

# 基于 silvaco-TCAD 的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 红外探测器的仿真

陈 豪<sup>1</sup>, 肖清泉<sup>1†</sup>, 袁正兵<sup>1</sup>, 王 坤<sup>1</sup>, 黎业羽<sup>1</sup>, 史娇娜<sup>1</sup>, 谢 泉<sup>1</sup>, 陆书龙<sup>2</sup>

1. 贵州大学大数据与信息工程学院, 贵阳 550025;

2. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 纳米器件与应用重点实验室, 苏州 215123

收稿日期: 2018-08-27; 接收日期: 2018-12-29

**【摘要】** 采用 silvaco-TCAD 研究  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  SAGCM-APD 光电探测器, 对探测器的结构参数对器件的电场分布、击穿电压和贯穿电压的影响进行仿真分析. 研究表明电荷层对器件内部电场起到更好的调节作用, 但过高的电荷层面密度会导致 APD 探测器的击穿电压与贯穿电压之差减小. 倍增层厚度的增加使击穿电压先减小后增高, 贯穿电压线性增加, 同时耗尽层宽度变大, 使器件电容减小. 当倍增区厚度  $1\ \mu\text{m}$ 、偏压为  $-5\ \text{V}$  时, 器件电容密度达到了  $4.5 \times 10^{-17}\ \text{F}/\mu\text{m}$ . 反向偏置电压为  $30\ \text{V}$  时, APD 探测器在  $1.31\ \mu\text{m}$  和  $1.55\ \mu\text{m}$  波长下的响应度分别达到  $1\ \text{A/W}$  和  $1.1\ \text{A/W}$ .

**关键词:**  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  SAGCM-APD 探测器; InP 倍增层; 击穿电压; 贯穿电压

**PACS:** 7460, 7490, 0290

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2019.01.001

## Simulation on the $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ Infrared Detectors by Silvaco-TCAD

CHEN Hao<sup>1</sup>, XIAO Qingquan<sup>1</sup>, YUAN Zhengbing<sup>1</sup>, WANG Kun<sup>1</sup>,  
LI Yeyu<sup>1</sup>, SHI Jiaona<sup>1</sup>, XIE Quan<sup>1</sup>, LU Shulong<sup>2</sup>

1. College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Key Laboratory of Nano-devices and Applications, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionic,  
Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123

Received date: 2018-08-27; accepted date: 2018-12-29

**【Abstract】**  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  SAGCM-APD photodetector was studied by using the silvaco-TCAD software, and the influences of the main structural parameters of the detector on the electric field distribution, breakdown voltage, penetration voltage were simulated. The results show that the charge layer can adjust the internal electric field of the device, but over high doping concentration can lead to the decrease in the difference between the breakdown voltage and the punch-through voltage of the APD detector. The breakdown voltage of the APD device firstly decreases and then increases with increasing thickness of the InP multiplication layer, and the punch-through voltage increases linearly with increasing thickness of the InP multiplication layer. At the same time, the device capacitance decreases

\* 国家自然科学基金项目(61264004); 贵州省留学回国人员科技活动择优资助项目([2018]0009); 贵州省高层次创新型人才培养项目资助的课题.

† qqxiao@gzu.edu.cn

with increasing width of the depletion layer, and the response speed of the device increases. The capacitance density is about  $4.5 \times 10^{-17}$  F/ $\mu\text{m}$  when the thickness of the InP multiplication layer is 1  $\mu\text{m}$ , the reverse bias voltage is  $-5$  V. The responsivity of the APD detector is 1 A/W and 1.1 A/W at the wavelength of 1.31  $\mu\text{m}$  and 1.55  $\mu\text{m}$  when the reverse bias voltage is  $-30$  V.

**Keywords:**  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  SAGCM-APD detector; the InP multiplication layer; breakdown voltage; punch-through voltage

**PACS:** 7460,7490,0290

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2019.01.001

## 1 引言

近年来  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  APD 探测器由于其高增益、宽带宽、高灵敏度等优良性能已经应用于高比特率长途光纤中通信系统<sup>[1-2]</sup>,也是最常用的近红外光谱范围内的光电探测器.对 APD 探测器的研究改进中,为了降低器件的隧穿电流,1979 年,Nishida K 等人提出将吸收层和倍增层分立而来具有异质结构的  $\text{InGaAs}$  APD 探测器<sup>[3-4]</sup>来代替最早的同质结构<sup>[5]</sup>,而在此基础上进一步将分离、吸收、渐变、电荷、倍增各层分立开的高可靠性平面(SAGCM)结构应用于 APD 探测器,并成为研究热点. $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 是直接带隙材料,在  $1.6\ \mu\text{m}$  附近具有吸收峰值、高电子迁移率、与  $\text{InP}$  衬底晶格完全匹配等诸多优点,可以使得  $\text{InGaAs}/\text{InP}$  APD 探测器成为光纤通信中关键光接收元件.在诸如医学 3D 成像天文相关或检测和诊断系统、量子成像以及加密系统光子计数、激光测距等方面也取得广泛的应用<sup>[6]</sup>.

APD 探测器的性能一定程度上取决于内部的电场强度和分布,击穿电压和倍增层的厚度是影响 APD 探测器性能的两个重要参考参数<sup>[7]</sup>.本文围绕 SAGCM 结构的  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  APD 探测器建立了相应的器件结构模型,并采用 silvaco-TCAD<sup>[8]</sup>模拟仿真了器件的  $\text{InP}$  电荷层与倍增层对器件内部的电场分布、贯穿电压和击穿电压的影响.同时,对器件的 C-V 特性以及光响应特性等性能进行了分析讨论,并与文献 9 的实验结果进行对比分析,探测器的内部结构参数的改变对器件主要特征参数的影响与实验吻合,确立了相应的器件参数,对接下来 APD 器件的制备与优化具有一定的参考意义.

## 2 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ SAGCM-APD 器件的结构仿真模型

本文中器件仿真采用设计的 SAGCM 结构,如图 1,重掺杂 n 型  $\text{InP}$  作为器件的衬底,在其上生长了一层 n 型  $\text{InP}$  缓冲器,接着是弱 P 型掺杂的  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  作为吸收层.为了避免  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  吸收层和  $\text{InP}$  倍增层之间的带隙不匹配,插入了四元化合物  $\text{In}_{0.82}\text{GaAs}_{0.4}\text{P}$  作为渐变层减小两者之间的带阶差<sup>[5]</sup>,高掺杂的 n 型  $\text{InP}$  电荷层以调节器件内置电场分布,最后则是用  $\text{InP}$  材料作为倍增层和接触层,控制层与过渡层确保了倍增层发生倍增效应.

采用开管式 Zn 扩散方式形成 APD 探测器中的  $\text{In-GaAs}$  帽子层,为了形成欧姆接触,P 型  $\text{InGaAs}$  帽子层通常需要薄而且高掺杂<sup>[10]</sup>.

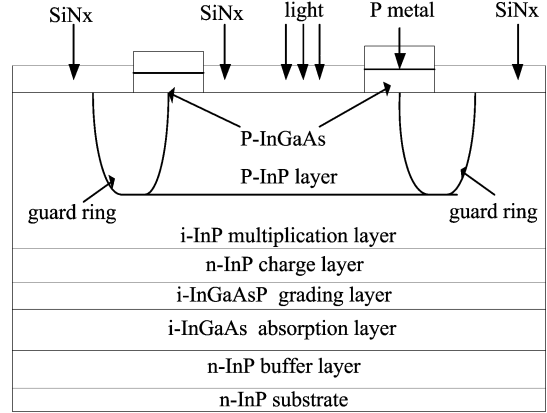


图 1  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  APD 结构剖面图

Fig.1 Schematic cross-section of the  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  APD

表 1 APD 器件参数

Table 1 Parameters of the APD device

| 层名                   | 符号    | 厚度/ $\mu\text{m}$ | 符号    | 浓度掺杂/<br>$\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ |
|----------------------|-------|-------------------|-------|-----------------------------------------|
| $\text{InGaAs}$ 帽子层  |       | 0.1               |       | 1000                                    |
| $\text{InP}$ 接触层     | $W_p$ | 1                 | $N_p$ | 1000                                    |
| $\text{InP}$ 倍增层     | $W_m$ | $0.2\sim 1$       | $N_m$ | 0.1                                     |
| $\text{InP}$ 电荷层     | $W_c$ | $0.01\sim 0.4$    | $N_c$ | $10\sim 20$                             |
| $\text{InGaAsP}$ 渐变层 | $W_g$ | 0.1               | $N_g$ | 0.1                                     |
| $\text{InGaAs}$ 吸收层  | $W_a$ | 1                 | $N_a$ | 0.1                                     |
| $\text{InP}$ 缓冲层     | $W_b$ | 0.5               | $N_b$ | 100                                     |
| $\text{InP}$ 衬底      | $W_s$ | 3.5               | $N_s$ |                                         |

silvaco-TCAD 是一个以物理为基础能对不同半导体特性的设计和仿真框架的计算机辅助系统.本文通过 Atlas 软件中定义结构参数来构建整个器件结构模型,选取 SRH、Auger 等复合模型、与杂质浓度有关的 CONMOB 迁移率模型、局域 impact selb 模型等主要的物理模型.使用 silvaco TCAD 对 SAGCM 结构的  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  APD 探测器进行二维(2D)数值模拟,研究探测器的内部结构参数的改变对器件主要特征参数的影响,包括内部电场、贯穿电压、响应度等等.表 1 是 APD 器件结构参数的典型取值.

### 3 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ SAGCM-APD 器件仿真分析

#### 3.1 偏置电压

对于研究结构参数对器件内部的电场变化,器件模拟中可假设入射光被 APD 耗尽层全部吸收,载流子漂移进入倍增层,其倍增效应只发生在倍增区.图中建立一维的坐标系,倍增层与欧姆接触层的 PN 结处设为坐标原点,各层到原点的距离为:

$$\begin{aligned} x_p &= w_p, x_m = w_m, x_c = w_m + w_c, \\ x_g &= w_m + w_c + w_g, \\ x_a &= w_m + w_c + w_g + w_a \end{aligned} \quad (1)$$

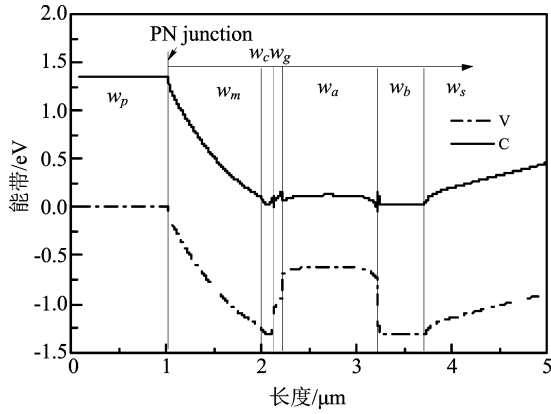


图 2  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  APD 器件能带结构图

Fig.2 Energy band structure diagram of the  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  APD

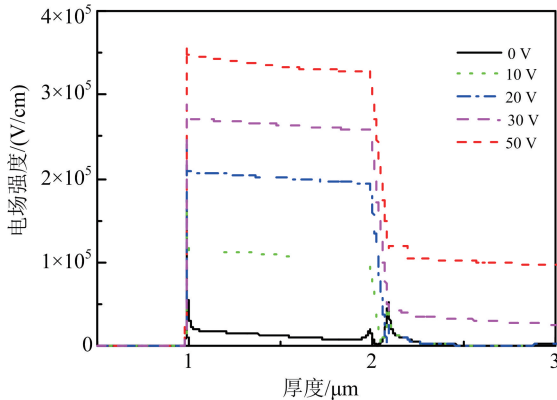


图 3 偏置电压对  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  APD 器件电场的影响

Fig.3 The effect of bias voltage on the electric field of the  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$  APD device

由图 3 所示,光电器件外加不同反向偏置下呈

现的电场分布情形,电压从 0 V 变化到 50 V,器件整体电场都在稳步上升.在反偏为 10 V 时吸收层电荷未完全耗尽,使得部分载流子根本没办法到达倍增区域,当偏置电压为 30 V 后,吸收层完全耗尽,此时电场强度的峰值为  $2.7 \times 10^5 \text{ V/cm}$ ,满足二极管发生雪崩击穿的电场强度条件,此时器件内部的倍增效应大于偏压的作用.

#### 3.2 电荷层结构参数的影响

贯穿电压和击穿电压都是  $\text{InGaAs}/\text{InP}$  APD 很重要的性能参数<sup>[11]</sup>.对于 SAGCM  $\text{InGaAs}/\text{InP}$  雪崩光电二极管,当耗尽层厚度随着反向偏置增加而延伸到吸收层时,反向偏置电压被定义为贯穿电压,其确定了器件的 PN 结的深度,对后续工艺设计具有至关重要的作用.在偏置电压不断增加,以至于雪崩放大接近无穷大时,反向偏置电压被重新定义作为击穿电压.贯穿电压和击穿电压受器件整体结构参数的影响,如厚度,掺杂分布和浓度等等.在模拟中,这些参数被设置为变量以获得穿通电压和击穿电压的变化趋势.

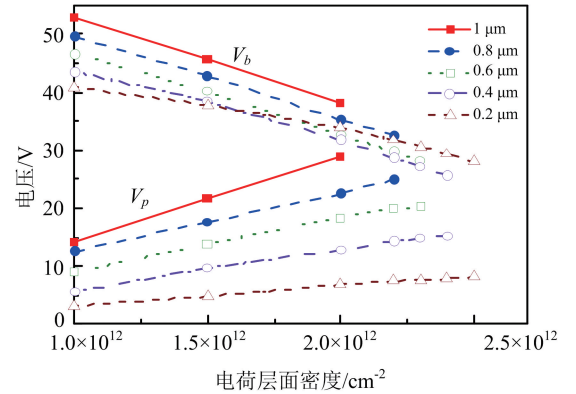


图 4 电荷层面密度与击穿电压、贯穿电压、倍增层厚度之间的关系

Fig.4 The relation between the charge density of charger layer and the breakdown voltage, the punch-through voltage, and the thickness of multiplication layer

如图 4 所示,随着电荷层面密度的增加器件的击穿电压线性减小而贯穿电压线性增大.倍增层厚度为 1  $\mu\text{m}$  和 0.4  $\mu\text{m}$  时,电荷层面密度从  $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  变化到  $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  时贯穿电压变化分别为  $15 \text{ V}/2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  和  $7.5 \text{ V}/2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,击穿电压变化率分别为  $15 \text{ V}/2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  和  $11.8 \text{ V}/2 \times$

$10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . 击穿电压与贯穿电压的变化率随着倍增层厚度的减小而减弱.

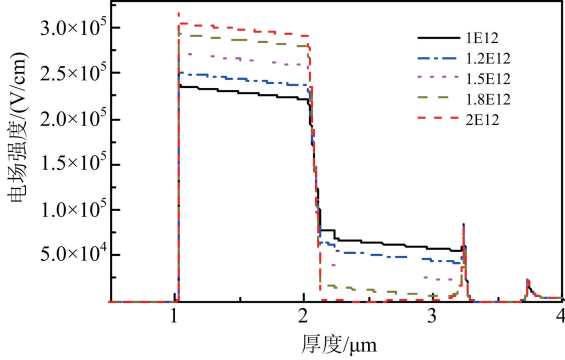


图 5 InP 电荷控制层面密度对器件电场的影响

Fig.5 The effect of the charge density of InP charge layer on the electric field of the device

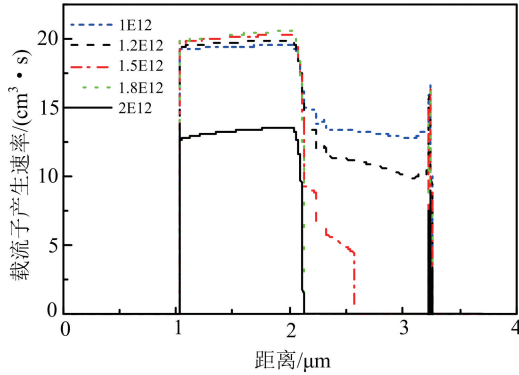


图 6 InP 电荷控制层面密度对载流子产生率的影响

Fig.6 The influence of the charge density of InP charge layer on the carrier generation rate hickness of multiplication layer

图 5 展示了在偏压为 30 V 时, 掺杂浓度越高的电荷层更有助于调整器件内部的电场分布, 并使得倍增层有更高的电场和吸收层有更低的电场, 倍增层中的雪崩效应加剧导致更低的击穿电压, 同时隧穿效应在吸收层中被压制. 图 6 揭示了高浓度的电荷层掺杂导致了吸收层中的载流子碰撞产生率和复合速率较小, 载流子渡越时间和输运距离减小, 降低了器件的暗电流, 但同时吸收层中的电场强度降低到一定值使载流子越过“壁垒层”的概率变低, 需要更高的电压才能使耗尽区耗尽, 最终导致更高的贯穿电压. 但过高浓度的电荷面密度, 如图 4 所示会使击穿电压和贯穿电压差较小, 吸收层还未完全耗尽倍增效应就已开始, 这大大影响了器件的性能和工作范围, 应极力避免. 鉴于此在设计器件过程中, 可

通过降低吸收层的厚度和浓度使得吸收层的电场升高.

表 2 电荷层厚度、掺杂浓度与击穿电压、贯穿电压的关系

Table 2 The relation between the thickness of charger layer and the breakdown voltage, the punch-through voltage

| 倍增区厚度 0.4 $\mu\text{m}$ |                          |                           |                  |                  |                          |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------|------------------|--------------------------|
| 电荷层厚度 / $\mu\text{m}$   | 电荷层浓度 / $\text{cm}^{-3}$ | 电荷层面密度 / $\text{cm}^{-2}$ | $V_p / \text{V}$ | $V_b / \text{V}$ | $(V_b - V_p) / \text{V}$ |
| 0.01                    | 2e18                     | 2e12                      | 12               | 29               | 17                       |
| 0.05                    | 4e17                     | 2e12                      | 11.8             | 30.6             | 12.8                     |
| 0.1                     | 2e17                     | 2e12                      | 12.5             | 31.7             | 19.2                     |
| 0.2                     | 1e17                     | 2e12                      | 13.7             | 33.1             | 19.4                     |
| 0.3                     | 6.63e16                  | 2e12                      | 14.8             | 34.8             | 20                       |
| 0.4                     | 5e16                     | 2e12                      | 16.4             | 36.1             | 19.7                     |

InP 电荷面密度为  $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . 一定的情况下, 改变电荷层厚度与浓度, 当电荷层厚度较薄时, 贯穿电压随掺杂浓度增加几乎不变, 击穿电压随掺杂浓度增加而逐渐减小. 提高工作电压范围电荷层的掺杂和厚度的设计可以以  $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  和  $0.1 \mu\text{m}$  来作为参考值.

### 3.3 倍增层结构参数的影响

图 7 为 APD 器件 InP 倍增层电场分布随倍增层浓度变化趋势. 掺杂浓度越高电场分布曲线越陡峭, 从而让器件内部的暗电流增大, 降低器件的倍增因子. 所以在器件设计中倍增层掺杂浓度一般为本征态. 另一方面接触层采用重掺杂方式, 可提高整体

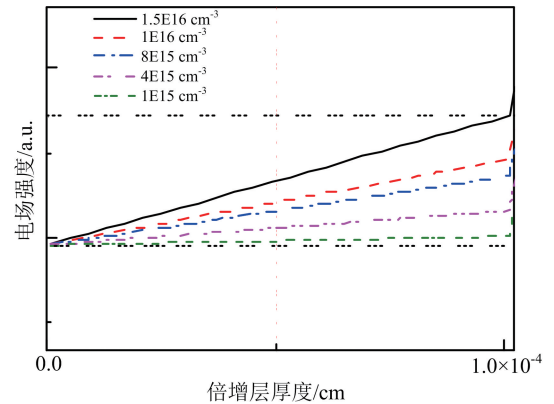


图 7 不同掺杂浓度下 InP 倍增层电场分布

Fig.7 The distribution of the electric field of the InP multiplication layer with different doping concentration

电场,使得吸收层电场起伏变小,保证倍增区的电场相对比较稳定。

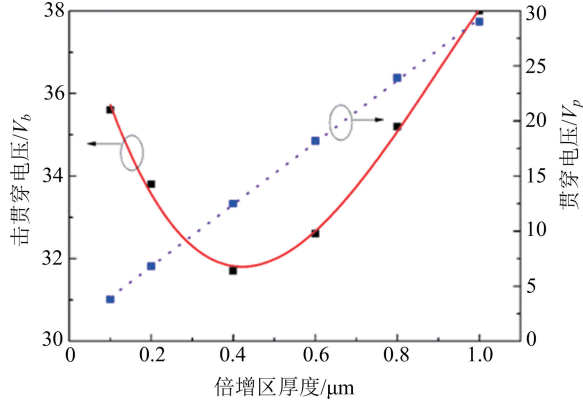


图 8 贯穿电压和击穿电压与 InP 倍增区厚度的关系

Fig.8 The relation between the thickness of InP multiplication layer and the breakdown voltage, the punch-through voltage

在图 8 中,在 InP 电荷控制层面密度为  $2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  时,贯穿电压由于倍增区耗尽层厚度的增加导致了呈线性增加,击穿电压在倍增区厚度  $w_m$  从  $0.1 \mu\text{m}$  到  $1 \mu\text{m}$  时先线性降低然后在增加,在  $0.4 \mu\text{m}$  时击穿电压有最小值  $V_{b\min}$  为  $29 \text{ V}$ .仿真时令电荷层掺杂浓度增加,击穿电压如图 4 整体呈下降趋势,但出现最小值  $V_{b\min}$  时的倍增层厚  $w_{V_{b\min}}$  度依然是在  $0.4 \mu\text{m}$ .在 InP 电荷层电荷面密度不变时,吸收层厚度的增加也会使得击穿电压最小值  $V_{b\min}$  对应的倍增宽度  $w_{V_{b\min}}$  线性增加<sup>[12]</sup>.

一种可能的解释是最初  $w_m$  增加,倍增层与电荷层调节电场具有相似的作用,使得器件内部电场线性增加,而且这种影响是线性同时以倍增区为主,从而击穿电压随  $w_m$  增加而减小.但当  $w_m$  增加到超  $0.4 \mu\text{m}$  时倍增层中的电场强度开始降低导致了更高的击穿电压,该后一现象的初始机制与功能类似的上述吸收层的厚度。

图 9 为 APD 探测器在频率为  $1 \text{ MHz}$  下的 C-V 仿真曲线随倍增层厚度的变化.在偏置电压一定时,倍增层厚度增加使器件电容减小,当倍增层厚度一定时,随着偏置电压减小,器件电容增大.理论分析上来看,APD 探测器中电极与 InP 衬底由于介电性产生的电容和管壳电容是由器件工艺来决定,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

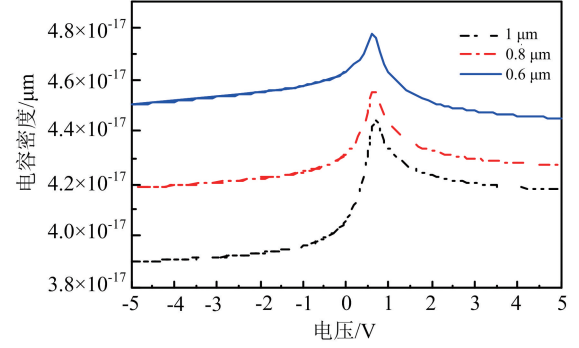


图 9 倍增层厚度对器件电容的影响

Fig.9 The influence of the thickness of multiplication layer on the capacitance of the APD device

尽电容  $C_\tau$  为主,可忽略  $C_d$ <sup>[13]</sup>,当外加交流偏置电压  $V$  时得到  $C_j$  表达式如下<sup>[13-14]</sup>:

$$C_j = C_\tau + C_d = \frac{\epsilon_o \epsilon_r}{w} + q \frac{dn_\varphi}{dv} \quad (2)$$

$$w = [2\epsilon_j (V_D - V)/qN_D]^{1/2} \quad (3)$$

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

通过上式可知加大倍增层厚度和反向偏压会使耗尽层宽度加大,器件电容变小,与模拟变化结果相一致.探测器带宽与 RC 关系是呈负相关<sup>[17]</sup>,为加大探测器可探测的频率范围与器件的响应速度,合理的降低器件电容是有必要的.同时为避免 APD 探测器雪崩效应“死空间”问题,InP 倍增区厚度的选取也不应该太小.当倍增区掺杂为本征态和厚度设为  $1 \mu\text{m}$  时,在  $-5 \text{ V}$  偏压下,器件电容密度约为  $4.5 \times 10^{-17} \text{ F}/\mu\text{m}$ .

### 3.4 光响应特性

在实际应用中,为了知道探测器对于特定波长的单位强度入射光所能产生的光电流大小因此引入响应度,一般直接定义为均方根光电流与入射光功率之比.响应度  $R_e$  为光电探测器中十分重要的性能参数,同时也是表征探测器灵敏度水平的一个参数,表达式如下<sup>[14]</sup>:

$$R_e = \frac{I_L}{P_{in}} = \frac{q\eta\lambda}{hv} = \frac{\eta\lambda(\mu\text{m})}{1.24} \approx \frac{q\{1 - \exp(1 - \alpha W)\}}{hv(1 + \alpha L_n)} \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为吸收系数,与波长有关, $W$  为耗尽层宽度, $\nu$  为电磁波频率, $q$  为电荷量常数, $L_n$  为 P 区少子扩散长度, $\eta$  为量子效率,其定义为单位入射光子产生的电子-空穴对数:

$$\eta = \frac{I_p}{P_{opt}} \cdot \frac{h\nu}{q} \quad (6)$$

$I_p$  为入射光功率,  $P_{opt}$  为入射到器件的光功率. 在器件模拟中, 通过优化结构参数后的 APD 探测器在保持 30 V 反向偏置电压不变, 并在 1.31  $\mu\text{m}$ /1.55  $\mu\text{m}$  波长下器件的光响应仿真结果如图 10 所示. 当入射光功率增加, 电流也线性增加. 当功率达到一定值后, 电流增加缓慢, 器件的量子效率与响应度开始降低, 影响了器件的性能. 1.31  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$  波长下器件响应度均大于 1 A/W, 在 1.55  $\mu\text{m}$  波长下器件响应较好一些.

## 4 结 论

文中采用 silvaco-TCAD 对 APD 探测器的物理

特性进行了模拟仿真, 介绍了器件的结构参数的选取对击穿电压与击穿电压等影响, 模拟的变化趋势与文献 9 的实验结果基本吻合, 掌握器件结构参数对器件性能的影响并进行了优化. 通过结构优化后的器件仿真具有宽响应范围和高量子效率等特性, 对后续器件的制备提供了一定的参考价值.

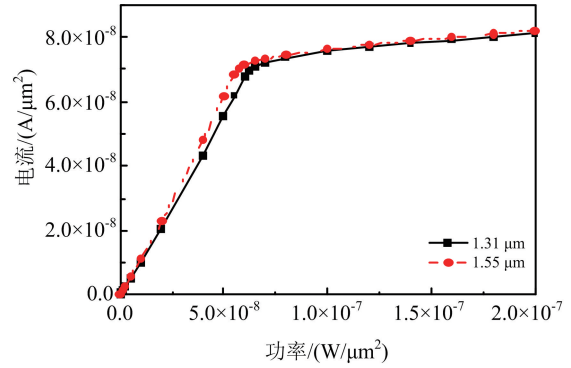


图 10 器件仿真响应特性

Fig.10 The responsivity characteristics of the devices simulation

## 参 考 文 献

- [1] J. C. Campbell. *J. Lightwave. Technol.*, **25**(2007), 109.
- [2] M. Nada, M. Nakamura, H. Matsuzaki, et al. *Opt. Express.*, **22**(2014), 443.
- [3] K. Nishida, K. Taguchi, Y. Matsumoto, et al. *Appl. Phys. Lett.*, **35**(1979), 251.
- [4] S.R.Forrest, O.K.Kim, G.R.Smith, et al. *Appl. Phys. Lett.*, **41**(1982), 95.
- [5] C. E. Hurwitz, J. J. Hsieh. *Appl. Phys. Lett.*, **32**(1978), 487.
- [6] 丁佳, 科技传播, 9(2017), 14.
- [7] J. Zheng, L. Wang, X. Wu, et al. *IEEE Photonic. Tech. L.*, **29**(2017), 2187.
- [8] 唐龙谷. 半导体工艺和器件仿真软件 silvaco TCAD 实用教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [9] 袁正兵, 肖清泉, 杨文献, 等. 光子学报, **47**(2018), 113.
- [10] X.Huang, X.Li, M.Shi, et al. *Infrared. Physics. Techn.*, **71**(2015), 514.
- [11] T. Kagawa, Y. Kawamura, H. Iwamura, et al. *IEEE J. Quantum. Elect.*, **28**(1992), 1419.
- [12] W. Z. Shen, S. C. Shen, W. G. Tang, et al. *Appl. Phys. Lett.*, **67**(1995), 3432.
- [13] Y. D. Wang, J. Chen, J. T. Xu, et al. *Infrared. Physics. Techn.*, **89**(2018), 41.
- [14] 施敏. 半导体器件物理(第三版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006.