

单载流子传输的双异质结光敏晶体管探测器的研究*

霍文娟^{1)2)†} 谢红云¹⁾ 梁松²⁾ 张万荣¹⁾ 江之韵¹⁾ 陈翔¹⁾ 鲁东¹⁾

1) (北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

2) (中国科学院半导体研究所, 材料重点实验室, 北京 100083)

(2013年8月5日收到; 2013年8月25日收到修改稿)

基于器件仿真器 Atlas, 建立了 InP/InGaAsP 单向载流子传输的双异质结光敏晶体管 (UTC-DHPT) 的二维模型, 分析讨论了器件性能与外延结构参数的关系. 设计出同时具有高响应度 (≥ 17.93 A/W) 和高特征频率 (≥ 121.68 GHz) 的 UTC-DHPT, 缓解了传统的异质结光敏晶体管光电探测器中探测效率和工作速度的矛盾.

关键词: 单向载流子, 光敏晶体管, 电流放大倍数, 响应度

PACS: 85.60.Dw, 85.60.Bt, 73.40.Kp

DOI: 10.7498/aps.62.228501

1 引言

近年来, 宽带综合业务网和射频光通信系统 (ROF) 的迅猛发展要求光探测器有高速率、高响应度、高增益和低噪声等性能^[1]. 20世纪90年代提出的异质结光敏晶体管 (HPT), 一方面使用异质结双极晶体管 (HBT) 器件结构, 集成光探测和电放大两种功能; 另一方面, 用于 ROF 基站的 HPT, 在光探测吸收的同时, 利用其非线性还可以完成注入锁定、混频、变频等功能^[2-5]. 基于这些优异的特性, HPT 自提出以来就引起了人们的关注, 并且可能取代光二极管 (PIN) 和雪崩光二极管 (APD) 应用在光通信领域. 传统的 HPT 大多采用单异质结外延结构, 用基区和集电区同时作为吸收区, 光生载流子 (包括电子和空穴) 集中产生于耗尽区和集电区, 空穴的迁移率较低, 其在集电区中的缓慢输运严重地限制了器件的光电响应速度^[6,7].

单行载流子光电探测器 (UTC-PD) 是一种新型的探测器, 器件中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^[8-12]. Shi 等^[13] 制作了一种背对背 UTC-PD, 其在 40 GHz 频率范围内都能保持 0.83 W/A 的高响应度. Rouvalis 等^[14] 报道了一种适用于光子集成的 UTC-PD, 其 3 dB 带宽达 170 GHz. 利用器件的超高速特性, Ito 等^[15] 制作了基于 UTC-PD 的太赫兹 (THz) 波发射器, 在 500 GHz 频率下获得了 17 μ W 的 THz 功率, 在 1000 GHz 频率下获得了近 3 μ W 的 THz 功率. 虽然对 UTC-PD 的研究已经较为广泛, 但是将 UTC 思想运用到 HPT 的报道很少. 2009 年, Wang 等^[16] 报道了边耦合 InP/InGaAsP 基 UTC-HPT 的实验结果, 展示了这种器件优异的非线性光电相应特性. 2011 年 Schiellein 等^[17] 报道了一种大面积 UTC-HPT 并对其表征方法开展了初步的探索. 由于 UTC 结构有望大大提高 HPT 器件的性能, 有必要对包含 UTC 结构的 HPT 进一步深入研究.

本文基于器件仿真器 Atlas 建立了该器件的二维模型, 系统地模拟并分析了不同结构参数对器件响应度及特征频率的影响, 相关结果阐明了器件的一些基本特性, 为 UTC-DHPT 的实验研究提供有价值的参考.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61006044, 60776051, 61006059, 61274071, 61090392)、国家高技术研究发展计划 (批准号: 2013AA014502, 2011AA010303)、北京市自然科学基金 (批准号: 4122014, 4082007) 和北京市教委科技发展计划 (批准号: KM200910005001, KM200710005015) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: huowenjuan@semi.ac.cn

2 结构与模型

本文所用的 InP/InGaAsP 单向载流子传输的双异质结光敏晶体管 (UTC-DHPT) 的材料结构如图 1 所示, 详细参数如表 1 所示. 用高掺杂的 InGaAs 作为 n 型欧姆接触层, 高掺杂的 InP 作为 n 型接触层, 发射区为中等掺杂的 InP, 基区采用带隙宽度为 0.80 eV 的 p 型 InGaAsP, 集电区采用带隙宽度为 1.12 eV 的 n 型 InGaAsP. 为了进一步降低 b-c 结导带尖峰, 在基区与集电区之间分别加入带隙宽度为 0.80, 0.88 eV 的 InGaAsP 作为过渡层. 图 2 所示为器件 b-c 结在 0 V 及 2 V 偏压下的能带结构. 从图中可以看出, 在 2 V 偏压下耗尽的 n-InGaAsP 集电区中产生强电场, 抑制了集电区靠近基区一侧的能带峰值, 有利于光生电子从基区向集电区的运动.

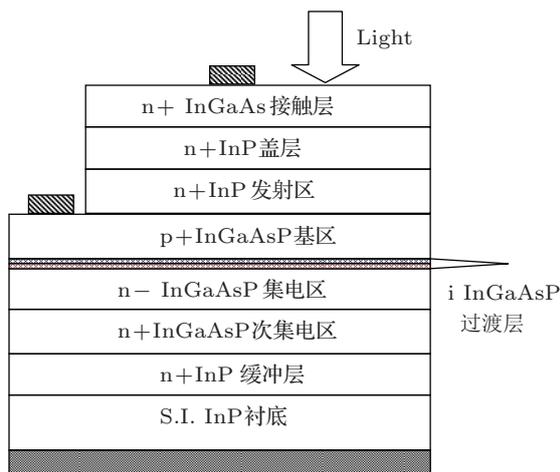


图 1 UTC-DHPT 结构示意图

表 1 模拟所用的外延层结构参数

层	掺杂/cm ⁻³	厚度/nm	带隙宽度/eV
n+InGaAs 接触层	1 × 10 ¹⁹	100	0.75
n+InP 盖层	1 × 10 ¹⁹	1800	1.35
n+InP 发射区	1 × 10 ¹⁷	50	1.35
p+InGaAsP 基区	1 × 10 ¹⁸	100	0.80
i InGaAsP 过渡层	1 × 10 ¹⁵	10	0.80
i InGaAsP 过渡层	1 × 10 ¹⁵	10	0.88
n- InGaAsP 集电区	1 × 10 ¹⁶	400	1.12
n+ InGaAsP 次集电区	1 × 10 ¹⁹	1000	1.12
n+InP 缓冲层	1 × 10 ¹⁹	500	1.35
n+InP 衬底	S. I		1.35

器件采用 e-b 结和 b-c 结双异质结代替原有的单异质结 HPT, 只用重掺杂基区作为吸收层. 当光垂

直入射时, 光生载流子产生于基区, 空穴作为多数载流子通过快速弛豫到达 e-b 结界面, 增加 e-b 结耗尽区的正电荷, 降低 e-b 结势垒, 发射区大量的电子翻越 e-b 结尖峰势垒扩散到达基区. 整个器件中只有光生电子由基区传输到集电区, 消除了单异质结中空穴低迁移率的限制, 电子的高迁移率得到了很好的利用, 实现了器件的单载流子传输 [18].

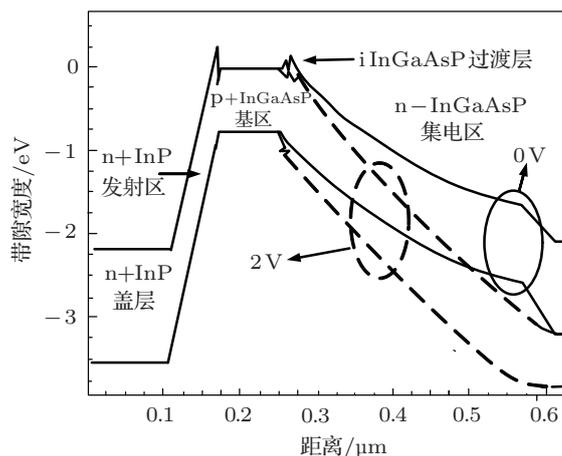


图 2 UTC-DHPT 能带图

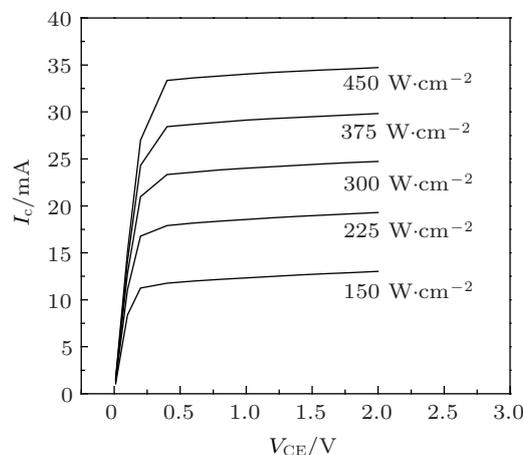


图 3 不同入射光强时集电极电流与 V_{CE} 的关系

基于器件仿真器 Atlas, 建立了 UTC-DHPT 模型并完成了器件的性能模拟. 为使器件模拟与实际工作模式一致, 模拟过程中, UTC-DHPT 的迁移率模型考虑了掺杂浓度相关的模型 CONMOB, 平行场相关的负微分饱和速度效应模型 FLDMOB, 另外考虑了 Auger 复合与 Shockley-Read-Hall 复合. 二维器件模拟取探测器的光敏面为 6 μm × 1 μm, 入射波长为 1.55 μm. 表 1 所示器件在不同光强下集电极电流随 V_{CE} 的变化如图 3 所示, 其与普通晶体

管的共发射极输出特性类似. $V_{CE} = 2\text{ V}$ 时器件集电极电流随入射光强的变化如图 4 所示. 图 3 和图 4 的曲线表明探测吸收注入光提供了器件的基极偏置, 计算得出器件的响应度为 17.6 A/W .

图 5 为 $V_{CE} = 2\text{ V}$, 入射光强从 0 增加到 $450\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 表 1 所示 UTC-DHPT 与对应传统 HPT 的 f_T 随集电极电流的变化曲线, 传统 HPT 的最大 f_T 为 46.7 GHz , 远小于 UTC-DHPT 的 115.4 GHz , 由此可知 UTC 结构的加入大大提高了器件的响应速度.

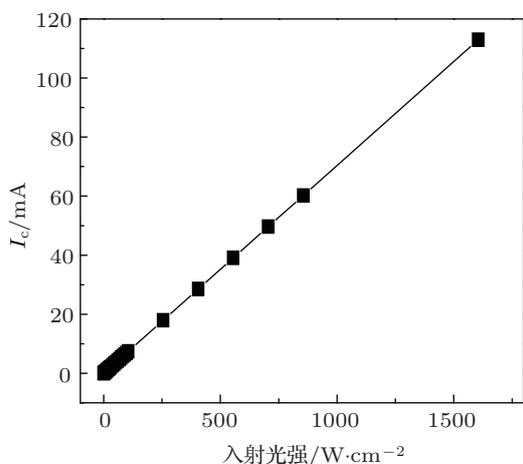


图 4 集电极电流与入射光强的关系

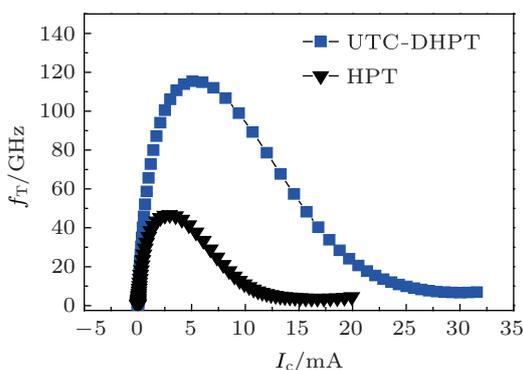


图 5 UTC-DHPT 与传统 HPT f_T 的对比

3 分析与讨论

对于探测器, 最重要的两个性能参数是响应度和响应速度. 本文采用的器件发射区的厚度为 50 nm , 掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$, 该设计参数可以获得良好的器件电学性能, 如电流放大倍数等^[19,20], 所以发射区结构参数不是本文的研究重点. 本文的工作围绕 UTC-DHPT 器件中构成 UTC

结构的基区(吸收层)、集电区(收集层)、过渡层等参数展开, 分析它们对器件响应度和 f_T 的影响, 相应晶体管的电流放大倍数及其对应 UTC-PD (将表 1 中 InP 发射区、InP 盖层、InGaAs 接触层的掺杂类型由 n 型变换为 p 型, 形成 UTC-PD) 的响应度也是本文的分析对象.

UTC-DHPT 的响应度主要取决于相应晶体管的电流放大倍数与对应 UTC-PD 的响应度, 并且应该分别与这两者成正比, 表示为

$$R \propto \beta, \quad R \propto R_{\text{UTC-PD}}, \quad (1)$$

其中 $\beta = \frac{\tau_n}{\tau_b}$ 为相应的晶体管的电流放大倍数, τ_b 为少数载流子在基区的渡越时间, τ_n 为少数载流子的寿命^[21]; $R_{\text{UTC-PD}} = I_p/P_i$ 为对应 UTC-PD 的响应度, I_p 为其输出电流, P_i 为其入射光功率.

UTC-DHPT 的响应速度可以用 f_T 表征, f_T 的表达式如下^[22]:

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{ec}} = \frac{1}{2\pi(\tau_e + \tau_b + \tau_{oh} + \tau_{ic} + \tau_c)}, \quad (2)$$

其中 τ_{ec} 表示电子从基区渡越到集电区的时间, τ_e 表示发射极荷电时间, τ_b 表示电子在基区的渡越时间; τ_{oh} 表示光生空穴由吸收层扩散/漂移到 e-b 结界面所需要的时间, 由于在此器件中, 空穴可以通过快速介电弛豫过程到达 e-b 结界面, 所以 τ_{oh} 非常小; τ_{ic} 表示电子在集电区的渡越时间; τ_c 为集电区的荷电时间.

3.1 基区(吸收层)对器件性能的影响

3.1.1 掺杂浓度对器件性能的影响

当表 1 中 p+InGaAsP 基区的掺杂浓度分别选取 1.0×10^{17} , 5.0×10^{17} , 1.0×10^{18} , 5.0×10^{18} 和 $1.0 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 时, 模拟对应晶体管的放大倍数、对应 UTC-PD 的响应度、UTC-DHPT 的响应度及 f_T , 分析基区掺杂浓度对器件性能的影响, 结果如图 6.

图 6(a) 为 UTC-DHPT 对应的晶体管放大倍数与吸收层掺杂浓度的关系曲线, 吸收层掺杂浓度减小, 吸收层中电子的寿命 τ_n 增大, 电子在吸收层的渡越时间 τ_b 减小, 所以器件的放大倍数随着基区掺杂浓度的增加而减小. 图 6(b) 为 UTC-PD 响应度与吸收层掺杂浓度的关系曲线, 掺杂浓度增

加时, 其响应度的变化很小. 图 6(c) 给出了吸收层掺杂浓度对 UTC-DHPT 响应度的影响, 器件的响应度随着掺杂浓度的增加先缓慢减小, 然后快速减小. 同时图 6(c) 也给出了相应晶体管放大倍数 β 与 UTC-PD 响应度 $R_{\text{UTC-PD}}$ 的乘积随吸收层掺杂浓度变化的曲线, 对比 UTC-DHPT 的响应度与 $\beta \times R_{\text{UTC-PD}}$ 发现: UTC-DHPT 的响应度正比于器件电流放大倍数与 UTC-PD 响应度的乘积, 即 $R \propto \beta \times R_{\text{UTC-PD}}$. 图 6(d) 所示为吸收层掺杂浓度对 UTC-DHPT f_T 的影响. 器件的 f_T 在 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

时达到最大值 115.4 GHz. 当吸收层的掺杂浓度较小时, 随着吸收层掺杂浓度的增加, 空穴快速弛豫速度增加, τ_{oh} 减小; 与此同时电子的扩散长度减小, 相应的吸收层中的电子的输运时间 τ_b 变长, 但是空穴快速弛豫使 f_T 的增加量大于由 τ_b 引起的减小量, 所以器件的 f_T 增大. 当吸收层的掺杂浓度大于 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 掺杂浓度的增加对 τ_b 的影响更大, 所以 f_T 减小. 综合考虑器件的响应度与 f_T , 吸收层应采用的掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

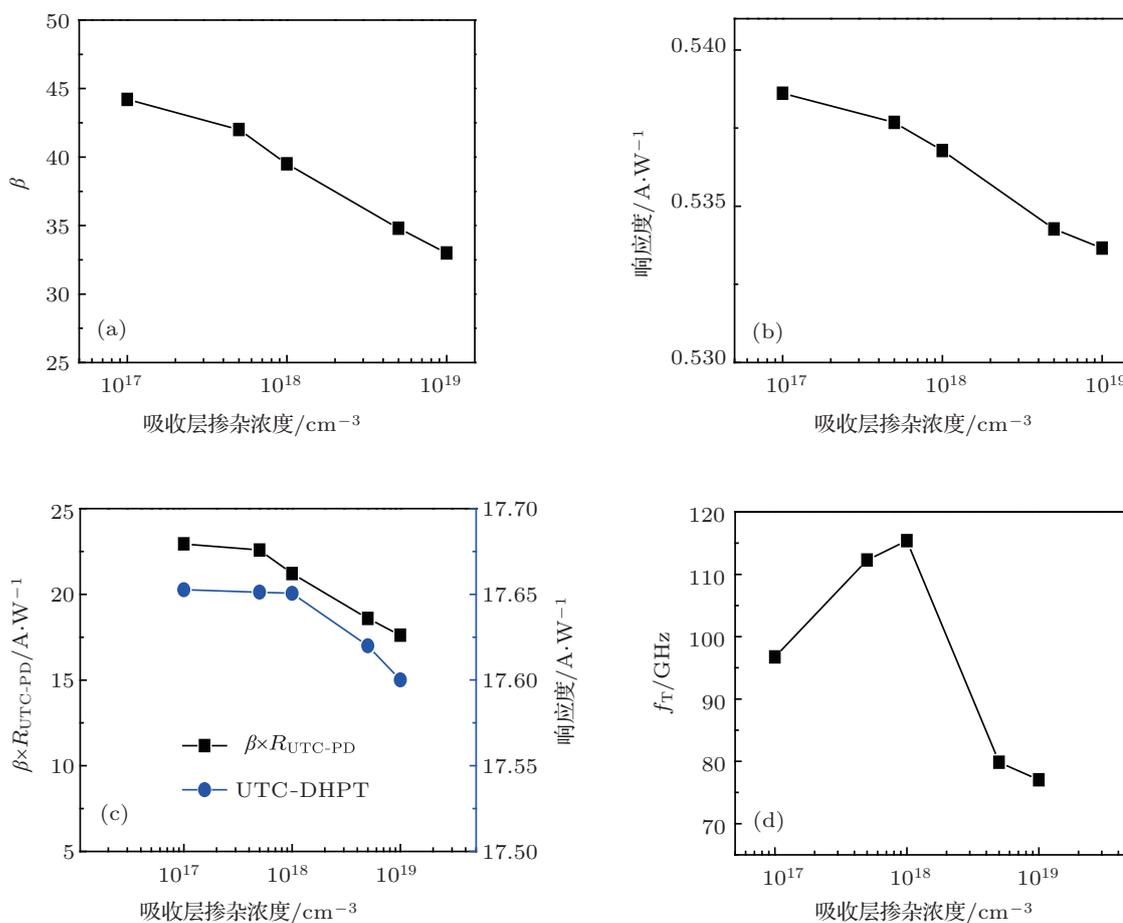


图 6 器件性能参数与吸收层掺杂浓度的关系 (a) 对应晶体管放大倍数与吸收层掺杂浓度关系; (b) UTC-PD 响应度与吸收层掺杂浓度关系; (c) UTC-DHPT 响应度与吸收层掺杂浓度关系; (d) UTC-DHPT f_T 与吸收层掺杂浓度关系

3.1.2 厚度对器件性能的影响

分别模拟表 1 中 p+InGaAsP 基区的厚度为 50, 100, 150, 200, 250, 300 nm 时器件的性能参数, 分析吸收层厚度对器件性能的影响.

图 7(a) 为对应晶体管放大倍数与吸收层厚度的关系曲线, 当吸收层厚度从 50 nm 增加到 300 nm 时, 器件的放大倍数下降. 图 7(b) 所示为对应 UTC-PD 吸收层厚度对器件响应度的影响, 吸收层厚度增大, 入射相同的光, 可以产生更多的光

电流, UTC-PD 的响应度增大 [23]. 图 7(c) 为 UTC-DHPT 的响应度随吸收层厚度变化的示意图, 其变化趋势同 $\beta \times R_{\text{UTC-PD}}$ 的一致: 吸收层厚度小于 100 nm 时, 吸收层厚度增加, 器件的响应度增加; 厚度继续增加时, 其响应度减小. 图 7(d) 所示为吸收层厚度变化对 UTC-DHPT 的 f_T 的影响, 吸收层厚度增加, 基区中电子的渡越时间 τ_b 增加, f_T 下降. 综合考虑响应度与 f_T , 器件选择厚度为 100 nm 的 InGaAsP 作为吸收层.

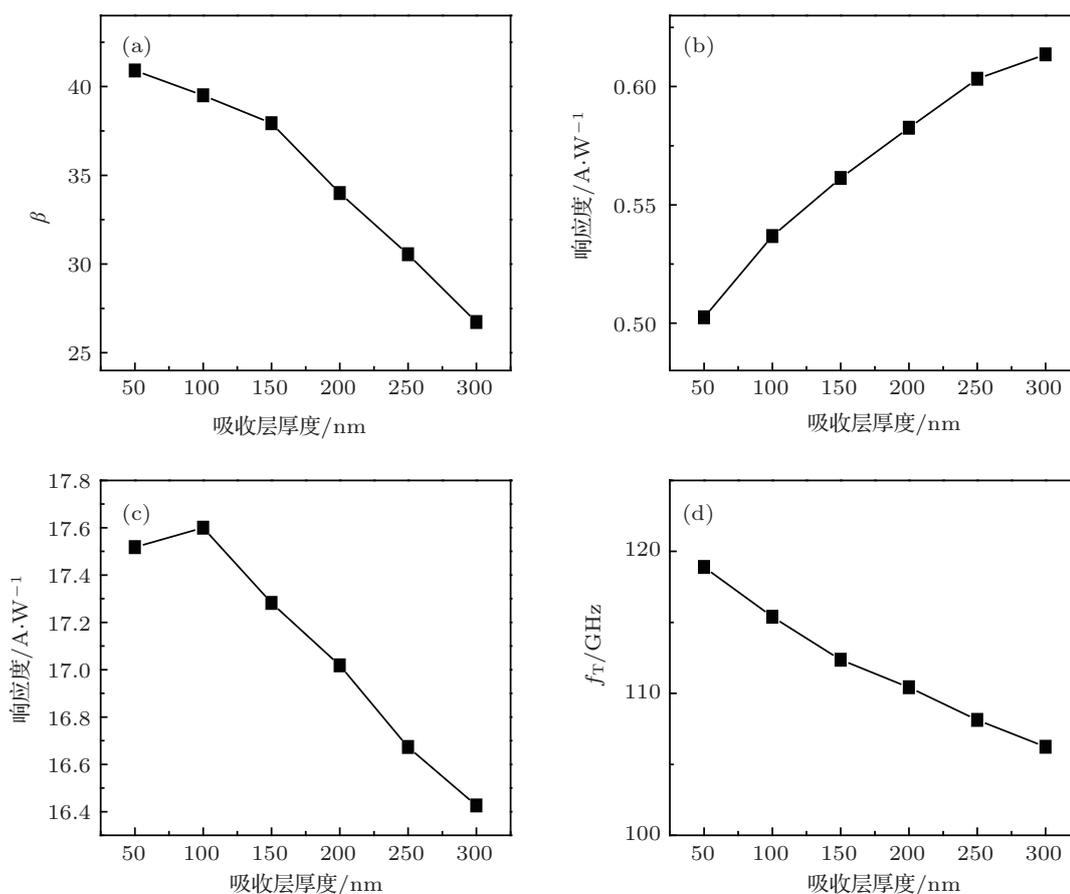


图7 器件性能参数与吸收层厚度的关系 (a) 对应晶体管放大倍数与吸收层厚度关系曲线; (b) UTC-PD 响应度与吸收层厚度关系; (c) UTC-DHPT 响应度与吸收层厚度关系; (d) UTC-DHPT f_T 与吸收层厚度关系

3.2 集电区 (收集层) 掺杂浓度对器件性能的影响

分别模拟表 1 中 n-InGaAsP 集电区掺杂浓度为 1.0×10^{15} , 1.0×10^{16} , 1.0×10^{17} , 1.0×10^{18} , $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时对应晶体管的放大倍数、UTC-PD 的响应度、UTC-DHPT 的响应度及 f_T , 结果如图 8 所示。

图 8(a) 所示为收集层掺杂浓度对器件放大倍数的影响, 掺杂浓度很低时, 器件的集电极会产生严重的基区展宽效应 (Kirk 效应); 随着掺杂浓度的增加, 基区展宽效应导致的严重的复合现象 (基区中电子与空穴) 得到缓解, 基区少数载流子的寿命 τ_n 增大, 器件的放大倍数增大. 图 8(b) 为收集层掺杂浓度与 UTC-PD 的响应度的关系曲线, 随着掺杂浓度的增加, UTC-PD 的响应度变化很小. 图 8(c) 为 UTC-DHPT 的响应度随收集层掺杂浓度的变化曲线, 随着收集层掺杂浓度的增加, 器件的响应度先基本保持不变, 然后迅速增大. 其趋势基本

由 $\beta \times R_{\text{UTC-PD}}$ 决定. 图 8(d) 所示为收集层掺杂浓度对 UTC-DHPT f_T 的影响, 随着收集层掺杂浓度的增加, 器件的 Kirk 效应逐渐缓解, 电子渡越集电区的时间 τ_c 减小, f_T 增加. 当收集层掺杂浓度从 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 增大到 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时, 收集层不能完全耗尽导致 τ_c 增加, UTC-DHPT 的 f_T 减小. 只考虑器件的响应度与 f_T , 器件应该选择的掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 但是收集层为高掺杂时, 器件 b-c 结的反向击穿电压会很低, 所以综合考虑器件的收集层掺杂应为 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

我们同样进行了 InP 收集层的厚度对探测器性能参数的分析. 由于响应度主要由器件电流放大倍数 (e-b 结注入效率) 和 UTC-PD 的响应度决定, 对收集层厚度的依赖性较小; 而器件的 f_T 会受到收集层电子渡越时间和充电时间的影响, f_T 对收集区厚度的依赖性较大, 随着收集层厚度从 100 nm 增加到 500 nm, f_T 从 157.14 GHz 单调下降到 111.64 GHz.

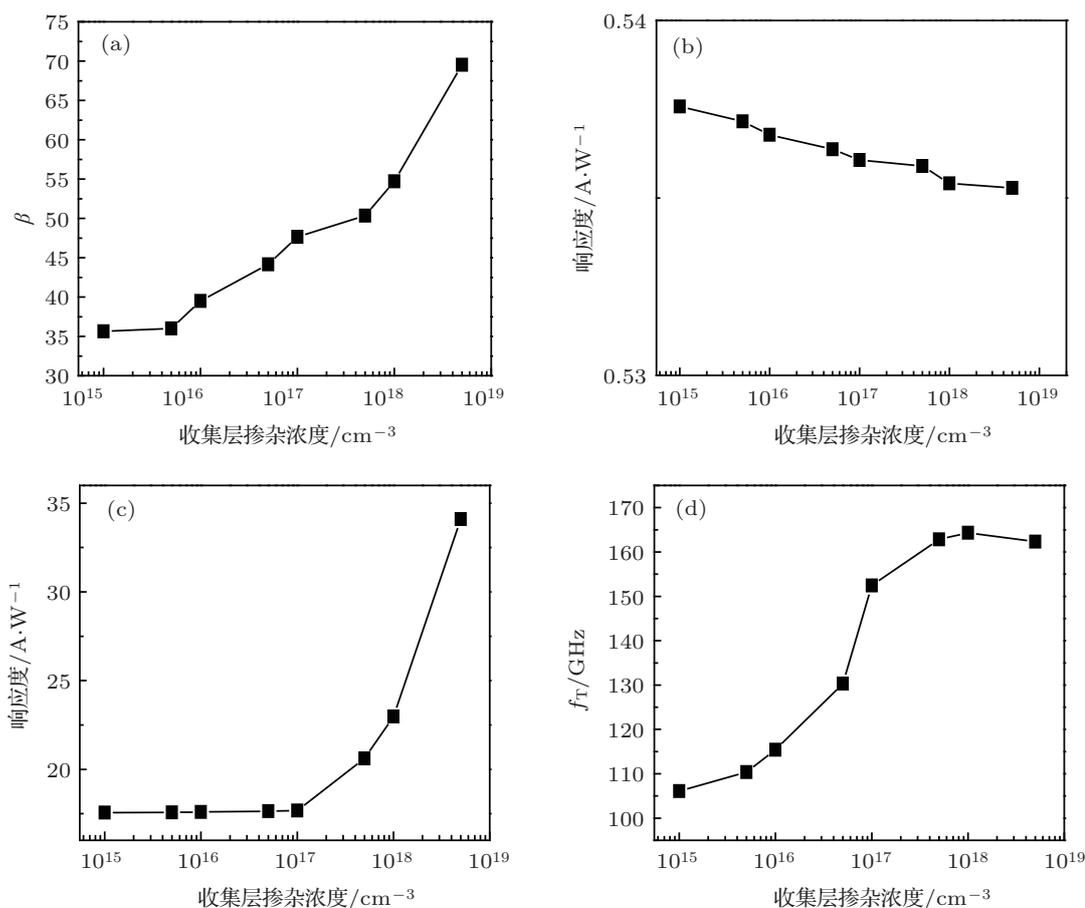


图8 器件性能参数与收集层掺杂浓度的关系 (a) 对应晶体管放大倍数与收集层掺杂浓度关系; (b) UTC-PD 响应度与收集层掺杂浓度关系; (c) UTC-DHPT 响应度与收集层掺杂浓度关系; (d) UTC-DHPT f_T 与收集层掺杂浓度关系

3.3 带隙宽度为 0.88 eV 的过渡层对器件性能的影响

3.3.1 过渡层带隙宽度对器件性能的影响

当表 1 中 InGaAsP 过渡层的带隙宽度分别为 0.826, 0.88, 0.953, 1.027 eV 时, 模拟器件的性能, 结果如图 9.

图 9(a) 为 UTC-DHPT 对应晶体管放大倍数与过渡层带隙宽度的关系曲线. 过渡层的带隙宽度从 0.826 eV 增加到 1.027 eV 时, 器件的放大倍数先增大然后减小. 当过渡层的带隙宽度比基区的带隙宽度稍大为 0.88 eV 时, 它可以有效消除图 2 所示 b-c 结的第一个导带尖峰, 但由于其与集电区的带隙宽度相差较大, 不能有效消除 b-c 结的第二个导带尖峰, 所以器件的放大倍数较小; 随着过渡层带隙宽度的增大, 它不仅能消除第一个导带尖峰, 也可以有效降低第二个导带尖峰, 这样被反向抽取的电子更容易快速翻越两个尖峰势垒, τ_b 减小, 器件的放大倍数一直增大, 直到其为 0.95 eV 时放大倍数达到最大值. 过渡层的带隙宽度继续增大到

1.027 eV 时, 它可以有效消除图 2 中 b-c 结第二个导带尖峰, 但不能有效消除第一个, 电子在基区的渡越时间 τ_b 增大, 所以放大倍数减小. 图 9(b) 为对应 UTC-PD 响应度与过渡层带隙宽度的关系曲线, 过渡层的带隙宽度从 0.826 eV 增加到 1.027 eV 时, UTC-PD 响应度基本不随过渡层带隙宽度的变化而变化. 图 9(c) 为 UTC-DHPT 的响应度随过渡层带隙宽度的变化的示意图, 过渡层的带隙宽度从 0.826 eV 增加到 1.027 eV 时, 响应度先增大, 直到其为 0.95 eV 时达到最大值, 带隙宽度继续增加, 器件的响应度减小. 其变化趋势基本同 $\beta \times R_{\text{UTC-PD}}$ 一致. 图 9(d) 所示为过渡层带隙宽度对 UTC-DHPT f_T 的影响, 随着带隙宽度从 0.826 eV 增加到 1.027 eV 时, f_T 先增加后减小. 带隙宽度从 0.826 eV 增加到 0.88 eV, b-c 结的两个尖峰势垒全都逐渐下降, 电子可以更快到达集电区, τ_b 减小, f_T 增加, 带隙宽度继续增加时, b-c 结之间的第一个尖峰势垒不能得到有效的消除, 导致电子的渡越速度减小, τ_b 增加, f_T 减小.

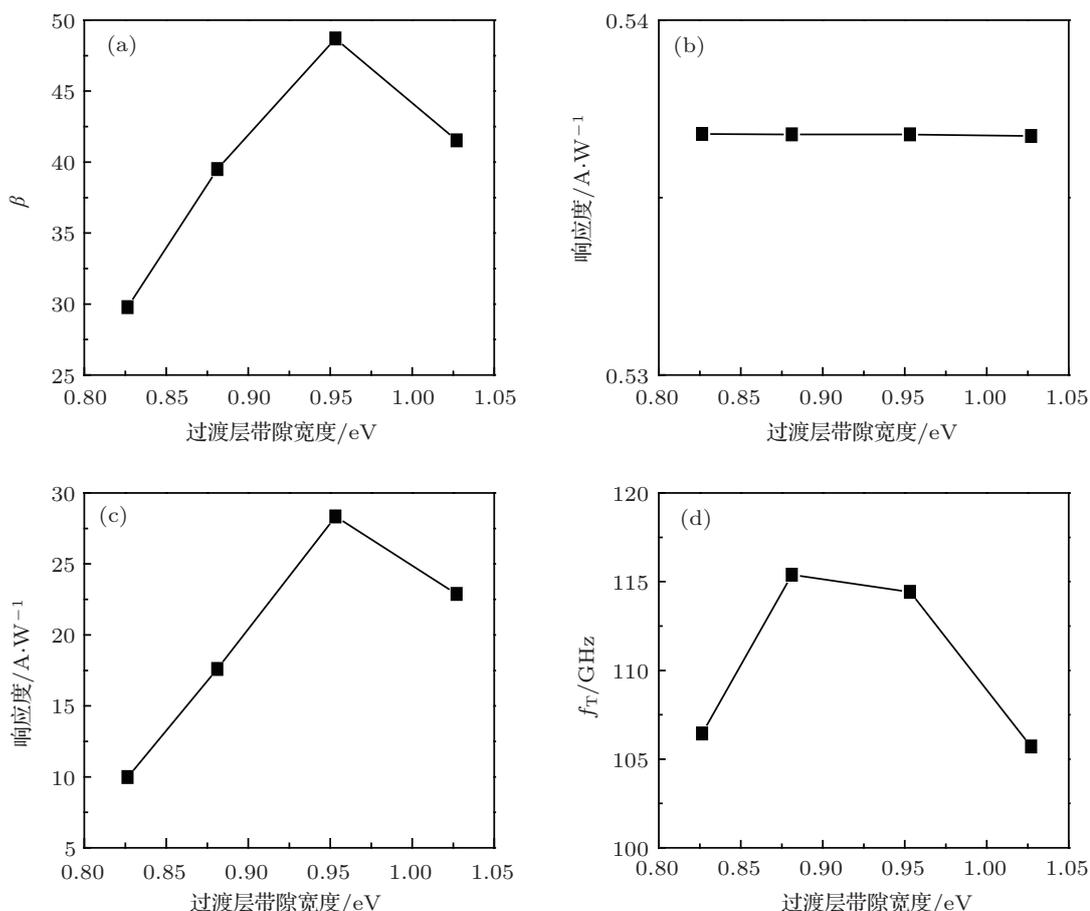


图9 器件性能参数与过渡层带隙宽度的关系 (a) 对应晶体管放大倍数与过渡层带隙宽度关系; (b) UTC-PD 响应度与过渡层带隙宽度关系; (c) UTC-DHPT 响应度与过渡层带隙宽度关系; (d) UTC-DHPT f_T 与过渡层带隙宽度关系

由图 9(c) 可知过渡层带隙宽度为 0.95 eV 时, 器件的响应度最大, 但是器件的设计目的是用在高速光通信中, 不能片面追求大的响应度, 综合考虑响应度和 f_T , 选择带隙宽度为 0.88 eV 的 InGaAsP 作为过渡层.

3.3.2 过渡层掺杂浓度对器件性能的影响

当表 1 中带隙宽度为 0.88 eV 的 InGaAsP 过渡层的掺杂浓度 (n 型掺杂) 分别取值为 1.0×10^{15} , 1.0×10^{16} , 1.0×10^{17} , 1.0×10^{18} , $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时, 模拟对应晶体管放大倍数、对应 UTC-PD 响应度、UTC-DHPT 响应度及 f_T 的变化规律, 如图 10 所示.

图 10(a) 所示为过渡层掺杂浓度对相应晶体管放大倍数的影响, 随着掺杂浓度从 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 增加到 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 过渡层能有效降低 b-c 结的导带尖峰势垒, 所以相应晶体管电流放大倍数逐渐增大. 图 10(b) 为对应 UTC-PD 的响应度与过渡层掺杂浓度的关系曲线, 随着过渡层

浓度的增加, UTC-PD 的响应度几乎没有变化. 图 10(c) 为 UTC-DHPT 响应度随过渡层掺杂浓度变化的曲线, 随着过渡层掺杂浓度的增加, 器件的响应度的变化趋势同 $\beta \times R_{\text{UTC-PD}}$ 的趋势基本相同: 先缓慢增加, 后迅速增大. 图 10(d) 为 UTC-DHPT 的 f_T 与过渡层掺杂浓度的关系曲线, 随着掺杂浓度从 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 增加到 $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, f_T 先增大后减小. 过渡层的掺杂浓度增加, 使 b-c 结导带尖峰势垒下降, τ_b 减小, f_T 增大; 掺杂浓度继续增大会阻碍电子顺利到达集电区, τ_b 增大, f_T 减小. 综合考虑过渡层掺杂对器件的响应度及 f_T 的影响, 选择过渡层的掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 此时器件既可以获得较大的响应度——17.93 A/W, 又可以获得较高的 f_T ——121.68 GHz.

3.3.3 过渡层厚度对器件性能的影响

选取表 1 中带隙宽度为 0.88 eV 的 InGaAsP 过渡层的厚度分别为 0, 5, 15, 20 nm 时, 模拟各器件的相关性能, 结果如图 11.

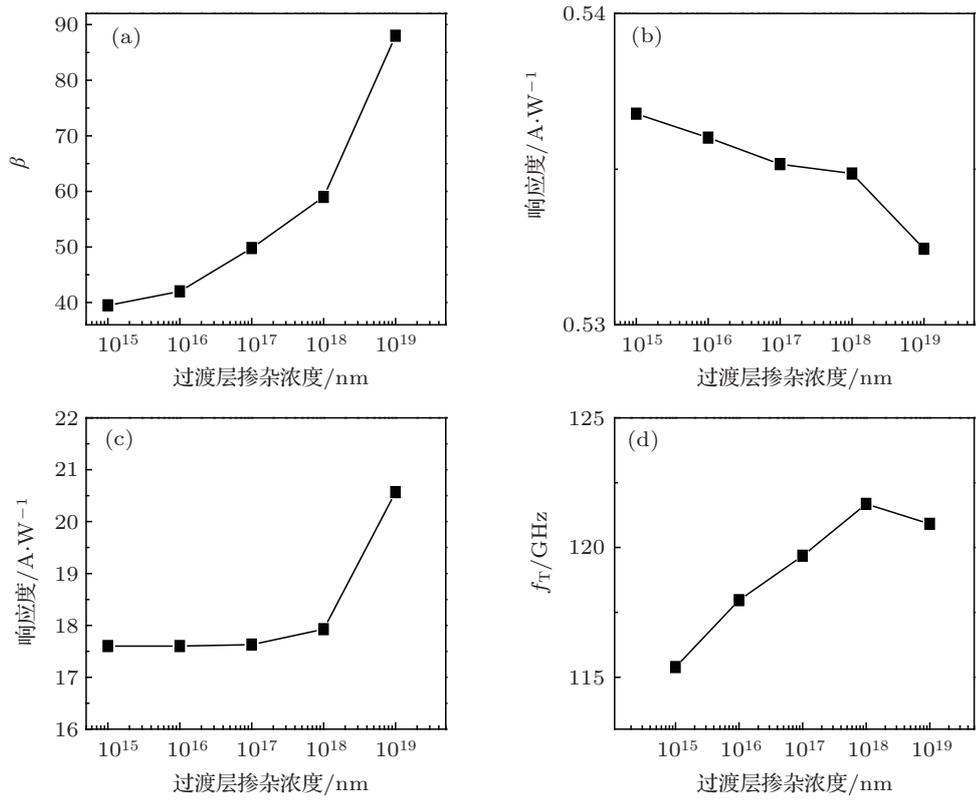


图 10 器件性能参数与过渡层掺杂浓度的关系 (a) 对应晶体管放大倍数与过渡层掺杂浓度关系; (b) UTC-PD 响应度与过渡层掺杂浓度关系; (c) UTC-DHPT 响应度与过渡层掺杂浓度关系; (d) UTC-DHPT f_T 与过渡层掺杂浓度关系

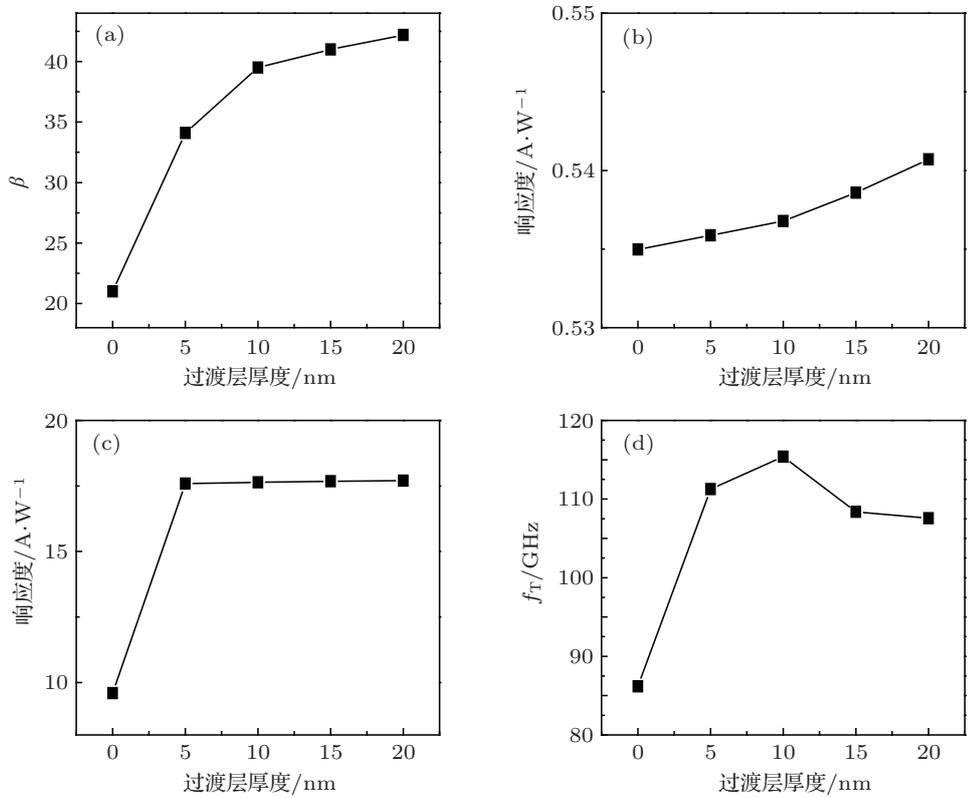


图 11 器件性能参数与过渡层厚度的关系 (a) 对应晶体管放大倍数与过渡层掺杂浓度关系; (b) UTC-PD 响应度与过渡层掺杂浓度关系; (c) UTC-DHPT 响应度与过渡层掺杂浓度关系; (d) UTC-DHPT f_T 与过渡层掺杂浓度关系

图 11(a) 为对应电晶体管放大倍数与过渡层厚度的关系曲线, 随着过渡层厚度从 0 nm 增加到 20 nm 时, 放大倍数增大, 这是因为随着厚度从 0 开始增加, 图 2 中 b-c 结的两个导带势垒尖峰迅速下降, 器件的放大倍数增大. 图 11(b) 表明了过渡层的厚度对 UTC-PD 响应度的影响, 随着过渡层厚度的增加, 器件的响应度缓慢增加. 图 11(c) 所示为过渡层厚度对 UTC-DHPT 响应度的影响, 随着过渡层厚度的增加, UTC-DHPT 的响应度先快速增大, 后基本保持一致, 此趋势基本由 $\beta \times R_{\text{UTC-PD}}$ 决定. 如图 11(d) 所示, 随着过渡层厚度从 0 nm 增加到 20 nm 时, UTC-DHPT 的 f_T 先增加后减小. 过渡层厚度的增加, 一方面使 b-c 结导带尖峰势垒降低, τ_b 减小, 器件的截止频率增加, 另一方面, 过渡层厚度的增加导致电子的总渡越位移增加, 所以电子的总渡越时间增加, f_T 减小. 厚度小于 10 nm 时, 它的增加主要使导带尖峰势垒降低, 进而提高器件 f_T ; 厚度

进一步增大到 15, 20 nm 时, 位移增大起主要作用, 所以这时 f_T 是减小的. 选择厚度为 10 nm 的过渡层, 器件可以同时获得较高的 f_T 和较大的响应度.

4 结论

本文利用载流子漂移-扩散理论及能带理论分析了 InP/InGaAsP UTC-DHPT 光电探测器的物理机理, 基于器件仿真器 Atlas 建立了器件的二维模型, 模拟了其基本性能, 分析讨论了器件性能与外延层结构参数的关系. 将表 1 中厚度为 10 nm, 带隙宽度 0.88 eV 的 InGaAsP 过渡层的掺杂浓度调为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 器件同时获得较高的响应度 ($\geq 17.93 \text{ A/W}$) 和 $f_T (\geq 121.68 \text{ GHz})$, 缓解了普通 HPT 中响应度与响应速度的矛盾; 另外还发现, UTC-DHPT 的响应度同相应电晶体管电流放大倍数与对应 UTC-PD 响应度的乘积成正比.

- [1] Zhang L Z, Zuo Y H, Cao Q, Xue C L, Cheng B W, Zhang W C, Cao X L, Wang Q M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 138501 (in Chinese) [张岭梓, 左玉华, 曹权, 薛春来, 成步文, 张万昌, 曹学蕾, 王启明 2012 物理学报 **61** 138501]
- [2] Khan H A, Rezazadeh A A, Sonhaib S, Tauqeer T 2012 *IEEE J. Quantum Elect.* **48** 576
- [3] Kamitsuna H, Matsuoka Y, Yamahata S, Shigekawa N 2001 *IEEE Trans. Microw. Theory* **49** 1921
- [4] Kamitsuna H, Matsuoka Y, Yamahata S, Shigekawa N 2000 *European Microwave Conference (EUMC)* Paris, France, October, 2000 p1
- [5] Chandrasekhar S, Lunardi L M, Gnauck A H, Hamm R A, Qua G J 1993 *IEEE Photonic. Tech. L.* **5** 1316
- [6] Kamitsuna H, Ishii K, Shibata T, Kurishima K, Ida M 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **10** 673
- [7] Leven A, Houtsma V, Kopf R, Baeyens Y, Chen Y K 2004 *Electron. Lett.* **40** 833
- [8] Ishibashi T, Furuta T, Fushimi H, Kodama S, Ito H, Nagatsuma T, Shimizu N, Miyamoto Y 2000 *IEICE Trans. Electron.* **83** 938
- [9] Ito H, Kodama S, Muramoto Y 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **10** 709
- [10] Chtioui M, Enard A, Carpentier D, Rousseau B, Lelarge F, Pommereau F, Achouche M 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 202
- [11] Zuo Y H, Cao Q, Zhang Y, Zhang L Z, Guo J C, Xue C L, Cheng B W, Wang Q M 2011 *Chin. Phys. B* **20** 018504
- [12] Zhang Y X, Liao Z Y, Zhao L J, Pan J Q, Zhu H L, Wang W 2010 *Chin. Phys. B* **19** 074216
- [13] Shi T, Xiong B, Sun C Z, Luo Y 2013 *IEEE Photonic. Tech. L.* **25** 136
- [14] Rouvalis E, Chtioui M, van Dijk F, Lelarge F, Fice M J, Renaud C C, Carpintero G A, Seeds A J 2012 *Opt. Express* **20** 20090
- [15] Ito H, Yoshimatsuc T, Yamamoto H, Ishibashi T 2013 *Proceedings of SPIE Volume 8716* Baltimore, Maryland, USA, April 29-30, 2013 p871602-1
- [16] Wang L S, Zhao L J, Pan J Q, Zhang W, Wang H, Zhu H L, Wang W 2009 *Opto-Electron. Rev.* **17** 242
- [17] Schiellein J, Rosales M, Polleux J L, Algani C, Merlet T, Riet M, Godin J 2011 *Proceedings of the 41st European Microwave Conference* Manchester, UK, October 10-13, 2011 p949
- [18] Ishibashi T, Kodama S, Shimizu N, Furuta T 1997 *J. Appl. Phys.* **36** 6263
- [19] Matsuoka Y, Sano E 1995 *Solid-State Electron.* **38** 1703
- [20] Matsuoka Y, Yamahata S, Kurishima K, Ito H 1996 *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** 5646
- [21] Liu W 1998 *Handbook of III-V Heterojunction Bipolar Transistors* (1st Ed.) (Malden: Wiley-Interscience) p81
- [22] Wang L S 2009 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Science) (in Chinese) [王列松 2009 博士学位论文 (北京: 中国科学院半导体研究所)]
- [23] Srivastava S, Roenker K P 2004 *Solid-State Electron.* **48** 461

Uni-traveling-carrier double heterojunction phototransistor photodetector*

Huo Wen-Juan^{1)2)†} Xie Hong-Yun¹⁾ Liang Song²⁾ Zhang Wan-Rong¹⁾
Jiang Zhi-Yun¹⁾ Chen Xiang¹⁾ Lu Dong¹⁾

¹⁾ (College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

²⁾ (Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 5 August 2013; revised manuscript received 25 August 2013)

Abstract

An InP/InGaAsP uni-traveling-carrier double heterojunction phototransistor (UTC-DHPT) photodetector is simulated and analyzed in a two-dimensional (2D) model utilizing a numerical device simulator (Atlas). The effects of device structure parameters on operational performance, such as responsivity and characteristic frequency, are studied in detail. Simulation results indicate that the UTC-DHPT can ease the contradiction between detection efficiency and working speed, which exists in traditional heterojunction phototransistor and achieve both high responsivity (≥ 17.93 A/W) and high characteristic frequency (≥ 121.68 GHz) simultaneously.

Keywords: uni-traveling-carrier, phototransistor, current amplification, responsivity

PACS: 85.60.Dw, 85.60.Bt, 73.40.Kp

DOI: 10.7498/aps.62.228501

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61006044, 60776051, 61006059, 61274071, 61090392), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2013AA014502, 2011AA010303), the Beijing Municipal Natural Science Foundation, China (Grant Nos. 4122014, 4082007), and the Beijing Municipal Education Committee, China (Grant Nos. KM200910005001, KM20070005015).

† Corresponding author. E-mail: huowenjuan@semi.ac.cn