

利用表面微结构提高波长上转换红外探测器效率

王超 郝智彪 王磊 康健彬 谢莉莉 罗毅 汪莱 王健 熊兵 孙长征 韩彦军 李洪涛 王禄 王文新 陈弘

Improvement on the efficiency of up-conversion infrared photodetectors using surface microstructure

Wang Chao Hao Zhi-Biao Wang Lei Kang Jian-Bin Xie Li-Li 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](#), 65, 108501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.108501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.108501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I10>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含有 AlGaAs 插入层的 InAs/GaAs 三色量子点红外探测器

Three-color InAs/GaAs quantum dot infrared photodetector with AlGaAs inserting layers

物理学报.2016, 65(10): 108502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.108502>

基于高阻 ZnO 薄膜的光电导型紫外探测器

Photoconductive UV detector based on high-resistance ZnO thin film

物理学报.2015, 64(19): 198501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.198501>

红外波长上转换器件中载流子阻挡结构的研究

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

物理学报.2015, 64(17): 178502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.178502>

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>

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>

## 利用表面微结构提高波长上转换红外探测器效率\*

王超<sup>1)</sup> 郝智彪<sup>1)†</sup> 王磊<sup>1)</sup> 康健彬<sup>1)</sup> 谢莉莉<sup>1)</sup> 罗毅<sup>1)‡</sup> 汪莱<sup>1)</sup>  
王健<sup>1)</sup> 熊兵<sup>1)</sup> 孙长征<sup>1)</sup> 韩彦军<sup>1)</sup> 李洪涛<sup>1)</sup> 王禄<sup>2)</sup> 王文新<sup>2)</sup> 陈弘<sup>2)</sup>

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)

(2015年11月23日收到; 2016年1月19日收到修改稿)

波长上转换红外探测器具有实现大面阵焦平面的优势, 但光提取效率是制约器件整体效率的关键因素之一. 本文主要研究利用表面微结构来提高波长上转换红外探测器的效率. 首先通过仿真计算研究了表面微结构参数对光提取效率的影响, 然后基于优化设计的参数, 采用聚苯乙烯纳米球掩膜刻蚀的方法制作了具有圆台型表面微结构的波长上转换红外探测器. 测试结果表明, 具有表面微结构的器件的光提取效率比无表面微结构的器件提高了130%. 本文制作表面微结构的方法可以实现波长上转换红外探测器整体效率的提高.

**关键词:** 波长上转换, 表面微结构, 纳米球, 光提取效率

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

**DOI:** 10.7498/aps.65.108501

## 1 引言

红外探测器在气象、环境、医疗、安防、军事等方面都有广泛的应用. 目前较为成熟的红外探测器包括热辐射计、碲镉汞探测器、铋化锑探测器和量子阱红外探测器等. 高性能、大尺寸以及具备多色探测潜力的成像系统是目前以及未来第三代红外探测技术的主要发展趋势<sup>[1,2]</sup>. 在面向大面阵成像探测时, 红外探测器阵列需要与硅基读出电路键合, 工艺复杂度高, 而且探测器材料与硅基读出电路材料之间存在较大的热失配<sup>[3]</sup>, 会导致低温下器件性能恶化甚至失效, 不利于制作大面阵焦平面. 波长上转换红外探测器<sup>[4]</sup>可将红外光子转变为能够被低暗电流的硅 CCD 探测的短波长光子, 这类器件无须键合读出电路, 通过与硅 CCD 的光学耦合实现成像探测, 可解决大面阵焦平面制作的困难. 王磊等<sup>[5]</sup>报道了基于量子级联运输的波长上转换红外探测器件, 在较低的工作偏压下实现了低

暗电流的波长上转换红外探测.

由于制作红外探测器的半导体材料与空气之间的折射率差造成的全反射效应限制了器件表面的光提取效率, 因此严重制约了波长上转换红外探测器的整体效率. 以 GaAs 材料为例, 根据菲涅耳定律可知, 只有当有源区出射光子的发射角度在约  $16^\circ$  的临界角范围之内时, 光子才能从器件表面出射, 其他大部分近红外光子则无法出射, 估算得到的光提取效率只有 2%—3%. 因此, 提高器件的光提取效率是提高波长上转换器件的整体效率的重要途径. 通过在器件表面制作具有适当形貌和尺寸的微结构, 可以改变发射光线在器件表面的入射角度分布, 在统计概率上将有更多的光从逃逸圆锥角内出射<sup>[6]</sup>, 从而提高光提取效率. 目前, 对于提高波长上转换红外探测器光提取效率尚缺乏较为系统的研究, 现有的文献研究大多关注的是 LED 器件的表面出光效率的提高. 陈依新等<sup>[7]</sup>将微米量级的表面图形应用于 AlGaInP 基 LED 器件, 可有效地提高器件的光提取效率, 并降低器件的发

\* 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 2015AA017101)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

热. 陈新莲等<sup>[8]</sup>利用空气孔和半径无序变化的光子晶体结构, 可使 GaN 基 LED 的光提取效率提高 53.8%. 其他可利用的方法有表面粗糙化<sup>[9-14]</sup>、表面纳米孔结构<sup>[15]</sup>、表面覆盖阳极氧化铝薄膜<sup>[16]</sup>以及表面亚微米级微结构等<sup>[17]</sup>.

本文采用自组装纳米球掩膜刻蚀的方法制作表面微结构, 以期提高波长上转换红外探测器件的效率. 该方法简单易行, 便于实现尺寸可控的大面积微结构制作. 首先通过模拟计算对表面微结构参数进行优化设计, 然后制作了具有表面微结构和无表面微结构的波长上转换红外探测器件, 最后进行对比测试, 分析了表面微结构对波长上转换器件效率的作用.

## 2 表面微结构设计 with 器件制作

### 2.1 表面微结构提高光提取效率的计算分析

本文采用的计算方法是基于蒙特卡罗统计原理的光线追迹法, 其基本原理是将折射定律应用于每一个折射面, 追迹具有代表性的光线通过光学系统的准确路径, 考虑的主要光学机理包括几何光学的反射(散射)、折射、透射效应等. 考虑到器件发光区的特点, 其出射光场的空间分布可近似为朗伯型. 使用与实际器件相同的材料参数, 建立具有表面微结构的器件模型, 同时考虑到纳米球掩膜的特点, 表面微结构采用圆台模型, 如图 1 插图所示.

首先分别研究圆台微结构的底面长度  $a = 2R$  ( $R$  为圆台底面半径)、侧面倾角  $\theta$ 、高度  $h$  等参数的改变对器件光提取效率的影响. 根据初步计算的结果并结合相关文献的报道, 在微结构形貌和其他参数相同的情况下, 相邻微结构的间距  $d$  等于微结构底面长度  $a$  时, 得到的结果往往是最优的. 因此, 计算微结构的其他参数变化对光提取效率的影响时, 保持微结构的间距  $d = a$  不变. 当器件表面没有任何微结构时, 计算得到的光提取效率约为 3.89%.

图 1(a) 是固定微结构的高度为 80 nm 和侧面倾角为  $70^\circ$  时, 光提取效率随微结构底面长度的变化. 计算结果表明: 当微结构底面长度在 40—200 nm 变化时, 器件的光提取效率达到 8%—9.3%, 且当微结构底面长度大于 80 nm 时, 光提取效率随微结构底面长度的变化趋缓, 并保持在 9% 以

上; 当微结构底面长度为 150 nm 时, 光提取效率为 9.23%.

图 1(b) 是固定微结构的底面长度为 150 nm 和微结构高度为 80 nm 时, 光提取效率随微结构侧面倾角的变化. 计算结果表明: 微结构侧面倾角对光提取效率的影响较为明显, 当倾角在  $50^\circ$ — $90^\circ$  变化时, 光提取效率达到 8.73%—9.26%; 当侧面倾角为  $75^\circ$  时, 光提取效率达到 9.26%.

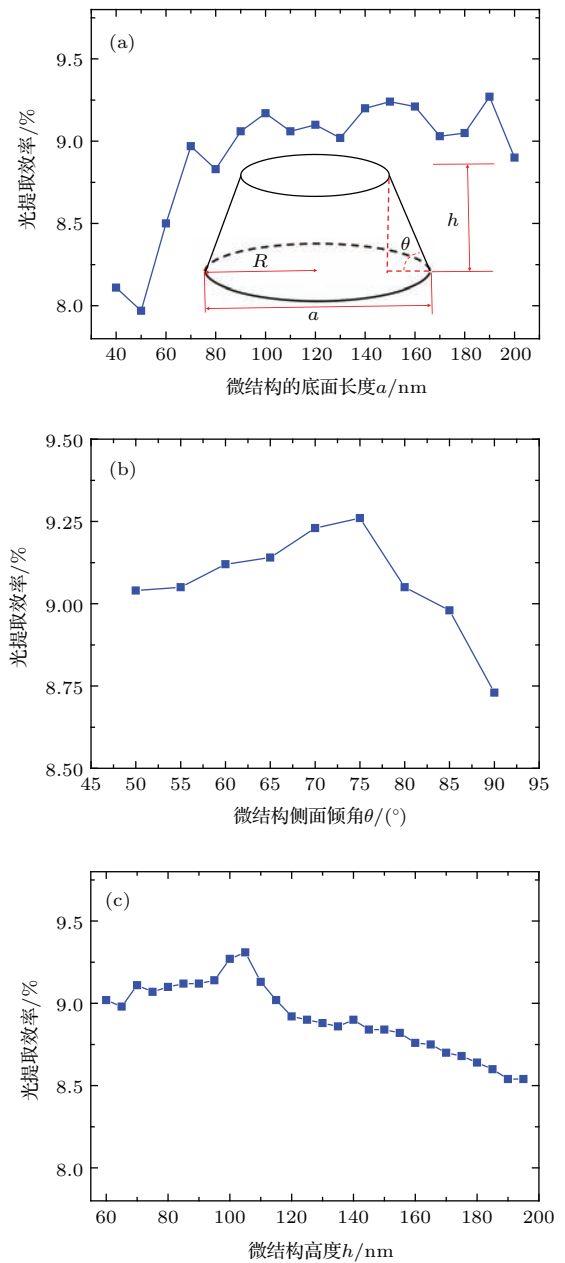


图 1 光提取效率随微结构的 (a) 底面长度、(b) 侧面倾角、(c) 高度变化的计算结果  
 Fig. 1. The calculated light extraction efficiency as a function of (a) the bottom length, (b) the side slope angle and (c) the height of the microstructure.

图 1(c) 是固定微结构的底面长度为 150 nm 和侧面倾角为  $75^\circ$  时, 光提取效率随微结构高度的变化. 计算结果表明: 随着微结构高度的增加, 光提取效率的变化趋势是先上升后下降, 当微结构高度在 60—120 nm 变化时, 光提取效率达到 8.9%—9.3%; 当微结构的高度为 105 nm 时, 光提取效率可以达到 9.31%.

综合上述计算结果, 当微结构的底面长度为 150 nm、高度为 105 nm、侧面倾角为  $75^\circ$  时, 计算得到的光提取效率约为 9.31%, 与无微结构的情况相比, 光提取效率可提高 139%.

## 2.2 器件制作

器件制作采用的外延材料和器件基本结构与王磊等<sup>[5]</sup>所报道的相同. 外延片由分子束外延设备在 (100) GaAs 衬底上生长. 器件的基本结构包括吸收区、级联输运区和发光区. 吸收区包括十个周期  $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}/\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$  耦合量子阱 (2.1 nm/3 nm); 级联输运区由  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}$  啁啾超晶格组成, 各量子阱中的电子能级能量逐个降低; 近红外发光区是阱宽为 3.1 nm 的  $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  量子阱, 78 K 时的发光波长为 770 nm. 吸收区吸收红外光后, 量子阱基态能级的电子跃迁到激发态能级, 通过共振隧穿注入到输运区, 光生电子在输运区的迁移依赖于子带间的快速弛豫过程, 最后注入发光区的量子阱中, 与从 P 型接触层注入到发光区的空穴发生辐射复合, 从而实现短波长光子的发射.

根据前文的计算结果, 优选的微结构底面长度为 150 nm, 微结构间距也为 150 nm. 考虑到纳米球掩膜刻蚀工艺的特点<sup>[18]</sup>, 应当选用直径为 300 nm 的纳米球. 我们购买得到的聚苯乙烯 (PS) 纳米球平均直径为 245 nm, 虽略小于 300 nm, 但是根据图 1(a) 计算结果, 仍有望获得较大的光提取效率.

首先采用化学自组装方法, 使纳米球尽量均匀且单层地平铺在样品表面. 平铺后的纳米球在样品表面紧密排列, 因此需要利用氧气等离子体辉光对纳米球的尺寸进行缩减. 为了减少热集聚效应对纳米球形貌的影响, 采用两次氧气辉光的方式将纳米球缩减到需要的尺寸, 该方法还可以有效清除覆盖在纳米球表面的其他残余有机物质. 然后以纳米球为掩膜, 采用等离子体干法刻蚀工艺在样品表面刻蚀出微结构, 并在空气氛围下经高温热退火去除残余的纳米球. 图 2(a) 为热退火处理后刻蚀样品表

面的电镜图. 如图所示, 在样品表面获得了形貌良好、排列均匀的圆台型微结构, 观察电镜图可知圆台底面长度约为 140 nm、高度约为 110 nm、侧面倾角约为  $80^\circ$ 、间距约为 120 nm, 与前文计算得到的微结构参数比较接近. 用实际得到的微结构参数重新计算, 得到的光提取效率为 8.6%, 与无微结构时相比提高了 121%.

完成表面微结构制作后, 再经过多次光刻、湿法腐蚀、两次电极制备、钝化、退火等工艺, 最终完成器件制作. 图 2(b) 为具有表面微结构的器件台面区域电镜俯视图. 器件台面的尺寸为  $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ , 表面依次有表面微结构、Ti/Au 透明电极以及  $\text{SiN}_x$  钝化层. 使用相同的外延片和器件工艺, 制作了表面有微结构的器件 A 和表面无任何微结构的器件 B.

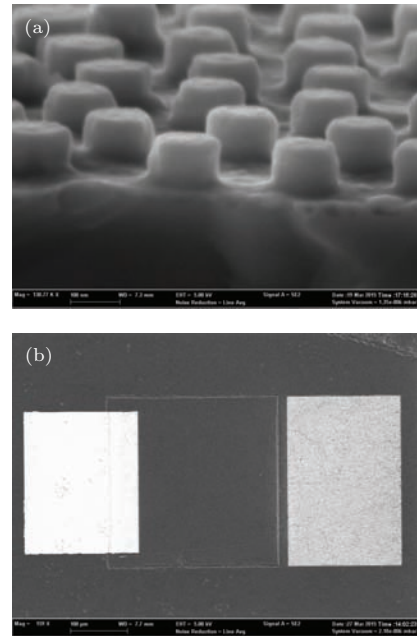


图 2 (a) 采用纳米球掩膜刻蚀工艺制作的表面微结构电镜图片; (b) 制作完成的器件的电镜图片

Fig. 2. Scanning electron microscopy images of (a) the surface microstructure fabricated by using nanosphere mask etching process and (b) the device.

## 3 结果与讨论

为了对制作完成的器件进行测试, 将波长上转换器件和 Si 二极管探测器 (Hamamatsu S2386-45K) 紧靠并固定在液氮杜瓦的冷指上, 使器件的发光面正对探测器, 测试温度为 78 K. 器件的衬底打磨出一个  $45^\circ$  面用于耦合入射的红外光. 标准温度为 1223 K 的黑体光源发出的红外光经过滤波片后由器件的  $45^\circ$  面入射, 器件发出的近红外光被 Si



探测器收集探测并产生响应电流. 通过测量上转换器件和Si探测器的电流, 可以计算器件的光提取效率.

为了获得良好的器件红外响应特性以及测试信噪比, 器件的工作偏压选取在其开启前的平带电压, 此时器件能带结构基本被拉平, 平衡p-n结的内建电场, 同时级联输运区形成载流子输运所需的声子台阶, 有利于吸收区产生的光生电子单向输运到发光区. 图3(a)所示为具有表面微结构的器件A以及后置硅探测器的归一化红外响应谱. 由图可见, 器件A与后置硅探测器的红外响应谱基本相符, 峰值波长均为4 μm. 这表明引起后置硅探测器的响应信号是由红外光对器件作用而造成器件发光而产生的, 波长上转换红外探测器的基本功能达到预期. 图3(b)对比了器件A和器件B的归一化红外响应谱, 二者几乎完全一致, 表明制作表面微结构对上转换器件的基本工作特性并无影响.

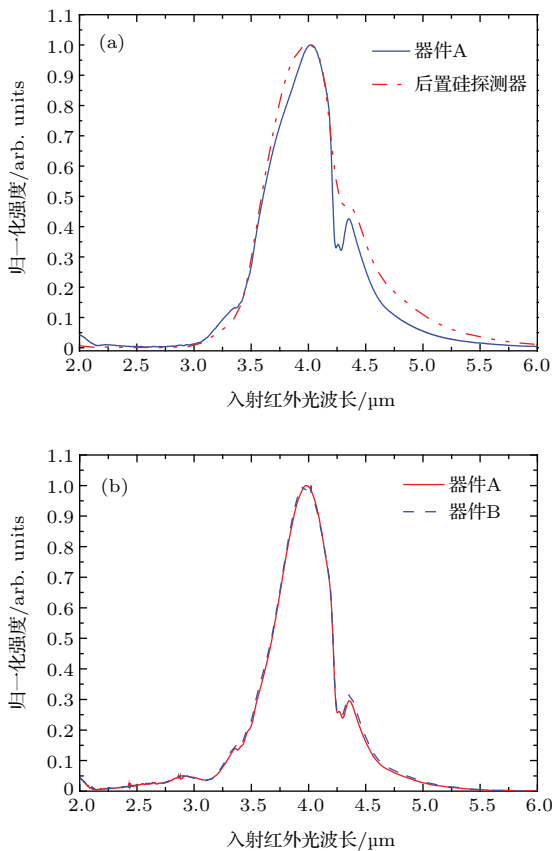


图3 波长上转换器件与后置Si探测器的归一化红外响应谱 (a) 器件A与后置Si探测器的归一化红外响应谱; (b) 器件A与器件B的归一化红外响应谱

Fig. 3. The normalized infrared response spectra of up-conversion infrared photodetectors and silicon detector: (a) The response spectra of device A and silicon detector; (b) the response spectra of device A and device B.

图4为器件A和器件B在无红外光照下的暗电流随偏压变化的曲线. 如图4所示, 在器件开启之前, 其暗电流随偏压的增加整体呈缓慢上升的趋势, 两种器件的变化趋势基本一致, 暗电流在同一量级. 但是器件B的整体暗电流水平略高于器件A, 在工作电压下, 器件A和器件B的暗电流分别为0.2和0.8 nA, 这可能是由于材料不均匀或工艺差别等因素造成的. 上述测试结果表明, 表面微结构工艺并未对器件造成损伤.

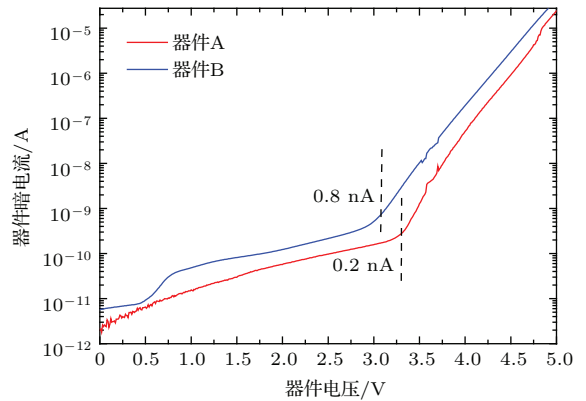


图4 (网刊彩色) 器件暗电流随器件偏压的变化

Fig. 4. (color online) The dark currents of the devices versus device bias.

在相同的测试光路下, 使用半导体参数测试仪控制器件A和器件B的工作偏压, 并根据有、无入射红外光情况下的电流变化得到器件和后置硅探测器的光响应电流. 后置硅探测器响应电流与器件响应电流的比值和器件的辐射效率  $\eta_{\text{辐射}}$ 、光提取效率  $\eta_{\text{提取}}$ 、Ti/Au透明电极的透射效率  $\eta_{\text{透射}}$ 、硅探测器的光收集效率  $\eta_{\text{收集}}$  以及硅探测器的量子效率  $\eta_{\text{PD}}$  有关. 具体表达式如下所示:

$$\frac{I_{\text{PD}}}{I_{\text{DE}}} = \eta_{\text{辐射}} \eta_{\text{提取}} \eta_{\text{透射}} \eta_{\text{收集}} \eta_{\text{PD}}$$

在两种器件的测试过程中, 硅探测器的光收集效率  $\eta_{\text{收集}}$  和量子效率  $\eta_{\text{PD}}$  是相同的. 器件发光区量子阱的辐射复合效率  $\eta_{\text{辐射}}$  在理论上与器件的响应电流有关, 相同的器件响应电流对应的辐射复合效率近似相同. 由于器件A和器件B非同一种工艺制作, 其金属透明电极的透射率可能是不同的. 本文利用两个器件蒸镀透明电极时的透明玻璃陪片, 测量得到对应于器件的发光波长时器件A和器件B的透明电极透射率分别为42%和56%. 基于上述测量数据, 可以得到器件A和器件B的光提取效率之比.

在工作电压下, 通过改变入射光强得到器件 A 和器件 B 对应的后置硅探测器响应电流以及两个器件光提取效率之比随器件响应电流的变化, 如图 5 所示. 测试结果表明, 在相同的器件响应电流下, 具有表面微结构的器件 A 对应的后置硅探测器响应电流明显高于无表面微结构的器件 B; 响应电流在 250—500 nA 范围内变化时, 器件 A 的光提取效率较器件 B 提高了 60%—130%.

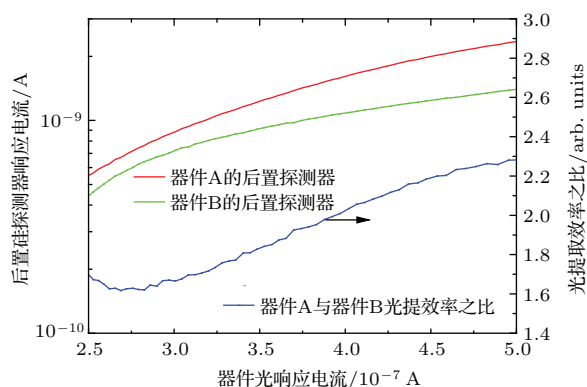


图 5 (网刊彩色) 后置硅探测器的响应电流和器件的光提取效率随器件响应电流的变化

Fig. 5. (color online) The relationship between the response current of silicon detector as well as the light extraction efficiency and the response current of device.

理论上, 表面微结构对波长上转换器件光提取效率的影响与入射红外光光强是无关系的. 但测试结果却是随入射光强的增加, 器件 A 与器件 B 的光提取效率之比也是增加的, 可能的原因如下: 尽管器件 A 和器件 B 采用的是相同的外延材料和工艺, 但实际上两个器件并非全同, 因此在相同的器件响应电流下, 二者的辐射复合效率可能略有不同, 所以在计算光提取效率之比时直接将两个器件的辐射复合效率抵消会造成偏差. 随着入射红外光光强增加, 器件的响应电流逐渐增大, 同时对应的辐射复合效率趋于饱和, 此时按上述方法计算得到的光提取效率之比更接近实际情况. 综合上述测试结果和分析可以得出, 通过在器件表面制作微结构, 可以使器件的光提取效率提高 130%. 相应地, 波长上转换红外探测器的总体效率也可以获得等量的提高.

## 4 结 论

本文研究了表面微结构对波长上转换红外探测器效率的提升作用. 本文首先通过仿真计算, 研

究了微结构的底面长度、侧面倾角和高度等参数对光提取效率的影响, 获得了优化的参数设计. 在此基础上, 采用聚苯乙烯纳米球掩膜刻蚀的方法制作了具有圆台型表面微结构的波长上转换红外探测器. 与无表面微结构的器件相比, 具有表面微结构的器件在相同工作电流下的光提取效率提高可达 130%, 同时器件的基本特性并无变化. 本文工作表明, 制作表面微结构是提高波长上转换红外探测器效率的有效方法.

## 参考文献

- [1] Rogalski A 2003 *Prog. Quant. Electron.* **27** 59
- [2] Liu W, Ye Z H 2011 *Laser Infrar.* **41** 365 (in Chinese) [刘武, 叶振华 2011 *激光与红外* **41** 365]
- [3] Dupont E, Byloos M, Gao M, et al. 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 182
- [4] Yang Y, Zhang Y H, Shen W Z, et al. 2011 *Prog. Quant. Electron.* **35** 77
- [5] Wang L, Hao Z B, Luo Y, et al. 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 131107
- [6] Schnitzer I, Yablonovitch E, Caneau C, et al. 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 2174
- [7] Chen Y X, Shen G D, Han J R, et al. 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 545 (in Chinese) [陈依新, 沈光地, 韩金茹 等 2010 *物理学报* **59** 545]
- [8] Chen X L, Kong F M, Li K, et al. 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 017805 (in Chinese) [陈新莲, 孔凡敏, 李康 等 2013 *物理学报* **62** 017805]
- [9] Huh C, Lee K S, Kang E J, et al. 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 9383
- [10] Huang H W, Kao C C, Chu J T, et al. 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 983
- [11] FuJii T, Gao Y, Sharma R, et al. 2004 *J. Appl. Phys.* **84** 855
- [12] Lee Y J, Lu T C, Kuo H C, et al. 2007 *Mat. Sci. Eng. B* **138** 157
- [13] Tamboli A C, McGroddy K C, Hu E L 2009 *Phys. Status Solidi C* **6** 807
- [14] Zike L, Wei G, Chen X, et al. 2010 *J. Semicond.* **31** 114011
- [15] Ma L, Jiang W J, Zou D S, et al. 2011 *J. Phys: Conf. Ser.* **276** 012077
- [16] Wang C C, Lu H C, Liu C C, et al. 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 428
- [17] Song Y M, Choi E S, Yu J S, et al. 2009 *Opt. Express.* **17** 20991
- [18] Hu Y, Hao Z, Lai W, et al. 2015 *Nanotechnology* **26** 075302

# Improvement on the efficiency of up-conversion infrared photodetectors using surface microstructure\*

Wang Chao<sup>1)</sup> Hao Zhi-Biao<sup>1)†</sup> Wang Lei<sup>1)</sup> Kang Jian-Bin<sup>1)</sup> Xie Li-Li<sup>1)</sup> Luo Yi<sup>1)‡</sup>  
 Wang Lai<sup>1)</sup> Wang Jian<sup>1)</sup> Xiong Bing<sup>1)</sup> Sun Chang-Zheng<sup>1)</sup> Han Yan-Jun<sup>1)</sup>  
 Li Hong-Tao<sup>1)</sup> Wang Lu<sup>2)</sup> Wang Wen-Xin<sup>2)</sup> Chen Hong<sup>2)</sup>

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 23 November 2015; revised manuscript received 19 January 2016 )

## Abstract

In recent decades, infrared (IR) detection technology has been widely used in many fields such as weather monitoring, environmental protection, medical diagnostics, security protection, etc. With the progress and mature of the technologies, more attention has been paid to the imaging detections of weak IR signals. So the higher efficiency of the device is required. Moreover the next-generation IR photodetection technology focuses on large-scale, high-speed and low-dark-current imaging. The mechanical bonding between infrared detector chip and silicon readout circuit inevitably causes a thermal mismatch problem. Up-conversion IR photodetectors can solve the problem about the performance deterioration of photodetector and the thermal mismatch with silicon-based readout circuit, hence they have great advantages in realizing large-format focal plane array detection.

However, the poor light extraction efficiency due to total reflection severely restricts the overall efficiency of the up-conversion device, which has become one of the bottlenecks to improve the device efficiency. In this paper, surface microstructures with micro-pillar morphology are designed and fabricated on quantum-cascade up-conversion IR photodetectors. The effect on the up-conversion efficiency is investigated by enhancing the light extraction efficiency.

Firstly, by the optical ray retracing method, the influence of surface microstructure on light extraction efficiency is studied when considering different morphology parameters, and optimized surface microstructure is designed to possess a pillar base length of 150 nm, height of 105 nm and side wall angle of 75°.

Then based on the results of simulation, up-conversion IR photodetectors with surface microstructures are fabricated using polystyrene nanospheres as mask. The self-assembled monolayer nanospheres are first etched to a proper size by using O<sub>2</sub> plasma, then the patterns are transferred to SiN<sub>x</sub> film, which acts as an ICP dry etching mask of the micro-pillars. Finally, the up-conversion device and a silicon detector are together loaded on a cold finger of a cryogenic dewar. The characteristics of the up-converter and up-conversion system are evaluated using a blackbody source.

The experimental results show that the devices with and without surface microstructure exhibit similar IR responses and dark currents, while the emission of device with microstructure is obviously increased. Taking into consideration other factors related to external quantum efficiency, the light extraction efficiency of the device with micro-pillar structure on surface can be increased by up to 130%. Therefore it can be concluded that this method is an efficient way to improve the efficiency of up-conversion IR photodetector. The finding in this paper can also be applied to other semiconductor device with light extraction efficiency.

**Keywords:** up-conversion, surface microstructure, light extraction efficiency, polystyrene spheres

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

**DOI:** 10.7498/aps.65.108501

\* 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 National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2015AA017101).

† Corresponding author. E-mail: [zbhao@tsinghua.edu.cn](mailto:zbhao@tsinghua.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [luoy@tsinghua.edu.cn](mailto:luoy@tsinghua.edu.cn)