ISSN 1001-5868
CODEN BAGUE5

在线投稿 阅读

半导体光电

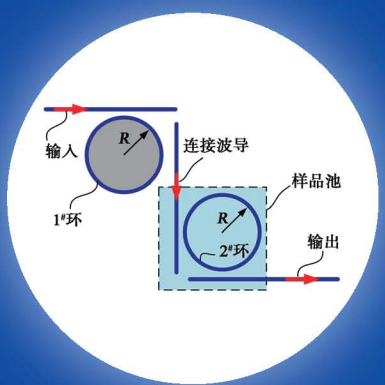
SEMICONDUCTOR OPTOELECTRONICS

4
2020
第41卷

中文核心期刊　Scopus数据库来源期刊　RCCSE中国核心学术期刊（A）

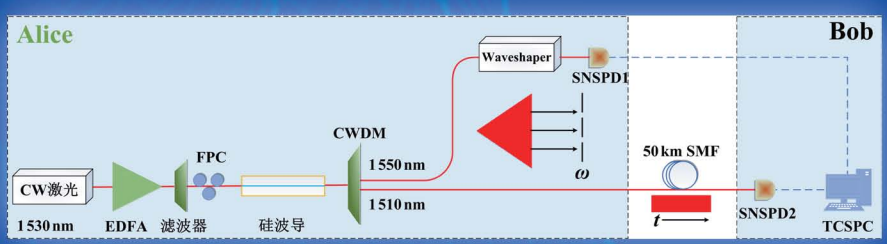
本期导读

○全光纤型侧向OCT探针的设计与鲁棒性分析
○星载高灵敏度平衡光电探测器研究
○高光谱成像用高速CMOS图像传感器设计
○预电离效应对ArF准分子激光特性的影响分析
○微波光子链路中的附加相位噪声分析
○基于弱光栅阵列应变传感的驼峰溜放监测方法研究
○基于互信息的紫外成像仪中图像配准研究



基于硅基微环谐振器的折射率传感研究综述

介绍了硅基微环谐振器的折射率传感探测原理，然后依据探测原理分类梳理了硅基微环折射率传感的最新研究进展，并分析总结了基于不同原理的探测传感的优缺点，最后讨论了现阶段硅基微环谐振器在折射率传感中存在的问题和未来的发展方向。



面向长距离量子通信的双光子关联成像技术

对已有量子时域关联成像方案进行了较大的改进，利用可编程滤波器数字设定待成像信息，进而实现了二维图像信息的自动化实时传送。实验结果表明，改进方案的成像质量和速度均有显著改善。

ISSN 1001-5868
9 771001 586206 08>

重庆光电技术研究所　主办
Chongqing Optoelectronics Research Institute

半导体光电
BANDAOTI GUANGDIAN
双月刊·1976年创刊·国内外公开发行
2020年8月第41卷第4期(总第210期)

目　　次

※动态综述※

基于硅基微环谐振器的折射率传感研究综述 …… 徐亚萌，孔　梅(455)
光子晶体光纤的设计与应用研究综述 …… 赵丽娟，梁若愚，徐志钮(464)

※光电器件※

全光纤型侧向OCT探针的设计与鲁棒性分析 …… 马　婧，王颖奇，胡运韬，等(472)
一种基于双模干涉的光纤折射率传感器 …… 王　钧，杨　树(476)
星载高灵敏度平衡光电探测器研究 …… 崔大健，周　浪，奚水清，等(480)
浴铜灵有机分子材料对钙钛矿薄膜表面的钝化作用 …… 宋　奇，梁春军，何志群(485)
高光谱成像用高速CMOS图像传感器设计 …… 冯国旭，刘昌举，刘戈扬，等(489)
菲涅耳透镜下多结电池表面局部高辐射功率对短路电流的影响 …… 江景祥，舒碧芬，梁齐兵，等(494)
半导体激光器温度调谐波长扫描技术 …… 柯文雄，江　毅(500)
基于随机光栅的可调谐随机光纤激光器 …… 沈成荣，董新永(505)

※材料、结构及工艺※

湿法黑硅工艺中银残留对太阳电池性能的影响 …… 黄钧林，范维涛，张　鑫，等(509)
IC基板传输机器人末端执行器结构拓扑优化设计 …… 祝锡晶，郭　宵，林知微，等(513)
预电离效应对ArF准分子激光特性的影响分析 …… 苏　丹，赵江山，王　倩(517)
介电常数近零模式与表面声子极化模式的耦合杂化研究 …… 杨明莉，陈溢杭(523)
氧化镓生长模拟中的流场与反应参数优化研究 …… 戴必胜，陈　琳，陶志阔，等(527)
偏振发光的钙钛矿纳米线薄膜 …… 王健越，魏雅平，邱龙臻，等(531)
微针鳍散热器结构参数模拟及优化 …… 王志敏，叶贵根，薛世峰，等(535)

※光电技术及应用※

面向长距离量子通信的双光子关联成像技术 …… 王登峰，姚　鑫，焦仲科，等(542)
融合特征法与直接法的RGB-D稠密视觉SLAM算法 …… 胡章芳，张　杰，程　亮(548)
微波光子链路中的附加相位噪声分析 …… 瞿鹏飞，肖永川，庾财斌，等(555)
DFB激光器饱和吸收稳频的精密温控系统设计 …… 张　玮，李兆隆，郭　平，等(560)
基于弱光栅阵列应变传感的驼峰溜放监测方法研究 …… 甘维兵，艾凌云，涂世宇，等(566)
基于ROI的高精度红外全景拼接算法研究 …… 代少升，姚　俐(572)
面向自动化装配过程的光纤传感调校系统 …… 孟祥秋，于金召，王　杰(578)
一种基于卷积神经网络的人脸识别改进算法 …… 王彦秋，冯英伟(582)
基于激光检测的无人机探测系统与实验 …… 陈　实，杨　帆，王梓任(587)
基于星座图对射频指纹识别方法的研究 …… 袁建国，赵富强，覃陆祯玥，等(592)
基于互信息的紫外成像仪中图像配准研究 …… 侯思祖，陈　宇，刘雅婷(598)

SEMICONDUCTOR OPTOELECTRONICS

Vol. 41 **No.** 4 **August** 2020(**Bimonthly**) (**Total No.** 210) (**Started in** 1976)

CONTENTS

Research Progresses of Refractive Index Sensing Based on Silicon-on-Insulator Microring Resonators …… XU Yameng, KONG Mei(455)

Review of Designs and Applications of Photonic Crystal Fiber …… ZHAO Lijuan, LIANG Ruoyu, XU Zhiniu(464)

Design and Robust Analysis of All-fiber-type Side-viewing OCT Probe …… MA Jing, WANG Yingqi, HU Yuntao, et al.(472)

An Optical Fiber Refractive Index Sensor Based on Double-mode Interference …… WANG Jun, YANG Shu(476)

Research on High Sensitivity Balanced Photodetector for Space Application …… CUI Dajian, ZHOU Lang, XI Shuiqing, et al.(480)

Surface Passivation of Perovskite Films by Bathocuproine Molecule …… SONG Qi, LIANG Chunjun, HE Zhiqun(485)

Design of High-speed CMOS Image Sensor for Hyperspectral Imaging …… FENG Guoxu, LIU Changju, LIU Geyang, et al.(489)

Influence of Local High Radiation on Short-circuit Current of Multi-junction Solar Cell under Fresnel Lens …… JIANG Jingxiang, SHU Bifen, LIANG Qibing, et al.(494)

Temperature-tuning Based Wavelength Scanning Technology for Semiconductor Lasers …… KE Wenxiong, JIANG Yi(500)

Tunable Random Fiber Laser Based on Random Grating …… SHEN Chengrong, DONG Xinyong(505)

Effect of Silver Residue in MACE Process on the Performance of Solar Cells …… HUANG Junlin, FAN Weitao, ZHANG Xin, et al.(509)

Topology Optimization Design of End-actuator of IC Substrate Transmission Robot …… ZHU Xijing, GUO Xiao, LIN Zhiwei, et al.(513)

Effects of Pre-ionization on Properties of ArF Excimer Laser …… SU Dan, ZHAO Jiangshan, WANG Qian(517)

Study on the Coupling Hybrid of Dielectric Constant Near Zero Mode and Surface Phonon Polarization Mode …… YANG Mingli, CHEN Yihang(523)

Optimization of Flow Field and Reaction Parameters in the Growth Simulation of Gallium Oxide …… DAI Bisheng, CHEN Lin, TAO Zhikuo, et al.(527)

The Perovskite Nanowire Films with Polarized Luminescence …… WANG Jianyue, WEI Yaping, QIU Longzhen, et al.(531)

Simulation and Optimization of Structural Parameters of the Micro Pin-Fin Radiator …… WANG Zhimin, YE Guigen, XUE Shifeng, et al.(535)

Two-photon Correlation Imaging Technique towards Long-distance Quantum Communications …… WANG Dengfeng, YAO Xin, JIAO Zhongke, et al.(542)

RGB-D Dense Visual SLAM Algorithm Combining Feature Method and Direct Method …… HU Zhangfang, ZHANG Jie, CHENG Liang(548)

Analysis of Addictive Phase Noise in Microwave-Photonic Links with External Modulation …… QU Pengfei, XIAO Yongchuan, YU Caibin, et al.(555)

Design of Precise Temperature Control System for Saturated Absorption Frequency Stabilization of DFB Laser …… ZHANG Wei, LI Zhaolong, GUO Ping, et al.(560)

Research on New Method of Track Occupancy Detection Based on Strain Sensing of Weak Fiber Bragg Grating Array …… GAN Weibing, AI Lingyun, TU Shiyu, et al.(566)

Research on The method of Infrared Panoramic Image Mosaic Based on ROI …… DAI Shaosheng, YAO Li(572)

Optical Fiber Sensor Adjustment System for Automated Assembly Process …… MENG Xiangqiu, YU Jinzhao, WANG Jie(578)

An Improved Face Recognition Algorithm Based on Convolutional Neural Network …… WANG Yanqiu, FENG Yingwei(582)

UAV Detection System and Experiment Based on Laser Detection …… CHEN Shi, YANG Fan, WANG Ziren(587)

Research on the Radio Frequency Fingerprint Identification Method Based on the Constellation Diagram …… YUAN Jianguo, ZHAO Fuqiang, QINLU Zhenyue, et al.(592)

Image Registration in Ultraviolet Imager Based on Mutual Information …… HOU Sizu, CHEN Yu, LIU Yating(598)

动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.001

基于硅基微环谐振器的折射率传感研究综述

徐亚萌，孔　梅*

（长春理工大学 理学院 光电信息科学与技术系，长春 130022）

摘　要： 片上折射率传感在安全检查、环境监测、健康诊断和食品监督等领域有着广阔的应用前景，基于硅基微环谐振器的折射率传感器具有微型化、集成化等优点，已成为当前研究的热点。文章首先对硅基微环谐振器的折射率传感探测原理进行了介绍，然后依据探测原理分类梳理了国内外硅基微环折射率传感的最新研究进展，并分析总结了不同传感探测原理的优缺点，最后讨论了现阶段硅基微环谐振器在折射率传感中存在的问题和未来的发展方向。

关键词： 微环谐振器；波导器件；折射率传感；Fano 谐振；包络谱传感

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0455－09

Research Progresses of Refractive Index Sensing Based on Silicon-on-Insulator Microring Resonators

XU Yameng，KONG Mei

（Department of Information Science and Technology，School of Science，Changchun University of Science and Technology，Changchun 130022，CHN）

Abstract： On-chip refractive index sensing has broad application prospects in the fields of safety inspection，environmental monitoring，health diagnosis，food supervision，etc. Currently，the microring resonator refractive index sensor based on silicon-on-insulator platform has become a research hot spot due to its capacities on miniaturization and integration. In this paper，its principles are introduced firstly，and then，the latest research progresses in and abroad are sorted out according to the principles of detection，and also the advantages and disadvantages are analyzed and summarized simultaneously. Finally，the existing problems and future development trends of refractive index sensing based on silicon-on-insulator microring resonators are discussed.

Key words： microring resonator；waveguide devices；refractive index sensing；Fano resonance；envelope spectrum sensing

0　引言

传感技术作为推动国家乃至世界信息化产业进步的重要标志，在军事反恐[1]、环境监测[2]、医疗保健[3]、食品安全[4-5]等领域有着巨大的应用前景。微型化和集成化的片上传感系统已经成为未来传感技术的发展趋势。硅基器件具有结构紧凑、对通信波段的光透明，且加工工艺与现有微电子工艺相兼容等优势。因此，作为片上传感系统中关键器件的理想候选，硅基传感器件受到了广泛关注。

周围环境物质的折射率是十分关键的传感监测参量，可以直接或间接地反映周围环境物质的性质和状态。折射率传感即利用折射率来监测周围环境物质的变化。传感灵敏度和可探测范围是衡量折射率传感性能的重要指标，直接反映了可被有效探测的物质折射率的变化精度和范围。在提高传感灵敏度和拓宽可探测范围的核心目标指引下，围绕硅基折射率传感开展的研究工作不断涌现。在众多硅基器件中，微环谐振器[6]的结构简单、紧凑，目前硅基

收稿日期：2020－04－24.

基金项目：国家自然科学基金项目(61905022).

* **通信作者：**孔　梅　**E-mail：** kongmei@cust.edu.cn

折射率传感器件的高灵敏度和宽可探测范围均基于硅基微环谐振器实现。

然而，用于折射率传感的微环谐振器也面临高传感灵敏度和宽可探测范围不可兼得的发展瓶颈。例如，已有报道实测微环谐振器传感灵敏度达 10^4 nm/RIU(Refractive Index Unit)量级，但高传感灵敏度只在某一折射率附近出现且可探测范围仅为 10^{-3} RIU 量级[6]。也有研究报道将硅基折射率传感器件的可探测范围拓宽至 1 RIU，但此时传感灵敏度下降为 10^2 nm/RIU 量级[7]。这在实际应用中会带来一些问题。对于溶液和气体等待测物质来说，折射率只与待测物质的浓度或表面密度有关，探测信号不会随待测物质体积的减小而减弱，这使得折射率传感适用于微量物质的探测。当折射率传感应用于微量物质探测时，物质的折射率变化可能非常微小，需要提高器件传感灵敏度以提升其探测物质微量变化的能力。但是，相同物质在不同浓度之间的折射率差也较大，此时需要拓宽可探测范围。以石油为例，其折射率常被用来检验油品质量，但其折射率与产地、加工过程和油品组成等均有关系，如产自羊三木和欢喜岭的石油，经过相同加工过程，折射率差可小至 10^{-4} RIU 量级，而同为大庆产的石油，经过不同的加工过程，折射率差可达 10^{-1} RIU 量级。仅有高灵敏度或仅有宽可探测范围的折射率传感器已经不能满足此类紧系国家重大需求的应用要求。综上所述，硅基微环传感器是最有前景的集成型折射率传感器件之一，研究其传感灵敏度和可探测范围的同时提升具有十分重要的意义。

1 微环谐振器的折射率传感原理

典型的全通型微环谐振器的分析模型如图 1 所示。全通型微环谐振器可看成由一段弯曲波导和一个耦合器组成，耦合器的传输矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_{t1} \\ E_{t2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & \kappa \\ -\kappa^* & t^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i1} \\ E_{i2} \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中，E_{i1}，E_{i2}，E_{t1} 和 E_{t2} 表示各个位置的光场振幅，t 为振幅自耦合系数，κ 为振幅交叉耦合系数，假设耦合区无损耗，则它们满足以下关系：

$$|t^2|+|\kappa^2|=1 \tag{2}$$

把沿着环波导传输的各种光损耗并入环的衰减因子，则光在微环中传输一周后光场振幅关系为

$$E_{i2}=\alpha e^{j\theta}E_{t2} \tag{3}$$

其中，α 为环程振幅传输因子，$\theta=2\pi n_{\text{eff}}L/\lambda_0$ 为绕环一周的相位改变，n_{eff} 为微环波导的有效折射率，$L=2\pi R$ 为微环周长，R 为微环半径，λ_0 是真空中的光波长。

由式(1)～(3)可得微环的传输函数为

$$T=\left|\frac{E_{t1}}{E_{i1}}\right|^2=\frac{t^2+\alpha^2-2\alpha t\cos\theta}{1+\alpha^2t^2-2\alpha t\cos\theta} \tag{4}$$

根据振幅自耦合系数 t 和环程振幅传输因子 α 的关系，可以将微环的耦合状态分为欠耦合态($t>\alpha$)、临界耦合态($t=\alpha$)和过耦合态($t<\alpha$)。满足临界耦合条件时，谐振峰处的光场透过率为零，微环消光比达到最大。

对于硅基微环谐振器来说，当光在其中传输时，会有倏逝场存在于微环波导芯外，倏逝场能够感应波导外界物质的折射率变化，该变化可被转化为可测量的光学特征参数，即通过监测谐振波长漂移量或特定波长处的强度变化量均可实现传感功能，相应的传感灵敏度表达式分别为

$$S_\lambda=\Delta\lambda/\Delta n \tag{5}$$

$$S_I=\Delta I/\Delta n \tag{6}$$

其中，$\Delta\lambda$ 为波长漂移量，ΔI 为强度变化量，Δn 为待测物质折射率变化量。根据选取的不同监测参量，硅基微环的折射率传感原理主要分为单波长探测、包络谱波长探测、单峰强度探测和包络谱强度探测。

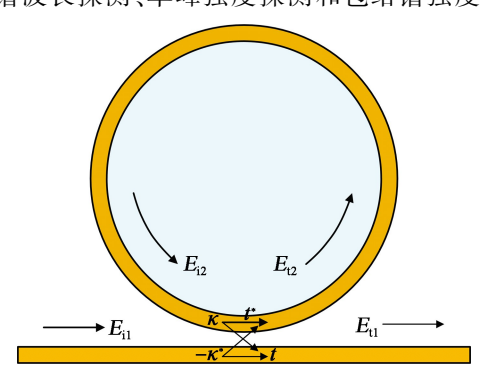


图 1 全通型微环谐振器分析模型

1.1 单波长探测传感原理

对于硅基微环来说，当忽略振幅自耦合系数和环程振幅传输因子的波长相关性时，微环直通端传输谱线为谐振深度相等的均匀梳状谱，如图 2 中实线所示。当微环波导外界待测物质的折射率发生变化时，振幅自耦合系数和环程振幅传输因子的变化非常小，而传输模式的有效折射率发生改变，导致谐振波长发生漂移，即图 2 中谱线从实线漂移至虚线位置，通过监测单个谐振波长的漂移量实现传感功

能。由上述原理可知，基于此单波长探测传感原理的可探测范围受限于微环的自由光谱范围。

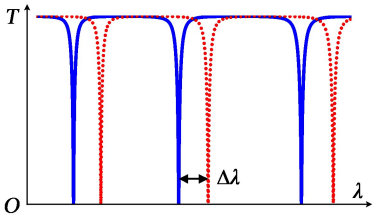


图 2　单波长探测传感原理示意图

1.2　包络谱波长探测传感原理

从包络谱的形成机制来看，包络谱波长探测传感原理可分为游标法和色散法。

(1)游标法。游标法是借助双微环或多微环级联结构，利用参考环和传感环谱线中密集交错谐振峰的游标效应得到包络谱。图 3 为游标法包络谱波长探测传感原理示意图[8]，图 3(a)为参考环的谐振谱线，图 3(b)为传感环的谐振谱线，参考环与传感环的谐振谱线密集交错，使整体结构的谐振谱线为图 3(c)中实线所示包络谱型。当外界待测物质发生变化，参考环的谐振谱线不受影响，传感环的谐振谱线发生漂移，使得图 3(c)中整体结构的包络谱从实线漂移至虚线位置，通过监测包络谱波长漂移量实现传感功能。由上述原理可知，图 3(c)中包络谱的波长漂移量明显大于图 3(b)中所示单个波长的漂移量，同时探测范围不再受限于单个微环的自由光谱范围，而是整体结构的准自由光谱范围，因此，传感灵敏度和可探测范围均有大幅度提升。

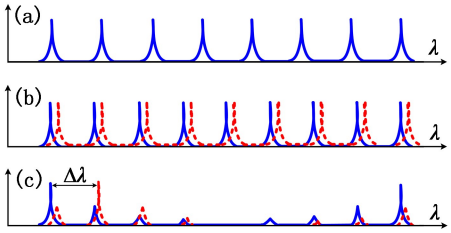
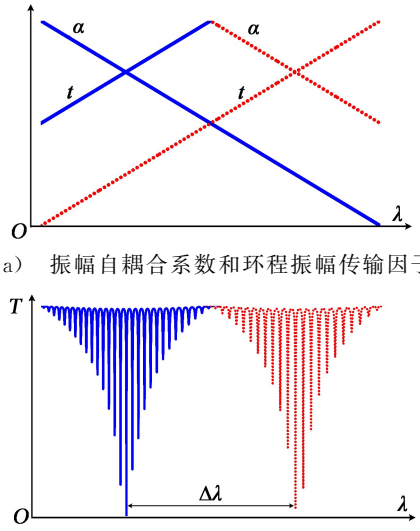


图 3　游标法包络谱波长探测传感原理示意图。(a) 参考环的谐振谱线；(b) 传感环的谐振谱线；(c) 整体结构的谐振谱线。

(2)色散法。色散法是利用微环的损耗特性(环程振幅传输因子 α)和耦合特性(振幅自耦合系数 t)的波长相关性，即微环临界耦合条件的波长相关性形成单个多峰包络谱。当外界折射率变化时，满足临界耦合条件的波长位置亦发生变化，通过监测波长变化量实现传感功能。当振幅自耦合系数 t 和环程振幅传输因子 α 如图 4(a)实线所示(这里 t 和 α 随波长的变化是从数学角度假设的，仅为了更明了地说明结论)，微环传输谱线为图 4(b)中实线所示的多峰值包络谱。当微环波导外界待测物质的折射率发生变化，振幅自耦合系数 t 和环程振幅传输因子 α 的色散特性使微环临界耦合波长发生较大变化。因此，图 4(b)中实线包络谱线将漂移至虚线谱线位置，由此可见包络谱的波长漂移量远大于单峰的波长漂移量，传感灵敏度得以提高，可探测范围也不再受限于微环本身自由光谱范围。



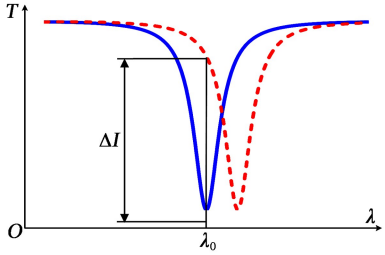
(a)　振幅自耦合系数和环程振幅传输因子

(b)　微环直通端传输谱线

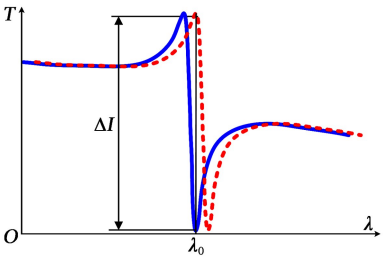
图 4　色散法包络谱波长探测传感原理图

1.3　单峰强度探测传感原理

一般来说，微环谐振器的传输谱线是图 5(a)所示关于谐振波长对称的 Lorentz 型，而引入离散态和连续态的耦合后，可得到如图 5(b)所示的 Fano 线型[9]。相比于 Lorentz 线型，Fano 线型具有明显的不对称特征，透射系数在很小的波长范围内就可以从最大变为最小。固定探测波长为 λ_0，当外界传感物质的折射率发生变化时，谐振峰从图中实线位置漂移至图中虚线位置，则探测波长处的光场强度发生的变化为 ΔI，通过监测该波长处强度变化实现传感功能。由于 Fano 线型比 Lorentz 线型更陡峭，



(a)　Lorentz 线型



(b) Fano 线型

图 5 单峰强度探测传感原理示意图

可探测范围变小,但灵敏度明显更高,一般用于极微小折射率变化的探测。

1.4 包络谱强度探测传感原理

该方案中,包络谱的形成机制与游标法包络谱波长探测传感原理相同,借助于微环级联结构,利用参考环和传感环谱线中密集交错谐振峰的游标效应得到包络谱。包络谱强度探测传感原理如图 6 所示[10],当外界待测物质发生变化时,包络谱线从图中实线位置漂移至虚线位置,则点线所示的光源光谱和传输谱的重叠程度从最大变化到最小,导致输出功率变化,通过监测输出功率变化实现传感功能。

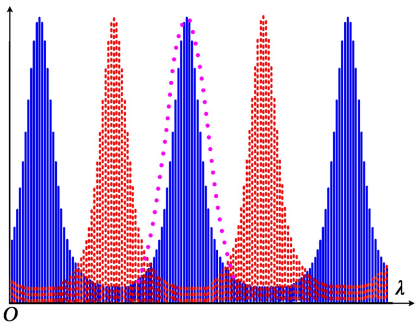


图 6 包络谱强度探测传感原理示意图

2 基于硅基微环谐振器的折射率传感研究进展

2.1 微环单波长探测传感的研究进展

在前期国内外的研究中,基于硅基微环谐振器的折射率传感中的波导结构较单一,如条波导微环谐振器[11-13]、槽波导微环谐振器[14-19]和一维光子晶体微环谐振器[20-25]等。随着研究的深入,研究者们发现单一结构传感器的灵敏度受限,于是研究方向开始向复合结构发展,即将单一结构复合在一起构成传感器,如含槽一维光子晶体微环[26-27]、亚波长光栅微环[28-33]等。

2.1.1 条波导微环

条波导微环谐振器结构简单,是最常见的微环结构之一,由于条波导微环中导模存在倏逝场,可与待测物质相互作用,使其成为天然的传感器件。然而,硅条波导的高模场约束限制了微环谐振器的响应。从硅基微环谐振器的传感机理来看,提高其传感灵敏度的关键在于让光场与待测物质充分接触,增强光与待测物质的相互作用,以提高其对外界折射率变化的敏感度。因此,研究者们提出让微环工作在 TM 模式[11]或将波导层减薄[12],前者在波导与待测物质界面处存在强场;而后者的倏逝场具有较大的穿透深度,借以增强光与待测物质的相互作用,实现了传感灵敏度的小幅度提升。另外,有研究小组提出利用悬浮型条波导微环结构实现折射率传感功能[13],如图 7(a)所示。然而,多种条波导微环方案中的灵敏度并不令人满意,因为它们仍然是基于条形波导的倏逝场和待测物质之间的相互作用。

2.1.2 槽波导微环

槽波导,即为高折射率介质间存在较窄的低折射率介质的波导。由于法向电场分量的不连续性可使电场主要集中于低折射率介质区,如果低折射率介质区填充为待测物质,可有效增强光场与待测物质的相互作用。因此,随着槽波导研究的广泛开展,光场局域在槽区的槽波导微环谐振器[14-17]被提出,如图 7(b)所示。随后更有双槽微环[18](如图 7(c)所示)和多槽微环结构[23]被提出,此时待测物质成为波导芯的一部分,光场与待测物质相互作用明显增强,使得此类微环的折射率传感灵敏度提升至 10^2 nm/RIU 量级。

2.1.3 一维光子晶体微环

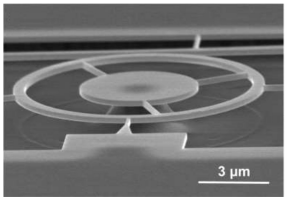
近年来,很多研究小组将一维光子晶体波导引入硅基微环中,形成一维光子晶体微环谐振器(PhC-MRR)[20-25],如图 7(d)所示。在一维光子晶体微环中,被填入光子晶体空气孔中的待测物质成为波导芯的一部分,慢光效应也有利于光与待测物质的相互作用,这使得一维光子晶体微环在传感应用中具有很大的吸引力。一般情况下,基于一维光子晶体微环的传感可被分为基于介质模式的传感[22-24]和基于空气模式的传感[24-25]。介质模式集中在高折射率介质区,不利于场与待测物质的相互作用;而空气模式集中在低折射率区域(待测物质区),有利于场与待测物质之间的相互作用,在传感灵敏度上更具竞争力。

空气模式和待测物质的空间重叠为它们的相互作用提供了强大的空域约束,因此,继续改善一维光

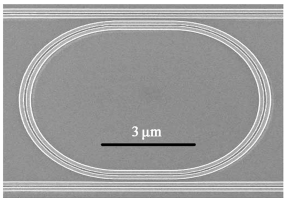
子晶体微环中空气模式的时域约束(即光子腔寿命，以品质因子 Q 衡量)成为另一个研究热点。目前，大部分一维光子晶体微环谐振器[20-25]均基于圆孔，但光在圆孔中不能得到足够的集中，因此品质因子较低。环半径为 16 μm 的一维光子晶体微环中空气模式的品质因数可达 1.46×10^4[25]，但随着微环半径的减小，品质因子将劣化。另有研究小组在微环半径为 4 μm 的一维光子晶体微环中得到了品质因子为 10^4 的空气模式[24]，但是该空气孔半径较小且为浅刻蚀，所以灵敏度仅为 100 nm/RIU[24]。本文提出了蝴蝶结型一维光子晶体微环，如图 7(i)所示，可将光场有效地局域在蝴蝶结孔尖端，实现的空气模式品质因子与上述工作实现的模式品质因子相近，但传感灵敏度提高了一倍。

2.1.4　复合结构微环

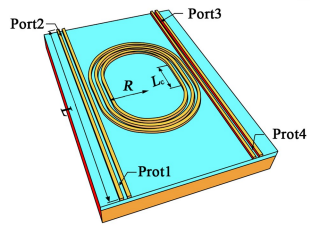
随着集成光学传感器由单一结构向复合结构发展，多种新型的复合结构微环被提出，如含槽一维光子晶体微环[26-27]、亚波长光栅微环[28-33]等。含槽一维光子晶体微环[26-27]可以利用槽波导的场局域效应、光子晶体的慢光效应和微环谐振器的谐振效应等共同增强光与待测物质的相互作用。亚波长光栅微环[28-33]可将光场集中在折射率较低的待测物质区，增强光与待测物质的相互作用，进一步提高传感灵敏度。另外，当亚波长光栅工作波长略大于其布拉格反射波长时，传播模式的群折射率较大，即存在慢光效应，也有利于增强光与待测物质的相互作用，进一步提高传感灵敏度。现有研究工作有基于梯形柱亚波长光栅微环[29]、悬浮亚波长光栅微环[31]和多层亚波长光栅微环[32]等结构的折射率传感，具体结构见图 7(f)～(h)。



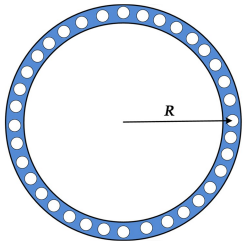
(a)　悬浮条波导微环[17]



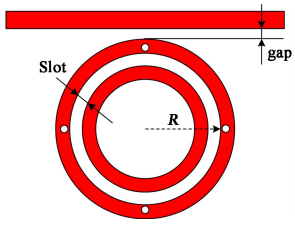
(b)　单槽波导微环[19]



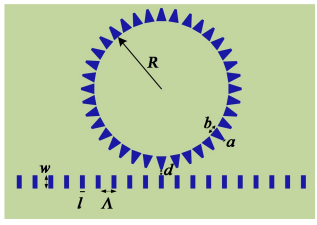
(c)　双槽波导微环[18]



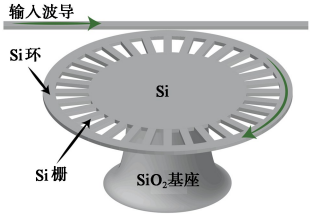
(d)　一维光子晶体微环[20]



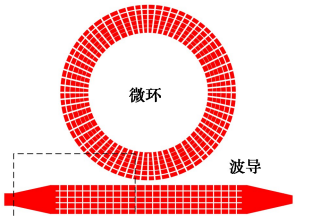
(e)　含槽一维光子晶体微环[27]



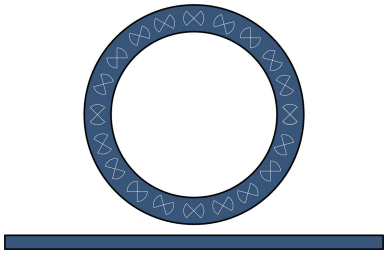
(f)　亚波长光栅微环[29]



(g)　悬浮亚波长光栅微环[31]



(h)　多层亚波长光栅微环[32]



(i)　蝴蝶结型一维光子晶体微环

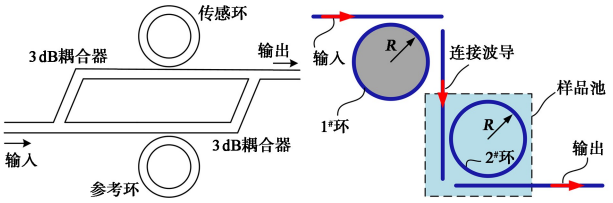
图 7　各类微环折射率传感器的结构示意图

2.2　微环包络谱波长探测传感的研究进展

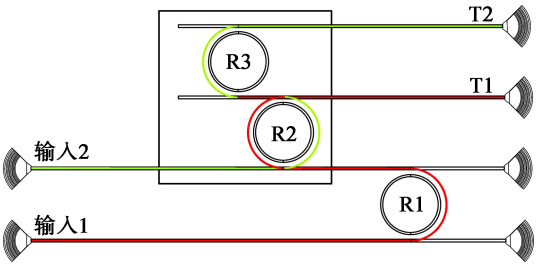
2.2.1　基于游标法的研究进展

针对游标法的理论研究，研究者于 2009 年提出了利用马赫-曾德尔干涉仪双臂耦合微环[34]或双微环级联[8]实现包络谱探测传感，均证明传感灵敏度可达 10^5 nm/RIU 量级。针对游标法的实验研究，从 2010 年至 2019 年，研究人员先后利用双微环级联[35]、双悬浮硅纳米线波导微环级联[36]、双脊形硅波导微环级联[37-38]、三个微环级联[39]、微环级联马赫-曾德尔干涉仪(MZI)[40]等方案实现了包络谱探测传感，如图 8 所示。然而，这些报道的实测传感灵敏度均低于理论预期，这是由于游标法在实际应用中还存在一些发展瓶颈。一方面，在理论上灵敏度受限于级联微环自由光谱范围之差，需要精确控制参考环和传感环的半径之差才能实现理论设计的自由光谱范围之差，以保证传感灵敏度。但是游标法中每个微环的微小工艺误差都会影响级联微环的整体效果，现有工艺难以实现理论设计效果。此外，目前游标法基于双悬浮硅纳米线波导微环级联、双脊形硅波导微环级联、三个微环级联等复杂结构，制备工艺复杂。另一方面，基于游标法传感的可探测范围不再受限于微环的自由光谱范围，而是受限于包

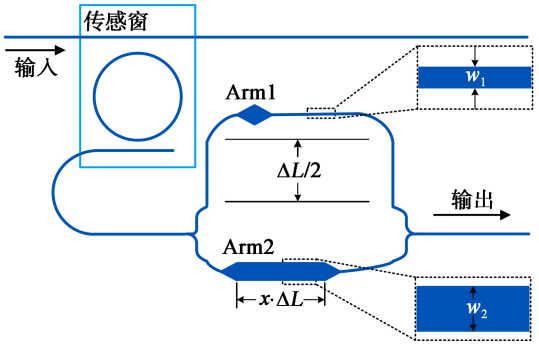
络谱的准自由光谱范围[41]，当待测物质的折射率变化较大时，包络谱的漂移量就会大于其自由光谱范围[42-43]，无法确定实际漂移量，游标法测量将失效，目前游标法探测传感中可探测范围的典型值在 10^{-3}～10^{-2} RIU 量级[37,39,41]。



(a) MZI 臂耦合微环[38] (b) 双环级联[8]



(c) 三环级联[39]

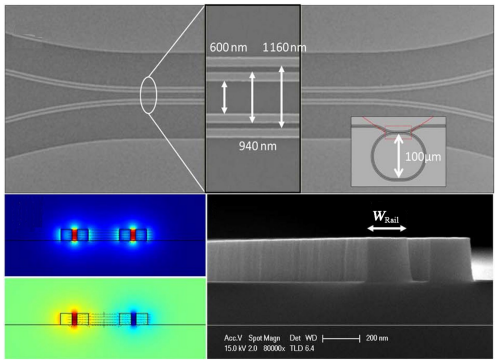


(d) 微环级联 MZI[40]

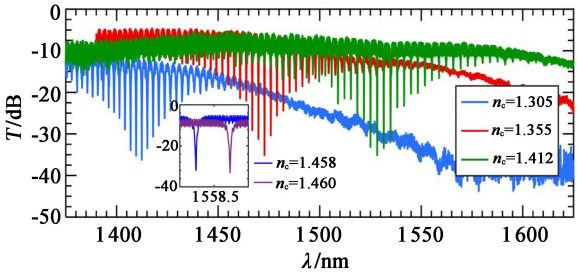
图 8 基于游标法包络谱波长探测原理的结构图

2.2.2 基于色散法的研究进展

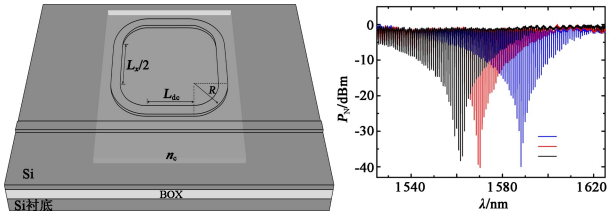
2016 年，法国巴黎第十一大学的研究小组利用单个槽波导微环的包络谱探测传感[44]，如图 9(a)～(b)，实现了 10^3 nm/RIU 量级的灵敏度，但由于槽波导微环损耗随外界折射率变化过快，其可探测范围小于 0.2 RIU。2017 年，印度理工学院马德拉斯分校的研究小组提出的基于单个条波导微环的包络谱探测传感[7]方案将可探测范围提升至 1 RIU，但由于条波导对光的限制作用较强，波导损耗很小且几乎不随外界待测物质的折射率变化，临界耦合条件的波长位置调节仅依靠耦合特性随外界待测物质折射率的变化，因此传感灵敏度仅为 10^2 nm/RIU 量级，且该结构尺寸较大，单个微环面积达 0.38 mm^2，远大于槽波导微环谐振器的面积(0.003 mm^2)，不利于器件的微型化和大规模集成，如图 9(c)所示。



(a) 槽波导微环



(b) 槽波导微环的包络谱传感图[44]



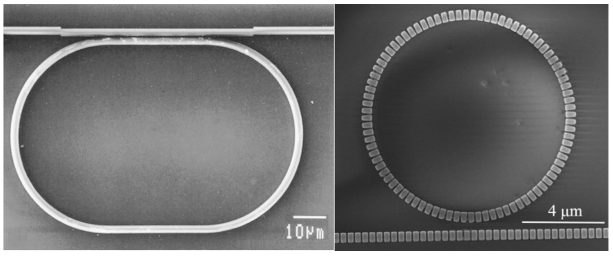
(c) 条波导微环及其包络谱传感图[7]

图 9 基于色散法包络谱探测的两种包络谱传感图

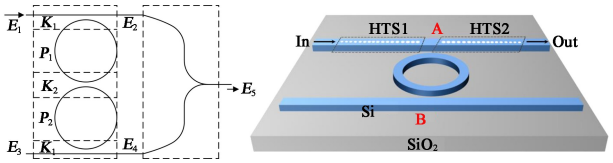
2.3 微环单峰强度探测传感的研究进展

微环谐振器的谐振线型是关于谐振波长对称的 Lorentz 型，可通过提高微环谐振腔的品质因子使谐振谱线更加尖锐，进而提高单峰强度探测的传感灵敏度。相比于 Lorentz 线型，Fano 线型更陡峭，作为单峰强度探测传感器的灵敏度更高。Fano 线型的产生需要离散态与连续态的耦合。一般而言，微环谐振器的谐振谱线为离散态，法布里-珀罗(FP)腔的谐振谱线提供连续态。2003 年，美国密歇根大学的研究小组提出将微环谐振器的总线波导错位刻蚀形成 FP 腔，以产生 Fano 谐振用于传感[45]，如图 10(a)所示。自此之后，基于微环谐振器 Fano 谐振的折射率传感工作受到了明显的关注。2010 年，北京大学的研究小组提出利用微环总线波导的端面构成 FP 腔，利用 Fano 谐振在理论上实现了传感功能[46]。随后，该研究小组又提出利用双环级

联[47]产生 Fano 谐振用于折射率传感。2017 年，华中科技大学和吉林大学的合作研究小组利用梯形亚波长光栅微环和条形亚波长光栅 FP 腔耦合，如图 10(c)所示，实验上实现了基于 Fano 谐振的复折射率传感[48]。2018 年，电子科技大学的研究小组利用微环谐振器和一维光子晶体腔耦合产生 Fano 谐振，如图 10(d)所示，强度检测灵敏度为 1.76×10^4 dB/RIU[49]。



(a)　微环与错位 FP 腔耦合[45]　(c)　亚波长光栅微环和 FP 腔耦合[48]



(b)　双环级联耦合[47]　(d)　微环与光子晶体腔耦合[49]

图 10　基于 Fano 谐振强度探测的四种耦合结构

2.4　微环包络谱强度探测传感的研究进展

随着游标法包络谱波长探测的逐步发展，基于游标法包络谱强度探测的折射率传感方案被报道。该方案主要由浙江大学何建军小组提出并完成。前期工作主要集中于使用双环级联形成包络谱进行强度探测[6,10,41,50]，借鉴条波导微环中的 TM 模式比 TE 模式更易与待测物质相互作用的方案，证明了基于 TM 模式的包络谱强度探测传感的灵敏度明显高于 TE 模式的灵敏度。随后，该研究小组又提出了使用 MZI 级联微环方案实现包络谱强度探测传感[51]，传感灵敏度在 10^3 dB/RIU 量级。

综上所述，基于硅基微环谐振器的折射率传感的研究工作备受关注，为进一步明确目前的研究进展，将本文提及相关工作中的传感灵敏度和可探测范围列于表 1。通过对比可发现，对于波长探测传感而言，包络谱波长探测的传感灵敏度较单波长探测的传感灵敏度提升了 1～2 个数量级。此外，色散法包络谱波长探测传感中，可探测范围也有明显提升。对于强度探测而言，基于 Fano 线型强度探测的传感灵敏度比包络谱强度探测的传感灵敏度高 1 个数量级，但其可探测范围却明显小于后者，故仅适用于微小折射率变化的探测。

表 1　不同传感方案的传感灵敏度和可探测范围

波长探测		结构	S_λ/(nm/RIU)	$\Delta\lambda$/RIU
单波长探测		单环 TM 模式[11]	222	受限于微环 FSR
		单环薄硅层 TE 模式[12]	133	
		悬浮条波导微环[13]	310	
		单槽微环[14]	298	
		单槽微环[15]	490	
		* 双槽微环[18]	708	
		一维光子晶体微环[23]	248	
		一维光子晶体微环[24]	99.7	
		* 含槽一维光子晶体[27]	480.4	
		亚波长光栅微环 TE 模式[28]	490	
		亚波长光栅微环 TM 模式[30]	429.7	
		悬浮亚波长光栅[31]	503	
		多层亚波长光栅微环[32]	579.5	
		* 亚波长光栅微环[33]	627.8	
包络谱波长探测	游标法	* MZI 单臂耦合微环[34]	1.55×10^5	—
		* 双环级联[8]	2.91×10^5	# 0.000 34
		双环级联[6]	24 300	# 0.004
		双环级联[35]	2 169	—
		双悬浮硅纳米线波导微环级联[36]	4.6×10^5	8×10^{-5}
		双脊形硅波导微环级联[37]	1 300	0.011 5
		三环级联[39]	5 866	0.076
		单环与 MZI 级联[40]	3 552	—
		双环级联[41]	3 500	0.003 2
		双环级联[42]	3 000	—
		* 内光栅与槽波导微环[43]	559.5	—
	色散法	槽波导微环[44]	1 300	0.2
		条波导微环[7]	340	1
强度探测		结构	S_I/(dB/RIU)	$\Delta\lambda$/RIU
单峰强度探测		* 微环与光子晶体腔耦合[49]	1.76×10^4	受限于谱宽
包络谱强度探测		双环级联 TE 模式[10]	450	0.002
		双环级联[41]	2 500	0.032
		双环级联 TM 模式[6]	2 430	—
		双环级联[50]	1 579	—
		单环与 MZI 级联[51]	1 892	—

“*”表示理论研究。“#”表示求传感灵敏度所用折射率变化范围，非可探测范围。

3　总结及展望

单波长探测折射率传感灵敏度的提高主要依靠光与待测物质的相互作用增强实现，目前为 10^2 nm/RIU 量级，提高空间有限，可探测范围受限于微环的自由光谱范围；包络谱波长探测传感的灵敏度目前为 10^3 nm/RIU，理论值可达 10^5 nm/RIU 量级，可有效提高传感灵敏度，效果明显优于利用倏逝场增强光与待测物质相互作用的效果，成为大幅提高传感灵敏度的有效手段。在包络谱的探测传感中，游标法在理论上可达到的传感灵敏度较高，但是可探测范围受限且工艺复杂。色散法虽然可有效拓宽可探测范围，但是在现有方案中，受微环波导内在物理机制限制，高传感灵敏度与宽可探测范围不可兼得。

对于强度探测折射率传感来说，基于单峰 Fano

谐振的强度探测传感灵敏度可达 10^4 dB/RIU，且结构简单，但可探测范围较小。而基于包络谱强度探测的传感灵敏度为 10^3 dB/RIU，均基于多环级联结构，结构较复杂，且较高的传感灵敏度要求双环FSR相等，对加工工艺提出了较高要求。

综上所述，高传感灵敏度与宽可探测范围在目前方案中仍然不可兼得，但借鉴本文中综述的方案，可将光子晶体结构或亚波长光栅结构、TM模式工作等引入色散法包络谱波长探测方案中，有望同时实现高灵敏度和宽可探测范围。

参考文献：

[1] Orghici R, Lutzow P, Burgmeier J, et al. A microring resonator sensor for sensitive detection of 1, 3, 5-Trinitrotoluene (TNT)[J]. Sensors, 2010, 10(7): 6788-6795.

[2] Mi G, Horvath C, Van V. Silicon photonic dual-gas sensor for H_2 and CO_2 detection[J]. Opt. Express, 2017, 25(14): 16250-16259.

[3] Shi Sichao, Cheng Qing, Lin Rong, et al. Micro-ring sensor used in the diagnosis of gastric cancer[C]// Proc. SPIE Inter. Conf. on Optoelectronics and Microelectronics Technol. and Application, 2017: 102441K.

[4] Wang S, Ramachandran A, Ja S. Integrated microring resonator biosensors for monitoring cell growth and detection of toxic chemicals in water[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2009, 24(10): 3061-3066.

[5] Feng X, Zhang G, Chin L K, et al. Highly sensitive, label-free detection of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid using an optofluidic chip[J]. ACS Sensors, 2017, 2(7): 955-960.

[6] Jiang Xianxin, Ye Junjun, Zou Jun, et al. Cascaded silicon-on-insulator double-ring sensors operating in high-sensitivity transverse-magnetic mode[J]. Opt. Lett., 2013, 38(8): 1349-1351.

[7] Chandran S, Ramesh K, Das B K. Dispersion enhanced critically coupled ring resonator for wide range refractive index sensing[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron., 2017, 23(2): 424-432.

[8] Dai Daoxin. Highly sensitive digital optical sensor based on cascaded high-Q ring-resonators[J]. Opt. Express, 2009, 17(26): 23817-23822.

[9] Fan Shanhui. Sharp asymmetric line shapes in side-coupled waveguide-cavity systems[J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 80(6): 908-910.

[10] Jin Lei, Li Mingyu, He Jianjun. Optical waveguide double-ring sensor using intensity interrogation with a low-cost broadband source[J]. Opt. Lett., 2011, 36(7): 1128-1130.

[11] Hoste J W, Werquin S, Claes T, et al. Conformational analysis of proteins with a dual polarization silicon microring [J]. Opt. Express, 2014, 22(3): 2807-2820.

[12] Fard S T, Donzella V, Schmidt S A, et al. Performance of ultra-thin SOI-based resonators for sensing applications[J]. Opt. Express, 2014, 22(12): 14166-14179.

[13] Gaur G, Hu S, Mernaugh R L, et al. Label-free detection of herceptin using suspended silicon microring resonators[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2018, 275: 394-401.

[14] Robinson J T, Chen L, Lipson M. On-chip gas detection in silicon optical microcavities[J]. Opt. Express, 2008, 16: 14296-14301.

[15] Claes T, Molera J G, Vos K D, et al. Label-free biosensing with a slot-waveguide-based ring resonator in silicon on insulator[J]. IEEE Photonics J., 2009, 1(3): 197-204.

[16] Radjenovic B, Radmilovic-Radjenovic M. Excitation of confined modes in silicon slotted waveguides and microring resonators for sensing purposes[J]. IEEE Sensors J., 2014, 14(5): 1412-1417.

[17] Steglich P, Villringer C, Pulwer S, et al. Hybrid-waveguide ring resonator for biochemical sensing[J]. IEEE Sensors J., 2017, 17(15): 4781-4790.

[18] Yuan Guohui, Gao Liang, Chen Yuren, et al. Improvement of optical sensing performances of a double-slot-waveguide-based ring resonator sensor on silicon-on-insulator platform [J]. Optik, 2014, 125(2): 850-854.

[19] Kargar A, Chao C Y. Design and optimization of waveguide sensitivity in slot microring sensors[J]. J. of the Optical Society of America A, 2011, 28(4): 596-603.

[20] Mcgarvey-Lechable K, Bianucci P. Maximizing slow-light enhancement in one-dimensional photonic crystal ring resonators[J]. Opt. Express, 2014, 22(21): 26032-26041.

[21] Mcgarvey-Lechable K, Hamidfar T, Patel D, et al. Slow light in mass-produced, dispersion-engineered photonic crystal ring resonators[J]. Opt. Express, 2017, 25(4): 3916-3926.

[22] Lo S M, Hu S, Weiss S M, et al. Photonic crystal microring resonator based sensors[C]// Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2014: JTu4A.79.

[23] Lo S M, Hu S, Gaur G, et al. Photonic crystal microring resonator for label-free biosensing[J]. Opt. Express, 2017, 25(6): 7046-7054.

[24] Urbonas D, Balcytis A, Vaskevicius K, et al. Air and dielectric bands photonic crystal microring resonator for refractive index sensing[J]. Opt. Lett., 2016, 41(15): 3655-3658.

[25] Gao Ge, Zhang Yong, Zhang He, et al. Air-mode photonic crystal ring resonator on silicon-on-insulator[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 19999.

[26] Wang Xueping, Kong Mei, Xu Yameng. Slotted photonic crystal microring resonators[J]. Fiber & Integrated Optics, 2017, 36: 91-100.

[27] Wu Nishan, Xia Li. High-Q and high-sensitivity multi-hole

slot microring resonator and its sensing performance[J]. Physica Scripta, 2019, 94: 115512.

[28] Flueckiger J, Schmidt S, Donzella V, et al. Sub-wavelength grating for enhanced ring resonator biosensor[J]. Opt. Express, 2016, 24(14): 15672-15686.

[29] Yan Hai, Huang Lijun, Xu Xiaochuan, et al. Breaking the limitation of evanescent wave sensing with subwavelength grating waveguides[C]// Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2017: JTh3M. 3.

[30] Huang Lijun, Yan Hai, Xu Xiaochuan, et al. Improving the detection limit for on-chip photonic sensors based on subwavelength grating racetrack resonators[J]. Opt. Express, 2017, 25(9): 10527-10535.

[31] Yousuf S, Shahin M M, Gevorgyan H, et al. Suspended microring resonator sensor using internal sub-wavelength grating[C]// Adv. Photonics, 2015: SeS4C. 4.

[32] Luan E, Yun H, Laplatine L, et al. Enhanced sensitivity of sub-wavelength multi-box waveguide microring resonator label-free biosensor[J]. IEEE J. of Sel. Top. in Quantum Electronics, 2018, 25(3): 1-11.

[33] Wu Nishan, Xia Li. Side-mode suppressed filter based on an angular grating-subwavelength grating microring resonator with high flexibility in wavelength design[J]. Appl. Opt., 2019, 58(26): 7174-7180.

[34] Yi H, Citrin D S, Chen Y, et al. Dual-microring-resonator interference sensor[J]. Appl. Phys. Lett., 2009, 95: 191112.

[35] Claes T, Bogaerts W, Bienstman P. Experimental characterization of a silicon photonic biosensor consisting of two cascaded ring resonators based on the Vernier-effect and introduction of a curve fitting method for an improved detection limit[J]. Opt. Express, 2010, 18(22): 22747-22761.

[36] Hu Jing, Dai Daoxin. Cascaded-ring optical sensor with enhanced sensitivity by using suspended Si-nanowires[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2011, 23(13): 842-844.

[37] Jin Lei, Li Mingyu, He Jianjun. Highly-sensitive silicon-on-insulator sensor based on two cascaded micro-ring resonators with vernier effect[J]. Opt. Commun., 2011, 284: 156-159.

[38] Chen Yangqing, Yu Fang, Yang Chang, et al. Label-free biosensing using cascaded double-microring resonators integrated with microfluidic channels[J]. Opt. Commun., 2015, 344: 129-133.

[39] Liu Yong, Li Yang, Li Mingyu, et al. High-sensitivity and wide-range optical sensor based on three cascaded ring resonators[J]. Opt. Express, 2017, 25(2): 972-978.

[40] Zhang Yang, Zou Jun, Cao Ziwei, et al. Temperature-insensitive waveguide sensor using cascaded ring and Mach-Zehnder interferometer[J]. Opt. Lett., 2019, 44(2): 299-302.

[41] Jin Lei, Li Mingyu, He Jianjun. Analysis of wavelength and intensity interrogation methods in cascaded double-ring sensors[J]. J. of Lightwave Technol., 2012, 30(12): 1994-2002.

[42] Chang Y, Dong B, Ma Y, et al. Vernier effect-based tunable mid-infrared sensor using silicon-on-insulator cascaded rings [J]. Opt. Express, 2020, 28(5): 6251-6260.

[43] Gu Hongjun, Gong He, Wang Chunxue, et al. Compact inner-wall grating slot microring resonator for label-free sensing[J]. Sensors, 2019, 19: 5038.

[44] Zhang W, Serna S, Le R X, et al. Highly sensitive refractive index sensing by fast detuning the critical coupling condition of slot waveguide ring resonators[J]. Opt. Lett., 2016, 41(3): 532-535.

[45] Chao C Y, Guo L J. Biochemical sensors based on polymer microrings with sharp asymmetrical resonance[J]. Appl. Phys. Lett., 2003, 83(8): 1527-1529.

[46] Yi H, Citrin D S, Zhou Z. Highly sensitive silicon microring sensor with sharp asymmetrical resonance[J]. Opt. Express, 2010, 18(3): 2967-2972.

[47] Yi H, Citrin D S, Zhou Z. Highly sensitive athermal optical microring sensor based on intensity detection[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2011, 47(3): 354-358.

[48] Tu Zhengrui, Gao Dingshan, Zhang Meiling, et al. High-sensitivity complex refractive index sensing based on Fano resonance in the subwavelength grating waveguide micro-ring resonator[J]. Opt. Express, 2017, 25(17): 20911-20922.

[49] Peng Fangcao, Wang Zhuoran, Yuan Guohui, et al. High sensitivity refractive index sensing based on Fano resonances in a photonic crystal cavity coupled microring resonator[J]. IEEE Photonics J., 2018, 10(2): 6600808.

[50] Xie Zhenyi, Cao Ziwei, Liu Yong, et al. Highly-sensitive optical biosensor based on equal FSR cascaded microring resonator with intensity interrogation for detection of progesterone molecules[J]. Opt. Express, 2017, 25(26): 33193-33201.

[51] Zhu H, Yue Y, Wang Y, et al. High-sensitivity optical sensors based on cascaded reflective MZIs and microring resonators[J]. Opt. Express, 2017, 25(23): 28612-28618.

作者简介：

徐亚萌(1987—)，女，吉林人，2009 年本科毕业于华中科技大学，2014 年博士毕业于华中科技大学光学工程专业，现为讲师，主要研究方向为硅基微纳光学器件特性及其传感技术；

孔　梅(1967—)，女，吉林人，1990 年本科毕业于南开大学，1999 年博士毕业于浙江大学物理电子学专业，现为教授，博士生导师，主要研究方向为导波光学器件及微纳光学器件物理和应用、光学传感技术等。

动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.002

光子晶体光纤的设计与应用研究综述

赵丽娟，梁若愚，徐志钮*

（华北电力大学 电气与电子工程学院，河北 保定 071003）

摘 要： 光子晶体光纤具有较强的可设计性，一般通过改变光子晶体光纤包层中空气孔的大小、形状或者排列方式对光纤的传输特性进行调节，以此实现高双折射、高非线性、平坦色散及低限制性损耗等特性。光子晶体光纤的传输特性在不同领域中具有较大的应用价值，如分布式传感、飞秒激光器和气体传感器等。文章首先介绍了光子晶体光纤的结构特征以及与普通单模光纤的区别，在此基础上针对各种典型的光子晶体光纤结构分析了其色散和非线性等传输特性。详细介绍了基于光子晶体光纤的分布式光纤传感、飞秒激光器和气体传感器的传感机理以及达到的传感性能，并与非基于光子晶体光纤的传感器的传感性能进行了比较，验证了基于光子晶体光纤传感器的优异性能。最后对光子晶体光纤的发展及应用进行了总结与展望。

关键词： 光子晶体光纤；结构优化；分布式光纤传感；飞秒激光器；气体传感器

中图分类号： TN253 **文章编号：** 1001－5868(2020)04－0464－08

Review of Designs and Applications of Photonic Crystal Fiber

ZHAO Lijuan, LIANG Ruoyu, XU Zhiniu

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN)

Abstract: Photonic crystal fiber (PCF) can be designed flexibility. In general, the propagation properties of the PCF are adjusted by changing the sizes, shapes or arrangement of the air holes, and then the PCF with high birefringence, high nonlinearity, flattened dispersion and low confinement loss can be obtained. PCF has potential applications in different fields, such as distributed optical fiber sensor, femtosecond laser, gas sensor and so on. In this paper, firstly, the structure characteristics of PCF and the difference between the traditional single-mode fiber (SMF) and the PCF are introduced. Secondly, their typical structures and propagation properties are analyzed. Thirdly, the sensing mechanisms and performance of distributed optical fiber sensor, femtosecond laser and gas sensor based on the PCF are introduced in detail. The results show that compared with the traditional SMF, the PCF can achieve more excellent performance in applications. Finally, the developments and applications of PCF are summarized and prospected.

Key words: photonic crystal fiber; structure optimization; distributed optical fiber sensor; femtosecond laser; gas sensor

收稿日期：2020－02－08.

基金项目：国家自然科学基金项目(51607066,61377088)；河北省自然科学基金项目(E2019502177)；中央高校基本科研业务费专项资金项目(2020YJ005，2019MS090，2019MS085).

* **通信作者：**徐志钮 **E-mail：** wzcnjxx@sohu.com

0　引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber，PCF)的概念在 1992 年由 Russel 首次提出，其结构与常规光纤具有很大的不同，传统光纤为实体的纤芯和包层，且材料通常均为二氧化硅，而光子晶体光纤的包层引入了按一定规则排列的空气孔。它具有传统光纤不能实现的“奇异”特性，例如抗弯曲、灵活的色散特性、非线性特性和耐辐照特性等。在光通信、光器件、光传感以及激光领域具有广阔的应用前景。

1996 年，英国南安普顿大学光电子学研究中心的 Knight 等[1]利用堆砌法制作出第一根光子晶体光纤，随后，又制作出第一根光子带隙型光子晶体光纤[2]。光子带隙型光子晶体光纤的出现使光子晶体与光纤光学相结合，从此光纤光学的内容有了新的发展。

光子晶体具有优异的可设计性，随着空气孔大小和间距的变化，光子晶体光纤的各种传输特性也会随之改变。从第一根光子晶体光纤问世至今，对于光子晶体的研究已经从理论学习转向结构设计与实际应用，并取得了许多进展。光子晶体光纤的双折射特性、负平坦色散以及非线性效应等传输特性都有很大程度的提高。2019 年，于锦华等[3]报道的内包层椭圆孔光子晶体光纤在波长 1 550 nm 处获得高达 4.22×10^{-2} 的双折射系数，109.65 $(W\cdot km)^{-1}$ 的高非线性系数和低至 −14 ps/(nm·km)的色散值；2020 年，Sun 等[4]报道的光子晶体光纤在波长 1 550 nm 处双折射系数为 3.72×10^{-2}，色散值低至 −1 343.46 ps/(nm·km)，并且具有宽的色散平坦特性。光子晶体光纤在许多应用领域都展现了比普通光纤更为优异的性能，如光纤通信、光纤传感、光器件制作和激光器制造等。

本文分析了光子晶体光纤与普通单模光纤的区别，针对各种典型的光子晶体光纤结构分析了其色散和非线性等传输特性。然后详细介绍了基于光子晶体光纤的分布式光纤传感、飞秒激光器和气体传感器的传感机理以及达到的传感性能，并与非基于光子晶体光纤的传感器的传感性能进行了比较，验证了基于光子晶体光纤传感器的优异性能。最后对光子晶体光纤未来的发展进行了展望，为其进一步的研究提供了理论基础，具有重要的参考价值。

1　光子晶体光纤结构及设计

1.1　光子晶体光纤介绍

光子晶体光纤在光纤包层中具有二维周期性排列的空气孔，包层材料一般为固体硅。光子晶体光纤具有实芯和空芯两种结构，按照导光机理还可以分为折射率导光型和带隙引导型。一般来说，实芯光子晶体光纤采用的是全折射率导光机制，空芯光纤采用的是光子带隙导光机制[5]。

Knight 等拉制出了历史上第一根光子晶体光纤，其导光机制与传统光纤的全内反射导光机制类似，并且具有无截止单模传输特性[6-7]，使光纤的发展有了新的突破。光子带隙型光子晶体光纤的出现极大推动了非线性光纤光学的发展，其依靠光子带隙原理进行导光。与普通单模光纤相比，光子晶体光纤可以灵活地改变包层结构，用来削弱或加强光纤的非线性效应，灵活地设计色散和色散斜率，提供宽带色散补偿，它还可以在较大频率范围内支持光纤单模传输，具有更优异的性能。

1.2　光子晶体光纤结构优化

光子晶体光纤的传输特性会随着光纤包层空气孔的形状、排列方式和包层材料的变化而变化。由于制作工艺的限制，目前光子晶体光纤的设计主要围绕改变空气孔的形状和排列方式进行。光子晶体光纤的六角对称性越低，得到的光纤双折射系数越高。在实际制造过程中横截面中的圆形空气孔并不是理想的圆，光纤内部由于应力不均匀也会引起折射率分布不均匀，导致 HE11 模在不同的偏振方向具有不同的传播速度，从而出现双折射现象。双折射效应可以有效防止光信号的两种偏振模式在传播过程中的能量耦合[8]，在传统保偏光纤中也可以观察到双折射效应，但是传统保偏光纤的双折射系数多为 $10^{-5}\sim10^{-4}$ 量级，而光子晶体光纤的双折射系数通常可达 10^{-2} 量级[9-14]。2000 年英国 Bath 大学设计了一种光子晶体光纤，这种光子晶体光纤由于减少了一排空气孔使得光纤的双折射系数首次达到 10^{-3} 量级。2019 年于锦华等[3]设计了一种内包层椭圆孔光子晶体光纤，其结构如图 1 所示。该结构在靠近纤芯处引入了椭圆空气孔，使得光子晶体光纤在波长 1 550 nm 处的双折射系数高达 4.22×10^{-2}。此种高双折射光纤可以广泛应用于波分复用及偏振可控的精密光纤传感器和光纤通信等领域。

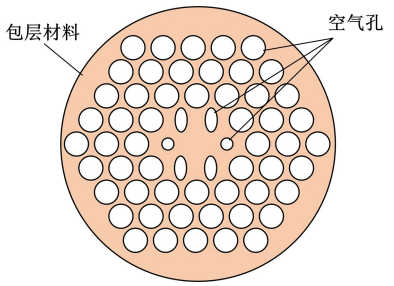


图 1 内包层椭圆光子晶体光纤结构示意图

除双折射之外，光子晶体光纤的色散、限制性损耗以及非线性效应等奇异特性也是衡量光子晶体光纤的主要指标[15]。光能量在光纤中传输时，会出现不同的传输速度，引起色散。光纤的色散会导致光脉冲在传输过程中出现脉冲展宽，从而引起码间串扰，影响通信质量，大大降低光纤的通信容量和通信距离。在设计光子晶体光纤时通过改变光纤的内部结构可以调节光纤的色散[16-18]。例如改变光子晶体光纤的纤芯直径可以在极宽的波长范围内调节零色散点，通过减小包层中空气孔的大小可以减小零色散点处群速度色散的斜率[19-20]。2020 年，Sun 等[4]设计了一种由椭圆空气孔组成的压缩三角晶格光子晶体光纤，在 S+C+L+U 的波长带上具有低至 −1 343.46±6.74 ps/(nm·km)的平坦色散，相较于其他设计的光纤结构，具有更低的色散值和更宽的色散平坦，其结构如图 2 所示。

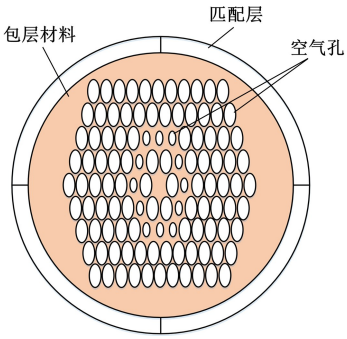


图 2 压缩三角晶格光子晶体光纤结构

此种光子晶体结构在 1 450～1 700 nm 波长范围内具有较大的负色散平坦特性。平坦色散光纤可使光信号的传输距离增长，在密集波分复用光通信系统中具有应用价值。另外负色散可以应用于超宽色散补偿、短波长光孤子传输、超短脉冲激光器/放大器、高功率光传输、高功率 PCF 激光器、极短拍长的偏振保持光纤、光纤传感器和光开关等。

光子晶体光纤的非线性效应对于光脉冲的传输具有一定的影响。光子晶体光纤模场面积越小，非线性效应越强。当光脉冲在高非线性光纤中传输时，在光纤色散和非线性的共同作用下其光谱宽度被扩展上百倍，产生超连续谱[21]。超连续谱在超短脉冲压缩、激光光谱学等方面具有较大的应用潜力。

图 3 为 Liao 等[22]设计的高非线性光子晶体光纤结构示意图。该结构改变了空气孔的排列方式，加入了椭圆形软玻璃棒(SF57)，使其获得了较高的非线性系数，当前已设计出的光子晶体光纤的非线性系数在 1 550 nm 处基本处于 100 (W·km)$^{-1}$ 以下，而图 3 所示的光纤结构非线性系数达到 300 (W·km)$^{-1}$ 以上，具有较高的非线性效应。此种高非线性光子晶体光纤可应用于光谱测量、光传感、干涉测量、飞秒激光器以及密集波分复用通信系统等领域，具有较高的应用价值。

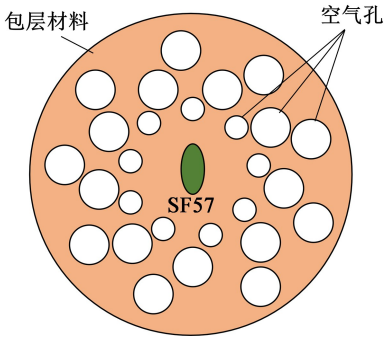


图 3 非线性较高的光子晶体光纤结构

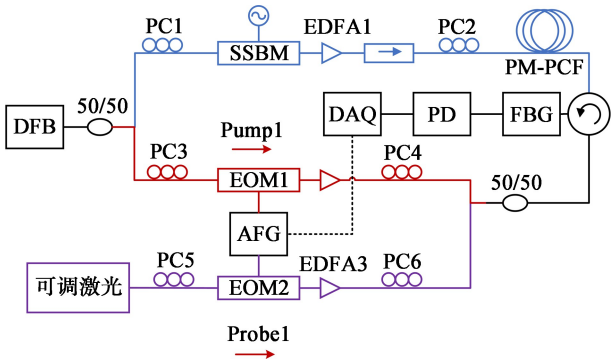
2 光子晶体光纤的典型应用

2.1 分布式传感

分布式光纤传感系统是一种利用光纤作为传感敏感元件和传输信号介质的传感系统[23-24]，可以对光纤成千上万个点的温度和应变信息进行测量[25-26]。目前基于布里渊散射的分布式光纤传感技术的传感点数已经超过 100 万个，与传统的点式光纤传感器相比，分布式传感具有体积小、测量精度高、抗电磁干扰等优势。目前分布式光纤传感主要围绕应力和温度两方面，当外界温度和应力发生变化时，作为敏感元件的光纤的反射谱参数会随之改变。通过测量反射谱的相关特性，会得到外界因素的变化情况。虽然分布式传感以单模光纤为主，但光子晶体光纤在结构和传输特性上具有独特优点，导致其在传感精度和范围上具有一定优势。

2017 年，Teng 等[27]成功利用薄直径纯二氧化硅光子晶体光纤设计了一种分布式静水压力传感系统，此系统通过温度补偿排除了温度干扰，实现了静

水压力传感。其实验装置如图 4 所示[27]。



DBF：分布反馈式激光器；PC：偏振控制器；SSBM：单边带调制器；EOM：电光调制器；EDFA：掺铒光纤放大器；DAQ：数据采集；PD：光电探测器；FBG：光纤布拉格光栅；PM－PCF：保偏光子晶体光纤；AFG：模拟函数发生器；Pump：泵浦光；Probe：探测光

图 4　静水压力传感实验装置

图 4 中 PM-PCF 表示采用的是保偏光子晶体光纤，与普通保偏光纤相比，光子晶体光纤具有更低的温度系数，不易受周围环境影响[28]，另外 PM-PCF 具有多孔结构，更容易受到气压的影响发生形变，从而引起双折射发生较大变化。因此，通过检测双折射频移的变化可以测量气压的变化。在 PM-PCF 上设置的两个测量点的双折射频移 Δf_B (Birefringence-Induced Frequency Shift，BireFS)随压力 p 变化的拟合曲线如图 5[27]所示。

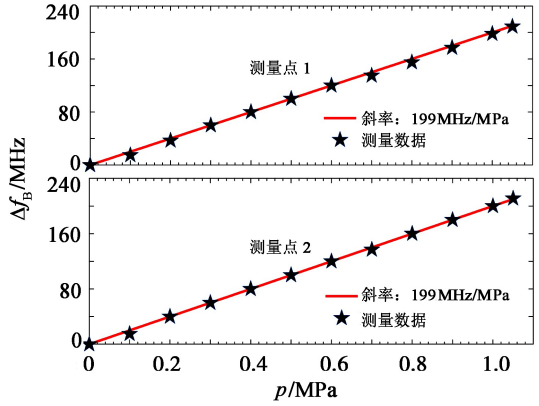
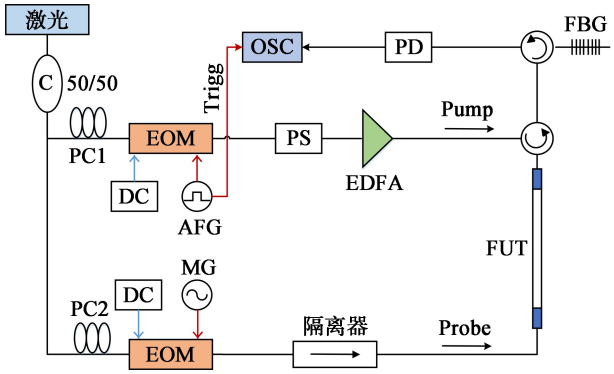


图 5　PM-PCF 双折射频移随压力的变化拟合曲线

从图 5 中可以看出，得到的拟合结果显示此静水压力传感系统的灵敏度约为 199 MHz/MPa。此外该分布式光纤传感系统得到了 20 cm 的空间分辨率，测量精度高达 0.025 MPa，此分布式静水压力传感系统排除了温度的干扰，测量环境温度可达几百摄氏度，适用于油井监测，提高采油效率。

除了分布式压力传感，基于光子晶体光纤还可以实现分布式温度或应变传感。在分布式温度传感系统中，普通单模光纤可以有效测量 1 100 ℃高温，但是当温度升高至 1 200 ℃时，普通单模光纤的损耗立即增大，使传感精度严重下降。2018 年，徐鹏柏[29]设计了一种利用光子晶体光纤（NKT Photonics Ltd，LMA-10）作为传感元件的分布式高温测量系统，图 6 为该系统实验装置示意图[28]。



C：耦合器；PC：偏振控制器；EOM：电光调制器；DC：直流电源；AFG：任意函数发生器；MG：微波源；PS：扰偏器；EDFA：掺铒光纤放大器；FUT：待测光纤；FBG：光纤布拉格光栅；PD：光电探测器；OSC：示波器

图 6　分布式光纤高温测量实验装置

图 6 所示的分布式光纤高温测量系统在 0～1 000 ℃温度范围内温度系数 σ 为 1.42 MHz/℃，在 1 000～1 200 ℃温度范围内多次测量曲线重合度较好，说明光子晶体光纤在 1 000 ℃以上的高温传感中可以不用退火直接使用。与普通单模光纤(SMF)实验结果的比较如图 7[28]所示。从图中可以看出，光子晶体光纤在分布式高温传感系统中具有比普通单模光纤更高的可应用性，适用于高温传感，且精度更高。

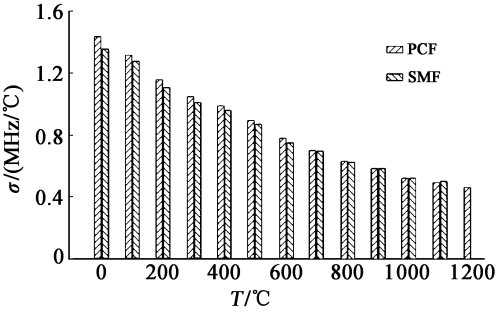


图 7　PCF 与 SMF 温度系数的比较

2.2　飞秒激光技术

飞秒激光是一种以脉冲形式运转的激光，具有

持续时间短、瞬间功率高、在超细微空间可以精确聚焦定位等特点。从目前的发展来看，飞秒激光技术的发展关键是提高激光器输出的单脉冲能量以及平均功率。基于普通单模光纤的飞秒激光器由于光纤纤芯面积的限制，超短激光脉冲在光纤中传输时受到非线性效应和光纤色散的影响，会导致脉冲畸变从而限制输出功率。而光子晶体光纤由于自身灵活的可设计性，可以实现比普通单模光纤高两个数量级以上的大模场面积和更低的非线性效应，同时可以灵活地调节零色散点以及色散斜率，达到提高单脉冲能量和平均功率的目的[30-31]。此外，掺杂稀土元素离子的光子晶体光纤作为增益介质，具有增益谱线宽、转换效率高、散热效果好的优点，同时可以将激光光束封闭在纤芯内，不受外界环境影响，能够适应多变的环境。与普通固体飞秒激光器[32]相比，光纤飞秒激光器还具有成本低、结构紧凑、散热性能好的优势，更加适用于激光领域。

2007 年，Ortac 等[33]利用一根掺杂的光子晶体光纤实现孤子锁模，获得了平均功率为 880 mW、单脉冲能量为 16.5 nJ、脉冲宽度为 500 fs 的稳定锁模输出；之后，又采用一根掺 Yb^{3+} 光子晶体光纤作为增益介质，获得了平均功率为 2.7 W、单脉冲能量为 265 nJ、脉冲宽度为 400 fs 的稳定锁模输出[34]。

同时国内也开展了对基于光子晶体光纤的飞秒激光器的设计研究，天津大学首先设计出第一台全 PCF 飞秒激光放大系统[35]，实现了 39 fs 的脉宽；张玉颖等[36]设计了一种自由耦合输出的高功率全正色散光子晶体光纤飞秒激光器，采用一段 1.5 m 长、掺杂了 Yb^{3+} 的大模场面积光子晶体光纤作为激光增益介质，其实验装置图[35]如图 8。图中的 SESAM 为高调制深度半导体可饱和吸收镜[37]。此装置将光子晶体光纤作为激光增益介质，最终得到平均功率为 2.5 W、脉冲宽度为 2 ps 的高功率超短脉冲，对应单脉冲能量为 44 nJ，脉冲经腔外压缩至 430 fs，具有自由耦合输出且输出稳定的特点。

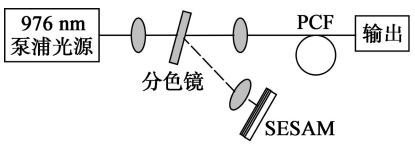


图 8 飞秒激光器实验装置图

2.3 气体传感器

气体传感器的关键指标是传感器响应速度以及传感精度。与普通单模光纤相比，基于光子晶体光纤的气体传感器可以根据功能需求对光纤中的气孔进行设计，增强光与物质的作用效果，提高传感器的灵敏度[38]。目前，基于光子晶体光纤的气体传感器主要分为干涉型、光栅型、光谱吸收型和表面等离子体共振型。

2004 年，Ritari 等[39]首次将光子晶体光纤与气体传感相结合，其系统装置示意图如图 9[40]。

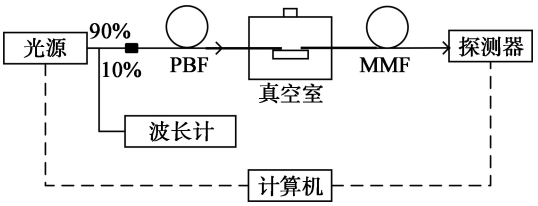


图 9 光谱吸收型气体检测实验装置图

如图 9 所示，将空芯光子晶体光纤连接在两根普通单模光纤之间作为吸收池，气体可以通过连接缝隙进入纤芯区域，Ritari 等利用此装置测得了吸收池中乙炔气体吸收光谱的特征吸收峰，这为气体检测提供了新的思路和方向。同时，国内也设计出了基于光子晶体光纤的气体传感器，杨远洪等[41]提出了一种基于 Sagnac 干涉仪的干涉型保偏光子晶体光纤氢气传感器，利用钯吸氢后体积膨胀这一特性，在光纤表面涂覆一层钯银合金氢敏膜，氢敏膜受氢气浓度影响，体积产生变化，挤压保偏光子晶体光纤，调制其双折射，进而改变光纤透射光谱的波长，再通过测量 Sagnac 干涉仪输出光谱中特定波谷的波长值实现氢气传感。此传感器在氢气浓度为 0%～1%时灵敏度为 1.037 nm/%，在氢气浓度为 1%～4%时灵敏度为 0.133 nm/%。2017 年，杨建春等[42]设计的长周期光栅型甲烷传感器在光纤内表面涂覆一层由 cryptophane-A-6Me 与聚丙烯酸碳-纳米管/聚丙烯胺盐酸盐构建的敏感薄膜，当薄膜接触到的甲烷浓度发生变化时，会引起薄膜折射率发生变化并使得光纤透射光谱的共振波长发生蓝移，进而实现对甲烷气体浓度的传感，最终达到的甲烷浓度传感灵敏度为 1.078 nm/%。然而干涉型、光谱吸收型和光栅型气体传感器检测灵敏度较低且制造工艺较复杂，而表面等离子体共振（Surface Plasmon Resonance，SPR）气体传感器具有较高的灵敏度和稳定性，更适用于多变环境的传感。

表面等离子体效应是指当偏振光以一定角度入射到棱镜端面，在棱镜与金属交界处会产生表面等离子波，一旦入射波与上述表面等离子波相遇，如果

满足相位匹配条件，此时金属膜内的自由电子就会发生共振[43-44]。

在光子晶体光纤气体传感器中，会在包层中特定的空气孔内镀上一层金属薄膜并填充气体样品，当光波在光子晶体光纤中传播时，部分光会从纤芯泄露到包层中，进而产生限制性损耗，当产生表面等离子体共振效应时，光纤中光传输的能量衰减达到最大，即限制性损耗达到最大，根据不同波长下的限制性损耗大小，绘制出曲线图，便可以得到损耗光谱图。在损耗光谱图中，可以通过损耗曲线判断表面等离子体的强度，继而得到共振波长，而共振波长的强度受到待测样品折射率的影响，介质改变会影响共振峰的移动，通过计算便可以得到待测气体折射率的变化，从而实现气体传感[45]。

2018 年，Liu 等[46]设计了一种基于光子晶体光纤的表面等离子体共振传感器，传感器横截面如图 10 所示。

图中标号为 1，2 的空气孔内层分别涂覆了甲烷和氢气的敏感材料和一层金属薄膜，此气体传感器成功检测到了甲烷和氢气的混合气体。其甲烷气体的检测灵敏度为 −1.99 nm/%，氢气的检测灵敏度为 −0.19 nm/%，可用于特殊环境下的气体检测。

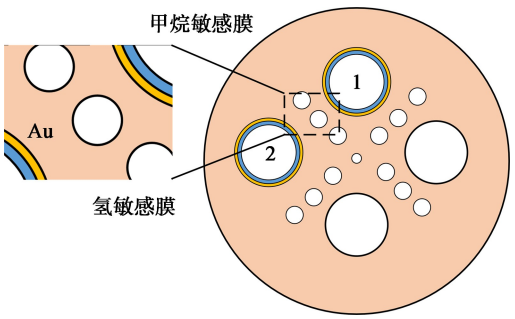


图 10　基于 PCF 的气体传感器横截面示意图

与传统的气体传感器相比，基于光子晶体光纤的气体传感器成本低、可设计性高、抗电磁干扰能力强，同时具有较高的检测灵敏度和可实时监测和免标记等特点，在气体传感方面具有优异的性能。

3　结论及展望

本文介绍了光子晶体光纤的发展过程，对比分析了其与普通光纤的区别，根据不同传输特性给出了当前光子晶体光纤设计中性能最好的设计结构。在目前研究中，双折射系数最高达 4.22×10^{-2}，非线性系数最高达 900 $(W\cdot km)^{-1}$，负色散低至 −1 343.46±6.74 ps/(nm·km)，且在 1 450～1 700 nm 范围内具有较大范围的负色散平坦特性。然后着重介绍了光子晶体光纤在分布式传感、飞秒激光器和气体传感器等领域的基本原理、应用实例和达到的性能。可以看出，与普通光纤相比，光子晶体光纤自身的可设计性及其优异的传输特性使其在传感及光器件制造方面具有更大的应用价值。今后可以在光纤材料选择和结构方面作进一步研究以提高其传感精度、拓展传感领域。

参考文献：

[1] Knight J C, Birks T A, Russell P St J. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. Opt. Lett., 1996, 21(19): 1547-1549.

[2] Knight J C, Broeng J, Birks T A. Photonic band gap guidance in optical fibers[J]. Science, 1998, 282(5393): 1476-1478.

[3] 于锦华，励强华，于程程. 内包层椭圆孔光子晶体光纤光学特性分析[J]. 光通信研究，2019，4(7)：36-39.
Yu Jinhua, Li Qianghua, Yu Chengcheng. Optical properties analysis of photonic crystal fiber based on inner elliptical holes [J]. Study on Optical Communications, 2019, 4(7): 36-39.

[4] Sun C, Wang W, Jia H. A squeezed photonic crystal fiber for residual dispersion compensation with high birefringence over S+C+L+U wavelength bands[J]. Opt. Commun., 2020, 458: 124757.

[5] 周灵德，李小甫，余海湖，等. 光子晶体光纤研究与应用[J]. 功能材料，2014，12(45)：12006-12018.
Zhou Lingde, Li Xiaofu, Yu Haihu, et al. Research progress and applications of photonic crystal fiber[J]. J. of Functional Materials, 2014, 12(45): 12006-12018.

[6] Birks T A, Knight J C, Russell P St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. Opt. Lett., 1997, 22(13): 961-963.

[7] Monro T M, Bennett P J, Broderick N G R, et al. Holey fibers with random cladding distributions[J]. Opt. Lett., 2000, 25(4): 206-208.

[8] 曹合心，张　瀚，吕辅勇，等. 保偏光纤双折射压力敏感性分析[J]. 系统仿真技术，2019，15(2)：87-92.
Cao Hexin, Zhang Han, Lv Fuyong, et al. Pressure sensitivity analysis of polarization-maintaining fiber birefringence [J]. System Simulation Technol., 2019, 15(2): 87-92.

[9] 陈　纯. 高双折射光子晶体光纤特性及应用研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2017.
Chen Chun. High birefringence properties of photonic crystal fiber and its application [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.

[10] Jiang G, Fu Y, Huang Y. High birefringence rectangular-hole photonic crystal fiber [J]. Optical Fiber Technol.,

2015, 8(10): 163-171.

[11] Liu Q, Liu Q, Sun Y, et al. A high-birefringent photonic quasi-crystal fiber with two elliptical air holes[J]. Optik, 2019, 184: 10-15.

[12] 杨天宇, 姜海明, 王二垒, 等. 一种近红外波段的高双折射高非线性光子晶体光纤[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(3): 350-354.

Yang Tianyu, Jiang Haiming, Wang Erlei, et al. Photonic crystal fibers with large birefringence and high nonlinearity in near-infrared band[J]. J. of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(3): 350-354.

[13] 刘 敏, 侯静云, 杨 虚, 等. Design of photonic crystal fiber with elliptical air holes to achieve simultaneous high birefringence and nonlinearity[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(1): 389-393.

Liu Min, Hou Jingyun, Yang Xu, et al. Design of photonic crystal fiber with elliptical air holes to achieve simultaneous high birefringence and nonlinearity[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(1): 389-393.

[14] 盛 勇, 陆 驹, 姚高峰, 等. 椭圆空气孔矩形结构光子晶体光纤的高双折射及限制损耗分析[J]. 光子学报, 2014, 43(1): 50-53.

Sheng Yong, Lu Ju, Yao Gaofeng, et al. Analysis of high birefringent and confinement loss of elliptical air-holes rectangular photonic crystal fiber[J]. Acta Photonic Sinica, 2014, 43(1): 50-53.

[15] 王 伟, 侯蓝田. 光子晶体光纤的现状和发展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(2): 43-58.

Wang Wei, Hou Lantian. Present situation and future development in photonic crystal fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(2): 43-58.

[16] 李绪友, 许振龙, 凌卫伟, 等. 高非线性色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 119-124.

Li Xuyou, Xu Zhenlong, Ling Weiwei, et al. Numerical simulation and analysis of photonic crystal fiber with high nonlinearity and flattened chromatic dispersion[J]. Chinese J. of Lasers, 2014, 41(5): 119-124.

[17] 葛祥友, 李 平, 王效杰, 等. 新型高双折射及色散平坦光子晶体光纤研究[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 332-335.

Ge Xiangyou, Li Ping, Wang Xiaojie, et al. Study on a new type high birefringence and flattened dispersion photonic crystal fiber[J]. J. of Appl. Opt., 2006, 27(4): 332-335.

[18] 鞠晓丹, 刘兆伦, 倪正华, 等. 光子晶体光纤在光通信中的色散补偿应用[J]. 光通信技术, 2004, 7(7): 26-28.

Ju Xiaodan, Liu Zhaolun, Ni Zhenghua, et al. Application of dispersion compensation of photonic crystal fibers for modern communication systems[J]. Optical Communication Technol., 2004, 7(7): 26-28.

[19] Knight J C, Arriaga J, Birks T A. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2000, 12(7): 807-809.

[20] Ferrando A, Silvestre E, Miret J J. Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers[J]. Opt. Lett., 2000, 25(11): 790-792.

[21] 刘 来. 特种光纤中的非线性效应及其应用研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2014.

Liu Lai. Study on nonlinear effects in specialty optical fibers and their applications[D]. Jilin: Jilin University, 2014.

[22] Liao J, Huang T, Xiong Z, et al. Design and analysis of an ultrahigh birefriengent nonlinear spiral photonic crystal fiber with large negative flattened disperison[J]. Optik, 2017, 1(54): 42-49.

[23] 张智娟, 陈飞飞, 徐志钮, 等. 分布式光纤传感中布里渊动态光栅研究现状与发展趋势[J]. 半导体光电, 2018, 39(4): 455-461.

Zhang Zhijuan, Chen Feifei, Xu Zhiniu, et al. Research status and development trends of Brillouin dynamic grating in distributed optical fiber sensing [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(4): 455-461.

[24] Xu Z, Zhao L. Estimation of error in Brillouin frequency shift in distributed fiber sensor[J]. IEEE Sensors J., 2020, 20(4): 1829-1837.

[25] Xu Zhiniu, Zhao Lijuan. Accurate and ultra-fast estimation of Brillouin frequency shift for distributed fiber sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 303: 111822.

[26] 徐志钮,胡宇航,赵丽娟,等.基于单斜坡法的光电复合海缆温度、应变快速测量方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(5): 202-208.

Xu Zhiniu, Hu Yuhang, Zhao Lijuan, et al. Rapid temperature and strain measurement method for optic-electric composite submarine cable based on slope-assisted method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 202-208.

[27] Teng L, Zhang H, Dong Y, et al. Temperature-compensated distributed hydrostatic pressure sensor with a thin-diameter polarization-maintaining photonic crystal fiber based on Brillouin dynamic gratings[J]. Opt. Lett., 2016, 41(18): 4413-4416.

[28] 滕 雷. 基于布里渊动态光栅的高精度分布式横向压力传感器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

Teng Lei. High sensitive distributed transverse load sensor based on Brillouin dynamic gratings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technol., 2015.

[29] 徐鹏柏. 基于特种光纤布里渊散射效应的分布式传感技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

Xu Pengbai. Distribution optical fiber sensing based on stimulated Brillouin scattering in special optical fibers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technol., 2018.

[30] 胡明列, 宋有建, 刘博文, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展及其前沿应用[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1660-1670.

Hu M, Song Y, Liu B, et al. Development and advanced

applications of femtosecond photonic crystal fiber laser technique[J]. Chinese J. of Lasers, 2009, 36(7): 1660-1670.

[31] 王清月，胡明列，宋有建，等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光[J]. 中国激光，2007，34(12)：1603-1606.
Wang Qingyue, Hu Minglie, Song Youjian, et al. Large mode area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulses[J]. Chinese J. of Lasers, 2007, 34(12): 1603-1606.

[32] 于　晨，田文龙，朱江峰，等. 高功率掺镱全固态飞秒激光器[J]. 红外与激光工程，2019，48(11)：40-46.
Yu Chen, Tian Wenlong, Zhu Jiangfeng, et al. High power Yb-doped all-solid-state femtosecond lasers[J]. Infrared and Laser Engin., 2019, 48(11): 40-46.

[33] Ortag B, LimPert J, Tunnermann A. High-energy femtosecond Yb-doped fiber laser operating in the anomalous dispersion regime[J]. Opt. Express, 2007, 32(15): 2149-2151.

[34] Ortac B, Schmidt O, Schreiber T, et al. High-energy femtosecond Yb-doped dispersion compensation free fiber laser[J]. Opt. Express, 2007, 15(17): 10725-10732.

[35] Liu B W, Hu M L, Fang X H, et al. High-power wavelength tunable photonic crystal fiber based oscillator amplifier frequency shifter femtosecond laser system and its applications for material microprocessing[J]. Laser Phys. Lett., 2009, 6(1): 44-48.

[36] 张玉颖，张　驰，胡明列，等. 自由耦合输出的高功率全正色散光子晶体光纤飞秒激光器[J]. 中国激光，2010，37(1)：64-67.
Zhang Yuying, Zhang Chi, Hu Minglie, et al. Free output coupler high-power all normal dispersion femtosecond photonic crystal fiber laser[J]. Chinese J. of Lasers, 2010, 37(1): 64-67.

[37] 张海鹃，崔雪龙，徐金龙，等. 基于半导体可饱和吸收镜锁模的 Yb：$NaY(WO_4)_2$ 飞秒激光器[J]. 中国激光，2012，39(11)：10-12.
Zhang Haikun, Cui Xuelong, Xu Jinlong, et al. CW mode locked Yb：$NaY(WO_4)_2$ femtosecond laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Chinese J. of Lasers, 2012, 39(11): 10-12.

[38] 阴亚芳，周　圆，杨　祎，等. 基于光子晶体光纤的气体传感系统设计与实现[J]. 半导体光电，2015，36(5)：811-814.
Yin Yafang, Zhou Yuan, Yang Yi, et al. Design and implementation of gas sensing system based on photonic crystal fiber[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(5): 811-814.

[39] Ritari T, Niemi T, Ludvigsen H, et al. Polarization-mode dispersion of large mode-area photonic crystal fibers[J]. Optics Communications, 2003, 226(1): 233-239.

[40] 景　磊. 新型光子晶体光纤气体传感器研究[D]. 天津：天津大学，2012.
Jing L. Research on novel gas sensors with photonic crystal fibers[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

[41] 杨远洪，王　欢，杨福玲，等. 基于 Sagnac 干涉仪的保偏光子晶体光纤氢气传感器[J]. 光学学报，2014，34(8)：85-89.
Yang Y, Wang H, Yang F, et al. Polarization maintaining photonic crystal fiber hydrogen sensor based on Sagnac interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 85-89.

[42] Yang J C, Xin C, Shen R, et al. High sensitivity photonic crystal fiber long period grating methane sensor with cryptophane-A-6Me absorbed on a PAA-CNTs/PAH nanofilm[J]. Opt. Express, 2017, 25(17): 20258-20267.

[43] Dash J N, Jha R. SPR biosensor based on polymer PCF coated with conducting metal oxide[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2014, 26(6): 595-598.

[44] Dash J N, Jha R. Highly sensitive D shaped PCF sensor based on SPR for near IR[J]. Optical & Quantum Electronics, 2016, 48(2): 1-7.

[45] 王　猛. 光子晶体光纤 SPR 气体传感机理及关键技术研究[D]. 江苏：中国矿业大学，2019.
Wang Meng. Research on mechanism and key technologies of photonic crystal fiber SPR gas sensing[D]. Jiangsu: China University of Mining and Technol., 2019.

[46] Liu H, Wang M, Wang Q, et al. Simultaneous measurement of hydrogen and methane based on PCF-SPR structure with compound film-coated side-holes [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 5(7): 1-7.

作者简介：

赵丽娟(1981—)，女，博士，副教授，主要研究方向为光纤传感与光纤通信；

徐志钮(1979—)，男，博士，副教授，主要研究方向为分布式光纤传感及其在电气设备状态监测和故障诊断中的应用。

光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.003

全光纤型侧向 OCT 探针的设计与鲁棒性分析

马 婧[1]，王颖奇[2]，胡运韬[3]，霍 力[1*]

（1. 清华大学 电子工程系 集成光电子学国家重点实验室，北京 100084；
2. 北京图湃影像科技有限公司，北京 102206；
3. 清华大学 附属北京清华长庚医院 清华大学临床医学院，北京 102218）

摘 要： 全光纤型侧向光学相干层析（OCT）探针由于兼具尺寸小和三维全周成像的优点，近年来受到了学术、工业界的广泛关注。文章通过对全光纤型侧向 OCT 探针的聚焦性能进行数值仿真，优化了探针的结构参数。基于优化的探针结构，针对反射器与 GRIN 光纤间随机横向位移引发的光功率衰落，进一步数值分析了探针套管尺寸及反射器位置对于探针鲁棒性的影响。

关键词： 光学相干层析；全光纤型侧向 OCT 探针；光学设计；光学仿真；鲁棒性分析

中图分类号： TN249 **文章编号：** 1001－5868(2020)04－0472－04

Design and Robust Analysis of All-fiber-type Side-viewing OCT Probe

MA Jing[1], WANG Yingqi[2], HU Yuntao[3], HUO Li[1]

(1. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, CHN; 2. Beijing TOPI Imaging Technology Co. Ltd., Beijing 102206, CHN;
3. Beijing Tsinghua Changgung Hospital, School of Clinical Medicine, Tsinghua University, Beijing 102218, CHN)

Abstract: All-fiber-type side-viewing optical-coherence-tomography (OCT) probe has attracted extensive interests in both academic and industry because of its ultra-small size and the ability of full-circumferential imaging. In this manuscript, the design of all-fiber-type side-viewing OCT probe is optimized for better focusing performance by numerical simulation. Furthermore, the robustness of the optimized all-fiber-type side-viewing OCT probe versus the size of probe tube and the position of reflector is numerically analyzed for the power fading resulting from the random transverse displacement between reflector and GRIN fiber.

Key words: optical coherence tomography; all-fiber-type side-viewing probe; optics design; optics simulation; robust analysis

0 引言

光学相干层析（OCT）是近 20 年来蓬勃发展的一项成像技术。借助 OCT 能快速、高灵敏度地对组织和器官实现医学成像[1]，同时在不切除组织、不使用造影剂的条件下，就可实现接近组织活检、组织病理检查的微米级成像分辨率[2]。然而，由于光波在生物组织中的穿透深度较浅[3]，OCT 成像的应用最初被限制在了眼球、皮肤等组织器官[4-5]。为拓宽 OCT 成像的应用范围，全光纤型 OCT 探针受到了广泛的关注。得益于光纤的尺寸优势，全光纤型 OCT 探针可被封装于超小型的针头或内窥导管内，用于对生物体内部软组织[6]或组织器官微腔[7]的高分辨率成像。

OCT 探针根据光束聚焦方位不同可分为两类——前向 OCT 探针[8]与侧向 OCT 探针[9]。相比前向型方案，侧向 OCT 探针需引入额外的反射

收稿日期：2020－03－27.
基金项目：国家自然科学基金项目(61575107)；北京市医院管理局-“扬帆计划”项目(12018134003)；北京市科学技术委员会项目(12019133001).
* **通信作者：**霍 力
E-mail： lhuo@mails.tsinghua.edu.cn

器以转移焦平面至探针侧面。这使侧向 OCT 探针具有了三维扇面成像的能力[9]，但另一方面却缩短了探针的有效工作距离。若光束由于有效工作距离不够而不能聚焦在目标位置，将带来焦深的浪费，随之导致成像质量的劣化。同时，额外的反射器在探针的加工、使用过程中可能由于错位而引发光波有效反射区域面积的减小和光功率的衰落，这对探针的工作稳定性提出了挑战。

本文基于对全光纤型侧向 OCT 探针聚焦性能的理论分析，给出了在商用光纤产品的光学参数下探针聚焦性能的数值仿真结果。基于仿真优化的探针结构参数，实现了 20 μm 的焦斑半径和 1.167 5 mm 的工作距离。进一步地，本文建立了针对反射器与渐变折射率(GRIN)光纤间随机横向位移的功率衰落模型，并基于理论建模和数值仿真研究了侧向 OCT 探针的鲁棒性。

1　侧向 OCT 探针的基本结构

如图 1 所示，全光纤型侧向 OCT 探针由单模光纤、无芯光纤、GRIN 光纤和反射器组成。在该成像系统中，单模光纤输出的高斯型光斑为“物”；GRIN 光纤为“透镜”，其纤芯折射率沿径向渐变。在柱坐标系中，抛物线型 GRIN 光纤的折射率分布为

$$n(r,\varphi)=\begin{cases} n_0\left(1-\dfrac{g^2}{2}r^2\right), & r\leqslant R_{\text{core}} \\ n_{\text{clad}}, & R_{\text{core}}<r\leqslant R_{\text{clad}} \end{cases} \tag{1}$$

其中，R_{core}，R_{clad} 分别为纤芯、包层半径，g 为梯度常数，n_0 为 GRIN 光纤中心折射率，n_{clad} 为包层折射率。如图 1 所示，“物”经无芯光纤发散、“透镜”聚焦后，在焦平面前、距 GRIN 光纤 Z_0 处被 45°斜面反射，最终在探针侧面重新会聚形成焦斑。为缩小器件的尺寸，采用对无芯光纤端面抛光、镀膜的方式替代反射棱镜实现反射器的功能[6]。

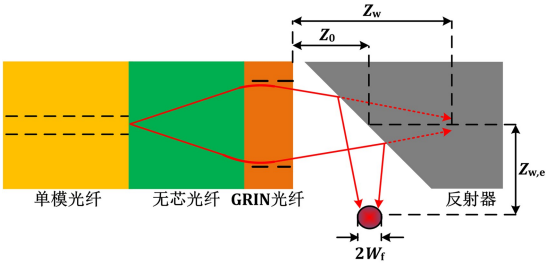


图 1　基于 GRIN 光纤的侧向 OCT 探针结构

2　OCT 探针的聚焦性能

工作距离与焦斑半径是决定 OCT 探针聚焦性能最重要的光学参数。确保合适的工作距离和尽可能小的焦斑半径是 OCT 探针设计的关键。侧向 OCT 探针的工作距离 $Z_{\text{w,e}}$ 根据平面发射原理可写作[10] $Z_{\text{w,e}}=Z_{\text{w}}-Z_0$，$Z_{\text{w}}$ 为反射面后所成虚像的像距。为提高工作距离，一方面应使反射器紧靠 GRIN 光纤，即 $Z_{0,\min}=R_{\text{clad}}$；更关键的是选择合适的探针结构参数以提升 Z_{w}。根据射线转移矩阵法，Z_{w} 可表示为[8,10]

$$Z_{\text{w}}=\frac{n_2\left[\left(1+\left(\dfrac{\kappa L_0}{n_1}\right)^2-\left(\dfrac{\kappa}{n_0 g}\right)^2\right)\alpha\beta-\dfrac{\kappa^2 L_0^2}{n_0 n_1 g}(\beta^2-\alpha^2)\right]}{n_0 g\left[\alpha^2+\left(\dfrac{\kappa}{n_0 n_1 g}\right)^2(n_1\beta-n_0 g L_0\alpha)^2\right]} \tag{2}$$

其中，$\alpha=\sin(gL_1)$，$\beta=\cos(gL_1)$，$\kappa=\lambda_0/(\pi W_0^2)$；$\lambda_0$ 为光源的中心波长，n_1 为无芯光纤的折射率，n_2 为空气的折射率，L_0 为无芯光纤的长度，L 为 GRIN 光纤的长度，W_0 为单模光纤的模场半径。同时，决定探针横向分辨率的焦斑半径 W_{f} 也可表示为

$$W_{\text{f}}=\frac{\kappa W_0}{n_0 g\sqrt{\alpha^2+\left(\dfrac{\kappa}{n_0 n_1 g}\right)^2(n_1\beta-n_0 g L_0\alpha)^2}} \tag{3}$$

基于表达式(2)，(3)，为确定合适的无芯光纤与 GRIN 光纤长度以优化探针的聚焦性能，进行了相关数值仿真。为使仿真结果接近实际情况，参照商用的光纤产品对仿真参数进行了设置。光纤产品的具体型号列于表 1；仿真中用到的具体参数数值列于表 2。此外，单模、无芯、GRIN 光纤的包层半径相同，$R_{\text{clad}}=62.5$ μm；GRIN 光纤的纤芯半径 $R_{\text{core}}=31.25$ μm。

表 1　OCT 探针的光纤组件型号

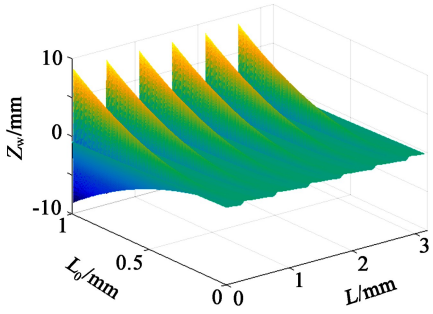
光纤种类	生产公司	产品型号
单模光纤	Corning	HI1060
无芯光纤	Thorlabs	FG125LA
GRIN 光纤	Thorlabs	GIF625-100

表 2　三种光纤的光学参数

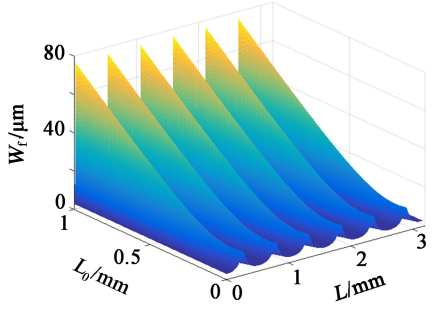
λ_0/nm	W_0/μm	n_1	n_0	g/mm^{-1}
1 060	3.1	1.449 7	1.475 5	5.990 2

如图 2 所示，基于 GRIN 光纤的自聚焦效应，

Z_w 与 W_f 在 L_0 给定时均为 L 的周期函数，周期 $\Delta=\pi/g=0.524\ 5$ mm。又由图 2 可知，Z_w 与 L_0 正相关。虽然增加无芯光纤的长度可以有效提升工作距离，但需要注意的是，L_0 实质上是成像系统的“物距”。若“物距”太大，光斑会因为过于发散以致超过“透镜”的有效接收区域，从而引发功率衰落和信噪比劣化。在 GRIN 光纤的输入光斑半径小于 R_{core} 时，可保证额外损耗小于 1 dB[5]。为使光束不过分发散，同时增大工作距离，选定 $L_0=0.345$ mm，此时 GRIN 光纤输入光斑的束腰半径为 30.7 μm，小于 R_{core}。



(a) Z_w 与 L_0 和 L 间的关系



(b) W_f 与 L_0 和 L 间的关系

图 2 Z_w 和 W_f 分别与 L_0 和 L 间的关系

在 $L_0=0.345$ mm 的情形下，进一步研究了 $W_f(L)$ 与 $Z_w(L)$ 的对应关系 $W_f(Z_w)$。如图 3 所示，由于 $Z_w(L)$ 与 $W_f(L)$ 的周期性，$W_f(Z_w)$ 为首尾相接的封闭曲线。其中，A，C 分别代表 GRIN 光纤在发散光束与聚焦光束间的临界状态；B，D 均为 Z_w 的极值点，分别对应 GRIN 光纤聚焦、发散光束。由图 3 可知，当 $W_f=20$ μm 时，有 $Z_w=1.23$ mm，$Z_{w,e}=Z_w-Z_{0,min}=1.167\ 5$ μm。此时的探针可在合适的工作距离处实现较高的横向分辨率，对应的 GRIN 光纤的长度 $L=(0.081\ 1+0.524\ 5n)$ mm，$n\in N$。

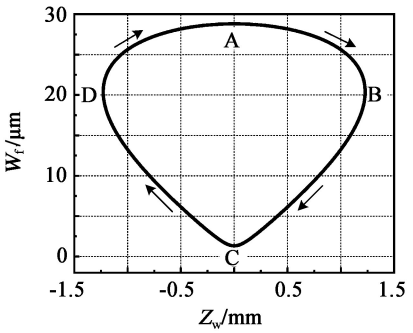


图 3 $W_f(L)$ 与 $Z_w(L)$ 的对应关系，短箭头代表 GRIN 光纤长度 L 增加的方向

3 侧向 OCT 探针的鲁棒性分析

除聚焦性能外，为保证侧向 OCT 探针在实际应用中可以稳定工作，有必要考察 OCT 探针的鲁棒性。在实际的工程应用中，容纳探针的针管内径一般略大于光纤的包层直径。对应地，如图 4 所示，由于加工误差、外界振动等不理想因素带来的干扰会使反射器相对 GRIN 光纤发生随机的横向位移，随之引入功率损耗及焦斑畸变，使探针无法正常工作。

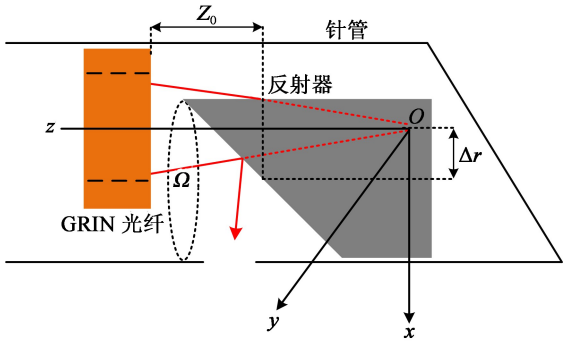


图 4 侧向 OCT 探针光功率损失原理示意图

在给定位移大小为 Δr 时，反射器相对 GRIN 光纤朝 x 正方向位移会带来最大的功率损耗 η[11]。在傍轴条件下，η 可以表示为

$$\eta(\Delta r,Z_0)=\frac{\iint_{\Omega}\mathrm{e}^{-\frac{2(x^2+y^2)}{W^2(Z_w-Z_0+R_{clad})}}\mathrm{d}S}{\iint_{\infty}\mathrm{e}^{-\frac{2(x^2+y^2)}{W^2(Z_w-Z_0+R_{clad})}}\mathrm{d}S} \tag{4}$$

其中，$W(z)$ 为高斯光束的束腰半径，$W(z)=[1+(\lambda_0 z/\pi/W_f^2)^2]^{1/2}\times W_f$，$\Omega$ 为空间中平面，$(x-\Delta r)^2+y^2+[z-(Z_w-Z_0+R_{clad})]\leqslant R_{clad}^2$。为研究 Δr 与 Z_0 对 η 的影响，基于式(4)进行了数值仿真，其中 Z_w 根据第 2 部分的仿真结果设置为 1.23 mm。如图 5 所示，当反射器逐渐偏离 GRIN 光纤，损失的光功率随之增大。若认为探针在 $\eta<0.5$ dB 时具有较高的鲁棒性，则要求 $\Delta r<43$ μm。

在实际操作中，可将全光纤型侧向 OCT 探针安装在细套管中来限制 Δr 的大小，从而有效提升探针的鲁棒性。具体地，若将侧向 OCT 探针安装在 30-gauge 的针头（内径 $D_{\mathrm{in},1}=159\ \mu\mathrm{m}$）内，有 $\Delta r_{\max}=D_{\mathrm{in},1}-2R_{\mathrm{clad}}=34\ \mu\mathrm{m}$，$\eta_{\max}=0.07$ dB；反之，若将侧向 OCT 探针安装于 28-gauge 的针头（内径 $D_{\mathrm{in},2}=184\ \mu\mathrm{m}$）内，则 $\Delta r_{\max}=D_{\mathrm{in},2}-2R_{\mathrm{clad}}=59\ \mu\mathrm{m}$，$\eta_{\max}=2.8$ dB。因此，在 Δr 相对较小时增大 Z_0 可降低探针对 Δr 的敏感度、减小功率衰落。例如在 $\Delta r=R_{\mathrm{clad}}$ 时，$Z_0=2Z_{\mathrm{w}}/3$ 相对 $Z_0=R_{\mathrm{clad}}$ 可减小 0.48 dB 的光功率损失。然而，当 $\Delta r>R_{\mathrm{clad}}$ 时，反射器越过了高斯光束的轴线，此时，反射器离 GRIN 光纤越远，功率衰落越大。例如在 $\Delta r=80\ \mu\mathrm{m}$ 时，$Z_0=2Z_{\mathrm{w}}/3$ 相对 $Z_0=R_{\mathrm{clad}}$ 将增大 3.2 dB 的光功率损失。可见，增大 Z_0 在相对位移较小时对减小损耗的帮助不大；在探针被安装在较粗的套管内、相对位移较大时，反而会严重地劣化系统稳定性。考虑到增大 Z_0 还会降低侧向 OCT 探针的工作距离，因此，在实际加工允许的条件内，应使反射器靠近 GRIN 光纤为优。

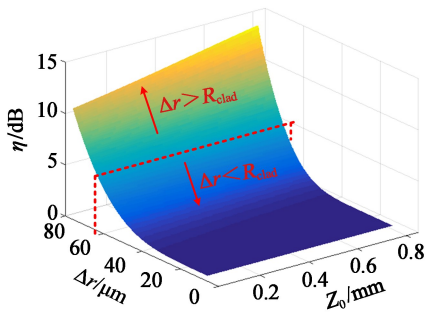


图 5　η 与 Δr 和 Z_0 间的关系

4　结论

本文通过数值仿真，对全光纤型侧向 OCT 探针的结构进行了优化。仿真结果表明在无芯光纤长度 $L_0=0.345$ mm，GRIN 光纤长度 $L=(0.081\ 1+0.524\ 5n)$ mm，GRIN 光纤与反射器间距离 $Z_0=R_{\mathrm{clad}}$ 时，探针可同时实现合适的工作距离 $Z_{\mathrm{w,e}}=1.167\ 5$ mm 与较高的横向分辨率 $W_{\mathrm{f}}=20\ \mu\mathrm{m}$。基于优化的探针结构，本文数值分析了全光纤型侧向 OCT 探针在反射器随机位移下的鲁棒性。结果表明，减小安装探针的套管尺寸，可限制相对位移的大小、提高探针鲁棒性。同时，探针安装在粗套管（$D_{\mathrm{in}}>2R_{\mathrm{clad}}$）中时，减小 Z_0 可提高探针的鲁棒性；探针安装在细套管（$D_{\mathrm{in}}\leqslant 2R_{\mathrm{clad}}$）中时，增大 Z_0 虽能微弱地提高探针的鲁棒性（小于 0.5 dB），却会极大地降低侧向探针的工作距离。因此，无论套管尺寸大或小都应使反射器尽可能地靠近 GRIN 光纤。

参考文献：

[1] Huang D, Swanson E A, Lin C P, et al. Optical coherence tomography[J]. Science, 1991, 254(5035): 1178-1181.

[2] Luo S, Liu H, Zhao H, et al. Gastric and colon cancer imaging with swept source optical coherence tomography[C]// 2017 Conf. on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR). IEEE, 2017: 1-3.

[3] Yaqoob Z, Wu J, McDowell E J, et al. Methods and application areas of endoscopic optical coherence tomography [J]. J. of Biomedical Optics, 2006, 11(6): 063001.

[4] Wojtkowski M, Kowalczyk A, Leitgeb R, et al. Full range complex spectral optical coherence tomography technique in eye imaging[J]. Opt. Lett., 2002, 27(16): 1415-1417.

[5] Xi J, Huo L, Wu Y, et al. High-resolution OCT balloon imaging catheter with astigmatism correction[J]. Opt. Lett., 2009, 34(13): 1943-1945.

[6] Lorenser D, Yang X, Kirk R W, et al. Ultrathin side-viewing needle probe for optical coherence tomography [J]. Opt. Lett., 2011, 36(19): 3894-3896.

[7] Li H, Standish B A, Mariampillai A, et al. Feasibility of interstitial Doppler optical coherence tomography for in vivo detection of microvascular changes during photodynamic therapy[J]. Lasers in Surgery and Medicine: The Official J. of the American Society for Laser Medicine and Surgery, 2006, 38(8): 754-761.

[8] Wang C, Fang C, Tang Z, et al. Analytical method for designing gradient-index fiber probes [J]. Optical Engin., 2011, 50(9): 094202.

[9] Fu H L, Leng Y, Cobb M J, et al. Flexible miniature compound lens design for high-resolution optical coherence tomography balloon imaging catheter [J]. J. of Biomedical Opt., 2008, 13(6): 060502.

[10] Jung W, Benalcazar W A, Ahmad A, et al. Numerical analysis of gradient index lens-based optical coherence tomography imaging probes [J]. J. of Biomedical Opt., 2010, 15(6): 066027.

[11] Griffith D J, Ruppeiner G. Introduction to electrodynamics [J]. American J. of Phys., 1981, 49(12): 1188-1189.

作者简介：

马　婧（1995—），女，四川人，硕士研究生，主要研究方向为 OCT 探针的设计。

E-mail：mj17@mails.tsinghua.edu.cn

光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.004

一种基于双模干涉的光纤折射率传感器

王 钧*，杨 树

（北京邮电大学 理学院，北京 100876）

摘 要： 为实现高灵敏度的折射率测量，设计了一种基于双模干涉的光纤折射率传感器，该传感器为单模-多模-单模光纤（SMS）结构，其中单模光纤和多模光纤具有相同的直径和纤芯折射率。剥去多模光纤的包层，将其置于待测环境中，多模光纤中激发出的两个模式之间会发生干涉，当待测环境折射率发生变化时，干涉谱中的波谷会发生移动，可根据光谱中波谷的移动量来实现对折射率的测量。利用 FDTD Solutions 软件进行仿真模拟，得到不同折射率下的干涉谱，结果表明，位于 1 517.32 nm 的干涉谷对折射率的敏感度为 1 848.2 nm/RIU，最小分辨率误差仅为 2.74×10^{-5} RIU。该传感器较传统光纤传感器而言，结构简单，有着高灵敏度、低分辨率误差等优点，应用前景广阔。

关键词： 光纤传感器；双模干涉；波长调制；折射率；光纤干涉仪

中图分类号： TN253；TP212 **文章编号：** 1001－5868(2020)04－0476－04

An Optical Fiber Refractive Index Sensor Based on Double-mode Interference

WANG Jun, YANG Shu

(College of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, CHN)

Abstract: To achieve high-sensitivity refractive index measurement, an optical fiber refractive index sensor based on double-mode interference is designed. The sensor is a single-mode-multimode-single-mode fiber (SMS) structure, in which the single-mode fiber and the multi-mode fiber are of the same diameter and core refractive index. To strip the cladding of the multimode fiber and place it in the environment to be measured, interference will occur between the two modes excited out of the multimode fiber. The transmission dips of the sensor will shift when the ambient refractive index changes, so the simultaneous measurement of the refractive index can be achieved by monitoring the wavelength shifts. Using FDTD Solutions software for simulation, the interference spectra at different refractive index were obtained. The results show that the sensitivity of the dip at 1 517.32 nm to the refractive index is 1 848.2 nm/RIU, and the minimum resolution error is only 2.74×10^{-5} RIU. Compared with the traditional optical fiber sensor, the sensor processes simple structure, high sensitivity and low resolution, making it has high potential applications.

Key words: optical fiber sensor; double-mode interference; wavelength modulation; refractive index; optical fiber interferometer

0 引言

光纤传感器以其结构简单、尺寸小、抗电磁干扰能力强、制作成本低、耐腐蚀、测量动态范围大、稳定性好等优点而备受关注，并且灵敏度高、信息容量大，已被广泛应用于医药、生物、化学等领域[1]。干涉型光纤传感器的基本原理是：当外界环境的待测

收稿日期：2020－04－06.

* **通信作者：**王 钧 **E-mail:** highlightwj@163.com

物理量发生变化时，利用干涉技术得到光纤内传输光强的变化，从而根据干涉光谱图检测出外界参量的变化。据此，光纤干涉传感器可被用于对多种环境参量的测量中，如折射率、温度、环境湿度、应变、压力等。目前，常用的光纤干涉传感器有：马赫-曾德尔干涉仪（Mach-Zehnder Interferometer）、迈克尔逊干涉仪（Michelson Interferometer）、法布里-珀罗干涉仪（Fabry-Perot Interferometer）以及赛格耐克环形干涉仪（Sagnac Fiber Loop Interferometer）[2]。对于光纤传感器的解调，有多种方法实现，如利用干涉谱的强度、波长、相位等参量来进行解调，得到需要测量的物理量，具体可根据实际情况来选择不同的解调方法[3]。

上述常用光纤传感器主要是利用单模光纤来组合得到相关干涉仪的结构，随着科技的发展，越来越多的特种光纤也被应用到了光纤传感领域中，如多模光纤、保偏光纤、光子晶体光纤、空芯光纤等，成为了现代光纤传感器的重要组成部分。对于传统模式干涉型光纤传感器，大多是多个模式之间的干涉，一般是从实验得到测量结果，无法对误差及灵敏度进行明确的数值理论分析。本文通过调整结构参数使多模光纤中仅激发 HE_{11} 模和 HE_{12} 模，即以双模干涉来实现对待测环境折射率的测量。对比传统多模干涉型光纤传感器，双模干涉型光纤传感器有着较高的灵敏度，并且可以得到定量的解析表达式，可以从理论上具体分析误差及灵敏度，物理机制较为清晰，对传感器的性能有着更进一步的认知。

1　基于双模干涉的光纤折射率传感器的基本原理

在基于模式干涉的光纤传感器中，主要是基模与高阶模发生干涉，当仅存在 HE_{11} 模和 HE_{12} 模发生干涉时，传感器内的传输光强可以表示为[4]

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\varphi \tag{1}$$

其中，I_1 和 I_2 分别是 HE_{11} 模和 HE_{12} 模的光强，I 是干涉光谱的强度，φ 为两个模式的相位差：

$$\varphi = \frac{2\pi(n_{\mathrm{effHE}_{11}} - n_{\mathrm{effHE}_{12}})}{\lambda}L = \frac{2\pi n_{\mathrm{eff}}}{\lambda}L \tag{2}$$

式中，λ 为空气中自由空间光波长，L 为传感光纤的长度，$n_{\mathrm{effHE}_{11}}$ 和 $n_{\mathrm{effHE}_{12}}$ 分别是 HE_{11} 模和 HE_{12} 模的有效折射率，n_{eff} 为两个模式的有效折射率之差。当相位为 $(2k-1)\pi$ 的整数倍时，干涉光强达到最小值，此时对应干涉波形中的波谷，该波谷对应的波长为[5]

$$\lambda_k = \frac{2n_{\mathrm{eff}}}{(2k-1)}L \tag{3}$$

其中，λ_k 表示第 k 级波谷的位置。由式(1)～(2)可看出，干涉谱的强度 I、各波谷对应的波长 λ 与传感光纤的纤芯和包层的折射率以及传感光纤的长度 L 等参量有关。当外界待测环境参量发生变化时，传感光纤的参数也会随之改变，继而导致干涉光谱中的波谷发生漂移或者干涉强度改变。

如果用合适的解调方法对上述光谱中发生的变化进行调制，就能得到需要测量的环境参量。本文采用波长调制来对传感器进行解调，基本原理是通过测量光谱中波谷的漂移量，来得到外界环境参量的信息。一般选取单个或多个波谷作为测量点，当外界环境参量变化时，得到该波谷的波长漂移量。由式(3)，波谷的漂移量可以表示为[6]

$$\Delta\lambda_k = \frac{2(n_{\mathrm{eff}}\Delta L + \Delta n_{\mathrm{eff}}L)}{2k-1} \tag{4}$$

其中，ΔL 为光程差的变化量，Δn_{eff} 为有效折射率的差值变化量。当外界的温度、折射率、应变等物理量发生变化时，ΔL 和 Δn_{eff} 会相应变化，从而使干涉波长产生漂移，若能检测出 ΔL 和 Δn_{eff} 的变化，即能得到外界的参量信息。

该结构的分辨率误差可以表示为

$$\Delta n_{\mathrm{a}} = \Delta\lambda \cdot \frac{\frac{1}{\lambda}(n_{\mathrm{effHE}_{11}} - n_{\mathrm{effHE}_{12}}) + \frac{\partial n_{\mathrm{effHE}_{12}}}{\partial\lambda} - \frac{\partial n_{\mathrm{effHE}_{11}}}{\partial\lambda}}{\frac{\partial n_{\mathrm{effHE}_{11}}}{\partial n_{\mathrm{a}}} - \frac{\partial n_{\mathrm{effHE}_{12}}}{\partial n_{\mathrm{a}}}} \tag{5}$$

式中，$\Delta\lambda$ 为光谱仪的波长分辨率，n_{a} 是待测环境的折射率，φ 为传感器中所传输的两个模式的相位差，如式(2)所示。

干涉波形中的任意一个波谷都可以作为传感器的测量波谷点，每个波谷对应该波谷对外界参量的灵敏度。多模光纤的长度会直接影响干涉波形中的波谷数量，多模光纤越长，在波长范围内可观测到的干涉谷就越多，但同时传感器的传输损耗会增大，不利于波长的解调，故需设计合适的多模光纤长度来进行测量。多模光纤的直径越小，对环境折射率的变化就会越灵敏，但当直径过小时，机械强度会降低，容易折断，考虑到实际光纤的制作难度，也需选择合适的多模光纤直径，所以需综合考虑多模光纤的直径和长度，既要保证传感器拥有良好的机械强

度，也需得到较好的干涉谱进行测量。

对于光纤模式干涉传感器，最常见的一种结构是将两段单模光纤（SMF）和多模光纤（MMF）相熔接而构成的 SMS 结构[7]，当入射光波由单模光纤进入到多模光纤时，由于纤芯模场不匹配，会激发出多个模式在多模光纤中传输，这些模式之间会发生干涉。通过对多模光纤进行后期加工或者改变多模光纤的类型，可以制作出不同类型和功能的传感器，如对多模光纤进行腐蚀、纤芯错位、拉锥成不同形状等后期加工处理[8]。

本文讨论的是一种较为简单的 SMS 结构（见图 1）：令单模光纤和多模光纤的直径相等，且拥有相同的纤芯折射率，剥去多模光纤的包层，将其放入待测环境中，当外界环境参量改变时，干涉谷会发生移动。值得注意的是，去除包层的多模光纤对折射率的响应很灵敏[9]。

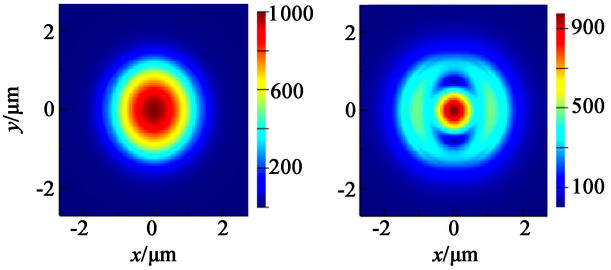
图 1 SMS 结构图

2 仿真计算

本文所探讨的结构中，单模光纤与多模光纤的纤芯直径均为 2.8 μm，二者纤芯折射率相同，均为 1.72，单模光纤的包层折射率为 1.628。剥去多模光纤的包层，将其置于待测环境中，此时仅激发 HE_{11} 模和 HE_{12} 模，多模光纤长 300 μm，据此利用 FDTD Solutions 软件进行仿真计算。在实际实验中，需将宽带光源作为外部入射光的光源，放置在输入 SMF 的一端，中间段的传感光纤放置于待测环境中，将光谱分析仪放置于输出 SMF 的另一端，光谱仪将数据进行处理后在终端显示结果。

图 2 为当待测环境折射率为 1.33，观测波长为 1 550 nm 时单独激发出的 HE_{11} 模和 HE_{12} 模的模场分布图，二者的有效折射率分别为 1.678 5 和 1.497 3。

图 3 为待测环境折射率为 1.33 时的模式干涉型光纤传感器的干涉光谱图，其中，横坐标为波长，纵坐标表示光强，选择观测波长范围为 1 500～1 600 nm。观察光谱图可知，光源经过干涉传感器后，产生了明显的干涉条纹，代表在该波段干涉效应较为明显，且干涉波形较为均匀，若光纤内有多个高阶本征模式参与干涉，就会得到不均匀的干涉谱。在本文的结构参数下，观测波长范围内共存在两个干涉谷，随着折射率的增加，干涉谷会向长波长方向移动，选择 1 517.32 nm 干涉谷 A 进行观察。



（a） HE_{11} 模 （b） HE_{12} 模

图 2 HE_{11} 模和 HE_{12} 模的模场分布图

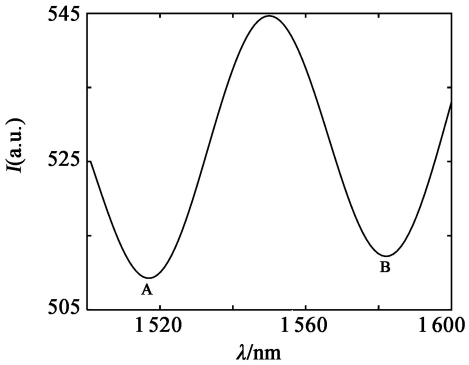


图 3 环境折射率为 1.33 时的干涉谱

为进一步验证本文所提出的结构的灵敏度较传统型干涉型传感器有较大改进的结论，需要通过改变待测环境的折射率来分析不同的干涉谱曲线。为保证所选定观察的干涉谷 A 未移动出观测波长范围，最终确定该结构的可测环境折射率 n_a 范围为 1.33～1.36。

图 4 为不同待测环境折射率下得到的各干涉谱，可以看出，在干涉效应下，随着环境折射率的改变，干涉谷 A 对折射率的变化敏感，发生了一定程度的移动。观察各折射率下的干涉谱，可发现干涉谷 A 对应的波长与待测环境折射率之间基本呈线性关系变化，可以将其拟合为一条直线，如图 5 所示。其中，离散点表示的是波长的变化，而实线则表示与之对应的线性拟合，横坐标为待测环境折射率，纵坐标为干涉谷 A 移动的距离 Δλ。当待测环境折射率由 1.33 变至 1.36 时，干涉谷 A 向长波长方向共移动了 55.4 nm，相较传统模式干涉光纤传感器[10]，其整个测量范围内干涉谷的移动距离变大，折射率响应的灵敏度也随之变大，可达到 1 848.2 nm/RIU（RIU 为单位折射率）。由于一般光谱仪的最小分辨率为 0.05 nm，利用式（5）可计算

得到该传感器的分辨率误差为 2.74×10^{-5} RIU，减小了近一个数量级，极大地优化了传感器性能。

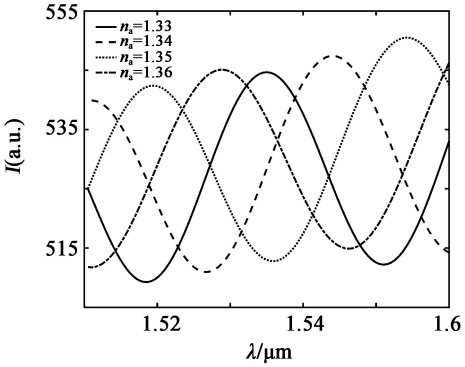


图 4　不同环境折射率下的干涉谱

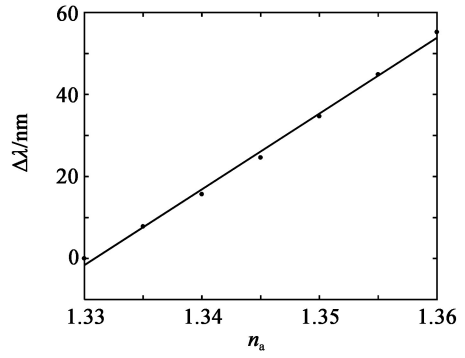


图 5　干涉谷 A 随环境折射率变化的偏移量

3　结论

本文设计了一种基于模式干涉的光纤传感器，该传感器由两段单模光纤同多模光纤连接而成，去掉多模光纤的包层使纤芯裸露在待测环境中，其中，单模光纤和多模光纤拥有相同的直径与相同的纤芯折射率。当入射光从单模光纤耦合到多模光纤时，会激发多模光纤中的基模和高阶模式。在本文的结构参数下仅激发出了 HE_{11} 模和 HE_{12} 模，这两个模式随即会发生稳定的双模干涉，可通过输出单模光纤观测到输出光谱图。当外界待测环境的折射率发生变化时，HE_{11} 模和 HE_{12} 模的有效折射率均会发生改变，输出光谱也会随之改变，具体表现为波谷发生移动，根据该移动量可实现对折射率的测量。根据仿真结果，选取了位于 1 517.32 nm 的干涉谷来进行折射率测量，该干涉谷对折射率的灵敏度为 1 848.2 nm/RIU，分辨率误差仅为 2.74×10^{-5} RIU。该传感器制作简单，具有高灵敏度、低分辨率误差等优点，在环境折射率检测方面有着较好的应用前景。

参考文献：

[1] 杜志泉，倪　峰，肖发新. 光纤传感技术的发展与应用[J]. 光电技术应用，2014，29(6)：7-17.
Du Zhiquan，Ni Feng，Xiao Faxin. Development and application of optical fiber sensing technology[J]. Electro-optic Technology Application，2014，29(6)：7-17.

[2] 孙　苗. 基于模间干涉的马赫-泽德光纤传感器的研究[D]. 杭州：中国计量学院，2013：24-28.
Sun Miao. Study of modal interferences in Mach-Zehnder fiber sensors[D]. Hangzhou：China Jiliang University，2013：24-28.

[3] 孙　浩. 基于相位调制的干涉型光纤传感器研究[D]. 西安：西北大学，2016：5.
Sun Hao. The optical fiber interferometric sensors based on phase modulation[D]. Xi'an：Northwest University，2016：5.

[4] Wu D，Zhu T，Chiang K S，et al. All single-mode fiber Mach-Zehnder interferometer based on two peanut-shape structures [J]. Lightwave Technol.，2012，30：805-810.

[5] Li L，Xia L，Xie Z，et al. In-line fiber Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature based on thinned fiber[J]. Sensors and Actuators A：Phys.，2012，180：19-24.

[6] 韩学文，贾东方，王肇颖. 基于模间干涉原理的少模光纤传感器[J]. 光通信技术，2017，41(4)：35-38.
Han Xuewen，Jia Dongfang，Wang Zhaoying. Few-mode optical fiber sensors based on modal interference principle[J]. Optical Communication Technology，2017，41(4)：35-38.

[7] Wang P，Brambilla G，Ding M，et al. Investigation of single-mode-multimode-single-mode and single-mode-tapered-multi-mode-single-mode fiber structures and their application for refractive index sensing[J]. Opt. Soc. Am. B，2011，28(5)：1180-1186.

[8] 温晓东. 基于干涉原理的光纤传感器设计与特性研究[D]. 北京：北京交通大学，2016：24-26.
Wen Xiaodong. Design and characteristic research of the fiber sensors based on interferential principle[D]. Beijing：Beijing Jiaotong University，2016：24-26.

[9] Zhang Y，Zhou A，Qin B，et al. Refractive index sensing characteristics of single-mode fiber-based modal interferometers[J]. Lightwave Technol.，2014，32(9)：1734-1740.

[10] Wang H，Meng H，Xiong R，et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on asymmetric structures modal interference [J]. Optic Commun.，2016，364：191-194.

作者简介：

王　钧(1995—)，女，硕士研究生，主要研究方向为光纤干涉传感器。

光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.005

星载高灵敏度平衡光电探测器研究

崔大健[1*]，周　浪[1]，奚水清[1]，任　丽[1]，兰　枫[2]，郭精忠[2]

（1. 重庆光电技术研究所，重庆 400060；2. 西安空间无线电技术研究所，西安 710100）

摘　要： 设计了一种由平衡光电二极管芯片和跨阻放大器混合集成的星载高灵敏度平衡光电探测器。平衡光电二极管芯片采用双 InP-InGaAs 光电二极管单元单片集成的内平衡结构，以降低芯片自身噪声，提高探测器灵敏度。通过 Cadence 仿真软件对集成了正负双向电流输入电路、自动增益控制电路和反相器型输入电路的闭环放大器结构进行了仿真，得到等效噪声功率、带宽和增益三者之间的关系，制作出适配平衡光电二极管芯片的跨阻放大器。搭建 1.55 μm 激光测试系统对研制的探测器进行性能测试，结果显示，其 3 dB 带宽为 1.58 GHz，等效噪声功率密度为 5.96 pW/Hz$^{1/2}$，共模抑制比为 42.04 dB(@DC～1.58 GHz)，在相干激光通信系统中的接收灵敏度达到－61 dBm。

关键词： 平衡光电探测器；高灵敏度；卫星相干光通信

中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0480－05

Research on High Sensitivity Balanced Photodetector for Space Application

CUI Dajian[1], ZHOU Lang[1], XI Shuiqing[1], REN Li[1], LAN Feng[2], GUO Jingzhong[2]

(1. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN;
2. Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, CHN)

Abstract: Designed is an onboard balanced photoelectric detector with high sensitivity, which is composed of a balanced photodiode chip and a trans-impedance amplifier. The balanced photodiode chip adopts the internal balance structure of dual InP-InGaAs photodiode unit to reduce the noise of the chip itself and improve the detection sensitivity. The closed-loop amplifier integrated with positive and negative bi-directional current input circuit, automatic gain control circuit and inverter input circuit was simulated by Cadence software, and the relationship of the equivalent noise power, bandwidth and gain was obtained. Then a tran-resistance amplifier being adaptive to balanced photodiode chip was produced. A 1.55 μm laser test system was set up to test the performance of the developed detector, and the results show that its 3 dB bandwidth of 1.58 GHz, equivalent noise power density of 5.96 pW/Hz$^{1/2}$, and the common-mode rejection ratio of 42.04 dB (@DC～1.58 GHz) are realized, and the receiving sensitivity in the coherent laser communication system reaches －61 dBm.

Key words: balanced photodetector; high sensitivity; satellite coherent communication

0　引言

随着空间相干激光通信技术[1]在长距离星间激光通信中的广泛应用，对其核心器件之一[2-3]——平衡光电探测器的研究也越来越受到重视。平衡光电探测器具有共模噪声抑制特性，可以消除本征激光器的相对强度噪声和二极管自身噪声，从而提升接收信噪比[4]，相较于其他激光探测技术，其探测接收灵敏度提高了 20 dB 左右[5]。

在已知的国外空间相干激光通信技术的报道

收稿日期：2020－03－29.

* 通信作者：崔大健　E-mail：cuidj@cetccq.com.cn

中，空间相干激光通信终端均采用系统配套定制的平衡光电探测器模块，无商用化平衡光电探测器产品。其中，欧洲 EDRS 系统采用了零差相干通信方案[6-7]，利用定制化的光电混合集成平衡光探测器模块，实现最高通信速率 5.6 Gb/s，灵敏度达到 −45 dBm；而国内关于光电混合集成小型化平衡光电探测器的研究还未见报道。

为此，本文设计了一种小型化和高灵敏度星载平衡光电探测器。探测器由平衡光电二极管芯片与跨阻放大器在陶瓷薄膜基板上混合集成而成，并成功应用于空间相干激光通信系统，其实测接收灵敏度达到 −61 dBm。

1　器件设计

平衡光电探测器工作原理如图 1，平衡光电二极管芯片（由对称的光电二极管串联组成）同时接收由前端光混频器输出的 2 路空间光信号（相位相差 180°），将光信号转换为电流信号合成一个端口输出，再经低噪声跨阻放大器（TIA）放大后差分输出，送至后级信号处理电路。

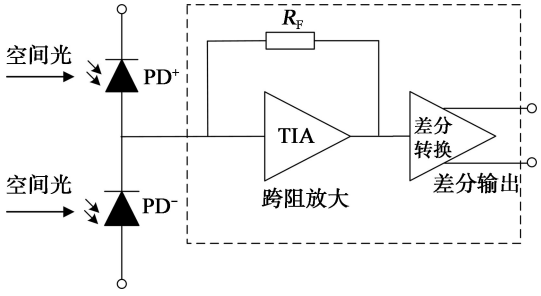


图 1　平衡光电探测器工作原理图

1.1　平衡光电二极管芯片

平衡光电二极管芯片通过采用单片集成双 InP-InGaAs 光电二极管单元的方式实现内平衡结构，保证了芯片两单元参数的对称一致性，如图 2 所示。

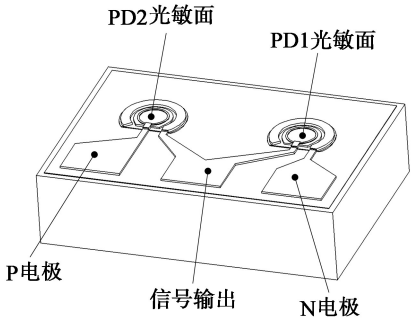


图 2　平衡光电二极管芯片结构图

相干激光通信工作波长为 1.55 μm，因此平衡光电二极管芯片单元采用正入光、半绝缘衬底（SI-InP）台面型 InP/InGaAs/InP 双异质结 pin 结构，如图 3 所示。该结构既能实现隔离保护，降低光电信号的串扰，又能有效降低芯片寄生电容，提高器件的响应频率。

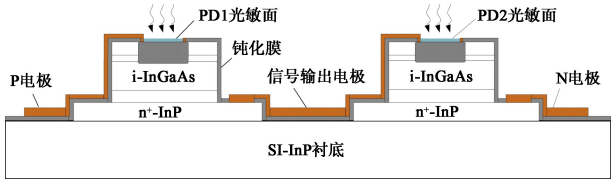


图 3　平衡光电二极管芯片剖面图

设计的平衡光电二极管芯片主要结构参数为：单元光敏面直径为 45 μm，InGaAs 吸收层厚度为 2.5 μm；采用平面和台面相结合的工艺，包括介质膜淀积、光刻、扩散掺杂、金属电极蒸发、剥离、减薄抛光、合金等工序，完成芯片制备。性能测试分析得出芯片响应度为 0.95 A/W，3 dB 带宽为 10 GHz，响应度不一致性为 0.02 dB，饱和光功率为 11 dBm，电容为 0.25 pF。

1.2　跨阻放大器芯片

根据平衡光电探测器工作需求，定制化设计 1 GHz 跨阻放大器，整体设计方案框图如图 4 所示。

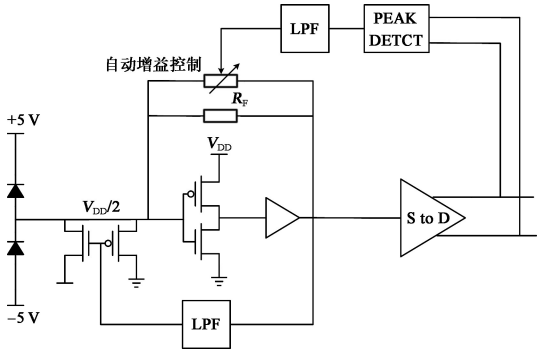


图 4　放大器整体设计方案框图

跨阻放大器芯片集成了正负双向电流输入电路、自动增益控制电路和反相器型输入电路等电路。正负双向电流输入电路[8]可以稳定探测器和放大器的偏置，提高直流光动态范围；自动增益控制电路可以根据光强调节放大器增益，提高放大器交流光动态响应范围；输入端的反相器型输入电路，可以提高放大器对正负信号响应的一致性和灵敏度[9]。

跨阻放大器核心部分采用闭环放大器结构，如图 5 所示。闭环放大器的反馈环使输入节点交流接地，使得输入电流流向反馈电阻，并通过反馈电阻把

电流信号转化为电压信号。相比于低噪声放大器与开环放大器，闭环放大器的噪声和信号具有两种不同的转换增益，进而可以通过噪声的增益小于信号的增益来获得更高的信噪比。

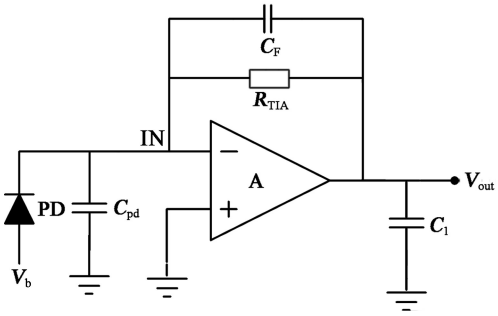


图 5 闭环放大器原理图

闭环放大器噪声模型如图 6 所示，C_{pd} 是放大器输入端的总电容，A 是电压放大器 A 的直流增益，$R_{out,A}$ 是电压放大器 A 的输出阻抗，C_l 是放大器的负载电容。闭环放大器的传递函数为

$$Z_{TIA}=R_{TIA}/((1+j2\pi fR_{TIA}C_{pd}/A)\times(1+j2\pi fR_{out,A}C_l)) \quad (1)$$

根据式(1)，可以推导出闭环放大器的增益约等于 R_{TIA}，−3 dB 带宽等于 $A/2\pi R_{TIA}C_{pd}$。

闭环放大器的输入等效噪声电流近似为

$$i_{n,in,rms}=(kT(Ag_mR_{TIA}^2R_{out,A}C_lC_{pd}+g_mR_{TIA}\cdot R_{out,A}^2C_{pd}^2-A^2g_mR_{TIA}R_{out,A}^2C_l^2-Ag_mR_{out,A}^3\cdot C_lC_{pd}+\gamma A^2R_{TIA}^2C_{pd}^2+\gamma AR_{TIA}R_{out,A}C_lC_{pd}-\gamma A^3R_{TIA}R_{out,A}C_lC_{pd}-\gamma A^2R_{out,A}^2C_l^2)/(R_{TIA}^2C_{pd}^2-A^2R_{out,A}^2C_l^2)(g_mR_{TIA}^2R_{out,A}C_l))^{1/2} \quad (2)$$

其中，g_m 是电压放大器 A 的输入跨导，γ 是热噪声系数，k 是玻尔兹曼常数，T 是绝对温度。

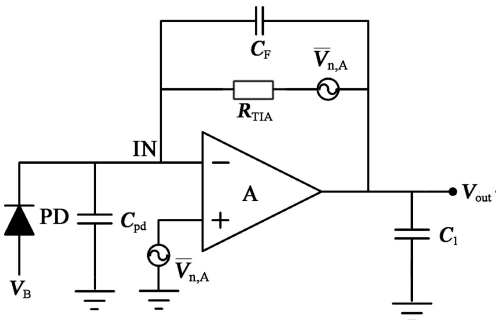


图 6 闭环放大器噪声模型

根据式(1)和(2)，采用 Cadence 软件对闭环放大器模型进行仿真，其等效噪声功率密度仿真结果如图 7 所示，在 1 GHz 处，等效噪声功率密度 $I_N\approx 6.9\ pA/Hz^{1/2}$。

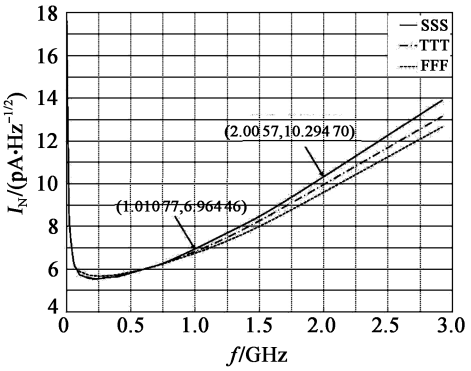


图 7 放大器在三种不同工艺角下的噪声仿真曲线

跨阻放大器在设计中增加的自动增益控制模块，会通过检测输出差分摆幅，产生自动增益控制的控制电压 V_C，以调节放大器的增益，但是也会影响放大器的带宽和输入等效噪声功率。因此，在仿真模型中加入正负双向电流输入电路、自动增益控制电路和反相器型输入电路，分析增益 G、带宽 BW 与输入等效噪声功率 I_n 随控制电压 V_C 的变化情况，仿真结果如图 8 所示。由图可知，增益随控制电压 V_C 的变大而变小，所以通过增益控制可以有效提高放大器的动态范围；同时，带宽和等效噪声功率均随控制电压 V_C 的变大而变大，表明放大器的带宽和等效噪声功率会随放大器的自动增益调节而变化，并且在增益的自动调节范围内，放大器带宽大于等于 1.3 GHz，等效噪声功率小于等于 574 nA(即等效噪声功率密度为 10.4 $pA/Hz^{1/2}$@3 GHz)。

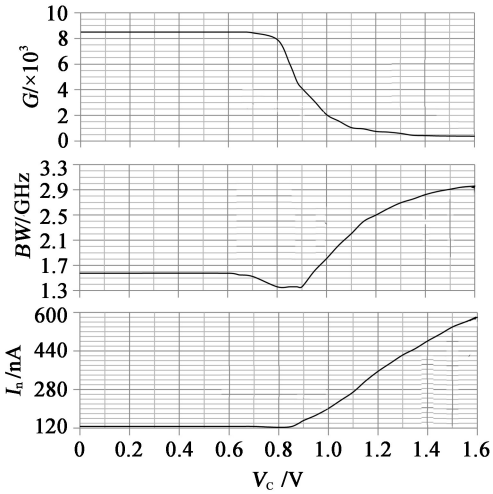


图 8 放大器增益、带宽与等效噪声功率随 V_C 的变化曲线

已知光电二极管芯片的响应度 $R_{e,pd}=0.95$ A/W，经计算得到最终平衡光电探测器的总等效噪声功率密度 $I_N\approx 10.9\ pW/Hz^{1/2}$@3 GHz，满足

星载激光通信系统应用需求。

1.3 光电混合集成

平衡光电探测器主要由平衡光电二极管芯片、跨阻放大器芯片、射频陶瓷电路基板、金属化光纤、SSMA 连接器、气密金属腔体组成。采用光电混合集成工艺，将平衡光电二极管芯片、跨阻放大器芯片混合集成在射频陶瓷电路基板上，以缩小器件体积，提高探测器性能；采用铅锡焊工艺进行光纤同轴耦合封装，并在氮气氛围中采用平行缝焊工艺进行气密性封盖，以保证平衡光电探测器的长期可靠性。

该平衡探测器相比于传统分立器件组装方案，具有明显集成小型化优势，外形尺寸长×宽×高约为 18 mm×16 mm×8 mm。

2 性能测试

2.1 器件性能测试

如图 9 所示，采用矢量网络分析仪搭建测试系统，对平衡光电探测器的 3 dB 带宽、共模抑制比等关键技术指标进行测试。

试验结果如图 10 所示，平衡光电探测器在高增益工作模式下，3 dB 带宽为 1.58 GHz，共模抑制比 $CMRR \geqslant 42.04$ dB(@DC～1.58 GHz)。由于受器件中跨阻放大器带宽的限制，器件 3 dB 带宽小于平衡光电二极管芯片 3 dB 带宽。高共模抑制比表明该平衡光电探测器具有高共模信号抑制特性、高信噪比和高灵敏度。

采用示波器对器件的等效噪声功率密度 I_N、转换增益等参数指标进行测试。设置示波器的带宽为 1 GHz，采样速率为 5 Gb/s。测得示波器噪底 V_{RMS0} 为 141 μV，在高增益模式下，平衡光电探测器 RMS 噪声幅度 V_{RMS1} 为 670 μV，输出幅度 V_{out} 为 55.3 mV(@输入光功率 $P_{in}=10$ μW)。

$$G = V_{out}/2P_{in} \tag{3}$$

通过式(3)计算出平衡光电探测器的转换增益为 2.8 kV/W。

$$I_N = V_{RMS}/(G \cdot (BW)^{1/2}) \tag{4}$$

其中，$V_{RMS}=(V_{RMS1}^2 - V_{RMS0}^2)^{1/2}$，再由式(4)，可计算出平衡光电探测器的等效噪声功率密度 I_N 为 5.96 pW/Hz$^{1/2}$。

将该试验测试结果与模拟仿真结果进行对比，在相同增益下(即增益为 2.8 kV/W)，对比结果如表 1 所示。

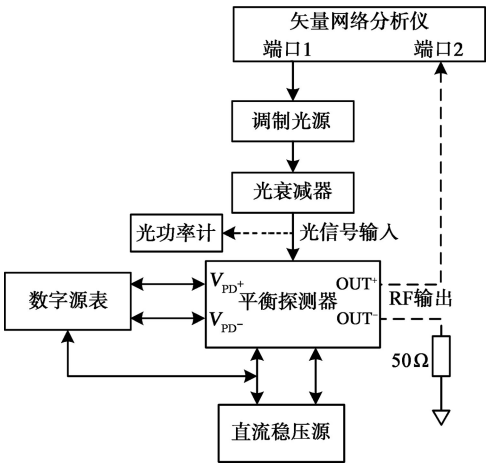
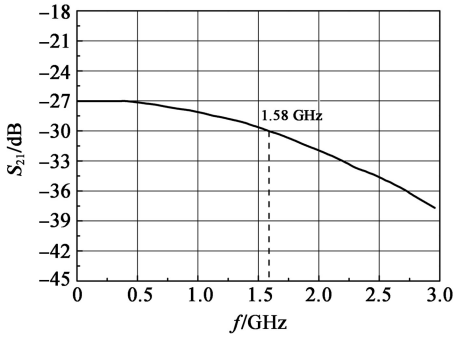
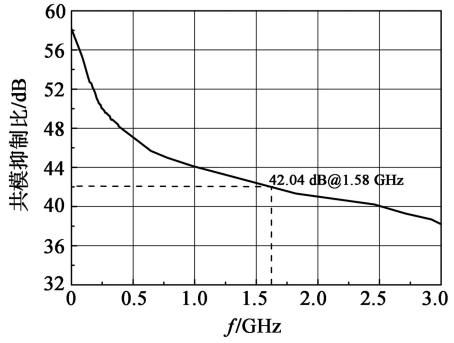


图 9　测试框图



(a)　3 dB 带宽



(b)　共模抑制比

图 10　试验结果

表 1　试验测试结果与模拟仿真结果对比表

参数	增益/(kV·W^{-1})	3 dB 带宽/GHz	等效噪声功率密度 I_N/(pW·Hz$^{-1/2}$)
模拟仿真	2.8	1.66	4.65
试验测试	2.8	1.58	5.96

从表 1 中可以发现，平衡光电探测器的实测值略低于模拟值，这是光电混合集成中引入的匹配电路和输出电路造成的；但是平衡光电探测器的整体参数指标符合设计要求。

2.2 系统验证测试

图 11 所示为平衡光电探测器在空间相干激光

通信系统终端中的典型应用实例，平衡光电探测器将混频器与本振光相干混频的光信号进行光电转换及放大，并送至后级高速采集处理电路进行解调译码等相关处理。

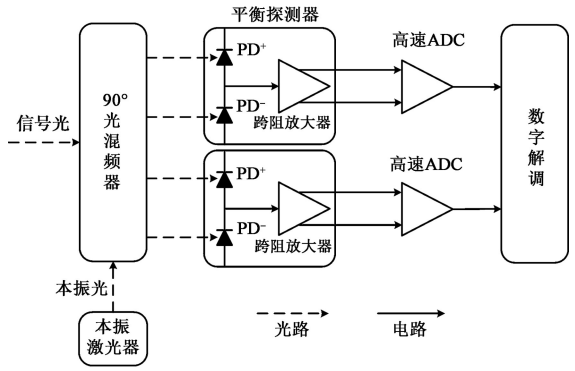


图 11 平衡探测器典型应用实例

经过用户试验测试，其灵敏度测试曲线如图 12 所示，在不同误码率和 1 Gb/s 通信速率测试条件下，接收灵敏度达到－61 dBm，相对于理论值[10]，其总损失约为 2.5 dB，这是由于光混频器损耗约 1 dB、平衡探测器损耗约 0.7 dB，数字处理损耗约 0.8 dB。平衡光电探测器的等效噪声功率密度为 5.96 pW/$Hz^{1/2}$，与相干接收机的本振光功率带来的散粒噪声 56 pW/$Hz^{1/2}$ 相比，对灵敏度的影响较小，可以忽略。同时，该平衡光电探测器已通过辐照试验考核并成功实现批量空间应用。

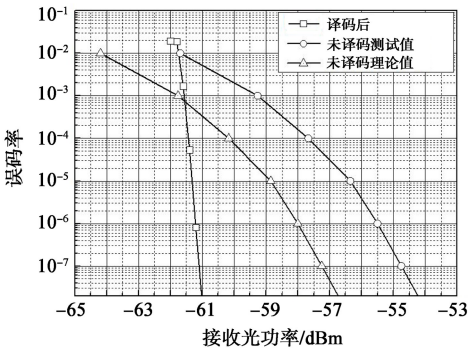


图 12 系统灵敏度测试曲线

综上所述，该平衡光电探测器满足长距离星间激光通信系统的应用要求。

3 结论

本文研制了由平衡光电二极管芯片和跨阻放大器进行光电混合集成的星载高灵敏度平衡光电探测器。通过在平衡二极管芯片中采用双 InP-InGaAs 光电二极管单元单片集成的内平衡结构和仿真设计，集成了正负双向输入电流方案、自动增益控制模块和反相器型输入电路的跨阻放大器，降低了探测器的噪声，提高了信噪比、带宽和增益，解决了星载平衡光电探测器探测接收灵敏度低的问题。经实际测试，探测器共模抑制比达 42.04 dB 以上，3 dB 带宽为 1.58 GHz，转换增益为 2.8 kV/W，输入噪声等效功率密度为 5.96 pW/$Hz^{1/2}$，在相干激光通信系统中的接收灵敏度达到－61 dBm。

参考文献：

[1] Chan V W S. Free-space optical communications [J]. J. Lightwave Technol., 2007, 24(12): 4750-4862.

[2] Li Guifang. Recent advances in coherent optical communication[J]. Advances in Opt. and Photon., 2009(1): 279-307.

[3] Clark T R, Dennis M L. Coherent optical phase-modulation link[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2007, 19(16): 1206-1208.

[4] Zhuang L, Roeloffzen C G H, Meijerink A, et al. Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas-part Ⅱ: experimental prototype [J]. J. Lightwave Technol., 2010, 28(1): 19-31.

[5] 刘宏阳，张燕革，艾 勇，等. 用于相干光通信的平衡探测器的设计与实现[J]. 激光与光电子学进展，2014，51(7)：23-29.
Liu Hongyang, Zhang Yange, Ai Yong, et al. Design and implementation of balance detector used in coherent optical communication system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(7): 23-29.

[6] Heine F, Kmpfner H, Lange R, et al. Laser communication applied for EDRS, the European data relay system[J]. Ceas Space J., 2011, 2(1/4): 85-90.

[7] Lange R, Smutny B. BPSK laser communication terminals to be verified in space [C]// Proc. IEEE Military Communications Conf., 2004.

[8] Shahdoost S, Medi A, Saniei N. Design of low-noise transimpedance amplifiers with capacitive feedback [J]. Integrated Circuits & Signal Proc., 2016, 86(2): 233-240.

[9] Ngo T H, Kim C H, Kwon Y J, et al. Wideband receiver for a three-dimensional ranging LADAR system[J]. IEEE Trans. on Circuits & Systems Ⅰ Regular Papers, 2013, 60(2): 448-456.

[10] Kikuchi K, Tsukamoto S. Evaluation of sensitivity of the digital coherent receiver [J]. J. of Lightwave Technol., 2008, 26(13): 1817-1822.

作者简介：

崔大健(1982－)，男，硕士研究生，高级工程师，主要从事光电子器件的研究。

光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.006

浴铜灵有机分子材料对钙钛矿薄膜表面的钝化作用

宋　奇，梁春军，何志群*

（北京交通大学 理学院 光电子研究所，北京 100044）

摘　要： 采用2,9-二甲基-4,7-二苯基-1,10-邻二氮杂菲（浴铜灵，缩写：BCP）有机小分子作为钙钛矿薄膜与电子传输层之间的界面修饰层，从而使得反型结构的钙钛矿太阳电池性能得到显著改善。通过扫描电子显微镜研究发现：BCP分子可在钙钛矿薄膜样品表面的晶界间充分填充，推测其抑制了界面缺陷态的产生。进一步研究器件内部界面电荷的累积，并结合交流阻抗谱的分析，证实经BCP钝化的钙钛矿太阳电池中界面电荷的累积减少，光生载流子的复合被抑制，电池的光电转换效率由原来的15.7%提升到了17.4%。

关键词： 界面修饰；钙钛矿太阳电池；BCP；缺陷态

中图分类号： TN366　　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0485－04

Surface Passivation of Perovskite Films by Bathocuproine Molecule

SONG Qi，LIANG Chunjun，HE Zhiqun

（Institute of Optoelectronic Technology，School of Science，Beijing Jiaotong University，Beijing 100044，CHN）

Abstract： In this work，organic small molecule 2，9-Dimethyl-4，7-diphenyl-1，10-phenanthroline（bathocuproine，abbr. BCP）was selected as a buffer layer for interface engineering between active and electron-transporting layers（ETL）in a reversed perovskite solar cells. It was found that the device performance was significantly improved after THE deposition of a BCP layer between the ETL and the perovskite layer. It reveals that the spacing between the grains was effectively filled by the BCP by scanning electron microscope，which can be responsible to prevent the generation of defect state at perovskite interface. Further analysis of the charge accumulation in the device in combination with AC impedance measurement proved that the migration of ions and the photon-generated carrier recombination in the perovskite solar device were reduced after the deposition of BCP layer. As a result，the optoelectronic power-conversion-efficiency is improved from 15.7% to 17.4%.

Key words： interface engineering；perovskite solar cells；BCP；defect state

0　引言

有机、无机杂化钙钛矿材料由于其独特的物理化学特性，目前在众多的科学领域吸引了科研人员的广泛关注[1-2]。ABX_3是这一类材料的结构通式，其晶胞呈面心立方结构。在理想的材料内部，三种离子位置固定且呈有序周期性排列[3]。其中A通常指有机阳离子（MA^+，FA^+）和第一主族离子（Rb^+，Cs^+），B主要指金属铅离子（Pb^{2+}），X指卤素阴离子（Cl^-，Br^-，I^-）。结构中的每种离子都显著地影响着钙钛矿材料的物理化学特性，进而在制备的光电器件中发挥着不同的作用[4-6]。通过调节各种离子在钙钛矿材料中的比例以及改善制备工艺，钙钛矿太阳电池的光电转换效率已经达到了23.7%[7]。

溶液旋涂法制备薄膜太阳电池具有易操作、低

收稿日期：2019－04－09.

基金项目：国家自然科学基金项目（61574014，61874008，11474017）；北京市科委项目（Z181100004718004）.

* 通信作者：何志群　　E-mail：zhqhe@bjtu.edu.cn

成本的优势。然而,晶体生长受温度、湿度等外部环境的影响,导致多晶钙钛矿薄膜表面的晶界处会产生大量缺陷态[8]。当光子透过玻璃基片激发活性层产生光生电子-空穴对时,缺陷的存在使得电子和空穴在界面处发生复合,阻碍光电流向外部电路的传输,影响光伏器件的光电性能[9]。因此,减少活性层表面的缺陷成为进一步提升钙钛矿光伏器件光电转换效率的重要途径。

本文工作尝试将2,9-二甲基-4,7-二苯基-1,10-邻二氮杂菲(浴铜灵,缩写:BCP)覆盖在钙钛矿薄膜表面对其钝化,进一步分析发现这可以有效抑制缺陷形成,提高太阳电池的光电转换效率。

1 实验部分

1.1 实验材料

将 NiO_x 纳米颗粒根据文献报道的合成方法溶解在去离子水中,浓度为 20 mg/mL,加热搅拌 2 h 形成纳米分散液作为空穴传输材料[10];碘化铅(PbI_2,纯度 99.99%)、甲基碘化铵(MAI)和富勒烯衍生物 $PC_{61}BM$ 购于西安宝莱特材料公司;BCP(99.9%)购于 Sigama-Aldrich 公司;有机溶剂 N,N-二甲基甲酰胺(DMF,99.9%)、二甲基亚砜(DMSO,99.9%)、异丙醇(IPA,99%)和氯苯(99%)购于 Sigama-Aldrich 公司;钙钛矿薄膜光伏器件背侧金电极材料(99.9%)购于中诺新材有限公司;透明电极材料为氧化铟锡导电玻璃(ITO),其方阻小于 15 Ω/□。

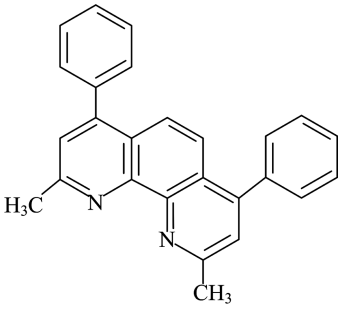
1.2 薄膜与器件制备

ITO 导电衬底依次使用清洗剂、去离子水、丙酮和异丙醇在超声清洗器中超声处理 20 min,并用干燥的氮气将其表面吹干。之后将基片转移到紫外臭氧清洗器中处理 15 min。使用 NiO_x 水溶液旋涂在清洗完毕的 ITO 导电基片上,转速为 2 000 r/min,时间为 60 s。$MAPbI_3$ 钙钛矿前驱体溶液依次使用两个转速旋涂而成:1 000 r/min(15 s)+3 000 r/min(35 s)。在第二个转速旋涂 20 s 时使用移液枪吸取 250 μL 氯苯快速冲洗钙钛矿表面。然后将旋涂完毕的钙钛矿薄膜转移到 100 ℃ 的加热平台进行 10 min 退火。待退火完毕冷却到室温,依次将 $P_{61}CBM$ 溶液、BCP 溶液以 3 000 r/min 的转速旋涂在钙钛矿表面,时间为 40 s。最后,将旋涂完毕的样品转移到真空镀膜腔室蒸镀 80 nm 的金(Au)作为薄膜电池的背侧电极(蒸镀速度为 0.1 nm/s)。

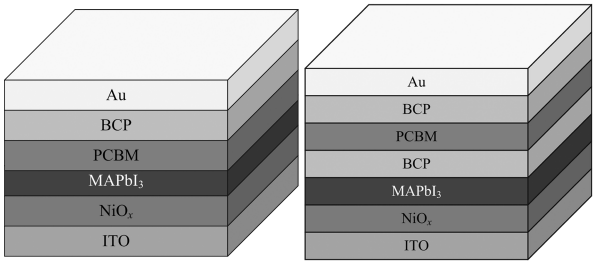
2 实验结果与分析

本文工作所讨论的钙钛矿光伏电池为倒置结构器件(p-i-n 型):ITO/NiO_x/$MAPbI_3$/$PC_{61}BM$/BCP/Au。尝试将 BCP 涂覆在钙钛矿薄膜表面,研究其对器件性能的影响。

图 1(a)是 BCP 小分子结构示意图,从图中可以看出 BCP 是一种具有高度轴对称的二维片状结构的小分子,这使得在选取溶解 BCP 的溶剂时需慎重考虑溶剂的极性强弱。实验发现异丙醇相比于乙醇、丙酮、氯苯等作为溶解 BCP 的有机溶剂具有独特的优势,它既能微溶 BCP,又不会在制备过程中对下层钙钛矿薄膜产生破坏性溶解。本研究将 BCP 溶于异丙醇溶液中,并旋涂在钙钛矿薄膜表面以进一步开展研究。图 1(b)和(c)分别是有无 BCP 溶液对钙钛矿薄膜表面进行界面修饰的器件结构示意图。BCP 小分子溶液在钙钛矿活性层表面的具体实验操作是:吸取浓度为 0.5 mg/mL 的 BCP 溶液 60 μL 静态旋涂在制备好的钙钛矿薄膜表面,转速为 3 000 r/min,时间为 30 s,如图 2 所示。



(a) BCP 分子结构



(b) 修饰前 (c) 修饰后

图 1 BCP 分子结构及使用 BCP 修饰前后的钙钛矿电池结构示意图

实验中使用的 BCP 溶液浓度只有 0.5 mg/mL,而且旋涂过程中转速设置较高,这导致覆盖在钙钛矿层表面的 BCP 较薄,厚度在几纳米。从图 3 中的 UV-vis 吸收光谱测试结果发现,当 BCP 小分子旋涂覆盖在钙钛矿层表面时,测得光吸

收强度的变化非常小。这既能表明旋涂的 BCP 层厚度较小，不会影响在光伏器件中电子经过 $PC_{61}BM$ 层向外电路的传输，同时也能证明溶解 BCP 的异丙醇溶剂并没有溶解破坏钙钛矿活性层的成膜质量。

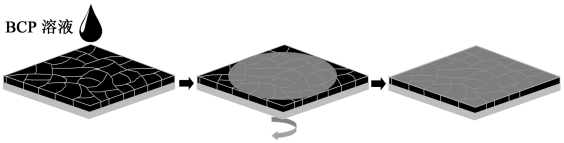


图 2　BCP 的旋涂工艺示意图

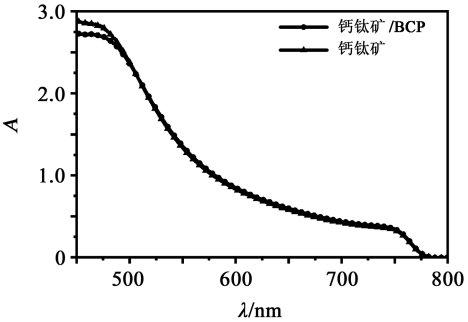
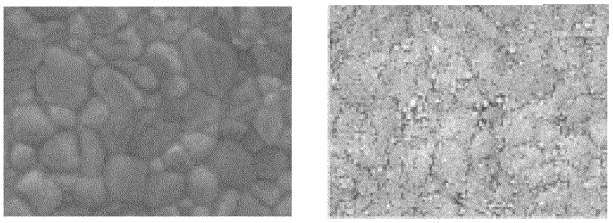


图 3　钙钛矿薄膜和钙钛矿/BCP 薄膜的 UV-vis 吸收光谱

如图 4 所示，采用扫描电子显微镜（SEM）观察发现：经 BCP 钝化后的钙钛矿薄膜表面有一层厚度非常薄的膜层，并且在钙钛矿晶体与晶体之间的晶界处附着大量的白色颗粒，这就是通过旋涂工艺操作处理后的 BCP 小分子。钙钛矿膜层表面晶界处存在大量的缺陷态，这些缺陷态会严重抑制光生载流子向外电路输运，从而阻碍器件光伏性能的提升[9,11]。采用 BCP 钝化工艺能够有效填补晶界处的空隙，进而减少表面缺陷态的产生，达到改善钙钛矿薄膜质量的效果。



（a）　钙钛矿薄膜　　（b）　钙钛矿/BCP 薄膜

图 4　钙钛矿薄膜表面 SEM 形貌

利用 BCP 界面钝化工艺制备成的光伏器件，其光电转化效率比标准器件提升了 11% 左右（从 15.7% 提升到了 17.4%）。通过分析图 5 中的 J-V 特性曲线发现，开路电压（V_{oc}）从 1.0 V 提升到了 1.02 V，短路电流密度（J_{sc}）从 20.81 mA/cm^2 提升到了 21.75 mA/cm^2，填充因子（F_F）从 75.4% 提升到了 78.5%。器件光电转换效率 η 计算公式为

$$\eta=\frac{P_{max}}{P_{in}}=\frac{V_{oc}\times J_{sc}\times F_F}{P_{in}} \tag{1}$$

其中，P_{in} 是太阳光入射光功率，P_{max} 是最大输出功率。P_{in} 取 100 mW/cm^2，由式（1）计算得出经过 BCP 修饰的钙钛矿光伏器件的光电转换效率为 17.4%，相比于未经修饰工艺处理的器件而言，光伏性能得到了明显提升。

表 1 对两组不同条件下制备的钙钛矿太阳电池的性能参数进行了统计。从中可以得出，器件性能的明显改善得益于 BCP 小分子层在活性层和电子传输层之间起到了关键性的钝化修饰作用，从而有效降低了电子-空穴在器件界面处的复合几率，提升了光电流向外电路的输运能力。

表 1　有无 BCP 界面修饰层的样品光伏参数对比

样品	V_{oc}/V	J_{sc}/(mA/cm^2)	F_F/%	η/%
$MAPbI_3$	1.00	20.81	75.40	15.70
$MAPbI_3$/BCP	1.02	21.75	78.50	17.40

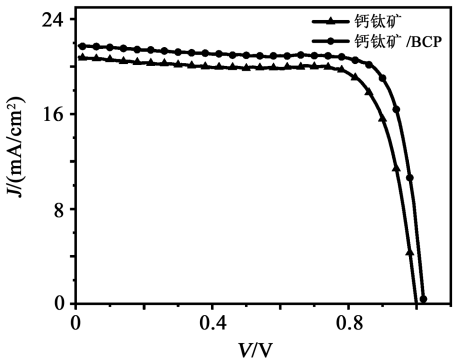


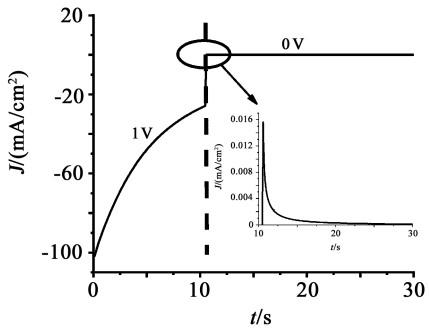
图 5　有无 BCP 层界面修饰的最优光伏器件的 J-V 性能对比

对于钙钛矿太阳电池而言，有机、无机杂化钙钛矿材料独特的物理化学特性使得半导体材料内部的离子不会稳定地在其原有序列上固定不动，而是会在电极两侧施加恒定外电场时产生明显移动。这将导致晶体内部原有的结构遭到破坏，阻碍了器件光电转换效率的进一步提升，甚至为日后进入商业化，解决器件长期工作稳定性的研究工作带来巨大的挑战。通过测量器件中电荷在界面处的积聚程度能够得出离子在器件内部移动的强弱，进而对器件性能的改善提供有效的证明。

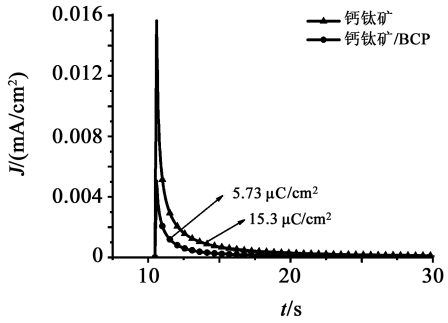
通过测量器件中的电荷积聚过程，可以窥测 BCP 分子对界面的修饰作用。实验采用 Keithley 源表进行测量，具体实验仪器设置与前期研究类似[12]，结果如图 6 所示。

如图 6（a）所示，当在器件两侧电极处施加

1.0 V 的偏压，持续 10 s，随后瞬间将电压切换到 0 V（短路状态），界面处离子电荷会发生重新分布，在进入短路状态的瞬间会随时间产生很小的电流。此时将电流密度对时间积分就能计算出离子电荷的密度。在图 6(b)中，标准器件的界面电荷密度为 15.3 $\mu C/cm^2$，而使用 BCP 钝化修饰处理后，器件的界面电荷密度降为 5.73 $\mu C/cm^2$，这一结果表明 BCP 修饰层有效地降低了活性层界面处电荷的积累，说明活性层中离子的移动被有效地束缚，进而提高钙钛矿光伏器件的转化效率和稳定性。



(a) 界面离子电荷



(b) 有无 BCP 层修饰的光伏器件界面电荷密度

图 6 实验测量结果

通过交流阻抗谱(EIS)的测试能够对光伏器件内部载流子的复合电阻(R_{rec})、界面接触电阻(R_{co})的变化进行分析[7]。图 7 是对不同条件下制备的钙钛矿太阳电池运用交流阻抗测试后所绘制的 Nyquist Plots 分析图，每条曲线显示了两个大小不同的半圆，高频和低频区域半圆的半径分别表示载流子传输过程中的 R_{rec} 和 R_{co} 值[13]。分析图 7 可以得出，与标准器件相比，使用 BCP 钝化修饰制备的钙钛矿光伏电池具有更大的 R_{rec} 和更小的 R_{co}。这表明 BCP 修饰层的使用大大增强了电荷向外电路输运的能力，有效地抑制了电子传输层与活性层之间电子-空穴的复合，从而使得器件的光电性能在模拟光源照射下得到了显著提升。

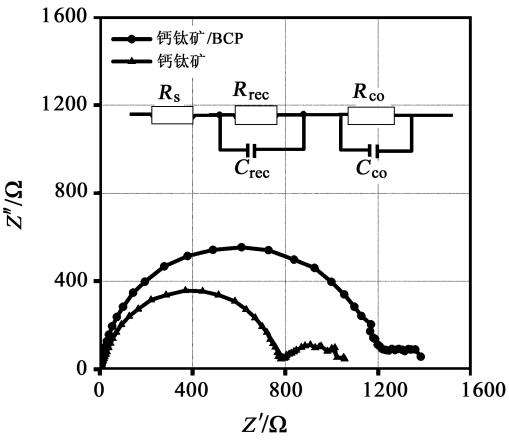


图 7 交流阻抗谱

3 结论

本文采用 BCP 作为钙钛矿活性层与电子传输层之间的钝化层，研究其对钙钛矿薄膜以及光伏器件性能的影响。*J-V* 特性曲线表明，光伏器件的光电流密度和填充因子经 BCP 溶液钝化修饰后明显得到改善，光电转换效率从 15.7% 提升到了 17.4%。SEM 扫描电镜图像显示 BCP 小分子均匀填充在钙钛矿晶界处，直观地表明 BCP 小分子对钙钛矿薄膜表面的晶界缺陷态起到了显著的钝化修饰效果。器件界面电荷积聚能力和交流阻抗谱的测试结果进一步证明 BCP 界面修饰后的器件中活性层离子的移动以及界面电子-空穴的复合得到了有效的抑制。这一工作为今后在钙钛矿薄膜表面探索新型修饰钝化层，提升器件光电性能的研究开辟了切实可行的新途径。

参考文献：

[1] Prasanna R, Leijtens T, Dunfield S P, et al. Design of low bandgap tin-lead halide perovskite solar cells to achieve thermal, atmospheric and operational stability[J]. Nature Energy, 2019, 4(11): 939-947.

[2] Jung M, Ji S, Kim G, et al. Perovskite precursor solution chemistry: from fundamentals to photovoltaic applications[J]. Chemical Society Rev., 2019, 48(7): 2011-2038.

[3] Tsai H, Asadpour R, Blancon J C, et al. Light-induced lattice expansion leads to high-efficiency perovskite solar cells[J]. Science, 2018, 360(6384): 67-70.

[4] Saliba M, Matsui T, Seo J, et al. Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency [J]. Energy & Environmental Science, 2016, 9(6): 1989-1997.

(下转第 541 页)

光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.007

高光谱成像用高速 CMOS 图像传感器设计

冯国旭[1]，刘昌举[2,3]*，刘戈扬[2]，李　明[2]，徐江涛[3]

（1. 中国电子科技集团公司第十一研究所，北京 100016；
2. 重庆光电技术研究所，重庆 400060；3. 天津大学 微电子学院，天津 300072）

摘　要： 针对高帧频、全局曝光、通道数可选等成像应用需求，提出了一种高光谱成像用 CMOS 图像传感器，重点分析了 8T 像素结构和读出电路的设计方案与电路原理，完成了芯片的整体仿真和流片验证。结果表明：设计符合预期，成像效果良好，像素具备较高的满阱和全局快门功能，读出电路实现了输出通道数可选功能，同时保证了模拟信号在大面阵、低输出通道数条件下的高速、低噪声输出，最终实现的像素阵列为 2 048×256，像素尺寸为 24 μm×24 μm，单通道最大输出频率为 40×10^6 pixel/s，最高帧频为 4 000 f/s，可满足高光谱成像系统对图像传感器的需求。

关键词： CMOS 图像传感器；高光谱成像；全局快门；高帧频

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0489－05

Design of High-speed CMOS Image Sensor for Hyperspectral Imaging

FENG Guoxu[1], LIU Changju[2,3], LIU Geyang[2], LI Ming[2], XU Jiangtao[3]

(1. The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100016, CHN;
2. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN;
3. School of Microelectonics, Tianjin University, Tianjin 300072, CHN)

Abstract: For the imaging requirements such as high frame rate, global shutter and adjustable output channel amount, a kind of CMOS image sensor for hyperspectral imaging is proposed. The schematic plan and working principles of 8T pixel structure and readout circuit are introduced in detail. Post-simulation and tapeout of this sensor were completed, and the experimental results show the design meets the expectation by achieving targeting features and realizing high-speed and low-noise analog signal output under the condition of large layout area and small amount of output channels. The pixel array size of 2 048×256 and the pixel pitch of 24 μm×24 μm are achieved, the maximum signal output frequency for a single channel is 40×10^6 pixel/s and the frame rate can reach up to 4 000 f/s, being able to meet the general requirement of a hyperspectral imaging system.

Key words: CMOS image sensor; hyperspectral imaging; global shutter; high frame rate

0　引言

在物体识别和成像领域，高光谱成像具有可以分辨物体光谱的特点，尤其在地质调查、环境监测与资源勘查等对地观测应用中有重要意义[1]。国内外的星用高光谱成像系统大多选择 CCD 探测器作为关键器件，但功耗、体积、待机时间等问题是制约其载荷向小型化、低成本发展的重要因素。近年来随着半导体工艺和全局快门的快速发展，CMOS 图像传感器在系统集成、读出方式、高帧频、功耗等方面取得了较大的技术进步，为了满足载荷的小型化、低功耗、长待机、低成本等要求，具有高灵敏度、高帧频和全局曝光技术的 CMOS 图像传感器成为高光谱

收稿日期：2019－12－11.
基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFF0104700).
* **通信作者：**刘昌举 **E-mail:** liuchangju66@126.com

成像领域的重点发展方向[2]。

基于 CMOS 图像传感器的高光谱成像可实现高速、可靠的全局快门成像，较大地提升了光谱图像质量[3-4]。针对全局曝光、可自由选择的多种输出通道及高帧频的应用需求，本文设计了一种高光谱成像用 CMOS 图像传感器，其整体架构包括像素和读出电路两个部分。其中，像素采用 8T 结构、全局快门和像素内双采样方案，满足高光谱成像对全局快门特性的要求，同时保证读出信号具有较低的固定模式噪声(FPN)；读出电路采用输出通道可选的多通道数方案：由于列级电路传输导线上的寄生效应不可忽视，故此方案在兼顾高速图像输出和高集成度的同时，重点解决了模拟输出信号在大面阵、低输出通道数下的驱动问题，确保信号的高速、低噪声输出。

1 高光谱用 CMOS 图像传感器整体设计

高光谱用 CMOS 图像传感器的像素尺寸设计为 24 μm×24 μm，像素阵列为 2 048×256，整体架构示意图如图 1 所示。为实现最高帧频 4 000 f/s 的模拟信号输出目标，该图像传感器的输出通道采用分组级联的设计思路，共设计了 8 组一级输出通道，每组输出由 8 个二级输出通道组成，总共构成 64 个读出电路的信号输出通道，信号的读出方式采用单边输出，可在 64，32，16 通道输出模式之间切换。芯片的主时钟频率为 40 MHz，当芯片工作在 64 通道输出模式时，传感器可实现 4 000 f/s 帧频的模拟信号图像输出；当输出通道数为 32 和 16 时，帧频分别对应 2 000 和 1 000 f/s。由于该传感器阵列长度接近 50 mm，横向导线的寄生负载较大，因此在像素阵列的左右两边均设计了行选电路，当数字电路输出控制时序时，两组行选电路同时向像素阵列输入时序信号，以达到增强信号驱动的目的，保证像素开关的工作速度和功能。

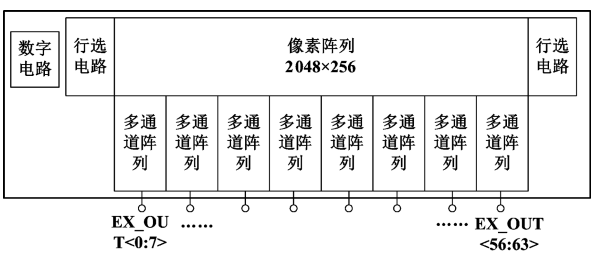


图 1 CMOS 图像传感器整体架构示意图

2 像素设计

高光谱用 CMOS 图像传感器的像素结构示意图如图 2 所示[5]，其中，M1 管为像素感光二极管的复位管；电容 C1 用于调节像素的满阱容量，通过控制 M2 管开关状态以控制其是否接入像素；M3 为第一级源跟随管，由 M4 管为其提供偏置电流，其电流大小由像素外提供的偏压(push_bias)控制；M4，M5，M6 管与电容 C2 组成像素内双采样电路；M7 为第二级源跟随管，其偏置电流由列级偏置电路提供，并由 M8 管的行选开关管控制其读出。为避免像素信号读出操作对 PPD 的影响，本设计将 M1 管漏极单独接入电压 $V_{dd_pixelrst}$，其余需要供电的电路被接到电压 V_{dd_pixel}。

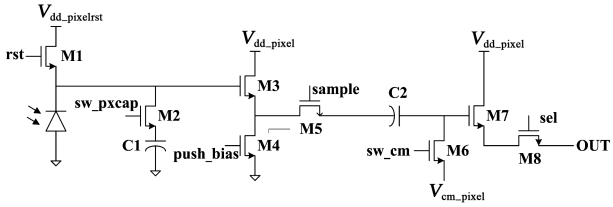


图 2 像素结构示意图

全局快门模式的像素控制时序如图 3 所示，其工作原理为：首先打开 M1 管对 PPD 复位，像素开始曝光；当曝光即将结束时，关闭 M5，M6 管，为 PPD 信号的读出做准备，同时将双采样参考电压 V_{cm_pixel} 输入电容 C2 的正极板；当曝光结束时，偏置电压被输入 M4 管，像素信号电平 V_{sig_pixel} 会通过 M3 源跟随管到达电容 C2 的负极板，此时 C2 上的电压降为式(1)所示，其中 V_{th_m3} 为 M3 管的阈值电压。

$$\Delta V_{C2} = V_{cm_pixel} - (V_{sig_pixel} - V_{th_m3}) \quad (1)$$

当断开 M6 管时，C2 的正极板处于悬空状态，M1 管对 PPD 管进行复位操作，复位电压通过 M3 管到达 C2 的负极板，此时 C2 正极板上的电压为式(2)所示，即在 C2 正极板上得到像素复位电平与信号电平之差，故而 V_{th_m3} 被消除。

$$V_{C2_p} = \Delta V_{C2} + (V_{dd_pixelrst} - V_{th_m3}) = V_{cm_pixel} + V_{dd_pixelrst} - V_{sig_pixel} \quad (2)$$

当各行像素依次输出信号时，首先输出 V_{C2_p} 并存储至读出电路，之后再次闭合该行像素的 M6 管，在 C2 正极板上获得 V_{cm_pixel} 并向外读出，存储至读出电路；在读出电路中进行式(3)的求差操作，此时 V_{cm_pixel} 被消除，获得该行像素的最终有效图像信

号[6]。

$$V_{C2_p} - V_{cm_pixel} = V_{dd_pixelrst} - V_{sig_pixel} \quad (3)$$

上述全局快门控制时序实现了输出信号的双采样处理，其中 M3 源跟随管的阈值电压在输出信号中被消除，有利于降低输出信号的 FPN。相对传统 4T 像素结构而言，基于 3T 的像素结构对像素工艺条件要求较低，满阱容量可设计得更大，除 M1，M3 管外的其他像素内晶体管均可采用标准 CMOS 工艺实现。

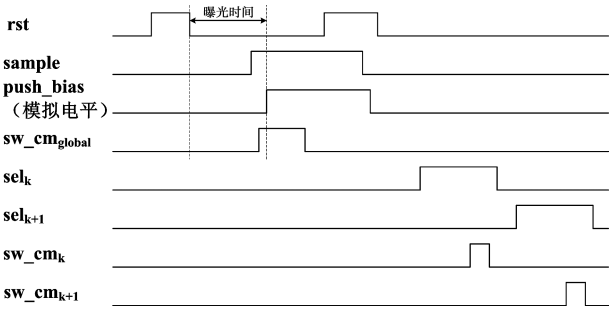


图 3　像素全局快门控制时序

3　读出电路设计

3.1　单通道列级读出电路

高光谱用 CMOS 图像传感器共设计了 64 组输出通道，每组通道在电路结构上对应 32 个列级读出电路，以及 1 组片外输出驱动电路。图 4 为单个输出通道对应列级读出电路阵列（简称单通道阵列）示意图，其中 32 列像素输出的信号从 IN〈0：31〉端输入，进入各列级的模拟信号处理单元（图 4 中的 A 模块），再经过各列级电路中的模拟输出控制开关，最终从 OUT 端口依次输出第 1 列至第 32 列的模拟信号。

单通道阵列的控制时序如图 5 所示，当向输入端 SW 接入高电平时，闭合开关 S6，断开 S5，并向列级电路 SDI 端输入指定长度的高电平（此处为 33 个时钟周期），该高电平脉冲通过移位寄存器向 CHAIN_OUT 输出方向传递，利用移位寄存器传递

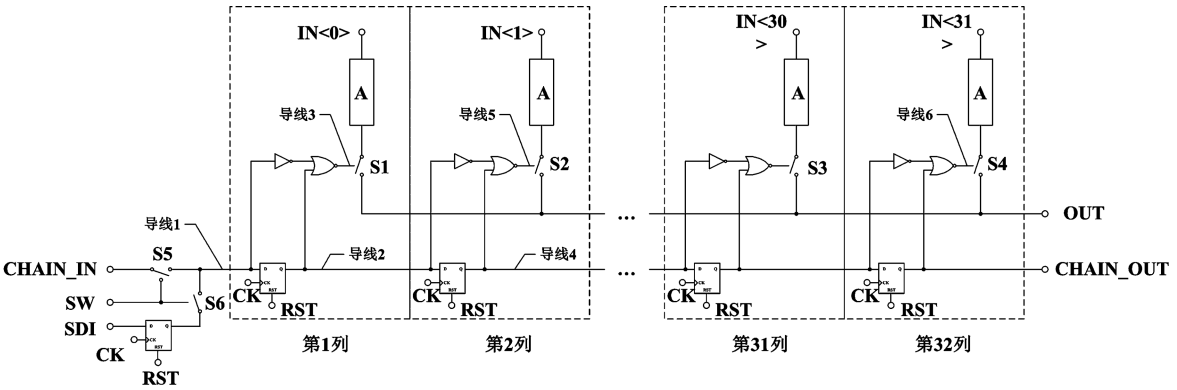


图 4　单通道阵列示意图

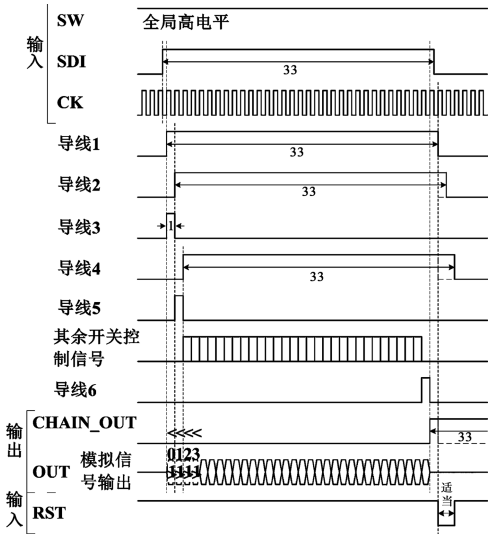


图 5　单通道阵列控制时序

产生的延时与各列级组合逻辑电路生成导线 3 和导线 5 的时序，其余控制信号和导线 6 上的高电平脉冲则用于控制列级其他模拟输出开关。本芯片使用 RST 信号对数字电路进行复位操作，以缩短部分信号的高电平脉冲长度，减少列级电路进入下一个读出周期的时间，提升读出频率。

为了实现模拟信号输出和通道数可选的功能，当单通道阵列的 CHAIN_OUT 输出端向下一级相邻通道的 CHAIN_IN 输入高电平脉冲时，该单通道电路可通过输入端 SW 断开 S6，闭合 S5，向 CHAIN_IN 输入端输入指定长度的高电平脉冲，其原理与图 5 时序相似。

3.2　多通道列级读出电路

该 CMOS 图像传感器的读出通道数最大为

64,为简化描述,下面以 8 个输出通道形成的读出电路为例进行分析。图 6 为 8 个单通道与片外输出驱动电路组成的阵列(下文简称多通道阵列)示意图,当像素信号从 IN〈0：255〉端输入到 I1〈0〉～I1〈7〉的通道阵列,然后通过 EX_OUT〈0：7〉输出到片外,可实现最大 8 通道输出;当选择输出通道数为 2 时,图像信号将通过 EX_OUT〈0〉与 EX_OUT〈4〉输出至片外。为了实现 8 通道、4 通道、2 通道的选择输出,通过输入端 MULTICH_SEL_MERGE〈0：2〉对电路阵列的不同输出通道数进行选择,其中,MULTICH_SEL_MERGE〈0〉连接第 1 组与第 5 组的开关 S1,S3 与 SW 输入端;MULTICH_SEL_MERGE〈1〉连接第 3 与第 7 组的 S1,S3 和 SW;MULTICH_SEL_MERGE〈2〉连接第 2,4,6,8 组的 S1,S3 和 SW。

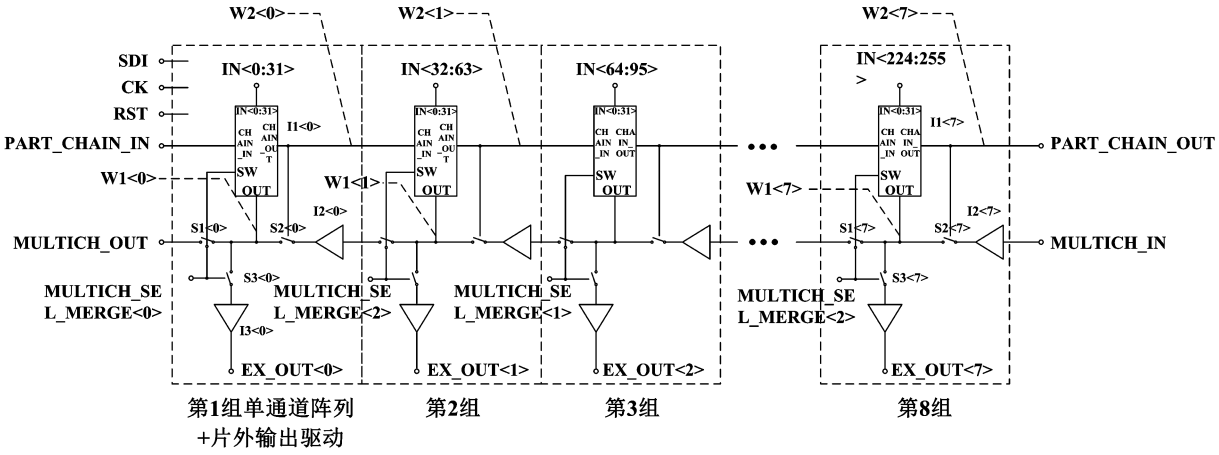


图 6 多通道阵列示意图

若启用 8 通道输出模式,需将 MULTICH_SEL_MERGE〈0：2〉输入总线置为 111,以断开图 6 中的 S1〈0：7〉八个开关、闭合 S3〈0：7〉八个开关并控制 SW 开关,8 通道输出模式下的读出控制时序如图 7 所示。当向 SDI 输入指定长度的高电平后,各单通道阵列按前文所述的工作原理处理模拟信号,然后模拟信号通过缓冲器 I2 和 EX_OUT〈0：7〉输出到片外,实现 8 通道输出功能,其中,缓冲器 I2 为模拟信号提供充足、持续、可克服导线寄生大负载的驱动,是保证信号在大面阵、低输出通道数情况下进行高速传输的关键。在信号读出期间,由于各单通道阵列中的开关 S5 和多通道阵列中的开关 S1 均被断开,开关 S2 在模拟信号输出之前亦保持断开状态,故多通道阵列中的电路组合可以相互独立工作而互不影响。

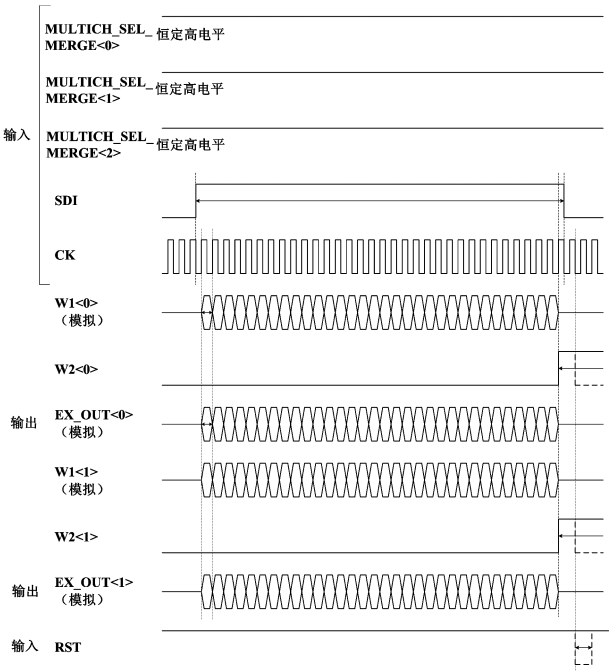


图 7 8 通道输出模式控制时序

若启用 2 通道输出模式,需将 MULTICH_SEL_MERGE〈0：2〉输入总线置为 100,以控制相应开关的状态,并向 SDI 端输入固定长度的高电平,在 SDI 高电平期间,模拟信号按前文所述原理向多通道阵列右端方向传递,通过各组合电路中的缓冲器 I2,最终从端口 EX_OUT〈0〉与 EX_OUT〈4〉输出至片外。4 通道输出模式的工作原理与 2 通道输出模式类似,此处不再赘述。

4 仿真结果

本文对像素和多通道读出电路构成的传感器进行了整体后仿真验证,多通道输出模式下的单通道

数据输出仿真波形如图 8 所示。当行同步信号为高电平时，单通道连续输出一行 32 列经模拟电路处理的像素信号电平，每个信号电平的周期为一个时钟周期，最高输出频率可达 40×10^6 pixel/s，如图 8 中第一个波形所示。为了得到片外模数转换电路采集芯片的模拟信号，需要在片外电路系统上设计可调整延迟时间的数据同步时钟，其频率与芯片主时钟频率一致，如图 8 中第三个波形所示。

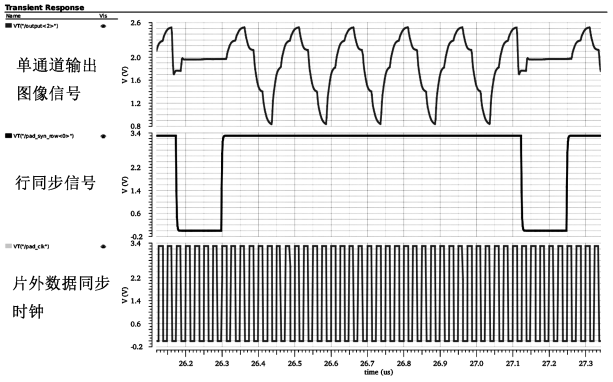


图 8　芯片后仿真波形

芯片的版图采用 4 层金属、1 层多晶、110 nm 的最小工艺尺寸进行设计、仿真和流片验证，整体芯片版图如图 9 所示，版图面积为 56 mm×11 mm，由于芯片尺寸超过了工艺单次曝光允许的最大尺寸，故采用一维拼接工艺技术完成了芯片版图的设计工作[7]。在整个芯片版图中，像素占大部分面积，除读出电路等功能模块版图外，无功能的版图部分均使用电源去耦电容填充[8]。

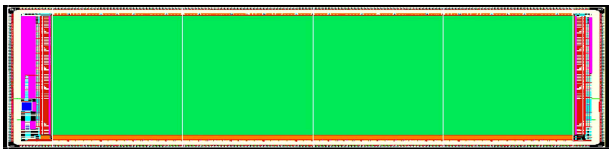


图 9　整体芯片版图

5　结论

针对多种输出通道可选择、高帧频、全局曝光等成像应用需求，本文设计了一种高光谱成像用 CMOS 图像传感器，重点介绍了 8T 像素结构和读出电路的设计方案与工作原理，完成了芯片的整体仿真和流片验证。测试结果表明：芯片的设计符合预期，成像效果良好，具备较高的满阱、全局快门和输出通道数可选的功能，像素内双采样设计实现了图像以较低的固定模式噪声输出，多输出通道可选的读出电路保证了模拟信号在大面阵、低输出通道数条件下的高速、低噪声输出。单通道最大输出频率达 40×10^6 pixel/s，在 2 048×256 像素阵列和 64 通道模式下，可实现最高 4 000 f/s 的帧频输出，满足高光谱成像系统对 CMOS 图像传感器的应用需求。

参考文献：

[1] 王建宇. 成像光谱技术导论[M]. 北京：科学出版社，2011：259-262.
Wang Jianyu. Introduction to Imaging Spectroscopy [M]. Beijing: Science Press, 2011: 259-262.

[2] 郎均慰. 基于 CMOS 图像传感器的高分辨率航天推帚成像光谱仪信息获取技术研究[D]. 上海：中国科学院上海技术物理研究所，2014.
Lang Junwei. Research on information acquisition technology of high resolution space broom imaging spectrometer based on CMOS image sensor [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2014.

[3] Jerram P, Burt D, Morris D, et al. Design of image sensors for hyperspectral applications[C]// Proc. International Society for Optics and Photonics, Sensors, Systems, and Next Generation Satellites Ⅹ Ⅲ, 2009, 7474: 74741E.

[4] 黄张成，黄松垒，陈　郁，等. 20 MPixel/s 高速红外焦平面读出电路设计[J]. 光学与光电技术，2014，12(2)：69-73.
Huang Zhangcheng, Huang Songlei, Chen Yu, et al. Design of 20 MPixel/s high-speed readout integrated circuit for infrared focal plane array[J]. Optics & Optoelectronic Technol., 2014, 12(2): 69-73.

[5] Dierickx B, Dupont B, Jerram P A, et al. CMOS synchronous shutter backside illuminated image sensor for hyperspectral imaging [C]// Bergen: Inter. Image Sensors Workshop, 2009.

[6] Stefanov K D, Dryera B J, Hall D J, et al. A global shutter CMOS image sensor for hyperspectral imaging [J]. Proc. SPIE, 2015, 9602: 12. 2187856.

[7] Scheffer D. A wafer scale active pixel CMOS image sensor for generic X-ray radiology[J]. SPIE, 2007, 6510: 12. 708433.

[8] 理查德·拉扎维. 模拟 CMOS 集成电路设计[M]. 西安：西安交通大学出版社，2003：549.
Razavi Richard. Analog CMOS Integrated Circuit Design[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003: 549.

作者简介：

冯国旭(1977—)，男，吉林长春人，硕士，高级工程师，主要从事激光和探测器应用技术方面研究和科研管理工作；

刘昌举(1981—)，男，重庆梁平人，高级工程师，主要研究方向为 CMOS 图像传感器及专用集成电路设计。

光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.008

菲涅耳透镜下多结电池表面局部高辐射功率对短路电流的影响

江景祥，舒碧芬*，梁齐兵，黄　妍，崔高峻，喻祖康

（中山大学 太阳能系统研究所 广东省光伏技术重点实验室，广州 510006）

摘　要： 为探索以菲涅耳透镜为聚光器的聚光光伏模组中，多结电池中心局部高辐射功率对短路电流的影响，测量菲涅耳透镜的高亮度光斑直径，并据此分别测试室内不同局部光照面积下和户外不同尺寸透镜下的 GaInP/GaInAs/Ge 三结电池的短路电流，利用电路网络模型分析实验结果。结果表明，短路电流与局部聚光的面积无关；小尺寸菲涅耳透镜聚焦下，沿光轴电流与辐射功率同步变化；透镜尺寸增大到一定程度，电池中心局部承受过高辐射功率，电流受峰值隧穿电流限制，宏观体现为焦平面处短路电流下降。电池放置在焦平面两侧，均可缓解局部高辐射功率，短路电流最高提升 8.0%。

关键词： 聚光光伏模组；菲涅耳透镜；多结电池；局部高辐射功率；短路电流；峰值隧穿电流

中图分类号： TM615　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0494－06

Influence of Local High Radiation on Short-circuit Current of Multi-junction Solar Cell under Fresnel Lens

JIANG Jingxiang, SHU Bifen, LIANG Qibing, HUANG Yan, CUI Gaojun, YU Zukang

(Institute for Solar Energy Systems, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Photovoltaic Technology, Guangzhou 510006, CHN)

Abstract: In order to explore the influence of local high radiation on short－circuit current of multi-junction solar cell in concentrated photovoltaic module with Fresnel lens as the concentrator, the diameters of the high bright spot of Fresnel lens were measured so as to measure the short-circuit current of the GaInP/GaInAs/Ge triple-junction solar cell with different sizes of lens under different local illumination areas. And the experimental results were analyzed by using circuit network model. The results show that the short-circuit current is independent of the area of bright spot, and the current along the optical axis changes synchronously with radiation when the small size Fresnel lens is focused. When the size of lens increases to a certain extent, high radiation presents inthe center of solar cell, and the current is limited by peak tunneling current, which is reflected as the decrease of short-circuit current at the focal plane. Putting the solar cell on both sides of the focal plane canalleviatethe local high radiation, and the short-circuit current can be increased by 8.0%.

Key words: concentrated photovoltaic module; Fresnel lens; multi-junction solar cells; local high radiation; short circuit current; tunneling current

收稿日期：2020－03－15.

基金项目：国家自然科学基金项目(U1707603)；广东省自然科学基金重点项目(2014A030311050).

* **通信作者：**舒碧芬

E-mail: shubifen@163.com

0　引言

聚光光伏(Concentrated Photovoltaics，CPV)是光伏发电的主要形式之一，它利用聚光器件将太阳光会聚到面积较小的电池表面，可分为线聚光和点聚光[1-2]。菲涅耳透镜是点聚光技术中主流的聚光器，可使 CPV 模组具有较高的聚光倍数(300～1 000 倍)。菲涅耳透镜聚焦光斑的能量分布形貌为高斯分布[3-5]，中心区域呈现局部高辐射功率，因而聚光模组里多结电池中间区域往往承受远高于电池边缘的光强[6-7]。

聚光光伏模组多采用以Ⅲ-Ⅴ族半导体材料为基础的多结太阳电池。常见的 GaInP/GaInAs/Ge 三结电池由 GaInP 顶电池、GaInAs 中电池、Ge 底电池串联而成。为避免子电池直接串联导致子电池反偏、开路电压抵消等现象[8]，需要在子电池之间插入半导体隧穿结，以构造电流通道，实现低阻连接。理想情况下，隧穿结需具备足够高的峰值隧穿电流密度 J_{peak}，以保证短路电流全部纵向通过隧穿结[9-10]。通常多结电池的短路电流密度 J_{sc} 与辐射功率呈线性关系，但辐射功率增大到一定程度，会出现 $J_{sc}>J_{peak}$ 的情况，此时过剩的电流转变为横向电流和热能，反而降低电池的性能[11-13]。在菲涅耳透镜聚焦下，多结电池表面不可避免出现局部高辐射功率，影响电池的短路电流。此外，电池与透镜的距离不同，聚焦光斑局部高辐射功率的面积和强度不同，同样会对短路电流造成影响。因此，研究菲涅耳透镜聚焦下，沿光轴方向多结电池表面局部高辐射功率对短路电流的影响，对电池的制备、模组光学系统的设计有重要意义。

本文首先研究沿光轴焦平面附近的聚焦光斑，测量光斑局部高辐射功率区域的直径；利用室内多结电池测试平台，根据前述直径测量实验，测试不同局部光照面积下三结电池的短路电流；再利用不同尺寸的透镜进行户外实际工况的实验，测量沿光轴的短路电流；最后通过三结电池三维电路网络模型，分析实验现象和解释局部高辐射功率对电流的影响机理，提出电流提升方案。

1　实验测量

1.1　沿光轴聚焦光斑的直径变化

实验设备包括室内平行光源、可调支架、菲涅耳透镜、受光板等，透镜直径选用 80，100 和 120 mm 三种不同尺寸，焦距为 100 mm。光线垂直入射菲涅耳透镜，经聚焦后在受光板表面形成光斑，利用可调支架调整菲涅耳透镜与受光板之间的距离，测量 −4～4 mm 光轴方向(焦平面处光轴位置 $Z=0$ mm)聚焦光斑的直径变化。

图 1 表示菲涅耳透镜聚焦后形成的光斑，可观察到光斑并非均匀分布，按亮度可将光斑分为内外圈，内圈区域亮度明显更高，表明光斑呈现局部高辐射功率，符合菲涅耳透镜聚焦光斑的能量分布形貌为高斯分布的特点。当受光板位于不同的光轴位置时，光斑能量分布形貌随之变化，测量光斑内圈直径的变化，表 1 为典型光轴位置的内圈直径 D，实验中观察到最小光斑的光轴位置约在 1 mm 处。对于本实验最大的透镜(直径 120 mm)，光斑内圈最大直径约 3.5 mm。

图 1　菲涅耳透镜的光斑示意图

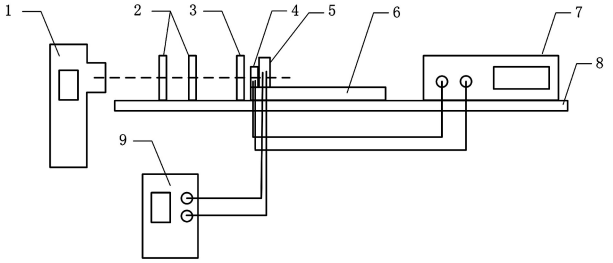
表 1　不同光轴位置的光斑内圈直径

光轴位置	不同尺寸透镜的内圈直径 D/mm		
Z/mm	直径 80 mm	直径 100 mm	直径 120 mm
−4.0	2.5	3.0	3.5
−2.0	1.5	2.0	2.5
0.0	1.0	1.5	2.0
2.0	1.5	2.0	2.5
4.0	2.5	3.0	3.5

1.2　室内局部光照下短路电流测试

菲涅耳透镜聚焦光斑呈高斯分布，实际模组中三结电池中心区域承受局部高辐射功率，可用局部光照的实验手段来模拟透镜聚焦，进而测试光电性能。测试平台如图 2 所示。将其按功能分为三部分：第一部分为光学系统，功能为提供所需的光照，出射均匀性良好的光斑，并调整光斑的直径、光轴位置等；第二、三部分为温度控制系统和测试系统。实验采用尺寸为 5 mm×5 mm 的 GaInP/GaInAs/Ge 三结电池，利用中心开有正方形孔洞的硅片实现局部光照。按照 1.1 节的结论，光斑内圈直径最大约 3.5 mm，本实验选用的开孔边长为 2，2.5，3 和

3.5 mm。实验时硅片置于电池正前方，电池表面接受光照的面积与硅片孔洞一致，以达到局部光照的效果。



1. 稳态氙灯太阳模拟光源；2. 透镜组；3. 中心开孔的硅片；4. 三结电池；5. 水冷散热器；6. 可调位移台；7. 数字源表；8. 光学减震平台；9. 水冷机

图 2 室内聚光光伏光电测试平台

实验结果如图 3 所示，本文采用局部聚光倍数 C 来描述电池表面接收的光能，将其定义为电池接收的辐照度（光辐射功率/孔洞面积）与标准辐照度（10^3 W/m^2）的比值。调整太阳模拟光源的功率，来保证不同光照面积通过相同的辐射功率，实验采用 8 个梯度的辐射功率。实验结果表明，辐射功率一定时，不同局部聚光倍数下短路电流基本相同，电流之间差别不超过 1.35%，可认为短路电流与局部光照的面积无关，只受辐射功率的影响。本实验局部聚光倍数 C 的最大值为 813，因此在聚光倍数为 813 倍以内，此三结电池的短路电流与辐射功率成正比。

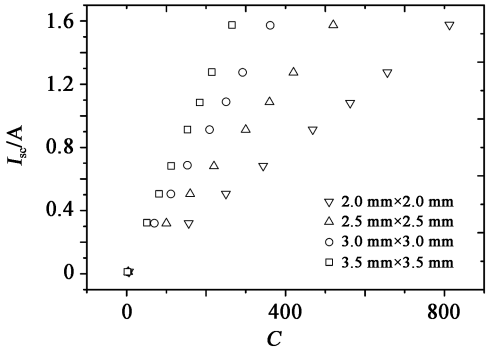
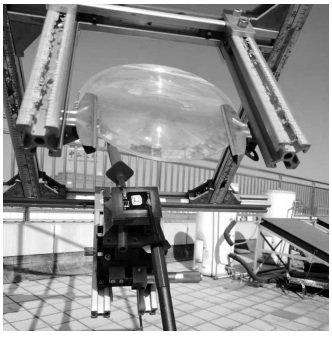


图 3 不同局部光照面积的短路电流随局部聚光倍数的变化

1.3 户外菲涅耳透镜下短路电流测试

利用图 4 所示的实验设备，进行户外菲涅耳透镜下沿光轴的三结电池短路电流测量。图 4(a)为双轴太阳跟踪器，工作平面时刻正对太阳，图 4(b)所示的实验设备固定在太阳跟踪器上，菲涅耳透镜位于三结电池正上方，通过三轴位移台调整三结电池与菲涅耳透镜的距离。分别使用直径为 60，80，100 和 120 mm 的透镜和尺寸为 5 mm×5 mm 的三结电池，测试的光轴范围在−4.0～4.0 mm，步长取 0.5 mm，辐照度为 750～800 W/m^2，环境温度为 24～25 ℃。

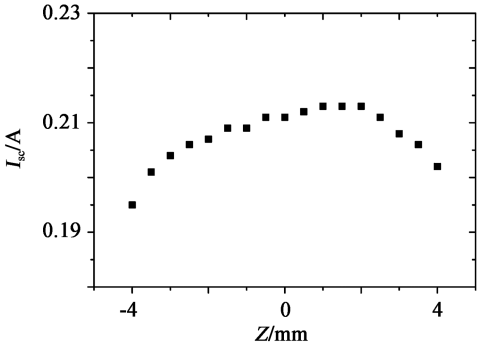
(a) 双轴太阳跟踪器



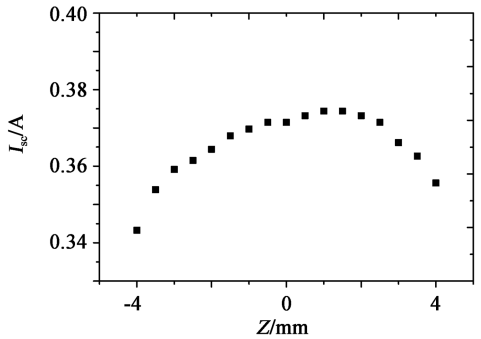
(b) 安装在双轴跟踪器上的实验设备

图 4 实验设备

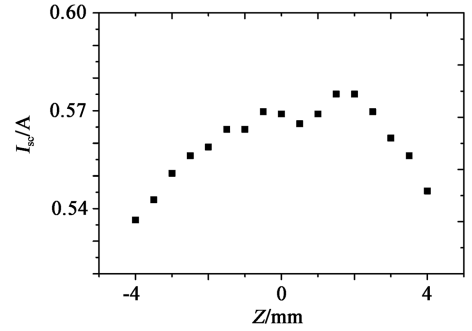
图 5 为不同尺寸的菲涅耳透镜下三结电池短路电流沿光轴的变化，数据为多次实验平均值。从图 5 可见，当透镜直径为 60，80 mm 时，短路电流先增大再减少，焦平面附近区域电流最大，这是由于远离焦平面的位置光斑直径大于电池面积，电池表面辐射功率低。但透镜直径为 100，120 mm 时，焦平面附近的短路电流存在极小值，焦平面两侧有极大值。100 mm 透镜下的焦平面处的短路电流相比两侧极大值分别下降 0.1%和 1.1%，120 mm 透镜下的电流下降幅度更大，分别下降 3.7%和 8.0%。



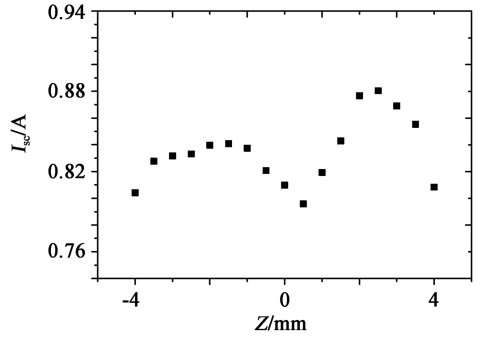
(a) 直径 60 mm



(b)　直径 80 mm



(c)　直径 100 mm



(d)　直径 120 mm

图 5　不同直径菲涅耳透镜下短路电流沿光轴位置的变化

对比 1.2 和 1.3 节的实验，在菲涅耳透镜聚焦下，透镜尺寸较小时，短路电流与辐射功率保持正相关关系，这与局部光照实验结论一致；但随着聚光倍数增大到一定程度，电池表面承受过高的局部辐射功率，短路电流的增长受到限制，宏观上体现为焦平面处的短路电流有所下降，而在焦平面两侧存在电流极大值。

2　理论分析

采用三结电池三维电路网络模型，对 1.2 节、1.3 节中短路电流实验结果进行分析，研究实验现象背后的机理。

2.1　三结电池三维电路网络模型

在聚光光伏模组中，三结电池承受非均匀光照，本文采用三结电池三维电路网络模型，此模型已被证实能很好地表征三结电池在非均匀光照和非均匀温度场的输出特性[14-15]。模型考虑更精细的电池物理结构，把三结电池整体分割为小电池阵列，小电池之间用横向电阻连接，每个小电池的光电特性根据表面的光照情况独立计算，输出特性相互独立。当电池阵列划分的网格足够精细时，模型能很好地匹配局部光照的情况。各子电池的 I-V 关系式如下：

$$\begin{cases} J_{\mathrm{t}} = J_{\mathrm{Lt}} - J_{0\mathrm{t}1}\left(\exp\dfrac{qV_{\mathrm{t}}}{kT}-1\right) - J_{0\mathrm{t}2}\left(\exp\dfrac{qV_{\mathrm{t}}}{2kT}-1\right) \\ J_{\mathrm{m}} = J_{\mathrm{Lm}} - J_{0\mathrm{m}1}\left(\exp\dfrac{qV_{\mathrm{m}}}{kT}-1\right) - J_{0\mathrm{m}2}\left(\exp\dfrac{qV_{\mathrm{m}}}{2kT}-1\right) \\ J_{\mathrm{b}} = J_{\mathrm{Lb}} - J_{0\mathrm{b}1}\left(\exp\dfrac{qV_{\mathrm{b}}}{kT}-1\right) - J_{0\mathrm{b}2}\left(\exp\dfrac{qV_{\mathrm{b}}}{2kT}-1\right) \end{cases} \tag{1}$$

式中，J_{t}，J_{m}，J_{b} 分别代表 GaInP，GaInAs，Ge 子电池的短路电流密度；J_{Lt}，J_{Lm}，J_{Lb} 分别代表各子电池的光生电流密度；$J_{0\mathrm{t}1}$，$J_{0\mathrm{t}2}$，$J_{0\mathrm{m}1}$，$J_{0\mathrm{m}2}$，$J_{0\mathrm{b}1}$，$J_{0\mathrm{b}2}$ 分别代表反向饱和电流密度；V_{t}，V_{m}，V_{b} 分别代表各子电池两端电压。

记子电池的吸收光谱区间为$[a,b]$，每个电池的光生电流密度 J_{L} 必须独立计算，表达式如式(2)：

$$J_{\mathrm{L}} = \int_a^b E(\lambda)S(\lambda)\mathrm{d}\lambda \tag{2}$$

式中，$S(\lambda)$为不同波长下对应的光谱响应值，$E(\lambda)$为不同波长下的太阳辐照度。在模拟计算中，光谱响应值 $S(\lambda)$利用外量子效率 $\eta_{\mathrm{ex}}(\lambda)$来换算[16]：

$$S(\lambda) = \frac{\eta_{\mathrm{ex}}(\lambda)\cdot\lambda\cdot q}{h\cdot c} \tag{3}$$

式中，$\eta_{\mathrm{ex}}(\lambda)$为外量子效率，同样与波长相关；$h$，$c$，$q$ 分别为普朗克常数、光速、电子电量。

考虑到三结电池中间区域可能承受极高的辐射功率，当短路电流过高时，隧穿结不再呈现电阻特性。为更好地反映分割后各个小电池的电流输出特性，子电池之间的隧穿结并不简单地用定值电阻代替，而是根据隧穿结的三种基本工作电流(隧穿电流、过剩电流和热扩散电流)进行模拟[17-18]。隧穿电流是能通过隧穿结并能纵向传导的短路电流，过剩电流为无法通过隧穿结而进行横向运输的电流，热扩散电流则代表电导率低的热扩散过程，三者之和存在峰值，即为峰值隧穿电流密度。

2.2　三结电池短路电流模拟分析

按照前述 1.2 节的实验条件，利用三结电池电

路网络模型，模拟不同局部光照面积下的短路电流，如图 6 所示。对比前述实验测量值可知，模拟值能很好地匹配实验结果，电路网络模型在局部聚光的条件下能很好地反映三结电池的输出特性。从模拟和实验数据可知，在局部聚光倍数 813 倍以内，短路电流与局部光照面积无关，与电池表面的辐射功率保持线性相关。

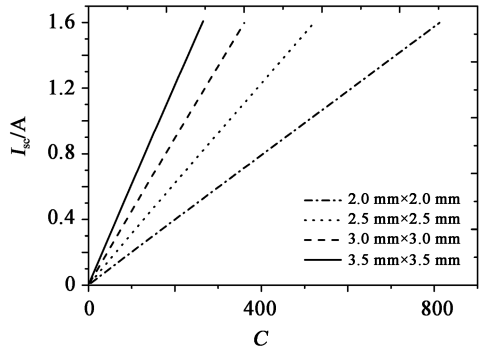
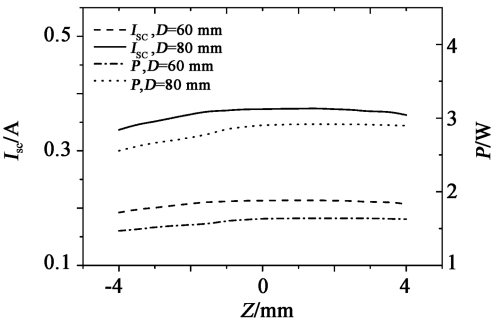
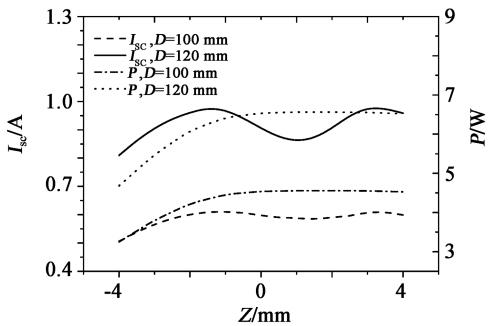


图 6 不同局部聚光面积下短路电流模拟值

利用电路网络模型模拟前述 1.3 节的户外实验，同时分析沿光轴电池表面的辐射功率，如图 7 所示，模拟结果同样与实验结果相吻合。透镜直径为 60 和 80 mm 时，短路电流与辐射功率同步变化；透镜直径为 100 和 120 mm 时，焦平面附近的辐射功率不能被充分转化为短路电流，直径 120 mm 的透镜下降幅度更大，焦平面两侧有短路电流极大值。



(a) 透镜直径为 60 和 80 mm



(b) 透镜直径为 100 和 120 mm

图 7 不同直径菲涅耳透镜下短路电流和辐射功率模拟值

进一步分析菲涅耳透镜下三结电池内部机理，发现当聚光倍数提升到一定程度，电池表面局部强光照会影响短路电流。此时短路电流除了受辐射功率的影响，还受峰值隧穿电流的影响。当各个子电池的电流均小于峰值隧穿电流时，电池内部电流的纵向运输受到限制，电流将无法全部通过隧穿结。

相比于底部隧穿结，通常三结电池顶部隧穿结的峰值隧穿电流密度更低[19]，模拟计算中三结电池的顶部峰值隧穿电流密度按文献[8]取 150 A/cm^2。在直径为 60 和 80 mm 透镜下，各子电池的电流小于峰值隧穿电流，因而三结电池的短路电流变化与辐射功率的变化基本一致，局部高辐射功率不影响短路电流。但在直径为 100 和 120 mm 透镜下，电池中心局部辐射功率过高，短路电流受限。

以直径为 120 mm 的菲涅耳透镜为例，几何聚光比（透镜面积与电池面积之比）为 452 倍，当电池位于焦平面（$Z=0$ mm）时，光斑直径为 3.9 mm，整个光斑的聚光比（透镜面积与光斑面积之比）为 947 倍。而且光斑能量分布形貌为高斯分布，光斑中心局部聚光倍数最高可达 18 800 倍。电池中心局部 0.31 mm^2 的区域短路电流密度 J_{sc} 大于峰值隧穿电流密度 J_{peak}，该区域只有部分光能转化为电流，存在短路电流损失。定义损耗短路电流密度 J_{loss} 为各子电池电流 J_t，J_m，J_b 的最小值与 J_{peak} 的差，计算 $-4\sim4$ mm 光轴区域的三结电池短路电流和损耗短路电流（如图 8），在 $-1\sim3$ mm 的光轴区间两者存在负相关关系。计算三结电池短路电流和损耗短路电流之和，得出两者之和在焦平面附近电流较为平坦，类似直径为 60 和 80 mm 的菲涅耳透镜下短路电流曲线形貌。此外，三结电池放置在稍远离焦平面的光轴位置，J_{loss} 的降低使得短路电流得以优化，在焦平面两侧出现极大值，最多可提升 8.0%。

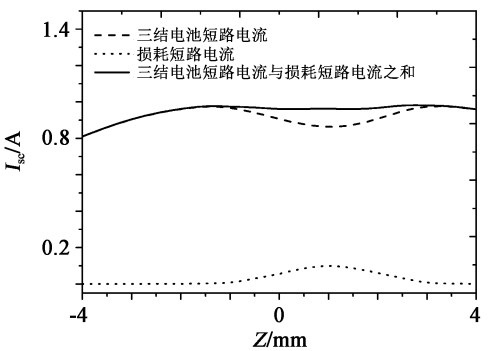


图 8 三结电池短路电流与损耗短路电流的关系

因此在实际工况下，局部高辐射功率不影响短路电流的前提是 $J_{sc}<J_{peak}$。菲涅耳透镜聚焦下的光斑呈显著的高斯分布，当聚光倍数增长到一定程度，在隧穿结的影响下出现短路电流损耗，宏观上表现为焦平面附近三结电池短路电流下降。通过改变电池所在的光轴位置，能有效降低短路电流损耗，从而提升电池的短路电流。

3　结论

考虑聚光光伏模组中多结电池表面存在局部高辐射功率，首先从实验上研究在菲涅耳透镜下，焦平面附近高亮度的内圈光斑直径；然后根据内圈光斑直径，在室内太阳光源下测试局部光照的三结电池短路电流；继而进行户外实际工况的实验，通过数值模拟分析电池内部机理。结果表明，在一定辐射功率下，短路电流与局部光照的面积无关，只与辐射功率有关；户外实际工况中，透镜尺寸较小时，沿光轴短路电流与辐射功率同步变化；但当透镜尺寸增大到一定程度，在焦平面附近存在短路电流极小值。这是由于聚光倍数上升到一定程度时，电池中心局部区域承受极高的辐射功率，局部区域短路电流密度 J_{sc} 受峰值隧穿电流密度 J_{peak} 的限制，造成电池整体短路电流损失。改变菲涅耳透镜和三结电池的距离，可缓解局部高辐射功率，相比焦平面处短路电流可提升 8.0%。

目前商用的聚光模组，尤其是高倍聚光模组的设计和产业化应用，为降低成本大多采用 500 或 1 000 倍的聚光倍数，多结电池中心局部区域可能承受过高辐射功率，输出电流受峰值隧穿电流限制。因此在聚光模组的设计中，需要考虑三结电池峰值隧穿电流和聚光倍数的平衡，可通过增大半导体掺杂浓度、适当降低隧穿结厚度等手段来提高峰值隧穿电流，或采用本文提出的优化三结电池的光轴位置的方法，从而优化模组工作性能。

参考文献：

[1] Luque A L, Viacheslav A. Concentrator Photovoltaics[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 7.

[2] Zhu L, Boehm R F, Wang Y, et al. Water immersion cooling of PV cells in a high concentration system[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(2): 538-545.

[3] Guiqiang L, Qingdong X. Effect of non-uniform illumination and temperature distribution on concentrating solar cell-A review[J]. Energy, 2018, 144: 1110-1136.

[4] Yaling H, Kun W, Yu Q, et al. Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: Non-uniform features, challenges, and solutions[J]. Appl. Thermal Engin., 2019, 149: 448-474.

[5] Garcia I, Rey-Stolle I, Galiana B, et al. A 32.6% efficient lattice-matched dual-junction solar cell working at 1 000 suns [J]. Appl. Phys. Lett., 2009, 94(3): 053509.1-053509.3.

[6] Bunthof L A A, Haverkamp E J, Van d W D, et al. Influence of laterally split spectral illumination on multi-junction CPV solar cell performance[J]. Solar Energy, 2018, 170: 86-94.

[7] Herrero R, Victoria M, Dominguez C, et al. Concentration photovoltaic optical system irradiance distribution measurements and its effect on multijunction solar cells[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2012, 20(4): 423-430.

[8] 宋明辉. 聚光多结太阳能电池的设计、制备及可靠性研究[D]. 武汉：华中科技大学，2012.
Song Minghui. Design, fabrication and reliability study of concentrator multi-junction solar cells[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

[9] Paquette B, Devita M, Turala A, et al. Optimization of p-doping in AlGaAs grown by CBE using TMA for AlGaAs/GaAs tunnel junctions[J]. J. of Crystal Growth, 2013, 374(374): 1-4.

[10] Dimroth F, Beckert R, Meusel M, et al. Metamorphic $Ga_yIn_{1-y}P/Ga_{1-x}In_xAs$ tandem solar cells for space and for terrestrial concentrator applications at $C>1\ 000$ suns[J]. Progress in Photovoltaics Research and Applications, 2001, 9(3): 165-178.

[11] 蔡建九，单智发，张　永，等. 高倍聚光 GaInP/InGaAs/Ge 三结太阳电池研究[J]. 半导体技术，2013，38(4)：241-247.
Cai Jianjiu, Shan Zhifa, Zhang Yong, et al. Research of GaInP/InGaAs/Ge triple junction solar cells for high concentrating photovoltaics[J]. Semiconductor Technology, 2013, 38(4): 241-247.

[12] Guter W, Bett A W. IV-characterization of devices consisting of solar cells and tunnel diodes[C]// Proc. of Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference, 2006: 749-752.

[13] Espinet P, Garcia I, Rey-Stolle I, et al. Extended description of tunnel junctions for distributed modeling of concentrator multi-junction solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(9): 2693-2697.

[14] Steiner M, Guter W. A validated spice network simulation study on improving tunnel diodes by introducing lateral conduction layers[J]. Progress in Photovoltaics Research and Applications, 2012, 20(3): 274-283.

[15] Galiana B, Algora C, Rey-Stolle I, et al. A 3-d model for concentrator solar cells based on distributed circuit units[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2005, 52(12): 2552-2558.

（下转第 504 页）

光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.009

半导体激光器温度调谐波长扫描技术

柯文雄，江　毅*

（北京理工大学 光电学院，北京 100081）

摘　要： 低成本、小型化的波长扫描半导体激光器在光纤传感系统中有着重要作用。设计了一种可进行温度调谐的半导体激光光源驱动电路。该电路系统以ARM单片机作为控制中心，利用热敏电阻采样激光工作温度，并通过半导体制冷器（TEC）进行温度调节，使得激光器能够根据温度调谐实现波长扫描；同时通过背向光探测器（PD）采样激光输出功率，并通过改变半导体激光驱动电流实现对激光输出功率的控制，使得激光器在温度变化时输出光功率保持稳定。实验结果表明，该电路能够长时间可靠地工作，激光器能够实现的最大波长调谐范围为5 nm，且输出光功率在整个波长扫描过程中保持稳定。

关键词： 半导体激光器；驱动电路；温度调谐；波长扫描；半导体制冷器

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0500－05

Temperature-tuning Based Wavelength Scanning Technology for Semiconductor Lasers

KE Wenxiong, JIANG Yi

(School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, CHN)

Abstract: Low-cost and miniaturized semiconductor lasers play an important role in optical fiber-sensing system. In this paper, a design of semiconductor laser driving circuit for temperature tuning is experimentally presented. Using the ARM chip as the core controller, the design applies a thermistor to collect the temperature signal, and uses the thermoelectric cooler (TEC) to control the temperature, thus the wavelength scanning of the laser can be achieved by temperature-controlled tuning. Then the output power is collected by a photo diode (PD), and the optic power of the laser is controlled by electric current, so that the optic power can keep stable with the changing temperature. Experiments results show that the circuit can work reliably for a long time, the max temperature tuning range reaches 5 nm, and the output optical power remains stable during the whole wavelength scanning process.

Key words: semiconductor laser; driving circuit; thermal tuning; wavelength scanning; thermoelectric cooler

0　引言

半导体激光器以其单色性好、体积小、成本低、转换率高、易调谐等优点，广泛应用于光纤传感系统[1-2]。根据半导体激光器的温度特性——温度变化能够引起激光中心波长漂移，可以通过对温度的连续改变，使得半导体激光器输出波长在一定范围内进行扫描。然而半导体激光器输出光功率容易受温度、电流等变化的影响而产生波动，光功率的波动影响了激光器工作的稳定性，同时，半导体激光器存在容易被静电、电网冲击和浪涌电流破坏等问题。因此，半导体激光器需要配套相应的驱动电路，以保证激光器工作准确、稳定和可靠。

收稿日期：2020－03－23.

基金项目：国家自然科学基金项目(61775020,61575021)；国家“863”计划项目(2015AA043504).

* **通信作者：**江　毅　**E-mail：** bitjy@bit.edu.cn

本文设计了一种半导体激光波长扫描驱动电路，该电路能通过温度调谐实现波长扫描，且激光输出光功率在波长扫描过程中保持稳定。该设计通过对激光器的工作温度进行周期调谐，实现对激光器输出波长的周期扫描。同时，通过调整激光器的驱动电流大小，补偿半导体激光器输出功率随温度变化而产生的波动，使得激光器输出功率保持稳定。

1　硬件电路设计

蝶形 DFB 激光器性能稳定、价格低廉，在光学实验室中被广泛使用。本设计选用中心波长为 1 550.1 nm 的 14 针蝶形 DFB 激光器，如图 1 所示，该封装内部集成了激光二极管（LD）、背光检测器（PD）、半导体制冷器（TEC）和热敏电阻（TH）4 个主要模块。

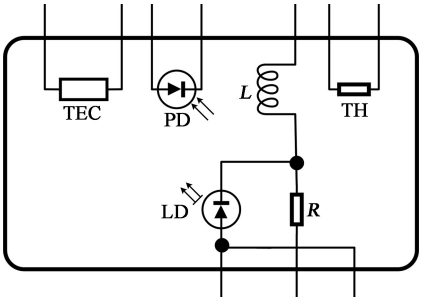


图 1　蝶形 DFB 激光器示意图

系统主要框图如图 2 所示，整个系统以 ARM 作为控制核心，主要分为温度采样电路、温度控制电路、功率采样电路和功率控制电路 4 个主要部分。ARM 选用 STM32F103 嵌入式处理器，通过 ARM 自带的 ADC 对热敏电阻采样的温度信号和背光检测器采样的功率信号进行模数转换。同时，ARM 通过控制 TEC 的电流方向实现加热或制冷，从而控制激光器的工作温度；采用数字电位器对激光器驱动电流进行控制，以控制激光器的输出光功率。

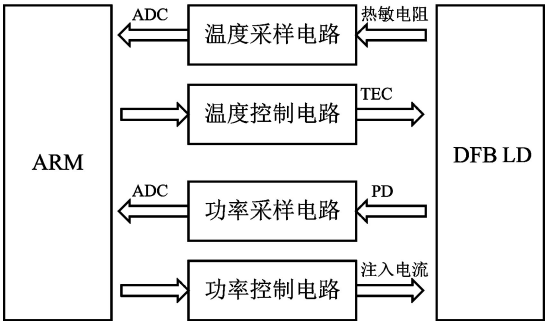


图 2　系统整体构成框图

1.1　ARM 芯片选择

STM32F103RG 是一款基于 ARM Cortex-M3 架构内核的 32 位处理器，其时钟频率最高可达到 72 MHz，芯片内置 128 kB 的 FLASH、20 kB 的 SRAM、2 个 SPI 通信接口、2 个 ADC 以及多个定时器等资源。其中内置的 ADC 为 12 bit、1 μs AD 转换时间，最高拥有 17 个采样通道，支持双采样、数据保持以及同步采样等功能[3]。

1.2　温度采样电路

半导体激光器集成的热敏电阻是负温度系数电阻，该电阻阻值随温度升高而减小，在 25 ℃时阻值为 10 kΩ。通过检测热敏电阻的阻值可以测出激光器内部温度[4-5]。

如图 3 所示，本设计采用惠斯通平衡电桥结构测量热敏电阻阻值，热敏电阻 R_t 上的电压信号能反映半导体激光器的工作温度。取电阻 $R_1=R_3$，电阻 R_2 和热敏电阻 R_t 的电压偏差为

$$\Delta U=\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}-\frac{R_t}{R_t+R_3}\right)\cdot V_{DD} \tag{1}$$

当激光器工作温度为 0 ℃时，电阻 R_2 和热敏电阻 R_t 的电压偏差 $\Delta U=0$。

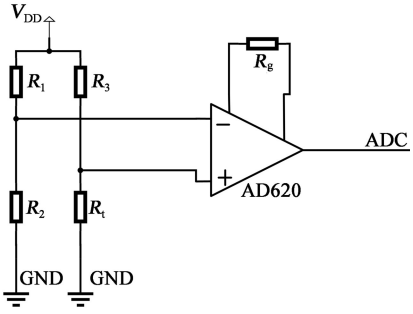


图 3　温度采样电路

电压偏差 ΔU 通过仪表放大器 AD620 进行隔离放大。AD620 是一种低成本、高精度的仪表放大器，其放大系数 G 由增益电阻 R_g 决定，计算公式为

$$G=\frac{49.4\ \text{k}\Omega}{R_g}+1 \tag{2}$$

放大后的电压偏差量 ΔU 输出到 STM32 片内集成的 ADC，通过数模数转换后进行采样。

1.3　温度控制电路

半导体激光器的工作温度会影响激光器内部的光栅周期，进而使输出激光波长发生漂移。当温度升高时，输出光波长会随之增大，发生红移；反之则发生蓝移。激光器的温度调谐系数为 1 nm/10 ℃，当激光器的温度连续变化时，半导体激光器的输出

光波长会进行相应扫描[6-7]。

本设计通过半导体制冷器(TEC)对激光器进行制冷或加热。如图 4 所示,本设计通过 2 个 N 沟道 MOS 管和 2 个 P 沟道 MOS 管组成 H 桥结构对 TEC 电流进行控制。MOS 管能通过 5 A 以上的大电流,功耗损失小、开关反应迅速,适合用于对 TEC 进行开关控制。ARM 通过 GPIO 管脚发出逻辑电平信号 A_1~A_4,该电平信号经过非门进行隔离,同时将 ARM 输出的高电平+3.3 V 转换为+5 V,用于驱动 MOS 管的开关。当 Q_1,Q_4 导通,Q_2,Q_3 不导通时,电流正向流过 TEC,此时 TEC 进行制冷;当 Q_2,Q_3 导通,Q_1,Q_4 不导通时,电流反向流过,此时 TEC 进行加热。在加热和制冷的过程中,激光器芯片工作温度连续改变,此时输出光波长连续扫描。此外,电阻 R_4 为限流电阻,改变 R_4 大小可以改变通过 TEC 的电流大小,因此针对实验中对波长扫描周期的要求,需要改变所使用 R_4 的阻值。

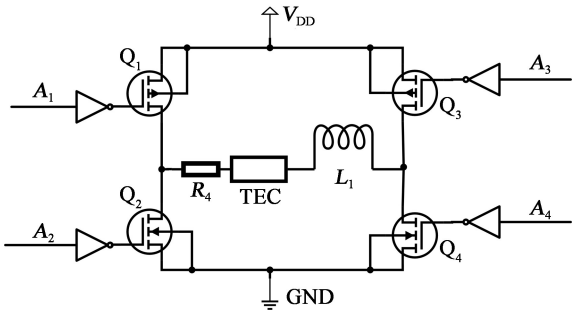


图 4 温度控制电路

1.4 功率采样电路

DFB 激光器有两个输出面:主光输出面输出的光是供用户使用的输出光,次光输出面输出的光是背向光。背向光功率与输出光功率成正比,因此可以用来检测激光器的光功率。激光器内部集成的背向光电二极管用来检测激光器的输出光功率[8]。

如图 5 所示,光电二极管 PD 通过光电转换得到光电流信号,电流信号经过由运放 OPA37 组成的电流电压转换电路转换为电压信号,其中 C_1 是滤波电容,R_5 是反馈电阻,电压信号 U 和电流 I 的转换公式为

$$U = I \cdot R_5 \tag{3}$$

电压信号 U 输出到 STM32 片内集成的 ADC,经过模数转换后进行采样。

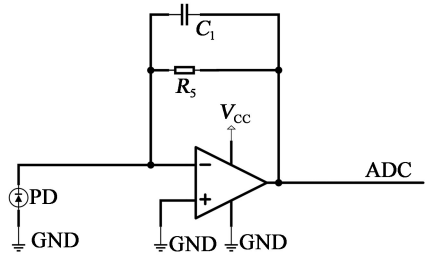


图 5 功率采样电路

1.5 功率控制电路

激光器工作温度会影响其输出光功率。当激光器温度上升时,激光器的热阻会增加,导致激光器的输出光功率减少;反之,当激光器温度降低时,激光器的热阻会减少,输出光功率增加。因此对激光器进行温度调谐时,激光器输出光功率会随着激光器的工作温度变化而产生波动。为了使激光器输出光功率保持稳定,需要增加或减少激光器的驱动电流,对输出光功率进行补偿[9-10]。

如图 6 所示,当电阻 R_8 增大时,该电阻分压变大,因此运放 OPA37 的输入电压增大,其输出端电压会随之增大,即场效应管 Q_5 的栅极电压增大。于是从 Q_5 漏极流向源极的电流增大,此电流即激光器的驱动电流。同理,当电阻 R_8 减小时,激光器的驱动电流会减少。在本设计中,电阻 R_8 选用有 256 个阶梯的数字电位器,其最大阻值为 10 kΩ,ARM 通过 SPI 接口可以实时调整电阻 R_8 的大小,进而实现对激光器驱动电流的控制。

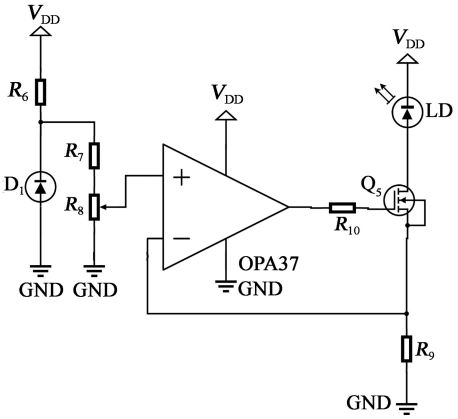


图 6 功率控制电路

2 嵌入式程序设计

在完成硬件电路的设计后,需要对 ARM 进行编程才能完成激光器控制功能。本设计程序采用 C 语言编写,在 Keil5 上进行开发编译。软件能够完成对激光器温度调谐范围、激光器功率稳定值的设定等功能,程序框图如图 7 所示。

主要程序部分包括:

(1)系统初始化。初始化 ARM 的系统资源，主要包括 ARM 的时钟、中断、ADC 等资源的初始化。

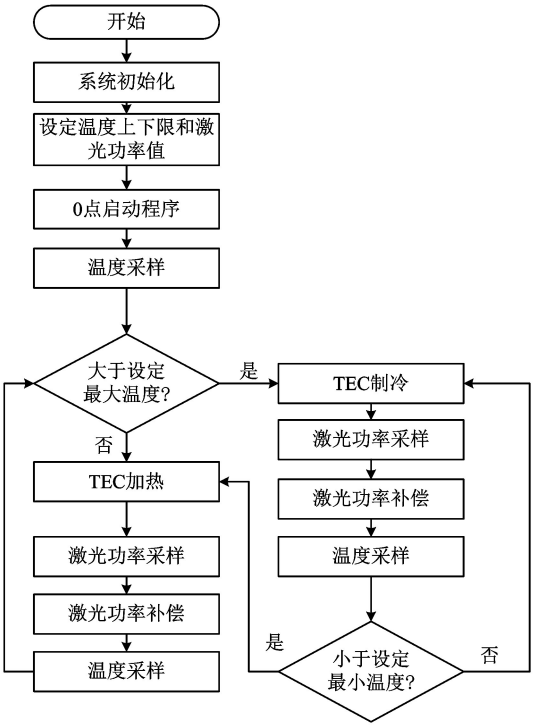


图 7　程序流程框图

(2)设定温度上下限和激光功率值。根据调谐范围和激光输出功率的实际需求，设定激光器调谐范围的上下限温度 T_1，T_2 和激光器输出光功率 P 的具体数值，温度将在 $T_1 \sim T_2$ 之间变化，同时激光输出光功率将稳定在 P 附近。

(3)0 点启动程序。刚上电时，将激光器的驱动电流设置为 0，即激光器不输出光。将电阻 R_8 的阻值设置为 0，此时激光器的驱动电流为 0。然后逐步增大电阻，激光器工作电流随着电阻增加而增大，此时激光器的输出光功率也会随之增大。当采样的激光器输出光功率等于预设的功率值时，停止增加电阻值。0 点启动程序能够有效防止激光器因为上电过程中瞬间产生过大的冲击电流而损坏，延长激光器的使用寿命[11]。

(4)功率补偿程序。在温度变化的过程中，通过改变激光器驱动电流对激光器输出光功率进行补偿，使得激光器输出光功率在温度变化时保持稳定。当采样的输出光功率大于设定值时，减小 R_8 的电阻值，激光器驱动电流会随之减小，使得激光器的输出光功率减小；反之，若采样的输出光功率小于设定值，则增大 R_8 的电阻值，激光器的驱动电流随之增大，使得激光器的输出光功率增大。

(5)温度调谐程序。通过热敏电阻采样激光器的温度，通过改变 TEC 的电流方向，使激光器加热或制冷。首先使激光器加热，当采样的激光器工作温度大于或等于设定的最高温度时，停止加热；然后进行制冷，当采样的激光器工作温度小于或等于设定的最小温度时，停止制冷。不断重复加热和制冷过程，使激光器在设定温度范围内周期性变化，此时激光器的输出波长会随着温度变化进行扫描。

3　实验结果

在室温环境(约 25 ℃)下，通过嵌入式程序设定激光器的最高温度为 50 ℃，最低温度为 5 ℃，同时将激光输出功率设定为 14 mW。

当激光器稳定扫描后，通过示波器采集驱动电路输入到 ARM 的 ADC 中的功率电压信号和温度电压信号，分别如图 8 和 9 所示。通过光波长计可以看到激光器的波长随着温度变化而发生相应漂移：大约每 10 ℃的温度变化能够带来 1 nm 的波长移动。同时，当温度在 60 ℃附近时，过高的温度使得激光器无法稳定工作。因此最大温度调谐范围设定为 0～50 ℃，此时波长调谐范围为 5 nm。

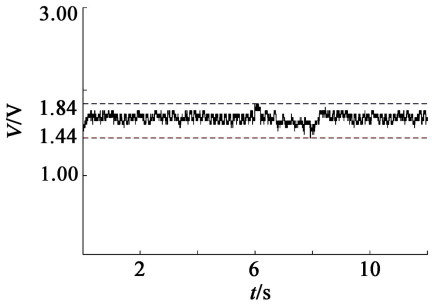


图 8　功率电压信号图

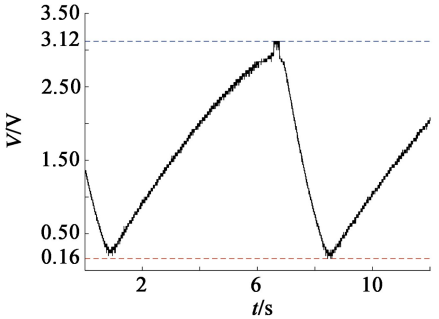


图 9　温度电压信号图

实验结果表明，该激光器驱动电路能够对激光器进行温度调谐，同时激光器输出光功率保持相对稳定，符合设计要求。

4 总结

本文设计的半导体激光驱动电路以STM32F103RG系列ARM芯片作为主控芯片，实现了半导体激光器温度调谐，其中温度调谐范围为0～50 ℃，波长调谐范围为5 nm，在温度改变过程中激光器的输出光功率能够保持稳定。通过嵌入式程序能够调整激光器的温度变化范围和输出光功率稳定值。同时，通过引入0点启动程序，减少了因激光器上电时的冲击电流而产生的损坏，可有效延长激光器的工作寿命。实验证明，本设计电路正确有效，能够保证激光器长时间稳定地工作。

参考文献：

[1] 孙 安，陈嘉琳，李国扬，等. 基于高频微波技术的分布式光纤传感器布里渊散射信号检测[J]. 中国激光，2007，34(4)：503-506.
Sun An，Chen Jialin，Li Guoyang，et al. Detection of spontaneous Brillouin backscattered power in distributed optical fiber sensor system based on high frequency microwave technology[J]. Chinese J. of Lasers，2007，34(4)：503-506.

[2] 陈学岗，万 雄，朱泉水. LD温度控制系统在光纤磁场传感器中的应用[J]. 传感器技术，2004，23(3)：51-53.
Chen Xuegang，Wan Xiong，Zhu Quanshui. Application of LD temperature control system in optical fiber magnetic field sensors[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2004，23(3)：51-53.

[3] 崔春艳，胡新宁，赵尚武，等. 一种光纤传感器光源驱动电路的设计[J]. 传感器与微系统，2007，26(9)：98-100.
Cui Chunyan，Hu Xinning，Zhao Shangwu，et al. Design of driving circuit for fiber-optic sensor light source[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2007，26(9)：98-100.

[4] STMicroelectronics Corporation. STM32F103xx Datasheet [H]. ST Microelectronics Corporation，2015.

[5] Chen C. Evaluation of resistance-temperature calibration equations for NTC thermistors[J]. Measurement，2009，42(7)：1103-1111.

[6] 李金义，杜振辉. 利用热敏电阻精确测量DFB激光器动态结温度[J]. 仪器仪表学报，2012，33(9)：2088-2093.
Li Jinyi，Du Zhenhu. High precision dynamic junction temperature estimation for DFB laser using thermistor[J]. Chinese J. of Scientific Instrument，2012，33(9)：2088-2093.

[7] 邱选兵，李 宁，孙冬远，等. 小型化高稳定半导体激光驱动电路研究[J]. 激光与红外，2018，48(4)：469-475.
Qiu Xuanbing，Li Ning，Sun Dongyuan，et al. Research on driving circuit for miniaturized high stable semiconductor laser [J]. Laser & Infrared，2018，48(4)：469-475.

[8] Chen K，Lin G T. Optimization of multiple-module thermoelectric coolers using artificial-intelligence techniques [J]. Inter. J. of Energy Research，2002，26(14)：1269-1283.

[9] 伏燕军，邹文栋，肖慧荣，等. 半导体激光器驱动电路的光功率控制的研究[J]. 红外与激光工程，2005，34(5)：626-630.
Fu Yanjun，Zou Wendong，Xiao Huirong，et al. Optic power control of LD drive circuit[J]. Infrared and Laser Engin.，2005，34(5)：626-630.

[10] 李成仁，宋昌烈，李淑凤，等. 半导体激光器输出波长随工作电流变化的实验研究[J]. 红外与激光工程，2003，32(2)：144-147.
Li Chengren，Song Changlie，Li Shufeng，et al. Experimental investigation of the change of semiconductor laser output wavelength corresponding to operation current[J]. Infrared and Laser Engin.，2003，32(2)：144-147.

[11] 梁 迅，姚 琼. 高稳定高集成度半导体激光光源驱动器[J]. 半导体光电，2007，28(3)：427-429.
Liang Xun，Yao Qiong. High stability and highly integrated laser diode driver[J]. Semiconductor Optoelectronics，2007，28(3)：427-429.

作者简介：

柯文雄(1994－)，男，福建人，硕士，主要研究方向为光纤传感系统；

江 毅(1967－)，男，博士，教授，主要研究方向为光纤传感器。

(上接第499页)

[16] Chander S，Purohit A，Nehra A，et al. A study on spectral response and external quantum efficiency of mono-crystalline silicon solar cell [J]. Inter. J. of Renewable Energy Research，2014，5(1)：41-44.

[17] Bett A W，Baur C，Dimroth F，et al. FLATCON/spl trade/-modules：technology and characterisation[C]// Proc. World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion. IEEE，2003，1：634-637.

[18] 陈 帅，杨瑞霞，吴亚美. Ⅲ-Ⅴ多结太阳电池隧道结模型的研究进展[J]. 微纳电子技术，2015，52(9)：6-14.
Chen Shuai，Yang Ruixia，Wu Yamei. Research process of tunnel junction models in Ⅲ-Ⅴ multi-junction solar cells[J]. Micronanoelectronic Technology，2015，52(9)：6-14.

[19] Steiner M，Guter W，Peharz G，et al. A validated SPICE network simulation study on improving tunnel diodes by introducing lateral conduction layers [J]. Progress in Photovol. Research and Appl.，2012，20(3)：274-283.

作者简介：

江景祥(1994－)，男，广东江门人，硕士生，研究方向为聚光光伏技术；

舒碧芬(1966－)，女，博士，教授，主要从事太阳能利用、节能技术，以及纳米能源材料方面的研究。

光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.010

基于随机光栅的可调谐随机光纤激光器

沈成荣[1]，董新永[1,2]*

（1. 中国计量大学 光学与电子科技学院，杭州 310018；2. 广东工业大学 信息工程学院，广州 510006）

摘　要： 提出一种基于随机光栅与高反射布拉格光栅（FBG）相结合的可调谐随机光纤激光器。利用 980 nm 泵浦光源泵浦一段 7 m 长的掺铒光纤（EDF）进行增益放大，由随机光栅提供随机反馈。随机光栅长 7 cm，具有约 10 000 个折射率修改点，这些点由飞秒激光逐点写入，并沿光纤方向随机分布，两点相邻间隔小于 10 μm。同时，利用中心波长为 1 548 nm 的高反射 FBG 来组成半开放腔结构，实现了随机激光的输出。实验测得的泵浦阈值功率仅为 18 mW，斜率效率高达 13.2%，并通过改变 FBG 的中心波长，实现了输出激光波长的可调谐，调谐范围为 4.45 nm（1 548.04～1 552.49 nm）。得益于半开放式激光腔的设计和 EDF 的高增益，整个系统具有阈值低、效率高、结构简单等优点。

关键词： 光纤激光器；随机光纤激光器；随机光栅

中图分类号： TN242　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0505－04

Tunable Random Fiber Laser Based on Random Grating

SHEN Chengrong[1], DONG Xinyong[1,2]

（1. Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, CHN;
2. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, CHN）

Abstract: A tunable random fiber laser based on random grating and high reflection FBG is proposed. A 980 nm pump light source is used to pump a 7 m long erbium-doped fiber for gain amplification, and random feedback is provided by a random grating. The random grating is 7 cm long and has about 10,000 refractive index modification points. These points are written point by point by the femtosecond laser and randomly distributed along the fiber direction. The distance between the two points is less than 10 μm. At the same time, a semi-open cavity structure was formed by using a high-reflection FBG with a center wavelength of 1 548 nm to achieve random laser output. The experimentally measured pump threshold power is only 18 mW, and the slope efficiency is as high as 13.2%. By changing the center wavelength of the FBG, the output laser wavelength can be tuned with a tuning range of 4.45 nm (1 548.04～1 552.49 nm). Thanks to the design of the semi-open laser cavity and the high gain of EDF, the entire system has the advantages of low threshold, high efficiency, and simple structure.

Key words: fiber laser; random fiber laser; random grating

0　引言

随机光纤激光器（RFL）是一种基于光纤中随机分布反馈效应的新型随机激光器，它具有结构简单、方向性好和低相干输出等优点，可用于非线性光学、无散斑成像、光纤通信和传感等领域[1-6]。目前，大多数报道的随机光纤激光器都是在长距离单模光纤中，通过受激拉曼散射（SRS）或受激布里渊散射（SBS）的反向瑞利散射来获得增益[7-11]。但是，光纤

收稿日期：2020－04－21.
基金项目：国家自然科学基金项目(61775204).
* **通信作者：**董新永　**E-mail：**911989353@qq.com

中 SRS 或 SBS 的增益效率相对较低，并且由于光纤玻璃结构内的不均匀性导致的后向瑞利散射非常弱，这使得激光操作变得十分困难，通常需要数十千米长的单模光纤，而且需要较高的激光泵浦阈值[12-15]。另一方面，掺铒光纤(EDF)激光器已经在仪器测试、光学传感器和光谱学(包括低阈值，窄带宽和宽波长调谐范围)中引起了极大的关注。目前，已经有研究通过使用 EDF 代替拉曼增益来作为增益介质，与独特的光纤光栅组合，获得了低泵浦阈值随机光纤激光器[16-22]。

基于上述问题，本文提出了一种利用飞秒激光逐点写入的随机光栅(Random Grating)作为随机分布反馈介质，结合 EDF 作为增益介质的可调谐随机光纤激光器。利用高反射布拉格光栅(FBG)作为反射端镜，使整个结构形成半开放腔，在 980 nm 泵浦光的激励下，实现了阈值功率为 17 mW 的随机激光输出。与此同时，利用调谐装置改变 FBG 的中心波长实现了输出激光波长的可调谐，调谐范围为 4.45 nm(1 548.04～1 552.49 nm)。由于 EDF 的高增益和半开放腔的结构设计，整个系统具有阈值低、激光转换效率高以及有效结构短等优点。

1 激光器结构与原理

基于随机光栅的可调谐随机光纤激光器的实验装置如图 1 所示，它由一个最大输出功率为 300 mW 的 980 nm 泵浦光源、一个 980/1 550 nm 波分复用器(WDM)、一段 7 m 长的 EDF、一个随机光栅和一个高反射 FBG 组成。其中，WDM 的公共端连接掺铒光纤，输入端连接 980 nm 泵浦光源，反射端连接高反射 FBG，从而起到波分复用的作用；EDF 作为增益介质起到增益放大的作用；与此同时，随机光栅提供全波段的随机分布反馈。高反射 FBG 的中心波长为 1 548 nm，3 dB 带宽为 0.12 nm，FBG 作为反射端镜，使整个系统成为半开腔系统，这样可以显著降低随机光纤激光器的阈值功率，并用应力调谐装置来改变 FBG 的中心波长，从而达到波长可调谐的目的。用分辨率为 0.02 nm 的光学光谱仪(OSA)和光功率计来测量输出功率，并在 FBG 一侧的光纤尾部切割成约 8°的倾斜角来消除光纤末端的菲涅耳反射。

本文所使用的随机光栅是由飞秒激光逐点写入的，其栅区长度为 7 cm，具有约 10 000 个折射率修改点，并沿单模光纤轴向随机分布，两个折射率修改点的间隔小于 10 μm。随机光栅的输出谱如图 2 所示，其提供的随机反馈强度比 10 km 长的单模光纤所提供的反馈强度更高。增强的折射率具有不均匀性，产生反向瑞利散射效应具有随机性，因此会产生随机分布的光反馈。

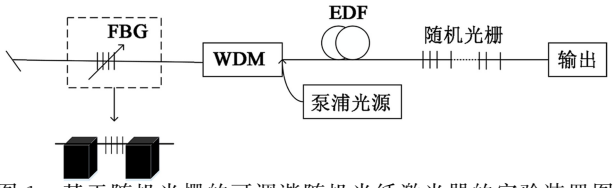


图 1 基于随机光栅的可调谐随机光纤激光器的实验装置图

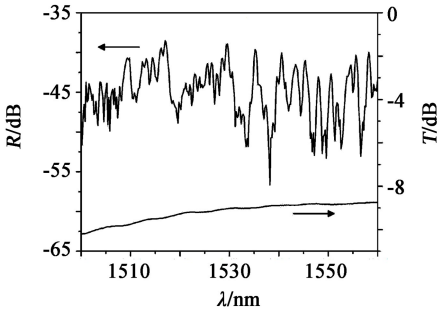


图 2 随机光栅的输出谱

随机光纤激光器的工作原理为：泵浦光通过 WDM 耦合进入 EDF，对其进行激励，铒离子吸收泵浦光能量后，从基态跃迁至高能级状态，然后以无辐射的方式跃迁到亚稳态能级，铒离子不断吸收泵浦光能量而在上能级聚集，当其数目达到一定值后，会从亚稳态跃迁到基态并辐射光子，最终实现能级间的粒子数反转，从而产生受激辐射，对通信波段的光进行光增益放大。一方面，由于随机光栅的随机分布反馈作用，在经过 FBG 的高反射之后，光增益会在 EDF 中放大。随着泵浦功率的增加，当系统的总增益克服了激光腔中的总损耗时，就会发生谐振，形成随机激光的输出。在这个过程中，随机光栅的点间距是随机分布的，所以其提供反馈的谐振腔的腔长和相位都不是固定的，因此该系统为随机光纤激光器。另一方面，在实现随机激光的输出后，利用应力调谐装置对高反射 FBG 施加轴向应变，通过改变高反射 FBG 的中心波长，来实现可调谐随机光纤激光器。

2 激光器的输出特性

图 3 显示了当高反射 FBG 的中心波长固定为 1 548 nm 时，在不同功率下测得的激光输出光谱。从图中可以发现，产生随机激光的阈值为 18 mW，

由于窄带宽 FBG 的选频滤波作用，只出现了一个主激光峰。在泵浦功率 P_p 为 30 mW 时，在主峰左边出现了一个侧峰。在泵浦功率到 50 mW 时，在峰值处分裂出两个主峰。随着泵浦功率的增加，侧峰有时消失，有时又会出现。光学信噪比(OSNR)则显著增加。另一方面，对输出光谱的具体数值进行分析，可以得到：随着泵浦功率的增加，激光输出的中心波长向长波方向偏移 0.05 nm，3 dB 幅值增加了 0.04 dB，OSNR 逐渐增加到 55 dB。

这可能是因为泵浦功率的增加导致了更多的激光模式被激发，而这些模式的波长并不完全相同，从而导致激光发射光谱的展宽和波长发生变化。同时，由于高反射 FBG 会将谐振腔的大部分功率都返回光学谐振腔，从而进一步加强腔内的模式竞争。除此之外，激光功率的增加会引起非线性效应，这也会使激光光谱变宽，从而影响激光的输出光谱。

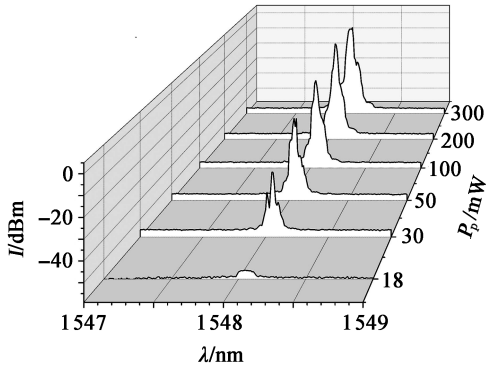


图 3　当高反射 FBG 的中心波长为 1 548 nm 时，在不同功率下测得的激光输出光谱

为了进一步研究该随机激光器的输出特性，不对 FBG 施加任何应力，将泵浦功率维持在 300 mW 的最大功率，在 25 ℃的实验室环境下，每 2.5 min 测量一次随机激光输出光谱，总共测 10 次。测量结果如图 4 所示，可以得出波长和功率波动分别为 0.04 nm 和 1.5 dB。可见光纤布拉格光栅窄宽带的滤波作用，使得输出激光的中心波长较为稳定。另一方面，在该泵浦功率下，激光腔内的模式竞争比较强烈，尤其是前 5 min 和 5～10 min 的功率波动比较明显，10 min 之后波动趋缓。该实验结果表明激光结构具有良好的稳定性。

在高反射 FBG 的中心波长为 1 548 nm 时，该光纤随机激光器的输出功率随泵浦功率的变化曲线如图 5 所示。从图中可以看出，在泵浦功率为 300 mW 时，激光器的输出功率 P_{out} 为 36.7 mW，斜率效率达到了 13.2%，这与普通(非随机)光纤激光器的效率相当。

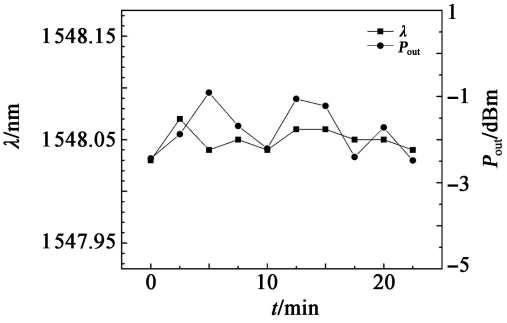


图 4　在泵浦功率为 300 mW 时，不同时间下的输出光谱

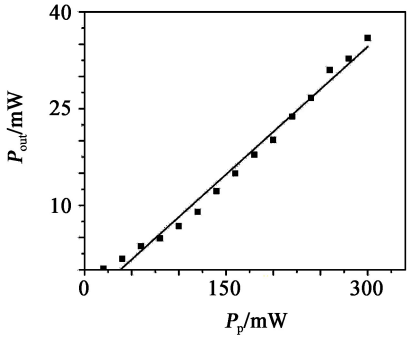


图 5　光纤随机激光器的输出功率随泵浦功率变化曲线

利用高反射 FBG 的选频滤波特性，可以通过改变 FBG 的中心波长，实现输出激光的波长可调谐。调节泵浦功率至 300 mW 并保持不变，通过应变装置改变 FBG 的轴向应变量。每改变一个应变，待输出激光稳定后，记录其激光输出光谱。随机激光的输出光谱与应变幅度 σ 的关系如图 6 所示。其调谐范围最大可达 4.45 nm(1 548.04～1 552.49 nm)，并且最大功率波动仅为 3 dB，在随机激光的正常波动范围内。其波长漂移量与应力幅度基本成线性关系。

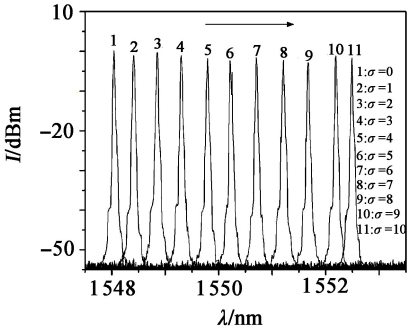


图 6　随机激光的输出光谱与应变幅度的关系

3　结论

利用高浓度 EDF 进行增益放大，以飞秒激光逐

点写入的随机光栅作为随机反馈介质，实现了一种具有低阈值、较高稳定性的可调谐随机光纤激光器，并对其光谱特性和输出特性做了研究。实验中，利用飞秒激光逐点写入了 10 000 个折射率调制点形成随机光栅，并使用高反射 FBG 形成半开腔系统。最终获得的随机激光输出的阈值功率仅为 18 mW，斜率效率为 13.2%。通过 FBG 的调谐装置，实现输出激光波长的可调谐，调谐范围最大可达 4.45 nm(1 548.04～1 552.49 nm)。实验结果表明，本文提出的随机光纤激光器具有低阈值、高转换效率以及较高稳定性等优点。这种基于无源器件的简单且紧凑的结构，在实际应用中非常有吸引力，特别是在光纤光学传感、光通信和生物医学研究领域。

参考文献：

[1] Ambartsumyan R, Basov N, Kryukov P. A laser with a nonresonant feedback[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 1966, 2(9): 442-446.

[2] 胡朋兵，董新永. 随机分布反馈光纤激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2011，48(11)：18-23.
Hu Pengbing, Dong Xinyong. Research progress in random distributed feedback fiber laser[J]. Laser & Optoelectron. Progress, 2011, 48(11): 18-23.

[3] Fotiadi A A. Random lasers: An incoherent fibre laser[J]. Nature Photon., 2010, 4(4): 204-205.

[4] Redding B, Choma M A, Cao H. Speckle-free laser imaging using random laser illumination[J]. Nature Photon., 2012, 6(6): 355-359.

[5] Tao Z, Bao X, Chen L. A self-gain random distributed feedback fiber laser based on stimulated Rayleigh scattering [J]. Opt. Communications, 2012, 285(6): 1371-1374.

[6] Wang L, Dong X, Shum P P, et al. Tunable erbium-doped fiber laser based on random distributed feedback[J]. IEEE Photon. J., 2014, 6(5): 1-5.

[7] Liu Y, Dong X, Jiang M, et al. Multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on random distributed feedback[J]. Appl. Phys. B, 2016, B122(9): 240-241.

[8] Huang C, Dong X, Nan Z, et al. Multiwavelength Brillouin-erbium random fiber laser incorporating a chirped fiber Bragg grating[J]. IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron., 2014, 20(5): 294-298.

[9] Huang C, Dong X, Zhang S, et al. Cascaded random fiber laser based on hybrid Brillouin-erbium fiber gains[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014, 26(13): 1287-1290.

[10] Wang L, Dong X, Shum P P, et al. Random laser with multiphase-shifted Bragg grating in Er/Yb-codoped fiber[J]. J. of Lightwave Technol., 2015, 33(1): 95-99.

[11] Pang M, Xie S, Bao X, et al. Rayleigh scattering-assisted narrow linewidth Brillouin lasing in cascaded fiber[J]. Opt. Lett., 2012, 37(15): 3129.

[12] Lizarraga N, Puente N P, Chaikina E I, et al. Single-mode Er-doped fiber random laser with distributed Bragg grating feedback[J]. Opt. Express, 2009, 17(2): 395.

[13] Song J, Dong X, Guo Z, et al. Random laser with Erbium-doped fiber and FS-laser introduced random fiber grating, 2018[C]// Proc. 2018 Asia Communications and Photonics Conf., 2018.

[14] Fan M, Wang Z, Wu H, et al. Low-threshold, high-efficiency random fiber laser with linear output[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2015, 27(3): 319-322.

[15] Xu Y, Gao S, Lu P, et al. Low-noise Brillouin random fiber laser with a random grating-based resonator[J]. Opt. Lett., 2016, 41(14): 3197.

[16] Gagne M, Kashyap R. Random fiber Bragg grating Raman fiber laser[J]. Opt. Lett., 2014, 39(9): 2755.

[17] Hu Z, Gao P, Xie K, et al. Wavelength control of random polymer fiber laser based on adaptive disorder[J]. Opt. Lett., 2014, 39(24): 6911.

[18] Sugavanam S, Tarasov N, Shu X, et al. Narrow-band generation in random distributed feedback fiber laser[J]. Opt. Express, 2013, 21(14): 16466.

[19] Sugavanam S, Yan Z, Kamynin V, et al. Multiwavelength generation in a random distributed feedback fiber laser using an all fiber Lyot filter[J]. Opt. Express, 2014, 22(3): 2839.

[20] 朱俊梅，张伟利，饶云江，等. 低阈值随机分布反馈光纤激光器的输出特性[J]. 中国激光，2013，40(3)：35-41.
Zhu J, Zhang W, Rao Y, et al. Output characteristics of low-threshold random distributed feedback fiber laser[J]. Chinese J. of Laser, 2013, 40(3): 35-41.

[21] Babin S A, El-Taher A E, Harper P, et al. Tunable random fiber laser[J]. Phys. Rev. A, 2011, 84(2): 4903-4911.

[22] Pinto A M R F. Interrogation of a suspended-core Fabry-Perot temperature sensor through a dual wavelength Raman fiber laser[J]. J. of Lightwave Technol., 2010, 28(21): 3149-3155.

作者简介：

董新永(1975—)，男，博士，研究员，主要从事光纤激光器、光纤通信和光纤传感等方面的研究。

材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.011

湿法黑硅工艺中银残留对太阳电池性能的影响

黄钧林[1,2]，范维涛[1,2]，张　鑫[1,2]，程　晶[1,2]，沈鸿烈[1*]

（1. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院，南京 210016；2. 维科诚(苏州)光伏科技有限公司，江苏 苏州 215121）

摘　要： 采用银金属辅助化学腐蚀技术在多晶硅衬底上制备了黑硅绒面，通过能谱仪、扫描电子显微镜和反射率测试仪对所制备黑硅样品的表面银金属残留、形貌和光吸收进行了表征和分析。在此基础之上，通过扩散、腐蚀清洗、镀膜和印刷烧结测试等工序，将多晶黑硅样品制备成太阳电池片，并通过 *I-V* 和 EL 测试仪对其光伏性能和电致发光特性进行了测量和分析。结果表明，与无银残留样品规则、均匀的圆形腐蚀坑绒面相比，黑硅制备过程中如果有银离子残留在表面，扩孔后的表面形貌呈现为方向杂乱和深浅不一的凹坑状形貌，且凹坑周围边界尖锐、形状不规则，制备成电池后转换效率偏低 3.03%。

关键词： 金属辅助化学腐蚀；银残留；绒面；太阳电池；效率

中图分类号： TM914.4　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0509－04

Effect of Silver Residue in MACE Process on the Performance of Solar Cells

HUANG Junlin[1,2], FAN Weitao[1,2], ZHANG Xin[1,2], CHENG Jing[1,2], SHEN Honglie[1]

(1. College of Materials Science & Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, CHN; 2. WKC(Suzhou) Energy Technol. Co. Ltd., Suzhou 215121, CHN)

Abstract: Black silicon with textured surface was prepared on mc-Si by metal assisted chemical etching (MACE) technique using Ag element. The surface Ag residues, morphology and optical absorption of the prepared black silicon samples were characterized and analyzed by energy dispersive spectrometer, scanning electron microscope and reflectivity tester. On this basis, solar cells were fabricated with the black silicon samples with standard processes of diffusion, etching, PECVD coating, screen printing and sintering. And their electrical and electroluminecence (EL) properties were characterized and analyzed by *I-V* and EL test. The results show that compared with the regular and uniform circular texture surface without Ag residues, the surface morphology of black silicon samples with Ag residues was disorderly in direction and different in depth. The efficiency of the related solar cell was 3.03% lower than that of the normal cell due to the sharp boundary around the pit and the irregular shape.

Key words: MACE; Ag residue; textured surface; solar cell; efficiency

0　引言

采用金刚线切割的多晶硅片由于表面存在非晶硅层，采用常规的酸制绒法无法获得理想的绒面[1-2]。将黑硅技术应用于金刚线切割多晶硅片上，可以制备出符合要求的绒面。制备黑硅的技术主要有 5 种，分别是飞秒激光法、反应离子腐蚀法、化学腐蚀法、等离子浸没法及金属辅助化学腐蚀法[3-4]。目前行业内主要采用的是金属辅助化学腐蚀法，其不仅可以在常规的多晶硅片上制备黑硅绒面，而且在柔性衬底、超薄硅片及铸锭单晶硅片上均可制备出良好的黑硅绒面[5]。金属辅助腐蚀法制备黑硅的技术俗称湿法黑硅工艺，主要有单金属离子腐蚀，如 Ag 离子辅助刻蚀、Cu 离子辅助腐蚀以及双金属离

收稿日期：2020－01－13.

* 通信作者：沈鸿烈　E-mail：hlshen@nuaa.edu.cn

子辅助腐蚀，如 Cu/Ag 离子混合辅助腐蚀、Cu/Ni 离子混合辅助腐蚀。通过金属辅助化学腐蚀技术，可在金刚线切割多晶硅片表面形成金子塔、倒金字塔、碗状结构、蜂窝结构等不同的绒面形貌[6-8]，其反射率在 300～1 100 nm 波段可低至 5.8%。其中碗状结构的黑硅绒面制备成黑硅后最高效率可达 19.17%，在产线上采用金属辅助腐蚀法制备的黑硅片封装的组件最高功率可达 279.74 W[9-11]。

太阳电池的制备工艺对硅片表面的洁净度要求非常高，任何杂质的残留都会造成电池的效率降低甚至失效。特别是金属污染对太阳电池的影响更加严重，Cu，Fe 和 Ni 等金属对太阳电池的影响已经被深入研究[12-15]。在太阳电池工艺的湿法制程中，各种杂质的引入都可能造成电池片性能的下降，双氧水的杂质含量对多晶黑硅太阳电池的影响已经被研究证明，其可导致单片减重 0.03 g，反射率提高 2%，效率降低 0.06%[16]。

在湿法黑硅工艺中，将银作为催化金属，增加了清洗的难度。本文研究发现，如果有银残留在硅片表面，即使表面反射率有所下降，用这种硅片制备的太阳电池的转换效率反而偏低，说明银金属残留对太阳电池性能有明显的负面影响，必须在后续工艺中将其彻底清洗干净。

1 实验方法

1.1 黑硅绒面的制备

实验用硅片为金刚线切割的多晶硅片，尺寸为 156.75 mm×156.75 mm，电阻率为 1～3 Ω·cm，厚度为(200±20) μm。采用德国 RCT 公司生产的链式黑硅制绒机进行样品绒面的制备，热扩散方式进行扩散制备 pn 结，水平式刻蚀机去除表面 PSG 及边缘的 pn 结，管式 PECVD 镀膜机制备减反射膜，丝网印刷机制备前后表面电极。

图 1 为银离子辅助腐蚀技术制备黑硅绒面的工艺流程图，采用一步法的制备工艺。首先采用一定比例的 $AgNO_3$，HNO_3 和 HF 溶液在硅片表面初步腐蚀出纳米绒面，经过表面水洗处理后使用高浓度的 HNO_3 去除硅片表面残留的银离子，然后使用 HNO_3 和 HF 对初步形成的纳米绒面扩孔，制备出微纳米复合的黑硅绒面，经过 KOH，HF 和 HCl 进行碱洗和酸洗之后烘干便完成了黑硅绒面的制备。

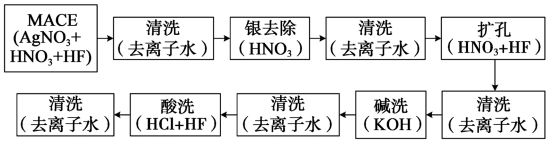


图 1 湿法黑硅工艺流程图

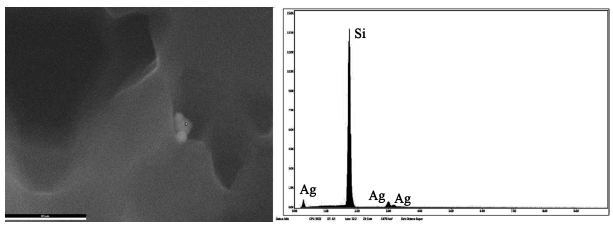
1.2 样品性能表征

本文采用图 1 所示的工艺流程完成黑硅绒面制备后，选取了有银离子残留(样品 A)和无银离子残留(样品 B)的样片作为研究对象，样品 A 是未经过图 1 流程中的第三步，即未经过高浓度硝酸的清洗去银的制绒硅片，样品 B 是全流程制备的制绒硅片。采用能谱仪(EDS)、扫描电子显微镜(SEM)和反射率测试仪分别对制绒后黑硅样品的能谱、形貌和反射率进行了表征。将两类样品经过扩散、腐蚀清洗、PECVD 镀膜和印刷烧结之后制备成了电池片样品，采用 HALM 测试仪和 EL 测试仪分别对制备电池片的 *I-V* 电性能和电致发光性能进行表征。

2 结果与讨论

2.1 样品表面银颗粒残留分析

图 2(a)，(b)分别为样品 A 的 SEM 和 EDS 能谱表征测试图。图 2(a)显示硅片绒面腐蚀坑底部较深的位置有白色残留物质存在。对其进行 EDS 表征发现其组成主要是银元素，表明硅表面有银颗粒未去除干净，存在银颗粒残留。此类型样品在扩孔槽中，由于银离子的催化作用，硅片会与溶液中的 HNO_3 及 HF 发生剧烈反应，伴随大量气泡和附加腐蚀现象的出现。样品 B 中未发现银金属残留。



(a) SEM 图像 (b) EDS 测试谱图

图 2 样品 A 的 SEM 图像与 EDS 测试谱图

2.2 两种样品反射率的比较

图 3 为样品 A 和 B 表面反射率 *R* 的测试曲线，测试波长范围为 350～1 100 nm。从图中曲线可以看出，样品 A 和 B 的反射率均在黑硅绒面最佳的反射率范围内。其中有银离子残留的样品 A，其反射率较无银离子残留的样品 B 偏低，尤其在可见和红外波段，反射率偏低较为明显，从光吸收单一角度来看，银离子残留的样品光吸收效果反而更好。结合图 4 分析可知这是由于银离子残留导致了在扩孔工

艺中的附加腐蚀，使硅片表面形成的绒面结构不规则，光线到达硅片表面后，能够形成更多次的反射而进入硅片体内，而无银离子残留的样品表面形成了规则的碗状结构，不会造成更多次的光反射。

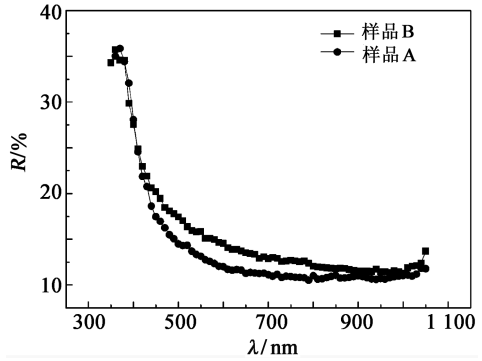
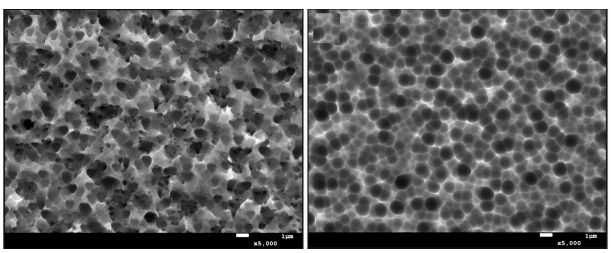


图 3　样品 A 和样品 B 的表面反射率曲线对比图

2.3　黑硅绒面的形貌分析

采用 SEM 对样品 A 和 B 进行了表面微观形貌测试分析，如图 4 所示。从图 4 可以看出，有银残留的样品 A 表面腐蚀坑形貌呈现出方向杂乱无章、大小和深浅不一的特点，腐蚀坑周围边界尖锐，有部分凹坑往硅片体内延伸；而无银离子残留的样品 B 表面腐蚀坑呈现规则的圆形，均匀分布在硅片表面，腐蚀坑形貌圆滑，连接处未见尖锐边界。



(a)　样品 A　　(b)　样品 B

图 4　硅片表面微观形貌 SEM 图比较

当硅片表面沉积有金属离子，其与 HF 和 HNO_3 混合溶液发生各向同性的电化学反应，反应速度远大于硅在 HF 和 HNO_3 溶液中的腐蚀速度。结合图 1 和图 2 分析可知，有银离子残留的硅片在扩孔槽内与 HF 和 HNO_3 溶液发生反应时，表面的反应速率有较大差异，银离子残留位置的反应速率远高于常规硅片表面的腐蚀速率，且银离子残留多少、残留区域离子集中度等因素使硅片存在多种反应速率，进而导致了杂乱无章、大小和深浅不一、边界尖锐腐蚀坑的出现。而没有银离子残留的硅片，在扩孔反应时表面反应类型单一，反应速率均匀，形成腐蚀坑的形貌也较为规则。

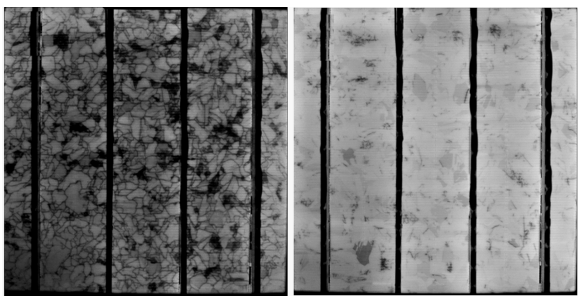
2.4　太阳电池特性比较

表 1 为样品 A 和 B 制备成电池片后的电学性能比较，从表中数据可以看出，有银离子残留的硅片制备成电池片后电性能参数表现较差，其开路电压(V_{oc})、短路电流(I_{sc})、填充因子(F_F)和并联电阻(R_{sh})分别为 0.597 V，8.48 A，77.24%和 201 Ω，较无银离子残留的样品分别偏低 0.037 V，0.66 A，2.99%和 546 Ω；它们的串联电阻(R_s)和漏电流(I_{rev2})分别为 0.003 05 Ω 和 0.534 9 A，分别是无银离子残留样品的 1.78 倍和 6.27 倍，最终导致太阳电池的转换效率(E_{ta})偏低 3.03%。结合图 4 的结果可知，由于银离子残留导致了样品表面的结构较杂乱，且存在很多的深坑和尖锐的边角，这些结构会导致样品在高温热扩散制备 pn 结时无法制备均匀的发射极，且在 PECVD 制备钝化膜时无法完全钝化其表面，甚至可能存在裸硅区域。这样的结构导致了样品表面存在大量的复合中心。因此制备成电池片后，开路电压严重偏低，电子无法传输到电极，因而短路电流也偏低。

表 1　二种样品制备太阳电池的电学性能比较

组别	V_{oc}/V	I_{sc}/A	F_F/%	E_{ta}/%	I_{rev2}/A	R_s/Ω	R_{sh}/Ω
样品 A	0.597	8.48	77.24	16.06	0.534 9	0.003 05	201
样品 B	0.634	9.14	80.23	19.09	0.085 3	0.001 71	747

图 5 为样品 A 和 B 制备电池片的 EL 测试图片，从图 5(a)可以看出，有银离子残留的样品制备成电池片以后，表面存在较多的缺陷和载流子复合中心，在 EL 测试中呈现出大面积的黑色区域，尤其是晶界处较为明显。没有银离子残留的硅片制备成的电池片缺陷和复合中心较少，EL 测试图像优于有银离子残留的样品。



(a)　样品 A　　(b)　样品 B

图 5　样品 A 和 B 制备电池片的 EL 测试图像

综合以上分析可以看出，在黑硅绒面的制备过程中，银离子残留以及因其引起的黑硅绒面形貌的差异，对电池片制造工艺和太阳电池的电学性能有诸多重要影响。首先，残留在腐蚀坑中的银离子在

硅片表面形成了大量缺陷和复合中心，这是电池片的 R_{sh} 偏低和 I_{rev2} 偏高的重要原因之一；其次，银离子残留使黑硅表面形成较多方向杂乱无章、大小和深浅不一、边界尖锐的腐蚀坑，这些无规则的腐蚀坑对于电池片后续工艺尤其是热扩散和 PECVD 镀膜工序影响较大，沿不同方向往硅片体内延伸、边界尖锐的腐蚀坑容易引起扩散磷源沉积和推进、镀膜 SiN_x 沉积时出现局部不均匀现象，使硅片表面 pn 结质量和钝化效果变差、少子寿命降低，这是导致电池片 V_{oc}，I_{sc} 和 F_F 偏低、转换效率下降的重要原因；第三，表面残留的银离子在扩散、烧结高温的推进下，扩散进入硅片内部，使硅片体少子寿命减小的效应，对太阳电池转换效率的下降也有一定影响。

3 结束语

本文采用金属辅助化学腐蚀技术在多晶硅衬底上制备了黑硅绒面，研究了银离子残留对黑硅绒面形貌和电池片电性能的影响。研究发现，在黑硅绒面的制备过程中，残留的银离子使黑硅表面形成大小、方向和深浅不规则的腐蚀坑，导致电池的后续工序无法完美地钝化绒面结构，在硅片表面形成了大量缺陷和复合中心，使得太阳电池的转换效率偏低。本文的结果表明，在制备黑硅绒面时，要将银离子去除干净，才能够制备出规则的绒面以实现对硅片表面的有效钝化，最终使表面多吸收的入射光转化，提升多晶硅太阳电池的转换效率。

参考文献：

[1] 陈春明，沈鸿烈，李琰琪，等. 金刚线切割多晶硅片表面酸制绒效果研究[J]. 半导体光电，2019，40(2)：68-72，78.
Chen Chunming，Shen Honglie，Li Yanqi，et al. Study on acid texturization of diamond wire sawn multicrystalline silicon[J]. Semiconductor Optoelectronics，2019，40(2)：68-72，78.

[2] 刘小梅. 金刚石线锯切割多晶硅片的表面性质与刻蚀制绒方法研究[D]. 南昌：南昌大学，2014.
Liu Xiaomei. Studies of surface properties and texturization methods of diamond wire sawn multi-crystalline silicon wafers [D]. Nanchang：Nanchang University，2014.

[3] Tan Qiulin，Lu Fengxiang，Xue Chenyang，et al. Nano-fabrication methods and novel applications of black silicon[J]. Sensors & Actuators：A. Physical，2019，295：560-573.

[4] Yang Xiaoqin，Zhang Wan. Influence of bowl-like nanostructures on the efficiency and module power of black silicon solar cells[J]. Solar Energy，2019，189：67-73.

[5] Nam N. Investigation on surface morphological and optical properties of black silicon fabricated by metal-assisted chemical etching with different etchant concentrations[C]// IOP Conf. Series：Earth and Environmental Science，2019，268：1-8.

[6] Auwal A，Azlan A，Mohd Z. Optimization of etching time for broadband absorption enhancement in black silicon fabricated by one-step electroless silver-assisted wet chemical etching[J]. Optik，2019，187：74-80.

[7] Zhang Pengfei，Sun Hengchao，Tao Ke，et al. An 18.9% efficient black silicon solar cell achieved through control of pretreatment of Ag/Cu MACE[J]. J. of Materials Science，2019，30(9)：8667-867.

[8] Nur A，Noor S. Effects of etching time towards broadband absorption enhancement in black silicon fabricated by silver-assisted chemical etching[J]. Optik，2019，176：586-592.

[9] Gao K，Shen H L，Liu Y W，et al. Enhanced etching rate of black silicon by Cu/Ni co-assisted chemical etching process [J]. Materials Science in Semiconductor Processing，2018，88：250-255.

[10] Sheng Guizhang，Zou Yuxin，Li Shaoyuan，et al. Controllable nano-texturing of diamond wire sawing polysilicon wafers through low-cost copper catalyzed chemical etching[J]. Materials Lett.，2018，221：85-88.

[11] Cao Fang，Chen Kexun，Zhang Jingjiao，et al. Next-generation multi-crystalline silicon solar cells：Diamond-wire sawing，nano-texture and high efficiency[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells，2015，141：132-138.

[12] Helene L，Erwann P，Sebastien D，et al. Controlling surface contamination issues in the fabrication environment of high efficiency crystalline silicon-based homojunction solar cells [J]. Energy Procedia，2017，124：745-751.

[13] Sylke M，Stefanie W，Christian H. Advanced metal contamination analysis for high efficiency solar cell manufacturing[J]. Energy Procedia，2016，92：369-373.

[14] Tleuzhan T，Sebastien D. Influence of copper contamination on the illuminated forward and dark reverse current-voltage characteristics of multicrystalline p-type silicon solar cells[J]. Physica Status Solidi (c)，2014，11：11-22.

[15] Coletti G，Bronsveld P，Hahn G，et al. Impact of metal contamination in silicon solar cells[J]. Advanced Functional Materials，2011，21(5)：879-890.

[16] 于 琨，王占友，郑海陆，等. 双氧水的杂质含量对多晶硅片制绒的影响[J]. 太阳能，2019(7)：43-46.
Yu Kun，Wang Zhanyou，Zheng Hailu，et al，Effect of impurity content of H_2O_2 on the texture of Mc-Si[J]. Solar Energy，2019(7)：43-46.

作者简介：

黄钧林(1988—)，男，江西人，硕士，主要研究方向为高效太阳电池技术；

沈鸿烈(1958—)，男，江西人，教授，博士生导师，研究方向为先进光电/电光转换材料与器件、新能源材料与应用技术等。

材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.012

IC基板传输机器人末端执行器结构拓扑优化设计

祝锡晶[1]，郭　宵[1]，林知微[2*]，陈祥玺[3]

（1. 中北大学 机械工程学院，太原 030051；2. 北京理工大学 自动化学院 智能系统协同创新研究中心，北京 100081；
3. 浙江轩业精密制造有限公司，浙江 台州 317500）

摘　要： 在半导体封装基板检测的传输过程中，末端执行器对其快速稳定高效率的传输起着关键作用。在满足设计强度、刚度的条件下，以末端执行器轻量化为目标，建立了末端执行器的三维模型，利用有限元分析软件ANSYS对基板传输机器人末端执行器进行静力学和模态分析，得到末端执行器在最大载荷情况下的应力、应变特性和对应的振型，并对其进行拓扑优化设计，根据拓扑优化结果建立新的末端执行器结构，对新的结构进行强度校核，验证设计方案的有效性。研究结果表明，优化后末端执行器的前四阶固有频率都大于伺服电动机的回转频率(50 Hz)，质量减少了26.7%，较好地实现了轻量化的目标，同时为后续的相关产品研制提供了一种新的技术方案。

关键词： 半导体基板；有限元分析；结构设计；拓扑优化；轻量化

中图分类号： TH692.9　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0513－04

Topology Optimization Design of End-actuator of IC Substrate Transmission Robot

ZHU Xijing[1], GUO Xiao[1], LIN Zhiwei[2], CHEN Xiangxi[3]

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, CHN;
2. Intelligent System Collaborative Innovation Research Center, School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, CHN; 3. Zhejiang Xuanye Precision Manufacturing Co. LTD., Taizhou 317500, CHN)

Abstract: End-actuator is very important for realizing fast, reliable and efficient transmission in substrate detection of semiconductor packaging. Under the condition of satisfying material strength and structure stiffness, a 3D model of the end-actuator was established with the goal to reduce the weight of the end-actuator. The static calculation and modal analysis of the end-actuator of the substrate transfer robot were performed with ANSYS software. Then the stress, strain characteristics and corresponding modes of the end-actuator under the maximum load were obtained. Based on the optimized topology, a new end-actuator structure was established. And the strength of the new structure was checked, verifying the validity of the design scheme. The results demonstrate that the first four order natural frequencies of the end-actuator are much higher than the gyro-frequency of the servomotor and the quality of the new structure is reduced by 26.7%. It achieves the goal of lightweight and provides a new technical solution for the subsequent development of related products.

Key words: semiconductor substrate; finite element analysis; structural design; topology optimization; light weight

0　引言

集成电路(IC)封装是将已经设计制造好的芯片通过微细加工技术在基板上进行封装，芯片引脚与基板正面引脚相接触，再通过基板背面的引脚与外部电路相连。IC封装的目的在于保护芯片不受或少受外界环境的影响，并为之提供一个良好的工作

收稿日期：2020－01－08.

* **通信作者：**林知微　**E-mail：**linzhiwei@bit.edu.cn

条件。在IC芯片封装的过程中要经过两次测试,分别是晶圆检测和成品测试。此外,芯片通过封装基板与外部电路相连,要对封装基板的电路进行测试。

半导体封装基板传输机器人是基板检测设备中的关键部件,其主要作用是实现基板在各个工位之间的快速传递与精确定位。基板的传输效率直接影响测试效率,为防止基板在搬运过程中抖动、脱落,应增强机器人手臂与末端执行器运行的稳定性。为了实现末端执行器的高速平稳运行,以机械振动为理论、机械设计为基础,对基板传输机器人末端执行器进行数字化建模、仿真计算、模态分析以及结构优化,寻找其最优结构[1]。这对于基板高效稳定的传输具有十分重要的意义,同时为后续基板传输过程提供了参考。

对结构进行优化设计有三种方法:形状优化、尺寸优化以及拓扑优化。其中形状优化和尺寸优化对于已经设计完成的结构优化效果并不明显,变形程度有限[1-2]。拓扑优化是一种基于有限元技术,在满足应力和刚度等约束条件下寻求最佳结构形式的优化方法。三维建模软件SolidWorks具有良好的建模环境,可以对末端执行器进行初步结构设计,本文利用有限元分析软件ANSYS对其结构进行静力学分析、模态分析,在此基础上进行拓扑结构优化,设计出一种新型的基板传输机器人末端执行器。

1 末端执行器静态特性分析

1.1 实体模型的建立

在三维建模软件SolidWorks中对基板传输机器人末端执行器进行初步的几何建模[3]。为了节省有限元软件计算资源,提高求解精度,在对末端执行器进行初步建模时,可以将一些不影响分析精度的特征,如螺纹孔、倒角等省略[4-5]。末端执行器实体模型如图1所示。

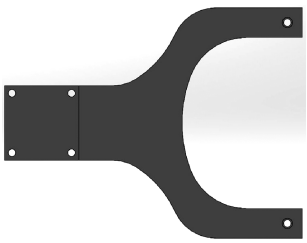


图1 末端执行器实体模型

1.2 静力学分析

将在SolidWorks中建好的末端执行器模型导入有限元软件ANSYS中进行分析、优化。通过静力学分析可以得出结构在受到特定的约束和载荷作用下的应力分布情况和位移云图,对其进行强度校核,在保证结构安全可靠的前提下对其进行优化设计[6]。

(1)材料选择:选择7075铝合金为末端执行器的材料。其材料的性能参数如表1所示。

表1 7075铝合金性能参数

性能参数	值
弹性模量/MPa	71 000
泊松比 ε	0.33
密度/(kg/m^3)	2 810
屈服强度 R/MPa	455

(2)网格划分:在对结构进行有限元分析时,对模型进行网格划分的质量高低将直接影响求解速度和结果的精度[7]。本文采用自动化划分网格的方法,网格大小设置为3 mm,共生成单元4 540个,节点9 536个,生成的有限元模型如图2所示。

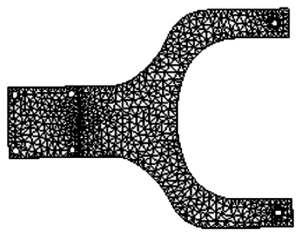
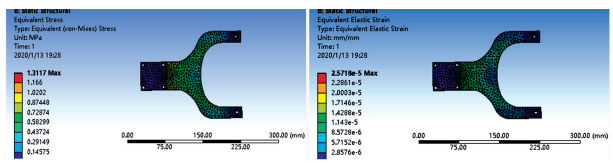


图2 末端执行器有限元模型

(3)施加载荷与求解:基板传输机器人末端执行器主要用于在各个工位之间传送基板。传送时基板被末端执行器上的吸附气孔吸紧,末端执行器另一端与机械臂固定。经计算,基板对末端执行器的压力最大为 $p=0.025\ 995$ MPa。对末端执行器进行静力学分析得到等效应力分布云图和等效应变云图,分别如图3(a),(b)所示。



(a) 等效应力云图 (b) 等效应变云图

图3 静力学分析结果

由图3静力学分析结果可知,末端执行器的应力主要集中于末端执行器与机械臂连接处,最大应力值为1.311 7 MPa,远小于末端执行器材料的屈服强度(455 MPa)。由此可知,即使在机械臂与末

端执行器固定处发生应力集中现象，由于其远小于材料的最大屈服强度，末端执行器的强度仍十分可靠。

1.3　模态分析

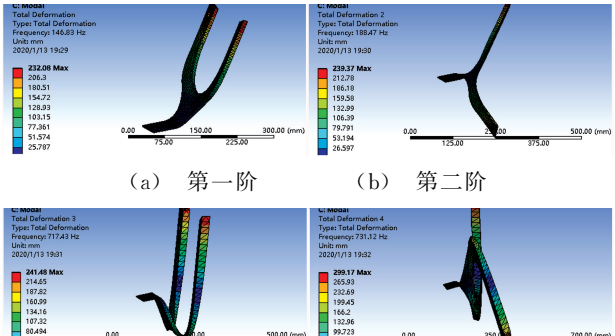
在基板传输过程中，为保证传送过程的平稳快速，应尽量避免末端执行器与机器人发生共振。利用有限元分析法对末端执行器进行模态分析，在设计初期了解其固有频率，避免设计缺陷，缩短设计周期，避免发生共振，提高传输效率[7]。

对结构进行模态分析时，只需求出结构的低阶频率而不必求出全部的固有频率和振型，一般只有前几阶固有频率才可能引起共振[6]。本文求出了末端执行器的前四阶固有频率和振型，如表 2 所示，前四阶末端执行器振型图如图 4 所示。

表 2　末端执行器的前四阶固有频率和振型

阶次	固有频率/Hz	振型特征	静态变形总量/mm
1	146.83	沿 z 方向摆动	0.057 83
2	188.47	在 z 方向上下摆动	
3	717.43	在 z 方向扭动	
4	731.13	在 x 和 z 方向上扭动	

由表 2 可知，末端执行器的低阶固有频率达到了很高的数值，而带动机械臂运动所使用的伺服电动机的额定转速为 3 kr/min，回转频率为 50 Hz。末端执行器的固有频率远离基板传输机器人的振动频率，展现出较好的刚度性能。对末端执行器进行模态分析，得出其低阶固有频率和振型，可以为进一步优化末端执行器结构提供依据[8]。



（a）　第一阶　　（b）　第二阶

（c）　第三阶　　（d）　第四阶

图 4　末端执行器前四阶模态振型

2　末端执行器优化设计

2.1　拓扑优化设计

拓扑优化因其不依赖原有结构和设计师的经验就可以获得新的结构，受到了研究人员的广泛关注。通俗地说，就是利用拓扑优化技术，在满足特定的约束条件和载荷的情况下使结构材料重新分布[7]。

基于有限元软件 ANSYS 的结构拓扑优化目标函数是在满足结构约束和载荷的条件下使整体的变形能最小，等效于整体的刚度最大[7]。约束函数是在给定载荷和最小柔度的情况下缩减结构一定百分比的体积或质量。拓扑结构优化的数学模型是[9]：

$$\begin{cases} \min F(\eta_i) \\ s.t. \quad f_\Omega \eta_i \mathrm{d}\Omega \leqslant \alpha V_0 \end{cases} \tag{1}$$

式中，F 为结构的变形能，η_i 为第 i 单元的伪密度，α 为缩减体积的百分比，V_0 为结构的原体积。

由图 3 静力学分析结果得知，基板传输机器人末端执行器在受最大压力情况下结构强度仍有很大的余量，本文通过拓扑优化对其结构进行不断改进，在满足特定的约束和载荷的情况下，以末端执行器的材料体积作为目标函数，通过改变末端执行器的结构形状来节约材料并减轻重量[10-11]。

将末端执行器上施加载荷和约束的位置设定为不优化区域，剩余区域设定为优化区域，优化参数模型体积设定为 20%，迭代次数为 12 次。拓扑优化的结果如图 5 所示。

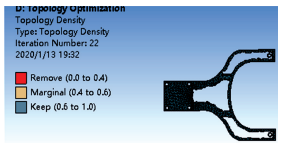
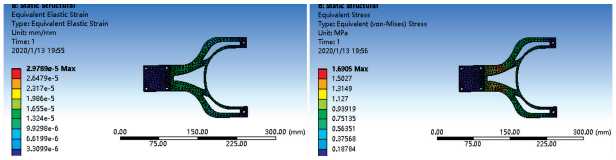


图 5　拓扑优化密度云图

2.2　优化模型校核

根据拓扑优化的结果重新对末端执行器进行设计，利用有限元分析软件 ANSYS 对新结构重新进行静力学和模态分析，由图 6 可知优化后的末端执行器最大应力为 1.704 MPa，出现在末端执行器的腰身处。优化后的末端执行器在满足特定的载荷和约束的情况下，提高了结构强度，实现了轻量化，达到了拓扑优化的目的，验证了实验方案的正确性。



（a）　等效应力云图　　（b）　等效应变云图

图 6　优化后的末端执行器应力、应变云图

由表 3 对优化结果分析可以得出以下结论：

末端执行器通过拓扑优化后，最大应力集中在

末端执行器的腰身处，最大应力值为 1.704 MPa，与优化前最大应力值 1.311 7 MPa 相比增加了 29.9%，但是其值远远小于 7075 铝合金的屈服强度(455 MPa)，优化后的结构整体满足设计要求，仍有设计空间。

表 3 末端执行器优化前后参数对比

参数名称	最大应力/MPa	最大应变/mm	质量/kg	一阶模态/Hz
优化前	1.311 7	$2.571\,8\times10^{-5}$	0.123 33	146.83
优化后	1.704	$2.978\,9\times10^{-5}$	0.090 399	138.08
变化率/%	29.9	15.8	−26.7	−5.95

优化后结构的最大位移出现在结构末端，最大应变为 $2.978\,9\times10^{-5}$ mm，与优化前相比仅增加 15.8%，满足基板传输的精度要求，且提高了传输效率。

优化后的结构在满足设计要求的前提下，重量减少了 26.7%，实现了轻量化的目标，一阶模态固有频率仅降低 5.95%，防共振效果明显。

3 结论

本文对基板传输机器人末端执行器进行了静力学分析和模态分析，对其结构进行了改进。基于拓扑优化的设计思想，设计了末端执行器新的结构形式，并对新结构进行了分析验证，结果表明：新的机构达到了减重优化，提高基板传输效率的目的，其低阶频率较高，远离基板传输机器人的振动频率，展现出较高的防共振能力。

参考文献：

[1] 刘劲松，朱杨冰，邱进军. 晶圆传输机器人大臂的模态分析及其结构优化[J]. 制造业自动化，2015(14)：15-19.
Liu Jinsong，Zhu Yangbing，Qiu Jinjun. Modal analysis and structure optimization of wafer transfer robot's big arm[J]. Manufacturing Automation，2015(14)：15-19.

[2] 谭立杰，王洪宇，王文举. 大直径探针台的晶圆自动传输系统[J]. 电子工业专用设备，2011，40(11)：40-44.
Tan Lijie，Wang Hongyu，Wang Wenju. Wafer auto-transfer system for large diameter prober[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing，2011，40(11)：40-44.

[3] 高 强，宋 芳. 晶圆传输机器人末端执行器的结构设计[J]. 轻工机械，2018，36(6)：15-19.
Gao Qiang，Song Fang. Structure design and optimization of end-effector for wafer transfer robot[J]. Light Industry Machinery，2018，36(6)：15-19.

[4] 李清伟. 焊接机器人大臂有限元分析及拓扑优化[J]. 组合机床与自动化加工技术，2014(11)：63-64.
Li Qingwei. The finite element analysis and topological optimization design for welding robot's arm[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique，2014(11)：63-64.

[5] 刘洪涛. 晶圆传输机器人末端执行器设计与关键技术研究[D]. 沈阳：东北大学，2012.
Liu Hongtao. Design of wafer handing robot end-effector and key technique research[D]. Shenyang：Northeastern University，2012.

[6] 单铭志，杨前明，邵长新. 棉桶更换机器人前臂有限元分析及拓扑优化[J]. 组合机床与自动化加工技术，2017(8)：25-28.
Shan Mingzhi，Yang Qianming，Shao Changxin. The finite element anslysis and topological optimization design for cotton barrel replacement robot's forearm[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique，2017(8)：25-28.

[7] 林丹益，李 芳. 基于 ANSYS 的结构拓扑优化[J]. 机电工程，2012，29(8)：898-901.
Lin Danyi，Li Fang. Topological optimization of continuum structure based on ANSYS[J]. J. of Mechanical and Electrical Engineering，2012，29(8)：898-901.

[8] 霍洪鹏，侯晓坤，姜军生. 基于 ANSYS 拓扑优化的机器人末端结构设计[J]. 山东工业技术，2018(5)：134-135.
Huo Hongpeng，Hou Xiaokun，Jiang Junsheng. Robot end structure design based on ANSYS topology optimization[J]. Shandong Industrial Technology，2018(5)：134-135.

[9] 陈 静，杨泽龙，安勇成. 基于 ANSYS 的立柱动态特性分析与拓扑优化[J]. 机械设计，2015(6)：75-79.
Chen Jing，Yang Zelong，An Yongcheng. Dynamic characteristics analysis and topology optimization for column based on ANSYS[J]. J. of Machine Design，2015(6)：75-79.

[10] 何凡普，于大泳. 硅片传输机器人手臂的拓扑优化[J]. 农业装备与车辆工程，2019，57(3)：78-81.
He Fanpu，Yu Dayong. Topology optimization of silicon transfer robot arm[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering，2019，57(3)：78-81.

[11] Wang Xiuye，Zhao Han，Zhang Zufang. Review of methods of mechanical digital design based on topology optimization[J]. Appl. Mechanics and Mater.，2013(2)：193-201.

作者简介：

祝锡晶(1969—)，男，山西人，博士，教授，博士研究生导师，研究方向为精密特种装备技术；

林知微(1969—)，女，江西人，博士，副教授，硕士研究生导师，北京理工大学自动化学院智能系统协同创新研究中心主任，研究方向为高精度控制系统。

材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.013

预电离效应对ArF准分子激光特性的影响分析

苏　丹[1,2,3]，赵江山[1,2,3]*，王　倩[1,2,3]

（1. 中国科学院微电子研究所，北京 100094；2. 北京市准分子激光工程技术研究中心，北京 100094；
3. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 利用流体模型对ArF准分子激光气体放电过程进行了数值模拟，通过对比不同初始预电离强度下的气体放电情况，分析了预电离效应对准分子激光系统放电特性的影响，并探究了不同气体参数下的预电离效果。结果表明，初始预电离强度对于极间击穿电压、ArF准分子的形成以及光输出特性均有显著影响。在保证均匀电场且有效放电的情况下，低的初始预电离强度难以“点燃”气体，但可以获得较高的激光输出能量，而提高初始预电离强度能有效降低击穿电压，却不利于气体对能量的吸收转化。此外，预电离效果受工作气压与F_2比例的影响，气压的升高或F_2浓度的增加，均会降低预电离的有效性。

关键词： 准分子激光；气体放电；流体模型；预电离；击穿电压

中图分类号： TN248.2　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0517－06

Effects of Pre-ionization on Properties of ArF Excimer Laser

SU Dan[1,2,3], ZHAO Jiangshan[1,2,3], WANG Qian[1,2,3]

(1. Institute of Microelectronics of The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, CHN;
2. Beijing Excimer Laser Technology and Engineering Center, Beijing 100094, CHN;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: A fluid model is used to investigate the discharge kinetics of ArF excimer laser. By comparing the gas discharge at different initial preionization intensities, the effects of preionization on discharge excited excimer laser system are analyzed. The preionization effect under different gas parameters is also discussed. The results show that the initial preionization intensity has significant effects on the breakdown voltage, the formation of ArF excimer, the optical quality and gain. Under the premise of uniform electric field and effective discharge, it is difficult to reach the gas breakdown threshold with low initial preionization intensity, but higher laser power can be obtained. Increasing the initial preionization intensity can effectively reduce the breakdown voltage, but it's not conducive to the absorption and conversion of energy. The preionization capability is affected by the gas pressure and fluorine ratio. The increasing of gas pressure or fluorine concentration can reduce the effectiveness of preionization.

Key words: excimer laser; gas discharge; fluid model; pre-ionization; breakdown voltage

0　引言

目前应用于光刻技术及工业加工的大能量准分子激光器多以放电泵浦激励方式为主，其核心运行物理机制是复杂的多组分气体高压(常为几十千伏)放电等离子体紫外激光辐射过程[1]。为了获得较高的激光能量输出，通常需要在高压气体工作介质(工作气体压强大于1.013×10^5 Pa)中获得大体积的均匀辉光放电。而在高气压、大放电间隙下，气体放电

收稿日期：2020－01－02.
基金项目：国家科技重大专项项目(2013ZX02202).
* 通信作者：赵江山　E-mail：zhaojiangshan@aoe.ac.cn

过程中极易出现不稳定的电弧，即由辉光放电过渡到弧光放电[2]，放电的不均匀性会影响激光脉冲的输出频率，对激光输出能量、光谱、光束质量以及气体和激光器的寿命均会产生不利的影响。为了解决这个问题，准分子激光器常采用预电离技术：在主电极放电之前使电极间气体具有一定的电离度，为主放电提供初期“种子电子”，引导其产生均匀的辉光放电，避免辉光-弧光转化[3]。

预电离技术对辉光放电的稳定性以及输出激光的性能指标有着重要影响，无疑是准分子激光器的关键技术之一[4]。Levatter 等[5]对预电离进行了理论研究，并提出初始电子密度的阈值[6]。Cernak 等[7]通过建立二维流体力学模型，给出了局部电子密度不均匀诱发流光而导致放电不稳定的详细演化过程。Xiong 等[8]采用二维模型研究了电晕预电离与二次电子激发对放电稳定性的影响。Mathew 等[9]利用 ICCD 相机对放电等离子体辉光进行拍照，直接观测到由预电离不足、化学动力学不稳定和电流密度过高引起的大体积辉光放电收缩、成丝、起弧等现象。

在预电离技术方面，国内外已有大量的研究成果，但这些研究成果仅提供理论参考和方法指导。对于不同的准分子激光系统和工作条件，放电所需的预电离效应是不一样的。本文运用一维流体模型来模拟 ArF 准分子激光动力学过程，研究预电离效应对准分子激光气体放电效果的影响，分析预电离因素对放电特性和激光输出脉冲特性的影响，以期为激光系统设计及结构优化提供指导思路和改进方向。

1 模型描述

气体放电过程是一个典型的非线性过程，其中发生着大量的电化学反应，包括气体原子或分子的激发与电离，粒子在气体中的漂移、扩散等运动过程，空间复合和附着等带电粒子的消失过程等，不同的非线性机制之间相互作用对于放电具有非常重要的影响[10]。本文模拟对象为 $Ar/F_2/He$ 混合气体，放电模型中所考虑的主要粒子反应见文献[11-12]。

为分析放电过程中十分复杂的电离气体，完整地表征其状态，要求理论模型及数值求解方案应满足具有足够高的计算精度、很好的收敛性和较高的计算效率等要求。本文建立流体模型，由气体放电的基本物理定律出发，用离散化物理变量来描述气体放电等离子体体系的状态，模拟准分子激光器气体放电过程的发展演变。在一维流体模型中，沿放电方向对等离子体进行数值模拟，且假设等离子体在垂直放电方向上是均匀分布的。

1.1 基本方程

流体模型将等离子体看作导电的连续介质进行研究，将粒子数密度和平均电子能量描述为时间和空间坐标的连续函数，通过联立连续性方程、电子能量方程和泊松方程来求解各个参量[13]。将计算得到的各个参量重新代入方程，迭代计算直至结果收敛，便可得到稳定的粒子密度、平均电子能量分布[14]。

粒子的运动可用连续性方程描述如下：

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = -\nabla \cdot \Gamma_i + S_i \tag{1}$$

式中，N_i 为粒子数密度，Γ_i 为粒子通量，S_i 为粒子的反应源项。

对于带电粒子，其通量由两部分组成，一部分是与带电粒子密度梯度相关的扩散，另一部分是在电场作用下的漂移：

$$\Gamma_i = -(\mu_i \cdot E)N_i - \nabla(D_i N_i) \tag{2}$$

而中性粒子，由于电晕放电的时间极短，其因温度或压力梯度产生的平流运动可忽略不计，故仅考虑输运过程中的扩散运动：

$$\Gamma_i = -D_i N_T \nabla\left(\frac{N_i}{N_T}\right) \tag{3}$$

式中，N_T 为总粒子数密度，D_i 为粒子扩散系数。

电子平均能量 ε 可由电子能量方程来描述：

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_e\varepsilon) = q\Gamma_e \cdot E - n_e \sum_i N_i k_i \Delta\varepsilon_i - \nabla \cdot \left(\frac{5}{2}\varepsilon\Gamma_e - \lambda \nabla T_e\right) \tag{4}$$

式中，n_e 为电子密度，E 为电场强度，k_i 是碰撞速率系数，$\Delta\varepsilon_i$ 为能量损耗，λ 为电子热导率，Γ_e 为电子通量，$T_e = \frac{2}{3}\varepsilon$ 为电子温度。

空间电场强度 E 可由泊松方程计算得到：

$$E = -\nabla V \tag{5}$$

$$-\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V) = q \tag{6}$$

式中，V 为电势，ε_0 为真空介电常数，ε_r 为相对介电常数，q 为电荷数。

光子数密度 n_p 可描述为[12]

$$\frac{dn_p}{dt} = \frac{cn_p}{l_c}(g - \alpha - g_{th}) + K\frac{n_{ArF^*}}{\tau} \tag{7}$$

$$g = l_g \sigma_{st} n_{ArF^*} \tag{8}$$

$$\alpha = l_g \sum_i n_i \sigma_i \tag{9}$$

$$g_{th} = -\left[\frac{1}{2}\ln R + \ln(1-L)\right] \tag{10}$$

式中，c 为光速，l_c 为腔长，l_g 为增益长度，g 为光学增益，α 为吸收系数，g_{th} 为增益阈值，K 和 τ 分别为 ArF^* 的自发辐射比例系数和自发辐射寿命，n_{ArF^*} 和 σ_{st} 分别为 ArF^* 的数密度和受激辐射截面，n_i 和 σ_i 分别为吸收光子的粒子密度与其碰撞截面，R 为输出镜反射率，L 为光学单程损耗（不包含粒子吸收）。模拟中，取 $l_c=105$ cm，$l_g=90$ cm，$K=1.8\times10^{-5}$，$R=8\%$，$L=8\%$。

1.2　放电电路

放电电路如图 1 所示，由电容 C_1 和 C_2、电感 L_1 和 L_2、电阻 R_1 以及开关 S_1 组成，R_D 表示放电等离子体的有效电阻。电容 C_1 为 10 nF，初始电压 U_{C0} 为 20 kV，C_2 为 1.5 nF，电感 L_1 为 600 nH，L_2 为 20 nH，电阻 R_1 为 1 Ω[11]。

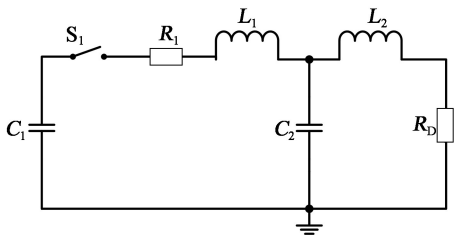


图 1　放电电路示意图

1.3　边界条件

对于阴极边界（$x=0$），设定其电位为 0，由于放电时间极短（～100 ns），混合气体中 Ar 的浓度较小，故不考虑 Ar^+ 和 Ar_2^+ 碰撞阴极板发射二次电子的过程，即将 Ar^+ 和 Ar_2^+ 的二次电子发射系数设为 0，而将 He^+ 的二次电子发射系数设为 0.01；对于阳极边界（$x=1$），其电位大小等于储能电容 C_1 的初始电压 U_{C0}，设定亚稳态粒子碰撞阳极后立即被表面吸附[15]。

1.4　模型参数

在对 ArF 准分子激光气体放电过程建立流体模型时，将电极间隙划分为 1 000 个单元数，瞬态求解过程中的时间步长为 1 ns，其他基本参量设定情况如表 1 所示。

表 1　模型参数

物理量	参数值
气压/$\times10^5$ Pa	2.5×1.013
气体组分 $Ar/F_2/He$	0.078 9/0.002 4/0.918 7
气温/K	293.15
电极间距/cm	1
放电横截面积/cm^2	90
初始预电离强度/m^{-3}	1×10^{14}
初始平均电子能量/eV	1

2　结果与讨论

2.1　气体放电的演化过程

图 2 为极间电压 V、放电电流 I 与输出激光功率 P 的变化波形。极间电压从 0 时刻开始不断爬升，在 $t=45$ ns 时达到最大值，约为 17 kV，随后气体发生了击穿，产生的电流脉冲迅速增长，使得外电路上限流电阻两端的电压增加，而极间电压开始下降。$t=59$ ns 时，放电电流达到峰值约为 3.9 kA，同时，激光输出功率开始急剧上升，短短几纳秒内（$t=66$ ns 时）便出现峰值且峰值约为 3.4 MW。

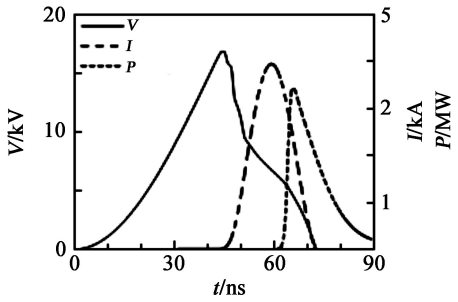


图 2　极间电压、放电电流与输出激光功率的变化波形

2.2　初始预电离强度对气体放电的影响

为探究初始预电离强度对 ArF 准分子激光气体放电的影响，在不改变模型其他工作参数的情况下，设置了不同的初始预电离强度 n_{e0}，即在初始电子密度为 10^8～10^{18} m^{-3} 的范围内进行了数值模拟。

2.2.1　电学特性的变化情况

图 3 为极间电压在不同初始预电离强度下的变化情况。可以看到，电压上升初期，即使初始预电离强度不同，在不同初始预电离强度下的极间电压波形的增长曲线是完全重合的。但随着初始预电离强度增大，极间气体击穿所需的电压阈值减小，且在时间上有一定的提前，LC 电路的振荡现象也更为明显。这说明加大初始预电离强度使得气体被击穿之前，空间中形成足够浓度的电子分布所需时间更短，

主放电也更容易完成。而在放电过程中，电功率往往不能被气体完全吸收，当初始预电离强度过大时，LC 电路的振荡脉冲变大，即能量转化效率变低了。

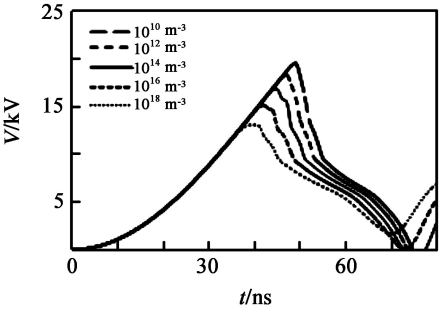
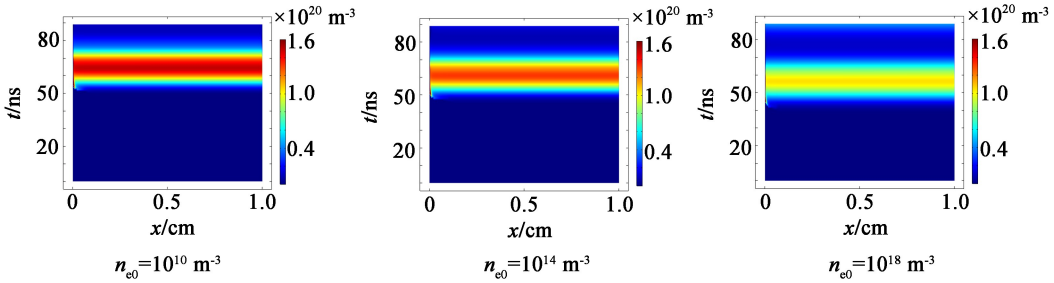
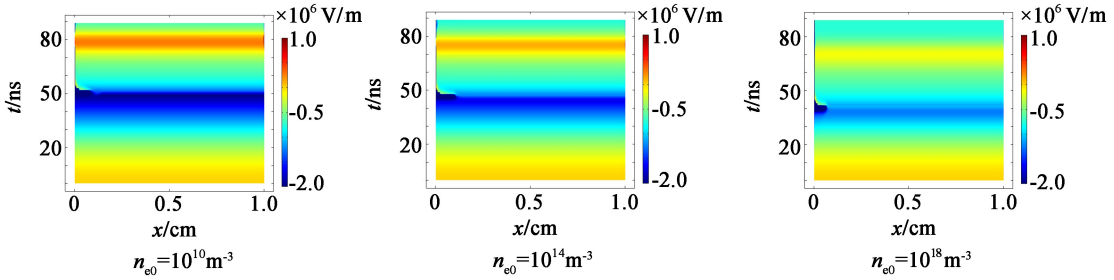


图 3 不同初始预电离强度下的极间电压变化波形

为对比预电离效果的均匀性，分别选取了初始预电离强度为 10^{10}，10^{14}，10^{18} m^{-3} 时的电子密度与空间电场的时空分布进行观察分析，如图 4 所示。可以看到，在放电产生前，极间电子密度分布基本均匀，放电开始后，近阴极区域（$x=0$ cm）由于剧烈的碰撞反应，产生了更多的电子数目，造成空间电荷场畸变。随着初始预电离强度增加，电子密度峰值减小，峰值出现时间逐渐前移，且近阴极区域的电子密度畸变范围也有所缩减。空间电场受空间电荷的变化所影响，初始预电离强度较小时，近阴极区域的电场畸变更为明显，初始预电离强度提高后，电场剧烈变化的范围缩小。这说明了初始预电离强度影响了电子密度的大小与分布情况，进而对空间电场的均匀性也产生了一定影响。



（a） 电子密度



（b） 电场强度

图 4 不同初始预电离强度下的电子密度与空间电场时空演变情况

2.2.2 粒子密度的变化情况

在 ArF 准分子激光气体放电过程中，ArF^* 作为光子的来源，其形成过程尤为重要。由图 5 中形成 ArF^* 的三个主要通道的反应速率随时间变化情况可知，在放电泵浦的 $Ar/F_2/He$ 混合气体中，ArF^* 主要是由 F_2 与处于原子激发态的 Ar^* 反应所生成的，Ar^+ 与 F^- 的离子复合反应是形成 ArF^* 的次要通道，而 Ar_2^+ 与 F^- 的复合对于 ArF^* 的形成贡献最小[16]。

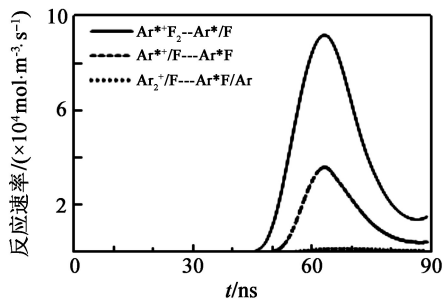


图 5 ArF^* 生成反应的速率变化曲线

为探究初始预电离强度对 ArF^* 形成的影响，对 ArF^* 生成反应中所涉及的主要粒子 $Ar^*/Ar^+/F^-/ArF^*$ 数密度的变化情况进行比较，如图 6 所示。可以看到，多种粒子的最大平均数密度 n 均随着初始预电离强度的增大而出现了不同程度的减少，整体上导致了 ArF^* 数目的减少。其中，Ar^* 的浓度变化呈现较大的下降趋势，而 Ar^+ 和 F^- 对初

始预电离强度的改变并不太敏感，这说明初始预电离强度的增大削弱了电子碰撞激发的能力，导致放电产生的激发态 Ar 原子数目减少，不利于准分子 ArF^* 的形成。

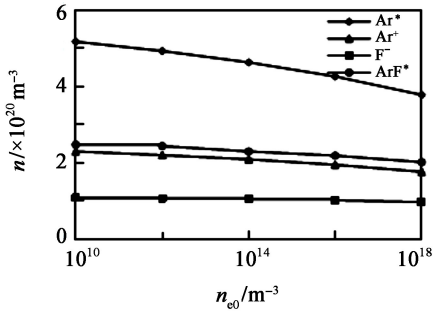


图 6　不同初始预电离强度下 Ar^*，Ar^+，F^-，ArF^* 的平均数密度最大值

2.2.3　激光输出的变化情况

光子的释放量直接受 ArF^* 的形成效率影响。图 7 显示了不同初始预电离强度下光子密度 n_p 随时间的变化情况，图 8 所示为不同初始预电离强度下的光脉冲能量 E 和光脉冲宽度 W（激光脉冲的半高宽度）。可以看到，随着初始预电离强度的提高，辐射的光子数目反而减少，出现峰值的位置向短时间方向移动，光脉冲能量呈下降的趋势，且光脉冲宽度也随初始预电离强度的改变而不同。由此可见，初始预电离强度对光输出有着显著影响，过大的初始预电离强度不利于激光增益的提高。

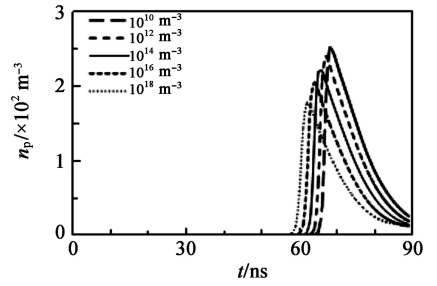


图 7　不同初始预电离强度下的光子密度变化情况

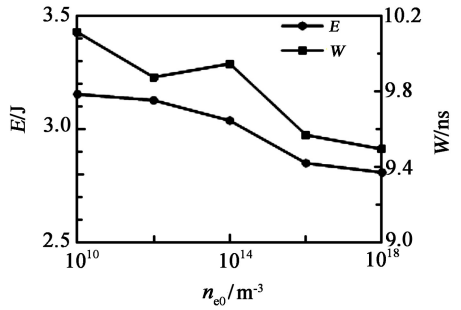


图 8　不同初始预电离强度下的光脉冲能量和光脉冲宽度变化情况

2.3　气体工作参数对预电离效果的影响

为探究气压和 F_2 浓度对预电离效应的影响，通过设定不同的工作参数，分别在低初始预电离强度（1×10^{10} m^{-3}）和高初始预电离强度（1×10^{14} m^{-3}）下对 ArF 准分子激光气体放电进行了数值模拟，计算得到多组气压和 F_2 离子浓度下的预电离效果，如表 2 所示。其中，击穿电压下降比 γ 的定义为在其他工作参数相同的情况下，高强度预电离下的击穿电压值 U_H 与较低强度预电离时击穿电压值 U_L 下降的比率，用公式可表述为

$$\gamma=\frac{U_L-U_H}{U_L}\times100\% \tag{11}$$

预电离效果的评估可以以击穿电压下降比的形式体现出来，比值越大预电离效果越佳，反之效果越差。根据表 2 的数据显示，在其他条件相同的情况下，击穿电压值与气压或 F_2 浓度的变化成正比，而击穿电压下降比与气压或 F_2 浓度的变化成反比，即增大气压或 F_2 浓度，预电离的效果有所下降。

表 2　多组气压、F_2 离子浓度下的预电离效果比较

气压/kPa	F_2 浓度/%	极间击穿电压/V		γ/%
		U_L	U_H	
253.312 5	0.24	19 566	16 790	14.19
	0.34	20 355	17 993	11.60
	0.44	21 245	19 110	10.05
303.975 0	0.24	24 065	21 450	10.87
	0.34	25 340	23 097	8.85
	0.44	26 313	24 399	7.27
354.637 5	0.24	28 186	25 863	8.24
	0.34	29 515	27 731	6.04
	0.44	30 470	29 371	3.61

一方面，由于气体压力与气体密度成正比，增大气压相当于提高了腔内的中性粒子密度，导致电子自由程缩短，不利于电子能量的累积，削弱了激发和电离能力，进而使得预电离效果下降，气体击穿需要更大的着火电压。另一方面，由于 F_2 具有很强的电负性，易于吸附电子形成负离子，F_2 浓度的增加使其与电子的附着反应得到加强，导致大量的电子被消耗，所形成的负离子易与空间中的正离子发生复合，使得气体中的带电质点减少，预电离效果下降，放电的形成和发展受到影响。

3　结论

本文建立了 ArF 准分子激光放电动力过程的流体模型，并针对预电离效应对放电特性的影响进

行了数值模拟分析，结果表明，在一定范围内提高初始预电离强度，能有效降低气体击穿的电压阈值，缩短放电所需时间，改善空间场分布的均匀性，有利于降低设备成本，提高输出频率，但同时影响了放电能量的高效转化，使得输出激光性能下降。此外，气体压力和 F_2 比例均会对预电离效果产生显著影响，气压或 F_2 浓度的增加将导致预电离效果被削弱。因此，要使 ArF 准分子激光系统能够进行有效的放电，需要合理地设置工作参数与预电离强度，根据需求适当调整预电离强度对于准分子激光系统的优化具有重大的实际意义。

参考文献：

[1] Dirk B, Pippert K D, Stamm U. History and future prospects of excimer lasers[C]// Proc. Second International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 2002, 4426: 456812.

[2] 李雪辰，董丽芳. 大气压介质阻挡辉光放电研究综述[J]. 自然科学进展，2006，16(12)：1521-1529.
Li X C, Dong L F. Review of atmospheric dielectric barrier glow discharge[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(12): 1521-1529.

[3] 詹花茂，李 明，李成榕. 介质阻挡放电中的紫外线预电离[J]. 高电压技术，2005，31(2)：62-63.
Zhan H M, Li M, Li C R. Ultraviolet preionization in dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 62-63.

[4] 余吟山，游利兵，梁 勖，等. 准分子激光技术发展[J]. 中国激光，2010，37(9)：2253.
Yu Y S, You L B, Liang X, et al. Progress of excimer lasers technology[J]. Chinese J. of Lasers, 2010, 37(9): 2253.

[5] Levatter J I, Lin S C. Necessary conditions for the homogeneous formation of pulsed avalanche discharges at high gas pressures[J]. J. of Appl. Phys., 1980, 51(1): 210-222.

[6] Bretagne J, Louvet Y. Theoretical analysis of the X-ray initiation of a high-pressure argon discharge for laser applications[J]. J. of Appl. Phys., 1987, 61(3): 827-832.

[7] Cerna K M, Bessieres D, Paillol J. Positive streamer formation in cathode region of pulsed high-pressure discharges for transversely excited atmosphere laser applications[J]. J. of Appl. Phys., 2011, 110(5): 053303.

[8] Xiong Z, Kushner M J. Photo-triggering and secondary electron produced ionization in electric discharge ArF^* excimer lasers[J]. J. of Appl. Phys., 2011, 110(8): 083304.

[9] Mathew D, Bastiaens H M J, Boller K J, et al. Effect of preionization, fluorine concentration and current density on the discharge uniformity in F_2 excimer laser gas mixtures[J]. J. of Appl. Phys., 2007, 102(3): 033305.

[10] 武占成，张希军，胡有志. 气体放电[M]. 北京：国防工业出版社，2012：11-33.
Wu Z C, Zhang X J, Hu Y Z. Gas Discharge[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 11-33.

[11] Akashi H, Sakai Y, Tagashira T. Modelling of a self-sustained discharge-excited ArF excimer laser[J]. J. of Phys. D: Appl. Phys., 1994, 27(6): 1097-1106.

[12] Akashi H, Sakai Y, Tagashira I. Modelling of a self-sustained discharge-excited ArF excimer laser: the influence of photo-ionization and photodetachment by laser light on the discharge development[J]. J. of Phys. D: Appl. Phys., 1995, 28(3): 445-451.

[13] Xiong Zhongmin, Kushner M J. Surface corona-bar discharges for production of pre-ionizing UV light for pulsed high-pressure plasmas[J]. J. of Phys. D: Appl. Phys., 2010, 43(50): 505204-505213.

[14] 付强新. 低气压辉光放电等离子体模拟与特性研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2013：37-41.
Fu Q X. Simulation and research on the characteristic of low-pressure glow discharge plasma[D]. Xi'an: Xidian University, 2013: 37-41.

[15] 付洋洋，罗海云，邹晓兵，等. 棒-板电极下缩比气隙辉光放电相似性的仿真研究[J]. 物理学报，2014，63(9)：095206.
Fu Y Y, Luo H Y, Zou X B, et al. Simulation on similarity law of glow discharge in scale-down gaps of rod-plane electrode configuration[J]. Chinese J. of Phys., 2014, 63(9): 095206.

[16] 雷 杰，王绍英，王 勇，等. 离子复合对准分子 ArF^*，Ar_2F^* 形成过程的影响[J]. 量子电子学，1987(4)：354-358.
Lei J, Wang S Y, Wang Y, et al. Influence of recombination in the formation processes of ArF^* and Ar_2F^* excimers[J]. Chinese J. of Quantum Electron., 1987(4): 354-358.

作者简介：

苏 丹(1994—)，女，广西南宁人，硕士生，研究方向为激光技术与应用；

赵江山(1974—)，男，河南人，博士，研究员，博士生导师，研究方向为激光技术。

材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.014

介电常数近零模式与表面声子极化模式的耦合杂化研究

杨明莉，陈溢杭*

（华南师范大学 物理与电信工程学院，广州 510006）

摘　要： 介电常数近零模式为在纳米尺度上控制光与物质相互作用提供了新途径。利用衰减全反射原理分别激发Al_2O_3衬底的声子极化激元和GaN薄膜的介电常数近零模式，并且通过调整薄层厚度和优化空气层的间隙来实现双层结构模式的耦合杂化。使用传输矩阵法和有限时域差分法数值模拟计算了混合模式的电场分布和色散，结果表明两种模式由于满足强耦合条件而发生耦合劈裂。在有限时域差分法模拟的光谱中，色散关系的高频和低频分支在反交叉点都显示出强耦合，从电场图中可以观察到混合模式。混合模式具有高度传播特性和亚波长光限制的特点，可以作为未来红外和太赫兹纳米光子集成和通信设备的基础。

关键词： 表面声子激元；介电常数近零；耦合；纳米光子学；模式限制

中图分类号： O43　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0523－04

Study on the Coupling Hybrid of Dielectric Constant Near Zero Mode and Surface Phonon Polarization Mode

YANG Mingli, CHEN Yihang

(College of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, CHN)

Abstract: The near-zero dielectric constant mode provides a new way to control the interaction of light and matter at the nanoscale. In this paper, the principle of attenuated total reflection was used to excite the ENZ modes of phonon polariton and gallium nitride films of aluminum oxide substrates respectively. By adjusting the film thickness and optimizing the gap between air layers, the coupling hybrid of the double-layer structure mode was achieved. The transmission matrix method and finite time domain difference method were used to numerically calculate the electric field distribution and dispersion of the mixed mode, indicating that the coupling splitting occurs in the two modes due to the strong coupling conditions. In the spectrum simulated by FDTD, both the high-frequency and low-frequency branches of the dispersion relationship show strong coupling at the anti-crosspoints, and the ENZ-SPhP mixed mode can be observed from the electric field diagram. ENZ-SPhP hybrid mode has high propagation characteristics and sub-wavelength light limitation, which can be used as the basis for future infrared and terahertz nanophotonic integration and communication equipment.

Key words: surface phonon excitons; near zero dielectric constant; coupling; nanophotonics; mode limitation

收稿日期：2020－02－23.

基金项目：广东省自然科学基金项目(2015A030311018, 2017A030313035).

* **通信作者：**陈溢杭　**E-mail:** yhchen@scnu.edu.cn

0 引言

人工设计的纳米级超材料的发展推进了集成太赫兹(THz)光子学的研究进程。超材料的电磁性质一般是由磁导率和介电常数来描述的。而根据磁导率和介电常数的不同,材料可以被分成普通材料、金属材料(介电常数为负)、左手材料(介电常数和磁导率皆为负)和零折射材料等几大类。其中零折射材料可以分成三类,分别是介电常数近零(ENZ)的材料、磁导率近零的材料以及介电常数磁导率和磁导率都接近零的材料。在基于超材料的 ENZ 介质中可以实现非凡的光传播。由于 ENZ 介质所激发的 ENZ 模式在亚波长尺寸范围内对光具有强烈的限制,引起了科研人员的广泛关注和研究。ENZ 模式的特性还包括通过狭窄的畸变通道进行隧穿[1-2],通过强制相位匹配提高非线性光学转换效率[3-5]、高发射方向性[6]并实现具有打破时间反转对称性和降低散射率的极化波波导模式。然而,ENZ 模式在纳米光子应用中受到平坦的光谱色散的限制,导致模式的群速度较小且传播长度非常短[7]。纳米光子学面临的一个重要挑战在于如何实现有效的纳米级通信和远程信息传输。利用 ENZ 独特的物理学性质,可以大大促进这两个目标的实现。因此,设计一个合适的结构可以高效地激发 ENZ 模式,并将该模式与其他光子模式相互耦合,耦合的模式可以以合理的群速度保持高传播特性。

本文利用有限时域差分法(FDTD)和传输矩阵法(TMM)理论研究在薄双层厚度介质下 Al_2O_3 衬底与 GaN 薄层中的声子极化激元(SPhP)发生耦合对光子局域以及传输特性的影响。研究发现双层结构的反射谱出现了两个经过耦合劈裂的谐振现象。通过理论分析,揭示了双层薄膜结构耦合作用的物理本质,并进一步解释了对称和反对称 SPhP 耦合模式形成的原因。同时,研究了对称与反对称分支各点的场分布效果。强耦合形成的新模式同时具有参与耦合的两个谐振子的不同性质,产生了一系列有趣的现象并提供了新的应用可能性。这些耦合模式具有深亚波长限制、局部电磁场的大幅增强、固有的低损耗以及非零群速度传播等特性[8]。

1 结构模型

图 1 为奥托几何形状层状的结构示意图,通过棱镜产生的倏逝波可实现结构中极化子模式的相位匹配激发,其中高折射棱镜($n_{prism}\approx 2.4$)在可调节的空气间隙中使声子极化子的相位匹配激发。在半无限厚的 Al_2O_3 薄膜上有厚度为 50 nm 的 GaN 薄膜,薄膜与棱镜之间的填充介质为空气。采用 FDTD 对双层结构的耦合特性进行研究。GaN 薄膜表现出非色散的 ENZ 极化子模式,而 Al_2O_3 表现出表面声子极化子模式,将双层薄膜所合并的两种模式发生耦合劈裂,从而产生两个新的反交叉的色散分支。不同入射角的光谱反射率测量值可以反映出极化子色散关系。

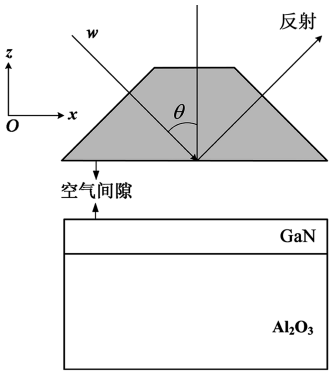


图 1 奥托模型的棱镜耦合装置示意图

本文选择的材料是极性电介质晶体,因为该材料在整个中红外波段对研究声子极化子现象具有非常好的应用前景,同时,极性电介质晶体可以在纵向光学(LO)和横向光学(TO)声子频率之间激发 SPhP 模式,该光谱范围被称为“Reststrahlen”频带(剩余射线带)[9]。当频率靠近纵向光学声子频率时,材料介电常数实部会非常接近于零。

极性电介质材料的介电常数满足 Drude 洛伦兹模型,也就是它的实部和虚部满足如下方程:

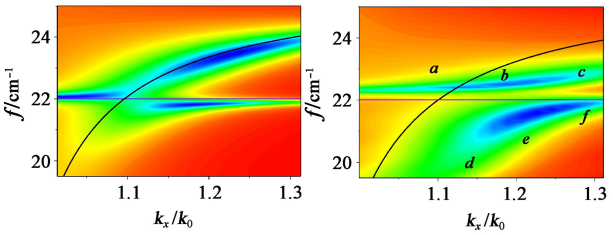
$$\varepsilon(w)=\varepsilon_{\infty}\left(1+\frac{w_{LO}^2-w_{TO}^2}{w_{TO}^2-w-\mathrm{i}w\gamma}\right) \tag{1}$$

其中,Al_2O_3 的横向声子频率 $w_{TO}=635\ cm^{-1}$,纵向声子频率 $w_{LO}=908\ cm^{-1}$,$\varepsilon_{\infty}=3.06$ 为高频下的电介质常数,$\gamma=6.3$ 为阻尼频率。GaN 的 $w_{TO}=560.1\ cm^{-1}$,$w_{LO}=742.1\ cm^{-1}$,$\varepsilon_{\infty}=5.04$ 为高频下的电介质常数,$\gamma=4$ 为阻尼频率。

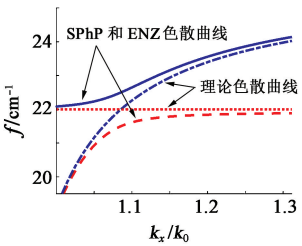
2 结果与讨论

通过 TMM 计算双层结构模式中相互作用的反射谱,如图 2(a)。50 nm GaN 薄膜所支持的 ENZ 模式与 Al_2O_3 层上的 SPhP 模式发生了耦合,可以观察到双层结构中模式由于发生强耦合而劈裂成两

个分支。其中曲线和直线分别是通过 Matlab 计算得到的 Al_2O_3 和 GaN 双层介质的色散曲线。利用 FDTD 仿真获得的在不同角度平面波照射下双层薄膜结构的反射谱，如图 2(b)所示。图中 a，b，c，d，e，f 六个点分别对应图 3(a)～(f)的电场图。图 2(c)是双层结构中的 SPhP 模式和 ENZ 模式发生耦合劈裂后，产生的一个光谱透明窗口。这种窗口产生的 33.3 cm^{-1} 光谱劈裂被称为拉比(Rabi)劈裂，Rabi 劈裂的能量符合强耦合特征。



(a)　双层结构耦合的反射谱　　(b)　双层薄膜结构的反射谱



(c)　裸 SPhP 和 ENZ 色散曲线强耦合引起的上下分支理论色散曲线

图 2　双层结构耦合的反射图谱和两条色散曲线耦合的上下分支理论色散曲线

使用以下表达式来模拟 ENZ 和 SPhP 模式之间的强耦合[10]：

$$E_{\text{coupling}}^{\text{UB,LB}}(k_x)=\frac{E_{\text{SPhP}}(k_x)+E_{\text{ENZ}}(k_x)}{2}+\frac{1}{2}\left(\Omega_{\text{R}}^2+\left(E_{\text{SPhP}}(k_x)-E_{\text{ENZ}}(k_x)\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中，$E_{\text{coupling}}^{\text{UB,LB}}(k_x)$ 是耦合的高频支和低频支的色散关系，$E_{\text{SPhP}}(k_x)$ 是没有耦合的 SPhP 色散关系，$E_{\text{ENZ}}(k_x)$ 是没有耦合的 ENZ 色散关系，Ω_{R}^2 是 Rabi 劈裂能量。该模型如图 3(c)所示，在定量上与 TMM 结果吻合较好，即混合模式是通过极化强耦合演化的。在耦合点，上支和下支具有 SPhP 和 ENZ 特征的混合对称(反对称)模式。从耦合点分裂后，上支和下支分别渐进地接近 SPhP 和 ENZ 色散曲线。

为了全面地了解双层结构中形成的对称和反对称混合耦合模式，图 3 给出在两种模式下双层结构的电场分布图。通过使用 FDTD 在图 2(b)色散光谱中标志的点来模拟 20 nm ENZ/5 μm SPhP 可视化双层结构的电场分布。图 3(a)，(d)分别对应于图 2(b)中的 a，d 点，在低波矢 a，d 点处，SPhP 和 ENZ 模式具有较宽的频率间隔，限制了两种模式明显的耦合。因此，我们预期沿色散关系的上支和下支应该在很大程度上分别类似于 ENZ 和 SPhP 模式。事实上，在电场图 3(a)中所显示的类似 ENZ 模式被主要局限在 20 nm 厚层内；相反，在频率较低处的色散(图 3(d))表现出一种光学模式，该模式被局限于双层表面，电场逐渐消失到周围介质中，类似于没有耦合的 SPhP 模式。当两个色散分支相遇并交叉时，它们会发生强耦合，分别如图 3(b)，(e)所示，电场分布同时表现出类似于 ENZ 和 SPhP 模式。在混合模式的上支(图 3(b))中，对称的混合模式在 ENZ 层内表现出较强的场约束，同时倏逝衰减到周围介质中。图 3(e)模式再次在 ENZ 层内同时显示强渐逝场和场限制，表明当两个模式相互靠近时，发生强耦合产生的新模式同时具有两个模式的不同性质。最后，在远离强耦合点的波矢处(图 3(c)，(f))，最初以类似 ENZ 模式显示的上支转变为类似 SPhP 的行为(图 3(c))，而在下支中观察到相反的情况。这表明发生强耦合的模式分裂成的

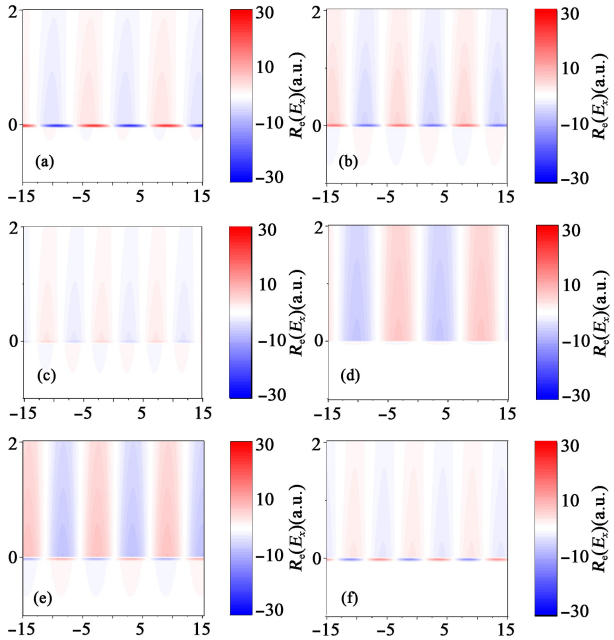
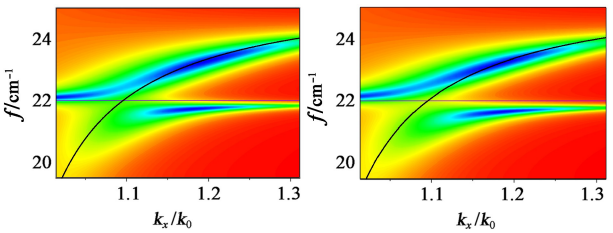


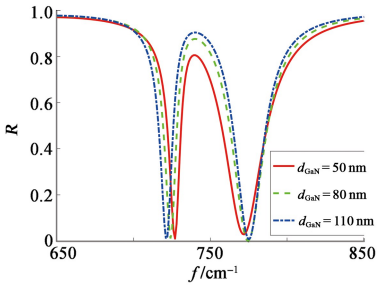
图 3　两种模式下双层结构的电场分布图。(a)具有 ENZ 主要特性的耦合高频分支的模式分布；(b)强耦合的高频支混合模式电场分布；(c)有 SPhP 主要特性的耦合高频支的模式分布；(d)有 SPhP 主要特性的未耦合低频支；(e)有强耦合的低频支混合模式的电场分布；(f)有 ENZ 主要特性的耦合低频支模式的电场分布

上下分支由于与反交叉点的距离不同，所反映出来的物理性质也不同。

最后通过改变 GaN 薄膜厚度得到双层结构的反射谱，可以观察到，两种模式耦合的强弱也会发生变化。图 4(c)表明，在双层薄膜结构中存在两个极化子分支，因此可以观察到两个共振谷，表明对于较厚的薄膜，分支的频谱分裂增加，这种趋势在 TMM 中也很明显。奥托几何形状通过调节空气间隙的宽度，对激励效率进行有效控制，在某个临界间隙处，激励效率最佳。并且每个光谱中的两个反射率下降的深度相当，这证明了这两种模式的混合特性。因此，在本文的结构中，间隙的可调性是调节极化子谐振的重要工具，可揭示有关其耦合效率的信息。通过在 Al_2O_3 衬底上调节超薄 GaN 膜的厚度可以确定两种效应随着间隙的增加在耦合的演化中起重要作用。首先，由于 SPhP 位于两层膜的界面且 ENZ 模式存在于 GaN 膜中，如图 4(a)，(b)所示，随着 GaN 薄膜厚度的增加，两种模式的空间重叠减少，从而降低了有效耦合强度。图中的曲线和直线分别代表 Al_2O_3 和 GaN 的色散曲线。



(a) GaN 膜厚度为 80 nm (b) GaN 膜厚度为110 nm



(c) 三种不同厚度 GaN 膜的反射率谱

图 4 TMM 数值计算出不同厚度的双层结构混合模式的色散关系图

3 结论

利用 FDTD 和 TMM 对双层结构中模式耦合特性展开理论研究，发现通过调节薄膜厚度和空气间隙可以调谐两种模式的耦合强度，揭示双层结构中 SPhP 模式与 ENZ 模式耦合的物理本质。通过数值模拟可以观察到耦合模式的电场分布，且在强耦合位置同时具有 SPhP 和 ENZ 的性质。这种独特的功能意味着双层膜可以在模式传播的同时，利用 ENZ 模式的行为，在近场中实现极端光限制。本文表明通过研究极性电介质异质结构中的低损耗 ENZ 极化子与 SPhP 的耦合性质，能够进一步提升 ENZ 模式在纳米光子应用中的潜力。

参考文献：

[1] Silveirinha M G, Engheta N. Theory of supercoupling, squeezing wave energy and field confinement in narrow channels and tight bends using e near-zero metamaterials[J]. Physical Review B, Condensed Matter and Materials Physics, 2007, 76(24): 245109.1-245109.17.

[2] Edwards B, AluiA, Silveirinha M G, et al. Reflectionless sharp bends and corners in waveguides using epsilon-near-zero effects[J]. J. of Appl. Phys., 105(4): 044905.

[3] Argyropoulos C, Chen P Y, Giuseppe D, et al. Boosting optical nonlinearities in e-near-zero plasmonic channels[J]. Phys. Rev. B: Condensed Matter, 2012, 85(4): 045129.

[4] Suchowski H, O'Brien K, Wong Z J, et al. Four wave mixing propagation in fishnet metamaterials[C]// CLEO: QELS Fundamental Science, 2013: 14380821.

[5] Mattiucci N, Bloemer M J, Aguanno G D. Phase-matched second harmonic generation at the dirac point of a 2-d photonic crystal[J]. Opt. Express, 2014, 22(6): 6381-6390.

[6] Kim J, Dutta A, Naik G V, et al. Role of epsilon-near-zero substrates in the optical response of plasmonic antennas[J]. Optica, 2016, 3(3): 339.

[7] Passler N C, Gubbin C R, Folland T G, et al. Strong coupling of epsilon-near-zero phonon polaritons in polar dielectric heterostructures[J]. arXiv: 1811.05754, 2018: 8b01273.

[8] Nordin L, Dominguez O, Roberts C M, et al. Mid-infrared epsilon-near-zero modes in ultra-thin phononic films[J]. Appl. Phys. Lett., 2017, 111(9): 091105.

[9] Caldwell J D, Lindsay L, Giannini V, et al. Low-loss, infrared and terahertz nanophotonics using surface phonon polaritons[J]. Nanophotonics, 2015, 4(1): nanoph-2014-0003.

[10] Runnerstrom E L, Kelley K P, Folland T G, et al. Polaritonic hybrid-epsilon-near-zero modes: engineering strong optoelectronic coupling and dispersion in doped cadmium oxide bilayers[J]. arXiv preprint: 1808.03847, 2018.

作者简介：

杨明莉(1994—)，女，硕士研究生，主要从事微纳光学研究；

陈溢杭(1979—)，男，博士，教授，主要从事光子晶体、微纳光学的研究。

材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.015

氧化镓生长模拟中的流场与反应参数优化研究

戴必胜[1]，陈　琳[1,2*]，陶志阔[1]，修向前[2]

（1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院，南京 210023；2. 南京大学 电子科学与工程学院，南京 210023）

摘　要： 建立了用于生长直径为15.24 cm（6 inch）的Ga_2O_3材料的氢化物气相外延（HVPE）生长腔的二维几何模型，对Ga_2O_3材料的生长进行了数值模拟。依次优化了GaCl进气速度、O_2进气速度、喷口到衬底间的距离等关键参数，在较高生长速率下使衬底上的Ga_2O_3膜厚相对均匀度达到7.02%。此外，对仿真中不同的反应活化能设置进行了对比实验，发现活化能参数虽然对平均生长速率有明显影响，但是对样品的生长速率分布及均匀性影响不大。

关键词： Ga_2O_3；氢化物气相外延；计算机仿真；流速；活化能

中图分类号： TN304.054；TN304.23　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0527－04

Optimization of Flow Field and Reaction Parameters in the Growth Simulation of Gallium Oxide

DAI Bisheng[1], CHEN Lin[1,2], TAO Zhikuo[1], XIU Xiangqian[2]

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, CHN; 2. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, CHN)

Abstract: A two-dimensional geometry model of hydride vapor phase epitaxy (HVPE) growth chamber with the diameter of 15.24 cm (6 inch) was established to simulate the growth of Ga_2O_3 material. The key parameters were optimized, such as the inlet velocity of GaCl and O_2 and the distance between the nozzle and the substrate. The uniformity of the thickness of Ga_2O_3 film on the substrate reached 7.02% at a relatively high growth rate. In addition, simulation experiments were carried out under different reactive activation energy parameters. It is found that although the activation energy parameters affect the average growth rate significantly, they have little influence on the optimal design of growth rate distribution and uniformity of the samples.

Key words: Ga_2O_3; HVPE; computer simulation; flow rate; activation energy

0　引言

氧化镓（Ga_2O_3）具有禁带宽度大、击穿场强高、Baliga优值高达3 444以及对可见光甚至紫外光透明等特点，在高压、高功率的电力电子器件以及短波长光电器件领域相较GaN和SiC更具优势[1]。在材料获取方面，目前虽然有浮区法、定边膜喂法和柴氏拉晶法等熔体生长技术用于制造Ga_2O_3块体[2]，但是单晶尺寸相对较小；而分子束外延（MBE）[3]和金属有机化合物化学气相沉积（MOCVD）等方法生长速率低，不适合大尺寸厚膜的制备[4]。近年来，氢化物气相外延（HVPE）技术以沉积速率高、结晶质量高，可进行大面积单晶生长等优点，在Ga_2O_3材料制备中引起了研究人员的关注[5]。但HVPE方法生长的材料质量对反应腔体的几何参数和气流环境较敏感，生长速率和均匀性的优化需要长时间的摸索，相较于发展成熟的GaN材料，Ga_2O_3在生长过程中尚存在许多待确定的因素，而将此过程交由计算流体力学（CFD）进行仿真实验则能显著加快探索进程，并帮助人们理解实验参数设计中的内在规

收稿日期：2020－01－14.

基金项目：国家自然科学基金项目（61574079）；南京邮电大学校级科研基金项目（NY217108）.

* **通信作者：**陈　琳　**E-mail：**cl@njupt.edu.cn

律。本文对用于生长直径为 15.24 cm(6 inch)的 Ga_2O_3 样品的 HVPE 生长腔体进行了数值模拟,对优化流场与反应活化能等参数设置给出了建议。

1 仿真模型建立与反应参数设置

1.1 反应腔几何模型的建立

仿真使用的 HVPE 反应腔的二维几何模型示意图如图 1 所示。反应物中,GaCl 气体来源于金属 Ga 与 HCl 气体在腔体前端的反应,从腔体中心进气;O_2 从腔体外围进气,二者都由 N_2 作为载气输运到衬底上方,在其表面反应生成 Ga_2O_3。位于 GaCl 与 O_2 管路之间的 N_2 起分隔作用,防止 GaCl 与 O_2 过早发生反应[6]。由于模型是轴对称的,建模及分析只需考虑反应腔纵截面的一半,下列讨论中各图的横坐标衬底位置表示衬底右半边区域各点到衬底中心的水平距离。

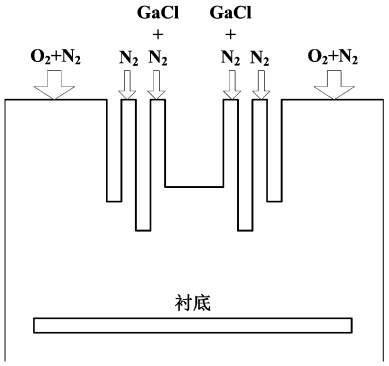


图 1 反应腔的二维几何模型示意图

1.2 模拟条件设置

本文在不影响实验规律的前提下,作了以下假定:(1)认为反应气体均为不可压的理想气体;(2)该腔体因尺寸和流速较大,计算所得雷诺数大于 2 000,故使用湍流模型以贴合实际;(3)认为反应室内生长区恒温,不考虑辐射作用;(4)反应在常压下进行,考虑重力作用。

反应腔中各种反应物的密度、比热容、标准反应焓、标准反应熵、热导率和粘度等参数可以通过气体手册查出[7-8]。反应腔内气体之间的扩散系数通过马克斯韦尔-吉列兰公式[9]估算得出:

$$D=\frac{4.36\times10^{-5}T^{\frac{3}{2}}\sqrt{\frac{1}{M_A}+\frac{1}{M_B}}}{p\left[(V_A)^{\frac{1}{3}}+(V_B)^{\frac{1}{3}}\right]^2} \quad (1)$$

式中,扩散系数 D 的单位为 m^2/s,T 为温度,单位为 K,p 为总压强,单位为 kPa,M_A 与 M_B,V_A 与 V_B 分别为 A,B 两种物质的摩尔质量和分子体积。

设置反应腔的平均温度为 1 280 K[4],反应腔内气体的二元扩散系数 D 经式(1)计算得出,如表 1 所示。

表 1 气体二元扩散系数(单位:m^2/s)

气体	N_2	Cl_2	GaCl
O_2	1.323×10^{-4}	9.889×10^{-5}	7.906×10^{-5}
GaCl	7.636×10^{-5}	5.089×10^{-5}	
Cl_2	9.432×10^{-5}		

仿真结果主要以衬底上的生长速率与相对均匀度作为衡量指标,其中相对均匀度定义为衬底表面各网格点生长速率的标准差与平均生长速率的比值,该值越小表示均匀性越好。

2 反应腔气体流量和几何参数的模拟实验与优化

2.1 GaCl 和 O_2 进气速度的数值模拟与优化

在 HVPE 的两种气体反应物中,GaCl 的进气速率是影响薄膜质量最重要的因素。气流过慢不利于 GaCl 的扩散,而过快则会导致 GaCl 在衬底上方的浓度分布不均匀,影响生长出的 Ga_2O_3 薄膜质量。其次要考虑 O_2 的流速,使扩散衬底中心的 O_2 有足够的浓度,保证一定的生长速率;同时应避免过高的 O_2 流量造成衬底上方Ⅵ/Ⅲ比过大,导致薄膜生长质量变差[10]。所以寻找合理的 GaCl 与 O_2 的流速对 Ga_2O_3 的生长至关重要。

2.1.1 GaCl 流速优化实验

在本次仿真中,初始设置的 GaCl 的摩尔分数为 0.5,O_2 的进气速度为 0.03 m/s,O_2 的摩尔分数为 0.5,分隔气 N_2 的进气速度为 2.8 m/s,衬底到喷口之间的距离为 15 cm。保持上述条件不变,仅改变 GaCl 的进气速度,将其依次设置为 4,5,6,7,8,9,10 和 11 m/s,共进行 8 组仿真。得到 Ga_2O_3 的生长速率分布,如图 2 所示(取其中代表性的 5 组)。

从图中的生长速率分布可以看出,随着 GaCl 流速的提高,Ga_2O_3 的生长速率在开始阶段逐渐升高,但在 GaCl 进气速度超过 9 m/s 后,Ga_2O_3 的生长速率反而开始下降。这是由于在二元反应中,当反应物浓度相近且足量时,生成物 Ga_2O_3 的生长速率由 GaCl 与 O_2 的摩尔浓度的乘积决定[11];但当 GaCl 进气速度过高时,O_2 向衬底上方的扩散受阻,

此时相对不足量的 O_2 浓度将主导 Ga_2O_3 的生长速率，使之呈下降趋势。

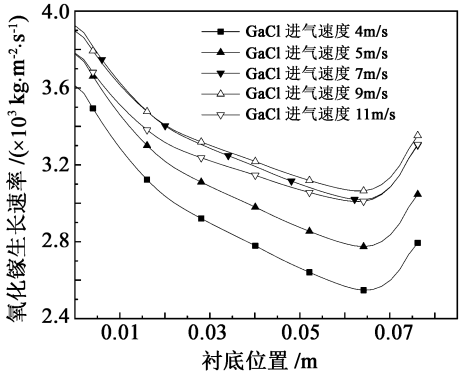


图 2　不同 GaCl 进气速度下 Ga_2O_3 的生长速率

2.1.2　O_2 流速优化实验

根据之前的仿真结果，设置 GaCl 的进气速度为 9 m/s，其他条件不变，仅改变 O_2 的进气速度，分别设置为 0.005，0.01，0.02，0.03，0.04，0.05，0.06，0.07 和 0.08 m/s，共进行 9 组仿真实验。在不同的 O_2 进气速度下，Ga_2O_3 的平均生长速率和相对均匀度的变化折线图如图 3 所示。

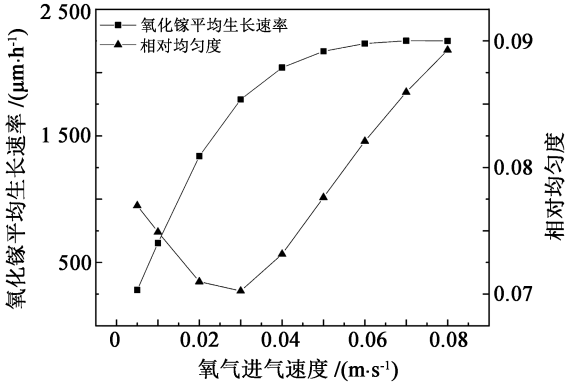


图 3　不同 O_2 流速下 Ga_2O_3 平均生长速率及相对均匀度

从图 3 可以看出，随着 O_2 进气速度的增大，衬底上 Ga_2O_3 的平均生长速率逐渐增加，在 O_2 进气速度达到 0.06 m/s 后趋于稳定。然而，随着 O_2 进气速度的提高，相对均匀度先递减后递增，在 O_2 进气速度为 0.03 m/s 时，相对均匀度最低，约为 7.02%。综上所述，本文选择 0.03 m/s 作为反应腔优化的 O_2 进气速度。

2.2　衬底与喷口距离的优化实验

在 HVPE 生长 Ga_2O_3 的计算机模拟中，喷口到衬底中心的距离会直接影响 Ga_2O_3 的生长速率以及相对均匀性。在前文所提的参数不变的条件下，设置了喷口到衬底的距离分别为 15，10 和 5 cm，进行 3 组仿真。结果表明，当距离为 5 cm 时，Ga_2O_3 薄膜的生长速率较快(1 895 μm/h)，但相对均匀性最差(11.6%)；距离为 15 cm 时，Ga_2O_3 薄膜的相对均匀性最好(7.02%)，生长速率较慢(1 788 μm/h)。该结果说明 15 cm 的距离足够 GaCl 与 O_2 均匀扩散到衬底表面。从生长出的 Ga_2O_3 薄膜的质量考虑，本文选取使 Ga_2O_3 薄膜的相对均匀性最好的 15 cm 作为喷口到衬底的优化距离。

3　化学反应活化能对仿真结果的影响

根据已有关于 HVPE 生长 Ga_2O_3 薄膜的报道[12]，Ga_2O_3 薄膜的生长速率可以达到 250 μm/h 以上，而本文中的模型进行仿真模拟得出的最高速率达到 1 788 μm/h。造成这一数据差异的原因有两个：(1)本次仿真中使用的 GaCl 与 O_2 的摩尔分数较高，GaCl 与 O_2 的浓度偏高；(2)本次仿真工作中设置的化学反应活化能为根据实验结果拟合的估算值，需要优化。关于指前因子，已有报道显示指前因子的设置对反应腔中壁面反应的生长速率与均匀度的影响不大[13]。为了分析化学反应活化能对 Ga_2O_3 薄膜的生长速率和相对均匀性的影响，本文讨论了在不同的化学反应活化能下，GaCl 的流速对 Ga_2O_3 薄膜的生长速率和相对均匀性的影响。

3.1　不同化学反应活化能的数值模拟

根据已有关于 HVPE 生长 Ga_2O_3 薄膜的实验报道[14]，直径为 75 mm 的反应腔在采用 100～400 cm^3/min 的 GaCl 流量时，Ga_2O_3 的生长速率在 75～250 μm/h。

本文采用的反应腔腔体直径为 200 mm，按照比例调整实验的各项参数，得到 GaCl 的进气速度为 6.96 m/s，质量分数在 0.08～0.274；O_2 的进气速度为 0.07 m/s，质量分数为 0.231 7；N_2 的进气速度为 4.27 m/s。假定参数缩放后保持实验报道的生长速率，通过设置不同的化学反应活化能进行仿真，最终得出的活化能参数为 6.0×10^7 J/kmol，此前的优化实验中即采用了该数值。

为了观察活化能对生长规律的影响，改变其数值分别为 7.7×10^7，8.7×10^7，9.7×10^7 和 1.1×10^8 J/kmol，加上原本设置的 6.0×10^7 J/kmol 共 5 组数据，在上述优化条件下进行仿真对比。

3.2 不同化学反应活化能下 GaCl 进气速度对 Ga_2O_3 的相对均匀度的影响

从图 4 中可以看出，当反应活化能从 6.0×10^7 J/kmol 增加至 8.7×10^7 J/kmol 时，相对均匀度总体不断降低，在与 GaCl 流速的关系上则均为单调递减；而当活化能设置为 9.7×10^7 J/kmol 时，随着 GaCl 流速的增加，相对均匀度先降低后升高；当活化能增加至 1.1×10^8 J/kmol 时，相对均匀度与 GaCl 流速的关系变为单调递增。

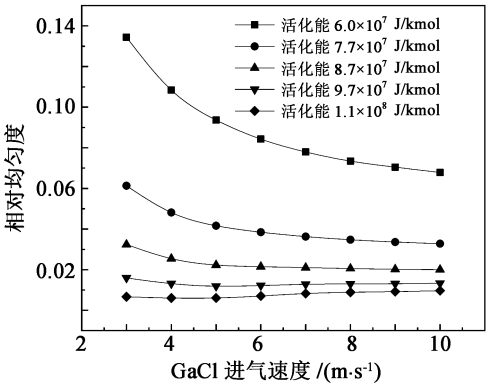


图 4 不同反应活化能下 GaCl 进气速度对 Ga_2O_3 相对均匀度的影响

分析其原因为：活化能作为反应势垒，在数值较低时反应较易进行，Ga_2O_3 生长速率主要取决于反应前体中浓度较低者的分布；而活化能数值增大较多时，Ga_2O_3 薄膜的生长速率将显著降低，即衬底上方 GaCl 与 O_2 的消耗速率较低。此时供给的 GaCl 与 O_2 均过量，生成物的生长速率将与各反应物摩尔浓度的乘积成正比。并且因为反应速度很慢，衬底的边缘效应减弱，原本 Ga_2O_3 生长速率曲线在衬底边缘部分的上翘变得平缓，而同时衬底中心的 GaCl 摩尔浓度很高，造成中心与边缘的生长速率差异悬殊，从而导致均匀性变差。但当活化能数值变化范围较小时，仿真结果的总体变化趋势不受影响。

4 结论

本文对 HVPE 生长 Ga_2O_3 的流量、几何参数及活化能进行了二维模拟，结果表明：当 GaCl 进气速度为 9 m/s，O_2 进气速度为 0.03 m/s 时，衬底上 Ga_2O_3 的平均生长速率达到 1 788 μm/h，相对均匀性达到 7.02%。反应活化能的大小对平均生长速率有显著影响，但对反应腔的参数设计影响不大。

参考文献：

[1] Higashiwaki M, Sasaki K, Murakami H, et al. Recent progress in Ga_2O_3 power devices[J]. Semiconductor Science and Technol., 2016, 31(3): 034001.

[2] 穆文祥. β-Ga_2O_3 单晶的生长、加工及性能研究[D]. 济南：山东大学，2018.
Mu Wenxiang. Research on growth, processing and properties of β-Ga_2O_3 single crystal[D]. Jinan: Shan Dong University, 2018.

[3] 王 伟，褚夫同，岳 超，等. β-Ga_2O_3 薄膜的分子束外延生长及其紫外光敏特性研究[J]. 电子元件与材料，2013，32(5)：17-19.
Wang Wei, Chu Futong, Yue Chao, et al. Research on the molecular beam epitaxial growth of β-Ga_2O_3 thin film and its ultraviolet photosensitivity[J]. Electronic Components and Materials, 2013, 32(5): 17-19.

[4] Murakami H, Nomura K, Goto K, et al. Homoepitaxial growth of β-Ga_2O_3 layers by halide vapor phase epitaxy[J]. Appl. Phys. Express, 2015, 8: 015503.

[5] Xiong Zening, Xiu Xiangqian, Li Yuewen, et al. Growth of β-Ga_2O_3 films on sapphire by hydride vapor phase epitaxy[J]. Chinese Phys. Lett., 2018, 35(5): 162-164.

[6] Nomura K, Goto K, Togashi R, et al. Thermodynamic study of β-Ga_2O_3 growth by halide vapor phase epitaxy[J]. J. of Crystal Growth, 2014, 405: 19-22.

[7] 叶大伦，胡建华. 实用无机物热力学数据手册[M]. 第 2 版. 北京：冶金工业出版社，2002：391.
Ye Dalun, Hu Jianhua. Handbook of Thermodynamic Data for Practical Inorganics[M]. 2nd Edi. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 391.

[8] 卡尔 L·约斯. Matheson 气体数据手册[M]. 第 7 版. 北京：化学工业出版社，2003：933.
Carl L·Yaws. Matheson Gas Data Manual[M]. 7th Edi. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 933.

[9] 蒋维钧. 化工原理. 下册[M]. 第 2 版. 北京：清华大学出版社，2003：17-18.
Jiang Weijun. Principles of Chemical Engineering. Volume Ⅱ[M]. 2nd Edi. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 17-18.

[10] Safvi S A, Perkins N R, Horton M N, et al. Effect of reactor geometry and growth parameter on the uniformity and material properties[J]. J. of Crystal Growth, 1997, 182: 233-237.

[11] 景 杰. 基于数值模拟的 HVPE 反应器设计与优化[D]. 南京：南京邮电大学，2016.
Jing Jie. Design and optimization of HVPE reactor based on numerical simulation[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommun., 2016.

（下转第 547 页）

材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.016

偏振发光的钙钛矿纳米线薄膜

王健越[1,3]，魏雅平[2,3]，邱龙臻[3]，朱　俊[3]*

（合肥工业大学 1. 电子科学与应用物理学院；2. 化学与化工学院；
3. 光电技术研究院 特种显示与成像技术安徽省技术创新中心，合肥 230009）

摘　要： 偏振发光薄膜在液晶显示中有潜在的应用，可有效降低能耗。制备偏振发光薄膜的关键在于对发光材料进行有序的取向。以各向异性的 $CsPbBr_3$ 纳米线为发光材料，使用偏心旋涂法对其进行取向并制备偏振发光薄膜。采用荧光光谱仪测试薄膜的偏振度，使用扫描电镜观察纳米线的取向形貌。通过改变偏心旋涂的基底、纳米线分散液的浓度和溶剂组分来优化纳米线薄膜的取向，获得了良好的荧光偏振度。

关键词： 钙钛矿纳米线；偏心旋涂；偏振发光；各向异性；取向

中图分类号： TB34　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0531－04

The Perovskite Nanowire Films with Polarized Luminescence

WANG Jianyue[1,3], WEI Yaping[2,3], QIU Longzhen[3], ZHU Jun[3]

(1. School of Electronic Science & Applied Physics; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering; 3. Special Display and Imaging Technology Innovation Center of Anhui Province, Academy of Optoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, CHN)

Abstract: Polarized light-emitting films have potential applications in liquid crystal displays and can significantly reduce energy consumption. The key to the preparation of polarized light-emitting films lies in the ordered orientation of the light-emitting materials. In this paper, the anisotropic $CsPbBr_3$ nanowires were used as the luminescent material, and the off-center spin-coating method was used to perpare the polarized luminescent film. The fluorescence spectrometer was used to test the degree of polarization of the film, and scanning electron microscope was used to observe the orientation of the nanowires. The orientation of the nanowire film was optimized by changing the substrates, nanowire dispersion concentration, and solvent composition, and a good fluorescence polarization degree was obtained.

Key words: perovskite nanowires; off-center spin-coating; polarized emission; anisotropy; alignment

0　引言

偏振发光薄膜在立体投影、液晶显示等光学领域有着广泛的应用。通常的液晶显示屏(LCD)利用线偏振光来控制光的通断，而直接采用偏振背光源可以大大降低 LCD 的成本并提高器件效率。偏振发光薄膜是制备偏振光源的关键。对无机材料来说，实现偏振发光一般需要各向异性的晶体，从而产生各向异性的光子发射，比如纳米棒/线、纳米片/盘等。钙钛矿纳米材料是一种性能优异的发光材料，有着发射峰窄、颜色可调、荧光量子产率高等优势。Tauber 等[1]于 2016 年报道了 $CH_3NH_3PbI_3$ 单根纳米线的偏振光致发光(PL)，其偏振度高达 0.7。Jurow 等[2]于 2017 年报道了钙钛矿纳米晶体薄膜的偏振发射。2018 年，Raja 等[3]使用聚合物材料与

收稿日期：2020－01－14.
基金项目：安徽省杰出青年科学基金项目(1708085J09).
* **通信作者：**朱　俊　　**E-mail：** jzhu@hfut.edu.cn

钙钛矿纳米线浇铸共混，通过拉伸取向制备了偏振光致发光薄膜，获得了 0.44 的偏振度。2019 年，Meng 等[4] 采用原位法在聚乙烯醇中合成 $CH_3NH_3PbX_3$ 纳米晶体，通过静电纺丝技术制备了偏振荧光的纳米纤维，其最高荧光偏振度达到了 0.53。这些研究证明，钙钛矿纳米材料具有优异的偏振特性。

取向方法是制备偏振发光薄膜的关键。目前已报道的取向方法有模板辅助成膜法[5-8]、Langmuir-Blodgett 沉积成膜法[9]、摩擦取向法[10-11]、机械拉伸法[12-14]，以及偏心旋涂法[15-17]等。对于钙钛矿纳米晶体，目前常用的制备偏振发光薄膜的方法主要是拉伸取向法和静电纺丝取向法[3-4]。这两种方法都需要聚合物掺杂，工艺较为复杂。偏心旋涂法是一种新兴的取向方法，2014 年 Yuan 等[15]首次报道了这种方法。但目前这种方法还没有应用于无机纳米材料的偏振发光领域。相对于其他取向工艺，偏心旋涂法无需添加聚合物辅助取向，而且可以直接在基板上成膜，在薄膜晶体管[15]、偏振发光以及光学薄膜制备等领域非常有发展潜力。

本文采用偏心旋涂法对钙钛矿纳米线进行取向，制备出了偏振发光薄膜。通过多种优化，使得制备的钙钛矿纳米线薄膜的荧光偏振度超过 0.4，这表明偏心旋涂取向法可以从多种路径优化取向，从而适应不同的材料特性。

1 偏心旋涂法制备钙钛矿纳米线取向薄膜

采用文献[18]报道的方法合成 $CsPbBr_3$ 钙钛矿纳米线，样品的透射电镜(TEM)图如图 1 所示。纳米线直径约为 10 nm，长度为数百纳米。对合成样品使用 $PbBr_2$ 溶液进行表面处理，得到的纳米线的荧光量子产率达到了 28%。随后使用偏心旋涂法对纳米线分散液进行取向成膜。

偏心旋涂取向就是将旋涂基板放置在远离旋涂机真空吸头中心的位置，利用旋涂时溶液快速挥发时产生的剪切力使纳米线取向。对 5 mg/ml 的 $CsPbBr_3$ 纳米线，分别使用中心旋涂和偏心旋涂在面积为 9 mm^2 的玻璃基底上成膜，并测试薄膜的荧光偏振度。使用偏振片和荧光光谱仪对薄膜进行测试，使偏振片光轴与薄膜取向方向成垂直或者平行，分别测试其 PL 强度。偏振度公式如下：

$$P=(L_1-L_2)/(L_1+L_2) \quad (1)$$

式中，P 为钙钛矿纳米线的偏振度，L_1 和 L_2 分别为钙钛矿纳米线取向方向和偏振片光轴方向成平行和垂直时所测得的薄膜荧光强度。如图 2 所示，中心旋涂成膜的 $CsPbBr_3$ 纳米线薄膜偏振度可以忽略不计，而偏心旋涂成膜的 $CsPbBr_3$ 纳米线薄膜偏振度达到了 0.45。扫描电镜(SEM)也清晰地显示出两种成膜方式在纳米线取向上的差别。中心旋涂的纳米线薄膜如图 3(a)所示，纳米线在基底上随机分布，杂乱无序。偏心旋涂的纳米线薄膜如图 3(b)所示，纳米线沿基片径向有序排列。可见，采用偏心旋涂取向法制备的薄膜具有良好的取向效果。

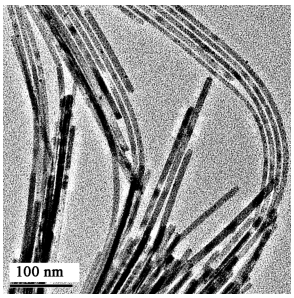
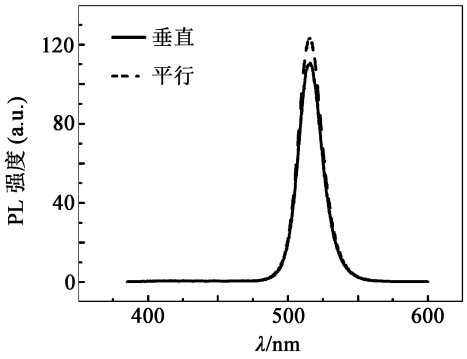
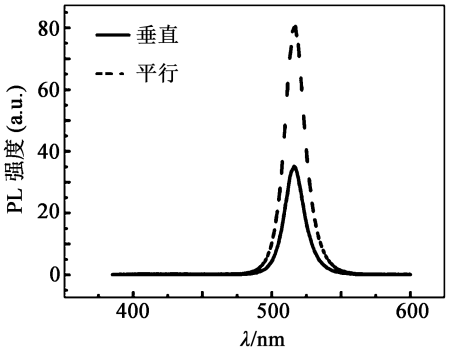


图 1 $CsPbBr_3$ 钙钛矿纳米线 TEM 图

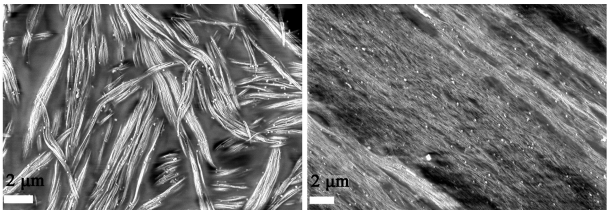


(a) 中心旋涂的 $CsPbBr_3$ 钙钛矿纳米线薄膜 PL 谱



(b)偏心旋涂的 $CsPbBr_3$ 钙钛矿纳米线薄膜 PL 谱

图 2 不同取向的 $CsPbBr_3$ 钙钛矿纳米线薄膜偏振特性对比图



（a） 中心旋涂　　（b） 偏心旋涂

图 3　是否取向的 $CsPbBr_3$ 钙钛矿纳米线薄膜表面形貌

钙钛矿纳米线是以分散液的形式散在溶剂中，那么一定溶剂中纳米线的相互作用可能会对取向效果有影响。用不同浓度的纳米线己烷分散液，使用偏心旋涂取向技术，在玻璃片上制备钙钛矿纳米线薄膜，探究纳米线分散液浓度对薄膜荧光偏振度的影响。以 5 mg/ml 为间隔，使用较少的分散液体，以尽量减少浓度估算的误差。如表 1 所示，当分散液浓度从 5 mg/ml 上升到 25 mg/ml 时，经过偏心旋涂取向的纳米线的薄膜荧光偏振度由 0.45 下降到 0.18。这说明使用偏心旋涂取向法对纳米线进行取向，得到的薄膜 PL 偏振度与分散液的浓度呈反比。因为偏心旋涂法的取向过程是对纳米线分散液整体施加一个定向离心力，在一定溶剂下，过多的钙钛矿纳米线的数量不利于纳米线的成膜取向。

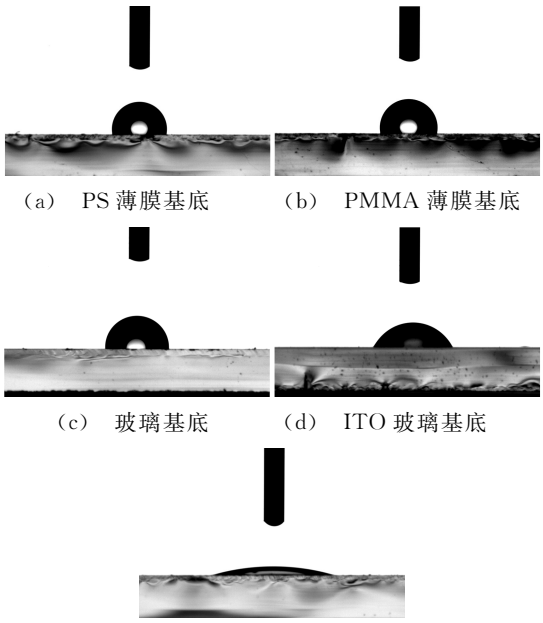
表 1　纳米线分散液浓度对偏心旋涂取向效果的影响

浓度/(mg·ml^{-1})	薄膜荧光偏振度
5	0.45
10	0.39
15	0.31
20	0.26
25	0.18

对于偏心旋涂取向技术，能影响到最终的纳米线薄膜取向效果的因素还有很多，薄膜基片的表面亲/疏水性是其中之一。在偏心旋涂的过程中，溶剂随转速的增加迅速挥发，而在溶剂挥发方向，也就是离心力的方向，溶剂挥发产生的剪切力使得钙钛矿纳米线沿离心力方向有序排列，在这个过程中，纳米线与基片的接触性会对最终的取向效果产生影响。选取多种不同的基底表面，它们具有不同的接触角，

表 2　不同基底对于偏心旋涂取向效果的影响

基底	接触角/(°)	薄膜荧光偏振度
PS	103	0.27
PMMA	102	0.33
玻璃	92	0.34
ITO 玻璃	62	0.44
PEDOT：PSS	16	0.42



（a） PS 薄膜基底　　（b） PMMA 薄膜基底

（c） 玻璃基底　　（d） ITO 玻璃基底

（e） PEDOT：PSS 薄膜基底

图 4　不同基底表面接触角图

如表 2 和图 4 所示。分别采用聚苯乙烯(PS)基底、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)基底、玻璃基底、ITO 基底和 PEDOT：PSS 基底，来检验偏心旋涂取向法中，旋涂基底的表面接触性对纳米线取向效果的影响。

可以看出，在有着较大接触角的 PS，PMMA 和玻璃片基底上偏心旋涂，所得到的纳米线薄膜荧光偏振度相对较小，而在 ITO 玻璃片、PEDOT：PPS 等接触角较小的基底上偏心旋涂，所得到的纳米线薄膜荧光偏振度相对较大。这说明那些有着较小的接触角、具有亲水性表面的基底更适合于纳米线的取向，这可能是因为亲水性的表面润湿性更好，更有利于钙钛矿纳米线的有序排列。

溶剂工程也是偏振发光取向中常用的调控手段，考虑到在偏心旋涂中，纳米线受到溶液挥发时的剪切力而取向，取向时间的长短对取向效果也会造成一定影响。取向时间的长短和纳米线溶剂的挥发时间相关，而通常来说溶剂挥发时间和溶剂自身的沸点有关，己烷为低沸点溶剂，沸点为 69 ℃，甲苯为高沸点溶剂，沸点为 110 ℃。在这里使用不同的己烷和甲苯溶液混合比例，利用混合溶剂中不同的溶剂组分来调节偏心旋涂过程中纳米线溶剂的挥发速度，从而调节钙钛矿纳米线薄膜的荧光偏振度。如表 3 所示，使用的钙钛矿纳米线分散液混合溶剂比例为 $V_{己烷}$ ：$V_{甲苯}$ ＝3：1 的样品的薄膜荧光偏振度

为0.32,而随着混合溶剂中甲苯溶剂比例的升高,样品的薄膜荧光偏振度也逐渐升高。可以看出,在混合溶剂中,高沸点甲苯溶剂的含量越多,越有利于钙钛矿纳米线的取向。这也证实了作者的推论。

表3 不同纳米线溶剂比例对偏心旋涂取向效果的影响

溶剂比例($V_{己烷}$ ∶ $V_{甲苯}$)	薄膜荧光偏振度
3∶1	0.32
2∶1	0.33
1∶1	0.35
1∶2	0.41
1∶3	0.43

2 结论

使用偏心旋涂取向法制备了$CsPbBr_3$纳米线取向薄膜,并优化了薄膜基底、溶剂比例、分散液浓度等取向参数,获得的最高薄膜荧光偏振度超过了0.4。偏心旋涂取向技术简单可靠,取向和成膜合为一体,非常适合无机材料的取向研究,为制备新型高效偏振荧光的薄膜和器件提供了新的思路。

参考文献:

[1] Tauber D, Dobrovolsky A, Camacho R, et al. Exploring the electronic band structure of organometal halide perovskite via photoluminescence anisotropy of individual nanocrystals[J]. Nano. Lett., 2016, 16(8): 5087-5094.

[2] Jurow M J, Lampe T, Penzo E, et al. Tunable anisotropic photon emission from self-organized $CsPbBr_3$ perovskite nanocrystals[J]. Nano Lett., 2017, 17(7): 4534-4540.

[3] Raja S N, Bekenstein Y, Koc M A, et al. Encapsulation of perovskite nanocrystals into macroscale polymer matrices: Enhanced stability and polarization[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2016, 8(51): 35523-35533.

[4] Meng Linghai, Yang Changgang, Meng Jingjia, et al. In-situ fabricated anisotropic halide perovskite nanocrystals in polyvinylalcohol nanofibers: Shape tuning and polarized emission[J]. Nano Research, 2019, 12(6): 1411-1416.

[5] Briseno A L, Mannsfeld S C B, Mang M L, et al. Patterning organic single-crystal transistor arrays[J]. Nature, 2006, 444: 913-917.

[6] Hwang J K, Cho S, Dang J M, et al. Direct nanoprinting by liquid-bridge-mediated nanotransfer moulding [J]. Nat. Nanotechnol., 2010, 5: 742-748.

[7] Park K S, Cho B, Baek J, et al. Single-crystal organic nanowire electronics by direct printing from molecular solutions[J]. Adv. Funct. Mater., 2013, 23(38): 4776-4784.

[8] Park K S, Lee K S, Kang C, et al. Cross-stacked single-crystal organic nanowire p-n nanojunction arrays by nanotransfer printing[J]. Nano Lett., 2015, 15(1): 289-293.

[9] Cimrova V, Remmers M, Neher D, et al. Polarized light emission from LEDs prepared by the Langmuir-Blodgett technique[J]. Adv. Mater., 1996, 8(2): 146-149.

[10] Jandke M, Strohrieg P, Gmeiner J, et al. Polarized electroluminescence from rubbing-aligned poly (p-phenylenevinylene)[J]. Syn. Met., 2000, 111-112: 177-180.

[11] Choi G J, Le Q V, Choi K S, et al. Polarized light-emitting diodes based on patterned MoS_2 nanosheet hole transport layer[J]. Adv. Mater., 2017, 29(36): 1702598.

[12] Cunningham P D, Souza Joao B, Fedin Igor, et al. Assessment of anisotropic semiconductor nanorod and nanoplatelet heterostructures with polarized emission for liquid crystal display technology[J]. ACS Nano., 2016, 10(6): 5769-5781.

[13] He Juan, Towers A, Wang Yanan, et al. In situ synthesis and macroscale alignment of $CsPbBr_3$ perovskite nanorods in a polymer matrix[J]. Nanoscale, 2018, 10(33): 15436-15441.

[14] He Juan, Wang Yanan, Chen Hao, et al. Polarized emission from stretch-aligned perovskite nanorods-polymer composites with high stability[J]. SID 2018 Digest, 2018, 49(1): 218-221.

[15] Yuan Yongbo, Giri G, Ayzner A L, et al. Ultra-high mobility transparent organic thin film transistors grown by an off-center spin-coating method[J]. Nat. Commun., 2014, 5: 3005.

[16] Kang Lu, Chen Hui, Yang Zhongjian, et al. Seesaw-like polarized transmission behavior of silver nanowire arrays aligned by off-center spin-coating[J]. J. Appl. Phys., 2018, 123: 205110.

[17] Anzai T, Porzio W, Vohra V, et al. Polarized emission from conjugated polymer chains aligned by epitaxial growth during off-center spin-coating[J]. J. Chem., 2017, 9: 8637108.

[18] Zhang Dandan, Yang Yiming, Bekenstein Y, et al. Synthesis of composition tunable and highly luminescent cesium lead halide nanowires through anion-exchange reactions[J]. J. Am. Chem. Soc., 2016, 138(23): 7236-7239.

作者简介:

朱 俊(1979—),男,教授,主要从事钙钛矿材料偏振发光和太阳电池方面的研究。

材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.017

微针鳍散热器结构参数模拟及优化

王志敏[1]，叶贵根[1]*，薛世峰[1]，巩　亮[2]

（中国石油大学(华东)1. 储运与建筑工程学院；2. 新能源学院，山东 青岛 266580）

摘　要： 通过数值模拟研究了交错式微针鳍散热器的散热效应，分析了针鳍阵列间距和高度对散热器壁温和压降的影响。结果表明，压降随针鳍间距和针鳍高度的减小而呈非线性增加；壁温随针鳍间距的增大而上升，随针鳍高度的增加则呈现出波动趋势。基于上述研究，进一步利用响应表面近似法对微针鳍的横向间距、纵向间距和高度进行了优化，优化后压降最大可降低 61.11%。

关键词： 微针鳍散热器；热点；微流体冷却；参数优化

中图分类号： TK121　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0535－07

Simulation and Optimization of Structural Parameters of the Micro Pin-Fin Radiator

WANG Zhimin[1], YE Guigen[1], XUE Shifeng[1], GONG Liang[2]

(China University of Petroleum 1. College of Pipeline and Civil Engineering; 2. College of New Energy, Qingdao 266580, CHN)

Abstract: The heat dissipation effect of the interleaved micro-pin-fin heat sink was studied by numerical simulation, and the influence of the array spacing and height of the pin fins on the wall temperature and pressure drop of the heat sink was studied. Experimental results indicate that the press drop increases nonlinearly with the decreasing array spacing and height of the pin fins, while the wall temperature increases with the increase of the pin fin spacing, but it shows a fluctuation trend with the increase of the pin fin height. Based on the above research, it further optimizes the lateral spacing, longitudinal spacing and height of the microneedle fins with the method of response surface approximation. The pressure drop can be reduced by a maximum of 61.11% after optimization.

Key words: micro pin-fin heat sink; hot spot; microfluidic cooling; parameter optimization

0　引言

随着电子机械系统的不断发展，芯片系统功率不断提高，但同时也导致系统内部发热量过大。除了产生较大的平均热通量外，系统中还可能存在比平均热通量高很多倍的局部热点，这使得传统的风冷散热器已经无法满足散热需要。19 世纪 80 年代，Tuckerman 等[1]提出了使用微流体作为冷却剂的微通道散热器，为研究新的冷却技术带来了思路。

随着现代电子设备散热要求的提高以及微尺度制造技术的飞速发展，微通道散热器不只局限于平直微通道，许多高效的微通道结构被人们制造和研究，如微针鳍、回流腔、沟槽和肋片等结构[2-6]。微针鳍是目前比较流行的一种微通道结构，这种结构虽然增强了传热，但同时也导致模型内部压降显著增加。Kosar[7]和 Brunschwiler[8]等设计了相关实验，研究了圆柱针鳍翅片的排列方式(交错和平行)对模型内部压降的影响。Koz[9]和 Tullius[10]等对圆柱形针鳍阵列进行了参数化模拟，分析了针鳍内部的热和水力性能。Daniel 等[11-12]针对散热器中的热点问题开发了一种非均匀针鳍密度模型，通过增加背部针鳍的密度强化散热，从而达到消除高热量热点的目的。

收稿日期：2020－04－17.

基金项目：国家自然科学基金项目(11972376)；山东省自然科学基金项目(ZR2019MA007)；中央高校基本科研专项基金项目(19CX02032A).

* **通信作者：**叶贵根　　**E-mail：** yegg@upc.edu.cn

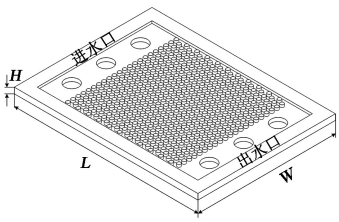
微通道散热器参数的优化对于芯片的降温控压是极为重要的，众多学者在这方面开展了大量研究。Shi 等[13-14]应用多目标进化算法，以最小化热阻和泵浦功率为目标，对矩形微通道进行优化，得到了其最佳结构参数。Hadad 等[15]采用 JAVA 算法和 NSGA-Ⅱ的现代优化算法对微通道散热器的多个参数进行了优化。Rao 等[16]使用响应面方法（Response Surface Methodology，RSM）和 JAVA 算法最大程度地减少矩形和梯形平行微通道散热器的热阻和泵浦功率。

综上可知，当前对微通道的优化设计研究主要集中在平直微通道的结构优化上。针对具有热点的微针鳍散热器的多参数优化研究尚处于起步阶段，其中，含有热点的微针鳍散热器的针鳍参数对热和液压性能的影响研究鲜有涉及。本文在前人研究的基础上，对具有热点的圆柱形微针鳍的散热器进行研究。通过数值模拟研究针鳍参数（横向间距、纵向间距和针鳍高度）对散热器温度和压降的影响，并利用多目标优化方法对针鳍的参数进行优化。

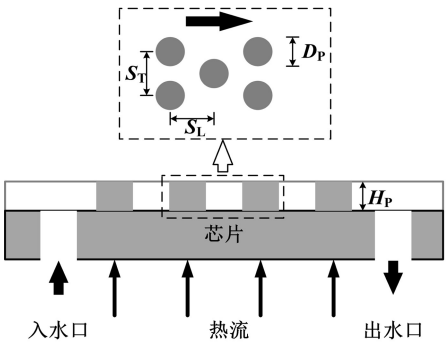
1 数值模型建立以及参数设置

1.1 数值模型及边界条件

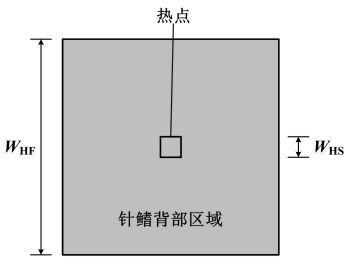
本文采用的微针鳍结构如图 1 所示，其中图 1(a)为模型整体示意图，图 1(b)为模型的针鳍排列方式示意图。该微针鳍结构拥有三个进水口和三个出水口，在针鳍区域的背部施加热流密度（如图 1(c)所示），其中，中心区域为热点区域。热量通过



(a) 整体模型图



(b) 针鳍排列示意图



(c) 针鳍背部热流施加区域示意图

图 1 微针鳍结构数值模型

热传导到达模型背部针鳍区域，冷却剂通过三个进水口进入模型内部，流经针鳍区域时通过热量交换带走热量，最后从出水口流出。本文设定针鳍的横向间距（S_T）和纵向间距（S_L）范围为 0.375～0.525 mm，针鳍高度（H_P）的范围为 0.1～0.3 mm。其他参数值在表 1 中列出。

模拟过程中遵循以下假设：

(1)流动是稳定的层流并且不可压缩；

(2)不考虑辐射换热；

(3)不考虑粘性耗散。

微通道散热器材料为硅，冷却剂为去离子水。硅的导热系数 k_{Si} 为温度 T 的函数[11]：

$$k_{Si}=2\,122.1-16.765T+4.818\,3\times10^{-2}T^2-4.744\,2\times10^{-5}T^3 \quad (1)$$

其中，温度单位为 K，公式使用范围为 280～373 K。硅和去离子水的其余热物理参数如表 2 所示。

表 1 模型几何参数 单位：mm

参数	L	W	H	D_P	W_{HF}	W_{HS}
数值	16	12	0.3	0.3	10	0.5

表 2 去离子水和硅的热物理参数

性能	硅	去离子水
密度/(kg·m^{-3})	2 330	998.2
热传导率/(W·m^{-1}·K^{-1})	由式(1)计算	0.6
比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	700	4 182
粘度/(kg·m^{-1}·s^{-1})	—	0.001 003

三个进水口设置为速度入口，速度均为 1 m/s（对应流量为 67.86 mL/cm^3），温度为 294.15 K（21 ℃）。出水口设置为压力出口，为常温大气压。在背景区域施加恒定热流密度，为 250 W/cm^2；热点区域热流密度为背景区域的两倍，即 500 W/cm^2。其余壁面均设置为绝热壁面。

1.2 网格划分及网格独立性分析

微通道散热的关键在于破坏边界层流动，因此

流体与针鳍接触区网格的划分至关重要。本文通过设置边界层来细化固-液接触区网格，然后使用混合方法完成不同设计的网格划分，其中流体域和固体域分别与六面体和四面体网格混合。为了减小网格尺寸对计算结果的影响，对于不同工况，固液接触区的边界层厚度方向的网格层数均固定为 3 层，部分网格如图 2 所示。

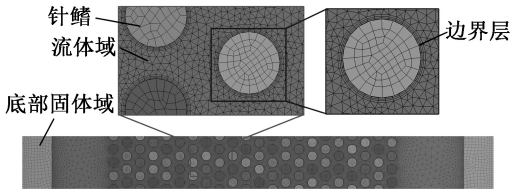


图 2　网格划分示意图

网格的数量对计算结果是否精确有着重要的影响。由于该区域结构复杂、针鳍数量较多，采用传统的网格独立性检验方法无法满足精度要求。本文主要在针鳍区域处减小了平均网格的大小，并使用文献[11]中的标准进行网格独立性检验，即：

$$C_i=\left|\frac{N^j-N^{j+1}}{N^j}\right|<5\times10^{-3} \tag{2}$$

式中，C_i 为网格独立性检验指数，N^j 为比较变量的计算值，N^{j+1} 为下一个精细网格中得到的计算值。在本文中对常规模型（$S_T=S_L=450\ \mu m$，$H_P=200\ \mu m$）进行网格独立性分析，并选用模型内部最高温度作为检验标准，即网格独立性检验指数设为 C_T。

表 3 列出了三个选定网格的网格独立性研究结果。根据这些结果，使用网格 2 的设置来平衡求解精度和计算时间。

表 3　网格独立性研究结果

网格	网格数目	模型内部最高温度	
		T_{max}/K	C_T
1	1 100 000	334.349	9.3×10^{-3}
2	2 783 502	331.25	2.2×10^{-3}
3	3 751 280	330.507	—

运用 ANSYS FLUENT 17.0 进行数值仿真。采用迭代方法 SIMPLEC 求解。运用二阶迎风格式求解动量和能量方程。通过设定不同的残差收敛标准，对模型计算进行评估。当能量残差达到 10^{-6} 时，计算时间和收敛情况良好，再增加收敛精度，计算机运行时间过长，而模拟结果并没有明显的提高。故设定收敛精度为 10^{-6} 时认为数值解收敛。

2　模拟结果与分析

2.1　横向间距对温度和压降的影响

图 3 给出了当纵向间距和针鳍高度保持不变时（$S_L=450\ \mu m$，$H_P=200\ \mu m$），横向间距 S_T 对微通道散热器热和水力性能的影响。从图中可以看出进出口压降 Δp 随着 S_T 的增大而呈非线性减小。这是因为 S_T 的增大能大大降低冷却剂的流动阻力，使冷却剂更好地在模型内部流动。模型内部最高温度 T_{max} 则随着 S_T 的增大呈先降低后上升的趋势，在 $S_T=400\ \mu m$ 时温度最低，为 328.8 K。当 S_T 由 375 μm 增加到 400 μm 时，内部最高温度出现大幅降低，为了分析其中缘由，提取了针鳍区域中间沿 x 方向冷却剂温度分布图，如图 4 所示。从图 4 可以看出，当冷却剂刚进入针鳍区域时，两者温度差异不大。但是，当冷却剂沿 x 方向流动时，$S_T=375\ \mu m$ 的模型内部冷却剂的温度上升速度却比 $S_T=400\ \mu m$ 的更快。冷却剂温度的升高导致冷却效率下降，故而模型内部具有更高的温度。

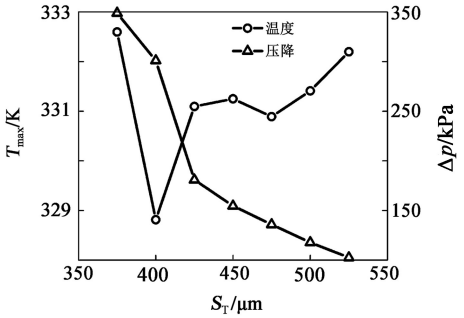


图 3　横向间距对温度和压降的影响

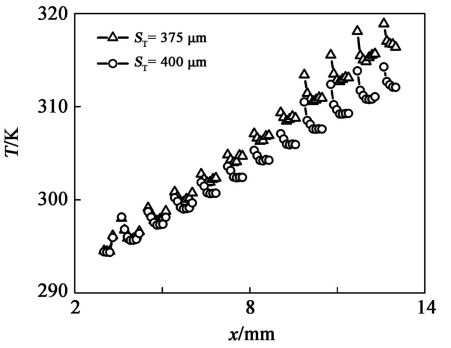


图 4　模型内部 x 方向冷却剂温度分布图

图 5 进一步给出了不同横向间距下模型内部沿 x 方向的温度和速度矢量分布。对比图 5 中温度图和流线图可以看出，随着横向间距的增加，冷却剂在针鳍间的流动速率逐渐下降，使得冷却剂的冷却效率进一步降低。在本文研究范围内，压降最高降低

了 70.7%，温度最高降低了 3.4 K。

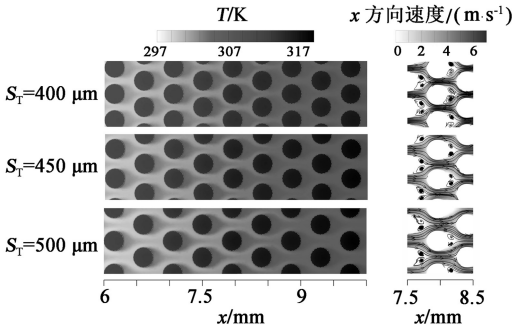


图 5 不同横向间距下模型内部沿 x 方向温度和速度矢量分布图

2.2 纵向间距对温度和压降的影响

图 6 显示了当横向间距和针鳍高度保持不变时（S_T=450 μm，H_P=200 μm），纵向间距 S_L 对微通道散热器热和水力性能的影响。从图中可以看出随着 S_L 的增大，模型内最高温度逐渐升高，而压降则逐步降低。S_L 的增大使冷却剂在针鳍间能够更好地流动，流动阻力降低。对比图 3 可以看出，相较于横向间距，纵向间距的改变对压降影响较小，且温度变化也更具规律性。图 7 给出了模型内部沿 x 方向的温度和速度分布。可以看出，纵向间距的改变

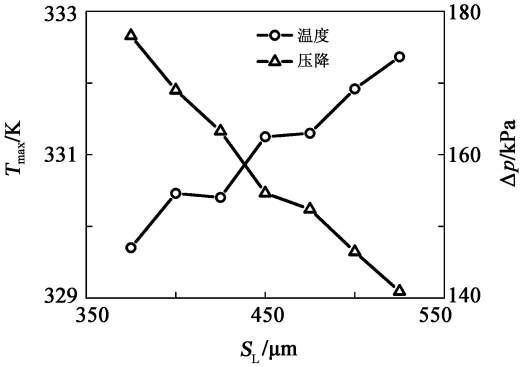


图 6 纵向间距对温度和压降的影响

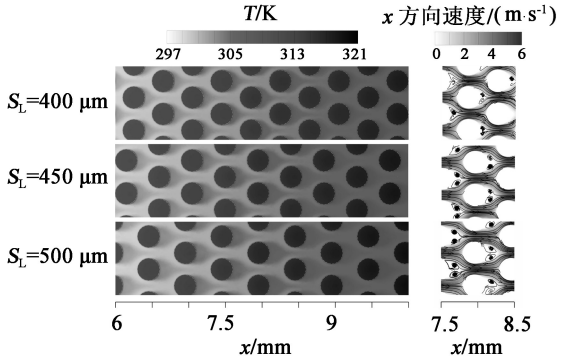


图 7 不同纵向间距下模型内部沿 x 方向温度和速度矢量分布图

并未对冷却剂流速产生较大影响，但由于纵向间距增大，传热面积随之减小，这导致模型内部温度呈现出上升趋势。在本文研究范围内，压降降低了 20.22%，温度提高了 2.7 K。

2.3 针鳍高度对温度和压降的影响

图 8 显示了当横向间距和纵向间距保持不变时（S_T=450 μm，S_L=450 μm），针鳍高度 H_P 对微通道散热器热和水力性能的影响。从图中可以看出，随着针鳍高度的提升，压降逐渐降低，但是温度呈上下波动趋势。可能原因如下：针鳍高度的提升使得流动空间增大，流动阻力降低，导致压降更小。温度方面，从图 9 中可以看出，针鳍高度越高，冷却剂流动速度越低，换热效率也相应越低。但是针鳍高度的提升同时有效地增加了换热面积，使散热器能够在相同时间内带走更多的热量，这提高了换热效率。因此，随着针鳍高度的增加，冷却剂流动速度下降，导致换热效率降低，而换热面积增大导致换热效率提高，两者之间的相互竞争使得温度出现波动。在研究范围内，压降最高可降低 85.6%。

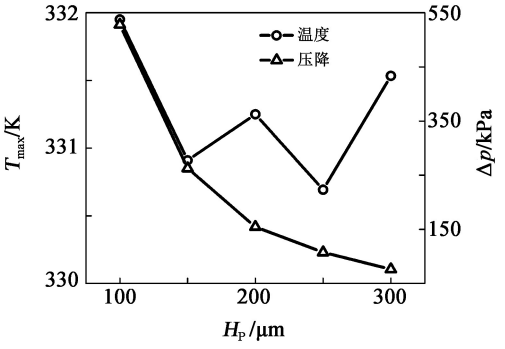


图 8 针鳍高度对温度和压降的影响

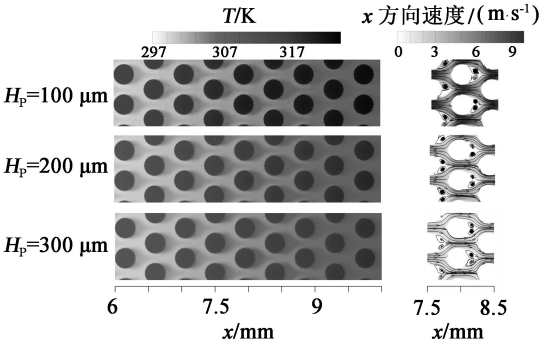


图 9 不同针鳍高度下模型内部沿 x 方向温度和速度矢量分布图

3 针鳍参数优化

3.1 优化方法

上述的模拟结果反映了针鳍间距对模型内最高

温度和压降的影响。为了得到最优化的间距，本文采用响应曲面近似（Response Surface Approximation，RSA）方法来实现模型多参数统一优化。

响应曲面近似方法是一种拟合多项式函数的方法，用于从数值计算中获得离散响应，然后建立目标函数的代理方程，它可以表示为

$$y(x)=\varphi_0+\sum_{j=1}^{N}\varphi_j x_j+\sum_{j=1}^{N}\varphi_{jj}x_j^2+\sum\sum_{i\neq j}\varphi_{ij}x_j \tag{3}$$

其中，x_j 是设计变量，N 为目标变量个数，φ 为回归系数，其值可以通过式 $(N+1)(N+2)/2$ 得到。在本文中，设计变量为 3 个：横向间距 S_T、纵向间距 S_L 和针鳍高度 H_P。目标变量为 2 个：壁面最高温度 T_{max} 和压降 Δp。

本文采用多重决定系数 R^2 来评估公式拟合的准确性。R^2 值越接近 1，公式拟合越准确。它的定义为

$$R^2=\frac{\sum_{i=1}^{Z}(\hat{y}_i-\bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{Z}(y_i-\bar{y}_i)^2} \tag{4}$$

其中，Z 是测试点的数量，y_i 是测试点的真实值，$\hat{y}_i$ 是拟合曲线的预测值，$\bar{y}_i$ 是测试点真实值的平均值。

通过多目标遗传算法（Multi-objective Evolutionary Algorithm，MOEA）对所求方程进行优化。在多目标优化问题中，目标函数往往受多种因素干扰。一个目标的改进可能会导致其他子目标的恶化。多目标优化问题就是找到一个最优解，称为 Pareto 最优解。本文采用多目标遗传算法中的 NSGA-Ⅱ算法程序，并对其进行评估。

3.2　优化结果

在响应面法中规定横向间距、纵向间距和针鳍高度的范围，响应面法自动生成一系列目标点。通过输入目标点的目标函数的数值，从而生成目标函数的方程。本文选取 35 个目标点对目标函数进行拟合，通过数值计算获得温度和压降，最终得到温度和压降关于横向间距、纵向间距和针鳍高度的显式表达式，即

$$\begin{aligned}\Delta p=&1.2\times10^4-40.2S_T+2.3S_L-47.9H_P+\\&4.8\times10^{-3}S_TS_L+0.1S_TH_P+6.1\times10^{-3}S_LH_P+\\&0.04S_T^2-0.01S_L^2+0.05H_P^2-8.6\times10^{-6}\cdot\\&S_TS_LH_P-2.3\times10^{-5}S_T^2S_L-7.8\times10^{-5}S_T^2H_P+\\&2.2\times10^{-5}S_TS_L^2-6.9\times10^{-5}S_TH_P^2-\\&7.0\times10^{-6}S_L^2H_P-1.3\times10^{-5}S_LH_P^2\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}T_{max}=&106.2-0.2S_T-0.7\times10^{-3}S_L-0.05H_P+3\times\\&10^{-5}S_TS_L+1.1\times10^{-5}S_TH_P+2.1\times10^{-5}S_LH_P+\\&2.1\times10^{-4}S_T^2+7.3\times10^{-6}S_L^2+1.0\times10^{-4}H_P^2\end{aligned} \tag{6}$$

两公式的多重决定系数分别为 0.997 1 和 0.998 2，均非常接近 1，由此可以确定所拟合方程是准确和可靠的。

通过多目标拟合得到的 Pareto 最优解如图 10 所示。为了评估本文拟合的多目标优化方法的准确性，从图中选取三个点进行建模分析，对多目标优化的结果和数值模拟结果进行了分析和比较，如表 4 所示。两者之间的偏差 E 定义为

$$E/\%=\left|\frac{\alpha_{CFD}-\alpha_{MOEA}}{\alpha_{CFD}}\right|\times100\% \tag{7}$$

从图 10 中可以看出，Pareto 最优解与数值解吻合得很好，误差在 8%以内。

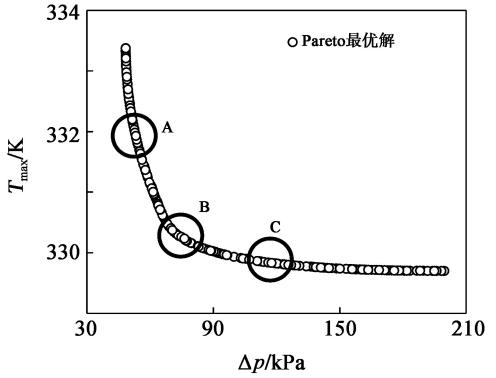


图 10　Pareto 最优解分布

表 5 则比较了三个 Pareto 最优解模拟值与常规模型（$S_T=450\ \mu m$，$S_L=450\ \mu m$ 和 $H_P=200\ \mu m$）的传热性能。在本文研究的范围内，针对 B 和 C 处，最高温度分别降低了 0.19 K 和 1.33 K，而 A 点的最高温度提高了 0.5 K。但是对于压降，A，B 和 C 三处的压降分别降低了 61.11%，51.99%和 27.41%。可以看出，优化针鳍参数后，可以在控制最高温度的同时，大幅降低模型内部的压降。

4　结论

本文对具有中心热点的微针鳍散热器模型进行了分析。以散热器内的最高温度和进出口压降为优化目标，对针鳍横向间距、纵向间距和针鳍高度三个参数进行优化。首先，建立了具有中心热点的微针

鳍散热器三维数值模型。接着,通过阶乘测试设计方法得到测试点,并通过三维数值模拟方法为每个测试点获得相对应的目标函数值。最后通过 RSA 方法得到目标函数方程,使用 MOEA 计算了 Pareto 最优解。本文所得到的主要结论如下:

(1)横向间距对模型的压降有较大影响。随着横向间距的减小,流动阻力逐渐增大,模型的压降非线性上升,温度则先下降后上升。在研究范围内,压降可降低 70.7%,温度最高降低 3.4 K。

(2)纵向间距对模型的压降影响最小且更具有规律性。压降随着纵向间距的增大而降低,同时温度呈上升趋势。在研究范围内,压降可降低 20.22%,温度提高 2.7 K。

(3)压降对针鳍高度相对敏感,针鳍高度的增加可以大幅降低模型内部压降。在研究范围内,压降最高可降低 85.6%。

(4)通过优化结构参数可以进一步提高微针鳍散热器的性能。优化后,可以在降低温度的同时有效降低微通道内部压差。相较于常规散热器,压降最高可降低 61%。

表 4 最优解与数值解对比

选取点	设计变量/μm			目标函数					
				T_{max}/K			Δp/kPa		
	S_T	S_L	H_P	MOEA 值	模拟值	E/%	MOEA 值	模拟值	E/%
A	500	420	270	331.69	331.75	0.02	55.4	60.14	7.88
B	480	375	260	330.31	331.06	0.23	73.16	74.24	1.45
C	470	375	230	329.89	329.91	0.01	107.04	112.26	4.65

表 5 最优解与常规模型对比

选取点	设计变量/μm			目标函数			
				T_{max}/K		Δp/kPa	
	S_T	S_L	H_P	Pareto 解	常规模型	Pareto 解	常规模型
A	500	420	270	331.75	331.25	60.14	154.64
B	480	375	260	331.06		74.24	
C	470	375	230	329.91		112.26	

参考文献:

[1] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Lett., 1981, 2(5): 126-129.

[2] Chai L, Wang L, Bai X. Thermohydraulic performance of microchannel heat sinks with triangular ribs on sidewalls-Part 2: Average fluid flow and heat transfer characteristics[J]. Inter. J. of Heat and Mass Transfer, 2019, 128: 634-648.

[3] Shafeie H, Abouali O, Jafarpur K, et al. Numerical study of heat transfer performance of single-phase heat sinks with micro pin-fin structures[J]. Appl. Thermal Engin., 2013, 58(1/2): 68-76.

[4] Wong K C, Lee J H. Investigation of thermal performance of microchannel heat sink with triangular ribs in the transverse microchambers[J]. Inter. Commun. in Heat and Mass Transfer, 2015, 65: 103-111.

[5] Chai L, Xia G, Liang Wang L, et al. Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks with periodic expansion-constriction cross-sections[J]. Inter. J. of Heat and Mass Transfer, 2013, 62: 741-751.

[6] Wei X J, Joshi Y K, Ligrani P M. Numerical simulation of Laminar flow and heat transfer inside a microchannel with one dimpled surface[J]. J. Electronic Packaging, 2007, 129(1): 63-70.

[7] Kosar A, Mishra C, Peles Y. Laminar flow across a bank of low aspect ratio micro pin fins[J]. J. Fluids Eng., 2005, 127(3): 419-430.

[8] Brunschwiler T, Michel B, Rothuizen H, et al. Interlayer cooling potential in vertically integrated packages [J]. Microsystem Technol., 2009, 15(1): 57-74.

[9] Mustafa Koz, Kosar A. Parameter optimization of a micro heat sink with circular pin-fins[C]// Proc. ASME 8th Inter. Conf. on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, 2010: 531-539.

[10] Tullius J F, Tullius T K, Bayazitoglu Y. Optimization of short micro pin fins in minichannels[J]. Inter. J. of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(15/16): 3921-3932.

[11] Lorenzini D, Green C, Sarvey T E, et al. Embedded single phase microfluidic thermal management for non-uniform heating and hotspots using microgaps with variable pin fin clustering[J]. Inter. J. of Heat and Mass Transfer, 2016, 103: 1359-1370.

[12] Lorenzini D, Joshi Y. Numerical modeling and experimental validation of two-phase microfluidic cooling in silicon devices for vertical integration of microelectronics[J]. Inter. J. of

Heat and Mass Transfer, 2019, 138: 194-207.

[13] 史晓军，李　珊，魏亚东，等. 纳米流体矩形微通道热沉结构参数多目标优化[J]. 西安交通大学学报，2018，52(5)：56-61.
Shi Xiaojun, Li Shan, Wei Yadong, et al. Multi-objective optimization on the geometrical parameters of a nanofluid-cooled rectangular microchannel heat sink[J]. J. of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(5): 56-61.

[14] Shi X, Li S, Mu Y, et al. Geometry parameters optimization for a microchannel heat sink with secondary flow channel[J]. Inter. Commun. in Heat and Mass Transfer, 2019, 104: 89-100.

[15] Hadad Y, Ramakrishnan B, Pejman R, et al. Three-objective shape optimization and parametric study of a micro-channel heat sink with discrete non-uniform heat flux boundary conditions[J]. Appl. Thermal Engin., 2019, 150: 720-737.

[16] Rao R V, More K C, Taler J, et al. Dimensional optimization of a micro-channel heat sink using Jaya algorithm[J]. Appl. Thermal Engin., 2016, 103: 572-582.

作者简介：

王志敏(1996－)，男，硕士研究生，主要研究方向为材料强度及其可靠性；

叶贵根(1983－)，男，博士，副教授，主要研究方向为微电子器件可靠性、冲击动力学、金属材料切削机理等。

(上接第 488 页)

[5] Jeon N J, Noh J H, Yang W S, et al. Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells[J]. Nature, 2015, 517: 476-480.

[6] Saliba M, Matsui T, Seo J Y, et al. Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency [J]. Energy & Environmental Science, 2016, 9(6): 1989-1997.

[7] Min H, Kim M, Lee S, et al. Efficient, stable solar cells by using inherent bandgap of α-phase formamidinium lead iodide [J]. Science, 2019, 366(6466): 749-753.

[8] Wu X, Trinh M T, Niesner D, et al. Trap states in lead iodide perovskites[J]. J. of the American Chemical Society, 2015, 137(5): 2089-2096.

[9] Heo S, Seo G, Lee Y, et al. Deep level trapped defect analysis in $CH_3NH_3PbI_3$ perovskite solar cells by deep level transient spectroscopy[J]. Energy & Environmental Science: EES, 2017(5): 1128-1133.

[10] Jiang F, Choy W C, Li X, et al. Post-treatment-free solution-processed non-stoichiometric $NiO_{(x)}$ nanoparticles for efficient hole-transport layers of organic optoelectronic devices[J]. Adv. Materials, 2015, 27(18): 2930-2937.

[11] Tu Yongguang, Yang Xiaoyu, Su Rui, et al. Diboron-assisted interfacial defect control strategy for highly efficient planar perovskite solar cells[J]. Adv. Mater., 2018, 30(49): 1805085.1-1805085.8.

[12] Zhang H, Lin H, Liang C, et al. Organic-inorganic perovskite light-emitting electrochemical cells with a large capacitance[J]. Adv. Functional Materials, 2015, 25(46): 7226-7232.

[13] Niu T, Lu J, Munir R, et al. Stable high-performance perovskite solar cells via grain boundary passivation[J]. Adv. Mater., 2018, 30(16): 1706576.

作者简介：

宋　奇(1992－)，男，河北张家口市人，硕士，主要从事光电子材料与器件方面的研究；

何志群(1959－)，女，博士，教授，博士生导师，主要从事有机聚合物发光材料与器件、显示技术，以及有机聚合物新能源材料及太阳光伏电池方面的研究。

光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.018

面向长距离量子通信的双光子关联成像技术

王登峰[1]，姚　鑫[1,2*]，焦仲科[1]，刘　玄[1]，董　帅[2]

（1. 中国空间技术研究院西安分院，西安 710100；2. 清华大学 电子工程系，北京 100083）

摘　要： 量子时域鬼成像利用光子对的时间-频率关联性实现了50 km光纤链路上的图像传送，有望应用于量子通信的协议中。然而，现有方案的成像质量较差，成像速度较慢，因此其应用性在一定程度上受到了限制。文章对已有成像方案进行了较大的改进，利用可编程滤波器数字设定待成像信息，进而实现了二维图像信息的自动化实时传送。实验结果证明，改进方案的成像质量和速度均有显著改善，有利于推动量子关联成像在量子通信领域的应用。

关键词： 时间-频率关联；鬼成像；符合计数测量；可编程滤波器；量子通信

中图分类号： O438　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0542－06

Two-photon Correlation Imaging Technique towards Long-distance Quantum Communications

WANG Dengfeng[1], YAO Xin[1,2], JIAO Zhongke[1], LIU Xuan[1], DONG Shuai[2]

（1. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, CHN;
2. Electronic Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100083, CHN）

Abstract: Quantum temporal ghost imaging utilizes the time-frequency correlation of photon pairs to realize the image transmission over optical fiber link of 50 km, which shows the potential applications in protocols of quantum communications. But the present schemes usually present poor imaging quality poor and low transmission speed, limiting the future application to some extent. In this paper, the scheme is considerably modified and a programmable optical filter is used to digitally set the information of the imaging object. Based on the modification, the two-dimensional image is transmitted automatically in real-time. Experimental results demonstrate that both the imaging quality and rate are notably improved with the modified scheme, pushing the applications of quantum correlation imaging in the field of quantum communications.

Key words: time-frequency correlation; ghost imaging; coincidence-count measurement; programmable optical filter; quantum secure communications

0　引言

关联成像即鬼成像，是一种通过两路光子的关联对放置在其中一路的物体进行成像的非直接成像技术[1-2]。具体而言，其中一路光子（习惯称为测试光路）经过待成像物体后被单像素探测器（习惯称为桶式探测器）收集，该探测器只能收集测试光路的总体光强，不具有空间分辨和成像能力。另一路光子（习惯称为参考光路）直接被一个具有空间分辨能力的探测器收集。即，放置在待成像物体后的探测器不能够对其直接成像，而能够直接成像的一路却没有放置待成像物体。然而，由于两路光子从同一光源产生，在空间、时间或频率等自由度上存在关联性，因此人们通过两路探测器的关联可以将待成像物体信息恢复出来。从直观上看，仿佛是具有成像能力的探测器对放置在另一光路上的物体进行了成像，因此人们也将关联成像形象地称为“鬼成像”。

收稿日期：2020－02－12.

基金项目：国家自然科学基金项目(61575102).

* **通信作者：**姚　鑫　**E-mail：** yaoxin_thu@163.com

第一个鬼成像实验是通过参量下转换[3-4]产生的具有空间关联性质的光子对来实现的[5]。由于双光子的空间关联性，当信号光子到达待成像物体前的某个位置时，闲频光子也会出现在相应的空间位置上。如果信号光子穿过待成像物体到达固定探测器，闲频光子也被移动到该位置上的探测器测量到，那么两个探测器输出的电脉冲会产生一个符合计数。反之，如果信号光子被待成像物体阻挡，那么只有闲频光子能够被相应位置上的探测器测量到，这种情况无法产生符合计数。显然，通过移动测试光路上的探测器位置，并记录不同位置上的符合计数的积累情况，就可以将待成像物体的信息恢复出来。

量子鬼成像的实质是通过信号光子与闲频光子之间的空间关联性，对闲频光子的空间分布进行测量，从而间接获知出现在待成像物体前的信号光子的空间分布情况。在鬼成像的发展历程中，人们曾经激烈争论过鬼成像属于量子效应还是经典效应[6-7]。2002 年，人们通过两路经典关联的光束首次观测到了鬼成像[8]。经典光或者所谓的热光具有空间二阶关联性。早在 1956 年，Hanbury-Brown 和 Twiss (HBT)就已经观测到了热光的二阶关联性现象[9]。2005 年左右的一系列实验证明，只要两路光束具备空间关联性，均可以实现鬼成像[10-11]。2016 年，Ryczkowski 等人[12]提出了一种时域鬼成像的方案。这个方案是在全光纤系统中实现的，其中待成像物体是时域信号。在该方案中，一路低带宽慢探测器(桶式探测器)记录的是一段时间内经过时域信号调制的总体光强，而另一路高带宽探测器则精确记录了到达待成像物体前的光强随时间的变化情况。利用两路探测器的关联，就能恢复出时域信号。2016 年，董帅等人提出了基于频率关联的长距离光纤传送量子时域鬼成像方案[13]。该方案在光纤信道的量子通信中具有潜在的应用价值。随后，Devaux 等人[14]利用随机生成的液晶显示器信号经过时域物体调制后收集总体光强，实现了时域计算鬼成像。此类研究将鬼成像从空间域拓展到了时间域，并且与光通信系统有较强的兼容性，增加了鬼成像的应用范围。近年来，人们除了研究可见光波段的鬼成像外，还分别实现了 X 射线鬼成像[15-17]、原子鬼成像[18]和电子鬼成像[19]等。2018 年，中科院的吴令安研究组提出并实验论证了基于鬼成像的低剂量 X 射线成像方案[15]。实验结果表明，在待成像物体受到同等曝光剂量的情况下，X 射线鬼成像的图像信噪比明显高于直接的投影成像的信噪比。此研究成果显示鬼成像在生物成像领域具有重要的应用价值。

我们注意到量子鬼成像实现了待成像物体信息从信号光子光路终端到闲频光子光路终端的转移，形成了一种由关联光子对图像信息实现传送的方式。因此，结合量子密码学中常见的一些安全检测机制[20]，有望将这种关联成像机制应用于量子保密通信的场景中。本文针对 2016 年董帅等人提出的量子时域鬼成像方案[13]进行了改进，显著提升了原有方案的成像速度并改善了成像质量。另外，通过对系统的软、硬件协同控制，对光子探测和符合运算的并行处理，实现了图像信息的实时传送。改进后的光纤传送量子时域鬼成像方案有望应用于面向信息安全传送的量子通信协议中。

1　量子时域鬼成像

传统的量子鬼成像是基于光子对在空间位置或动量上的关联性实现的，因此这类鬼成像实验大多局限在光学平台上，不考虑在光纤网络中的实现。光子对的频率关联性可以在光纤系统中稳定地保持，因此，董帅等人曾经提出了一种基于频率关联的长距离光纤传送量子时域鬼成像方案[13]，大大拓展了鬼成像的实现距离，其实验论证方案[13]如图 1 所示，量子光源产生具有宽谱频率关联的光子对，而后通过频率滤波将光子对分发给 Alice 和 Bob。Alice 收集光子对中的信号光子，Bob 收集闲频光子。在 Alice 一侧，信号光子经过空间色散元件后散射到物体不同位置上，其反射或透射成分被单光子探测器收集。在 Bob 一侧，闲频光子经过长距离单模光纤的时间色散后被单光子探测器收集。Alice 将测量得到的单光子事件信息通过经典信道传送给 Bob，后者利用两边的测量结果进行关联运算，即时域符合计数测量。最终，一对光子在频域上的关联性被转化为信号光子在 Alice 侧的空间位置与闲频光子在 Bob 侧的到达探测器时间之间的关联。基于这种关联，通过大量光子对的时间分辨符合计数累计就能够实现对一维物体的鬼成像。因此，这种鬼成像方案被称为时域鬼成像。由于闲频光子经过的长距离光纤既可以起到时间色散的作用，又可以当作 Alice 和 Bob 之间的传输链路，因此这个方案可以支持长距离光纤传送的鬼成像。

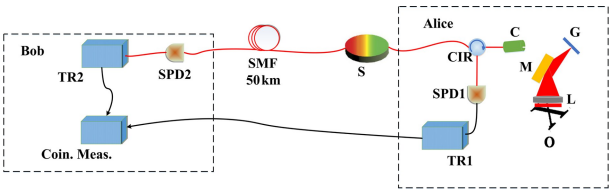
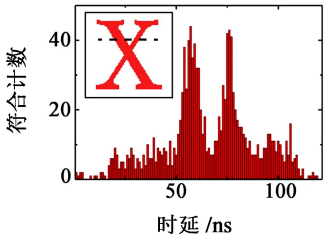


图 1 基于频率关联的量子时域鬼成像方案。TR:时间记录;SPD:单光子探测器;SMF:单模光纤;S:量子光源;C:准直器;G:光栅;M:反射镜;L:透镜;O:待成像物体;Coin. Meas.:符合计数测量

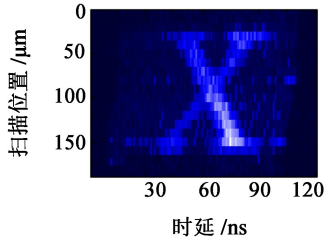
量子时域鬼成像背后的物理图景是:一方面,宽谱的闲频光子在长距离光纤中产生了色散展开,当两路探测器以时间延迟 τ 为自变量统计符合计数时,会得到时域展宽量为 $\Delta\tau = \Delta\Omega\beta_2 L$ 的色散展宽关联峰,其中 $\Delta\Omega$ 为闲频光子谱宽,β_2 是单模光纤的群速度色散系数,L 是长距离单模光纤链路长度。另一方面,闲频光子与信号光子谱宽相当,而且双光子在频域上一一对应,因此在不同的时域点 τ 处对应的信号光子和闲频光子有不同的频率 Ω。在 Alice 侧,由于空间光栅的散射,信号光子的频率与光子散射到待成像物体上的位置一一对应。在镀铬玻璃板上,不同位置处的空间反射系数不同,最终会造成符合计数测量值不同。因此,依靠光子对的频率关联和 Bob 处的群速度色散效应,能够将待成像物体的空间透射(反射)信息映射到光子对的时域符合计数测量上。

长距离光纤传送的量子时域鬼成像方案有望被应用于量子安全通信协议中。在这个方案中,图像发送方 Alice 与接收方 Bob 分别进行单光子测量。随后,Alice 将单边测量数据通过经典公开信道发送给 Bob,后者利用双方的测量数据进行关联计数,从而恢复出图像。由于鬼成像的特点是任何一路数据都无法单独成像,Alice 在经典信道上的数据公开无法造成图像信息的泄露。因此,如果出现第三方 Eve 进行图像窃听,那么 Eve 既要在经典信道上获取 Alice 的测量数据,又要在长距离光纤量子信道上窃听分发给 Bob 的单光子信息。最后,Eve 需要将在经典信道获取的数据和在量子信道窃听的数据进行关联才能窃取到图像信息。然而,量子信道的窃听行为会引起光子对纠缠特性的恶化[20],因此可以结合纠缠基量子密钥分发中的窃听检测技术对量子时域鬼成像中的量子信道进行监控,并通过合理设计鬼成像协议防止图像信息的泄露。

基于图 1 所示的装置,董帅等人对 50 km 光纤传送的量子时域鬼成像方案进行了实验论证[13]。待成像物体如图 2(a)中的插图所示[13],为 150 μm×140 μm 的镀铬玻璃板。由于在 Alice 一侧,宽谱的信号光子经过空间光栅后会散射成一条线,然后照射到待成像物体上,因此每一组符合计数测量结果只能对二维物体的某一条照射线成像,如图 2(a)所示[13],其中对应的单光子测量时间为 10 min。进一步地,每完成一组测量,就等间距地纵向移动一次物体,从而可以步进式地完成对整个二维物体的鬼成像,如图 2(b)所示[13]。鬼成像的每一组符合计数测量需要 10 min,成像速度较慢,整体成像质量也不够理想。本文将对这些问题进行有针对性地改进,以推动量子关联成像概念在量子通信领域的应用。



(a) 一组典型的符合计数柱状图



(b) 采用步进式扫描得到的二维鬼成像

图 2 文献[13]的量子时域鬼成像实验结果

2 基于可编程滤波器的量子时域鬼成像方案

在量子时域鬼成像方案中,量子光源产生具有宽谱频率关联的光子对,而后通过频率滤波将光子对分发给 Alice 和 Bob。一路经过空间色散元件照射到物体上,然后被单光子探测器收集;另一路经过时间色散元件被单光子探测器收集。最终,一对光子在频域上的关联性被转化为这两个光子在空间位置和到达探测器时间之间的关联。在前期方案中,董帅等人采用了金属光栅作为空间色散元件,利用镀铬玻璃板作为待成像物体实现了量子时域鬼成像方案的实验论证[13]。为了提升成像性能和自动化程度,本文对前述量子时域鬼成像实验系统进行了

较大的改进。使用可编程滤波器(Waveshaper 1 000 A,Finisar 公司)替代了空间色散元件和待成像物体,待传送图像信息则是可编程滤波器的滤波谱形。利用可编程滤波器滤波谱形可动态调控的功能,通过扫描方式实现二维图像的自动化量子时域鬼成像传送。改进的实验系统具备利用量子鬼成像机理实现连续图像信息传送的功能,为后续将其应用到量子安全通信场景中奠定坚实的基础。

改进后的实验系统如图 3 所示。连续波激光(CW Laser,中心波长为 1 530.33 nm)经过放大滤波后被注入到纳米硅波导中,激励起自发四波混频效应,产生具有频率关联和时间关联的双光子。粗波分复用器(CWDM)被用来分别滤出信号光子(中心波长 1 550 nm)和闲频光子(中心波长 1 510 nm)。经过滤波器后的信号光子和闲频光子的 3 dB 带宽均为 16 nm。信号光子进入可编程滤波器(Waveshaper)中受到设定的谱形滤波,然后被 Alice 的探测器收集;闲频光子经过 50 km 单模光纤(SMF)的时间色散后进入 Bob 的探测器。Alice 将单光子的时间记录通过经典信道发送给 Bob,后者对两路单光子的时间记录进行符合计数。实验所用硅波导宽度为 500 nm,高度为 220 nm,波导长度在毫米量级,插损约为 14 dB。注入到硅波导的连续波激光强度约为 15 dBm·W。单光子探测器是氮化铌(NbN)超导纳米线单光子探测器(SNSPD),探测效率约为 40%,暗计数约为 100 Hz,时间抖动约为 80 ps。时间关联单光子计数器(TCSPC)是 PicoQuant 公司的 Hydra Harp 400 型号,最小时间分辨率为 1 ps,时间抖动约为 4 ps。实验中 Alice 和 Bob 的单光子探测器计数率在 100 kHz 量级。

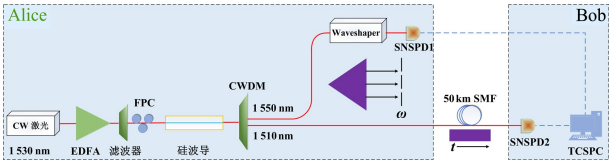


图 3　基于可编程滤波器的量子时域鬼成像实验系统

当在 Alice 一侧的可编程滤波器被设置为全通状态,即不同频率的信号光子均以低损耗通过滤波器时,由于闲频光子经过长距离光纤的色散展宽,Bob 得到的符合计数峰是一个时域展宽的关联峰。具体的时域展宽与关联双光子谱宽以及 50 km 单模光纤的群速度色散有关:

$$\Delta\tau = \Delta\lambda D_2 L \tag{1}$$

其中,$\Delta\lambda$ 是关联双光子谱宽,由于硅波导的二阶色散曲线在 1.5 μm 处较为平缓,在百纳米范围内均能基本满足自发四波混频的相位匹配条件,因此关联双光子的单边谱宽基本由信号光子和闲频光子的后级滤波带宽决定。这里 $\Delta\lambda$ 由可编程滤波器设置的滤波带宽决定。在 1 544～1 558 nm 范围内,可编程滤波器对不同波长的光子选择性地滤波;而在该波长范围外,滤波器对光子呈带阻特性。当滤波器在 1 544～1 558 nm 范围内被设置为全通状态,谱宽 $\Delta\lambda$ 为 14 nm。D_2 是传输光纤的二阶色散系数。单模光纤在 1.55 μm 处的二阶色散系数约为 17 ps/(nm·km)。考虑到单模光纤的色散零点位于 1.31 μm 处,且近似认为二阶色散系数随波长线性增长,因此 1.51 μm 处 D_2 约为 14.2 ps/(nm·km)。L 为单模光纤长度,取 50 km,因此时域展宽 $\Delta\tau$ 约为 9.94 ns。相应的实际测量结果如图 4 所示,测量时间为 20 s,经过 50 km 单模光纤的色散后,双光子关联峰的时域展宽为 9.30 ns,与理论估算基本吻合。

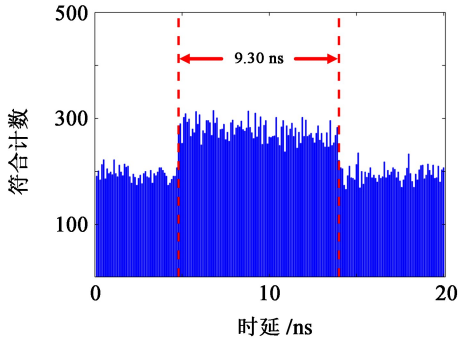
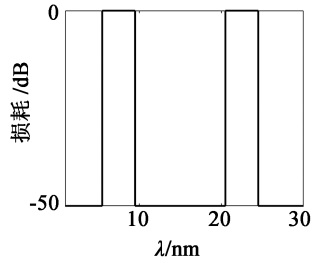


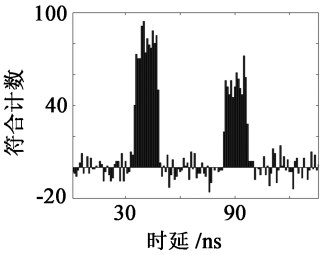
图 4　全通状态下,可编程滤波器在 1 544～1 558 nm 波长范围的符合计数

当可编程滤波器对信号光子在频域上进行滤波时,由于信号光子与闲频光子在频率上一一对应,因此在展宽的关联峰范围内只在相应的延时处会出现较高的符合计数,从而 Bob 可以将 Alice 一侧的可编程滤波器滤波信号恢复出来。如图 5(a)所示,Alice 设置可编程滤波器参数,选择性地让部分频率的信号光子通过,其余频率的信号光子会经过 50 dB 的附加损耗而无法被单光子探测器收集。具体而言,在 1 544～1 558 nm 范围内,Alice 等间距地设置了 30 个滤波区间,每个区间约对应 0.47 nm 的频率范围。当 Bob 对两路单光子探测的时间记录进行时间分辨符合计数时,就会得到与可编程滤波器滤波信号对应的符合计数柱状图,如图 5(b)所示。为了提高图像的信噪比,在符合计数柱状图中

减掉了平均的偶然符合计数，从而降低背景噪声对图像质量的影响。



(a) Waveshaper 在 1 544～1558 nm 波长范围的滤波结果



(b) 符合计数柱状图(对应的单光子测量时间为 20 s)

图 5 典型的一维量子时域鬼像实验结果

进一步地，将可编程滤波器、时间关联单光子计数器(TCSPC)以及 Matlab 计算程序控制集成在 LabVIEW 软件平台上，实现量子时域鬼成像的自动化实时传送。实验系统自动控制流程图如图 6 所示。首先在 LabVIEW 平台上完成仪器的初始化设置，如可编程滤波器的滤波范围、区间，以及 TCSPC 的数据采集时间。当待传图像加载到可编程滤波器后，单光子计数器采集数据并将数据传入 Matlab 计算程序，由后者完成符合计数运算，最终完成一次量子时域鬼成像。

图 5 的实验结果对应一维的量子时域鬼成像。进一步采用类似于传真机的步进扫描方式就可以完成二维图像的量子时域鬼成像传送。与图 5(a)相同，每一横排设置 30 个点。当完成某一步(排)的相应单光子测量后，可编程滤波器会切换到下一步(排)对应的滤波设置。由于在 Matlab 计算程序中单光子数据的符合计数运算需要的时间较长，因此在 LabVIEW 程序中单光子测量与符合计数运算同步进行，即单光子计数器在采集某一步单光子测量数据的同时，Matlab 计算程序进行前一步数据的符合计数运算。这种处理方式可以大大提升二维图像量子时域鬼成像的传送速度。如图 7(a)所示，可编程滤波器设置 30 步的谱形构成二维图像，整个二维图像具有 900 个像素点。每一步的单光子测量时间为 20 s。图 7(b)是实时产生的量子时域鬼成像结果，其中每一步符合计数的背景噪声都被减去。整个二维图像的成像耗时 10 min。相比于先期工作中基于空间光栅的量子时域鬼成像实验方案[13]，改进后的实验系统在成像速度和质量方面均有显著提升。

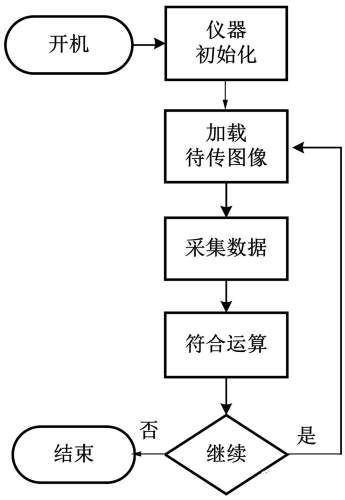


图 6 量子时域鬼成像实验系统自动控制流程图

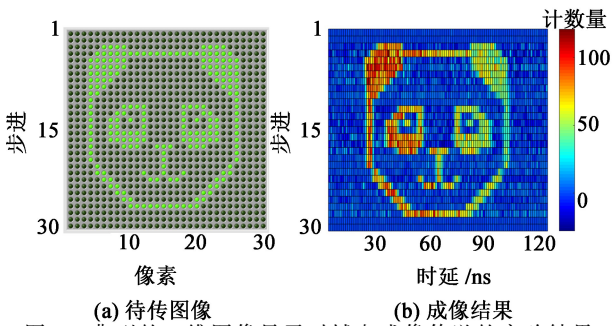


图 7 典型的二维图像量子时域鬼成像传送的实验结果

3 结论

基于时间-频率关联的量子时域鬼成像方案能够支持长距离光纤链路传送。根据鬼成像的特点，选取合适的量子安全检测机制，该方案有望应用于量子通信领域，实现图像信息的安全传送。针对前期董帅等人提出的原理性论证方案在成像性能上的缺陷，本文对实验系统进行了针对性地改进：使用可编程滤波器替代了自由空间中的色散元件和镀铬玻璃板，通过可编程滤波器的透射谱形设置待成像信息。一方面，改进后的方案能够更好地与光纤光学系统兼容；另一方面，由于待成像物体由镀铬玻璃板转变为数字设定的透射滤波谱，因此可以更好地支持系统的软硬件协同控制。在实验论证中，将待成像物体信息的设置、单光子数据采集和符合运算集成在一个平台上，通过并行数据采集和符合运算两

个功能，实现了二维图像信息的实时传送。实验结果表明，该方案显著地改善了图像传送质量，提升了图像传送速度，有望推动时频关联成像机制在量子通信领域的应用。

参考文献：

[1] Shih Y. Quantum imaging[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2007, 13: 1016-1030.

[2] Shapiro J H, Boyd R W. The physics of ghost imaging[J]. Quantum Inform. Process., 2012, 11(4): 949-993.

[3] Kwiat P G, Mattle K, Weinfurter H, et al. New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs[J]. Phys. Rev. Lett., 1995, 75(24): 4337-4341.

[4] Brendel J, Gisin N, Tittel W, et al. Pulsed energy-time entangled twin-photon source for quantum communication[J]. Phys. Rev. Lett., 1999, 82: 2594-2597.

[5] Pittman T B, Shih Y, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. Phys. Rev. A, 1995, 52(5): 3429-3442.

[6] Abouraddy A F, Saleh B E A, Sergienko A V, et al. Role of entanglement in two-photon imaging[J]. Phys. Rev. Lett., 2001, 87(12): 123602.

[7] Gatti A, Brambilla E, Bache M, et al. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation[J]. Phys. Rev. Lett., 2004, 93(9): 093602.

[8] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source[J]. Phys. Rev. Lett., 2002, 89(11): 113601.

[9] Brown R H, Twiss R Q. A test of a new type of stellar interferometer on sirius[J]. Nature, 1956, 178(4541): 1046-1048.

[10] Zhai Y H, Chen X H, Zhang D, et al. Two-photon interference with true thermal light[J]. Phys. Rev. A, 2005, 72(4): 043805.

[11] Ferri F, Magatti D, Gatti A, et al. High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with thermal light[J]. Phys. Rev. Lett., 2005, 94(18): 183602.

[12] Ryczkowski P, Barbier M, Friberg A T, et al. Ghost imaging in the time domain[J]. Nat. Photon., 2016, 10: 167-170.

[13] Dong S, Zhang W, Huang Y D, et al. Long-distance temporal quantum ghost imaging over optical fibers[J]. Sci. Rep., 2016, 6: 26022.

[14] Devaux F, Moreau P, Denis S, et al. Computational temporal ghost imaging[J]. Optica, 2016, 3: 698-701.

[15] Zhang A X, He Y H, Wu L A, et al. Tabletop X-ray ghost imaging with ultra-low radiation[J]. Optica, 2018, 5(4): 374-377.

[16] Pelliccia D, Rack A, Scheel M, et al. Experimental X-ray ghost imaging[J]. Phys. Rev. Lett., 2016, 117(11): 113902.

[17] Klein Y, Schori A, Dolbnya I P, et al. X-ray computational ghost imaging with single-pixel detector[J]. Opt. Express, 2019, 27(3): 3284-3293.

[18] Khakimov R I, Henson B M, Shin D K, et al. Ghost imaging with atoms[J]. Nature, 2016, 540(7631): 100-103.

[19] Li S, Cropp F, Kabra K, et al. Electron ghost imaging[J]. Phys. Rev. Lett., 2018, 121(11): 114801.

[20] Gisin N, Ribordy G, Tittel W, et al. Quantum cryptography[J]. Rev. Mod. Phys., 2002, 74(1): 145-195.

作者简介：

王登峰(1979—)，男，陕西西安人，硕士，主要研究方向为光学精密测量和光学时频传递；

姚　鑫(1990—)，男，陕西渭南人，博士，主要研究方向为量子光学和光学相干测量。

(上接第 530 页)

[12] Oshima Y, V Llora E G, Shimamura K. Quasi-heteroepitaxial growth of β-Ga_2O_3 on off-angled sapphire (0001) substrates by halide vapor phase epitaxy[J]. J. of Crystal Growth, 2015, 410: 53-58.

[13] 张　红，左　然. 反应动力学参数变化对 MOVPE 生长 GaN 的反应路径模拟的影响[J]. 中国科学：技术科学，2017(6)：45-57.

Zhang Hong, Zuo Ran. Effects of changes in reaction kinetic parameters on the simulation of the reaction path of GaN grown by MOVPE[J]. Science China: Technical Sciences, 2017(6): 45-57.

[14] Nikolaev V I, Pechnikov A I, Stepanov S I, et al. Epitaxial growth of (201) β-Ga_2O_3 on (0001) sapphire substrates by halide vapour phase epitaxy[J]. Materials Science in Semiconductor Proc., 2016, 47: 16-19.

作者简介：

戴必胜(1995—)，男，江苏阜宁人，硕士研究生，主要研究方向为物理电子学；

陈　琳(1980—)，男，江苏南京人，博士，讲师，南京大学在站博士后，主要研究方向为Ⅲ族氮化物半导体材料与器件。

光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.019

融合特征法与直接法的 RGB-D 稠密视觉 SLAM 算法

胡章芳*，张 杰，程 亮

（重庆邮电大学 信息无障碍工程研发中心，重庆 400065）

摘 要： 为了保持直接法的快速性与特征法的高精度和闭环能力，提出了一种融合直接法与特征法的 RGB-D 同时定位与地图创建（SLAM）算法。该算法主要包含 3 个并行线程：跟踪线程、局部建图线程和闭环线程。在跟踪线程中对非关键帧进行跟踪，通过最小化光度图像误差来进行相机的初始位姿估计以及像素点的对应关系计算，利用最小化局部地图点重投影误差进一步优化相机位姿，实现快速准确的跟踪与定位；在局部建图线程中对关键帧进行提取并匹配 ORB 特征，执行局部 BA（光束平差法），对局部关键帧位姿和局部地图点的位置进行优化，提高 SLAM 的局部一致性；在闭环线程中执行对关键帧的闭环检测和优化，从而保证 SLAM 全局一致性。另外，根据 RGB-D 图像和相机位姿信息，通过基于 Octomap 的建图框架，构建完整准确的 3D 稠密环境地图。在 TUM 数据集下的实验表明，所提出的方法可以得到与基于特征法相当的精度，且所需时间更少。

关键词： 同步定位与地图创建；直接法；特征法；建图；闭环

中图分类号： TP242 **文章编号：** 1001－5868(2020)04－0548－07

RGB-D Dense Visual SLAM Algorithm Combining Feature Method and Direct Method

HU Zhangfang, ZHANG Jie, CHENG Liang

(Engineering Research Center of Information Accessibility, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: In order to maintain the fast performance of the direct method and the high precision and loop closure capability of the feature-based method, a RGB-D simultaneous localization and mapping (SLAM) algorithm combining the direct method and the feature-based method is proposed. The proposed algorithm is composed of three parallel threads: tracking thread, local mapping thread and loop closing thread. In the tracking thread, the non-key frames are tracked, the initial pose estimation and the corresponding relationship calculation of pixel points are carried out by minimizing the photometric image errors, and the camera pose is further optimized by minimizing reprojection errors of the local map points to achieve fast and accurate tracking and positioning. In the local mapping thread, the ORB features are extracted and matched features in the key frames, and the local BA (Bundle Adjustment method) is performed to optimize the position and posture of local key frames and the location of local map points, so as to improve the local consistency of SLAM. In the loop closing thread, the loop detection and the loop optimization for key frames are executed, to enhance the global consistency of SLAM. In addition, according to the RGB-D image and camera pose information, a complete and accurate 3D dense environment map is constructed through Octomap-based mapping framework. Experiments on TUM datasets show that the proposed method

收稿日期：2020－01－01.

基金项目：国家自然科学基金项目(51604056)；重庆市科委项目(csts2017jcyjAX0427).

* **通信作者：**胡章芳 **E-mail：** 495075688@qq.com

achieves the same accuracy as feature-based method with less time.

Key words: simultaneous localization and mapping; direct method; feature-based method; map building; loop closing

0　引言

同时进行定位与地图构建(SLAM)是机器人领域的一个关键挑战和研究重点。未知环境中的自主移动机器人在执行各种任务时需要对环境地图进行构建,例如路径规划、避障和探索等。一方面,移动机器人必须知道其位置才能创建地图;另一方面,移动机器人需要通过地图来获取位置信息。因此,移动机器人必须对环境地图进行创建,同时在地图中定位。

完整的视觉 SLAM 框架由跟踪前端、优化后端、闭环检测以及地图构建等四部分组成。当跟踪丢失时,闭环检测可以实现重定位,对于长时间导航的正确性起着至关重要的作用。视觉 SLAM 中的视觉里程计(Visual Odometry,VO)[1]可分为两类:直接法与特征法。特征法[2]通过提取图像中的特征点和描述子,然后进行特征点匹配,并通过最小化重投影误差计算来获得机器人的位姿。匹配的特征点可用于闭环检测和重定位,这使得 VO 成为完整的 SLAM。然而,特征提取与匹配需要耗费大量的计算时间,使得特征法比直接法耗时更多。直接法[3]通过最小化光度误差来获得机器人的位姿信息,无需进行特征提取。然而基于直接法的 SLAM 闭环检测仍有一个待解决的问题:长时间导航出现的漂移问题。

文献[4]提出了一种基于特征法的 PTAM (Parallel Tracking and Mapping)算法,它属于早期典型的基于非线性优化后端的 SLAM 方法,可以实现跟踪与建图线程的并行化,还可有效依赖基于关键帧的光束平差法(BA)[5]进行实时运行。此后,大多数基于特征的方法都是 PTAM 的改进版本,其中一个是 ORB-SLAM[6]。ORB-SLAM 对于剧烈运动具有鲁棒性,支持宽基线的闭环检测和重定位,以及全自动的初始化,创新性地使用了三线程来完成 SLAM。但它们均采用单目相机,无法恢复真实的位姿信息和场景尺度。文献[7]在 ORB-SLAM 的基础上作了改进,它支持单目、双目以及 RGB-D 三种模式;针对无法建图的问题,提出了一种轻量级的定位模式,能够更加有效地重用地图。虽然 ORB-SLAM 已成为主流特征点 SLAM 方法中的代表,但其也存在一些不足:由于其采用特征法进行计算,需要对每张图像的 ORB 特征进行计算,这会耗费大量时间;另外,ORB 特征采用稀疏特征点进行建图,只能满足定位需求,无法实现导航、避障等诸多功能。

LSD-SLAM (Large-Scale Direct Monocular SLAM)[8]是一种典型的直接 SLAM 算法,其无需对特征点进行计算,还可以对半稠密地图进行构建,能够在没有 GPU 加速的情况下实时运行。但 LSD-SLAM 对于相机的内参和曝光十分敏感,同时在相机快速运动时容易丢失。在 LSD-SLAM 算法的基础上,DSO(Direct Sparse Odometry)[9]针对一个由若干关键帧组成的滑动窗口进行参数优化,并且提出了光度标定,对相机的曝光时间、暗角、伽马响应等参数进行标定后,能够提升直接法的鲁棒性。但是 DSO 不是一个完整的 SLAM,它不具有闭环检测、地图重用以及丢失后的重定位功能,而这些功能在实际应用场景中是不可或缺的。直接法与特征法各具优势,从目前的结果来看,最佳的直接法(即 DSO)在速度与精度方面都比最佳的特征法(即 ORB-SLAM)性能更优。但是 DSO 缺乏闭环检测,不利于长时间工作。因此如何结合这两种方法的优点是本文研究的出发点。

本文提出一种融合特征法与直接法的 RGB-D 稠密视觉 SLAM 算法,以结合直接法的快速性能与直接法的高精度和闭环能力。该算法对关键帧进行提取并匹配 ORB(Oriented FAST and Rotated BRIEF)特征[10],通过最小化光度误差对非关键帧进行跟踪,而不需要特征提取与匹配。关键帧用于局部建图线程与闭环线程,而非关键帧用于跟踪与定位,这使得本文算法耗时更少。此外,本文算法还可根据 RGB-D 图像和相机位姿信息,通过在基于八叉树的建图框架 Octomap[11]上构建 3D 占用网格地图,为移动机器人完成导航和避障等任务提供更加准确的环境地图。

1　算法框架与流程

本文算法在 ORB-SLAM2 的基础上进行研究,

系统构成示意图如图 1 所示，其中红色三角形表示关键帧，白色三角形表示非关键帧。系统基于场景的变化来判断当前帧是否为关键帧，进而提取与匹配每一个关键帧中的 ORB 特征，并且采用不需要特征提取与匹配的直接法来跟踪每个非关键帧。系统选择 ORB 特征，它含有旋转多尺度 FAST 角点和对应的 256 位描述子。此特征可以很快地被提取与匹配，同时具有较好的旋转不变性。关键帧之间的位姿优化通过特征匹配来实现，局部建图线程与闭环检测线程仅与关键帧有关。

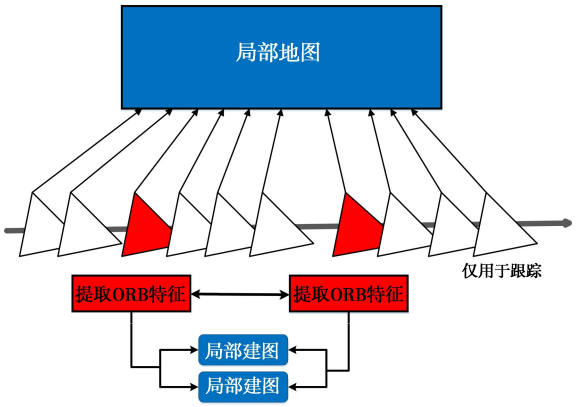


图 1 系统构成示意图

算法线程框图如图 2 所示，其中金色边框模块表示与 ORB-SLAM2 的不同之处，灰色边框模块表示与 ORB-SLAM2 相同。

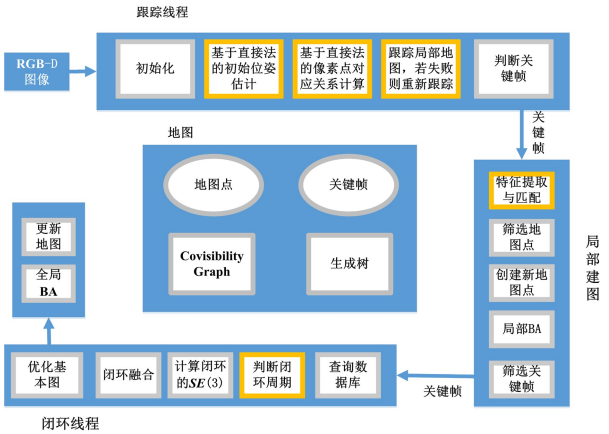


图 2 算法线程框图

该算法有三个并行线程：跟踪、局部建图和闭环检测。在跟踪线程中，由于使用 RGB-D 相机，因此可以直接获取环境的深度信息，不需要像单目相机那样做特定的初始化。在系统启动时，将第一帧作为关键帧，初始化其位姿之后，从所有三维坐标点中创建一个初始化地图。之后通过最小化光度误差来进行相机的初始位姿估计以及像素点的对应关系计算，利用最小化局部地图点的重投影误差再次优化相机位姿，对局部地图进行跟踪，并判断是否生成新的关键帧。若跟踪失败，则触发新的跟踪周期；在局部建图线程中，对当前关键帧图像中的 ORB 特征进行提取与匹配，之后筛选出当前关键帧中冗余的地图点，由特征提取与匹配的结果来创建新的地图点。当处理完所有关键帧之后，执行局部 BA 优化，对周围的关键帧位姿以及地图点位置进行优化，以获得更加准确的定位与建图精度。最后筛选候选关键帧，对冗余的关键帧进行剔除；在闭环检测线程中，通过检索图像识别数据库执行闭环检测[12]，当检测到闭环时，对闭环周期进行判断，若当前关键帧与闭环关键帧不属于同一个周期，则将闭环关键帧的周期与当前关键帧的周期合并为同一周期。采用位姿图优化的方法对运动累积误差进行校正。最后将此周期内的所有关键帧位姿与所有地图点位置作为优化变量执行全局 BA 优化，从而得到全局一致的环境地图和相机运动轨迹。

1.1 基于直接法的跟踪线程

ORB-SLAM2 中跟踪线程的图像帧处理速率由其运行帧率决定。例如在 TUM 数据集 fr3_office 序列中，使用搭载 intel core i7 7567U CPU 的台式机运行 ORB-SLAM2 算法，将每一帧图像提取特征数的阈值设为 1 000，跟踪线程的 4 个主要步骤的平均耗时如表 1 所示。

表 1 ORB-SLAM2 跟踪线程所用时间

步骤	耗时/ms	耗时百分比/%
图像预处理	13.52	59.38
位姿估计	1.36	5.97
局部地图跟踪	6.87	30.17
关键帧判断	1.02	4.48

由表 1 可知，在 ORB-SLAM2 跟踪线程中，对于 RGB-D 相机来说，特征提取与匹配在图像预处理步骤中，如图 3[7]，花费的时间最多，高达 59.38%。所以为了避免特征提取，采用直接法的方式实现像素点的匹配，从而减少跟踪线程所用时间。

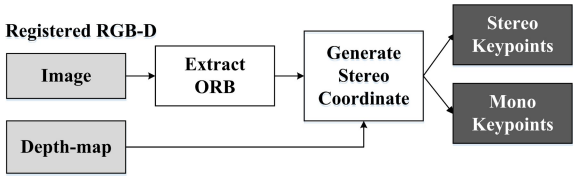


图 3 ORB-SLAM2 跟踪线程的图像预处理

本算法的跟踪线程主要步骤如下：首先通过最小化光度误差获取相机的初始位姿估计；然后通过最小化考虑曝光时间变化的光度误差来获得图像之间的像素点匹配关系信息；最后通过最小化局部地图点的重投影误差来获取更加准确的相机位姿估计，对局部地图进行跟踪，判断新的关键帧，为局部建图线程提供关键帧位姿初值。

1.1.1　初始位姿估计

跟踪线程通过对每一帧图像处理来对当前帧的位姿进行估计，如果上一帧跟踪成功，则利用一个恒速模型来对当前相机的位姿进行预测。根据估计的位姿，将参考帧中跟踪的 3D 地图点投影到当前帧中。当前帧与参考帧的相对位姿变换 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{cr}} \in SE(3)$ 则可以通过最小化光度误差计算得到，该误差主要建立在同一个 3D 点对应的图像块之间，即

$$\boldsymbol{T}_{\mathrm{cr}}=\underset{\boldsymbol{T}}{\operatorname{argmin}}\iint_{\mathcal{R}}\rho[\delta I(\boldsymbol{T},\boldsymbol{u})]\mathrm{d}\boldsymbol{u} \tag{1}$$

其中，$\rho[\cdot]=\frac{1}{2}\|\cdot\|^2$，$\boldsymbol{u}$ 是参考帧的像素位置，$\mathcal{R}$ 是图像块区域，光度误差 δI 如下所示：

$$\delta I(\boldsymbol{T},\boldsymbol{u})=I_{\mathrm{c}}(\pi(\boldsymbol{T}\cdot\boldsymbol{x}_{ri}))-I_{\mathrm{r}}(\boldsymbol{u}),\forall\boldsymbol{u}\in\mathcal{R} \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{x}_{ri}$ 是参考帧坐标系中第 i 个被跟踪的 3D 地图点的位置。

1.1.2　基于直接法的像素点对应关系计算

在 ORB-SLAM2 的跟踪线程中，图像帧中的特征点与环境地图点的对应关系是由匹配描述子来获得的，之后再利用最小化重投影误差对参数进行优化。在本算法的跟踪线程中由于没有进行特征提取，所以无法利用描述子匹配的方法获取其对应关系。本文将采用最小化光度误差的方法寻找像素点和地图点的对应。

通过初始位姿估计，可以得到经过优化且与上一帧像素点相关联的地图点集。从该地图点集中可以得到当前帧与局部关键帧可观测到的 Covisibility 地图点，将局部地图点在当前帧中进行投影，从而可通过最小化光度误差的方法获取更多图像像素点和局部地图点的对应关系。另外，本文由初始的投影像素坐标栅格化投影到当前帧中的地图点，采用 10×10 栅格，并根据深度信息对栅格中的地图点进行排列，在计算像素点匹配时，对每个栅格至多选取 6 个不同深度的地图点，从而提高算法的运行效率。

通过上一步的初始位姿估计，可由当前帧和局部关键帧之间的位姿将地图点投影到当前帧上作为当前帧的特征点。而像素匹配点会因相机位姿与地图点位置的不准性产生误差。SVO[13] 在像素点匹配时通过最小化图像小光斑的光度误差来获取亚像素精度的像素点对应关系：

$$\boldsymbol{u}'_i=\underset{\boldsymbol{u}'_i}{\operatorname{argmin}}\|\boldsymbol{I}_k(\boldsymbol{u}'_{i,n})-\boldsymbol{I}_{\mathrm{r}}(\boldsymbol{A}_i\cdot\boldsymbol{u}_{i,n})\|^2 \tag{3}$$

其中，$\boldsymbol{I}_{\mathrm{r}}$ 为局部地图点所在关键帧对应的灰度图，$\boldsymbol{u}_{i,n}$ 为 $\boldsymbol{I}_r$ 对应的图像块中第 n 个像素点的坐标，$\boldsymbol{u}'_{i,n}$ 的定义同理，其属于 $\boldsymbol{I}_k$ 对应的图像块。为了对当前帧和关键帧之间因距离过大引起的图像块变化进行调整[4]，还引入了仿射变换矩阵 $\boldsymbol{A}_i$。

由于普遍使用的相机都包含自动曝光功能，同时 2 个时刻相机的曝光时间也不相同，这会造成环境中同一点在不同图像中灰度误差较大。因此本文通过考虑曝光时间引起的灰度变化，引入光度响应函数[14]对其进行优化：

$$\boldsymbol{u}'_i=\underset{\boldsymbol{u}'_i}{\operatorname{argmin}}\left\|\boldsymbol{I}_k(u'_{i,n})-f\left(\frac{\Delta t_k}{\Delta t_{\mathrm{r}}}f^{-1}(\boldsymbol{I}_{\mathrm{r}}(\boldsymbol{A}_i\cdot\boldsymbol{u}_{i,n}))\right)\right\|^2 \tag{4}$$

式中，Δt_{r} 和 Δt_k 分别是 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{r}}$ 和 $\boldsymbol{I}_k$ 的曝光时间，$f(\cdot)$ 为光度响应函数，$f^{-1}(\cdot)$ 为逆光度响应函数。最后利用 G-N(Gauss Newton)算法求解式(4)。

1.1.3　跟踪局部地图

在完成局部地图点与当前帧像素点匹配后，利用 g2o[15] 通过最小化重投影误差再次优化相机的相对位姿 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{cw}}$：

$$\boldsymbol{T}_{\mathrm{cw}}=\underset{\boldsymbol{T}_{\mathrm{cw}}}{\operatorname{argmin}}\frac{1}{2}\sum_i\|\boldsymbol{u}_i-\pi(\boldsymbol{T}_{\mathrm{cw}}\cdot\boldsymbol{p}_{\mathrm{w}i})\|^2 \tag{5}$$

其中，$p_{\mathrm{w}i}$ 是世界坐标系中第 i 个 Covisibility 地图点。此过程的优化问题仅对相机位姿执行 BA 优化，由于单个位姿节点的 BA 问题对于地图点的约束太过单一，因此将地图点的优化放在局部 BA 线程中执行。

本文在跟踪线程中虽然没有在当前帧中提取 ORB 特征，但是通过最小化考虑曝光时间变化的光度误差得到了关联地图点的当前帧像素点对应关系，避免了对每一帧图像进行特征提取，从而加快了跟踪线程运行速率。

1.1.4　地图点管理与关键帧处理

如果在上一步中成功跟踪到地图点，那么将成功跟踪的地图点进行缓存，以便在下一帧中对其进行优先处理。最后，确定当前帧是否应作为关键帧生成，关键帧的质量决定了局部地图的好坏，本文选

取关键帧的规则如下：

(1)当前帧至少跟踪到 30 个地图点；

(2)当前帧跟踪到的地图点少于参考关键帧地图点的 90%；

(3)距上一个关键帧插入之后已跟踪超过 20 帧图像；

(4)上一个关键帧与当前帧的位置差值或姿态角差值不小于阈值 $\boldsymbol{T}_t$。

条件(1)可以确保在里程计跟踪丢失后，插入的关键帧对位姿变化不会产生较大影响。条件(2)可以保证关键帧跟踪的质量，同时，避免引入过多的冗余信息。条件(3)保证当局部线程处于繁忙状态时插入关键帧，可以通过发送一个信号暂停局部 BA，以便尽快对新的关键帧进行处理。条件(4)对相机的旋转与平移产生的视差变化进行了考虑。

1.1.5 局部建图与闭环检测

本算法的局部建图和闭环检测线程只与关键帧及其 ORB 特征有关。在局部建图线程中包含关键帧特征提取与匹配、地图点构造、地图点和关键帧筛选以及局部 BA 优化。如果一个图像帧作为关键帧生成，则提取并匹配新的 ORB 特征，同时将成功跟踪的特征保存在此关键帧中。之后通过最小化重投影误差进行局部 BA 来进一步优化关键帧和局部地图点的位姿。闭环检测线程利用 ORB 特征在 DBoW2 上构建的词袋模型来检测闭环。最后通过位姿图优化来纠正累积误差。

2 稠密地图构建

ORB-SLAM2 算法可以实时、精确地估计相机的位姿并构建稀疏地图。然而稀疏地图无法用于导航和避障，因此本文选择基于 Octomap[11](八叉树地图)的概率占据地图构建 3D 稠密地图，而非传统的点云地图。与点云地图相比，八叉树地图采用八叉树分层的方式存储地图，可以节省地图存储空间，能够实时有效地更新重建的地图，同时其分辨率是可调的。此八叉树地图可用于机器人的避障与导航。

八叉树结构的叶子节点以概率的形式来表示空间的占用状态。假设某节点为 n，观测数据为 z，在 t 时刻此节点被占用概率表示为

$$P(n \mid z_{1:t}) = \left[1 + \frac{1-P(n \mid z_t)}{P(n \mid z_t)} \cdot \frac{1-P(n \mid z_{1:t-1})}{P(n \mid z_{1:t-1})} \cdot \frac{P(n)}{1-P(n)}\right]^{-1} \tag{6}$$

一般情况下假设先验概率 $P(n)=0.5$，为了保证 $P(n)$在[0,1]区间之内，这里引入 $\log it$ 变换：

$$\log it(P) = \ln\left(\frac{P}{1-P}\right) \tag{7}$$

由式(7)可得：

$$\ln\left[\frac{P(n \mid z_{1:t})}{1-P(n \mid z_{1:t})}\right] = -\ln\left[\frac{1-P(n \mid z_t)}{P(n \mid z_t)} \cdot \frac{1-P(n \mid z_{1:t}-1)}{P(n \mid z_{1:t-1})} \cdot \frac{P(n)}{1-P(n)}\right] = \ln\left[\frac{P(n \mid z_{1:t-1})}{1-P(n \mid z_{1:t-1})}\right] + \ln\left[\frac{P(n \mid z_t)}{1-P(n \mid z_t)}\right] \tag{8}$$

其中，

$$L(n \mid z_t) = \ln\left[\frac{P(n \mid z_t)}{1-P(n \mid z_t)}\right] \tag{9}$$

则式(6)可以改写为

$$L(n \mid z_{1:t}) = L(n \mid z_{1:t-1}) + L(n \mid z_t) \tag{10}$$

从式(10)中可以看出，对于三维空间中的任意点，新的观测值都会直接添加到最后的观测值中，这种更新方式更加灵活且易于实现。在八叉树建图过程中，根节点的占据概率可由子节点的概率计算得出。计算根节点的方法有两种：求平均值法 $\bar{l}(n) = \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8} L(n_i)$ 和求最大值法 $\bar{l}(n) = \max_i L(n_i)$。在创建点云地图的过程中，基于 Octomap 库实时构建 3D 环境的八叉树地图。

3 实验与分析

本算法的运行平台配置如下：CPU 为 intel core i7 7567U，主频为 3.5 GHz，内存为 32 G，不使用 GPU 加速，测试系统为 Ubuntu 16.04。在 TUM RGB-D 数据集[16]下进行算法测试。

3.1 数据集实验

TUM RGB-D 数据集作为德国慕尼黑工业大学公开的一种 RGB-D SLAM 系统标准评价方案，其中包含了由 RGB-D 传感器采集的不同类别的室内图像序列，可用于评估不同纹理、照明以及结构条件下的环境重建和 SLAM 方案。同时，此数据集还提供了用于评估算法定位精度的真实轨迹。为了评估本文的 RGB-D SLAM 系统的性能，本文选择能

够评估大部分 RGB-D SLAM 算法的一些图像序列进行测试，并且与 ORB-SLAM2[7] 和 DVO-SLAM[17] 进行对比。

3.1.1　视觉里程计评估

为了体现本算法的定位效果，首先仅对本算法和 ORB-SLAM2 里程计部分的位姿输出精度进行对比，不包含闭环检测以及闭环优化部分，检测本算法改进后的跟踪线程与局部建图线程对算法定位精度的影响。视觉里程计的评估主要以相对位姿误差(Relative Pose Error，RPE)指标为依据，见表 2。

表 2　里程计输出相对位姿误差对比

图像序列	平移 RMSE/(m·s^{-1})		旋转 RMSE/((°)·s^{-1})	
	本文算法	ORB-SLAM2	本文算法	ORB-SLAM2
fr1/desk	0.029 1	0.028 3	1.504 8	1.503 9
fr1/desk2	0.045 2	0.044 4	2.146 3	2.143 8
fr1/room	0.087 6	0.086 8	2.938 6	2.937 3
fr1/xyz	0.013 2	0.014 3	0.925 8	0.926 7
fr2/desk	0.040 1	0.039 8	1.318 8	1.316 7
fr2/large_no_loop	0.087 5	0.085 7	1.524 3	1.521 9
fr2/large_with_loop	0.228 3	0.227 4	3.678 7	3.677 4
fr2/xyz	0.011 6	0.012 4	0.505 6	0.506 2
fr3/long_office_household	0.027 8	0.026 5	0.845 5	0.843 1
fr3/str_nontex_far	0.015 3	0.017 6	0.532 1	0.541 7
fr3/str_tex_far	0.023 3	0.022 9	0.567 3	0.566 1

由表 2 可知，在大多数情况下，本文算法与 ORB-SLAM2 算法精度相当，甚至在“fr1/xyz”、“fr2/xyz”和“fr3/str_nontex_far”3 个序列中精度都要高于 ORB-SLAM2 算法，由于本文在跟踪线程采用了直接法，因此在无纹理的“fr3/str_nontex_far”序列中，本文方法的旋转与平移 RPE 要明显高于对比方法。

3.1.2　SLAM 系统评估

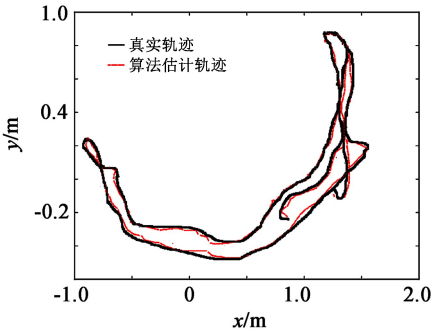
不同于视觉里程计的评估，SLAM 系统在评估方面采用绝对轨迹误差(Absolute Trajectory Error，ATE)指标。该部分实验仍然在 TUM 数据集上进行，并将本文算法与 ORB-SLAM2 和 DVO-SLAM 进行比较，结果见表 3。

表 3　SLAM 系统绝对轨迹误差对比

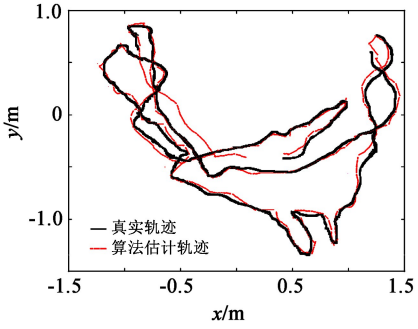
图像序列	本文算法	ORB-SLAM2	DVO-SLAM
fr1/desk	0.016	0.016	0.021
fr1/desk2	0.024	0.022	0.046
fr1/room	0.045	0.047	0.043
fr1/xyz	0.009	0.010	0.011
fr2/desk	0.008	0.009	0.017
fr2/xyz	0.004	0.004	0.018
fr3/long_office_household	0.011	0.010	0.035
fr3/str_nontex_far	0.010	0.012	0.011

在表 3 中，第一列为 TUM 数据集各个图像序列的名称，在包含闭环检测与优化的情况下，将本算法与 ORB-SLAM2 和 DVO-SLAM 进行了对比实验，通过对比 ATE 指标可以发现，本算法取得了与 ORB-SLAM2 算法相当的精度，而在“fr3/str_nontex_far”序列中，在环境结构单一、纹理信息不丰富的情况下，ORB-SLAM2 出现了跟踪失败的情况，本文算法由于可以利用光度信息进行跟踪，没有出现跟踪丢失的情况，鲁棒性较好且取得的结果误差最小。

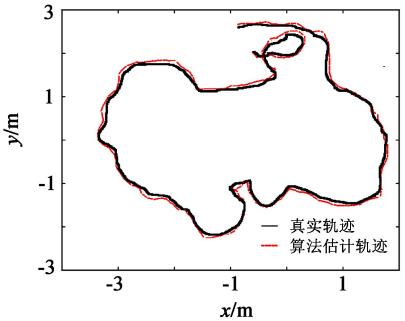
在图 4 中，对 TUM 数据集中 4 个图像序列的 SLAM 算法运行轨迹图与真实轨迹进行对比，均取得了较理想的结果。在“fr3/str_nontex_far”序列中，估计轨迹与真实轨迹几乎达到了一致。这也证明本算法无论面对结构简单、纹理信息缺失的环境还是纹理丰富的环境，都有着较高的准确性及稳定性。



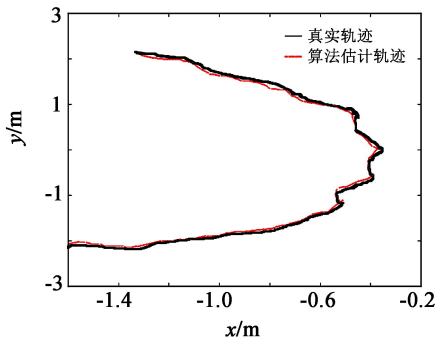
(a)　fr1/desk2



(b)　fr1/room



(c)　fr3/long_office_household



(d) fr3/str_nontex_far

图 4 本文 SLAM 算法对 4 个图像序列估计轨迹对比图

3.1.3 系统实时性评估

通过在 TUM 数据集上进行测试,本算法各个步骤的耗时情况统计如表 4 所示。在 SLAM 系统中,只有跟踪线程需要对 RGB-D 图像进行实时处理,而对于局部建图与闭环检测线程,仅对关键帧进行处理,无需实时运行。因此跟踪线程的运行帧率决定了算法的运行帧率。在表 4 中,本文算法的跟踪线程平均耗时在 11 ms 左右,考虑图像的读取与校正等步骤,其处理的运行帧率在 25～35 Hz。

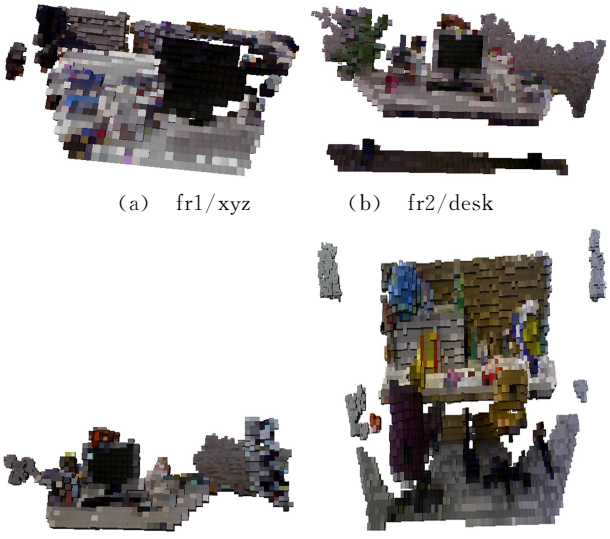
表 4 跟踪线程的耗时统计(单位:ms)

步骤	ORB-SLAM2	本文算法
特征提取	11.42	—
初始位姿估计	1.36	0.68
特征匹配	13.44	7.51
局部地图跟踪	6.87	2.93
关键帧判断	1.02	0.22

表 4 将本文算法与 ORB-SLAM2 算法的跟踪线程完整耗时进行了对比,由于 ORB-SLAM2 算法在对每一帧图像进行处理时都要提取 1 000 个 ORB 特征,且在跟踪局部地图时需进行图像特征点与局部地图点的匹配,而本文算法采用直接法无需进行特征提取,且在跟踪局部地图时可由特征匹配直接完成,因此在跟踪线程中节省了很大一部分时间,提升了算法运行的效率。

3.2 稠密地图构建实验

ORB-SLAM2 算法主要针对相机位姿估计的实时性、准确性以及鲁棒性进行改进,在地图构建部分只能构建稀疏地图,无法实现机器人进行导航和避障等任务。本文算法利用 RGB-D 传感器构建了适用于移动机器人的稠密八叉树地图,解决了单目相机的尺度不确定性问题。将本文提出的方法在 TUM 数据集中的"fr1/xyz"、"fr2/desk"、"fr2/xyz"以及"fr3/long_office_household"4 个图像序列下进行实验,生成了八叉树图,如图 5 所示。四个八叉树图的存储空间仅为 0.38 MB,这表明八叉树图可以节省大量的存储空间,且易于维护。



(a) fr1/xyz (b) fr2/desk

(c) fr2/xyz (d) fr3/long_office_household

图 5 4 个图像序列的八叉树地图

4 结论

本文提出了一种基于 RGB-D 相机的半直接稠密 SLAM 方法。该方法在跟踪线程中,对于非关键帧采用直接法进行初始位姿估计和像素点匹配,无需进行特征提取与匹配,从而提高了跟踪线程的运行速率。而对于关键帧采用特征法进行特征提取与匹配,以保证 SLAM 算法局部优化、全局优化以及闭环检测功能的实现。此外,本文算法基于 RGB-D 相机构建了压缩的且易于维护的八叉树稠密地图,满足了移动机器人导航和避障的需求。在 TUM 数据集上对该算法进行了验证,实验数据表明其能够保持与 ORB-SLAM2 算法相当的定位精度,并且在跟踪线程中的运行帧率得到了显著提升,可实时构建环境信息丰富的 3D 稠密地图。在今后的工作中将进一步对惯性测量单元(IMU)数据进行融合,从而为跟踪线程的初始位姿估计提供初值,并将其作为误差项用于优化局部地图跟踪和局部 BA,进一步提升算法的精度与鲁棒性。

参考文献:

[1] Scaramuzza D, Fraundorfer F. Visual odometry [tutorial] [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2011, 18(4): 80-92.

(下转第 559 页)

光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.020

微波光子链路中的附加相位噪声分析

瞿鹏飞*，肖永川，庾财斌，孙力军

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 针对模拟微波光子链路中附加相位噪声对微波信号相位噪声的恶化问题，详细研究了光链路中白噪声及有色噪声的产生机理，建立了光链路的附加相位噪声理论模型，阐述了附加相位噪声的变化规律，并通过实验证实了模型的正确性。同时针对本振信号的多路光分配典型应用，提出了 EDFA 辅助的附加相位噪声优化措施。实验结果表明所提出的相位噪声模型能够有效地应用于微波光子链路，能对附加相位噪声的分析和优化提供理论依据，具有较大的工程指导意义。

关键词： 微波光子学；光链路；相位噪声；附加相位噪声

中图分类号： TN015　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0555－05

Analysis of Addictive Phase Noise in Microwave-Photonic Links with External Modulation

QU Pengfei，XIAO Yongchuan，YU Caibin，SUN Lijun

（Chongqing Optoelectronics Research Institute，Chongqing 400060，CHN）

Abstract： For the degradation problem of microwave signal phase noise caused by the additional phase noise of analog microwave photonic link，the characteristics of the white noise and frequency noise of microwave photonic link (MPL) were fully analyzed. The addictive phase noise (APN) model of MPL was established to expound the APN behaviors，and the correctness of the model was also verified by experiments. As for the typical applications of local oscillator optical distribution system，the EDFA-assisted MPL can be used to improve the APN. Experimental results indicate that the proposed phase noise model can be effectively applied to the microwave photonic link and can provide theoretical basis for the analysis and optimization of additional phase noise.

Key words： microwave photonics；optical links；phase noise；addictive phase noise

0　引言

微波光子链路由于具有带宽大、损耗小、并行处理能力强以及抗电磁干扰等优点，在雷达、电子战中得到越来越广泛、深入的应用[1-4]。高性能模拟微波光子链路由于在射频光子前端、射频拉远、时钟传输等方面的强烈需求而获得了大量研究。宽带大动态的微波光子技术成为研究的热点，已有大量有关线性化、低噪声的微波光子互转换技术的报道[5-7]。然而高性能模拟微波光子链路的另一个重要特性，即链路的附加相位噪声一直未见详细研究。附加相位噪声表征了信号在微波光子互转换和传输过程中信号质量的恶化程度，这对于雷达本振信号的射频拉远、参考时钟的远距离传输等应用有着极其重大的意义。所以系统研究链路各个环节的重要参数与附加相位噪声之间的关系对于改善附加相位噪声，尤其是近 DC 端的相位噪声特性有极其现实的指导意义。本文详细分析了链路的噪声特性及相位噪声的转化模型，同时给出了器件关键参数和相位噪声的依赖关系，建立了较完整的本征微波光子链路相位噪声模型。该模型对于实际的链路设计、系统性能的综合优化具有一定的指导作用。

收稿日期：2020－03－12.

* **通信作者：**瞿鹏飞　**E-mail：**etry24@163.com

1 微波光子链路的附加相位噪声模型

1.1 链路附加相位噪声理论模型

图 1 是一个典型的外调制本征微波光子链路，在该链路中，微波信号经发射机电光转换后，进入一定长度的光纤中传播，然后由接收机转换为电信号输出。在整个过程中，光链路自身元器件的各种噪声会转换到微波信号上，从而恶化信号的相位噪声。

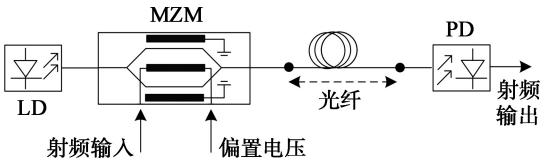


图 1 典型的外调制微波光子链路结构

按照信号相位噪声的定义，信号源的相位功率谱密度函数可表示为

$$L_0(f)=\frac{P^0_{\mathrm{SSB}}(f)}{P_0} \tag{1}$$

其中，P^0_{SSB} 指原始单边带噪声调制信号的功率谱，P_0 是信号功率；当该信号经过链路之后，P_{SSB} 会叠加链路的噪声，信号功率也会按照系统增益发生变化，新的 $L(f)$ 可以表达为

$$L_{\mathrm{new}}(f)=\frac{P'_{\mathrm{SSB}}(f)}{P_{\mathrm{out}}}=\frac{G_{\mathrm{RF}}P^0_{\mathrm{SSB}}(f)+N_{\mathrm{add}}(f)}{G_{\mathrm{RF}}P_0}=\frac{P^0_{\mathrm{SSB}}(f)}{P_0}+\frac{N_{\mathrm{add}}(f)}{G_{\mathrm{RF}}P_0} \tag{2}$$

式中，第一项为源信号的单边带相位功率谱密度，第二项为引入链路噪声之后的附加相位噪声。将链路噪声分为白噪声及有色噪声两类，则附加相位噪声可以表示为

$$L'(f)=\frac{N_{\mathrm{add}}(f)}{G_{\mathrm{RF}}P_0}=\frac{N_0kT}{P_0G_{\mathrm{RF}}kT}+\frac{N_f(f)}{P_0G_{\mathrm{RF}}}=\frac{NF\cdot kT}{P_0}+\frac{N_f(f)}{P_0G_{\mathrm{RF}}} \tag{3}$$

进一步从光链路噪声的角度来看，其主要来自于激光器和探测器中的白噪声以及闪烁噪声，白噪声包含热噪声、散粒噪声以及高频段的相对强度噪声。这类噪声将整体抬高输入微波信号远频端相位噪声的噪底，式(3)的第一项表明可以采用链路的噪声系数 NF 以及输入射频功率 P_0 等参量对相位噪声的噪底进行定量表征；闪烁噪声存在于激光器、探测器之中，研究表明激光器的 $1/f$ 噪声居主导地位，该噪声在近直流频端(Near-DC)表现出极强的频率依赖特性，它通过光链路中的激光器等有源器件的参量调制效应作用于微波信号相位噪声的近频端。式(3)中第二项的频率相关噪声对此进行了定量描述。

按照这种阐述，可以把微波光子链路等效为一个存在一定增益、噪声系数和 $1/f$ 噪声的放大器模型，该模型如图 2 所示。

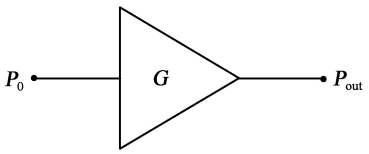


图 2 放大器相位噪声模型

通过上述相位噪声的产生机理分析，整个微波链路的附加相位噪声模型可从式(3)中进一步简化为

$$L'(f)=b_0+b_{-1}/f \tag{4}$$

式中，b_0 代表链路相位噪声的噪底水平，该值可表示为 $b_0=NF\cdot kT/P_0=1/CNR$；其中，CNR 为射频信号的载噪比，b_{-1} 是 $1/f$ 噪声模型的系数，该系数难以直接从理论上进行推导，通常可通过实验测量确定；b_0 与 b_{-1}/f 的交点称为拐角频率 f_c，其值表示为 $f_c=b_{-1}/b_0=b_{-1}CNR$。图 3 表示了附加相位噪声中两种噪声以及拐角频率之间的关系。总的来说，只要确定了式(1)中的两个系数，即可定量描述微波光子链路对微波信号相位噪声的影响。

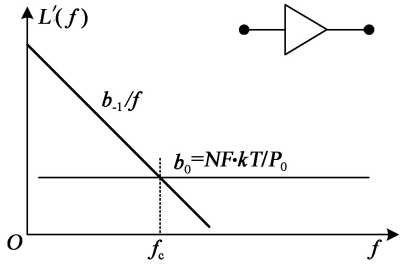


图 3 附加相位噪声中的白噪声与有色噪声

1.2 附加相位噪声噪底模型——b_0

结合式(3)和(4)，可以看出 b_0 可通过研究链路的宏观参数噪声系数加以确定。对于一个如图 1 所示的外调制光链路而言，系统的噪声系数可表达为[8]

$$NF_{\mathrm{RF}}(\phi_{\mathrm{dc}})=\frac{N_{\mathrm{out}}(\phi_{\mathrm{dc}})}{G_{\mathrm{RF}}(\phi_{\mathrm{dc}})kT} \tag{5}$$

其中增益和总输出噪声可表示为

$$G=\frac{1}{2}i_{\mathrm{B}}^2Z_{\mathrm{out}}K\sin^2\phi_{\mathrm{dc}} \tag{6}$$

$$N_{\mathrm{out}}(\phi_{\mathrm{dc}})=N_{\mathrm{Laser}}+N_{\mathrm{sn}}+N_{\mathrm{th}} \tag{7}$$

在式(5)～(7)中，i_B 表示光电探测器接收到的直流光电流，$i_B=0.5\mathscr{R}t_m t_{md}P_{m,in}$，$\mathscr{R}$ 是光电探测器的响应度，t_m 是调制器的损耗，$P_{m,in}$ 是调制器的输入光功率，t_{md} 是调制器到光电探测器的损耗，Z_{out} 是输出端负载，ϕ_{dc} 是调制器的偏置点，$K=2\pi^2 Z_{in}/V_\pi^2$ 是电光调制器的电光调制响应，Z_{in} 是电光调制器的输入阻抗，V_π 是电光调制器的半波电压，N_{Laser}，N_{sn}，N_{th} 分别是激光器的相对强度噪声、散弹噪声和热噪声，它们可分别表示为

$$N_{Laser}=\frac{\langle i_B\rangle^2}{2}10^{\frac{RIN}{10}}\Delta f(1-\cos\phi_{dc})^2 Z_{out} \tag{8}$$

$$N_{sn}=2e\langle i_B\rangle\Delta f(1-\cos\phi_{dc})Z_{out} \tag{9}$$

$$N_{th}=[G_{RF}(\phi_{dc})+1]\Delta fkT \tag{10}$$

根据上述模型就可以定量获得相位噪声噪底，同时还能看出相位噪声噪底 b_0 与链路的输出噪底 N_{out} 具有密切的联系，它们之间的相互关系可由式(11)表示。该公式表明两者的噪底在数值上并不相等，而是与光子链路的输入射频功率和链路增益相关。

$$\frac{N_{out}}{b_0}=P_0 G_{RF} \tag{11}$$

1.3　$1/f$ 相位噪声模型——b_{-1}

$1/f$ 噪声是自然界中近直流频端中普遍存在的一种现象，这种噪声的功率谱密度与频率成反比。在微波光子链路中，DFB 激光器的相对强度噪声(RIN)在近直流频端具有较强的 $1/f$ 噪声特性。而且 RIN 噪声将通过链路中的非线性效应在探测器中转换为微波信号的相位噪声，其转换关系可表示为[9]

$$L'(f)=RIN(f)\cdot P_{opt}^2\cdot\left(\frac{d\varphi}{dP_{opt}}\right)^2 \tag{12}$$

其中，$L'(f)$为偏离微波载波频率 f 处的相位噪声谱密度，$d\varphi/dP_{opt}$ 为微波相位-光功率转换斜率。由于 $RIN(f)$在近直流端可近似为

$$RIN(f)=\frac{RIN(1\text{ Hz})}{f} \tag{13}$$

将式(12)代入式(11)中，并结合式(4)的第二项，即 $1/f$ 噪声项，可以很容易地观察到其系数可以用式(14)表示：

$$b_{-1}=RIN(1\text{ Hz})\cdot P_{opt}^2\cdot\left(\frac{d\varphi}{dP_{opt}}\right)^2 \tag{14}$$

式中，$\frac{d\varphi}{dP_{opt}}$ 是探测器中的微波相位-光功率转换斜率，$RIN(1\text{ Hz})$以及转换斜率在工程中一般通过实际测量获得。一般而言，较好的 DFB 激光器其 $RIN@1$ Hz 可达到 -80～-100 dB/Hz，线性斜率转换效率处于 10 ～ 50 rad/W，b^{-1} 处于 -100 dB/Hz 的水平。文献[10]对此有较好的论述，本文不再赘述。

2　附加相位噪声分析及优化

2.1　链路附加相位噪声分析

为了从链路性能的角度阐述链路参数与附加相位噪声之间的关系，采用表 1 所示的典型链路参数进行较详细的分析。

表 1　用于仿真分析的各种参数

参数	数值
激光功率 $P_{m,in}$/dBm	16
相对强度噪声 RIN/(dB·Hz^{-1})	-160
调制器插损 t_m/dB	5
调制器半波电压 V_π/V	5
链路光插损 t_{md}/dB	可变
探测器响应度 $\mathscr{R}$/(A·W^{-1})	0.8
射频频率 f/GHz	10
输入射频功率 P_0/dBm	10
输入阻抗 R_{in}/Ω	50
输出阻抗 R_{out}/Ω	50
传输光纤长度 L/km	1

从图 4 的曲线中可以看出，相位噪声的远端噪底取决于链路的噪声系数以及输入信号功率水平。链路的噪声系数受到链路中激光光功率、调制器偏置点、链路光损耗以及探测器响应度等诸多因素影响。为了尽可能地取得较低的相位噪声噪底，必须优化链路，实现较低的噪声系数；输入射频功率受到调制器 1 dB 压缩点的限制。但通过优化数以及允许 15 dBm 的输入功率，相位噪声噪底达到 -160 dBc/Hz 是可能的，这已经远优于大多数射频信号的远端噪底了，故几乎不会恶化信号的远端相位噪声。

结合 $1/f$ 噪声模型以及表 1 中所示的典型参数，对微波光子链路进行了附加相位噪声分析，并结合实测相位噪声数据进行了对比分析，可以从图 5 中看出光链路的附加相位噪声在近 DC 端呈现出 $1/f$ 特性，并与 $1/f$ 相位噪声模型吻合良好。实际上提取 1 kHz 处的 RIN 值是该模型的关键，这可以从实验数据或者激光器供应商的数据手册中获得；另外远端噪底也能通过其模型获得很好的验证。对于本例所用的链路而言，可计算出其噪声系数约为

35 dB，在输入射频功率 10 dBm 下，其噪底约为 $b_0 = NF \cdot kT/P_{in} = -149$ dBc/Hz，这与实验数据也具有较好的一致性。总的来说，远端噪底由于只涉及链路的宏观参量，无论从实验还是理论上都比近端 $1/f$ 相位噪声的相关参量要准确且易于获取，同时更易于改善。

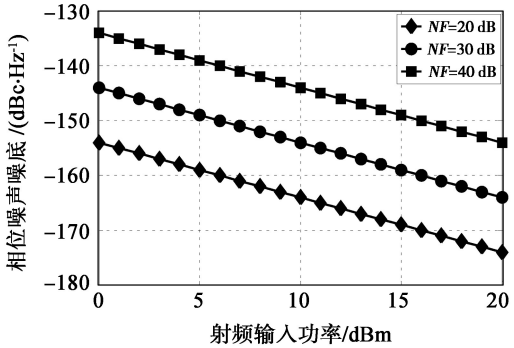


图 4 输入射频功率与相位噪声噪底的关系

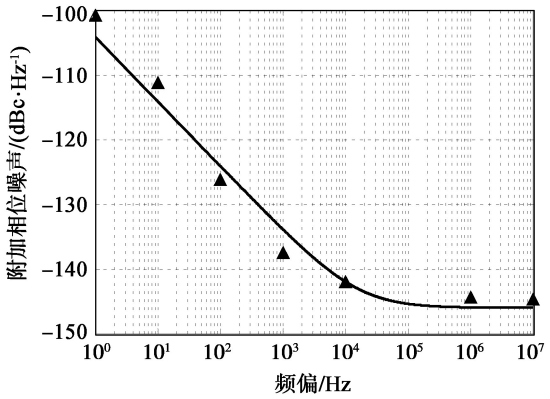


图 5 链路附加相位噪声的理论和实测对比

2.2 本振信号射频光分配的相位噪声特性

低附加相位噪声的微波光子链路最重要的应用就是雷达、电子战等领域中的本振传输。随着射频拉远及大规模天线阵的迫切需求，实现低附加相位噪声下本振信号的多路网络分配成为一个亟待解决的问题。本振分配带来的显著问题是光信号功率损失导致的射频相位噪声恶化。图 6 显示出在不同分配路数下，单路信号的噪声系数发生较大的恶化。在这种情况下射频信号的载噪比剧烈恶化，所以其相位噪底随着分配路数的增多不断抬高，信号的相位噪声随之恶化，见图 7 所示的相位噪声曲线。

克服因分路引起的噪声系数及相位噪声恶化的方法通常是在发射机之后采用光放大器进行补偿。图 6 显示了采用光放大器之后的链路的噪声系数改善，从图中可以看到，不同的放大增益下，噪声系数得到了极大的改善，但由于放大器也存在一定的噪声系数，所以即使完全补偿光分路带来的光功率损失，也不可能实现完全的噪声系数补偿，这与单路信号的噪声系数仍相差 5 dB 左右。同时从附加相位噪声的角度来看，单纯的本振分配必然导致信号的相位噪声恶化，但通过放大补偿能够极大地改善相位噪声，以满足应用的需求，但同样因为放大器噪声的存在，导致无法达到单路时的相位噪声水平。

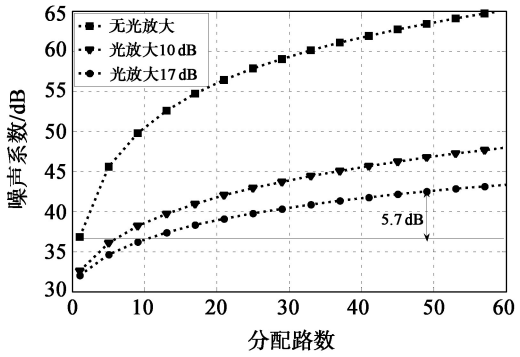


图 6 不同分配路数下的噪声系数变化

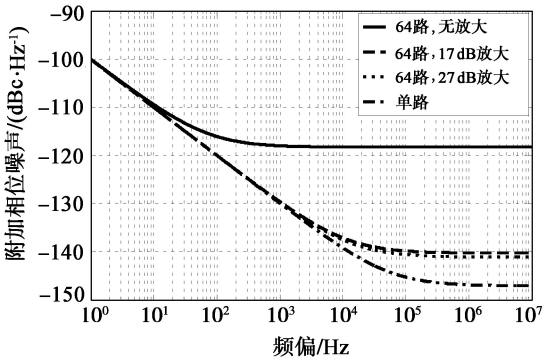


图 7 不同分配路数下信号的相位噪声变化

总的来说，通过引入低噪声、增益合适的光放大器，能够实现本振分配的附加相位噪声改善，可以达到较好的水平，这对于大多数高频应用（比如 GHz 量级的本振信号），几乎可以做到不恶化其相位噪声。而对于相位噪声性能本身很好的低频信号（兆赫兹量级），则需要采取更低 RIN、高功率、窄线宽激光光源来保证链路的低附加相位噪声。

3 结论

针对模拟微波光子链路在本振光传输、分配时因附加相位噪声恶化的问题，本文详细研究了光子链路附加相位噪声的产生机理，并建立了相应的理论模型，从白噪声及频率相关噪声的角度阐述了附加相位噪声的变化规律。同时从实验和理论两方面对附加相位噪声进行了分析；针对雷达或电子战等领域中的射频拉远、本振分配等应用场景，提出了采

用光放大补偿的措施来优化附加相位噪声，并明确了放大器的选用原则。结果表明本文的相位噪声模型能够有效应用于微波光子链路，能对附加相位噪声的分析和优化提供理论依据，具有较好的工程指导意义。

参考文献：

[1] Jose C, Dalma N. Microwave photonics combines two worlds [J]. Nature Photonics, 2007, 1: 319-330.

[2] Vilcot A, Cabon B, Chazelas J. Microwave Photonics——From Components to Applications and Systems[M]. Kluwer: Kluwer Academic Publishers, 2003: 306-375.

[3] Seed A J, Williams K J. Microwave photonics [J]. J. Lightwave Technol., 2006, 24(12): 4628-4641.

[4] Williamson R C, Esman R D. RF photonics[J]. J. Lightwave Technol., 2008, 26(9): 1145-1153.

[5] Wang Renyuan, Bhardwaj A, Li Yifei. Efficent RF frequency down conversion using coupling quantum-well optical phase modulator[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2011, 23(10): 645-647.

[6] Marpaung D, Roeloffzen C, Etten W V. Enhanced dynamic range in a directly modulated analog photonic link[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2009, 21(24): 1810-1812.

[7] Cox C H, Ackerman E I, Betts G E, et al. Limits on the performance of RF-over-fiber links and their impact on device design[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2006, 54(2): 906-920.

[8] Urick V J, Bucholtz F, Mckinney J D, et al. Long-haul analog photonics[J]. J. of Lightwave Technol., 2011, 29(8): 1182-1205.

[9] Bibey M B, Deborgies F. Very low phase-noise optical links—experiments and theory [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(12): 2257-2262.

[10] Eliyahu D, Seidel D, Maleki L. RF amplitude and phase-noise reduction of an optical link and an opto-electronic oscillator [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(2): 449-456.

作者简介：

瞿鹏飞(1983—)，男，博士，工程师，研究方向为微波光子学。

(上接第 554 页)

[2] Krombach N, Droeschel D, Houben S, et al. Feature-based visual odometry prior for real-time semi-dense stereo SLAM [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 109: 38-58.

[3] Schops T, Sattler T, Pollefeys M. BAD SLAM: Bundle adjusted direct RGB-D SLAM[C]// Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019: 134-144.

[4] Klein G, Murray D. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces[C]// Proc. of the 2007 6th IEEE and ACM Inter. Symp. on Mixed and Augmented Reality IEEE Computer Society, 2007: 1-10.

[5] Eudes A, Lhuillier M, Naudet-Collette S, et al. Fast odometry integration in local bundle adjustment-based visual slam [C]// IEEE 2010 20th Inter. Conf. on Pattern Recognition, 2010: 290-293.

[6] Mur-Artal R, Montiel J M M, Tardos J D. ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system [J]. IEEE Trans. on Robotics, 2015, 31(5): 1147-1163.

[7] Mur-Artal R, Tardos J D. ORB-SLAM2: An open-source slam system for monocular, stereo and RGB-D cameras[J]. IEEE Trans. on Robotics, 2017, 33(5): 1255-1262.

[8] Engel J, Schops T, Cremers D. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM[C]// European Conf. on Computer Vision. Springer, Cham, 2014: 834-849.

[9] Engel J, Koltun V, Cremers D. Direct sparse odometry[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 40(3): 611-625.

[10] Karami E, Prasad S, Shehata M. Image matching using SIFT, SURF, BRIEF and ORB: performance comparison for distorted images[C]// IEEE Newfoundland Electrical and Computer Engin. Conf., 2015.

[11] Hornung A, Wurm K M, Bennewitz M, et al. OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees [J]. Autonomous Robots, 2013, 34(3): 189-206.

[12] Mo H, Wang K, Wang H, et al. Research on loop closing for SLAM based on RGB-D images [C]// Proc. of 2018 Chinese Intelligent Systems Conf., 2019: 739-748.

[13] Forster C, Pizzoli M, Scaramuzza D. SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry[C]//2014 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2014: 15-22.

[14] Shi B, Matsushita Y. Self-calibrating photometric stereo [C]// 2010 IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010: 1118-1125.

[15] Grisetti G, Kummerle R, Strasdat H, et al. g2o: A general framework for (hyper) graph optimization[C]//Proc. 2011 IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, 2011.

[16] Sturm J, Engelhard N, Endres F, et al. A benchmark for the evaluation of RGB-D SLAM systems[C]//Proc. 2012 IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2012: 573-580.

[17] Kerl C, Sturm J, Cremers D. Dense visual SLAM for RGB-D cameras [C]// Proc. 2013 IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2013: 2100-2106.

作者简介：

胡章芳(1969—)，女，重庆市人，教授，硕士生导师，主要研究领域为数字图像处理、微机电系统、智能信号处理。

光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.021

DFB 激光器饱和吸收稳频的精密温控系统设计

张 玮，李兆隆，郭 平，赵建业*

（北京大学 信息科学技术学院，北京 100871）

摘 要： 相对于外腔半导体激光器，分布式反馈（Distributed Feedback Laser，DFB）激光器的温调率较高，为实现饱和吸收稳频，需要对激光器温度进行精密控制。分析了饱和吸收稳频系统的控温需求，基于 MAX1978 芯片设计了精密温控系统；利用恒流源对测温电桥电路进行了线性优化，利用遗传算法对模拟 PID 电路参数进行快速整定，系统最终实现 0.2 mK 的控温稳定度，比同类设计的稳定度高 1～2 个数量级，解决了饱和吸收谱线明显晃动的问题，具有广阔的应用前景。

关键词： 分布式反馈激光器；精密控温；遗传算法；MAX1978；饱和吸收稳频

中图分类号： TN248.4 **文章编号：** 1001－5868(2020)04－0560－06

Design of Precise Temperature Control System for Saturated Absorption Frequency Stabilization of DFB Laser

ZHANG Wei，LI Zhaolong，GUO Ping，ZHAO Jianye

（School of Electronics Engineering and Computer Science，Peking University，Beijing 100871，CHN）

Abstract： Compared with the external cavity semiconductor laser，distributed feedback laser has a higher temperature regulation rate. In order to achieve saturated absorption frequency stabilization，it is necessary to control the laser temperature precisely. In this paper，the temperature control requirements of the saturated absorption frequency stabilization system is analyzed，a precise temperature control system is designed based on MAX1978 chip. The linear optimization of the temperature bridge circuit is realized by using constant current source，and the parameters of the analog PID circuit are quickly adjusted by using genetic algorithm. Finally the temperature control stability of 0.2 mK is achieved，which is 1～2 orders of magnitude higher than that of the similar design. It solves the problem of obvious shaking of saturated absorption spectrum and has a broad application prospect.

Key words： DFB laser；precise temperature control；genetic algorithm；MAX1978；saturated absorption frequency stabilization

0 引言

近年来，光传输[1-2]、精密测量、光频标等高新技术的迅猛发展对激光器的频率稳定度提出了更高的要求[3]，传统激光器受制于线宽[4]，频率稳定度尚不能达到要求，因此必须采取措施进一步稳定激光器频率。饱和吸收稳频是一种有效的激光器稳频方案，其实质是利用具有更高稳定度的原子跃迁频率对激光器频率进行补偿与校正，从而提高激光频率的稳定度[5]。在饱和吸收稳频的实现过程中，温度控制是至关重要的步骤之一。分布式反馈（DFB）激光器温调率较高，其输出激光波长对温度变化敏感，如果温度控制不合适，就会带来饱和吸收谱观测不到、饱和吸收谱晃动等问题，造成稳频困难甚至不能实现稳频，因此必须对激光器进行精密温控。

本文在分析 DFB 激光器饱和吸收稳频温控需

收稿日期：2020－04－08.

基金项目： 国家自然科学基金项目（61535001）.

* **通信作者：**赵建业 **E-mail：** zhaojianye@pku.edu.cn

求的基础上，基于 MAX1978 芯片设计了激光器精密温控系统，采用线性优化的电桥电路进行温度测量，PID 补偿电路进行反馈控制，使用遗传算法对 PID 参数进行优化，最终控温稳定度高达 0.2 mK，很大程度地抑制了饱和吸收谱线的左右晃动，为实现激光器饱和吸收稳频提供了保证。除此之外，此温控系统同样适用于其他需要精密控温的场所，本文的设计方法也可为其他温控系统的设计提供参考。

1　激光器温控系统设计

1.1　控温需求分析

为了合理设计温控系统，首先对 DFB 激光器饱和吸收稳频系统的控温需求进行简要分析。本文采用的是 Nanoplus 公司的 DFB 激光器，可实现基于^{87}Rb 原子 D1 线跃迁频率的饱和吸收稳频。经过初步控温，在激光器温度为 34 ℃、稳定度为 2 mK 时，扫描激光器工作电流观测到饱和吸收谱（如图 1 所示）。但此时谱线有明显的左右晃动现象，晃动范围约为 100 MHz，超出^{87}Rb 原子 D1 线饱和吸收峰的带宽（约为 50 MHz），导致 DFB 激光器饱和吸收稳频环路难以被锁定，因此考虑将控温稳定度进一步提高到 0.2 mK，此时激光器的温调率[6]可由下式表示：

$$\Delta f=\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}T}\Delta T=\frac{c}{\lambda^2}\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}T}\Delta T \tag{1}$$

式中，光速 $c=3\times10^8$ m/s，波长 $\lambda=795$ nm，温调率 $\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}T}=0.05$ nm/K。当温差 $\Delta T=2\times10^{-4}$ K，温度变化引起的光谱抖动范围为 $\Delta f=4.75$ MHz，小于谱峰带宽的 1/10，可实现饱和吸收稳频。

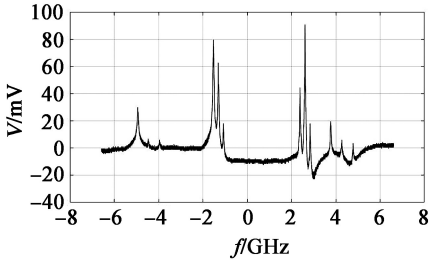


图 1　饱和吸收谱

综合上述实验与数据分析结果，得到精密控温系统设计的关键指标：控温点为 34 ℃左右，控温稳定度在 0.2 mK 以内。

1.2　温控系统设计

温控系统原理框图如图 2 所示，实验选用的激光器内部封装了热敏电阻和半导体制冷器（Thermo Electric Cooler，TEC），其中，热敏电阻作为测温元件，TEC 作为温度补偿元件。热敏电阻实时检测当前温度，并与目标温度比较，将得到的温差信号作为误差信号输入 PID 补偿电路；PID 补偿电路输出控制信号调整 PWM 控制器，驱动 TEC 实现加热或制冷，反馈调整当前温度并最终实现温度稳定。

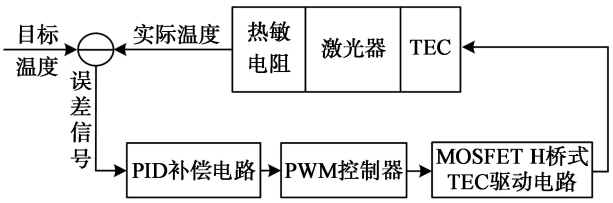


图 2　温控系统原理框图

常见的基于 TEC 控温的实现方式有两种，一种是采用分立元件实现，另一种是采用专用的集成芯片实现。前者较为繁琐，调试困难；后者操作简单，集成度高，性能更稳定，因此本文选用专用的 TEC 控温芯片。常见的 TEC 控温芯片[7]如表 1 所示。

表 1　常见 TEC 控温芯片

公司	芯片	片上资源	特点
MAXIM	MAX1968	驱动 TEC 的 MOSFET	需要外接差分运放、PID 控制运放，双向控温
	MAX1969	驱动 TEC 的 MOSFET	需要外接差分运放、PID 控制运放，单向控温
	MAX1978	差分运放、PID 控制运放、驱动 TEC 的 MOSFET	双向控温
	MAX1979	差分运放、PID 控制运放、驱动 TEC 的 MOSFET	单向控温
ANALOG	ADN8830	差分运放、PID 控制运放	需要外接驱动 TEC 的 MOSFET、控温精度低

综合上述芯片特点，MAX1978 芯片高度定制，可提供最高为±3 V 的 TEC 双向电压来实现 TEC 的制冷或加热，其需要外接的电路少、简单实用、控温精度高、效率高[8]，因此本文选用 MAX1978 芯片来设计精密控温系统。电路框图如图 3 所示，TEC 的两端分别接在 OS1 和 OS2 引脚处；热敏电阻 R_t 一端接 FB^- 引脚，另一端接地。温度变化时测温电桥失衡，电桥两臂的压差信号经差分放大 50 倍后输入 PID 补偿电路；PID 补偿电路输出的控制信号通过 CTLI 引脚进入 PWM 控制器，进而调整流入 TEC 电流的大小和方向，最终实现温度校正。测温电路和 PID 补偿网络是本系统的设计重点，后文将进行详细介绍。

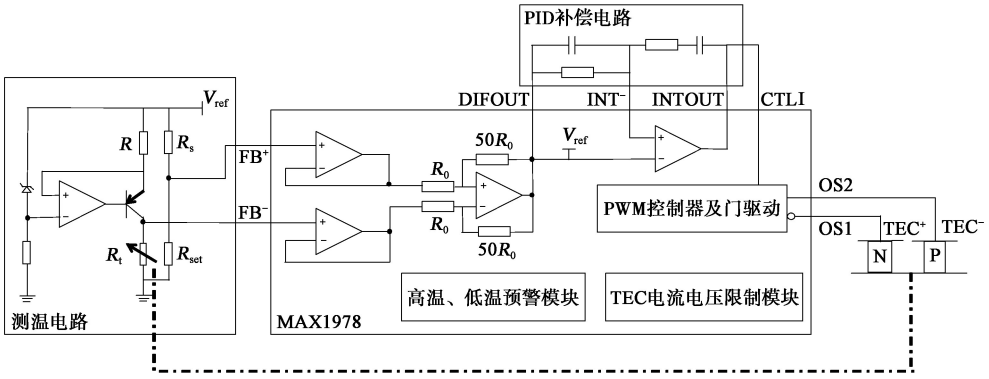


图 3 精密控温系统电路框图

2 基于线性化电桥的测温电路

常见的测温电路为惠斯通电桥电路模型。如图 4(a)所示，R_s 为分压电阻，R_t 为热敏电阻，R_{set} 阻值与目标温度下热敏电阻阻值相同。若当前温度与目标温度不等，则电桥失衡，电桥两臂出现压差，压差将反映热敏电阻阻值变化。当 $R_t=R_{set}+\Delta R$ 时，电桥两臂压差为

$$\Delta V=V_{ref}\frac{-R_s\Delta R}{(R_{set}+R_s)(R_{set}+R_s+\Delta R)} \tag{2}$$

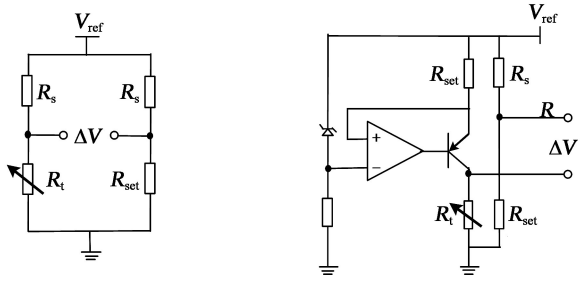
由上式可知，改进前的惠斯通电桥电路的压差与热敏电阻阻值变化成非线性关系，不方便测量和计算。为此，本文引入恒流源对电桥电路进行线性优化，如图 4(b)所示，恒流源的电流为

$$I=\frac{V_{ref}}{R}=\frac{V_{ref}}{R_{set}+R_s} \tag{3}$$

当 $R_t=R_{set}+\Delta R$，此时压差与阻值变化的关系为

$$\Delta V=V_{ref}\left(\frac{R_{set}}{R_{set}+R_s}-\frac{R_{set}+\Delta R}{R_{set}+R_s}\right)=\frac{-V_{ref}\Delta R}{R_{set}+R_s} \tag{4}$$

观察上式可知，改进后的线性电桥电路压差与热敏电阻的阻值变化成线性关系。需要注意的是，为保证控温精度，尽可能降低噪声，本系统选用高精度、低温漂（2×10^{-6}/℃）、低噪声（1 $\mu V_{p\text{-}p}$）的 ADR4520BRZ 电源芯片产生的 2.048 V 电压作为电桥电路参考电压，电桥电阻选用低温漂（5×10^{-6}/℃）、高精度（0.01%）的金属膜电阻。考虑 34 ℃的控温需求、热敏电阻温度和阻值关系以及金属膜电阻可选电阻值等因素，最终选择 $R_{set}=6.75$ kΩ，$R_s=10$ kΩ。



(a) 传统惠斯通电桥电路 (b) 线性化后的电桥电路

图 4 优化前后的测温电路

3 基于遗传算法的 PID 参数整定

PID 补偿电路如图 5 所示，由于其具有简单易用、鲁棒性好等特点，被广泛应用于自动控制领域。本文中，芯片 MAX1978 外接的 PID 补偿电路是整个系统最重要的部分，PID 参数的整定效果直接决定控温的精度和稳定度[9]。通常，PID 控制方程[10]可表示为

$$u(t)=K_Pe(t)+K_I\int_0^t e(t)\mathrm{d}t+K_D\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

式中，$u(t)$为控制信号，$e(t)$为误差信号，K_P 为比例系数，K_I 为积分系数，K_D 为微分系数，可分别表示为 $K_P=-\left(\frac{R_2}{R_1}+\frac{C_1}{C_2}\right)$，$K_I=-\frac{1}{R_1C_2}$，$K_D=-R_2C_1$。

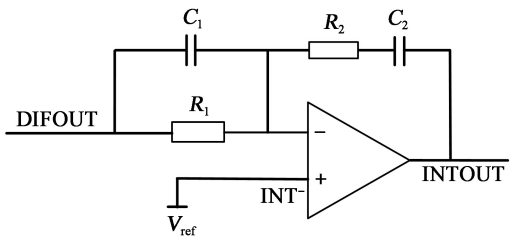


图 5 PID 补偿电路示意图

对于模拟 PID 网络，常用的 PID 参数整定方法

有 Z-N 临界比例度法[11]、衰减曲线法和经验整定法等，这些整定方法通常需要多次实验，调试周期一般较长，过程比较繁琐，要求调试人员具有丰富的调试经验，因而调试结果受调试人员主观因素影响大。为了在短时间内获得最优的 PID 参数，本文使用遗传算法进行搜寻。

遗传算法是一种模拟自然选择和生物进化机制随机搜索找寻全局最优解的算法[12]。它将问题编码为群体，将适应度函数作为评价群体中个体优劣的标准，采用遗传算子构建新群体，在群体迭代过程中，个体逐渐接近适应度函数最小值，最终获得问题的最优解。不同于传统优化算法的单点搜索，遗传算法是对群体进行搜索，故具有隐含的并行性，搜索范围广，速度快。本文利用 Matlab 中的 ga 函数实现遗传算法，工作流程如图 6 所示。

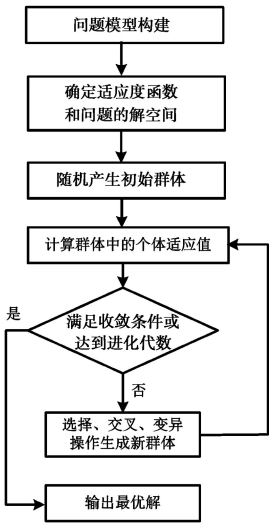


图 6　遗传算法工作流程框图

具体分析如下：(1)为了对系统进行定量分析，需要构建出系统的数学模型。本系统的 S 域模型如图 7 所示，其中受控对象模型通常是带有纯延时的一阶迟滞系统[13]，其参数获取方法是将 PID 网络断开，在 MAX1978 的 CTLI 引脚输入阶跃信号，可通过观测热敏电阻两端电压的阶跃响应曲线得到。

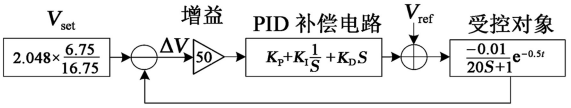


图 7　控温系统 S 域模型

(2)遗传算法的目的是找到最优的代表问题的解的矢量，使适应度函数的值取全局最小[13]，本文选择 K_P，K_I，K_D 作为解矢量，由于本温控系统强调稳态值波动小，超调也尽量小，因此设置适应度函数中的稳态值权重为 1 500，超调量权重为 100。适应度函数如下：

```
J=0 %适应度函数输出值
for i=1:L
err=(yd-y(i))*50;%误差
if(i<50)
  J1=J1+i*abs(err); %初始权重低
else
  J1=J1+1500*err^2;%稳定后权重高
    end
end
J=J1+100*pos;%pos 为超调量
```

(3)遗传算子的作用是基于旧群体产生新群体，包括选择算子、交叉算子、变异算子。选择算子是按照一定规则将旧群体中适应度高的个体选择出来；交叉算子是将两父子个体编码互换一部分形成子个体；变异算子将子个体的部分编码改变，产生变异个体。Matlab 为 ga 函数提供了预实现的遗传算子，本文选用 selectionstochunif 作为选择算子、crossoverscattered 作为交叉算子、mutationgaussian 作为变异算子。

(4)当最优个体适应度达到阈值或群体适应度，不再上升或者迭代次数达到阈值，算法终止[14]。最终仿真得到的最优解为 $K_P=0.1$，$K_I=0.073\ 8$，$K_D=0.05$。由于噪声的存在、电容电阻的可选值有限等原因，实际系统与构建的模型仍有一定差距，PID 参数需要进行微调。经过调整，最终确定 $R_1=1.5\ \mathrm{M\Omega}$，$R_2=75\ \mathrm{k\Omega}$，$C_1=0.47\ \mu\mathrm{F}$，$C_2=10\ \mu\mathrm{F}$，此时 $K_P=0.097$，$K_I=0.067$，$K_D=0.035\ 25$。

4　实验结果

为测试控温效果，本实验采用安捷伦的六位半数字万用表测量热敏电阻两端的电压变化曲线，进而计算出温度的变化范围。实际操作过程中，将万用表接在 FB^- 引脚处即可。作为对照，实验先测量了没有控温时(温控板不连接激光器 TEC) MAX1978 芯片 FB^- 引脚的电压变化(图 8)；之后，对激光器进行控温(温控板连接激光器 TEC)，分别测量了 FB^- 的电压变化(图 9)和 FB^- 与 FB^+ 的压差曲线(图 10)。由测试结果可得，温控前，激光器的温度沿着一个方向漂移且变化范围较大；控温后，

激光器的温度趋于稳定，热敏电阻的压差变化稳定在 5 μV 以内。

热敏电阻阻值随温度变化的关系式和线性电桥分压关系分别可表示为

$$R_t = R_0 \cdot \exp\left[B\left(\frac{1}{T_t} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \tag{6}$$

$$R_t = \frac{V}{V_{ref}} \cdot (R_{set} + R_s) \tag{7}$$

式中，$B = 3\,930$，$R_0 = 10\ \text{k}\Omega$，$T_0 = 298.15\ \text{K}$，$V_{ref} = 2.048\ \text{V}$，$V$ 为热敏电阻电压，R_t 为热敏电阻在温度为 T_t 时的阻值。由式(6)～(7)可得：当 $V \in [0.817\,826, 0.817\,831]$ V，$T \in [34.382\,535, 34.382\,712]$ ℃，即温度变化范围为 0.177 mK(如图 11 所示)，达到预期目标。经观测，此时饱和吸收谱的谱线晃动范围明显减小，约为 5 MHz，满足稳频的要求。后续实验也成功在此控温条件下实现了 DFB 激光器的饱和吸收稳频。

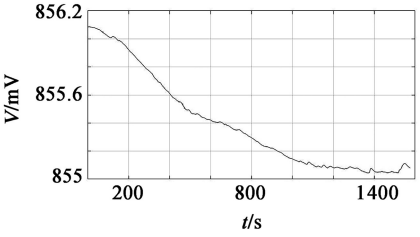


图 8 控温前热敏电阻电压变化曲线

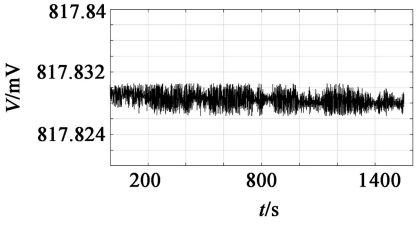


图 9 控温后热敏电阻电压变化曲线

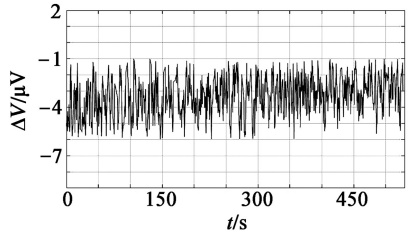


图 10 FB^- 与 FB^+ 压差曲线

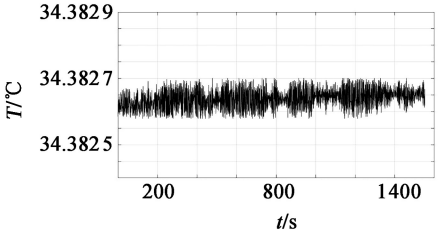


图 11 温度变化曲线

5 结论

本文基于 DFB 激光器饱和吸收稳频的控温需求，详细讨论了精密控温系统的设计过程，包括控温需求分析、元器件选型、电路设计与优化、PID 参数的整定以及系统测试。不同于传统的基于 MAX1978 芯片的控制系统，本文对测温电路进行了线性优化并选用高精度的参考电压和精密电阻电容器件，有利于提高测量精度和控温精度。为缩短 PID 补偿电路参数的调试时间，本文构建了系统数学模型，利用遗传算法快速搜寻最优 PID 参数。经测试，本系统控温稳定度在 0.2 mK 以内，相比同类基于 MAX1978 控温系统设计[15-16]的稳定度提高了 1～2 个数量级。测量结果表明，本系统足以满足饱和吸收稳频的应用需求，能够尽可能降低外界温度对激光器输出波长、输出功率和线宽的影响。本控温系统在非线性光学[17]、光谱测量[18]、原子物理等领域有广阔的应用前景；由本系统精密控温的 DFB 激光器也可用于激光冷却[19]、冷原子 CPT[20]等精密物理实验。

参考文献：

[1] Hou D, Li P, Liu C, et al. Long-term stable frequency transfer over an urban fiber link using microwave phase stabilization[J]. Optics Express, 2011, 19(2): 506-511.

[2] Ning B, Hou D, Zheng T, et al. Hybrid analog-digital fiber-based radio-frequency signal distribution[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2013, 25(16): 1551-1554.

[3] 陈 超，张 剑，刘新元，等. 原子饱和吸收谱谐波稳频短期稳定度研究[J]. 光学学报，2004，24(12)：1649-1652.
Chen Chao, Zhang Jian, Liu Xinyuan, et al. Study on short-term stability[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(12): 1649-1652.

[4] Urick V J, Williams K J, Mckinney J D. Fundamentals of Microwave Photonics[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2015.

[5] 张 靖，陶 桦，卫 栋，等. Rb 原子饱和吸收稳频半导体激光器系统[J]. 光学学报，2003，23(2)：197-201.
Zhang Jing, Tao Hua, Wei Dong, et al. Rb atom saturated absorption stable frequency semiconductor laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(2): 197-201.

[6] DFB laser diodes from 760 nm to 830 nm[EB/OL]. (2020-04-08) https://nanoplus.com/fileadmin/user_upload/Data_sheets/nanoplus_DFB_760-830 nm.pdf.

[7] 贺驰光. 非制冷红外焦平面温控电路设计[D]. 武汉：华中科技大学，2013.
He Chiguang. The design of temperature control circuit of

uncooled infrared focal plane arrays[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[8] MAX1979Datasheet-MaximIntegratedProducts [EB/OL]. [2020-04-08]. http://html.alldatasheetcn.com/html-pdf/73010/MAXIM/MAX1978/25712/MAX1978.html.

[9] 阙　旻，蒋　宁，刘子骥，等. 基于MAX1978的非致冷红外焦平面温度控制系统[J]. 红外，2010，31(11)：20-24.
Que Min, Jiang Ning, Liu Ziji, et al. MAX1978-based temperature control system for uncooled infrared focal plane [J]. Infrared, 2010, 31(11): 20-24.

[10] Li Y, Ang K H, Chong C C Y. PID control system analysis and design-problems, remedies and future directions[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2006, 26(1): 32-41.

[11] Zhuang M, Atherton D P. Automatic tuning of optimum PID controllers[J]. Control Theory & Applications IEEE Proceedings D, 1993, 140(3): 216-224.

[12] 陈　丹，方康玲，陈乔礼. 遗传算法在PID参数优化中的应用[J]. 微计算机信息，2007，23(7)：42-43，75.
Chen Dan, Fang Kangling, Chen Qiaoli. The application of float-point genetic algorithm in the PID parameter optimization [J]. Microcomputer Information, 2007, 23(7): 42-43, 75.

[13] 徐　晶. 基于嵌入式温度实验系统的PID控制[D]. 南京：南京理工大学，2005.
Xu Jing. PID control based on embedded temperature experimental system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.

[14] 谷　克. 遗传算法在公路路线智能决策系统中的应用研究[D]. 陕西：长安大学，2008.
Gu K. Application of genetic algorithm in intelligent decision system of highway route[D]. Shaanxi: Chang'an University, 2008.

[15] 严建锁，李少甫，刘先勇，等. 光声检测用半导体激光器温度控制电路[J]. 西南科技大学学报，2010，25(1)：60-63.
Yan Jiansuo, Li Shaofu, Liu Xianyong, et al. Semiconductor laser temperature control circuit for photoacoustic detection[J]. J. of Southwest University of Science and Technology, 2010, 25(1): 60-63.

[16] 谭中奇，龙兴武，李发明. 痕量气体光谱法检测用半导体激光器温度控制电路[J]. 仪器仪表学报，2006，27(Z3)：1909-1910.
Tan Zhongqi, Long Xingwu, Li Faming. Temperature control circuit of semiconductor laser for the spectroscopy detection of trace gas[J]. Chinese J. of Scientific Instrumentation, 2006, 27(Z3): 1909-1910.

[17] Peters E, Diddams S A, Fendel P, et al. A deep-UV optical frequency comb at 205 nm[J]. Opt. Express, 2009, 17(11): 9183-9190.

[18] 李华康. 基于半导体激光器阵列的相干光谱测量研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2019.
Li Huakang. Research on coherent spectroscopy measurement based on semiconductor laser array [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

[19] Raab E L, Prentiss M, Cable A, et al. Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure[J]. Physical Rev. Lett., 1988, 59(23): 2631-2634.

[20] Liu X, Ivanov E, Kitching J, et al. Frequency Shift Mitigation in A Cold-atom CPT Clock[C]// 2016 IEEE Inter. Frequency Control Symp., 2016: 154-156.

作者简介：

张　玮(1995—)，女，河南省信阳市人，在读硕士研究生，主要研究方向为电路与系统的分析与设计、原子钟等；

赵建业(1972—)，男，江苏省徐州市人，博士，教授，主要研究方向为电路与系统的分析与设计、光频标、原子钟等。

光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.022

基于弱光栅阵列应变传感的驼峰溜放监测方法研究

甘维兵[1*]，艾凌云[2]，涂世宇[2]，柳　苗[2]，姜　茹[2]

（武汉理工大学 1. 光纤传感技术国家工程实验室；2. 信息工程学院，武汉 430070）

摘　要： 针对现有驼峰溜放监测技术易受电磁干扰和外界环境影响，且很难实现大容量、高密集测量的不足，提出一种基于弱光栅阵列应变传感的驼峰溜放监测方法。首先，采用反射率仅为0.2‰的弱光栅阵列及混合复用组网技术解决了大容量、高密集检测的难题；其次，结合有限元模型和轮轨耦合理论对轨道受力情况、传感器灵敏度进行推导分析；最后，将封装好的光栅阵列传感光纤安装在试验现场，并进行了压道实验。结果表明，该方法能够准确识别溜放车组的轮轴信息、行车方向以及轨道占用信息。系统可靠性高、灵敏度较高，为轨道占用检查技术提供了新的思路。

关键词： 光栅阵列；混合复用；轮轨耦合；应变传感；轨道占用；轮轴计数

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0566－06

Research on New Method of Track Occupancy Detection Based on Strain Sensing of Weak Fiber Bragg Grating Array

GAN Weibing[1]，AI Lingyun[2]，TU Shiyu[2]，LIU Miao[2]，JIANG Ru[2]

（1. National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology；
2. School of Information Engineering，Wuhan University of Technology，Wuhan 430070，CHN）

Abstract： In view of the fact that the current monitoring technology of track occupancy detection is easy to be influenced by electromagnetic interference and external environment，and it is difficult to realize large capacity and high density measurement，a new method based on strain sensing of weak fiber grating array is proposed. Firstly，the weak fiber grating array with reflectivity of 0.2‰ and the hybrid multiplexing technology are used to solve the problem of large capacity and high density detection. Secondly，based on the finite element model and wheel-rail coupling theory，this paper deduces and analyzes the force on the track and the sensitivity of the sensor. Finally，the packaged fiber grating array is installed on the test site，and the track load experiment is carried out. The experimental results show that the system can accurately identify the axle information，running direction and track occupation information. The system has good reliability and high sensitivity，which provides a new idea for track occupation inspection technology.

Key words： fiber grating array；hybrid multiplexing；wheel-rail coupling；strain sensing；track occupation；axle counting

0　引言

轨道交通是我国国民经济大动脉、关键基础设施和重大民生工程，是综合交通运输体系的骨干和主要交通方式之一，在国民经济发展中的地位和作用至关重要。铁路编组站作为货运列车到达、解体和重新编组出发的“工厂”，其安全高效的编组操作直接关系到铁路运输效率，关乎国民经济大提速。

收稿日期：2020－02－18.

基金项目：国家自然科学基金项目(61875155，61735013).

* **通信作者：**甘维兵

E-mail： ganweibing@whut.edu.cn

驼峰溜放作为编组站作业最为关键的一环，其溜放过程的安全监测至关重要[1]。溜放过程中经常遇到途停、超速连挂、追钩撞车等安全问题，解决此问题的关键就是要实时监测列车的位置信息，并对轨道占用状态进行智能判断[2]。目前，轨道电路是应用最为广泛的一种检查设备，已成为一种较为成熟的轨道闭塞技术装备，在世界各国得到广泛应用。但是，轨道电路的智能化程度较低，易受电磁场和恶劣环境影响，从而造成“红光带”故障[3]。图像识别技术被广泛应用于驼峰溜放监测中，摄像机以一定时间间隔对溜放车组进行拍摄，通过图像处理与模式识别对溜放车组的特征和运行趋势进行判断[4-5]。然而，该技术对拍摄质量要求较高，存在检测盲区，且在夜间、暴雨、浓雾等极端天气下图像识别精度会大大降低[6-7]。全球定位系统(GPS)定位技术也被尝试应用于驼峰溜放监测，但其定位精度有限，达不到编组站调车机的定位要求。有研究者提出采用差分 GPS 技术来提高定位精度，从而达到溜放准确检测的目的，但该方法不能识别轮轴信息，且无法获取溜放车组的荷载信息[8]。

光纤光栅(FBG)传感技术具有测量精度高、可靠性好、易实现分布式组网、不受电磁干扰等优点，近十年来已在智能轨道交通安全监测等领域得到了广泛应用[9]。但传统的光栅传感器是点式准分布传感，无法同时满足长距离、大容量和高密集检测，而编组站驼峰溜放检测恰好需要这种长距离、高密集的检测技术[10]。针对上述需求，本文拟采用弱光栅阵列技术解决光栅传感无法实现长距离、高密集检测的科学难题，通过应力应变传感的方式准确获取溜放车组的轮轴、车速及轨道占用信息，并实现对溜放车组的精准定位。

1　传感原理及大规模组网

1.1　弱光栅传感原理

和传统光栅传感原理一样，弱光栅也是一种滤波器，只对特定中心波长的窄带光具有反射作用[11]。由于其峰值反射率仅为 0.2‰，且 3 dB 反射带宽很窄，因而具有灵敏度高、复用能力强等特点。由耦合模理论可知，弱光栅反射光的中心波长与光栅周期、纤芯有效折射率遵循如下关系：

$$\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda \tag{1}$$

式中，n_{eff} 为纤芯有效折射率，Λ 为光栅周期，λ_B 为弱光栅反射光中心波长。光纤纤芯有效折射率、光栅周期等特征参数都会随着外界温度、应变等物理量的变化而发生变化，从而导致光栅中心波长发生偏移，通过检测其偏移量即可获得被测物理量如温度、应变等变化情况，弱光栅传感原理如图 1 所示。

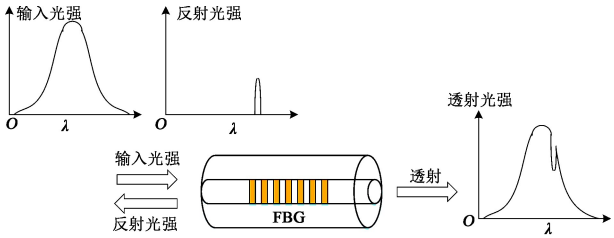


图 1　弱光栅传感原理示意图

由传感原理可知，光纤光栅中心波长偏移量与温度、应变的关系为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_f + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\varepsilon \tag{2}$$

式中，α_f 为光纤的膨胀系数，ξ 为光纤的热光系数，P_e 为光纤的弹光系数。假设温度变化 ΔT 为 0，即不考虑温度影响时，轴向应变对光栅波长漂移产生的总影响为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon \tag{3}$$

对于掺锗石英光纤，$P_e = 0.22$，则光纤光栅单位轴向应变引起的波长漂移为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\varepsilon} = 0.78\lambda_B \tag{4}$$

对于中心波长为 1 550 nm 的光栅，单位应变引起的中心波长漂移为 1.2 pm/με。可以看出，FBG 波长变化与其所受应力应变有着良好的线性关系，可通过检测 FBG 中心波长变化来推导轨道应力的应变情况。

1.2　弱光栅阵列组网

光纤光栅可采用波分、时分、空分复用技术实现分布式传感或构建传感网络。单一的复用技术已无法满足大规模组网需求，如基于波分复用(WDM)的分布式传感系统，受光源带宽的限制，单一通道最多只能复用 30 只传感器；空分复用(SDM)串扰低，但测量点数少，利用率较低；时分复用(TDM)适合分布式测量，但传感参量有限[12]。本文首次提出了一种基于超低反射率光栅阵列技术的时分和波分复用传感器网络，在时域和波长域二维空间进行寻址，很好地解决了光纤传感大规模组网的难题，其架构如图 2 所示。

传统光纤光栅传感网络存在焊点多、损耗大、抗

拉强度低等缺点。相比之下，弱光栅阵列传感网络具有独特的优势和特点：无节点损耗，一致性好，抗拉强度高，容量大，单根光纤可以复用成千上万只传感节点；可以同时对温度、应变、位移和震动等多个参量进行测量，工业拉丝塔制备的光栅阵列最小间隔可以达到 10 cm[13]。综上所述，弱光栅阵列技术能够很好地满足编组场驼峰溜放监测对大容量、长距离、高密集检测的工程需求。

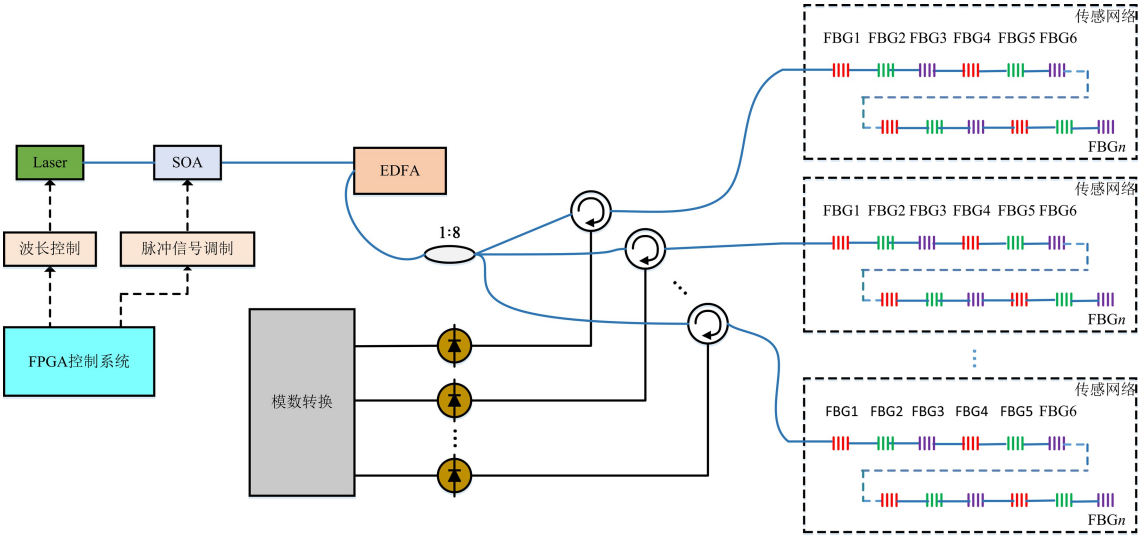
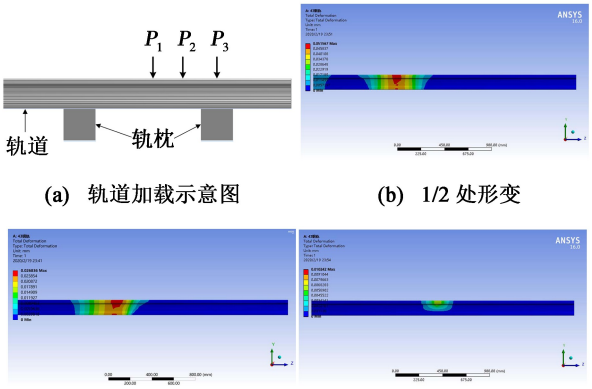


图 2 基于波分和时分混合复用的传感网络

2 传感器受力分析

2.1 轨道受力分析

为了确定轨道形变与应变的分布情况，利用 ANSYS 建立有限元模型对轨道受力特性进行分析，模拟轴重为 2.25 t 的溜放车组作用在 45 kg/m 的有砟钢轨上，其中枕木之间的标准间距为 60 cm。当车轮分别停留在两枕木的 P_1 点(1/2 处)、P_2 点(1/4 处)和 P_3 点(枕木正上方)时，轨道的形变情况如图 3 所示。



(a) 轨道加载示意图 (b) 1/2 处形变

(c)1/4 处形变 (d) 枕木正上方形变

图 3 轨道的形变情况

通过对枕木之间不同位置加载后的轨道应变集中程度进行分析，可以得出：当车轮运行至两枕木正中间(1/2 处)时，轨道形变最大，并且远远超过其他两种情况。

2.2 传感器灵敏度分析

考虑到轨道受力与应变传递率的问题，选择 304 不锈钢夹具与钢轨进行刚性连接，其中夹具底部固定在轨道的下边沿，顶部用于紧固、张拉光纤光栅传感器。当两枕木正中间受到车轮载荷(2.25 t)作用时，即在轨道形变最大的情况下，用于固定光纤光栅传感器两端的刚性夹具会随着轨道的形变而发生微小倾斜，如图 4 所示。

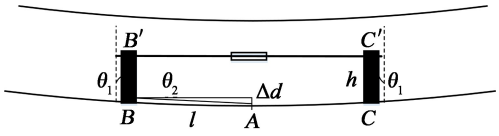


图 4 轨道受力等效图

由于夹具底部 B，C 两点相对固定且对称，因而夹具 BB' 和 CC' 均会产生相同的倾斜角 θ_1；若点 A 为 BC 中点，则钢轨 AB 与 AC 段会因形变产生相等的弯曲角 θ_2，此时固定在两夹具之间的光纤长度将从 BC 缩短为 $B'C'$。倾斜角 θ_2 可通过 AB 两点的形变差来求得：

$$\tan\theta_2 = \frac{\Delta d}{l} \tag{5}$$

式中，l 为 AB 的长度，Δd 为 A，B 两点垂直方向的形变差。已知 BC 的长度为 L_2，所以上式可以改写

为

$$\tan\theta_2=\frac{2\Delta d}{L_2} \tag{6}$$

假设刚性夹具的高度为 h，可以得到钢轨形变前后 BC 两点的长度变化值，即光纤光栅的长度变化值：

$$\Delta l=2h\tan\theta_1 \tag{7}$$

由于 θ_1 和 θ_2 均为趋于零的极小角度值，因而可近似认为

$$\tan\theta_1=\tan\theta_2 \tag{8}$$

所以式(7)可改写为

$$\Delta l=\frac{4h\Delta d}{L_2} \tag{9}$$

所制备的光栅阵列传感器采用了增敏的方法，将每只传感器两端分别采用内径为 3 和 5 mm 的不锈钢管进行嵌套封装，中间的软连接部分为紧套光纤，其长度为 L_1，如图 5 所示。

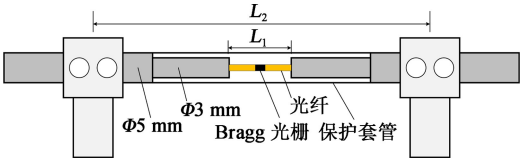


图 5　传感器的增敏封装示意图

轨道受力，通过两端的刚性夹具和不锈钢管传递到紧套光纤，此时光纤光栅的微应变 $\mu\varepsilon$ 可表示为

$$\mu\varepsilon=\frac{\Delta l}{L_1}\times10^6=\frac{4h\Delta d}{L_2L_1}\times10^6 \tag{10}$$

在实验过程中，取 h 为 7 cm，L_1 为 10 cm，L_2 为 25 cm，由有限元仿真可知 Δd 为 0.020 5 mm，由此可推算出传感器此时的理论应变值达到了 229.6 $\mu\varepsilon$。对于空车来讲，其灵敏度可很好地满足工程需求。

3　实验与分析

3.1　实验场景

本次实验在某铁路信号厂内的运营轨道上进行，该轨道为标准的 45 kg/m 钢轨，实验平板车载重 18 t，包含前、后轮组共计 8 个轮子(单轴 2.25 t)，采用人工推行平板车的方式进行溜放试验，如图 6 所示。

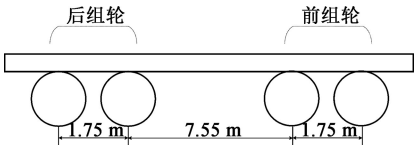


图 6　实验平板车及尺寸

3.2　系统架构

本系统主要由传感单元、解调单元和处理单元三部分组成，其中传感单元由敷设在各条股道上的传感光纤构成，解调单元主要包括光栅阵列信号解调仪，处理单元包括 PC 机和软件处理部分。图 7 所示为驼峰溜放监测系统基本架构。

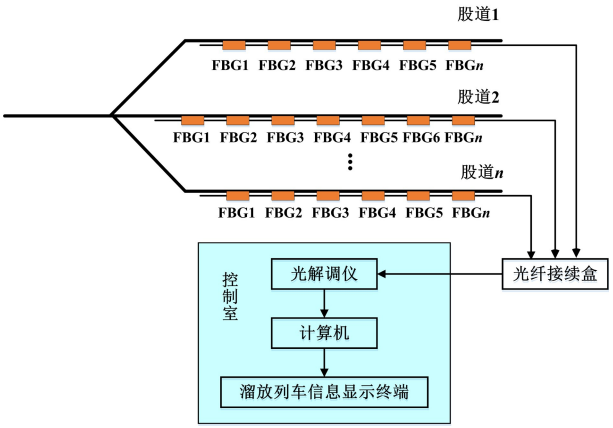


图 7　驼峰溜放监测系统架构

当溜放车组行驶在传感区域时，车轮对轨道产生的应变使得光栅阵列传感器的中心波长发生偏移，光栅阵列信号解调仪器实现对波长信号的解调，并将解调后的信息输送到处理单元，经过解算后由 PC 机输出溜放车组的实时行车信息。通过计算单位时间内传感器波长峰值出现的个数可以获得溜放车组的轮轴信息；通过标定波长变化值与轮轴载重信息可以推断溜放车组荷载；通过获得溜放车组车轮依次经过相邻两个传感器的间隔时间可以获取当前的车速。

3.3　传感器安装

如图 8 所示，将传感光纤沿轨道一侧依次进行敷设及安装，确保相邻两个轨枕缝之间均安装 1 只传感器，相邻传感器之间的传输光纤采用铠装护套进行保护，以确保传输部分的长期可靠性。此次敷设传感光纤长度约 200 m，共计 150 只传感器。

(a)　沿轨道安装　　(b)　局部细节

图 8　传感器敷设与安装场景照片

在分岔口后的多条溜放股道上分别按照图 8 所

示铺设传感光纤，多条股道的传感光纤汇聚到光纤接续盒后，再通过传输光缆连接到位于控制室内的解调仪。

3.4 实验分析

随机选取 10 只连续分布的光栅阵列传感器 FBG11～20 进行数据分析，将列车经过以上 10 只传感器前、后的所有中心波长变化数据列于表 1。

表 1 10 只连续 FBG 中心波长值(单位:nm)

FBGn	λ_0	λ_1	$\Delta\lambda$
11	1 553.461	1 553.236	0.225
12	1 551.770	1 551.542	0.228
13	1 553.617	1 553.421	0.196
14	1 551.610	1 551.415	0.195
15	1 553.321	1 553.109	0.212
16	1 551.599	1 551.386	0.213
17	1 553.504	1 553.311	0.193
18	1 551.208	1 551.017	0.191
19	1 553.293	1 553.159	0.234
20	1 551.463	1 551.256	0.207

其中，λ_0 为静态未受力时 FBG11～20 传感器的中心波长值，λ_1 为列车车轮位于传感器正上方时 FBG11～20 传感器的中心波长值，$\Delta\lambda$ 为 λ_0 与 λ_1 的差值。由此可以看出，列车经过时，每个 FBG 传感器都能很好地响应，且灵敏度较高。

任意选择一只传感器和一组传感器对列车前、后轮依次经过时的传感器波长变化情况进行分析，如图 9 和 10 所示。

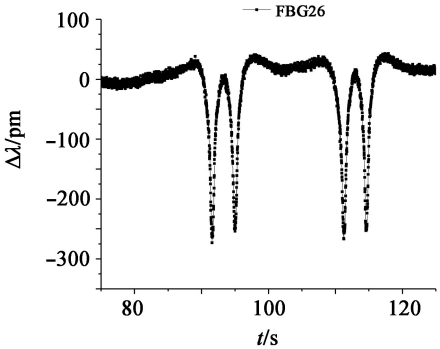


图 9 列车轮轴计数波形图

从图 9 可以看出，传感器感知车轮经过时的现象十分明显，由于是单轨敷设传感光纤，故只有 4 个峰值，且一致性较好，具备计轴功能。由于平板车载重 18 t，共有 8 个轮子，即单轴重 2.25 t，对应传感器波长变化最大值为 200 pm 左右，通过精确标定即可获得溜放车组荷载；结合轮轴间距(1.7 m)与传感器峰值时间间隔(4 s)，就能获知此时列车推行速度为 0.44 m/s。

从图 10 可以看出，随着车轮的移动，相邻传感器的中心波长依次发生变化，当车轮位于某一只传感器正上方时，该传感器波长变化值达到最大，其相邻的传感器中心波长变化相对较小。根据相邻传感器的波长变化和时序就能判断出列车的行进方向。

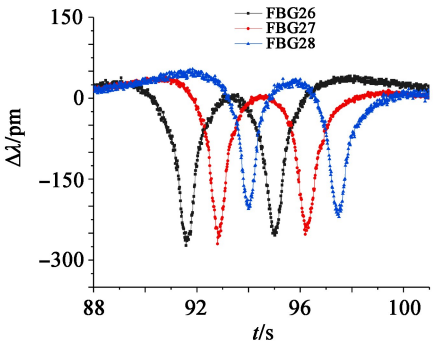


图 10 列车运行方向波形图

将所有传感器在不同时刻 t、不同位置 n 和中心波长的变化值绘制成瀑布图，如图 11 所示。每个传感器中心波长变化值 $\Delta\lambda$ 与时间的曲线均包含四个峰值，分别对应列车单侧 4 个车轮的轮轴信息。随着列车的行进，4 个波峰随时间依次向后面的传感器进行传递，由此可得到列车的运行轨迹，因此根据轮轴信息可以对列车进行精准定位。

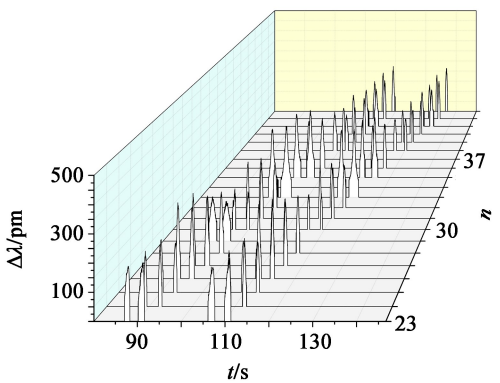


图 11 传感器感知列车运行瀑布图

从图 11 可以看出，溜放车组运行至任意位置，都有对应区域的 FBG 传感器对其响应，从而可以实现监测区域的全覆盖。

3.5 实验小结

通过以上实验现象可以看出：光栅阵列传感器具有可靠性高、重复性好、灵敏度高等优点。通过对单只传感器的受力进行分析，可以清晰地分辨出列车的轮轴信息，由此可知该传感器具备测速功能；通过对单只传感器的受力进行精确标定，可较为准确

地获取溜放车组的荷载，由此可知该传感器具备称重功能；通过对相邻传感器组的受力大小和时序进行分析，可对列车行进方向进行准确判断。

4　结论

本文针对传统的驼峰溜放监测技术存在的易受电磁干扰、无法精准定位、无法实现编组站全覆盖监测以及无法同时监测溜放车组多个物理量信息的问题，提出了一种基于大容量光栅阵列应变传感技术的驼峰溜放监测方法，对该方法进行了理论分析和推导，并通过现场实验验证了该方法的可行性。

与传统方法相比，大容量光栅阵列应变传感技术用于驼峰溜放监测具有以下几点优势：(1)采用全光进行通信，不受沿线电磁干扰，稳定性好，可靠性高；(2)该方法是一种连续式的监测手段，可实现监测区域的全覆盖，未来有望大大提高驼峰溜放的高效性和安全性；(3)该方法能较全面地反映溜放车组的行车信息，可同时监测车组的轮轴、车速和载重信息；(4)基于波分和时分的混合复用方法可以大大提高光栅阵列传感器的复用数量，为大容量、长距离的监测需求奠定良好基础，能很好地满足各型编组站对多条溜放股道同时进行监测的要求。

在驼峰溜放监测过程中，轨道占用检测空间分辨率取决于阵列光栅应变传感器的分布密度，本实验所能达到的空间分辨率为相邻两轨枕之间的距离，即 60 cm；对于目前铁路上最轻的平板车，传感器的灵敏度可以达到 200 pm 以上。所设计的阵列传感光纤具有良好的可靠性和可重复性，证明该系统具有较好的工程应用可行性。

参考文献：

[1] Levine B, Lu A, Reddy A. Measurement of subway service performance at New York city transit: Case study with automated train supervision track-occupancy data [J]. Transportation Research Record: J. of the Transportation Research Board, 2013, 2353(1): 57-68.

[2] Chang M, Dong W, Ji Y. A distributed approach for track occupancy detection[J]. Control Engin. Practice, 2014, 22(1): 69-80.

[3] Tong W, Liu Y, Jin X, et al. Analysis to space location between excitation coil and induction coil of unilateral axle counting sensor[C]// Proc. 2015 Fifth Inter. Conf. on IEEE Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2015: 1951-1954.

[4] Peng F, Duan N, Rao Y J, et al. Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014, 26(20): 2055-2057.

[5] Rodriguez L, Pinedo C, Lopez I, et al. Eurobalise-Train communication modelling to assess interferences in railway control signalling systems [J]. Network Protocols and Algorithms, 2016, 8(1): 58-72.

[6] Dou F, Dai C. Filtering algorithm and direction identification in relative position estimation based on induction loop-cable [J]. J. of Central South University, 2016, 23(1): 112-121.

[7] Li L, Wang J, Zhang Z, et al. Radiation characteristics of rectangular leaky waveguide under high speed railway environments[C]// Proc. 2011 IEEE 4th Inter. Symp. on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE), 2011: 493-497.

[8] Acharya A, Sadhu S, Ghoshal T K. Train localization and parting detection using data fusion [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2011, 19(1): 75-84.

[9] Tam H Y. World's first city-wide fiber Bragg grating sensing network for railway monitoring[C]// IEEE Conf. on Optical Fibre Technology, 2014: 1056-1057.

[10] Majumder M, Gangopadhyay T K, Chakraborty A K, et al. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring-present status and applications [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147(1): 150-164.

[11] Yi Kuang, Guo Yongxing, Li Xiong, et al. Packaging and temperature compensation of fiber Bragg grating for strain sensing: A survey[J]. Photonic Sensors, 2018, 8(4): 320-331.

[12] Luo Zhihui, Wen Hongqiao, Guo Huiyong, et al. A time- and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. Opt. Express, 2013, 21(19): 22799-22807.

[13] G Xin, L Zhengying, W Fan, et al. Distributed sensing technology of high-spatial resolution based on dense ultra-short FBG array with large multiplexing capacity[J]. Opt. Express, 2017, 25(23): 28112-28122.

作者简介：

甘维兵(1978—)，男，湖北省武汉市人，博士，副研究员，主要从事光纤传感技术及应用方面的研究工作；

艾凌云(1995—)，男，湖北省黄冈市人，硕士研究生，主要从事光纤传感方面的研究工作。

光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.023

基于 ROI 的高精度红外全景拼接算法研究

代少升*，姚　俐

（重庆邮电大学 通信与信息工程学院，重庆 400065）

摘　要： 针对红外图像空间分辨率低、视场窄，导致图像配准率低、实时性差的问题，提出一种基于感兴趣区域(ROI)的高精度红外全景拼接算法。该算法首先根据两张相邻图像的近似位置关系，求取图像间的 ROI；接着，在 ROI 窗口中提取尺度不变特征变换(SIFT)特征点并将其作为运动目标，结合 KLT(Kanade-Lucas-Tomasi)实时跟踪算法确定待配准图像中特征点的位置信息并进行匹配；然后采用随机采样一致性(RANSAC)算法剔除误匹配点对；最后利用像素级融合法消除拼接痕迹，合成一幅分辨率稳定、视场宽的红外全景图像。经实验验证，该算法与传统 SIFT 算法相比，配准率提高了 3.491%，运行时间约提高了 50%，能够准确、有效地实现多帧红外图像的无缝拼接。

关键词： 红外全景图像；图像配准；ROI；KLT 算法；图像融合

中图分类号： TP751　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0572－06

Research on The method of Infrared Panoramic Image Mosaic Based on ROI

DAI Shaosheng，YAO Li

（College of Communication and Information Engineering，Chongqing University of Posts and Telecommunications，Chongqing 400065，CHN）

Abstract： Aiming at the problems of low spatial resolution and narrow field of view of infrared images，which leads to low image registration rate and poor real-time performance，an infrared panoramic mosaic algorithm based on the region of interest (ROI) of image is proposed. The method is built to run as follows：firstly，the ROI of the two adjacent infrared images is calculated according to their position relationship. Then，the SIFT feature points are extracted in the ROI and used as moving targets，thus the feature points in the infrared image to be registered are determined by combining the KLT tracking algorithm. Secondly，the RANSAC algorithm is used to eliminate mismatches. Finally，the pixel level fusion method is used to eliminate the stitching traces and an infrared panoramic image with stable resolution and wide field of view is synthesized. The experimental results show that compared with the traditional SIFT algorithm，the registration rate and the running time of the proposed algorithm is improved by 3.491% and nearly 50%，respectively，which can realize the seamless splicing of multi-frame infrared images accurately and effectively.

Key words： infrared panoramic image；image registration；ROI；KLT algorithm；image fusion

0　引言

红外成像技术因具有穿透烟雾、抗干扰以及良好的伪装识别能力，能够在恶劣环境下全天候工作，因此，它被应用于夜视侦查、导航、安防监控、医学图像合成等各个领域。但对于需要红外图像分辨率高、视场宽的应用场景，目前大多数红外成像设备无法达到要求，需要借助图像拼接软件完成。现有的

收稿日期：2020－03－21.

基金项目： 国家自然科学基金项目(61671094).

* **通信作者：**代少升　**E-mail：** daiss@cqupt.edu.cn

图像拼接方法主要有三种：基于灰度信息的方法、基于频域相关的方法以及基于特征相关的方法。其中，基于特征相关的图像拼接方法因具有良好的鲁棒性而受到广泛关注，比较成熟的点特征算子有：Harris，SIFT，SURF，FAST 等[1]。SIFT，即尺度不变特征变换算法，是由 Lowe 在 1999 年提出并在 2004 年对其进行完善的，该方法最后生成的局部特征算子不仅在图像的旋转、尺度缩放等方面具有很好的鲁棒性，而且能够对噪声干扰、亮度及视角变化等保持较好的稳定性[2-3]。在图像拼接应用中，李玉峰等[4]提出了一种基于区域分块与 SIFT 相结合的图像拼接算法，提高了图像拼接速度。章雷等[5]提出了一种基于 SIFT 特征点构建近邻图结构和增加向量相似度约束条件的图像匹配方法，根据相关系数进行匹配点的筛选，完成精确匹配。祁曦[6]将 Harris 与 SIFT 特征点相结合，利用 K-means 聚类算法对特征点进行分类、画区域，通过在区域内构建三角网的方式完成精配准，该方法有效提高了配准精度和拼接效率。

上述研究大多数是针对可见光图像的拼接。由于成像方式不同，红外图像相较于可见光图像具有分辨率低、灰度范围窄、信噪比低等缺点[7]。因此，对于红外图像拼接，传统的 SIFT 算法存在以下三个问题：红外图像误匹配点多；算法计算复杂，实时性差；由于拍摄角度、亮度等不同，拼接后的红外图像易出现拼接缝隙。为了解决上述问题，本文提出一种基于 ROI 的高精度红外全景拼接方法：首先根据相邻两张红外图像的近似位置关系求得图像间的 ROI 窗口；然后在 ROI 中提取第一张图像的 SIFT 特征点并将其作为运动目标，使用 KLT 光流追踪算法进行追踪匹配；最后使用像素级融合法消除拼接痕迹。

1　传统 SIFT 图像拼接方法

红外全景图像拼接技术主要包括图像采集、图像配准、图像融合 3 个步骤。基于点特征的图像配准包含特征点检测和特征匹配两个过程，图像配准是图像拼接过程中最重要的一步，直接决定图像拼接质量的好坏。传统 SIFT 图像配准流程如图 1 所示。

SIFT 特征点检测步骤如下：

(1)构造高斯尺度空间。将 $L(x,y,\sigma)$ 定义为 1 个图像的尺度空间，可以表示为原图像 $I(x,y)$ 与高斯滤波函数 $G(x,y,\sigma)$ 的卷积[8-9]，计算公式为

$$L(x,y,\sigma)=G(x,y,\sigma)\otimes I(x,y) \tag{1}$$

$$G(x,y,\sigma)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{\frac{(x-m/2)^2+(y-n/2)^2}{2\sigma^2}} \tag{2}$$

式中，σ 是尺度空间的尺度大小，决定图像的模糊程度，m 和 n 是高斯模板的维度，$\otimes$ 表示卷积运算。

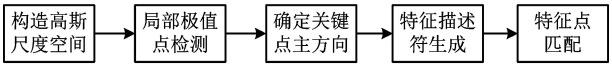
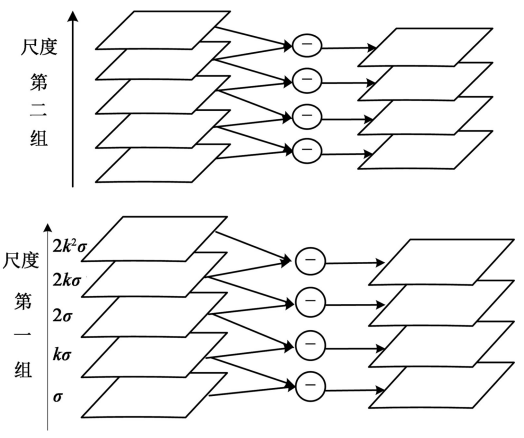


图 1　SIFT 图像配准流程图

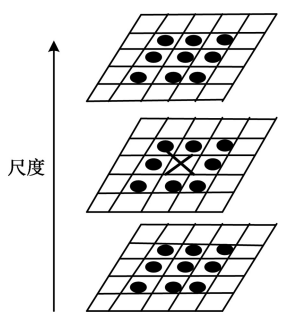
(2)局部极值点检测。在同一组尺度空间中，将相邻两层图像作高斯差分之后再与原图像进行卷积得到高斯差分尺度空间(Difference of Gaussian，DOG)，用 $D(x,y,\sigma)$ 表示。高斯金字塔尺度空间构建如图 2(a)所示，其具体计算公式为

$$D(x,y,\sigma)=(G(x,y,k\sigma)-G(x,y,\sigma))\otimes I(x,y)=L(x,y,k\sigma)-L(x,y,\sigma) \tag{3}$$

如图 2(b)所示，将 DOG 中每一个极值点与同层 8 个相邻点以及上下相邻两层对应的 $9\times2=18$ 个点进行比较，满足大于(或小于)26 个像元且在原图像 $I(x,y)$ 和 DOG 上都是极值点的才确定该点为稳定的特征点[10-11]。



(a)　尺度金字塔构建示意图



(b)　极值点比较示意图

图 2　高斯金字塔尺度空间构建及极值点比较示意图

(3)确定关键点主方向。通过计算特征点梯度与梯度直方图,使得特征描述向量在主方向上具有旋转不变性[12]。DOG 金字塔中关键点的梯度模值 $m(x,y)$与梯度方向 $\boldsymbol{\theta}$ 计算公式为

$$m(x,y)=\sqrt{(L(x+1,y)-L(x-1,y))^2+(L(x,y+1)-L(x,y-1))^2} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{\theta}(x,y)=\tan^{-1}\left(\frac{L(x,y+1)-L(x,y-1)}{L(x+1,y)-L(x-1,y)}\right) \tag{5}$$

式中,$L(x,y)$为特征点的尺度空间值。

(4)特征描述符生成。以特征点为中心,选取 8×8=64 的窗口,将子窗口再分割成 4×4=16 个,计算这 16 个小块上的 8 个方向向量,得到一个特征点为 16×8=128 维的特征描述符。具体生成过程如图 3 所示,其中小格子和箭头长度分别代表梯度方向和梯度幅值。

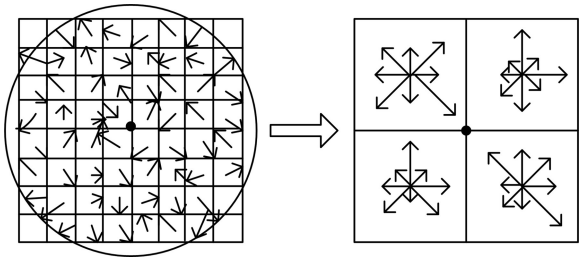
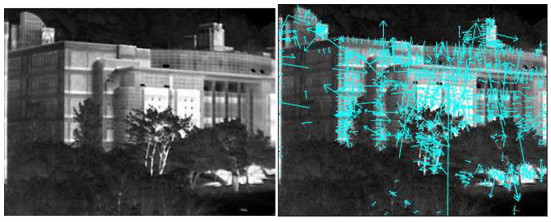


图 3 生成 SIFT 描述符

至此,每个特征点信息可以用$(x,y,\sigma,\boldsymbol{\theta})$表示,即$(x,y)$表示位置,$\sigma$ 表示尺度,$\boldsymbol{\theta}$ 表示主方向。SIFT 特征点的提取结果如图 4 所示。



(a) 原始红外图像 (b) SIFT 特征点提取结果

图 4 SIFT 特征点提取

2 基于 ROI 的高精度图像配准算法

针对红外图像配准存在误匹配点对较多、算法复杂度高、实时性差的问题,本文对 SIFT 算法进行改进,以提高配准精度和算法效率。

2.1 基于 ROI 改进的 SIFT 图像配准方法

2.1.1 确定感兴趣区域

设 $h_1(x,y)$和 $h_2(x,y)$为两张相邻待拼接的红外图像,重叠区域即为 ROI,如图 5 所示,用四边形 $PMNQ$ 来表示。

两张图像的 ROI 窗口用 3×3 的矩阵 $\boldsymbol{W}$ 来计算:

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix} w_0 & w_1 & w_2 \\ w_3 & w_4 & w_5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中,图像的旋转变换表现为 w_0,w_1 两个参数;图像的缩放变换表现为 w_3,w_4 两个参数;x 轴向的平移用 w_2 参数来表示,y 轴向的平移用 w_5 参数来表示。用 A,B,C,D 表示 h_1 的 4 个顶点,H,I,J,K 表示 h_2 的 4 个顶点。计算 ROI 的流程如下:

(1)根据矩阵 $\boldsymbol{W}$ 计算 H,I,J,K 4 个点的坐标;

(2)由各个点的坐标求得 4 个直线方程,即 HJ,JD,AB,BD;

(3)得到 HJ 与 AB 的交点坐标 P,AB 与 BD 的交点坐标 Q,JD 与 HJ 的交点坐标 M 及 JD 与

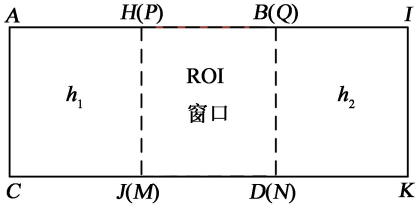


图 5 两张待拼接图像的近似位置关系

(a) 待拼接左图

(b) 待拼接右图

(c) ROI 窗口

图 6 两组待拼接图像的 ROI 窗口

BD 的交点坐标 N；

(4)感兴趣区域(ROI)为四边形 $PMNQ$。

图 6 中(a),(b)是两组相邻的待拼接红外图像，(c)中矩形框表示两张图像的 ROI 窗口。

2.1.2　SIFT 与 KLT 结合的特征点实时配准算法

确定好 ROI 后，使用 SIFT 算法在该窗口提取的特征点包含三个信息：坐标(x,y)、所在尺度 σ、方向 θ。在本文中，σ 设为 1，金字塔层数为 4。将 $h_1(x,y)$检测到的特征点 $S_i(i=0,1,2,3,\cdots,n)$ 作为运动目标，结合 KLT[13] 实时追踪算法寻找 $h_2(x,y)$中特征点 $S'_i(i=0,1,2,3,\cdots,n)$ 的位置进行匹配。KLT 常用来实时跟踪同一背景下的运动物体，精度非常高，而 ROI 可以看作是红外图像序列间的同一背景。SIFT 与 KLT 结合的特征点实时配准算法流程如下：

(1)假设特征点 S_i 出现在相邻两张待拼接的红外图像 $h_1(x,y)$和 $h_2(x,y)$中，那么在 ROI 中存在极小的灰度平方差 φ，表示为

$$\varphi=\iint_{\mathrm{ROI}}[h_2(\boldsymbol{X})-h_1(\boldsymbol{X}-\boldsymbol{D})]^2 w(\boldsymbol{X})\mathrm{d}\boldsymbol{X} \tag{7}$$

式中，特征点 S_i 的坐标 $\boldsymbol{X}=(x,y)^{\mathrm{T}}$，偏移量 $\boldsymbol{D}=[d_x,d_y]^{\mathrm{T}}$，加权函数 $w(\boldsymbol{X})=1$。不妨将式(7)中的 $[h_2(\boldsymbol{X})-h_1(\boldsymbol{X}-\boldsymbol{D})]$ 转换成对称形式，可得：

$$\varphi=\iint_{\mathrm{ROI}}\left[h_2\left(\boldsymbol{X}+\frac{\boldsymbol{D}}{2}\right)-h_1\left(\boldsymbol{X}-\frac{\boldsymbol{D}}{2}\right)\right]^2 w(\boldsymbol{X})\mathrm{d}\boldsymbol{X} \tag{8}$$

(2)为了得到正确匹配点，要使 φ 值最小，因此对式(8)进行微分并在满足 $\varphi'=0$ 时求得极小值。由于偏移量 $\boldsymbol{D}\ll\boldsymbol{X}$，可以对 $h_2\left(\boldsymbol{X}+\frac{\boldsymbol{D}}{2}\right)$ 和 $h_1\left(\boldsymbol{X}-\frac{\boldsymbol{D}}{2}\right)$ 进行泰勒级数展开并保留前两项，可得式(9)：

$$\begin{cases}h_2\left(\boldsymbol{X}+\dfrac{\boldsymbol{D}}{2}\right)\approx h_2(\boldsymbol{X})+\dfrac{d_x}{2}\dfrac{\partial h_2(\boldsymbol{X})}{\partial x}+\dfrac{d_y}{2}\dfrac{\partial h_2(\boldsymbol{X})}{\partial y}\\ h_1\left(\boldsymbol{X}-\dfrac{\boldsymbol{D}}{2}\right)\approx h_1(\boldsymbol{X})-\dfrac{d_x}{2}\dfrac{\partial h_1(\boldsymbol{X})}{\partial x}-\dfrac{d_y}{2}\dfrac{\partial h_1(\boldsymbol{X})}{\partial y}\end{cases} \tag{9}$$

于是有：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial h_2\left(\boldsymbol{X}+\frac{\boldsymbol{D}}{2}\right)}{\partial\boldsymbol{X}}\approx\dfrac{1}{2}\dfrac{\partial h_2(\boldsymbol{X})}{\partial x}+\dfrac{1}{2}\dfrac{\partial h_2(\boldsymbol{X})}{\partial y}\\ \dfrac{\partial h_1\left(\boldsymbol{X}-\frac{\boldsymbol{D}}{2}\right)}{\partial\boldsymbol{X}}\approx\dfrac{1}{2}\dfrac{\partial h_1(\boldsymbol{X})}{\partial x}-\dfrac{1}{2}\dfrac{\partial h_1(\boldsymbol{X})}{\partial y}\end{cases} \tag{10}$$

将式(10)代入到 $\varphi'=0$ 中，可得：

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\boldsymbol{X}}\approx\iint_{\mathrm{ROI}}[h_2(\boldsymbol{X})-h_1(\boldsymbol{X})+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}]\cdot\boldsymbol{A}(\boldsymbol{X})w(\boldsymbol{X})\mathrm{d}\boldsymbol{X} \tag{11}$$

式中，$\boldsymbol{A}=\left[\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{h_1+h_2}{2}\right),\dfrac{\partial}{\partial y}\left(\dfrac{h_1+h_2}{2}\right)\right]^{\mathrm{T}}$。

(3)为了得到偏移量 $\boldsymbol{D}$，需要对 $\boldsymbol{D}$ 进行微分，将式(8)作微分且满足 $\dfrac{\partial\varphi}{\partial\boldsymbol{D}}=0$，化简可得：

$$\boldsymbol{H}\boldsymbol{D}=\boldsymbol{\varepsilon} \tag{12}$$

式中，$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}a_x^2 & a_xa_y\\ a_xa_y & a_y^2\end{bmatrix}$ 是一个二阶矩阵，$\boldsymbol{\varepsilon}$ 是一个向量，表示残差。

(4)将 $h_1(x,y)$上的特征点 S_i 利用式(8)牛顿迭代法求解 $h_2(x,y)$的最优匹配特征点 S'_i，最终解如式(13)：

$$d_{n+1}=d_n+\begin{bmatrix}a_x^2 & a_xa_y\\ a_xa_y & a_y^2\end{bmatrix}^{-1}\cdot\left[\iint_{\mathrm{ROI}}[h_2(\boldsymbol{X})-h_1(\boldsymbol{X})]\begin{bmatrix}a_x\\ a_y\end{bmatrix}w(\boldsymbol{X})\mathrm{d}\boldsymbol{X}\right] \tag{13}$$

式中，d 表示 ROI 中心的平移，d_n 表示第 n 次经过牛顿迭代法所得到的 d 值，迭代计算 d 值需要设置初始迭代值，本文设置 d_0 为 0。

本文将改进后的 SIFT 实时匹配算法作为第一次匹配，但由于红外图像模糊、对比度低，难免会产生错误匹配对。因此本文在精匹配阶段使用随机采样一致性 RANSAC 算法进行过滤筛选，剔除潜在错误匹配对。综上所述，基于 ROI 的高精度红外全景图像拼接算法流程如图 7 所示。

2.2　红外全景图像融合的实现

拍摄过程由于受到光照、拍摄视角等影响，会产生图 8(a)所示的拼接痕迹，因此本文采用像素级融合方法中的渐入渐出法得到图 8(b)所示的红外拼接图。该算法的复杂度不高，可以满足实时性要求。$R(x,y)$为融合后的图像，融合公式为

$$R(x,y)=\begin{cases}h_1(x,y), & (x,y)\in h_1\\ t_1h_1(x,y)+t_2h_2(x,y), & (x,y)\in(h_1\cap h_2)\\ h_2(x,y), & (x,y)\in h_2\end{cases} \tag{14}$$

式中，系数 t_1 和 t_2 是两张红外图像的权重，取值范围在(0,1)，同时满足 $t_1+t_2=1$ 的限定条件。另外，权值 t_i 的大小由重叠区域的宽度 k 决定，即 $t_1=$

$(k-i)/k, i \in [0,k]$。

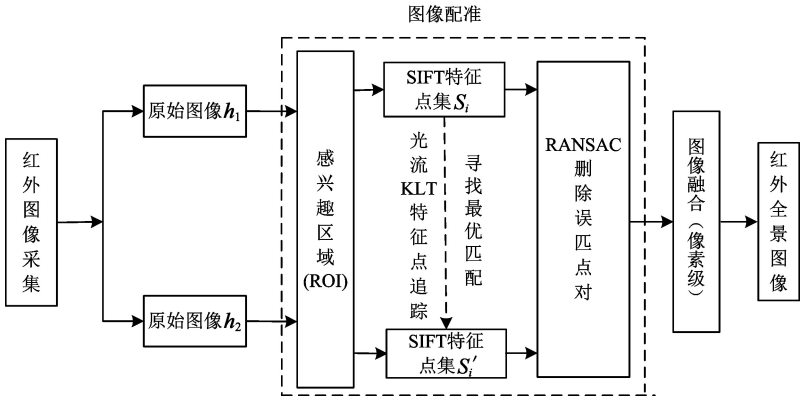


图 7 基于 ROI 的高精度红外全景图像拼接算法流程图

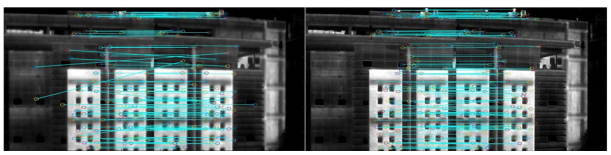
(a) 未融合的拼接图 (b) 渐入渐出法融合结果图

图 8 融合前、后对比图

3 实验仿真与结果分析

为了验证本文算法的可行性，实验仿真基于 64 位 Win10 操作系统，CPU 为 2.70 GHz 的 AMD 处理器，内存为 4 GB 的 PC 机平台，实验编程环境为 MATLAB-R2018b。本文利用实验室现有的非致冷型微测热辐射计红外探测器采集图像，探测器的分辨率为 668×464，频率为 50 Hz，响应波段为 8～14 μm。采集图像的方式：将红外成像仪的底座固定，通过旋转热像仪的方式采集红外图像序列(8～12 张)，且重叠区域在 40%～50%，拍摄场地分为室内和室外。本文利用三组红外图像分别对传统 SIFT 配准算法与本文算法进行验证，配准结果如图 9 所示。

(a1) 传统 SIFT 配准算法 (b1) 本文算法



(a2) 传统 SIFT 配准算法 (b2) 本文算法

(a3) 传统 SIFT 配准算法 (b3) 本文算法

图 9 传统 SIFT 算法与本文算法图像配准对比图

由图 9 可知，传统 SIFT 算法是在整幅图像中搜索特征点进行匹配，且匹配点对多集中在边缘以及亮度高的地方，容易产生误匹配对；而本文算法所检测的特征点都在 ROI 窗口中，且匹配点对分布较为均匀，在一定程度上降低了误匹配率。

本文以配准率 P_r 和运行时间 T 两个指标作为评价标准。P_s 表示总匹配点对，P_c 表示正确匹配点对，ΔP_r 表示本文算法与 SIFT 算法配准率之差，将 P_r 定义为

$$P_r = \frac{P_c}{P_s} \times 100\% \tag{15}$$

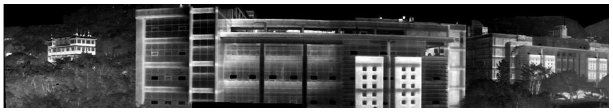
由表 1 实验数据可知，相较于传统算法，本文算法的配准率平均提高了 3.491%；在 ROI 中检测特征点可以减少传统 SIFT 大量的无用搜索，运行效率约提高 50%。由此可见，在使用相同样本的情况下，本文算法不仅提高了图像配准的精确度，而且大大改善了拼接算法的效率。

曝光差异和对比度的不同会导致拼接痕迹的问题，因此使用渐入渐出融合算法对配准后的红外图像进行融合，得到如图 10 所示的全景拼接图。这种方法不仅能有效消除拼接痕迹，符合人眼视觉特性要求，而且实时性较高。

表 1　三组红外图像配准实验数据分析

红外图像	算法	特征点数量/个	P_s/对	P_c/对	P_r/%	T/s	ΔP_r/%
实验一	SIFT	198/113	50	46	92	3.018	3.349
	本文算法	109/68	43	41	95.349	3.018	
实验二	SIFT	281/369	138	127	92.029	4.646	3.775
	本文算法	146/198	121	116	95.804	2.411	
实验三	SIFT	503/588	133	122	91.729	4.819	3.942
	本文算法	262/297	119	107	96.423	2.435	

(a)　室内图



(b)　室外图

图 10　红外全景拼接图

4　结论

全景图像拼接技术可以解决传统红外成像设备无法兼顾分辨率和视场规模的问题，被广泛应用于民事和军事领域。经实验测试，本文提出的基于 ROI 的高精度红外图像拼接算法，与传统 SIFT 图像拼接算法相比，能够高效、准确地完成多帧红外图像的无缝拼接。该算法适用于需要宽视场、高分辨率的监控应用场景。

参考文献：

[1] Karami E, Prasad S, Shehata M. Image matching using SIFT, SURF, BRIEF and ORB: performance comparison for distorted images [C]// Proc. of the 2015 Newfoundland Electrical and Computer Engin. Conf., 2015.

[2] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. Inter. J. Comp. Vision, 2004, 60(2): 91-110.

[3] 苏培峰，黄世奇，王艺婷，等. 具有 SIFT 描述的多尺度图像配准[J]. 计算机工程与科学，2017，39(9)：1700-1705.
Su P F, Huang S Q, Wang Y T, et al. Multi-scale image registration with SIFT description[J]. Computer Engineering and Science, 2017,39(9): 1700-1705.

[4] 李玉峰，李广泽. 基于区域分块与尺度不变特征变换的图像拼接算法[J]. 光学精密工程，2016，24(5)：1197-1205.
Li Y F, Li G Z. Image mosaic algorithm based on regional block and scale invariant feature transformation [J]. Optical Precision Engin., 2016, 24(5): 1197-1205.

[5] 章　雷. 基于改进的 SIFT 特征的图像匹配算法研究[D]. 淮南：安徽理工大学，2019.
Zhang L. Research on image matching algorithm based on improved SIFT features [D]. Huainan: Anhui University of Technology, 2019.

[6] 祁　曦. 基于改进 SIFT 和改进 K-means 的遥感图像配准算法[D]. 上海：华东师范大学，2018.
Qi X. Remote sensing image registration algorithm based on improved SIFT and improved K-means [D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.

[7] Dai S, Liu J, Xiang H, et al. Super-resolution reconstruction of images based on uncontrollable micro-scanning and genetic algorithm[J]. Optoelectron. Lett., 2014, 10(4): 313-316.

[8] 张少坤. 全景图像拼接关键技术研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2018.
Zhang S K. Research on key technologies of panoramic image stitching [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.

[9] 陈　月. 基于 SIFT 特征检测与匹配的快速图像拼接方法研究[D]. 长春：吉林大学，2017.
Chen Y. Research on fast image stitching based on SIFT feature detection and matching [D]. Changchun: Jilin University, 2017.

[10] 何亚黎，袁　义. 全景图像拼接关键技术研究[J]. 信息化建设，2016(3)：357.
He Y L, Yuan Yi. Research on key techniques of panoramic image mosaic[J]. Information Construction, 2016(3): 357.

[11] 周佳欣，徐梦云，刘建全. 基于改进的 SIFT 算法的图像配准方法[J]. 工业控制计算机，2019，32(5)：97-98，101.
Zhou J X, Xu M Y, Liu J Q. Image registration method based on improved SIFT algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2019, 32(5): 97-98, 101.

[12] 林文彬. 基于多角度的蛇果图像匹配算法研究[D]. 杭州：浙江大学，2014.
Lin W B. Research on snake fruit image matching algorithm based on multi-angle[D]. Hangzhou: Zhejiang Univ., 2014.

[13] Tomasi C, Kanade T. Detection and tracking of point features[R]. Tech Rep CMU-CS-91-132, Carnegie Mellon University, 1991.

作者简介：

代少升(1974—)，男，博士，教授，主要从事红外成像系统及 SOPC 嵌入式系统设计与开发。

光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.024

面向自动化装配过程的光纤传感调校系统

孟祥秋[1*]，于金召[2]，王　杰[1]

（1. 吉林建筑科技学院，长春 130000；2. 吉林东光精密机械厂，长春 130000）

摘　要： 为了减小装配误差，解决自动装配过程中强迫装配、装配不到位等问题，设计了基于光纤传感的调校系统。该系统由光纤传感阵列、解调模块、调校控制机构组成。提出了应变分布解算模型，推导了波长与位置偏差的函数关系，仿真分析了工件应变敏感区域的分布特征，量化了应变与位置误差的映射关系。实验采用可调施力结构对系统应变监测量进行标定，采用视觉测量对系统位置偏差量进行标定。实验结果显示，位置偏差与波长变化呈线性映射关系，验证了依据波长反演装配位置偏差的可行性。与视觉测量的标准值相比，该系统的位置偏差平均相对误差为8.6%。由此可见，该系统具有实时、精确反演工件应变场的计算能力，在自动化装配中具有很好的应用前景。

关键词： 光纤传感；装配调节；自动化；位置偏差

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0578－04

Optical Fiber Sensor Adjustment System for Automated Assembly Process

MENG Xiangqiu[1]，YU Jinzhao[2]，WANG Jie[1]

（1. Jilin University of Architecture and Technology，Changchun 130000，CHN；
2. Jilin Dongguang Precision Mechanism Factory，Changchun 130000，CHN）

Abstract： In order to reduce assembly errors and solve problems such as forced assembly and incomplete assembly during the automatic assembly process，the optical fiber sensing calibration system was designed. The system consists of a fiber-optic sensor array，a demodulation module，and a tuning control mechanism. A solution model for strain distribution was proposed，and the function relationship between wavelength and position deviation was deduced. The distribution characteristics of the strain sensitive area of the workpiece were analyzed by simulation，and the mapping relationship between strain and position error was quantified. In the experiment，adjustable force structure was used to calibrate the system strain monitoring data，and visual measurement was used to calibrate the system position deviation. The experimental results show that the position deviation has a linear mapping relationship with the wavelength change. It is feasible to invert the deviation of the assembly position by the wavelength. Compared with the standard value of visual measurement，the average relative error of the position deviation of the system is 8.6%. The strain field of the workpiece can be inverted by this system in real time.

Key words： fiber optic sensing；assembly adjustment；automation；position deviation

收稿日期：2020－04－18.

基金项目：国家自然科学基金项目(61703056)；吉林省高等教育学会项目(JGJX2019D500).

* **通信作者：**孟祥秋

E-mail： mengxiangqiunuc@sina.com

0　引言

随着《中国制造 2025》的提出，制造业的工业化和现代化成为近几年重要的发展方向[1]，其中，自动化装配技术是制造业迈向自动化、数字化、智能化的关键环节。自动化装配技术需要装配工件具有很好的参数采集与数据实时处理能力，才能保证装配速度快、稳定性好，实现生产线的高效工作[2]。装配过程中的装配错位、强迫装配、装配不足等问题[3]都可以通过对装配工件应变场分布的分析获得，故研究精确、快速获取装配工件应变场参数的传感网络对自动化装配过程的精确反馈控制具有重要意义。

在传统的模具类产品生产流水线上，只需要利用程序完成机械臂的路径规划就能够对固定工位上的工件进行安装，从而形成自动化装配[4]。但这样的工艺适用范围越来越局限，一是随着产品结构的复杂度增加，每个工件尺寸误差的累计会导致装配出错率大幅上升；二是对于大尺寸工件、复杂面形工件而言，固定路径不足以完成装配，必须借助装配调校系统。

应用于装配调校系统的技术有：光学测量法[5-6]、图像处理法[7-8]、传感器反馈法[9-10]。光学测量法利用激光测距等原理实现标准点之间的精密测量，从而根据基准点之间的空间位置调整装配角度及距离。该方法精度高、速度快，但需要待装工件为合作目标，且具有基准点，否则通过扫描完成工件外形及位置的操作会出现数据量巨大、工作效率低等问题，不适合大规模工业生产[11]。图像处理法与光学测量法类似，通过采集装配位置图像提供调校数据，无需基准点，具有更好的通用性，但受工装位置开敞性影响较大，并且辅助装配精度低[12]。传感器反馈法是利用电学、光学等传感器采集装配工装、工件的应变场提供数据反馈来实现指导装配的[13]。相比电学器件，光纤传感具有无源、抗干扰能力强、可大范围多点监测、体积可忽略等诸多优势，故本文研究了一种面向自动化装配的光纤传感调校系统。

1　系统设计

1.1　系统组成

光纤传感调校系统由可调谐激光器、光纤耦合器、解调仪、光纤光栅等组成，系统结构如图 1 所示。调制光源对入射光纤的光进行扫频，入射光经光纤耦合器进入光纤传感网络中，然后到达应变感知模块，即光纤光栅（Fiber Bragg Grating[14-15]，FBG）位置，将对应位置上的应变信息加载到波长变化信息中。将 FBG 固定在装配机械手、大型工件对接处、应变敏感区等位置，获取待测工件应变场的实时数据，从而实现装配的在线调校。

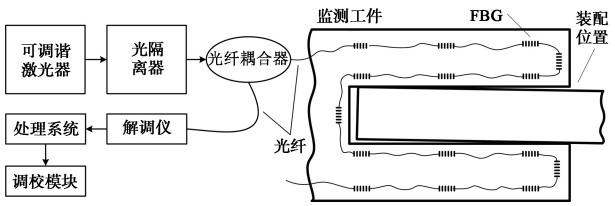


图 1　光纤传感调校系统示意图

如图 1 所示，光纤传感网络中的 FBG 分布在待测工件的应变敏感区域，从而获取装配区域的实时应变场分布数据，为调校模块提供数据支撑。

1.2　传感机理

在装配过程中，工件受夹持、挤压等会产生形变，从而导致 FBG 产生相应的变形，使回波的中心波长 λ_B 发生偏移。利用波长与应变的线性关系能够求得被测工件上各个装配位置的应力分布。设工件监测环境温度不变，则中心波长 λ_B 只与有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ 有关，且满足如下关系：

$$\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda \tag{1}$$

针对工件的应变监测可知，中心波长改变量与应变的函数关系为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_\varepsilon)\varepsilon \tag{2}$$

其中，ε 为应变量，P_ε 为弹光系数。

1.3　应变分布解算模型

将波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 与工件偏差位置 η 之间的函数关系写成 $W_iC = Y$ 形式的超定方程，W 表示波长，i 表示其对应的 FBG，从而构成测试波长值集合，即 $\Delta\lambda_1 \sim \Delta\lambda_i$；$C$ 为参考系数，用于反映波长与工件位置偏差的比例程度，其是一个系数集合，每个位置对应一个参考系数；Y 为变形后真实位置的位置偏差集合，其 x 轴分量表示为 $\mathrm{d}x$，y 轴分量表示为 $\mathrm{d}y$，z 轴分量表示为 $\mathrm{d}z$。由此可得：

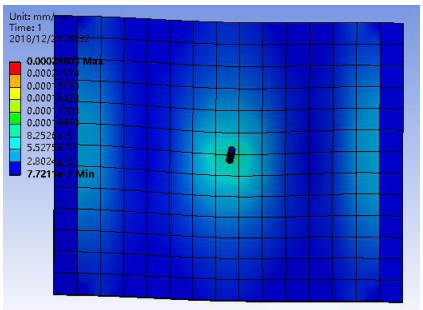
$$(\mathrm{d}x,\mathrm{d}y,\mathrm{d}z) = [\Delta\lambda_{B1}\cdots\Delta\lambda_{Bi}]\cdot[C_{x_1,y_1,z_1}\cdots C_{x_i,y_i,z_i}]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

其中，$\Delta\lambda_i$ 可以通过 FBG 测试获得，C_i 可以通过对标准作用力测试标定得到，而$(\mathrm{d}x,\mathrm{d}y,\mathrm{d}z)$即为调校系统提供的装配调校参考信息。因为整个采集过程是实时反馈的，当光纤传感网络采集的应变分布数据超过阈值时，就会为自动装配模块提供修正参数。

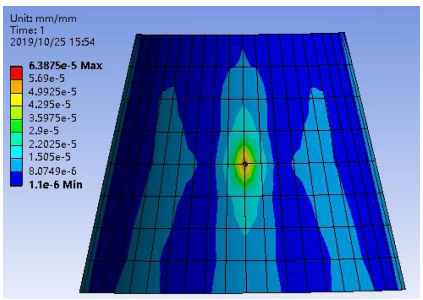
当装配机械臂完成修正后，应力得到有效释放，进而使得光纤传感网络测试数据低于阈值，完成正常装配，从而实现在线装配的自动调校。

2 仿真分析

为了获得工件在装配过程中属于敏感区域的位置信息，并且量化应变灵敏度与装配调校系统的匹配关系，需要对不同应力条件下工件的应变场分布进行仿真。为了使系统具有更好的通用性，分别在平面和曲面上取任意两个施力位置分析应变分布特性，从而将其拓展至任意工件外形的敏感监测位置，仿真结果如图 2 所示。



(a) 平面受力分布



(b) 曲面受力分布

图 2 不同形状工件受力后的应变场分布仿真结果

由图 2(a)可知，对于平面工件而言，施力点在工件中心位置时，应变场的分布与施力点的绝对距离大致呈散射状分布，与固定点方向的应变梯度差异较大，在自由端的应变梯度变化相对较小，从而形成类似椭圆的等势线。由图 2(b)可知，对于曲面工件而言，施力点仍在工件中心位置，但其应力分布与平面工件的应力分布存在巨大差异，不仅固定点方向的应变梯度明显增大，而且在自由端方向的应变场分布也不再均匀。同时，其分布特性受曲面曲率的影响明显，随着曲率的增大，应变梯度变化斜率增大，距施力点的应变效应被削弱。由两种常用形状结构的应力场分布仿真结果可知，无论平面或曲面，曲率大小、应变场分布均存在等势区域，故只要按照装配工艺就能找到应力点的集中位置，而在这些敏感位置放置 FBG 就能有效地获取装配过程中的应力场分布，并为调校系统提供参数依据。

3 实验

3.1 实验系统搭建

系统采用 TSP-1000 型可调谐激光器和 JH-FBG-D1 型光纤光栅解调仪，FBG 采用应力预紧型封装。为了简化结构，利用可调节施力臂对工件进行挤压施力来模拟装配位置的应力场变化，待测工件为 3 mm 厚铝合金板。由于施力臂可调节，故应力点的施力值可知，而光纤传感系统又可以通过式(2)获得 FBG 位置处的应力变化，从而完成应力点与波长变化量的对应系数标定，即完成可控应变量调节标定实验，实验系统结构如图 3 所示。

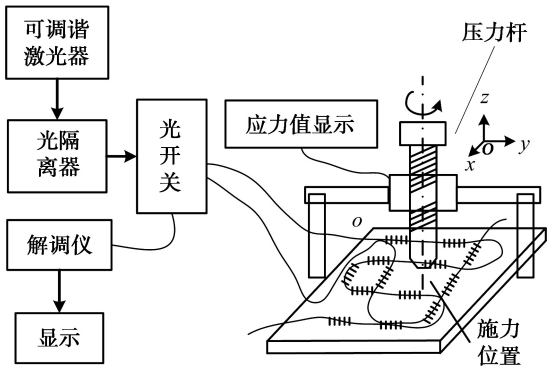


图 3 可控应变量调节标定实验系统示意图

系统利用光开关分时控制两根测量光纤，每根光纤上携带多个 FBG 传感器，应力点的施力值可调，并且调节量可通过应力显示器显示。由此只要将对应位置上 FBG 的回波波长与施力量建立函数关系就能够对工件应力场进行实时监测。在保证不发生塑性形变的条件下，改变压力值，记录 FBG 的回波变化量，系统每 5 s 采集一次各点的波长偏移量，重复 3 组测试数据取平均。系统内采用单独的 FBG 进行温度补偿，用于消除环境温度变化造成的测试误差。

3.2 测试点函数对应关系

通过实验可以获取每个 FBG 测试点应力值与波长变化量之间的函数关系，由此关系给出被测工件的位置偏差量，从而为自动装配系统提供补偿参数。不同位置对同一应力的响应值在测试实验中可以得到标定，因为每个 FBG 的响应值在弹性变形过

程中是线性的。对于每个测试点的波长、位置变化量的测试结果如图 4 所示。

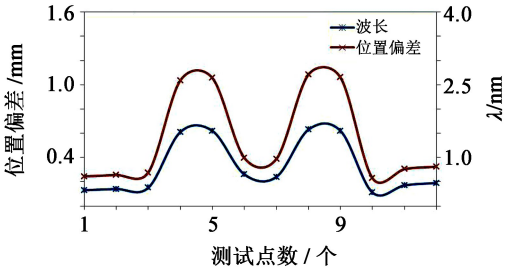


图 4　位置偏差与波长变化的对应关系

由测试点关系可知，位置偏差与波长变化趋势完全吻合，可以通过线性比例关系完成波长与位置的映射关系，从而与校正位置建立联系。

3.3　测试数据对比

为了量化应变场变化量与工件形变程度的关系，采用相比应变检测方法精度高 1～2 个数量级的光学扫描法进行对比验证。激光扫描仪定位精度为 50 μm，扫描速度为 10 000 点/秒，获取的点云数据在 VXelements 中处理获得(dx，dy，dz)的准确值，再用 FBG 测试反演数据进行对比，结果如表 1 所示。

表 1　数据测试值对比

坐标/cm	仿真值/mm	视觉测量值/mm	FBG 反演值/mm	坐标/cm	仿真值/mm	视觉测量值/mm	FBG 反演值/mm
(2,6)	0.133	0.147	0.13	(8,12)	0.261	0.252	0.24
(2,9)	0.121	0.158	0.14	(10,6)	0.554	0.618	0.63
(4,12)	0.153	0.164	0.15	(10,9)	0.587	0.591	0.62
(6,6)	0.532	0.638	0.61	(12,12)	0.167	0.137	0.11
(6,9)	0.595	0.687	0.62	(14,6)	0.144	0.189	0.17
(8,3)	0.247	0.286	0.26	(14,9)	0.158	0.174	0.19

在测试数据表中，坐标位置与如图 3 中(x，y，z)关系一致，原点位置在模拟监测工件的左上方 o 的位置，则各个坐标点表示 FBG 黏贴在待测工件上的位置。总体上看，三种数据的变化趋势是相同的，但测试效果存在明显差异。仿真值表示采用 ANSYS 模拟在相应应力条件下的形变量，在仿真分析中，计算得到的位置误差变化相对平缓，而采用视觉测量的变化梯度明显大于仿真值，说明实际工件在受力条件下的变化趋势更为明显。虽然仿真计算精度较高，但由于受工件材料实际的均匀性、应力作用点位置等影响，与视觉实测值还是存在较大误差。相比之下，FBG 反演计算得到的估读值与标准值更为接近，与标准值相比，平均相对误差优于 8.6%。在实际应用过程中，只要对已铺设在装配结构中的 FBG 传感系统进行光学方法标定，就能在自动装配中实时地完成装配位置的在线校正。由此可见，该系统对于自动装配过程具有很好的辅助作用。

4　结论

本文针对自动装配过程中强迫装配、装配不到位等问题，研究了一种基于光纤传感的调校系统。该系统可以实时获取工件敏感位置的应力分布，为装配微调系统提供工件位置偏差参考数据，从而达到实时修正装配轨迹、减小装配误差的目的。实验验证了位置偏差与波长变化的函数关系，并通过视觉测量的位置偏差标定了光纤传感系统的位置反演结果，验证了系统的可行性。综上所述，该系统适用于自动化装配过程，具有很好的应用价值。

参考文献：

[1] Skvortsov M I, Wolf A A, Dostovalov A V, et al. Distributed feedback fiber laser based on a fiber Bragg grating inscribed using the femtosecond point-by-point technique[J]. Laser Phys. Lett., 2018, 15(3): 35-103.

[2] Al-Anany Y M, Tait M J. Fiber-reinforced elastomeric isolators for the seismic isolation of bridges[J]. Composite Structures, 2016, 160(7): 300-311.

[3] Kuang Y, Guo Y, Xiong L, et al. Packaging and temperature compensation of fiber Bragg grating for strain sensing: A survey[J]. Photonic Sensors, 2018, 8(4): 320-331.

[4] Mulle M, Yudhanto A, Lubineau G, et al. Internal strain assessment using FBGs in a thermoplastic composite subjected to quasi-static indentation and low-velocity impact [J]. Composite Structures, 2019, 215(32): 305-316.

[5] Arnaldo G. Leal-Junior, Camilo A R, et al. Simultaneous measurement of pressure and temperature with a single FBG embedded in a polymer diaphragm[J]. Optics & Laser Technol., 2019, 112(93): 77-84.

[6] Yu C W, Lei S C, Chen W S, et al. Downhole fiber optic temperature-pressure innovative measuring system used in sanshing geothermal test site[J]. Geothermics, 2018, 74(31): 190-196.

[7] Guo Y X, Li X, Kong J Y, et al. Sliding type fiber Bragg grating displacement sensor [J]. Optics & Precision Engineering, 2017, 25(1): 50-58.

[8] 曲道明，孙广开，李　红，等. 变形机翼柔性蒙皮形状光纤传感及重构方法[J]. 仪器仪表学报，2018，39(2)：460-40.
Qu D M, Sun G K, Li H, et al. Optical fiber sensing and reconstruction method for morphing wing flexible skin shape [J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 460-40.

(下转第 586 页)

光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.025

一种基于卷积神经网络的人脸识别改进算法

王彦秋[1]，冯英伟[2*]

（1. 辽东学院，辽宁 丹东 118001；2. 河北建筑工程学院，河北 张家口 075000）

摘　要： 针对目前图像特征点人脸识别算法匹配精度低等缺点，提出了一种基于卷积神经网络的人脸识别算法。该算法采用传统算法算子融合卷积神经网络进行识别，首先采用局部感受野的思想，将整体图像进行分割，得到局部图像集合，并将该集合中每个局部图像像素存储在像素矩阵 $\boldsymbol{A}_i$ 中。然后对各个局部图像进行卷积运算，得到局部图像之间的内在特征联系，存储于 $\boldsymbol{B}_i$ 矩阵中，并池化进行特征映射。最后，训练出网络加权系数并求出识别结果。实验结果表明，相比其他算法，所提算法改善了原有算法图像特征点匹配精度低的问题，验证了所提算法的有效性。

关键词： 图像识别；人工智能；神经网络；卷积；特征提取

中图分类号： TP391.41　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0582－05

An Improved Face Recognition Algorithm Based on Convolutional Neural Network

WANG Yanqiu[1], FENG Yingwei[2]

（1. Eastern Liaoning University, Dandong 118001, CHN; 2. Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, CHN）

Abstract: Aiming at the shortcomings of current image feature point face recognition algorithms such as low matching accuracy, a face recognition algorithm based on convolutional neural network is proposed. The algorithm uses traditional algorithm operators to fuse convolutional neural networks for recognition. First, the idea of local receptive field is used to segment the overall image to obtain a local image set. Each local image pixel in the set is stored in the pixel matrix $\boldsymbol{A}_i$. Then the convolution operation is performed on each local image to obtain the intrinsic feature relationship between the local images, and it is stored in the $\boldsymbol{B}_i$ matrix and pooled for feature mapping. Finally, the network weighting coefficients are trained and the recognition results are obtained. Experimental results show that compared with other algorithms, the proposed algorithm improves the problem of low matching accuracy of image feature points of the original algorithm, and verifies the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: image recognition; artificial intelligence; neural network; convolution; feature extraction

0　引言

近年来，随着人工智能技术的飞速发展和硬件性能的提高，计算机视觉得到迅速发展。特别是在医疗、军事、公安、门禁、支付等领域，图像识别、人脸识别技术得到了广泛应用，给人们的生产、生活带来了极大的便利[1]。图像特征点识别是图像识别中的核心与关键技术。特征点识别需要满足一定的实验前提，包括光照、旋转等特性不能发生变化[2]。在进行图像特征点提取时，计算机通过图像识别算法，计算并提取图像的基本信息，并判断该信息是否为图像的基本特征（形状、外观、空间关系、纹理等）[3-4]。人脸特征点提取的方法主要有形状和外观提取、空

收稿日期：2020－01－19.

基金项目：2019 年度河北省高等学校科学研究课题（QN2019180）；河北省高等教育教学改革研究与实践项目（2017GJJG171）；河北省高等教育学会 2017 年度高等教育科学研究课题（GJXHZ2017-09）.

* 通信作者：冯英伟　E-mail：fyw0529@163.com

间配置关系提取、基于纹理的提取及基于标注特征点的提取等[5]。

近年来，研究者们对人脸识别特征点提取进行了大量研究。Cootes 等[6]提出了 ASM（Active Shape Models）模型算法，该模型是基于统计模型的提取方法，主要由面部特征点、脸部轮廓等面部形状参数构成，通过这些模型实现对人脸特征点的提取。Hong 和 Edwards 等[7-8]提出了 AAM（Active Appearance Model）模型算法，该算法通过提取面部的形状、灰度纹理信息实现特征提取，应用场景为二维场景。Wang 等[9]提出了基于图形特征提取的方法，该方法中用每个像素的灰度表示面部特征的高低，通过脸部的高低实现特征点提取，该方法称为 TC（Topographic Context）算法。该算法先将面部特征抽象为山脊与山峰、山丘与平原等地形标签，再由这些地形标签构成新的图像，通过这种方法实现特征点提取[10-11]。Dennis 提出的 Dabor 纹理分析线性滤波器被广泛应用于局部区域的图像纹理分析，但该算法提取的图像特征点存在大量冗余。针对该问题，研究人员后续提出了多种改进算法[12-14]。其中一种算法就是 SIFT 算法，该算法也属于纹理提取算法[15-17]。研究发现，以上算法各有优点，但均存在图像特征点匹配精度低等问题。

基于此，本文采用局部感受野的思想，将复杂图像分割为局部图像，将像素存储在像素矩阵 $\boldsymbol{A}_i$ 中，再将局部图像进行卷积，并池化进行特征映射，从而训练出网络加权系数，最终求出识别结果。仿真与测试结果表明，本文改善了现有算法图像特征点匹配精度低的问题，具有一定的研究价值与现实意义。

1　提出的基于卷积神经网络的人脸识别算法

针对现有算法特征点匹配精度低的问题，本文算法首先将待识别的图片进行分割，对局部图片依次提取像素，存储在像素矩阵中。采用卷积神经网络（Convolutional Neural Network，CNN）对局部采样区域进行卷积，为了降低计算量，通过池化滤波进行特征映射，通过激活函数对映射结果进行处理。然后通过以上数据对网络进行训练，得到神经网络权重，最终通过神经网络得到识别结果。

1.1　算法步骤

步骤 1：算法采用局部感受野的思想，首先将图像划分为 $n(0<n<i)$ 个局部采样区域；

步骤 2：提取局部图像 n_i 的特征，并用像素矩阵 $\boldsymbol{A}_i$ 表示；

步骤 3：设定 3×3 滤波器，对局部像素 $\boldsymbol{A}_i$ 进行卷积运算得到卷积结果 $\boldsymbol{B}_i$；

步骤 4：设定 2×2 池化滤波，并采用最大池化对 $\boldsymbol{B}_i$ 进行特征映射，得到映射结果 $\boldsymbol{C}_i$；

步骤 5：采用线性修正单元作为激活函数 y_i 对 $\boldsymbol{C}_i$ 进行处理，y_i 定义如式(1)所示：

$$y_i=\begin{cases}0, & x<0\\ t, & x>0 \text{ 且 } x=t\end{cases} \tag{1}$$

步骤 6：增加网络深度，采用深度为 j 次的网络，得到深度神经网络计算结果 $\boldsymbol{D}_i$；

步骤 7：学习训练，根据模板训练并计算出网络权重；

步骤 8：根据训练权重对 $\boldsymbol{D}_i$ 进行加权求和，得到最终识别结果，并根据识别结果判定最终识别结果。

算法流程图如图 1 所示。

图 1　图像识别算法流程图

1.2　算法采用算子

积分图形采用 SURF 算法，定义式为

$$ii(i,j)=\sum_{r\leqslant i,c\leqslant j}p(r,c) \tag{2}$$

其中，$ii(i,j)$ 为图像左上角与点 (i,j) 构成的对角线区域灰度值的累加和，$p(r,c)$ 表示图像中 (r,c) 这一点的灰度值，$ii(i,j)$ 可用式(3)～(4)通过迭代得到：

$$s(i,j)=s(i,j-1)+p(i,j) \tag{3}$$

$$ii(i,j)=ii(i-1,j)+s(i,j) \tag{4}$$

其中，$s(i,j)$是一列的积分。由以上可得，任意矩形区域 $ABCD$ 的像素和可以通过式(5)计算得到：

$$\sum ii(i,j)=C-B-D+A \tag{5}$$

其中，坐标原点选在图像左上角，各点横坐标满足：$XB=XC>XA=XD$，各点纵坐标满足：$XC=XD>XA=XB$。

算法中采用 SURF 算法 Hessian 矩阵近似图像，每个像素点的 Hessian 矩阵采用式(6)计算。

$$\boldsymbol{H}(f(x,y))=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial f}{\partial x}\dfrac{\partial f}{\partial x} & \dfrac{\partial f}{\partial x}\dfrac{\partial f}{\partial y}\\ \dfrac{\partial f}{\partial x}\dfrac{\partial f}{\partial y} & \dfrac{\partial f}{\partial x}\dfrac{\partial f}{\partial x}\end{bmatrix} \tag{6}$$

为了判定当前点比周边点更亮或更暗，即局部极值的判定，采用式(7)进行计算：

$$Det(\boldsymbol{H})=\frac{\partial f}{\partial x}\frac{\partial f}{\partial x}\frac{\partial f}{\partial y}\frac{\partial f}{\partial y}-\left(\frac{\partial f\partial f}{\partial x\partial y}\frac{\partial f\partial f}{\partial x\partial y}\right) \tag{7}$$

算法借鉴 SURF 算法，采用 Boxfilter 盒式滤波器代替高斯滤波，以提高运算速度。采用 Boxfilter 后，每个像素点的 Hessian 矩阵近似表示为式(8)：

$$Det(\boldsymbol{H})=D_{xx}\times D_{yy}-(\lambda\times D_{xy})^2 \tag{8}$$

其中，λ 为权值，通过调整该权值平衡不采用高斯滤波带来的误差。SURF 算法将模板简化，将整个区域划分为不同的小矩形，每个矩形区域填充一个灰度值，灰度值的取值包括白色、黑色与灰色三种，分别用正数、负数和 0 表示。

在满足以下假设条件下进行实验：(1)采用 $\sigma=1.2$ 的高斯微分滤波器；(2)模板尺寸定义为 $n\times n$。Hessian 矩阵可简化为式(9)：

$$Det(\boldsymbol{H})=D_{xx}\times D_{yy}-(wD_{xy})^2 \tag{9}$$

其中，D_{xx}，D_{yy}，D_{xy} 是已知 $n\times n$ 模板与图像卷积的运算结果。

2 实验与仿真

2.1 实验参数

为了验证算法的有效性和优越性，系统对比了本文算法与 SIFT 和 SURF 的识别概率，结果表明本文算法有效提高了识别率和匹配精度。实验环境采用戴尔 Precision 移动图形工作站、Matlab Simulink 工具、Windows10 操作系统、32 GB 内存及酷睿 Core i7 CPU。实验基于以上算法的假设条件进行，实验选用参数如表 1 所示。

表 1 实验参数表

参数	取值
n	16
$\boldsymbol{A}_i$	32×32
卷积滤波器	3×3
池化映射函数	Max{}
激活函数	线性修正单元函数 y_i
j	50
迭代	100

2.2 识别结果与分析

以 Windows 图片为例，实验中第一步先将图片进行区域处理，图片分割处理结果如图 2 所示。

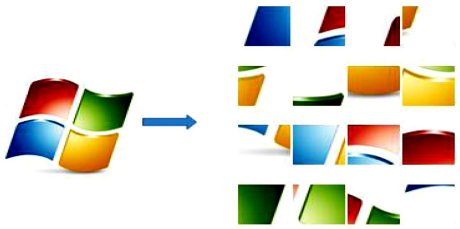


图 2 图像分割处理结果

为了方便处理，将识别图像进行黑白处理，并以 1 代表黑色，0 代表白色，可得到分割后的其中一个子图矩阵 $\boldsymbol{A}_i$，如式(10)所示：

$$\boldsymbol{A}_i=\begin{bmatrix}1 & \cdots & 0\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 0\end{bmatrix}_{32\times32} \tag{10}$$

其中，$0\leqslant i\leqslant16$。

在此基础上进行卷积运算，可通过式(11)求得 $\boldsymbol{B}_i$：

$$\boldsymbol{B}_i=\begin{bmatrix}b_{11} & \cdots & b_{132}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ b_{321} & \cdots & b_{3232}\end{bmatrix}_{32\times32} \tag{11}$$

其中，b_{ij} 计算式如式(12)：

$$b_{ij}=\sum\nolimits_{ij}A_{ij}/(32\times32) \tag{12}$$

为了降低计算量，采用池化映射实现数据压缩，求取 $\boldsymbol{C}_i$ 的计算式：

$$\boldsymbol{C}_i=\begin{bmatrix}\max b_{11} & \cdots & \max b_{18}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ \max b_{81} & \cdots & \max b_{88}\end{bmatrix} \tag{13}$$

对特征参数进行激活函数处理，采用线性修正函数 y_i 对网络进行处理，以增加网络深度。

在此基础上求取全连接层，求取方法如下式：

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}\max b_{11}\\ \vdots\\ \max b_{18}\\ \vdots\end{bmatrix} \tag{14}$$

根据训练得到权值矩阵 $\boldsymbol{w}_{n1}$，计算式如式(15)：

$$\boldsymbol{w}_{n1}=\begin{bmatrix}w_{11}\\ \vdots\\ w_{i1}\\ \vdots\end{bmatrix} \tag{15}$$

计算得到最终的识别值 $\boldsymbol{S}$，计算式如式(16)：

$$\boldsymbol{S}=\sum\nolimits_{n}\boldsymbol{w}_{i1}\times\max\boldsymbol{b}_{j1} \tag{16}$$

采用 Matlab 对上例进行测试，测试结果如下：

网络初始化完成……

开始训练……

网络标记 0　识别概率 0.988 812 1

网络标记 1　识别概率 0.990 201 1

网络标记 2　识别概率 0.966 414 5

网络标记 3　识别概率 0.967 881 5

网络标记 4　识别概率 0.936 815 7

网络标记 5　识别概率 0.955 667 3

检验 200 张图像，其中正确 197 张，错误 3 张，每个网络标记对应的识别概率如图 3 所示。

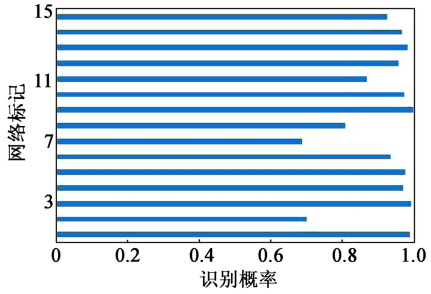


图 3　识别概率结果图

识别概率变化曲线如图 4 所示。图 5 对比了本文算法与 SURF 算法的匹配度，横轴选取了[170，197]区间，纵轴为识别匹配度，从变化曲线可看出，算法稳定后具有一定优越性。

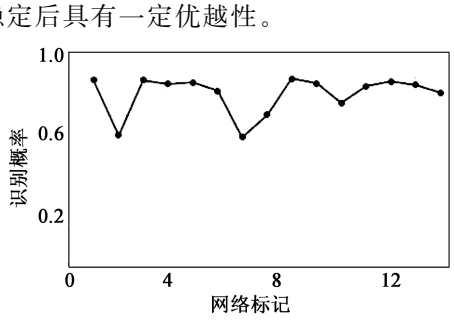


图 4　识别概率变化曲线图

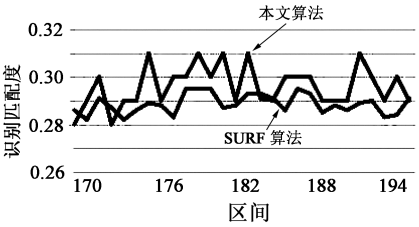


图 5　识别匹配度对比曲线图

3　结论

本文提出了一种基于卷积神经网络的人脸识别算法。通过将复杂图片分解为简单局部图片，利用卷积运算获取各局部子图的内在联系，并池化对 $\boldsymbol{B}_i$ 进行特征映射，得到映射结果 $\boldsymbol{C}_i$。采用线性修正单元作为激活函数 y_i 对 $\boldsymbol{C}_i$ 进行处理，并增加网络深度，采用深度神经网络，得到深度神经网络计算结果 $\boldsymbol{D}_i$，然后通过学习训练计算出网络权重。最后，根据训练权重对 $\boldsymbol{D}_i$ 进行加权求和，得到最终识别结果，并根据识别结果判定最终识别结果。

参考文献：

[1] 林　川，曹以隽. 基于深度学习的轮廓检测算法：综述[J]. 广西科技大学学报，2019，30(2)：1-12.
Lin C，Cao Y J. Contour detection algorithms based on deep learning：a review[J]. J. of Guangxi University of Science and Technology，2019，30(2)：1-12.

[2] 张东波，陈治强，易良玲，等. 图像微观结构的二值化表示与目标识别应用[J]. 电子与信息学报，2018，40(3)：633-640.
Zhang D B，Chen Z Q，Yi L L，et al. Binary representation of image microstructure and application of target recognition[J]. J. of Electronics & Information Technology，2018，40(3)：633-640.

[3] 吕　蕾，张金玲，朱英杰，等. 一种基于数据手套的静态手势识别方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2015，27(12)：2410-2418.
Lv L，Zhang J L，Zhu Y J，et al. A static gesture recognition method based on data gloves[J]. J. of Computer-Aided Design & Computer Graphics，2015，27(12)：2410-2418.

[4] 杨　丽，胡桂明，黄东芳，等. 结合肤色分割和 ELM 算法的静态手势识别[J]. 广西大学学报(自然科学版)，2015(2)：444-450.
Yang L，Hu G M，Huang D F，et al. Static gesture recognition combining skin color segmentation and ELM algorithm[J]. J. of Guangxi University (Nature Science Edi.)，2015(2)：444-450.

[5] 张　澎，崔梦天，谢　琪，等. 基于深度卷积生成对抗网络的植物图像识别方法的研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版)，2019，45(2)：185-191.
Zhang P，Cui M T，Xie Q，et al. Research on plant image

recognition method based on deep convolution generating adversarial network [J]. J. of Southwest University for Nationalities (Nature Science Edi.), 2019, 45(2): 185-191.

[6] 张雪芹，陈嘉豪，诸葛晶晶，等. 基于深度学习的快速植物图像识别[J]. 华东理工大学学报(自然科学版)，2018，44(6)：887-895.
Zhang X Q, Chen J H, Zhuge J J, et al. Fast plant image recognition based on deep learning [J]. J. of East China University of Science and Technology (Nature Science Edi.), 2018, 44(6): 887-895.

[7] 于慧伶，麻峻玮，张怡卓. 基于双路卷积神经网络的植物叶片识别模型[J]. 北京林业大学学报，2018，40(12)：132-137.
Yu H L, Ma J W, Zhang Y Z. Plant leaf recognition model based on two-way convolutional neural network [J]. J. of Beijing Forestry University, 2018, 40(12): 132-137.

[8] 郑一力，张 露. 基于迁移学习的卷积神经网络植物叶片图像识别方法[J]. 农业机械学报，2018，49(S1)：354-359.
Zheng Y L, Zhang L. Method for plant leaf image recognition based on transfer learning convolutional neural network[J]. J. of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 354-359.

[9] 陈肖蒙，王 瑜，邢素霞. 基于小波和可变局部边缘模式的植物物种识别[J]. 计算机应用与软件，2018，35(9)：230-235.
Chen X M, Wang Y, Xing S X. Plant species recognition based on wavelet and variable local edge pattern [J]. Computer Applications and Software, 2018, 35(9): 230-235.

[10] 关 胤. 基于残差网络迁移学习的花卉识别系统[J]. 计算机工程与应用，2019，55(1)：174-179.
Guan Y. Flower recognition system based on residual network transfer learning[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(1): 174-179.

[11] 毕立恒. 基于叶片图像算法的植物种类识别方法研究[J]. 浙江农业学报，2017，29(12)：2142-2148.
Bi L H. Research on plant species recognition method based on leaf image algorithm[J]. Zhejiang J. of Agriculture, 2017, 29(12): 2142-2148.

[12] 陈淑君，周永霞，方勇军. 基于整体外观特征的植物种类识别研究[J]. 计算机应用与软件，2017，34(9)：222-227.
Chen S J, Zhou Y X, Fang Y J. Research on plant species recognition based on overall appearance features[J]. Computer Applications and Software, 2017, 34(9): 222-227.

[13] Srdjan S, Marko A, Andras A, et al. Deep neural networks based recognition of plant diseases by leaf image classification [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2016, 2016: 2453.

[14] Tang Qiling, Sang Nong, Liu Haihua. Contrast-dependent surround suppression models for contour detection [J]. Pattern Recognition, 2016, 60: 51-61.

[15] Lin Chuan, Xu Guili, Cao Yijun, et al. Improved contour detection model with spatial summation properties based on nonclassical receptive field [J]. J. of Electronic Imaging, 2016, 25(4): 43018.

[16] Suh H K, Hofstee J W, IJsselmuiden J, et al. Sugar beet and volunteer potato classification using Bag-of-Visual-Words model, scale-invariant feature transform, or speeded up robust feature descriptors and crop row information [J]. Biosystems Engin., 2017, 166: 210-226.

[17] Mukherjee P, Lall B. Saliency and KAZE features assisted object segmentation[J]. Image and Vision Computing, 2017, 61(c): 82-97.

作者简介：

王彦秋(1979－)，女，辽宁丹东人，硕士，实验师，研究方向为教育信息化、人工智能；

冯英伟(1980－)，男，辽宁海城市人，硕士，副教授，研究方向为云计算、物联网技术。

(上接第 581 页)

[9] 吴 俊，陈伟民，舒岳阶，等. 锚头植入式应变均化光纤布喇格光栅测力传感器[J]. 光子学报，2015，44(7)：95-100.
Wu J, Chen W M, Shu Y J, et al. Analysis on strain transfer of a pasted FBG strain sensor[J]. Optik, 2015, 44(7): 95-100.

[10] Sun L, Hao H, Zhang B B, et al. Strain transfer analysis of embedded fiber Bragg grating strain sensor[J]. J. of Testing and Evaluation, 2016, 44(6): 2312-2320.

[11] Sun Baochen, Li Jianzhi, Zhang Wentao. Fiber Bragg grating sensor[J]. Optical Fiber Sensing and Structural Health Monitoring Technology, 2019, 26(4): 77-148.

[12] Botsisj, Humbertl, Colpof, et al. Embedded fiber Bragg grating sensor for internal strain measurement sin polymeric materials[J]. Optics and Laser Sin Engineering, 2005, 43(3): 491-510.

[13] Giovanna P, Daniele T, Agostino I, et al. Analysis and design of chirped fiber Bragg grating for temperature sensing for possible biomedical applications[J]. IEEE Photon. J., 2018, 10(3): 1-15.

[14] Yucel M, Torun M. Simplified fiber Bragg grating-based temperature measurement system design with enhanced high signal-to-noise ratio [J]. Microwave & Optical Technol. Lett., 2018, 60(4): 965-969.

[15] Mesquita E, Pereira L, Theodosiou A, et al. Optical sensors for bond-slip characterization and monitoring of RC structures [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 280(1): 332-339.

作者简介：

孟祥秋(1986－)，女，硕士，实验师，主要从事光电测试方面的研究。

光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.026

基于激光检测的无人机探测系统与实验

陈　实，杨　帆*，王梓任

（电子科技大学 信息与通信工程学院，成都 611731）

摘　要： 现有的无人机探测通常采用以雷达扫描为主，辅以其他传感器探测的方式。但是，目前使用雷达探测的成本较高，而激光器作为一种低成本、低功耗的器件已受到人们广泛关注。以激光为载体，结合无线光通信中的捕获、瞄准、跟踪（APT）系统，设计并实现了一种基于激光探测技术的无人机扫描定位系统，并以气球模拟无人机目标的测试方式，测试了该系统的定位精度和效率。扫描试验结果表明：在激光发射器平均功率小于40 mW的情况下，该系统对目标的捕获定位能达到较高的精度，误差在5%以内，最大可探测范围为45 m。

关键词： 无人机；APT技术；脉冲激光测距；激光扫描；目标检测

中图分类号： TN959.11　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0587－05

UAV Detection System and Experiment Based on Laser Detection

CHEN Shi, YANG Fan, WANG Ziren

(School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, CHN)

Abstract: Existing unmanned aerial vehicle (UAV) detection mainly applies radar scanning as the main detection method and other sensors as the supplement, but the cost of radar is relatively high. As the device with low cost and low power, the laser has received widespread attention. In this paper, using the laser as a carrier and combining with the acquisition, pointing, tracking (APT) system in wireless optical communication, a UAV scanning positioning system based on laser detection technology was designed and implemented. The positioning accuracy of the system was tested by using a balloon test method. The scanning test results show that when the average power of the laser transmitter is less than 40 mW, the target can be captured and positioned with a high accuracy with an error of lower than 5%, and the maximum detectable range is 45 m.

Key words: UAV; APT; pulse laser ranging; laser scanning; target detection

0　引言

无人直升机、无人多旋翼飞行器等民用无人机日益普及，但受无人机超低空飞行环境以及地面高大建筑物遮挡的影响，地面雷达很难对无人机进行精准探测预警。且探测时易将其与鸟类目标混淆，对无人机非法入侵的探测日渐成为军方和政府部门必须面对的棘手问题[1]。民用无人机体积小、成本低、方便携带、易操作，且获取途径多，容易被不法分子利用来投放生化毒剂、运载易燃易爆物品、运输毒品、散播各种危险舆论传单等，很可能对重大活动、重点区域的安保工作造成严重威胁。

目前，对于飞行目标的探测主要有雷达探测、无线电探测与光电探测三种方式。如瑞典萨博公司研发的长颈鹿AMB雷达，采用新式雷达探测，能发现RCS大于0.001 m^2的空中目标[2]。德国安诺尼公

收稿日期：2020－04－08.

基金项目：四川省科技计划项目(2019YFG0119)；国家自然科学基金委员会-中国民用航空局民航联合研究基金项目(U1633129)).

* 通信作者：杨　帆 E-mail：yangf_byr@uestc.edu.cn

司推出的无人机侦测系统，能够对无人机电磁发射的信号方向进行实时测量，系统频率覆盖 9 kHz～20 GHz，能检测多种复杂环境下的无人机信号[3]。美国诺格公司的“毒液”反无人机系统则采用轻型激光指示/测距仪(LLDR)，能在昼夜及模糊可视环境下识别、锁定、跟踪低飞的小型无人机[4]。除此之外，还有以色列的“无人机穹”[5]、美国的 Drone Tracker[6]等系统采用多种探测手段结合的方式检测无人机。对比国外的无人机检测技术，我国较具代表性的民用侦测系统则是 2017 年广州海格亚华防务科技有限公司研制的“苍擒”系统[7]。

上述无人机检测系统的使用成本均较高，多应用于重要地段的无人机侦测，对于一般的露天广场等适用性低；同时，这些检测系统都有完整的检测体系，对于已有的地面雷达性能提升而言，功能重复过多、花费过高。

激光器作为一种低成本、低功耗器件，被广泛应用于众多领域的测量工作。其中，由于脉冲激光峰值功率高、发散角较小、脉冲持续时间短，脉冲激光测距在探测距离和测量精度上具有显著优势[8]。本文结合之前对于激光扫描的研究成果，提出了一种激光探测无人机技术，利用大气光束的捕获、瞄准、追踪(Acquisition，Pointing and Tracking，APT)技术，实现对无人机的航迹测量与定位，完成对无人机等低慢小目标的捕获，为地面雷达的无人机预警或露天广场等小范围场所的无人机有效拦截提供数据支持。

1 系统模型

本系统采用激光脉冲测距的方法完成系统与目标之间的距离测量，在距离测量的基础之上，结合角度测量，完成对目标的位置测量和速度估计。同时，采用空间激光通信中常用的 APT 技术，将激光束照射到被测目标后的反射光作为 APT 系统中的信标光束，通过指向捕获、对准，使激光测距模块发射的激光脉冲能实时照射到被测目标上，实现对目标的检测。

探测系统总体框架如图 1 所示，主要包括：(1)由角度测量、激光发射接收器和相应的光学模组组成的激光测量部分；(2)由光斑检测单元和伺服转台组成的扫描跟踪部分；(3)由微处理器和显示电路组成的数据处理显示模块。

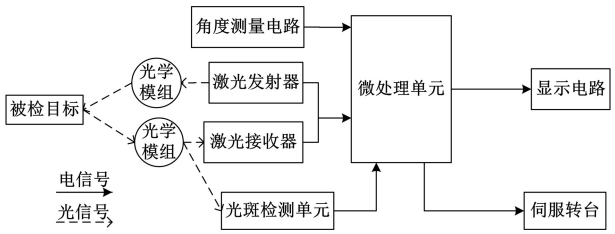


图 1 系统总体结构框图

2 基于激光的捕获与测距

2.1 扫描跟踪

在无线激光通信中，APT 系统的任务是实现光链路的建立，并在链路建立后保持光束方向的相对稳定，以保证通信的实现[9]。在无人机目标的激光探测应用中，APT 系统的工作流程主要分为三个阶段：目标初始捕获阶段、目标对准阶段以及目标跟踪阶段。APT 系统的工作流程如图 2 所示。

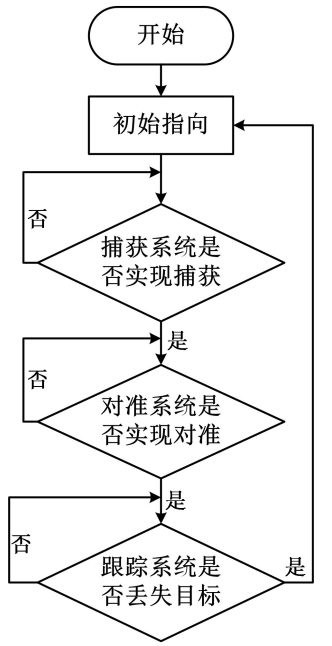


图 2 APT 系统工作流程

在本系统的扫描跟踪部分中，光斑检测模块采用空间激光通信中常用的四象限光电探测器构成光斑检测模块，伺服转台选用由舵机控制的 2 自由度云台作为跟踪捕获系统的伺服转台。光斑检测模块将采集到的光斑位置信息传输给微处理器，微处理器通过控制信号控制伺服转台，从而改变激光系统的倾角与方位角，以此完成激光对目标的对准与跟踪。扫描跟踪系统的工作流程如图 3 所示。

扫描系统从零位置开始，在微处理器的控制下，对水平面 108°角、垂直面 54°的前方目标区域进行

矩形扫描，直到光斑检测单元接收到反射光信号后，完成捕获。微处理器调整伺服转台对准目标，进入跟踪阶段，光斑检测单元测得脱靶数据并将其发送给微处理器，经过数据处理控制伺服转台实现对目标的跟踪。并且由光斑检测单元检测是否丢失目标，若丢失目标则发送一个信号反馈给微处理器，系统回到初始状态重新捕获目标。

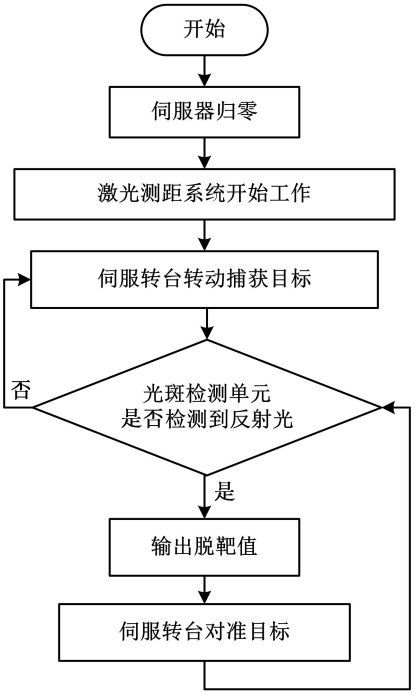


图 3　捕获跟踪流程图

2.2　激光测距及定位

本系统激光测距采用脉冲法，其基本原理为：测距系统工作时，首先发射一束特定的脉冲激光，经大气传输后到达目标表面产生反射回波，接收器接收到反射回波，最后通过测量回波信号的时间间隔，获得目标的距离 l[10]：

$$l=(c\times t)/2 \tag{1}$$

其中，c 为真空中的光速，t 为激光脉冲到达目标并被反射回接收器的时间。本系统在激光测距的同时，利用角度测量电路获得该时刻的激光发生器的方位角和仰角，达到目标定位的目的；同时，综合短时间内的多次定位结果，计算出低慢小目标的大概速度。

如图 4 中所示，O 点为探测器所在地；P_1 为目标初始点；P_2，P_3 分别为进行第一次和第二次激光测距接收到反射信号目标所在位置点。开始时，系统发射一次激光脉冲信号，角度测量电路测得目标位于 P_1 点的倾角 α_1 和方位角 β_1，此后系统跟进目标，当目标运动到 P_2 位置时，系统激光接收器接收到目标反射的激光脉冲信号，测得脉冲激光往返的总时间 t_1，完成该次测量。之后以同样的方法继续测量 P_2 和 P_3 两点的数据。经式(1)运算后，进行三角计算则可得到目标 P_i 对于原点 O 的坐标。

$$\begin{cases} x_i=l_i\times\cos\alpha_i\times\cos\beta_i \\ y_i=l_i\times\cos\alpha_i\times\sin\beta_i \\ z_i=l_i\times\sin\alpha_i \end{cases} \tag{2}$$

其中，(x_i,y_i,z_i) 为 P_i 相对于原点 O 的坐标，l_i 为激光测距测得的 P_i 与原点 O 的直线距离，α_i 为直线 OP_i 与 xOy 平面的夹角，β_i 为直线 OP_i 在 xOy 面上的投影与 x 正半轴的夹角。

$$\begin{aligned} l_{12}&=\sqrt{(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2+(z_1-z_2)^2} \\ l_{23}&=\sqrt{(x_2-x_3)^2+(y_2-y_3)^2+(z_2-z_3)^2} \end{aligned} \tag{3}$$

l_{12} 为 P_1，P_2 的距离；l_{23} 为 P_2，P_3 的距离。因为目标从 P_1 点到 P_2 点和从 P_2 点到 P_3 点的时间间隔 t_1 和 t_2 很短，故可以将目标经过 P_1 和 P_2 点以及 P_2 和 P_3 点的平均速度近似视为目标的瞬时速度：

$$\begin{aligned} v_{12}&=l_{12}/t_1 \\ v_{23}&=l_{23}/t_2 \end{aligned} \tag{4}$$

对 v_{12} 和 v_{23} 求均值可得到目标经过 P_1，P_2，P_3 的速度：

$$v=(v_{12}+v_{23})/2 \tag{5}$$

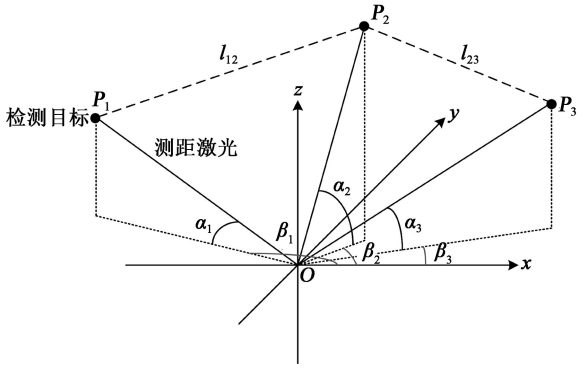


图 4　激光测量与定位系统测量原理图

3　试验论证

3.1　试验系统和场地

激光探测系统包括 STM32F407 微处理器、激光测距模块、伺服转台、光斑检测模块、LCD 显示屏和矩阵键盘。激光测距板和光斑检测模块位于伺服转台上。激光测距模块采用串口与 32 位微处理器通信。扫描捕获完成时，LCD 显示屏显示激光测距

板测得的位置信息与测距结果。

本测试采用游乐园中常见的氢气球作为检测目标。检测目标与系统的距离采用科麦思手持激光测距仪(测量精度±1 mm)的检测距离作为真实的参考距离。测试时为了避免自然光和周围的环境对测量造成干扰,选择空旷的地点和阴天进行测量。

3.2 系统测试

本次试验共测量 10 组数据,每组数据中的检测目标与探测系统的距离均不相等;每组数据共测量 10 次,同组不同次测量时,检测目标位置不同,但与系统距离相等。记录每组的捕获情况、定位数值以及定位耗时。10 组数据测试完成后,人为地将测量系统对准目标反光板进行捕获,测试系统的最大测量距离。结果如表 1 和图 5～6 所示。

表 1 检测情况

实际距离/m	捕获率/%	测量距离/m	误差/%
1.0	100	1.045	4.30
2.5	100	2.558	2.32
5.0	90	5.104	2.08
7.5	90	7.651	2.01
10.0	80	10.150	1.50
15.0	60	15.198	1.31
17.5	40	17.692	1.10
20.0	20	20.196	0.98
22.5	10	22.671	0.76
25.0	10	25.463	1.85

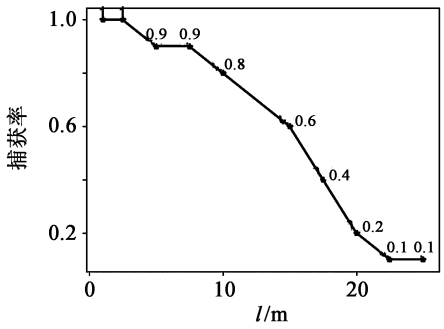


图 5 捕获率与距离关系图

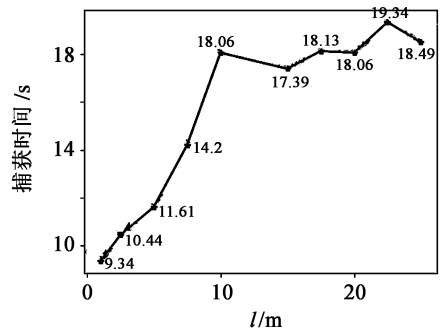


图 6 平均捕获时间与距离关系图

经人为对准得到探测系统可探测的最大距离约为 45 m,对比 10 组测得的距离数据与误差可知,激光测距仪测得的距离误差在±5%以内;当系统与目标距离在 7.5 m 内时,捕获概率在 90%以上,平均捕获时间在 15 s 以内。

3.3 结果分析与改进

3.3.1 测距分析

表 1 中的距离测量值均大于实际值,分析认为这是由于测量距离最远仅为 25 m,被检目标气球为一个弧面,并不能视为一个质点,实验所设置的实际距离是系统到目标中心部位的距离,系统定位时并未对准被测气球中心部位,而是对准了气球的边缘,导致测得的数据较实际值偏大。

其次,对系统最大探测距离进行分析。参照激光测距发射功率与接收功率关系,可知脉冲激光最大探测距离 l_{max} 为[11]

$$l_{max}=\sqrt{\frac{P_t\rho T^2\eta A_r}{\pi P_{rmin}}} \tag{6}$$

其中,P_t 为激光发射峰值功率,ρ 为目标反射率,η 为光学系统效率,A_r 为接收光学有效面积,T 为大气透过率,P_{rmin} 为最小可探测功率。由此可见,l_{max} 与$\sqrt{P_t}$成正比。在真实的激光系统中,激光平均功率可达 400～600 W,结合之前的实验结果,在其他参数基本不变的情况下,根据式(6)的正比关系,可估算出最大探测距离范围约为 4.5～5.5 km。

3.3.2 捕获分析

从捕获时间与距离关系可以看出,当距离小于 10 m 时,时间与距离正相关;当距离大于 10 m 后,平均检测时间趋于稳定。这是由于当目标距离系统较近时,目标覆盖多个光栅扫描中的点,完成捕获的时间较短。随着距离的增加,目标只覆盖了光栅检测中的一个点,捕获所用时间大致相同。

由于系统采用矩形光栅步进扫描,可知其将空间分为正方形区域,边长 l_a 为

$$l_a=2l\sin\frac{\Delta\theta}{2} \tag{7}$$

其中,l 为目标与激光发射器的距离,$\Delta\theta$ 为舵机扫描角度步进值,实验中约为 9°。

在远处时,扫描覆盖面仅为正方形四角的扇形。所以可知目标中心距离正方形四角距离为 r_1 时,无法被探测到:

$$r_1=\frac{d_1+d_2}{2} \tag{8}$$

式中，d_1 为目标探测面直径，实验采用气球模拟 $RCS=0.01\ m^2$ 无人机目标，其 d_1 约为 0.127 m，d_2 为 l 处光斑直径。

所以，由式(7)～(8)可知，距离 l 与探测概率 p 的关系为

$$p=\frac{\pi r_1^2}{l_a^2}=\pi\left[\frac{d_1+d_2}{4l\sin(\Delta\theta/2)}\right]^2 \tag{9}$$

计算可知，在 l 大于 15 m 后，扫描覆盖率小于 10%，这与实验中 15 m 后捕获率不佳的结果相吻合。因此，若降低步进角，采用多激光协同扫描，则可在捕获时间不增加的情况下提高捕获率。

4　结束语

本文针对无人机目标检测，提出了一种基于激光扫描跟踪的检测系统。该系统将激光测距与 APT 技术相结合，为解决无人机等低慢小目标雷达难以检测的问题提供了一种思路。同时还对该系统的检测性能进行了实地测试，结果表明，系统在激光平均功率小于 40 mW 时，对 7.5 m 范围内目标的捕获概率达 90%，定位误差在 5%以内，最远检测距离约为 45 m。

参考文献：

[1] 张建伟，郭会明. 低空慢速小目标拦截系统研究[J]. 计算机工程与设计，2012，33(7)：2874-2878.
Zhang Jianwei，Guo Huiming. Net cast interception system research aimed at low small slow target [J]. Computer Engineering and Design，2012，33(7)：2874-2878.

[2] 石红梅，谭　晃. 国外无人机监管及反制技术最新发展概况[J]. 中国安防，2016(4)：100-105.
Shi Hongmei，Tan Huang. Overview of the latest developments in foreign UAV regulatory and countermeasure technologies[J]. China Security & Protection，2016(4)：100-105.

[3] 罗　斌，黄宇超，周　昊. 国外反无人机系统发展现状综述[J]. 飞航导弹，2017(9)：24-28.
Luo Bin，Huang Yuchao，Zhou Hao. Overview of the development status of anti-UAV systems abroad [J]. Aerodynamic Missile J.，2017(9)：24-28.

[4] 李明明，卞伟伟，甄亚欣. 国外“低慢小”航空器防控装备发展现状分析[J]. 飞航导弹，2017(1)：62-70.
Li Mingming，Bian Weiwei，Zhen Yaxin，Analysis on the development status of foreign "Low Slow Small" aircraft prevention and control equipment[J]. Aerodynamic Missile J.，2017(1)：62-70.

[5] 李　方. 国外反微小型无人机电子装备发展分析[J]. 军民两用技术与产品，2019(8)：22-26.
Li Fang. Analysis of the development of foreign anti-mini-small UAV electronic equipment [J]. Dual Use Technologies & Products，2019(8)：22-26.

[6] 张　静，张　科，王靖宇，等. 低空反无人机技术现状与发展趋势[J]. 航空工程进展，2018，9(1)：1-8，34.
Zhang Jing，Zhang Ke，Wang Jingyu，et al. A survey on anti-UAV technology and its future trend [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering，2018，9(1)：1-8，34.

[7] W. HK. 全国机场首个无人机防御系统投入试运行[J]. 军民两用技术与产品，2017(23)：20.
W. HK. National airport's first UAV defense system put into trial operation[J]. Dual Use Technologies & Products，2017(23)：20.

[8] 谢庚承，叶一东，李建民，等. 脉冲激光测距回波特性及测距误差研究[J]. 中国激光，2018，45(6)：260-267.
Xie Gengcheng，Ye Yidong，Li Jianming，et al. Echo characteristics and range error for pulse laser ranging [J]. Chinese J. of Lasers，2018，45(6)：260-267.

[9] 刘瑞雄，张　涛. 自由空间激光通信中的 APT 技术分析[J]. 现代电子技术，2010，33(7)：102-103.
Liu Ruixiong，Zhang Tao. Analysis of APT technology used in free-space laser communication [J]. Modern Electronics Technique，2010，33(7)：102-103.

[10] Hai Y，Li Y，Ma X H，et al. Optical system design for small size laser ranging[C]// Proc. IEEE 2015 Inter. Conf. on Optoelectronics and Microelectronics，2015：115-118.

[11] 王晓冬. 高频脉冲激光测距接收系统设计[D]. 南京：南京理工大学，2009.
Wang Xiaodong. Design of high frequency pulse laser ranging receiving system[D]. Nanjing：Nanjing University of Science and Technology，2009.

作者简介：

陈　实(1997－)，男，四川人，硕士研究生，主要研究方向为无线光通信、5G 关键技术；

杨　帆(1982－)，男，重庆人，博士，副教授、硕士生导师，主要研究方向为水下 AUV 通信、智能电网、5G 关键技术、无人机通信，以及室内定位等。

光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.027

基于星座图对射频指纹识别方法的研究

袁建国*，赵富强，覃陆祯玥，徐一为，熊首泽
（重庆邮电大学 光电信息感测与传输技术重庆市重点实验室，重庆 400065）

摘　要： 针对星座图的射频(RF)指纹识别方案中，低信噪比环境下识别准确率低的问题，提出一种基于欧式距离与幅度距离的二维识别算法来进行RF指纹识别。该方案通过对星座图进行优化处理，可从优化后的星座图中提取识别性能更好的RF指纹，再通过二维识别算法来提高识别准确率。仿真结果表明：与仅用欧式距离作为判断依据的方法相比，所提出的二维识别算法的识别准确率最高可提升8%，在设备容量为50组的情况下识别准确率为77.8%，并且从优化后的星座图中所提取的RF指纹具有更好的唯一性和稳定性。

关键词： 射频指纹；星座图；欧式距离；幅度距离
中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0592－06

Research on the Radio Frequency Fingerprint Identification Method Based on the Constellation Diagram

YUAN Jianguo, ZHAO Fuqiang, QINLU Zhenyue, XU Yiwei, XIONG Shouze
(Chongqing Key Laboratory of Photoelectronic Information Sensing and Transmitting Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: In the RF fingerprint identification scheme for the constellation diagram, with respect to the problem of the low identification precision rate in low signal noise ratio (SNR) environment, a two-dimensional identification algorithm based on the Euclidean distance and amplitude distance is proposed. This solution optimizes the constellation diagram to extract RF fingerprints with better identification performance from the optimized constellation diagram, and then uses the two-dimensional identification algorithm to improve the identification precision rate. Simulation results show that compared with the method based on the Euclidean distance, the identification precision rate of the proposed two-dimensional identification algorithm can be improved by up to 8% and the identification precision rate is 77.8% when the equipment capacity is 50. The RF fingerprints characterized by the optimized constellation diagram present better uniqueness and robustness.

Key words: radio frequency fingerprint; constellation diagram; Euclidean distance; amplitude distance

0　引言

随着网络信息技术的飞速发展，无线通信设备的接入认证问题已成为当今无线网络安全面临的严峻挑战。在传统的无线通信系统中，设备访问时的认证主要取决于存储在设备中的身份认证信息或输入的认证指令，这种认证方式存在密码泄露等问题。由于射频(RF)指纹是设备本身的物理特征，建立在物理层上的RF指纹信息不易被修改，可从通信系

收稿日期：2020－04－04.
基金项目：国家自然科学基金项目(61671091)；重庆市基础与前沿研究计划项目(csts2017jcyjAX0427).
* 通信作者：袁建国　E-mail：yyyyjg@126.com

统的底层来保护系统。基于 RF 指纹的物理层安全技术可有效地解决无线设备的安全接入问题[1-2]。

射频指纹的特征提取过程是射频指纹识别中的重要环节。现有的射频指纹特征提取方法主要分为两种[1-3]：一种是基于瞬态信号响应射频指纹提取方法，另一种是基于稳态信号响应射频指纹提取方法。星座图中包含了稳态信号信息，其中包括滤波器响应、功率放大器的非线性效应和其他线性与非线性相干因素等。设备间的差异可体现在星座图中，反过来星座图也可以反映设备间的差异，所以可直接提取星座图中的特征作为射频指纹。

本文开展了基于星座图的射频指纹识别方法的研究，选用星座图中聚类中心点作为射频指纹，以欧式距离的和与幅度距离的和作为指纹特征。提出一种基于欧式距离与幅度距离的二维识别算法来进行指纹识别，并进行了相应的仿真分析。

1　系统描述与分析

实际的无线网络安全协议中常出现漏洞现象。比如，IEEE 820.11 无线局域网（Wireless Local Area Network，WLAN）最初的有线等效加密（Wired Equivalent Privacy，WEP）协议中很容易被攻击者通过抓包来实现统计攻击。尽管此后已将其升级到保护无线电脑网络安全系统（Wi-Fi Protected Access，WPA）和 WPA2，但其口令句可被恢复，仍然存在各种安全问题。针对 WLAN 中非法访问、密码泄露等问题，选取 IEEE 802.11n 正交频分复用（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，OFDM）系统作为本次仿真系统模型，系统框图如图 1 所示。

射频指纹之所以能用来识别不同个体，是因为射频设备中的电子元器件存在容差效应，导致发射出的电磁波包含发射设备独有的射频指纹特征。图 1 中正交调制器和功率放大器两个器件对射频指纹的影响最大，正交调制器的原理框图如图 2 所示。

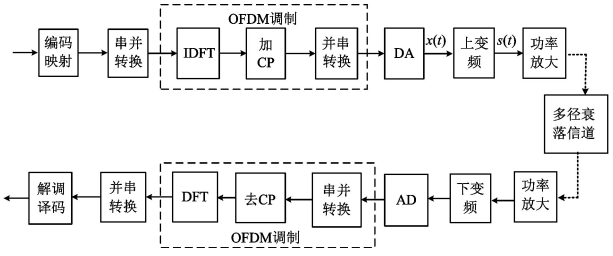


图 1　基于 802.11n OFDM 系统模型

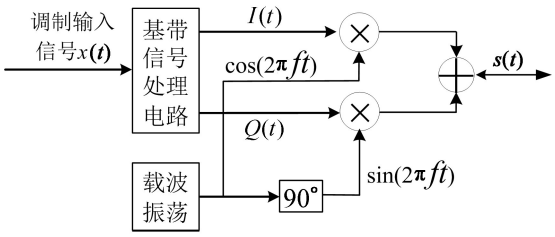


图 2　正交调制器原理框图

正交调制的一般表达式为[4]

$$s(t)=I(t)\times\cos(2\pi ft)-Q(t)\times\sin(2\pi ft) \tag{1}$$

其中，$I(t)$ 和 $Q(t)$ 分别为正交调制前输入信号 $x(t)$ 的实部和虚部；上变频时的载波频率为 f，其值为 2.4 GHz。在实际的通信过程中会产生线性误差，主要包括增益误差和偏移误差两种。

正交调制过程中的基带信号，考虑其线性增益误差，若 A_I 和 A_Q 分别为 I 路和 Q 路的增益误差，需将 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 做如下替换：

$$I(t)=(I+A_I)I(t) \tag{2}$$

$$Q(t)=(I+A_Q)Q(t) \tag{3}$$

对于两路正交载波，除了考虑其线性偏移误差外，因载波不能准确相移 90°，故 I，Q 两路还存在初始相位。若 f_i 和 f_q 为载波频率偏移，I_i 和 I_q 为初始相位，则需将两路正交载波做如下变换：

$$\cos(2\pi ft)\rightarrow\cos[2\pi(f+f_i)+I_i] \tag{4}$$

$$\sin(2\pi ft)\rightarrow\sin[2\pi(f+f_q)+I_q] \tag{5}$$

将式(2)～(5)代入式(1)中，得到实际情况下的已调信号 $s(t)$，可用式(8)表示：

$$i(t)=(1+A_I)\times I(t)\times\cos[2\pi(f+f_i)t+I_i] \tag{6}$$

$$q(t)=(1+A_Q)\times Q(t)\times\sin[2\pi(f+f_q)t+I_q] \tag{7}$$

$$s(t)=i(t)-q(t) \tag{8}$$

由于存在容差效应，每个 RF 设备都有不同的调制误差。正因为这些调制误差，每个 RF 设备均拥有自身唯一的指纹特征。

功率放大器模型其实是一个非线性系统，可用沃尔泰拉级数模型和泰勒级数模型来表示。本文采用无记忆泰勒级数功率放大器模型进行研究，其系统模型如图 3 所示。

功率放大器的系统响应函数可用式(9)表示。

$$\psi(n)=\sum_{l=1}^{K}a_l[s(n)]^l \tag{9}$$

其中，输入信号是 $s(n)$，功率放大器的输出信号为 $\psi(n)$，K 是泰勒多项式的阶数，a_l 代表泰勒多项式的系数。对于无记忆泰勒级数功率放大器而言，l 一般取奇数项，K 取 5，即可得到输出 $\psi(n)$。通过式(9)可看出，对于不同的泰勒级数功率放大器，可通过改变泰勒多项式的系数来区别不同设备。

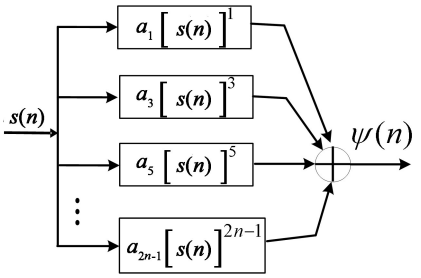


图 3 无记忆泰勒级数功率放大器的系统模型

2 射频指纹特征的获取与优化

基于星座图的射频指纹识别是一种基于稳态信号响应的射频指纹提取方法。在 802.11n 协议中有 16QAM，64QAM，BPSK 和 QPSK 四种调制方式，本文选择 QPSK 调制方式。以聚类中心点作为指纹，如果选取 16QAM 或 64QAM 会增加计算复杂度，还会占用更多的存储空间；BPSK 则过于简单，不利于提取射频指纹，故选择 QPSK 调制可获得更为清晰的星座图。

2.1 星座图的获取与优化处理

OFDM 系统是一种特殊的多载波传输技术，被广泛应用在 WLAN 领域。射频指纹识别技术也可应用在 WLAN 中以识别非法访问接入点(Access Point，AP)。所以本文选用 IEEE 802.11n OFDM 系统模型。然而，在 OFDM 系统中由于发送端和接收端的载波频率不相等、信道衰落、发送端硬件差异等问题会造成相位噪声，相位噪声会影响星座图的分布，因而通过数字信号处理(Digital Signal Processing，DSP)方法降低相位噪声对系统的干扰。将处理后的数字信号在复平面上绘制出来即为星座图。星座图提供了一种方便的方法来研究数字通信系统接收机的性能以及 I/Q 信号之间的关系。从式(10)[4]中可看到，当接收机和发射机的载波频率不相等时，星座图中的数据会有一个随时间 t 变化的相位旋转因子 $e^{j2\pi\theta t+\gamma}$。

$$Y(t)=X(t)e^{j2\pi\theta t+\gamma} \tag{10}$$

其中，$X(t)$为发射机基带信号，$Y(t)$为接收机下变频后的基带信号，γ 为接收机接收信号时的相位误差，θ 为接收机与发射机载波频率之差。可先利用差分处理得到较为稳定的星座图。具体操作如下[5]：

$$D(t)=Y(t)\cdot Y^{*}(t+n)$$

$$D(t)=X(t)e^{j2\pi\theta t+\gamma}\cdot X(t+n)e^{-j2\pi\theta(t+n)-\gamma}$$

$$D(t)=X(t)\cdot X(t+n)e^{-j2\pi\theta n} \tag{11}$$

其中，$Y^{*}(t)$为共轭取值，n 为差分间隔。虽然有一个选择因子 $e^{-j2\pi\theta n}$，但是其为一个恒定的数值。后续将运用 OFDM 系统中的信道估计技术进一步对星座图进行优化。

除此之外，星座图中难免会出现偏离较大的点，这些点在星座图中并不多，但会影响整体的聚类效果，导致得到的聚类中心点缺失稳定性。考虑到这一点，可将星座图中离散程度较大的点适当地进行拉回处理，而不是一味地进行滤除处理：首先设置四个阈值，分别为 ±1.5 和 ±0.2，再将星座图中点的实部和虚部的值分别定义为 i 和 q。当实部 i 的值满足 $i>1.5$ 或 $i<-1.5$ 条件时，将 i 分别赋值为 1.5 和 -1.5；若实部 i 的值满足 $0<i<0.2$ 或 $-0.2<i<0$ 条件时，将 i 分别赋值为 0.2 和 -0.2。同理，虚部的值 q 也按上述过程处理。这样处理的好处是既保留了星座图的离散性，又可得到较为稳定的聚类中心点。

2.2 基于星座轨迹图的射频指纹特征提取

对星座图进行优化后，提取星座图中的指纹特征是最为重要的一个环节。可采用 K 均值(K-means)聚类算法来获取星座图中的 4 个聚类中心点。文献[4]选取的是 5 个聚类中心点，因为未做子载波解映射处理，保留了{$-21,-7,0,21,7$}子载波上的数据，这样会在聚类边缘出现聚类错误。如图 4 所示，数据点的归纳错误将影响聚类中心点的位置。

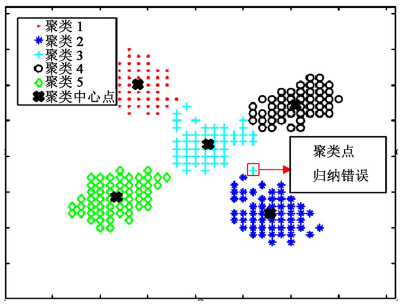


图 4 未做子载波解映射处理的 K-means 聚类

通过计算不同设备间聚类中心点的欧式距离的

和与幅度差值的和，可获得设备的匹配程度，从而可识别每个设备。如图 5 所示，设备 1 到达自身参考聚类中心点的欧式距离的和明显小于其他设备，说明欧式距离的和可用来计算匹配程度。

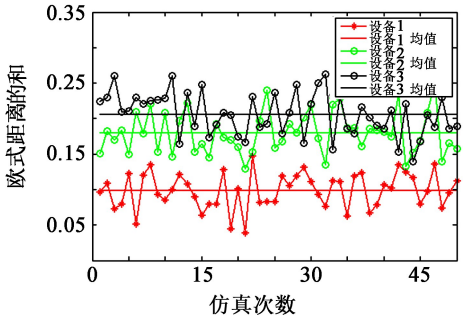


图 5　欧氏距离差异图

由于信道和噪声的影响，即使同一设备在调制前发送相同的数据，所得到的聚类中心点也有微小的差异。如图 6 所示，设备到达自身参考聚类中心点的欧式距离也是变化的。为尽可能地减少误差，在确定参考聚类中心点前必须进行优化操作。具体训练操作如下：

首先将设备通过如图 1 所示系统循环仿真 100 次，得到 100 组聚类中心点，将前 50 次聚类中心点作为训练数据，后 50 次聚类中心点进行识别操作。然后取前 50 次聚类中心点的平均值作为参考聚类中心点，再计算前 50 次聚类中心点到参考聚类中心点间的欧式距离，滤除掉离参考聚类中心点最近和最远的数据点。最后重新计算剩下 48 次聚类中心点的平均值，以这个平均值作为最后的参考聚类中心点，即为射频指纹。

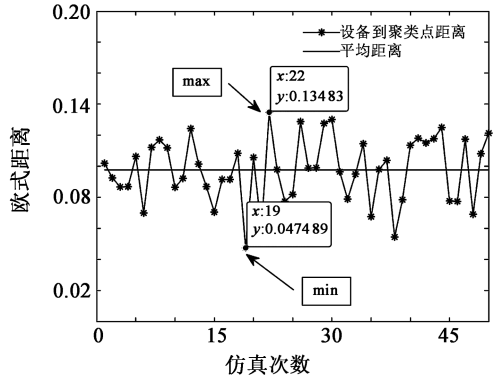


图 6　设备参考聚类中心点的确定

3　一种新颖的二维识别算法

射频指纹识别是一个模型分类问题，由训练和识别阶段组成。其中，将设备优化后的参考聚类中心点作为射频指纹，提取到每个设备的指纹后，再登记入库并完成训练过程。在识别阶段，首先采集待识别设备的射频指纹，然后将其与指纹数据库中的已有指纹进行比较，以确定身份是否合法。如果待识别设备身份合法，再进行身份匹配。

在身份匹配判断过程中，本文主要依照设备间聚类中心的欧式距离的和与幅度差值的和来获取设备相似度的匹配程度。本次实验中，利用 QPSK 调制得到 4 个聚类中心点，将其记为 k_p^i，$0<p\leqslant 4$。当获得设备 i 的聚类中心点后，针对新输入的设备 j，通过式(12)计算聚类中心的欧式距离的和：

$$S_{i,j}=\sum_{p=1}^{p}[d(k_p^i-k_p^j)] \tag{12}$$

其中，$S_{i,j}$ 表示设备 i 与设备 j 聚类中心的欧式距离的和，p 表示 QPSK 中的第 p 个点，d 表示两点间的欧式距离，k_p^i 和 k_p^j 分别表示 i 设备和 j 设备的第 p 个点的坐标。除了利用欧式距离的和来获得匹配程度外，幅度差的和同样也可计算匹配程度，式(13)为幅度差的计算公式。

$$A_{i,j}=\sum_{p=1}^{p}[a(k_p^i-k_p^j)] \tag{13}$$

其中，$A_{i,j}$ 表示设备 i 与设备 j 聚类中心的幅度距离的和，a 表示幅度差值。得到新输入设备 j 的聚类中心点后，如果 $A_{x,j}(x=1,2,3,\cdots,n)$ 最小，则判决 j 设备属于库中所存的第 x 个设备。最后，通过分析 $S_{i,j}$ 和 $A_{i,j}$ 的大小可对输入设备进行准确判断，具体判决流程如图 7 所示。

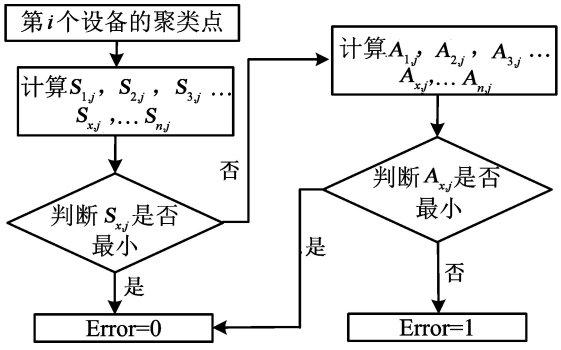


图 7　识别判决流程

在识别前，通过训练过程将每个设备的射频指纹记录到指纹数据库中。在识别阶段，以欧式距离的和作为第一判决特征，当获得设备 i 的 4 个聚类中心点后，计算设备 i 的聚类中心点与射频指纹库中每个设备聚类中心点的欧式距离总和，先判断是否与指纹数据库中设备 i 的欧式距离的和最小。如

果是，则判决正确；如果不是，再看幅度差值的和是否与设备 i 的幅度差值的和最小。

4 仿真结果分析

4.1 SNR 变化下射频指纹识别准确率的变化

在设备量为 10 组、信噪比(Signal Noise Ratio，SNR)在 0～40 dB 的情况下，依照上文中的二维识别过程，得到如图 8 所示的结果。仿真结果显示，在 SNR 为 20 dB 时，识别准确率为 91.4%。相比文献[1]对 4 个无线电设备的识别过程，二维识别算法在确保识别准确率大于 90%的情况下，提升了识别设备容量。此外，文献[1]还采用多特征的机器学习分类算法，不仅占用大量的存储空间，还会增加算法的计算复杂度。

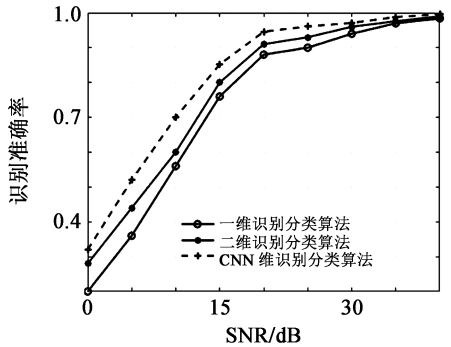


图 8 各算法在不同信噪比下的识别准确率

文献[6]仅根据欧式距离作为判断依据，虽然在高 SNR 环境下有良好的识别性能，但在低 SNR 环境下，识别性能明显降低。本文所提出的欧式距离与幅度距离的二维识别算法与一维识别算法相比，识别准确率提升显著，在 SNR 较低环境下作用更为明显，当 SNR 为 5 dB 时，识别准确率最高可提升 8%。

在分类识别过程中，机器学习算法可以提供出色的分类识别效果，例如卷积神经网络(Convolutional Neural Networks，CNN)算法、决策树算法等。但是这些算法需要长时间的训练过程，且算法复杂度较高[1-3,7]。本文提出的二维识别算法可同时满足低计算复杂度和高识别准确率的要求。

4.2 设备容量变化下射频指纹识别准确率的变化

在现有的研究中，有的算法准确率高达 95%，但只是针对几个设备进行识别，不符合实际的应用场景。考虑到设备容量问题，本文仿真了设备量在 3～50 组时的识别准确率，结果如图 9 所示。

由图 9 可知，在 SNR 为 20 dB 时，对 3 组设备的识别准确率高达 100%。但随着设备量的增加，识别准确率明显下降：当设备容量提升至 50 组时，二维识别算法的识别准确率为 77.8%。由上述仿真结果可知，二维识别算法与一维识别算法相比，不仅可以提高识别准确率，还可以增加系统的设备容量。

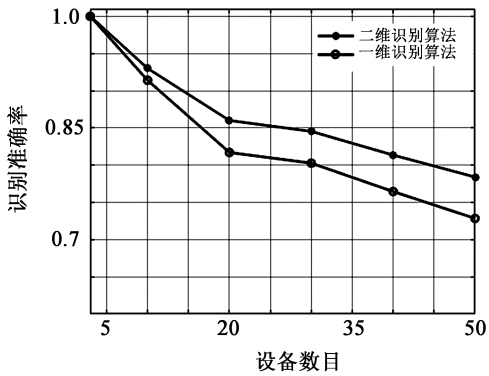


图 9 不同设备容量下的识别准确率

4.3 基于星座图提取的射频指纹特点

无线通信设备的射频指纹是可识别信号的一个或多个特征的集合，用来识别信号发射源。在实际应用时，射频指纹应具备唯一性、稳定性、时不变性等特点。文献[4]已指出，WLAN 网卡提取的射频指纹在 5 个月内保持一致，设备识别分类性能保持稳定。然而，发射机和接收机之间的距离、电压、电流等的变化会影响射频指纹的稳定性[8]。本文将对基于星座图提取的射频指纹进行唯一性和稳定性性能分析。

设备的参考聚类中心点因受信道和噪声的影响，会随着 SNR 的变化而变化，参考聚类中心点也就丢失了射频指纹应具备的唯一性。为解决这个问题，可选取 SNR 为 10 dB 以下的参考聚类中心点作为唯一的射频指纹，在不同 SNR 下仿真得到如图 10 所示的识别情况。如果识别准确率和图 8 所示的识别准确率相似，则可论证基于星座图提取的射频指纹具有唯一性。虽然随着 SNR 的变化，设备的射频指纹会改变，但是本文只选取 SNR 为 10 dB 时的聚类中心点作为射频指纹的固定参考聚类中心点，确保了射频指纹的唯一性。仿真实验表明，射频指纹的参考聚类中心点保持不变，在 SNR 为 20 dB 时，识别准确率可达 90.4%。

通过对射频指纹唯一性特点的分析可知 SNR 对聚类中心点的影响不是特别大。表 1 与表 2 是

50 组中某一设备的 4 个聚类中心点受到 SNR 影响的变化情况。

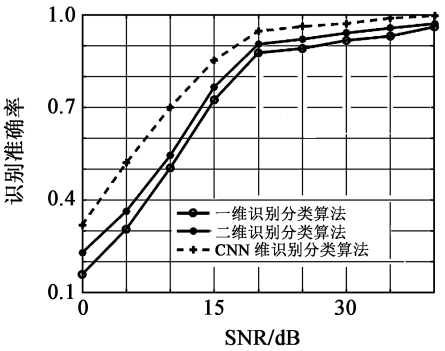


图 10　各算法在参考聚类中心点固定时不同 SNR 下的识别准确率

表 1　各象限聚类中心点实部的变化

参数	实部一	实部二	实部三	实部四
标准值	−0.708 0	0.700 0	0.714 9	−0.710 4
最大值	−0.702 2	0.700 0	0.716 3	−0.709 9
最小值	−0.708 0	0.694 2	0.710 3	−0.715 5
波动范围/%	±0.82	±0.83	±0.64	±0.72

表 2　各象限聚类中心点虚部的变化

参数	虚部一	虚部二	虚部三	虚部四
标准值	0.698 8	0.699 4	−0.713 2	−0.706 3
最大值	0.698 8	0.699 6	−0.710 1	−0.705 2
最小值	0.694 5	0.695 2	−0.713 5	−0.709 1
波动范围/%	±0.62	±0.60	±0.43	±0.40

从表 1 与表 2 中可知，聚类点的波动范围在 ±0.1%以内，且设备的聚类点一般在小数点后第三位开始变化。通过大量实验发现，设备与设备之间聚类点的差异往往出现在小数点后第二位，说明允许设备的聚类点有较小的变化。通过以上分析可知 SNR 对射频指纹的影响小于设备自身硬件对射频指纹的影响，正是因为这种关系，才可利用聚类点作为射频指纹。

5　结束语

本文首先建立了 IEEE 802.11n OFDM 系统模型，对正交调制器和功率放大器的硬件差异建立了相应的数学模型。选用星座图中聚类中心点作为射频指纹进行研究，对星座图进行适当的拉回处理后，既保留了一定的离散性，又可得到较为稳定的聚类点。将优化后的星座图按 4 类进行 K 均值聚类，避免了聚类错误现象。仿真发现，设备到达自身参考聚类点的欧式距离的和明显小于其他设备，验证了欧式距离的和可用来计算匹配程度的方案。通过对设备 50 组聚类点的训练，得到了设备最终的参考聚类中心点，并以此作为射频指纹。实验结果表明，所提出的二维识别算法可获得较高的识别准确率，还可降低算法的计算复杂度和训练时间。当 SNR 为 20 dB 且设备容量为 10 组时，识别准确率为 91.4%，在 SNR 为 5 dB 时所提出的二维识别算法的识别准确率最高可提升 8%，设备容量为 50 组情况下识别准确率为 77.8%，并且基于星座图提取的 RF 指纹具有唯一性与稳定性等优点。

参考文献：

[1] Wang X L, Zhang Y F, Zhang H X, et al. Identification and authentication for wireless transmission security based on RF-DNA fingerprint[J]. Eurasip J. on Wireless Communications and Networking, 2019, 12(1): 120-131.

[2] Yu J, Hu A, Li G, et al. A robust RF fingerprinting approach using multisampling convolutional neural network[J]. IEEE Internet of Things J., 2019, 6(4): 6786-6799.

[3] 吴皓威，赵俊波，徐浩然，等. 全双工终端的收发 I/Q 不平衡估计与补偿算法[J]. 通信学报，2017，38(1)：141-148.
Wu Haowei, Zhao Junbo, Xu Haoran, et al. Estimation and compensation for transmitter and receiver I/Q imbalance of full-duplex terminals[J]. J. on Communications, 2017, 38(1): 141-148.

[4] 陈　强. 基于差分星座图的射频指纹提取方法研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2018.
Chen Qiang. Research on authentication technology based on radio frequency fingerprint[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.

[5] 彭林宁，胡爱群，朱长明. 基于星座轨迹图的射频指纹提取方法[J]. 信息安全学报，2015，1(1)：50-58.
Peng Linning, Hu Aiqun, Zhu Changming. Radio fingerprint extraction based on constellation trace figure[J]. J. of Cyber Security, 2015, 1(1): 50-58.

[6] Peng Linning, Hu Aiqun, Jiang Yu, et al. A differential constellation trace figure based device identification method for ZigBee nodes [C]// 2016 8th Inter. Conf. on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), 2016: 1-6.

[7] 袁红林，陆小丹，徐　晨. 基于 B-Spline 神经网络的宽带通信发射机指纹估计[J]. 应用科学学报，2019，37(1)：16-27.
Yuan Honglin, Lu Xiaodan, Xu Chen. Fingerprints based on B-Spline neural network[J]. J. of Appl. Sciences-Electronics and Information Engineering, 2019, 37(1): 16-27.

[8] Wang W, Sun Z, Piao S. Wireless physical-layer identification: Modeling and validation[J]. IEEE Trans. on Information Forensics and Security, 2016, 11(9): 2091-2106.

作者简介：

袁建国(1968－)，男，重庆人，博士，教授，硕士生导师，主要研究方向为电子与通信工程技术，尤其是通信系统中 FEC 编译码技术与 OFDM 技术。

光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.028

基于互信息的紫外成像仪中图像配准研究

侯思祖*，陈　宇，刘雅婷

（华北电力大学 电气与电子工程学院，河北 保定 071003）

摘　要： 紫外成像仪为实现放电点定位和电气设备故障诊断，需要对来自不同传感器的紫外与可见光图像进行配准。针对紫外与可见光图像成像原理差异较大，特征点提取及匹配困难的问题，文章提出一种基于互信息的紫外与可见光图像配准算法并将其应用到紫外成像仪中完成实时配准。首先计算紫外与可见光图像中的互信息，将互信息作为相似性测度，采用刚体变换模型对图像进行变换，然后通过1＋1进化算法求取最优相似性测度时的空间变换参数而完成图像配准，并通过仿真和紫外成像仪样机验证了所提算法的有效性。

关键词： 紫外成像仪；图像配准；互信息；1＋1进化算法

中图分类号： TP391　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0598－07

Image Registration in Ultraviolet Imager Based on Mutual Information

HOU Sizu，CHEN Yu，LIU Yating

（School of Electrical and Electronic Engineering，North China Electric Power University，Baoding 071003，CHN）

Abstract： In order to achieve discharge point location and electrical equipment fault diagnosis，UV imagers need to register UV and visible light images from different sensors. Due to the large difference between the imaging principles of ultraviolet and visible light images and the difficulty in feature extraction and matching，a mutual image-based UV and visible image registration algorithm is proposed and applied to the UV imager for real-time registration. Firstly，the mutual information in the ultraviolet and visible light images is calculated. The mutual information is used as the similarity measure. The image is transformed by the rigid body transformation model. The image transformation parameters are obtained by the 1＋1 evolutionary algorithm to obtain the spatial transformation parameters of the optimal similarity measure，and the effectiveness of the proposed algorithm is verified by simulation and UV imager.

Key words： ultraviolet imager；image registration；mutual information；1＋1 evolutionary algorithm

0　引言

电力和铁路是国家的重要基础设施，其中输配电线路、变电站、高压设备及电气化铁路设备都会因为环境、安装、维护等因素的影响而产生高压放电现象。当带电体局部应力超过临界值时，会使周围空气电离而产生电晕放电现象并伴随产生光波、声波、电磁辐射和高频脉冲电流等[1-2]。这不仅会造成输电线路线损，同时也会降低电气设备的绝缘性能，导致设备缺陷和故障，严重威胁电网和铁路的运行安全，电磁波也会对无线通信产生很大的脉冲干扰[3]，威胁通信安全。因此研究一种能通过检测放电现象及时发现绝缘缺陷和预防故障发生的技术是非常必要的。

一般情况下，电晕放电可辐射的光波段覆盖紫

收稿日期：2020－03－03.

基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFF01011900).

* 通信作者：侯思祖　E-mail：1647354604@qq.com

外、红外、可见光谱段[4]。在电力巡检中，红外检测是一种常用的放电检测手段[5]，然而红外检测是利用热量来检测放电现象，不仅容易受到天气等环境因素的影响，而且当检测到热量信息时，表明电气设备已经发生了严重损坏，因此具有很大的安全隐患。而电晕放电的紫外光谱特性能量主要集中在 200～400 nm 波段，在自然界中，太阳辐射的紫外光在经过臭氧层时，其 240～280 nm 波段的紫外光会被吸收[6]，这一波段也被称为“日盲”紫外波段。所以，可以利用“日盲”紫外波段进行放电检测，由于高灵敏度的紫外探测可以发现高压设备的早期放电现象，故可及时地检测到高压电气设备的缺陷故障并提早解决，以保障电网及铁路的运行安全[7-9]。

深截止“日盲”紫外滤波片只能通过 240～280 nm 波段的紫外光，紫外镜头通过对紫外光信号的探测得到紫外光图像。由于成像后图像中仅包含紫外光信息，必须同时结合可见光通道对相同目标进行可见光成像，最后通过图像融合技术将目标与背景两幅图像进行融合，充分利用两者的互补信息，更加全面、准确地描述放电点位置、放电强度和放电类型等信息[10-11]。

图像配准是图像融合的前提和保障，对于来自不同镜头的图像进行融合时，首先要保证两幅图像在空间上对齐[12]。目前，图像配准技术在遥感、医学、模式识别以及各种异源传感器图像融合等领域中应用广泛[13]。Chen 等[14]提出了一种基于角点仿射变换的紫外双光谱图像配准技术，给紫外双光谱图像配准提供了很好的思路。Cao 等[15]针对 CT 及 MRI 异源图像配准提出了一种多模态的基于区域自适应的配准方法。Du 等[16]针对红外与可见光图像配准提出了一种尺度不变的强度保持特征描述符，通过对角点进行匹配，使用仿射函数进行配准。但是这些研究都是在两幅图像具有一定相似特征的基础上进行的，对于相似特征较少的图像并不能很好地处理，存在很大的误差。

因此，针对紫外图像与可见光图像之间相似特征难以匹配的问题，本文从像素灰度的角度，提取两幅图像的互信息，通过将互信息作为相似性测度，采用 1+1 进化算法寻找最优刚体变换模型，通过该最优变换模型实现紫外图像与可见光图像在空间上的对齐。该刚体变换模型的有效性在实际的紫外成像仪样机上得到了验证。

1　互信息配准

1.1　互信息配准流程

信息论中将互信息定义为信息之间的关系，可以表示为两个随机变量之间统计相关性的度量，由此可以得出图像互信息的计算方法。作为图像多模态配准中的度量，图像互信息利用对图像灰度值的统计数据形成单个图像的灰度值概率函数和两个图像相似部分对应的灰度值联合概率函数，以此来衡量两幅图像的相关程度。在图像配准的过程中，认为两幅图像的相关性最大时对应的互信息也最大。基于互信息的图像配准最早在 1995 年被用于医学图像配准中，此后研究人员对于互信息的配准方法做了大量研究。

对于以互信息作为相似性测度的图像配准来说，目标就是寻找一个空间变换模型，使得两幅图像中的对应点相互对齐，以便进行比较或融合。基于互信息的图像配准流程如图 1 所示。

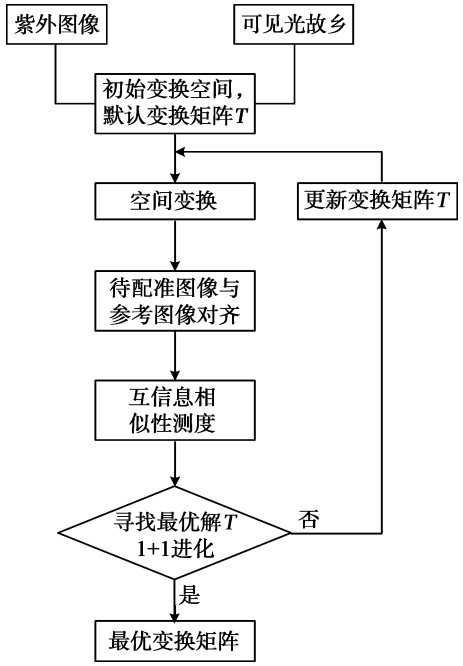


图 1　基于互信息的图像配准流程图

它的流程可以概括为：首先提取两幅图像的特征空间信息，计算紫外图像与可见光图像之间的互信息，然后通过优化搜索算法对空间变换矩阵进行更新迭代，从中找出使两幅图像相似性测度互信息最大的最优变换矩阵 $\boldsymbol{T}$，最后根据变换矩阵实现对紫外图像的空间变换，使其在空间上与可见光图像配准，达到图像融合的要求。

1.2 图像互信息相关理论

基于图像灰度信息的相似性测度是一种通过统计和概率估计的方法对图像进行匹配的表示相似程度的参数。常见的图像灰度信息相似性测度包括互相关法、均方差和法及互信息法等。在多模态图像中最常用的为互信息法，互信息法是一种不需要对源图像做预处理的方法，被广泛应用于医学图像配准中。互信息法对于各种模式的图像配准都具有有效性，鲁棒性及可靠性较高。本文采用基于互信息的相似性测度来提高紫外与可见光图像的匹配精度，下面介绍一些图像互信息的基本概念。

1)熵

在信息论中，熵表示随机变量的不确定性。假设随机事件 x_i 出现的概率为 p_i，则信息量为：$I(x_i)=-\log 2p_i$，单位为 bit。而信息量的数学期望为信源的平均信息量，即信源的信息熵。

假设一个随机变量 X 内存在 N 个随机事件 $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$，随机事件出现的概率集合为 $P=\{p_1,p_2,\cdots,p_n\}$，也就是随机变量 X 的概率密度函数为 $p(x)$，则随机变量 X 的熵可以定义为

$$H(X)=-\sum p(x)\log p(x) \tag{1}$$

此外联合熵表示两个随机变量的相关性。联合熵越小表示这两个随机变量越相关，若两个随机变量越不相关，它们的联合熵会越大。假设 $p_{XY}(x,y)$ 是两个随机变量 X,Y 的联合概率密度函数，则联合熵的数学定义为

$$H(X,Y)=-\sum_{x,y} p_{XY}(x,y)\log p_{XY}(x,y) \tag{2}$$

2)图像互信息

图像互信息可以度量两幅图像的统计独立程度，基于前面熵和联合熵的定义，给定紫外与可见光图像 UV 和 V，他们的互信息可以定义为

$$MI(\mathrm{V},\mathrm{UV})=H(\mathrm{V})+H(\mathrm{UV})-H(\mathrm{V},\mathrm{UV}) \tag{3}$$

或

$$MI(\mathrm{V},\mathrm{UV})=\sum_{\mathrm{v},\mathrm{uv}} p(\mathrm{v},\mathrm{uv})\log\frac{p(\mathrm{v},\mathrm{uv})}{p(\mathrm{v})p(\mathrm{uv})} \tag{4}$$

式(3)中，$MI(\mathrm{V},\mathrm{UV})$ 为可见光与紫外光图像的互信息，$H(\mathrm{V})$，$H(\mathrm{UV})$ 和 $H(\mathrm{V},\mathrm{UV})$ 分别表示可见光图像的熵、紫外光图像的熵、可见光与紫外光图像的联合熵。式(4)中，$p(\mathrm{v},\mathrm{uv})$ 表示可见光与紫外光图像的联合概率密度函数，$p(\mathrm{v})$ 和 $p(\mathrm{uv})$ 分别表示可见光图像的概率密度函数和紫外光图像的概率密度函数。根据互信息的定义，对于可见光与紫外光的互信息计算流程如图 2 所示。

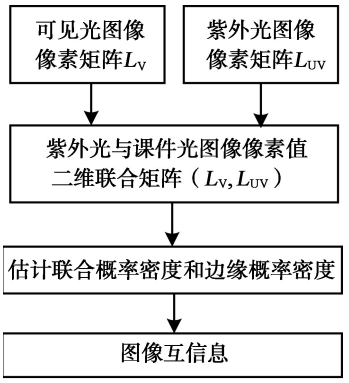


图 2 紫外光与可见光图像互信息计算流程

可见光图像和紫外光图像的像素灰度值分别表示为 $\boldsymbol{L}_{\mathrm{V}}(i,j)$，$\boldsymbol{L}_{\mathrm{UV}}(i,j)$：

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{V}}(i,j)=\begin{bmatrix} L_{\mathrm{V}}(1,1) & L_{\mathrm{V}}(1,2) & \cdots & L_{\mathrm{V}}(1,n) \\ L_{\mathrm{V}}(2,1) & L_{\mathrm{V}}(2,2) & \cdots & L_{\mathrm{V}}(2,n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{\mathrm{V}}(m,1) & L_{\mathrm{V}}(m,2) & \cdots & L_{\mathrm{V}}(m,n) \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{UV}}(i,j)=\begin{bmatrix} L_{\mathrm{UV}}(1,1) & L_{\mathrm{UV}}(1,2) & \cdots & L_{\mathrm{UV}}(1,n) \\ L_{\mathrm{UV}}(2,1) & L_{\mathrm{UV}}(2,2) & \cdots & L_{\mathrm{UV}}(2,n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{\mathrm{UV}}(m,1) & L_{\mathrm{UV}}(m,2) & \cdots & L_{\mathrm{UV}}(m,n) \end{bmatrix} \tag{5}$$

其中，$i=1,2,\cdots,m$，$j=1,2,\cdots,n$，其中 i,j 分别表示像素的横纵坐标，m,n 分别表示图像的宽高像素数。先将可见光图像和紫外图像对应坐标的像素值整合成一个二维向量$(\boldsymbol{L}_{\mathrm{V}}(i,j),\boldsymbol{L}_{\mathrm{UV}}(i,j))$，$i=1,2,\cdots,m$，$j=1,2,\cdots,n$。然后通过直方图估计法估计出两个图像的联合概率密度 $p(\mathrm{v},\mathrm{uv})$ 和边缘概率密度 $p(\mathrm{v})=\sum p(\mathrm{v},\mathrm{uv})$，$p(\mathrm{uv})=\sum p(\mathrm{v},\mathrm{uv})$。最后，根据式(4)计算出两幅图像的互信息。

2 最优空间变换

2.1 1+1 优化算法

对于基于互信息的图像配准来说，当寻找到两幅图像最大的互信息时，得出的空间变换参数会使紫外图像(待配准图像)在空间上与可见光图像(参考图像)对齐。这里需要采用一种有效的进化搜索算法通过迭代计算来求得满足最大互信息的空间变换参数。

1+1 算法是一种进化优化算法[17]，其流程如图 3 所示，通过该算法可以寻找最优的配准参数。该

算法可以满足大量的数据处理需求，同时克服了不同尺度参数的问题。在一般的进化算法中，s 表示一个个体，它的能量 $E(s)$ 表示该个体的适应度。通常来说，一个个体的能量越小，它的适应度越强。现有的个体会在每个优化步骤开始时形成种群，而作为每一优化步骤的结果，新个体（子体）是由群体（父体）的某种突变产生的。新个体被增加到种群中，然后随着适者群的生存而被减少到原来的种群规模。在 1+1 进化算法中，种群规模和新个体的数量都为 1。其中突变是一种均值为 $\mu = s - parent$、协方差为 ε^2 的多维正态分布的随机向量。在每一次优化步骤中协方差 ε^2 会自适应地变换。如果新的种群由更合适的个体组成，则增长因子 $\boldsymbol{C}_{\text{grow}}$ 会使 ε^2 增加，反之降低因子 $\boldsymbol{C}_{\text{shrink}}$ 会使 ε^2 减小。

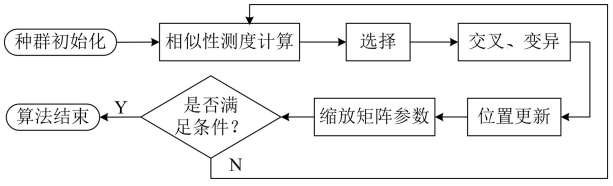


图 3　1+1 进化算法流程图

1+1 算法通过随机选择参数空间中的新位置来迭代，该新位置由当前位置为中心的概率函数控制。原始的 1+1 优化算法会对所有的参数使用同一个方差，而各向同性概率函数会受局部信息更新规则的影响而增加或减少。1+1 进化算法的数学表达式如下：

$$\boldsymbol{\varphi}_t \sim N(0,1) \tag{6}$$

$$\boldsymbol{x}_{t+1} = \boldsymbol{x}_t + \boldsymbol{\alpha}_t \boldsymbol{\varphi}_t \tag{7}$$

$$\boldsymbol{\alpha}_{t+1} = \begin{cases} \boldsymbol{\alpha}_t \boldsymbol{C}_{\text{grow}}, & f(x_{t+1}) < f(x_{\text{opt}}) \\ \boldsymbol{\alpha}_t \boldsymbol{C}_{\text{shrink}}, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{x}_{\text{opt}} = \begin{cases} \boldsymbol{x}_{t+1}, & f(x_{t+1}) < f(x_{\text{opt}}) \\ \boldsymbol{x}_{\text{opt}}, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{9}$$

其中，$\boldsymbol{C}_{\text{grow}}$，$\boldsymbol{C}_{\text{shrink}}$，$\boldsymbol{x}_0$，$\boldsymbol{\alpha}_0$ 是已知参数，表示均值为 0、方差为 1 的各向同性正态分布的多维随机向量。作为各向同性概率函数的结果，可能不会调整相等的缩放参数和能量的局部特征。因此，利用二阶统计量来更新多维高斯概率函数，并以此对 1+1 进化算法进行改进。缩放参数 α_t 表示的正常密度函数的简单缩放被矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的乘法所替代，也就是协方差 $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{A}^* \boldsymbol{A}'$，其中 $\boldsymbol{A}'$ 是 $\boldsymbol{A}$ 的转置。可参考以下公式：

$$\boldsymbol{\varphi}_t \sim N(0,1) \tag{10}$$

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{\varphi}_t + m \sim N(m, \boldsymbol{A}^* \boldsymbol{A}') \tag{11}$$

因此，缩放和平移向量 $\boldsymbol{\varphi}$ 就是服从均值为 m、协方差为 $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{A}^* \boldsymbol{A}'$ 的正态分布。在每次迭代搜索过程中，通过新的局部信息来更新协方差矩阵，以此求得最大互信息。

2.2　空间变换模型

根据相似性测度互信息取最大的原则，采用 1+1 进化算法对空间变换参数进行搜索迭代，寻找最优空间变换参数，使得紫外图像与可见光图像在空间坐标上对齐。

图像配准的主要目的就是解决两幅图像在空间上的映射问题。其中待配准图像与参考图像之间可能会存在平移、旋转、尺度变换甚至是非线性变换，如图 4 所示。

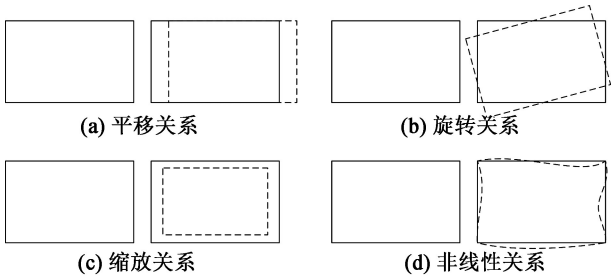


图 4　图像间变换关系示意图

由于紫外成像仪中两个镜头的摆放位置是经过光学对准的，故两幅图像之间不存在旋转问题，配准过程中只会涉及平移。这里采用简单的刚体变换，刚体变换是一种保持图像形状，并保持图像中任意两点间的距离不变的图像变换模型。刚体变换的数学表达式如下：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & t_x \\ \sin\theta & \cos\theta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

其中，(x, y) 是原图像灰度值的坐标，(x', y') 是经过刚体变换后的图像灰度值的坐标，θ 为旋转角度，t_x 为水平平移量，t_y 为竖直平移量，单位为像素。

3　仿真结果

3.1　主观分析

本文提出的基于互信息的紫外与可见光图像配准算法的仿真流程图如图 5 所示。

利用对互信息的相似性测度进行度量，以刚体变换作为空间变换模型实现待配准图像的变换，通过 1+1 优化算法搜索满足相似性测度的空间变换参数，然后将其应用到待配准图像上以实现紫外光图像与可见光图像在空间上的对齐，并对经过配准

的图像计算叠加精度，以证明算法的有效性。

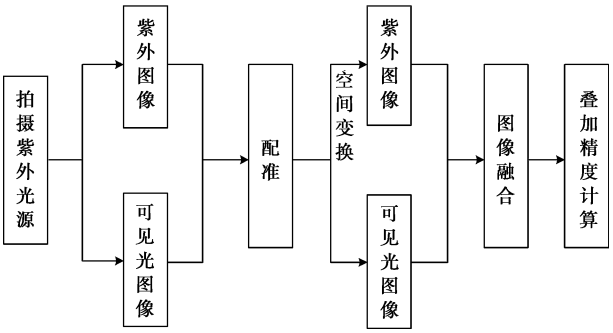


图 5 仿真流程图

图 6～8 分别表示采用基于互信息的图像配准算法对 6，10 和 15 m 距离下的十字低压汞灯紫外光图像和可见光图像进行配准的仿真结果。对配准后的紫外光图像与可见光图像进行简单叠加后可以明显看到紫外光图像与可见光图像已经很好地完成了空间对齐，这表明基于互信息的紫外与可见光图像配准算法在主观视觉上可以满足紫外与可见光图像配准的要求。

(a) 可见光图像 (b) 紫外光图像 (c) 配准后的融合图像

图 6 6 m 距离下基于互信息的图像配准算法仿真结果

(a) 可见光图像 (b) 紫外光图像 (c) 配准后的融合图像

图 7 10 m 距离下基于互信息的图像配准算法仿真结果

(a) 可见光图像 (b) 紫外光图像 (c) 配准后的融合图像

图 8 15 m 距离下基于互信息的图像配准算法仿真结果

3.2 紫外光与可见光图像叠加精度

前面的仿真结果表明基于互信息的紫外与可见光图像配准方法的配准结果在主观视觉方面有着很好的效果。下面通过专门用来测量紫外成像仪中紫外光图像与可见光图像的配准精度指标从客观数据方面证实本文提出的基于互信息的紫外与可见光图像配准算法的精确性。该配准精度指标表示紫外成像仪中紫外通道与可见光通道对同一紫外光源成像时的最大叠加角度偏差，单位为 mrad，测试方法如图 9 所示，在保证同一视场角下，通过紫外成像仪对紫外平行光管进行成像，成像后求取紫外通道中心点（质心）和可见光图像中线点（质心），由式(13)求得最大叠加角度偏差，然后换算成叠加精度。

$$d\theta=\sqrt{\left(\frac{dx}{W}\times\theta_W\right)^2+\left(\frac{dy}{H}\times\theta_H\right)^2} \tag{13}$$

其中，$d\theta$ 表示最大叠加角度偏差，单位为(°)，dx，dy 表示紫外光图像与可见光图像质心坐标的差值，W，H 分别是横向和纵向像素数，θ_W，θ_H 分别是水平方向和竖直方向视场角度。经过式(12)计算后得出最大角度偏差 $d\theta$，通过角度弧度换算公式求得紫外与可见光叠加精度 $d\omega$。

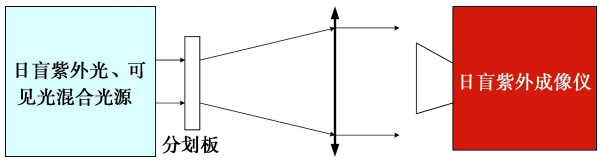


图 9 紫外光与可见光叠加精度测试示意图

通过对经过图像配准算法配准的紫外光图像和可见光图像测试叠加精度以验证基于互信息的紫外光与可见光图像配准算法的有效性。对 6～15 m 不同距离、不同位置的十字低压汞灯进行配准，并对配准后的图像进行测试。首先通过对十字汞灯求取质心的方法求得紫外光图像和可见光图像的质心坐标，然后根据式(13)计算最大叠加角度偏差，并计算叠加精度。计算结果如表 1 所示。

表 1 6～15 m 距离的紫外与可见光图像叠加精度

距离/m	紫外光图像质心坐标	可见光图像质心坐标	叠加角度偏差 $d\theta$/(°)	叠加精度 $d\omega$/mrad
6	(859.67,705.17)	(861.46,706.99)	0.010 1	0.18
7	(1 004.62,716.85)	(1 006.36,715.41)	0.008 6	0.15
8	(1 048.50,725.00)	(1 049.82,722.39)	0.012 4	0.22
9	(988.81,738.31)	(990.28,736.39)	0.009 8	0.17
10	(982.53,729.07)	(982.88,724.19)	0.021 7	0.38
11	(836.33,687.33)	(836.96,685.55)	0.008 2	0.14
12	(884.39,732.78)	(884.44,729.82)	0.013 2	0.23
13	(1 122.00,623.50)	(1 121.03,620.56)	0.013 5	0.23
14	(1 025.13,702.36)	(1 023.56,699.32)	0.014 5	0.25
15	(911.83,680.92)	(912.05,678.96)	0.008 7	0.15

根据以上所给信息可计算得出，在 6～15 m 距离下不同位置的紫外与可见光图像叠加精度远小于项目所提指标 0.5 mrad，故可以满足实际的工程需要。通过此验证可以确认基于互信息的紫外与可见光图像配准算法对于紫外成像仪中的紫外配准是非常有效的。

4　紫外成像仪中的实时配准

紫外成像仪的图像配准采用机械配准和外部标定参数的方式。机械配准指的是根据光学方面的计算将紫外相机与可见光相机按照一定的位置进行固定以满足两通道成像尽量保持在同一光轴，经过机械配准后紫外与可见光相机成像后会使两幅图像的叠加具有近似相同空间变换，如图 10 所示。也就是说，对于同一台紫外成像仪，可以采用外部计算好的空间变换参数来进行校正。采用本文提出的基于互信息的紫外与可见光图像配准算法来计算空间变换参数，通过此空间变换参数来实现对经过机械配准的图像进行软件补偿。

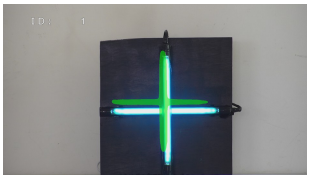


图 10　机械配准后的融合图像

对不同距离下的十字低压汞灯进行拍摄，并计算其空间变换参数，如表 2 所示。通过分析计算所得的空间变换参数，其中 $\cos\theta=1$，$\sin\theta\approx0$，可知对于待配准图像的旋转角度可近似等于 0。t_x，t_y 分别为水平平移和竖直平移的像素数。

在实际紫外成像仪样机中配有激光测距模块，可以通过该模块测量目标与紫外成像仪之间的距离，并根据查找表的方式按距离对放电目标的紫外图像进行变换。其中图 11 为紫外成像仪未经过配准所拍摄的在 6，10 和 15 m 距离下的融合图像。图 12 为紫外成像仪在经过上述配准方法后，所拍摄的在 6，10 和 15 m 距离下的已配准的融合图像。可以看到经过上述配准方法后得到的融合图像在主观视觉上已满足配准要求。

表 2　不同距离下的空间变换参数

距离/m	变换参数			
	$\cos\theta$	$\sin\theta$	t_x	t_y
6	1	0.006 5	24.976 8	54.284 8
7	1	0.007 6	23.777 0	57.665 3
8	1	0.009 9	23.550 8	60.953 4
9	1	0.008 7	23.929 0	61.436 5
10	1	0.005 1	26.655 1	54.751 5
11	1	0.000 000 9	26.402 1	53.932 4
12	1	0.000 04	26.439 6	53.233 1
13	1	0.009 3	23.598 2	55.289 6
14	1	0.000 1	23.608 3	55.697 1
15	1	0.000 1	24.023 6	54.697 1

(a)6 m 距离　(b)10 m 距离　(c)15 m 距离

图 11　不同距离下未配准的融合图像

(a)6 m 距离　(b)10 m 距离　(c)15 m 距离

图 12　不同距离下配准后的融合图像

因为这些参数是在外部进行标定的，在实际应用中已经将配准参数计算完毕并按照查找表的方式写入到图像融合处理平台中，故可直接通过表中参数对紫外图像进行变换。在紫外成像仪样机检测中，图像配准及融合后的实时性达到 40 f/s，实现了配准及图像融合的实时性。

此外，通过对已配准紫外成像仪进行叠加精度测试，从客观数据来证明本算法应用到紫外成像仪的有效性。3.2 节已经介绍了一种测量紫外成像仪图像叠加精度的计算方法，本节按照此方法对已完成配准的紫外成像仪进行叠加精度的测试，测试结果如表 3 所示。

表 3　已完成配准的紫外成像仪叠加精度测试结果

距离/m	紫外光图像质心坐标	可见光图像质心坐标	叠加角度偏差 $d\theta$/(°)	叠加精度 $d\omega$/mrad
6	(981.11,736.33)	(979.09,740.55)	0.019 9	0.34
7	(1 202.43,736.62)	(1 199.93,741.09)	0.021 5	0.37
8	(1 057.67,873.33)	(1 056.63,877.30)	0.018 0	0.31
9	(1 168.11,760.99)	(1 170.46,764.64)	0.018 0	0.31
10	(870.26,730.25)	(872.99,732.75)	0.013 0	0.22
11	(880.79,737.00)	(877.37,738.74)	0.013 8	0.24
12	(1 207.36,714.38)	(1 209.28,716.89)	0.012 9	0.22
13	(1 239.14,699.00)	(1 237.98,702.25)	0.015 0	0.26
14	(1 210.27,801.25)	(1 209.34,804.89)	0.016 5	0.28
15	(911.35,789.35)	(910.38,792.38)	0.013 8	0.24

5 结论

紫外成像仪利用紫外图像与可见光图像两者之间的信息，经过严格的图像配准来精确地定位放电点的位置，以满足电力及铁路巡检中对于故障的定位及诊断。图像配准一般采用基于特征的配准方法，将两幅图像的相似特征进行匹配，计算空间变换参数。而对于紫外图像来说，由于紫外图像与可见光图像之间的相似特征很少，特征匹配误差较大，故本文提出采用基于互信息的方法对紫外图像和可见光图像进行配准，该方法利用图像的灰度计算两者之间的互信息，并采用进化算法求取最大相似性测度，从而得出满足要求的空间变换参数。由于紫外成像仪镜头结构的特性，实时配准时只需要在仪器出厂前校准配准参数即可，故该方法虽然消耗时间较长，但相比于基于特征的配准方法更适合于紫外图像的配准。对不同距离下拍摄的图像进行配准的仿真试验及应用到实际紫外成像仪中都验证了本文所提方法的有效性。

参考文献：

[1] 艾建勇，金立军. 基于紫外图像的接触网棒瓷绝缘子污秽状态检测[J]. 电工技术学报，2016，31(10)：112-118.
Ai J Y，Jin L J. Rod porcelain insulator filth state detection of catenary based on ultraviolet image [J]. Trans. of China Electrotechnical Society，2016，31(10)：112-118.

[2] 王胜辉，冯宏恩，律方成. 电晕放电紫外图像参数变化特性及距离修正[J]. 仪器仪表学报，2014，35(8)：1823-1830.
Wang S H，Feng H En，LV F C. Parameter variation characteristic and observation distance correction of corona discharge ultraviolet image [J]. Chinese J. of Scientific Instrument，2014，35(8)：1823-1830.

[3] 隋晓杰，宋守信. 高压输电线路电晕放电分析[J]. 电力建设，2006，27(3)：37-38.
Sui X J，Song S X. Analysis on corona discharge of HV transmission lines[J]. Electric Power Construction，2006，27(3)：37-38.

[4] 贾志东，王林军. 基于紫外成像技术的瓷绝缘子串放电程度量化评估[J]. 高电压技术，2017，43(5)：1467-1475.
Jia Z D，Wang L J. Quantitative assessment of porcelain insulator string discharge degree based on UV imaging technology[J]. High Voltage Engineering，2017，43(5)：1467-1475.

[5] 肖慧慧，胡晓东，邓 阳. 综合应用多种带电检测手段确诊设备局部放电缺陷[J]. 机车电传动，2018(4)：101-102，123.
Xiao H H，Hu X D，Deng Y. Comprehensive application of various live detection methods for partial discharge detection [J]. Electric Drive for Locomotives，2018(4)：101-102，123.

[6] Zhang Y B，Da-Jian L I，Zhao J. Corona UV imaging detection technology and its application[J]. Chinese J. of Quantum Electronics，2014，31(5)：622-627.

[7] 吴礼刚，何文荣，胡晋荪，等. 日盲紫外-可见光双光谱照相机系统[J]. 光学精密工程，2010，18(7)：1529-1535.
Wu Ligang，He Wenrong，Hu Jinsun，et al. Solar blind UV and visible dual-spectral camera [J]. Optics and Precision Engin.，2010，18(7)：1529-1535.

[8] Jiao Guohua，Zhang Yizhou，Dong Yuming，et al. An optical system in solar-blind UV for corona discharge detection[C]// Proc. IEEE Inter. Conf. on Real-time Computing & Robotics，2016.

[9] 匡 蕾，顾 燕. 紫外像增强器用于电力安全检测的研究[J]. 红外技术，2015，37(11)：986-990.
Kuang L，Gu Y. Research on the application of UV image intensifier in security detection of power equipment[J]. Infrared Technol.，2015，37(11)：986-990.

[10] Hu Bo，Ma Lixin，Yuan Shujuan，et al. New corona ultraviolet detection system and fault location method[C]// 2012 China Inter. Conf. on Electr. Distribution，2012：1-4.

[11] Luo Y，Wu Y，Hu J，et al. Research on detection method for spatial discharge of high voltage electrical equipment based on ultraviolet monitoring video[C]// 2017 IEEE 5th Inter. Symp. on Electromag. Compatibility，2017：1-5.

[12] Elstrom U V，Wysocka B A，Muren L P，et al. Daily kV cone-beam CT and deformable image registration as a method for studying dosimetric consequences of anatomic changes in adaptive IMRT of head and neck cancer [J]. Acta Oncologica，2010，49(7)：1101.

[13] Fan B，Huo Ch L，Pan Ch H. Registration of optical and SAR satellite images by exploring the spatial relationship of the improved SIFT[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett.，2013，10(4)：657-661.

[14] Chen T，Yuan Sh，Li J P，et al. Image registration for a UV-Visible dual-band imaging system[J]. Optics and Lasers in Engin.，2018，105(6)：209-218.

[15] Cao H X，Yang J，Gao Y，et al. Region-adaptive deformable registration of CT/MRI pelvic images via learning-based image synthesis [J]. IEEE Trans. on Image Processing，2018，27(7)：3500-3512.

[16] Du Q，Fan A，Ma Y，et al. Infrared and visible image registration based on scale-invariant PIIFD feature and locality preserving matching [J]. IEEE Access，2018，6：64107-64121.

[17] Styner M，Brechburhler C，Szekely G，et al. Parametric estimate of intensity inhomogeneities applied to MRI[J]. IEEE Trans. on Medical Imaging，2000，19：153-165.

作者简介：

侯思祖(1962—)，男，教授，博导，研究方向包括配网故障定位诊断、电力通信网综合管理和检测。

《半导体光电》编辑委员会

顾　问　王占国(科学院院士)　姚建铨(科学院院士)　方家熊(工程院院士)

主　任　欧　黎

副主任　蒋志伟

委　员　(以姓氏笔画为序)

王小勇　方　亮　孔　梅　宁永强　孙长征　刘秉琦　刘　胜　刘　斌
华　勇　安俊明　李　成　李向阳　李国强　余　华　邹卫文　张卫平
张佰君　沈鸿烈　宋凝芳　罗风光　周立庆　孟　洲　祝连庆　赵明富
徐学良　高新江　郭　霞　崔一平　龚　敏　蒋亚东　喻志农　童杏林
熊　平　潘　武　瞿鹏飞

半导体光电
BANDAOTI GUANGDIAN
(双月刊　1976年创刊)
第41卷　第4期　2020年8月

SEMICONDUCTOR OPTOELECTRONICS
(Bimonthly, Started in 1976)
Vol. 41　No. 4　August　2020

主管单位	中国电子科技集团有限公司	**Competent Authorities**	China Electronics Technology Group Corporation
主办单位	重庆光电技术研究所	**Sponsored by**	Chongqing Optoelectronics Research Institute
编辑出版	《半导体光电》编辑部	**Edited and Published by**	Editorial Office of Semiconductor Optoelectronics
编委主任	欧　黎	**Director of Editorial Board**	OU Li
主　　编	蒋志伟	**Chief Editor**	JIANG Zhiwei
执行主编	李福果	**Executive Chief Editor**	LI Fuguo
责任编辑	朱玲瑞	**Editor in Charge**	ZHU Lingrui
印　　刷	重庆五湖印务有限公司	**Printed by**	Chongqing Wuhu Printing Corp.
国内订阅	《半导体光电》编辑部	**Domestic Subscription**	Editorial Office of Semiconductor Optoelectronics
通信地址	重庆市南岸区南坪花园路14号(400060)	**Address**	No. 14 Garden Road, Nan'an District, Chongqing 400060, P. R. China
电　　话	(023)65860286(编辑) (023)65860287(发行)	**Telephone**	(023)65860286(Edition) (023)65860287(Distribution)
电子邮箱	soe@163.net	**E-mail**	soe@163.net

中国标准连续出版物号：ISSN 1001－5868 / CN 50－1092/TN

每期定价　20.00元

半导体光电

二〇二〇年八月
二〇二〇年八月

第四十一卷　第四期　（455-604）
第四十一卷　第四期　（455-604）