

利用纳米球提高红外波长上转换探测器效率

刘顺瑞 聂照庭 张明磊 王丽 冷雁冰 孙艳军

Improvement in the efficiency of up-conversion infrared photodetector by nanospheres

Liu Shun-Rui Nie Zhao-Ting Zhang Ming-Lei Wang Li Leng Yan-Bing Sun Yan-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 188501 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.188501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.188501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I18>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

InGaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器中势垒生长温度的研究

Barrier growth temperature of InGaAs/AlGaAs-quantum well infrared photodetector

物理学报.2017, 66(6): 068501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.068501>

基于谐振腔增强型石墨烯光电探测器的设计及性能分析

Design and performance analysis of microcavity-enhanced graphene photodetector

物理学报.2016, 65(13): 138501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.138501>

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 layer

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>

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>

# 利用纳米球提高红外波长上转换探测器效率\*

刘顺瑞<sup>1)</sup> 聂照庭<sup>2)</sup> 张明磊<sup>1)</sup> 王丽<sup>1)</sup> 冷雁冰<sup>1)</sup> 孙艳军<sup>1)†</sup>

1)(长春理工大学光电工程学院, 长春 130022)

2)(长春理工大学电子信息工程学院, 长春 130022)

(2017年3月9日收到; 2017年6月21日收到修改稿)

在红外波长上转换探测器氮化硅( $\text{SiN}_x$ )钝化层制作单层六角密排的二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )纳米球阵列, 以提高红外波长上转换探测器的整体效率. 采用自组装的方法在器件钝化层上制备了直径分别约为300, 450, 750和1000 nm的 $\text{SiO}_2$ 纳米球, 并与无表面微纳结构器件进行对比测试. 结果表明: 钝化层附着 $\text{SiO}_2$ 纳米球能有效地提高红外波长上转换器的光提取效率; 当 $\text{SiO}_2$ 纳米球直径为750 nm时的光提取效率最优, 是无表面微纳结构器件的2.6倍, 可实现低成本制作高效率红外波长上转换探测器.

**关键词:** 波长上转换, 纳米球层, 光提取效率, 光致发光**PACS:** 85.60.Gz, 81.16.Rf, 78.60.Fi**DOI:** 10.7498/aps.66.188501

## 1 引言

近几十年来, 红外检测技术在天气监测、环境保护、医疗诊断、安全防护等领域得到了广泛的应用, 随着技术的进步和成熟, 弱红外信号成像检测得到更多的关注<sup>[1,2]</sup>. 半导体红外波长上转换探测器有实现超大面阵焦平面的优势, 具有非常重要的民用和军用价值, 目前较为成熟的面向大面阵成像的焦平面探测器制作时, 每个红外探测器均需与硅基读出电路进行键合<sup>[3-5]</sup>. 由于探测器与读出电路材料之间的热膨胀系数不同, 将引入额外噪声并降低其可靠性<sup>[6]</sup>. 硅电荷耦合器件(Si-CCD)探测器探测的是短波长光子, 红外波长上转换探测器恰能将红外光子转变为短波长光子<sup>[7]</sup>, 其通过与Si-CCD的光学耦合实现探测, 从而解决大面阵焦平面制作的难题.

红外波长上转换探测器的基本结构包括n型GaAs层、电子注入层、有源区以及p型AlGaAs层、Ti/Au透明电极以及 $\text{SiN}_x$ 钝化层. 由于 $\text{SiN}_x$ 钝化层折射率为2左右, 与空气存在较大的折射率差值

而发生全反射, 大部分光子被材料再吸收或者形成波导模, 最终只有少数光子能出射, 严重制约了红外波长上转换探测器的整体效率<sup>[8,9]</sup>. 一般而言, 在器件表面制作微纳结构破坏材料界面的全反射是直接提高光提取效率的方法, 如光子晶体<sup>[10,11]</sup>、表面纳米孔结构<sup>[12]</sup>、纳米球掩模刻蚀<sup>[13]</sup>等, 这些方法往往工艺复杂且易影响器件的电学特性, 导致漏电较高或暗电流较大等问题出现<sup>[14]</sup>. 不使用刻蚀工艺可有效避免上述问题, 如Yuan和Lu<sup>[15]</sup>采用机械切削加工的方法进行发光二极管(LED)表面强化出光微结构的加工, 发光效率提升了49%; Ye等<sup>[16]</sup>在LED的n型GaN表面制备ZnO纳米结构, 使光输出增加近3倍; 王超等<sup>[17]</sup>利用聚苯乙烯纳米球掩模刻蚀的方法在红外波长上转换器外延片表面制作圆台结构, 使光提取效率提高2.3倍.  $\text{SiO}_2$ 纳米球是一种常用的光散射介质, 具有成本低、尺寸差异小、可大面积单层制备等特点<sup>[18,19]</sup>, 然而将其用于提高红外波长上转换探测器效率的研究却鲜有报道. 此外, 不同直径的纳米球阵列对光提取效率也有不同的影响, 因此确定最优的纳米

\* 国家自然科学基金(批准号: 11474037, 11474041)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [custsun@126.com](mailto:custsun@126.com)

球直径也是非常重要的。

本文采用自组装的方法在红外波长上转换探测器钝化层制作单层六角密排的SiO<sub>2</sub>纳米球,以期提高上转换器的光提取效率,该方法成本低廉且简单易行,便于大面积单层制备.首先通过自组装的方法制作了钝化层附着直径为300, 450, 750和1000 nm SiO<sub>2</sub>纳米球的红外波长上转换器,然后和无表面微纳结构的器件进行对比测试,并分析了SiO<sub>2</sub>纳米球对红外波长上转换器效率的影响机理.

## 2 实验方法

实验选取相同条件下生长的外延片,结构自下而上依次是衬底、约600 nm厚的n型GaAs接触层、约20 nm厚的In<sub>0.08</sub>Ga<sub>0.92</sub>As电子注入层、有源区、p型AlGaAs和GaAs接触层、名义厚度为2.5 nm/5 nm的Ti/Au透明电极,表层为SiN<sub>x</sub>钝化层,器件在80 K时的发光波长为770 nm左右.

制作单层密排的SiO<sub>2</sub>纳米球步骤为:亲水处理-匀SiO<sub>2</sub>纳米球-自组装.首先将器件浸入H<sub>2</sub>O/NH<sub>4</sub>OH/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>以50:10:3配比的溶液进行亲水处理,然后将器件用去离子水冲洗.匀SiO<sub>2</sub>纳米球使用Smartcoater 100型匀胶机,首先在器件

表面滴上约10 μL的10%固体单分散SiO<sub>2</sub>纳米球乳液,先以1000 r/min的低速旋涂5 s,使乳液均匀旋涂于器件钝化层表面,再用2500 r/min的高速旋转将SiO<sub>2</sub>球在钝化层表面旋涂为单层,得到单层规则排列的纳米球阵列结构.但此时的SiO<sub>2</sub>纳米球排列并非密排,需将旋涂有SiO<sub>2</sub>球的器件放入滴有表面活性剂十二烷基硫酸钠的溶液中,使SiO<sub>2</sub>纳米球自组装呈六角密排阵列结构,形成单层微球膜重新沉积于器件表面.最后将钝化层表面附着SiO<sub>2</sub>纳米球的器件放在干燥箱中烘烤固化.图1是直径为750 nm的SiO<sub>2</sub>纳米球在大面积分布的扫描电子显微镜(SEM)图,可以看出纳米球排列无双层或多层现象,虽偶见缺陷球形和较小缝隙,但总体范围内SiO<sub>2</sub>纳米球是六角单层密排的.

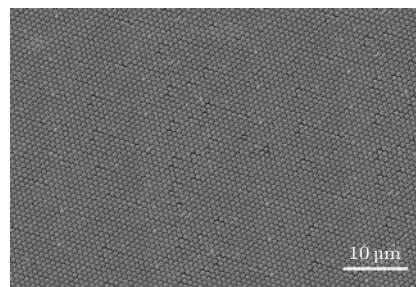


图1 大面积直径为750 nm的SiO<sub>2</sub>纳米球阵列SEM图  
Fig. 1. SEM image of the large area SiO<sub>2</sub> sphere.

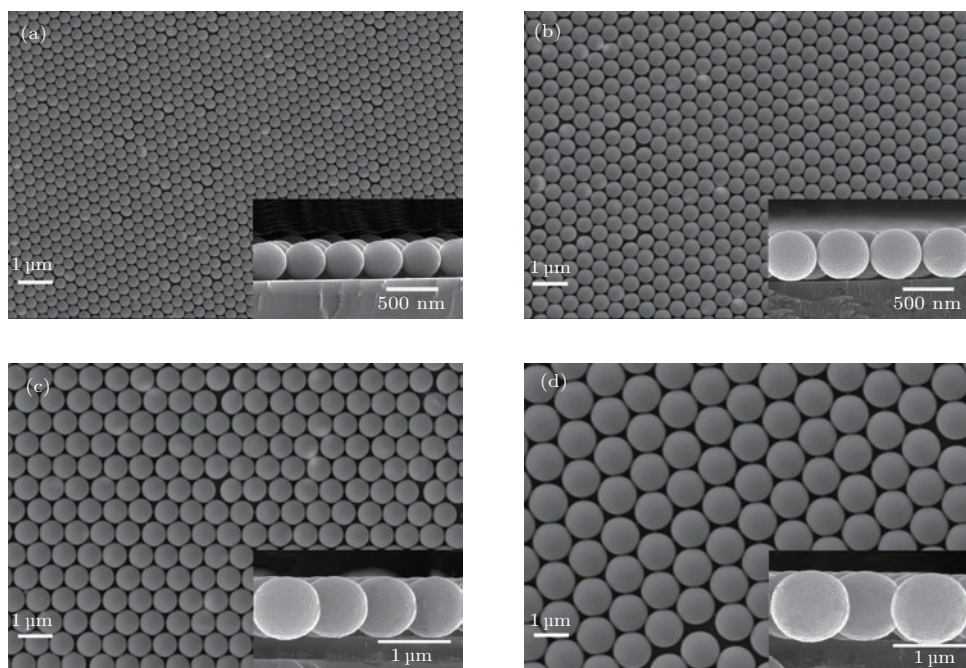


图2 在红外波长上转换器钝化层表面制作的不同直径的SiO<sub>2</sub>纳米球SEM图 (a) 300 nm; (b) 450 nm; (c) 750 nm; (d) 1000 nm  
Fig. 2. SEM images of the SiO<sub>2</sub> sphere formed onto the SiN<sub>x</sub> layer with different sizes: (a) 300 nm; (b) 450 nm; (c) 750 nm; (d) 1000 nm.

为了研究纳米球尺寸对器件效率的影响,我们在钝化层表面分别制作了不同直径的SiO<sub>2</sub>纳米球阵列层. 图2为不同尺寸纳米球的SEM图,可以看出, SiO<sub>2</sub>纳米球的大小分布比较均匀,仅有少许缺陷球形,且基本呈六角单层密排的周期性阵列结构. 实验中共制备了5个器件,器件A为表面无微纳结构的红外波长上转换器,作为参考样品;器件B—E表面分别制作了直径约为300, 450, 750和1000 nm的SiO<sub>2</sub>纳米球单层六角密排阵列结构.

### 3 实验结果与分析

实验装置如图3所示,装配时,要使红外波长上转换器固定在杜瓦瓶的冷指上并使其出光面尽量靠近探测器光敏面. 红外响应谱测试使用的硅基探测器型号为Hamamatsu S386-45K,测试时光源选用950 °C黑体,入射光需先经过长通滤波片和带通滤波片滤除可见光以及近红外光,再通过抛物面反射镜汇聚到器件表面的45°光耦合面上. 工作偏压选取在其开启前的平带电压,此时红外波长上转换器能带在正向工作电压下被拉平,有利于电子注入层产生的电子单向输运至有源区,进而获得良好的器件红外响应特性及测试信噪比. 硅探测器的响应电流及红外波长上转换的响应电流特性均采用Agilent 4155C半导体参数测试仪直接测量.

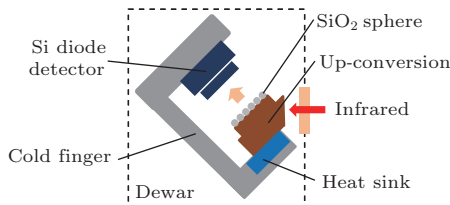


图3 (网刊彩色) 测试系统示意图

Fig. 3. Schematic diagram of the measurement setup.

图4(a)所示为参考样品A及其后置硅探测器的归一化响应谱,可以看出,二者红外响应谱峰值波长均为4 μm且谱型基本相符,表明是由红外光使上转换器发光从而引起后置硅探测器的响应信号,即红外波长上转换探测器基本功能达到预期. 图4(b)为钝化层附着SiO<sub>2</sub>纳米球的四个器件与参考样品的归一化响应谱,五个器件的峰值波长和谱型均非常一致,表明在钝化层制作SiO<sub>2</sub>纳米球对器件的基本工作特性无影响.

红外波长上转换探测系统的黑体响应测试中,光提取效率 $\eta_{\text{提取}}$ 可由下式表示:

$$\eta_{\text{提取}} \propto \frac{I_{\text{CCD}}}{\eta_{\text{透射}}\eta_{\text{收集}}\eta_{\text{量子}}\eta_{\text{辐射}}I_{\text{UP}}}, \quad (1)$$

式中,  $I_{\text{CCD}}$ 表示硅探测器响应电流,  $\eta_{\text{透射}}$ 表示透明电极的透射效率,  $\eta_{\text{收集}}$ 表示硅探测器的光收集效率,  $\eta_{\text{量子}}$ 表示硅探测器的量子效率,  $\eta_{\text{辐射}}$ 表示上转换器的辐射效率,  $I_{\text{UP}}$ 表示上转换器响应电流.

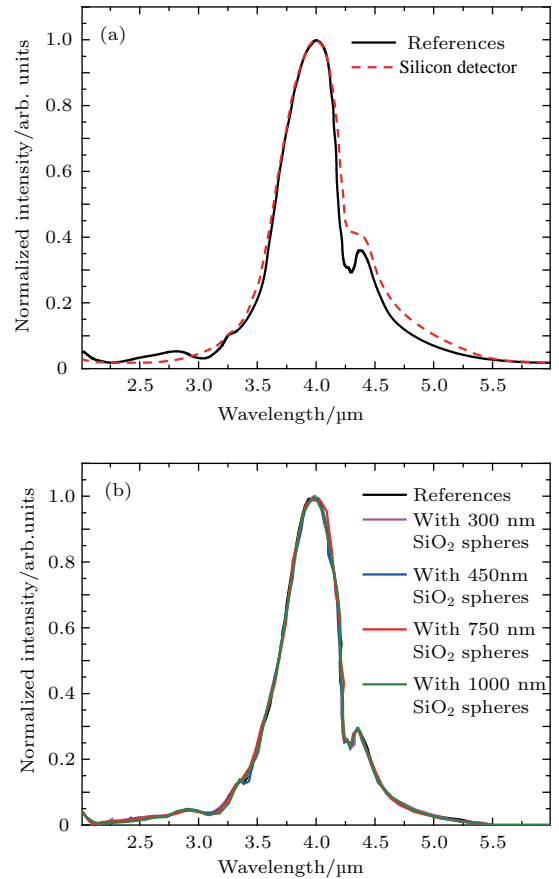


图4 (网刊彩色) 钝化层附着SiO<sub>2</sub>纳米球的器件与参考样品A的归一化红外响应谱 (a) 器件A与后置Si探测器的归一化红外响应谱; (b) 器件A与器件B—E的归一化红外响应谱

Fig. 4. (color online) 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—E.

理论上红外波长上转换器有源区量子阱的辐射复合效率与其响应电流相关,相同的器件响应电流对应的辐射复合效率近似相同. 测试光路相同同时可以获得相同的光子收集效率以及硅探测器量子效率,同一轮工艺制作的器件金属透明电极的透射率也是相同的. 当两个器件的响应电流相同时,可

以认为后置硅探测器响应电流的不同仅由上转换器发光效率不同造成. 因此, 可比较不同红外波长上转换器响应电流相同时其后置硅探测器的响应电流的大小, 进而分析比较不同上转换器的光提取效率.

在相同的测试光路下控制红外波长上转换器 A—E 的工作偏压, 并根据有、无入射红外光的电流变化可测得器件和对应的后置硅探测器的光响应电流. 通过改变入射光强, 可以得到器件 A—E 的响应电流与其对应的后置硅探测器响应电流的变化, 以及器件 B—E 分别与参考样品 A 的光提取效率之比随器件响应电流的变化. 后置硅探测器的响应电流随器件响应电流的变化测试结果如图 5 所示, 可以看出, 四个钝化层附着 SiO<sub>2</sub> 纳米球的红外波长上转换器对应的硅探测器响应电流均明显高于参考样品 A, 随着 SiO<sub>2</sub> 纳米球直径的逐渐增大, 器件的光提取效率也有所增加; 在纳米球直径与出射光波波长接近, 即纳米球直径为 750 nm 时器件的光提取效率最大; 但当 SiO<sub>2</sub> 纳米球直径继续增大时, 器件的光提取效率有减弱的趋势.

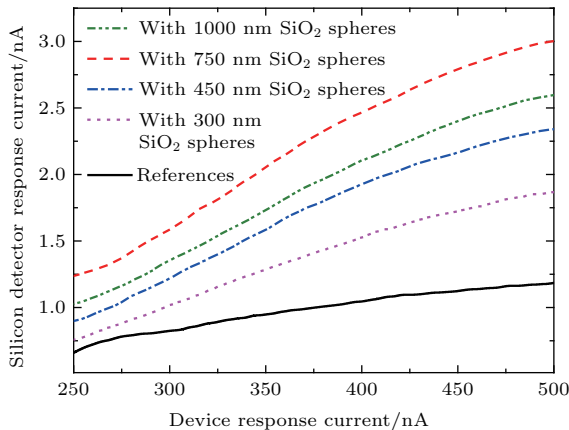


图 5 后置硅探测器的响应电流随器件响应电流的变化  
Fig. 5. The relationship between the response current of silicon detector and the response current of device.

由图 6 可以看出, 在相同的响应电流条件下, 器件 B—E 的光提取效率明显高于参考样品 A. 例如, 在上转换器响应电流为 250 nA 时, 器件 B—E 的后置硅探测器响应电流较参考样品 A 分别增加 1.16, 1.46, 1.9 和 1.54 倍; 而在上转换器响应电流为 500 nA 时, 器件 B—E 的后置硅探测器响应电流较参考样品 A 分别增加 1.59, 2.02, 2.6 和 2.18 倍, 比响应电流为 250 nA 时的增加倍数要大些, 其原因是由于器件表面附着的纳米球会散射部分红外光

到有源层中, 使红外波长上转换器能够吸收更多的红外光, 当入射红外光光强增大时, 纳米球散射的光子也随之增多. 由于不同直径的纳米球散射情况不同, 导致有源层对红外光的总吸收率不同, 致使各个上转换器有源层对红外光的总吸收率也不同. 同时, 随着入射光光强的加大, 红外波长上转换器的响应电流也逐渐增大, 对应的辐射复合效率将趋于饱和状态, 此时得出的光提取效率比值更接近实际情况.

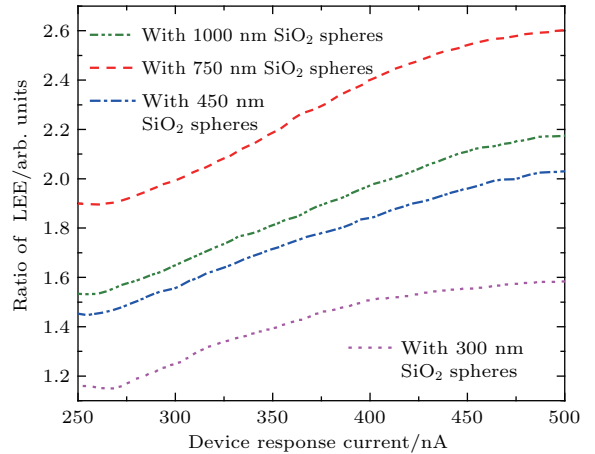


图 6 器件的光提取效率随器件响应电流的变化  
Fig. 6. The relationship between the light extraction efficiency (LEE) and the response current of device.

由上述实验结果可以得出, 在红外波长上转换探测器钝化层制作单层六角密排的 SiO<sub>2</sub> 纳米球可以提高其光提取效率, 且 SiO<sub>2</sub> 纳米球直径为 750 nm 时光提取效率最优, 为无表面微纳结构器件的 2.6 倍.

对于表面无微纳结构的 SiN<sub>x</sub> 钝化层, 可由斯涅耳定律计算得到全反射临界角为 32°, 表明只有小于临界角的局域半锥内的光线能够出射. 而表层制作了 SiO<sub>2</sub> 纳米球阵列结构的钝化层光出射效果如图 7 所示. 单层密排的周期性 SiO<sub>2</sub> 纳米球结构具有光栅效应, 等效介质理论指出, 当光通过特征尺寸小于波长的微纳结构时, 结构表面的细节轮廓不能被光波识别出, 仅存在零级衍射, 此时微纳结构等效于一层均匀介质, 更适宜于透射<sup>[20]</sup>. 二维亚波长周期结构的等效折射率表示为

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{(1 - f^2 + f^2 n_s^2)[f^2 + (1 - f^2)n_s^2] + n_s^2}{2[f^2 + (1 - f^2)n_s^2]}} \quad (2)$$

进一步得到透射率公式为

$$T = 1 - \frac{(1 - n_s)^2 \cos^2 \delta + \left(\frac{n_s}{\varphi} - \varphi\right)^2 \sin^2 \delta}{(1 + n_s)^2 \cos^2 \delta + \left(\frac{n_s}{\varphi} + \varphi\right)^2 \sin^2 \delta}, \quad (3)$$

式中  $f$  为体填充因子,  $n_s$  指  $\text{SiO}_2$  折射率, TE 模时  $\varphi = n_{\text{eff}} \cos \theta$ , TM 模时  $\varphi = n_{\text{eff}} / \cos \theta$ ,  $\theta$  为入射角,  $\delta = 2\pi d n_{\text{eff}} \cos \theta / \lambda$ ,  $d$  为等效膜层厚度, 在此指纳米球直径,  $\lambda$  为工作波长. 可以看出, 透射率与体填充因子和纳米球直径有关, 故改变纳米球直径时, 光提取效率有所不同; 同时  $\text{SiO}_2$  纳米球直径与发光波长相接近时, 可将其看作有效散射源 [21], 即  $\text{SiO}_2$  纳米球阵列结构能改变光的传播方向, 把部分波导模耦合出钝化层表面, 实现纳米图形化表面的作用, 使红外波长上转换探测器总体效率也获得相应的提高.

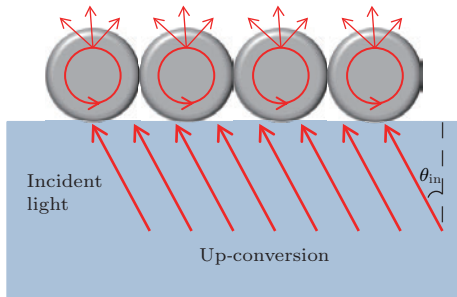


图7 附有单层密排  $\text{SiO}_2$  纳米球的钝化层出光示意图  
Fig. 7. Light-ray traces in the  $\text{SiN}_x$  layer with  $\text{SiO}_2$  sphere.

为进一步分析  $\text{SiO}_2$  纳米球阵列结构增大光提取效率的机理, 采用三维时域有限差分法进行器件透射谱的模拟, 仿真结构如图7所示. 将光源中心波长设置为 770 nm,  $\text{SiN}_x$  的折射率设置为 2.0,  $\text{SiO}_2$  纳米球的直径设置为 750 nm, 折射率设置为 1.5. 分别考虑 S 偏振和 P 偏振的情况下, 模拟得到的钝化层附有  $\text{SiO}_2$  纳米球结构与无微纳结构的钝化层透射谱如图8所示. 对于钝化层表面无微纳结构的参考样品, 当入射角大于  $32^\circ$  时的透过率为零, 表明大于临界角的光线不能从器件钝化层表面出射; 而钝化层表面附有直径为 750 nm 的  $\text{SiO}_2$  纳米球阵列结构的器件出光角度大于临界角时有几个较明显的透射峰, 且 S 偏振和 P 偏振均有透射峰出现, 表明在钝化层上附着  $\text{SiO}_2$  纳米球阵列结构可以把器件内部的波导模耦合出来, 从而提高红外波长上转换探测器的总体效率.

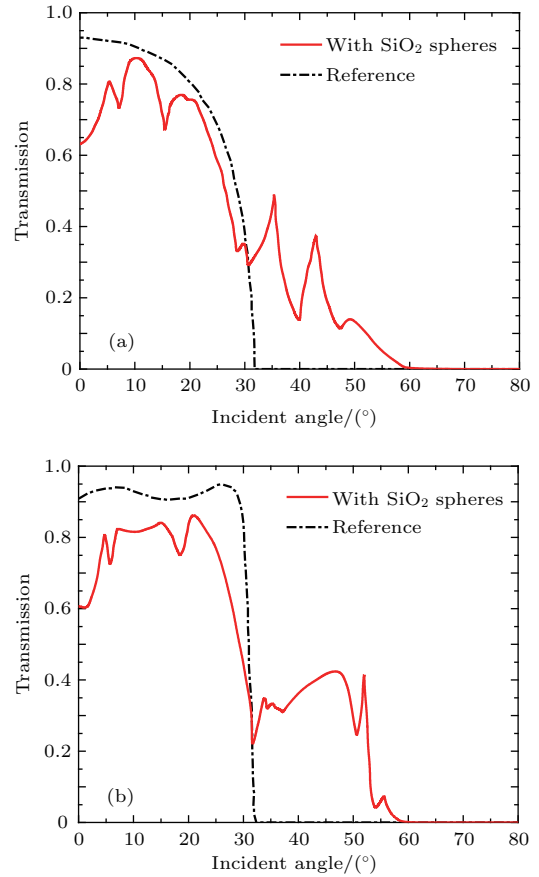


图8 附有直径为 750 nm 的  $\text{SiO}_2$  纳米球结构器件与无  $\text{SiO}_2$  纳米球器件的透射谱 (a) S 偏振入射光的透射谱; (b) P 偏振入射光的透射谱

Fig. 8. Simulations of transmission spectra to the devices without and with 750 nm radius  $\text{SiO}_2$  nanospheres: The simulations with S- and P-polarizations are shown in panels (a) and (b), respectively.

## 4 结 论

采用自组装方法在红外波长上转换器钝化层表面制作了直径不同的单层六角密排的  $\text{SiO}_2$  纳米球阵列, 并开展黑体响应测试. 结果表明, 器件钝化层上附着  $\text{SiO}_2$  纳米球可以提高其光提取效率, 当  $\text{SiO}_2$  纳米球直径为 750 nm 时的器件光提取效率增强可达 2.6 倍. 该出光增强可归因于  $\text{SiO}_2$  纳米球阵列结构破坏了钝化层表面的全反射, 增大了逃逸光锥, 从而提高了红外波长上转换探测器的光提取效率. 因此, 这是一种低成本实现高效率红外波长上转换探测器的方法.

## 参考文献

[1] Yang Y, Zhang Y H, Shen W Z, Liu H C 2011 *Prog. Quant. Electron.* **35** 77

- [2] Rogalski A 2005 *Prog. Phys.* **68** 2267
- [3] Yang Y, Liu H C, Hao M R, Shen W Z 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 074501
- [4] Dupont E, Byloos M, Gao M, Buchanan M, Song C Y, Wasilewski Z R, Liu H C 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 182
- [5] Izhnin I I, Dvoretzky S A, Mynbaev K D, Fitsych O I, Mikhailov N N, Varavin V S, Pociask-Bialy M, Voitsekhevskii A V, Sheregii E 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 163501
- [6] 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]
- [7] Giorgetta F R, Baumann E, Graf M, Yang Q, Manz C, Köhler K, Harvey B E, David R A, Edmund L, Alexander D G, Yuriy F, Jäckel H, Milan F, Jérôme F, Daniel H 2009 *J. Quant. Electron.* **45** 1039
- [8] Schnitzer I, Yablonovitch E, Caneau C, Gmitter T J, Scherer A 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 2174
- [9] Lin C F, Zheng J H, Yang Z J, Dai J J, Lin D Y, Chang C Y, Lai Z X, Hong C S 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 083121
- [10] Gao H, Kong F M, Li K, Chen X L, Ding Q A, Sun J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 127807 (in Chinese) [高晖, 孔凡敏, 李康, 陈新莲, 丁庆安, 孙静 2012 物理学报 **61** 127807]
- [11] Lai C F, Chao C H, Kuo H C, Yen H H, Lee C E, Yeh W Y 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 123106
- [12] Hoshino T, Mabuchi K 2015 *Appl. Phys. Express* **8** 087001
- [13] Chen Z X, Ren Y, Xiao G H, Li J T, Chen X, Wang X H, Jin C J, Zhang B J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 018502
- [14] Kim J Y, Kwon M K, Park S J, Kim S H, Lee K D 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 251103
- [15] Yuan D, Lu L S 2014 *Key Eng. Mater.* **589** 537
- [16] Ye B U, Kim B J, Song Y H, Son J H, Yu H K, Kim M H, Lee J L, Baik J M 2012 *Adv. Funct. Mater.* **22** 632
- [17] Wang C, Hao Z B, Wang L, Kang J B, Xie L L, Luo Y, Wang L, Wang J, Xiong B, Sun C Z, Han Y J, Li H T, Wang L, Wang W X, Chen H 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 108501 (in Chinese) [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 2016 物理学报 **65** 108501]
- [18] Chen X, Liang Z H, Chen Z X, Yang W M, Chen T F, Jin C J, Zhang B J 2013 *Chin. Phys. B* **22** 048101
- [19] Yao Y, Yao J, Nnarasimhan V K, Ruan Z, Xie C, Fan S, Cui Y 2012 *Nature Commun.* **3** 664
- [20] Zhu Z C, Liu B, Cheng C W, Chen H, Gu M, Yi Y S, Mao R H 2014 *Phys. Status Solidi A* **211** 1583
- [21] Fang C Y, Liu Y L, Lee Y C, Chen H L, Wan D H, Yu C C 2013 *Adv. Funct. Mater.* **23** 1412

# Improvement in the efficiency of up-conversion infrared photodetector by nanospheres\*

Liu Shun-Rui<sup>1)</sup> Nie Zhao-Ting<sup>2)</sup> Zhang Ming-Lei<sup>1)</sup> Wang Li<sup>1)</sup>  
Leng Yan-Bing<sup>1)</sup> Sun Yan-Jun<sup>1)†</sup>

1) (School of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

2) (School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

( Received 9 March 2017; revised manuscript received 21 June 2017 )

## Abstract

In recent years, infrared (IR) photodetector has been extensively used and played an important role in environmental control, medical diagnostics, and satellite remote sensing. Therefore, the priority should be given to how to stimulate the development of imaging detection of weak IR signal. Up-conversion IR photodetector has an ability to detect quite weak IR signal in the large plane array focal plane, so it has civil and military significance. 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 in improving the device efficiency.

In this work, we propose that the light-extraction efficiency of up-conversion IR photodetector can be improved by a self-assembled monolayer of SiO<sub>2</sub> sphere. Thereby, the up-conversion efficiency can be enhanced. The up-conversion IR photodetector emits the light mainly from the silicon nitride (SiN<sub>x</sub>) passivation layer. And the hexagonal closely-packed SiO<sub>2</sub> sphere monolayer is formed on the SiN<sub>x</sub> layer. In order to study the effect of the size of nanosphere on the light-extraction efficiency, we prepare the SiO<sub>2</sub> spheres with diameters of 300, 450, 750, and 1000 nm respectively.

Results indicate that the devices with and without SiO<sub>2</sub> nanospheres exhibit similar IR responses and dark currents, while the emission of device with SiO<sub>2</sub> spheres obviously increases. And the light extraction efficiency increases up to an optimal level when the average size (750 nm) of SiO<sub>2</sub> sphere approximates to the wavelength (770 nm) of light source. Taking into consideration other factors relating to external quantum efficiency, the light extraction efficiency of the device with 750-nm-sized SiO<sub>2</sub> spheres on surface increases 2.6 times. In order to explain the physical mechanism for the light-extraction enhancement, we carry out the three-dimensional finite difference time-domain simulation, thereby calculating the transmission spectrum of the device with 750-nm-sized SiO<sub>2</sub> spheres. Simulation results show that the incident light beyond critical angle can be partly extracted when the surface of up-conversion IR photodetector has a SiO<sub>2</sub> sphere monolayer, leading to an enhanced light-extraction efficiency. So the SiO<sub>2</sub> sphere monolayer acts as a two-dimensional diffraction grating, which behaves as a light scattering medium for the light propagating in a waveguiding mode within the up-conversion IR photodetector. Therefore it can be concluded that this is a simple and cost-effective method of improving the efficiency of up-conversion IR photodetector. The finding in this paper can also be applied to improving the light extraction efficiency of other semiconductor devices.

**Keywords:** up-conversion, nanospheres monolayer, light extraction efficiency, photoluminescence

**PACS:** 85.60.Gz, 81.16.Rf, 78.60.Fi

**DOI:** 10.7498/aps.66.188501

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11474037, 11474041).

† Corresponding author. E-mail: [custsun@126.com](mailto:custsun@126.com)