

# 单行载流子光电探测器中空间电荷屏蔽效应理论分析和实验研究<sup>\*</sup>

郭剑川<sup>†</sup> 左玉华 张 云 张岭梓 成步文 王启明

(中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100086)

(2009 年 7 月 28 日收到; 2009 年 10 月 29 日收到修改稿)

本文优化设计和外延生长了一种单行载流子(UTC)光电探测器有源区结构,并且采用微电子工艺制备了台面尺寸为 30  $\mu\text{m}$  的 UTC 光电探测器.同时,采用了漂移-扩散模型对该有源区结构进行了理论模拟,从载流子浓度和空间电场角度重点分析研究了空间电荷屏蔽效应对 UTC 光电探测器直流饱和特性影响的物理机理. UTC 光电探测器理论模拟结果与实测数据基本相符.

**关键词:** 单行载流子, 光电探测器, 空间电荷屏蔽效应

**PACC:** 0670D, 2940P, 7280E, 7850G

## 1. 引 言

半导体光电探测器的非线性现象于 1978 年首先在雪崩器件中被发现<sup>[1]</sup>. 在 20 世纪 80 年代末期和 90 年代初期, pin 结构中也发现了非线性现象<sup>[2,3]</sup>. 早期对这些非线性现象的解释都是从载流子扩散角度进行研究. 此后, 为了得到高速、高饱和功率的光电探测器, 许多科学家对半导体光电探测器的非线性现象及其机理进行了深入的研究. 半导体光电探测器的非线性效应研究主要基于 InGaAs/InP 材料体系. 光电探测器中存在众多的非线性机理, 诸如空间电荷屏蔽效应对内建电场的影响<sup>[4]</sup>、负载阻抗导致偏压不稳定<sup>[5]</sup>、热效应<sup>[6]</sup>、掺杂、未耗尽吸收区内的非线性复合<sup>[7]</sup>、非线性电容<sup>[8,9]</sup>、非线性吸收<sup>[10]</sup>、载流子散射、陷阱俘获载流子、异质界面的渡越问题、电场与载流子的扩散常数有关、载流子引起的等离子体色散效应对材料折射率的影响<sup>[11]</sup>. 人们对这些因素大多已经进行了细致的实验研究和定量计算, 但是这些非线性机理的综合影响还有待进一步探讨. 这些因素以空间电荷屏蔽效应的作用最明显.

本文中, 我们设计了一种单行载流子(UTC,

uni-travelling-carrier) 结构光电探测器, 并且采用漂移-扩散模型对此种探测器进行了详细的理论分析, 重点分析了空间电荷屏蔽效应影响光电探测器饱和特性的作用机理. 最后采用此外延结构在实验上制备了该光电探测器, 并且对该探测器的直流饱和特性进行了测量分析.

## 2. 空间电荷屏蔽效应

对普通 pin 光电探测器而言, 高速特性要求光生载流子在被吸收后能够在空间电场的作用下快速漂移出耗尽区. 当探测器工作在大输出电流时, 吸收区内的光生载流子浓度非常高. 而空穴相对于电子的漂移速度要低得多<sup>[12,13]</sup>. 因此, 两种载流子漂移速度的差异将在空间电荷区内产生空间电荷屏蔽效应, 降低空间电场强度, 进一步恶化光电探测器的高饱和输出特性.

到目前为止, 有多种方法可以减少或消除空间电荷屏蔽效应的影响, 以获得高速、高饱和电流输出的光电二极管<sup>[14]</sup>. 如采用边耦合结构来减小光生载流子的漂移距离; 采用消逝波渐变耦合波导实现在光行进方向上光吸收的均匀性, 避免载流子浓度在纵向上的分布不均; 采用双耗尽区结构减少光生

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB302802, 2007CB613404)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: jchguo2009@gmail.com

载流子的漂移空间距离和 InGaAs 层的热阻影响. 另外一种非常有效, 现在也被高速光电探测领域广泛采用的方法是采用 UTC 光电二极管结构<sup>[15]</sup>. UTC 光电探测器是日本 NTT 光子实验室 Ishibashi 等人于 1997 年研制成功的<sup>[16]</sup>.

### 3. UTC 结构与外延生长

在综合考虑高速、高饱和输出功率等特性后, 我们进一步优化设计了 UTC 光电探测器的有源区结构, 并且采用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 外延生长了该 UTC 光电探测器基片. 外延片衬底采用半绝缘 (S. I.) InP 基衬底, 首先生长 100 nm 的高掺  $p^+$ -InP 缓冲层, 然后依次生长 50 nm 的  $p^{++}$ -In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 层和 1000 nm 的  $p^+$ -InP 电极层. 吸收层总厚度为 200 nm, 采用梯度掺杂方式, 掺杂浓度按生长顺序依次为  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (30 nm,  $p^+$ ),  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (50 nm,  $p$ ),  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  (100 nm,  $p^-$ ) 和 20 nm 非故意掺杂层. 空间层包括三层, 分别为 1.4  $\mu\text{m}$ -InGaAsP (15 nm) 非故意掺杂层、1.1  $\mu\text{m}$ -InGaAsP (15 nm) 非故意掺杂层和 1.1  $\mu\text{m}$ -InGaAsP (400 nm,  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ )  $n$  型低掺杂层. 最后一层为 800 nm 的  $n^+$ -InP ( $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) 电极层. 外延片断面扫描电子显微镜 (SEM) 照片如图 1 所示. 由 SEM 断面观测得知, MOCVD 生长的有源层厚度与设计值非常符合, 厚度误差小于 10%. 外延材料质量优良, 晶格失配在 -215.2—30.5 ppm 范围内. 实际掺杂浓度与设计掺杂浓度误差小于 20%.

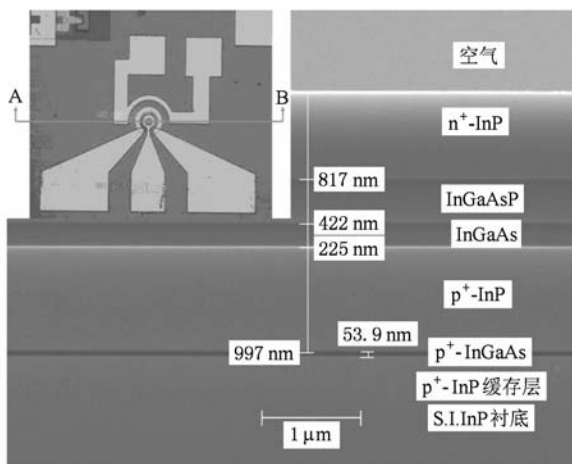


图 1 外延片断面 SEM 照片

### 4. UTC 光电探测器的直流饱和特性理论研究

如前所述, 相对于普通 pin 型光电探测器, UTC 光电探测器的主要优点是削弱了空间电荷屏蔽效应, 提高了饱和输出功率. 我们以漂移-扩散模型为基础对二维 InP 基 UTC 光电探测器的能带特性、光吸收特性、直流饱和特性等进行了数值模拟研究.

UTC 光电探测器剖面示意图和外加偏压方式如图 2 所示. 入射光正入射到探测器表面, 依次通过  $n$  区、 $i$  区和  $p$  区. 数值模拟中, 入射光波长确定为 1540 nm, 器件台面半径为 10  $\mu\text{m}$ , 通光窗口半径为 6  $\mu\text{m}$ , 电极接触均为欧姆接触, 无寄生电阻和串联电阻, 负载电阻为 50  $\Omega$ . 图 3 是 UTC 型光电探测器在 0 V 和 4 V 偏压下的能带图.

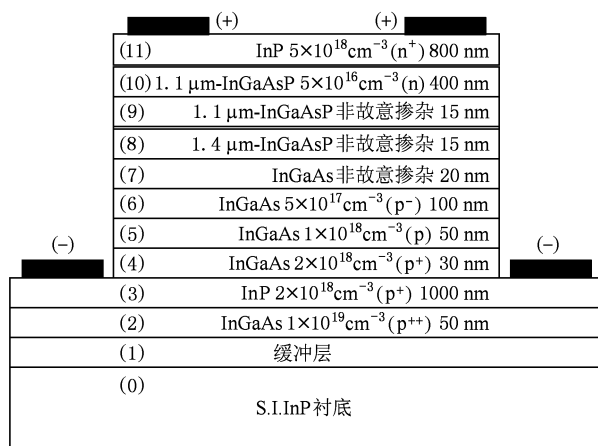


图 2 UTC 光电探测器剖面示意图

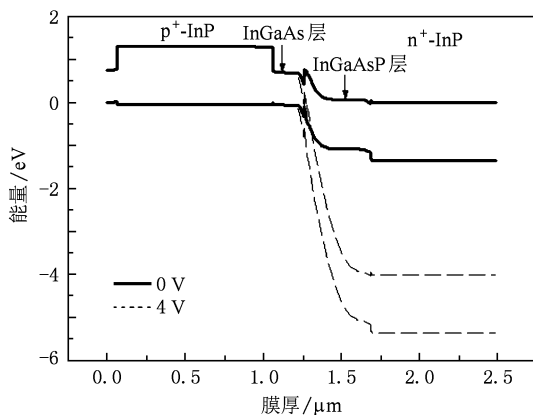


图 3 UTC 光电探测器在 0 V 和 4 V 偏压下的能带图

图 4 为 UTC 型光电探测器在无光照时不同偏压下的局部电场分布图. 在 0 V 偏压下, 虽然非故意掺杂区(7,8,9 层) 电场强度高于 50 kV/cm, 载流子在此区域内饱和漂移, 但是高场区的范围很窄, 第 10 层 1.1  $\mu\text{m}$ -InGaAsP 空间层绝大部分还没有耗尽, 电场强度在  $10^3$  V/cm 数量级, 载流子处于严重低速漂移状态. 随着外加偏压逐渐增大, 1.1  $\mu\text{m}$ -InGaAsP 空间层的电场强度也随之增大, 渐变掺杂吸收区耗尽层有少部分扩展. 当偏压大于 3 V 时, 1.1  $\mu\text{m}$ -InGaAsP 空间层全部耗尽. 4—7 层吸收区为 p 型梯度掺杂, 空穴为多数载流子, 空穴电流以扩散电流为主. 梯度掺杂在吸收区内形成了内建电场, 内建电场有利于电子(少数载流子)的漂移.

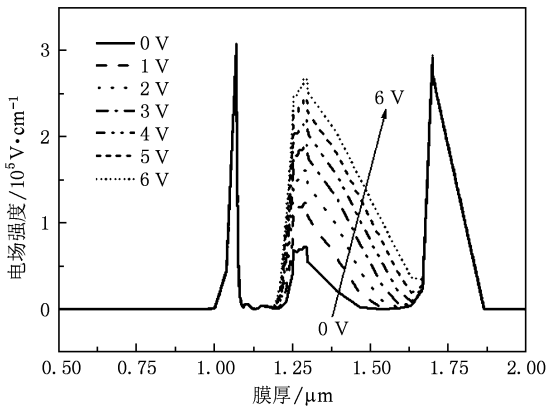


图 4 不同偏压下, UTC 光电探测器在无光照时的局部电场分布图

图 5 是在 6 V 偏压、不同光功率密度照射下, 探测器的电场强度局部分布图. 从图 5 中可以看出, 随着光功率密度的增加, 空间层的电场强度明显降低. 当光功率密度达到  $6 \times 10^7$  W/m<sup>2</sup> 时, 空间层的电场强度最大值已经降低到 53.1 kV/cm, 载流子已经开始步入非饱和漂移状态. 当光功率密度超过  $8 \times 10^7$  W/m<sup>2</sup> 时, 1.1  $\mu\text{m}$ -InGaAsP 空间层的电场强度已经降低到 13.9 kV/cm 以下, 已经远小于载流子饱和漂移所需的电场强度, 光电探测器也步入非线性区, 即出现输出光电流饱和现象, 如图 6 所示. 在 6 V 偏压下, UTC 光电探测器的饱和输出光电流密度约为 33.0 A/m, 对应的输入光功率密度为  $6.82 \times 10^7$  W/m<sup>2</sup>. 图 6 和图 7 中分别作出了 0—6 V 偏压下输出光电流密度和响应度与入射光功率密度之间的关系. 随着偏压的减小, 非线性效应更加严重, 饱和输出光电流也随之减小.

光波入射到光电探测器有源区内, 被吸收材料

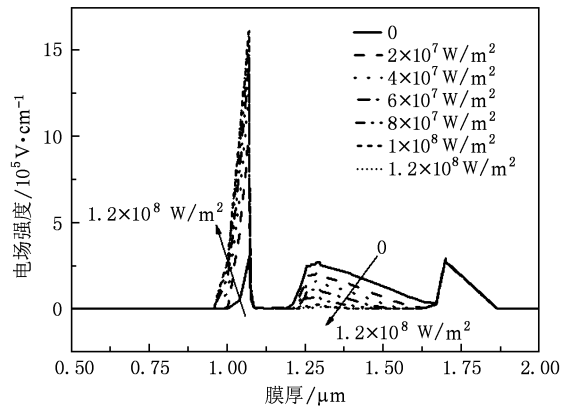


图 5 在 6 V 偏压下, 不同光功率密度照射时 UTC 光电探测器的电场强度局部分布图

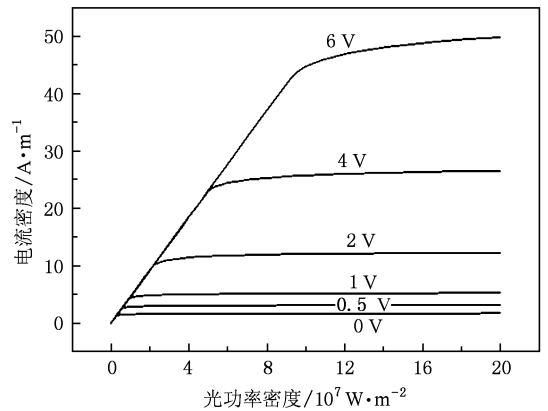


图 6 不同偏压下, UTC 光电探测器输出光电流密度与输入光功率密度的关系图

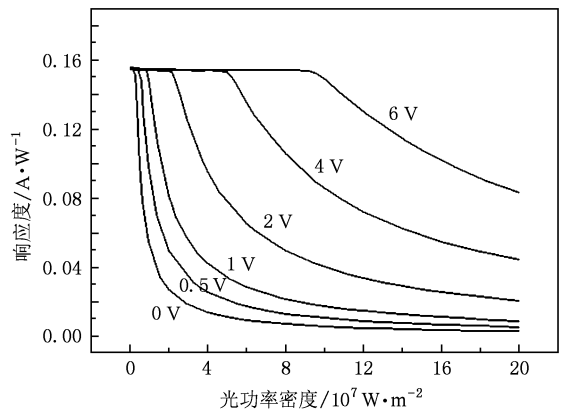


图 7 不同偏压下, UTC 光电探测器响应度与输入光功率密度的关系图

吸收转换为光生载流子. 光生载流子在电场作用下向相反方向漂移运动. 电子和空穴的饱和漂移速度有差异, 当入射光功率足够大时, 空间电荷区内会

残留大量的慢载流子——空穴. 空穴的大量积累会减小空间电场强度, 从而进一步积累空穴, 如此恶性循环, 直至达到光电流输出饱和. 如图 8 所示, 在无光输入时, 处于耗尽的空间层内的空穴载流子浓度非常低, 只有  $10^3 \text{ cm}^{-3}$  数量级. 在低输入光功率时 ( $< 6.82 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ ), 空间层的空穴浓度依然维持在  $10^3 \text{ cm}^{-3}$  数量级水平. 入射光功率密度为  $6 \times 10^7 \text{ W/m}^2$  时, 已非常接近探测器饱和输入光功率密度  $6.82 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ , 空间层内的空穴载流子浓度已经升至  $1.72 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ . 输入光功率密度大于  $6.82 \times 10^7 \text{ W/m}^2$  分别为  $8 \times 10^7, 1 \times 10^8$  和  $1.2 \times 10^8 \text{ W/m}^2$  时,  $1.1 \mu\text{m-InGaAsP}$  空间层内空穴浓度出现了数量级上的改变, 直接跳跃到了  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  数量级, 此时探测器已经完全进入了饱和和工作模式. 与此同时, 吸收区内电子浓度也从低入射光功率时的  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$  数量级跳变到了  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  数量级, 如图 9 所示.

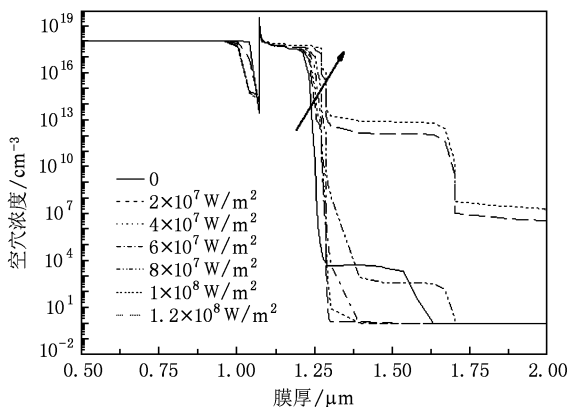


图 8 不同入射光功率密度时, UTC 光电探测器空穴浓度局部分布图

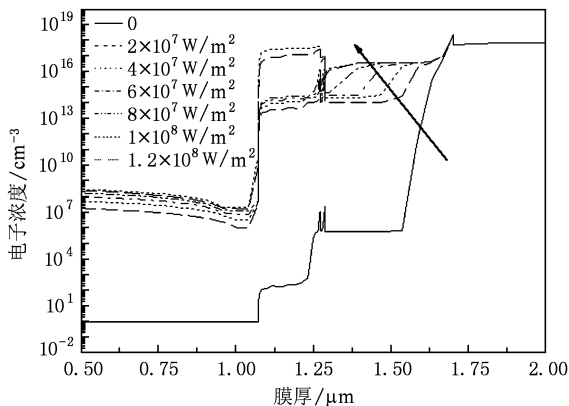


图 9 不同入射光功率密度时, UTC 光电探测器电子浓度局部分布图

图 10 给出了不同入射光功率时输出光电流密度随探测器偏压的关系图. 在一定光功率下, 随着偏压的增大, 探测器的工作模式逐渐由饱和响应过渡到线性响应, 探测器的输出光电流密度逐渐增大直至达到恒定值. 输入光功率密度越大, 探测器线性工作所需的阈值电压就越高.

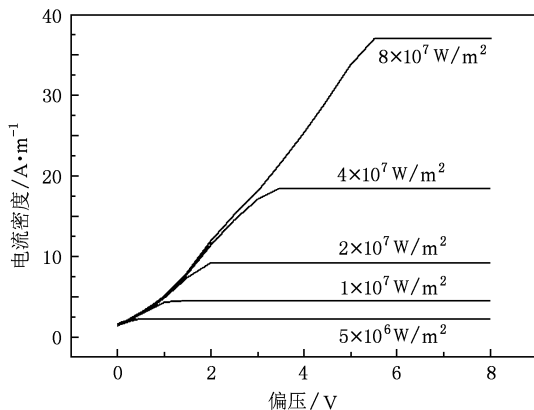


图 10 不同入射光功率密度时, UTC 光电探测器输出光电流密度与偏压的关系图

## 5. 普通 UTC 光电探测器饱和性能实验研究

图 11 是在不同偏压下 (0, 0.5, 1, 2, 4 V), 该 UTC 光电探测器输出光电流随着输入光功率的变化特性曲线. 当输入光功率较小时, 输出光电流随着输入光电流线性增大, 响应度基本恒定为  $0.11 \text{ A/W}$ . 当输入光功率继续增大时, 0 V 偏压下该探测器首先进入饱和, 饱和光电流为  $4.8 \text{ mA}$ , 最大线性输入光功率大约为  $25 \text{ mW}$ . 随着偏压的增大, 最大线性输入光功率依次增大, 饱和输出光电流也依次增大. 当偏压为  $4 \text{ V}$  时, 输入光功率达到  $200 \text{ mW}$  时, 该器件依然处于线

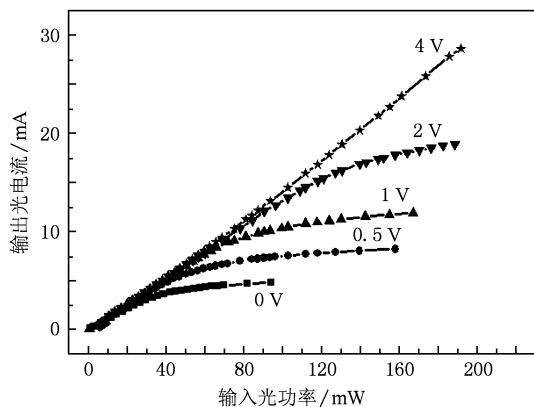


图 11 UTC 光电探测器的光响应特性曲线

性工作状态,没有出现饱和现象.

图 12 是该 UTC 光电探测器在不同输入光功率时,输出光电流与探测器偏压之间的关系曲线. 在低

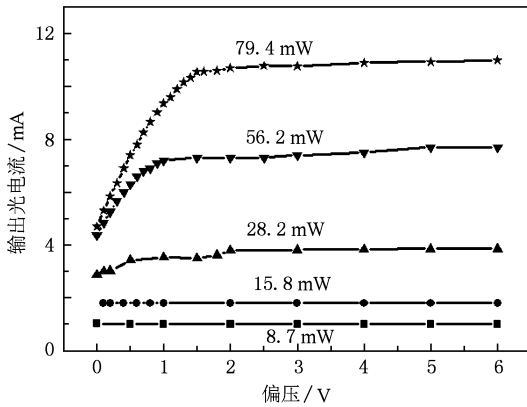


图 12 不同入射光功率时,UTC 光电探测器输出光电流随偏压的变化曲线

输入光功率( = 8.7 mW < 25 mW)时,该探测器一直呈现线性响应. 随着输入光功率的增加,探测器在低偏压时出现饱和现象,线性工作所需的偏压也逐渐增大. 对于某一特定输入光功率,随着偏压的增加,探测器由饱和工作进入了线性工作范围,输出光电流也趋于稳定.

## 6. 结 论

在综合考虑了材料特性、电学和光学需求后,我们设计并生长了 UTC 结构的 InP 基外延片. 以漂移-扩散模型为基础对该 UTC 光电探测器做了细致的直流饱和特性分析. 最后,制作了 UTC 光电探测器,并对该器件的直流饱和特性进行测试与分析,实验结果与理论分析基本符合.

- [1] Ozeki T, Hara E H 1976 *Electron. Lett.* **12** 80
- [2] Humphreys D A, Lobbett R A 1988 *IEE Proceedings J. Optoelectronics* **135** 45
- [3] Esman R D, Williams K J 1990 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **2** 502
- [4] Williams K J, Esman R D, Dagenais M 1994 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** 639
- [5] Dentan M, de Cremoux B 1990 *IEEE J. Lightw. Technol.* **8** 1137
- [6] Duan N, Wang X, Li N, Liu H D, Campbell J C 2006 *IEEE J. Quantum Elect.* **12** 1255
- [7] Williams K J, Esman R D 1998 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **7** 1015
- [8] Jiang H, Yu P K L 1998 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 1608
- [9] Williams K J, Goetz P G 2000 *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics* Oxford, UK, September 11—13, 2000 P221
- [10] Juodawlkis P W, O'Donnell F J, Hargreaves J J, Oakley D C, Napoleone A, Groves S H, Mahoney L J, Molvar K M, Missaggia L J, Donnelly J P, Williamson R C, Twichell J C 2002 *The 15th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society* Glasgow, Scotland, UK, November 10—14, 2002 P426
- [11] Guo J C, Zuo Y H, Zhang Y, Ding W C, Cheng B W, Yu J Z, Wang Q M 2007 *IEEE J. Lightw. Technol.* **9** 2783
- [12] Windhorn T H, Cook L W, Stillman G E 1982 *IEEE Electron. Dev. Lett.* **3** 18
- [13] Hill P, Schlafer J, Powazinik W, Urban M, Eichen E, Olshansky R 1987 *Appl. Phys. Lett.* **18** 1260
- [14] Xia L C, Gao X J 2004 *Semiconductor Optoelectronics* **3** 169 (in Chinese)[夏力臣、高新江 2004 半导体光电 **3** 169]
- [15] Zhang Y X, Liao Z Y, Wang W 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2393
- [16] Ishibashi T, Shimizu N 1997 *Proc. Ultrafast Electron. Optoelectron.* **13** 83

# Theoretical analysis and experimental study of the space-charge-screening effect in uni-traveling-carrier photodiode\*

Guo Jian-Chuan<sup>†</sup> Zuo Yu-Hua Zhang Yun Zhang Ling-Zi Cheng Bu-Wen Wang Qi-Ming

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductor,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China)

(Received 28 July 2009; revised manuscript received 29 October 2009)

## Abstract

A new optimized structure of an UTC (uni-traveling-carrier) photodiode is developed and epitaxied by metal-organic chemical vapor deposition. We fabricated a UTC photodiode of 30  $\mu\text{m}$  in diameter. Theoretical simulation based on drift-diffusion model was used to analyze the space-charge-screening effect in UTC photodiode primarily in two aspects: the carrier concentrations and the space electric field. The simulation results were generally in agreement with the experimental data.

**Keywords:** uni-traveling-carrier, photodiode, space charge screening effect

**PACC:** 0670D, 2940P, 7280E, 7850G

---

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos. 2006CB302802, 2007CB613404).

<sup>†</sup> E-mail: jchguo2009@gmail.com