

用于 100 Gb/s 光通信系统的 p 区倒置型 APD 的研究

廖卓冬, 李珂, 刘浩冉, 段晓峰*, 黄永清, 刘凯

北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 光通信系统不断提升的传输速率对光电探测器的带宽提出了更高的要求。利用有限元分析软件 APSYS 对 p 区倒置型雪崩光电探测器 (APD) 进行设计与优化。结果表明, 双台面 p 区倒置型 APD 可将电场限制在中心区域, 避免器件发生边缘击穿, 器件的暗电流约为 0.1 nA, 最大带宽为 23 GHz, 增益带宽积为 276 GHz。在此结构上, 对双台面 p 区倒置型 APD 的台面及层结构参数进行优化, 得到最大带宽为 31.7 GHz, 增益带宽积为 289.4 GHz 的三台面 p 区倒置型 APD。

关键词 光通信; 光电探测器; p 区倒置型雪崩光电探测器; 台面结构; 增益带宽积

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1306002

1 引言

云计算、大数据、移动互联网等新型宽带业务的广泛发展和应用, 使得数据中心数据流量呈爆炸性增长。据统计, 数据中心的数据吞吐量正以每年约 50% 的速度增长。传统的电互连由于自身缺点的限制, 很难满足当今数据中心的数据传输需求, 光互连技术成为数据中心数据传输的主要解决方案。在此背景下, 数据中心对光模块的需求呈加速态势增长^[1]。市场调研机构最新发布的报告指出, 2019 年光模块市场的规模达到约 77 亿美元, 预计到 2025 年将增至约 177 亿美元, 2019—2025 年的复合年增长率为 15%。

雪崩光电探测器 (APD) 是光模块常采用的光电探测器之一, 它具有较强的内部增益, 能够提供更高的接收机灵敏度和更大的动态范围, 受到越来越多学者的关注和研究^[2-4]。日本学者 Nada 等^[5]报道了仅有 90 nm InAlAs 倍增层的倒置台面结构 APD, 用该 APD 制备的光接收机可在没有光学放大器的单模光纤上进行 40 km、106 Gb/s 的 PAM4 传输。

随着数据传输速率迈向 100 Gb/s 和 400 Gb/s, 单通道传输速率提升至 25 Gb/s 及以上, 这对光电探测器的带宽提出了更高的要求。具有高带宽、低暗电流的 APD 可在数据中心高速光互连模块中发挥至关重要的作用^[6]。目前我国的 APD 芯片国产化率较低, 高端芯片仍严重依赖进口, 因此, 为了满足 APD 日渐增长的应用需求, 缩小国内外高端芯片之间的差距, 研究高性能 APD 有着十分重要的意义^[7]。本文利用 APSYS 软件对 p 区倒置 (p-down) 型 APD 进行研究。

结果表明, 双台面 p 区倒置型 APD 具有限制电场的作用, 器件的边缘电场较低, 最大带宽和增益带宽积分别为 23 GHz 和 276 GHz。对双台面 p 区倒置型 APD 进行优化, 可得到最大带宽为 31.7 GHz、增益带宽积为 289.4 GHz 的三台面 p 区倒置型 APD, 该 APD 可用于传输速率更高的光通信系统。

2 仿真软件及模型

APSYS 是一款有限元分析软件, 以漂移、扩散模型为基础, 通过自洽方法求解泊松方程、载流子连续性方程和电流密度方程, 并配以各种物理模型来计算半导体器件的光学和电学性能^[8]。APD 内部载流子的传输机理十分复杂, 仿真中物理模型的选择是否合适在一定程度上会影响结果的准确性和可靠性。

一般情况下, 器件内部电离杂质的散射作用会使载流子的迁移率随着掺杂浓度的增大而降低。仿真中使用载流子迁移率模型来描述器件内部载流子的迁移率随掺杂浓度的变化, 其变化关系^[9]为

$$\mu = \mu_{\min} \left(\frac{T}{300} \right)^{\alpha} + \frac{\mu_{\max} \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta} - \mu_{\min} \left(\frac{T}{300} \right)^{\alpha}}{1 + \left(\frac{T}{300K} \right)^{\gamma} \left(\frac{N}{N_c} \right)^{\delta}}, \quad (1)$$

式中: μ_{\min} 和 μ_{\max} 分别表示载流子的最小迁移率和最大迁移率; N 和 N_c 分别表示掺杂浓度和临界掺杂浓度; T 为热力学温度; α 、 β 、 γ 和 δ 表示拟合参数。

在没有光照的情况下, 由于热电子发射等, 器件内部会产生自由载流子, 从而形成暗电流。在低偏置电

收稿日期: 2021-11-16; 修回日期: 2021-12-18; 录用日期: 2022-01-04

基金项目: 国家重点研发课题 (2018YFB2200803)

通信作者: *xfduan@bupt.edu.cn

压下,暗电流主要由产生的复合电流和陷阱辅助隧穿电流组成^[10-12]。仿真中主要用 Shockley-Read-Hall

(SRH)复合模型来表征除了光生载流子扩散和漂移外的电子与空穴的产生和复合过程,其表达式为

$$R_{SRH} = \frac{N_T (pn - n_i^2)}{\tau_{p0} \left[n + n_i \exp\left(\frac{E_i - E_T}{kT}\right) \right] + \tau_{n0} \left[p + n_i \exp\left(\frac{E_T - E_i}{kT}\right) \right]}, \quad (2)$$

式中: n 和 p 分别表示电子浓度和空穴浓度; E_i 和 n_i 分别为本征费米能级和本征载流子浓度; E_T 和 N_T 分别为陷阱能级和陷阱浓度; τ_{n0} 和 τ_{p0} 分别为 SRH 复合机制下的电子寿命和空穴寿命。

为了准确表征碰撞电离的程度,仿真中使用 Chynoweth 碰撞电离模型来描述载流子的碰撞电离生成率 G ,其表达式^[13]为

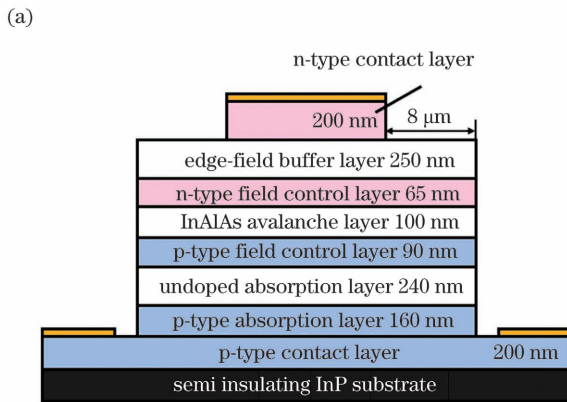
$$G = (\alpha J_n + \beta J_p) / q, \quad (3)$$

式中: α 和 β 分别表示电子和空穴的碰撞电离系数; J_n 和 J_p 分别为电子和空穴的电流密度; q 为电子电荷。

3 仿真结果与分析

3.1 双台面 p 区倒置型 APD 仿真结果分析

图 1(a)为双台面 p 区倒置型 APD(p 区在下、n 区



在上)的结构示意图。它是在半绝缘的 InP 衬底上依次生长 p 型接触层、混合吸收层、p 型场控制层、倍增层、n 型场控制层、边缘场漂移层以及 n 型接触层。倍增层厚度设计为 100 nm,目的在于减少雪崩延迟时间,提升器件的高速性能^[14]。仿真中环境温度设置为室温,器件采用背部垂直入射的入光方式,入射光的波长和功率分别为 1310 nm 和 7.4 μW,第一台面的直径为 10 μm,p 型场控制层、n 型场控制层的掺杂浓度分别为 $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 和 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。

图 1(b)为双台面 p 区倒置型 APD 的能带示意图。器件采用混合吸收层结构,p 型掺杂的吸收层中空穴为多子,在此区域内产生的光生空穴会被迅速弛豫,因此,p 型吸收层中载流子渡越时间由光生电子的扩散时间 τ_N 决定,其表达式为

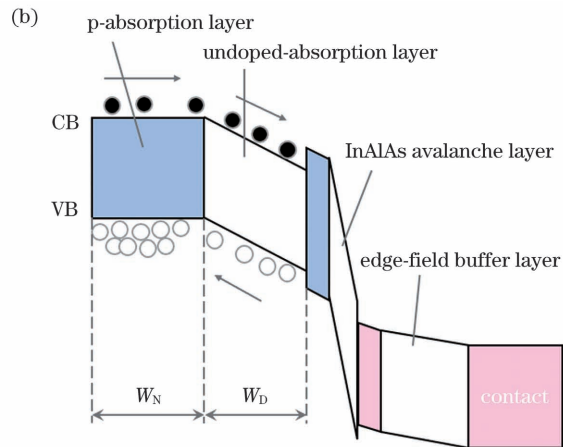


图 1 双台面 p 区倒置型 APD 的结构。(a)截面示意图;(b)能带示意图

Fig. 1 Structure of p-down APD with double-mesa. (a) Schematic of cross-sectional view; (b) band diagrams

$$\tau_N \approx \frac{W_N}{v_N}, \quad (4)$$

式中: W_N 为 p 型吸收层的厚度; v_N 为光生电子的扩散速度。对于均匀的 p 型掺杂来说, v_N 由扩散系数 D_e 决定($\approx 3D_e/W_N$),在室温下, D_e 约为粒子迁移率的 2.6%^[15]。当 W_N 为确定值时,可根据 D_e 与迁移率的关系、 v_N 与 D_e 的关系式及式(4)计算出 τ_N 的值。

在未掺杂的本征吸收层中,光生空穴的运动速度较为缓慢,因此,载流子渡越时间由空穴的漂移时间 τ_D 决定,其表达式为

$$\tau_D \approx \frac{W_D}{v_D}, \quad (5)$$

式中: W_D 为本征吸收层的厚度; v_D 为光生空穴的漂移

速度。在 APSYS 软件的材料库中,InGaAs 材料耗尽区内空穴的漂移速度约为 $1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 。将混合吸收层看作两个独立的电流源并联,则总的载流子渡越时间^[16] τ_{eff} 为

$$\tau_{eff} = \frac{W_N \tau_N + \tau_D W_D}{W} \approx \frac{W_N^2/v_N + W_D^2/v_D}{W}, \quad (6)$$

式中: W 为混合吸收层的总厚度。根据式(6)可分析得到一组 W_N 和 W_D 的值,使得总的渡越时间 τ_{eff} 最小,从而得到吸收层的最大输运带宽。因此,采用混合吸收层结构不仅可以缩短空穴的漂移距离,缓解空穴在界面处发生堆积的现象,还可以通过合理设计 p 型吸收层厚度占总吸收层厚度的比例,在不影响器件响应度的同时提升器件的带宽。使用 MATLAB 软件对式(6)进行数值分析,所得载流子的总渡越时间随 p 型

吸收层厚度占比的变化关系如图 2 所示。从图 2 可以看出,当 p 型吸收层厚度占总吸收层厚度的比例约为 0.4 时,载流子的总渡越时间达到最小,此时器件吸收层中获得最大的运输带宽。

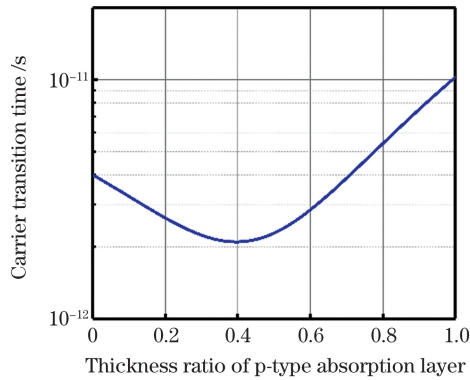


图 2 载流子的总渡越时间随 p 型吸收层厚度占比的变化关系
Fig. 2 Carrier transition time changed with thickness ratio of p-type absorption layer

图 3 所示为双台面 p 区倒置型 APD 在工作偏压下的内部电场分布。可以看出,器件的最高电场位于第一台面限制下的倍增层区域内。出现这一现象的原因是,当器件外加偏压时,n 型、p 型场控制层最先开始耗尽,当耗尽过程到达低掺杂的边缘场漂移层时,边缘场漂移层迅速向上耗尽,耗尽过程在高掺杂的第一台面下方停止,从而形成第一台面限制电场的现象,而常规结构(p 区在上、n 区在下)的双台面 APD 第一台面不能起到限制电场的作用,因为它的最高电场位于整个倍增层内。为避免边缘击穿的发生,常规结构的 APD 需要设计更为复杂的台面结构及层结构来降低器件的边缘电场。

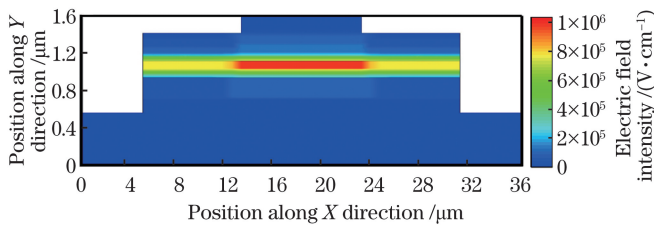


图 3 双台面 p 区倒置型 APD 在工作偏压下的内部电场分布
Fig. 3 Electric field distribution of p-down APD with double-mesa structure at operating bias condition

图 4 所示为双台面 p 区倒置型 APD 在工作偏压下的倍增层横向电场分布。器件的倍增层电场在第一台面外的区域急剧下降,在第二台面的边缘处基本不变,边缘电场的电场强度相比于中心电场降低了约 65 kV/cm。因此,相比于常规结构,p 区倒置型 APD 可优化内部电场分布,这在一定程度上提高了器件实际应用过程中的可靠性和稳定性。

图 5 所示为双台面 p 区倒置型 APD 的 I-V 特性曲线。由于第一台面限制电场的作用,未掺杂吸收层的电场强度和第二台面的边缘电场强度降低,使得器件具有较低的暗电流。从图 5 可以看出,在低偏压条

件下,器件的暗电流小于 0.1 nA。当偏压大于 16 V 时,暗电流、光电流缓慢上升,在电压 $V=27.5$ V 时发生击穿,除此之外器件没有发生其他的击穿现象。

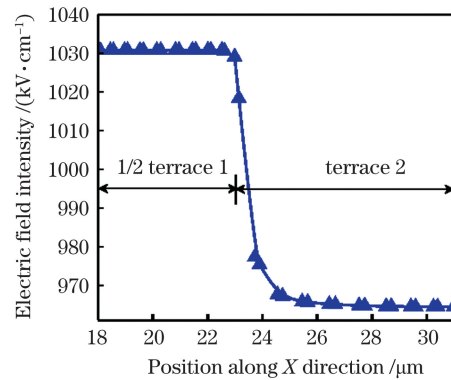


图 4 双台面 p 区倒置型 APD 在工作偏压下的倍增层横向电场分布

Fig. 4 Transverse electric field distribution of avalanche layer at operating bias condition obtained from p-down APD with double-mesa structure

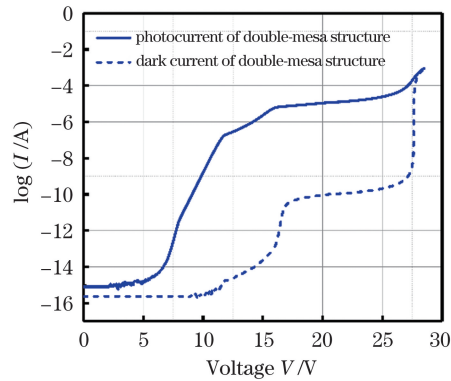


图 5 双台面 p 区倒置型 APD 的 I-V 特性曲线

Fig. 5 I-V curves of p-down APD with double-mesa structure

图 6 所示为双台面 p 区倒置型 APD 的频率响应曲线。由于器件内部电场结构的优化及混合吸收层中运输带宽的提升,双台面 p 区倒置型 APD 的最大带宽可达 23 GHz,此时增益为 12,响应度为 0.93 A/W,增益带宽积为 276 GHz。

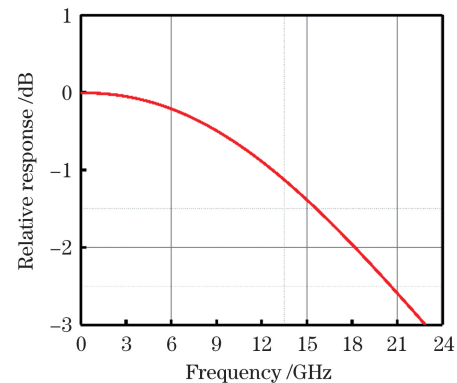


图 6 双台面 p 区倒置型 APD 的频率响应曲线

Fig. 6 Frequency response curve of p-down APD with double-mesa structure

3.2 三台面 p 区倒置型 APD 仿真结果分析

在双台面 p 区倒置型 APD 结构的基础上,对器件的台面及台面直径和吸收层、场控制层的厚度及掺杂浓度进行优化,得到一个三台面结构的 p 区倒置型 APD。图 7 为三台面 APD 的结构示意图,n 型场控制层和边缘场漂移层共同形成第二个台面。第一台面的直径为 14 μm ,混合吸收层的总厚度为 300 nm,p 型吸收层和场控制层的掺杂浓度和厚度分别为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 和 100 nm,倍增层厚度、入射光波长及功率保持不变。

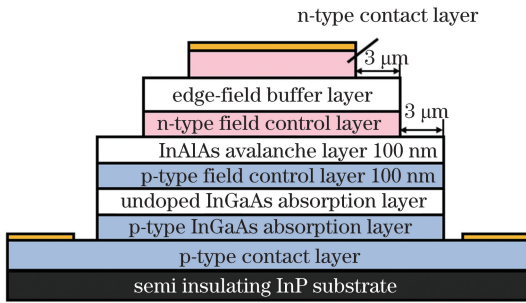


图 7 三台面 p 区倒置型 APD 的结构示意图

Fig. 7 Schematic of cross-sectional view of p-down APD with triple-mesa structure

在双台面 p 区倒置型 APD 中,n 型场控制层和未掺杂的本征吸收层共同位于第二台面。当 n 型场控制层耗尽后,电场会被施加到本征吸收层的整个区域内,此时吸收层存在边缘电场,这一电场直到耗尽过程到达第一台面下方时才会被抑制。因此,双台面结构虽能降低器件吸收层的边缘电场,但在耗尽过程中边缘电场仍然存在。图 8 所示为三台面 p 区倒置型 APD 在工作偏压下的内部电场分布。在三台面结构中,n 型场控制层和本征吸收层分别位于第二台面和第三台面,当器件外加偏压时,电场诱导区域由第二台面的面积决定,这使得本征吸收层边缘电场在耗尽开始时就已经被消除,之后器件内部电场被精确控制在第一台面下方的区域内。因此,相比于双台面结构,三台面结构具有更强的电场限制作用,能更好地控制有源区大小,避免边缘击穿的发生。

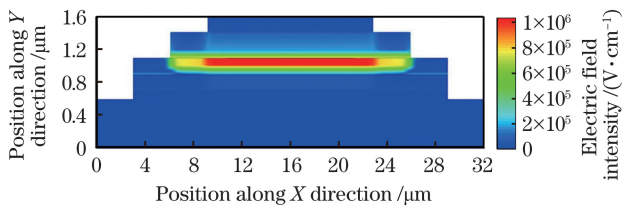


图 8 三台面 p 区倒置型 APD 在工作偏压下的内部电场分布

Fig. 8 Electric field distribution of p-down APD with triple-mesa structure at operating bias condition

图 9 所示为三台面 p 区倒置型 APD 在工作偏压下的倍增层横向电场分布。倍增层电场在第一台面外开始下降,到第二台面的边缘时,边缘电场强度相比于

中心电场下降了约 483 kV/cm ;在第二台面和第三台面之间,倍增层的电场强度迅速下降为 0 kV/cm ,再次证明了三台面结构具有强的电场限制作用。

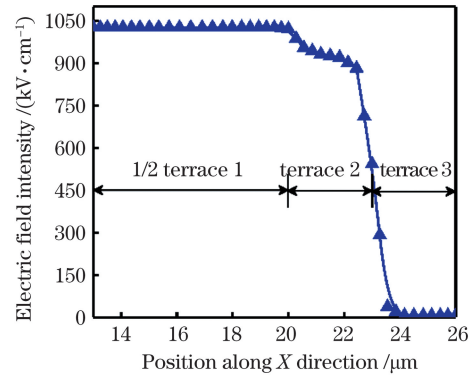


图 9 三台面 p 区倒置型 APD 在工作偏压下的倍增层横向电场分布

Fig. 9 Transverse electric field distribution of avalanche layer at operating bias condition obtained from p-down APD with triple-mesa structure

图 10 所示为双台面、三台面结构 p 区倒置型 APD 的 I - V 特性曲线。从击穿电压来看,三台面结构击穿电压与双台面结构相比未发生明显改变,约为 27 V;从光电流来看,三台面结构混合吸收层厚度的减少,使得器件光电流降低,直到工作电压 $V > 20 \text{ V}$ 时,三台面结构的光电流上升至与双台面结构的电流大致相等;从暗电流来看,三台面结构的暗电流在击穿电压前的任何偏压条件下都低于双台面结构,原因是三台面结构能更为精确地控制器件内部电场,有利于降低表面泄漏电流,从而减小器件的暗电流。

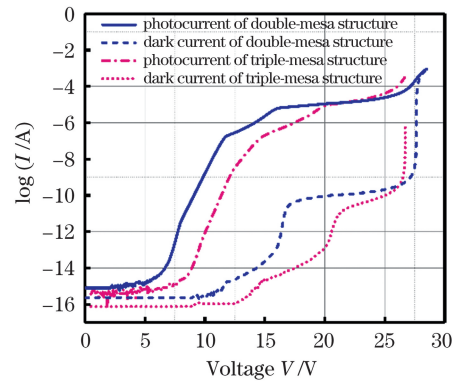


图 10 两种台面结构的 p 区倒置型 APD 的 I - V 特性曲线

Fig. 10 I - V curves of p-down APDs with two mesa structures

图 11 所示为两种台面结构的 p 区倒置型 APD 的频率响应曲线。可以看出,双台面、三台面结构 APD 的最大带宽分别为 23 GHz 和 31.7 GHz,三台面结构的带宽约为双台面结构的 1.378 倍。两种 APD 带宽差异的原因是,三台面结构的倍增层边缘电场为 0 V,边缘区域不发生倍增,因此三台面结构的增益要小于双台面结构,从而器件的带宽得到提升。在三台面结构取得最大带宽的偏压下,器件的增益为 9.13,增益

带宽积为 289.4 GHz。通过以上分析可知, p 区倒置型结构的 APD 具有低暗电流、低边缘电场和高带宽的优点, 可在高速光互连模块中发挥至关重要的作用。

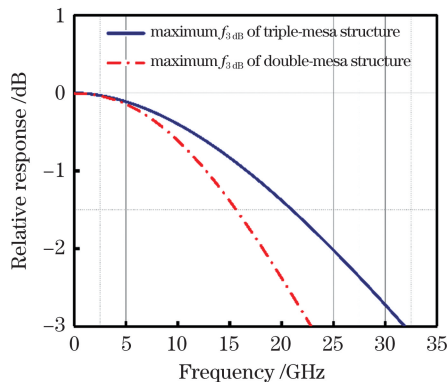


图 11 两种台面结构的 p 区倒置型 APD 的频率响应曲线
Fig. 11 Frequency response curves of p-down APDs with two mesa structures

4 结 论

对 p 区倒置型 APD 进行设计与优化。相比于常规结构, p 区倒置型结构可将电场限制在中心区域, 降低器件的边缘电场, 具有低暗电流、高带宽的优点。对双台面、三台面结构的 p 区倒置型 APD 进行仿真分析与比较, 结果表明, 双台面结构的 APD 最大带宽可达 23 GHz, 增益带宽积为 276 GHz; 相比于双台面结构, 三台面结构能更精确地控制器件内部电场, 具有更低的暗电流和更大的带宽, 其最大带宽和增益带宽积分别为 31.7 GHz 和 289.4 GHz, 用 p 区倒置型 APD 制备成的光模块可应用到传输速率日益增长的光通信系统中。

参 考 文 献

- [1] Nakajima F, Nada M, Yoshimatsu T. High-speed avalanche photodiode and high-sensitivity receiver optical subassembly for 100-gb/s ethernet[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 243-248.
- [2] 崔星宇, 林逢源, 张志宏, 等. 低噪声 InGaAs/InP 雪崩光电二极管的模拟分析[J]. *中国激光*, 2021, 48(17): 1701001.
- [3] Cui X Y, Lin F Y, Zhang Z H, et al. Simulation analysis of low-noise InGaAs/InP avalanche photodiodes [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 1701001.
- [4] 朱子辰, 张志明. 基于雪崩光电二极管的 1550 nm 单光子探测模块[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(13): 1304001.

- [5] Zhu Z C, Zhang Z M. 1550 nm single photon detection module based on avalanche photodiode [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1304001.
- [6] 王江, 罗林保. 基于氧化镓日盲紫外光电探测器的研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1100001.
- [7] Wang J, Luo L B. Advances in Ga₂O₃-based solar-blind ultraviolet photodetectors[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1100001.
- [8] Nada M, Yoshimatsu T, Nakajima F, et al. A 42-GHz bandwidth avalanche photodiodes based on III-V compounds for 106-gbit/s PAM4 applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(2): 260-265.
- [9] Nada M, Muramoto Y, Yokoyama H, et al. Inverted InAlAs/InGaAs avalanche photodiode with low-high-low electric field profile[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51(2): 02BG03.
- [10] Campbell J C. Recent advances in avalanche photodiodes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 278-285.
- [11] Xiao Y G, Li Z Q, Li Z M S. Modeling of resonant cavity enhanced separate absorption charge and multiplication avalanche photodiodes by Crosslight APSYS[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6660: 666014.
- [12] Xiao Y G, Li Z Q, Li Z M S. Modeling of avalanche photodiodes by Crosslight APSYS [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6294: 62940Z.
- [13] Li Q, He J L, Hu W D, et al. Influencing sources for dark current transport and avalanche mechanisms in planar and mesa HgCdTe p-i-n electron-avalanche photodiodes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(2): 572-576.
- [14] Xie R Z, Li Q, Wang P, et al. Spatial description theory of narrow-band single-carrier avalanche photodetectors[J]. *Optics Express*, 2021, 29(11): 16432-16446.
- [15] Li Q, Wang F, Wang P, et al. Enhanced performance of HgCdTe midwavelength infrared electron avalanche photodetectors with guard ring designs [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, 67(2): 542-546.
- [16] Yuan P, Hansing C C, Anselm K A, et al. Impact ionization characteristics of III-V semiconductors for a wide range of multiplication region thicknesses [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(2): 198-204.
- [17] 王航, 袁正兵, 谭明, 等. 倍增层厚度对 In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 雪崩二极管器件特性的影响 [J]. *光学学报*, 2020, 40(18): 1804001.
- [18] Wang H, Yuan Z B, Tan M, et al. Effect of multiplication layer thickness on device properties of In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP avalanche photodiode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1804001.
- [19] Ishibashi T, Shimizu N, Kodama S, et al. Uni-traveling-carrier photodiodes [C] // *Ultrafast Electronics and Optoelectronics*, March 17, 1997, Incline Village, Nevada, Washington, D. C.: OSA, 1997: UC3.
- [20] Muramoto Y, Ishibashi T. InP/InGaAs pin photodiode structure maximising bandwidth and efficiency [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(24): 1749-1750.

Avalanche Photodiode with p-down Structure for 100 Gb/s Optical Communication System

Liao Zhuodong, Li Ke, Liu Haoran, Duan Xiaofeng^{*}, Huang Yongqing, Liu Kai
State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract

Objective The rapid development and widespread application of new broadband services such as cloud computing, big data, and mobile internet have led to an explosive growth in data center traffic. Due to the limitations of traditional electrical interconnects, it is difficult to meet the data transmission requirements of the current data centers, and optical interconnect technology has become the main solution for data transmission issues in data centers. In recent years, the trend in the increase of data center traffic and bandwidth is driving the upgrade of optical modules in data centers, and the demand for optical modules is growing at an accelerated rate. As the core component of the optical module, photodetectors play a key role in converting the transmitted optical signals into electrical signals. In this context, the demand for photodetectors in data centers is growing. Avalanche photodiodes (APD) are one of the photodetectors frequently used in optical modules, which have internal gain and can provide higher receiver sensitivity and dynamic range, and are receiving more and more attention from scholars. As data transmission rates move toward 100 Gb/s and 400 Gb/s, single-channel transmission rates increase to 25 Gb/s and beyond, placing higher demands on the bandwidth of photodetectors. APD can play a vital role in high-speed optical interconnection modules for data centers; therefore, it is of great importance to study APD with high bandwidth and high quantum efficiency.

Methods We use APSYS software to design and optimize the avalanche photodiode with a p-down structure (p-down APD). APSYS is a finite element analysis software that calculates the optical and electrical properties of semiconductor devices by self-consistently solving Poisson's equation, the carrier continuity equation, and the current density equation with various physical models. The transport mechanism of carriers inside the APD is very complex, and the accuracy and reliability of the results will be affected by the proper choice of physical model. In our simulations, we use the carrier mobility model to describe the variation of carrier mobility with respect to doping concentration, an Shockley-Read-Hall (SRH) model to characterize the process of electron and hole generation and complexation in addition to the diffusion and drift of photogenerated carriers, and the Chynoweth model to characterize the extent of impact ionization accurately.

Results and Discussions In this paper, we propose a p-down APD with a hybrid absorber layer, which is designed and optimized to give full play to the advantages of the p-down structure. In the device design process, the hybrid absorber layer structure not only shortens the drift distance of the holes and alleviates the phenomenon of accumulation of holes at the interface but also solves the conflicting relationship between responsivity and bandwidth (Fig. 2). The p-down APD confines the electric field to the central region by using the double-mesa structure (Fig. 3). Due to the limiting electric field at the first mesa, the electric field in the undoped absorber layer and the electric field at the edge of the second mesa are reduced, making the p-down APD with double-mesa structure to have low dark current (Fig. 5), high bandwidth, and gain-bandwidth product (Fig. 6). A triple-mesa p-down APD is obtained by optimizing the mesa and layer structure parameters of the double-mesa p-down APD, which has the advantage of getting stronger electric field limiting effect (Fig. 8), lower dark current (Fig. 10), higher bandwidth (Fig. 11), and being useful in future optical communication systems.

Conclusions The rapid increase in transmission rate in optical communication systems puts higher demands for the photodetector bandwidth. In this paper, the p-down APD is designed and optimized using the finite element analysis software APSYS. Compared with the conventional structure, the p-down structure can confine the electric field in the central region and reduce the electric field at the edge of the device, which has the advantages of low dark current and high bandwidth. The p-down APD with double-mesa and triple-mesa structures are simulated and compared. The results show that the p-down APD with a double-mesa structure can confine the electric field to the central region and prevent undesirable edge breakdown. The dark current of this APD is about 0.1 nA, the maximum bandwidth is 23 GHz, and the

gain-bandwidth product is 276 GHz. A triple-mesa p-down APD with a maximum bandwidth of 31.7 GHz and a gain-bandwidth product of 289.4 GHz are obtained by optimizing the mesa and layer structure parameters of the double-mesa p-down APD, which has the advantage of obtaining stronger electric field limiting effect, lower dark current, and larger bandwidth. Therefore, APD with a p-down structure can play a crucial role in future optical communication systems.

Key words optical communication; photodetector; p-down avalanche photodiodes; mesa structure; gain-bandwidth product