

I型倍增层对异质SAM结构InSb-APD红外探测器性能的影响

方小坤 叶伟 权贝贝 朱朝阳 萧生

Effect of type I multiplier layer on performance of InSb-APD infrared detector with heterogeneous SAM structure

FANG Xiaokun, YE Wei, QUAN Beibei, ZHU Chaoyang, XIAO Sheng

引用本文:

方小坤, 叶伟, 权贝贝, 等. I型倍增层对异质SAM结构InSb-APD红外探测器性能的影响[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 659–664. DOI: 10.5768/JAO202445.0304002

FANG Xiaokun, YE Wei, QUAN Beibei, et al. Effect of type I multiplier layer on performance of InSb-APD infrared detector with heterogeneous SAM structure[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(3): 659–664. DOI: 10.5768/JAO202445.0304002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0304002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

APD探测器模块性能及噪声检测

Detection of performances and noise of APD detector module

应用光学. 2019, 40(6): 1115–1119 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0603006>

一种轻质薄型反射镜的挠性支撑结构设计

Flexible support structure design of lightweight thin reflector

应用光学. 2017, 38(5): 815–819 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0505002>

基于长波红外探测器的消热差轻量化光学系统设计

Design of athermal and lightweight optical system based on long-wave infrared detector

应用光学. 2021, 42(3): 429–435 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301009>

激光辐照碲镉汞红外焦平面探测器的热应力损伤研究

Thermal-stress damage of MCT infrared focal plane array detector caused by laser irradiation

应用光学. 2018, 39(5): 751–756 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0506003>

基于卡塞格林结构的近地层紫外通信发射光学系统设计

Design of UV communication emission optical system in surface layer based on Cassegrain structure

应用光学. 2017, 38(2): 205–209 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0201009>

双层荧光粉涂覆对COB封装LED出光的影响

Effect of double-layer phosphor coating on LED light output of COB encapsulation

应用光学. 2020, 41(5): 1053–1059 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0505001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 03-0659-06

I型倍增层对异质SAM结构InSb-APD红外探测器性能的影响

方小坤¹, 叶伟², 权贝贝³, 朱朝阳², 萧生²

(1. 扬州市职业大学 电子工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 陕西理工大学 机械工程学院, 陕西 汉中 723001;
3. 西北工业集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 红外探测器的光电特性会受到内部结构倍增层参数的影响, 为了能够改善器件的雪崩效应, 借助仿真软件 Silvaco-TCAD, 详细探讨了 I 型倍增层的残余掺杂浓度和厚度对异质 SAM 结构 InSb-APD 红外探测器性能的影响。研究表明, 随着 I 型倍增层掺杂浓度的增加, 其倍增层内的电场强度峰值增加, 同时光响应度略微增加; 随着 I 型倍增层厚度的增加, 其倍增层的光响应度与暗电流密度升高, 同时电场强度峰值减少。进一步研究表明, 当 I 型倍增层残余掺杂浓度和厚度分别为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 和 $3 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 有利于雪崩过程。

关键词: I 型倍增层; InSb; 掺杂浓度; SAM 结构

中图分类号: TN215

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0304002

Effect of type I multiplier layer on performance of InSb-APD infrared detector with heterogeneous SAM structure

FANG Xiaokun¹, YE Wei², QUAN Beibei³, ZHU Chaoyang², XIAO Sheng²

(1. School of Electronic Engineering, Yangzhou Polytechnic College, Yangzhou 225009, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China; 3. Northwest Industries Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: The photoelectric properties of the infrared detector will be affected by the multiplier layer parameters of the internal structure. In order to improve the avalanche effect of the device, the effect of residual doping concentration and thickness of type I multiplier layer on the performance of InSb-APD infrared detector with heterogeneous SAM structure was investigated in detail with the simulation software Silvaco-TCAD. The results show that as the doping concentration of type I multiplier layer increases, the peak electric field intensity within its multiplier layer increases, and the optical responsivity increases slightly. The increase of the thickness of type I multiplier layer rises the optical responsivity and dark current density of its multiplier layer, and the peak electric field intensity decreases. Further studies show that the avalanche process is favored when the residual doping concentration and thickness of the type I multiplier layer are $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and $3 \text{ }\mu\text{m}$, respectively.

Key words: type I multiplier layer; InSb; doping concentration; SAM structure

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-12-15

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室项目 (16JS016); 陕西省教育厅专项科研计划 (18JK0151); 陕西省“十四五”教育科学规划 2022 年度课题: 产教融合下的项目式教学课程思政教学研究与实践 (SGH22Y1351); 陕西理工大学科研项目 (202060250); 自然科学基金面上项目 (YZ2016124)

作者简介: 方小坤 (1980—) 男, 硕士, 副教授, 主要从事光电检测与电子信息技术、光伏储能材料与器件等研究。

E-mail: yzdfxk@yzpc.edu.cn

通信作者: 叶伟 (1977—) 男, 博士, 副教授, 主要从事功能材料与器件、储能材料与器件等研究。

E-mail: yewei518@163.com

引言

对雪崩光电二极管 (avalanche photo diode, APD) 的研究,始于上个世纪 50 年代^[1],且该项研究成果成功应用在光纤通信^[2-4]、光谱学^[5-6]和光探测与测距^[7]等诸多领域。在材料方面,以 III-V 族半导体材料 InSb 为代表,该材料具有量子效率高、响应速度快和稳定性高^[8]等优点,而且利用该材料制备的 InSb-APD 具有高灵敏度、高像素稳定性和易于制备大尺寸像元阵列以及低成本等特点,故经常用于高质量的红外探测系统^[9],这使得 InSb-APD 的研究受到相关科研机构的格外关注。但是,由于 InSb 材料在室温下的带隙较窄,内部产生的复合电流、隧道电流和其他噪声机制等不足对光电探测性能有很大影响。此外,其 SAM-APD 结构将倍增层和吸收层分离设计能更好地分离电子-空穴对的传输,以抑制器件噪声的产生,同时降低器件的暗电流,进一步提高雪崩增益和响应速度^[10]。近年来,为了提高 APD 红外探测器的性能,研究人员对探测器的结构进行相关的研究,以改善器件的工作性能。例如, GU Y^[11] 等人通过优化倍增层的厚度,利用仿真计算得出, InAlAs/InGaAs 雪崩光电二极管优化的 200 nm 倍增层能够改善增益带宽积并降低暗电流;王航^[12]等人分析了倍增层厚度对 In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP APD 器件特性的影响;叶伟^[13]等人详细研究了倍增层 InAlAs 浓度对 In_{0.83}Al_{0.17}As/In_{0.83}Ga_{0.17}As 红外探测器特性的影响规律; CAO Y^[14]等人提出了一种分离式吸收区 GaAs_{0.52}Sb_{0.48}和倍增区 Al_{0.85}Ga_{0.15}As_{0.56}Sb_{0.44}雪崩光电二极管,表现出良好的低噪声特性; XIE H Q^[15]等人提出了一种基于 SOI 的横向分离吸收多重缓冲器雪崩式光电二极管,可以消除由曲率效应引起的边缘击穿,提高器件的稳定性; LI J K^[16]等人采用 InAsSb 作为 SAM-APD 的倍增层,极大地增强了器件

的增益性。直到目前,关于 I 型倍增层对异质 SAM 结构 InSb-APD 红外探测器性能的影响却鲜有报道。因此,在本课题组前期研究的基础上,我们针对 I 型倍增层参数对异质 SAM 结构 InSb-APD 红外探测器性能展开详细讨论,以探究 I 型倍增层的浓度、厚度对异质 SAM 结构 InSb-APD 红外探测器性能的影响。

1 异质结构 InSb-APD 的结构和建模

图 1 为异质 InSb-APD 的结构图。该探测器自上而下分别为 0.5 μm 厚 P 型 GaSb 空穴传输接触层; 2 μm 厚 P 型 InSb 吸收层,吸收红外辐射并转化为电子空穴对; 3 μm 厚接收电子并维持光生载流子雪崩过程的 N 型非有意掺杂 InSb 倍增层; 0.5 μm 厚传输电子并隔绝衬底杂质的 N 型 InP 缓冲层; N 型 InP 衬底。

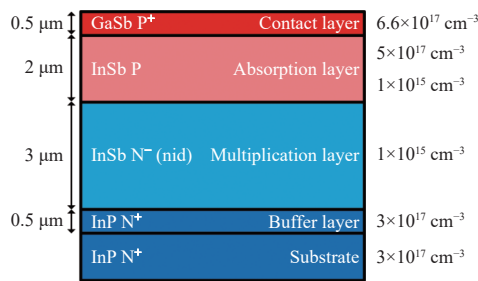


图 1 异质 InSb-APD 探测器结构图

Fig. 1 Structure diagram of heterogeneous InSb-APD detector

1.1 材料模型参数

在使用 ATLAS 模拟时,通过 material、models 以及 impact 命令来指定材料参数以及物理模型^[17],大致可以分为材料的迁移率模型、复合模型、载流子统计模型和碰撞电离模型以及隧穿模型。表 1 给出了仿真时 GaSb、InSb 和 InP 材料的主要参数。

表 1 仿真时模型材料的主要参数

Table 1 Main parameters of model material during simulation

Material	GaSb	InSb	InP
No-band width/eV	0.726	0.17	1.344
Electron affinity/eV	4.06	4.59	4.4
SRH carrier lifetime/s	$\tau_n=1 \times 10^{-8}$ $\tau_p=6 \times 10^{-7}$	$\tau_n=5 \times 10^{-8}$ $\tau_p=5 \times 10^{-8}$	$\tau_n=1 \times 10^{-9}$ $\tau_p=1 \times 10^{-9}$
Roscher factor/cm ⁶ /S	$C_n=5 \times 10^{-30}$ $C_p=5 \times 10^{-30}$	$C_n=5 \times 10^{-26}$ $C_p=5 \times 10^{-26}$	$C_n=9 \times 10^{-31}$ $C_p=9 \times 10^{-31}$
Dielectric constant ϵ	15.7 ϵ_0	16.8 ϵ_0	12.5 ϵ_0
Valence band and conduction band effective density of states/cm ⁻³	$N_c=2.1 \times 10^{17}$ $N_v=1.8 \times 10^{19}$	$N_c=4.2 \times 10^{16}$ $N_v=7.3 \times 10^{18}$	$N_c=5.7 \times 10^{17}$ $N_v=1.1 \times 10^{19}$
Effective quality		$m_c=0.014 m_0$ $m_h=0.43 m_0$	

2 结果与讨论

2.1 倍增层残余掺杂浓度对器件的影响

图 2 为非有意掺杂倍增层中残余掺杂浓度对器件光学特性的影响。由图 2(a) 可知, 随着倍增层掺杂浓度的增加, 器件的响应度略微增加, 出现这种现象是由于耗尽区在高倍增层浓度下会向 P 型 InSb 吸收层扩展, 使更多在吸收层区域产生的光生载流子通过耗尽区扩散进入倍增区, 进而增加器件的稳态光电流。图 2(b) 展示了器件在不同倍增层浓度下的开关特性, 可以明显看出在浓度大于 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 之后, 被光源照射后的响应时间显著增加, 同时稳态光电流无法保持, 导致器件的开关特性急剧变差。

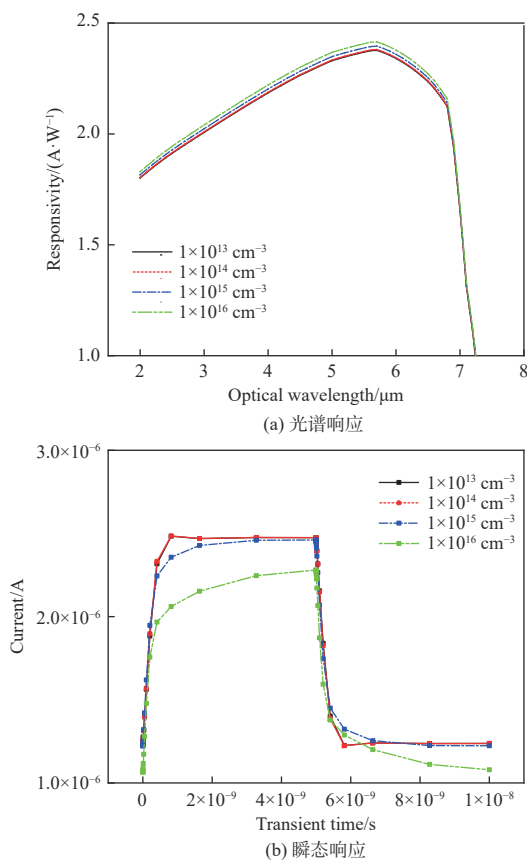


图 2 倍增层残余掺杂浓度对器件光学特性的关系
Fig. 2 Relationship between residual doping concentration of multiplier layer on optical properties of device

图 3 为不同倍增层残余掺杂浓度下的器件内部电场分布图。在倍增层掺杂浓度为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 时, 器件耗尽层宽度小于 $2 \mu\text{m}$, 同时在吸收层与倍增层界面处存在较大的尖峰电场。但随着倍增层中掺杂浓度的降低, 耗尽层宽度增加, 同时内建电场趋于均匀, 这种变化可以抑制器件隧穿效应的

发生, 有利于雪崩过程。因此, 倍增层的残余掺杂浓度应保持在 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 之内较为合理。

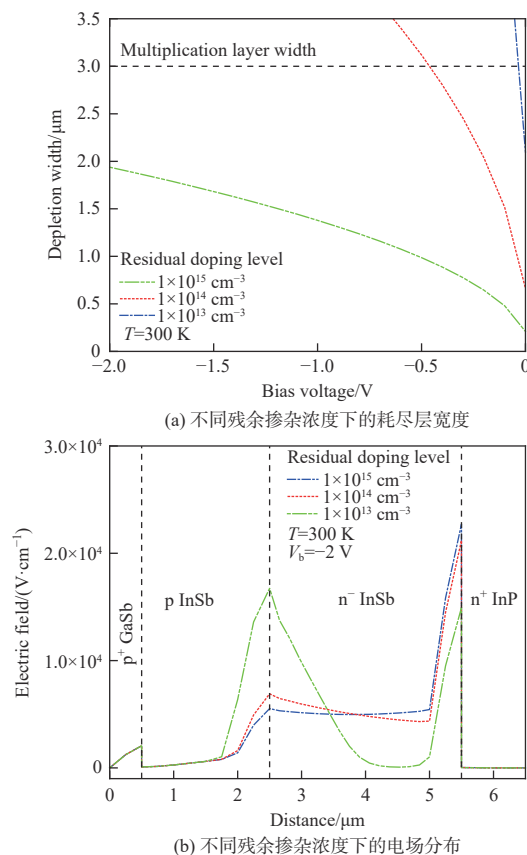


图 3 器件的内部电场结构

Fig. 3 Internal electric field structure of device

2.2 倍增层厚度对器件的影响

图 4 为不同倍增层厚度对器件光学特性的影响。由图 4(a) 可知, 在此设定倍增层掺杂浓度不变, 增大倍增层厚度使器件的响应度增加, 但其响应度峰值对应的波长位置保持不变, 且在厚度 $3 \mu\text{m}$ 与 $4 \mu\text{m}$ 时的响应度值几乎不变, 其最大值均为 2.41 A/W 。这种现象是由于耗尽层扩宽至整个 InSb 倍增层长度上, 有效光敏区并未扩大, 故器件的响应度几乎不变。由图 4(b) 可知, 随着倍增层厚度由 $1 \mu\text{m}$ 增加到 $4 \mu\text{m}$ 时, 器件的稳态光电流也随之增大, 但其响应时间逐渐增加, 在厚度为 $4 \mu\text{m}$ 时, 器件开关特性降低最为严重。

图 5 为倍增层厚度对暗电流密度和电场分布的影响。其中, 图 5(a) 展示了不同倍增层厚度对应的暗电流密度曲线图, 随着倍增层厚度的增加, 相应的暗电流也随之增大, 其原因如图 5(b) 所示, 在施加反向电压时, 作为高电阻区域的 InSb 倍增层分担绝大部分的偏压, 随着电压升高, 耗尽区同

时向吸收层和倍增层内部扩展,这使得器件的光吸收更加高效。但是,随着器件倍增层 InSb 厚度的增加,其材料自身缺陷也会随之增多,进而导致暗电流增大。

图 6(a) 是器件在 1 MHz 的恒定频率下,得到的 C-V 曲线与倍增层厚度的变化关系图。当厚度不变时,负偏压增大,电容减小;保持施加偏压一定时,厚度减小,电容增加。

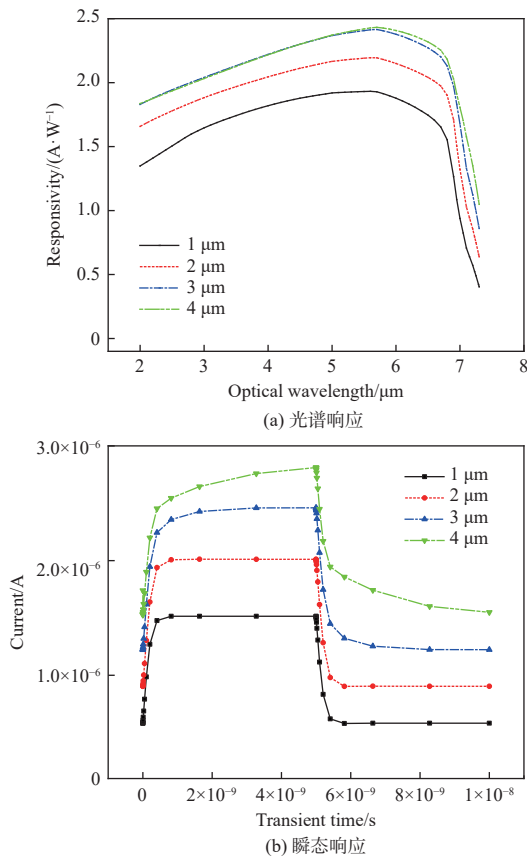
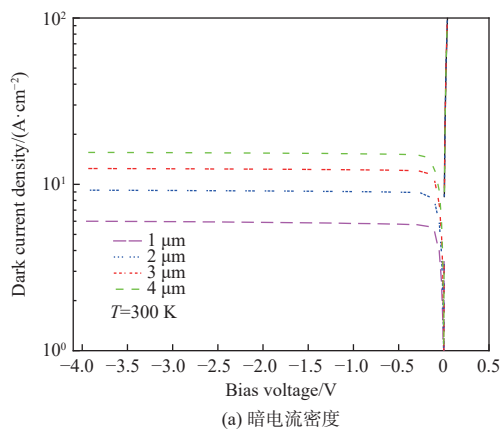
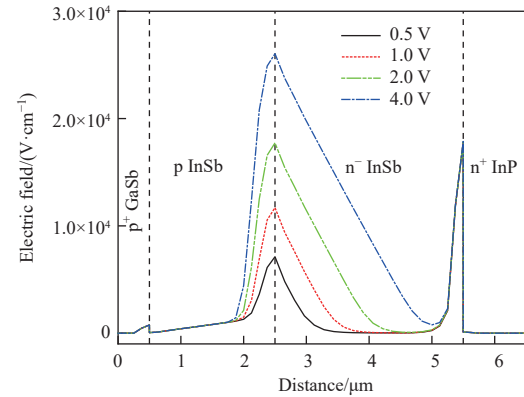


图 4 倍增层厚度对器件光学特性的关系

Fig. 4 Relationship between thickness of multiplier layer on optical properties of device



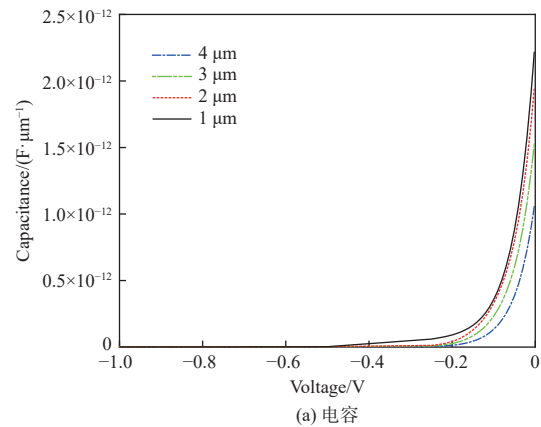
(a) 暗电流密度



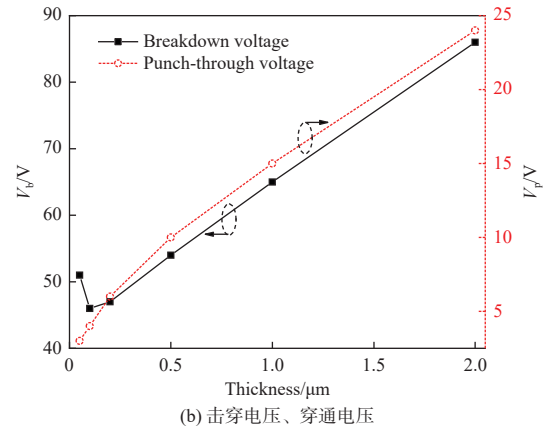
(b) 内部电场分布与偏压的关系

图 5 倍增层厚度的影响

Fig. 5 Effect of multiplier layer thickness



(a) 电容



(b) 击穿电压、穿通电压

图 6 倍增层厚度对电容和击穿电压、穿通电压的关系

Fig. 6 Relationship between thickness of multiplier layer on capacitance, breakdown voltage and through-put voltage

将 PIN 结构 APD 探测器简化为 PN 结计算其结电容 C_j , 且外加信号频率很高时, 结电容以势垒电容 C_τ 为主, 忽略扩散电容 C_D [18-19], 其表达式为

$$C_j = C_\tau + C_D = \frac{\epsilon_j A}{w} \quad (1)$$

式中 w 为耗尽层宽度, 由式(2)计算:

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r(V_{bi} - V)}{qN_B}} \quad (2)$$

式中: ε_0 为真空介电常数; ε_r 为相对介电常数; V_{bi} 为内建电场; N_B 为轻掺杂侧的浓度。由式 (1) 和式 (2) 分析可知, 增加反向偏压和增大倍增层厚度都能增大耗尽层宽度 w , 从而减小器件电容。在倍增层厚度为 $3\ \mu\text{m}$, 反向偏置电压为 $5\ \text{V}$ 时, 器件的电容密度为 $4.81 \times 10^{-16}\ \text{F}/\mu\text{m}$ 。图 6(b) 为不同厚度与击穿电压、穿透电压的关系。从图 6(b) 可知, 厚度从 $0.05\ \mu\text{m}$ 增加至 $0.1\ \mu\text{m}$ 时, 器件击穿电压从 $51\ \text{V}$ 下降至 $46\ \text{V}$; 厚度为 $0.2\ \mu\text{m}$ 时, 击穿电压升高到 $47\ \text{V}$, 随后随着厚度的增加, 击穿电压快速上升。由于倍增层材料为非有意掺杂的本征半导体, 假设整个倍增区域的电场是均匀分布的, 得到器件的增益 M_p 的计算公式:

$$M_p = \frac{1-k}{\exp[-\alpha(1-k)W]-k} \quad (3)$$

式中: W 为倍增层厚度; α 为电子碰撞电离系数; $k=\alpha/\beta$, β 为空穴碰撞电离系数。

当倍增层厚度略有变化时, k 近似为常数。假设偏置电压恒定, 将 M_p 相对于 W 求导后得到:

$$\frac{\partial M_p}{\partial W} = M_p^2 e^{-\alpha(1-k)W} (\alpha + W \frac{\partial \alpha}{\partial W}) \quad (4)$$

负的变 ∂M_p 意味着增益降低, 同样的增益需要更高的电压, 这意味着击穿电压的增加, 且当倍增层厚度变化率 ∂W 为正时, $\partial \alpha$ 为负。因此, 将击穿电压处于最小值时的倍增层厚度设为 W_0 , 在 $W < W_0$ 时, 电子碰撞电离系数 α 远大于 W , 则 $(\alpha + W \partial \alpha / \partial W) > 0$, 这时击穿电压随着倍增层厚度的增加而减小。同时由于 W 对式 (4) 在指数项上的影响, 击穿电压曲线的斜率很大。当倍增层厚度 $W > W_0$, 继续增大时, α 相对变小, 当 $(\alpha + W \partial \alpha / \partial W) < 0$ 时, 击穿电压随着倍增层厚度的增加同时上升。从图 6 中可以发现, 当击穿电压下降时, 倍增层厚度仅为 $0.05\ \mu\text{m} \sim 1\ \mu\text{m}$ 左右, 此时的较薄倍增层可能与电荷层的作用相同, 调节了器件内部的电场。

图 7 为不同倍增层厚度与内部电场分布的关系图。穿透电压与倍增层厚度呈正比例关系, 从 $0.05\ \mu\text{m}$ 时的 $3\ \text{V}$ 随着厚度变化线性增加到了 $2\ \mu\text{m}$ 时的 $24\ \text{V}$; 在偏置电压保持不变时, 器件内部的电场分布与倍增层的厚度有紧密关联, 作为高阻区的 I 型倍增层厚度增加, 使大部分偏压分担降落在倍增层中, 降低了吸收层及器件整体的电场强

度。同时耗尽层基本处于倍增层内, 需要更大的偏置电压才能使吸收层完全耗尽。综上所述, 通过增大倍增层厚度来调节器件内部电场, 得到适当的击穿与穿通电压, 提升载流子在倍增层中碰撞电离的几率, 从而提高器件的倍增因子。因此, $3\ \mu\text{m}$ 是 I 型倍增层厚度的最佳选择。

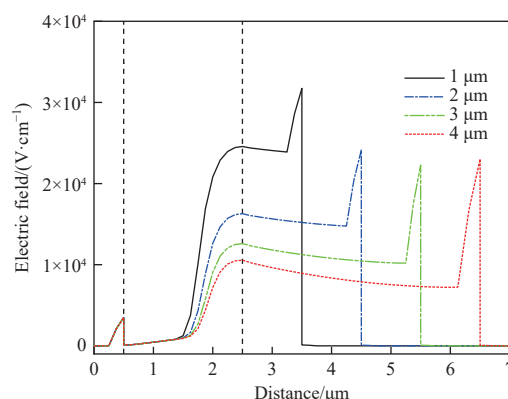


图 7 不同倍增层厚度与内部电场分布的关系

Fig. 7 Relationship between different multiplier layer thicknesses and internal electric field distribution

3 结论

本文借助半导体器件仿真工具 Silvaco-TACD, 利用其 ATLAS 模块设计出一种异质结构 InSb-APD 红外探测器, 并详细讨论了器件 I 型倍增层的残余掺杂浓度、厚度对异质结构 InSb-APD 红外探测器的影响。研究表明, I 型倍增层掺杂浓度在 $1 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ 时, 内建电场趋于均匀, 有利于雪崩过程, 且抑制了器件隧穿效应的发生; 同时, 当器件 I 型倍增层的厚度为 $3\ \mu\text{m}$ 时, 可极大提升载流子在倍增层中的碰撞电离几率, 进而提高器件的倍增因子。

参考文献:

- [1] LIU C, YE H F, SHI Y L. Advances in near-infrared avalanche diode single-photon detectors[J]. *Chip*, 2022, 1(1): 100005.
- [2] BENEDIKOVIC D, VIROT L, AUBIN G, et al. Silicon-germanium avalanche receivers with fJ/bit energy consumption[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(2): 1-8.
- [3] WANG B H, HUANG Z H, SORIN W V, et al. A low-voltage Si-Ge avalanche photodiode for high-speed and

- energy efficient silicon photonic links[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(12): 3156-3163.
- [4] SRINIVASAN S A, LAMBRECHT J, GUERMANDI D, et al. 56 Gb/s NRZ O-band hybrid BiCMOS-silicon photonics receiver using Ge/Si avalanche photodiode[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(5): 1409-1415.
- [5] YAMAMOTO Y, OSHITA M, SAITO S, et al. Near-infrared spectroscopic gas detection using a surface plasmon resonance photodetector with 20 nm resolution[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2021, 4(12): 13405-13412.
- [6] HAKKEL K D, PETRUZZELLA M, OU F, et al. Integrated near-infrared spectral sensing[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 103.
- [7] LIU D Q, LI T T, TANG B, et al. A near-infrared CMOS silicon avalanche photodetector with ultra-low temperature coefficient of breakdown voltage[J]. *Micromachines*, 2021, 13(1): 47.
- [8] 萧生, 叶伟, 边宁涛, 等. 异质结构InSb-APD中波红外探测器的设计与表征[J]. *激光与红外*, 2021, 51(7): 888-896.
- XIAO Sheng, YE Wei, BIAN Ningtao, et al. Design and characterization of mid-wave infrared heterostructure InSb APD detector[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(7): 888-896.
- [9] 司俊杰. 基于InSb的新型红外探测器材料(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(1): 20210811.
- SI Junjie. Novel InSb-based infrared detector materials (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210811.
- [10] 彭永达, 贾新亮, 王超, 等. SAM结构雪崩光电二极管的工艺仿真与特性研究[J]. *电子技术*, 2018, 47(5): 16-18.
- PENG Yongda, JIA Xinliang, WANG Chao, et al. The study of process realization and characteristics for avalanche photodiode with SAM structure[J]. *Electronic Technology*, 2018, 47(5): 16-18.
- [11] GU Y, TAN M, WU Y, et al. InAlAs/InGaAs avalanche photodiodes with optimized multiplication layers (in English)[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, 40(6): 715-720.
- [12] 王航, 袁正兵, 谭明, 等. 倍增层厚度对In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP雪崩二极管器件特性的影响[J]. *光学学报*, 2020, 40(18): 1804001.
- WANG Hang, YUAN Zhengbing, TAN Ming, et al. Effect of multiplication layer thickness on device properties of In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP avalanche photodiode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1804001.
- [13] 叶伟, 杜鹏飞, 萧生, 等. InAlAs浓度对In_{0.83}Al_{0.17}As/In_{0.83}Ga_{0.17}As红外探测器特性的影响[J]. *应用光学*, 2022, 43(2): 317-324.
- YE Wei, DU Pengfei, XIAO Sheng, et al. Influence of InAlAs concentration on In_{0.83}Al_{0.17}As/In_{0.83}Ga_{0.17}As infrared detector characteristics[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(2): 317-324.
- [14] CAO Y, BLAIN T, TAYLOR-MEW J D, et al. Extremely low excess noise avalanche photodiode with GaAsSb absorption region and AlGaAsSb avalanche region[J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 122(5): 051103.
- [15] XIE H Q, PENG Y D, LI J Y, et al. Lateral separate absorption multibuffer multiplication avalanche photodiode based on SOI film[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(7): 3003-3006.
- [16] LI J K, DEHZANGI A, BROWN G, et al. Mid-wavelength infrared avalanche photodetector with AlAsSb/GaSb superlattice[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 7104.
- [17] JIANG Y, CHEN J. Optimization of the linearity of InGaAs/InAlAs SAGCM APDs[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(14): 3459-3464.
- [18] 王傲霜, 肖清泉, 陈豪, 等. Mg₂Si/Si雪崩光电二极管的设计与模拟[J]. *物理学报*, 2021, 70(10): 337-345.
- WANG Aoshuang, XIAO Qingquan, CHEN Hao, et al. Design and simulation of Mg₂Si/Si avalanche photodiode[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(10): 337-345.
- [19] WANG Y D, CHEN J, XU J T, et al. Modeling of frequency-dependent negative differential capacitance in InGaAs/InP photodiode[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 89: 41-45.