

不同晶态 Ge 薄膜键合层对 InGaAs/Si 雪崩光电二极管性能的影响研究

鲍诗仪, 母浩龙, 周锦荣, 黄志伟, 柯少颖*

闽南师范大学物理与信息工程学院, 福建 漳州 363000

摘要 由于 InGaAs 与 Si 之间存在 7.7% 的晶格失配, 因此难以获得制备方式简单、性能良好的 InGaAs/Si 雪崩光电二极管 (APD)。从理论上提出了一种从源头弱化 InGaAs/Si 晶格失配对 APD 性能影响的办法, 即在 InGaAs/Si 键合界面引入一层 a-Ge 或 poly-Ge 键合层, 模拟比较了 InGaAs/Si APD 性能随键合层厚度的变化情况。研究指出, a-Ge 和 poly-Ge 材料作为键合层对载流子有阻挡或俘获作用, 因此器件能够获得超低暗电流, 且由于键合层导带势垒对载流子的阻挡作用, APD 雪崩之后出现了光暗电流间隙, 可以在较小暗电流情况下获得大的光电流。当 a-Ge 厚度为 0.5 nm 时, APD 雪崩击穿前增益可达最大值 451.3, 而当 poly-Ge 厚度为 0.5 nm 时, 雪崩击穿前增益仅为 7.9。这种差异是由于 poly-Ge 键合层处价带出现了势阱, 载流子浓度下降。该工作为超低噪声和高增益 InGaAs/Si APD 的研制提供了理论指导。

关键词 材料; 雪崩光电二极管; InGaAs/Si 键合; poly-Ge 键合层; a-Ge 键合层; 晶格失配

中图分类号 TN315

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221108

1 引言

雪崩光电二极管 (APD) 是一种常见的光电探测器, 其在传统光电二极管 (PD) 的基础上增加了倍增区, 从而实现了极高的内部增益, 获得了更高的灵敏度^[1], 目前已被广泛应用于光纤通信^[2]、单光子计数和激光雷达^[3-4]等领域。由于 APD 具有体积小、灵敏度高、响应速度快等优点, 在无线通信领域已成为研究热点^[5-6]。在光电探测器的制备中, InGaAs 材料由于在近红外波长范围内具有高的吸收系数^[7], 且具有电子迁移率高、稳定性好和量子效率高等特性^[8], 成为了近红外吸收的首选半导体材料。目前常见的用于构建 APD 倍增层的材料为 Si 或 InP, 由于 InP 与 InGaAs 晶格匹配, 能够外延出高质量的 APD 结构, 因此 InGaAs/InP APD 一度成为主流的研究方向^[9-14], InGaAs/InP 单光子探测器的性能也得到了进一步提升, 能够满足量子通信、激光雷达等领域的应用要求^[15]。但由于 InP 材料本身的限制, 如电子、空穴电离系数比 (k 值) 接近 1, InP 基 APD 过剩噪声大、增益带宽积小^[16-17], 且 InP 材料制备的 APD 器件制作工艺复杂、成本较高, 故 InGaAs/InP APD 难以应用在一些需要微弱光探测的特殊场合。而 Si 材料的 k 值低至 0.02, 有着比 InP 材料更低的缺陷密度, 这使得以 Si 材料作为倍增层的 APD 有望实现更低

的暗电流和更高的增益^[18-22]。

综上所述, 将 InGaAs 材料作为吸收层及 Si 材料作为倍增层是实现高性能 APD 的潜在替代方案, 因此 InGaAs/Si APD 近些年来逐渐受到广泛关注^[23]。但由于 InGaAs 材料和 Si 材料存在 7.7% 的晶格失配, 因此在 Si 材料上直接外延生长 InGaAs 薄膜容易产生高密度位错, Si 基外延 InGaAs APD 难以实现。虽然 Hawkins 等^[24]的早期工作证明了 InGaAs/Si APD 可以通过晶圆键合来实现, 但报道的 InGaAs/Si APD 仍然存在着键合界面晶格失配导致的暗电流较大、噪声较高等问题。虽然后续 Pan 等^[25]再次优化了该工艺, 解决了 InGaAs/Si APD 暗电流变大的问题, 然而键合界面晶格失配问题依然没有得到根本解决。

近年来, 有研究采用直接键合法或引入半导体中间层键合法从理论或实验上实现了性能更加优良的 InGaAs/Si APD, 如宋海兰等^[26]采用硼化物溶液表面处理工艺设计制造了具有低暗电流和良好光谱响应的 InGaAs/Si APD; 余实现等^[27]通过在 InGaAs/Si 键合界面处引入 a-Si 键合层消除了 InGaAs 和 Si 之间的晶格失配, 从而获得了超低噪声的 InGaAs/Si APD。这些工作为制备高性能的 InGaAs/Si APD 提供了新的途径。

半导体中间层键合技术是通过在键合界面处引入半导体作为键合中间层来弱化两种材料之间的晶格失

收稿日期: 2022-08-05; 修回日期: 2022-09-08; 录用日期: 2022-09-18; 网络首发日期: 2022-09-28

基金项目: 国家自然科学基金 (62004087)、福建省自然科学基金 (2020J01815)、漳州市自然科学基金 (ZZ2020J32)

通信作者: *syke@mnnu.edu.cn

配对 APD 性能的影响,从而抑制失配位错成核。人们对该方法的研究起步较晚,相关研究报道较少。近期已有研究报道了在 InGaAs/Si APD 键合界面处 a-Si 对 APD 性能的影响,但由于 a-Si 带隙较大,存在较大的导带和价带带阶,因此器件增益下降。Ge 与 Si 同属间接带隙半导体,且 Ge 材料具有禁带宽度小和红外吸收截止波长长等优点^[28]。因此,为了解决该问题,本文通过在 InGaAs/Si 键合界面引入 a-Ge 或 poly-Ge 半导体中间层,从理论上模拟对比了 a-Ge 或 poly-Ge 厚度对 InGaAs/Si APD 不同性能参数的影响,并分析了各个性能参数之间的联系,获得了具有超低暗电流和超高增益的 InGaAs/Si APD。

2 结构模型与模拟软件

本文基于以下理论对 InGaAs/Si APD 器件性能进行计算。

泊松方程表示为

$$\operatorname{div}(\epsilon \nabla \psi) = -\rho, \quad (1)$$

式中: ψ 、 ϵ 和 ρ 分别为静电势、介电常数和空间电荷密度。

载流子运输模型表示为

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} J_n + G_n - R_n, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} J_p + G_p - R_p, \quad (3)$$

$$J_n = -q \mu_n n \nabla \Phi_n, \quad (4)$$

$$J_p = -q \mu_p p \nabla \Phi_p, \quad (5)$$

式中: J_n 和 J_p 分别表示电子和空穴的电流密度; G_n 和

G_p 分别表示电子和空穴的产生速率; R_n 和 R_p 分别表示电子和空穴的复合率; q 、 μ_n 和 μ_p 分别表示单位电子电荷量、电子的迁移率和空穴的迁移率; n 表示电子浓度; p 表示空穴浓度; Φ_n 表示 n 型半导体的准费米能级; Φ_p 表示 p 型半导体的准费米能级。

俄歇复合模型表示为

$$R_{\text{Auger}} = A_n(pn^2 - nn_{\text{ie}}^2) + A_p(np^2 - pn_{\text{ie}}^2), \quad (6)$$

式中: R_{Auger} 为俄歇复合率; A_n 和 A_p 分别为电子和空穴俄歇系数; n_{ie} 为本征载流子浓度。

依赖平行电场的载流子迁移模型表示为

$$\mu_n(E) = \mu_{n0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{n0} E}{v_n} \right)^{B_N}} \right]^{\frac{1}{B_N}}, \quad (7)$$

$$\mu_p(E) = \mu_{p0} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_{p0} E}{v_p} \right)^{B_P}} \right]^{\frac{1}{B_P}}, \quad (8)$$

式中: $\mu_n(E)$ 和 $\mu_p(E)$ 分别表示平行电场中的电子迁移率和空穴迁移率; E 表示电场大小; μ_{n0} 和 μ_{p0} 分别表示低场电子迁移率和空穴迁移率; v_n 和 v_p 分别表示电子和空穴的饱和速率; B_N 与 B_P 为设置参数。

浓度决定的 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合模型表示为

$$R_{\text{SRH}} = \frac{pn - n_{\text{ie}}^2}{\tau_{p0} \left[n + n_{\text{ie}} \exp\left(\frac{E_{\text{TRAP}}}{kT_L}\right) \right] + \tau_{n0} \left[p + n_{\text{ie}} \exp\left(\frac{-E_{\text{TRAP}}}{kT_L}\right) \right]}, \quad (9)$$

式中: R_{SRH} 表示 SRH 复合率; τ_{p0} 和 τ_{n0} 分别为空穴寿命和电子寿命; T_L 为开尔文晶格温度; E_{TRAP} 为陷阱能级和本征费米能级之间的差值。

标准能带跃迁模型表示为

$$G_{\text{BBT}} = DB_A E^{B_G} \exp\left(-\frac{B_B}{E}\right), \quad (10)$$

式中: G_{BBT} 为隧穿率; D 为统计因子; $B_A = 9.6615 \times 10^{18} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{V}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; $B_B = 3.0 \times 10^7 \text{ V/cm}$; $B_G = 2.0$ 。

光学辐射复合模型表示为

$$R_{\text{np}}^{(\text{OPT})} = C_c^{(\text{OPT})} (np - n_{\text{ie}}^2), \quad (11)$$

式中: $R_{\text{np}}^{(\text{OPT})}$ 为光照下的产生复合率; $C_c^{(\text{OPT})}$ 为捕获率。

陷阱辅助跃迁模型表示为

$$R_{\text{SRH}} = \frac{pn - n_{\text{ie}}^2}{\frac{\tau_{p0}}{1 + \Gamma_p^{(\text{DIRAC})}} \left[n + n_{\text{ie}} \exp\left(\frac{E_{\text{TRAP}}}{kT_L}\right) \right] + \frac{\tau_{n0}}{1 + \Gamma_n^{(\text{DIRAC})}} \left[p + n_{\text{ie}} \exp\left(\frac{-E_{\text{TRAP}}}{kT_L}\right) \right]}, \quad (12)$$

式中: $\Gamma_p^{(\text{DIRAC})}$ 表示狄拉克井的空穴场效应增强项; $\Gamma_n^{(\text{DIRAC})}$ 表示狄拉克井的电子场效应增强项。

库伦势阱 Poole-Frenkel 势垒降低模型表示为

$$R_{\text{n,SRH}} = \frac{pn - n_{\text{ie}}^2}{\left(\frac{\tau_{p0}}{1 + \Gamma_p^{(\text{DIRAC})}} \right) \left[n + n_{\text{ie}} \exp\left(\frac{E_{\text{TRAP}}}{kT_L}\right) \right] + \left(\frac{\tau_{n0}}{\chi_F + \Gamma_n^{(\text{COUL})}} \right) \left[p + n_{\text{ie}} \exp\left(\frac{-E_{\text{TRAP}}}{kT_L}\right) \right]}, \quad (13)$$

$$R_{p,SRH} = \frac{pn - n_{ie}^2}{\left(\frac{\tau_{p0}}{\chi_F + \Gamma_n^{(COUL)}}\right) \left[n + n_{ie} \exp\left(\frac{E_{TRAP}}{kT_L}\right) \right] + \left(\frac{\tau_{n0}}{1 + \Gamma_p^{(DIRAC)}}\right) \left[p + n_{ie} \exp\left(\frac{-E_{TRAP}}{kT_L}\right) \right]}, \quad (14)$$

式中： $R_{n,SRH}$ 表示与电子相关的 SRH 复合率； $R_{p,SRH}$ 表示与空穴相关的 SRH 复合率； χ_F 表示普尔-弗伦克尔热辐射增强因子； $\Gamma_n^{(COUL)}$ 表示库仑场增强项。

缺陷辅助俄歇复合模型表示为

$$\tau_{n0} = \frac{\tau_n}{\left[1 + T_N(n_0 + p_0)\tau_n\right]}, \quad (15)$$

$$\tau_{p0} = \frac{\tau_p}{\left[1 + T_P(n_0 + p_0)\tau_p\right]}, \quad (16)$$

式中： n_0 为电子密度； p_0 为空穴密度； T_N 和 T_P 的默认值为 $1.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^3/\text{s}$ 。

键合 InGaAs/Si APD 器件的结构如图 1 所示。可以看出，接触层为厚度为 $0.1 \mu\text{m}$ 、掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 p 型重掺杂 InGaAs 和厚度为 $1.0 \mu\text{m}$ 、

掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 n 型重掺杂 Si，程序中默认电极与 p 型重掺杂 InGaAs 层以及 n 型重掺杂 Si 层为欧姆接触；吸收层为厚度为 $1.2 \mu\text{m}$ 、掺杂浓度为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的本征 InGaAs；为了缓解 InGaAs 和 Si 之间的晶格失配对 InGaAs/Si APD 性能的影响，我们在 InGaAs/Si 界面引入 a-Ge 或 poly-Ge 键合层，厚度分别为 0.5 、 1.0 、 2.0 、 5.0 、 10.0 、 20.0 nm ；电荷层为厚度为 $0.1 \mu\text{m}$ 、掺杂浓度为 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的轻掺杂的 Si，主要起到调制电场的作用；倍增层为厚度为 $1.3 \mu\text{m}$ 、掺杂浓度为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的本征 Si，较厚的倍增层可以为 APD 提供较大的增益；将 Si_3N_4 材料作为钝化层。在光照条件下，采用 1550 nm 的近红外光对器件进行照射。APD 器件材料的具体参数如表 1 所示。

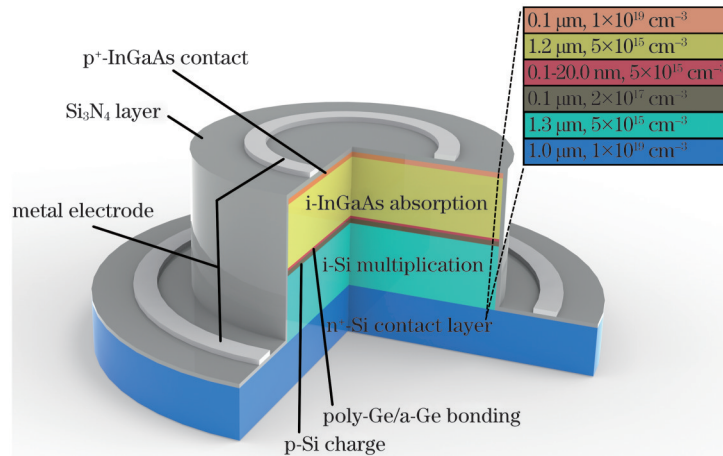


图 1 InGaAs/Si APD 器件的结构图

Fig. 1 Structural diagram of InGaAs/Si APD device

表 1 InGaAs/Si APD 器件的材料参数^[29-32]

Table 1 Material parameters of InGaAs/Si APD device^[29-32]

| Parameter | i-InGaAs | a-Ge | Poly-Ge |
|--|--|--|--|
| Thickness /nm | 1200 | 0.5-20.0 | 0.5-20.0 |
| Permittivity | 13.9 | 16 | 16 |
| Electron affinity /eV | 4.5 | 4.17 | 4.17 |
| Lifetime /s | 1.0×10^{-8} (electron) 1.0×10^{-8} (hole) | 1.0×10^{-8} (electron) 1.0×10^{-8} (hole) | 1.0×10^{-8} (electron) 1.0×10^{-8} (hole) |
| Band gap /eV | 0.75 | 1.1 | 0.7 |
| Mobility /($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) | 14200(electron) 400(hole) | 20(electron) 15(hole) | 1416(electron) 690(hole) |
| Band tail density of states /($\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$) | - | 2.0×10^{21} | 1.0×10^{16} |
| Dopant concentration / cm^{-3} | 5×10^{15} | 5×10^{15} | 5×10^{15} |
| Gaussian density of states / cm^{-3} | - | 1.0×10^{17} | 1.0×10^{10} |
| Saturation velocity /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 1.5×10^7 (electron) 7.7×10^6 (hole) | 1.0×10^7 (electron) 9.0×10^6 (hole) | 1.0×10^7 (electron) 9.0×10^6 (hole) |

3 结果与讨论

首先,比较了 a-Ge 和 poly-Ge 键合层厚度对 InGaAs/Si APD 光暗电流的影响,将引入 a-Ge 键合层与引入 poly-Ge 键合层的 InGaAs/Si APD 分别命名为 A-APD 和 Poly-APD,如图 2 所示,其中 T 为温度, P 为光功率, λ 为光波长, I 为光暗电流。图 3 为光照条件下 APD 雪崩电压 (V_{br}) 随键合层厚度的变化。可以看出, A-APD 和 Poly-APD 在雪崩后均出现了光暗电流间隙,且该现象在 Poly-APD 中更为明显,这表明引入 a-

Ge 和 poly-Ge 键合层均可以降低器件噪声,其中引入 poly-Ge 键合层对于降低器件噪声更加有效。为了进一步观察光电流的变化趋势,本文模拟了 $0.95V_{br}$ 下光电流随键合层厚度的变化,如图 4 所示。可以看出,在 $0.95V_{br}$ 下, A-APD 光电流随着键合层厚度的增加呈现先上升后下降的趋势,而 Poly-APD 的光电流随键合层厚度的增加呈现下降的趋势。

为了探究 A-APD 和 Poly-APD 光电流变化的原因,模拟了 APD 复合率 (R) 随键合层厚度的变化,如图 5 所示。可以看出,二者的载流子复合均主要集中在

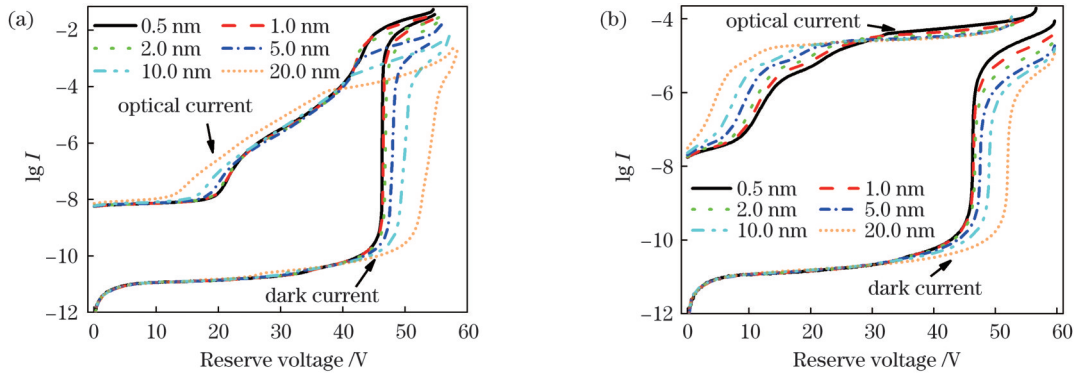


图 2 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$ 时不同键合层厚度的电流-电压曲线。(a) A-APD; (b) Poly-APD

Fig. 2 Current-voltage curves under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, and $\lambda=1550\text{ nm}$. (a) A-APD; (b) Poly-APD

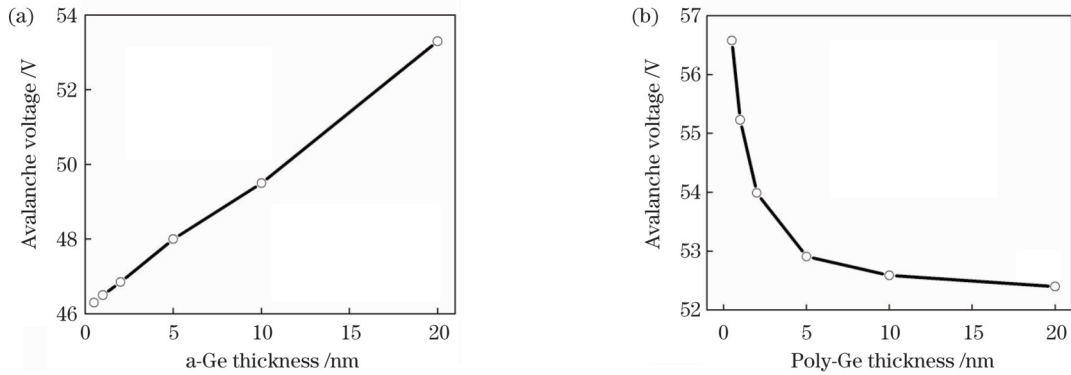


图 3 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$ 时 V_{br} 随键合层厚度的变化。(a) A-APD; (b) Poly-APD

Fig. 3 V_{br} versus bonding layer thickness when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, and $\lambda=1550\text{ nm}$. (a) A-APD; (b) Poly-APD

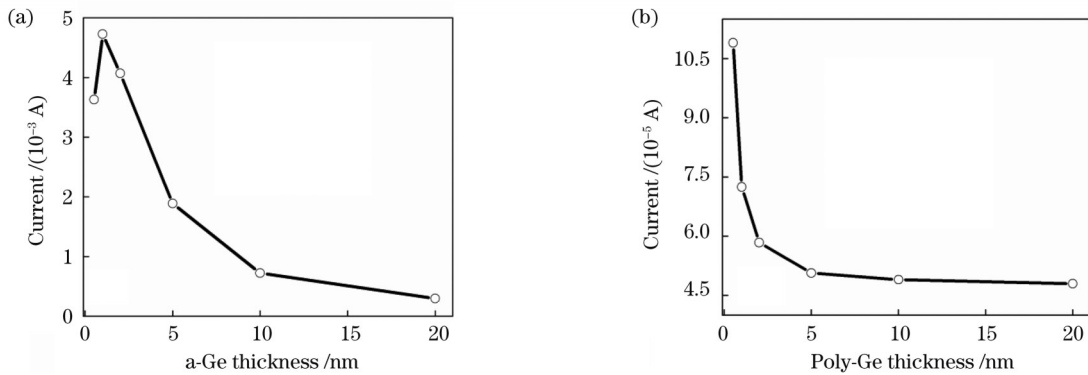


图 4 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$ 时 $0.95V_{br}$ 下光电流随键合层厚度的变化。(a) A-APD; (b) Poly-APD

Fig. 4 Optical current versus bonding layer thickness at $0.95V_{br}$ when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, and $\lambda=1550\text{ nm}$. (a) A-APD; (b) Poly-APD

倍增层和 Si 衬底上,随着键合层厚度的增加,A-APD 的复合率在倍增层和 Si 衬底上均呈现先上升后下降的趋势,而 Poly-APD 的复合率在倍增层和 Si 衬底上均下降,这与光电流的变化趋势一致。对比图 5(a)、

(b) 中的插图,随着键合层厚度的增加,A-APD 中的 InGaAs/Si 键合层复合率呈现先上升后下降的趋势,而在 Poly-APD 中,InGaAs/Si 键合层复合率呈现下降的趋势。

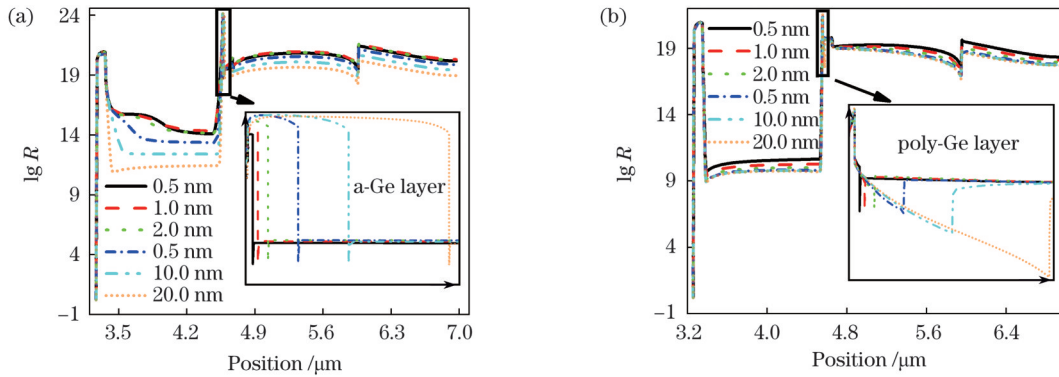


图 5 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, $V=0.95V_{br}$ 时不同键合层厚度下的复合率, 插图为键合层复合率。(a) A-APD; (b) Poly-APD

Fig.5 Recombination rates under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, and $V=0.95V_{br}$ with recombination rate in bond layer shown in inset. (a) A-APD; (b) Poly-APD

为了探究复合率随键合层厚度变化的原因,模拟了载流子浓度随键合层厚度的变化,如图 6、7 所示。从图 6 可以看出,随着键合层厚度的增加,A-APD 中吸收层的电子浓度小幅度下降,而空穴浓度与复合率的变化趋势一致,可知吸收层空穴浓度的变化是导致吸收层复合率变化的主要原因;同时倍增层的电子、空

穴浓度均呈现先上升后下降的趋势,可知倍增层电子、空穴浓度的变化是导致倍增层复合率变化的主要原因。从图 6(a)、(b) 中的插图可以看出,在 a-Ge 键合层内,电子浓度和空穴浓度随着键合层厚度的增加均呈现先上升后下降的趋势,这与键合界面复合率的变化趋势一致。从图 7 可以看出,随着键合层厚度的增加,

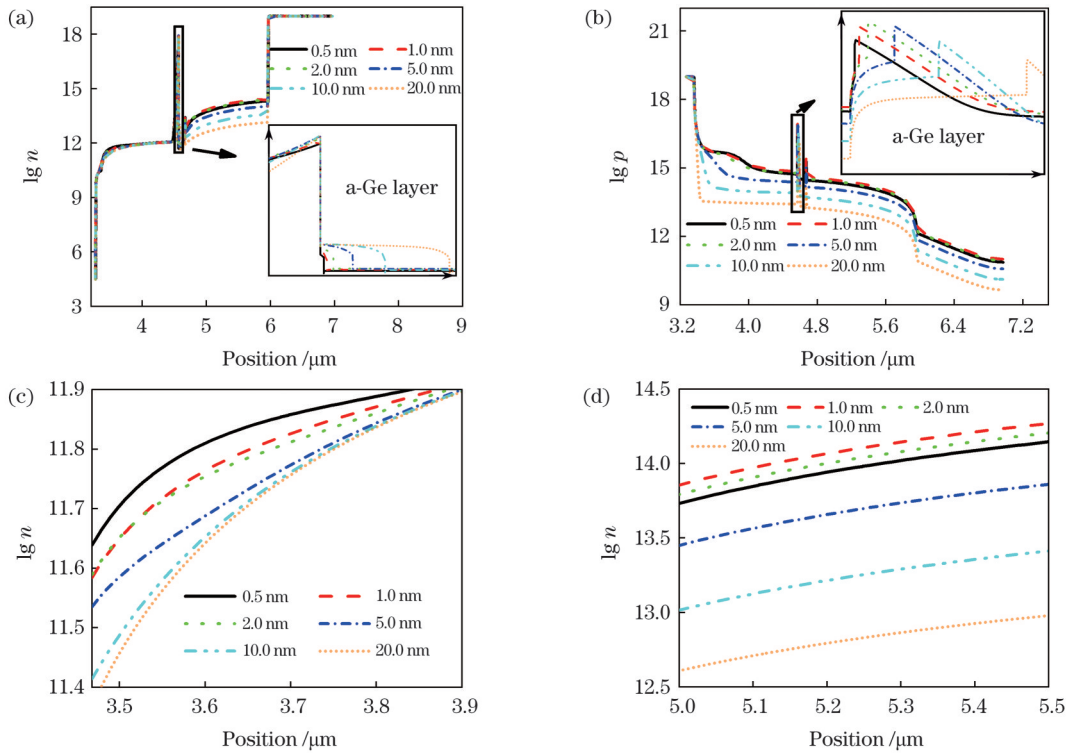


图 6 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, $V=0.95V_{br}$ 时不同键合层厚度下的 A-APD 载流子浓度, 插图为键合层载流子浓度。(a) 电子浓度; (b) 空穴浓度; (c) 吸收层电子浓度; (d) 倍增层电子浓度

Fig.6 Carrier concentrations of A-APDs under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, and $V=0.95V_{br}$ with carrier concentration in bond layer shown in inset. (a) Electron concentration; (b) hole concentration; (c) electron concentration in absorption layer; (d) electron concentration in multiplication layer

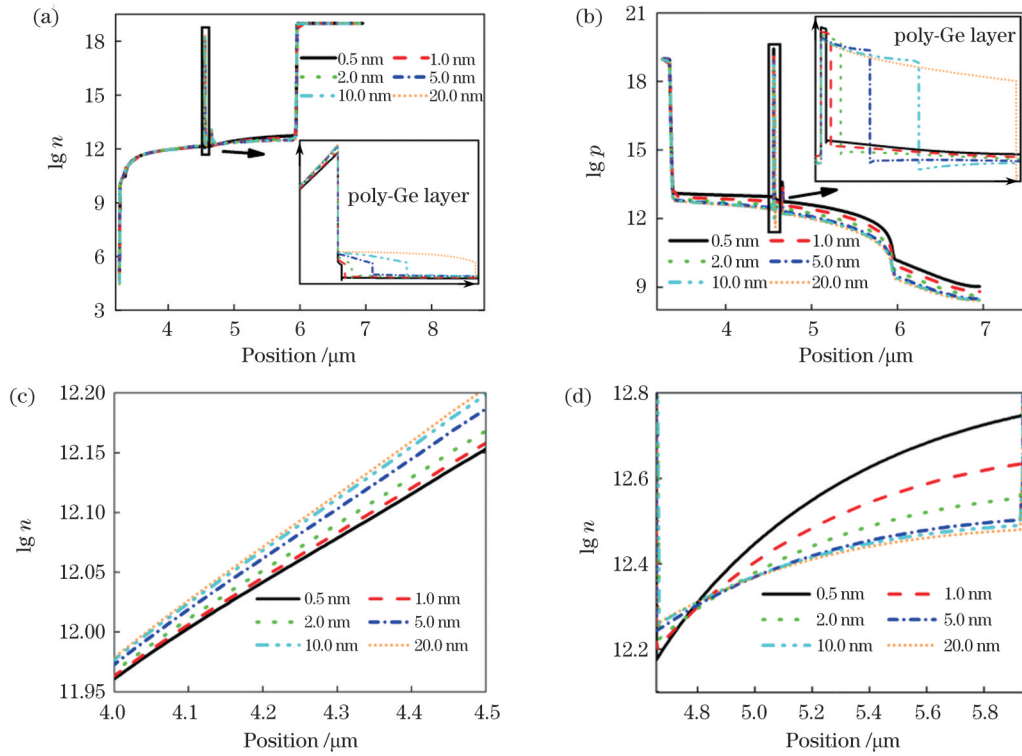


图 7 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, $V=0.95V_{br}$ 时不同键合层厚度下的 Poly-APD 载流子浓度, 插图为键合层载流子浓度。(a) 电子浓度; (b) 空穴浓度; (c) 吸收层电子浓度; (d) 倍增层电子浓度

Fig.7 Carrier concentrations of Poly-APDs under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, and $V=0.95V_{br}$ with carrier concentration in bond layer shown in inset . (a) Electron concentration; (b) hole concentration; (c) electron concentration in absorption layer; (d) electron concentration in multiplication layer

Poly-APD 中倍增层的电子、空穴浓度均下降, 导致倍增层复合率下降; 而吸收层的电子浓度小幅度上升, 空穴浓度下降, 由于空穴浓度占主要地位, 因此吸收层复合率下降。从图 7(a)、(b) 中的插图可以看到, 在 Poly-APD 中, 随着键合层厚度的增加, 键合层内的电子浓度上升, 而空穴浓度下降, 由于空穴浓度占主要地位, 因此键合界面复合率下降。对比图 6 和图 7, 在 InGaAs/Si 键合界面附近都可以看到载流子发生严重堆积, 且 Poly-APD 中的空穴堆积比 A-APD 中的空穴堆积更加严重。

为了解释键合界面附近载流子大量堆积的原因, 模拟了 A-APD 和 Poly-APD 键合界面处在平衡态和偏压条件下导带和价带随着键合层厚度的变化, 如图 8、9 所示。从图 8 可以看出: 在平衡态下, A-APD 导带和价带中均出现了势垒, 且势垒宽度随着键合层厚度的增加而增大, 导致载流子难以运输; 而在偏压条件下, 势垒发生了倾斜, 这使得载流子能够更好地运输, 但偏压条件下在键合界面处 A-APD 中仍存在较为明显的势垒, 导致载流子发生大量堆积。从图 9 可以看出: 在平衡态下, Poly-APD 键合界面的导带中存在势垒, 价带中存在势阱; 在施加偏压后, 导带中仍存在势垒, 导致载流子在导带处大量堆积, 价带中仍存在势阱, 导致空穴进一步堆积, 且键合层厚度越厚, 价带势阱越宽, 这使得载流子有更大的弛豫距离, 势阱对载流

子的俘获效应减弱, 导致空穴浓度随着键合层厚度的增加而下降。同时, 本文还模拟了 A-APD 和 Poly-APD 电荷浓度的变化, 如图 10 所示。结合图 8 和图 10(a) 可以发现, A-APD 中的电荷浓度在 InGaAs/a-Ge 键合界面处急剧升高, 表明载流子由于势垒作用发生了严重堆积, 且电荷浓度的变化趋势与电子空穴浓度一致, 当键合层厚度为 0.5 nm 时电荷浓度最小, 说明键合层厚度接近 0.5 nm 时, 载流子能够更好运输。结合图 9 和图 10(b) 可以发现, 在 Poly-APD 中, InGaAs/poly-Ge 键合界面附近的电荷浓度急剧升高, 且正电荷浓度的升高更为明显, 表明载流子由于势垒作用发生了严重堆积, 又由于势阱作用空穴堆积得更为严重, 因此键合界面附近 Poly-APD 的空穴堆积比 A-APD 更为严重。此外, 还可以看到, 电荷浓度随着键合层厚度的增加而下降, 表明较厚的 poly-Ge 有利于载流子在键合界面的运输。

为了探究电子浓度和空穴浓度变化的原因, 模拟了碰撞电离率 (I_r) 随键合层厚度的变化, 如图 11 所示。碰撞电离率与载流子浓度息息相关, 在倍增层触发雪崩的原始电子来自吸收层。从图 11(a) 可以看出: 随着键合层厚度的增加, A-APD 中吸收层的碰撞电离率上升, 因此吸收层电子浓度也应增大, 但由于电子在键合层界面处大量堆积, 因此电子浓度在吸收层反而呈现略微下降的趋势; 而在倍增层, 随着键合层厚度的增

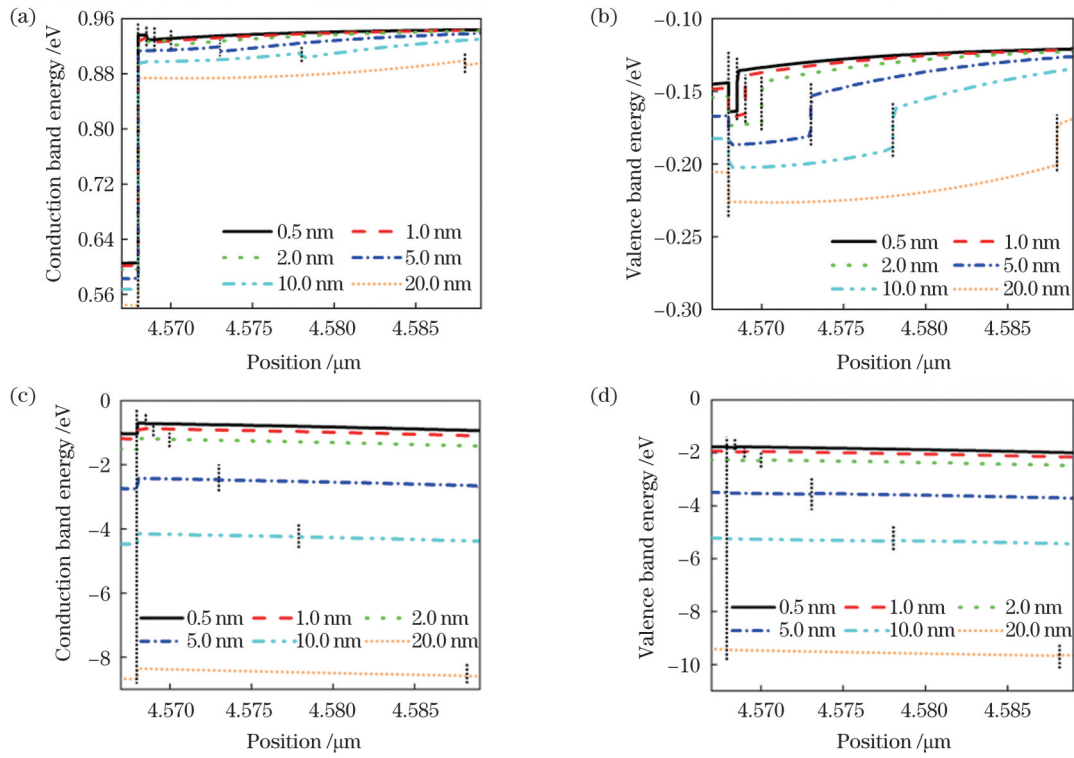


图 8 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$ 时不同键合层厚度下的 A-APD 能带。(a) 平衡态导带; (b) 平衡态价带; (c) $0.95V_{br}$ 下的导带; (d) $0.95V_{br}$ 下的价带

Fig.8 Energy bands of A-APDs under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, and $\lambda=1550\text{ nm}$.
(a) Conduction band at balanced bias; (b) valence band at balanced bias; (c) conduction band at $0.95V_{br}$; (d) valence band at $0.95V_{br}$

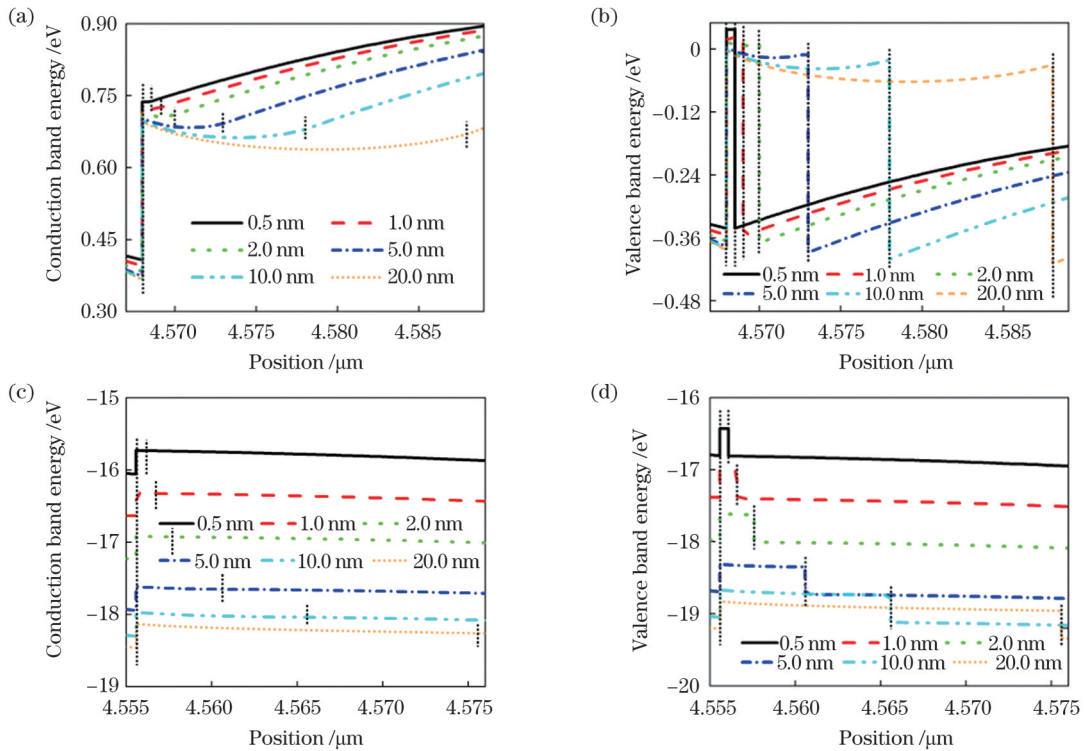


图 9 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$ 时不同键合层厚度下的 Poly-APD 能带。(a) 平衡态导带; (b) 平衡态价带; (c) $0.95V_{br}$ 下的导带; (d) $0.95V_{br}$ 下的价带

Fig.9 Energy bands of Poly-APDs under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, and $\lambda=1550\text{ nm}$.
(a) Conduction band at balanced bias; (b) valence band at balanced bias; (c) conduction band at $0.95V_{br}$; (d) valence band at $0.95V_{br}$

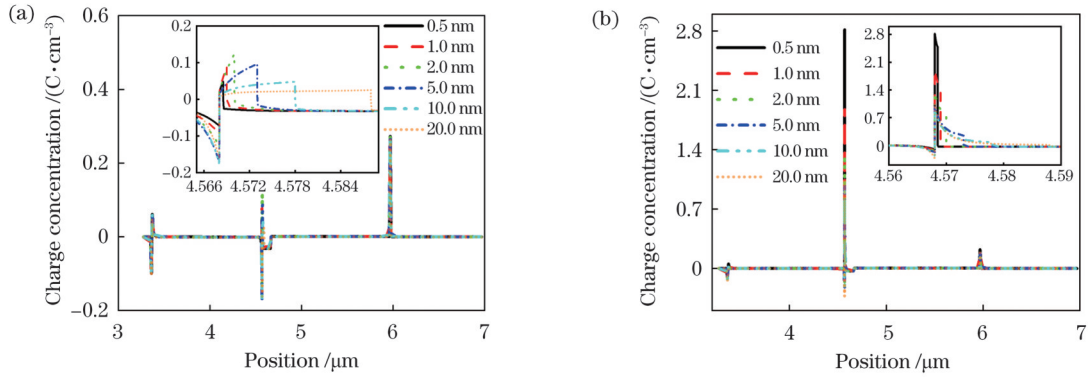


图 10 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, $V=0.95V_{br}$ 时不同键合层厚度下的电荷浓度。(a) A-APD; (b) Poly-APD
 Fig.10 Charge concentrations under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, and $V=0.95V_{br}$.
 (a) A-APD; (b) Poly-APD

加,碰撞电离率呈现先上升后下降的趋势,导致倍增层的电子、空穴浓度以及吸收层的空穴浓度均呈现先上升后下降的趋势。而从图 11(b)可以看出:随着键合层厚度的增加, Poly-APD 中吸收层的碰撞电离率上升,导致吸收层电子浓度的上升;倍增层的碰撞电离率随着键合层厚度的增加而下降,导致吸收层空穴浓度

及倍增层电子、空穴浓度下降。

为了佐证电子空穴浓度变化的原因,同时模拟 A-APD 和 Poly-APD 的电子和空穴的碰撞电离系数随键合层厚度的变化,如图 12、13 所示。从图 12 可以看到,在 A-APD 中,随着键合层厚度的增加,吸收层的电子、空穴碰撞电离系数的变化不明显,而倍增层的电子、空

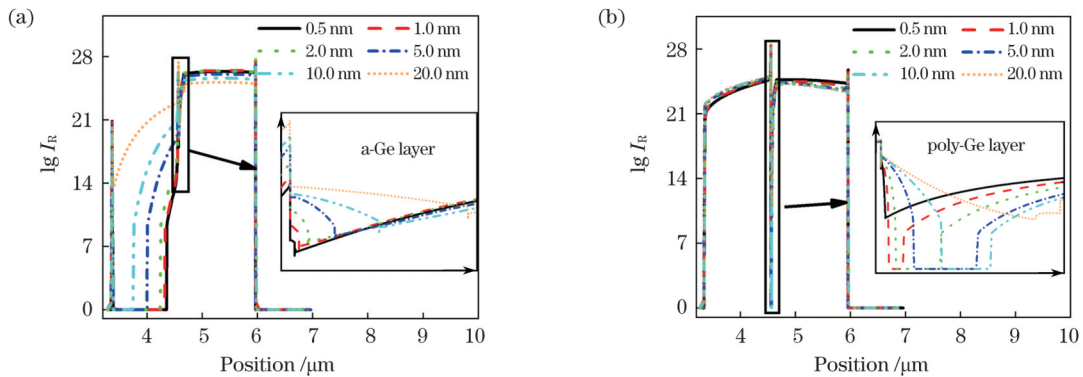


图 11 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, $V=0.95V_{br}$ 时不同键合层厚度下的雪崩碰撞电离率,插图为键合层雪崩碰撞电离率。(a) A-APD; (b) Poly-APD
 Fig.11 Avalanche impact ionization rates under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, and $V=0.95V_{br}$ with avalanche impact ionization rate in bond layer shown in inset. (a) A-APD; (b) Poly-APD

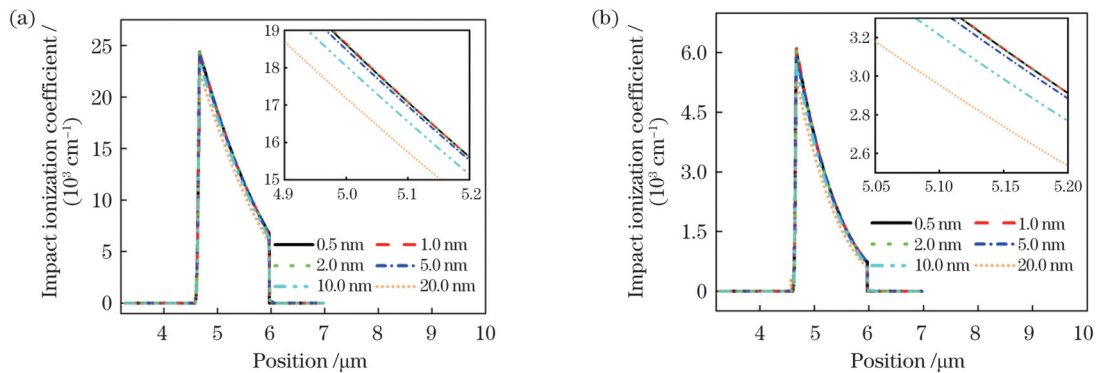


图 12 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, $V=0.95V_{br}$ 时不同键合层厚度下的 A-APD 载流子碰撞电离系数,插图为倍增层的碰撞电离系数。(a) 电子碰撞电离系数; (b) 空穴碰撞电离系数
 Fig.12 Carrier impact ionization coefficients of A-APDs under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, and $V=0.95V_{br}$ with impact ionization coefficient in multiplication layer shown in inset. (a) Electron impact ionization coefficient; (b) hole impact ionization coefficient

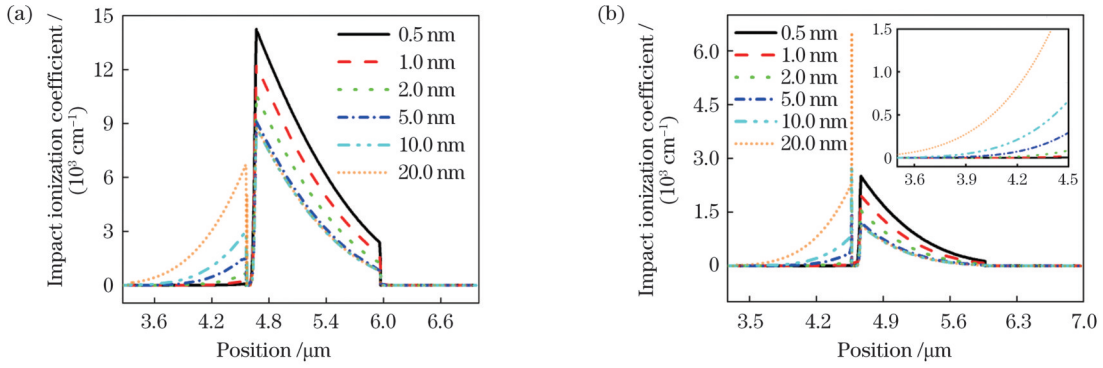


图 13 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, $V=0.95V_{br}$ 时不同键合层厚度下的 Poly-APD 载流子碰撞电离系数, 插图为吸收层的空穴碰撞电离系数。(a) 电子碰撞电离系数; (b) 空穴碰撞电离系数

Fig.13 Carrier impact ionization coefficients of Poly-APDs under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, and $V=0.95V_{br}$ with hole impact ionization coefficient in absorption layer shown in inset. (a) Electron impact ionization coefficient; (b) hole impact ionization coefficient

空穴碰撞电离系数呈现先上升后下降的变化, 导致吸收层电子浓度的变化不明显和倍增层的电子、空穴浓度呈先上升后下降的变化趋势。从图 13 可以看到, 在 Poly-APD 中, 随着键合层厚度的增加, 吸收层的电子、空穴碰撞电离系数均上升, 而在倍增层二者均下降, 导致吸收层电子浓度上升和倍增层电子、空穴浓度下降。

为了解释碰撞电离率变化的原因, 模拟 A-APD 和 Poly-APD 键合层厚度对电场分布的影响, 如图 14 所示。对比碰撞电离率图和电场分布图, 可以看出, 在 A-APD 和 Poly-APD 中, 电场与碰撞电离率随键合层厚度的变化趋势一致, 表明吸收层和倍增层电场分布的变化是导致碰撞电离率变化的主要原因。

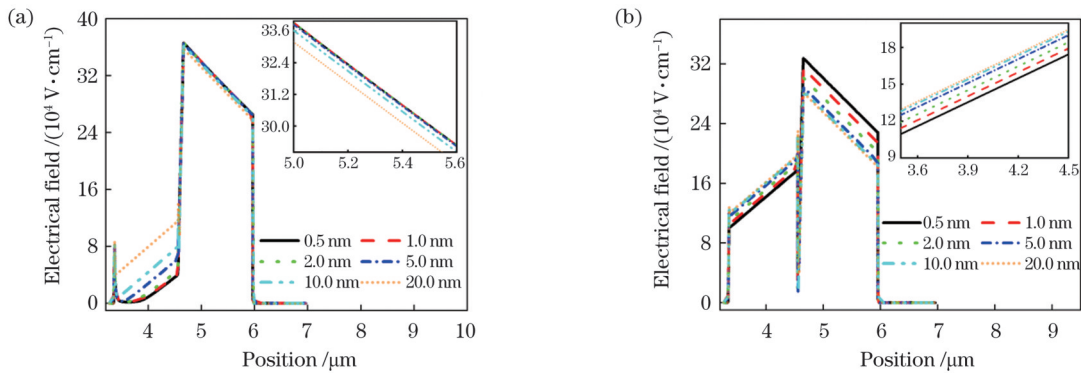


图 14 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, $V=0.95V_{br}$ 时不同键合层厚度下的电场分布。(a) A-APD, 插图为倍增层电场分布; (b) Poly-APD, 插图为吸收层电场分布

Fig.14 Electrical field distributions under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, and $V=0.95V_{br}$. (a) A-APD with electrical field distribution in multiplication layer shown in inset; (b) Poly-APD with electrical field distribution in absorption layer shown in inset

通过光电流分别研究了 A-APD 和 Poly-APD 的增益随键合层厚度的变化, 如图 15 所示。对比图 15(a)、(b), 可以看出, A-APD 和 Poly-APD 的增益随反向偏压的增加先平缓变化后加速上升, 且 A-APD 的增益远大于 Poly-APD 的增益。图 16 为 V_{br} 下的增益随键合层厚度的变化趋势。可以看出, A-APD 在键合层厚度为 0.5 nm 时, 雪崩击穿前的增益可达最大值 451.3; 而 Poly-APD 在键合层厚度为 0.5 nm 时, 雪崩击穿前的增益仅为 7.9, 二者的增益均随着键合层厚度的增加而下降, 这表明采用较薄的键合层有助于获得高增益的 APD。

同时还提取了 A-APD 和 Poly-APD 的 3 dB 带宽, 如图 17 所示。可以看出, 随着键合层厚度的增加 A-

APD 的 3 dB 带宽大致呈现先增大后减小的变化趋势, 而 Poly-APD 的 3 dB 带宽大致呈现下降的变化趋势。

为了探究 3 dB 带宽变化的原因, 模拟了电子、空穴速率随键合层厚度的变化, 如图 18、19 所示。从图 18 可以看出, 随着键合层厚度的增加, A-APD 吸收层中的电子速率和空穴速率均呈上升趋势, 导致 3 dB 带宽上升。但随着键合层厚度的增加, a-Ge 键合层电阻增大, 器件电阻电容(RC)时间常数增加, 导致最终 3 dB 带宽呈现下降趋势。而从图 19 可以看出, Poly-APD 吸收层和倍增层的电子、空穴速率的变化都不大, 但键合层电子速率和空穴速率的最低值的覆盖范围随着键合层厚度的增加而增加, 导致 3 dB 带宽的下降。

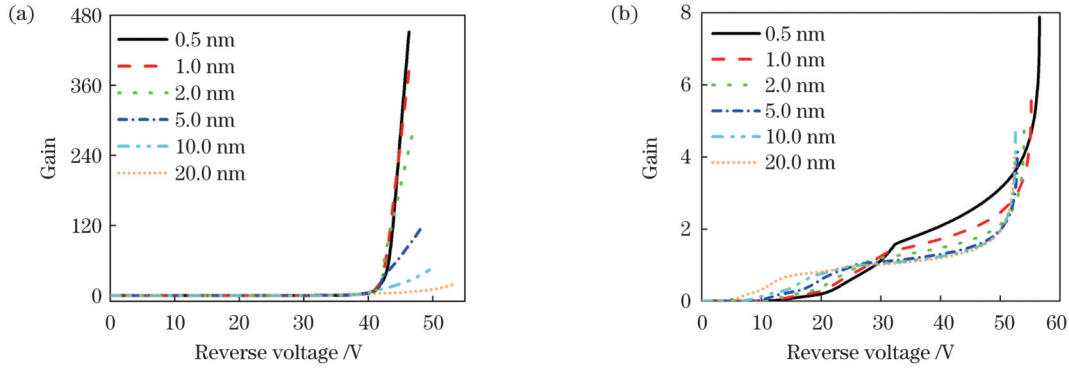


图 15 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$ 时不同键合层厚度下的增益。(a) A-APD; (b) Poly-APD

Fig.15 Gains under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, and $\lambda=1550\text{ nm}$. (a) A-APD; (b) Poly-APD

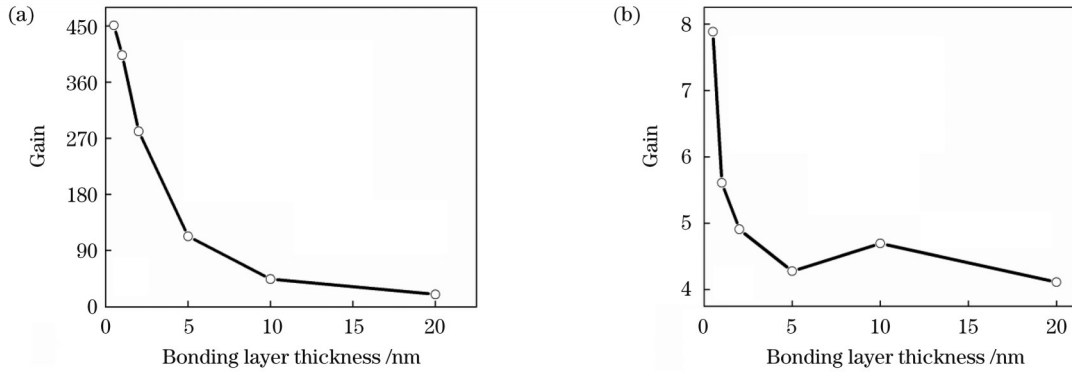


图 16 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, $V=V_{br}$ 时增益随键合层厚度的变化。(a) A-APD; (b) Poly-APD

Fig. 16 Gain versus bonding layer thickness when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, and $V=V_{br}$. (a) A-APD; (b) Poly-APD

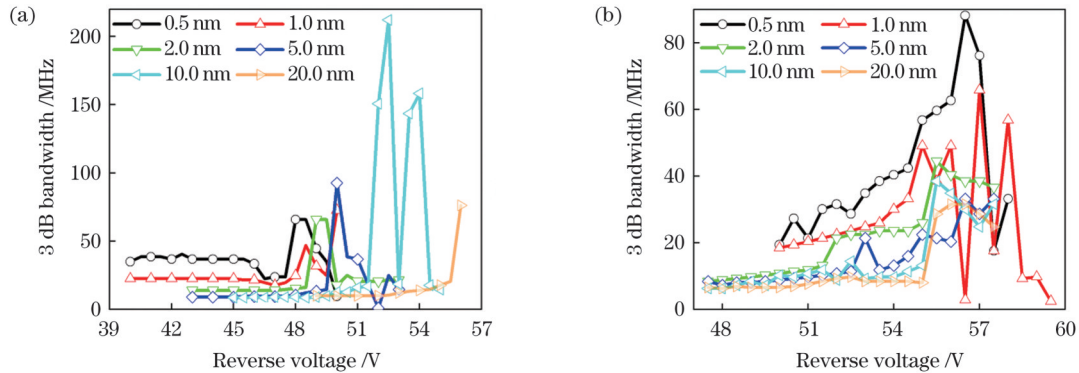


图 17 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$ 时不同键合层厚度下的 3 dB 带宽。(a) A-APD; (b) Poly-APD

Fig.17 3 dB bandwidths under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, and $\lambda=1550\text{ nm}$. (a) A-APD;

(b) Poly-APD

此外,本文还模拟了 APD 增益带宽积的变化趋势,如图 20 所示。可以看出:随着键合层厚度的增加, A-APD 和 Poly-APD 的增益带宽积大致呈现下降的变化趋势;当 a-Ge 厚度为 0.5 nm 且偏压为 46 V 时, A-APD 的增益带宽积能够达到最大值,最大值为 13.7 GHz;而当 poly-Ge 厚度为 0.5 nm 且偏压为 56.5 V 时, Poly-APD 的增益带宽积能够达到最大值,最大值为 598 MHz。

4 结 论

从理论上对比研究了 InGaAs/Si 键合界面处引入

的 a-Ge 和 poly-Ge 键合层厚度对 InGaAs/Si APD 性能的影响。研究表明,由于 a-Ge 和 poly-Ge 中间层弱化了 InGaAs 和 Si 之间的晶格失配对 APD 性能的影响, A-APD 与 Poly-APD 在雪崩前的暗电流均可低至 10^{-11} A , 且由于势垒的阻挡作用和势阱的空穴捕获效应,二者在雪崩后均出现了光暗电流间隙,这将有利于实现 APD 的超低噪声。与此同时, A-APD 的增益与增益带宽积均远大于 Poly-APD, 且二者的增益和增益带宽积均随键合层厚度的增加而下降, 其中当键合层厚度为 0.5 nm 时, A-APD 的增益可达最大值 451.3, 增益带宽积可达最大值 13.7 GHz。因此, 采用 a-Ge 作为

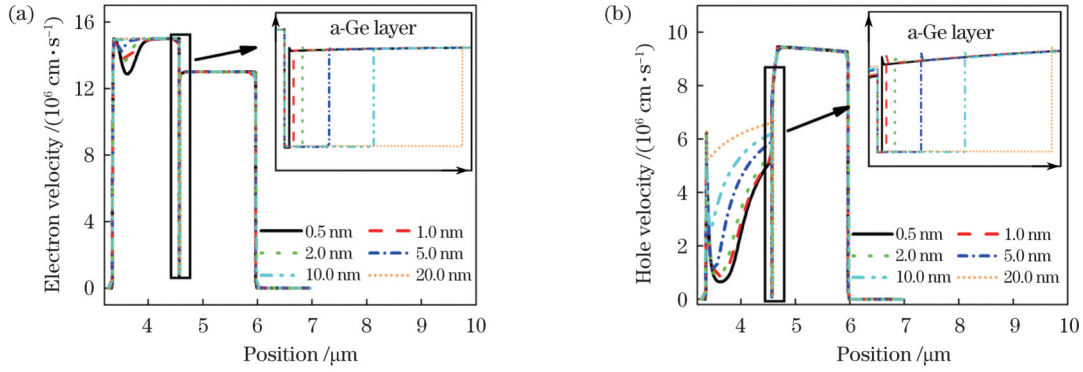


图 18 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, $V=0.95V_{br}$ 时不同键合层厚度下的 A-APD 的载流子速率, 插图为键合层载流子速率。(a) 电子速率; (b) 空穴速率

Fig.18 Carrier velocities of A-APDs under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, and $V=0.95V_{br}$ with carrier velocity in bonding layer shown in inset. (a) Electron velocity; (b) hole velocity

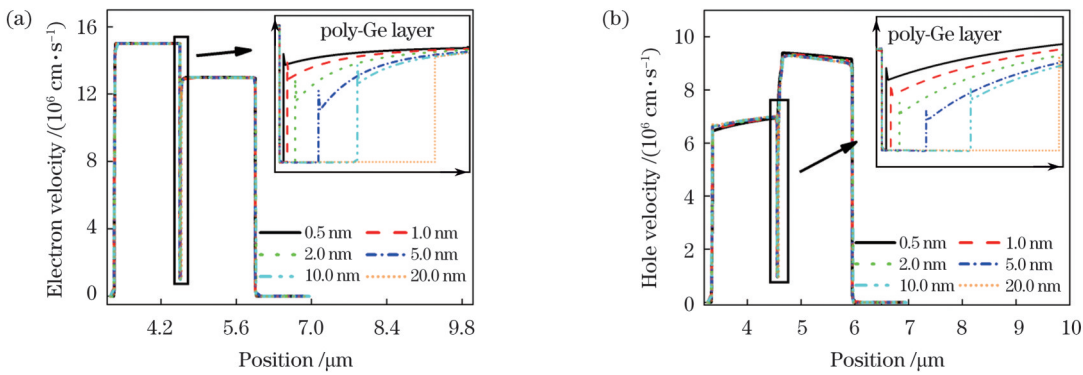


图 19 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, $V=0.95V_{br}$ 时不同键合层厚度下的 Poly-APD 的载流子速率, 插图为键合层载流子速率。(a) 电子速率; (b) 空穴速率

Fig.19 Carrier velocities of Poly-APDs under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$, and $V=0.95V_{br}$ with carrier velocity in bonding layer shown in inset. (a) Electron velocity; (b) hole velocity

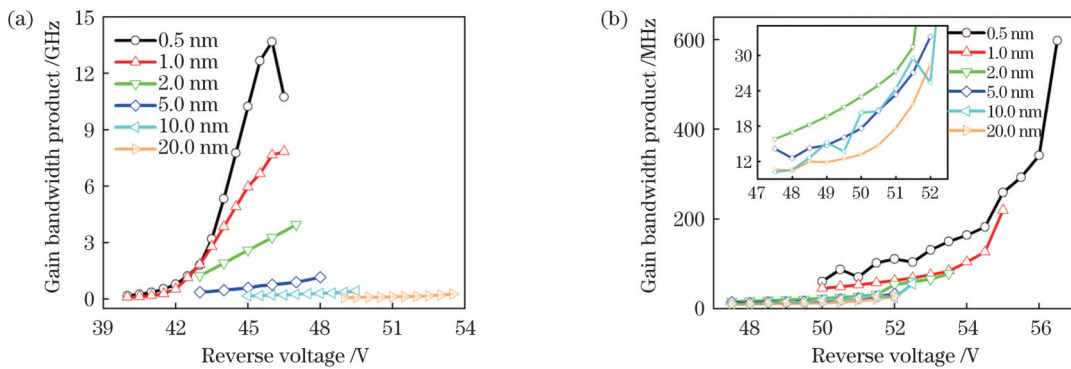


图 20 当 $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, $\lambda=1550\text{ nm}$ 时不同键合层厚度下的增益带宽积。(a) A-APD; (b) Poly-APD

Fig.20 Gain bandwidth products under different bonding layer thicknesses when $T=300\text{ K}$, $P=-20\text{ dBm}$, and $\lambda=1550\text{ nm}$. (a) A-APD; (b) Poly-APD

键合层材料且选用较薄的键合层能够获得光暗电流、增益和增益带宽积等器件性能都较为理想的 InGaAs/Si APD。

参 考 文 献

[1] Li Y, Yuan W F, Li K, et al. InGaAs/InAlAs SAGCMCT avalanche photodiode with high linearity and wide dynamic range [J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(2): 022503.

[2] 杨东, 贺欢. 光电检测器在光纤通信中的应用[J]. 山东轻工业学院学报(自然科学版), 2010, 24(3): 33-35.
Yang D, He H. The application of Opto-electronic detector in optical fiber communication[J]. Journal of Shandong Institute of Light Industry (Natural Science Edition), 2010, 24(3): 33-35.

[3] Li Z P, Huang X, Cao Y, et al. Single-photon computational 3D imaging at 45 km[J]. Photonics Research, 2020, 8(9): 1532-1540.

[4] Zhang J, Itzler M A, Zbinden H, et al. Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication[J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(5): e286.

- [5] 廖卓冬, 李珂, 刘浩冉, 等. 用于 100 Gb/s 光通信系统的 p 区倒置型 APD 的研究[J]. 中国激光, 2022, 49(13): 1306002.
Liao Z D, Li K, Liu H R, et al. Avalanche photodiode with p-down structure for 100 Gb/s optical communication system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(13): 1306002.
- [6] 周畅, 于笑楠, 姜会林, 等. 基于 APD 自适应增益控制的近地无线激光通信信道大气湍流抑制方法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 0406002.
Zhou C, Yu X N, Jiang H L, et al. Atmospheric turbulence suppression methods for near the earth wireless laser communication channels based on avalanche photodiode adaptive gain control[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0406002.
- [7] van Veen D T, Houtsma V E, Gnauck A H, et al. Demonstration of 40-gb/s TDM-PON over 42-km with 31 dB optical power budget using an APD-based receiver[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(8): 1675-1680.
- [8] 邢悦, 宛芳, 罗慧慧, 等. InGaAs 近红外激光雷达光电探测器研究进展[J]. 安庆师范大学学报(自然科学版), 2022, 28(2): 6-14.
Xing Y, Wan F, Luo S H, et al. Recent progress in InGaAs near infrared LIDAR photodetector[J]. Journal of Anqing Normal University (Natural Science Edition), 2022, 28(2): 6-14.
- [9] 周鹏. 基于 InGaAs/InP 单光子雪崩二极管的红外单光子探测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 11-13.
Zhou P. Research on InGaAs/InP single photon avalanche diode based infrared single photon detection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 11-13.
- [10] 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[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(4): 427-431.
Li Y F, Liu J L, Wang Q P, et al. Avalanche characterization of high speed single-photon detector based on InGaAs/InP APD[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34(4): 427-431.
- [11] 许伊宁. 基于 InGaAs(P)/InP 单光子雪崩光电二极管的微型单光子探测模块研究[D]. 济南: 山东大学, 2021: 1-23.
Xu Y N. Research on the miniature single photon detection module based on InGaAs(P)/InP single photon avalanche photodiode[D]. Jinan: Shandong University, 2021: 1-23.
- [12] Zhou P, Liao C J, Wei Z J, et al. Determination of breakdown voltage of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ single photon avalanche diodes[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(1): 010402.
- [13] Xing H L, Zhang J Q, Liu A F, et al. Design of high linearity InGaAs/InP avalanche photodiode with a hybrid absorption layer structure[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 102: 103018.
- [14] Han H, Zhu Y C, Guo Z L, et al. High performance InGaAs/InP avalanche photodiode integrated with metal-insulator-metal microcavity[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(6): 307-318.
- [15] 黄润宇, 赵伟林, 曾辉, 等. InP 基单光子探测器的发展和應用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011009.
Huang R Y, Zhao W L, Zeng H, et al. Development and application of InP-based single photon detectors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011009.
- [16] Hawkins A R, Wu W S, Bowers J E. Improvement of avalanche photodetectors through integration of InGaAs and Si[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 2999: 68-77.
- [17] Pauchard A, Mages P, Kang Y M, et al. Wafer-bonded InGaAs/silicon avalanche photodiodes[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4650: 37-43.
- [18] 廖雅香, 张均营, 余凯, 等. SiGe/Si 单光子雪崩光电二极管仿真[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0520004.
Liao Y X, Zhang J Y, Yu K, et al. Simulation of SiGe/Si single photon avalanche photodiode[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(5): 0520004.
- [19] Yuan Y, Tossoun B, Huang Z H, et al. Avalanche photodiodes on silicon photonics[J]. Journal of Semiconductors, 2022, 43(2): 14-26.
- [20] Peng H L, Qu H W, Zheng W H. A promising low noise and high gain InGaAs/Si avalanche photodiode[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11564: 1156407.
- [21] 曹胜果. 硅基雪崩光电二极管器件原理、建模与应用研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2020: 2-7.
Cao S G. Research on principle, modeling and application of silicon avalanche photodiode device[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2020: 2-7.
- [22] 陈全胜, 张明, 彭时秋, 等. 硅基雪崩光电二极管技术及应用[J]. 电子与封装, 2021, 21(3): 5-11.
Chen Q S, Zhang M, Peng S Q, et al. Technology and application of silicon avalanche photodiode[J]. Electronics & Packaging, 2021, 21(3): 5-11.
- [23] Yamada Y, Nada M, Uomoto M, et al. First demonstration of a high-speed and high-power-tolerance InGaAs/Si photodiode fabricated by atomic diffusion bonding[J]. Physica Status Solidi (a), 2021, 218(3): 2000395.
- [24] Hawkins A R, Reynolds T E, England D R, et al. Silicon heterointerface photodetector[J]. Applied Physics Letters, 1996, 68(26): 3692-3694.
- [25] Pan Z, Bitter M, Pauchard A, et al. InGaAs-Si avalanche photodiodes fabricated by wafer bonding[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4905: 322-325.
- [26] 宋海兰, 黄辉, 崔海林, 等. InGaAs/Si 雪崩光电二极管[J]. 半导体光电, 2010, 31(5): 702-704, 708.
Song H L, Huang H, Cui H L, et al. InGaAs/Si avalanche photodiodes[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(5): 702-704, 708.
- [27] 余实现, 张焯, 黄志伟, 等. InGaAs/Si 键合界面 a-Si 键合层厚度对 InGaAs/Si 雪崩光电二极管性能的影响[J]. 光子学报, 2022, 51(2): 0251218.
She S X, Zhang Y, Huang Z W, et al. Effect of the thickness of the a-Si bonding layer at InGaAs/Si bonded interface on the performance of InGaAs/Si avalanche photodiode[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(2): 0251218.
- [28] 赵永红, 孙芳魁, 丁卫强, 等. 硅基 Si/Si_{0.65}Ge_{0.35} 多量子阱 APD 响应特性的研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2019, 36(3): 359-362.
Zhao Y H, Sun F K, Ding W Q, et al. Research on response characteristics of silicon-based Si/Si_{0.65}Ge_{0.35} multi-quantum well APD[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2019, 36(3): 359-362.
- [29] Abdulwahid O S, Sexton J, Kostakis I, et al. Physical modelling and experimental characterisation of InAlAs/InGaAs avalanche photodiode for 10 Gb/s data rates and higher[J]. IET Optoelectronics, 2018, 12(1): 5-10.
- [30] Xu J, Chen X S, Wang W J, et al. Extracting dark current components and characteristics parameters for InGaAs/InP avalanche photodiodes[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 76: 468-473.
- [31] Barrera M, Rubinelli F, Rey-Stolle I, et al. Numerical simulation of Ge solar cells using D-AMPS-1D code[J]. Physica B: Condensed Matter, 2012, 407(16): 3282-3284.
- [32] 柯少颖, 王芑, 潘涛, 等. 渐变带隙氢化非晶硅薄膜太阳能电池的优化设计[J]. 物理学报, 2014, 63(2): 028802.
Ke S Y, Wang C, Pan T, et al. Optimization design of hydrogenated amorphous silicon germanium thin film solar cell with graded band gap profile[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(2): 028802.

Effect of Different Crystalline Ge Film Bonding Layers on Properties of InGaAs/Si Avalanche Photodiodes

Bao Shiyi, Mu Haolong, Zhou Jinrong, Huang Zhiwei, Ke Shaoying*

College of Physics and Information Engineering, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, Fujian, China

Abstract

Objective InGaAs materials as absorption layers and Si materials as multiplication layers are potential alternatives for achieving high-performance avalanche photodiodes (APDs). However, simple and well-performing InGaAs/Si APDs are difficult to fabricate owing to the 7.7% lattice mismatch between InGaAs and Si. Investigators have recently reported that a-Si was introduced at the InGaAs/Si APD bonding interface to inhibit the nucleation of mismatch dislocations and realize an ultra-low dark current. However, owing to the large bandgap of a-Si, the bonding interface has a large conduction band and valence band offset. This causes the gain of the device to decrease. Ge and Si are both indirect band gap semiconductors, and Ge materials have the advantages of a small gap width and a long absorption cutoff wavelength in the infrared region. Hence, in this study, a method to mitigate the effect of the InGaAs/Si lattice mismatch on APD performance from the source side is theoretically proposed. Here, a-Ge or poly-Ge bond layers are introduced into the InGaAs/Si bond interface, and the variation in the InGaAs/Si APD performance with the bond layer thickness is simulated and compared. In this work, theoretical guidance for the development of ultralow-noise and high-gain InGaAs/Si APDs will emerge.

Methods An a-Ge or poly-Ge bond layer is introduced into the InGaAs/Si bond interface, and variations in APD performance with bond layer thickness are simulated and compared. Initially, the optical and dark currents of the APD are simulated and compared considering the thickness of the bonding layer. Subsequently, the recombination rate and carrier concentration of the APD under light conditions are simulated to understand the cause of the change in the APD optical current. To further understand the cause of the change in the electron concentration of the APD, the changes in the APD energy band under light conditions are simulated. Then, the changes in charge concentration, impact ionization rate, electric field, and other parameters with the bond layer thickness are simulated and compared. Finally, the gain and gain bandwidth products of the APD are simulated and compared to further explore the performance improvement of the device.

Results and Discussions After introducing a-Ge or poly-Ge bond layers, the dark current of the APD before avalanche can be as low as 10^{-11} A (Fig. 2). Moreover, potential barriers or wells appear in the energy band of the bonding interface (Figs. 8 and 9). Owing to the barrier effect and hole trapping effect, optical and dark current gaps appear in both (Fig. 2), and this phenomenon is more obvious in the APD with the poly-Ge bond layer. These results indicate that both the a-Ge and poly-Ge bonding layers can reduce device noise. The gain and gain-bandwidth products of the APD are simulated and compared. The results show that when a-Ge is used as the bonding layer and the thickness of the bonding layer is 0.5 nm, the gain and gain bandwidth product can reach its maximum. The maximum gain of the APD can reach 451.3 (Fig. 15), and the maximum gain bandwidth product can reach 13.7 GHz (Fig. 20). Theoretically, an InGaAs/Si APD with high gain and ultralow noise is obtained.

Conclusions In this study, the effects of a-Ge and poly-Ge bonding layer thicknesses introduced at the InGaAs/Si bonding interface on the performance of InGaAs/Si APD are theoretically studied. The results show that the dark current before the avalanche can be as low as 10^{-11} A when the a-Ge and poly-Ge bond layers are introduced. Furthermore, the APD with a-Ge or poly-Ge bond layers introduced after the avalanche exhibits optical and dark current bandgaps. This will help the APD achieve ultralow noise. Similarly, the gain and gain bandwidth products of the APD with an a-Ge bonding layer are much larger than those with a poly-Ge bonding layer. The gain and gain bandwidth products of the APD decrease with an increase in the bond layer thickness. The APD performance is optimum when a-Ge is used as the bonding layer and the bond layer thickness is 0.5 nm. At this time, the maximum gain can reach 451.3 and the maximum gain bandwidth product can reach 13.7 GHz. However, when poly-Ge is used as the bonding layer, the maximum gain of the APD is only 7.9 and the maximum gain bandwidth product is only 598 MHz. Therefore, the use of a-Ge as the bonding layer material and the selection of a thin bonding layer are considered ideal schemes for preparing InGaAs/Si APD with improved device performances.

Key words materials; avalanche photodiode; InGaAs/Si bonding; poly-Ge bonding layer; a-Ge bonding layer; lattice mismatch