

## 单载流子光电探测器的高速及高饱和功率的研究\*

张岭梓<sup>1)†</sup> 左玉华<sup>2)</sup> 曹权<sup>2)</sup> 薛春来<sup>2)</sup> 成步文<sup>2)</sup>张万昌<sup>1)</sup> 曹学蕾<sup>1)</sup> 王启明<sup>2)</sup>

1) (中国科学院高能物理研究所, 粒子天体物理研究中心, 北京 100049)

2) (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 100083)

(2011年3月29日收到; 2011年11月28日收到修改稿)

利用载流子漂移-扩散模型, 模拟并分析了 InGaAs/InP 单载流子光电探测器 (Uni-traveling-carrier/UTC-PD) 在不同条件下的物理特性及其带宽和饱和特性, 结合器件实验结果分析了影响器件高速和高饱和性能的物理机理. 结论表明在吸收区采用浓度渐变掺杂和增加 InP 崖层 (cliff layer), 可以显著提升器件饱和特性, 高入射功率下吸收区电场崩塌是器件饱和的直接因素, 直径大于 20  $\mu\text{m}$  的 UTC 探测器中 RC 常数仍是影响带宽的主要因素. 论文指出了优化器件结构、提升器件性能的有效方法.

关键词: UTC 探测器, 空间电荷效应, 高频, 高饱和

PACS: 85.60.Gz, 78.20.Bh, 78.55.Cr

## 1 引言

现代光通信的迅猛发展要求不断提高系统传输容量. WDM-ROF 技术作为解决“最后一公里”的关键技术对光接受终端提出了更高的要求, 高频已经不再是唯一的指标, 高饱和功率、大输出电流也成为 ROF 系统的主要性能指标之一. 在传统 p-i-n 型面入射光电探测器中, 器件带宽主要取决于载流子传输时间和 RC 时间常数. 为减小 RC 常数, p-i-n 探测器必须减小器件面积, 此时载流子传输时间决定了器件带宽. 然而减小通光面积必然会产生耦合困难、欧姆电阻增大以及热积累效应显著等不利结果. 另一方面, 要增大输出电流须增加入射光功率密度, 但是空间电荷效应会导致 p-i-n 探测器迅速饱和. 所以 p-i-n 型探测器很难同时提高响应带宽和输出饱和电流.

自 1997 年提出 UTC 探测器<sup>[1]</sup>, 它的高带宽和高饱和方向的优异特性就吸引了人们的注意. InGaAs/InP UTC 探测器将吸收区 (InGaAs) 和空间电

荷区 (InP) 相互分离. 在 p 型吸收区中, 光生空穴是多数载流子, 其介电弛豫时间非常短, 直接在吸收区内复合掉. 吸收区内光生电子则在扩散、漂移作用下向耗尽的空间电荷区运动, 进入耗尽区后在外场作用下迅速漂移并被阴极收集. 普通 p-i-n 探测器受空间电荷效应影响, 载流子输运时间均取决于速度较慢的空穴, 器件性能受到极大的限制. UTC 探测器内仅有电子为有效载流子, 因而极大地压缩了其载流子传输时间, 空间电荷效应也被有效抑制. 同时 UTC 探测器利用速度过冲效应, 电子漂移速度可达  $4 \times 10^7 \text{ cm/s}$ <sup>[2]</sup>, 远高于 InP 电子饱和漂移速度 ( $1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ )<sup>[3]</sup>. 因而可通过优化器件结构实现高速及高饱和功率特性.

日本 NTT 公司的 Ishibashi 等人通过减小 UTC 探测器面积, 提高了 3 dB 带宽. 2000 年该研究组将器件尺寸减小到了  $5 \mu\text{m}^2$ , 实现了 310 GHz 的带宽, 这是迄今为止 3 dB 带宽最高的面入射探测器, 但是响应度仅有  $0.07 \text{ A/W}$ <sup>[4]</sup>. Campbell 教授研究小组则着重于高功率研究<sup>[5,6]</sup>, 相应的理论分析并不多. 探测器带宽和饱和机理的物理解释通常使用数值

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB302802)、国家自然科学基金 (批准号: 60676005, 60906035) 和中国科学院知识创新工程 (批准号: ISCAS2009T01) 资助的课题.

† E-mail: zhang.labs@gmail.com

模拟. 文献 [7] 模拟了 UTC 器件 3 dB 带宽的影响因素, 但是没有考虑到饱和机理. 我们课题组曾利用载流子漂移扩散模型模拟并研究了一种单载流子传输光电探测器的空间电荷屏蔽效应 [8]. 该文中所采用的器件模型未包含 InP 崖层, 因而其饱和机理与通常的 UTC 器件不尽相同.

本文首先介绍了模拟器件的结构参数及模拟条件, 然后模拟分析了器件的基本物理特性、高入射光功率下的饱和机理、小信号模型下的带宽响应特性. 模拟结果表明大入射光功率下, UTC 器件吸收区电场首先崩塌, 电子完全依靠扩散运动渡越到耗尽区. 此时空间电荷屏蔽效应随入射光功率增大而增强, 最终导致器件饱和. 已完成的器件实验结果相比, 本文指出欧姆损耗与热光效应是造成含下反射镜的 UTC 探测器实测饱和特性远低于模拟结果的原因. 带宽测试结果表明, 在器件台面面积较大的情况下, RC 常数仍是限制 UTC 器件带宽的

主要因素. 此外, 本文提出了器件结构的优化方向.

## 2 UTC 结构与模拟条件

设计了正入射 UTC 探测器, 外延层结构如图 1 所示 [9,10]. 重掺杂的 1.4Q-InGaAsP 作为 P 型欧姆接触层, 1.3Q-InGaAsP 可以防止吸收区电子反向扩散. 110 nm 厚吸收区采用渐变掺杂结构, 以构建自建电场加速电子输运. InGaAs/InP 异质结过渡区采用非掺杂的 InGaAs. 异质结过渡区与 InP 空间电荷区之间采用了 10 nm 的重掺杂 InP 崖层 [1], 其作用是拉低 InP 耗尽区的势垒高度, 提高 InGaAs 一侧的电场强度, 有利于电子穿越异质结势垒. 器件结电容取决于耗尽区厚度, 为降低结电容提高响应速度, 我们采用 300 nm 厚 InP. 最后采用 700 nm 厚 n 型重掺杂 InP 作为阴极欧姆接触层.

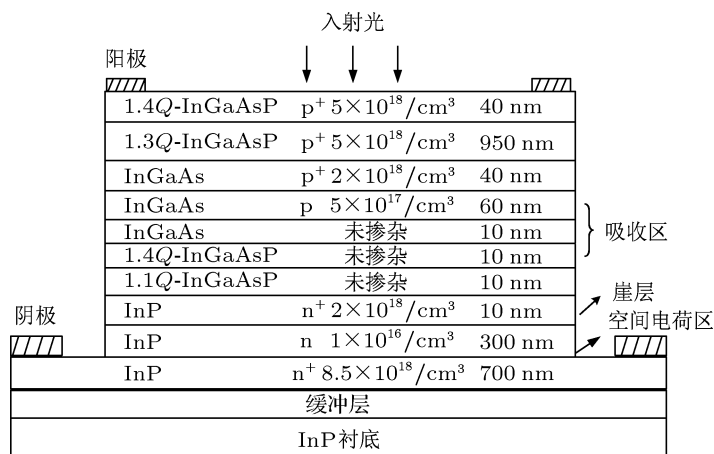


图 1 UTC 器件结构

模拟中采用载流子漂移扩散模型, 基本方程是泊松方程、电流密度方程和电流连续性方程. 为简化模拟过程, 重点分析空间电荷效应和 RC 常数对器件性能的影响, 对模拟条件做了如下假定:

(1) 假设载流子通过隧穿效应渡越异质结, 不考虑异质结的载流子积累;

(2) 不考虑寄生阻抗, 假设器件结电容为总电容, 负载电阻为 50 Ω, 忽略阻抗对器件偏压的分压;

(3) 不考虑热积累效应;

(4) 带宽模拟采用小信号模型, 入射光由 p 型一侧均匀入射, 模拟时采用的器件台面面积为 10 μm<sup>2</sup>, 材料参数参见文献 [11] 和 [12].

## 3 UTC 器件的高饱和特性模拟及分析

UTC 探测器吸收区通常掺杂浓度梯度渐变. 根据式 (1), 掺杂浓度线性渐变的 110 nm 厚吸收区内可以构建一个平均场强为  $9.5 \times 10^3 \text{ V/cm}$  的自建电场  $E$ :

$$E = \frac{k \cdot T}{e \cdot p(x)} \cdot \frac{dp(x)}{dx}, \quad (1)$$

其中  $p(x)$  为受主掺杂浓度. 该自建电场有利于光生电子漂移至耗尽区.

与普通 p-i-n 探测器相比, UTC 结构中引入了重掺杂的 InP 崖层. 其厚度和掺杂浓度对器件性能影响较大. 高浓度掺杂崖层中的电离施主会在吸收

区一侧产生反向电场,在空间电荷区一侧产生正向电场,如图 2 所示.其反向电场与吸收区自建电场同方向.正向电场则会阻碍电子向阴极电极运动,进而影响器件在零偏下的响应速度和饱和电流.当对器件施加 0.7 V 反偏时,内外电场相互抵消,空间电荷区内可建立起最低约  $-320 \text{ V/cm}$  的电场.当外加反偏达到 2V 时,空间电荷区反向电场得到显著增强,且随外加偏压增加而增大. III-V 族材料的电子漂移速度与电场关系为 GaAs 模型,低场下的电子速度可以远高于饱和漂移速度.<sup>[11,12]</sup> 由图 2 可知,该器件吸收区内的电子平均速度高于饱和速度,有利于提高器件带宽和饱和特性.

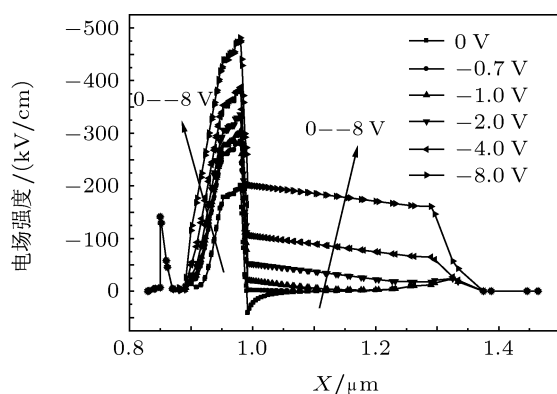


图 2 不同偏压下,无光照 UTC 探测器的局部电场分布图(吸收区(0.88—0.99  $\mu\text{m}$ ),耗尽区(1—1.3  $\mu\text{m}$ ))

ROF 系统要求接入端器件有较高的饱和输出电流.图 3 所示为台面面积为  $10 \mu\text{m}^2$  的器件在不同偏压下模拟输出电流与入射光功率的关系.由图中可见,该器件在线性区内响应度约为  $0.16 \text{ A/W}$ ,与理论设计和实验结果基本一致<sup>[9]</sup>.其饱和和入射光功率密度在 0 V 偏压下为  $0.3 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ ,随着偏压增大而增大.7 V 反偏下器件没有达到饱和.模拟的饱和输出电流要高于试验结果<sup>[9]</sup>,主要原因有以下两点.首先,模拟过程未考虑欧姆电阻及寄生电阻.在大电流输出下,电阻会分流部分压降,导致器件偏压降低<sup>[13]</sup>.在零偏压下甚至使器件内部产生正向偏置,使器件提前进入饱和状态.其次模拟中未考虑热效应.由于 InP 基材料热光效应较为显著,因而我们实际制作的器件中带有下反射镜的 UTC 器件在热光效应下会使中心响应波长发生偏移,响应度降低,输出电流减小,系统提前进入饱和状态<sup>[10]</sup>.

高入射光功率下器件内部电场分布和载流子浓度分布会发生相应变化,从而产生明显的空间电荷效应.图 4(a) 为  $1 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  入射光功率密

度下,器件在饱和状态时的电场分布.对比图 2 可见,吸收区内电场完全塌陷,电子渡越完全依靠扩散运动.其原因是饱和状态下,吸收区内少数载流子电子浓度较高,如图 4(b) 所示,使得吸收区内自建电场被完全屏蔽.同时高掺杂的 InP 崖层屏蔽了吸收区,外加偏压完全降落在耗尽区内.图 4(b) 与 (c) 表明,吸收区内光生电子与空穴浓度相同,且远高于掺杂浓度,确保了电中性条件;空间电荷区中靠近异质结一侧电子、空穴浓度相接近,且随着反向偏压增大而降低.由此可见,在饱和条件下,吸收区有部分空穴反向扩散至耗尽区内,导致较低反偏下空间电荷区中异质结过渡区一侧场强降低,当外加偏压增至  $-4 \text{ V}$  时才能使空间电荷区内基本耗尽.此时,器件的响应速度完全取决于电子扩散速度.图 4(d) 所示为无光照条件下,电子浓度分布与偏压的关系.在 0 V 偏压下,n 型重掺杂的 InP 崖层附近电子浓度较高.随着偏压增大,外场作用逐步抵消内场,在  $-2 \text{ V}$  偏压下空间电荷区内完全建立起反向电场,电子浓度迅速降低.对比图 4(b) 和 (d) 可见,载流子浓度分布变化引起的空间电荷效应是导致器件饱和的重要因素.

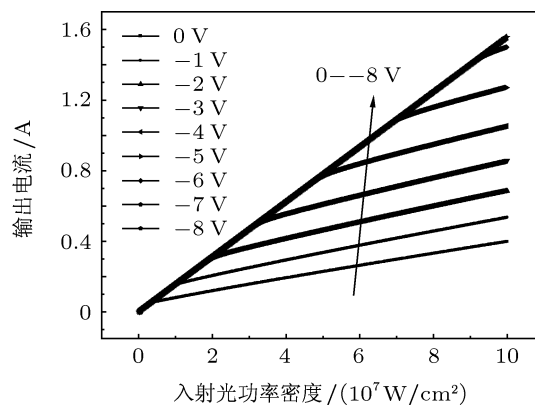


图 3 器件饱和电流随偏压增加而增大

度下,器件在饱和状态时的电场分布.对比图 4(a) 可知,在  $5 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$  入射光功率密度下,器件尚未饱和.然而在  $1 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$  入射光功率密度下,吸收区电场已完全塌陷,仅为  $1 \text{ kV/cm}$ ,此时电子主要依靠扩散运动和热电子发射进入耗尽区<sup>[14]</sup>.随着入射光功率增大,光生载流子浓度也增大,通过扩散进入耗尽区的电子数量也增多.耗尽区中靠近异质结过渡区一侧,电子浓度随入射光功率增加而增大,局部场强则随之降低.因而在 4 V 固定反偏下,靠近 n 型电极一侧场强随入射光功率增加而增

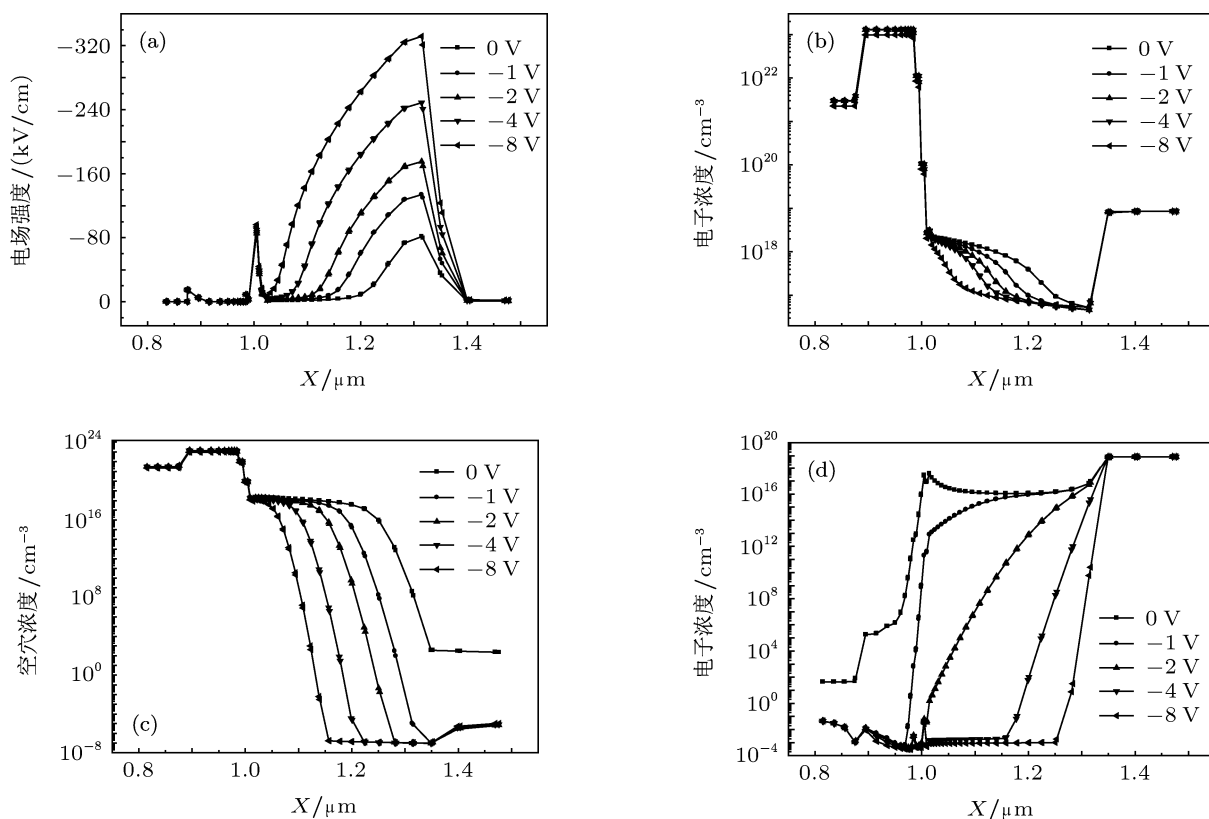


图4 (a)饱和输出时,吸收区内电场塌陷,耗尽区内电场随偏压增加而增大;(b)饱和状态下吸收区和耗尽区电子浓度分布;(c)饱和状态下吸收区和耗尽区空穴浓度分布;(d)无光照时,不同偏压下吸收区和耗尽区电子浓度分布

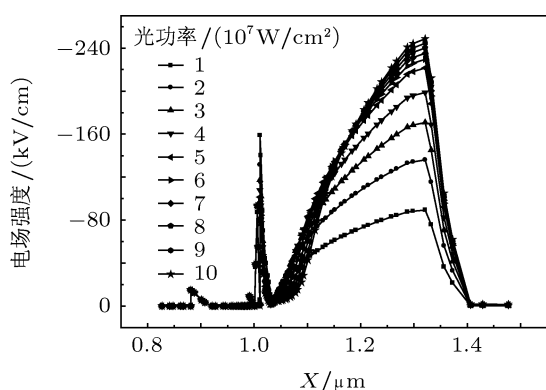


图5 4V反偏下,电场随光功率密度增加而增大

大. 当入射光功率密度高于  $5 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$  时,空间电荷屏蔽效应最为显著,耗尽区电场不再有显著变化,电子电流密度趋于饱和,器件进入饱和区. 由上述分析可知,器件饱和输出电流与电子在吸收区内的扩散运动有关,因而采用吸收区浓度渐变掺杂和崖层 n 型重掺有利于电子输运至耗尽区,提高器件饱和电流. 文献 [8] 中所模拟的器件没有 InP 崖层,饱和时吸收区电场随外加偏压增加而增大,空间电荷区电场则完全崩塌. 可见增加了 InP 崖层后器件

饱和机理完全不同,此时吸收区内电场崩塌,空间电荷区大部分区域仍能保持耗尽,而 InP 的高饱和和漂移速度有助于提升饱和和输出电流. 另一方面,由于 UTC 探测器将吸收区和耗尽区分离,可利用较厚的耗尽区减小结电容、提高带宽,而 UTC 探测器中引入 InP 崖层后在饱和状态下仍能保持空间电荷区大部分区域处于耗尽状态,所以 RC 常数决定的带宽  $f_c$  变化不大. UTC 器件的性能对器件结构极为敏感,InP 崖层的厚度和浓度大小对饱和特性的具体影响将在未来工作中深入研究.

#### 4 UTC 器件的高频特性模拟及分析

器件响应速度由载流子输运时间和 RC 常数共同决定. 当 UTC 结构的吸收区均匀掺杂时,耗尽区内电子速度远高于吸收区,所以渡越时间决定的带宽  $f_t$  由吸收区内电子的扩散运动和热电子发射速度共同决定 [14]:

$$f_t \approx 1/(2\pi\tau_\alpha) = 1/(2\pi(W_\alpha^2/2D_e + W_\alpha/v_{th})), \quad (2)$$

其中,  $W_\alpha$ ,  $D_e$ ,  $v_{th}$  分别表示吸收区厚度、耗尽区

厚度、吸收区电子扩散系数、吸收区热电子发射速度. 由于模拟采用的 UTC 器件吸收区采用了渐变掺杂, 因而必须考虑到吸收区内自建电场对电子输运时间的影响. 图 2 显示吸收区内电场强度较高, 因而电子平均输运速度可与饱和漂移速度相比拟<sup>[14]</sup>. 模拟结果显示,  $f_t$  在 0 V 和 -1 V 偏压下可以达到 100.5 GHz 和 206 GHz. 对于直径为 20  $\mu\text{m}$  的圆形台面器件而言, RC 限制  $f_c$  仍是决定器件带宽的主要因素. 由 RC 常数决定的带宽  $f_c$  远小于  $f_t$ , 因而器件 3 dB 带宽可近似为  $f_c$ . 该器件在 0 V 和 1 V 反偏下测试 3 dB 带宽分别为 5.1 GHz 和 17.05 GHz. 图 6 总结了不同台面直径器件的模拟带宽与实测带宽, 数值基本一致<sup>[10]</sup>. 然而, 当器件尺寸进一步缩小时, 载流子输运时间对器件带宽影响逐渐增强. 图 7 给出了小尺寸 UTC 探测器的模拟 3 dB 带宽与 NTT 实验结果对比. 图中器件 A、B 的台面面积减小至 20  $\mu\text{m}^2$ 、吸收区厚度均为 140 nm, 其中 A 为吸收区渐变掺杂, B 为吸收区均匀掺杂, A 器件的 3 dB 带宽为 152 GHz, 远高于 B 器件的 119 GHz, 由此可见吸收区渐变掺杂结构对带宽提高有显著作用<sup>[14]</sup>. 数据 C 的测试带宽为 310 GHz, 这是迄今为止面入射探测器中所报道的最高结果<sup>[4]</sup>. 该探测器台面面积 5  $\mu\text{m}^2$ , 并采用等效 12.5  $\Omega$  的负载阻抗以减小 RC 限制, 同时其吸收区厚度仅 30 nm, 有效地降低了载流子输运时间.

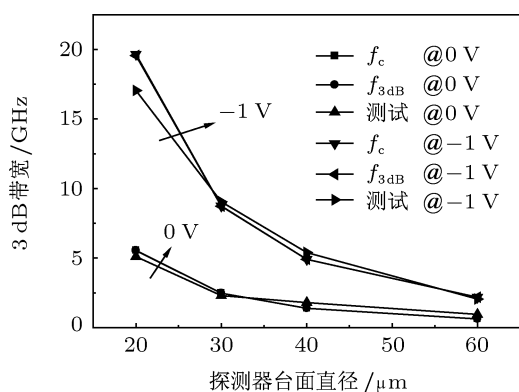


图 6 UTC 器件模拟带宽与测试结果比较

对比图 6、图 7 可知, 减小电容可极大地提高 3 dB 带宽. 然而器件结电容由台面面积和耗尽区厚度决定, 减小台面面积必然会增加欧姆接触电阻, 同时降低了入射光耦合效率, 对工艺要求较高. 相比之下, 空间电荷区内电子渡越时间远小于吸收区内渡越时间, 因而适当增大空间电荷区厚度并不会显著降低  $f_t$ . 所以对较大面积的 UTC 探测器而言, 增大空间电荷区厚度是提高带宽的有效方法.

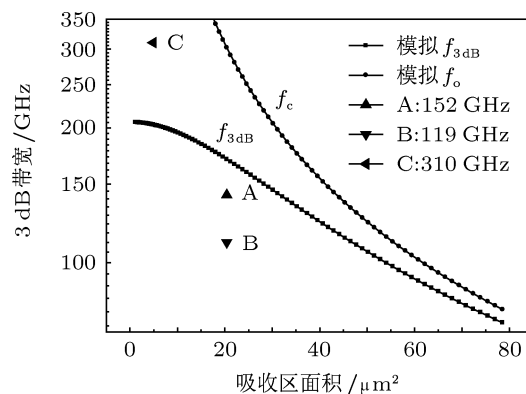


图 7 小尺寸 UTC 器件在 1V 反偏下的模拟带宽与 NTT 报导结果比较

## 5 结论

本文利用载流子漂移 - 扩散模型模拟了 UTC 探测器的带宽和饱和特性. 模拟结果显示空间电荷屏蔽效应对器件饱和特性有着显著影响, 指出欧姆损耗与热光效应是造成含下反射镜的 UTC 实测饱和特性远低于模拟结果的原因. 模拟与实验结果表明, UTC 器件性能对于器件结构极为敏感, 在吸收区采用浓度渐变掺杂和增加 InP 崖层可以明显提升器件饱和特性. 研究表明, 对于直径为 20  $\mu\text{m}$  的 UTC 探测器, RC 常数仍是影响 3 dB 带宽的主要因素, 适当增大空间电荷区厚度可以有效提高器件 3 dB 带宽. 而改进吸收区结构是提高更小尺寸 UTC 探测器响应带宽的有效途径.

[1] Ishibashi T, Shimizu N, Kodama S, Ito H, Nagatsuma T, Furuta T 1997 *Proc. OSA TOPS on Ultrafast Electronics and Optoelectronics* **13** 83  
 [2] Windhorn T H, Cook L W, Stillman G E 1982 *IEEE Electron Device Lett.* **3** 18  
 [3] Hill P, Schlafer J, Powazinik W, Ueban M, Eichen E, Olshansky R

1987 *Appl. Phys. Lett.* **50** 1260  
 [4] Ito H, Kodama S, Ishibashi T 2000 *Electron. Lett.* **36** 1809  
 [5] Li N, Li X W, Demiguel S, Zheng X G, Campbell J C, Tulchinsky D A, Williams K J, Isshiki T D, Kinsey G S, Sudharsanan R 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 864  
 [6] Li X W, Li N, Demiguel S, Zheng X G, Campbell J C, Tan H H,

- Jagdish C 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 2326
- [7] Zhu H B, Mao L H, Yang Z, Guo W L, Zhang S L, Liang H L 2006 *Chinese Journal of Semiconductors* **27** 2019 (in Chinese) [朱浩波, 毛陆虹, 杨展, 郭维廉, 张世林, 梁惠来 2006 半导体学报 **27** 2019]
- [8] Guo J C, Zuo Y H, Zhang Y, Zhang L Z, Cheng B W, Wang Q M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4524 (in Chinese) [郭剑川, 左玉华, 张云, 张岭梓, 成步文, 王启明 2010 物理学报 **59** 4524]
- [9] Zhang L Z, Zuo Y H, Cao Q, Xue C L, Chen B W, Yu J Z, Wang Q M 2010 *7th IEEE International Conference on Group IV Photonics*, Beijing, China, 272
- [10] Zhang L Z, Cao Q, Zuo Y H, Xue C L, Chen B W, Wang Q M 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 881
- [11] Adachi S 1992 *Physical Properties of III-V semiconductor compounds-InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs, and InGaAsP* (New York: John Wiley & Sons, Inc.) pp75–99, pp223–262
- [12] Wada O, Hasegawa H 1999 *InP-Based Materials and Devices-Physics and Technology* (New York: John Wiley & Sons, Inc.) pp85–86
- [13] Williams K J, Esman R D 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 1443
- [14] Shimizu N, Watanabe N, Furuta T, Ishibashi T 1998 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10** 412

## High-speed and high-power uni-traveling-carrier photodetector\*

Zhang Ling-Zi<sup>1)†</sup> Zuo Yu-Hua<sup>2)</sup> Cao Quan<sup>2)</sup> Xue Chun-Lai<sup>2)</sup> Cheng Bu-Wen<sup>2)</sup>  
Zhang Wan-Chang<sup>1)</sup> Cao Xue-Lei<sup>1)</sup> Wang Qi-Ming<sup>2)</sup>

1) (Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2) (State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 29 March 2011; revised manuscript received 28 November 2011)

### Abstract

The drift-diffusion theory is adopted to simulate the bandwidth and the saturation characteristics of InGaAs/InP uni-traveling-carrier (UTC) photodetector. According to the experiment results, we analyze the physical mechanisms in high speed and high power UTC photodetector. It is shown that introducing the cliff layer and the gradually doped absorption layer can enhance the saturation characteristic obviously. Electric field collapse in the absorption layer leads to the saturation, and RC constant is still a limitation factor for device with diameter larger than 20  $\mu\text{m}$ . In this paper we point out the effective methods to improve device performance.

**Keywords:** uni-traveling-carrier photodetector (UTC PD), space charge effect, high speed, high power

**PACS:** 85.60.Gz, 78.20.Bh, 78.55.Cr

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB302802), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60676005, 60906035), and the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. IS-CAS2009T01).

† E-mail: zhang.labs@gmail.com