文章编号:1001-9014(2025)03-0327-08

DOI:10. 11972/j. issn. 1001-9014. 2025. 03. 001

吸收倍增分离型雪崩器件的穿通现象研究

李 冲[1*], 马子怡[1], 杨 帅[1], 刘玥雯[1], 王稼轩[1], 刘云飞[2], 董昱森[1], 李紫倩[1], 刘殿波[1]

(1. 北京工业大学 信息科学技术学院 光电子技术教育部重点实验室,北京 100124;
2. 北京工业大学 物理与光电工程学院 先进半导体光电技术研究所,北京 100124)

摘 要:本文研究了吸收倍增分离型雪崩光电探测器(Separate Absorption Charge Multiplication Avalanche Photodetectors,SACM APD)的穿通特性,基于器件的光谱响应、电容特性以及不同工作温度下的I-V特性,结合SILVACO仿真平台计算得到的器件内部电场和能带分布,分析了SACM APD穿通前后器件性能并建立相应的数学模型。设计优化硅基SACM APD器件结构参数和工艺参数,当场控层离子注入能量为580KeV时,仿真得到,优化结构器件的穿通阈值电压为-30 V,电容降低至穿通前的1/3。基于(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor,CMOS)工艺制备了硅SACM APD器件,测试得到器件的穿通阈值电压为-30 V,穿通时光电流升高至原来的2. 18倍@808 nm,响应峰值波长由穿通前的590 nm红移至穿通后的820 nm,峰值响应度由0. 171 A/W@590 nm升高至0. 377 A/W@820 nm,电容降低为穿通前的1/3@1 MHz。

关 键 词:穿通;吸收倍增分离;硅基雪崩探测器;电容穿通

中图分类号:TN364+.2 **文献标识码**:A

Research on the punch-through phenomenon of separate absorption, charge, and multiplication avalanche photodetectors

LI Chong[1*], MA Zi-Yi[1], YANG Shuai[1], LIU Yue-Wen[1], WANG Jia-Xuan[1], LIU Yun-Fei[2], DONG Yu-Sen[1], LI Zi-Qian[1], LIU Dian-Bo[1]

(1. Key Laboratory of Optoelectronics Technology of Ministry of Education, School of Information Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Institute of Advanced Semiconductor Optoelectronic Technology, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In this paper, the punch-through phenomenon was studied, based on a fabricated separate absorption, charge, and multiplication avalanche photodetector (SACM APD). The spectral response, capacitance characteristics, and I-V characteristics at different operating temperatures of the APD were measured and analyzed. Meanwhile, the device performance before and after the punch-through phenomenon were compared, and the model of the electric field region formed by external voltage was analyzed, based on the measurement results and the simulated electric field and energy band distributions by SILVACO. When the ion implantation energy of the charge layer was 580 KeV, the simulated device had a punch-through voltage of -30V and a capacitance reduction of one-third before punch-through. Then, a Si SACM APD was prepared based on CMOS process. The punch-through voltage of the device was -30V and the capacitance was reduced to 1/3@1MHz before punch-through, which exactly matched the simulation results. Moreover, the photocurrent after punch-through increases to 2. 18 times of the before value at 808 nm. The peak responsivity increases from 0. 171 A/W@590 nm to 0. 377 A/W@820 nm.

收稿日期:2024-09-10,**修回日期**:2024-12-10 **Received date**:2024-09-10,**Revised date**:2024-12-10

基金项目:国家自然科学基金(62375008);国家重点研发计划(2021FYB2206500);中国科学院青年基础研究项目(YSBR-056);中国科学院前沿科学重点研究计划(ZDBS-LY-JSC008)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (N0. 62375008); National Key Research and Development Program of China (2021FYB2206500); CAS Project for Young Scientists in Basic Research (YSBR-056); Key Research Program of Frontier Sciences, CAS (ZDBS-LY-JSC008)

作者简介(Biography):李冲(1987—)女,河南郑州人,副教授,博士学位,主要从事半导体光电探测器和激光器芯片的研究。E-mail: lichong@bjut. edu. cn

[*] **通讯作者**(Corresponding author): E-mail: lichong@bjut. edu. cn

Key words: punch-through, SACM, silicon based avalanche photodetectors, capacitance punch-through

引言

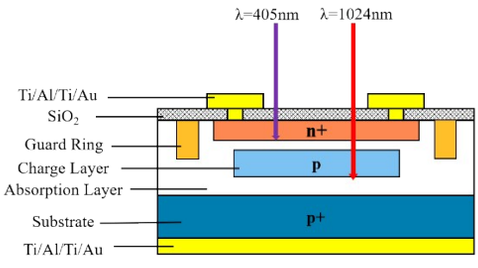
雪崩光电二极管(Avalanche Photodetectors, APD)通过雪崩倍增效应获得内部光电流增益,提高探测器灵敏度,是高灵敏度光接收系统中的核心半导体器件[1-3]。APD的工作模式分为线性模式和盖革模式,工作在线性模式下的APD的输出电流与输入光信号呈线性关系[4],广泛应用于远距离光纤通信[5-6]、激光雷达[7-8]以及其他微弱光信号检测领域[9-11]。线性模式APD通常采用吸收倍增分离型(SACM)结构,利用电荷层实现吸收区和倍增区电场的分别调控,吸收区分压可以抑制倍增系数的浮动,有利于精确控制倍增系数[12-13],抑制器件的失效击穿。SACM APD还可以利用不同半导体材料分别构成吸收层和倍增层,利用Si、InP、InAlAs等低电子空穴离化系数比(k值)材料构成低过剩噪声的倍增层[14-17],并选用高吸收系数的材料作为吸收层,同时实现高倍增系数、低过剩噪声和高光谱响应性能,因此,SACM APD在生物医学成像、核辐射剂量检测、漫射光学成像等领域有着广泛应用[18-20]。

吸收倍增分离型结构在高速、高倍增、低工作电压、高可靠性等方面有着巨大优势。InGaAs/InP的吸收倍增分离型APD在0.9倍击穿电压时实现了5.5 A/W@1310 nm的高响应度和21 GHz的高带宽[21];波导集成的Ge/Si SACM APD,利用波导Ge吸收和Si倍增,同时实现了-15.7 V的低击穿电压、0.68 A/W@1310 nm的高响应度和25.7 GHz高带宽的性能,验证了SACM APD使用不同材料构建吸收区和倍增区的优势[22]。GaAsSb/AlGaAsSb的SACM型APD在1550 nm波长时具有278@69.5 V的高增益,噪声因子F<3@M=70[23];基于Au/WSe_2/Ge异质结构的分离吸收倍增APD,红外吸收区和雪崩区分别位于Ge衬底和Au/WSe_2肖特基结中,暗电流由1 nA(非分离型WSe_2/Ge探测器)降低至20 pA,并实现了4100@1550 nm极高的雪崩增益[24];基于石墨烯(nanofilms of macroscopic - assembled - graphene, nMAG)/外延硅的分离型APD利用石墨烯的高导电性和优异的光吸收特性,降低了器件噪声的同时将增益提高至1 123@1 550 nm[25]。此外,基于AlGaN的背入射式SAM APD,采用纯空穴触发,具有1.8×10^5@-70 V的高增益和优越的日盲探测特性[26]。基于4H-SiC的分离型APD也被研制出,器件响应度达到0.174 A/W@270 nm,倍增因子达到10^6[27]。众所周知,穿通电压为外加电场从倍增区向吸收区扩展的临界电压,线性倍增模式SACM APD的工作偏压介于穿通电压和击穿电压之间,穿通电压的高低决定了器件的工作电压与能耗,穿通现象的意义在于可以通过控制穿通电压,实现高倍增系数和低过剩噪声,提高探测器的光响应及稳定性。

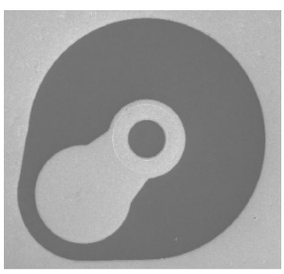
本文基于硅SACM结构雪崩光电探测器,分析器件在穿通前后关键性能变化,研究穿通现象对器件的影响规律并建立相应模型。通过测试器件暗电流、光响应、电容等特性,并结合高低温测试研究穿通电压附近暗电流与工作温度之间的关系,分析穿通前后器件内部电场分布及载流子输运行为,并建立相应的物理和数学模型。制备的器件在常温下的暗电流密度为0.1872 mA/cm^2@-30 V,尺寸研究可知器件的暗电流主要是体暗电流,外延层厚度为25 μm,在低偏压下内建电场实现了本征Si的全耗尽,因此,穿通对暗电流影响不明显。但是,光响应测试发现工作偏压在-25 ~-30 V之间时,光电流出现明显的抬升,明显的穿通现象,穿通前后光响应增加了2.18倍@808 nm,且光谱响应峰值波长出现红移现象,响应度峰值由0.171 A/W@590 nm升高至0.377 A/W@820 nm;电容的C-V测试得到穿通后的器件电容降低至穿通前的1/3@1 MHz。器件雪崩增益达到250@-182 V。此外,暗电流研究发现器件的工作温度低于200 K时,在穿通电压附近暗电流出现下降现象,随着工作温度降低,暗电流降低现象越明显。

1 器件制备

优化设计的SACM APD如图1所示,器件为异面电极,采用的是p型重掺杂的硅衬底,外延25 μm高阻本征硅层(电阻率>1000 Ω·cm),通过离子注入形成n+欧姆接触层和p型场控层,该层也称电荷层(charge layer),利用高温退火实现晶格修复和离子激活。为防止器件边缘的提前击穿,设计了隔离环结构,通过离子注入形成。器件的欧姆接触金属均为Ti/Al/Ti/Au(15 nm/500 nm/15 nm/50 nm),退火合金的温度为450 ℃,时间30 s。制备的器件的SEM俯视图如图1(b)所示,为了更好地分析器件的



（a）



（b）

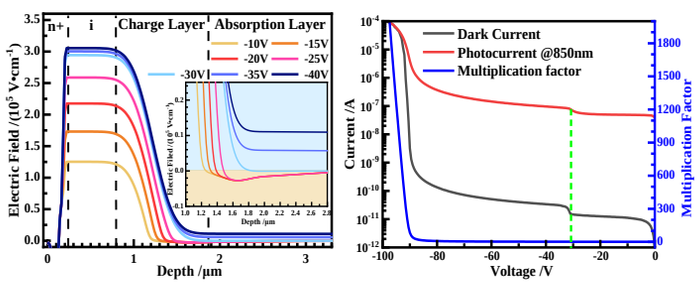
图1　器件结构示意图:(a)SACM APD结构剖视图;(b)器件SEM图

Fig. 1　Schematic diagram of device structure: (a) Schematic of cross-section of the fabricated SACM APD; (b) SEM image of 50μm SACM APD

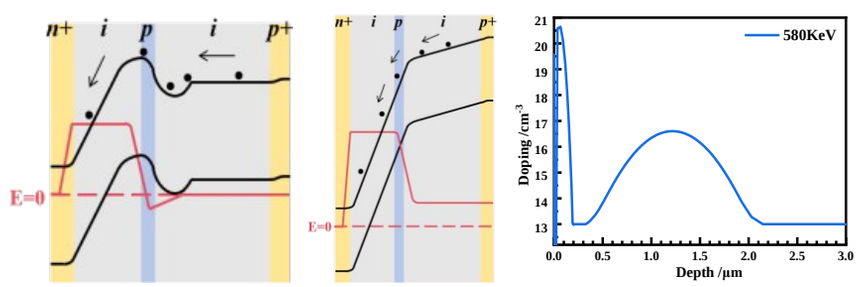
性能,设计了光敏面半径为20 μm、50 μm、100 μm、200 μm等多种尺寸器件。

2　器件结构设计

基于SILVACO仿真平台对硅SACM APD的结构参数和工艺参数进行仿真设计,利用仿真平台的Atlas模块计算得到器件内部的电场和能带分布及I–V特性,如图2所示。工作偏压低于–30 V时,在场控层和吸收区界面附近存在反向电场区域,能带向下弯曲产生一个电子阻挡势垒(如图2(c)),并且吸收区的电场低于150 V/cm,吸收区的光生载流子在输运过程中会有一部分被这个势垒所阻挡,限制了光生载流子的输运;随着外加反向偏压的增加,器件内部的耗尽区扩展,与p/i区界面处的反向电场相互抵消,当偏压增大到31 V时,器件内部的反向电场被全部抵消,阻挡势垒消失(如图2(d)),暗电流的穿通阶跃开始,由于耗尽区穿通到吸收区,载流子在正向电场的作用下完成输运,此时光电流的穿通阶跃完成。结合平台的Athena模块仿真得到场控层离子注入能量为580 KeV时,器件掺杂浓度



（a）　　（b）



（c）　　（d）　　（e）

图2　器件结构仿真示意图:(a)不同反向偏压下,器件内部电场仿真图,插图显示了场控层和吸收层界面的反向电场;(b)SACM APD的仿真*I-V*特性和倍增系数;(c)器件穿通前能带示意图;(d)穿通后能带示意图;(e)离子注入能量为580 KeV时器件掺杂浓度示意图

Fig. 2　Schematic diagram of device structure simulation: (a) electric field distribution of the SACM APD at different reverse biases. The inset shows the feedback electric field at the interface between electric field control layer and light absorbing layer; (b) simulated *I-V* characteristics and multiplication factor of the SACM APD; (c) energy band diagrams before punch-through; (d) energy band diagrams after punch-through; (e) the cross-sectional doping concentration distribution of the SACM APD, when the ion implantation energy is 580 KeV

如图2(e)所示。器件在850 nm波长下的*I-V*特性及倍增系数如图2(b)所示,当850 nm光源垂直入射下,器件的穿通阈值电压为-30 V,暗电流和光电流有明显抬升现象。

3 器件性能

在室温(25 ℃)下使用Keithley 4200半导体分析仪对器件的电学性能进行测试,利用屏蔽罩实现全暗的测试环境,利用激光器与光纤实现不同光波长下的光电流测试。半径100 μm的SACM APD暗电流曲线及808 nm波长下的I-V特性和倍增系数如图3(a)所示,暗电流密度为0.1 872 mA/cm^2@-30 V,当反偏电压达到-182 V时器件击穿,此时增益达到250。器件的光响应电流在-25 V~-30 V之间出现明显抬升,验证优化后的器件结构设计,同时也揭示了穿通电场对光生载流子输运的增强作用。通过拟合得到穿通之前光电流的斜率为-0.00145,穿通时斜率为-0.0418(如绿色点线所示),而穿通后斜率为-0.0042,穿通时斜率为穿通前的29倍。定义光电流为初始光电流值的三倍时对应电压为穿通的阈值电压,因此研制器件的穿通阈值电压为-30 V。对光敏面半径为20 μm、50 μm、100 μm和200 μm的器件进行了暗电流测试,如图3(b)所示。可将器件的暗电流密度(J_{Dark})分为面积相关的体暗电流密度(J_{Bulk})、周长相关侧扩散电流密度($J_{Lateral}$)以及与尺寸无关的金属半导体界面泄漏电流(I_{M-S}),表示为:

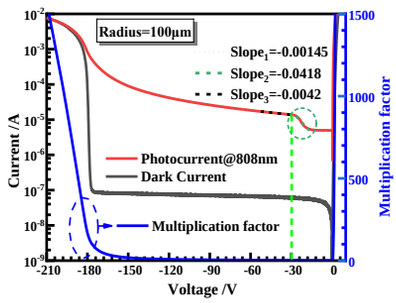
$$I_{Dark} = J_{Bulk} \times \pi R^2 + J_{Lateral} \times 2\pi R + I_{M-S}, \quad (1)$$

式(1)中,R为器件通光孔半径。提取不同尺寸器件在-30 V下的暗电流值,根据公式(1)进行拟合,如图3(c)所示。通过拟合结果提取出面积相关系数J_{Bulk}=1.768×10^{-8} A/μm^2,周长系数$J_{Lateral}$=7.224×10^{-12} A/μm,与尺寸无关的暗电流I_{M-S}=7.735×10^{-13} A。表明面积相关的体暗电流是暗电流的主要来源,且随偏压增加无明显抬升,穿通现象对暗电流影响不明显。

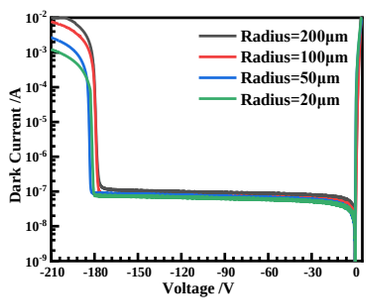
图4(a)为100 μm SACM雪崩器件在405 nm、505 nm、635 nm、808 nm、850 nm和1064 nm波长下的光电流测试曲线,表1提取出不同波长下穿通前后的光电流和吸收系数。器件的光电流均在-25 ~ -30 V偏置电压范围内呈现抬升趋势,其中,808 nm波长下器件的光电流在穿通前后的比值达到了2.18,而405 nm波长光的吸收深度仅0.1 μm,因此穿通前后光电流抬升不明显。假设,器件在发生穿通时,倍增区电场尚未达到雪崩电场,器件的总光电流J_{tot}可分为耗尽区内产生的载流子所形成的漂移电流J_{dr}和耗尽区外的扩散电流J_{diff},即:

$$J_{tot} = q\Phi_0\left[1 - \frac{\exp(-\alpha W_D)}{1 + \alpha L_n}\right] + \frac{qn_{p0}D_n}{L_n}, \quad (2)$$

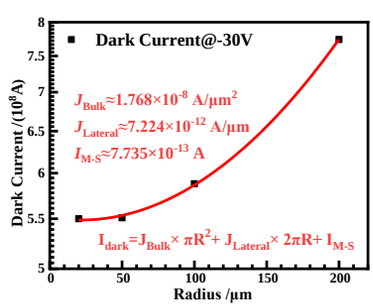
式(2)中q为电荷量,Φ_0为单位面积的入射光子通量,α为吸收系数,W_D为耗尽区宽度,n_{p0}为平衡态



(a)



(b)



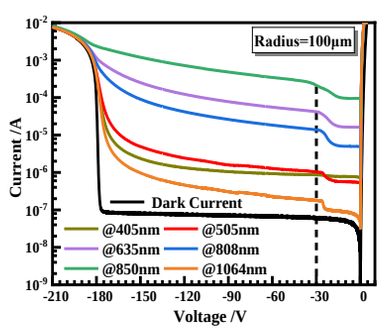
(c)

图3 SACM APD的*I-V*特性及不同尺寸暗电流特性。(a) 100 μm SACM APD的*I-V*特性和倍增系数;(b)光敏面半径为20 μm、50 μm、100 μm、200 μm器件的暗电流曲线;(c)-30 V偏压下暗电流与光敏面半径的关系,红线是根据公式(1)的拟合曲线

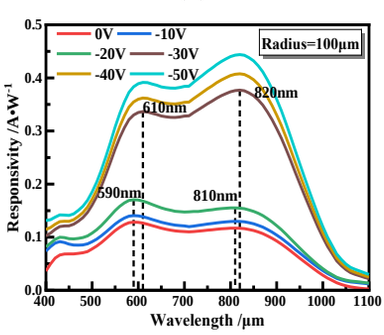
Fig. 3 *I-V* characteristics of SACM APD and dark current characteristics of SACM APD with different sizes. (a) *I-V* characteristics and multiplication factor of 100 μm SACM APD; (b) dark current of devices with a radius of 20 μm,50 μm,100 μm,200 μm versus voltage; (c) relationships between the dark current and the photosensitive area radius at −30 V, the red line is the fitting curve according to Eq. (1)

电子浓度,D_n为电子扩散系数,L_n为电子扩散长度。器件在正常工作时,公式(2)中的第二项很小可以忽略,808 nm时穿通后光电流为穿通前的2.18倍,可以近似求出穿通后载流子的耗尽区宽度增加了8.24 μm。图4(b)为器件在不同偏压下的光谱响应图,测试系统由Zolix TLS3可调单色仪,Keithley 2400源表及数据采集设备组成,单色仪输出光功率通过标准探测器计算得出。器件的光谱响应呈现了双峰现象,分别在590 nm和820 nm附近,主要是由吸收层厚度和电场层决定。随着偏置电压的增大,器件光谱响应不断增强,且光谱响应曲线变化趋势保持着较好的一致性。当外加偏压由-20 V增加至-30 V时,主次峰换位,器件主峰响应由0.171 A/W@ 590 nm增加至0.377 A/W@ 820 nm,这是由于穿通造成电场层增大,器件光谱响应的主峰值出现红移。

图5(a)为100 μm SACM APD在不同频率下电容随电压的变化关系曲线,得到随着反向偏压的增大,外加电场层缓慢向场控层扩展,引起电容的不



(a)



(b)

图4　SACM APD的*I-V*光电流特性及光谱响应。(a)100 μm SACM APD在不同波长下的*I-V*光电流;(b) 100 μm SACM APD在不同偏压下的光谱响应

Fig. 4　*I-V* characteristics and spectral response of SACM APD. (a) *I-V* characteristics of 100 μm SACM APD with different input light wavelengths; (b) spectral response of 100 μm SACM APD at different reverse biases.

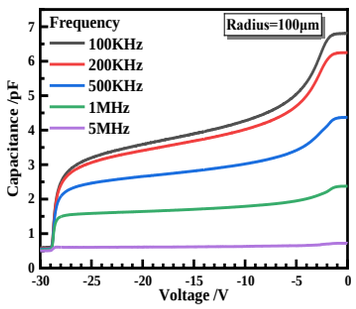
表1　不同波长入射光下的穿通前后光电流对比及吸收系数表

Table 1　Comparison of photocurrent before and after punch-through and the absorption coefficients with different input light wavelengths

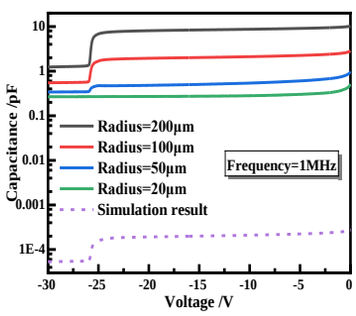
Wavelength λ/nm	Photocurrent before punch-through I_{before}/μA	Photocurrent after punch-through I_{after}/μA	I_{after}/I_{before}	Absorption coefficient α /cm^{-1}
405	0.79	0.86	1.08	95000
505	0.63	1.04	1.65	11000
635	21.83	41.87	1.92	3200
808	6.31	13.77	2.18	775
850	134.83	212.77	1.58	535
1064	0.10	0.18	1.80	11

断减小;在-25 ~ -30 V电压前后倍增层的耗尽区与吸收层的本征耗尽区合并,外加电场覆盖器件的倍增区、电荷区和吸收区三区,器件电容极速下降,减小为原来数值的1/3(@1 MHz),吸收区耗尽后电容随偏压不再发生明显变化。而在发生穿通之前,在固定电压下,电容随着频率的增加而减小,此外,不同频率下电容随偏压的变化趋势也不尽相同,器件电容在1 MHz以下随偏压增加的减小趋势更加明显,代表器件穿通的电容下降沿对应偏压也随频率增大而变大。这是因为器件电容主要由耗尽区电容、阻挡势垒捕获载流子形成的电容、缺陷态电容、界面电容以及寄生电容组成,在1 MHz以下的低频状态,器件电容等于耗尽区电容、阻挡势垒电容及其他内部电容之和,随着反向偏压增加,电子阻挡势垒逐渐消失,即这一部分贡献的电容"容量"减少,并且由于吸收区分压不断增强,电容下降趋势逐渐缓慢;而扫描频率在1 MHz以上时,阻挡势垒中电子的产生复合将跟不上高频信号的变化[28],器件电容近似等于耗尽区电容,耗尽区由电荷层逐渐向吸收区扩展,耗尽区宽度逐渐增大,电容逐渐减小。穿通之后,电子阻挡势垒消失,完成穿通后耗尽区宽度几乎不变,所以不同频率下电容相差不大,也反映了器件缺陷态电容、界面电容对器件电容贡献较小。

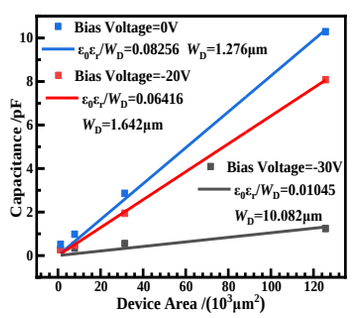
如图5(b)所示,测试了不同尺寸器件在1 MHz频率下的电容特性,提取了器件在0 V、-20 V和-30 V时的电容值。此时器件电容主要由耗尽区电容组成,满足平行板电容模型$C_j=A\varepsilon_0\varepsilon_r/W_D$,其中$A$为器件光敏面面积,$W_D$为耗尽层宽度。通过拟合电容与器



(a)



(b)

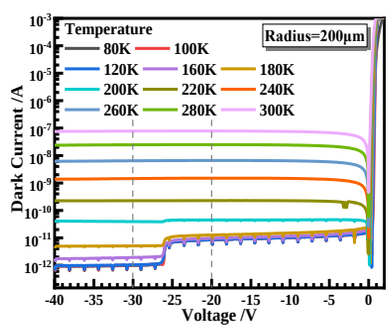


(c)

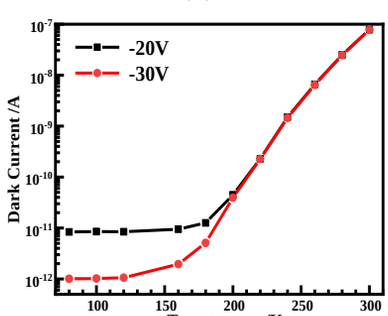
图5 SACM APD的*C-V*特性。(a)不同频率下100 μm SACM APD的*C-V*特性;(b)1MHz下不同光敏面半径SACM APD的*C-V*特性(虚线为半径100 μm器件在1MHz频率下电容仿真曲线);(c)不同尺寸器件在0 V、-20 V、-30 V偏压下的电容值及电容与器件光敏面面积拟合关系

Fig.5 *C-V* characteristics of SACM APD. (a) *C-V* characteristics of 100μm SACM APD at 100 KHz, 200 KHz, 500 KHz, 1 MHz, 5 MHz, respectively; (b) C-V characteristics of devices with a radius of 20 μm, 50 μm, 100 μm, 200 μm at 1 MHz (dashed line represents the simulation result for devices with a radius of 100μm at 1 MHz) ;(c) relationships between the capacitance values and the devices area with reverse bias voltages of 0 V, -20 V, -30 V.

件光敏面面积的线性关系可得到耗尽区宽度W_D,得到0 V、-20 V和-30 V时的耗尽区宽度分别为1.276 μm、1.642 μm和10.082 μm,穿通前后耗尽区之差为8.44 μm,如图5(c)所示,略大于由公式(2)计算出来的耗尽区之差8.24 μm。这是因为由于复合会导致光生载流子的湮灭,寿命降低,从而使得收集效率降低,对应计算出来的耗尽区宽度偏低。从图5(b)也可以看出由于穿通器件电容在-25 V至-30 V之间明显下降。而半径为20 μm的小尺寸器件穿通现象不明显,这是因为器件表面欧姆接触n+区域面积较小,离子注入形成的区域边界不明显,n+区比场控层大的部分发生耗尽,器件电容会受边缘电场的影响较大。虚线为使用TCAD silvaco软件仿真得到的频率1 MHz,半径100 μm的器件电容曲线,由于仿真模型比较理想化,没有引入工艺中带来的缺陷、损伤,因此仿真电容远小于器件实际测试电容,但下降趋势与实际器件测试表现一致,证明了器件内部由于穿通现象使得电容急剧下降。



(a)



(b)

图6 SACM APD的温度特性:(a)不同温度下200 μm SACM APD的暗电流特性;(b)-20 V和-30 V偏压下器件暗电流随温度的变化关系

Fig.6 Temperature characteristics of SACM APD: (a) dark current of 200 μm SACM APD versus voltage at different temperatures; (b) the relationship between dark current and temperature at -20 V and -30 V

基于半导体器件参数分析仪和与温控仪组成的探针台测试系统,对器件进行低温暗电流测试,得到80 ~300 K下半径200 μm的SACM APD器件的暗电流特性。测试结果如图6(a)所示,器件暗电流

随着温度的升高而增大,当器件工作温度低于200 K时,在穿通电压附近暗电流出现随偏压增大下降的现象。提取了不同温度下,-20 V和-30 V对应的电流值,如图6(b)所示,可以看出在200 K以下,随着温度的降低,电流差值增大,暗电流降低现象越明显。我们之后对器件80 ~300 K的激活能进行了分析,在低于200 K时器件暗电流机制以陷阱辅助隧穿为主导,器件发生穿通后,耗尽区扩展至吸收区,暗电流主要产生区域从具有浅陷阱能级的离子注入区转移到较深陷阱能级的本征Si吸收层,因此,穿通后暗电流有所下降[29][30][31]。

4　结论

本文研究了硅SACM APD器件的穿通现象对器件暗电流、光谱响应、电容以及温度响应的影响。基于硅基本征外延片,并结合CMOS工艺,制备了不同尺寸的雪崩光电探测器,测试了器件常温下的I-V特性、光谱响应和电容特性,以及80 ~300 K温度范围内的暗电流特性,对比分析了器件穿通前后性能差异。制备的器件在常温下的暗电流密度为0.187 2 mA/cm^2@-30 V,由于低偏压下的本征耗尽,穿通对室温的暗电流影响较小;光响应电流穿通前后抬升了2.18倍@808 nm,穿通造成了光谱响应峰值波长的红移,光谱响应峰值由0.171 A/W@590 nm升高至0.377 A/W@820 nm,器件雪崩增益达到250@-182 V,此外,穿通将器件的电容降低了2/3@1 MHz。变温暗电流测试发现器件的工作温度在低于200 K时,穿通造成了暗电流出现下降现象,随着工作温度降低,暗电流降低现象越明显。基于这些现象深入探讨了穿通前后器件内部电场分布及能带的变化,并明确了其中的物理机制,对后续分离型器件的优化设计提供了理论依据和实验指导,尤其是对于设计应用于近红外波段的低功耗、高增益、高响应度的光电探测器具有重要意义。

References

[1] CHIANG C C, HO W J, LIU J J, et al. Fabrication and characterization of planar-type top-illuminated high-responsivity InP-based avalanche photodetector for 10 Gbps optical receiver applications[C]//International Symposium on Next Generation Electronics. 2018. [S.l.].

[2] ZHAO Y L. Impact ionization in absorption, grading, charge, and multiplication layers of InP/InGaAs SAGCM APDs with a thick charge layer[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(10): 3493-3499.

[3] KASPER B L, CAMPBELL J C. Multigigabit-per-second avalanche photodiode lightwave receivers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(10): 1351-1364.

[4] IZHNIN I I, LOZOVOY K A, KOKHANENKO A, et al. Single-photon avalanche diode detectors based on group IV materials[J]. Applied Nanoscience, 2022, 12(3): 253-263.

[5] PARK B, PARK I, CHOI W, et al. A 64×64 APD-based ToF image sensor with background light suppression up to 200 klx using in-pixel auto-zeroing and chopping[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2019, 54(5): 1-10.

[6] AHMAD Z, KUO S I, CHANG Y C, et al. Avalanche photodiodes with dual multiplication layers and ultra-high responsivity-bandwidth products for FMCW lidar system applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27(6): 1-1.

[7] LIANG Y, XU B, FEI Q, et al. Low-timing-jitter GHz-gated InGaAs/InP single-photon avalanche photodiode for LIDAR[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 28(2): 1-7.

[8] LU C, WU K, CAO Y, et al. Monolithic coherent LABS lidar based on an integrated transceiver array[J]. Optics Letters, 2022, 47(11): 1-4.

[9] AMÉLIE P, PAUWELS J, HÅKANSSON E, et al. Entanglement-assisted quantum communication with simple measurements[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1-10.

[10] COUTEAU C, BARZ S, DURT T, et al. Applications of single photons to quantum communication and computing[J]. Nature Reviews Physics, 2023, 5(6): 326-338.

[11] LOVE A C, CALDWELL D R, KOLBABA-KARTCHNER B, et al. Redshifted coumarin luciferins for improved bioluminescence imaging[J]. Journal of the American Chemical Society, 2023, 145(6): 3335-3345.

[12] PEREIRA J M T. Frequency-response simulation analysis of InGaAs/InP SAM-APD devices[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010, 48(4): 712-717.

[13] MURTAZA S S, ANSELM K A, HU C, et al. Resonant-cavity enhanced (RCE) separate absorption and multiplication (SAM) avalanche photodetector (APD)[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 7(12): 1486-1488.

[14] ZHANG J, YAO E, KE S Y. Optimal design of charge-free layer InGaAs/Si avalanche photodetector[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(5): 0504001.
张娟, 姚儿, 柯少颖. 无电荷层InGaAs/Si雪崩光电探测器的优化设计[J]. 光学学报, 2024, 44(5): 0504001.

[15] CHEN W S, WANG H B, TAO J, et al. A study on the epitaxial structure and characteristics of high-efficiency blue silicon photodetectors[J]. Chinese Optics, 2022, 15(3): 568.
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.

[16] LIU W, SHI Z, GAO J. Enhanced initial photocurrent caused by the multiplication process at punch-through voltage in InGaAs/InP avalanche photodiode with highly doped charge layer[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 124: 104218.

[17] ZHAO H L, PENG H L, ZHOU X Y, et al. Structural design of dual carrier multiplication avalanche photodiodes on InP substrate[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(19):

285-291.
赵华良，彭红玲，周旭彦，等. InP衬底上的双载流子倍增雪崩光电二极管结构设计[J]. 物理学报，2023，72(19)：285-291.
[18] YANG S，ZHOU D，CAI X，et al. Analysis of dark count mechanisms of 4H-SiC ultraviolet avalanche photodiodes working in Geiger mode[J]. IEEE Transactions on Electron Devices，2017，64(8)：1-8.
[19] NISHIGUCHI K，NAKATA K，HASHIZUME T. A numerical modeling of the frequency dependence of the capacitance-voltage and conductance-voltage characteristics of GaN MIS structures[J]. Journal of Applied Physics，2022，132(17)：112198.
[20] ZHENG J，XUE X，YUAN Y，et al. Dynamic-quenching of a single-photon avalanche photodetector using an adaptive resistive switch[J]. Nature Communications，2022，13(1)：1517.
[21] NASEEM A，ZOHAUDDIN，AHMAD Z，et al. Avalanche photodiodes with composite charge-layers for low dark current，high-speed，and high-power performance[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics，2022，28(2)：1-10.
[22] YI L K，LIU D Q，LI D M，et al. Waveguide-integrated Ge/Si avalanche photodiode with vertical multiplication region for 1310 nm detection[J]. Photonics，2023，10(7)：750.
[23] LEE S，JIN X，JUNG H，et al. High gain，low noise 1550 nm GaAsSb/AlGaAsSb avalanche photodiodes[J]. Optica，2023，10(2)：147.
[24] GAO L，ZHANG N，YOU J，et al. Broadband and ultra-high-sensitivity separate absorption-multiplication avalanche phototransistor based on a Au-WSe2-Ge heterostructure[J]. ACS Photonics，2023，10(12)：4349-4356.
[25] LI Z W，CAO X X，ZHANG Z X，et al. Multilayer graphene/epitaxial silicon near-infrared self-quenched avalanche photodetectors[J]. Advanced Optical Materials，2024，12(21)：2302900.
[26] CAI Q，LUO W K，GUO H，et al. Direct observation of reach-through behavior in back-illuminated AlGaN avalanche photodiode with separate absorption and multiplication structure[J]. Journal of Physics D：Applied Physics，2020，53(42)：425101.
[27] CAI X L，ZHOU D，CHENG L，et al. Performance improvement of 4H-SiC PIN ultraviolet avalanche photodiodes with different intrinsic layer thicknesses[J]. Chinese Physics B，2019，28(9)：098503.
[28] CHENG C J，SI J J，ZHANG X F，et al. Capacitance characteristics of back-illuminated Al0.42Ga0.58N/Al0.40Ga0.60N heterojunction p-i-n solar-blind UV photodiode[J]. Applied Physics Letters，2007，91(25)：253510.
[29] SZE S M. Physics of Semiconductor Devices[M]. 3rd ed. New York：Wiley-Interscience，2008：34-35.
[30] GOPAL V，PLIS E，RODRIGUEZ J B，et al. Modeling of electrical characteristics of midwave type II InAs/GaSb strain layer superlattice diodes[J]. Journal of Applied Physics，2008，104(12)：124506.
[31] SUN W，LU Z，ZHENG X，et al. High-gain InAs avalanche photodiodes[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics，2012，49(2)：154-161.