



InP 基 UTC-PD 的理论分析与模拟

谢生^①, 刘丽颀^②, 亢文萍^①, 宋瑞良^①, 毛陆虹^①, 张世林^①

① 天津大学电子与信息工程学院, 天津 300072;

② 南开大学物理学院, 天津 300074

E-mail: xie_sheng06@tju.edu.cn

2008-10-30 收稿, 2009-04-14 接受

国家自然科学基金(批准号: 60736035)和天津大学青年教师培养基金(批准号: TJU-YFF-08B64)资助项目

摘要 首先采用漂移-扩散理论分析了单行载流子光电探测器(UTC-PD)的光电流响应. 利用器件仿真器 ATLAS 建立了 UTC-PD 的器件模型, 并对优化设计的 InP/InGaAs PD 的能带结构和性能参数作了二维模拟. 模拟结果表明, 光敏面为 $14\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 、反偏电压为 2 V 时, 光电流响应的线性动态范围达 60 mW, 响应度和 -3 dB 带宽分别为 0.16 A/W 和 40 GHz. 当输入光脉冲宽度为 10 ps 时, 光电流响应的峰值达 1.3 mA, 半峰全宽(FWHM)为 28 ps.

关键词
光电子学
光电探测器
单行载流子
磷化铟
器件模拟

光纤通信和超快测试系统的发展要求光电探测器能够在高速、大功率和宽动态范围的系统中工作, 而传统的 PIN 探测器受空间电荷效应的限制, 无法同时满足这些要求. 单行载流子光电探测器(UTC-PD)是一种新型的探测器, 只有电子作为载流子流过结区. 因此, 相对于传统的 PIN 探测器而言, 它具有更快的响应速度、更高的饱和电流和更宽的线性动态范围^[1~4]. 自器件结构提出后, UTC-PD 就引起人们的极大兴趣.

最近, 国内外研究人员在器件设计和实验制备方面取得了很大的进展. 2004 年, Ito 等人^[2]报道了 -3 dB 带宽达 310 GHz 的 UTC-PD, 并在光电集成电路、高功率毫米波产生器和测试系统信号源方面得到应用. 2007 年, Virginia 大学的 Wang 等人^[3]用直径 40 μm 的 PD 取得了 14 GHz 带宽和 25 dBm 的输出功率, 饱和电流-带宽积达 $1820\ \text{mA} \cdot \text{GHz}$. 2008 年, 法国 Alcatel-Thales III-V 实验室制备出高功率、高线性度的 UTC-PD, 20 GHz 的饱和电流达 70 mA^[4]. 相对于实验制备而言, 器件模拟方面的研究较少^[5~7], 且多为数值方法建立的一维模型. 为了简化计算, 这些模型都作了近似, 且未考虑掺杂浓度和电场对迁移率的影响.

本文从泊松方程和载流子连续性方程出发, 采用漂移-扩散理论分析了 InP 基 UTC-PD 的光电流响应, 用器件仿真器 ATLAS 建立了包括掺杂浓度和电场对迁移率的影响及负微分饱和速度效应的器件模型, 以使器件模拟与实际工作模式一致. 基于所建模型, 对优化设计的 InP/InGaAs UTC-PD 的能带结构、光电流响应和瞬态特性作了二维模拟.

1 理论分析

对于图 1 所示的 InP/InGaAs UTC-PD 的典型结构而言, 器件反偏时的电子速度过冲效应使得平滑能带不连续的间隔层对器件性能的影响可以忽略不计^[1,5]. 根据 UTC-PD 的工作原理, 总电流密度表示为

$$J_{\text{tot}} = \frac{1}{W} \int_0^W \left(J_e + J_h + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) dx, \quad (1)$$

式中有源区厚度 $W = W_A + W_C$, W_A 和 W_C 分别为吸收区和收集区厚度, J_e 为电子电流密度, J_h 为空穴电流密度, $\varepsilon \partial E / \partial t$ 是对 W 积分得到的位移电流密度, ε 是介电常数.

当器件短路时 ($\partial E / \partial t = 0$), 收集区电流是吸收区注入的电子电流, 因而方程(1)可重写为

引用格式: 谢生, 刘丽颀, 亢文萍, 等. InP 基 UTC-PD 的理论分析与模拟. 科学通报, 2009, 54: 3092~3096

Xie S, Liu L S, Kang W P, et al. Theoretical analysis and simulation of InP-based uni-traveling-carrier photodetector. Chinese Sci Bull, 2009, 54, 3691–3696, doi: 10.1007/s11434-009-0394-x

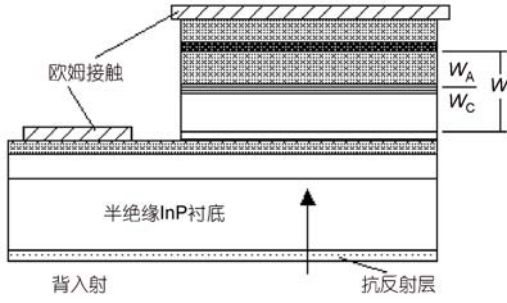


图1 InP/InGaAs UTC-PD 结构示意图

$$J_{\text{tot}} = \frac{1}{W} \int_0^{W_A} (J_e + J_h) dx + \frac{1}{W} \int_{W_A}^{W_A+W_C} J_e dx. \quad (2)$$

为了得到 J_e 和 J_h 的值, 必须求解泊松方程和载流子连续性方程. 当 InGaAs 吸收区掺杂浓度较高 ($\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 并忽略载流子感生电场 $E(x)$ 对电子输运的影响时, 泊松方程和载流子连续性方程表示为^[8]

$$\frac{\partial(\varepsilon E(x))}{\partial x} = q(p - n), \quad (3)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G - \frac{n}{\tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_e n E_0 + D_e \frac{\partial n}{\partial x} \right], \quad (4a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G - \frac{p}{\tau} + \frac{\partial}{\partial x} [\mu_h p_0 E(x)], \quad (4b)$$

式中 q 是电子电荷, n 是光生电子浓度, p 是光生空穴浓度, p_0 是本底空穴浓度, G 是光生载流子的产生率, τ 是载流子寿命, E_0 是作用在少子上的准中性场, $E(x)$ 是光生载流子感生电场, $\mu_e(\mu_h)$ 是电子(空穴)的迁移率, D_e 是电子扩散系数.

当电场 $E(x)$ 受到以 $\exp(j\omega t)$ 时变的小信号微扰时, 满足下面的电流连续性方程

$$J_e + J_h + \varepsilon(\partial E / \partial t) = \text{const}, \quad (5)$$

(5)式对 x 求微分, 可得

$$\frac{\partial}{\partial x} [J_e + J_h] = -j\omega\varepsilon \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{j\omega\tau_R}{1 + j\omega\tau_R} \frac{\partial J_e}{\partial x}, \quad (6)$$

式中 τ_R 为介电弛豫时间, 可表示为 $\tau_R = \varepsilon / q\mu_h p_0$. 在吸收区掺杂浓度 $N_A = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 吸收区的介电弛豫时间 ($\tau_R = 3 \sim 4 \text{ ps}$) 对光响应的影响可以忽略不计^[1].

利用边界条件 $J_e|_{x=W_A} = J_e(W_A)$ 和 $J_h|_{x=W_A} = 0$ 对 (6)式积分, 可得

$$J_e + J_h = J_e(W_A) \left[1 - \frac{j\omega\tau_R}{1 + j\omega\tau_R} \left(1 - \frac{J_e(x)}{J_e(W_A)} \right) \right]. \quad (7)$$

假定收集区的电子漂移速度 $v_e = \text{const.}$, 在小信号近似条件下, 收集区的电子电流密度可表示为^[5]

$$\begin{aligned} \frac{1}{W} \int_{W_A}^{W_A+W_C} J_e dx &= \frac{W_C}{W} J_e(W_A) \\ &\times \left[\frac{\sin(\omega\tau_c/2)}{\omega\tau_c/2} \right] \exp(-j\omega\tau_c/2), \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $\tau_c = W_C / v_e$ 为电子渡越收集区的时间, W_C 为收集区厚度, v_e 为电子漂移速度.

将(7)式和(8)式代入(2)式, 可得 UTC-PD 的光电流响应表达式

$$\begin{aligned} J_{\text{tot}} &= \frac{1}{W} \int_0^{W_A} J_e(W_A) \left[1 - \frac{j\omega\tau_R}{1 + j\omega\tau_R} \left(1 - \frac{J_e(x)}{J_e(W_A)} \right) \right] dx \\ &+ \frac{W_C}{W} J_e(W_A) \left[\frac{\sin(\omega\tau_c/2)}{\omega\tau_c/2} \right] \exp(-j\omega\tau_c/2). \end{aligned} \quad (9)$$

当吸收区/收集区界面的电子输运机制为热电子发射模型时, 边界条件 $J_e|_{x=W_A} = J_e(W_A)$ 可表示为^[5]

$$\begin{aligned} J_e(W_A) &= J_e|_{x=W_A} = \\ &= \frac{-qGW_A}{1 + (W_A/v_{th} + W_A^2/2D_n)/\tau + j\omega(W_A/v_{th} + W_A^2/2D_n)}, \end{aligned} \quad (10)$$

式中 q 是电子电荷, G 是光生载流子的产生率, W_A 是吸收区厚度, v_{th} 是热电子发射速度, D_e 是电子扩散系数, τ 是载流子寿命, ω 是角频率.

将(10)式代入(9)式并对 x 积分, 即可得到 UTC-PD 的光电流响应.

2 器件结构与模型

在实际应用时, 最关心的两个参数是 UTC-PD 的响应度和响应速度. 根据文献^[9], UTC-PD 的响应度可表示为

$$R_e = \frac{k_p}{h\nu} [1 + R \exp(-\alpha W_A)] \cdot [1 - \exp(-\alpha W_A)], \quad (11)$$

式中 κ , p , $h\nu$, R 和 α 分别表示耦合常数、入射光功率、单光子能量、反射率和吸收系数.

在收集区很薄、光敏面很小的情况下, 收集区的漂移时间 τ_c 及电路 RC 时间 τ_{RC} 对器件响应时间的影响可以忽略, 因此, -3 dB 带宽可近似表示为^[10]

$$f_{-3 \text{ dB}} \approx \frac{1}{2\pi\tau_A} = \frac{1}{2\pi(W_A^2/2D_e + W_A/v_{th})}, \quad (12)$$

式中 W_A , D_e 和 v_{th} 分别为吸收区厚度, 电子扩散系数和热电子发射速度.

对比(11)和(12)式可以发现, 吸收层厚度 W_A 对响应度和-3 dB 带宽的作用相反. 因此, 为了同时取得高响应度和高速, 必须对 W_A 进行优化设计. 基于理论分析和实验报道^[2,7,11], 本文对 UTC-PD 的外延层材料结构作了优化, 如表 1 所示. 为了减少电子在吸收区的扩散时间, InGaAs 吸收区的掺杂浓度设计为线性渐变 ($5 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

表 1 模拟所用的外延层结构

层名	厚度/nm	掺杂浓度/ cm^{-3}	带隙能/eV
$\text{P}^{++}\text{InGaAs}$ 接触层	50	3×10^{19}	0.75
$\text{P}^{++}\text{InGaAsP}$ 阻挡层	20	2×10^{19}	0.85
P^+InGaAs 吸收层	220	线性渐变	0.75
i-InGaAs 间隔层	8	1×10^{15}	0.75
i-InGaAsP 间隔层	16	1×10^{15}	1.00
i-InP 间隔层	6	1×10^{15}	1.35
$\text{N}^+\text{-InP}$ 悬崖层	7	1×10^{18}	1.35
N^-InP 收集层	263	1×10^{16}	1.35
N^+InP 亚收集层	50	5×10^{18}	1.35
$\text{N}^{++}\text{InGaAs}$ 接触层	10	1.5×10^{19}	0.75
N^{++}InP 衬底	500	1.5×10^{19}	1.35

为了使器件模拟与实际工作模式一致, UTC-PD 的迁移率模型考虑了掺杂浓度和电场的影响以及平行场相关的负微分饱和速度效应. 其中, 掺杂浓度相关的迁移率模型 CONMOB 表示为^[8]

$$\mu = \mu_{\min} \left(\frac{T}{300} \right)^{\alpha} + \frac{\mu_{\max} \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta} - \mu_{\min} \left(\frac{T}{300} \right)^{\alpha}}{1 + \left(\frac{T}{300} \right)^{\gamma} \left(\frac{N}{N_C} \right)^{\delta}}, \quad (13)$$

式中 $\mu_{\min}$ 和 $\mu_{\max}$ 分别表示最小和最大迁移率, T 是绝对温度, N 是掺杂浓度, α, β, γ 和 δ 是拟合常数, N_C 是临界掺杂浓度.

包括负微分饱和速度效应的平行场迁移率模型 FLDMOB 表示为^[8]

$$\mu(E) = \frac{\mu_0 + \frac{v_{\text{sat}}}{E} \left(\frac{E}{E_C} \right)^{\chi}}{1 + \left(\frac{E}{E_C} \right)^{\chi}}, \quad (14)$$

式中 μ_0 是低场迁移率, v_{sat} 是饱和速度, E_C 是临界电场, χ 是常数.

此外, 由于光生载流子在扩散和漂移过程中会不断地复合而消失, 因而器件模型也考虑了 Auger 复

合和 Shockley-Read-Hall 复合.

在仿真过程中, 取探测器光敏面为 $14 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$, 入射波长为 $1.55 \mu\text{m}$, InGaAs 吸收区的电子和空穴饱和速度分别为 $v_{\text{satn1}} = 2.5 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ^[12]和 $v_{\text{satp1}} = 5 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ^[5], InP 收集区的电子和空穴饱和速度分别取为 $v_{\text{satn2}} = 2.6 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 和 $v_{\text{satp2}} = 6.6 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ^[7]. 除非特别指明, UTC-PD 均偏置在-2 V.

3 结果与讨论

图 2 给出了-2 V 偏压时不同光功率对应的能带结构图. 从图中可以看到, 无光照时, InP 收集区完全耗尽, 产生约 40 kV/cm 的电场梯度. 随着光功率的增加, 吸收区产生的光生载流子也相应地增加. 当注入耗尽区的光生电子浓度与该区掺杂浓度可比拟时, 注入电子就会在吸收区/收集区边界积累, 产生空间电荷效应, 进而降低有效电场和能带弯曲. 从图 2 中 1, 10, 30, 50 mW 光功率对应的能带结构可以清楚地看到, 随着光功率的增加, 能带逐渐向上偏移, 这与空间电荷效应降低能带弯曲是一致的. 另外, 从图中还可以看到, 无论是否光照, 吸收区和收集区间的能带过渡都很平缓, 无势垒尖峰出现.

图 3 给出了光电流和反偏电压、注入光功率的关系曲线. 从图 3(a)中可以看到, 光电流随光功率的增大而增大, 无光照时, 器件的暗电流为 0.8 pA . 当偏压较低时, 光电流随反偏电压近似线性增加; 偏压较高时, 光电流趋于饱和. 这是因为低偏压的 InP 收集区是部分耗尽的, 随着反偏电压的增大, 耗尽区逐渐展宽, 电子的收集效率增大, 因而光电流随之上升. 当偏压增大到 InP 收集区完全耗尽时, 进入收集区的电子被完全收集, 光电流输出趋于饱和, 偏压的进一步增加并不能使输出光电流增加. 另外, 从图中还可以看到, 随着光功率的增加, 电流饱和点逐渐移向偏压较高一侧, 这是由高压偏压使得空间电荷效应的影响减小造成的.

从图 3(b)可以看到, 光功率小于 60 mW 时, 光电流随光功率线性增长, 对应 0.16 A/W 的响应度; 光功率超过 60 mW 后, 光电流偏离线性关系, 逐渐趋于饱和, 对应的响应度也迅速降低. 输出光电流饱和与响应度降低的原因是流过收集区的光生电子接近该区的掺杂浓度, 使得电子在吸收区/收集区界面堆积而产生空间电荷效应, 有效电场降低, 因而注入电子的收集效率大大降低.

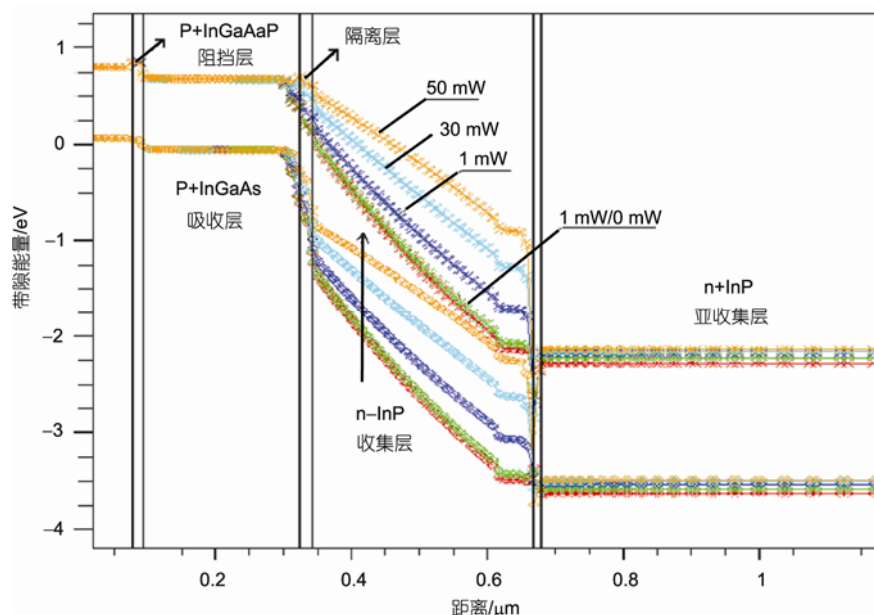


图 2 不同光功率对应的能带结构图

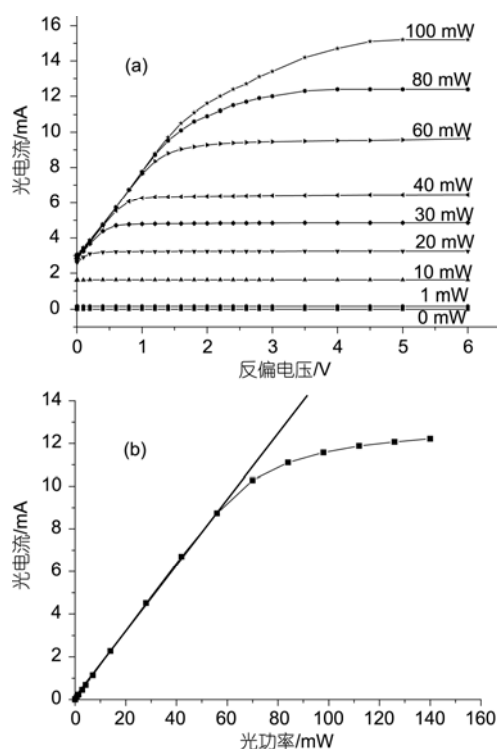


图 3 UTC-PD 的直流特性

(a) 直流光电流; (b) 光电流与光功率的关系曲线

图 4(a)给出了 UTC-PD 的交流小信号响应, 其中, 直流光功率为 5 mW, 交流光功率为 0.14 mW. 从图中可以看到, 低频时, UTC-PD 的交流光响应与频率

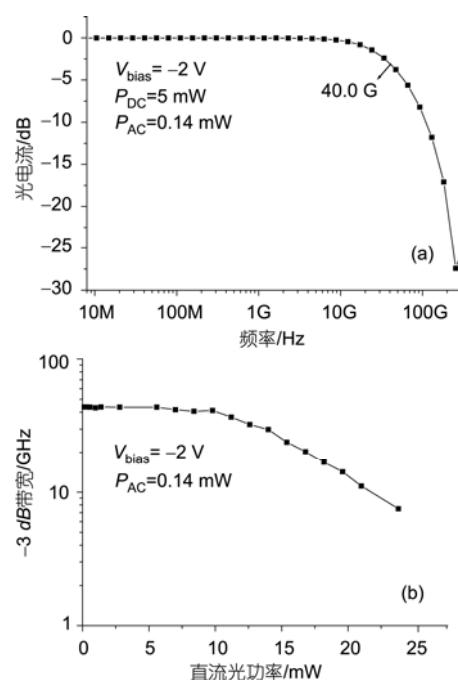


图 4 UTC-PD 的交流特性

(a) 频率响应; (b) -3 dB 带宽

无关, 保持不变; 高频时, 交流光响应受传输时间和 RC 时间常数的影响而迅速下降, 对应的 -3 dB 带宽约为 40 GHz.

在保持偏置和交流光功率不变的情况下, 改变直流光功率(140 μ W~25 mW), 可以得到 UTC-PD 的

-3 dB 带宽与直流光功率的关系曲线,如图 4(b)所示.从图中可以看到,直流光功率较小时,-3 dB 带宽基本保持不变,约为 40 GHz;当光功率超过 10 mW 后,-3 dB 带宽开始下降.带宽降低的原因与光电流饱和一致,都是由于空间电荷效应造成的.

图 5 给出了 UTC-PD 响应光脉冲的瞬态特性.其中,脉冲宽度 10 ps,光功率 10 mW.从图中可以看到,光照开始后,光电流迅速上升,在光脉冲关断 2 ps 后,光电流达到峰值 1.3 mA,对应 10% 的量子效应.因

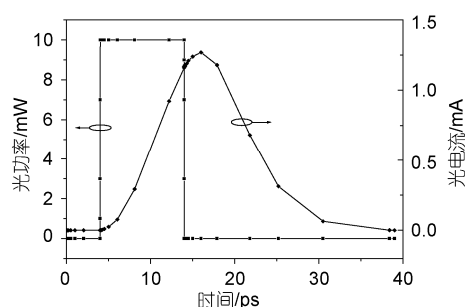


图 5 UTC-PD 的瞬态特性

为只有扩散进收集区的电子才能被电场“扫出”,从光生载流子产生到完全被“扫出”需要一定的时延,因而峰值电流滞后光脉冲.从图中还可得光电流响应的半峰全宽(FWHM)为 28 ps,上升和下降时间分别为 10 ps 和 17 ps.

4 结论

本文基于半导体物理的基本微分方程,用漂移-扩散理论分析了 InP/InGaAs UTC-PD 的光电流响应,用器件仿真器 ATLAS 对 UTC-PD 进行了建模,并对优化结构的 InP/InGaAs 器件作了二维仿真.从仿真结果可知,所设计 InP 基 UTC-PD 的线性动态范围达 60 mW,-3 dB 带宽约为 40 GHz.当输入脉宽为 10 ps,光功率为 10 mW 的光脉冲时,光电流响应的 FWHM 为 28 ps,量子效率为 10%.本文用 ATLAS 建立的 UTC-PD 器件模型完全基于半导体物理的基本方程,因此,它对器件结构和性能参数的进一步优化奠定了基础.

参考文献

- Ishibashi T, Furuta T, Fushimi H, et al. InP/InGaAs uni-traveling-carrier photodiodes. *IEICE Trans Electron*, 2000, 83: 938—949
- Ito H, Kodama S, Muramoto Y, et al. High-speed and high-output InP-InGaAs uni-traveling-carrier photodiodes. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2004, 10: 709—727[[doi](#)]
- Wang X, Duan N, Chen H, et al. InGaAs-InP photodiodes with high responsivity and high saturation power. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19: 1272—1274[[doi](#)]
- Chtioui M, Enard A, Carpentier D, et al. High-power high-linearity uni-traveling-carrier photodiodes for analog photonic links. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20: 202—204[[doi](#)]
- Ishibashi T, Kodama S, Shimizu N, et al. High-speed response of uni-traveling-carrier photodiodes. *Jpn J Appl Phys*, 1997, 36: 6263—6268[[doi](#)]
- 朱浩波, 毛陆虹, 杨展, 等. 单向载流子传输光电探测器模拟. *半导体学报*, 2006, 27: 2019—2024
- Srivastava S, Roenker K P. Numerical modeling study of InP/InGaAs uni-traveling carrier photodiode. *Solid State Electron*, 2004, 48: 461—470[[doi](#)]
- Silvaco International. ATLAS User's Manual Version 1.5.0, 1997
- Shimizu N, Mori K, Ishibashi T, et al. Quantum efficiency of InP/InGaAs uni-traveling-carrier photodiodes at 1.55-1.7 μm measured using supercontinuum generation in optical fiber. *Jpn J Appl Phys B*, 1999, 38: 2573—2576[[doi](#)]
- Shimizu N, Noriyuki W, Tomofumi F, et al. InP-InGaAs uni-traveling-carrier photodiode with improved 3 dB bandwidth of over 150 GHz. *IEEE Photon Technol Lett*, 1998, 10: 412—414[[doi](#)]
- Jun D H, Jang J H, Asesida I, et al. Improved efficiency bandwidth product of modified uni-traveling carrier photodiodes structures using an undoped photo-absorption layer. *Jpn J Appl Phys B*, 2006, 45: 3475—3478[[doi](#)]
- Adichi S. *Physical Properties of III - V Semiconductor Compounds: InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs, and InGaAsP*. New York: Wiley Interscience, 1992. 359—362