光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250422001

死区高反射膜对硅光电倍增管量子效率的影响

郭超前[1]，王　军[1,3]，吴　云[2]，杨延飞[1,3,5]，张向通[1]，张昊童[1]，王　磊[1]，刘　露[1,4,5]，刘丽娜[4]，李连碧[1,3,5]，韩小祥[1,3,5]，李泽斌[1,3,5]，张国青[1,3,5]*

（1. 西安工程大学 理学院，西安 710048；2. 北京控制工程研究所，北京 100190；3. 西安理工大学 理学院，西安 710048；4. 西安市核防护纺织装备技术重点实验室，西安 710048；5. 射线柔性防护技术陕西省高校工程研究中心，西安 710048）

摘　要： 文章提出在硅光电倍增管（SiPM）死区表面制备高反射金属膜，通过金属膜与透明封装层的光学谐振腔效应，将死区入射光导向光敏区，以提升其光子探测效率及绝对量子效率。基于几何光学理论建模并结合Comsol多物理场仿真，分析了量子效率的增强机制。结果显示，理论计算和光学仿真得到的光透射率增幅分别为6.23%和6.31%，半导体器件仿真证明绝对量子效率增幅6.2%，与透射率增幅一致。该方法有效突破死区损耗限制，为提升SiPM光子探测性能提供了一种可行方案。

关键词： 硅光电倍增管；间隔区域；光子探测效率；绝对量子效率

中图分类号： O441.4　**文章编号：** 1001－5868(2025)04－0645－07

Impact of High-Reflectivity Films in Dead Zones on the Quantum Efficiency of Silicon Photomultipliers

GUO Chaoqian[1], WANG Jun[1,3], WU Yun[2], YANG Yanfei[1,3,5], ZHANG Xiangtong[1], ZHANG Haotong[1], WANG Lei[1], LIU Lu[1,4,5], LIU Lina[4], LI Lianbi[1,3,5], HAN Xiaoxiang[1,3,5], LI Zebin[1,3,5], ZHANG Guoqing[1,3,5]

(1. School of Science, Xi´an Polytechnic University, Xi´an 710048, CHN; 2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, CHN; 3. School of Science, Xi´an University of Technology, Xi´an 710048, CHN; 4. Key Laboratory of Nuclear Protection Textile Equipment Technology, Xi´an 710048, CHN; 5. Shaanxi Provincial Engineering Research Center for Radiation Flexible Protection Technology, Xi´an 710048, CHN)

Abstract: This study proposes a method that involves depositing a highly reflective metal film on the dead-zone surface of the SiPM. This structure forms an optical resonant cavity with the transparent encapsulation layer, redirecting incident light from the dead zones to the photosensitive regions, thereby enhancing both the PDE and absolute quantum efficiency. The mechanism behind this enhancement was analyzed using geometric optics modeling in combination with simulations performed in Comsol Multiphysics. Theoretical calculations and optical simulations reveal an increase in light transmittance of 6.23% and 6.31%, respectively. Additionally, semiconductor device simulations demonstrate a 6.2% improvement in absolute quantum efficiency, aligning closely with the simulated transmittance gains. This approach effectively mitigates losses due to the dead zones,

收稿日期：2025－04－22.

基金项目：陕西省重点研发计划项目（2024GX-YBXM-081、2023-YBGY-196）；北京控制工程研究所空间光电测量与感知实验室开放基金项目（LabSOMP-2023-01）；国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院NSAF联合基金项目（U2330109）；陕西省自然科学基础研究计划项目（2024JC-YBMS-023、2022JQ-660）；等离子体物理国家重点实验室项目（6142A04230302）；陕西数理基础科学研究项目（22JSY030、22JSY012）；陕西省教育厅服务地方专项（22JC033）.

* **通信作者：**张国青

offering a viable solution for enhancing the photon detection capabilities of SiPMs.

Key words: silicon photomultiplier; dead zone; spacing region; photon detection efficiency; absolute quantum efficiency

0 引言

硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier, SiPM),又称多像素光子计数器(Multi-pixel Photon Counter, MPPC),是将数千个盖革模式雪崩光电二极管(Geiger-Mode Avalanche Photo-diode, G-APD)以阵列形式集成于单晶硅片上的固态光电探测器件。作为室温下单光子灵敏探测器,其优异的光子数分辨能力使其在激光雷达、高能物理、核医学成像等领域具有广阔的应用前景[1]。

光子探测效率(Photon Detection Efficiency, PDE)作为SiPM性能的核心参数,定义为探测器响应的光子数与入射光子数的比值,直接决定了微弱光信号的捕捉能力及测量精度[2]。目前,15 μm尺寸G-APD单元的SiPM器件PDE已达46%[3],但受限于死区损耗等物理机制,其性能仍具有提升空间。SiPM的PDE优化可从三方面展开[4]:(1)几何填充因子(Geometric Fill Factor, GFF),即光敏区面积占比[5],受限于工艺兼容性,提升空间有限;(2)盖革触发效率,指耗尽区收集的电子-空穴对引发盖革雪崩效应的概率[6],由材料与结构决定,器件制备后趋于稳定;(3)绝对量子效率,为其表面透射率T与内量子效率η_i的乘积[7]。其中,η_i由硅材料光吸收特性决定,而表面透射率T则受限于光敏区的反射损耗,成为PDE提升的关键瓶颈。

基于上述分析,提升表面透射率T是增强PDE的核心路径之一。当前直接提高T的方法可通过制备减反射膜(Antireflection Coating, ARC)[8-9],该方法虽能降低表面反射损耗,但存在成本高、环境稳定性差的缺陷。间接提高T则聚焦于几何光学调控——例如在器件表面集成微透镜阵列[10],利用透镜汇聚效应将死区入射光聚焦至光敏区,却面临工艺复杂度、产线兼容性差的挑战[11-12],此外背面金属镜反射技术使未被吸收的光子二次进入有源层,显著提升PDE,但存在光学不稳定性和机械疲劳风险[13]等问题。

鉴于现有方法的局限性,本文提出一种低成本、高兼容性的间接提升T的方案:在SiPM的死区表面沉积高反射金属膜,通过金属膜与透明封装层形成的光学谐振腔效应,利用光子的多次反射耦合至光敏区。该方法的创新性在于:将金属膜应用于SiPM死区表面而非器件背面;工艺兼容性显著提升,金属膜沉积采用成熟的磁控溅射技术,仅增加一道金属光刻工序,与现有半导体产线高度兼容;通过几何光学理论与Comsol多物理场仿真,系统分析金属膜参数对反射增强效果的影响,为工程化制备提供理论支撑。

1 原理与方法

以圆形六角密排阵列结构的SiPM芯片为研究对象,如图1所示,该结构相比方形阵列可显著提升耗尽区电场均匀性并维持高GFF[14]。封装后表面有透明封装介质层的SiPM器件如图2所示。

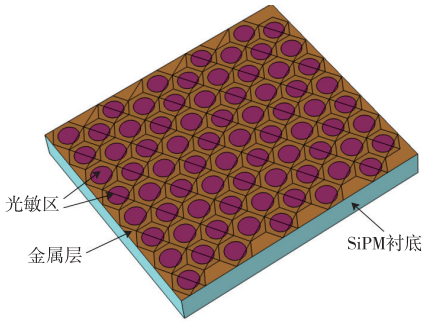


图1 圆形六角排列SiPM芯片三维结构示意图

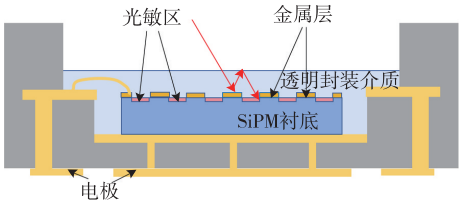


图2 表面有透明封装介质层的SiPM示意图

为简化理论计算,将周期性G-APD单元划分为正六边形基础单元,单个单元包含中心圆形光敏区(图1粉色区域,直径为7 μm)及外围环状金属反射区(图1黄色区域,由正六边形与圆形光敏区的差集构成)。器件关键参数:G-APD单元中心间距为10 μm,死区宽度为3 μm;封装介质为环氧树脂(折射率n=1.53,表面透射率T_L=89%,反射率R_L=11%),厚度为300 μm;高反射金属膜采用蒸镀铝膜(反射率R_S=95%),光敏区表面反射率R=12%。

基于几何光学理论建立光传输模型，并进行了金属膜参数灵敏度分析。光学仿真基于Comsol射线光学模块展开。首先构建含封装介质的SiPM表面模型：G-APD单元中心间距为10 μm，间隔宽度为3 μm，光敏区呈圆形（直径为7 μm）；设定间隔区金属膜（反射率95%）与光敏区表面（反射率12%）的镜面反射边界条件，透明封装介质折射率n=1.53、表面反射率R_L=11%。采用等面积矩形光源（与正六边形单元等面积），入射方向平行于矩形边界，波长设定为450 nm（蓝光波段），单次释放光线数N=1 000。通过追踪不同入射角度θ的光线轨迹，计算光敏区对入射光的吸收率。

光电特性仿真基于Comsol半导体模块的电磁波频域耦合物理场展开。首先在暗态下模拟增设金属膜前后的器件内部电场分布及反向偏压I-V特性曲线，探究金属膜对器件电学结构的影响；继而在光照条件下获取光响应度曲线，并通过光响应度R_0与绝对量子效率η的关系式，如公式（1），计算绝对量子效率随波长的变化曲线。

$$R_0=e\eta/hf \tag{1}$$

式中，e为电子电荷，h是普朗克常量，f为入射光频率。

2　理论建模

2.1　透射率推导

基于图1所示的周期性阵列结构，假设入射光源为矩形平面波，经透明封装介质上表面折射后，恰好覆盖单个G-APD对应的矩形微元区域，光线传播示意图如图3所示。为简化分析，选取特殊入射条件：入射方向平行于矩形微元边界，封装介质内的折射角θ取值范围为0°～90°。

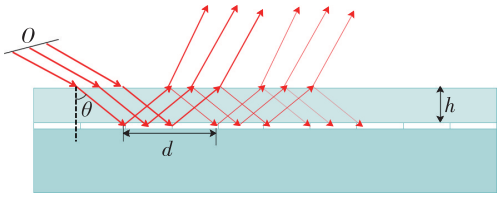


图3　平行光入射至G-APD单元阵列后光线传播示意图

假设光源O的光强为I，经封装介质表面反射后，透射光强为T_lI，其中，P_1T_lI直接被光敏区吸收，P_2T_lI入射至死区金属反射膜，经光敏区（反射率R）与金属膜（反射率R_S）反射后的总光强为$(P_1R+P_2R_S)I$，该光强经封装介质上表面二次反射（反射率R_L）后，投射至相邻矩形微元的光强为$R_L(P_1R+P_2R_S)T_LI$。

由于周期性阵列结构的对称性，后续入射的矩形微元光敏区与金属膜面积占比一致，每次反射后入射至新微元的光强遵循等比衰减规律：

$$I_{i+1}=I_i(P_1R+P_2R_S)R_L \tag{2}$$

公比为$(P_1R+P_2R_S)R_L$。已知：

$$I_1=(1-R_L)I \tag{3}$$

基于等比数列递推关系，可得第i个矩形微元的入射光强为：

$$I_i=(1-R_L)\left[(P_1R+P_2R_S)R_L\right]^{i-1}I \tag{4}$$

基于第i个矩形微元的入射光强，其吸收光强可表示为：

$$I_{ini}=I_iP_1(1-R) \tag{5}$$

对于折射角为θ、光强为I的单微元入射光源，SiPM光敏区的总吸收光强可表示为：

$$I_{sum}=\sum_{i=1}^{\infty}I_{ini}=\sum_{i=1}^{\infty}I_iP_1(1-R)=\sum_{i=1}^{\infty}P_1(1-R)(1-R_L)\left[(P_1R+P_2R_S)R_L\right]^{i-1}I \tag{6}$$

另外，当：

$$q=(P_1R+P_2R_S)R_L \tag{7}$$

则：

$$I_{sum}=\lim_{i\to\infty}\frac{P_1(1-R)(1-R_L)(q^i-1)}{q-1}I \tag{8}$$

由于公比$q<1$，等比数列收敛，对无穷次反射过程取极限后，SiPM光敏区吸收的总光强可表示为：

$$I_{sum}=\frac{P_1(1-R)(1-R_L)}{1-(P_1R+P_2R_S)R_L}I \tag{9}$$

基于等比数列求和的数学特性，该结果与折射角θ无关，表明入射光在任意角度下的多次反射过程具有统计对称性。当入射光源为覆盖N个微元的面光源（总光强NI，对应非平行光的任意入射方向）时，SiPM光敏区的总吸收光强为：

$$NI_{sum}=\frac{P_1(1-R)(1-R_L)}{1-(P_1R+P_2R_S)R_L}NI \tag{10}$$

SiPM光敏区对入射光的吸收率可表示为：

$$P_S=\frac{P_1(1-R)(1-R_L)}{1-(P_1R+P_2R_S)R_L} \tag{11}$$

在未增设高反射金属膜的对照情况下（假定死

区间隔区域反射率为0)，SiPM光敏区对入射光线的吸收率为：

$$P_{S0}=\frac{P_1(1-R)(1-R_L)}{1-P_1RR_L} \tag{12}$$

基于光敏区吸收率与表面透射率的正相关关系，将吸收率增幅等价为绝对量子效率中表面透射率T的增益，可得T的增幅为：

$$T_{more}=\frac{P_S}{P_{S0}}-1=\frac{1-P_1RR_L}{1-(P_1R+P_2R_S)R_L}-1 \tag{13}$$

取矩形平面波单个矩形微元面积与正六边形G-APD单元面积一致(即86.602 5 μm^2)，其中光敏区(圆形)面积为38.484 5 μm^2(占比P_1=44.44%)，金属反射层区域面积为48.118 μm^2(占比P_2=55.56%)。同时将前文设定的参数代入公式(3)、(13)、(14)、(15)，经计算得到公比为0.065 8，死区有无金属膜时的吸收率分别为0.371 9，0.350 2，进而得到SiPM表面透射率T的增幅为6.20%。

2.2 金属膜参数对透射率影响的理论分析

不同金属的光学常数直接决定反射率饱和深度与饱和值[15]。表1为几种常见金属膜的光学常数。可以看出银膜综合性能最优，但现代微电子技术在芯片表面常用的金属膜为Al。因此以Al为例，对Al膜厚度、工艺容差对透射率的影响进行分析。

表1 常见金属膜的反射参数[15]

材料	波长/nm	趋肤深度δ/nm	反射率饱和深度/nm	饱和反射率(典型值)
Au	550	29	50～60(连续膜)	95%(红光区可达98%)
Al	550	14.6	50～60(无氧化)	95%
Ag	550	12～15	30～40	96～98%

50 nmAl膜厚度接近3倍趋肤深度，已达到饱和反射率95%。

表2为根据上述理论计算的得到的Al膜厚度对SiPM有效透射率的影响。可以看出，随着Al膜厚度的增加，使反射率从80%升至95%，透射率增幅从5.20%升至6.20%，但厚度灵敏度从0.075%/nm降至0.015%/nm，50～60nm时反射率饱和，SiPM表面透射率增幅趋稳。

表2 铝膜厚度灵敏度分析

R_S/%	厚度/nm	P_S/%	P_{S0}/%	T/%	厚度灵敏度/(%·nm^{-1})
80	20～22	36.83	35.02	5.20	0.075
85	25～27	36.94	35.02	5.51	0.062
90	30～40	37.09	35.02	5.91	0.040
95	50～60	37.19	35.02	6.20	0.015

表3为SiPM表面Al膜结构制备的不同工艺参数对SiPM有效透射率的影响。可以看出厚度均匀性±3 nm、表面粗糙度±1 nm、光刻对准精±0.5 μm的容差分别导致透射率偏差±0.12%、降0.24%、降0.62%。通过采取优化措施磁控溅射与椭偏仪实时监测、等离子体清洗、电子束光刻(对准精度±0.2 μm)等优化措施可有效控制误差。

表3 工艺容差灵敏度分析

工艺参数	容差范围	对Rs的影响	对T的影响
厚度均匀性	±3 nm	Rs±2%	T±0.12%
表面粗糙度	±1 nm	Rs每增加1 nm降2%	T−0.24%
光刻对准精度	±0.5 μm	死区覆盖度降5%	T−0.62%

3 仿真结果与分析

利用Comsol射线光学模块对图1结构进行光线追踪，器件光敏区对入射光的吸收率结果如图4所示。吸收率定义为光接收的光子数与入射光子总数的比值。

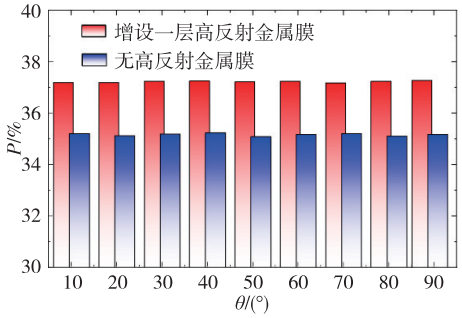


图4 死区有无高反射层的光学仿真结果示意图

由图4可以得知，在SiPM表面增设一层高反射金属膜增加了光敏区对光子的吸收率，且吸收率与入射角度无关。通过Comsol射线光学模块进行光线追踪仿真，对0°～90°范围内不同入射角θ的计算结果取平均值，得到增设高反射金属层时SiPM光敏区吸收率为37.22%，无金属层时为35.02%。经计算(37.22～35.02%)/35.02%×100%可得透射率增幅为6.28%。光学仿真结果表明，死区高反射膜结构使SiPM绝对量子效率的透射率分量提升6.28%，理论计算值6.20%与仿真结果6.28%之间的差异(相对误差1.29%)主要源于三方面因素：

(1)理论模型基于平行光假设的几何光学近似，而实际仿真考虑了0°～90°全角度入射条件下的散射效应；(2)网格剖分精度不足导致光敏区(直径7 μm)边缘在射线追踪中产生几何偏差，影响光耦合效率；(3)单次1 000条光线的蒙特卡洛统计引入±0.05%的统计误差，经10次独立仿真平均后降至±0.02%。通过误差传递公式综合评估，系统不确定度为±0.12%。

图5为Comsol半导体模块仿真得到的有无死区高反射膜的SiPM光响应度及绝对量子效率曲线。通过半导体模块的电磁波频域耦合物理场仿真获取光响应度曲线，再依据公式(1)计算得到绝对量子效率曲线。数据显示：在450 nm入射光处，增设高反射膜的SiPM较未处理器件光响应度增幅约6.2%；在425 nm波长附近，前者绝对量子效率增幅同样接近6.2%，与理论计算及光学仿真结果高度吻合。

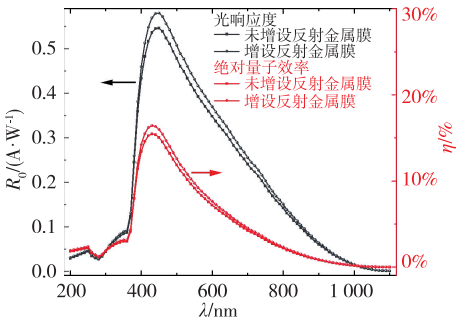


图5　Comsol半导体模块仿真结果

在暗态条件下对增设死区高反射膜的SiPM施加25 V反向偏压，其电场强度二维分布如图6所示。对比无金属层结构可见，死区金属膜的引入对SiPM内部耗尽区电场分布无显著影响。

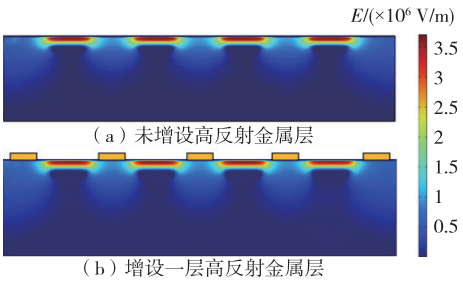


图6　Comsol光电特性仿真的电场分布

图7为模拟得到的伏安特性曲线，其中红色曲线对应G-APD间隔区增设金属膜的SiPM器件，黑色曲线为死区无金属膜的对照样品。仿真结果显示，增设高反射金属膜的SiPM较未处理器件，其击穿电压出现明显偏移。分析认为，金属层的引入在死区形成了额外的金属-半导体接触界面，可能改变器件边缘的电场分布，导致击穿电压降低，表明该结构改性对器件电学击穿特性存在一定影响。

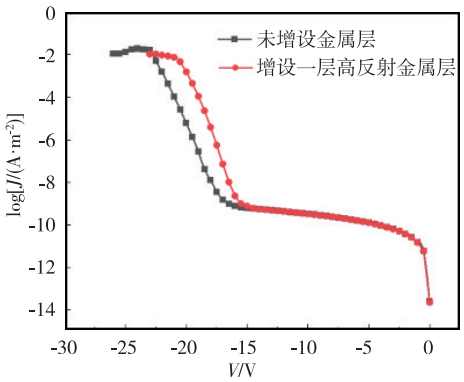


图7　SiPM在不同条件下暗置的反向I-V曲线

4　实验可行性分析

本文所提结构的制备步骤示意图如图8所示，具体制备工艺：采用电子束蒸镀技术(真空度为5×10^{-5} Pa、蒸发速率为0.8 nm/s，50 nmAl膜厚度均匀性±3 nm)在硅晶圆表面沉积金属薄膜。Al膜与Si基底附着力已在文献[13]中报道，经3M胶带测试达5B级(ISO 2409标准)，－40℃～85℃热循环100次无脱落，且电子束蒸镀工艺与CMOS后端金属化产线兼容[16]。通过紫外光刻工艺(分辨率±0.5 μm)对死区以外的光敏区域进行图形化保护，采用5%浓度$FeCl_3$溶液(腐蚀速率为0.5 nm/s)湿法刻蚀，仅保留死区间隔区域的Al膜；随后通过CF_4/O_2等离子体刻蚀(功率为150 W)去除铝膜表面天然氧化层，旋涂液态树脂并固化，最终形成覆盖金属层的透明封装结构(图2)。该结构通过Al膜与封装层的光学谐振腔效应，实现死区入射光向光敏区的高效耦合。

Al膜作为微电子技术常用金属膜，在450 nm蓝光处反射率达95%，无深能级杂质风险[13]。工艺上可能存在的问题有：Al膜表面天然氧化层需通过等离子体刻蚀去除并蒸镀SiO_2保护层维持反射率；Al与环氧树脂的热膨胀差异可添加硅烷偶联剂改善界面韧性；需控制电子束蒸镀温度与基片旋转速率以保证厚度均匀性。这些问题在现代微电子工艺技术中均可以得到解决，该方案为SiPM死区优化提供更具工程可行性的实现路径。

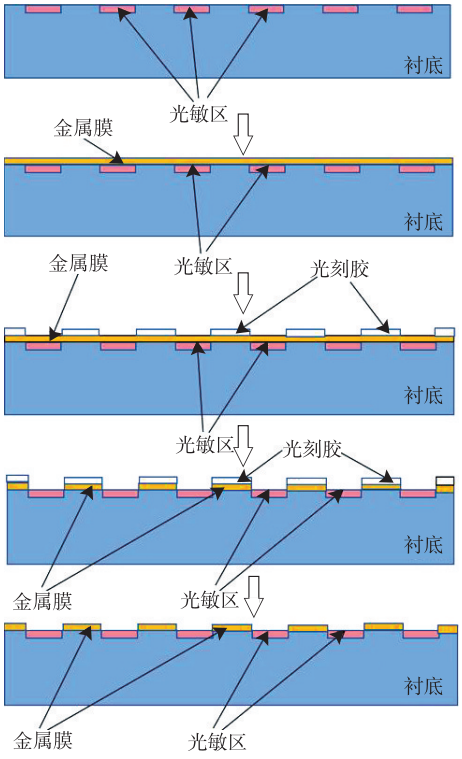


图8 工艺流程图

5 结论

在SiPM表面死区覆盖金属Al膜，通过金属Al膜与封装层的光学谐振腔效应可以明显提高SiPM的量子效率。理论与仿真表明，透射率增幅6.20～6.28%，绝对量子效率提升6.2%。该方法可采用成熟的磁控溅射工艺，兼容半导体产线，无需复杂加工，为SiPM芯片及其他阵列化光电探测器的探测效率性能提升提供了参考。

参考文献：

[1] 胡文韬，劳 慧，邱 奥，等. 全数字PET关键器件硅光电倍增器研究进展[J]. CT理论与应用研究，2024，33(4)：421-432.
Hu Wentao, Lao Hui, Qiu Ao, et al. Advance in silicon photomultiplier for all-digital positron emission tomography [J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2024, 33(4): 421-432.

[2] 冯 畅. 多波长绝对标定单光子探测器探测效率的实验研究[D]. 天津：天津大学，2021.
Feng Chang. Absolute calibration of single-photon detector detection efficiency at multiple wavelength bands[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.

[3] 张 琳，谢 港，刘宇霄，等. 外延电阻淬灭型硅光电倍增器的最新研究进展[J]. 红外与激光工程，2022，51(7)：20210587.
Zhang Lin, Xie Gang, Liu Yuxiao, et al. Recent research progress of silicon photomultiplier with epitaxial quenching resistor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(7): 20210587.

[4] Gundacker S, Heering A. The silicon photomultiplier: fundamentals and applications of a modern solid-state photon detector[J]. Physics in Medicine & Biology, 2020, 65(17): 17TR01.

[5] 赵嘉琦，胡 帅，党蕊君，等. 基于射线追踪技术与电磁等效原理的几何光学近似模型的设计与验证[J]. 光学学报，2024，44(12)：1201003.
Zhao Jiaqi, Hu Shuai, Dang Ruijun, et al. Design and verification of geometric optical approximation model based on ray tracing technique and electromagnetic equivalence principle [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(12): 1201003.

[6] 王 江，王 鸥，刘向东，等. 32×32 Si盖革模式激光焦平面探测器[J]. 激光技术，2024，48(5)：665-670.
Wang Jiang, Wang Ou, Liu Xiangdong, et al. 32 × 32 Si Geiger-mode laser focal plane detector[J]. Laser Technology, 2024, 48(5): 665-670.

[7] 栾新鹏. 纤锌矿InGaN/GaN核壳纳米线太阳能电池的内量子效率[D]. 呼和浩特：内蒙古大学，2022.
Luan Xinpeng. Internal Quantum Efficiency of Fiber Zinc Ore InGaN/GaN Core Shell Nanowire Solar Cells[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2022.

[8] 王逸翔，肖志葳，贾红宝，等. 表面改性多孔氧化硅减反射膜的制备及其性能分析[J]. 山西化工，2024，44(9)：11-13.
Wang Yixiang, Xiao Zhiwei, Jia Hongbao, et al. Preparation and performance study of surface modified porous silica anti-reflective coating [J]. Shanxi Chemical Industry, 2024, 44(9): 11-13.

[9] 汪文文，肖志葳，邓志文，等. 基于ZrO_2-SiO_2和介孔SiO_2凝胶膜制备可见光区双层减反射膜[J]. 辽宁科技大学学报，2024，47(1)：75-80.
Wang Wenwen, Xiao Zhiwei, Deng Zhiwen, et al. Preparation of double-layer visible region anti-reflective films based on ZrO_2-SiO_2 and mesoporous SiO_2 gel films[J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2024, 47(1): 75-80.

[10] Trippl C, Haefeli G, Schneider O, et al. Microlens-enhanced silicon photomultiplier arrays for LHCb SciFi Tracker Upgrade Ib[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, 1040: 167216.

[11] 周天丰，解加庆，梁志强，等. 光学微透镜阵列模压成形研究进展与展望[J]. 中国光学，2017，10(5)：603-618，703.
Zhou Tianfeng, Xie Jiaqing, Liang Zhiqiang, et al. Advances and prospects of molding for optical microlens array [J]. Chinese Optics, 2017, 10(5): 603-618, 703.

[12] 乌李瑛，刘 丹，刘 民，等. 硅微透镜阵列的制备工艺[J]. 半导体光电，2023，44(3)：389-394.

Wu Liying, Liu Dan, Liu Min, et al. Fabrication process for microlens array on silicon [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(3): 389-394.

[13] Yoon H, Hong S. Highly improved photocurrent of a flexible MoS_2 photodetector *via* a backside Al metal mirror and its in- and outward folding states [J]. RSC Advances, 2024, 14 (47): 34979-34984.

[14] 张国青, 刘丽娜, 朱长军. 圆形六角密排多像素光子计数器 [P]. 发明专利, 201320817286.3. 2014.07.30.
Zhang Guoqing, Liu Lina, Zhu Changjun. Circular Hexagonal Densely Paired Multi Pixel Photon Counter [P]. Invention Patent, 201320817286.3. 2014.07.30.

[15] Nabil M, Fouad S S, Easawi K, et al. Novel correlations between optical absorption and water desalination of Ag/Fe_3O_4 nanocomposite prepared by pulsed laser ablation in liquid[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 164: 109545.

[16] Sosnowchik B D, Azevedo R G, Cao A, et al. Silicon-to-steel bonding using rapid thermal annealing [J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2005, 28 (4): 626-634.

作者简介：

郭超前(2000—)，男，硕士研究生，主要从事光电检测研究；

张国青(1983—)，男，博士，教授，硕士生导师，主要从事单光子灵敏探测器方面的研究。