



## Mg<sub>2</sub>Si/Si雪崩光电二极管的设计与模拟

王傲霜 肖清泉 陈豪 何安娜 秦铭哲 谢泉

### Design and simulation of Mg<sub>2</sub>Si/Si avalanche photodiode

Wang Ao-Shuang Xiao Qing-Quan Chen Hao He An-Na Qin Ming-Zhe Xie Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 108501 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201923

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201923>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

H对Mg<sub>2</sub>Si力学性能影响的第一性原理研究

Effect of H on elastic properties of Mg<sub>2</sub>Si by the first principles calculation

物理学报. 2019, 68(17): 177102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190368>

毛细管放电类氩氙69.8 nm激光增益特性研究

Characteristics of gain in Ne-like Ar 69.8 nm laser pumped by capillary discharge

物理学报. 2017, 66(15): 155201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.155201>

高时间稳定性的雪崩光电二极管单光子探测器

Avalanche photodiode single-photon detector with high time stability

物理学报. 2020, 69(7): 074204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191875>

Mg<sub>2</sub>Si<sub>0.3</sub>Sn<sub>0.7</sub>掺杂Ag和Li的热电性能对比

Comparative study of thermoelectric properties of Mg<sub>2</sub>Si<sub>0.3</sub>Sn<sub>0.7</sub> doped by Ag or Li

物理学报. 2019, 68(11): 117201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190247>

CsI光阴极在10100 keV X射线能区的响应灵敏度计算

Calculation of CsI photocathode spectral response in 10–100 keV X-ray energy region

物理学报. 2018, 67(8): 085203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180029>

钙钛矿/硅叠层太阳能电池中平面a-Si:H/c-Si异质结底电池的钝化优化及性能提高

Passivation optimization and performance improvement of planar a-Si:H/c-Si heterojunction cells in perovskite/silicon tandem solar cells

物理学报. 2019, 68(2): 028101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181759>

# Mg<sub>2</sub>Si/Si 雪崩光电二极管的设计与模拟\*

王傲霜 肖清泉<sup>†</sup> 陈豪 何安娜 秦铭哲 谢泉

(贵州大学大数据与信息工程学院, 新型光电子材料与技术研究所, 贵阳 550025)

(2020年11月16日收到; 2020年12月17日收到修改稿)

Mg<sub>2</sub>Si 作为一种天然丰富的环保材料, 在近红外波段吸收系数高, 应用于光电二极管中对替代市面上普遍使用的含有毒元素的红外探测器具有重要意义. 采用 Silvaco 软件中 Atlas 模块构建出以 Mg<sub>2</sub>Si 为吸收层的吸收层、电荷层和倍增层分离结构 Mg<sub>2</sub>Si/Si 雪崩光电二极管, 研究了电荷层和倍增层的厚度以及掺杂浓度对雪崩光电二极管的内部电场分布、穿通电压、击穿电压、*C-V*特性和瞬态响应的影响, 分析了偏置电压对 *I-V*特性和光谱响应的影响, 得到了雪崩光电二极管初步优化后的穿通电压、击穿电压、暗电流密度、增益系数 ( $M_n$ ) 和雪崩效应后对器件电流的放大倍数 ( $M$ ). 当入射光波长为 1.31  $\mu\text{m}$ , 光功率为 0.01  $\text{W}/\text{cm}^2$  时, 光电二极管的穿通电压为 17.5 V, 击穿电压为 50 V, 在外加偏压为 47.5 V (0.95 倍击穿电压) 下, 器件的光谱响应在波长为 1.1  $\mu\text{m}$  处取得峰值 25  $\text{A}/\text{W}$ , 暗电流密度约为  $3.6 \times 10^{-5} \text{ A}/\text{cm}^2$ ,  $M_n$  为 19.6, 且  $M_n$  在器件击穿时有最大值为 102,  $M$  为 75.4. 根据模拟计算结果, 优化了器件结构参数, 为高性能的器件结构设计和实验制备提供理论指导.

**关键词:** SACM-APD, Mg<sub>2</sub>Si/Si 异质结, 光谱响应, 增益系数**PACS:** 85.30.-z, 73.40.Lq, 85.60.Gz, 42.60.Lh**DOI:** 10.7498/aps.70.20201923

## 1 引言

市面上的红外光电探测器普遍使用了铟镓砷 (InGaAs)<sup>[1]</sup>、碲镉汞 (HgCdTe)<sup>[2,3]</sup> 材料, 这些原材料具有吸收系数高、带隙可调、增益系数高和电子迁移率高等优点<sup>[3,4]</sup>, 但其含量在地壳中不多, 并且均含有重金属元素, 将其大量应用于红外光电探测器将会出现原材料匮乏, 且对环境造成的污染也不容忽视<sup>[5,6]</sup>, 因此寻找其他合适的材料制备红外器件已成为解决上述问题的关键<sup>[7]</sup>.

Mg<sub>2</sub>Si 是红外光电探测器最理想的原材料之一, 具有天然丰富、环境友好、载流子迁移率高、在近红外波段光吸收系数高<sup>[8,9]</sup>、与 Si 的晶格失配小 ( $< 5\%$ )<sup>[10,11]</sup>、与成熟的 Si 工艺兼容<sup>[12]</sup>、与 n 型

Si 有良好的欧姆接触<sup>[13]</sup>、高纯的单晶 Mg<sub>2</sub>Si 是 n 型半导体<sup>[10]</sup> 而掺杂银或铜后能成为 p 型半导体<sup>[14]</sup> 等优点. 但目前对 Mg<sub>2</sub>Si 用于光电子器件的文献报导不多, 大多数研究组都是对其基本性质进行研究. Udono 等<sup>[15]</sup> 和 El-Amir 等<sup>[16]</sup> 先后通过热扩散制作了 Mg<sub>2</sub>Si 光电二极管, 表明其具有良好的整流特性, 在波长为 0.95—1.8  $\mu\text{m}$  范围内有良好的光谱响应, 在零偏压下, 波长为 1.4  $\mu\text{m}$  处光谱响应达到峰值为 0.014  $\text{A}/\text{W}$ , 展示了其作为红外光电探测器的应用前景, 对替代市面上含有毒元素的红外光电探测器具有重要研究意义.

为了开发基于 Mg<sub>2</sub>Si 薄膜的红外探测器, 此前我们研究组已经围绕 Mg<sub>2</sub>Si/Si 异质结光电二极管设计了 pn 型和 pin 型的器件模型<sup>[17]</sup>, 所模拟的 pin 型器件要优于 pn 型器件, 光谱响应峰值为

\* 贵州省留学回国人员科技活动择优资助项目 (批准号: [2018]09)、贵州省高层次创新型人才培养项目 (批准号: [2015]4015) 和贵州省研究生科研基金 (批准号: [2020]035) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: qqxiao@gzu.edu.cn

0.742 A/W, 但暗电流密度略大, 约为  $1 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>. 而研究发现雪崩光电二极管 (APD) 具有高增益、宽带宽、响应快等 [18,19] 诸多优点, Nishida等 [20] 将吸收层和倍增层分离而提出的吸收层、电荷层和倍增层分离 (SACM) 结构成为当前 APD 普遍所采用的结构. 因此本文考虑到 Mg<sub>2</sub>Si/Si 异质生长的晶格失配度, 在保证 Mg<sub>2</sub>Si/Si 异质结能良好生长的前提下, 采用 Silvaco 软件中 Atlas 模块构建出以 Mg<sub>2</sub>Si 为吸收层的 Mg<sub>2</sub>Si/Si SACM-APD, 为高性能的器件制备提供指导, 降低器件研制经费, 提高器件性能, 使高性能 Mg<sub>2</sub>Si 红外探测器件的制备成为可能, 从而解决红外探测器原材料匮乏及不环保的问题.

## 2 SACM-APD 的结构设计

理论模型采用 Silvaco 中的 Atlas 模块对 Mg<sub>2</sub>Si/Si 异质结 SACM-APD 的结构进行设计. Nishida 等 [20] 将吸收层和倍增层分离而提出的 SACM 型结构成为当前 APD 普遍所采用的结构, 此结构可以通过调节电荷层的结构参数来调节器件内部场强. 本文设计的 SACM-APD 如图 1 所示, 器件衬底采用重掺杂 n 型 Si, 衬底上生长一层 n 型 Si 作为缓冲层, 接着是弱 p 型掺杂的 Si 作为倍增层, 较高掺杂的 p 型 Si 电荷层位于倍增层与 Mg<sub>2</sub>Si 吸收层之间, 以调节器件内部电场分布, 最后采用较薄且掺杂浓度高的 p 型 Mg<sub>2</sub>Si 薄膜作为接触层. 为形成欧姆接触, n 型 Si 衬底通常需要高的掺杂浓度 [12].

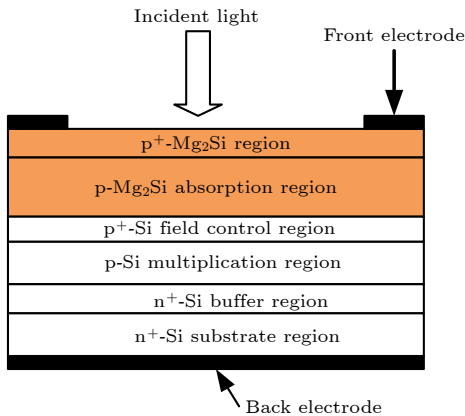


图 1 SACM-APD 结构示意图  
Fig. 1. Schematic diagram of SACM-APD.

图 2 为 Mg<sub>2</sub>Si/Si SACM-APD 的能带结构示意图, 图中建立一维的坐标系, p-Mg<sub>2</sub>Si 接触层顶

位置设为坐标原点,  $W_p$ ,  $W_a$ ,  $W_c$ ,  $W_m$ ,  $W_b$  与  $W_s$  分别为器件接触层、吸收层、电荷层、倍增层、缓冲层和衬底的厚度, 参数见表 1.

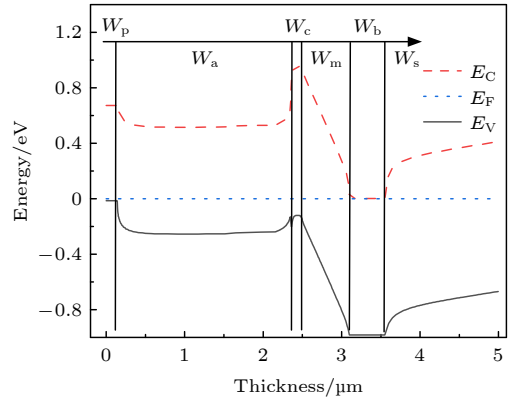


图 2 APD 的能带结构图  
Fig. 2. Energy band structure diagram of the APD.

表 1 APD 的结构参数  
Table 1. Structural parameters of the APD.

层名	符号	厚度/μm	符号	浓度掺杂/ $\times 10^{16}$ cm <sup>-3</sup>
金属电极层	—	0.1	—	0
Mg <sub>2</sub> Si 接触层	$W_p$	0.15	$N_p$	500
Mg <sub>2</sub> Si 吸收层	$W_a$	0.6—4	$N_a$	0.1
Si 电荷层	$W_c$	0.1—0.3	$N_c$	6—14
Si 倍增层	$W_m$	1	$N_m$	0.01—1
Si 缓冲层	$W_b$	0.5	$N_b$	100
Si 衬底	$W_s$	3.5	$N_s$	1000

物理模型中的材料参数均来自最近的文献 [9, 15, 21, 22] 与本研究组的测试结果, 表 2 为 Mg<sub>2</sub>Si 与 c-Si 的一些基础的材料参数.

表 2 模拟计算中采用的各层基本参数  
Table 2. The parameters of different layers in the simulation.

参数	Mg <sub>2</sub> Si	c-Si [21]
相对介电常数	20 [21]	11.9
电子迁移率/(cm <sup>2</sup> ·V <sup>-1</sup> ·S <sup>-1</sup> )	550 [21]	1350
空穴迁移率/(cm <sup>2</sup> ·V <sup>-1</sup> ·S <sup>-1</sup> )	70 [15]	500
材料带隙/eV	0.77 [9,21]	1.12
导带有效态密度/cm <sup>-3</sup>	$7.8 \times 10^{18}$	$2.8 \times 10^{19}$
价带有效态密度/cm <sup>-3</sup>	$2.06 \times 10^{19}$	$1.04 \times 10^{19}$
电子亲和力/eV	4.37 [21,22]	4.05

对于光电器件的模拟, 为了使仿真结果更接近实际, 材料表面折射率情况被考虑到, 吸收系数是光电器件模拟中重要的参数, 对光生载流子的产生

率以及光生电流起着主导的作用, 文中  $\text{Mg}_2\text{Si}$ <sup>[9]</sup> 与  $\text{c-Si}$ <sup>[23]</sup> 中的吸收系数与折射率均来自于近期文献中实验测量到的, 如图 3 所示.

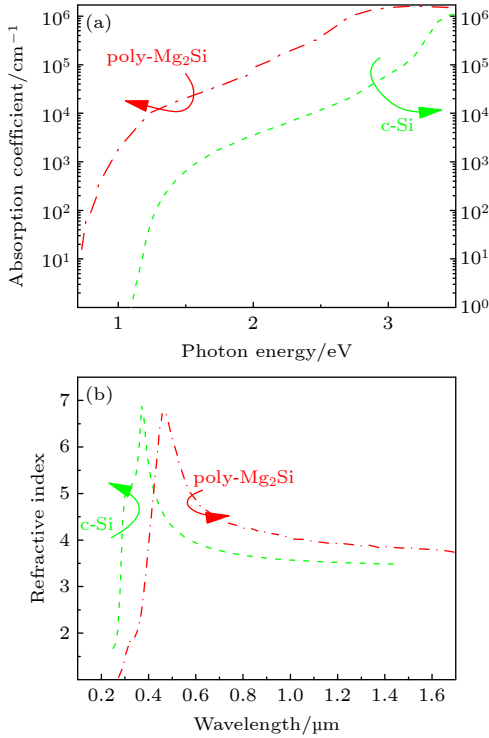


图 3  $\text{Mg}_2\text{Si}$  与  $\text{c-Si}$  的光学特性 (a)  $\text{Mg}_2\text{Si}$  与  $\text{c-Si}$  的吸收系数 ( $\text{cm}^{-1}$ ) 与入射能量的关系; (b)  $\text{Mg}_2\text{Si}$  与  $\text{c-Si}$  的折射率与波长的关系  
Fig. 3. Optical properties of  $\text{Mg}_2\text{Si}$  and  $\text{c-Si}$ : (a) Absorption coefficient ( $\text{cm}^{-1}$ ) of the poly- $\text{Mg}_2\text{Si}$  and  $\text{c-Si}$ ; (b) refractive Index of the poly- $\text{Mg}_2\text{Si}$  and  $\text{c-Si}$ .

### 3 $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}$ SACM-APD 的性能仿真与分析

#### 3.1 内部电场与载流子分布

图 4(a) 给出了  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}$  SACM-APD 在电荷层厚度为  $0.1 \mu\text{m}$  时随外加电压升高的内部电场分布图. 由图 4(a) 可知, 当电荷层太薄时, 对器件的倍增层与吸收层的场强分布调控能力不足, 倍增层电场将会延伸至吸收层中, 即无法使倍增层与吸收层完全分离开来, 会使雪崩倍增效应在吸收层中加剧, 器件的隧穿电流增大, 影响器件性能. 如图 4(b) 所示, 当电荷层厚度增加为  $0.2 \mu\text{m}$  时, 吸收层与倍增层分离开来, 使雪崩效应主要在倍增层中产生, 光生载流子的产生则几乎在吸收层中, 这种情况下将能显著地降低器件的暗电流, 因此电荷层厚度设置不应太薄.

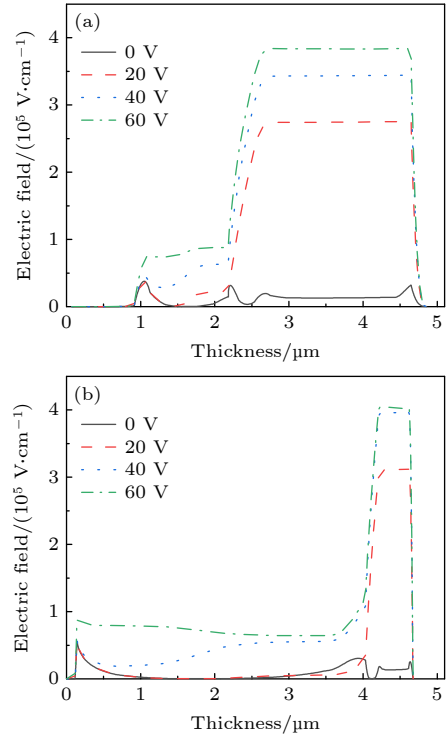


图 4 (a) 电荷层厚度为  $0.1 \mu\text{m}$  时器件的电场分布; (b) 电荷层厚度为  $0.2 \mu\text{m}$  时器件的电场分布  
Fig. 4. (a) Electric field distribution of the device with charge layer thickness of  $0.1 \mu\text{m}$ ; (b) electric field distribution of the device with charge layer thickness of  $0.2 \mu\text{m}$ .

图 5 揭示了不同外加偏压下的器件内部的载流子生成率, 由图 5 可知, 在偏压小于  $20 \text{ V}$  时, 器件内部载流子生成率几乎只发生在倍增层中, 对应的此时暗电流增加较为平稳. 但当偏压为  $40 \text{ V}$  时, 倍增层中的载流子生成率上升了两个数量级, 部分耗尽区中也存在载流子生成, 此时器件处于穿透状态. 当偏压增大至  $60 \text{ V}$  时, 倍增层中载流子生成率达到  $10^{26} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}$  数量级, 电流快速增加, 器件已处于雪崩击穿状态.

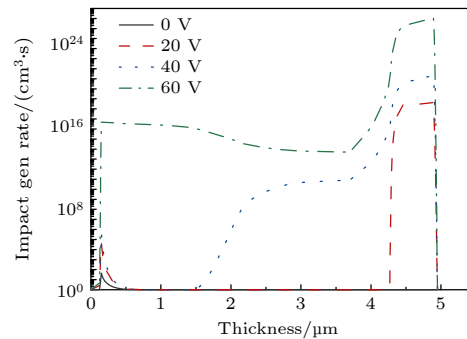


图 5  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}$  SACM-APD 器件在不同偏压下内部的载流子生成率  
Fig. 5. The influence of the different Bias voltage on the carrier generation rate.

图 6 为在外加偏压为 40 V 时, 倍增层不同掺杂浓度下倍增层的电场分布关系, 在掺杂浓度为  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , 其内部电场分布均匀, 当掺杂浓度继续增加至  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  时, 整体的电场强度增加有限, 其分布呈现出较小程度的倾斜, 继续增高掺杂浓度, 倍增层整体电场强度上升很快, 且不均匀程度加剧, 此时会导致器件产生较大的暗电流, 降低器件的增益系数. 所以在器件制备中, 为保证倍增区的电场相对稳定, 倍增层的掺杂浓度一般不宜超过  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . 另一方面接触层采用重掺杂方式, 可提高内部整体电场, 使得吸收层电场起伏变小.

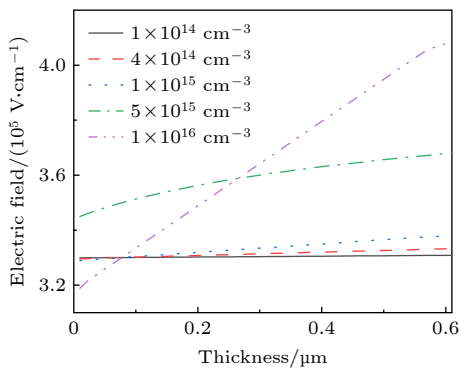


图 6 倍增层不同掺杂浓度时倍增层的电场分布  
Fig. 6. Electric field distribution of the multiplier layer under different doping concentrations.

### 3.2 穿通电压与击穿电压

穿通电压<sup>[20]</sup>和击穿电压均会受到 APD 结构参数的影响, 如各层掺杂浓度、厚度等. 在模拟中, 设置这些参数为变量以获得穿通电压和击穿电压的变化趋势, 对后续工艺设计具有至关重要的作用.

如图 7 所示, 图中上半部分呈下降趋势的四条曲线  $V_b$  为不同电荷层厚度的击穿电压, 下半部分呈上升趋势的四条曲线  $V_p$  为不同电荷层厚度下的穿通电压. 若电荷层厚度一定时, 当其掺杂浓度升高, 穿通电压呈线性上升趋势, 而击穿电压呈线性下降趋势, 且下降趋势较为明显. 当电荷层厚度为  $0.1 \mu\text{m}$  时, 穿通电压随掺杂浓度的变化趋势为  $1.2 \text{ V}/2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 击穿电压随掺杂浓度的变化趋势  $4 \text{ V}/2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 击穿电压和穿通电压之差  $\Delta(V_b - V_p)$  随掺杂浓度升高而降低, 在掺杂浓度为  $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  时, 有最大值  $64 \text{ V}$ . 当厚度增加至  $0.25 \mu\text{m}$  时, 穿通电压随掺杂浓度的变化趋势

为  $2 \text{ V}/2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 击穿电压随掺杂浓度的变化趋势  $15 \text{ V}/2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 在掺杂浓度为  $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  时,  $\Delta(V_b - V_p)$  有最大值  $37 \text{ V}$ . 在设计雪崩光电二极管的结构参数时, 如果电荷层厚度设计的较薄且掺杂浓度较低, 在小偏压情况下, 器件中的吸收层会产生耗尽, 器件提前处于穿通状态. 同时电荷层对器件中倍增层的电场调控作用力度较弱, 需要外加极大的偏压才能使倍增层中形成足够大的电场产生雪崩倍增效应, 这都极大地影响器件的性能. 若选用较厚且高掺杂的电荷层时, 此时电荷层对器件倍增层与吸收层电场调控作用较强, 会使倍增层中的电场加强, 吸收层中的电场削弱, 此时需要较大的外加电压才能使器件处于穿通状态, 但需要不大的外加电压就会使器件处于击穿状态. 例如当电荷层厚度为  $0.25 \mu\text{m}$ 、掺杂浓度为  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\Delta(V_b - V_p)$  仅为  $3 \text{ V}$ , 若再增加电荷层厚度与掺杂浓度时, 会导致器件中耗尽区尚未完全耗尽时就已处于击穿状态, 在器件制备过程中应极力避免此情况, 电荷层的设计要结合实际进行综合考虑.

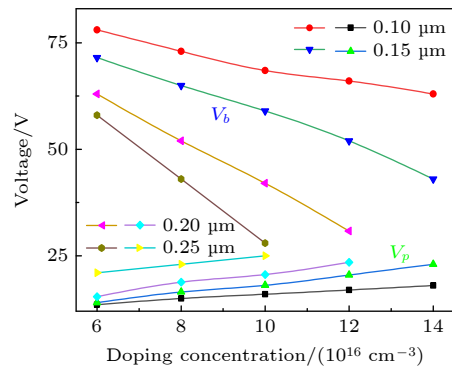


图 7 电荷层厚度、掺杂浓度与击穿电压和穿通电压之间的关系  
Fig. 7. The relation between the thickness and doping concentration of charge layer and the breakdown voltage, the punch-through voltage.

当电荷层掺杂浓度为  $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、厚度为  $0.2 \mu\text{m}$  时, 图 8 揭示了倍增层厚度  $w_m$  的增加对 APD 穿通电压与击穿电压的影响. 如图 8 所示, 击穿电压随  $w_m$  的增大出现先减小后增大的现象,  $w_m$  从  $0.2$  到  $0.6 \mu\text{m}$  时总体呈下降趋势, 在  $0.6$  到  $1.2 \mu\text{m}$  时呈上升趋势, 在  $0.6 \mu\text{m}$  时  $V_b$  取得最小值  $53 \text{ V}$ , 且总体呈现非线性变化规律, 而穿通电压呈线性增加, 上述变化趋势可由 APD 的增益系数公式<sup>[24]</sup>来

解释. 若倍增区厚度太薄, 会产生较大的击穿电压与很小的穿通电压. 因此在实际制作中可适当提高倍增层厚度, 提升载流子在倍增层中碰撞电离的几率, 提高器件的增益系数.

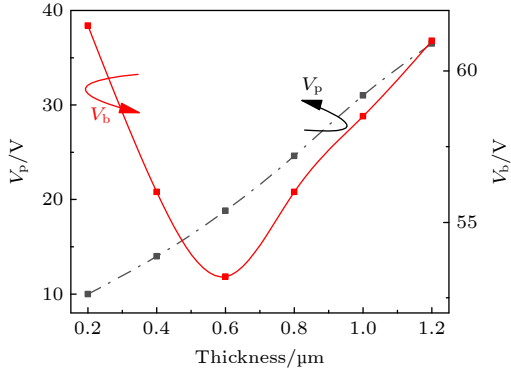


图 8 不同倍增层厚度时的击穿电压与穿通电压

Fig. 8. Breakdown voltage and penetration voltage at different thicknesses of the multiplier layer.

图 9 揭示了雪崩光电二极管中的倍增层不同掺杂浓度对器件的击穿电压与穿通电压的影响. 当倍增层掺杂浓度升高, 击穿电压逐渐下降, 且下降趋势微弱, 掺杂浓度从  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  上升至  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  时, 击穿电压仅从 56 V 下降至 53 V, 穿通电压则几乎没变.

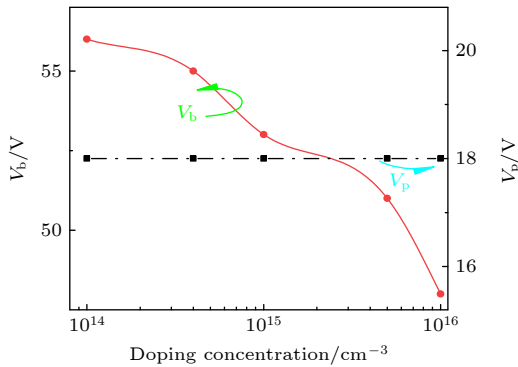


图 9 倍增层不同掺杂浓度与穿通电压和击穿电压关系

Fig. 9. Breakdown voltage and penetration voltage at different doping concentration of the multiplier layer.

### 3.3 I-V 特性与光谱响应

APD 的内部增益机制一般为雪崩倍增, 本工作中的电子在高电场作用下的倍增层碰撞电离的几率是随机的, 因此倍增后生成的电流分布不均匀, 雪崩光电二极管产生一个附加噪音机制, 称为倍增噪音, 是雪崩光电二极管主要的噪音来源. Si 中电子的碰撞电离系数比空穴高, 因此采用电子

作为雪崩光电二极管的倍增机制. 一般由电子倍增产生的噪音  $F_n$  为<sup>[25]</sup>

$$F_n = M_n \left[ 1 - (1 - k) \left( \frac{M_n - 1}{M_n} \right)^2 \right], \quad (1)$$

其中  $k$  代表倍增区域内有效空穴与电子的离子化系数的比值;  $M_n$  为增益系数, 是 APD 中最基本的参数之一. 增益系数一般定义为光照下产生的电流  $I_P$  减去黑暗下的暗电流  $I_D$  之差与有效光电流  $I_A$  之比. 在计算过程中一般如下公式:

$$M_n = (I_P - I_D) / I_A. \quad (2)$$

如图 10 所示, 黑色曲线与红色曲线分别代表雪崩光电二极管在黑暗与光照下 ( $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ , 光功率 =  $0.01 \text{ W/cm}^2$ ) 下的  $I$ - $V$  曲线. APD 在偏压为 12 V 左右耗尽区开始逐渐向  $\text{Mg}_2\text{Si}$  吸收层扩散, 提升了入射光被  $\text{Mg}_2\text{Si}$  薄膜层吸收形成光生载流子的几率, 耗尽区的场强分布提高, 自由载流子越过吸收层与电荷层到达倍增层的概率升高, 暗电流会有较大幅度的提升. 当偏压为 18 V 左右时吸收层被完全耗尽, 器件处于穿通状态. 随着偏压的继续增大, 此时耗尽区会向 p 区与 n 区延伸, 倍增层雪崩效应开始显现, 此时器件的电流增加较为平缓. 在 50 V 左右时, 器件倍增层中的电子在高电场情况下雪崩碰撞离化明显, 暗电流与光电流几乎呈指数增长, 发生击穿. 当器件工作处于线性模式下 ( $V_p < V < V_b$ ),  $M_n$  从 0.75 增加至最大值 102, 电压为  $0.95 V_b$  时的  $M_n$  为 19.6, 与传统的 Si 基雪崩光电二极管接近. 此时器件的暗电流密度为  $3.6 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ , 该  $\text{Mg}_2\text{Si/Si}$  SACM-APD 与 pn 型和 pin 型  $\text{Mg}_2\text{Si/Si}$  光电二极管相比, 具有略大的暗电流密度<sup>[17]</sup>, 与目前国际上商用的红外探测器性能对比见表 3, 在器件制备时, 要注意严格控制各层的参数从而控制暗电流密度.

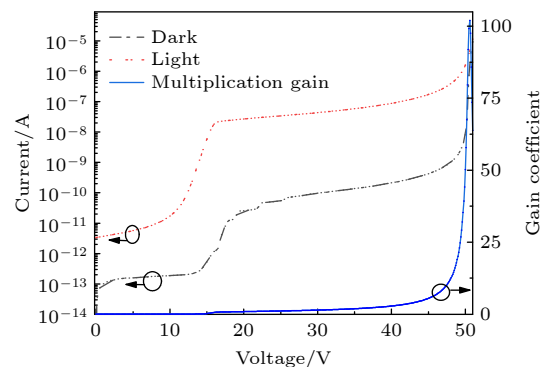


图 10 APD 的  $I$ - $V$  特性与增益系数

Fig. 10.  $I$ - $V$  characteristics and gain coefficient of APD.

表 3 模拟结果与目前国际水平对比

Table 3. Comparison of simulation results with current international level.

材料	暗电流密度/(A·cm <sup>-2</sup> )	光谱响应/(A·W <sup>-1</sup> )
InGaAs	$5 \times 10^{-4}$ [26]	1.2[26]
InGaAs/InP	$7 \times 10^{-10}$ [26]	—
HgCdTe/CdTe/Si	0.007[26]	—
HgCdTe/CdZnTe	$2.7 \times 10^{-5}$ [27]	1.45[27]
Mg <sub>2</sub> Si	0.04[14,16]	0.014[14,16]
Mg <sub>2</sub> Si/Si-pn	$6 \times 10^{-7}$ [17]	0.32[17]
Mg <sub>2</sub> Si/Si-pin	$1 \times 10^{-6}$ [17]	0.742[17]
Mg <sub>2</sub> Si/Si-SACM	$3.6 \times 10^{-5}$	25

图 11 为外加偏置电压对 APD 光谱响应的影响, 由图可知器件的光谱响应波长能扩展至 1.6 μm, 因此选用 Mg<sub>2</sub>Si 作为吸收层能有效地扩展 Si 基 APD 的光谱响应波段. 在 47.5 V(0.95 V<sub>b</sub>) 偏压下, 波长为 1.1 μm 时光谱响应达到峰值, 为 25 A/W, 在 1.31 μm 处也有较高的响应度, 所以此 APD 可适用于光通信等光电设备领域中. 总体而言, 随着偏置电压的增大, APD 的光谱响应不断增强, 但其随波长的变化趋势保持了较好的一致性. 越接近击穿电压, 增强的幅度越大. 当在偏压为 17.5 V 时, APD 的吸收层被完全耗尽, 器件被穿通, 此时倍增效应还未产生, 因此选取 17.5 V 为器件的穿通电压.

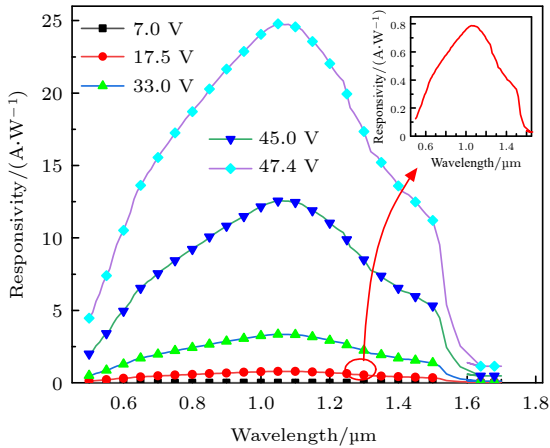


图 11 不同的偏置电压对 APD 光谱响应的影响

Fig. 11. Effect of different bias voltages on the spectral response of APD.

若设  $I_{MP}$  与  $I_{MD}$  分别是雪崩倍增效应后的光电流与暗电流,  $I_P$  与  $I_D$  是未发生雪崩倍增效应的光电流与暗电流, 仿真计算时取器件穿通前光电流与暗电流之差的平均值代表倍增效应前的电流, 两者之

比  $M$  如下式所示:

$$M = (I_{MP} - I_{MD}) / (I_P - I_D). \quad (3)$$

上式中  $M$  可表示雪崩效应后对电流的放大倍数. 通过先前的工作确定 17.5 V 为器件的穿通电压, 取 17.5 V 以前光电流与暗电流之差的平均电流为倍增前的电流, 17.5 V 以后为倍增后的电流. 如图 10 所示,  $M$  在偏压大于 46 V 时迅速增加, 在 50.8 V 时有最大值 1660. 若取  $I_{MP}$  与  $I_{MD}$  之差的平均电流为倍增后的电流, 经计算此时  $M$  为 75.4, 证明该结构对电流的增益效果较好.

### 3.4 器件的 $C-V$ 特性与开关特性

图 12 为 APD 在频率为 1 MHz 下的  $C-V$  仿真曲线随倍增层厚度的变化. 当外加偏压一定时, 随着倍增层厚度的增加, 器件电容减小. 当厚度一定时, 随着外加偏压的减小, 器件电容增大. 从理论上分析时, APD 中由于电极与衬底介电性产生的电容和管壳电容是由器件工艺来决定的, 在这里不做讨论, 只考虑结电容  $C_j$ , 可等效为 pn 结处理, 如果外部交流小信号频率很高时, 电容  $C_j$  以耗尽电容  $C_\tau$  为主, 可忽略  $C_d$ [28], 当外加交流偏置电压  $V$  时得到  $C_j$  关系式为 [28,29]

$$C_j = C_\tau + C_d = \frac{\epsilon_o \epsilon_r}{w} + q \frac{dn_\varphi}{dv},$$

$$w = [2\epsilon_j(V_D - V)/qN_D]^{1/2},$$

$$V_D = \frac{KT}{q} \ln(N_A N_D). \quad (4)$$

由 (4) 式可推知, 当倍增层厚度和偏置电压变大时, 耗尽层宽度会相应展宽, 器件电容减小, 与

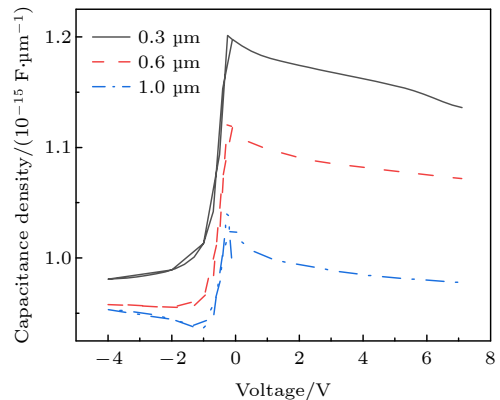


图 12 倍增层厚度对器件电容的影响

Fig. 12. The influence of the thickness of multiplication layer on the capacitance of the device.

模拟变化结果相一致. 探测器带宽与  $RC$  关系是呈负相关<sup>[25]</sup>:

$$f_{RC} = 1/2\pi RC. \quad (5)$$

根据 (5) 式可知合理降低器件电容是有必要的. 当倍增区厚度为  $1 \mu\text{m}$  时, 在  $5 \text{ V}$  偏置电压下, 器件电容密度约为  $1 \times 10^{-15} \text{ F}/\mu\text{m}$ .

图 13 为不同倍增层厚度时器件的瞬态响应曲线, 增加倍增层厚度, 对器件的响应时间影响微弱, 但器件的稳态光电流却是先减小后增大, 可能是因为倍增层厚度的增加会调控器件内部场强分布, 使击穿电压出现先降低后升高的趋势. 本例中得到的瞬态响应曲线的偏压均为  $37 \text{ V}$ , 因此倍增层厚度的不同导致了不同的稳态光电流.

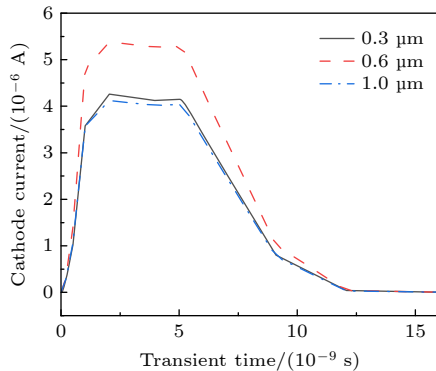


图 13 不同倍增层厚度时器件的瞬态响应

Fig. 13. Transient response of the device for different thickness of the multiplication layer.

## 4 结 论

考虑到  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}$  异质生长的晶格失配度, 建立了  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}$  SACM-APD 模型, 研究了电荷层和倍增层的厚度以及掺杂浓度对雪崩光电二极管的内部电场分布、穿通电压 ( $V_p$ )、击穿电压 ( $V_b$ )、 $C-V$  特性和瞬态响应的影响, 分析了偏置电压对  $I-V$  特性和光谱响应的影响, 得到了  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}$  SACM-APD 初步优化后的  $V_p$ ,  $V_b$ 、暗电流密度、增益系数 ( $M_n$ ) 和雪崩效应后对器件电流的放大倍数 ( $M$ ), 为高性能的器件制备奠定了良好的基础. 根据模拟结果可知: 器件的光谱响应波长能扩展至  $1.6 \mu\text{m}$ , 选用  $\text{Mg}_2\text{Si}$  作为吸收层的 APD 能有效地扩展 Si 基 APD 的光谱响应波段. 随着电荷层厚度与掺杂浓度的升高, 器件的  $V_p$  呈线性上升趋势, 而  $V_b$  呈线性下降趋势, 且下降趋势较为明显, 因

此电荷层能较好地调节器件内部电场分布. 当倍增层掺杂浓度大于  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  后, 倍增层电场分布出现较大程度的不均衡, 会产生较大的暗电流, 因此为保证倍增区的电场相对稳定, 倍增层的掺杂浓度不宜超过  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . 在器件结构参数优化后, SACM-APD 的  $V_p$  为  $17.5 \text{ V}$ ,  $V_b$  为  $50 \text{ V}$ ; 当偏压为  $47.5 \text{ V}$  ( $0.95 V_b$ ) 时, 器件的光谱响应在波长为  $1.1 \mu\text{m}$  时达到峰值  $25 \text{ A/W}$ , 与先前的研究中 pin 型  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}$  光电二极管的光谱响应峰值  $0.742 \text{ A/W}$  相比, 光谱响应得到了很大程度的提高; 暗电流密度约为  $3.6 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ , 该  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}$  SACM-APD 与 pn 型和 pin 型  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}$  光电二极管暗电流密度  $1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$  相比, 暗电流密度略大;  $M_n$  为  $19.6$ , 且  $M_n$  在器件击穿时取得最大值为  $102$ ,  $M$  为  $75.4$ , 器件具有较好的增益效果. 在器件制备过程中, 考虑到  $\text{Mg}_2\text{Si}/\text{Si}$  异质生长的晶格失配度, 界面态密度应控制在  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  以内, 并且可以通过在器件表面加设保护环<sup>[30]</sup> 来提高器件的反向耐压性能.

## 参考文献

- [1] Mo Q Y, Zhao Y L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 072902 (in Chinese) [莫秋燕, 赵彦立 2011 物理学报 **60** 072902]
- [2] Park S M, Grein C H 2019 *J. Electron. Mater.* **48** 8163
- [3] Rogalski A 2005 *Rep. Prog. Phys.* **68** 2267
- [4] Xu S J, Chua S J, Mei T, Wang X C, Zhang X H, Karunasiri G, Fan W J, Wang C H, Jiang J, Wang S, Xie X G 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 3153
- [5] Rogalski A 2002 *Infrared. Phys. Technol.* **43** 187
- [6] Rogalski A 2011 *Infrared. Phys. Technol.* **54** 136
- [7] Hu W D, Li Q, Chen X S, Lu W 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 120701 (in Chinese) [胡伟达, 李庆, 陈效双, 陆卫 2019 物理学报 **68** 120701]
- [8] LaBotz R 1963 *J. Electrochem. Soc.* **110** 127
- [9] Kato T, Sago Y, Fujiwara H 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 063723
- [10] Borisenko V E 2000 *Semiconducting Silicides* (New York: Springer) pp137-179
- [11] Au-Yang M Y, Cohen M L 1969 *Phys. Rev.* **178** 1358
- [12] Liao Y F, Fan M H, Xie Q, Xiao Q Q, Xie J, Yu H, Wang S L, Ma X Y 2018 *Appl. Surf. Sci.* **403** 302
- [13] Janega P L, McCaffrey J, Landheer D, Buchanan M, Denhoff M, Mitchel D 1988 *Appl. Phys. Lett.* **53** 2056
- [14] Udono H, Tajima H, Uchikoshi M, Itakura M 2015 *Jpn. J. Appl. Phys.* **54** 07JB06
- [15] Udono H, Yamanaka Y, Uchikoshi M, Isshiki M 2013 *J. Phys. Chem. Solids.* **74** 311
- [16] El-Amir A A M, Ohsawa T, Nabatame T, Ohia A, Wadaa Y, Nakamura M, Fua K, Shimamura K, Ohashia N 2019 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **91** 222
- [17] Chen H, Xiao Q Q, Xie Q, Wang K, Shi J N, 2019 *Mater. Rep.* **33** 3358 (in Chinese) [陈豪, 肖清泉, 谢泉, 王坤, 史娇娜 2019 材料导报 **33** 3358]

- [18] Forrest S R, Kim O K, Smith R G 1982 *Appl. Phys. Lett.* **41** 95
- [19] Zhang H Y, Wang L L, Wu C Y, Wang Y R, Yang L, Pang H F, Liu Q L, Guo X, Tang K, Zhang Z P, Wu G 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 074204 (in Chinese) [张海燕, 汪琳莉, 吴琛怡, 王煜蓉, 杨雷, 潘海峰, 刘巧莉, 郭霞, 汤凯, 张忠萍, 吴光 2020 物理学报 **69** 074204]
- [20] Nishida K, Taguchi K, Matsumoto Y 1979 *Appl. Phys. Lett.* **35** 251
- [21] Deng Q, Wang Z, Wang S, Shao G D 2017 *Sol. Energy* **158** 654
- [22] Sekino K, Midonoya M, Udono H, Yamada Y Udono H 2011 *Phys. Procedia* **11** 171
- [23] Martin A G 2008 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **92** 1305
- [24] Park C Y, Hyun K, Kang S G, Kim H M 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 3789
- [25] Smetona S, Matukas J, Palenskis V, Olechnovicus M, A. Kaminskas K, Mallard R 2004 *Proceedings of SPIE-Photonics North 2004: Optical Components and Devices* Ottawa, Canada, September 26–29, 2004 p834
- [26] Xie T, Ye X H, Xia H, Li J Z, Zhang S J, Jiang X Y, Deng W J, Wang W J, Li Y Y, Liu W W, Li X, Li T X 2020 *J. Infrared Millim. W.* **39** 0583 (in Chinese) [谢天, 叶新辉, 夏辉, 李菊柱, 张帅君, 姜新洋, 邓伟杰, 王文静, 李玉莹, 刘伟伟, 李翔, 李天信 2020 红外与毫米波学报 **39** 0583]
- [27] Yuan H, Zhang J, Kim J, Meyer C, Laquindanum J, Kimchi J, Lei J 2018 *Proceedings of SPIE -Infrared Sensors, Devices, and Applications VIII* San Diego, United States, August 22–23, 2018 p107660 J-1
- [28] Wang Y D, Chen J, Xu J D, Li X Y 2018 *Infrared Phys. Technol.* **89** 41
- [29] Sze S M, K. Ng K (translated by Geng L, Wu G J) 2008 *Physics of Semiconductor Devices* (3rd Ed.) (Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press) pp514–523 (in Chinese) [施敏, 伍国珏 著 (耿莉, 张瑞智 译) 2008 半导体器件物理 (第3版) (西安: 西安交通大学出版社) 第514—523页]
- [30] Lee M J, Rucker H, Choi W Y 2012 *IEEE Electron Device Lett.* **33** 80

# Design and simulation of Mg<sub>2</sub>Si/Si avalanche photodiode\*

Wang Ao-Shuang   Xiao Qing-Quan<sup>†</sup>   Chen Hao   He An-Na

Qin Ming-Zhe   Xie Quan

(*Institute of Advanced Optoelectronic Materials and Technology, College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China*)

( Received 16 November 2020; revised manuscript received 17 December 2020 )

## Abstract

InGaAs and HgCdTe materials are widely used in short wave infrared photodetectors, which contain heavy metal elements. The massive use of the heavy metal elements naturally results in their scarcity, and the nonnegligible environmental pollution. Searching for other suitable materials for infrared devices becomes a key to solving the above problems. As a kind of abundant and eco-friendly material, Mg<sub>2</sub>Si has a high absorption coefficient in the near-infrared band. Its application in infrared detector makes it possible to replace the infrared devices containing toxic elements on the market in the future. The Mg<sub>2</sub>Si/Si avalanche photodiode(APD) with separation structure of absorption layer, charge layer and multiplication layer, with Mg<sub>2</sub>Si serving as the absorption layer, is constructed by using the Atlas module in Silvaco software. The effects of the thickness and doping concentration of the charge layer and multiplier layer on the distribution of internal electric field, punch-through voltage, breakdown voltage ( $V_b$ ),  $C$ - $V$  characteristics, and transient response of Mg<sub>2</sub>Si/Si SACM-APD are simulated. The effects of bias voltage on the  $I$ - $V$  characteristics and spectral response are analyzed. The punch-through voltage, breakdown voltage, dark current density, gain coefficient ( $M_n$ ) and the current amplification factor ( $M$ ) after avalanche effect of APD are obtained after the structure optimization. According to the simulation results, the spectral response wavelength of the device is extended to 1.6  $\mu\text{m}$ , so the selection of Mg<sub>2</sub>Si as the absorption layer effectively extends the spectral response band of Si based APD. When the wavelength of incident light is 1.31  $\mu\text{m}$  and the optical power is 10  $\text{mW}/\text{cm}^2$ , the obtained punch-through voltage is 17.5 V, and the breakdown voltage is 50 V. When the bias voltage is 47.5 V ( $0.95 V_b$ ), the peak value of spectral response is 25 A/W at a wavelength of 1.1  $\mu\text{m}$ , a density of dark current is about  $3.6 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>, a multiplication factor  $M_n$  is 19.6, and  $M_n$  achieves a maximum value of 102 when the device is broken down. Meanwhile, the current amplification factor  $M$  after avalanche effect is 75.4, and the current gain effect of the SACM structure is obvious. The peak value of spectral response for the pin-type photodiode in the previous study is only 0.742 A/W. Comparing with the pin-type photodiode, the spectral response of Mg<sub>2</sub>Si/Si SACM-APD is greatly improved. In this work, the structure parameters of the device are optimized, which lays a nice foundation for fabricating the high-performance devices.

**Keywords:** SACM-APD, Mg<sub>2</sub>Si/Si heterojunction, spectral response, gain coefficient

**PACS:** 85.30.-z, 73.40.Lq, 85.60.Gz, 42.60.Lh

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201923

\* Project supported by the Foundation for Sci-tech Activities for the Overseas Chinese Returnees in Guizhou Province, China (Grant No. [2018]09), the High-level Creative Talent Training Program in Guizhou Province of China (Grant No. [2015]4015), and the Graduate Research Fund in Guizhou Province of China (Grant No. [2020]035).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [qqxiao@gzu.edu.cn](mailto:qqxiao@gzu.edu.cn)