

发光量子阱对波长上转换红外探测器效率的影响

康健彬¹, 王磊¹, 郝智彪^{1*}, 王超¹, 谢莉莉¹, 罗毅^{1*}, 汪莱¹, 王健¹,
熊兵¹, 孙长征¹, 韩彦军¹, 李洪涛¹, 王禄², 王文新², 陈弘²

(1. 清华大学 电子工程系 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084;
2. 中国科学院物理研究所, 北京 100190)

摘要: 波长上转换红外探测器在实现大面阵、低暗电流红外探测方面具有很大的发展潜力. 短波长光子的发光效率是影响上转换器件效率的重要因素. 设计、制作了具有不同发光阱个数的波长上转换红外探测器件, 结合器件的红外响应和仿真计算, 分析了发光阱个数对波长上转换效率的影响规律. 研究表明, 选择单个发光阱, 有利于提高器件的发光效率, 从而提高波长上转换效率.

关键词: 波长上转换; 量子阱; 发光效率; 载流子分布

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Influence of emission quantum wells on the efficiency of up-conversion infrared photodetectors

KANG Jian-Bin¹, WANG Lei¹, HAO Zhi-Biao^{1*}, WANG Chao¹, Xie Li-Li¹, LUO Yi^{1*},
WANG Lai¹, WANG Jian¹, XIONG Bing¹, SUN Chang-Zheng¹, HAN Yan-Jun¹,
LI Hong-Tao¹, WANG Lu², WANG Wen-Xin², CHEN Hong²

(1. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Dept. of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Up-conversion infrared (IR) photodetectors show great potential in large-array and low dark current IR detection due to the advantages of pixelless imaging and being free from thermal mismatch between photodetectors and read-out integrated circuits. The emission efficiency of near-IR photons is one of the important issues that influence the up-conversion efficiency. In this paper, cascade IR up-converters with different numbers of emission quantum wells were designed and fabricated. Based on the IR response measurement and simulation of carrier distribution, the influence of the number of quantum wells on the emission efficiency of near-IR photons was investigated. The experiment results indicate that the near-IR emission efficiency can be improved by adopting single emission quantum well, which consequently improves the up-conversion efficiency.

Key words: up-conversion, quantum well, emission efficiency, carrier distribution

PACS: 42. 79. Nv, 85. 60. Gz, 85. 60. Bt

收稿日期: 2015-09-18, 修回日期: 2015-12-25

Received date: 2015-09-18, revised date: 2015-12-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2013CB632804, 2012CB315605); 国家自然科学基金 (61176015, 61210014, 51002085, 61321004, 61307024, 61176059); 国家高技术研究发展计划 (2012AA050601)

Foundation items: supported by National Program on Key Basic Research Project of China (2013CB632804 and 2012CB315605), National Natural Science Foundation of China (61176015, 61210014, 51002085, 61321004, 61307024 and 61176059), and National High-tech R&D Program of China (2012AA050601)

作者简介 (Biography): 康健彬 (1987-), 男, 四川泸州人, 博士研究生, 主要研究领域为半导体基红外光子探测器. E-mail: kjb10@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: zbhao@tsinghua.edu.cn, luoy@tsinghua.edu.cn

引言

基于半导体光电转换原理的红外光子探测器以其能带可调、响应速度快、探测率高等特点成为红外探测领域的重要分支. 碲镉汞探测器凭借高响应度和低暗电流密度的优势展示了优异的性能^[1], 然而对应于长波长的碲镉汞材料生长难度大, 在制作大面阵器件时容易导致成品率下降、成本上升. 基于 III-V 族化合物半导体的量子阱红外探测器外延技术成熟、外延均匀性好、器件制作工艺完善^[2], 但是其暗电流与光电流具有相同的增益机制, 偏置电压在驱动光生电子的同时也会形成较大的暗电流.

在制作焦平面探测器时, 每个像素器件需要与硅基读出电路进行键合. 由于探测器材料与硅材料之间热膨胀系数差异较大, 会引入额外的噪声并降低探测系统的可靠性^[3]. 基于此, 刘惠春等人提出了量子阱红外探测器与发光二极管集成的探测器件^[4]. 该器件将红外信号转变为可被硅 CCD 探测的近红外信号, 免除键合工艺, 在大面阵器件研制方面具有优越性, 然而该器件在无红外光入射时具有较强的本底辐射^[5].

为了实现大面阵、低暗电流的红外探测技术, 提出了基于量子级联运输的波长上转换红外探测器件^[6]. 该器件可免除化合物半导体器件与硅基读出电路的键合工艺, 更重要的是, 通过引入量子级联运输结构可实现光生电子在低电场条件下的单向迁移, 既能保证响应度, 又有助于降低器件的本底辐射. 器件的上转换效率主要受吸收效率、载流子运输效率、发光效率、光提取效率等的影响. 着眼于波长上转换红外探测器的发光效率, 设计并制作了具有不同个数发光阱的上转换器件, 通过分析器件的响应特性, 研究发光阱个数对器件发光效率的影响机理.

1 器件模型

基于量子级联运输的波长上转换红外探测器是利用低维半导体材料中的量子效应实现红外光子到近红外光子的转换, 其核心材料结构包括红外光子吸收区、光生载流子运输区和近红外光子发光区. 吸收区利用电子在量子阱内子带能级间的跃迁实现对红外光子的吸收. 运输区通过数个啁啾耦合量子阱形成“声子台阶”, 实现光生电子的共振隧穿和声子辅助隧穿. 发光区利用量子阱内导带与价带间的跃迁实现近红外光子的发射.

上转换过程中近红外光子的发光效率(近红外光强度与上转换器件响应电流的比)对探测系统的性能有重要影响, 而载流子的浓度分布是直接影响发光效率的重要因素之一. 相同的材料和电注入水平下, 载流子浓度分布与量子阱的个数相关. 理论上讲, 增加量子阱个数一方面能够提高对载流子的俘获能力, 但另一方面也可能使载流子在不同量子阱中分布不均匀, 降低平均载流子浓度, 反而降低发光效率. 为了研究发光阱个数对上转换器件效率的影响规律, 设计了两个具有不同发光阱个数的 GaAs 基波长上转换器件. 图 1(a)、(b) 所示分别为 A 器件和 B 器件在平带电压条件下的导带结构及电子波函数分布. 该平带电压将部分抵消 p-n 结形成的内建电势差, 形成满足器件工作所需的能带结构和能级对准关系. A 器件的发光区由单个 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$ 量子阱构成, 而 B 器件的发光区则由三个相同阱宽的 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$ 量子阱构成, 室温下峰值发光波长的设计值为 827 nm. 除此之外, 两个器件的其它结构都相同, 即: 吸收区由十个相同的 $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}/\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ 耦合量子阱构成, 理论计算的红外响应中心波长为 4.2 μm , 其中 $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ 量子阱区域为 n 型掺杂, 掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 运输区由六个阱宽渐变的 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$ 耦合量子阱构成, 第一个量子阱的基态能级与吸收区量子阱第一激发态能级能量相同, 随后相邻量子阱中的电子能级能量差为 GaAs 的纵光学声子能量 (36 meV). 值得一提的是, 在发光区与运输区之间插入了 2 nm 厚的 AlAs 势垒层, 目的是抑制空穴在吸收区及运输区积累, 增加发光区对空穴的俘获能力^[7]. AlAs 势垒层在阻挡空穴的同时不能影响光生电子的传输, 因此其厚度只选择了 2 nm, 这个厚度对空穴的阻挡效果仍比较有限, 器件实际工作时空穴在发光区以外仍有一定的分布.

2 实验方法

2.1 器件制备

文中设计的波长上转换红外探测器的材料结构由多层纳米量级厚度的量子阱/势垒异质材料构成, 分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 技术从原理上可实现单原子层界面陡变的异质外延生长, 非常适于生长基于能带工程的量子阱红外光电功能材料. 按照图 1 所示的能带结构, 采用 MBE 技术生长了波长上转换红外探测器材料样品 A 和 B. 首先在衬底表面生长 600 nm 厚的 n 型 GaAs 接触层, 掺

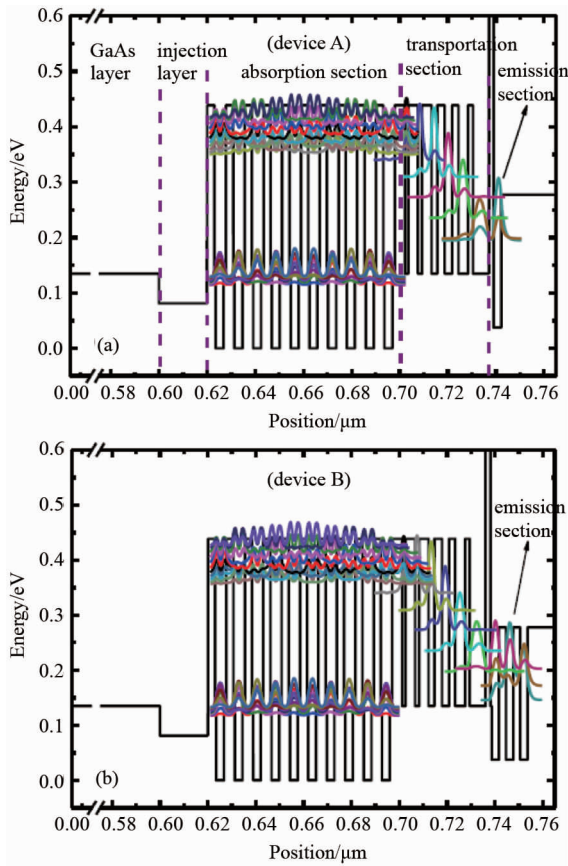


图1 GaAs 基波长上转换红外探测器的导带结构及电子波函数分布. 横坐标零点选择在衬底上表面
 Fig.1 Conduction-band profiles and electron wave-function envelopes of GaAs-based cascade infrared up-converters. The origin of abscissa is chosen at the top surface of the substrate

杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 然后是 20 nm 厚的 $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$ 电子注入层, 紧接着是器件的有源区, 最后在有源区上方生长 p 型 AlGaAs 和 GaAs 接触层, 掺杂浓度分别为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 和 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. 器件制作工艺首先是采用光刻和湿法腐蚀的方法形成 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 的台面结构, 台面高度以腐蚀到 n 型 GaAs 层为宜. 随后在腐蚀后的 GaAs 表面上溅射 NiGeAu 合金作为 n 型欧姆接触电极, 在台面上电子束蒸发 Ti/Au (名义厚度 2.5 nm/5 nm) 透明电极作为 p 型欧姆接触电极, 后期再经过退火、钝化等工艺制作成可测试的器件样品. 透明电极的作用是为了实现对出射近红外光子的有效透射. 为了保证工艺的一致性, A、B 器件样品在同一批次的工艺流程中制作完成.

2.2 测试系统

由于量子阱子带间吸收的偏振选择性^[8], 器件不能吸收垂直入射的红外光, 在测试时需要将样品

的端面磨成 45° 角, 用以耦合入射红外光. 器件样品是利用低温胶粘贴到铜热沉上, 再一起固定到液氮杜瓦的冷指一侧. 在冷指的另一侧装配了一个硅基光探测器 (Hamamatsu S2386-45K) 用于收集出射的近红外光子. 在装配时, 要使器件出光面尽可能靠近硅探测器的光敏面. 上转换器件的电流-电压特性由半导体参数测试仪 (Agilent 4155C) 直接测量, 同时硅探测器的光电流也由该仪器读取, 图 2 所示为测试系统示意图. 为了降低测试系统的噪声, 硅探测器的偏置电压固定为 0 V. 红外响应测试中, 红外光源为 950°C 黑体, 出射的宽谱光线先经过 $2 \mu\text{m}$ 的长通滤波片和 $4.0 \sim 4.4 \mu\text{m}$ 的带通滤波片, 再通过抛物面反射镜汇聚到置于液氮杜瓦中的器件 45° 光耦合面上. 使用滤波片是为了滤除红外光源中的可见光以及近红外光, 否则该波段的光将直接导致硅探测器产生光电流, 从而形成噪声.

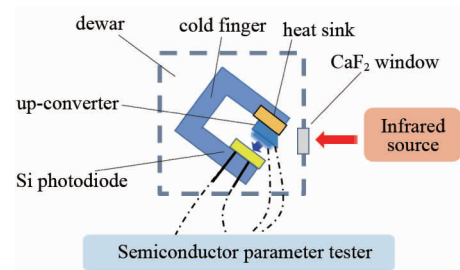


图2 测试系统示意图
 Fig.2 Schematic diagram of the measurement setup

3 结果与讨论

利用图 2 的测试系统, 测试了上转换器件在 80 K 温度和有、无红外光情况下的电流-电压特性, 如图 3(a) 所示, 同时图 3(b) 给出了硅探测器电流随上转换器件电压变化的曲线. 其中, 实线和虚线分别代表有红外光和无红外光但有 300 K 背景辐射时的测试结果, 细线和粗线分别对应器件 A 和 B. 测试时两个器件保持相同的光路. 测试结果表明, 在入射红外光的作用下, 上转换器件和硅探测器的响应电流在较大的电压范围内均比 300 K 背景辐射下的电流有两个量级的提升, 验证了上转换系统的红外响应功能.

在无红外光时, 从 0 V 到 3.5 V 的器件偏压范围内, 两个器件的电流基本保持一致, 且呈缓慢增大的趋势. 在该电压范围内, 硅探测器的电流均维持在 pA 量级, 此时器件较弱的本底发光被测试系统噪声

所淹没. 当器件偏压增大到 3.5 V 之后, 上转换器件和硅探测器的电流都有显著的上升, 这体现了器件自身类似于发光二极管的开启特性. 开启之后 A 器件的电流稍高于 B 器件的电流, 这是因为 A 器件发光个数少于 B 器件导致其电阻稍小. 由于上转换器件的发光强度随注入电流增大而增大, 硅探测器的电流也呈现出相同的现象.

在有红外光时, A 器件的电流在 1.25 V 电压处出现陡峭的上升, 而 B 器件的电流从 0.75 V 开始就有明显的红外响应, 说明 B 器件在较小的电压下就可以达到平带条件. 从图 3(b) 可看出, A 器件所对应的硅探测器电流在上转换器件电压为 1.75 V 处出现明显的突变, 但 B 器件电压直到 2.35 V 时硅探测器才探测到显著的发光. 观察 2.0 V 器件电压处, 可以发现两个上转换器件的响应电流基本相同, A 器件已经有较强的发光, 但 B 器件的发光仍然非常微弱.

上述测量表明, 入射红外光使得上转换器件的

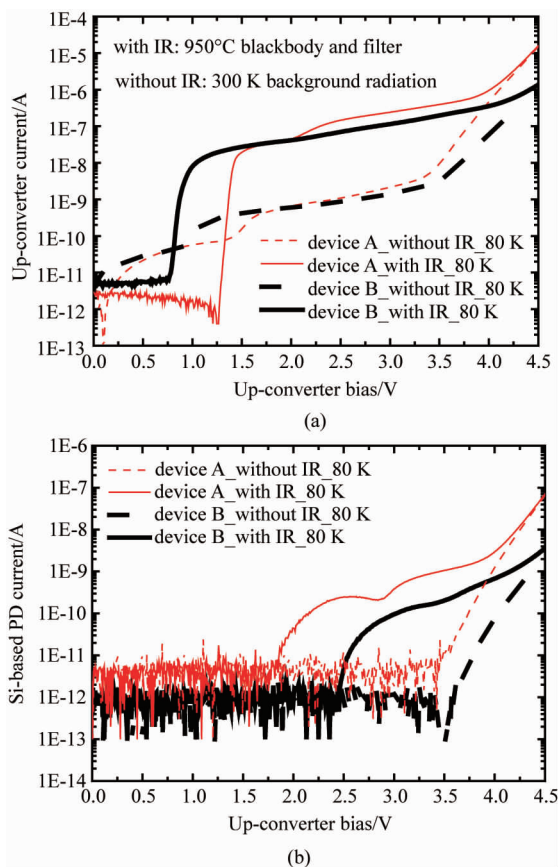


图 3 (a) 上转换器件的电流-电压特性; (b) 硅探测器电流随上转换器件电压变化的曲线

Fig. 3 (a) Measured I-V characteristics of up-converters at 80 K under different measurement conditions; (b) Si-based photodiode currents versus up-converter biases

近红外发光得到增强, 从而增大了硅探测器的响应电流. 为了确认上转换系统的红外探测功能, 需要进一步测试硅探测器的光电流响应谱. 测试时仍利用图 2 所示的液氮杜瓦结构, 红外光源采用傅里叶变换红外光谱仪 (VERTEX 80, Bruker) 的内置光源. 测试中需要给器件施加恒定的电压, 同时硅探测器的光电流由低噪声电流前置放大器 (SR570, Standford Research Systems) 采集, 放大后的信号被导入光谱仪的数据处理系统. 根据图 3(b) 中无红外光情况下的电流特性可知, A 器件和 B 器件发光强度的开启电压约为 3.5 V. 为了获得较高的信噪比, 两个器件的工作电压均选取为 3.5 V. 图 4 所示为测试得到的 A 器件和 B 器件在 3.5 V 电压、80 K 温度下所对应硅探测器的相对响应谱. 可以看到, 两者的峰值波长和谱型均非常一致, 说明两个器件的吸收区结构基本一致. 该测试结果证明了硅探测器的响应电流是由中红外入射光造成的.

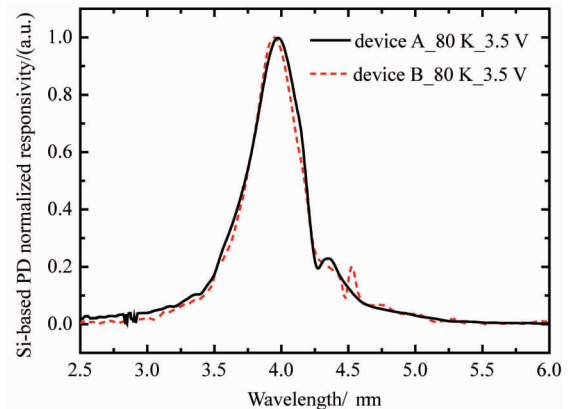


图 4 A 器件和 B 器件在 3.5 V 电压、80 K 温度下所对应硅探测器的相对响应谱

Fig. 4 The normalized responsivity spectra of Si-based photodiodes of up-converters A (black line) and B (red dashed line) at 80 K, 3.5 V

在上转换系统的黑体响应测试中, 由硅探测器的响应电流所表征的上转换器件发光强度与上转换器件的响应电流、发光效率、光提取效率 (包括器件自身的出光效率、透明电极的透射效率、测试系统收集效率) 和硅探测器的量子效率成正比, 如下式所示:

$$I_{PD} \propto I_{\text{器件}} \eta_{\text{发光}} \eta_{\text{提取}} \eta_{PD} \quad (1)$$

相同的半导体材料对应相同的出光效率, 同一次透明电极的制备工艺可以获得几乎相同的近红外光透射效率, 相同的测试光路可以获得相同的收集效率以及硅探测器量子效率. 当两个上转换器件的

响应电流相同时,可以认为硅探测器响应电流的差异只来源于上转换器件发光效率的不同.因此,在相同的上转换器件响应电流下比较硅探测器的响应电流并以此来分析发光效率是可行的.

基于图 3 的测试结果,将上转换器件的响应电流作为横坐标,硅探测器的响应电流作为纵坐标,得到图 5 所示上转换器件的发光特性曲线,其中实线代表 A 器件,虚线代表 B 器件.从图中可以看到,在现有测试条件下,A 器件的响应电流约为 35 nA 时,硅探测器的电流就开始急剧地上升,而 B 器件的响应电流要达到 70 nA 时才会出现比较明显的发光.以上转换器件响应电流均为 60 nA 为例,如图中点划线所示,此时 A 器件对应的硅探测器响应电流已达到 80 pA,但 B 器件的发光仍然被测试系统噪声淹没,其发光强度比 A 器件低两个量级以上.随着上转换器件响应电流的进一步增大(在横坐标所示器件响应电流范围内),器件的发光效率会增加且逐渐趋于饱和,这时两个器件发光效率的差异逐渐减小,但总的来说,B 器件的发光效率仍然略低于 A 器件.

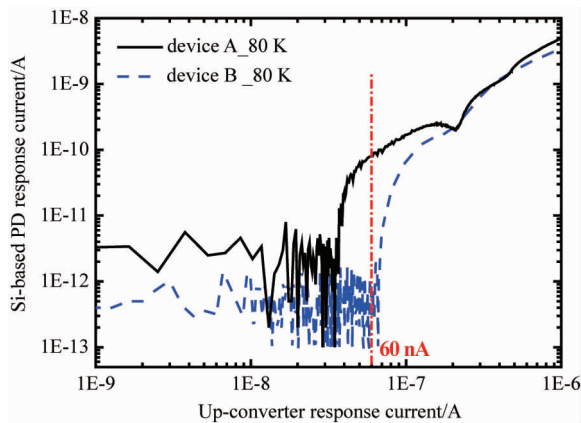


图 5 硅探测器响应电流随上转换器件响应电流变化的曲线

Fig. 5 Response currents of Si-based photodiodes versus response currents of up-converters for devices A (black line) and B (blue dashed line)

上转换器件的发光效率受电子和空穴浓度的影响,而材料结构的改变会影响电子和空穴在器件中的分布.为了进一步分析上述实验结果,在考虑量子阱器件中空穴的俘获、发射过程^[9]和隧穿过程^[10]的基础上,通过自洽求解薛定谔方程、泊松方程、电流连续性方程和载流子速率方程,计算了 A、B 器件结构中的空穴浓度分布.图 6 所示为 A、B 器件在 80 K 温度和平带电压条件下的空穴浓度分布.当偏置电

压处于平带电压和开启电压之间时,器件自身的电注入较小;当器件受红外光照射产生的光生电子向 P 型区运输的过程中,由于电中性的要求,从器件的 P 型区相应地有空穴注入.根据图 6 的计算结果,尽管注入的空穴在发光区分布的浓度明显较高,但是在发光区之外也有一定分布,包括吸收区、运输区和 N 型区.光生电子以声子辅助隧穿的方式通过运输区,其寿命远低于带间辐射复合寿命,因此在运输区的辐射发光将非常微弱.在吸收区量子阱中,电子的寿命比较长,有可能与注入的空穴复合而发光.同理,在 N 型区包括 GaAs 层和紧邻吸收区的 $\text{In}_{0.08}\text{Ga}_{0.92}\text{As}$ 电子注入层也可能发生电子空穴复合发光.根据我们的计算,当器件处于液氮温度下时,上述区域和发光区的发光波长都处于硅基光探测器的响应波长范围内,因此都能造成波长上转换系统的红外响应.

器件测试结果表明,在红外响应电流 35 ~ 100 nA 范围之内时,A 器件的发光效率明显高于 B 器件.我们试着从两方面来进行讨论.根据半导体发光二极管经典的 ABC 载流子复合模型^[11],发光器件的内量子效率在一定的注入电流范围内随电子和空穴浓度的增大而增大.仔细观察图 6 中 B 器件发光区的空穴浓度,不难发现三个阱中的空穴浓度低于 A 器件,而且分布不均匀,越靠近运输区空穴浓度越低,该不均匀性会随温度的降低变得更严重.尽管光生电子浓度分布难以定量计算,但是根据图 1(b)中的电子波函数分布定性地说,光生电子在紧邻运输区的第一个发光阱中分布的浓度较大,其它两个量子阱中的电子浓度较小.对于 A 器件,因为只有一个发光阱,光生电子和注入空穴都集中于其中,在相同的光电流下参与发光的电子和空穴浓度更高.因此在上述红外响应电流范围内,A 器件发光区的内量子效率高于 B 器件,即使考虑积分效应,其发光强度仍可能大于 B 器件.另一方面,考察发光区之外的空穴浓度分布,A 器件吸收区和 N 型区中的空穴浓度也高于 B 器件,相应的发光强度也可能大于 B 器件.综合这两方面因素,在红外响应电流 35 ~ 100 nA 范围之内时,具有单个发光阱的 A 器件的整体发光效率高于具有三个发光阱的 B 器件.当然,其中的物理机理仍需进一步深入研究.此外,器件中的空穴阻挡结构也需要继续优化.

4 结论

波长上转换红外探测器中近红外光子的发光效

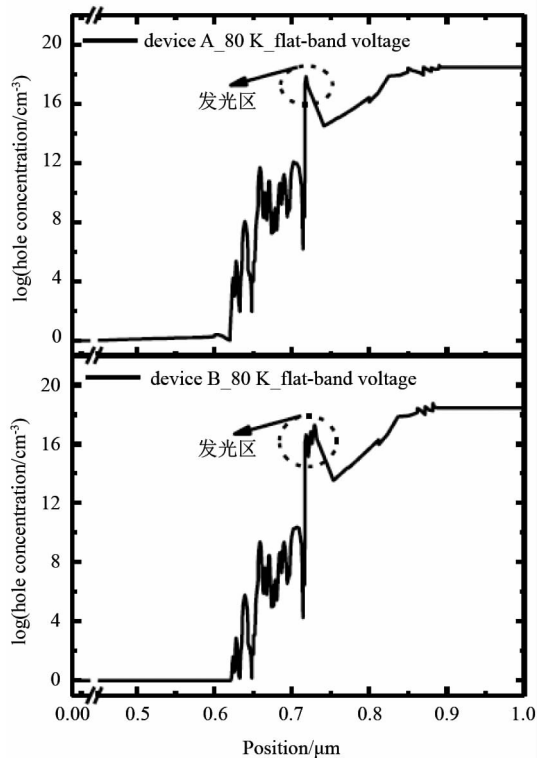


图6 A、B器件在80 K温度与平带电压条件下的空穴浓度分布. 横坐标零点选择在衬底上表面

Fig. 6 Calculated hole distributions for up-converters A (upper panel) and B (lower panel) at 80 K and flat-band voltage. The origin of abscissa is chosen at the top surface of the substrate

率是影响器件上转换效率的重要因素,发光效率与电子和空穴浓度分布密切相关.通过设计、制作具有单个和三个发光阱的上转换器件,对器件的发光效率进行了测试分析.结果表明,选择单个发光阱有利于提高器件的发光效率,进而提高整体系统的上转换效率.根据半导体发光器件的载流子复合模型以及器件中空穴浓度和光生电子浓度的分布特点,认为单个发光阱器件近红外发光的内量子效率高具有三个发光阱的器件.

References

- [1] Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook[J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2005, **68**(10): 2267 - 2336.
- [2] Tidrow M Z, Beck W A, Clark W W, *et al.* Device physics and focal plane array applications of QWIP and MCT[J]. *Opto-Electronics Review*, 1999, **7**(4): 283 - 296.
- [3] LI Yan-Jin, HE Li, YANG Jian-Rong, *et al.* Study on thermal mismatch stress of HgCdTe infrared focal plane array [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李言谨, 何力, 杨建荣, 等. 碲镉汞红外焦平面器件热失配应力研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(6): 409 - 412.
- [4] Liu H C, Li J, Wasilewski Z R, *et al.* Integrated quantum well intersub-band photodetector and light emitting diode [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(10): 832 - 833.
- [5] Dupont E, Liu H C, Buchanan M, *et al.* Pixel-less infrared imaging based on the integration of an n-type quantum-well infrared photodetector with a light-emitting diode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(4): 563 - 565.
- [6] LUO Yi, HAO Zhi-Biao, WANG Lei, *et al.* An up-conversion infrared photodetector based on quantum cascade structure: China Patent, 2011104389994 [P]. (罗毅, 郝智彪, 王磊, 等. 一种含量子级联结构的波长上转换器件: 中国专利, 2011104389994). 2011. <http://www.sipo.gov.cn/zljsfl/>.
- [7] KANG Jian-Bin, HAO Zhi-Biao, WANG Lei, *et al.* Studies on carrier-blocking structures for up-conversion infrared photodetectors[J]. *Acta Phys. Sin.* (康健彬, 郝智彪, 王磊, 等. 红外波长上转换器件中载流子阻挡结构的研究. *物理学报*), 2015, **64**(17): 178502.
- [8] Liu H C, Buchanan M, Wasilewski Z R. How good is the polarization selection rule for intersubband transitions [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(14): 1682 - 1684.
- [9] Hillmer H, Marcinkevicius S. Optically detected carrier transport in III/V semiconductor QW structures: experiments, model calculations and applications in fast 1.55 μm laser devices [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **66**(1): 1 - 17.
- [10] Buffaz A, Carras M, Doyennette L, *et al.* Long range resonant tunneling in quantum cascade structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(16): 162103.
- [11] Ban D, Luo H, Liu H C, *et al.* Optimized GaAs/AlGaAs light-emitting diodes and high efficiency wafer-fused optical up-conversion devices [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **96**(9): 5243 - 5248.