

单向载流子传输光电探测器模拟*

朱浩波[†] 毛陆虹 杨 展 郭维廉 张世林 梁惠来

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 用 Atlas 软件对单向载流子传输光电探测器(uni-traveling-carrier photodetector, UTC-PD)进行了模拟,研究了器件的基本工作原理,着重讨论了器件性能与外延层结构的关系.设计出的 UTC-PD 可同时具有高的响应度($\geq 0.18\text{A/W}$)和宽的 3dB 带宽($\geq 100\text{GHz}$).与传统的 pin 光电探测器相比简化了前端电路结构,降低了噪声,节约了成本,可以应用于超高速光互联.

关键词: UTC; 光电探测器; 响应度; 3dB 带宽
EEACC: 2560B

中图分类号: TN364+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2006)11-2019-06

1 引言

近几年,随着光互联技术的迅速发展,具有 20GHz 以上带宽的光电转换系统已经实现了商业化^[1].但是随着互联网技术的不断进步,相应的数据量越来越庞大,对于带宽的需求也越来越高.传统的 pin 光电二极管在其特性上具有一定的瓶颈,如在大注入光强下响应度和 3dB 带宽等性能的恶化.这主要是由于光生空穴在本征耗尽区迁移率较低,空穴的积累产生内建电场进一步降低载流子速率所致.通常在光接收机前端,光电探测器后面必须接一个电放大器,这种前端对电放大器的放大倍数、带宽和噪声要求极高,目前,采用 InP 基的半导体工艺制作这种电路成本较高.另外,在用传统的 pin 光电二极管制作超高速(如 40~100GHz)光接收机前端时,为了降低光电二极管的电容就要减小二极管的面积,这使得光接收面积减小,引起光生电流减少.单向载流子传输光电二极管(UTC-PD)可克服这些缺点. UTC-PD 更适用于大入射光强和大电流的高速输出.在 UTC-PD 前使用一个简单的前置光放大器^[2],强光下 UTC-PD 的输出可直接驱动逻辑电路,从而使得信号放大发生在光路,而不是传统的在电路.这样不但会降低噪声,提高带宽,而且会大大简化光电接收机前端,节约制作成本.随着 InP 基半导体工艺的不断成熟,UTC-PD 光电探测器将会有更广阔的应用前景.在国内,对 UTC-PD 的研究一直较少.在国外,Ishibashi 等人^[3,4]在计算机模拟的基础上,研究了 UTC-PD 光探测器的物理机制^[5]及基本的器件性能^[6],得到的器件具有较大的 3dB 带

宽.但响应度相对较低,且在大入射光强下器件性能会出现明显的恶化,在实际应用中还需要进一步改进.继续深入了解器件的工作原理,掌握提高器件 3dB 带宽并同时保持较高响应度的方法,使其能很好地满足超高速光互联的要求是十分必要的.

本文首先阐述 InP/InGaAs 基单向载流子传输光电接收机中 UTC 光电探测器件的结构模型^[3,7],包括器件的物理结构和能带分布.然后分析器件的工作原理,着重讨论器件性能与入射光强和器件结构参数的关系,找到器件同时具有高的响应度和 3dB 带宽的最佳结合点.

2 器件模型

InP/InGaAs 单向载流子传输光电探测器的结构主要有三种:(1)垂直入射背照式;(2)水平入射波导式;(3)侧边入射折射式.其中后两种结构具有较高的器件响应度(可达 0.4~0.7A/W),但相应的 3dB 带宽较窄.为了获得较高的 3dB 带宽以适应超高速光互联的应用,本文采用垂直入射背照式结构,如图 1 所示,器件响应度相对较低($< 0.2\text{A/W}$).

在 pin 光电二极管^[7,8]中,对光电流作出贡献的包括电子和空穴两种载流子(如图 1(b)所示),在耗尽吸收层中的电子和空穴各自独立运动都会影响光响应,由于各自速度不同,电子很快掠过吸收层,而空穴则要停留很长时间,因而总的载流子迁移时间主要取决于空穴的输运时间,3dB 带宽也取决于空穴.另外一方面,当输出电流或功率增大时,其响应速度和带宽会进一步下降,这是因为低迁移率的载流子空穴在输运过程中形成堆积,产生空间电荷效

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(批准号:2002CB311905)

[†] 通信作者. Email: yesnickel@yahoo.com.cn

2006-04-20 收到,2006-06-14 定稿

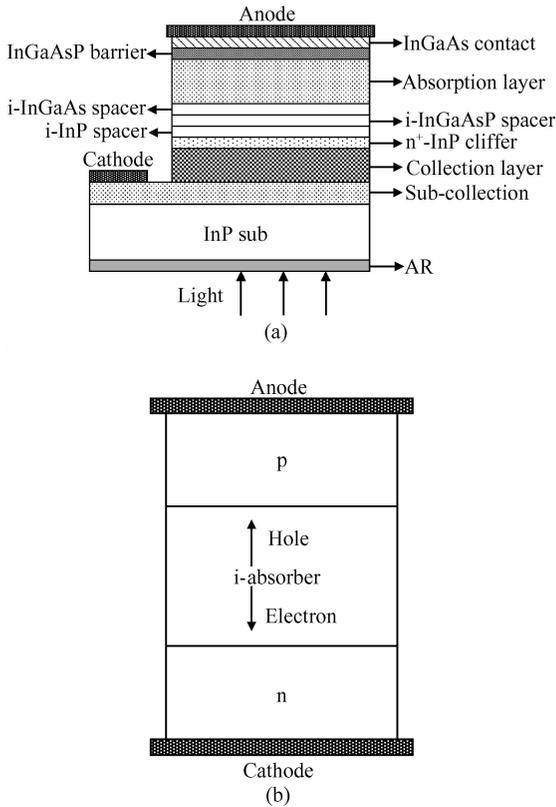


图 1 (a) 器件的外延结构图; (b) pin 结构

Fig. 1 (a) Epitaxial layer diagram for InP/InGaAs UTC-PD; (b) pin diagram

应, 这种效应进一步使电位分布发生变形, 从而阻碍载流子从吸收层向外运动. UTC-PD 的设计正是针对上述问题进行的. 器件的剖面图如图 1(a) 所示. 首层为欧姆接触层, 其下为 p^+ -InGaAs 顶层, 接着为禁带宽度较大的势垒阻挡层 p^+ -InGaAsP, 以阻碍电子向阳极扩散. 其下为 p -In_{0.53}Ga_{0.47}As 光吸收层, 再下面为空间过渡层, 包括 i -InGaAs 过渡层, i -InGaAsP 过渡层, i -InP 过渡层, n^+ -InP 悬崖层, 接下来为 n -InP 收集层, 亚收集层, InP 衬底, 最下面为抗反射涂层 AR, 阴极接触做在器件收集层的左侧以防止其阻挡光入射. 模拟中用到的各层参数列于表 1 中.

表 1 模拟中所采用的器件参数

Table 1 Device parameters used in simulation

层	厚度/nm	掺杂/cm ⁻³	带隙能量/eV ^[10]
p^+ -InGaAs 顶层	60	3×10^{19}	0.73
p^+ -InGaAsP 势垒层	15	2×10^{19}	0.85
p -InGaAs 吸收层	220	1×10^{18}	0.73
i -InGaAs 过渡层	10	1×10^{15}	0.80
i -InGaAsP 过渡层	20	1×10^{15}	1.00
i -InP 过渡层	8	1×10^{15}	1.34
n^+ -InP 悬崖层	7	1×10^{18}	1.34
n -InP 收集层	260	1×10^{16}	1.34
n -InP 亚收集层	50	5×10^{18}	1.34

从图 1 中可以看出, UTC 器件的工作过程是: 给器件阴极加正偏压, 光从宽禁带 n -InP 收集层注入, 在 p^+ -InGaAs 吸收层被吸收. 该器件的基本结构与 pin 光电二极管相似, 但是吸收层材料在 UTC 器件中用 p^+ -InGaAs 层代替了 pin 中的 i 区域. 一系列未掺杂空间过渡层夹在吸收层和收集层之间以减缓两层之间的带隙能量差. 从表 1 中可以看到, InGaAs 吸收层的带隙能量为 0.73eV, InP 收集层为 1.35eV, 带隙能量差为 0.62eV, 插入的 InGaAsP 过渡层带隙能量为 1.00eV, 从而可以很好地起到过渡的作用(实际应用中过渡层的选择对器件的响应度和带宽均有影响, 本文由于篇幅所限不作讨论). 在 UTC-PD 中, 光生电子从 p^+ -InGaAs 区向外扩散, 到耗尽的 n -InP 收集层, 在外加偏压的作用下电子向阴极运动产生流向阳极的光生电流. 其中紧邻于吸收层的 InGaAsP 势垒层所产生的导带势垒阻挡了电子向阳极扩散(如图 2(a) 中所示). 吸收层所产生的光生载流子中, 多数载流子空穴作为传导电流最终被清除, 不会进入收集层, 不对光生电流作贡献. 因而该光电二极管的响应速度快, 主要取决于电子在吸收层的扩散时间^[9] ($t_{diff} \approx W_a^2/2D_c$) 和在收集层中的漂移时间 ($t_{drift} \approx W_c/v_d$). 在吸收层中光生电子的运动主要是在浓度梯度下的扩散运动, 而在耗尽的收集层中则主要是在外加电场作用下的漂移运动. 这也就是为什么这种器件被称为单向载流子传输光电二极管.

在研究工作中, UTC-PD 器件的模拟利用 Silvaco 公司的模拟软件 ATLAS, 通过改变模拟中所需的器件参数得到理想的响应度及 3dB 带宽性能.

3 器件原理

3.1 器件能带与载流子分布

图 2(a) 所示为器件在 0 及 2V 偏压下的能带结构图. 从图中可以看出, 在 2V 偏压下耗尽的 n -InP 收集层中产生强电场, 抑制了收集层靠近吸收层一侧的能带峰值, 有利于光生电子从吸收层向收集层的运动, 能带分布较为理想. 图 2(b) 所示为整个器件中的电子及空穴电流分布图. 从图中可以看出, 在 InP 收集层中, 光电流完全由从吸收层扩散过来的电子产生并且在电场的作用下向阴极漂移. 吸收层中的电子电流主要是在浓度梯度驱动下的扩散电流, 该电流在 InGaAsP 势垒层为 0 (仅有极少数电子越过势垒层), 到收集层端时上升到最大值, 由于在 p^+ 吸收层中空穴为多数载流子, 空穴电流主要为是漂移电流(忽略了从收集层进入吸收层的空穴), 在吸收层右端为 0 而在势垒层端上升到最大值. 最

后,我们还观察到电子电流在进入收集层下面的亚收集层以后就有所下降.这是因为在模拟中采用的是二维模拟,阴极位于亚收集层的旁边而不是下方(如图 1 所示).这与实际应用也是一致的,因为通常光都是从 InP 收集层一侧入射,而金属接触层必须放在侧面避免挡住光的入射.

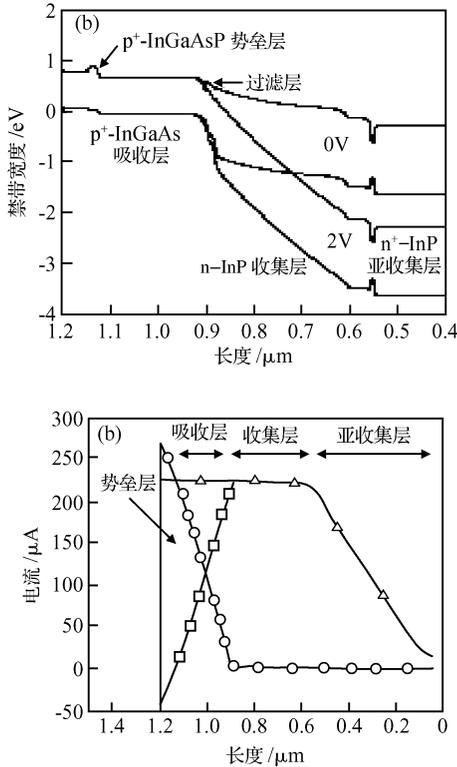


图 2 (a) 0V 及 2V 偏压下器件的能带结构图;(b) 2V 偏压、 $1 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ 入射光强下器件中的电子(□)、空穴(○)以及总(△)电流浓度分布图

Fig.2 (a) Energy band diagram for 0 and 2V reverse bias;(b) Electron (□), hole (○) and total (△) current profiles across the device for optical intensity of $1 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ and 2V reverse bias

3.2 入射光强响应

对 UTC-PD 而言,器件的速度和响应度是两个互相制约的量(有文献报道^[11]该器件 3dB 带宽可达 200GHz,但响应度很低).相对于 pin 光电二极管,UTC-PD 的一个重要优点是其在入射光强下具有高响应度,由光电探测器产生的电流可以直接驱动后续电路而不需要后接电放大电路,因此响应度不能降得太低.图 3 所示为器件的 3dB 带宽与入射光强($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$)的函数关系.由图可见,当入射光强大于 $2 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时器件的 3dB 带宽随着入射光强的增大有一个比较明显的下降,相应的器件响应速度变慢.这可以归因于两方面的因素:(1)大入射光强下吸收层的光生电子浓度虽然增大了,但光

生电子浓度梯度减小,导致扩散通过吸收层的时间变长;(2)大入射光强下流过 InP 收集层的光生电流较大,使得其中的电子浓度接近于掺杂浓度,由于电子堆积产生空间电荷效应,导致收集层中靠近吸收层一端的电场强度降低,光生电子漂移通过收集层的时间也变长了.在实际应用当中,往往需要光探测器在大入射光强下具有较快的响应速度的同时保持高响应度,因此需要展宽器件在大注入光强时的 3dB 带宽.这就需要在下面的研究中找到适当的器件结构参数,使得器件的 3dB 带宽与响应度均能够满足超高速光通信的要求.

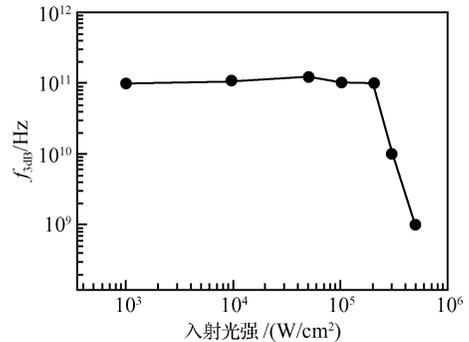


图 3 2V 偏压下 3dB 带宽与入射光强关系图

Fig.3 3dB frequency versus light intensity for a bias of 2V

4 器件结构设计与模拟分析

UTC-PD 器件的性能优劣受其外延层结构参数的影响较大,在模拟分析的过程中需要确定这些关键参数的值,具体分析如下.

4.1 吸收层对器件性能影响

p^+ -InGaAs 吸收层对 UTC-PD 光探测器的性能起着关键的作用.图 4(a)所示为器件在入射光强为 10^5 W/cm^2 ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$) 时响应度及量子效率随吸收层厚度变化的曲线.器件的响应度计算公式为:

$$R = \frac{I_p}{P_r} = \frac{\eta e}{hf} = \frac{\eta e \lambda}{hc} = \frac{\eta \lambda}{1.24} \times \frac{A}{W_a} \quad (1)$$

其中 $\eta = (1 - e^{-\alpha_s W_a})(1 - R_r)$ 为量子效率; λ 为入射光波长; W_a 为吸收层厚度; $\alpha_s = 4\pi k/\lambda$ 为吸收层的光吸收系数; k 为材料的消光系数; R_r 为反射率.

从图 4(a)可以看出,对于 $1.55 \mu\text{m}$ 波长的入射光,由于 InGaAs 的光吸收长度^[10]($\sim 1 \mu\text{m}$)要远大于吸收层的厚度($0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$),光电流以及响应度随着吸收层厚度的增加而增加,且器件的量子效率也相应增大.虽然我们可以通过增加吸收层的厚度来提高器件的响应度,但设计该器件的目的是用于超高速光通信中的光探测,不能片面追求响应度,还

要综合考虑其他性能,尤其是 3dB 带宽.

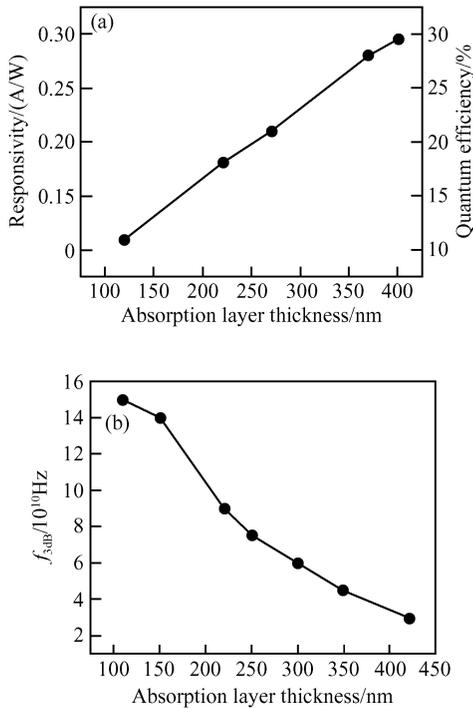


图 4 (a) InGaAs 吸收层厚度与器件响应度关系曲线; (b) InGaAs 吸收层厚度与 f_{3dB} 关系曲线
Fig.4 Responsivity (a) and f_{3dB} frequency (b) versus InGaAs absorption layer thickness

UTC 器件的 3dB 带宽与吸收层厚度的关系可以通过公式(2)来估算:

$$f_{3dB} \approx \frac{1}{2\pi\tau_a} = \frac{1}{2\pi(W_a^2/2D_c + W_a/V_{th})} \quad (2)$$

其中 D_c 为吸收层电子扩散系数; V_{th} 为吸收层的热电子发射速度. 图 4(b)所示为器件的 3dB 带宽与吸收层厚度之间的关系曲线,可见随着吸收层厚度的增大 3dB 带宽呈现明显的下降趋势,这与公式(2)是一致的. 在设计的过程中应根据实际需要选取适当的吸收层厚度. 在本文中,综合考虑器件的响应度和速度,结合图 4(a)和(b)可知,当选取吸收层厚度为 220nm 时可同时获得大的器件响应度 ($\approx 0.18A/W$)和优良的速度性能 ($\approx 100GHz$).

图 5(a)和(b)所示分别为器件的响应度和 3dB 带宽在吸收层厚度为 220nm 的条件下与吸收层的掺杂浓度之间的关系.

从图 5(a)可以看出,器件的响应度在吸收层掺杂浓度低于 $10^{19}cm^{-3}$ 时几乎为一个常数,表明此时对于光生电子的收集效率很高,吸收层非常薄使得大部分的光生电子都能够快速地扩散到收集层中. 而电子的扩散长度随着吸收层掺杂量的增大而减小,掺杂量在 $10^{19}cm^{-3}$ 以上时,电子的扩散长度与吸收层的厚度相近,从而降低了电子的收集效率. 当

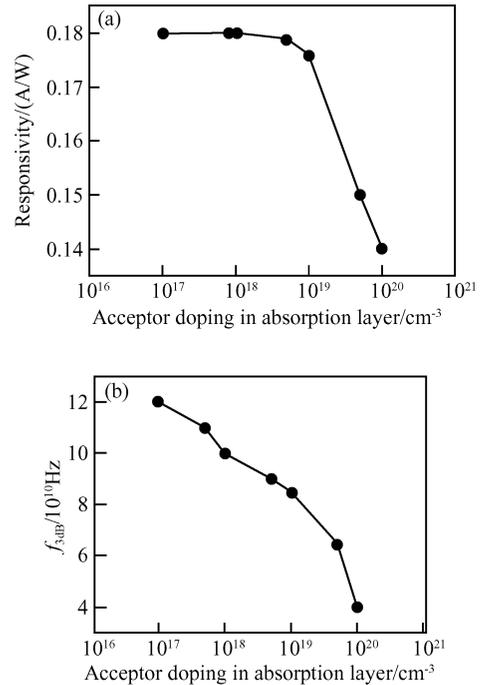


图 5 吸收层厚度为 220nm 时器件的响应度 (a) 和 f_{3dB} 带宽 (b) 与吸收层掺杂的关系曲线

Fig.5 Responsivity (a) and f_{3dB} frequency (b) versus absorption layer doping for a fixed absorption layer width of 220nm

掺杂浓度为 $1 \times 10^{19}cm^{-3}$ 时,从迁移率以及载流子寿命与掺杂浓度的关系^[10]推算出扩散长度大约为 650nm,而在 $1 \times 10^{20}cm^{-3}$ 时为 210nm,此时吸收层厚度为 220nm.

随着吸收层掺杂量的增加,电子的扩散长度减小,相应的吸收层中的电子的输运时间变长,图 5 (b)表明 3dB 带宽具有明显的单调降低趋势. 虽然吸收层掺杂量的减小可以提高 3dB 带宽,但较低的掺杂会减低在大注入光强下吸收层的光入射率从而影响器件的量子效率和响应度.

4.2 收集层对器件性能的影响

由于器件具有后续的亚收集层,InP 收集层的厚度及掺杂对探测器的响应度影响不大,但对器件的 3dB 带宽有较大影响. 图 6(a)和(b)分别上在 2V 偏压, $10^5 W/cm^2$ 入射光强 ($\lambda=1.55\mu m$) 下 n-InP 收集层的厚度以及掺杂浓度与器件 3dB 带宽的关系 (其他参数均保持表 1 中的值不变). 在收集层厚度很薄的情况下,2V 偏压时 InP 收集层处于完全耗尽状态^[5]. 图 6(a)示出了当收集层厚度从 100nm 增大到 300nm 时 3dB 带宽的增加. 虽然随着 InP 收集层厚度的增大该区的载流子漂移距离有所上升,但由于厚度增大导致等效串联电阻增大,等效电容减小,总的效果导致 RC 时间常数有一个相应的减小,

总的光生电子渡越时间呈下降趋势. 这可以用来解释图 6(a)中 3dB 带宽曲线的上升. 当收集层厚度继续增大时, 器件的 3dB 带宽迅速下降, 表明此时由于厚度增大导致的光生电子收集层渡越时间增大起主要作用. 对于 InP 收集层的掺杂, 当掺杂量为 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 时器件的 3dB 带宽达到一个峰值, 随后就会迅速下降. 这是因为在高掺杂浓度下收集层不能完全耗尽所致.

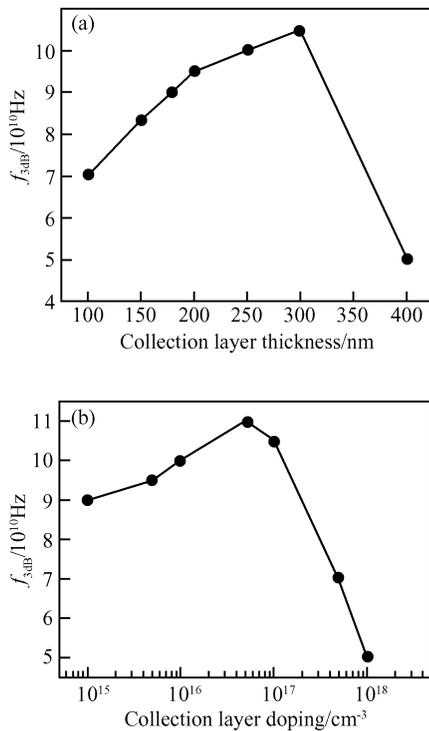


图 6 (a) 器件 3dB 带宽与 InP 收集层厚度的关系 (掺杂浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$); (b) 3dB 带宽与 InP 收集层掺杂浓度的关系 (厚度为 260nm)

Fig. 6 f_{3dB} frequency variation with thickness of the n-InP collection layer for a doping level of $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (a) and with the doping for a layer thickness of 260nm (b)

5 结论

本文首先利用 Silvaco 公司的器件模拟软件 Atlas 进行 UTC-PD 器件结构模拟. 模拟了器件的基本性能, 得到在 0 及 2V 偏压下的器件能带结构

图及载流子浓度分布图. 在此基础上, 着重讨论了器件性能与结构的关系. 器件速度的加快可以通过减小吸收层的厚度来实现, 但是同时也降低了器件的响应度. 吸收层掺杂量的减小也会相应地提高 3dB 带宽且响应度保持在较高水平. 收集层厚度的增大可以增大器件的 3dB 带宽, 但超过 300nm 后 3dB 带宽下降, 而随着收集层掺杂浓度的增大器件的 3dB 带宽先上升达到一个峰值以后迅速下降. 综上所述, 在模拟中选取器件的关键参数如表 1 所列, 可以同时获得较高的响应度 (0.18 A/W) 和 3dB 带宽 (100GHz), 满足超高速光互联的要求.

参考文献

- [1] Nian Hua, Mao Luhong, Li Wei, et al. Bandwidth design for CMOS monolithic photoreceiver. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(4): 677
- [2] Enoki T, Sano E, Ishibashi T. Prospects of InP - based IC technologies for 100-GBIT/S-class lightwave communications systems. International Journal of High Speed Electronics & Systems, 2001, 11(1): 137
- [3] Ishibashi T, Furuta T, Fushimi H, et al. InP / InGaAs uni-traveling carrier photodiodes. IEICE Trans Electron, 2000, E83-C(6): 938
- [4] Ishibashi T, Kodama S, Shimizu N, et al. High speed response of uni-traveling carrier photodiodes. Jpn J Appl Phys, 1997, 36(10) Part 1: 6263
- [5] Adachi S. Physical properties of III-V semiconductor compounds; InP, InAs, GaAs and InGaAsP. New York; Wiley Interscience, 1992: 359
- [6] Budianu E, Purica M, Rusu E. Heterostructures on InP substrate for high detection devices over a large spectral range. Microelectron Eng, 2000, 51/52: 393
- [7] Huber A, Huber D, Morf T, et al. Monolithic high transimpedance gain (3.3k Ω), 40Gbit/s InP-HBT photoreceiver with differential outputs. Electron Lett, 1999, 35(11): 897
- [8] Humber D, Bitter M, Morf T, et al. 46GHz bandwidth monolithic InP/InGaAs pin/SHBT photoreceiver. Electron Lett, 1999, 35(1): 40
- [9] Franz J H, Jain V K. Optical communications components and systems. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002
- [10] Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng. Physics of semiconductors. Sixth edition. Beijing: National Defence Industry Press, 2003
- [11] Ito H, Furuta T, Hirata A, et al. Pre-amplifier integrated uni-travelling-carrier photodiode module for operation in 120GHz band. Electron Lett, 2005, 41(6): 1

Study of Uni-Traveling-Carrier Photodetectors*

Zhu Haobo[†], Mao Luhong, Yang Zhan, Guo Weilian, Zhang Shilin, and Liang Huilai

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A new type of photodetector, called a UTC-PD (uni-traveling-carrier photodetector), is simulated with Atlas simulator. The basic principle of the device is studied. In particular, the relationship between structure and performance is discussed. The obtained UTC-PD can achieve high responsivity ($\geq 0.18 \text{ A/W}$) and wide 3dB band-width ($\geq 100 \text{ GHz}$) simultaneously. Compared to conventional pin photodetectors, the UTC-PD has a simpler front-end circuit, lighter noise, and lower cost.

Key words: UTC; photodetector; responsivity; 3dB band-width

EEACC: 2560B

Article ID: 0253-4177(2006)11-2019-06

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2002CB311905)

[†] Corresponding author. Email: yesnickel@yahoo.com.cn

Received 20 April 2006, revised manuscript received 14 June 2006