

32×32 Si盖革模式激光焦平面探测器

王江, 王鸥, 刘向东, 袁利, 柯尊贵, 郝昕, 覃文治, 杨赞秀

32×32 Si Geiger-mode laser focal plane detector

引用本文:

王江, 王鸥, 刘向东, 袁利, 柯尊贵, 郝昕, 覃文治, 杨秀. 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]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 48(5): 665–670.

您可能感兴趣的其他文章

1. APD阵列及其成像激光雷达系统的研究进展

引用本文: 李兵, 杨赞秀, 李潇, 等. APD阵列及其成像激光雷达系统的研究进展[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 310–316.

2. 激光云粒子成像探测仪研制

引用本文: 史晓丁, 冯力天, 刘英, 等. 激光云粒子成像探测仪研制[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 67–72.

3. 基于APD面阵探测器的非扫描激光主动成像雷达

引用本文: 陈德章, 张华, 冷杰, 等. 基于APD面阵探测器的非扫描激光主动成像雷达[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 775–778.

4. 905nm InGaAs脉冲激光二极管驱动电流特性分析与测试

引用本文: 李勇军, 邹建, 甘泉露, 等. 905nm InGaAs脉冲激光二极管驱动电流特性分析与测试[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 803–806.

5. 线激光散斑检测弹幕武器炮口振动测量方法

引用本文: 徐达, 何凯平, 熊伟, 等. 线激光散斑检测弹幕武器炮口振动测量方法[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 876–880.

文章编号: 1001-3806(2024)05-0665-06

32 × 32 Si 盖革模式激光焦平面探测器

王江¹, 王鸥^{1*}, 刘向东¹, 袁利², 柯尊贵¹, 郝昕¹, 覃文治¹, 杨赞秀¹

(1. 西南技术物理研究所, 成都 610041, 中国; 2. 中国航天科技集团有限公司 第五研究院 第五〇二研究所, 北京 100035, 中国)

摘要: 为了满足 350 nm ~ 1100 nm 波长范围内远距离及微弱激光 3 维成像探测的需求, 提出了一种规模为 32 × 32 的盖革模式硅激光焦平面阵列探测器, 它主要由硅雪崩光电二极管阵列、读出电路芯片、微透镜阵列、半导体制冷器、引脚网格阵列壳体等元件组成。硅雪崩光电二极管焦平面阵列采用拉通型 N⁺-Π₁-P⁻-Π₂-P⁺ 结构, 工作在盖革模式下, 通过 Si 片背面抛磨减薄及盲孔刻蚀技术, 实现了纤薄光敏区的加工; 读出电路采用主动模式淬灭设计, 使电路单元的死时间控制在 50 ns 以内, 并利用一种带相移技术的时间数字转换电路优化方案, 在满足时间分辨率不大于 2 ns 的同时, 降低了读出电路芯片的功耗。结果表明, 在反向过偏电压 14 V、工作温度 -40 °C 的条件下, 该探测器在 850 nm 的目标波长可实现 20.7% 的平均光子探测效率与 0.59 kHz 的平均暗计数率, 时间分辨率为 1 ns, 有效像元率优于 97%。该研究为纤薄型背进光 Si 基激光焦平面探测器的研制提供了参考。

关键词: 传感器技术; 雪崩焦平面探测器; 盖革模式; 硅; 激光 3 维成像

中图分类号: TN215; O475

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.05.008

32 × 32 Si Geiger-mode laser focal plane detector

WANG Jiang¹, WANG Ou^{1*}, LIU Xiangdong¹, YUAN Li², KE Zungui¹,
HAO Xin¹, QIN Wenzhi¹, YANG Yunxiu¹

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 2. 502 Research Institute, the Fifth Research Institute, China Aerospace Science and Technology Group Co. Ltd., Beijing 100035, China)

Abstract: A 32 × 32 Geiger-mode silicon laser focal plane array detector was developed for the long-distance or weak-laser detection of the 3-D imaging system using the wavelength in range of 350 nm ~ 1100 nm. This detector is mainly composed of silicon avalanche photodiode array, readout circuit chips, microlens arrays, semiconductor refrigerators, and pin-grid array shells. The silicon avalanche photodiode focal plane arrays, adopts the structure of pull through N⁺-Π₁-P⁻-Π₂-P⁺ and works at the Geiger mode. The processing of thin photosensitive areas has been achieved through Si wafer back polishing and blind hole etching technology. An active-quenching-mode design was adopted to control the dead time of the circuit unit within 50 ns. An optimized time-to-digital converter circuit scheme with phase shift technology was used to achieve a time resolution within 2 ns while reducing the power consumption of the readout circuit chip. The results show that under the conditions of reverse bias voltage of 14 V and operating temperature of -40 °C, the detector can achieve an average photon detection efficiency of 20.7% and an average dark counting rate of 0.59 kHz at the target wavelength of 850 nm, with a time resolution of 1 ns and an effective pixel rate better than 97%. This study provides a reference for the development of thin-type back-illuminated silicon-based laser focal plane detectors.

Key words: sensor technique; avalanche focal plane detector; Geiger-mode; silicon; laser 3-D imaging

0 引言

单光子雪崩二极管(single photon avalanche diode, SPAD)具有物理意义上最小的光信号探测阈值, 其探测波长与高功率脉冲激光器匹配, 通过对信号光子统计, 可以实现遥远距离极微弱光的探测^[1-2]。近年来,

随着激光探测技术的发展, 基于 SPAD 面阵的硅基盖革模式雪崩光电二极管(Geiger-mode avalanche photodiode, GM-APD)激光焦平面探测器组件因具有既能获得强度信息与距离信息、又可达到单光子量级的极高灵敏度等特点, 特别适用于超远距离、暗弱目标的探测与识别, 而且采用半导体工艺制作、集成度高、体积及功耗可控, 作为远距离或者微弱激光 3 维成像探测系统的核心组件, 得到了极大重视, 研究进展迅速^[3-7]。

美、欧、日等国从 20 世纪 70 年代就开始了该项技

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB3203101)

* 通信作者: eyiwang@163.com

收稿日期: 2023-08-29; 修回日期: 2023-11-17

术的研究。发展至今,相继在该领域实现了器件机理、组件制备及工程化的突破。其中,美国在此项技术研究中处于领先的地位,美国麻省理工大学 Lincoln 实验室、ASC 公司、Sensors Unlimited 公司、Lockheed Martin 公司、Raytheon 公司、普林斯顿 Lightwave 公司、DRS 公司等机构均推出了相应的雪崩光电二极管 (avalanche photodiode, APD) 激光焦平面探测器组件,主流阵列规模逐渐从 32×32 、 64×64 等小规模阵列逐渐扩大到 128×128 、 256×256 等中等规模,并正逐渐向 1024×1024 及以上大规模阵列发展,响应波段覆盖 $500 \text{ nm} \sim 5000 \text{ nm}$ ^[8-18]。Lincoln 实验室和 Raytheon 公司还实现了 APD 阵列与读出电路的单片集成,进一步降低了 APD 激光焦平面探测器在工程化应用上的成本和技术难度。此外,日本三菱公司、德国 First Sensor 公司等机构也在该领域开展了一系列工作,并研制了相应的探测器组件。国内开展激光探测器研制的单位主要有西南技术物理研究所、中国电子科技集团公司第四十四研究所、中国科学院上海技术物理研究所等,目前处于对国外同类产品的跟研状态^[19-22]。

本文中报道了 32×32 像元规模、 $150 \mu\text{m}$ 中心距的硅盖革模式雪崩光电二极管阵列 (Geiger-mode avalanche photodiode arrays, GM-APDA), 主动淬灭型时间数字转换读出电路以及混合集成的盖革模式硅雪崩光电二极管阵列激光焦平面探测器组件的设计与制备工艺。利用抛磨减薄及盲孔刻蚀技术对芯片背面进行精确减薄,得到像元区厚度为 $60 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ 的硅 GM-APDA 光敏芯片;利用数字相移技术,实现了读出电路高时间分辨率与低功耗的兼顾;利用微透镜耦合技术,解决了探测器组件填充因子较低的问题。对器件的平均光子探测效率、暗计数率、时间分辨率等主要性能参数进行了测试,结果达到了预期水平。

1 盖革模式硅激光焦平面探测器设计与制备

1.1 器件结构与工作原理

盖革模式硅激光焦平面探测器主要由硅 GM-APDA 光敏芯片、读出电路芯片、微透镜阵列、半导体热电制冷器 (thermoelectric cooler, TEC)、陶瓷基板、引脚网格阵列 (pin grid array, PGA) 壳体等元件组成,参见图 1。其中,微透镜将入射光聚焦后投向各 GM-APDA 单元的光敏面;GM-APDA 芯片的像元规模为 32×32 ,在 850 nm 波长具备不小于 20% 的平均光子探测效率;读出电路具备不大于 2 ns 的时间分辨率与 12 位计时位数;TEC 为探测器提供 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 的稳定工作温度。该探测器的每个像素单元包含 GM-APDA 光敏单元和读出电路单元,其具体工作原理为:当探测系统中的激光器

发射激光时,开始时钟信号会被触发,读出电路的时间测量模块开始计时。当检测到光子触发 GM-APDA 的雪崩效应时,探测器会产生 1 个向下的电压脉冲。若该脉冲信号低于判别阈值,此时的计时值将被锁存,并传输给寄存器;最后在系统输出时钟的控制下,每个串联像素寄存器锁存的数据将依次并行输出。系统解码这些时间数据后,可以获得各个像素的光子飞行时间,进而得到目标的 3 维距离图像。

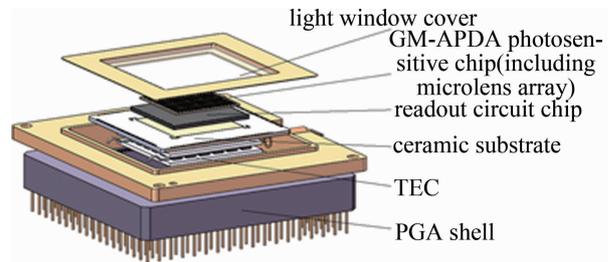


图 1 盖革模式硅激光焦平面探测器组成元件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Geiger-mode silicon laser focal plane detector module

1.2 GM-APDA 光敏芯片设计与制备

GM-APDA 光敏单元采用拉通型结构,如图 2a 所示。其中, N^+ 为高浓度 N 型掺杂的正面接触层,表面掺杂浓度不小于 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,厚度为 $0.4 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$; Π_1 为雪崩倍增区,掺杂浓度不大于 $2.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,厚度为 $1 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$; P^- 为电荷层,掺杂浓度不大于 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$,厚度为 $0.5 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$,其为倍增区提供高电场 (不小于 $3 \times 10^5 \text{ V/cm}$),同时为吸收区产生较低电场 (不大于 $1 \times 10^5 \text{ V/cm}$),但仍足以保证载流子在吸收区以饱和速度漂移 (不小于 $1 \times 10^4 \text{ V/cm}$),从而在有效降低芯片雪崩工作电压的同时获得较低的时间抖动; Π_2 为外延生长的 P 型轻掺杂层,掺杂浓度不大于 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$,厚度为 $30 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$,是信号光的主要吸收区,工作电压下该层被耗尽; P^+ 为外延基片的衬底层,掺杂浓度不小于 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,作为器件的背面接触层使用。

由于较强的入射光进入倍增区被吸收后会产生大量的电子-空穴对,造成较大的过剩噪声,因此,光敏芯片采用背入射方式,以抑制 APD 的过剩噪声。这需要对硅衬底进行减薄、刻蚀进光孔、并在进光面表面设置抗反射膜层,以减小表面对光的反射。本文中采用 $\text{SF}_6 + \text{C}_4\text{F}_8 + \text{O}_2$ 气体系列,在减薄抛光好的阵列芯片背面与 APD 对应的位置进行刻蚀,通过 $\text{SF}_6 + \text{O}_2$ 刻蚀硅,以及通过 C_4F_8 钝化通孔侧壁,制备得到直径 $90 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$ 、深度 $36 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ 的进光孔,其表面形貌如图 2b 和图 2c 所示。图 2c 中色度条表示到进光孔底部的距离,成功实现了刻蚀深度不均匀性不大于 $\pm 2\%$ 。

完成进光孔刻蚀后,采用 SI500D 型低温感应耦合等离子沉积系统,在 85 °C 沉积出高质量的氮化硅薄膜,随后使用剥离方法实现进光孔内氮化硅增透膜制备。入射光依次通过 P⁺ 层、吸收区、倍增区、N⁺ 层后到达介质层与电极的界面,其具有较高的反射率,未被吸收的入射光将被反射回吸收层,以进一步提高器件的量子效率和响应度。同时,为减少载流子在较厚衬底层中的扩散时间,背面电极通过进光孔侧壁与 APD 较薄的 P⁺ 区接触,以提高 APD 响应速度。

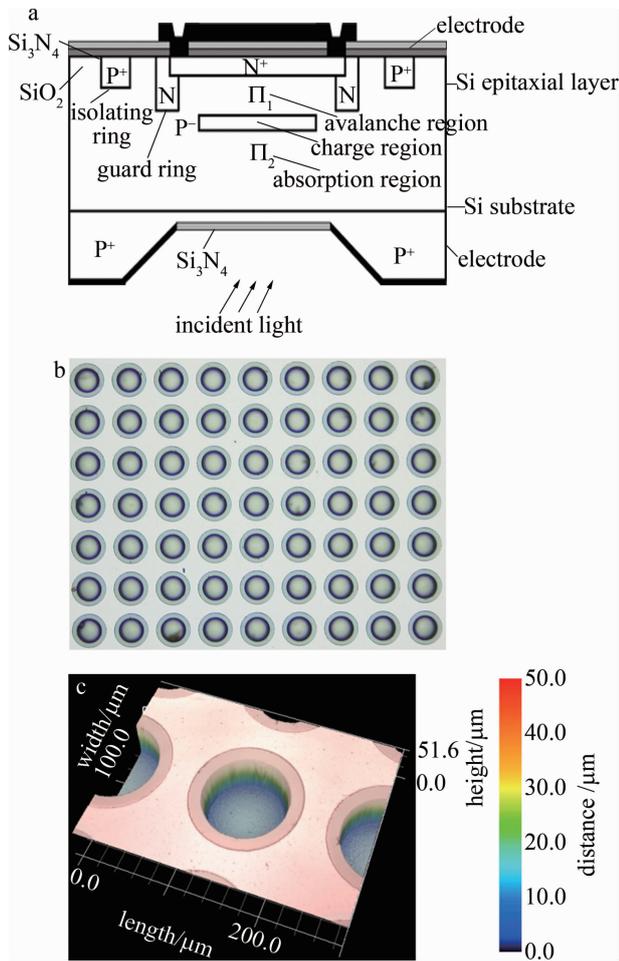


图2 a—GM-APDA 光敏芯片结构示意图 b,c—进光孔共聚焦显微镜照片

Fig. 2 a—structure diagram of the GM-APDA photosensitive chip b,c—confocal microscope photograph of the light entry hole

GM-APDA 芯片是一个具有 32 × 32 规模 APD 单元的阵列芯片。为防止表面形成反型沟道引起光敏单元之间的串扰,光敏单元周围被设置了截止隔离环;同时,该结构还可有效减小光敏单元之间的横向耗尽宽度,从而提高 APD 阵列的像元密度。为确保 APD 阵列具有较高的响应均匀性和有效像元率,光敏单元之间的间隔不宜过宽以致阵列光敏芯片尺寸过大,故像元中心距取 150 μm,光敏面(即 P-N 结面)直径设置为 50 μm,即光敏单元之间的间隔约为 100 μm。为保

护单元外围,采用保护环的设计,使最外围有用光敏单元的边缘效应得到和内部单元相似的抑制,防止边缘的低压击穿,并减小表面漏电流。

1.3 读出电路设计

本文中采用一种带相移技术的时间数字转换电路(time digital conversion circuit, TDC)优化方案,通过由计数器与延时链组成的两级结构,在满足不大于 2 ns 时间分辨率及 20 kHz 读出帧速度的同时,降低了读出电路芯片功耗,整体架构设计如图 3a 所示。工作过程如下:外部输入 125 MHz 的时钟(clock, CLK)信号,当外部计时开始信号上升沿到来时,计数器开始计数;当检测到光子时电路内部产生的计时结束信号的上升沿到来时,计数器停止计数,并保持当前计数值;同时让外部输入时钟 CLK 通过由 8 个延时单元构成的延时链产生 8 个不同相位的时钟信号,在 start 信号到来时,对各个相位时钟信号进行 1 次采样,延时链输出 1 个 8 位的信号,再经编码模块进行编码后,输出并保存在数据处理模块(deal)中;同样地,当门控信号转换电路产生的翻转信号(stop)到来时,又对各相位时钟信号进行 1 次采样,经编码模块(code)进行编码,输出至数据处理模块(deal),与 start 信号到来时的采样编码结果进行差运算,得到一个 4 位的信号,与 8 位的计数器结果一起构成整个时间段对应的数字值(12 位),从而实现把 start 到 stop 信号之间的时间间隔转换为 12 位数字信号。当 stop 信号到达时,计数器停止计数,当 20 kHz 的计数器输出时钟有效时,将其锁存的状态逐一对位并行转移到 12 位寄存器内,在不低于 25 MHz 的移位输出时钟控制下,同时把 32 × 32 个像素寄存器中锁存的 12 位数字状态,一一对应地以并行方式传输到下一像素寄存器对应的状态位,实现 20 kHz 帧数据读出。寄存器之间以串联的方式连接,12 位数据并行输出。图 3a 中,PG 表示脉冲生成(pulse generation),TP 为预置时间(timing pre-set)。

为了使单元 GM-APDA 的死时间达到不大于 50 ns,读出电路采用了主动模式淬灭设计。GM-APDA 单元淬灭电路设计图如图 3b 所示。工作过程如下:当 GM-APDA 检测到光子时,APD 发生雪崩击穿,产生雪崩电流,探测电路探测到雪崩电流,使 A 点电压发生向下跳变,从而控制主动淬灭电路开始工作。经过一段时间,主动淬灭电路的输出端 B 点的电压变为高电平,经反馈支路开启所控制的晶体管 M₁,将 V_{APD} 点的电压迅速拉低,使单管 APD 两端电压低于击穿电压,实现单管 APD 的淬灭过程。又经过一段时间,主动淬灭电路中的充放电电路使 B 点电压逐渐降低。当 B 点电压变为低电平后,主动淬灭电路通过反馈关断所

控制的晶体管 M_1 , V_{DD} 通过电阻 R_0 和 APD 的寄生电容对单管 APD 充电,使 APD 芯片恢复盖革模式工作状态。如此就实现了 APD 在接受光子后的淬灭和恢复过程。GM-APDA 单元主动淬灭电路的时序如图 3c 所示。当 APD 发生雪崩击穿,产生大电流时,主动淬灭电路使得 V_{APD} 迅速下降,实现单管 APD 的淬灭。而后, B 点处于高电平,表明 APD 处于恢复阶段。在淬灭和恢复期间, out 输出高电平,表明 APD 已经接受光子。 B 点变为低电平后, V_{APD} 上升,此时 V_{DD} 正在对 APD 充电,以实现 APD 的下一探测。

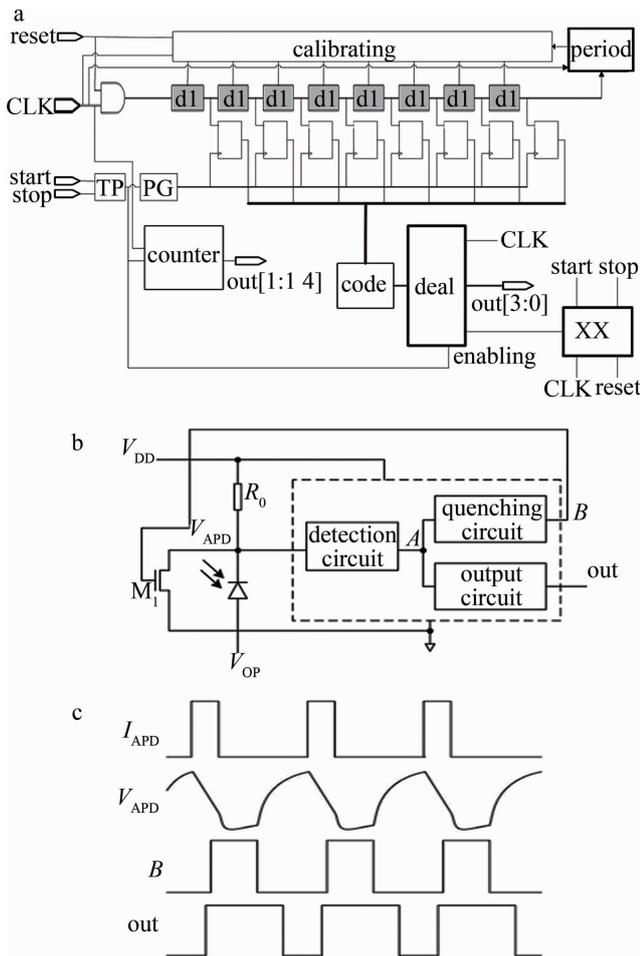


图 3 a—高精度时间数字转换电路结构图 b—GM-APDA 单元主动淬灭电路设计框图 c—GM-APDA 单元主动淬灭电路时序图
 Fig. 3 a—structure diagram of the high precision time digital conversion circuit b—block diagram of the GM-APDA unit active quenching circuit design c—timing diagram of the GM-APDA unit active quenching circuit

1.4 探测器组件制备

完成流片后,对光敏芯片进行击穿电压与坏点测试,测试结果如图 4 所示。图中星号标记处为像元阵列中坏点所在位置。由图 4 可知,图中所示的 32×32 规模光敏芯片共有 24 处坏点,故其有效像元率可达 97% 以上。经坏点光刻屏蔽后,通过高精度钢柱倒装

互连,将 GM-APDA 光敏芯片与读出集成电路芯片进行混合集成,获得硅盖革焦平面芯片组件。

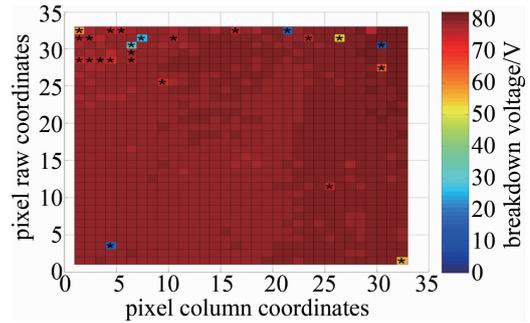


图 4 GM-APDA 光敏芯片击穿电压与像元坏点分布测试图
 Fig. 4 Test diagram of the breakdown voltage and the dead pixels distribution of GM-APDA photosensitive chip

本文中 GM-APDA 光敏芯片设计中心距 $150 \mu\text{m}$,光敏面直径 $50 \mu\text{m}$,故填充因子仅能达到 8.7%,这意味着入射光的大部分会照射到光敏面之间的死区中。这部分光不仅没有被利用,而且会反射、散射,或引起相邻相元间光串扰,在探测器中形成有害辐照。因此,本文作者设计将微透镜阵列耦合于 SPAD 芯片表面,

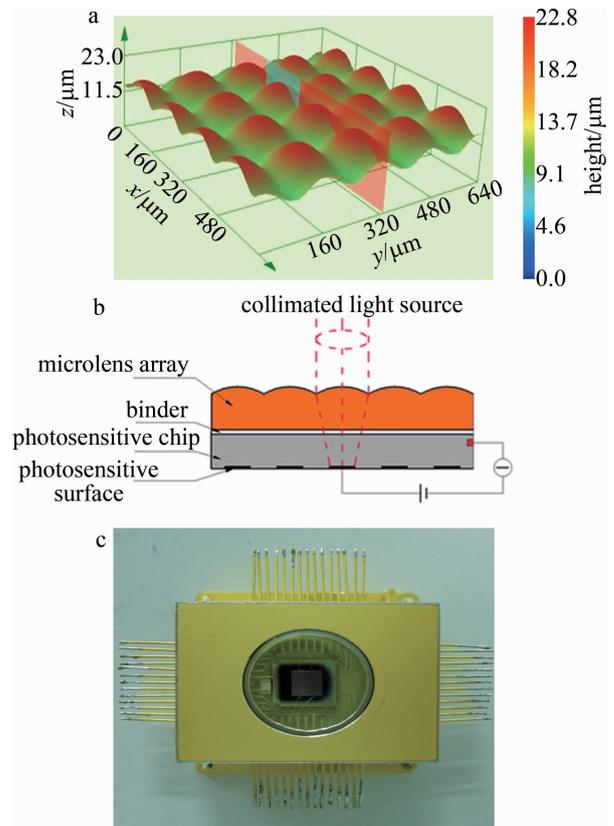


图 5 a—微透镜阵列表面形貌及尺寸分布测试图 b—微透镜阵列安装示意图 c—盖革模式硅激光焦平面探测器组件实物图
 Fig. 5 a—test diagram of the surface morphology and the size distribution of microlens array b—installation diagram of microlens array c—photograph of the Geiger-mode silicon laser focal plane detector module

把光敏区外的散射光汇聚到光敏面内,提升组件有效填充因子,从而提升像元探测效率。本文中采用光刻胶热熔回流与电感耦合等离子刻蚀相结合的工艺,在石英基材上制备出微透镜阵列,其表面形貌及尺寸如图5a所示。图中,色度条表示微透镜阵列表面任意一点到微透镜阵列底部的高度。微透镜阵列的安装示意图如图5b所示。本文中通过支撑式光学胶粘结的方式将微透镜阵列耦合在芯片组件表面,以避免“面面”直接接触耦合时产生气泡,并同时实现微透镜阵列安装高度的微调,取安装距离140 μm,耦合精度控制在约±5 μm,耦合后组件有效填充因子为76.6%。选用多层结构TEC作为冷源,采用水冷+主动冷却方式,将热面温度控制在20℃、冷面维持在-40℃,为芯片提供稳定的工作温度。封装时,将陶瓷垫片粘接在TEC冷面,随后将硅盖革焦平面芯片组件直接粘接在陶瓷垫片上。封装腔体需进行内部排气处理,排气后腔内气压不大于10 Pa。最终制备得到的探测器组件实物图如图5c所示。

2 性能参数测试

搭建如图6a所示的测试系统对盖革模式硅激光焦平面探测器进行性能测试,其原理为:通过供电系统给被测器件供电,采用多路信号发生器提供被测件正常工作所需的控制信号,经数据采集将被测件的计时值采集并存储,然后通过数据分析得到被测器件的光电指标。

其中:(a)芯片工作在-40℃;(b)光学系统采用平行光管;(c)数据采集采用TL2236B型数据采集器;(d)控制信号发生器采用PKPG2016+型信号发生器,帧频20 kHz。控制时序中,启动信号脉宽160 ns;开始计时信号脉宽120 ns,前沿距启动信号后延20 ns;关断信号脉宽660 ns,前沿距开始计时信号前沿5000 ns;读出始能信号脉宽80 ns,前沿距关断信号后延120 ns;读出时钟信号脉宽40 ns,占空比50%;光触发信号距开始计时信号前沿1380 ns;复位信号脉宽100 ns,前沿距离读出始能信号前沿91 μs。

对测试系统采集的数据进行处理,得到被测探测器组件的光子探测效率(photon detection efficiency, PDE)、暗计数率(dark count rate, DCR)以及有效像素率,如图6b和图6c所示。图中的测试结果表明,倒装互连的集成方式是可以实现探测器的正常工作的,互连连通率可达99.6%。当反向偏置电压高于击穿点14 V、该探测器在目标波长为850 nm时,可实现平均PDE为20.7%和平均DCR为0.59 kHz。

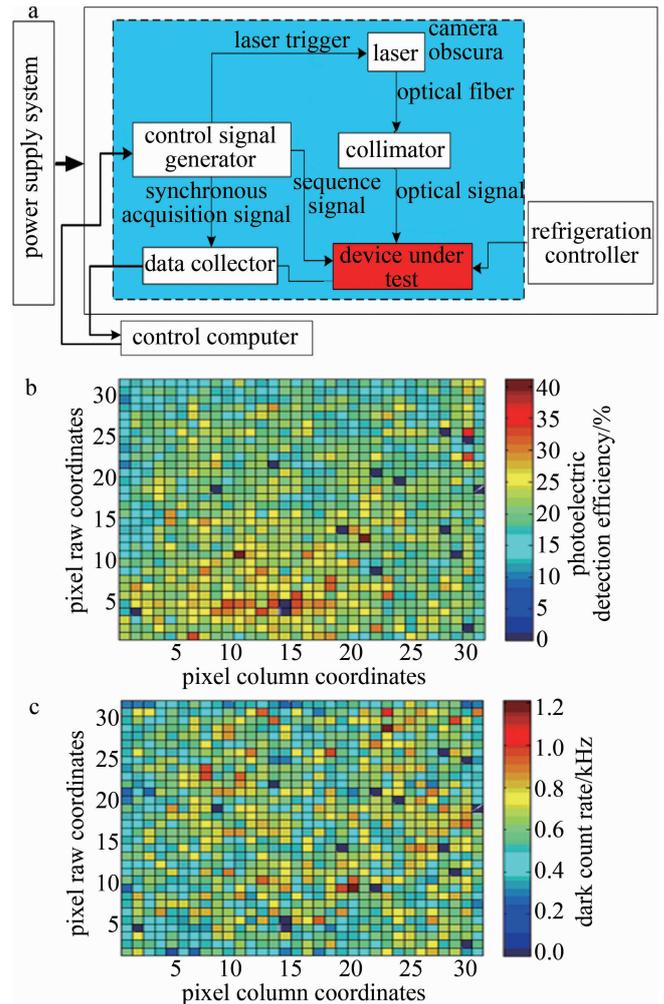


图6 a—盖革模式硅激光焦平面探测器组件测试系统示意图 b,c—反向偏置电压过偏14 V时盖革模式硅激光焦平面探测器组件的PDE/DCR及盲元分布图

Fig. 6 a—diagram of the Geiger-mode silicon laser focal plane detector module test system b,c—test diagram of the PDE/DCR and the dead pixels distribution of Geiger-mode silicon laser focal plane detector module when the reverse bias voltage is overoffset by 14 V

3 结论

研制了规模为32×32,中心距离为150 μm的背进光式平面结构硅盖革模式雪崩二极管面阵,经背面减薄与盲孔刻蚀后,与读出电路通过钢柱倒装互连的混合集成方式制备得到了盖革模式激光焦平面探测器组件。其中,读出电路采用数字移相技术,在较低的主频(125 MHz)下实现了1 ns的时间分辨率。经测试表明,该器件在-40℃的工作温度下,当反向偏置电压过偏14 V时,平均光子探测效率为20.7%(@850 nm),平均暗计数率为0.59 kHz。该探测器具备高灵敏度、高光子探测效率、全固态的特点,满足轻小型、低功耗、高精度激光3维成像、微弱光探测设备的应用需求,在远距离空间探测、交会对接、激光3维成像制导等领域

具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] EISAMAN M D, FAN J, MIGDALL A, *et al.* Invited review article: Single-photon sources and detectors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(7): 071101.
- [2] TOSI A, MORA D A, ZAPPA F. All silicon 1.55 μm high-resolution photon counting and timing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(23): 1956-1958.
- [3] ALBOTA M A, HEINRICHS R M, KOCHER D G, *et al.* Three-dimensional imaging laser radar with photon-counting avalanche photodiode array and microchip laser[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(35): 7671-7678.
- [4] MARINOL R M, STEPHENS T, HATCH R E, *et al.* A compact 3D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays: System and measurements[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2003, 5086: 1-15.
- [5] KEAST C, AULL B, BURNS J, *et al.* Three-dimensional integration technology for advanced focal planes[J]. *MRS Online Proceeding Library Archive*, 2008, 1112: 204-206.
- [6] MARINOL R M, RICHARDSON J, GARNIER R, *et al.* Photon-counting lidar for aerosol detection and 3-D imaging[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2009, 7323: 73230H.
- [7] ROGER S, HOWARD B S. Eye-safe laser radar 3-D imaging[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2001, 5412: 46-56.
- [8] ALBOTA M A, AULL B F, FOUCHE D G, *et al.* Three-dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, 13(2): 351-370.
- [9] ITZLER M A, ENTWISTLE M, OWENS M, *et al.* Comparison of 32×128 and 32×32 Geiger-mode APD FPAs for single photon 3D LADAR imaging [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2011, 8033: 80330G.
- [10] AULL B F, SCHUETTE D R, YOUNG D J, *et al.* A study of crosstalk in a 256×256 photon-counting imager based on silicon Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(4): 2123-2132.
- [11] GHIONI M, GULINATTI A, MACCAGNANI P, *et al.* Planar silicon SPADs with 200 μm diameter and 35 ps photon timing resolution [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2006, 6372: 63720R.
- [12] JACKSON J C, MORRISO A P, PHELAN D, *et al.* A novel silicon Geiger-mode avalanche photodiode[C]//Digest. *International Electron Devices Meeting*. San Francisco, USA: IEEE, 2002: 797-800.
- [13] SCIACCA E, GIUDICE A C, SANFILIPPO D, *et al.* Silicon planar technology for single-photon optical detectors [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, 50(4): 918-925.
- [14] ROCHAS A, GANI M, FURRER B, *et al.* Single photon detector fabricated in a complementary metal-oxide-semiconductor high-voltage technology [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(7): 3263-3270.
- [15] FINKELSTEIN H, HSU M J, ESENER S C. STI-bounded single-photon avalanche diode in a deep-submicrometer CMOS technology [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2006, 27(11): 887-889.
- [16] AULL B F, LOOMIS A H, YOUNG D J, *et al.* Geiger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, 13(2): 335-349.
- [17] AULL B, BURNS J, CHEN C, *et al.* Laser radar imager based on 3D integration of Geiger-mode avalanche photodiodes with two SOI timing circuit layers[C]//2006 IEEE International Solid State Circuits Conference-Digest of Technical Papers. San Francisco, USA: IEEE, 2006: 1179-1188.
- [18] ZAPPA F, GULINATTI A, MACCAGNANI P, *et al.* SPADA: Single-photon avalanche diode arrays[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(3): 657-659.
- [19] ZHAO H L, FAN Y Ch, SUN H Y, *et al.* Review about 3D laser radar system based on Geiger-mode APD arrays[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(10): 1083-1088 (in Chinese).
赵洪利, 范有臣, 孙华燕, 等. 基于盖革模式 APD 阵列的非扫描激光三维成像雷达研究综述[J]. *激光与红外*, 2013, 43(10): 1083-1088.
- [20] CHEN D Zh, ZHANG H, LENG J, *et al.* Non-scanning active imaging lidar based on APD planar array detector [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(6): 775-778 (in Chinese).
陈德章, 张华, 冷杰, 等. 基于 APD 面阵探测器的非扫描激光主动成像雷达[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 775-778.
- [21] ZHOU J, ZHOU Y, NI X Y, *et al.* Research progress and applications of polarization integrated infrared photodetector[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(5): 230010.
周建, 周易, 倪歆玥, 等. 偏振集成红外光电探测器研究进展与应用[J]. *光电工程*, 2023, 50(5): 230010.
- [22] LI B, YANG Y X, LI X, *et al.* Research progress of APD array and its imaging LiDAR system [J]. *Laser Technology*, 2023, 47(3): 310-316 (in Chinese).
李兵, 杨赟秀, 李潇, 等. APD 阵列及其成像激光雷达系统的研究进展[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 310-316.