

宽波段响应硅雪崩光电探测器研究

彭红玲¹, 卫家奇^{1,2}, 宋春旭^{1,2}, 王天财^{1,2}, 曹澎^{1,2}, 陈剑³, 邓杰³,
ZHUANG Qian-Dong⁴, 郑婉华^{1*}

(1. 中国科学院半导体研究所 固态光电信息技术实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院大学 电子与通信工程学院, 北京 101408;

3. 西南技术物理研究所, 四川 成都 610041;

4. Physics Department, Lancaster University, Lancaster LA1 4YB, U. K.)

摘要: 本文基于目前对宽波段探测器的应用需求, 设计了一种在 250~1100 nm 范围有较高响应的硅雪崩光电探测器 (Si APD), 不需要拼接即可实现紫外-可见-近红外波段光的高效探测。分别对硅的紫外增强和(近)红外增强进行了分析, 在此基础上, 为获得宽波段响应 Si APD, 对器件结构进行模拟设计, 采用光背入射等方式, 提高短波吸收, 同时保证近红外吸收。模拟优化的 Si APD 器件峰值波长 940 nm 左右, 在 250 nm 和 1100 nm 处响应光电流均超过峰值的 15%, 这种结构的器件适用于多光谱及未来高精度探测等应用领域。

关键词: 硅雪崩光电探测器; 宽波段响应探测器; 紫外增强; 近红外增强

中图分类号: TN215; TN23 文献标识码: A

Research on silicon avalanche photodetector with wideband response

PENG Hong-Ling¹, WEI Jia-Qi^{1,2}, SONG Chun-Xu^{1,2}, WANG Tian-Cai^{1,2}, CAO Peng^{1,2}, CHEN Jian³,
DENG Jie³, ZHUANG Qian-Dong⁴, ZHENG Wan-Hua^{1*}

(1. Laboratory of Solid State Optoelectronics Information Technology, Institute of Semiconductors, CAS, Beijing 100083, China;

2. College of Electronic and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;

3. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China;

4. Physics Department, Lancaster University, Lancaster LA1 4YB, U. K.)

Abstract: Based on the current application requirements for wideband response photodetectors, we designed a novel silicon avalanche photodetector (Si APD) with high response in a broad spectral range of 250 -1100 nm and it could achieve efficient detection of ultraviolet, visible and near-infrared light without splicing. The enhancement of silicon on ultraviolet and infrared bands was separately analyzed. This was followed by simulation on the device structure designs using different methods such as back incidence, to improve short wavelength absorption while maintaining a high infrared absorption. The Si APD shows a peak wavelength at around 940 nm and a high photoresponse at 250 nm and 1100 nm which exceeds 15% of the peak responsivity. This type of device is suitable for multispectral applications and future high-precision detection.

Key words: silicon avalanche photodetector, wideband response, ultraviolet enhancement, near-infrared enhancement

收稿日期: 2023-10-23, 修回日期: 2023-12-11

Received date: 2023-10-23, Revised date: 2023-12-11

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFE0200900)

Foundation items: Supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (2018YFE0200900)

作者简介 (Biography): 彭红玲 (1972—), 女, 湖北红安人, 博士, 主要研究领域为半导体光电探测器、太阳能电池、激光器. E-mail: hlpeng@semi.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: whzheng@semi.ac.cn

引言

对应于不同领域,光探测器有不同的类型,目前从紫外到近红外波段的探测器应用非常广泛,各材料体系的探测器发展都趋于成熟。紫外探测器应用在火灾预警、医学病变检测、紫外通讯、物质成分分析等领域;在医疗和生物领域,对蓝光以下包括紫外波段的探测器有较高的响应度要求,而此波段一般采用的半导体宽带隙材料为 GaAs、GaN/Al-GaN、SiC 等,但这些探测器都还达不到光电倍增管(PMT)和硅雪崩光电探测器(Si APD)的大面积和高增益,尤其在 300~400 nm 范围内的探测^[1-2]。可见光探测器包括 Si 基光电二极管、光敏电阻、CCD/CMOS 图像传感器等,应用于光学摄像、工业测量等领域。(近)红外探测器在光通信、空间探测、医学诊断、物质分析、夜视等方面有广泛应用,(近)红外探测器包括 InGaAs 探测器、Ge/Si、HgCdTe、非本征 Si 探测器、Sb 化物探测器、热释电探测器等^[1-2]。如果能将多个不同波段集成在一块芯片上,在深空探测等领域将具有明显的体积和集成优势^[3-4],多波段探测能够综合多个不同波段的图像信息,得到信息互补的图像,对目标信息的捕获更为全面,识别的准确性和速度都大幅提高,在各领域均有着巨大的应用价值^[5-9]。例如美国西北大学实现了从短波红外(SWIR)到长波红外(LWIR)的三结超晶格光电探测器(PD)^[5],其暗电流低;中国科学院上海技术物理研究所实现 128×128 低串扰 HgCdTe 双色红外焦平面阵列探测器^[8];美国乔治亚理工学院将探测器阵列集成到 CMOS 电路上,将 GaN(UV 紫外波段)、MCT(MWIR 中波红外)和 Si-CMOS 电路异质集成,实现多波段光谱探测芯片^[9]。硅光探测器由于其成熟工艺、与集成电路的 CMOS 工艺兼容性,更容易实现大阵列和低成本;因此,硅光探测器宽波段响应的研究将使得硅基探测器应用在更多领域。

各研究机构及探测器供应商在进行硅基探测器研究时,在紫外、蓝光^[10-22]、红外波段的响应增强^[23-44]都分别进行了广泛的研究,并对宽光谱响应的硅基探测器^[45-50]进行了研究。对于宽光谱硅探测器,采用宽带隙材料与硅材料结合,或者石墨烯、二维材料、纳米线等材料或结构与硅材料结合,均可以获得波长拓展的宽波段探测器。例如 2015 年,香港中文大学利用 LPCVD 技术制作了 Si 基石墨烯宽光谱光电探测器,波长拓展到 1 550 nm^[46]。2023 年,吉林大学利用 ZnO 和 Ga₂O₃ 两种半导体材料与 Si

衬底形成多层结构,将 Si 基光电探测器的响应光谱扩宽到深紫外,研制出响应光谱覆盖紫外-可见-近红外光的硅基宽光谱光电探测器,响应波段涵盖 254~980 nm^[47]。不过上述结构包含多种不同材料的制作,稳定性有待提高,与 CMOS 兼容有一定的难度,且近红外波长未达到 1 100 nm。采用全硅材料的探测器可以与 CMOS 工艺集成,获得可靠性好的低成本集成光电芯片,在各领域将得到广泛应用。美国在《2020 年代天文学和天体物理学的发现之路》中将时域天文学和天体物理确定为未来十年的关键科学挑战,而其中宽波段硅探测器可以实现这些天体探索任务所需的稳定性和灵敏度。2022 年,Jet Propulsion 实验室采用二维(2D)掺杂 Si CCD 实现紫外-可见-近红外的探测,在 150~700 nm 波段量子效率得到很大提升^[49-50]。相较于硅 PD 和 CCD 探测器,Si APD 在体积更小的情况下可获得足够高的灵敏度,得益于其具有的高倍增,对于吸收较低的波段也可以通过设计提高响应度,从而获得宽光谱的硅 APD 探测器。上海技术物理研究所通过拼接的方式实现了 300~1 100 nm 宽波段响应 APD 阵列探测器。为了获得稳定性高、在紫外-可见-近红外(1 100 nm)波段都有较高响应度的单片 Si 探测器,本文通过对硅 APD 的紫外增强和近红外增强分析,对 Si APD 结构及各功能参数进行设计,在硅衬底上可实现单片 250~1 100 nm 宽波段响应 APD,可应用于未来单片集成的多光谱探测光电芯片。

1 硅材料的基本特性

硅材料的禁带宽度为 1.12 eV,其截止波长为 1 100 nm,在 700~900 nm 之间响应度最高。随着波长增加,硅的吸收系数快速减小,导致在 1 100 nm 处响应度极低;而在短波段方向,由于半导体器件结构中包含的金属电极、钝化层等对紫外等短波有较强的吸收,因此硅探测器在 600 nm 以下响应度也较低。国内外各研究机构采用半导体工艺处理探测器感光面、荧光材料转换、低维材料异质结等方法,基本能实现紫外到近红外宽光谱响应,但器件稳定性和可靠性需要进一步提升,拓展波长有进一步提高空间。

硅的吸收特性如图 1 所示^[19],对 400 nm 以下波长的光吸收系数较高,但其表面反射率也高。硅在 400 nm 以下波段的吸收长度比较短(紫外波段仅为数纳米),在表面电势的作用下光生电流更容易流向 Si/SiO₂ 界面而被俘获复合,从而大大降低硅光电

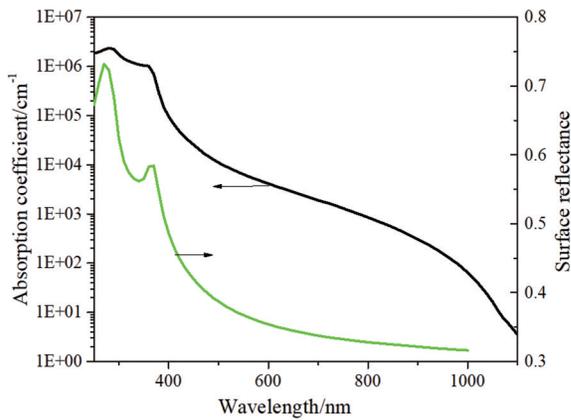


图1 硅吸收系数和表面反射率随波长的变化曲线

Fig. 1 Curve of silicon absorption coefficient and surface reflectance with wavelength

探测器对此波段光的响应度。为提高硅探测器在紫外和蓝光波段的响应,研究人员对紫外增透膜、横向PIN吸收输运分离结构、MOS背栅控制内部电荷密度、横向叉指PIN结构、背入射结构、表面浅层离子注入和外延生长原子级厚度的 δ 掺杂等技术进行了研究^[1-22]。而在近红外波段,硅的吸收系数急剧降低,导致硅在近红外波段响应度也急剧减小,要在近红外较长波段获得较大的响应度,势必也要对器件结构进行较大的改进,这将在近红外增强部分进行详细分析。

2 Si APD 器件设计及模拟结果

为此,我们分几步对单芯片宽波段Si APD进行研究,为获得集成兼容性,器件结构及制备工艺尽量简单且可重复。

2.1 简单薄层紫外增强Si APD 特性

与典型的宽禁带材料相比,基于硅基的光电二极管具有晶格质量完备、低噪声、工艺成熟、易于与电路集成、更容易实现大阵列和低成本制备的优势。为了实现单芯片硅紫外与近红外波段兼容,有些措施不能采用,因此先尝试对紫外波段响应增强的Si APD结构参数进行优化。相较于常规的Si APD结构,采用吸收区靠近入射光面,表面电极接触层薄的方式,先增强250~600 nm波段响应,这样既减少了电极接触层对短波光的吸收损耗,吸收区又尽量靠近光入射面,增加短波的吸收,使得更多的光生电子进入倍增层实现雪崩倍增。采用外延结构实现对各层的掺杂及深度的精确控制,APD结构参数如表1所示,在N型衬底上先外延一层0.5 μm 厚的P型倍增层,之后是0.1~0.2 μm 的场控层,在其

上外延1.3~2 μm 的本征层,之后通过离子注入和快速热退火实现薄的P型电极接触层。

表1 薄层紫外增强Si APD各层参数

Table 1 Thin layer UV enhanced Si APD layer parameters

参数层	厚度/ μm	掺杂浓度/ cm^{-3}
电极接触层	0.05~0.2	$1.0 \times 10^{19}(\text{P})$
吸收层	1.3	$1.0 \times 10^{15}(\text{P})$
场控层	0.20	$8.0 \times 10^{16}(\text{P})$
倍增层	0.5	$2 \times 10^{16}(\text{P})$
衬底	20.0	$1.0 \times 10^{19}(\text{N})$

将器件设置为150 μm 宽度,刻蚀成台面结构,如图2所示。刻蚀深度分别为刚刻蚀到吸收区、刚刻蚀过场控层及刻蚀过倍增层;击穿电压有略微不同,并且随着倍增层掺杂浓度的降低而增加。图3展示的是刚刻蚀到倍增层表面的器件结果,包括APD器件掺杂分布、模拟的电场分布和IV曲线,倍增区电场大于 $3 \times 10^5 \text{ V/cm}$,吸收区电场约80 000 V/cm 。

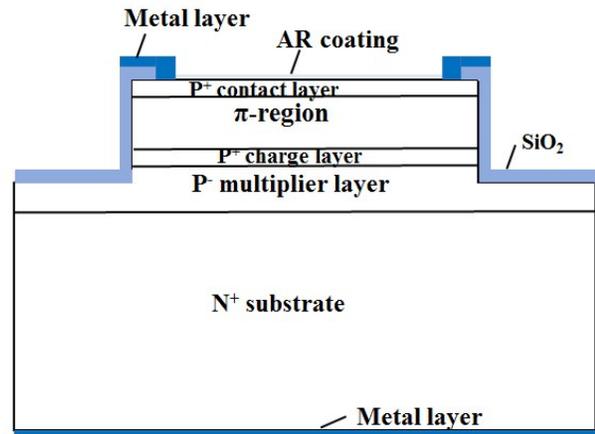


图2 紫外增强Si APD器件结构图

Fig. 2 UV enhanced Si APD device structure

为提高紫外吸收,可以在Si APD器件表面蒸镀减反膜,以增强硅在紫外波段的响应。硅在紫外波段的折射率变化很大,如图4所示,针对某一波段的增透会使其他波段透过率降低^[2,19]。

国内外各研究机构对减反膜的研究已经很成熟,这里不再赘述,只针对上述结构进行了简单的减反膜计算,用以分析其对各波段光的吸收对比。常用的紫外增透材料主要包括 MgF_2 、 MgO 、 HfO_2 、 Al_2O_3 和 SiO_2 等,采用SiN薄膜作为减反膜,模拟结果如图5所示,短波有明显增强,但1 100 nm响应较低,达不到作为宽波段响应的要求。由于硅对长波

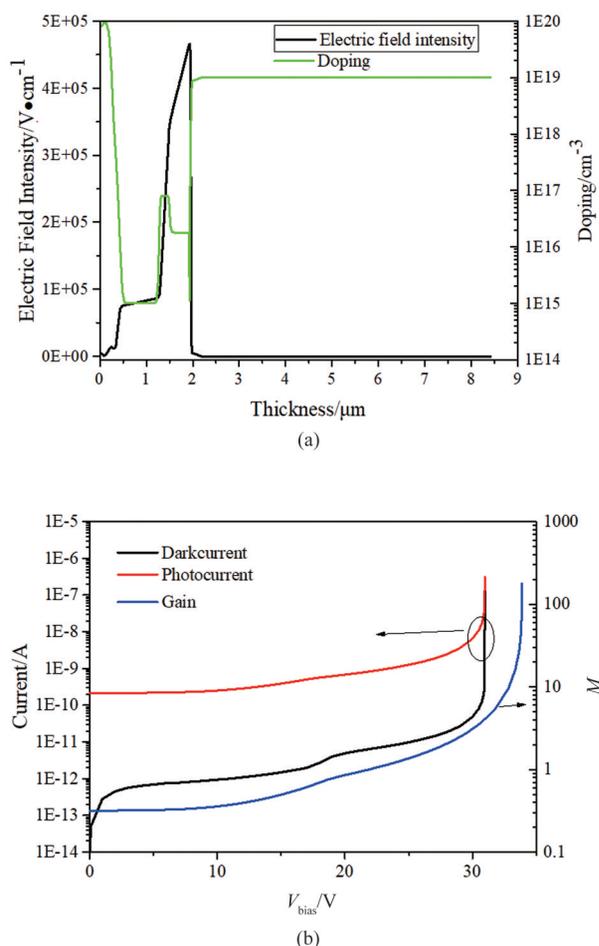


图3 紫外增强 Si APD, (a)电场分布和掺杂分布; (b) I - V 曲线及倍增曲线

Fig. 3 Ultraviolet enhanced Si APD, (a) electric field distribution; (b) I - V curve and multiplication curve

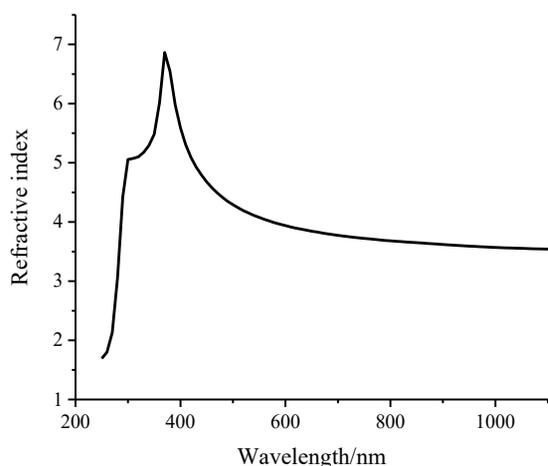


图4 硅的折射率与波长的关系曲线

Fig. 4 Curve of the refractive index dependence on wavelength of silicon

段吸收系数很低,与短波段相比大概有 4~5 个数量级的差别,因此不能只采用短波段增透膜形式来获得宽波段响应的硅 APD。下面将从硅 APD 近红外增强方面进行分析,同时兼顾紫外等短波段响应。

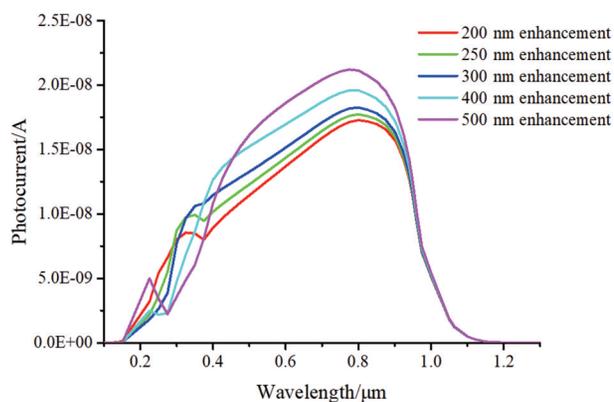


图5 Si APD在不同条件短波减反膜下的光电流谱

Fig. 5 Photocurrent spectra of Si APD under different conditions in shortwave antireflection films

2.2 近红外增强兼顾紫外增强的 Si APD 结构设计及模拟

硅基近红外光电探测器在通信及激光雷达领域有着越来越重要的应用,而单晶硅材料受到禁带宽度和吸收率等因素的限制,其红外响应较弱,要增强其近红外响应,需要引入缺陷,改变硅的吸收带边,扩展波长。常用的方法是对硅材料进行黑硅化处理,利用黑硅表面周期性微结构的减反射作用增强吸收,或者通过超饱和掺杂层中大量的替位杂质、准替位杂质和缺陷在硅禁带中引入大量的能级,从而导致其能对此波段光高吸收^[26]。日本滨松公司通过超短激光脉冲对 Si 表面进行处理得到“黑硅”,其 Si APD 对近红外波段的光谱响应度和量子效率明显提升^[27]。不过利用飞秒激光刻蚀制备黑硅的工艺存在不足,此方法成本较高,黑硅表面的纳米结构间隙大,电极不太容易制作。

人为地在本征区内离子注入硅制造注入损伤,注入损伤引起的晶格缺陷和处于晶格间隙的硅原子均会在硅禁带中制造缺陷能级,增加硅的杂质吸收几率,拓展硅响应波长。2007年,麻省理工学院^[35]研制的硅波导型 PIN 光电探测器,在 1.550 nm 响应度为 0.8 A/W。2014年,哥伦比亚大学^[37]通过优化硅离子注入后的退火条件,将硅波导型 PIN 光电探测器的响应波段扩展到 2.2~2.3 μm。2014年,加拿大 Thomson 等^[38]实现了 2~2.5 μm 波段下的基

于缺陷的硅探测器;2015年,Ackert等^[39]基于上述结构进行了优化,器件精简,速率达到20 Gbit/s。中国科学院半导体所^[41]也对硅深能级近红外吸收增强进行了研究,利用硒离子注入掺杂引入杂质深能级,代替硅离子自注入的缺陷深能级来实现基于深能级吸收的光电转换;另外将高浓度深能级掺杂的杂质中间带材料应用在硅近红外波导探测器,硅探测器响应波长扩展到1 550 nm。2020年,西安电子科技大学利用双埋层结构,实现了近红外波段探测效率的较大提升,在870 nm波长光照射下,单光子雪崩二极管的探测效率达到了18.6%^[43]。

除此之外,使用近红外敏感的材料作为吸收区域,Si作为倍增区,也可获得红外增强响应。例如,键合的InGaAs/Si APD、外延Ge/Si APD等可在C波段获得较高的响应,应用于光通信系统;由于异质结材料的晶格不匹配会导致器件的暗电流和噪声较高,因此对键合或外延的质量要求较高。采用量子点APD,即通过在探测器前增加一层量子点材料作为光转换层或光活性层,使得量子点材料对探测光进行光转换或光响应,从而实现量子点材料对硅基探测器的探测增强,包括紫外增强、红外增强等^[23-25]。采用表面微结构陷光等技术,也可以实现硅的近红外吸收增强。2023年,加利福尼亚大学戴维斯分校(UC Davis)通过在硅中创建光子捕获微米和纳米级孔洞,使得通常垂直入射的光几乎90°折射,进而使光沿平面横向传播,从而在近红外波段内引发光的显著增强吸收效应。这一技术的突破性进展使其性能达到了与砷化镓(GaAs)等III-V族半导体相媲美的水平^[44]。

目前这些红外增强的方法需要对Si进行表面处理、注入掺杂或特殊结构设计,虽然提高了近红外吸收,但短波紫外吸收未见同时增强或者制备方案复杂,为了在同一块硅芯片上实现短波和近红外都有较强吸收,我们在硅APD结构上进行设计,使其响应波段能覆盖250~1 100 nm。器件结构采用背入射法,吸收区靠近入光面,电极接触层较薄,使得短波段光吸收尽量大;同时增加厚度以利于吸收近红外光波,调节器件各区掺杂及厚度等参数,获得较大的近红外响应。最后经过合适的减反膜设计,使得硅APD在250~1 100 nm范围有较高的响应度。

器件结构如图6所示,在高阻硅衬底上分别外延P型倍增层、N⁺电极接触层;刻蚀沟槽并离子注入

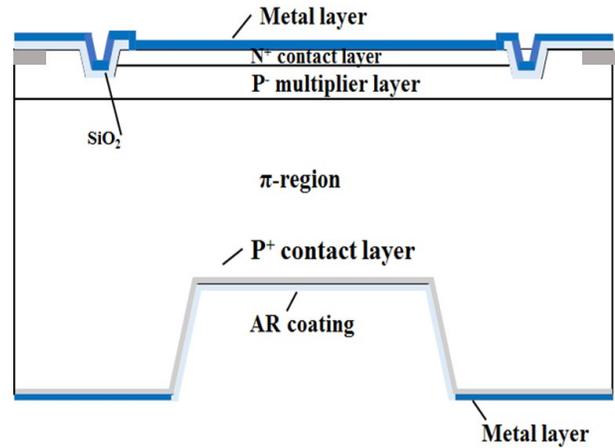


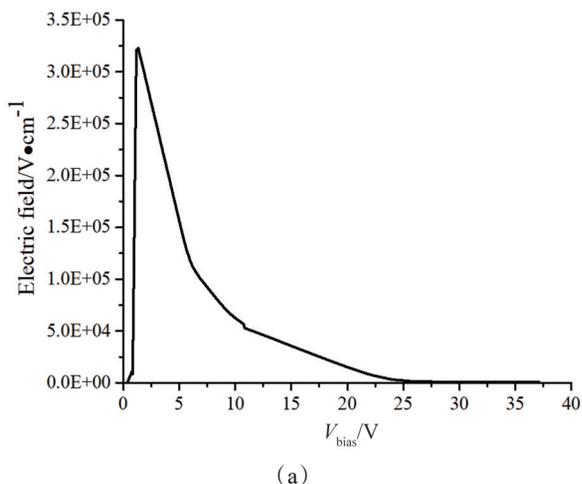
图6 宽波段Si APD器件结构图

Fig. 6 Broadband Si APD device structure

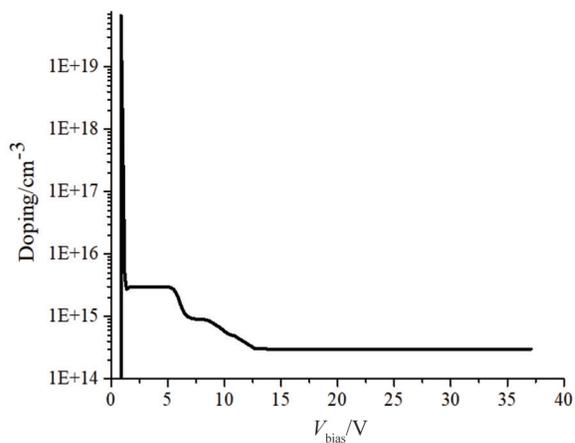
形成N型保护环,离子注入形成截止环,然后减薄衬底,刻蚀光窗口,注入形成P⁺电极接触层;做减反膜和电极,光从背面入射,经本征区吸收后,光生载流子进入倍增层,实现雪崩倍增。Si APD的掺杂浓度和电场如图7所示;模拟计算的IV曲线和倍增如图8所示,在905 nm光入射下,APD倍增超过100。对于不同波长的光入射,APD的吸收与倍增不同,模拟结果显示此结构对于250~1 100 nm的入射光,在高电场下都获得了足够的倍增。为了在短波和近红外波段都有较强的响应度,结合减反膜设计对APD的倍增特性进行了研究。

如图9所示,对于无减反膜的上述结构APD,优化器件各参数可以获得在250 nm和1 100 nm,吸收都达到峰值的10%以上,如图9中红线所示,形成了宽波段响应的APD器件。为了提高整个250~1 100 nm波段的响应度,设计了增透膜,使得器件在较宽波段,特别是可见以及近红外波段范围内都有较高的响应度,如图9黑线所示。

对于较宽波段的探测器而言,其近红外响应度会比只做红外增强的峰值低一些,这是因为器件结构考虑了兼顾短波段的吸收。实际应用中,如果需要指定对某一波段增强,可以灵活改变增透膜的设计。另外通过对APD倍增的设计,使APD在较大的增益时处于线性工作状态,此时Si APD将在整个宽波段范围具有足够的光响应度。如图10所示,在不同电压下得到的光电流谱,180 V对应的倍增最大,随着电压再增加,倍增逐渐减小;倍增较大时,紫外和近红外响应增强明显。由图可知,Si APD在250~1 100 nm有较高的响应,在940 nm响应最强,其中



(a)



(b)

图7 宽波段Si APD, (a)电场分布; (b)掺杂分布
Fig. 7 Broadband Si APD, (a) electric field; (b) impurity concentration profile

250 nm 和 1 100 nm 响应均超过峰值波长响应的 15%, 获得了较宽波段的光谱范围。后续我们将对 Si APD 在短波红外的拓展做进一步研究, 并将在实验中进行验证。

3 结论

通过对 Si APD 紫外增强和近红外增强进行模拟仿真, 优化 Si APD 结构参数, 获得宽波段响应 Si APD。采用背入射方式提高紫外等短波吸收, 通过倍增层及吸收层等各层参数优化, 提高近红外吸收, 并采用减反膜对宽波段 APD 进行响应增强设计, 在较高倍增时 Si APD 在紫外-可见-近红外波段都获得较高的响应, 其中 250 nm 和 1 100 nm 处响应

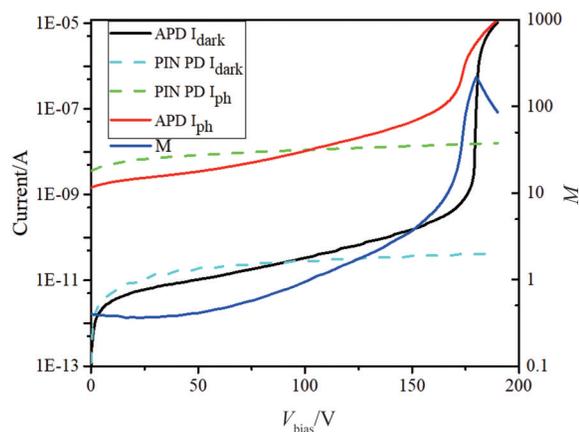


图8 上述结构模拟的Si APD 在 905 nm 光照下的 I/V 及估算的倍增曲线

Fig. 8 I/V and multiplication curves of Si APD simulated by the above structure under 905 nm illumination

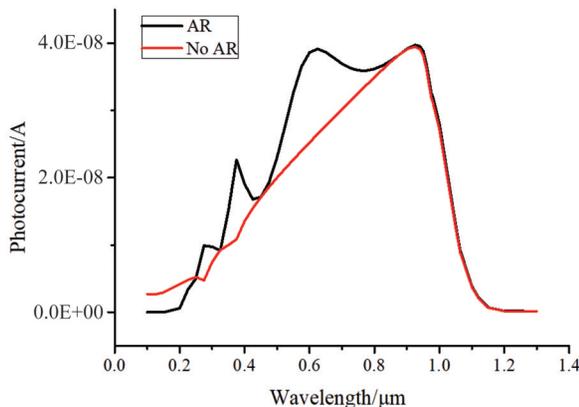


图9 Si APD 光谱, (a)无减反膜; (b)有减反膜

Fig. 9 The Spectrum of Si APD, (a) without antireflection coating; (b) with antireflection coating

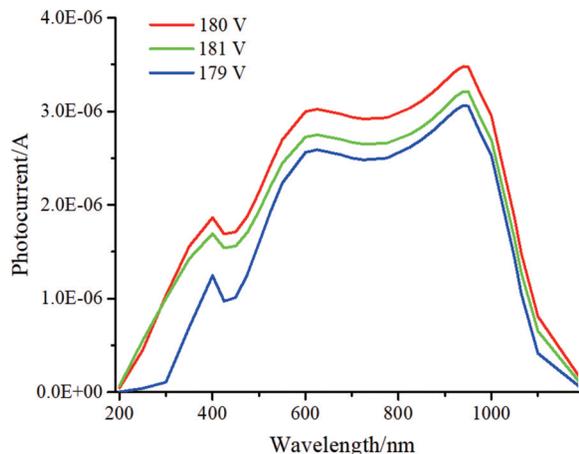


图10 不同电压下宽波段Si APD 光电流谱

Fig. 10 Broadband Si APD photocurrent spectrum under different voltages

强度均超过峰值的 15%, 这种宽波段 Si APD 不需要复杂工艺即有望实现单片紫外-可见-近红外波段光的高效探测, 适用于未来多光谱及高精度探测等应用领域。

References

- [1] ZHANG Meng-jiao, CAI Yi, JIANG Feng, *et al.* Silicon-based ultraviolet photodetection: progress and prospects [J]. *Chinese Optics*, 2019, **12**(1): 19-37. (张猛蛟, 蔡毅, 江峰, 等. 紫外增强硅基成像探测器进展 [J]. *中国光学*), 2019, **12**(1): 19-37.
- [2] Richard A. Myers, Richard Farrell, Suzannah L. Riccardi, *et al.* UV-enhanced silicon avalanche photodiodes: Optical Components and Materials X 2013 [C]. *Proc. SPIE* 8621, 2013: **86211H** (11 March 2013).
- [3] WANG Xu-Dong. Optimization of the enhancement of the Si-based APD for near-ultraviolet detection through structural design [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (王旭东. 硅基 APD 近紫外探测增强的结构优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学), 2015.
- [4] CHEN Wei-shuai, WANG Hao-bing, TAO Jin, *et al.* A study on the epitaxial structure and characteristics of high-efficiency blue silicon photodetectors [J]. *Chinese Optics*, 2022, **15**(3): 568-591. (陈伟帅, 王浩冰, 陶金, 等. 高效率蓝光硅光探测器外延结构及特性研究 [J]. *中国光学*), 2022, **15**(3): 568-591.
- [5] Manijeh Razeghi, Arash Dehzangi, Jiakai Li. Multi-band SWIR-MWIR-LWIR Type-II superlattice based infrared photodetector [J], *Results in Optics*, 2021, **2** (2021): 100054.
- [6] Liu Pei-xuan. Design of digital control circuit for multispectral pixel level fusion detector [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (刘沛轩. 多光谱像素级融合探测器的数字控制电路设计 [D]. 成都: 电子科技大学), 2020.
- [7] Vallone M, Goano M, Tibaldi A, *et al.* Challenges in multi-physics modeling of dual-band HgCdTe infrared detectors [J]. *Appl. Opt.*, 2020, **59**(19): 5656-5663.
- [8] Hu Wei-da, Ye Zhen-hua, Liao Lei, *et al.* 128×128 long-wavelength/mid-wavelength two-color HgCdTe infrared focal plane array detector with ultralow spectral cross talk [J]. *Opt. Lett.*, 2014, **39**(17): 5184-5187.
- [9] K. Lee, S. Seo, S. Huang, *et al.* Design of a smart pixel multispectral imaging array using 3D stacked thin film detectors on Si CMOS circuits [C]. 2000 Digest of the LEOS Summer Topical Meetings. Electronic-Enhanced Optics. Optical Sensing in Semiconductor Manufacturing. Electro-Optics in Space. Broadband Optical Networks (Cat. No. 00TH8497), Aventura, FL, USA, 2000, pp. 157-158.
- [10] R. Lecomte, C. Pepin, D. Rouleau, *et al.* Radiation detection measurements with a new "Buried Junction" silicon avalanche photodiode [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1999, **423**: 92-102.
- [11] HUO L-ZH, TAN H-SH, HE R, *et al.* Research of blue-violet enhanced silicon photomultiplier [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(11): 110401. (霍林章, 谭何盛, 何燃, 等. 蓝紫光增强硅光电倍增器的研究 [J]. *激光与光电子学进展*), 2015, **52**(11): 110401.
- [12] LU H-H. Simulation study on silicon-based blue-light enhanced APD detector for visible light communication [D]. Guangzhou: Jinan University, 2019. (鲁欢欢. 可见光通信硅基蓝光增强 APD 探测器仿真研究 [D]. 广州: 暨南大学), 2019.
- [13] CHEN F. The enhancement of the APD for Blue-Ray detection in VLC [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018. (陈锋. 可见光通信 APD 探测器的蓝光增强技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [14] WANG H-B. Research on enhancement in blue-light properties of silicon based avalanche photodiode [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Precision Machinery and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020. (王浩冰. 硅基雪崩光电二极管蓝光增敏研究 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)), 2020.
- [15] Ghazi A, Zimmermann H, Seegebrecht P. CMOS photodiode with enhanced responsivity for the UV/blue spectral range [J]. *Electron Devices IEEE Transactions on*, 2002, **49**(7): 1124-1128.
- [16] Chen Chang-ping, Wang Han, Jiang Zhen-yu, *et al.* Design, fabrication, and measurement of two silicon-based ultraviolet and blue-extended photodiodes [J]. *Photonic Sensors*, 2014, **4**(4): 373.
- [17] WANG Yi-Tong. Research on Silicon UV Avalanche Photodetectors [D]. Beijing: Beijing University Of Posts and Telecommunications, 2021. (王艺潼. 紫外硅雪崩光电探测器的研究 [D]. 北京: 北京邮电大学), 2021.
- [18] Excelitas Technologies. Short-wavelength enhanced Si-APD C30739ECERH, <https://www.excelitas.com/product/c30739ecerh-si-apd-ceramic-carrier>.
- [19] M. A. Green. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, **92**: 1305-1310.
- [20] HAMDEN E T, GREEN F, HOENK M E, *et al.* Ultraviolet antireflection coatings for use in silicon detector design [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(21): 4180-4188.
- [21] Bablu Kumar Ghosh, Kenneth Teo Tze Kin, Saiful Sapri Mohd Zainal. Different materials coating effect on responsivity of Si UV photo detector, 2013 [C]. 2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT), 2013: 446-449.
- [22] HAMDEN E T, JEWELL A D, SHAPIROCA, *et al.* Charge-coupled devices detectors with high quantum efficiency at UV wavelengths [J]. *Journal of Astronomical Telescopes Instruments & Systems*, 2016, **2**(3): 036003.
- [23] ZHU Xiao-xiu, GE Y, LI J-J, *et al.* Research progress of quantum dot enhanced silicon-based photodetectors [J]. *Chinese Optics*, 2020, **13**(1): 62-74. (朱晓秀, 葛咏, 李建军, 等. 量子点增强硅基探测成像器件的研究进展 [J]. *中国光学*), 2020, **13**(1): 62-74.
- [24] Wang Zan, Gu Yun-jiao, Li Xiao-man, *et al.* Recent Progress of Quantum Dot Infrared Photodetectors [J]. *Adv. Optical Mater.*, 2023, **11**: 2300970.
- [25] Wang Jun-fan, Chen Jun. Photoresponsivity-Enhanced

- PbS Quantum Dots/Graphene/Silicon Near-Infrared Photodetectors [J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2023, **22**:525–530.
- [26] Li Wei, Wang Yu, Wu Teng-fei. Progress in Black Silicon Infrared Detectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**:070004. (李维, 王宇, 武腾飞. 黑硅红外探测器研究进展[J]. *中国激光*), 2016, **53**:070004.
- [27] K. Yamamoto, A. Sakamoto, T. Nagano, K. Fukumitsu. NIR sensitivity enhancement by laser treatment for Si detectors [J]. *Original Research Article Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, **624**(2):520–523.
- [28] Hu Shao-xu, Han Pei-de, Wang Shu-ai, *et al.* Improved photoresponse characteristics in Se-doped Si photodiodes fabricated using picosecond pulsed laser mixing [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2012, **27**(10):102002.
- [29] MAILOA J P, AKEY A J, SIMMONS C B, *et al.* Room-temperature sub-band gap optoelectronic response of hyperdoped silicon [J]. *Nature communications*, 2014, **5**:3011.
- [30] GARCÍA-HEMME E, GARCÍA-HERNANSANZ R, OLEA J, *et al.* Room-temperature operation of a titanium supersaturated silicon-based infrared photodetector [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(21):211105.
- [31] Wang Jian-bo. Study of preparation and related device of black silicon [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (王健波. 黑硅材料的制备及器件研究[D]. 成都: 电子科技大学), 2015.
- [32] Ma Shi-jun, Liu Shuang, Xu Qin-wei, *et al.* A theoretical study on the optical properties of black silicon [J]. *AIP Advances*, 2018, **8**(3):035010.
- [33] Zhao Ji-Hong, Li Xian-Bin, Chen Qi-Dai, *et al.* Ultrafast laser-induced black Si, from micro-nanostructuring, infrared absorption mechanism, to high performance detecting devices [J]. *Materials Today Nano*, 2020, **11**:100078.
- [34] Zhao Xiao-na, Zhao Bing, Lin Kun, *et al.* Direct fabrication of black Si with enhanced infrared transmittance using femtosecond laser irradiation [J]. *Optics and Laser Technology*, 2024, **168**:109881.
- [35] Geis M W, Spector S J, Grein M E, *et al.* CMOS-compatible all-Si high-speed waveguide photodiodes with high responsivity in near-infrared communication band [J]. *Photonics Technology Letters*, IEEE, 2007, **19**(3):152–154.
- [36] Duan N, Liow T Y, Lim A E, *et al.* High speed waveguide-integrated Ge/Si avalanche photodetector [C]. Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2013: OM3K.3.132–133.
- [37] Souhan B, Grote R R, Chen C P, *et al.* Si⁺-implanted Si-wire waveguide photodetectors for the mid-infrared [J]. *Optics express*, 2014, **22**(22):27415–27424.
- [38] D. J. Thomson, L. Shen, J. J. Ackert, *et al.* Optical detection and modulation at 2–2.5 μm in silicon [J]. *Opt Express*, 2014, **22**:10825–10830.
- [39] Jason J. Ackert, David J. Thomson, Li Shen, *et al.* High speed detection at two micrometers with monolithic silicon photodiodes [J]. *Nat Photonics*, 2015, **9**:393–397.
- [40] Zhou Hong-yi. The study of the silicon photodetector [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015. (周弘毅. 硅基光电探测器的研究[D]. 北京: 北京工业大学), 2015.
- [41] Mao Xue. Silicon Waveguide Photodetector with Responsivity in Near-Infrared Band Based on Deep Level Absorption [D]. Beijing: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, 2012. (毛雪. 基于硅深能级近红外光吸收的波导探测器研究[D]. 北京: 中国科学院半导体研究所), 2012.
- [42] D. F. Logan, P. E. Jessop, A. P. Knights. Modeling Defect Enhanced Detection at 1 550 nm in Integrated Silicon Waveguide Photodetectors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(7):930–937.
- [43] Xing Hai-long. Research on Infrared Enhanced Silicon-based Single Photon Avalanche Diode [D]. Xi'an: Xi'an University, 2020. (邢海龙. 红外增强型硅基单光子雪崩二极管的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学), 2020.
- [44] Qarony W, Mayet A S, Devine E P, *et al.* Achieving higher photoabsorption than group III–V semiconductors in ultrafast thin silicon photodetectors with integrated photon-trapping surface structures [J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2023, **2**(5):056001.
- [45] A. Nemecek, K. Oberhauser, G. Zach, *et al.* Fast and efficient integrated silicon PIN-finger photodetector from ultraviolet up to near infrared, 2005 [C]. IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2005. 2nd, Antwerp, Belgium, 2005, pp. 108–110.
- [46] Chen Ze-feng, Cheng Zhen-zhou, Wang Jia-qi, *et al.* High Responsivity, Broadband, and Fast Graphene/Silicon Photodetector in Photoconductor Mode [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, **3**(9):1207–1214.
- [47] Guan Yu-feng. Research on Silicon Based Wide Spectrum Photodetectors [D]. Jilin: Jilin University, 2023. (关宇锋. 硅基宽光谱光电探测器的研究[D]. 吉林: 吉林大学), 2023.
- [48] D. Grubišić, Shah A. New silicon reach-through avalanche photodiodes with enhanced sensitivity in the DUV/UV wavelength range [C]. Information & Communication Technology Electronics & Microelectronics (MIPRO), 2013. 36th International Convention on Publication Year: 2013, Page(s): 48–54.
- [49] Michael E. Hoenk, April D. Jewell, Gillian Kyne, *et al.* 2D-doped silicon detectors for UV/optical/NIR and x-ray astronomy, 2022 [C]. Proc. SPIE 12191, X-Ray, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy X: 1219113.
- [50] Shouleh Nikzad, April D. Jewell, Michael E. Hoenk, *et al.* High-efficiency UV/optical/NIR detectors for large aperture telescopes and UV explorer missions: development of and field observations with delta-doped arrays [J]. *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.*, 2017, **3**(3):036002.