

# 基于异质结倍增层的 InAlAsSb SACM 雪崩光电二极管的优化

蒋毅, 陈俊\*

(苏州大学 电子信息学院, 江苏 苏州 215006)

**摘要:** 使用低工作电压的雪崩光电二极管 (APD) 有利于提高集成电路的稳定性和降低功耗. 文章建立了一个分离吸收、电荷、倍增 (SACM) 型的雪崩光电二极管的模型, 为了在低偏压下获得高增益同时不降低工作电压范围, 这个模型采用了具有高低禁带宽度的异质结倍增层. 同时, 文章研究了异质结倍增层的厚度和掺杂浓度对暗电流和增益的影响. 通过对掺杂浓度的优化, 击穿电压和穿通电压可以同时下降.

**关键词:** InAlAsSb; 雪崩光电二极管; 异质结倍增层; 击穿电压; 穿通电压

**中图分类号:** TN215; TN362 **文献标识码:** A

## Optimization of InAlAsSb SACM APD with a heterojunction multiplication layer

JIANG Yi, CHEN Jun\*

(School of Electronic and Information Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

**Abstract:** For avalanche photodiodes (APDs), low operation voltage is required for integrated circuit stability and low power consumption. In this paper, a model for InAlAsSb separate absorption, charge, and multiplication (SACM) APD is established. To get higher gain at lower reversed bias voltage without sacrificing the operating voltage range, a high/low band gap multiplication layer is adopted. The effects of the thickness and doping concentration of the multiplication layer on the dark-current and the break-down voltage have been investigated. By optimization of the doping concentration, the break-down voltage and punch-through voltage can be decreased simultaneously.

**Key words:** InAlAsSb, avalanche photodiode, hetero-junction multiplication layer, break-down voltage, punch-through voltage

**PACS:** 78.55. Cr, 85.60. Gz

## 引言

雪崩光电二极管在光通信<sup>[1-2]</sup>、成像<sup>[3-4]</sup>和单光子探测<sup>[5-6]</sup>等许多领域具有应用价值, 可以很好地替代光电倍增管作为系统的接收部件. 雪崩光电二极管的增益来源于雪崩倍增, 因此限制其性能的主要因素之一就是雪崩倍增需要很高的工作电压. 降低雪崩光电二极管的工作电压有利于提高器件和集成电路的稳定性, 降低功耗<sup>[7-8]</sup>.

光纤通信的快速发展对作为接收器关键部件的雪崩光电二极管有了越来越高的要求. 增益带宽积是雪崩光电二极管的关键参数之一, 它和  $k$  参数 (电子和空穴的碰撞离化系数比) 有关. 最常见的低  $k$  材料是 Si,  $k$  值约为 0.02, 但是硅的截止波长小于  $1\mu\text{m}$ . 为了弥补这一不足, 可以使用 InAlAsSb 来代替 Si. InAlAsSb 的  $k$  参数约为 0.01, 它的截止波长可以通过改变组份来调节, 可以吸收短波红外

收稿日期: 2019-01-12, 修回日期: 2019-07-07

基金项目: 国家自然科学基金 (61774108)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61774108)

作者简介 (Biography): 蒋毅 (1994-), 男, 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要从事光电器件研究. E-mail: 20164228012@stu.suda.edu.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: junchen@suda.edu.cn

Received date: 2019-01-12, Revised date: 2019-07-07

光<sup>[1,9-11]</sup>. 使用InAlAsSb制作的分离吸收、电荷、雪崩(SACM)型雪崩光电二极管的噪声特性可以与最先进的Si雪崩光电二极管相媲美<sup>[9]</sup>.

对于传统的SACM型雪崩光电二极管,可以通过改变电荷层和倍增层的掺杂浓度或厚度来调节击穿电压. 但是当击穿电压下降时,穿通电压会同时上升. 这使得器件的工作电压范围降低,增益曲线更陡,最坏的情况下击穿会先于穿通发生. 为了在不提高穿通电压的前提下降低击穿电压,本文建立了一个InAlAsSb材料的SACM型雪崩光电二极管模型,在此基础上将倍增层改为一个具有高低禁带宽度的异质结结构,来模拟和分析这个结构对于器件击穿电压、增益和暗电流的影响.

## 1 器件结构和仿真模型

图1表示了仿真模拟中使用的两种InAlAsSb

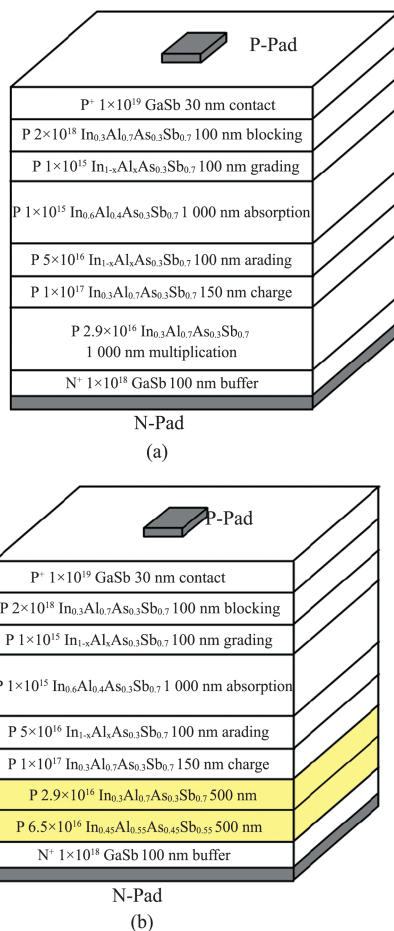


图1 InAlAsSb材料SACM型雪崩光电二极管器件(a)传统结构和(b)具有高低禁带宽度异质结倍增层的结构示意图  
Fig. 1 (a) The conventional structure and (b) the structure with high/low bandgap heterojunction multiplication layer of the InAlAsSb SACM APDs

材料SACM型雪崩光电二极管器件的结构. 对于传统结构(图1(a)),从顶至底依次是P电极,P型掺杂 $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 厚度30 nm的GaSb接触层,P型掺杂 $2 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 厚度100 nm的 $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ 阻挡层,P型掺杂 $1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 厚度100 nm的 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ 渐变层,P型轻掺杂 $1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 厚度1000 nm的 $\text{In}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ 吸收层,P型掺杂 $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 厚度100 nm的 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ 渐变层,P型掺杂 $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 厚度150 nm的 $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ 电荷层,P型轻掺杂 $2.9 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 厚度1000 nm的 $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ 倍增层,N型掺杂 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 厚度100 nm的GaSb缓冲层. 在具有高低禁带宽度异质结倍增层的结构(图1(b)),以下简称“异质结倍增层结构”中,倍增层被替换为P型掺杂 $2.9 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 厚度500 nm的 $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ 高禁带宽度区和P型掺杂 $2.9 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 厚度500 nm的 $\text{In}_{0.45}\text{Al}_{0.55}\text{As}_{0.45}\text{Sb}_{0.55}$ 低禁带宽度区. $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ 的禁带宽度为1.17 eV, $\text{In}_{0.45}\text{Al}_{0.55}\text{As}_{0.45}\text{Sb}_{0.55}$ 的禁带宽度为0.93 eV.

模型的面积为 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ,在电子阻挡层和吸收层之间的渐变层的材料组份 $x$ 从顶部的0.7变化到底部的0.4,在吸收层和电荷层之间的渐变层的材料组份 $x$ 从顶部的0.4变化到底部的0.7. 在仿真中,波长900 nm的光波从顶部入射.

在仿真中使用了Fermi-Dirac载流子统计模型、Shockley-Read-Hall复合模型、载流子迁移率分析模型、俄歇复合模型、光产生复合模型、带至带隧穿模型和Selberherr碰撞电离模型. 仿真使用软件Silvaco TCAD进行.

产生复合过程由Shockley-Read-Hall复合模型描述,其复合率可以由下式给出:

$$R_{srh} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\tau_{p0} \left[ n + n_{ie} \exp\left(\frac{E_{trap}}{kT_L}\right) \right] + \tau_{n0} \left[ p + n_{ie} \exp\left(\frac{-E_{trap}}{kT_L}\right) \right]} \quad (1)$$

其中 $n$ 、 $p$ 和 $n_{ie}$ 分别是电子浓度、空穴浓度和本征载流子浓度, $\tau_{n0}$ 和 $\tau_{p0}$ 分别是电子和空穴的本征载流子寿命, $E_{trap}$ 是陷阱能级和本征费米能级之间的能量差, $k$ 是玻尔兹曼常数, $T_L$ 是晶格温度.

带至带隧穿模型描述了依赖于电场强度的带至带隧穿电流,其产生率可以由下式给出:

$$G_{bt} = A \cdot E^{\gamma} \exp\left(-\frac{B}{E}\right)$$

$$A = \frac{q^2 \sqrt{2m_e^*}}{4\pi^3 h^2 \sqrt{E_g}}$$

$$B = \frac{2\pi^2 \sqrt{m_e^*} / 2 E_g^{3/2}}{qh}, \quad (2)$$

其中  $E$  是电场强度,  $\gamma$  是模型参数.

Selberherr 碰撞离子化模型被用来计算碰撞离子化系数, 其表达式见下式:

$$\alpha_n = A_n \exp\left[-\left(\frac{B_n}{E}\right)^{\beta_n}\right], \alpha_p = A_p \exp\left[-\left(\frac{B_p}{E}\right)^{\beta_p}\right], \quad (3)$$

其中  $\alpha_n$  和  $\alpha_p$  分别是电子和空穴的碰撞离子化系数,  $E$  是电场强度,  $A$ 、 $B$  和  $\beta$  是模型参数.

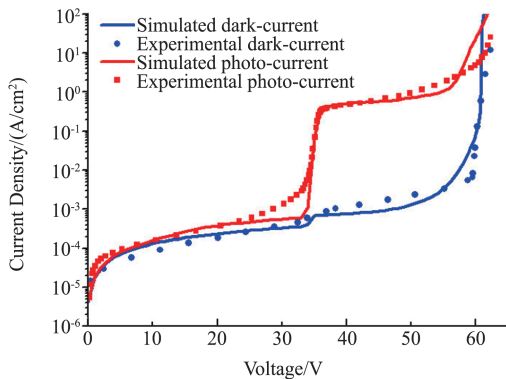


图2 仿真和实验的IV特性拟合

Fig. 2 Simulated and experimental I-V characteristic

图2展示了该器件结构的仿真数据与实验数据<sup>[9]</sup>的IV特性拟合结果,可以看出仿真结果与实验结果拟合得较为成功. 实验所用器件结构是与图1(a)中的仿真结构相同的传统SACM型雪崩光电二极管,器件在GaSb衬底上使用分子束外延技术生长外延层,使用等离子干法刻蚀定义台面形状. 其中  $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  渐变层由 AlAs、AlSb、InAs 和 InSb 数字合金制成.

## 2 结果和讨论

图3展示了图1中的传统结构和异质结倍增层结构的电流和增益曲线. 异质结倍增层结构的雪崩击穿电压为58.5 V, 小于传统结构的雪崩击穿电压5.1 V, 且穿通电压没有上升. 这可以归因于异质结倍增层中低禁带宽度区的碰撞离子化系数高, 在较低的电场强度下就能提供较高的增益. 因为这一层的禁带宽度低, 电子更容易接受其它电子的碰撞能量从价带跃迁到导带成为自由电子, 也就是说碰撞离子化的阈值能量降低了. 图4(a)展示了传统结构和异质结倍增层结构在不同反偏压下的电场分布. 在雪

崩击穿电压下, 异质结倍增层结构的倍增层中的电场强度低于传统结构, 这意味着异质结倍增层结构雪崩击穿需要的反偏压小. 图4(b)展示了传统结构和异质结倍增层结构的能带. 在大约2.5  $\mu\text{m}$  的位置 ( $\text{In}_{0.45}\text{Al}_{0.55}\text{As}_{0.45}\text{Sb}_{0.55}$  和  $\text{In}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}_{0.7}\text{Sb}_{0.3}$  界面) 有一个能带不连续, 导带下落形成的内建电场与外加反偏电场的方向相同, 有助于电子的运输, 增强了电子的碰撞离子化. 价带上的空穴势垒会阻碍空穴的运输, 可以降低  $k$  值, 有助于降低噪声.

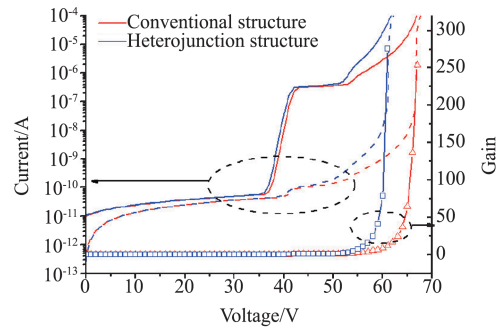


图3 异质结倍增层结构和传统结构的电流(实线表示光电流, 虚线表示暗电流)和增益(符号线)

Fig. 3 I-V characteristic (solid line for photo-current, dash line for dark-current) and the gain (symbol line) of the heterojunction multiplication layer structure and the conventional structure

当禁带宽度降低时, 带至带隧穿产生率会上升, 但从图4(a)电场分布中可以看出, 异质结倍增层结构的电场小于传统结构. 根据式(2), 隧穿产生率与电场强度和禁带宽度都有关. 传统结构禁带宽度高、电场强度大, 异质结倍增层结构禁带宽度低、电场强度低, 结果是两者的隧穿产生率相当. 仿真的结果显示两者未倍增的隧穿电流相差很小, 在40 V反偏压时, 异质结倍增层结构的暗电流比传统结构暗电流密度仅高  $1.9 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ . 但是由于异质结倍增层结构的倍增系数高于传统结构, 所以倍增后整体的暗电流大, 这也说明了异质结倍增层使得增益上升.

低禁带宽度区的碰撞离子化率大于高禁带宽度区, 如果倍增层中的电场集中在低禁带宽度区内, 那么总体的碰撞离子化率会更高. 这一点可以依靠调整这两个区域的掺杂浓度分布来实现, 通过提高低禁带宽度区的掺杂浓度并且降低高禁带宽度区的掺杂浓度, 可以使低禁带宽度区中的电场强度上升而高禁带宽度区的电场强度下降.

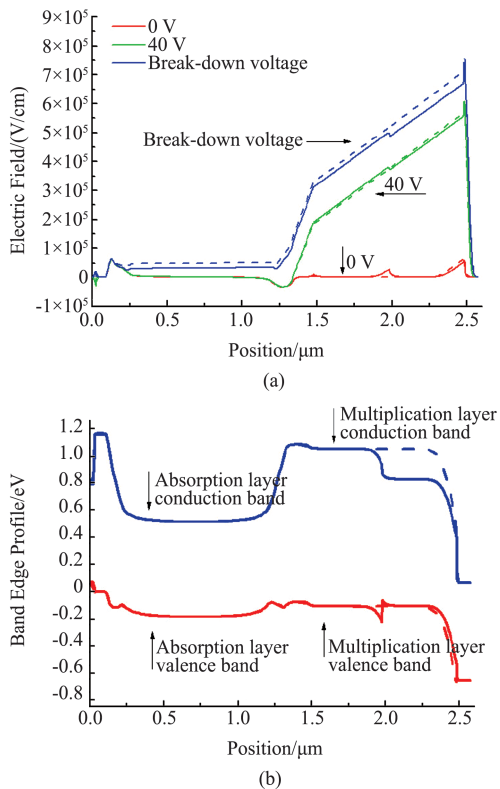


图4 异质结倍增层结构(实线)和传统结构(虚线)(a)在0 V, 40 V反偏压和雪崩电压(异质结倍增层结构58.5 V,传统结构63.6 V)下的电场分布。(b)在零偏压下的能带  
Fig. 4 (a) The electric field distribution biased at reversed voltage of 0 V, 40 V and their respective break-down voltage (58.5 V for heterojunction multiplication layer structure and 63.6 V for conventional structure) and (b) the band edge profile biased at 0 V of the heterojunction multiplication layer structure (solid line) and the conventional (dash line) structure

图5(a)展示了不同低禁带宽度区掺杂浓度的器件的电流和增益。其中APD1是作为参照的传统结构器件,APD2-4表示优化的结构。优化结构的高禁带宽度区即 $\text{In}_{0.3}\text{Al}_{0.7}\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$ 层的掺杂浓度为0。从图中可以看出APD2-4的雪崩击穿电压随低禁带宽度区掺杂浓度的上升而降低,这一方面是因为倍增层掺杂浓度对雪崩击穿电压的调节作用,另一方面是因为电场集中在低禁带宽度区,使得总碰撞电离率上升,雪崩击穿电压下降,如图5(b)所示。低禁带宽度区的掺杂浓度上升会使得击穿电压上升,但影响不大。

从图5(a)中可以看出APD2-4的击穿电压约为32 V,小于APD1的40 V。击穿电压可以表示为各层耗尽需要的电压和,总的击穿电压可以表示为:

$$V_{br} = V_{brm} + V_{brc} \quad (4)$$

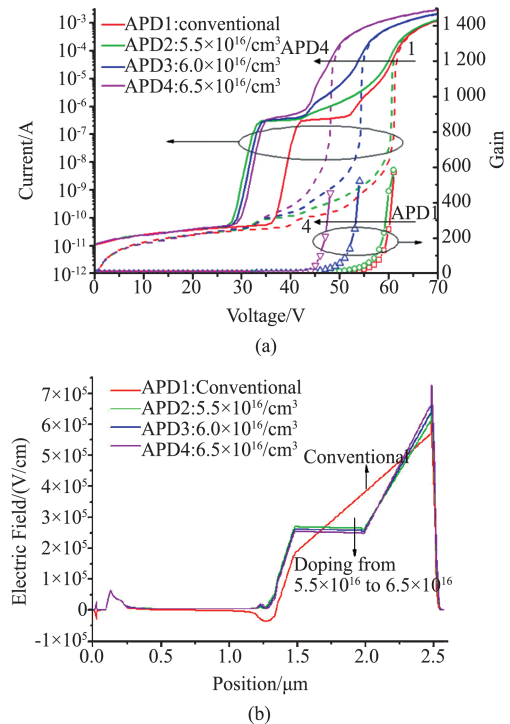


图5 不同低禁带宽度区掺杂浓度的器件的(a)电流(实线表示光电流,虚线表示暗电流)、增益(符号线)和(b)反偏压40 V下的电场分布

Fig. 5 (a) I-V characteristic (solid line for photo-current, dash line for dark-current), the gain (symbol line) and (b) electric field distribution at the bias of -40 V of devices with different doping concentration of the low bandgap region

其中 $V_{br}$ 是总击穿电压, $V_{brm}$ 是倍增层耗尽需要的电压, $V_{brc}$ 是电荷层耗尽需要的电压。对于APD1-4, $V_{brc}$ 是相同的。耗尽区与外加偏压的关系可以表述为:

$$w = \left\{ \frac{2\varepsilon_s V_R}{eN_a} \right\}^{1/2} \quad (5)$$

对于倍增层, $V_R$ 代表 $V_{brm}$ , $w$ 代表倍增层需要耗尽部分即掺杂浓度不为0的部分的厚度。因为APD2-4的高禁带宽度层是本征的,即倍增层有一半是0掺杂的,而APD1的所有部分的掺杂浓度都为 $2.9 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ ,所以APD2-4的 $w$ 是APD1的一半。因此,APD2-4的 $V_{brm}$ 小于APD1,那么APD2-4总的击穿电压就小于APD1。

通过对异质结倍增层结构的掺杂浓度的优化,使得雪崩击穿电压和击穿电压同时下降,在保持工作电压范围的同时,在较低的反偏压下就能获得较高的增益。

由上述的分析可知,在保持异质结倍增层总厚度不变的情况下,降低低禁带宽度区的厚度可以降低



低穿通电压. 图6展示了在上述掺杂优化的基础上改变异质结倍增层低禁带宽度区的厚度, 并保持倍增层总厚度 1000 nm 不变时的电流特性. 可以发现随着低禁带宽度区厚度的下降, 穿通电压下降而雪崩击穿电压上升, 这与传统结构降低倍增层的掺杂总量(厚度乘以掺杂浓度)而导致穿通电压下降而雪崩击穿电压上升的特性类似. 通过前文对图5的分析可知, 提高低禁带宽度区的掺杂浓度可以降低雪崩击穿电压而对穿通电压的提升较小, 因此可以在减小低掺杂区厚度的基础上增大掺杂浓度来同时降低雪崩击穿电压和穿通电压. 比如当低禁带宽度区的厚度为 300 nm, 掺杂浓度为  $1.1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$  时, 穿通电压为 30.4 V, 比传统结构低 10.9 V, 雪崩击穿电压为 43 V, 比传统结构低 23.5 V. 在调节低掺杂区厚度与掺杂浓度的时候也要注意雪崩击穿电压和工作电压范围的折衷.

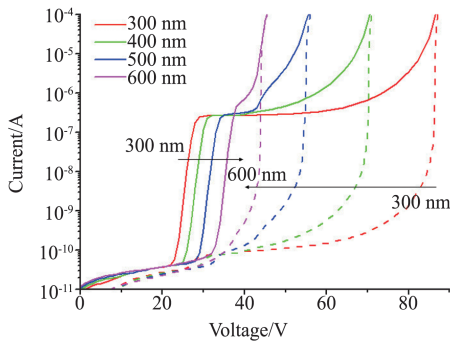


图6 异质结倍增层结构器件, 在倍增层总厚度不变的情况下不同低禁带宽度区厚度器件的光电流(实线)和暗电流(虚线)

Fig. 6 The photo-current (solid line) and the dark-current (dash line) of the heterojunction multiplication layer structures with different low bandgap region thickness and the same total thickness of the multiplication layer

当低禁带宽度区的厚度减小且掺杂浓度增大时, 这一区域的最大电场会增大, 使得隧穿暗电流上升. 为了研究低禁带宽度区厚度和掺杂浓度对原始隧穿暗电流的影响, 仿真了4个器件, 其低禁带宽度区的参数如表1所示.

为了更好地观察并方便比较隧穿暗电流, 这些器件的雪崩击穿电压被调整为相同值. 图7(a)展示了这些器件的原始暗电流, 可以看出随着器件低禁带宽度区厚度的降低和掺杂浓度的上升, 原始暗电流增大了. 这一方面是因为低禁带宽度区最大电场的提高导致低禁带宽度区的隧穿电流上升, 另一方

表1 器件低禁带宽度区参数

Table 1 Parameters of the low band-gap region of the devices

器件	厚度(nm)	掺杂浓度(/cm <sup>3</sup> )
APD1	300	$1 \times 10^{17}$
APD2	400	$7.5 \times 10^{16}$
APD3	500	$6 \times 10^{16}$
APD4	600	$5.05 \times 10^{16}$

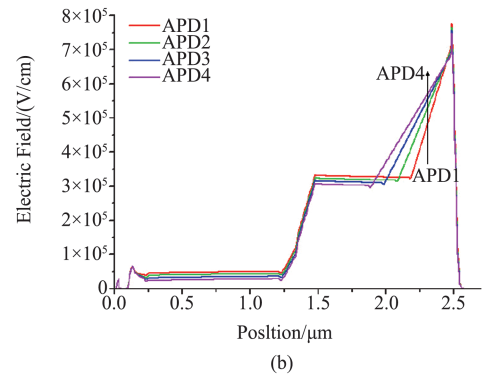
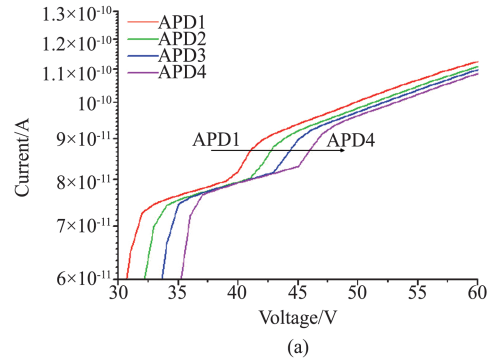


图7 (a)不同低禁带宽度区参数的器件的原始暗电流和(b)电场分布

Fig.7 (a) Primary dark-current (b) electric field distribution of devices with different low band-gap region parameters

面也是因为吸收区电场的增大而导致吸收区隧穿电流的上升, 如图7(b)所示.

总结来说, 在优化了异质结倍增层的掺杂分布之后, 可以通过降低低禁带宽度区的厚度和提高它的掺杂浓度来进一步降低雪崩击穿电压和穿通电压, 但隧穿电流会随之上升, 在设计器件时需要考虑两者的折衷.

### 3 结论

建立了一个 InAlAsSb 材料的 SACM 型雪崩光电二极管模型, 在此基础上将倍增层改为一个具有高低禁带宽度异质结倍增层的结构. 仿真结果表明这个结构可以在不提升穿通电压的情况下降低雪崩

击穿电压,这意味着在较低的反偏压下就能取得较高的增益. 异质结倍增层的掺杂浓度分布和厚度可以进一步优化,使得穿通电压和雪崩击穿电压同时降低.

## References

- [1] Campbell J C. Advances in photodetectors [M]. Optical Fiber Telecommunications V A (Fifth Edition). New York: Academic Press, 2008:221-268.
- [2] LI Feng, WANG Shu-Tang. Study on InGaAs/InGaAsP/InP SAGM avalanche photodiode [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李锋,王树堂. InGaAs / InGaAsP / InP长波长雪崩光电二极管研究. *红外与毫米波学报*), 1991, **10**(1): 67-72.
- [3] Bertone N, Clark W. Avalanche photodiode arrays provide versatility in ultrasensitive applications [J]. *Laser Focus World*. 2007, **43**(9): 69.
- [4] Mitra P, Beck J D, Skokan M R, et al. Adaptive focal plane array (AFPA) technologies for integrated infrared microsystems [J]. *Proceeding of the SPIE*. 2006, **6232**: 62320G.
- [5] Tosi A, Calandri N, Sanzaro M, et al. Low-noise, low-jitter, high detection efficiency InGaAs/InP single-photon avalanche diode [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2014, **20**(6): 3803406.
- [6] Jiang, X D, Itzler M, O'Donnell K. InP-Based single-photon detectors and geiger-mode APD arrays for quantum communications applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2015, **21**(3): 3800112.
- [7] Shao Z, Chen D, Liu Y, et al. Significant performance improvement in AlGaN solar-blind avalanche photodiodes by exploiting the built-in polarization electric field [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2014, **20**(6): 3803306.
- [8] LI Yong-Fu, LIU Jun-Liang, Wang Qing-Pu, et al. Avalanche characterization of high speed single-photon detector based on InGaAs/InP APD [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李永富,刘俊良,王青圃,等. 基于InGaAs/InP雪崩光电二极管的高速单光子探测器雪崩特性研究. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(4): 427-431.
- [9] Ren M, Maddox S J, Woodson M E, et al. AllInAsSb separate absorption, charge, and multiplication avalanche photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*. 2016, **108**(19): 191108.
- [10] Woodson M E, Ren M, Maddox S J, et al. Low-noise AllInAsSb avalanche photodiode [J]. *Applied Physics Letters*. 2016, **108**(8): 081102.
- [11] Ren M, Maddox S, Chen Y, et al. AllInAsSb/GaSb staircase avalanche photodiode [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **108**(8): 081101.