光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20241127001

# 锑化物中波雪崩光电探测器的设计与优化

王佩炎[1,2]，陈伟强[1,2*]，鹿利单[1,2]，祝连庆[1,2]，张东亮[3]

（1. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心，北京 100016；2. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院，北京 100016；3. 华北光电技术研究所，北京 100015）

**摘 要：** 针对中波弱光探测下线性模式APD的需求，设计基于InAs/GaSb二类超晶格和AlGaAsSb四元合金分别作为吸收层和倍增层的雪崩光电探测器。通过构建AlGaAsSb合金的碰撞电离模型，基于SILVACO-ATLAS仿真平台系统模拟了倍增层厚度及掺杂浓度、吸收层厚度及掺杂浓度等结构参数对器件*I-V*特性、电场分布以及瞬态响应的影响，从而获得最佳的模型参数以减小暗电流和提高增益。同时，也探究了不同温度对器件性能的影响。仿真结果显示在300 K温度下，工作电压下的增益为16.4，在击穿电压处的最大增益为129.5，比探测率为$2.39\times10^{11}$ cm·$Hz^{1/2}$·$W^{-1}$。该研究可为在室温下工作的中波红外雪崩光电二极管提供理论参考。

**关键词：** InAs/GaSb超晶格；雪崩光电探测器APD；AlGaAsSb；暗电流

**中图分类号：** TN383.5；TN215 **文章编号：** 1001－5868(2025)02－0216－10

## Design and Optimization of Mid-Wavelength Avalanche Photodiodes Based on Antimonides

WANG Peiyan[1,2], CHEN Weiqiang[1,2], LU Lidan[1,2], ZHU Lianqing[1,2], ZHANG Dongliang[3]

(1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, CHN; 2. Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering College, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, CHN; 3. North China Institute of Optoelectronic Technology, Beijing 100015, CHN)

**Abstract:** To satisfy the demand for linear avalanche photodetectors (APDs) in low-light detection, an APD based on an InAs/GaSb second-class superlattice and AlGaAsSb quaternary alloy as absorption and multiplier layers, respectively, was designed in this study. By constructing a collision ionization model for the AlGaAsSb alloy and using the SILVACO-ATLAS simulation platform, the effects of structural parameters such as the thickness and doping concentration of the multiplication and absorption layers on the device's $I-V$ characteristics, electric-field distribution, and transient response were systematically simulated. The aim was to obtain the optimal model parameters to reduce dark current and improve gain. Additionally, the effect of different temperatures on device performance was investigated. Simulation results show that at 300 K, the gain at the operating voltage is 16.4 and the maximum gain at the breakdown voltage is 129.5, with a specific detectivity of $2.39\times10^{11}$ cm·$Hz^{1/2}$·$W^{-1}$. This study provides a theoretical basis for the development of medium-wave infrared avalanche photodiodes operating at room temperature.

**Key words:** InAs/GaSb superlattice; avalanche photodiode; AlGaAsSb; dark current

**收稿日期：**2024－11－27.

**基金项目：**国家自然科学基金项目(62205029).

*通信作者：陈伟强

## 0　引言

中波长红外(MWIR)光电探测器已广泛应用于自由空间光通信[1]、远程军事和天文领域。雪崩光电探测器(APD)具有较高的内部增益,可以探测非常弱甚至单光子信号,应用场景越来越广泛。对于MWIR APD器件,已有多种材料体系得到研究,包括HgCdTe[2]、InSb[3]、InAs[4]和Ⅱ型超晶格(T2SLs)[5-7]。至今,HgCdTe是最成熟的红外技术材料体系,但该材料化学键的不稳定性导致器件良率低、成本高,且难以实现大规模阵列应用[8]。InSb材料虽然表现出极低的过剩噪声,但其必须在低温下工作,以减小暗电流,这种工作温度使探测器在商业应用中面临许多困难[9]。此外,基于InAs的APD不能覆盖MWIR光谱[10]的整个范围。近年来,T2SLs因其具有优异的生长均匀性、大带隙可调性、俄歇复合抑制和碰撞电离系数比小等优点而受到广泛关注,逐步成为第三代红外焦平面探测器的优选材料[11]。

针对锑化物T2SLs中波红外雪崩光电探测器,目前最需要解决的问题是减小暗电流和提高其内部增益。2020年,美国西北大学设计了InAs/InSb超晶格作为吸收区的PIN结构的APD,在 −6.5 V电压下,电子主导的雪崩机制在77 K时增益为7.4[5]。2021年,中国科学院半导体所报道了InAs/GaSb T2SL作为吸收区、AlAsSb材料作为倍增区的MWIR APD[6],在200 K下的最大增益为6.1。该APD还可以通过优化器件结构设计来提高性能。2022年,美国西北大学报道了AlAsSb/GaSb T2SL中波红外SAM-APD,在200 K下的增益能达到29[12],该APD是通过倍增层中的多量子阱结构实现电子主导的雪崩机制来提高增益和降低噪声。总之,中波红外锑化物APD器件成为近年来国内外研究热点。

由于雪崩光电探测器结构比较复杂,因此仿真优化对于指导器件性能的提升和提高研发效率非常关键。为降低APD的隧穿电流,被广泛采用的是吸收层和倍增层分离[13](SAM)结构的APD。本文利用SILVACO仿真平台设计了锑化物中波APD,其中8 MLs InAs/6 MLs GaSb为吸收区,$Al_{0.3}GaAs_{0.02}Sb$为倍增区。$Al_xGa_{1-x}As_{1-y}Sb_y$(以下简称AlGaAsSb)材料体系可以满足与GaSb晶格匹配的外延要求,其带隙范围约为0.7～2.2 eV[14]。其次,AlGaAsSb材料的电荷有效质量小,有利于提高器件的响应速度,且有研究表明AlGaAsSb可能是一种碰撞电离系数比($k$)值较低的材料[15],可以降低APD的过剩噪声,因此很适合用作倍增层[16]。通过构建AlGaAsSb合金的碰撞电离模型,然后对器件进行建模,分析倍增层厚度及掺杂浓度、吸收层厚度及掺杂浓度等结构参数对器件$I$-$V$特性、电场分布以及瞬态响应的影响,从而得到最佳的结构参数。仿真结果显示:300 K下在工作电压处的增益为16.4,在击穿电压处的最大增益为129.5,比探测率为$2.39\times10^{11}$ cm·Hz$^{1/2}$·W$^{-1}$。该研究可为中波红外雪崩光电二极管的研制提供设计参考。

## 1　器件结构建模

### 1.1　材料参数及仿真物理模型

#### 1.1.1　产生-复合模型

载流子的产生-复合模型描述了探测器中电离辐射引发的电子-空穴对的形成,以及这些载流子在电场作用下发生碰撞电离(即雪崩过程)和复合过程。该模拟中用到肖克利-霍尔-里德(SRH)复合模型以及俄歇(AUGER)复合模型。其表达式为:

$$R_{\mathrm{SRH}}=\frac{pn-n^2}{\tau_{\mathrm{p}}\left[n+n_{\mathrm{ie}}\exp\left(\frac{E_{\mathrm{trap}}}{kT_{\mathrm{L}}}\right)\right]+\tau_{\mathrm{n}}\left[p+n_{\mathrm{ie}}\exp\left(\frac{-E_{\mathrm{trap}}}{kT_{\mathrm{L}}}\right)\right]} \tag{1}$$

$$R_{\mathrm{Auger}}=c_{\mathrm{n}}\left(np^2-nn_{\mathrm{i}}^2\right)+c_{\mathrm{p}}\left(np^2-pn_{\mathrm{ie}}^2\right) \tag{2}$$

式中,$\tau_{\mathrm{n}}$和$\tau_{\mathrm{p}}$分别表示电子寿命和空穴寿命,$n_{\mathrm{ie}}$为本征载流子浓度,$E_{\mathrm{trap}}$为陷阱能级和本征费米能级的差值,$T_{\mathrm{L}}$为晶格温度,$c_{\mathrm{n}}$和$c_{\mathrm{p}}$为俄歇复合系数。

#### 1.1.2　迁移率模型

迁移率是局部电场、晶格温度、掺杂浓度等的函数,反映了载流子在电场作用下的运输能力。在仿真时使用浓度依赖迁移率模型(Conmob)和平行电场依赖模型(Fldmob)。Conmob模型与材料杂质浓度相关,该模型考虑了半导体中载流子在300 K以及低电场的迁移率随着掺杂浓度的变化而变化。Fldmob阐述了在饱和漂移速度下有效迁移率减少的现象[17],是一种在高、低电场间转换时的迁移率平滑过渡的模型。低电场下迁移率模型表达式为:

$$\mu_n(E)=\mu_{n0}\left[\frac{1}{1+\left(\frac{\mu_{n0}E}{v_{satn}}\right)^{\frac{1}{BATEN}}}\right]^{\frac{1}{BATEN}} \tag{3}$$

$$\mu_p(E)=\mu_{p0}\left[\frac{1}{1+\left(\frac{\mu_{p0}E}{v_{satp}}\right)^{\frac{1}{BATEP}}}\right]^{\frac{1}{BATEP}} \tag{4}$$

式中，$\mu_{n0}$和$\mu_{p0}$代表的是低电场下电子迁移率和空穴迁移率，$v_{satn}$和$v_{satp}$分别为电子饱和漂移速度和空穴饱和漂移速度。$BATEN$，$BATEP$代表的是与晶格温度相关的系数。

1.1.3 碰撞电离模型

碰撞电离是APD工作的主要物理过程。在APD中，碰撞电离模型的选取决定了雪崩倍增的结果，它可以通过载流子的产生速率定义[18]：

$$G=\alpha_n n v_n+\alpha_p p v_p \tag{5}$$

式中，$G$为电子-空穴对的局部产生率，$\alpha_n$和$\alpha_p$分布代表电子碰撞电离系数和空穴碰撞电离系数，$v_n$和$v_p$分别为电子和空穴的漂移速率。该模拟中使用了IMPACT SELB碰撞电离模型。AlGaAsSb碰撞电离系数的计算将在后面详细说明。

在本设计涉及的一些物理模型中，可能会存在一些局限性。如在碰撞电离模型中可能没有考虑温度对载流子运输和电离过程的影响。因此，在仿真时也添加了与温度相关的物理模型，以考虑温度变化对器件性能的影响，后续也会通过实验来进行验证和优化。采用等效材料的方法处理了超晶格材料的能带结构和物理参数。利用SILVACO-ATLAS进行器件建模与数值模拟，ATLAS中物理模型状态是由MODELS和IMPACT指定，能带结构基于$k\cdot p$模型，输运特性基于漂移-扩散模型、碰撞电离模型和泊松方程。表1总结了300 K下InAs/GaSb和AlGaAsSb材料的主要参数[19-20]。

**表1 300 K下InAs/GaSb和AlGaAsSb的主要材料参数**

| 参数 | 8 MLs InAs/6 MLs GaSb | $Al_{0.30}GaAs_{0.02}Sb$ |
|---|---|---|
| 禁带宽度/eV | 0.258 | 1.149 |
| SRH复合的电子寿命/s | $8\times10^{-8}$ | $1\times10^{-9}$ |
| 电子亲和势/eV | 4.06 | 3.93 |
| SRH复合的空穴寿命/s | $4\times10^{-8}$ | $1\times10^{-9}$ |
| 电子迁移率/($cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$) | 1 000 | 1 300 |
| 空穴俄歇系数/($cm^6\cdot s^{-1}$) | $4\times10^{-29}$ | $5\times10^{-30}$ |
| 空穴迁移率/($cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$) | 500 | 3 100 |
| 电子俄歇系数/($cm^6\cdot s^{-1}$) | $4\times10^{-27}$ | $5\times10^{-30}$ |
| 介电常数 | 15.3 | 14.5 |

## 1.2 AlGaAsSb碰撞电离参数的计算

根据局部电场雪崩理论[21]，APD的过剩噪声和增益都由倍增区的电子碰撞电离系数($\alpha$)和空穴碰撞电离系数($\beta$)决定。对于AlGaAsSb四元合金，不同组分下的碰撞电离参数会有所不同，从而影响空穴电子电离系数比$k$($k=\alpha/\beta$)值的变化，对于空穴倍增型APD来说，$k$值越低，过剩噪声越小。碰撞电离系数依赖于材料的带隙、电荷载流子的有效质量和电场分布等因素。对于不同组分下AlGaAsSb四元合金碰撞电离系数的计算，Donnelly等[22]提出基于准物理模型的碰撞电离系数函数，表达式为：

$$\alpha(E,T)=\frac{E}{E_{th_e}}\exp\left[-\frac{E_{th_e}}{\frac{\left(F\lambda_{0-e}\tan\left(E_{p0-e}/2k_BT\right)\right)^2}{3E_{p0-e}\tan\left(E_{p0-e}/2k_BT\right)}+F\lambda_{0-e}\tan\left(E_{p0-e}/2k_BT\right)+k_BT}\right] \tag{6}$$

$$\beta(E,T)=\frac{E}{E_{th_h}}\exp\left[-\frac{E_{th_h}}{\frac{\left(F\lambda_{0-h}\tan\left(E_{p0-h}/2k_BT\right)\right)^2}{3E_{p0-h}\tan\left(E_{p0-h}/2k_BT\right)}+F\lambda_{0-h}\tan\left(E_{p0-h}/2k_BT\right)+k_BT}\right] \tag{7}$$

式中，$\lambda$为声子平均自由程，$E_p$为声子能量，$E_{th}$为阈值能量，$E$为电场，$k_B$为玻尔兹曼常数，$T$为开尔文温度。由于SILVACO-ATLAS软件的碰撞电离使用了SELB模型，如公式(8)和(9)所示：

$$\alpha = AN\exp\left[-\left(\frac{BN}{E}\right)^{BETAN}\right] \tag{8}$$

$$\beta = AP\exp\left[-\left(\frac{BP}{E}\right)^{BETAP}\right] \tag{9}$$

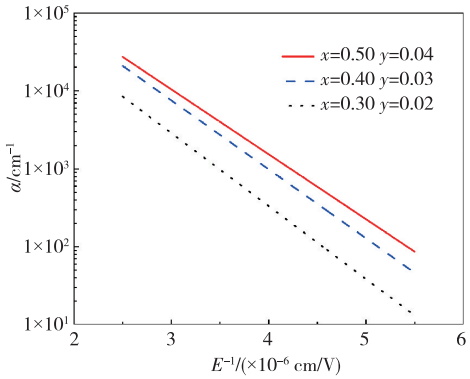
式中，$AN$，$BN$，$AP$，$BP$为四个碰撞电离参数。为了与ATLAS平台模型兼容，将基于准物理模型计算的数据，通过拟合得到匹配SELB模型的参数。

为了获得与GaSb晶格匹配下的AlGaAsSb四元合金的最小碰撞电离系数比值，根据AlGaAsSb的晶格常数以及应变随Al组分的变化关系进而选择三种组分的四元合金进行碰撞电离系数的计算，AlGaAsSb的晶格常数可以通过对AlSb，GaSb，AlAs，GaAs二元系进行线性插值得到[23]：

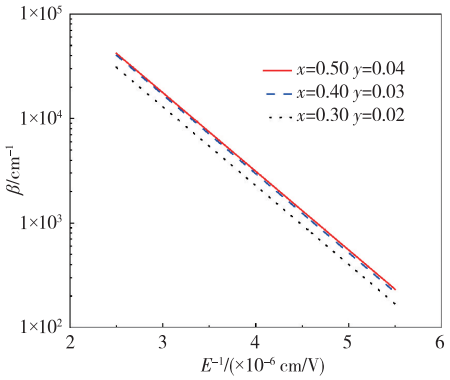
$$a_{AlGaAsSb} = \left[x\cdot a_{AlSb} + (1-x)\cdot a_{GaSb}\right]\cdot(1-y) + \left[x\cdot a_{AlAs} + (1-x)\cdot a_{GaAs}\right]\cdot y \tag{10}$$

当AlGaAsSb与GaSb匹配时，由公式(10)可得$x$，$y$的组分关系，分别取三组：$x$=0.3，$y$=0.02，$x$=0.4，$y$=0.03和$x$=0.5，$y$=0.04，由公式(6)和(7)计算得到在300 K下的碰撞电离系数如图1所示，空穴的碰撞电离系数大于电子的碰撞电离系数，$k$随着Al组分的增加而增加，因此对于空穴倍增型APD，$k$值越小过剩噪声越低，最终确定Al组分为0.3，As组分为0.02。

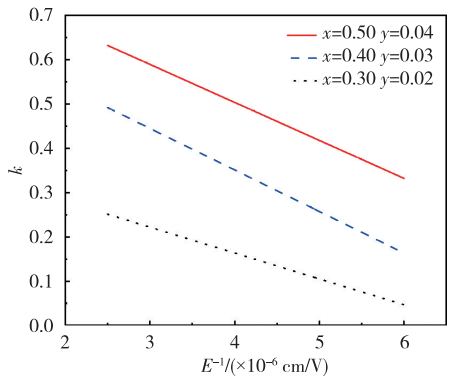
再利用MATLAB将由公式(6)和(7)给出的碰撞电离模型与SELB碰撞电离模型进行拟合，从而得到最佳的$AN$，$AP$，$BN$，$BP$四个碰撞电离参数值，如图2(a)和图2(b)所示。




(a) 电子碰撞电离系数与电场的关系

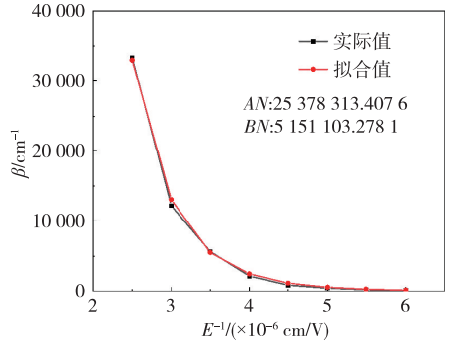



(b) 空穴碰撞电离系数与电场的关系

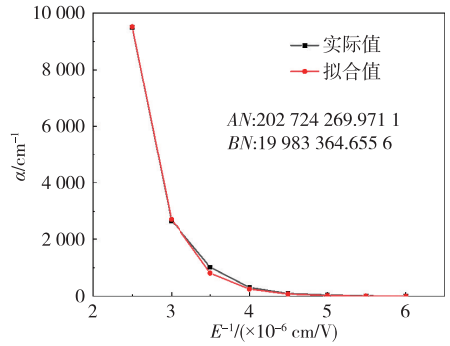



(c) $k$值与电场的关系

图1　在300 K下，不同合金组分的电子碰撞电离系数、空穴碰撞电离系数和不同组分下的$k$值与电场关系




(a) 电子碰撞电离系数的拟合曲线




(b) 空穴碰撞电离系数的拟合曲线

图2　基于SELB模型的电子碰撞电离系数和空穴碰撞电离系数的拟合曲线

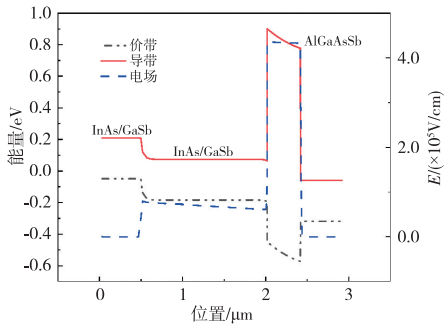
### 1.3 器件结构设计

所设计的锑化物中波APD的结构如图3(a)所示,该探测器自上而下分别为:0.02 μm厚N型InAs盖层;0.5 μm厚N型8 MLs InAs/6 MLs GaSb上接触层并进行$5\times10^{18}$ cm$^{-3}$的掺杂;吸收红外辐射并转化为电子-空穴对的8 MLs InAs/6 MLs GaSb吸收层;接收空穴并维持光生载流子雪崩过程的$Al_{0.3}GaAs_{0.02}Sb$倍增层;0.5 μm厚P型8 MLs InAs/6 MLs GaSb下接触层并进行$5\times10^{18}$ cm$^{-3}$的掺杂;0.5 μm厚GaSb缓冲层;以N型GaSb为衬底。该探测器的光照方向为自上而下垂直照射,电极和半导体材料之间的接触设置为欧姆接触。在掺杂过程中以Si和Be分别作为n型掺杂和p型掺杂。

图3(b)为器件在300 K下的能带结构和电场分布图。电场分布在APD中起着至关重要的作用,它决定了载流子在吸收区的分离和倍增层的碰撞电离过程。根据图3(b)可以看出,吸收层的电场一般较小,避免发生碰撞电离,并且要有足够的强度满足漂移速度(带宽)的要求,倍增层内的电场强度达到了100 kV/cm以上,保证了倍增层有足够大的电场来发生碰撞电离。




(a) 雪崩光电探测器结构图




(b) 能带结构与电场分布图

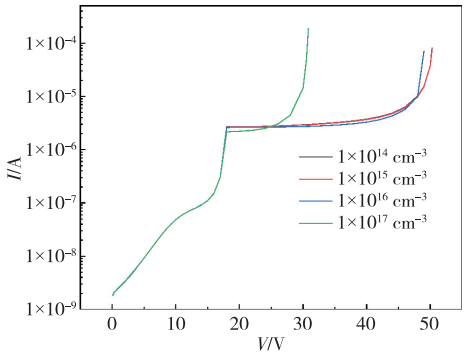
图3 雪崩光电探测器结构与电场分布图

## 2 仿真优化分析

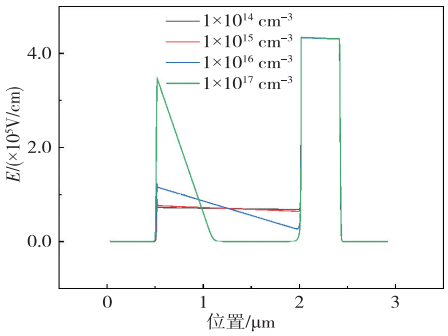
### 2.1 吸收层掺杂浓度对器件性能的影响

固定8 MLs InAs/6 MLs GaSb吸收层厚度为1.5 μm,对吸收层分别进行$1\times10^{14}$,$1\times10^{15}$,$1\times10^{16}$,$1\times10^{17}$ cm$^{-3}$的N型掺杂,在此基础上研究300 K下吸收层掺杂浓度对器件性能的影响。

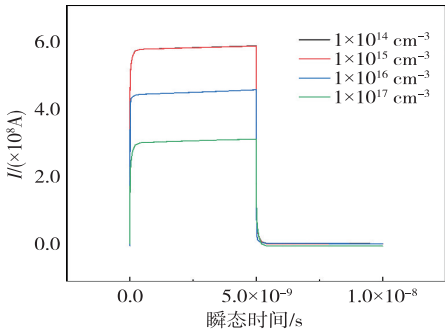
图4(a)显示了器件在300 K时的*I-V*曲线,当掺杂浓度增加时,即电子浓度增大,相应的少子空穴浓度减小,对应的空间电荷区宽度变窄,导致在室温下占主导因素的产生-复合电流被抑制,从而使得暗电流减小。器件内部的电场分布也会随着掺杂浓度的变化而变化,当掺杂浓度为$1\times10^{14}$和$1\times10^{15}$ cm$^{-3}$时,吸收区电场分布均匀,当掺杂浓度为$1\times10^{16}$和$1\times10^{17}$ cm$^{-3}$时,吸收区电场升高并逐渐倾斜,严重影响器件性能,图4(b)为在28 V时的电场分布图。如图4(c)所示,在工作电压(一般取击穿电压的0.9倍)下,随着掺杂浓度的增加使得探测器的稳态电流逐渐减小,掺杂浓度在$1\times10^{15}$ cm$^{-3}$以内响应特性变化不大,当掺杂浓度高于$1\times10^{15}$ cm$^{-3}$时,响应特性逐渐变差。为得到低暗电流、高性能的探测器,综合考虑内部电场以及瞬态响应对器件性能的影响,吸收层掺杂浓度应该保持在$1\times10^{15}$ cm$^{-3}$内,采用吸收层掺杂浓度为$1\times10^{15}$ cm$^{-3}$。




(a) 不同吸收层掺杂浓度下的*I-V*曲线




(b) 不同吸收层掺杂浓度对电场强度的影响



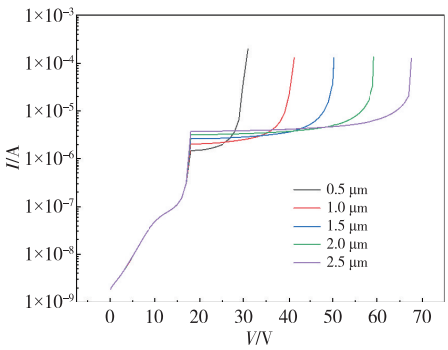

（c）不同吸收层掺杂浓度对瞬态响应的影响

图 4　不同吸收层掺杂浓度对器件性能的影响

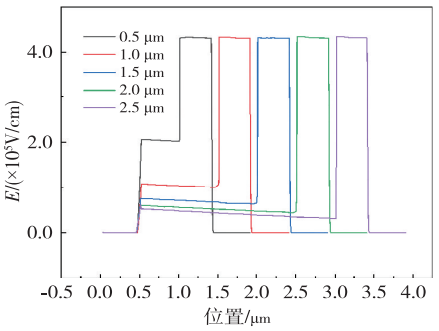
## 2.2　吸收层厚度对器件性能的影响

将 8 MLs InAs/6 MLs GaSb吸收层掺杂浓度设为 $1\times10^{15}$ cm$^{-3}$，厚度分别取 0.5，1，1.5，2，2.5 μm 等 5 组变量，在此基础上研究 300 K 下吸收层厚度对器件性能的影响。

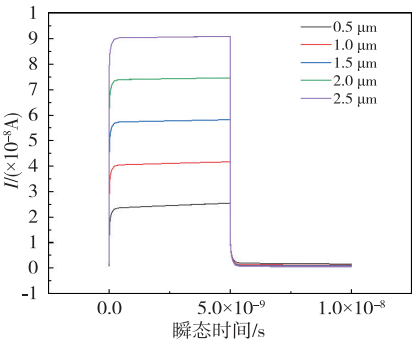
当吸收层厚度从 0.5 μm 增加到 2.5 μm 时，会引起缺陷和杂质的总数量增加，载流子有更多的机会在吸收层中与杂质或缺陷中心发生 SRH 复合，导致暗电流增加。由图 5(a)可知，在相同的偏压下厚度为 2.5 μm 时暗电流最大；在偏置电压不变的情况下，吸收层厚度增加使得吸收层电场降低。如图 5(b)所示为在 28 V 时的电场分布，当吸收层厚度大于 1.5 μm 时，吸收层内的电场超过 100 kV/cm 以上，已经达到发生雪崩倍增的要求，会引起载流子发生强烈的碰撞电离；当厚度小于 1.5 μm 时可能会导致电场太低而没有足够的强度满足漂移速度的要求。由图 5(c)可知，在工作电压下，吸收层厚度增大会引起器件在光脉冲作用下产生的稳态电流依次增加，器件的响应特性得到改善，同时厚度增加也会引起响应时间的增加，在厚度为 0.5 μm 时的响应时间最差，在 2.5 μm 时的响应时间最长。因此，综合考虑吸收层厚度对器件性能的影响，后续采用 1.5 μm 作为吸收层厚度。




（a）不同吸收层厚度下的 $I$-$V$ 曲线




（b）不同吸收层厚度对电场强度的影响



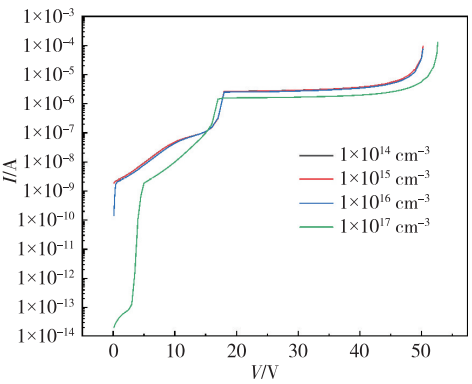

（c）不同吸收层厚度对瞬态响应的影响

图 5　不同吸收层厚度对器件性能的影响

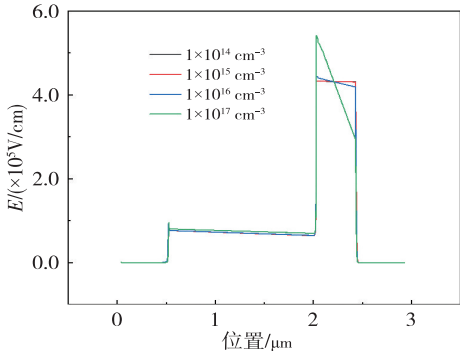
## 2.3　倍增层掺杂浓度对器件性能的影响

将倍增层厚度设为 0.4 μm，对倍增层分别进行 $1\times10^{14}$，$1\times10^{15}$，$1\times10^{16}$，$1\times10^{17}$ cm$^{-3}$ 的 N 型掺杂，在此基础上研究 300 K 下倍增层掺杂浓度对器件性能的影响。

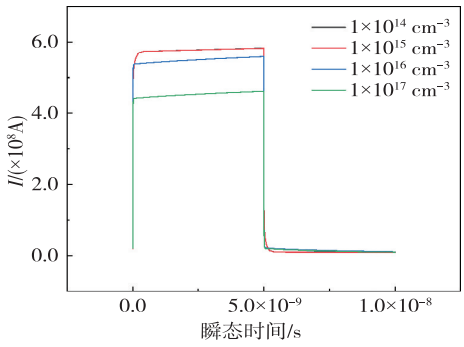
如图 6(a)所示，当倍增层掺杂浓度增加时，AlGaAsSb 倍增层的空间电荷区会向 InAs/GaSb 吸收层延伸，从而导致倍增层中的空间电荷区变窄，抑制了复合电流的生成，降低器件的暗电流。从图 6(b)可以看出，在 28 V 时倍增区内的电场强度随着掺杂浓度的升高而逐渐倾斜，使得电场分布不均匀，载流子在倍增过程中可能产生更多的随机性，从而使噪




（a）不同倍增层掺杂浓度下的 $I$-$V$ 曲线




（b）不同倍增层掺杂浓度对电场强度的影响




（c）不同倍增层掺杂浓度对瞬态响应的影响

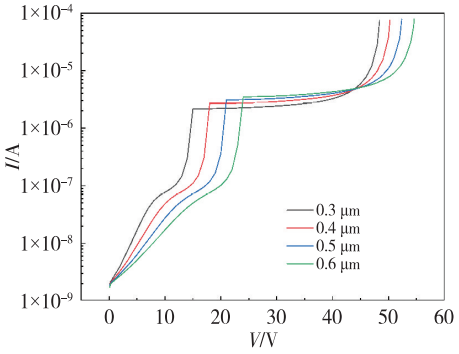
图6 不同倍增层掺杂浓度对器件性能的影响

声增加，器件内部电场逐渐倾斜并分布不均匀，而且响应特性也逐渐变差。综上所述，当掺杂浓度在$1\times10^{15}$ $cm^{-3}$以内时，器件的暗电流、电场以及瞬态响应基本不变，当掺杂浓度高于$1\times10^{15}$ $cm^{-3}$时，器件的电场逐渐倾斜并且瞬态响应严重下降。所以吸收层掺杂浓度应该保持在$1\times10^{15}$ $cm^{-3}$以内，后续采用掺杂浓度为$1\times10^{15}$ $cm^{-3}$。

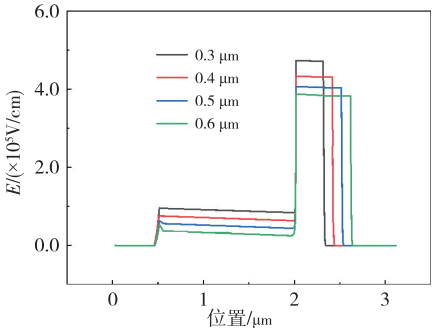
### 2.4 倍增层厚度对器件性能的影响

将倍增层掺杂浓度设为$1\times10^{15}$ $cm^{-3}$，厚度取0.3，0.4，0.5和0.6 μm等4组变量，在此基础上研究300 K下倍增层厚度对器件性能的影响。

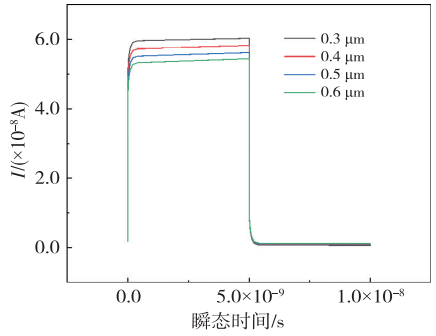
如图7(a)所示，当倍增层厚度从0.3 μm增加至0.6 μm时，器件的穿通电压从14 V增到24 V，击穿电压从46 V增加至54 V，倍增层厚度增加会使倍增层最大电场强度减小，为了达到相同的倍增效应则需要更高的偏压，因此探测器的击穿电压和穿通电压都会增大。倍增层厚度增加也会引入更多的晶体缺陷，这种缺陷可以作为复合中心，由于产生-复合电流的增加暗电流也随之增加，在0.6 μm时暗电流最大；不同厚度下，在28 V时的电场分布如图7(b)所示，可以看出倍增区的电场强度会随着倍增层厚度的增加而减小，从而减少载流子在倍增层中的碰撞电离，影响器件的增益。由图7(c)可知，随着倍增层厚度的减小稳态时电流增大，且到达稳态电流时所需时间越短，开关特性变好。综合上述仿真结果分析，当倍增层厚度从0.3 μm增加至0.6 μm时，器件的暗电流升高、瞬态响应逐渐变差以及内部电场也逐渐下降，因此倍增层不宜过厚。如果倍增区太薄，会导致达到倍增区的载流子因死区影响，雪崩时间太短，使得雪崩过程未能充分完成，导致器件响应性能下降，因此采用0.4 μm作为倍增层厚度。




（a）不同倍增层厚度下的$I$-$V$曲线




（b）不同倍增层厚度对电场强度的影响



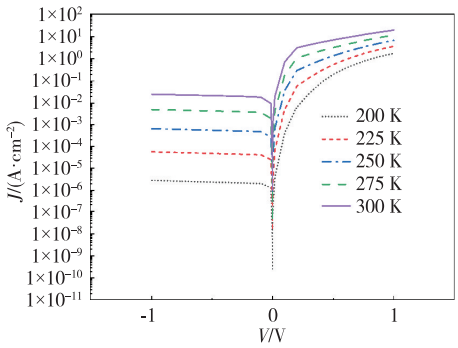

（c）不同倍增层厚度对瞬态响应的影响

图7 不同倍增层厚度对器件性能的影响

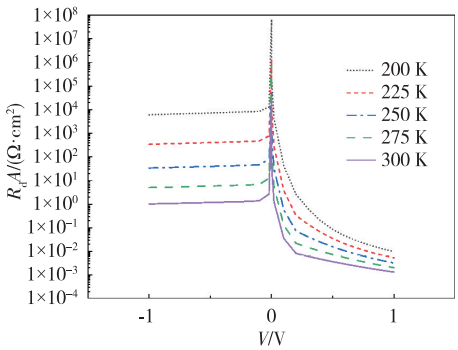
## 3 器件性能分析

根据优化结果，将8 MLs InAs/6 MLs GaSb吸收

层厚度设为1.5 μm,掺杂浓度为$1\times10^{15}$ cm$^{-3}$;倍增层四元合金组分为$Al_{0.3}GaAs_{0.02}Sb$,厚度设为0.4 μm,掺杂浓度为$1\times10^{15}$ cm$^{-3}$。为了研究温度对器件性能的影响,仿真了从200～300 K下的暗电流密度($J_{Dark}$)和微分电阻面积乘积($R_dA$)随偏压变化的关系。图8(a)表明探测器的暗电流密度会随着温度的降低而减小,由于热激发,暗电流密度在较低的偏压下达到饱和状态,耗尽层中的产生-复合电流为暗电流的主要机制。相邻曲线的间隔随着温度的升高而减小,表明载流子的产生-复合速率随着温度的升高而减慢。在较大偏压尤其是较高温度下,暗电流密度明显上升,这是由于带间隧穿引起的。由图8(b)可知$R_dA$随着温度的升高而降低,在－400 mV偏置电压下,200 K下的$R_dA$为$7.5\times10^3$ Ω·cm$^2$,300 K下的$R_dA$=1.21 Ω·cm$^2$,如表2所示,可以更加清晰的发现温度的变化对器件的性能有着显著的影响。




(a) 不同温度下的暗电流密度




(b) 不同温度下的$R_dA$

图8　不同温度下暗电流密度和$R_dA$与偏压的关系

归一化探测率($D^*$)是光电探测器的一个重要性能指标,即比探测率。该指标描述的是探测器对弱光的探测能力。主要参数公式为:

$$D^*=R_i\left[2qJ+\frac{4kT}{R_0A}\right]^{-1/2} \tag{11}$$

**表2 －400 mV偏置电压下,温度变化对暗电流和$R_dA$的影响**

| 温度/K | $J$/(A·cm$^{-2}$) | $R_dA$/(Ω·cm$^2$) |
|---|---|---|
| 200 | $2.29\times10^{-6}$ | 7 543.004 |
| 225 | $4.61\times10^{-5}$ | 420.855 |
| 250 | $5.25\times10^{-4}$ | 41.054 |
| 275 | 0.004 | 6.037 |
| 300 | 0.021 | 1.210 |

式中,$R_i$为光响应度;$q$为元电荷的电荷量;$J$为暗电流密度;$k$为玻尔兹曼常数;$T$为开尔文温度值;$R_0A$为品质因子,其值为零偏压下$R_dA$的大小。如图9所示,在300 K温度下,由公式(11)计算得到在工作电压下的探测率可达到$2.39\times10^{11}$ cm·Hz$^{1/2}$·W$^{-1}$。通过文献调研,中波红外探测器在高温下(160～300 K)工作的探测率主要分布在$10^9$～$10^{11}$ cm·Hz$^{1/2}$·W$^{-1}$之间[24-27]。最近报道的InAsSb-PCBN结构的MWIR探测器在300 K下的探测率为$7.9\times10^9$ cm·Hz$^{1/2}$·W$^{-1}$[26],InAsSb-NW结构的MWIR探测器在300 K下的探测率为$4.81\times10^{11}$ cm·Hz$^{1/2}$·W$^{-1}$[27],相比之下,该探测器具有在室温下工作的潜力。

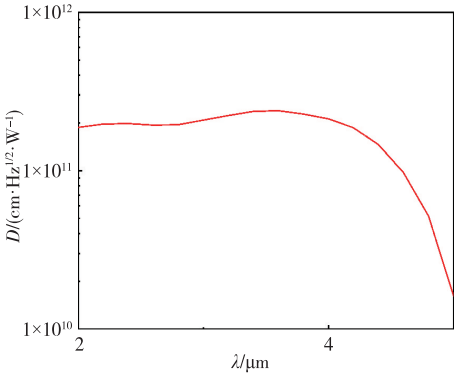



图9　300 K下的归一化探测率

雪崩光电探测器的倍增因子定义为有倍增时光电流与没有倍增时光电流之比,可用公式(12)表示为:

$$M=\frac{I_p-I_d}{I_{p0}-I_{d0}} \tag{12}$$

式中,$I_p$和$I_d$分别表示倍增工作电压下的光照总电流和暗电流;$I_{p0}$和$I_{d0}$分别为没有发生倍增(通常取穿通电压处)的光照总电流和暗电流。当温度为300 K时,增益随偏置电压的变化如图10所示,在工作电压处的增益为16.4,在击穿电压处的最大增益为129.5。

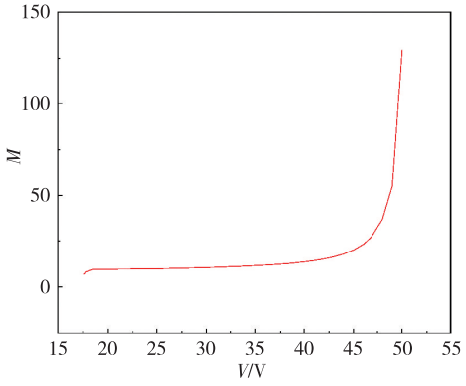



图 10 器件在 300 K 下的增益与偏置电压的关系

## 4 结论

文中首先通过构建 AlGaAsSb 合金的碰撞电离模型计算了碰撞电离参数，并通过比较空穴电子电离系数的比值选择了合适的四元合金组分。然后利用 SILVACO-TCAD 软件对锑化物中波 APD 进行仿真建模并研究了光学和电学性质，分析了吸收层和倍增层的厚度和掺杂浓度等结构参数对器件的 $I$-$V$ 特性、电场分布以及瞬态响应的影响，通过优化结构参数来减小器件的暗电流以及提高其性能，得到了器件结构的各个参数。此外，还讨论了温度对 $I$-$V$ 特性和微分电阻面积乘积（$R_dA$）的影响，结果显示暗电流密度会随着温度的升高而升高，而 $R_dA$ 会随着温度的升高而减小。仿真结果表明，在 300 K 下 APD 在工作电压下的增益为 16.4，在击穿电压处的最大增益为 129.5。比探测率达到了 $2.39\times10^{11}$ cm·Hz$^{1/2}$·W$^{-1}$，与其他在 300 K 下工作的探测器相比该探测器具有在室温下工作的潜力，且所设计的 APD 器件结构较为简单，能为锑化物中波红外雪崩光电探测器的设计和材料生长提供一定的参考价值。由于 APD 内部的增益机制和暗电流机制比较复杂，本文的模型未必能充分反应不同的物理机制和相互耦合关系，而且仿真结构与实际工艺会有偏差，后续需要通过材料生长、器件工艺和测试分析来进行验证，并将会在器件的结构设计和建模方面做出改进。

**参考文献：**

[1] Campbell J C. Recent advances in telecommunications avalanche photodiodes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(1): 109-121.

[2] Storebø A K, Brudevoll T, Selvig E, et al. Effect of the series resistance on the current response of a HgCdTe avalanche photodiode under high-intensity nanosecond irradiation [J]. Journal of Electronic Materials, 2022, 51(7): 4029-4039.

[3] Alimi Y, Pusino V, Steer M J, et al. InSb avalanche photodiodes on GaAs substrates for mid-infrared detection[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(1): 179-184.

[4] Huang J, Zhao C, Nie B, et al. High-performance mid-wavelength InAs avalanche photodiode using $AlAs_{0.13}Sb_{0.87}$ as the multiplication layer [J]. Photonics Research, 2020, 8(5): 755.

[5] Dehzangi A, Li J, Gautam L, et al. Avalanche photodetector based on InAs/InSb superlattice[J]. Quantum Reports, 2020, 2(4): 591-599.

[6] Yan S, Huang J, Zhang Y, et al. Mid wavelength type Ⅱ InAs/GaSb superlattice avalanche photodiode with AlAsSb multiplication layer[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(11): 1634-1637.

[7] Banerjee K, Ghosh S, Mallick S, et al. Midwave infrared InAs/GaSb strained layer superlattice hole avalanche photodiode [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(20): 201107.

[8] Perrais G, Rothman J, Destefanis G, et al. Impulse response time measurements in $Hg_{0.7}Cd_{0.3}Te$ MWIR avalanche photodiodes[J]. Journal of Electronic Materials, 2008, 37(9): 1261-1273.

[9] Jones A H, March S D, Bank S R, et al. Low-noise high-temperature AlInAsSb/GaSb avalanche photodiodes for 2 μm applications[J]. Nature Photonics, 2020, 14(9): 559-563.

[10] Tan C H, Velichko A, Lim L W, et al. Few-photon detection using InAs avalanche photodiodes [J]. Optics Express, 2019, 27(4): 5835-5842.

[11] 朱旭波，彭震宇，曹先存，等. InAs/GaSb二类超晶格中/短波双色红外焦平面探测器[J]. 红外与激光工程，2019，48(11)：102-107.
Zhu Xubo, Peng Zhenyu, Cao Xiancun, et al. Mid-/short-wavelength dual-color infrared focal plane arrays based on type-Ⅱ InAs/GaSb superlattice [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(11): 102-107.

[12] Li J, Dehzangi A, Brown G, et al. Mid-wavelength infrared avalanche photodetector with AlAsSb/GaSb superlattice[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 7104.

[13] Ren M, Maddox S J, Woodson M E, et al. AlInAsSb separate absorption, charge, and multiplication avalanche photodiodes[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(19): 191108.

[14] Donnelly J P, Duerr E K, McIntosh K A, et al. Design considerations for 1.06 μm InGaAsP-InP geiger-mode avalanche photodiodes [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2006, 42(8): 797-809.

[15] Taylor-Mew J, Shulyak V, White B, et al. Low excess noise of $Al_{0.85}Ga_{0.15}As_{0.56}Sb_{0.44}$ avalanche photodiode from pure electron injection [J]. IEEE Photonics Technology Letters,

2021，33(20)：1155-1158.

[16] Pinel L L G，Dimler S J，Zhou X，et al. Effects of carrier injection profile on low noise thin $Al_{0.85}Ga_{0.15}As_{0.56}Sb_{0.44}$ avalanche photodiodes[J]. Optics Express，2018，26(3)：3568-3576.

[17] Caughey D M，Thomas R E. Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field[J]. Proceedings of the IEEE，1967，55(12)：2192-2193.

[18] Van Overstraeten R，Man H D. Measurement of the ionization rates in diffused silicon p-n junctions[J]. Solid-State Electronics，1970，13(5)：583-608.

[19] Liu W，Zhu L，Zhang D，et al. Optimization of NBN dual-band mid-/long-wavelength detector based on InAs/GaSb superlattice[J]. 2023，52(9)：81-93.

[20] Parola S，Vauthelin A，Tournet J，et al. Improved efficiency of GaSb solar cells using an $Al_{0.50}Ga_{0.50}As_{0.04}Sb_{0.96}$ window layer[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells，2019，200：110042.

[21] McIntyre R J. Multiplication noise in uniform avalanche diodes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices，1966，ED-13(1)：164-168.

[22] Grzesik M，Donnelly J，Duerr E，et al. Impact ionization in $Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$ avalanche photodiodes [J]. Applied Physics Letters，2014，104(16)：162103.

[23] Nakwaski W. Thermal conductivity of binary，ternary，and quaternary Ⅲ-Ⅴ compounds[J]. Journal of Applied Physics，1988，64(1)：159-166.

[24] Chen S，Yu D，Qiliang L. High-performance nonequilibrium InSb pin infrared photodetectors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices，2019，66(3)：1361-1367.

[25] Donghai W，Jiakai L，Arash D，et al. Mid-wavelength infrared high operating temperature pBn photodetectors based on type-Ⅱ InAs/InAsSb superlattice[J]. AIP Advances，2020，10(2)：025018.

[26] Deng G，Yang W，Gong X，et al. High-performance uncooled InAsSb-based pCBn mid-infrared photodetectors[J]. Infrared Physics & Technology，2020，105：103260.

[27] Suo F，Tong J，Zhang D H. Dark current analysis of InAsSb-based hetero-pin mid-infrared photodiode[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics，2020，56(1)：4400106.

**作者简介：**

**王佩炎**(2000—)，男，湖南省湘潭市人，硕士研究生，主要从事锑化物超晶格雪崩光电探测器方面的研究；

**陈伟强**(1994—)，男，山东省潍坊市人，工学博士，讲师，主要从事锑化物二类超晶格红外探测器方面的研究。