

激光与光电子学进展

InGaAs 单光子探测器封装技术进展

张晨阳^{1,2}, 莫德锋², 徐红艳², 马英杰², 李雪², 苏文献^{1*}¹上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093;²中国科学院上海技术物理研究所红外探测全国重点实验室, 上海 200083

摘要 InGaAs 单光子探测器已被广泛应用于激光三维成像、长距离高速数字通信、自由空间光通信和量子通信等。针对单元、线列和小面阵器件, 已发展出同轴封装、蝶形封装、插针网格阵列封装等多种封装形式。探讨了温度对 InGaAs 单光子器件性能的影响及组件温控方法; 系统比较分析了针对光学元件如微透镜、透镜、光纤等与芯片的高精度耦合方法; 针对高频信号输出, 总结了引线类型、布线方式、封装结构设计等问题; 展望了 InGaAs 单光子探测器的发展趋势。

关键词 雪崩光电二极管; InGaAs; 单光子探测器; 封装

中图分类号 TN312+.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231228

Progress in Packaging Technology of InGaAs Avalanche Photodiode Detectors

Zhang Chenyang^{1,2}, Mo Defeng², Xu Hongyan², Ma Yingjie², Li Xue², Su Wenxian^{1*}¹School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;²National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract InGaAs single-photon detectors are extensively used in laser 3D imaging, long-distance high-speed digital communication, free-space optical communication, and quantum communication. Different packaging formats, including coaxial packaging, butterfly packaging, and pin grid array packaging, have been designed for unit, line array, and small panel array devices. The impact of the temperature on the efficacy of InGaAs single-photon devices and the methodologies for controlling component temperature are discussed. Detailed comparisons and analyses of high-precision coupling methods for optical components such as microlenses, lenses, optical fibers, etc. to the semiconductor are provided. For high-frequency signal output, the lead type, wiring method, packaging structure design, and other issues are reviewed, and the development trend of the InGaAs single-photon detectors is forecasted.

Key words avalanche photodiode; InGaAs; single-photon detector; packaging

1 引言

InGaAs 单光子探测器的响应波段为 0.9~1.7 μm , 该波段是大气透射窗口, 对人眼伤害相对较小^[1], 能探测的微弱信号已接近甚至达到单光子检测灵敏度的水平。在适当的偏置条件下, 此类光电探测器可在复杂的噪声环境中探测到极微弱的回波信号, 从而实现低功率下的远程探测。此类光电探测器已被

广泛应用于激光三维成像、长距离高速数字通信、自由空间光通信、量子通信和幻影成像等^[2-7]。器件封装是探测器走向应用的重要环节, 针对 InGaAs 单光子器件的封装, 国内外已开展大量研究工作, 包括组件结构设计、温控热学设计和光学设计等。本文针对 InGaAs 单光子探测器封装过程中需要综合考虑的热学、光学、电磁干扰和噪声等一系列问题进行了介绍, 总结了单光子器件封装面临的关键问题和发展趋势。

收稿日期: 2023-05-04; 修回日期: 2023-05-17; 录用日期: 2023-05-19; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(62075229, 62175250)、上海市科技重大项目(2019SZZX01)

通信作者: *digestsu@163.com

2 InGaAs 单光子探测器面阵规模进展及常见封装形式

美国麻省理工学院的林肯实验室是最早从事 InGaAs 单光子探测器设计与封装工作的机构,目前也一直处于行业领先地位。从最初的 4×4 、 32×32 、 64×64 等面阵到近些年的 256×256 面阵,林肯实验室的芯片设计能力从小规模阵列逐步发展到中大规模阵列^[8]。美国的 Princeton Lightwave 公司(Princeton)也对该项工作进行了深入研究:2010 年,该公司将 32×32 面阵、像素间距为 $100 \mu\text{m}$ 的单光子灵敏度盖革模式 APD (avalanche photodiode) 阵列应用在了三维 LADAR (laser radar) 成像系统上^[9];2015 年,为了进一步满足三维 LADAR 成像系统应用的要求,他们开发出了 128×32 的 Gm-APD (Geiger-mode avalanche photodiode) 阵列,实现了 100% 的像素常规可操作性和性能均衡性^[10]。2019 年,德国的弗劳恩霍夫应用固体物理研究所^[11]开发了 640×512 的 InGaAs APD 焦平面阵列(像素间距为 $15 \mu\text{m}$),并将其应用于 SWIR (shortwave infrared) 相机中。其他国外机构,如美国的 JDS Uniphase Corporation、加拿大的 Excelitas (原 Perkinelmer) 和日本的 Hamamatsu Photonics 等均对该项工作进行了研究并开发出了较成熟的产品。

2016 年,哈尔滨工业大学(HIT)的研究团队^[12]在 32×32 InGaAs Gm-APD 的基础上研制了一套激光成像实验平台,实现了外场激光的主动成像功能。2018 年,西南技术物理研究所(209 Institute)的研究团队^[13]成功研制了 64×64 Si SPAD (single-photon avalanche diodes) 和 32×32 InGaAs SPAD 及更大阵列规模的 SPAD 器件,并将其应用到无人驾驶激光雷达、激光测距和量子通信等领域。2022 年,中国科学院半导体研究所(Semiconductor Institute)的研究团队^[14]研制了用于 1550 nm 波长三维成像激光雷达系统的 64×64 InGaAs/InP 单光子雪崩二极管阵列,其像素间距分别为 $25 \mu\text{m}$ 和 $150 \mu\text{m}$,且在 1550 nm 波长处有着 25.72% 的高单光子探测效率。同年,中国电子科技集团公司第四十四研究所(44 Institute)的研究团队^[15]基于 64×64 和 64×256 的 InGaAs APD 焦平面阵列建立了理论分析模型并利用相应的成像设备对单光子阵列成像进行了分析和实验。与此同时,中国科学院上海技术物理研究所(SITP)的研究团队^[16]基于 64×64 Gm-APD 开发了一款单光子 3D 成像激光雷达,其像素间距为 $50 \mu\text{m}$,能够在短采集时间内实现较高的成像效率。国内其他研究单位如昆明物理研究所^[17]等对 InGaAs 单光子探测器的设计也有着深入研究。图 1 展示了国内外 InGaAs 单光子探测器面阵规模的主要进展。

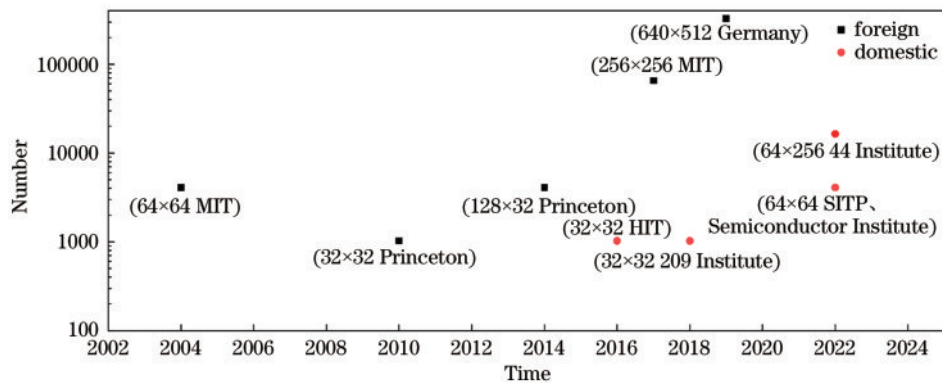


图 1 国内外 InGaAs 单光子探测器面阵规模主要进展

Fig. 1 Brief progress on the scale of InGaAs single-photon detector arrays at home and abroad

在光子探测效率和暗计数率(DCR,指在特定的温度下由暗电流触发雪崩电流而形成一次计数的概率)等探测器的主要参数方面,比较具有代表性的进展工作有:1)2006 年,Pellegrini 等^[18]通过使用抗反射涂层来增强异质结面处的电场,在温度为 $-73.15 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,将探测器的单光子探测效率提升到了 10%,对应 DCR 约为 100000 s^{-1} ;2)2014 年,Tosi 等^[19]通过改善锌扩散条件和优化垂直结构,在 $-48.15 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度和 $1.5 \mu\text{m}$ 波长下,将探测器的单光子探测效率提升至 28%,定时抖动约为 87 ps ,且在有源区上具备良好的均匀性;3)2016 年,Sanzaro 等^[20]在 InGaAs/InP SPAD 中使用单片集成电阻器,利用混合淬灭方法将总雪崩

电荷减少为原来的 $1/20$ 以下,延迟时间缩短至 $1 \mu\text{s}$,定时抖动降低至 70 ps ;4)2020 年,Fang 等^[21]通过优化电解质-金属反射层和栅极振幅,使 SPAD 的吸收效率显著提高,当 DCR 为 340000 s^{-1} 时,光子探测效率被提高至 60%,在实际应用中,当 DCR 为 3000 s^{-1} 时,探测效率为 40%。

InGaAs 单光子探测器相应的封装形式主要有同轴封装、双列直插封装、插针网格阵列封装和蝶形封装等。图 2 是一些产品的典型封装形式^[22],其中:图 2(a)、(b)是 Princeton Lightwave 公司的 APD 产品;图 2(c)是 2009 年麻省理工学院林肯实验室为验证封装可靠性使用的 128×32 APD 阵列产品。

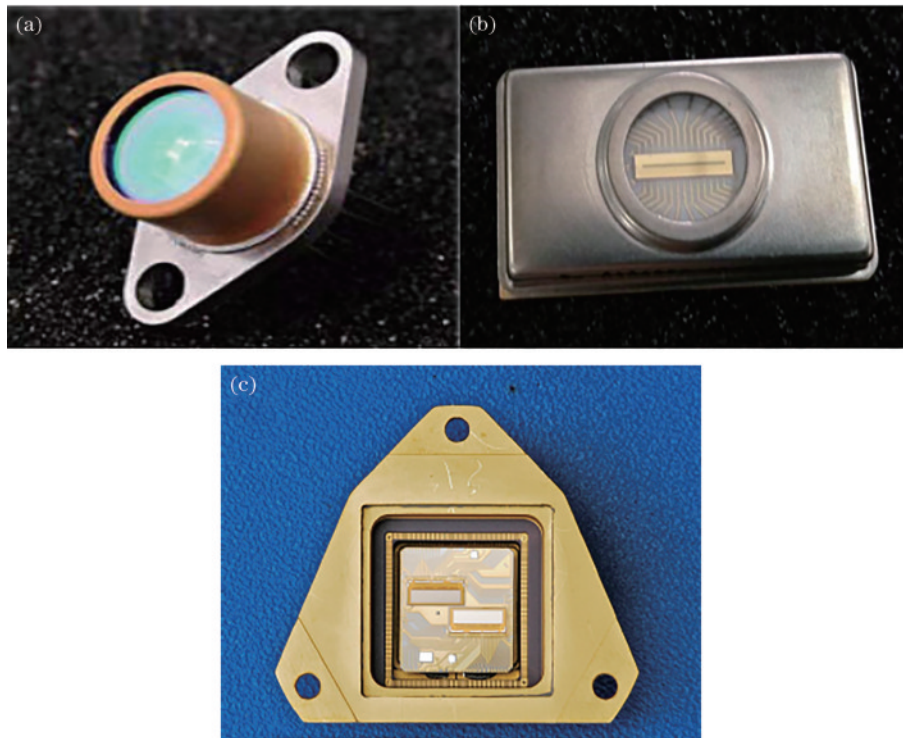


图 2 InGaAs 单光子探测器的典型封装形式^[22]。(a) 同轴封装; (b) 双列直插封装; (c) 插针网格阵列封装
Fig. 2 Typical packaging forms of InGaAs single-photon detector^[22]. (a) Coaxial packaging; (b) dual in-line packaging; (c) pin grid array packaging

同轴封装要求结构的上下部分有一致的同心度,各部件之间用环氧胶连接,关键部位可实施激光点焊。该封装完全能够承受各种环境下的机械力,寄生参数小、工艺简单、成本低。

双列直插封装的针脚在两侧呈直线平行排列,直插入印制线路板(PCB)后可实现机械固定和电气连接,其使用简单,应用最为广泛。双列直插封装一般仅适用于 PCB 的单面,由于针脚的限制,PCB 上通孔和布线的间距不能太近,因此双列直插封装具有无法实现高密度封装、制造困难和存在过大的引线电感等缺点。

插针网格阵列封装的针脚在整个平面呈针阵分布。与双列直插封装相比,插针网格阵列封装在不增加针脚间距和面积的情况下,按平方的关系增加了针脚数,提高了封装效率。

蝶形封装的管脚和电路板分布在管壳腔体两侧的边壁上,管脚引线也从两侧引出,节省了使用面积,为内部电路设计和布局预留了空间。此外,蝶形封装还利用多层陶瓷板增加了线路布局和功能,提高了封装器件的电学和光学性能^[23-26]。

3 封装影响因素

3.1 温度的影响

APD 的电流增益和反偏置驱动电压的大小与其温度密切相关。温度越高,驱动电压越大,电流增益越大,则感应灵敏度越高,但同时 DCR 也越高^[3]。麻省

理工学院林肯实验室开发了几种基于同一个定制设计的 PCB 的 APD 表征系统,能够为 39 个通道提供独立的直流偏置电压和交流偏置电源,该系统在一个很宽的温度范围内($-75\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$)能够完全自动化地完成 APD 特性测试^[22]。研究表明,对于 InGaAs 单光子探测器,降低温度会导致器件的 DCR 显著降低,其变化关系如图 3(a)所示。

敖天宏等^[27]通过探究温度对 InGaAs SPAD 器件的影响,对器件进行了结构性的改进,研制出光敏面直径为 $70\text{ }\mu\text{m}$ 的 InGaAs SPAD 器件;并通过实验测试了不同工作偏压下 SPAD 器件 DCR 和激活能的关系曲线,如图 3(b)所示。激活能越大说明 SPAD 器件的 DCR 受温度的影响越大。

但对于吸收区和倍增区分开的 InGaAs 单光子探测器而言,工作温度并不是越低越好,温度降低会使雪崩电压随之减小。常温下,InGaAs 单光子探测器的雪崩电压比贯穿电压要高,当温度不断降低且雪崩电压比贯穿电压小的时候,器件的探测效率将接近于零^[28]。研究表明,温度降低以后,被结区俘获的载流子寿命变长,在相同抑制时间下,后脉冲几率增大。另外,降低探测温度会使检测电路的灵敏度降低,因为随着温度的降低,金属-氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)的阈值电压值增大,基于阈值检测的检测电路的临界翻转电压也会增大。因此存在一个最佳温度,可由实验确定^[2]。Verghese 等^[29]研究了 128×32 面阵型单光子探测器,研究结果表明,当制冷温度

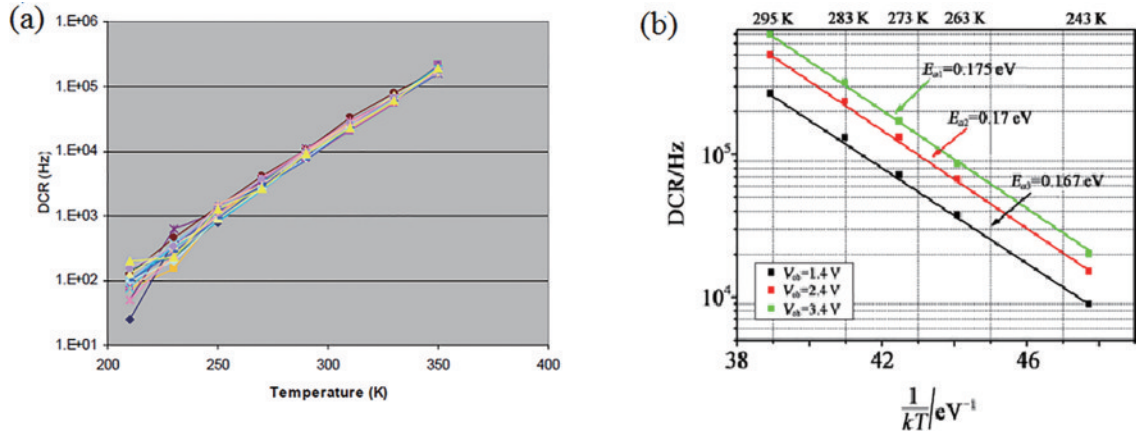


图 3 APD 暗电流测试曲线。(a) DCR 随温度的变化关系^[22]; (b) InGaAs SPAD 器件 DCR 与激活能的关系^[27]
 Fig. 3 APD dark current test curves. (a) Relationship between DCR and temperature^[22]; (b) relationship between DCR and activation energy of InGaAs SPAD device^[27]

为 -20 °C 时, 平均光子探测效率范围为 23%~25%, DCR 为 2000 s⁻¹。他们还开发了平面 InGaAs/InP SWIR 光电二极管的锌选择性扩散工艺, 最终在测试结构器件上进一步将暗电流密度降低到 85 nA/cm²。郑丽霞等^[30]使用 TEC (thermoelectric cooler) 制冷, 在低温 (-30 °C) 条件下实现了 APD 光触发雪崩电流信号的提取和快速淬灭。余超^[31]采用同轴封装, 利用机械式的斯特林制冷机对 InGaAs 器件进行制冷, 在 -80 °C 时制冷机的功率可达 50 W, 最低制冷温度为 -120 °C。梁焰^[3]研究了温度、DCR、后脉冲概率和重复频率等之间的关系, 他认为, 随着探测器重复频率的提高, 后脉冲误计数成为了影响器件性能的主要因素。因此, 与低

速 APD 制冷到 -50 °C 左右不同, 高速 APD (尤其是 1 GHz 以上的 APD) 的制冷温度通常控制在 -30 °C, 这样可以在保证 DCR 的同时, 降低后脉冲的概率。

3.2 频率的影响

InGaAs 单光子探测器往往在高频下工作。由经典电磁场理论可知, 当传导的信号频率高到一定程度 (一般高于 677 MHz) 时, 导线以及分立元件必须用分布参数进行设计^[32]。徐光辉等^[33]基于同轴封装管壳分别建立了芯片和管座的等效电路模型, 如图 4 所示。图 4 中, 电源 I_{op}H 等效为 APD 芯片, R_p 和 C_p 分别是串联电阻和并联电容, L_{B1} 和 L_{B2} 是金丝电感, 电容和电感的组合等效为管座。

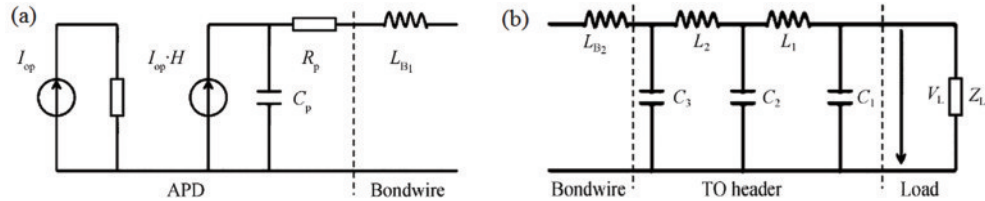


图 4 芯片和管座的等效电路模型^[33]。(a) 芯片; (b) 管座
 Fig. 4 Equivalent circuit models of chip and socket^[33]. (a) Chip; (b) socket

缩短金丝长度会减小金丝电感。单光子探测器在高频工作时金丝不能太长, 但也存在一个最佳值, 需要与 APD 芯片和管座匹配。

当传输速率受限于金丝时, 输出端可用高频传输线来取代键合金丝完成引线互连。衡量高频传输线的性能指标主要有: 电磁效应、串扰、传输速率、阻抗容忍控制、损耗和频率带宽等^[34]。其封装实现形式主要有微带线、多层陶瓷互连、共面波导结构、同轴连接器等。

较长的引线会引入外界的电磁干扰, 分布电感和引线的长短决定了淬灭延迟的大小, 进而决定了消除尖峰脉冲噪声的难易程度。刘俊良等^[35]设计了主动淬灭专用的集成式制冷封装, 如图 5 所示, 内含两级 TEC, 安装了平衡电容等元件的电路板与 SPAD 一起

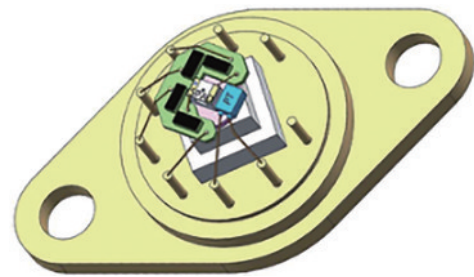


图 5 集成平衡电容和制冷的 SPAD 封装^[35]
 Fig. 5 SPAD packaging with integrated balancing capacitor and cooling^[35]

被封装在管壳中。该构造使 SPAD 线路与平衡电容共享相似的电磁环境和分布参数, 二者产生的噪声较容

易被消除。

在 10 Gb/s 或者更高速率的传输系统中,一般会采用共面波导和同轴连接器的方案。图 6 为共面波导

和同轴线的电磁场分布,可以看出,共面波导和同轴连接器的电磁场分布很相似,能够很好地解决两者在过渡电磁场中的不连贯现象。

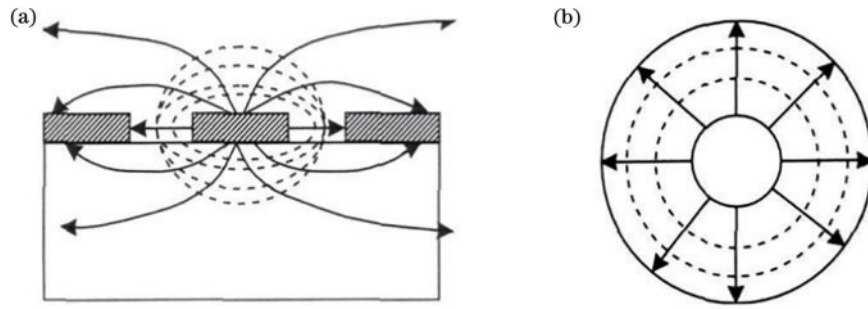


图 6 共面波导和同轴线的电磁场分布^[28]。(a)共面波导;(b)同轴线

Fig. 6 Electromagnetic field distributions of coplanar waveguide and coaxial line^[28]. (a) Coplanar waveguide; (b) coaxial line

4 封装关键技术

4.1 TEC 封装设计

在 InGaAs 单光子探测器的工作过程中,目前普遍利用 2~4 级热电制冷器进行制冷^[3,9]。半导体热电制冷器为全固态结构,具有体积小、成本低、无噪音和寿命长等特点,在小温差制冷应用中有着巨大的优势。如前所述,降低温度能降低热噪声,但想要同时得到高灵敏度、高响应度和高响应速度的探测器,则要求将工作温度控制在一个最佳水平并保持精确稳定。在封装设计时,需要重点考虑以下三个方面:

1)TEC 的选择。李日豪等^[34]在研究了 APD 器件在封装过程中的制冷量与热负载的关系后提出,封装设计的基本要求是获得最小制冷功率和最高制冷效率。一般认为,一级制冷器可以实现 20~50 °C 的温差,二级制冷器可以实现 50~70 °C 的温差,而实现 80~100 °C 温差则需要三级或四级制冷器。

2)封装环境。InGaAs 单光子探测器需要在 0 °C 以下的环境温度中工作,当 TEC 工作时,制冷片冷端温度达到足够低,空气中的水蒸气就会在其表面凝结成水滴,这会对 APD 造成致命的伤害。因此,在封装

InGaAs 单光子探测器时需要考虑气密性或进行真空封装。Mo 等^[36]实验与模拟了探测器在真空、氮气和氦气封装状态下 TEC 的制冷效果。分析结果表明:当输入电流一定时,TEC 的冷侧温度在真空条件下最低,在氮气条件下最高;当输入电流为 4.5 A 时,氮气封装和氦气封装的冷测温度分别可达 -58.15 °C 和 -62.15 °C。研究发现,TEC 工作时产生的焦耳热需要通过热面散发出去,热面温度对 TEC 的制冷效率及其能实现的最大制冷温差影响很大。

3)温控。TEC 的制冷温度可以通过改变输入电流或输入电压进行调节。由于 InGaAs 单光子探测器的性能对温度敏感,其控温精度一般要求在 0.05~0.10 °C。科研人员^[2-3,37]研究了实现多级 TEC 精确控温的方式,即采用线性电源供电,减少了噪声,提高了整个系统的信噪比和稳定性;设计全自动智能 PID (proportional integral derivative) 功率控制系统,其原理框图如图 7 所示。随着 APD 工作温度的变化,热敏电阻阻值改变,产生误差信号,信号经过 PID 电路的后处理部分控制半导体制冷块驱动源的输出电流,改变半导体制冷块的工作状态,最终补偿温度差,实现快速高精度温控。

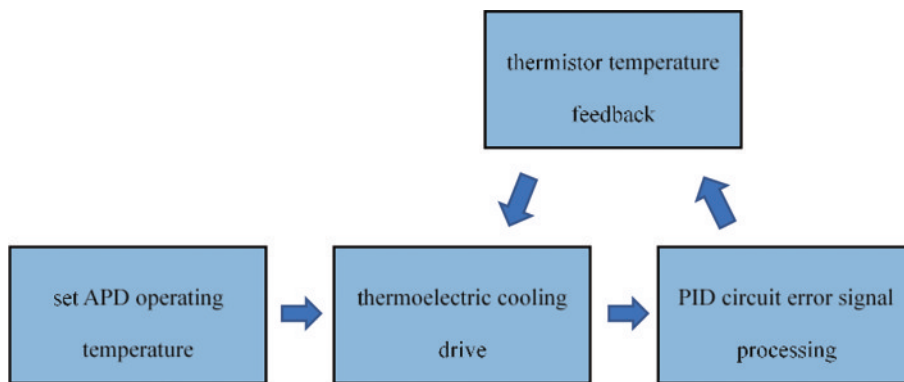


图 7 温控模块的原理图^[3]

Fig. 7 Schematic diagram of the temperature control module^[3]

4.2 集成光学元件的封装

在 InGaAs 单光子探测器的封装过程中,如何提高光耦合效率和降低背景辐射是人们比较关心的问题。受单光子器件制作工艺的限制,特别是对于面阵型器件,焦平面芯片的占空比很小,利用微透镜在器件焦平面芯片近表面耦合是比较有效的措施。Princeton Lightwave 公司在响应波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的 InP/InGaAs (P) 单光子探测器(其焦平面规模为 32×32 , 像元中心

间距为 $100 \mu\text{m}$, 像元直径为 $34 \mu\text{m}$) 上采用微透镜以后,其填充因子从 9% 提高到了 75%^[9]。

为了准确对齐微透镜和探测器芯片, Kang 等^[38]在微透镜和芯片上制作了对准键[图 8(a)中直径为 $2 \mu\text{m}$ 的圆], 利用图 8(a)、(b) 显微镜图像中的十字对准标记进行对准键的校准对位。结果表明,当十字标识的左边缘和右边缘都在圆形对准键的中心时,整个探测器芯片就实现了精准的对齐。

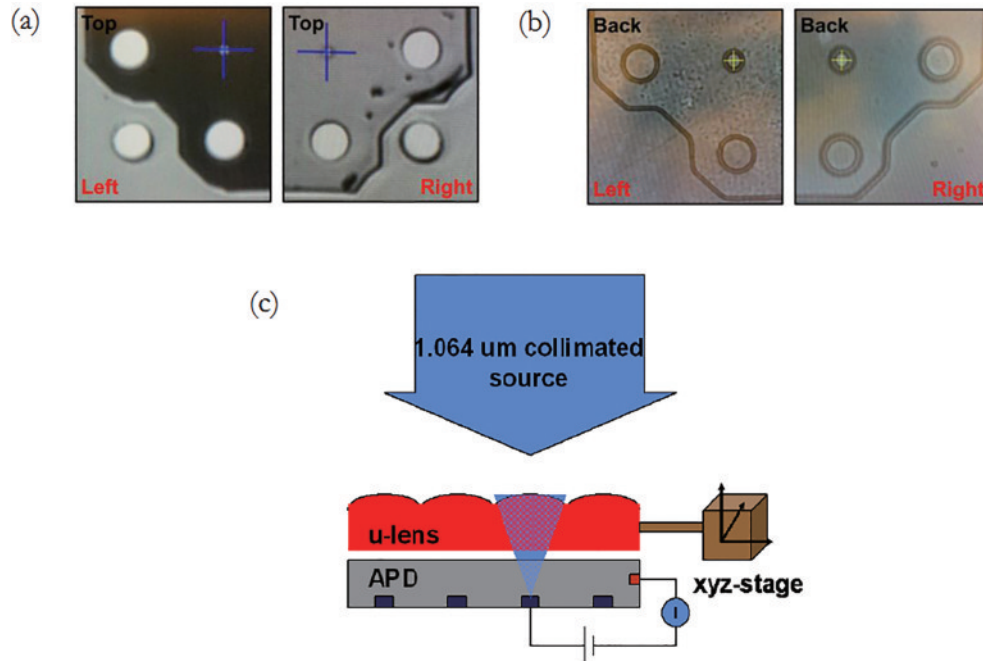


图 8 芯片与微透镜对准方法。(a) 微透镜上对准键与十字标记图像^[38]; (b) 探测器上对准键与十字标记图像^[38]; (c) 芯片与微透镜对准系统示意图^[22]

Fig. 8 Alignment methods of chip and microlens. (a) Image of alignment key and cross mark on microlens^[38]; (b) image of alignment key and cross mark on the detector^[38]; (c) schematic diagram of the chip and microlens alignment system^[22]

麻省理工学院林肯实验室的研究团队^[22]认为,当 APD 探测器的光敏元直径为 $10 \mu\text{m}$ 时,对准精度需要 $\leq 1 \mu\text{m}$ 。为此,他们研制了一个利用器件结构识别方向的对准实时反馈系统,如图 8(c) 所示。系统中,单光子探测器阵列规模为 128×32 , 安装在六自由度可调的装置上,步进小于 100 nm 。可采用两种方法实现偏差反馈:一种是在正列四角设置独立的光敏元,在对准过程中给予辐射源,实时监控光电流的变化,并进行校准;另一种方法是施加一个偏置电压到整个单光子阵列,并获得所有光敏元的光电流的总和,从而准确耦合微透镜阵列,但耦合时,如果阵列中有缺陷的 APD 像元(即短路或漏电流大),将会引入较大的偏差。

InGaAs 单光子探测器的探测信号非常微弱,为提高探测效率,降低背景光对其的影响非常关键。主要有三种方法:时间分辨法、空间分辨法和光谱分光法^[39]。时间分辨法主要通过控制电路实现,与 APD 组件的应用状态、死时间、后脉冲等参数相关,与封装结

构设计关系不大。空间分辨法主要通过减小视场角,如增加光阑、冷屏实现。从理论计算可以知道,背景噪声与视场角的正弦值正相关,在保证视场角足够的前提下,通过减少光阑或冷屏可以提高 APD 的探测效率。光谱分光法主要通过增加波段滤光片实现,其实现方式包括组件外集成和芯片近表面集成两种。芯片近表面集成可以抑制组件内杂光的影响,效果更为显著,其耦合间距受内引线抛丝弧高限制。

4.3 光纤耦合封装

InGaAs 单光子探测器与光纤的耦合是其目前应用的主要形式,能够实现长线列封装应用需求,而且光纤直径小,可以有效降低空间光背景辐射。

封装对准工艺中,光纤与芯片之间的耦合对准方法主要分为两类,一类是有源对准,另一类是无源对准。

有源对准是在有光信号的情况下进行光纤的实时对准,它利用高精度位移平台进行偏差调整,这种方法的耦合效率较高。如图 9 所示, Mahnkopf 等^[40]设计的

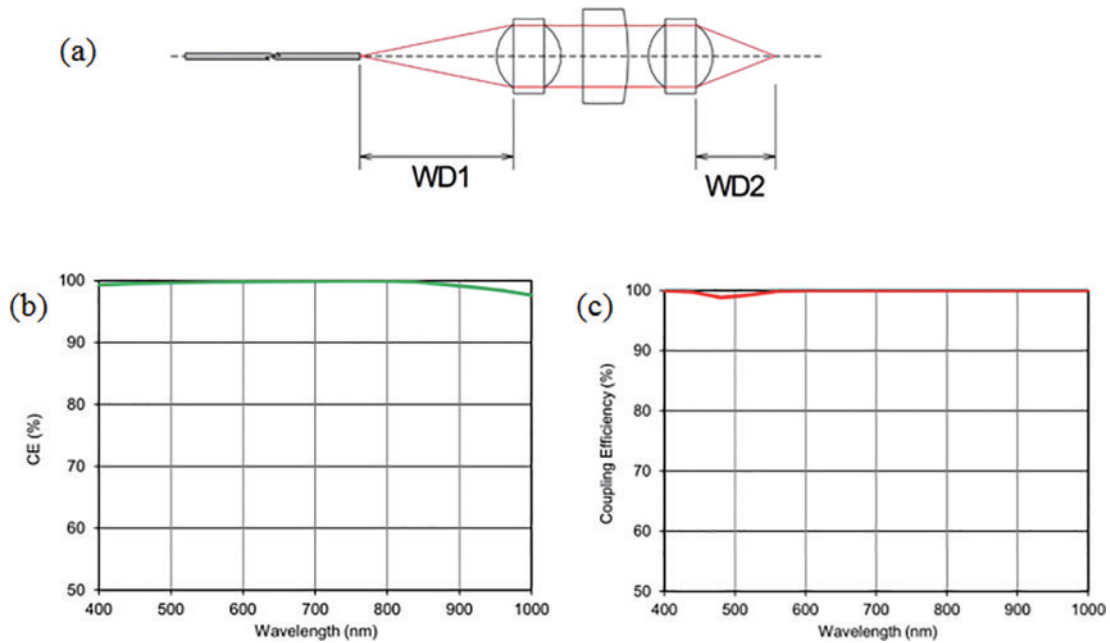


图 9 光学系统示意图及其耦合效率曲线^[40]。(a)光学系统示意图;(b) 105 $\mu\text{m}/0.22$ NA MMF 与直径为 100 μm 有源区的耦合效率曲线;(c) SMF28 与直径为 25 μm 有源区的耦合效率曲线

Fig. 9 Schematic diagram of the optical system and its coupling efficiency curves^[40]. (a) Schematic diagram of the optical system; (b) coupling efficiency curve of 105 $\mu\text{m}/0.22$ NA MMF with 100 μm diameter active region; (c) coupling efficiency curve of SMF28 with 25 μm diameter active region

一套光学对准系统可以通过调整 WD1 和 WD2、选择不同的波长以及替换透镜来实现不同的光纤与不同的二极管有源区域的对准耦合。在对准过程中,通过焊接在微透镜上的接收器输出的光响应信号,可以调整光纤与 SPAD 组件的相对高度和横向位移,最终实现两者的高精度耦合。在该系统中,在不考虑菲涅耳反射和散射损耗的情况下,对于 450~900 nm 波长范围内的 105 $\mu\text{m}/0.22$ NA MMF (multi-mode fiber) 与直径为 100 μm 有源区的耦合以及 SMF28 (single mode fiber 28) 与直径为 25 μm 有源区的耦合,其理论耦合效率可以保持在 90% 以上。

无源对准是在无光信号情况下,通过对准标记或者限位槽来完成封装时的对准耦合。对于一维光纤阵列,光纤限位通常使用 V 形槽;而二维限位结构则可采用微孔阵列,其制作材料可以是 Si、金属、陶瓷、玻璃等^[41-42]。图 10 是典型的 V 形槽限位结构^[43]。

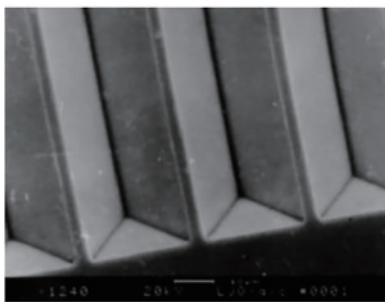


图 10 V 形槽限位结构^[43]
Fig. 10 V-groove limit structure^[43]

无源对准可以依靠精密的加工技术来达到高耦合效率。唐君等^[44]设计了一套用于无源耦合的组件,包含标准光纤接头和精确定位插针等,如图 11 所示。在倒装焊设备的帮助下,带有精密插孔的标准 MT-RJ (mechanical transfer registered jack) 接头可与芯片阵列精密对准,对准精度可达 0.1 μm 。在对准过程中,需要将有着精密插针的光纤阵列与标准 MT-RJ 接头临时固定,再进行两者的对接。对接完成后进行拆除护托和金丝压焊等工作。由于标准 MT-RJ 接头上的插孔与定位插针是精确配合的,最终此方式的平均耦合效率 >80%,且各个单元的耦合效率具有良好的的一致性。

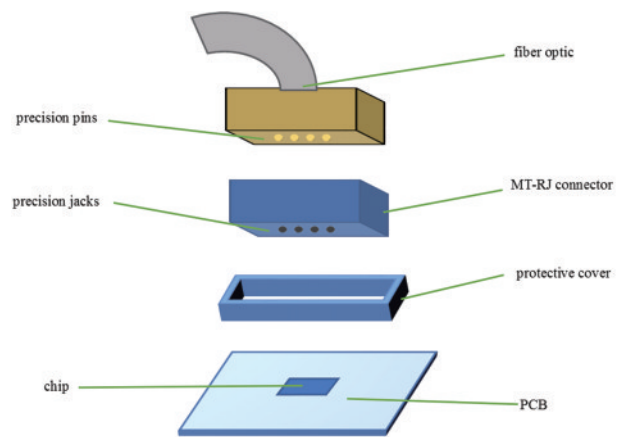


图 11 无源耦合示意图^[44]
Fig. 11 Schematic diagram of passive coupling^[44]

按耦合方式,光纤与芯片之间的对准方法也可以分为两类,即直接耦合与间接耦合。

直接耦合时,中间无聚焦透镜等元件,其结构简单且规模不受限制。直接耦合有两种探测器芯片的贴装

方法:卧式耦合和立式耦合^[45],如图 12 所示。采用卧式耦合和立式耦合两种方法都是为了减小键合金丝的跨距从而减少级联次数,进而尽量减少射频损耗和波动。

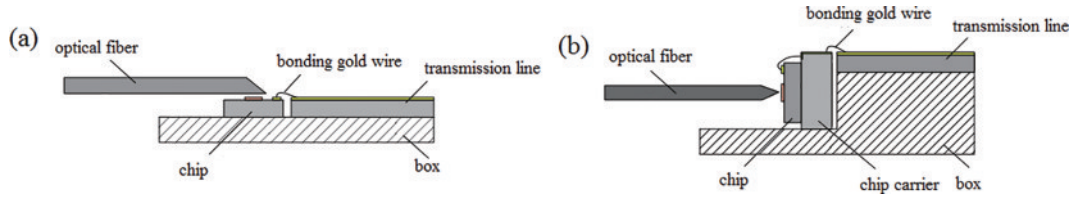


图 12 探测器芯片贴装方案^[45]。(a)卧式耦合;(b)立式耦合

Fig. 12 Mounting schemes of the detector chip^[45]. (a) Horizontal coupling; (b) vertical coupling

直接耦合通常适用于光敏元尺寸与光纤直径相比有较大余量的场合。如 MORPH (multichannel optical receiver photonic hybrid) 项目^[46]中, InGaAs 单光子探测器的光敏元直径为 200 μm , 光纤直径为 100 μm 。在耦合时,将光纤预先固定在陶瓷插芯中,依靠金属陶瓷插芯调整其与探测器的距离。其耦合间距会受到探测器引线抛丝和光纤数值孔径的限制。

间接耦合通常利用微光学元件来提高耦合效率。用于耦合的微光学元件包括透镜光纤、自聚焦透镜、球透镜^[47]、圆柱透镜和非球面透镜^[48]等。JDS Uniphase Corporation 较系统地研究了基于球透镜的间接耦合,分析了球透镜直径选择、轴向与横向装配偏差等对单光子器件高频响应的影响。球透镜的引入有效地增加了单光子器件的感光面积从而提高了其高频响应性能,但是也增加了包括光纤端面、球透镜的两个表面和芯片表面^[49]的背反射。仲顺顺等^[50]利用光学仿真软件为 10 Gb/s 以太网无源光网络 (EPON) 光器件建立了一种新的耦合模型,与同样同轴封装的传统球透镜相比,其耦合效率提高了约 16.68%。其耦合效率取决于光斑的模场和单模光纤模场的匹配程度。

针对光纤耦合型单光子探测器的气密性封装,直接耦合可采用光纤金属化方法,即将光纤与金属管先进行气密性焊接;而间接耦合则可采用光窗式耦合方法,即将光窗密封后再与光纤耦合。

5 结束语

本文主要介绍了 InGaAs 单光子探测器的面阵规模进展和常见封装形式、封装的主要影响因素以及封装的关键技术。温度与探测器的电流增益和感应灵敏度息息相关;探测器的高信号传导频率要求其导线和分立元件必须用分布参数进行设计;TEC 封装设计、微透镜与芯片的高精度耦合以及探测器与光纤的耦合是单光子探测器降低热噪声、提高响应度和光耦合效率的关键。InGaAs 单光子探测器具有广阔的应用前景,目前国外的 InGaAs 单光子探测器已向 512 \times 512 以上规模发展,国内的研究则主要集中在单元探测器、线列

或小面阵探测器,相应的封装结构设计尚未完全系统化。近红外单光子探测器封装时需要综合考虑芯片的低温工作性能、封装系统的温度均匀性、抗干扰、抗背景辐射和光纤耦合精准度等一系列问题,仍有待深入研究。

参 考 文 献

- [1] Miao Y H, Lin H X, Li B, et al. Review of Ge(GeSn) and InGaAs avalanche diodes operating in the SWIR spectral region[J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(3): 606.
- [2] 魏先政. 高速 InGaAs 单光子探测器设计[D]. 济南: 山东大学, 2013.
Wei X Z. Design of high-speed InGaAs single photon detector[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [3] 梁焰. 基于 InGaAs/InP APD 高速单光子探测方法及应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
Liang Y. High-speed single photon detection method based on InGaAs/InP APD and its application[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [4] 黄润宇, 赵伟林, 曾辉, 等. InP 基单光子探测器的发展和应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(10): 1011009.
Huang R Y, Zhao W L, Zeng H, et al. Development and application of InP-based single photon detectors[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011009.
- [5] 万超, 郝浩, 赵清源, 等. 单光子探测在无线光通信收发技术中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(5): 0500001.
Wan C, Hao H, Zhao Q Y, et al. Application of single photon detection in wireless optical communication transceiver technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(5): 0500001.
- [6] 张汉熠, 赵新宇, 张益成, 等. 单光子激光雷达研究进展[J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1910003.
Zhang H Y, Zhao X Y, Zhang Y C, et al. Review of advances in single-photon LiDAR[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1910003.
- [7] 霍晓培, 杨德振, 喻松林, 等. 单光子探测器研究现状与发展[J]. *激光与红外*, 2023, 53(1): 3-11.
Huo X P, Yang D Z, Yu S L, et al. Research on status

- and development of single photon detector[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(1): 3-11.
- [8] Aull B F, Duerr E K, Frechette J P, et al. Large-format Geiger-mode avalanche photodiode arrays and readout circuits[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(2): 3800510.
- [9] Itzler M A, Entwistle M, Owens M, et al. Geiger-mode avalanche photodiode focal plane arrays for three-dimensional imaging LADAR[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7808: 78080C.
- [10] Jiang X D, Itzler M, O'Donnell K, et al. InP-based single-photon detectors and Geiger-mode APD arrays for quantum communications applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(3): 5-16.
- [11] Rutz F, Bächle A, Aidam R, et al. InGaAs SWIR photodetectors for night vision[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11002: 1100211.
- [12] Sun J F, Jiang P, Zhang X C, et al. Experimental research of 32×32 InGaAs Gm-APD arrays laser active imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1206006.
- [13] Song H Z. Avalanche photodiode focal plane arrays and their application to laser detection and ranging[M]// *Photodetectors*. London: IntechOpen, 2018.
- [14] Wang S, Ye H, Geng L Y, et al. Design, fabrication, and characteristic analysis of 64×64 InGaAs/InP single-photon avalanche diode array[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2022, 51(5): 2692-2697.
- [15] Pan W W, Sun H, Jiang J F, et al. Theoretical analysis and experimental study on 3D real time imaging of photonic array[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12169: 1216938.
- [16] Tan C S, Kong W, Huang G H, et al. Long-range daytime 3D imaging lidar with short acquisition time based on 64×64 gm-APD array[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(3): 6623407.
- [17] 陈勇强, 贺岩, 罗远, 等. 基于盖革 APD 阵列脉冲式三维成像激光雷达系统[J]. *中国激光*, 2023, 50(2): 0210001.
- Chen Y Q, He Y, Luo Y, et al. Pulse three-dimensional imaging lidar system based on Geiger APD array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(2): 0210001.
- [18] Pellegrini S, Warburton R E, Tan L J J, et al. Design and performance of an InGaAs-InP single-photon avalanche diode detector[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(4): 397-403.
- [19] Tosi A, Calandri N, Sanzaro M, et al. Low-noise, low-jitter, high detection efficiency InGaAs/InP single-photon avalanche diode[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(6): 192-197.
- [20] Sanzaro M, Calandri N, Ruggeri A, et al. InGaAs/InP SPAD with monolithically integrated zinc-diffused resistor[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2016, 52(7): 4500207.
- [21] Fang Y Q, Chen W, Ao T H, et al. InGaAs/InP single-photon detectors with 60% detection efficiency at 1550 nm[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(8): 083102.
- [22] Funk J E, Smith G M, McIntosh K A, et al. Packaging and qualification of single-photon counting avalanche photodiode focal plane arrays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7320: 73200S.
- [23] 田民波. 电子封装工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- Tian M B. *Electronic packaging technology*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [24] 娄文忠, 孙运强. 微机电系统集成与封装技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- Lou W Z, Sun Y Q. *Fundamentals of MEMS integration and packaging technology*[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [25] 黎敏, 廖延彪. 光纤传感器及其应用技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
- Li M, Liao Y B. *Fiber optic sensor*[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008.
- [26] 田文超. 电子封装、微机电与微系统[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
- Tian W C. *Electronic packaging, MEMS and microsystems*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012.
- [27] 敖天宏, 赵江林, 童启夏, 等. In_{0.53}Ga_{0.47}As 雪崩光电二极管单光子探测器的温度特性研究[J]. *半导体光电*, 2022, 43(4): 765-769.
- Ao T H, Zhao J L, Tong Q X, et al. Study on temperature characteristics of In_{0.53}Ga_{0.47}As avalanche photodiode single photon detector[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2022, 43(4): 765-769.
- [28] Hiskett P A, Buller G S, Loudon A Y, et al. Performance and design of InGaAs/InP photodiodes for single-photon counting at 1.55 μm [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(36): 6818-6829.
- [29] Verghese S, McIntosh K A, Liao Z L, et al. Arrays of 128×32 InP-based Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7320: 73200M.
- [30] 郑丽霞, 吴金, 张秀川, 等. InGaAs 单光子探测器传感检测与淬灭方式[J]. *物理学报*, 2014, 63(10): 104216.
- Zheng L X, Wu J, Zhang X C, et al. Sensing detection and quenching method for InGaAs single-photon detector [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(10): 104216.
- [31] 余超. 面向激光雷达应用的单光子探测技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- Yu C. *Research on single photon detection technology for lidar application*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [32] 胡靖, 杨现文, 李世瑜, 等. 10 Gbit/s APD/TIA 探测器组件的设计[J]. *光通信研究*, 2009(4): 50-52, 63.
- Hu J, Yang X W, Li S Y, et al. Design of 10 Gbit/s APD/TIA detector assemblies[J]. *Study on Optical Communications*, 2009(4): 50-52, 63.
- [33] 徐光辉, 柴广跃, 彭金花, 等. 高速雪崩光探测器同轴封装的高频分析[J]. *光子学报*, 2012, 41(2): 240-243.
- Xu G H, Chai G Y, Peng J H, et al. High frequency analysis of TO packaging for high-speed avalanche photodetectors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(2):

- 240-243.
- [34] 李日豪, 廖常俊, 王金东, 等. 用于红外单光子探测的 APD 二次封装技术[J]. 半导体光电, 2006, 27(4): 376-378, 382.
- Li R H, Liao C J, Wang J D, et al. APD post-packaging technology for single-photon detection in infrared region[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006, 27(4): 376-378, 382.
- [35] 刘俊良, 许伊宁, 董亚魁, 等. 集成型快速主动淬灭 InGaAsP 近红外单光子探测器[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1212002.
- Liu J L, Xu Y N, Dong Y K, et al. Integrated InGaAsP near-infrared single-photon detector with fast active quenching[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1212002.
- [36] Mo D F, Wang Y, Liu D F, et al. Inert gas packaging of InGaAs detector with multistage thermoelectric cooler[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10838: 108380W.
- [37] 李水峰. 量子保密通信红外单光子探测器的温度控制技术[D]. 广州: 华南师范大学, 2007.
- Li S F. Temperature control technology of infrared single photon detector for quantum secure communication[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2007.
- [38] Kang C M, Bianconi S, Hamilton T, et al. Substrate-independent broad-band immersion microlens arrays with a high coupling efficiency for infrared focal plane arrays[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2022, 4(4): 1910-1920.
- [39] Wu X Y, Zheng Y C, Cui J Y. The technology on noise reduction of the APD detection circuit[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8905: 890525.
- [40] Mahnkopf S, Giudice A, Demmer D, et al. Optoelectronic packaging of single photon avalanche diodes[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10085: 100850C.
- [41] Kawai S. Parallel micro-optics for interconnections based on vertical cavity surface emitting laser arrays and their jisso technologies[J]. Optical Engineering, 2004, 43(5): 1018-1021.
- [42] 汪钦, 徐红春, 胡广文. 用于无源光网络的平面光波回路光电集成器件[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(11): 112301.
- Wang Q, Xu H C, Hu G W. Planar lightwave circuit opto-electronic integrated devices for passive optical network[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(11): 112301.
- [43] Liang J Q, Guo P, Liang Z Z, et al. Manufacturing and testing of the line-array fiber optic image slicer based on silicon V-grooves[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6836: 683607.
- [44] 唐君, 陈雄斌, 鲁琳, 等. 基于无源耦合技术的高速并行光接收模块的设计与实现[J]. 高技术通讯, 2011, 21(12): 1318-1322.
- Tang J, Chen X B, Lu L, et al. The design and implementation of a high speed parallel optical receiver module based on passive coupling[J]. Chinese High Technology Letters, 2011, 21(12): 1318-1322.
- [45] 伍艺龙, 吕晓萌, 廖翱, 等. 一种微波光子探测器组件的封装设计与实现[J]. 应用光学, 2020, 41(2): 400-404.
- Wu Y L, Lü X M, Liao A, et al. Package design and realization of a microwave photon detector component[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(2): 400-404.
- [46] Burns H N, Yun S T, Dinndorf K M, et al. Compact multichannel receiver using InGaAs APDs for single-pulse eye-safe laser radar imagery[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3065: 22-29.
- [47] Soskind Y G, Hart S, Kyriakopoulos G, et al. High dynamic range integrated 10 Gb/s receiver[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5358: 20-28.
- [48] Kobayashi M, Dutta A K. Module/packaging technologies for optical components: current and future trends[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4532: 270-280.
- [49] Soskind Y G, Itzler M A, Ranes B T. Micro-optics coupling for 10-Gb/s avalanche photodiodes[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4989: 1-11.
- [50] 仲顺顺, 周雄锋, 孙翔, 等. 10 Gb/s 高速光器件激光器端耦合模型设计与优化[J]. 制造业自动化, 2020, 42(6): 118-122.
- Zhong S S, Zhou X F, Sun X, et al. Design and optimization of laser end coupling model for 10 Gb/s high-speed optical devices[J]. Manufacturing Automation, 2020, 42(6): 118-122.