

MBE 生长的 PIN 结构碲镉汞红外雪崩光电二极管

顾仁杰^{1,2}, 沈川^{1,2}, 王伟强¹, 付祥良¹, 郭余英¹, 陈路¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 对中波红外碲镉汞雪崩光电二极管(APD)特性进行理论计算, 获得材料的能量散射因子及电离阈值能级与材料特性的相互关系, 从而计算器件的理论雪崩增益与击穿电压. 通过对材料特性(组分, 外延厚度, 掺杂浓度等)的优化, 设计并生长了适合制备 PIN 结构红外雪崩光电二极管的碲镉汞材料, 并进行了器件验证. 结果显示, 在 10 V 反偏电压下, 该器件电流增益可达 335.

关键词: 碲镉汞; 雪崩光电二极管; 雪崩增益; 击穿电压¹

中图分类号: O475, O782 **文献标识码:** A

MBE growth HgCdTe avalanche photodiode based on PIN structure

GU Ren-Jie^{1,2}, SHEN Chuan^{1,2}, WANG Wei-Qiang¹, FU Xiang-Liang¹, GUO Yu-Ying¹, CHEN Lu¹

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Hg_{1-x}Cd_xTe ($x=0.3$) avalanche photodiodes (APDs) with a PIN structure was investigated theoretically. The energy dispersion factor and the threshold energy are acquired according to the parameters of material. The gain as well as the breakdown voltage of the device was obtained. The composition, thickness, doping level were optimized theoretically for the APD device. A high performance APD device with a gain of 335 at the bias voltage of 10V was fabricated, which consisted of a PIN structure mad of HgCdTe grown by MBE.

Key words: HgCdTe; avalanche photodiode(APD); gain; breakdown voltage

PACS: 68.55. Ln, 72.80. Ey, 81.05. Dz

引言

碲镉汞红外雪崩焦平面器件通过对主动脉冲激光照射目标后的反射信号进行探测, 从而获取目标的距离与图像. 由于雪崩器件可实现主被动探测的特性, 碲镉汞雪崩光电二极管可作为 3D 成像器件应用于红外光电探测领域. 激光经远距离反射后作用到探测器上的光子数非常小, 这就要求器件具有较高的内增益和极高的频率响应特性. 雪崩二极管恰能满足这一探测功能. 研究表明, 由于碲镉汞材料的空穴与电子的碰撞电离系数差异大, 碲镉汞材料特别适合于制备高性能的雪崩二极管器件.

对碲镉汞雪崩光电二极管技术的研究开始于上世纪 70 年代末^[1-3]. 国外多个小组已经对碲镉汞雪崩光电二极管技术进行了深入的研究, 已经获得了高性能的雪崩光电二极管. BAE System 的 Reine^[4] 等人利用 CdZnTe 衬底上使用 LPE 技术生长了中波碲镉汞材料, 并制备了 APD 器件, 在 -11.7 V 偏压下最大增益可达 648, 过剩噪声因子 $F(M)$ 接近 1; CEA/LETI 的 Perrais^[5] 等人制备的 PIN 结构中波碲镉汞 APD 器件获得了迄今为止的最大增益 5300, 过剩噪声因子为 1.5. 虽然国外机构已经在碲镉汞雪崩光电二极管研究领域做了大量的工作, 但是国内却无相关的研制经验.

在大的反向偏置电压下, 光生电子-空穴对能够在电场加速下获得足够高的能量, 通过与离子相撞而产生更多的次级电子-空穴对. 随着反向偏置电压趋向于反向击穿电压, 这些载流子在耗尽区中继续碰撞, 电离出更多的电子空穴对, 从而产生雪崩. 雪崩增益 M 与材料的离化系数有关. 离化系数定义为载流子在单位长度中发生电离碰撞的次数, 与材料特性和散射机制相关, 并且决定了器件的雪崩增益及频响特性. 通常情况下, 材料的电子离化系数 α 与空穴离化系数 β 是有差异的, 雪崩器件的噪声特性由离化系数比 $k = \beta/\alpha$ 决定. 当 α 与 β 差异很大时, 材料具有非常小的噪声因子. 在碲镉汞材料中, k 与组分 x 具有非常强的相关性^[6]. 通过调节组分, 碲镉汞在短波段是空穴倍增型 ($x = 0.6, k > 30$), 在中长波段是电子倍增型 ($x < 0.4, k < 0.06$).

碲镉汞 APD 主要有三种结构, 高密度垂直互连光电二极管结构 (HDVIP, High-Density Vertically Interconnected Photodiode)^[7], PIN 结构^[4] 和吸收倍增分离结构 (SAM, Separate Absorption and Multiplication Region)^[8]. 虽然结构不同, 但它们在耗尽区的设计上非常相似. 本文对耗尽区参数进行计算, 从电离阈值能级和能量散射因子入手, 获得了中波电子雪崩型碲镉汞材料的增益与材料参数的关系. 进一步分析了器件增益与击穿电压之间的相互制约关系, 优化了材料结构. 最后通过对材料特性 (组分, 外延厚度, 掺杂浓度等) 的理论计算, 设计并生长了 PIN 结构碲镉汞材料, 最终制备了具有一定性能的碲镉汞雪崩器件.

1 理论计算

早期对碲镉汞材料的研究表明, 材料中电子的碰撞离化概率由下式确定^[9]:

$$P(E) = \frac{2.25 \times 10^{14} E_g^2}{E^{0.5} \varepsilon_0^2}, \quad (1)$$

其中 E_g 为禁带宽度, ε_0 为低频介电常数. 电子在电场中获得一定的能量, 当能量到达电离阈值能级 E_{th} 时, 载流子发生碰撞电离. 将式(1)对耗尽区宽度 W 积分即可求得阈值能级:

$$\int_W \frac{P(E)}{v_{sat}} dx = \frac{W}{v_{sat}} \int_V \frac{P(E)}{V + E_g} dV = \frac{W}{v_{sat}} \int_{E_{th}} \frac{P(E)}{E + \alpha E_g} dE = 1, \quad (2)$$

式中 v_{sat} 为电子饱和迁移速率, m_0^* 为自由电子有效质量. 能量散射因子 α 则与偏压 V 及电子能量存在以下关系:

$$E = (\lambda_e/W)V = \alpha \times V, \quad (3)$$

其中 λ_e 为电子平均自由程. 根据 Stratton 理论, α 可由下式估算^[10~11]:

$$\alpha = \frac{1.44 \times 10^{-3}}{W(\varepsilon_\infty^{-1} - \varepsilon_0^{-1})\theta(2e^{(\theta/T_0)} - 1)^{-1} + 1)}, \quad (4)$$

T_0 为工作温度, θ 为纵向光学模温度, ε_∞ 为高频介电常数.

电子在达到电离阈值能级 $E_{th} = \alpha \times V_{th}$ 后, 发生碰撞电离, 激发出一对能量分别为 $E_{th}/2$ 的热电子, 次级电子继续加速并电离出新的电子对, 因而雪崩增益可以表述为^[12]:

$$M = 2^{\frac{E - E_{th}}{E_{th}/2} + 1} = 2^{\frac{V - V_{th}}{V_{th}/2} + 1} = 2^{\frac{V - E_{th}\alpha E}{E_{th}/2\alpha E} + 1}. \quad (5)$$

增益-偏压的相互关系见图 1. 由图可见, 在相同耗尽区宽度条件下, 增益与偏压具有密切关联. 在耗尽区宽度较小时, 增益与宽度呈指数关系.

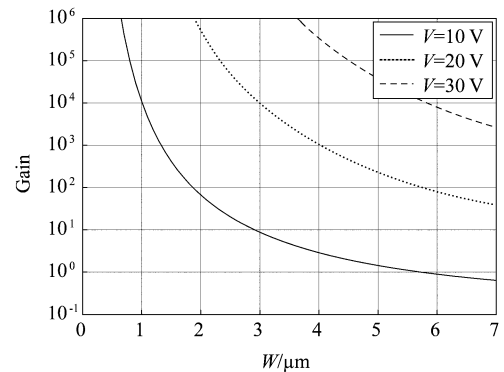


图 1 77 K 下 $x = 0.3$ 的碲镉汞材料增益与耗尽区宽度的关系

Fig. 1 Gain versus depletion widths for a $x = 0.3$ HgCdTe at 77 K for various bias voltages

通过以上分析可以得知, 要获得高性能的雪崩二极管, 必须提高器件的击穿电压, 同时需要保持较小的耗尽区宽度. 在理想的中波碲镉汞材料中, 较高的掺杂浓度与较窄的耗尽区宽度导致较低的材料反向击穿电压. 半导体材料的击穿电压由下式给出^[5]:

$$V_B = 60 \left(\frac{E_g}{1.1} \right)^{3/2} \left(\frac{N_g}{10^{16}} \right)^{-3/4}. \quad (6)$$

$$N_B^{-1} = N_A^{-1} + N_D^{-1}$$

在碲镉汞材料中, 通常 P 型层掺杂浓度约为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 考虑到雪崩光电二极管工作电压一般为 10 ~ 100 V 之间, 故在中波 ($x = 0.3$) 碲镉汞材料 PIN 结构中, 本征层掺杂浓度应控制在 $2.5 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{16}$ 之间, 见图 2.

对耗尽区宽度的理论计算由下式给出:

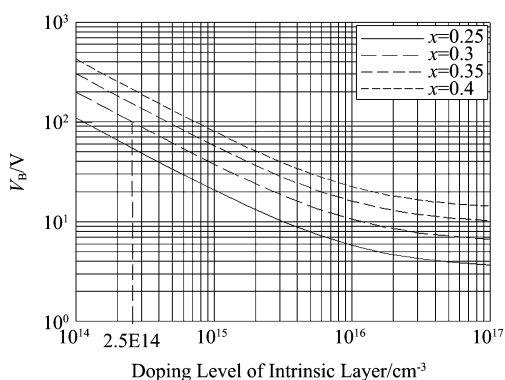


图2 不同组分碲镉汞材料击穿电压与本征层掺杂浓度的关系

Fig. 2 The breakdown voltage V_b versus the doping level in the intrinsic layer for various compositions

$$W = \left[\frac{2\epsilon_\infty \epsilon (V + V_{bi}) (N_A + N_D)}{qN_A N_D} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

$$W_n = \left[\frac{2\epsilon_\infty \epsilon (V + V_{bi})}{qN_D (1 + \frac{N_D}{N_A})} \right]. \quad (8)$$

典型的 PIN 结构示意图见图 3, 图 4 为总耗尽区宽度及 N 层中耗尽区宽度与 N 层掺杂浓度的关系(假定 P 区掺杂浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). 从图中可以看出, 随着 N 层掺杂浓度的降低, 总耗尽区宽度增加, 导致增益降低. 同时, 掺杂浓度的降低反而提高了器件的击穿电压. 因此, 对高性能碲镉汞雪崩光电二极管的优化设计必须综合考虑以上两个因素. 图 5 给出了一种较为简单直观的方法. 当理想的器件工作电压为 20 V 时, 其掺杂浓度必须低于 $2.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 总耗尽区宽度大于 $3.59 \mu\text{m}$, N 层耗尽宽度约为 $0.73 \mu\text{m}$, 理论增益约为 1500. 不同 N 掺杂浓度下器件性能的对比关系见表 1.

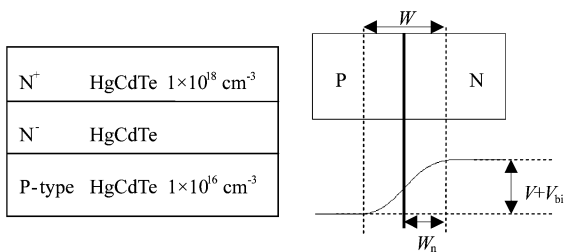


图3 典型 PIN 结构示意图
Fig. 3 Illustration of PIN structure

对碲镉汞雪崩光电二极管材料的设计必须遵循以下原则: N 层掺杂浓度应尽可能低, 以降低带间隧穿, 提高击穿电压; 耗尽区宽度应尽可能窄, 以获得

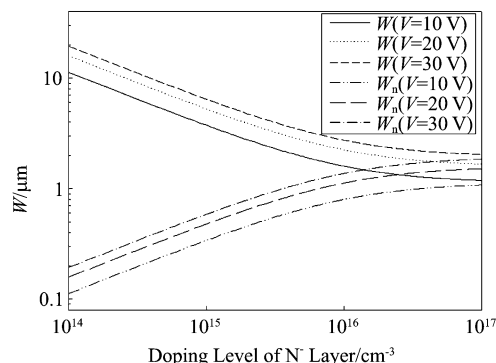


图4 不同偏压下总耗尽区宽度及 N 层耗尽区宽度与 N 层掺杂浓度的关系

Fig. 4 Widths of total depletion and that in N⁻ region versus acceptor density at various bias voltages

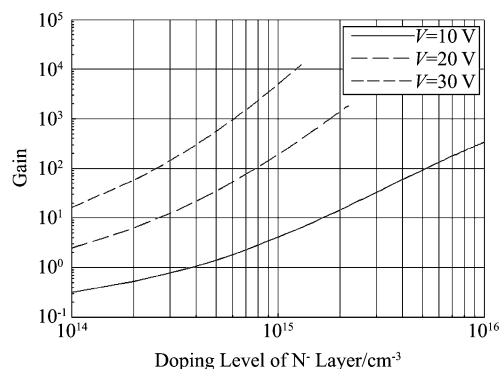


图5 不同偏压下增益与 N⁻ 掺杂浓度的关系
Fig. 5 Gain of the device versus doping level in various bias voltages

表1 增益与各设计参数之间的关系
Table 1 Relationship between designed parameters and gain

掺杂浓度/(cm^{-3})	1×10^{16}	1×10^{15}	1×10^{14}
击穿电压/V	12	36	190
工作电压/V	10	30	100
$W/\mu\text{m}$	1.3	6.3	25
$W_n/\mu\text{m}$	0.68	0.57	0.25
增益	350	1500	10 000

较高的增益, 同时应与载流子平均自由程相当. 优化后的中波碲镉汞雪崩光电二极管材料 PIN 结构由表 2 确定, 其工作电压设定为 10 V, 增益约为 350.

表2 中波碲镉汞雪崩光电二极管材料设计参数
Table 2 Designed parameters for an ideal HgCdTe APD device

	N ⁺	N ⁻	P
厚度/ μm	3	1	4
掺杂浓度/(cm^{-3})	1 018	1 016	1 016

2 实验

如图 6 所示,在 GaAs 衬底上,使用 Riber 32P 分子束外延设备原位生长了 PIN 结构的 HgCdTe 材料. 衬底材料装入 MBE 腔体后进行除气与脱氧;在生长碲镉汞材料之前,首先生长一层 CdTe 缓冲层来减小碲镉汞与 GaAs 衬底材料间大的晶格失配;通过控制生长温度及 Te 和 CdTe 的束流配比来控制材料的组分及生长速率,吸收层 Cd 组分控制在 0.31,生长速率约为 $2 \mu\text{m}/\text{h}$;通过控制 In 束源炉的束流,实现精确原位掺杂 N 及 N⁺ 层. In 的掺杂浓度主要靠改变 In 炉温度来实现,材料生长完之后,在其表面生长一层 ZnTe/CdTe 进行保护,最后通过原位高温退火,适当降低材料缺陷密度.

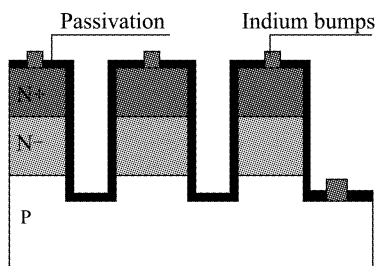


图 6 碲镉汞雪崩光电二极管台面焦平面阵列器件结构示意图
Fig. 6 Illustration of PIN HgCdTe APD mesa structure in the FPA

由于台面结器件其各光敏元是分离的,能减少不同光敏元之间的串音,对于光敏元尺寸越来越小和元密度越来越高的红外探测器焦平面尤为重要. 实验选用 128×128 焦平面阵列器件制备技术对材料进行湿化学腐蚀. 对于 MBE 技术生长的 HgCdTe 材料,在 0°C 时,用 0.5% ~ 1% 的 Br_2/HBr 腐蚀液和可自动旋转磁力搅拌器对材料进行台面腐蚀,通过控制腐蚀时间来控制腐蚀深度. 台面深度约为 $5 \mu\text{m}$,由于 HgCdTe 材料 N⁺ 及 N 层总厚度为 $4 \mu\text{m}$,因此台面腐蚀已经到达 P 区. 最后,经过钝化、欧姆接触爬坡金属化和互联 In 柱等工艺,得到原理型的 PIN 型碲镉汞雪崩光电二极管器件. 整个器件的公共电极是通过最靠近衬底的 P 型层相连的.

得到的 128×128 焦平面阵列器件单元面积为 $36 \mu\text{m} \times 36 \mu\text{m}$. 在与配套设计的蓝宝石读出电路板互联后,装入杜瓦中,能在背入射模式下进行 I-V 性能测试和评价.

3 测试结果和讨论

材料 SIMS 与 X 射线双晶测试曲线见图 7. 如图 7(a) 所示,材料 N 型层厚度与掺杂浓度完全达到设计要求,图 7(b) 则表示材料具有良好的晶体质量,双晶半峰宽达到 79.2 arcsec . 通过对红外透射光谱的拟合,得到的材料组分为 0.314,折算 77 K 下器件的截止波长约为 $4.8 \mu\text{m}$. 以上测试表明,现有的分子束外延原位掺杂技术已经能为高性能碲镉汞 PIN 结构雪崩光电二极管的制备提供材料技术保障.

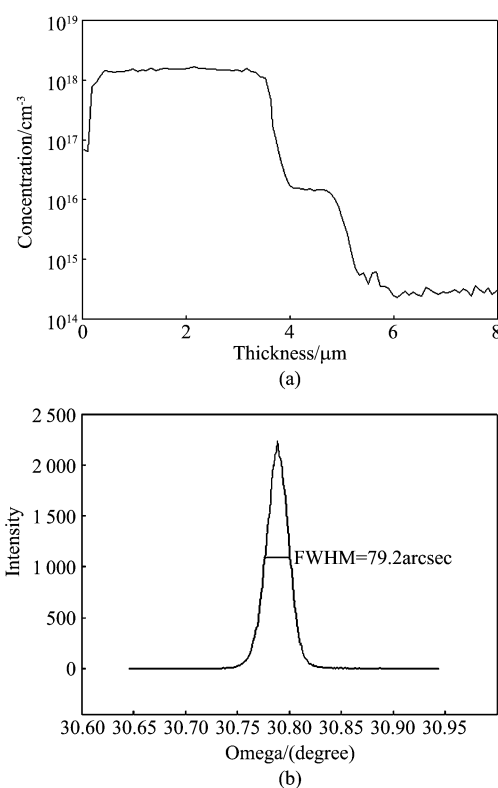


图 7 材料测试结果 (a) SIMS, (b) X 射线双晶摇摆曲线
Fig. 7 Results of the PIN materials (a) SIMS, and (b) FWHM of X-ray DCRC

图 8 是二极管器件在液氮温度 77 K 下的电流-电压 (I-V) 和动态阻抗-电压 (R-V) 曲线. 各单元的雪崩光电二极管的 I-V 曲线有很好的重复性,性能较均匀,对应的平均 R_0A 值约为 $1 \times 10^5 \Omega\text{cm}^2$,该参数已能与同波段常规碲镉汞光电探测器的性能相近.

器件的电流增益由下式简单估算:

$$M_V = \frac{I_V - I_{DV}}{I_0 - I_{D0}} \quad , \quad (9)$$

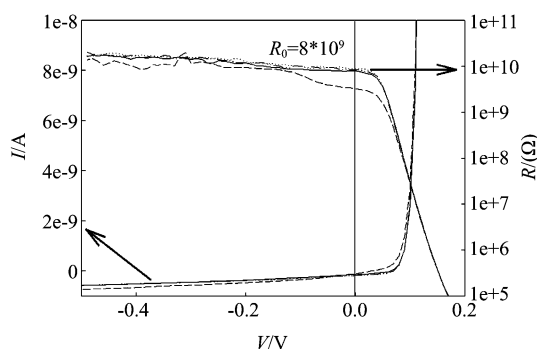


图8 器件 I-V 和 R-V 曲线

Fig. 8 I-V and R-V characteristic of HgCdTe APD device

式中 I_V 为偏压为 V 时的光电流, I_{DV} 为偏压为 V 时的暗电流, I_0 为偏压为 0 时的光电流, I_{D0} 为偏压为 0 时的暗电流. 分别对加冷屏与不加冷屏两种情况测试了器件的 IV, 对应器件的暗电流与光电流. 根据测试结果, 由上式计算得到的器件在 10 V 反偏电压下增益约为 335, 见图 9. 测试结果证实了该雪崩光电二极管结构设计的合理性.

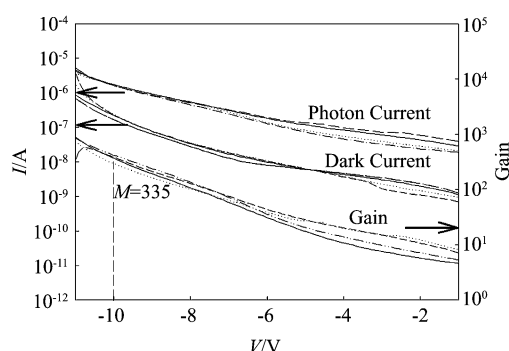


图9 器件增益

Fig. 9 Gain of the APD detector

4 结论

对 PIN 结构碲镉汞雪崩光电二极管进行了设计和优化. 从理论上计算了可用于雪崩二极管的碲镉汞材料的组分、厚度、掺杂浓度等参数. 为了优化器件性能, 平衡增益与击穿电压的相互制约, 设计 N 层掺杂浓度为 10^{16} cm^{-3} , 厚度为 $1 \mu\text{m}$. 使用分子束外延技术对设计的材料结构进行生长并原位掺杂, 最终制备了原理型器件. 测试结果表明, 器件在 10 V 偏压下电流增益达到 335, 是具备一定性能的

碲镉汞雪崩光电二极管器件.

雪崩器件的关键性能除了增益及击穿电压外, 还有过剩噪声因子, 增益归一化暗电流密度等, 本研究旨在通过相关理论分析及材料设计, 制备出具有一定雪崩性能的原理型器件, 因此仅对器件的雪崩增益及击穿特性作了实验验证, 单纯从材料的角度论证如文中设计的 PIN 结构的合理性. 在对材料特性有了一定了解之后, 将开展更深入的工作, 如对暗电流、光谱响应、噪声等参数的研究等. 由于碲镉汞红外雪崩光电二极管在主被动双模红外探测领域具有特有的优势, 因此其拥有广阔的应用前景.

REFERENCES

- [1] Verie C, Raymond F. Bandgap spin-orbit splitting resonance effects in Hg_{1-x}Cd_xTe Alloys [J], *Journal of Crystal Growth*, 1982, **59**: 342-346.
- [2] Chen A, Sher A. CPA band calculation for HgCdTe [J], *Journal of Vacuum Science & Technology*, 1982, **21**(1): 138-141.
- [3] Lecoy G P, Orsal B, Alabedra R. Impact ionization resonance and auger recombination in Hg_{1-x}Cd_xTe ($0.6 < x < 0.7$) [J], *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, **QE-23**(7): 1145-1153.
- [4] Reine M B, Marciniak J W, Wong K K, et al. Characterization of HgCdTe MWIR back-illuminated electron-initiated avalanche photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, **37**(9): 1376-1386.
- [5] Perrais G, Gravrand O, Baylet J, et al. Gain and dark current characteristics avalanche photo diodes [J], *Journal of Electron Materials*, 2007, **36**: 963.
- [6] Leveque G, Nassert M, Bertho D, et al. Ionization energies in CdHgTe avalanche photodiodes [J], *Semiconductor Science Technology*, 1993, **8**: 1317-1323.
- [7] Beck J, Wan C, Kinch M, et al. The HgCdTe electron avalanche photodiode [J], *Journal of Electronic Materials*, 2006, **35**(6): 1166-1173.
- [8] de Lyon T J, Baumgratz B, Chapman G, et al. MBE growth of HgCdTe avalanche photodiode structures for low-noise $1.55 \mu\text{m}$ photodetection [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1999, 201/202: 980-984.
- [9] Kinch M A, Beck J D, Wan C F, et al. HgCdTe electron avalanche photodiodes [J], *Journal of Electronic Materials* 2004, **33**(6): 630-639.
- [10] Stratton R. The influence of interelectronic collisions on conduction and breakdown in polar crystals [J], *Proceedings of the Royal Society A*, 1958, 246: 406-422.
- [11] Kinch M A. A theoretical model for the HgCdTe electron avalanche photodiode [J], *Journal of Electronic Materials*, 2008, **37**(9): 1453-1459.
- [12] Alabedra R, Orsal B, Lecoy G, et al. An HgCdTe avalanche photodiode for optical-fiber transmission systems at $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ [J], *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1985, **32**(7): 1302-1306.