

双异质结单载流子传输光敏晶体管输出电流

刘 硕, 谢红云*, 孙 丹, 刘 芮, 吴佳辉, 张万荣

(北京工业大学 信息学部电子科学与技术学院, 北京 100124)

摘要: 详细对比并分析了双异质结单载流子传输光敏晶体管(Uni-travelling-carrier Double Heterojunction Phototransistor, UTC-DHPT)与单异质结光敏晶体管(Single Heterojunction Phototransistor, SHPT)在大的入射光功率范围下集电极输出电流特性. 首先, UTC-DHPT 仅选取窄带隙重掺杂的基区作为吸收区, 与 SHPT 选取基区和集电区作为吸收区相比, 其光吸收区厚度小, 在小功率入射光下 UTC-DHPT 的输出电流小于 SHPT 的输出电流. 其次, 由于 UTC-DHPT 的双异质结结构, 光生电子和光生空穴产生于基区, 减弱了 SHPT 因光生空穴在集电结面积累而产生的空间电荷效应, 避免了 SHPT 在小功率入射光下输出电流开始饱和的问题, 从而 UTC-DHPT 获得了比 SHPT 更大的准线性工作范围. 最后, UTC-DHPT 的单载流子(电子)传输方式使得基区产生的光生空穴以介电弛豫的方式到达发射结界面, 有效降低了发射结势垒, 增加了单位时间内由发射区传输到基区的电子数量, 提高了其发射结注入效率, 在大功率入射光下 UTC-DHPT 比 SHPT 能获得更高的输出电流.

关键词: 光敏晶体管; 单载流子传输; 输出电流; 空间电荷效应; 发射结注入效率

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A

Output current of double heterojunction uni-travelling-carrier phototransistor

LIU Shuo, XIE Hong-Yun*, SUN Dan, LIU Rui, WU Jia-Hui, ZHANG Wan-Rong

(College of Electronic Science and Technology, Faculty of Information Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In this paper, the output current characteristics within a large range of incident light power of a double heterojunction uni-travelling-carrier phototransistor (UTC-DHPT) were analyzed in detail and compared with a single heterojunction phototransistor (SHPT) simultaneously. Firstly, the output current of UTC-DHPT is smaller than that of SHPT under small power incident light because the UTC-DHPT's absorption section is only the base region, which is smaller than SHPT's absorption section consisting of base and collector. Secondly, benefiting from the double hetero-junction, the photogenerated carriers are only generated in base in UTC-DHPT, and there are few photogenerated holes accumulated in the collector junction interface. The space charge effect, which is seriously in SHPT, is effectively alleviated. Furthermore, the saturation of the output current under small power incident light, which always occurs in SHPT, is avoided. Therefore, UTC-DHPT has a larger quasi linear range than SHPT. Lastly, the uni-travelling transportation in UTC-DHPT make photogenerated holes in the base region reach to the emitter junction interface by the rapid relaxation, and thereby effectively reduce the emitter junction barrier. This would increase the number of electrons transmitting from the emitter to the base in the unit-time, and the emitter junction injection efficiency is improved. Thus, UTC-DHPT can obtain higher output current than SHPT under the high power incident light.

Key words: phototransistor, uni-travelling-carrier, output current, space charge effect, emitter junction injection efficiency

收稿日期: 2016-12-28, 修回日期: 2017-04-15

Received date: 2016-12-28, revised date: 2017-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(61774012, 61574010, 61006044, 61604106); 北京市未来芯片技术高精尖创新中心科研基金(KYJJ2016008); 北京市自然科学基金(4122014, 4142007); 山东省自然科学基金项目(ZR2014FL025)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61774012, 61574010, 61006044, 61604106); the Research Fund from Beijing Innovation Center for Future Chip (KYJJ2016008); the Natural Science Foundation of Beijing, China (4122014, 4142007); the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (ZR2014FL025)

作者简介(Biography): 刘 硕(1992-), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究领域为半导体光电子学. E-mail: liushuo8721@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: xiehongyun@bjut.edu.cn

PACS: 85. 60. -q, 85. 60. Gz, 85. 60. Dw, 85. 60. Bt

引言

异质结光敏晶体管 (Heterojunction Phototransistor, HPT) 既有探测光信号的功能, 又兼有传统电学晶体管放大信号的特点, 近年来作为光电探测器被越来越多地应用于微波光通信系统 (如 Radio over Fiber, RoF 系统) 中^[1-3]. 在 RoF 系统中, 为了实现高效的线性光电探测, 人们既需要 HPT 有大的线性区或准线性区范围, 也需要其具有高的光电转换能力 (即在一定光功率下具有高的输出电流).

目前, 常见的 HPT 可分为单异质结光敏晶体管 (SHPT) 和双异质结光敏晶体管 (DHPT). SHPT 采用发射结为异质结、集电结为同质结的结构, 基区和集电区同为光吸收区并产生光生载流子^[4-5]. 在集电结反向偏压下, 光生电子被集电区收集, 从集电极输出; 光生空穴由集电区向发射结漂移. 光生电子和光生空穴的漂移运动共同形成了集电极输出电流. 为了提高器件光吸收效率并获得高的光响应度, 需要厚的基区和集电区; 而为了缩短光生载流子尤其是光生空穴从集电区漂移至发射结的渡越时间, 提高器件响应速度, 则需要薄的基区和集电区. 因此, SHPT 在同时优化光响应度和响应速度方面存在矛盾. 1997 年, 日本 Ishibashi 等人提出了一种单载流子传输的光电二极管 (Photo Diode, PD)^[6]. 这种 PD 器件仅采用窄带隙的 p 型区吸收入射光, 缓解了光生空穴慢迁移率对其工作速度的限制, 提高了其响应速度和饱和光电流. 近年来, 这种单载流子传输的思想逐渐被引入光敏晶体管中来缓解 SHPT 在器件结构优化中存在的矛盾, 如文献[7-10]. 文献[7]报道了一种 DHPT, 采用能吸收 1.55 μm 波长光信号的窄带隙 InGaAsP 作为基区、吸收 1.3 μm 波长光信号的宽带隙 InGaAsP 作为集电区和次集电区, 实现了单载流子传输. 该文献仅报道了 DHPT 在较小光功率下直流特性的结果, 没有涉及到其内部物理机理的研究. 文献[8]给出了一种 UTC-DHPT 增益与输出特性的结果, 并与其对应的 PD 作对比, 但也没有对其内部物理机理进行研究. 文献[9]基于器件仿真器 Atlas 建立了 InP/InGaAsP UTC-DHPT 二维模型, 模拟了在小光功率下的光响应度和特征频率, 同样没有涉及到内部物理机理的研究. 文献[10]给出了 UTC-DHPT 在基极光偏置和光电混合偏置两种条件时, 光响应度和光特征频率结果. 在其

工作机理方面, 仅分析了载流子渡越时间与光特征频率的关系. 由以上文献可以看出, 目前虽然有关 UTC-DHPT 的报道越来越多, 但鲜有对其集电极输出电流在大的入射光功率范围内输出特性和其内部物理机理进行的综合研究.

本文利用 Silvaco 公司的器件仿真软件 ATLAS 完成 UTC-DHPT 和 SHPT 输出电流特性的仿真与分析工作. 首先给出 UTC-DHPT 和 SHPT 在不同功率范围入射光下集电极输出电流的对比结果, 然后通过分析二者内部空穴分布和能带结构, 解释了 UTC-DHPT 比 SHPT 有更大的准线性区范围和在大功率入射光下更高输出电流的物理机理.

1 器件结构

图 1 为本文研究的 UTC-DHPT 器件二维结构图.

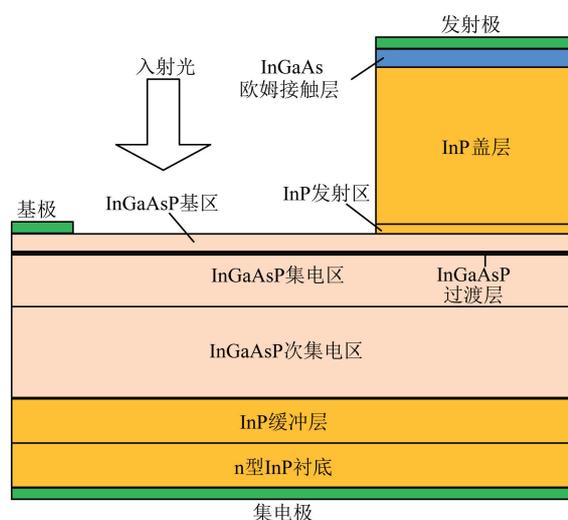


图 1 UTC-DHPT 器件二维结构图

Fig. 1 Two-dimensional device structure of the UTC-DHPT

发射极电极下方的欧姆接触层为 n 型掺杂的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, 掺杂浓度为 10^{19} cm^{-3} , 厚度为 100 nm; 盖层和发射区都采用 n 型掺杂的 InP, 掺杂浓度分别为 10^{19} cm^{-3} 和 10^{17} cm^{-3} , 厚度分别为 1 800 nm 和 50 nm; 基区采用 p 型重掺杂 (10^{18} cm^{-3}) 的 InGaAsP, 厚度为 100 nm, 带隙宽度为 0.80 eV; 集电区采用带隙宽度为 1.12 eV, 掺杂浓度为 10^{16} cm^{-3} 的 n 型 InGaAsP, 厚度为 400 nm. 为了降低集电结导带尖峰, 在基区与集电区之间加入了带隙宽度为 0.80 eV、0.88 eV 的 InGaAsP 作为过渡层. 集电区下方为 In-

GaAsP 次集电区、InP 缓冲层和 n 型掺杂 (10^{18} cm^{-3}) 的 InP 衬底. 面积为 $4 \times 6 \mu\text{m}^2$ 的基区光窗口接收 $1.55 \mu\text{m}$ 波长的入射光. 其相应 SHPT 的结构与光窗口设计与 UTC-DHPT 基本一致, 但是集电区采用与基区相同带隙宽度 (0.80 eV) 的 InGaAsP, 集电结不再有过渡层.

2 结果和讨论

图 2 为 UTC-DHPT 和 SHPT 在集电极偏置为 2 V 下, 集电极输出电流随入射光功率变化的曲线. 由图 2 看出, UTC-DHPT 和 SHPT 的输出电流都随入射光功率的增加而增大. 当光功率小于 1.6 mW 时, UTC-DHPT 的输出电流小于 SHPT. 这是由于 UTC-DHPT 的光吸收区仅有基区, 而 SHPT 的光吸收区为基区和集电区, 两种器件的光吸收区厚度大小的不同使得在 $0 \sim 1.6 \text{ mW}$ 入射光功率的范围内, UTC-DHPT 中产生的光生载流子总量明显少于 SHPT, UTC-DHPT 的输出电流小于 SHPT. 当入射光功率大于 1.6 mW 后, UTC-DHPT 的输出电流开始超过 SHPT. 此时, SHPT 的输出特性已进饱和区, 而 UTC-DHPT 的输出电流依然随着入射光功率的增加而快速增大.

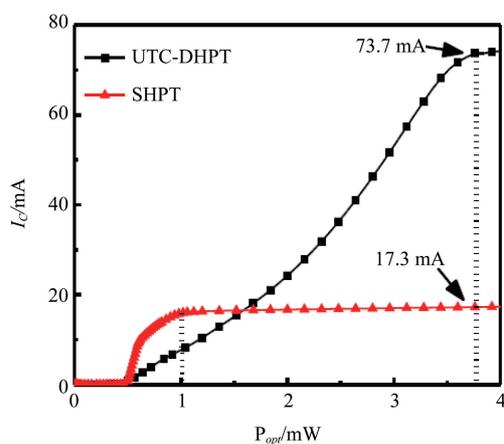


图 2 UTC-DHPT 和 SHPT 集电极输出电流随光功率变化曲线

Fig. 2 Variations of collector output current of UTC-DHPT and SHPT as a function of optical power

由图 2 还可以看出, 当光功率大于 1 mW 时, SHPT 开始进入饱和区, 输出电流不再随光功率的增加而显著增大, 饱和输出电流为 17.3 mA . 对于 UTC-DHPT, 当光功率增加到 3.8 mW 时才开始进入饱和区, 饱和输出电流达到 73.7 mA . SHPT 的准线性工作区 (可以看作两段斜率不同的准线性区) 范

围为 $0.5 \sim 1 \text{ mW}$; UTC-DHPT 的准线性工作区范围为 $0.5 \sim 3.8 \text{ mW}$.

简而言之, 在小功率入射光时 UTC-DHPT 的输出电流比 SHPT 低, 但在大的入射光功率范围内, UTC-DHPT 有比 SHPT 更大的饱和入射光功率和准线性工作区, 且能够提供更大的输出电流.

图 3(a) 是 UTC-DHPT 在集电极偏置为 2 V、光功率为 3 mW 下的空穴浓度分布, 图 3(b) 是 SHPT 在相同条件下的空穴分布. 图 4 是从图 3(a) 和图 3(b) 虚线所示的位置提取的 UTC-DHPT 和 SHPT 的空穴浓度变化曲线. 从图中可以看出, 两种器件的基区空穴浓度都在 10^{20} cm^{-3} 左右. 这是因为两种器件的基区材料相同, 在相同光照条件下具有相同的光生载流子产生率, 约 $10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$, 达到动态平衡时基区的空穴浓度主要受光生载流子的产生率影响, 因此二者浓度相近. 对于二者集电区来说, UTC-DHPT 集电区的空穴浓度较小, 约为 $10^{15} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; SHPT 集电区的空穴浓度和基区相仿, 在 10^{20} cm^{-3} 左右. 其原因在于 UTC-DHPT 中光生电子-空穴对仅产生于基区, 而 SHPT 中光生电子-空穴对同时产生于作为吸收区的基区和集电区.

在 SHPT 集电区产生的光生空穴, 由于迁移率相对较小, 会有一部分积累在集电结耗尽区和集电结界面, 形成空间电荷效应. 随着光功率的增大, 积累的光生空穴增多, 产生的空间电荷效应越来越严重, 会影响集电结反向电场对光生电子的作用, 减弱电子向集电区的漂移运动, 导致 SHPT 的集电极电流随着入射光功率的增加而迅速饱和. 而对 UTC-DHPT 来说, 为了实现单载流子传输采用了双异质结结构, 仅有作为吸收区的基区会产生大量的光生电子-空穴对, 如图 3 和图 4 所示, 集电结耗尽区中的空穴浓度远小于 SHPT, 不会造成空穴在集电结界面大量积累, 从而显著减弱了集电结空间电荷效应对电子漂移运动的影响. 因此 UTC-DHPT 避免了输出电流在小功率的入射光下就进入饱和区, 比 SHPT 有更大的准线性工作区范围.

如前所述, UTC-DHPT 和 SHPT 中的光生电子以漂移运动输送到集电极并被集电极收集形成输出电流, 而光生空穴以介电弛豫 (UTC-DHPT) 或漂移扩散 (SHPT) 的方式向发射结输运. 由于异质结的存在, 光生空穴会在发射结积累形成光生势垒, 影响发射结处的能带结构. 图 5 (a) 为 UTC-DHPT 在集电极偏置为 2 V, 无光照和光功率为 3 mW 时的能带结构; 图 5 (b) 为 SHPT 在相同条件下的能带结构.

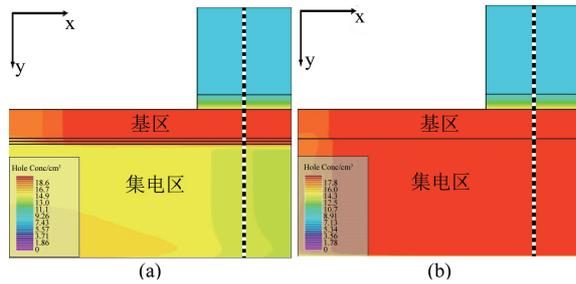


图3 (a) UTC-DHPT 空穴浓度分布, (b) SHPT 空穴浓度分布

Fig.3 (a) Hole concentration distribution of UTC-DHPT, (b) hole concentration distribution of SHPT

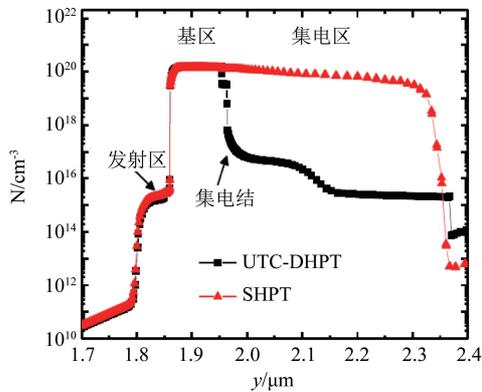


图4 UTC-DHPT 和 SHPT 空穴浓度

Fig.4 Hole concentration of UTC-DHPT and SHPT

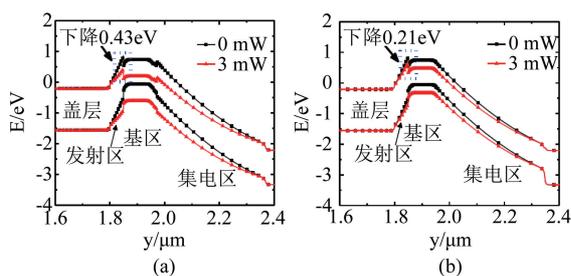


图5 (a) UTC-DHPT 在无光照和 3 mW 光功率下的能带图, (b) SHPT 在无光照和 3 mW 光功率下的能带图

Fig.5 (a) Energy band diagrams of UTC-DHPT in dark and under light with 3 mW, (b) energy band diagrams of SHPT in dark and under light with 3 mW

对 UTC-DHPT 来说,在光功率为 3 mW 下的发射结势垒相比无光照时降低了 0.43 eV;而对 SHPT 来说,在相同条件下发射结势垒降低了 0.21 eV。这是由于 UTC-DHPT 基区中的空穴向发射结运动的方式以介电弛豫为主,其速度远大于 SHPT 基区和集电区中空穴向发射结的扩散和漂移,单位时间内

到达 UTC-DHPT 发射结的空穴数量多于 SHPT^[7, 11-12]。因此,在相同光功率下,UTC-DHPT 发射结势垒降低的要比 SHPT 更多,发射区中的电子更容易传输到基区,提高了发射结注入效率,从而显著增加了 UTC-DHPT 集电极收集电子产生的输出电流。

因此可以得出,由于 UTC-DHPT 的双异质结结构和单载流子传输方式,能有效减弱集电结界面空间电荷效应对集电极电子收集作用的影响,同时改变发射结界面能带结构,显著提高发射结的注入效率,UTC-DHPT 能够获得比 SHPT 更大的准线性范围,适于处理更大功率范围的入射光,并且在大功率入射光下能提供更高的输出电流。

3 结论

首先给出了 UTC-DHPT 和 SHPT 在集电极偏置为 2 V、入射光波长为 1.55 μm 时,在不同入射光功率下的输出电流。当光功率小于 1.6 mW 时,UTC-DHPT 的集电极输出电流小于 SHPT。UTC-DHPT 在光功率为 3.8 mW 时开始饱和,饱和输出电流高达 73.7 mA,均大于 SHPT 的饱和入射光功率(1 mW)和饱和输出电流(17.3 mA);UTC-DHPT 输出电流的准线性区范围为 0.5 ~ 3.8 mW,同样大于 SHPT 输出电流的准线性区范围(0.5 ~ 1 mW)。通过分析 UTC-DHPT 的空穴分布和能带结构并与 SHPT 对比可知,UTC-DHPT 中为实现单载流子传输而构建的双异质结结构减弱了光生空穴在集电结界面面积累而产生的空间电荷效应,避免了其输出电流在较小光功率下就进入饱和区;基区产生的光生空穴以快速弛豫的方式到达发射结界面。这种单载流子传输的输运方式使得 UTC-DHPT 在相同光功率下发射结势垒降低的更多,提高了发射结的注入效率。因此,UTC-DHPT 具有比 SHPT 更大的准线性区和在大功率入射光下更高的输出电流。

References

- [1] Viana C, Tegegne Z G, Rosales M, *et al.* Hybrid photo-receiver based on SiGe heterojunction photo-transistor for low-cost 60 GHz intermediate-frequency radio-over-fibre applications[J]. *Electronics Letters*, 2015, **51**(8):640-642.
- [2] LOU Zheng, LIANG Zhong-Zhu, SHEN Guo-Zhen. Photo-detectors based on two dimensional materials[J]. *Journal of Semiconductors*, 2016, **37**(9):091001.
- [3] ZHANG Shang-Jian, WANG Heng, ZOU Xin-Hai, *et al.* Self-calibrating measurement of high-speed electro-optic phase modulators based on two-tone modulation[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(12):3504-3507.

- [4] Kim J Y, Choi C S, Choi W Y, *et al.* Characteristics of InP—InGaAs HPT-Based Optically Injection-Locked Self-Oscillating Optoelectronic Mixers and Their Influence on Radio-Over-Fiber System Performance[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(3):155 – 157.
- [5] Park M S, Jang J H. Enhancement of Optical Gain in Floating-Base InGaP—GaAs Heterojunction Phototransistors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(16):1202 – 1204.
- [6] Ishibashi T, Kodama S, Shimizu N, *et al.* High-Speed response of uni-traveling-carrier photodiodes [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1997, **36**(10):6263 – 6268.
- [7] Wang L, Zhao L, Pan J, *et al.* A new phototransistor with uni-travelling-carrier and optically gradual coupling properties[J]. *Opto-electronics Review*, 2009, **17**(3):242 – 246.
- [8] Kim J, Kanakaraju S, Johnson W B, *et al.* High upconversion gain optoelectronic mixer using uni-travelling carrier phototransistors[J]. *Electronics Letters*, 2012, **48**(10):583 – 585.
- [9] HUO Wen-Juan, XIE Hong-Yun, LIANG Song, *et al.* Uni-traveling-carrier double heterojunction phototransistor photodetector [J]. *Acta Physica Sinica* (霍文娟, 谢红云, 梁松, 等. 单载流子传输的双异质结光敏晶体管探测器的研究. *物理学报*), 2013, **62**(22):228501.
- [10] JIANG Zhi-Yun, XIE Hong-Yun, ZHANG Liang-Hao, *et al.* Analysis on high speed response of a uni-traveling-carrier double hetero-junction phototransistor [J]. *Chinese Physics B*, 2015, **24**(4):048504.
- [11] 王列松. InP/InGaAsP 光晶体管探测器和双模激光器的研制[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- [12] Srivastava S, Roenker K P. Numerical modeling study of the InP/InGaAs uni-travelling carrier photodiode[J]. *Solid-State Electronics*, 2004, **48**(3):461 – 470.