

InGaAs/InP 单光子雪崩光电二极管 InP 顶层掺杂研究

李彬*, 陈伟, 黄晓峰, 迟殿鑫, 姚科明, 王玺, 柴松刚, 高新江

(中国电子科技集团公司第四十四研究所 化合物半导体光电子事业部, 重庆 400060)

摘要:通过理论计算和对比实验研究了 InGaAs/InP 单光子雪崩光电二极管中 InP 顶层掺杂浓度对于器件性能的影响. 理论结果显示, InP 顶层的掺杂浓度越低越有利于抑制边缘击穿, 降低隧穿暗载流子产生速率, 提高雪崩击穿几率. 实验结果显示, 顶层非故意掺杂的器件在 223 K 下获得了 20% 的单光子探测效率和 1 kHz 的暗计数率, 其单光子探测效率比顶层掺杂浓度为 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 的器件高 3% ~ 8%, 而暗计数率低一个量级. 结果表明, 降低 InP 顶层的掺杂浓度有利于提高器件性能.

关键词:InGaAs/InP; 单光子雪崩光电二极管; 顶层; 掺杂浓度

中图分类号:O47 **文献标识码:**A

InP cap layer doping density in InGaAs/InP single-photon avalanche diode

LI Bin*, CHEN Wei, HUANG Xiao-Feng, CHI Dian-Xin, YAO Ke-Ming,

WANG Xi, CHAI Song-Gang, GAO Xin-Jiang

(Compound Semiconductor Opto-Electronics Department, China Electronics Technology Group Corp. No. 44 Research Institute, Chongqing 400060, China)

Abstract: The influence of the InP cap layer doping density of InGaAs/InP SPAD was studied through theoretical calculation and comparative experiment. Theoretical results show that low cap layer doping density is beneficial to suppress premature edge breakdown, reduce tunneling carrier generation rate, and increase breakdown probability. Experimental results show that devices with unintentionally doped cap layer have achieved 20% single photon detection efficiency and 1 kHz dark count rate at 223 K. Compared with devices with cap layer doping density of $5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$, the single photon detection efficiency increases by 3% ~ 8%, and the dark count rate decreases by about an order of magnitude. It is demonstrated that reducing the cap layer doping density is beneficial to improve the performance of InGaAs/InP SPAD.

Key words: InGaAs/InP, single-photon avalanche diode, cap layer, doping density

PACS: 85.60.Gz, 73.40.Kp, 81.15.Hi

引言

InGaAs/InP 单光子雪崩光电二极管 (SPAD) 具有性能优良、成本低、体积小、无需超低温制冷等优势, 是近红外波段单光子探测的主要技术方案和主流技术发展方向^[1-2], 广泛应用于量子通信和量子信息、激光探测与激光成像、分子发光与量子光谱分析

等领域^[3-5]. 特别是随着量子保密通信的迅速发展, 作为量子保密通信核心器件的 InGaAs/InP SPAD 成为研发热点^[6-7].

InGaAs/InP SPAD 基于分离吸收、渐变、电荷、倍增 (SAGCM) 结构, 广泛采用如图 1 所示的高可靠性平面型结构^[7-8]. 器件 PN 结及倍增层均在 InP 顶层形成, 因此 InP 顶层结构参数特别是掺杂浓度的

收稿日期: 2017-01-12, 修回日期: 2017-04-20

基金项目: 中国电子科技集团创新基金项目 (KJ1402011)

Foundation items: Supported by China Electronic Technology Group Innovation Fund Project (KJ1402011)

作者简介 (Biography): 李彬 (1987-), 男, 山东泰安人, 高级工程师, 工学博士, 主要研究领域为近红外 InP 基光电探测器.

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: lbatcq@163.com

Received date: 2017-01-12, revised date: 2017-04-20

合理设计是获得高性能 InGaAs/InP SPAD 的前提. 本文通过理论计算和对对比实验研究了 InP 顶层掺杂浓度对于 InGaAs/InP SPAD 性能的影响. 其中理论计算基于载流子漂移-扩散模型和 Zappa 等人^[9]建立的碰撞离化模型.

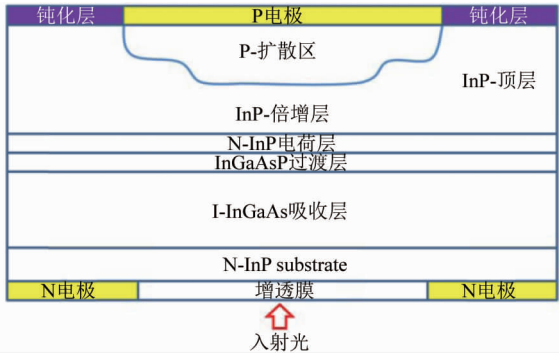


图1 平面型 InGaAs/InP SPAD 结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of planar type InGaAs/InP SPAD

1 模拟计算

1.1 顶层掺杂对边缘击穿抑制的影响

抑制边缘击穿是平面型 SPAD 研制的关键之一. 平面型 SPAD 一般采用阶梯型 PN 结结构^[7]逐级削弱边缘电场强度, 实现边缘击穿的抑制. 边缘击穿抑制效果决定于器件内部电场分布及不同区域的击穿电压.

图2是击穿电压下不同顶层掺杂浓度的器件内部电场分布, 其中图2(a)横轴 D 是阶梯结中心和边缘的深度差, 纵轴 E/E_c 是图2(b)中所标注的各区域电场强度与中心倍增区电场强度之比. 吸收层厚度为 $2\ \mu\text{m}$, 倍增层厚度为 $1\ \mu\text{m}$. 由图2可见, 阶梯结中心和边缘深度差相同时, 顶层掺杂浓度越低边缘各区域电场强度越低.

图3是不同顶层掺杂浓度的器件击穿电压与倍增层厚度的关系, 其中吸收层厚度为 $2\ \mu\text{m}$, 调节电荷层掺杂浓度使倍增层厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 时器件击穿电压相同. 由图3可见, 顶层掺杂浓度越低, 器件击穿电压随倍增层厚度变化越快. 因此当阶梯结中心和边缘深度差相同时, 顶层掺杂浓度越低阶梯结边缘击穿电压越高.

边缘局域电场越低、边缘击穿电压越高则边缘击穿抑制效果越好. 因此降低顶层掺杂浓度有利于抑制边缘击穿. 另外, 顶层低掺杂可以有效降低器件表面电场强度(图2中 E4), 有利于防止半导体/电介质界面处高电场导致的器件失效, 提高器件可靠

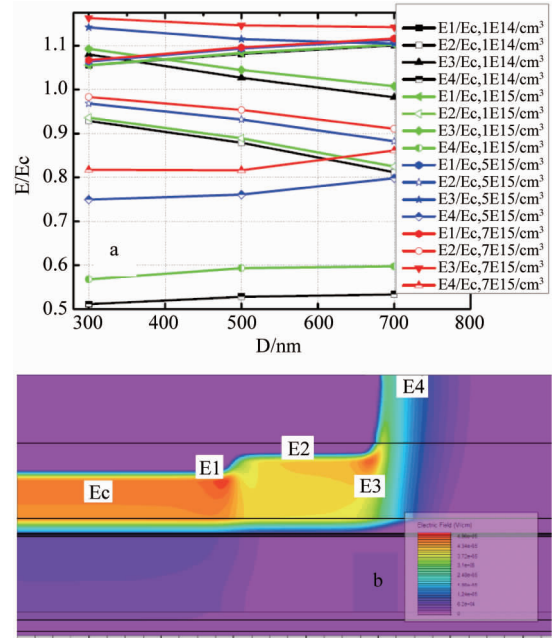


图2 击穿电压下不同顶层掺杂浓度的器件内部电场分布
Fig. 2 Electric field distribution as a function of doping density of the cap layer at breakdown voltage

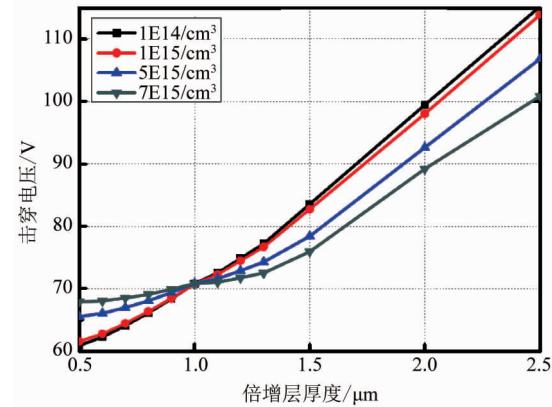


图3 InGaAs/InP SPAD 击穿电压—倍增层厚度关系
Fig. 3 Breakdown voltage as a function of multiplication layer thickness of InGaAs/InP SPAD

性^[10].

1.2 顶层掺杂对隧穿暗计数的影响

SPAD 倍增层隧穿暗载流子引起的暗计数是 SPAD 暗计数的重要成分^[8,11], 降低隧穿暗计数有助于提高器件性能. 隧穿分带间隧穿和陷阱辅助隧穿. 带间隧穿单位体积暗载流子产生速率表示为式(1), 陷阱辅助隧穿单位体积暗载流子产生速率表示为式(2):

$$N_{\text{BBT}} = \frac{\sqrt{2m_r}q^2E^2}{4\pi^3\hbar^2\sqrt{E_g}} \exp\left(-\frac{n\sqrt{m_r}E_g^{3/2}}{2\sqrt{2}qE\hbar}\right), \quad (1)$$

$$N_{\text{TAT}} = \frac{\sqrt{\frac{2m_r}{E_g} \frac{q^2 E^2}{4\pi^3 \hbar^2}} N_{\text{Trap}} \exp\left(-\frac{\pi \sqrt{m_{\text{lh}} E_{\text{B1}}^3} + \pi \sqrt{m_e E_{\text{B2}}^3}}{2\sqrt{2}qhE}\right)}{N_v \exp\left(-\frac{\pi \sqrt{m_{\text{lh}} E_{\text{B1}}^3}}{2\sqrt{2}qhE}\right) + N_c \exp\left(-\frac{\pi \sqrt{m_e E_{\text{B2}}^3}}{2\sqrt{2}qhE}\right)}, \quad (2)$$

其中 E 为电场强度, E_g 为材料禁带宽度, $m_r = 2m_e \times m_{\text{lh}} / (m_e + m_{\text{lh}})$ 为载流子约化有效质量, $m_e = 0.08m_0$ 为电子有效质量, m_0 为电子质量, $m_{\text{lh}} = 0.089m_0$ 为轻空穴有效质量, N_v 和 N_c 分别是价带和导带的有效态密度, N_{Trap} 是陷阱浓度, E_{B1} 和 E_{B2} 分别是价带到陷阱和从陷阱到导带的势垒高度, 根据 McIntosh^[12] 等的报道, 对于 InP, $E_{\text{B1}} = 0.75E_g$, $E_{\text{B2}} = 0.25E_g$.

顶层掺杂浓度影响器件发生雪崩击穿所需要的电场强度, 从而影响隧穿暗载流子产生率和暗计数率. 图 4 是 300 K 和 220 K 时不同顶层掺杂浓度的 SPAD 击穿电场强度与倍增层厚度的关系, 可见倍增层厚度相同时顶层掺杂浓度越高击穿电场越高. 图 5 是不同顶层掺杂浓度的 SPAD 击穿电压下单位面积隧穿暗载流子产生率对比. 可见倍增层厚度相同时顶层掺杂浓度越高隧穿暗载流子产生速率越快. 因此由隧穿暗载流子引起的暗计数也就越高. 另外, 隧穿暗载流子产生率随倍增层厚度的增加而降低, 意味着采用厚倍增层有利于降低器件暗计数率.

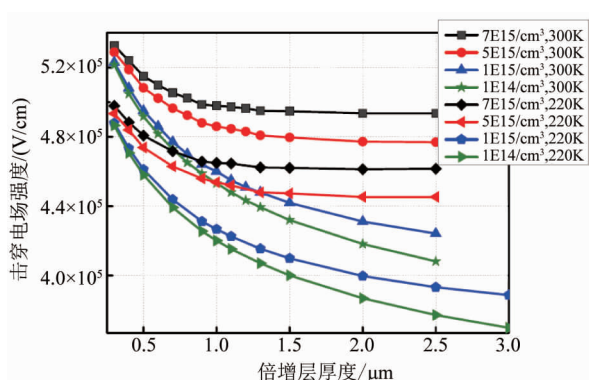


图 4 不同顶层掺杂浓度的 SPAD 击穿电场强度与倍增层厚度的关系

Fig. 4 Breakdown electric field as a function of multiplication layer thickness with the cap layer at different doping levels

1.3 顶层掺杂浓度对纵向电场分布及雪崩特性的影响

图 6 是击穿电压下不同顶层掺杂浓度的 SPAD 器件倍增层纵向电场分布, 可见掺杂浓度越高倍增层内电场强度变化越剧烈. 电场剧烈变化导致载流

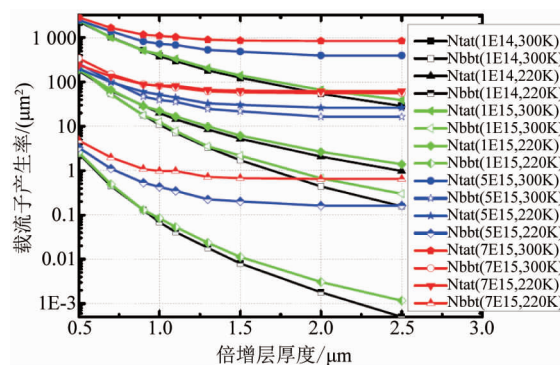


图 5 不同顶层掺杂浓度 SPAD 击穿电压下隧穿暗载流子产生率

Fig. 5 Tunneling carrier generation rate as a function of doping density of the cap layer at breakdown voltage

子碰撞电离产生率剧烈变化, 如图 7 所示. 部分区域可能会由于电场强度过低而不能有效发生雪崩倍增, 进一步增加倍增层厚度“有效倍增层”也不再增加, 因此图 4 和图 5 中顶层掺杂浓度越高击穿电场强度和隧穿暗载流子产生率越早不再随倍增层厚度的增加而降低.

同样过偏压下, 雪崩击穿几率与倍增层外的耗尽区厚度反相关^[13]. 在名义上倍增层厚度相同的情况下, 顶层掺杂浓度越高“有效倍增层”厚度越薄, 而不能有效发生雪崩倍增的耗尽区则相应变厚, 因此击穿几率降低, 这意味着单光子探测效率的降低.

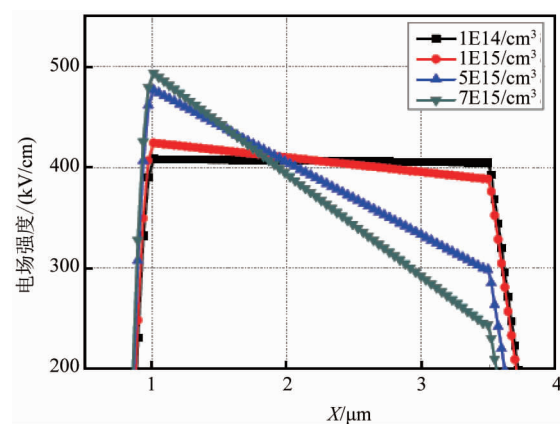


图 6 器件倍增层纵向电场分布

Fig. 6 Vertical electric field distribution of the multiplication layer

2 实验结果

采用顶层非故意掺杂 (掺杂浓度 $< 1 \times 10^{15} / \text{cm}^3$) 和掺杂浓度为 $5 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ 的外延结构, 通过相同的制备工艺制备了两种如图 1 所示的背入射平

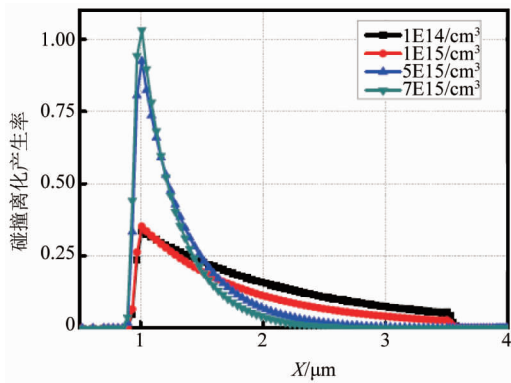


图7 器件归一化纵向载流子碰撞离化产生率分布
Fig. 7 Normalized vertical carrier impact generation rate distribution

面型 InGaAs/InP SPAD 器件样品,并进行了测试分析. 器件直径 $25 \mu\text{m}$,其制备过程中首先采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)在 N-InP 衬底上依次生长 InP 缓冲层、InGaAs 吸收层、InGaAsP 过渡层、InP 电荷层与 InP 顶层,其次在 InP 顶层扩散形成阶梯型 PN 结,通过控制扩散深度使倍增层厚度在 $1 \mu\text{m}$ 左右.

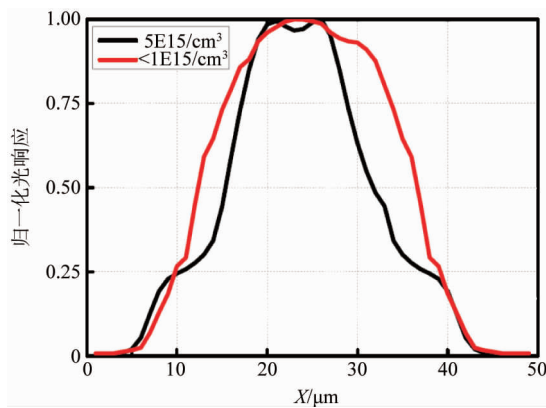


图8 InGaAs/InP SPAD 归一化光响应—位置曲线
Fig. 8 Normalized response profile as a function of positions of the InGaAs/InP SPAD

在击穿电压之下 2 V 沿光敏区轴线进行了器件光响应-位置扫描测试,其归一化结果如图 8 所示. 顶层非故意掺杂的器件在光敏区的中心光响应最强,在边缘处减弱,说明边缘击穿得到了有效的抑制,而顶层掺杂浓度 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 的器件则在光敏区的边缘光响应强于中心,说明边缘击穿抑制效果较差,与计算结果吻合.

器件不同过偏压下的单光子探测效率特性如图 9 所示,其中信号光波长为 $1.55 \mu\text{m}$,温度为 223 K .

两种器件单光子探测效率均随着过偏压的升高而升高,同样过偏压下顶层非故意掺杂的器件单光子探测效率比顶层掺杂浓度 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 的器件高约 $3\% \sim 8\%$,与理论预期吻合.

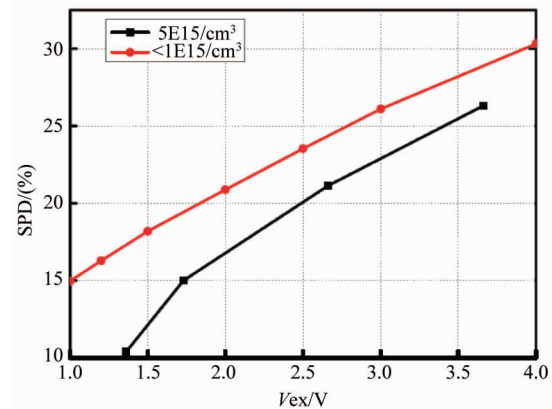


图9 器件过偏压—单光子探测效率关系曲线
Fig. 9 Single photon detection efficiency as a function of over bias

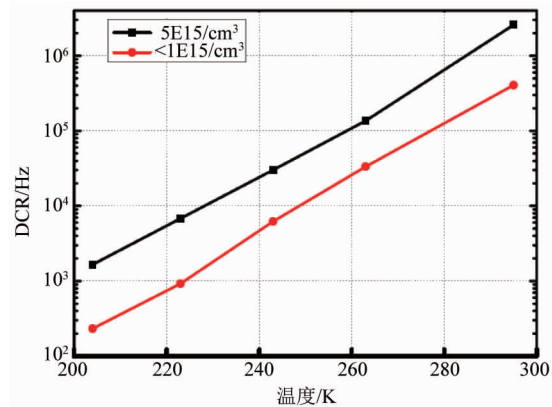


图10 器件暗计数率—温度曲线
Fig. 10 Dark count rate as a function of temperature

图 10 是两者单光子探测效率为 20% 时的暗计数率-温度特性. 顶层非故意掺杂的器件样品在 223 K 下暗计数率低至 1 kHz ,与目前最佳报道水平^[14]相当,比顶层掺杂浓度 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 的器件样品低约一个量级,这是由于较低的顶层掺杂浓度有利于抑制隧穿暗计数和边缘击穿,与理论预期吻合.

3 结论

采用理论计算研究了 InP 顶层掺杂浓度对于 InGaAs/InP SPAD 隧穿暗计数、边缘击穿抑制及击穿几率的影响,实验制备了顶层掺杂浓度不同的 SPAD 器件样品并进行了相应测试分析. 结果表明

降低顶层掺杂浓度可以降低倍增层内隧穿暗载流子产生速率,提高器件可靠性和单光子探测效率,并更容易获得良好的边缘击穿抑制效果.采用非故意掺杂的顶层制备的 InGaAs/InP SPAD 器件样品在 223 K 下获得了 20% 的单光子探测效率和 1 kHz 的暗计数率,性能远优于顶层掺杂的样品.

References

- [1] Zhang J, Itzler M A, Zbinden S, *et al.* Advances in InGaAs/InP single photon detector systems for quantum communication[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, **4**: e286.
- [2] Acerbi F, Frera D A, Tosi A, *et al.* Fast active quenching circuit for reducing avalanche charge and afterpulsing in InGaAs/InP single-photon avalanche diode[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2013, **49**(7):563–569.
- [3] McCarthy A, Ren M, Frera A D. Kilometer-range depth imaging at 1550nm wavelength using an InGaAs/InP single-photon avalanche diode detector[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(19):22098–22113.
- [4] Zhang J, Eraerds P, Walenta N, *et al.* 2.23 GHz gating InGaAs/InP single-photon avalanche diode for quantum key distribution[J]. *Proc. SPIE*, 2010, **7681**:76810Z.
- [5] Lee M H, Ha C, Jeong H S. Wavelength-division-multiplexed InGaAs-InP avalanched photodiodes for quantum key distribution[J]. *Opt. Commun.*, 2016, **361**:162–167.
- [6] Bouzid A, Han S W, Lee M S, *et al.* Single-Photon Detector at Telecommunication Wavelengths Using an Analog Integrator for Ultra Small Avalanche Discrimination[J]. *Applied Physics Express*, 2013, **6**:052201.
- [7] Tosi A, Calandri N, Sanzaro M. Low-jitter, high detection efficiency InGaAs-InP single-photon avalanche diode[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, **20**(6):3803406.
- [8] Lee K, Lee B, Yoon S, *et al.* A Low noise planar-type avalanche photodiode using a single-diffusion process in Geiger-mode operation[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2013, **52**:072201.
- [9] Zappa F, Lacaita A, Cova S. Nanosecond single-photon timing with InGaAs/Inp photodiodes [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(11):846–848.
- [10] Wei J, Dries C J, Wang H S. Optimization of 10-Gb/s long-wavelength floating guard ring InGaAs-InP avalanche photodiodes [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**(7):977–979.
- [11] Acerbi F, Tosi A, Zappa F. Dark count rate dependence on bias voltage during gate-off in InGaAs/InP single-photon avalanche diode [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(18):1832–1834.
- [12] McIntosh K A, Donnelly J P, Oakley D C. InGaAs/InP avalanche diodes for photon counting at 1.06 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(14):2505.
- [13] Acerbi F, Anti M, Tosi A, *et al.* Design criteria for InGaAs/InP single-photon avalanche diode[J]. *IEEE Photonics J.*, 2013, **5**(2):6800209.
- [14] Jiang X, Itzler M, Donnell K. InP-based single-photon detectors and Geiger-mode APD arrays for quantum communications applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, **21**(3):3800112.