

红外波长上转换器件中载流子阻挡结构的研究

康健彬 郝智彪 王磊 刘志林 罗毅 汪莱 王健 熊兵 孙长征 韩彦军 李洪涛 王禄 王文新 陈弘

Studies on carrier-blocking structures for up-conversion infrared photodetectors

Kang Jian-Bin Hao Zhi-Biao Wang Lei Liu Zhi-Lin Luo Yi Wang Lai Wang Jian Xiong Bing Sun Chang-Zheng Han Yan-Jun Li Hong-Tao Wang Lu Wang Wen-Xin Chen Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 178502 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.178502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.178502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I17>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于垂直晶体管结构的低电压并五苯光电探测器

Low-voltage pentacene photodetector based on a vertical transistor configuration

物理学报.2015, 64(10): 108503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.108503>

基于电子轰击式 CCD 的大动态条纹相机研究

Research on large dynamic range streak camera based on electron-bombarded CCD

物理学报.2015, 64(9): 098501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.098501>

高速高饱和单行载流子光探测器的设计与分析

Design and analysis of high speed and high saturation uni-traveling-carrier photodetector

物理学报.2014, 63(20): 208502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.208502>

基于内聚区模型的 InSb 面阵探测器分层研究

Delamination study of InSb infrared focal plane arrays using a cohesive zone model

物理学报.2014, 63(11): 118503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.118503>

利用色彩转换法制备高色稳定性的柔性白色有机电致发光器件

Highly color-stability flexible white organic light-emitting devices fabricated by color conversion method

物理学报.2012, 61(17): 178502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.178502>

红外波长上转换器件中载流子阻挡结构的研究*

康健彬¹⁾ 郝智彪^{1)†} 王磊¹⁾ 刘志林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)(清华信息科学与技术国家实验室, 清华大学电子工程系, 北京 100084)

2)(中国科学院物理研究所, 北京 100190)

(2015年3月3日收到; 2015年4月13日收到修改稿)

复杂半导体材料结构中的载流子分布特性对器件性能有重要影响. 本文针对一种新型的波长上转换红外探测器, 研究了载流子阻挡结构对载流子分布和器件特性的影响. 论文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分析了不同器件结构中的空穴分布. 同时, 生长了相应结构的外延材料, 并通过电致荧光谱分析了载流子阻挡结构对器件特性的影响. 结果表明, 2 nm 厚的 AlAs 势垒层既能有效阻挡空穴又不影响电子输运, 有利于制作波长上转换红外探测器. 此外, 论文分析了阻挡势垒层的厚度和高度以及工作温度对载流子分布的影响. 本文研究结果亦可应用于其他载流子非均匀分布的半导体器件.

关键词: 波长上转换, 载流子分布, 阻挡结构, 电致荧光

PACS: 85.60.Bt, 85.60.Gz, 73.63.Hs, 78.60.Fi

DOI: 10.7498/aps.64.178502

1 引言

红外探测成像技术可广泛应用于环境监测、资源勘测、卫星遥感、医学诊疗、武器制导等方面, 具有非常重要的民用和军用价值. 在很多应用场景中, 探测目标的红外辐射非常微弱, 对红外探测器的性能提出了很高要求, 特别是要满足低暗电流和大面阵的要求^[1]. 目前成熟的红外探测技术受限于材料质量^[2,3]或器件工作机理^[4]而难以满足这一要求. 为此, 罗毅等提出了基于量子级联输运的波长上转换红外探测器件结构^[5]. 器件工作时, 吸收区量子阱吸收红外光子并产生光生电子, 光生电子通过级联结构输运到发光区, 与注入到该区域的空穴发生辐射复合, 发射出可被低噪声的 Si-CCD 探测的短波长光子. 该波长上转换器件利用量子级联结构可以实现光生电子在低电压下高效的单向输运^[6], 有利于降低暗电流. 同时, 波长上转换器件

可避免器件与硅基读出电路键合而引入热失配^[7], 有利于实现大面阵焦平面器件.

针对上述波长上转换红外探测器的工作原理, 要求载流子是非均匀分布的, 即要求在没有红外光入射时电子只在吸收区积累而空穴只在发光区积累, 此时器件可以获得较低的暗电流及较高的内量子效率. 为了实现器件的预期功能, 必须要精确控制载流子的分布, 而载流子阻挡结构在这类器件中是实现载流子分布有效控制的关键^[8,9]. 理想的阻挡结构既要有效限制空穴分布同时又不影响光生电子的输运, 对材料设计提出了较高的要求.

目前对于半导体器件中的载流子阻挡结构尚缺乏系统的研究, 本文以波长上转换红外探测器为例, 通过仿真计算和实验研究了几种载流子阻挡结构对载流子分布的影响. 在综合考虑量子阱内载流子的热电子发射过程、声子散射过程和隧穿过程的基础上, 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, 理论分析了载流子

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB632804, 2012CB315605), 国家自然科学基金(批准号: 61176015, 61210014, 51002085, 61321004, 61307024, 61176059)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2012AA050601)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zbhao@tsinghua.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: luoy@tsinghua.edu.cn

的分布特性. 同时, 实际生长了具有相应载流子阻挡结构的波长上转换红外探测材料, 并通过电致荧光(EL)谱分析载流子的分布特性.

2 器件模型、理论计算方法及器件制作

2.1 器件模型

首先讨论基于量子级联结构的波长上转换红外探测器的基本结构, 图 1(a) 所示为该器件在平带条件下的能带结构图. 器件的基本结构包括 n 型 GaAs 层、In_{0.08}Ga_{0.92}As 电子注入层、有源区以及 p 型 AlGaAs 层. 有源区由多层量子阱构成, 根据功能的不同可分为红外光子吸收区、光生载流子运输区和近红外发光区. 吸收区由 n 型掺杂的 In_{0.28}Ga_{0.72}As / Al_{0.38}Ga_{0.62}As 量子阱构成, 利用量子阱子带间跃迁实现对红外光子的吸收. 运输区紧邻吸收区, 由 6 个阱宽渐变的 GaAs / Al_{0.38}Ga_{0.62}As 耦合量子阱构成, 相邻量子阱中的电子能级能量相差纵光学声子能量 (约 36 meV), 光生电子共振隧穿注入到运输区后通过声子辅助隧穿的方式弛豫到发光区. 发光区由 3 个相同阱宽

的 GaAs / Al_{0.38}Ga_{0.62}As 量子阱构成, 运输到此的光生电子与注入的空穴发生辐射复合, 完成短波长的近红外光子发射. 器件能带在正向工作电压下被拉平 (抵消 p-n 结形成的内建电势差), 此时满足工作所需的能级对准要求.

由于器件各功能区域相隔很近, 要想将空穴限制在发光区, 需要较强的空穴阻挡机理, 为此设计了三种不同的载流子阻挡结构, 如图 1(b)–(d) 所示. 图 1(b) 结构是在图 1(a) 的基础上对运输区作 n 型轻掺杂 ($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), 以期调节 p-n 结中耗尽区的位置, 阻止空穴在吸收区、注入层和 GaAs 层积累. 图 1(c) 结构是在图 1(a) 的基础上降低注入空穴的势垒高度, 即由 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 变为 Al_{0.18}Ga_{0.82}As, 目的是降低空穴的注入能量, 利用有源区相对较高的量子势垒将空穴限制在发光区内. 图 1(d) 结构是在图 1(a) 的基础上在运输区与发光区之间使用 2 nm 厚的 AlAs 势垒层以形成阻挡势垒. 由于电子有效质量较小, 2 nm 厚的 AlAs 势垒层既可以实现电子隧穿^[10], 同时对具有较大有效质量的空穴的隧穿概率则会大大降低.

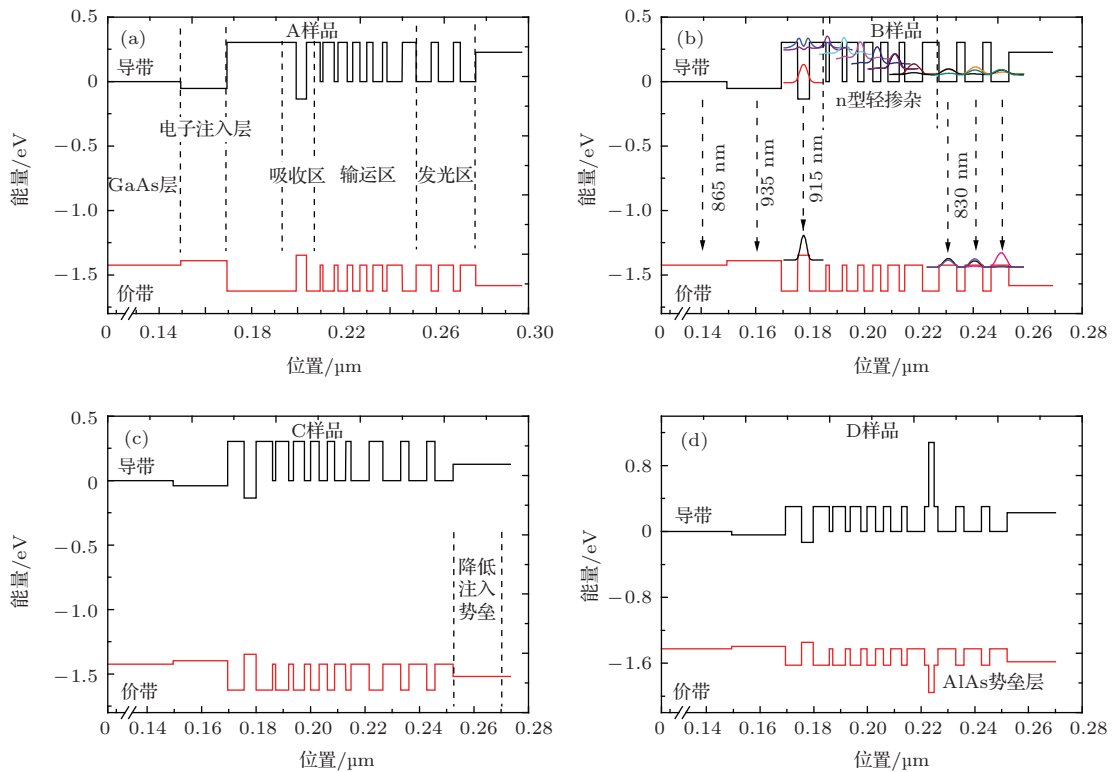


图 1 (a) 波长上转换红外探测器的基本能带结构; (b)–(d) 及三种载流子阻挡结构示意图 (横坐标零点选择在衬底上表面)

Fig. 1. Schematic band profiles of up-conversion infrared photodetector (a) and carrier-blocking structures (b)–(d) (the origin of abscissa is chosen on the top surface of substrate).

2.2 理论计算方法

基于量子级联结构的波长上转换红外探测器在工作电压下, 载流子的输运机理主要包括扩散和漂移、量子阱中的俘获和发射、耦合多量子阱中的子带间散射、不同量子阱间的隧穿以及电子与空穴的复合, 涉及电子-声子、电子-空穴的相互作用. 为了得到器件的电学和光学特性, 求解思路是在综合考虑上述物理过程的基础上, 利用有限元方法在空间离散量子机理的薛定谔方程、泊松方程、电流连续性方程和载流子速率方程, 然后采用牛顿迭代法等方法求解所形成的非线性方程组.

下面结合主要的物理方程简要介绍计算方法. 泊松方程、薛定谔方程和电流连续性方程为

$$\nabla \cdot [\varepsilon(z)\nabla\Phi(z)] = e [p(z) - n(z) + N_D^+(z) - N_A^-(z)], \quad (1)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2}\nabla\left[\frac{1}{m^*(z)}\nabla\right]\psi(z) + V(z)\psi(z) = E\psi(z), \quad (2)$$

$$-\nabla \cdot \mu_p(z)p(z)\nabla E_{Fp}(z) = R(z), \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mu_n(z)n(z)\nabla E_{Fn}(z) = R(z), \quad (4)$$

式中, e 为电子电量, $\varepsilon(z)$ 为材料的介电常数, $m^*(z)$ 为材料的电子有效质量. $p(z)$ 和 $n(z)$ 分别代表空穴浓度和电子浓度在材料生长方向的分布, $N_D^+(z)$ 和 $N_A^-(z)$ 分别代表电离施主浓度和电离受主浓度的分布, 它们与掺杂浓度和准费米能级有关, 利用 (1) 式可以解出器件的势能 $\Phi(z)$. $V(z)$ 为材料结构能带边沿的势能函数, 利用 (2) 式可以解出量子结构中的波函数 $\Psi_n(z)$ 及相应的本征能级 $E_n(z)$. (3), (4) 式为电子和空穴的电流连续性方程, $\mu_p(z)$ 和 $\mu_n(z)$ 分别代表空穴和电子的迁移率, $R(z)$ 是考虑电子空穴对的产生-复合机理引入的因子. 这两个方程主要描述的是载流子浓度与准费米能级 $E_F(z)$ 间的关系.

为了准确描述载流子在器件中的输运, 还需引入载流子的速率方程. 速率方程主要考虑载流子的俘获与发射^[11]、载流子与声子之间的散射^[12]、载流子的隧穿^[13]等复杂的散射过程, 根据各个过程的典型散射寿命建立载流子的动态输运模型. 具体计算中, 首先利用给定的初始势能和量子化能级求解电流连续性方程和载流子速率方程, 得到新的准费米能级; 然后利用该准费米能级求解薛定谔方程和泊松方程, 得到新的量子化能级和新的势能, 以

此循环, 在计算结果收敛的基础上得到器件在不同偏压下的能级分布与载流子浓度分布.

2.3 器件制作

根据图 1 所示的能带结构, 相应地生长波长上转换红外探测材料样品 A—D. 各材料样品是采用分子束外延 (MBE) 生长在半绝缘的 GaAs (001) 衬底上. 制作器件样品时, 首先利用等离子体干法刻蚀制作出 $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ 的台面结构, 刻蚀深度以刻到 n 型 GaAs 层为宜. 然后在 n 型 GaAs 层上溅射 NiGeAu 合金作为 n 型欧姆接触电极. 接下来在台面上电子束蒸发 Ti/Au (名义厚度 $2.5\ \text{nm} / 5\ \text{nm}$) 透明电极作为 p 型欧姆接触电极. 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. 最后经过退火、钝化等工艺完成器件的全部制作流程. 器件样品的 EL 谱由 Horiba iHR550 单色仪进行测试, 所用探测器为 Horiba Synapse Si-CCD 面阵 (1024×256) 探测器.

3 结果与讨论

首先, 根据建立的计算模型分析空穴在器件中的分布情况. 图 2 所示为计算得到的 A—D 器件在室温、平带电压 (正向 $1.3\ \text{V}$) 下的空穴浓度分布.

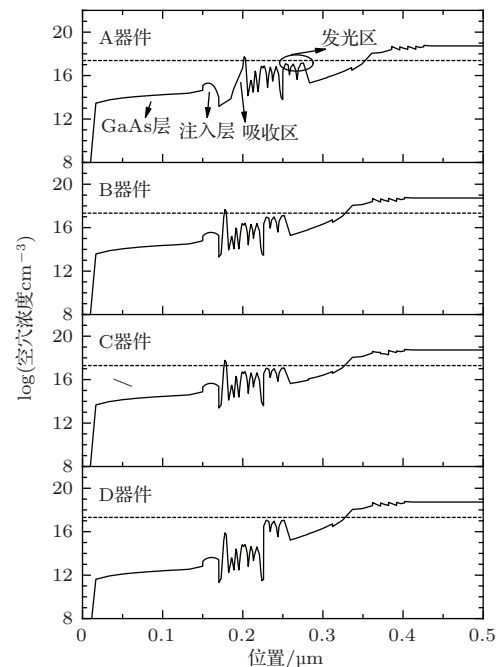


图 2 A—D 器件在室温、平带电压 (正向 $1.3\ \text{V}$) 下的空穴浓度分布 (横坐标零点选择在衬底上表面)

Fig. 2. Calculated hole distribution of devices A—D at room temperature and flat-band voltage (the origin of abscissa is chosen on the top surface of substrate).

在所有的器件中,注入到发光区的空穴浓度大致相同(约 10^{17} cm^{-3} 量级),如图中虚线所示.从图中可以看出,空穴浓度在n型GaAs层和注入层均较低,这是由于此区域为n型重掺杂. A, B, C器件中运输区的空穴浓度相比于发光区稍低,但吸收区的空穴浓度均比发光区高,这主要是由于吸收区的 $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ 量子阱相比于发光区的GaAs量子阱更深,对空穴有较强的俘获和限制能力.同时也可以看出, B和C器件的阻挡结构没有达到预期的阻挡效果.而在D器件中,吸收区与运输区的空穴浓度明显低于发光区,空穴主要在发光区积累,即2 nm厚的AlAs势垒层对空穴形成了较强的阻挡机理.

器件的不同功能区具有不同的带间跃迁能量,由于GaAs系材料的电子有效质量较小、迁移率较大,正向偏压下电子在各区域均有一定的分布,因此空穴在不同区域的分布会导致不同波长的发光,空穴浓度分布将决定器件的EL谱特征,或者说,器件的EL谱特征可反映空穴浓度分布的情况.图1(b)中标出了理论计算的器件各主要区域室温下的带间发光波长,其中GaAs层、电子注入层为体材料的带间跃迁,跃迁波长分别为865 nm和935 nm;吸收区、运输区及发光区为量子阱能级间的跃迁,具体能级位置详见图1(b),吸收区和发光区的跃迁波长分别为915 nm和830 nm,运输区量子阱阱宽较窄,其带间跃迁波长比发光区更短.需要说明的是,器件运输区中相邻量子阱的能级在平带电压下形成“声子台阶”,由于声子辅助隧穿寿命远低于带间跃迁寿命,电子注入到运输区量子阱后会通过声子辅助隧穿的方式迅速弛豫到发光区,电子将只在发光区积累而不会在运输区积累,理论上不会观测到运输区量子阱对应的EL峰.如果空穴阻挡结构具有良好的阻挡效果,空穴仅被限制在发光区中,此时器件只有发光区量子阱参与发光;如果阻挡作用较弱,空穴可能注入到吸收区、注入层以及GaAs层,EL谱图中将出现对应波长的发光峰.

图3所示为测试得到的A—D器件样品在室温、平带电压下的EL谱. A器件样品主要观测到三个可分辨的荧光峰,分别位于828 nm, 860 nm和920 nm.结合图1(b)的计算结果,可以判断828 nm处的荧光峰来自发光区,860 nm处的荧光峰来自GaAs层,920 nm处的荧光峰来自吸收区.其中860 nm处的荧光峰相对最强,说明在没有阻挡结构时空穴大量注入到GaAs层. B器件样品的三个

荧光峰中,也包含了GaAs层和吸收区的荧光峰,另外出现了位于940 nm的来自注入层的荧光峰,且该荧光峰相对较强,说明空穴在注入层中有较多积累,阻挡效果依然较差. B器件样品的EL谱中未观测到发光区的荧光峰,可能是由于运输区量子阱n型掺杂导致p-n结结区偏离发光区. C器件样品的四个荧光峰从短波长到长波长分别来自发光区、GaAs层、吸收区和注入层,注入层的荧光峰强度最强, GaAs层的荧光峰强度最弱,总体来看阻挡效果仍不理想. D器件样品的EL谱以828 nm处来自发光区的荧光峰为主,936 nm附近的很弱的荧光峰来自注入层和吸收区,说明空穴被有效限制在发光区,2 nm厚的AlAs阻挡势垒起到良好的空穴阻挡作用,且未影响电子的运输.结合以上分析,EL测试结果与理论计算得到的空穴浓度分布基本相符,即B和C器件结构的空穴阻挡效果较差, D器件结构的空穴阻挡效果较好.

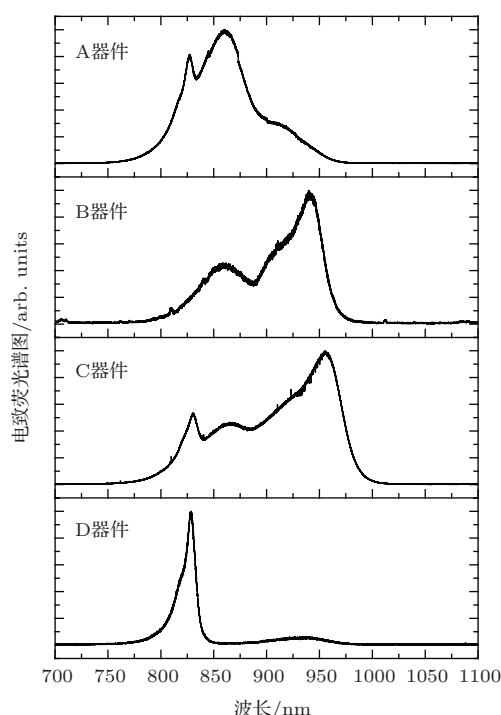


图3 A—D器件样品在室温、平带电压(正向1.3 V)下的电致荧光谱

Fig. 3. Measured EL spectra of devices A—D at room temperature and flat-band voltage (forward 1.3 V).

由于器件样品的荧光信号较为复杂,为了进一步验证对于上述各荧光峰的分析,我们用柠檬酸和双氧水的混合溶液对样品A外延材料进行了分步腐蚀,测试样品在不同腐蚀深度下的室温光致荧光(PL),所用激发光源的波长为532 nm.图4最下方所示为样品未腐蚀时的PL谱,可分辨出三个荧光

峰, 波长分别为780 nm, 860 nm和920 nm, 按照前述分析, 它们分别来自输运区、GaAs层、注入层和吸收区. 测量中未发现对应于发光区量子阱的发光峰, 这是由于进行PL测试时样品不加偏压, 在p-n结内建电场作用下, 输运区各量子阱中的能级近似形成与正向运输相反的声子台阶, 在发光区和输运区后几级量子阱中产生的光生电子会迅速弛豫到输运区前几级的量子阱中, 造成780 nm处的发光峰. 随着腐蚀时间的增加, 腐蚀顺序依次是p型层、发光区、输运区、吸收区、注入层和GaAs层, 所以测试结果应该是输运区的荧光峰先消失, 然后是吸收区和注入层的荧光峰消失, 最后只剩下GaAs层的荧光. 从图4可以看出, 当腐蚀时间增加到230 s时, 780 nm处的荧光峰消失, 此时的腐蚀深度约400 nm, 位于输运区与吸收区之间的区域, 发光区和输运区基本被腐蚀掉; 当腐蚀时间增加到410 s时, 920 nm处的荧光峰消失, 此时的腐蚀深度约500 nm, 位于GaAs层, 注入层和吸收区已被腐蚀掉; 继续增加腐蚀时间, 860 nm附近的荧光峰一直存在. 上述测试结果与理论推断基本一致, 表明对图3中EL峰来源的分析是可信的.

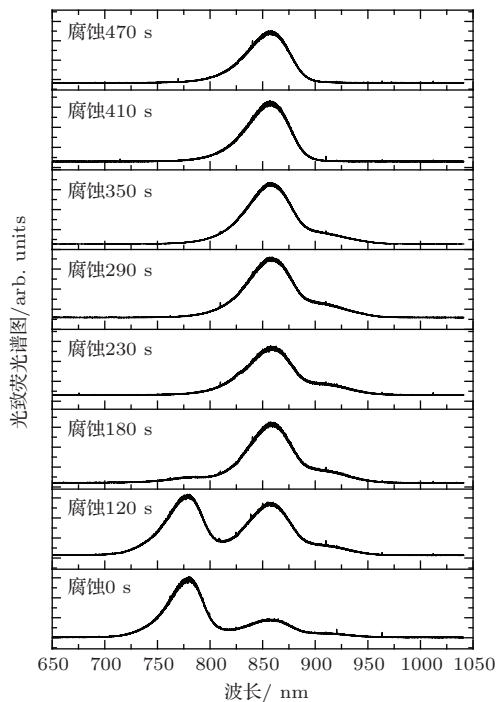


图4 样品A外延材料在不同腐蚀深度下的室温光致荧光谱
Fig. 4. Measured PL spectra of sample A after different etch depths at room temperature.

根据上述分析可知, D器件结构中2 nm厚的AlAs势垒层对空穴具有较好的阻挡效果. 我们进

一步研究了阻挡势垒的厚度和高度对载流子分布特性的影响. 在D器件结构的基础上, 分别将AlAs势垒层的厚度设为0.5 nm, 1 nm, 2 nm和4 nm, 相应结构在室温、平带电压下的空穴浓度分布计算结果如图5(a)所示, 图中虚线所示为发光区的空穴浓度值. 随着阻挡势垒厚度从0.5 nm变化到2 nm, 吸收区和输运区的空穴浓度逐渐减少, 对空穴的阻挡效果逐渐增强; 而阻挡势垒厚度从2 nm变化到4 nm时, 吸收区和输运区的空穴浓度几乎没有变化. 我们知道, 空穴注入到吸收区和输运区可以通过两种机制, 一是部分能量较高的载流子通过热激发越过势垒层, 二是部分能量较低的载流子隧穿通过势垒层. 当阻挡势垒厚度低于2 nm时, 部分载流子可以隧穿通过势垒, 且隧穿概率随着势垒厚度的增加而减小, 所以此时吸收区和输运区的空穴浓度随着势垒厚度的增加而减少. 这一势垒厚度范围与文献报道的能实现空穴隧穿的势垒厚度基本相符^[14]. 当阻挡势垒厚度超过2 nm时, 空穴的隧穿得到有效抑制, 室温下空穴注入到输运区、吸收区和注入层主要以热激发越过势垒层为主. 在此情况下, 势垒厚度的增加并不能增强对热激发载流子的阻挡作用, 因为根据费米分布规律, 在相同温度下高于一定能量(阻挡势垒高度)的载流子的分布特性是相同的, 能越过同一势垒高度的载流子的数量也是相同的.

另一方面, 在D器件结构的基础上, 分析了AlGaAs阻挡层Al组分不同即势垒高度不同时的空穴浓度分布. 需要说明的是, Al组分高于40%时AlGaAs材料变为间接带隙^[15], 但是在平带电压下器件有源区中的实际电场仍比较小, 载流子在通过2 nm厚的阻挡层时并不能从 Γ 能谷散射到X能谷, 因此, 有效势垒高度仍可按 Γ 点带隙计算. 对于阻挡层Al组分分别为100%, 80%, 60%和38%的结构, 在室温、平带电压下的空穴浓度分布计算结果如图5(b)所示. 从图中可以看出, 随着Al组分的降低, 即势垒高度的降低, 吸收区和输运区的空穴浓度逐渐升高, 阻挡效果变差. 这是因为在势垒厚度相同时, 势垒高度越低, 载流子隧穿概率越大, 同时能越过势垒的热载流子数量也越多.

此外, 还进一步研究了工作温度对载流子阻挡特性的影响规律. 在低温模型下主要考虑了材料禁带宽度的变化以及载流子在异质界面的热发射. 以D器件结构为例, 随着温度的降低, 在发光区空穴浓度基本保持不变的情况下, 吸收区和输运区的

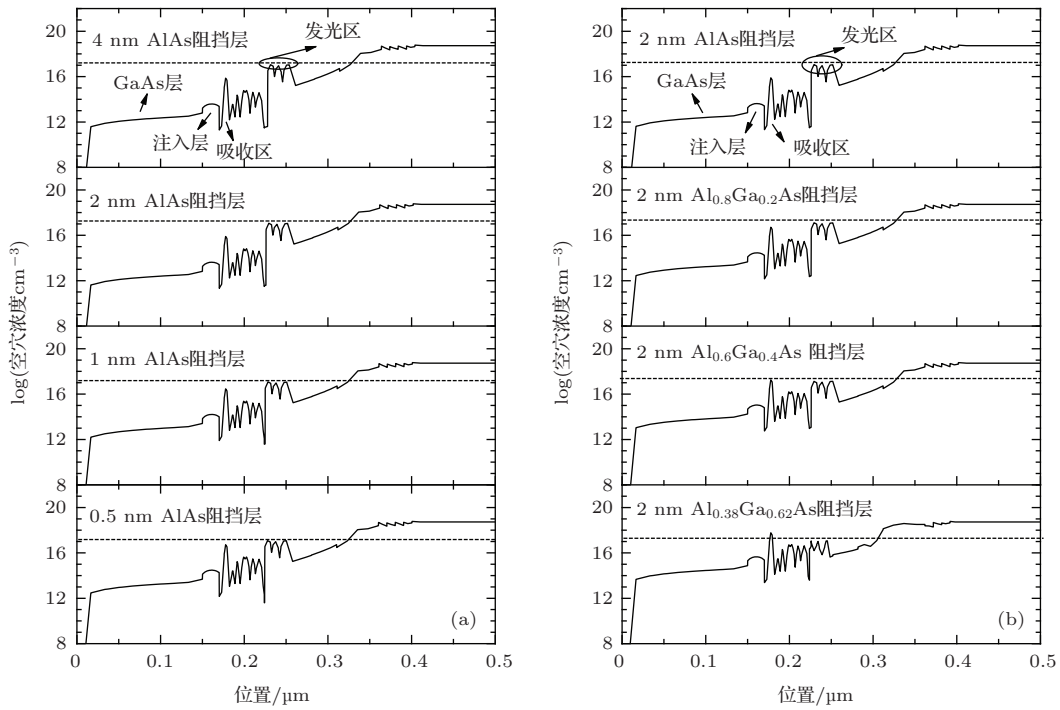


图5 (a) AlAs 势垒层厚度分别为 0.5 nm, 1 nm, 2 nm 和 4 nm 时的空穴浓度分布; (b) 阻挡层分别为 2 nm AlAs, Al_{0.8}Ga_{0.2}As, Al_{0.6}Ga_{0.4}As 和 Al_{0.38}Ga_{0.62}As 时的空穴浓度分布 (横坐标零点选择在衬底上表面)
 Fig. 5. Calculated hole distribution for (a) AlAs block barriers with different thicknesses and (b) 2 nm Al_xGa_{1-x}As block barriers with different Al mole fractions (the origin of abscissa is chosen on the top surface of substrate).

空穴浓度急剧下降. 根据计算结果, 当温度从 300 K 下降到 150 K 时, 吸收区空穴浓度从 10¹⁶ cm⁻³ 量级下降到约 10¹¹ cm⁻³ 量级, 这对工作在低温下的波长上转换红外探测器件来说是很有益的. 这主要是由于温度越低, 热激发能量高于阻挡势垒的载流子所占的比例越少, 注入到吸收区和输运区的载流子就越少.

4 结 论

基于量子级联运输的波长上转换红外探测器在工作时需要将载流子限制在特定的量子阱中, 而阻挡结构是控制载流子分布特性的关键. 本文针对这一新型红外探测器件, 通过仿真计算和 EL 谱测试研究了两种载流子阻挡结构对载流子分布和器件特性的影响. 研究表明, 输运区 n 型轻掺杂和降低空穴注入势垒未能实现对空穴的有效阻挡; 2 nm 厚的 AlAs 势垒层可以有效抑制空穴的隧穿和热发射, 且不影响电子的隧穿运输. 另外, 还分析了阻挡势垒层的厚度和高度以及工作温度对空穴阻挡特性的影响. 当阻挡势垒层厚度小于 2 nm 时, 随着势垒层厚度和势垒高度的增加, 对空穴的阻挡

作用增强; 当阻挡势垒厚度超过 2 nm 时, 热激发是影响空穴分布的主要因素, 势垒厚度的增加不会对阻挡效果产生影响. 在相同的阻挡势垒下, 器件工作温度越低, 热激发越过阻挡势垒的空穴数量越少, 阻挡效果越好.

参考文献

- [1] Yang Y, Liu H C, Hao M R, Shen W Z 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 074501
- [2] Izhnin I I, Dvoretzky S A, Mynbaev K D, Fitsych O I, Mikhailov N N, Varavin V S, Pociask-Bialy M, Voit-sekhovskii A V, Sheregii E 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 163501
- [3] Martin Walther, Robert Rehm, Johannes Schmitz, Jasmin Niemasz, Frank Rutz, Andreas Wörl, Lutz Kirste, Ralf Scheibner, Joachim Wendler, Johann Ziegler 2011 *Proc. of SPIE* **7945** 79451N
- [4] Xu W L, Xiong D Y, Li N, Zhen H L, Li Z F, Lu W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5424 (in Chinese) [徐文兰, 熊大元, 李宁, 甄红楼, 李志锋, 陆卫 2007 物理学报 **56** 5424]
- [5] Luo Y, Hao Z B, Wang L, Kang J B, Wang L 2011 *CN patent* ZL 201110438999.4 (in Chinese) [罗毅, 郝智彪, 王磊, 康健彬, 汪莱 2011 中国专利 ZL 201110438999.4]
- [6] Fabrizio Giorgetta R, Esther Baumann, Marcel Graf, Quankui Yang, Christian Manz, Klaus Köhler, Harvey

- Beere E, David Ritchie A, Edmund Linfield, Alexander Davies G, Yuriy Fedoryshyn, Heinz Jäckel, Milan Fischer, Jérôme Faist, Daniel Hofstetter 2009 *J. Quantum. Electron.* **45** 1039
- [7] Emmanuel Dupont, Byloos M, Gao M, Buchanan M, Song C Y, Wasilewski Z R, Liu H C 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 182
- [8] Ryzhii V, Liu H C 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 2354
- [9] Savich G R, Pedrazzani J R, Sidor D E, Maimon S, Wicks G W 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 121112
- [10] Harald Schnelder, Peter Koldl, Frank Fuchs, Bernhard Dlschler, Klaus Schwarz, John Ralston D 1991 *Semicond. Sci. Technol.* **6** C120
- [11] Hillmer H, Marcinkevicius S 1998 *Appl. Phys. B* **66** 1
- [12] Koeniguer C, Dubois G, Gomez A, Berger V 2006 *Phys. Rev. B* **74** 235325
- [13] Wang H X, Yin W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2669 (in Chinese) [王海霞, 殷雯 2008 物理学报 **57** 2669]
- [14] Bhattacharya P, Zhang M, Hinckley J 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 251107
- [15] Jeremy Nicklas W, John Wilkins W 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 091902

Studies on carrier-blocking structures for up-conversion infrared photodetectors*

Kang Jian-Bin¹⁾ Hao Zhi-Biao^{1)†} Wang Lei¹⁾ Liu Zhi-Lin¹⁾ 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, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2) (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 3 March 2015; revised manuscript received 13 April 2015)

Abstract

Infrared (IR) photodetectors have been widely used in the fields of both civil and military applications such as environmental monitoring, medical diagnostics, satellite remote sensing and missile guidance, etc. In conventional large scale focal plane array (FPA) IR imaging, the thermal mismatch between IR photodetectors and silicon readout circuits will inevitably lead to the degradation of the device performance. An up-conversion IR photodetector, which converts IR photons to short-wavelength photons for Si-CCD-based imaging, can avoid thermal mismatch caused by hybridization with silicon readout circuits, resulting in a low-cost way for large array IR imaging.

The operation principle of the semiconductor up-conversion IR photodetector is based on electron transitions and carrier transportation in different functional sections including absorption section, transportation section and emission section, hence the carrier distribution in the device structure has a crucial influence on the device performance. In order to achieve low dark current, carriers are expected to be non-uniformly distributed in the up-conversion device structure. Designing and optimizing the carrier-blocking structure are usually the key issues to acquire inhomogeneous carrier distribution.

In this paper, up-conversion infrared photodetectors with various hole-blocking structures are investigated both theoretically and experimentally. Firstly the carrier distributions are calculated by self-consistently solving the Schrödinger equation, Poisson equation, current continuity equation and carrier rate equation. Then the influence of the carrier-blocking structure on the device performance is analyzed by electroluminescence measurements on the corresponding epitaxial structures. According to the theoretical and experimental results, it is found that a 2-nm-thick AlAs barrier layer can block holes effectively without hampering the electron transportation, which is necessary for the up-conversion infrared photodetectors. However, other attempts to block holes, such as light n-doping in the transportation section or lowering the injection barrier, do not work well. In addition, the influences of the thickness and height of the blocking barrier and the operation temperature on the carrier distributions are also studied. When the thickness of the blocking barrier is less than 2 nm, the thicker or the higher is the barrier, the better is the blocking effect. However, when the thickness of the blocking barrier is larger than 2 nm, the blocking effect is not persistently enhanced with increasing thickness because the tunneling process is almost fully suppressed. Furthermore, with the same blocking barrier parameters, lowering the operation temperature can lead to better blocking effect. This work demonstrates the utilization and effect of carrier-blocking structures in semiconductor devices which demand an inhomogeneous carrier distribution.

Keywords: up-conversion, carrier distribution, carrier-blocking structure, electroluminescence

PACS: 85.60.Bt, 85.60.Gz, 73.63.Hs, 78.60.Fi

DOI: 10.7498/aps.64.178502

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2013CB632804, 2012CB315605), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61176015, 61210014, 51002085, 61321004, 61307024, 61176059), and the High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2012AA050601).

† Corresponding author. E-mail: zbhao@tsinghua.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: luoy@tsinghua.edu.cn