

基于人工微结构的大面积高效率近红外吸收器

陆加良^{1,2}, 俞伟伟^{2,3}, 张晓东¹, 许昊^{2*}, 郝加明², 孙艳²,
陈鑫², 孟祥建², 戴宁², 褚君浩²

(1. 东华大学 理学院, 上海 201620;

2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于人工微结构超材料的先进理念, 设计制备工作波长可调的近红外大面积吸收器. 器件制备采用纳米微球化学自组装方法制备顶层金属微结构, 该方法可制备大面积样品. 实验结果显示, 吸收器在近红外波段峰值吸收率超过 99%, 吸收波长可以通过结构单元几何尺寸调节. 理论模拟结果不但与实验测量的数据相一致, 而且很好地阐述了器件高效光吸收的物理机理.

关键词: 吸收器; 微结构; 大面积; 高效; 近红外

中图分类号: TN214 **文献标识码:** A

Large-area high-performance near-infrared absorber based on plasmonic nanostructures

LU Jia-Liang^{1,2}, YU Wei-Wei^{2,3}, ZHANG Xiao-Dong¹, XU Hao^{2*}, HAO Jia-Ming²,
SUN Yan², CHEN Xin², MENG Xiang-Jian², DAI Ning², CHU Jun-Hao²

(1. College of Science, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A large-area high-performance near-infrared absorber based on plasmonic nanostructures is introduced, fabricated and experimentally characterized. The periodic plasmonic nanostructures are prepared by self-assembled template, a charming low-cost technology for making large-area samples. Experimental results show that the absorbance can be as high as 99%. The spectral position of the absorption peak is experimentally demonstrated to be tuned by the geometric dimensions. The physical origin of the absorption effect is theoretically explained as well.

Key words: perfect absorber, plasmonic nanostructures, large area, high performance, near infrared

PACS: 78.66.-w, 42.25.Bs, 42.70.-a

引言

如何有效地提高物体吸收光子的效率一直是人们很感兴趣的课题. 特别是在红外波段, 高效率地吸收光子在众多领域有着重要的应用, 如太阳能热光伏^[1-3]、红外探测^[4-5]、红外隐身^[6]、光通信^[7-9]和生

物传感^[10]等. 传统方法吸光基本上是利用材料本身的性质, 因此这不但对材料本身的光学性能有限制, 而且对材料的光学厚度也有严格的要求. 通常情况下, 为了能够充分高效地吸收光子, 器件的厚度需要和光子波长在一个数量级, 甚至远大于光子波长. 这必然为发展小型化先进光电子器件带来诸多不便.

收稿日期: 2018-02-02, 修回日期: 2018-08-24

Received date: 2018-02-02, revised date: 2018-08-24

基金项目: 国家自然科学基金 (61471345), 上海市“科技创新行动计划” (14PJ1409500)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61471345), Shanghai Science and Technology Committee (14PJ1409500)

作者简介 (Biography): 陆加良 (1992-), 男, 浙江嘉兴人, 硕士研究生, 主要研究领域为超材料微结构增强吸收. E-mail: tacy_lu@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: haoxu@mail.sitp.ac.cn

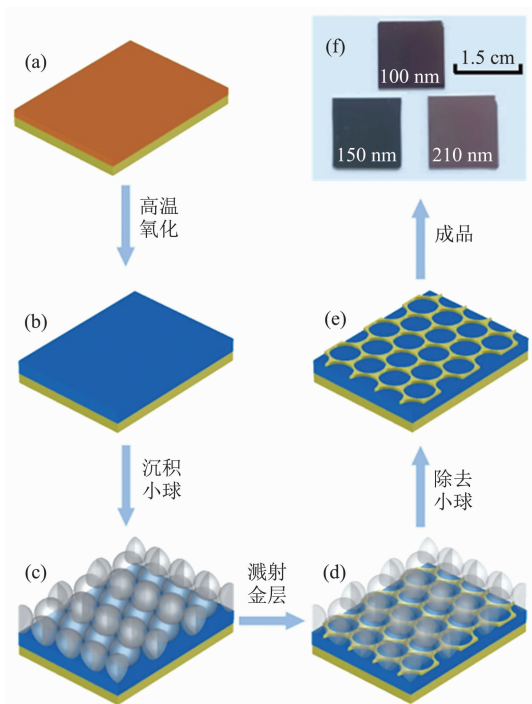


图1 样品制备流程图 (a)金/铜薄膜,(b)金/氧化铜薄膜,(c)金/氧化铜/聚苯乙烯小球阵列,(d)金/氧化铜/聚苯乙烯小球阵列+金薄膜,(e)金/氧化铜/金微结构示意图,(f)金/氧化铜/金微结构样品光学图片

Fig.1 Flow chart of the sample preparation. The schematics of (a) Au/Cu thin film, (b) Au/CuO thin film, (c) Au/CuO/array of PS microspheres, (d) Au/CuO/array of PS microspheres covered with Au thin film, (e) Au/CuO/Au-pattern, and (f) optical images of the fabricated samples

近年来,电磁超材料吸引了人们的广泛关注^[11-13].其特点是通过设计构造特殊的人工亚波长微结构,并通过调节微结构的几何形状和尺寸,使体系具有任意等效的介电常数和磁导率,实现对电磁波的自由调控.超材料一个重要的应用就是用来增强光吸收^[14-18].研究发现,在之前的相关研究工作中,用于增强光吸收的超材料微结构单元确实具有亚波长的特性,为该类器件的小型化提供了可能性.不过,在样品制备加工过程所采用的方法不外乎为如下几种,如电子束曝光工艺(Electron-beam lithography)^[15-16],聚焦离子束曝光技术(Focused ion beam lithography)^[19],干涉光刻技术(Interference lithography)^[20],激光自写工艺(Direct-laser writing)^[21]和纳米压印光刻技术(Nanoimprint lithography)^[22]等,这些方法通常不但成本昂贵,费时费力,而且很难做到大面积样品制备.

本文将基于超材料理念设计并制备近红外波段(0.9~2.5 μm)超吸收器.器件基本结构采用金属

微结构—介质膜—金属经典结构体系,加工工艺我们采用纳米微球做掩模版制备金属微结构,运用化学自组装方法排列纳米微球形成周期性微结构,该方法不但省时省力,而且可实现制备大面积样品.实验结果显示,我们制备的样品在近红外波段峰值吸收率超过99%.

1 实验设计

本文旨在基于人工微结构超材料理念设计制备工作波长可调的近红外大面积吸收器.实验样品制备过程如图1所示.

1.1 样品制备流程

取单抛硅片作为衬底.切割后,每片大小约为1.5 cm × 1.5 cm.硅片经过丙酮、乙醇、去离子水三次超声清洗各15 min.配置双氧水浓硫酸混合液, H₂O₂: H₂SO₄ = 3:1,将衬底硅片置于混合液中浸泡30 min,清水处理后再用去离子水冲洗烘干.利用电子束蒸发方法在硅片表面蒸镀一层厚度为200 nm的金(Au)薄膜.为防止因金与硅晶格失配导致金层脱落,在蒸镀金层之前,硅片表面先蒸镀5 nm左右的金属钛作为粘附层.接着利用双离子束溅射方法在金上沉积3种不同厚度的铜薄膜(如图1(a)所示).其厚度分别设置为50 nm、80 nm和110 nm.随后将样品置于马弗炉中进行高温退火氧化.升温速率为10℃/min,退火条件为400℃/30 min.该过程可将金属铜膜充分氧化,实现如图1(b)中所展示的金/Au/CuO结构.

下面的实验过程将用到直径为430 nm的聚苯乙烯(PS)小球.先将含有该微球的100微升溶液质量体积浓度为2.5% w/v的聚苯乙烯乳胶悬浮液与无水乙醇以1:1的体积比在离心管中均匀混合,利用自组装的方式将聚苯乙烯(PS)小球平铺在样品表面.单层PS小球以六角密堆积的形式排列且长程有序(图1(c)).

接下来利用双离子束溅射方法在经上述步骤处理后的样品表面沉积一层厚度为50 nm的金薄膜(图1(d)).取出样品后,用酒精棉球擦拭样品表面去除PS小球,同时覆盖在小球上面的金层也会一同被清除,但沉积在球与球之间的金会被保留下来,因此最后样品表面将呈现如图1(e)所示的Au蜂窝状微结构.最终得到图1(f)所示三个不同厚度的氧化铜薄膜样品.

1.2 主要仪器设备及耗材原料

聚苯乙烯球(PS 430 nm, Thermofish); 去离子

超纯水(简称 H_2O , Millipore: 18 M Ω 提纯); 丙酮, 无水乙醇等试剂为分析纯; 双离子束溅射台(铜靶材, Aron ion beam sputtering, AIBS); 电子束蒸发设备(金靶材, High Vacuum E-beam evaporation system, Tri-Axis); 箱式马弗炉. 扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM, FEI Siron 200); 光栅光谱仪(Lamda 950, PerkinElmer).

2 结果与讨论

2.1 样品结构表征

图2为实验过程中各个阶段制备样品的扫描电子显微镜图(SEM), 其中第一列为样品的上表面电镜图(俯视图), 第二列为截面图. 由上至下每一行分别对应: (1) 硅片表面镀有金层(图2(a)和2(f)). 由图2(a)可以观察到金成膜质量较好, 表面光滑平整; 由图2(f)可观察到顶部有约200 nm厚的膜层, 颜色偏暗, 界面清晰, 厚度均匀, 该层即为金膜层, 紧接着有一颜色偏白薄层, 该层是为起粘附的金属钛层, 底层为硅衬底. (2) 图2(b)和2(g)为在金层表面溅射一层金属铜膜并经高温退火氧化后的样品扫描电镜图. 图片显示高温退火后的氧化铜层出现颗粒状结晶, 这是金属铜在高温氧化过程中再结晶产生的晶粒. 氧化铜表面较为粗糙, 截面可以看到明显分层. 并且在由金属铜退火形成氧化铜的过程中, 厚度有明显的变化. 通过扫描电镜测量, 氧化铜膜的厚度分别约为100 nm、150 nm和200 nm, 是原本生长的金属铜薄膜厚度的1.8到2倍左右. (3) 图2(c)与2(h)分别为自组装单层六角密堆聚苯乙烯球阵列后样品俯视和截面电镜图. (4) 图2(d)与2(i)为在聚苯乙烯球阵列上镀50 nm厚金薄膜后的样品扫描电镜图. 金颗粒在垂直沉积的过程中大部分会盖在PS球上半球表面, 电镜图显示小球上半部分偏白, 呈现出金属层纹络, 而下半部分偏暗. 这是因为有机物聚苯乙烯与金相比, 导电性差, 因此在SEM照片中明暗对比明显. 因球与球之间的间隙较大, 因此金颗粒可以通过间隙沉积在氧化铜薄膜的表面. 截面图中PS球赤道线附近的鼓包是由于球与球之间的点接触在沉积过程中形成的金颗粒聚集点. (5) 图2(e)与2(j)为除去PS球后样品的扫描电镜图. 如图2(e)所示, 样品表面呈现出明显的蜂窝状结构.

2.2 样品光谱表征

除了对样品形貌进行了表征外, 还通过实验光谱测试与全波数值计算模拟相结合的方法对于实验

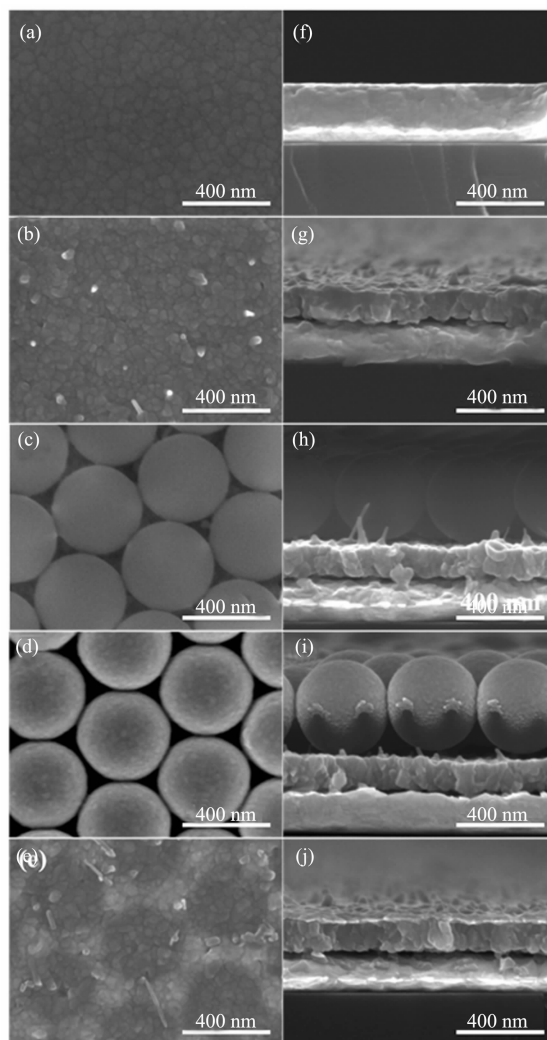


图2 不同阶段样品的扫描电子显微镜图(a-e)俯视图, (f-j)为截面图. (a,f)金/铜薄膜样品, (b,g)金/氧化铜薄膜样品, (c,h)金/氧化铜/聚苯乙烯小球阵列样品, (d,i)金/氧化铜/聚苯乙烯小球阵列+金薄膜样品(e,j)金/氧化铜/金微结构样品

Fig. 2 SEM images of the samples studied in different stages. (a-e) Top view, (f-j) cross section view, (a,f) Au/Cu thin film, (b,g) Au/CuO thin film, (c,h) Au/CuO/array of PS microspheres, (d,i) Au/CuO/array of PS microspheres covered with Au thin film (e,j) Au/CuO/Au-pattern

过程中对各阶段不同样品的光学性质进行了研究. 光谱测试实验采用的是 PerkinElmer 公司分光光谱仪 Lamda 950, 测试波长从 0.5 ~ 2.5 μm . 理论计算采用的工具为 Lumerical 公司开发的数值仿真软件 FDTD Solutions. 其中, 金和氧化铜的光学参数(n, k 值)采用的是参考文献[23]中的数据. 聚苯乙烯微球在该波段折射率为非色散, 且有 $n = 1.59, k = 0$. 上述研究所有的样品中, 底部皆有一层厚度(200 nm)远大于该波段光的趋肤深度(20 nm左右)的金薄膜层, 因此体系无透射. 且器件的最小组成结构单

元尺寸远小于我们感兴趣的波段范围(波长大于 900 nm),则体系结构也无高阶散射,因此将入射光减除反射光即等于样品的吸收.也就是说,要想掌握上述样品的吸光特性,只需要研究其相应的反射性质即可.

图 3 是各阶段样品的反射光谱曲线,其中左列为实验的测试结果,右列为数值模拟仿真计算结果.其中,图 3(a)是单层金膜样品和金膜上分别镀有三种不同厚度的铜薄膜样品的反射光谱.铜膜的厚度分别为 50 nm、80 nm、110 nm.由图可见,上述各样品都具有很强的反射性,反射率接近乃至远高于 90%,呈现出了很好的金属性,该结果与理论预期(图 3(e))完全相符.

图 3(b)为经过退火处理后样品的反射光谱.三个不同厚度的样品的反射强度在近红外波段均有一定程度的下降,形成较为明显的吸收峰,且发现随着顶层薄膜厚度的变厚,吸收峰的位置红移.其原因是由于金属铜膜经高温退火后变成了氧化铜膜,材料由金属性转变成介质性,对底层金属层起到了一定减反作用,增强了吸收.但由于在该波段氧化铜介质薄膜和金层组成的体系与空气界面光学阻抗失配较大,减反作用十分有限,以氧化铜膜厚度为 100 nm (150 nm) 为例,其反射率最小值仅为 66.4% (64.8%).该系列样品的数值模拟仿真结果如图 3(f)所示,与其相比,实验所得吸收峰谱相对较宽,分析认为其主要原因是因为实验上经高温退火氧化后所得的氧化铜膜厚度不均所导致.

图 3(c)是在氧化铜表面铺有聚苯乙烯小球阵列结构样品经实验测量的反射曲线.图 3(g)是该系列样品数值模拟仿真反射光谱曲线.由图可见,实验与数值模拟结果非常相似.与前一阶段结果相比,反射谱线峰宽变窄,极值也有所减小.这是因为从有效媒质的角度考虑,PS 球阵列可视为一层新的光学涂层具有减反作用,虽然 PS 球的折射率不高,但因结构为球形,因此对光也有一定会聚效应,形成半峰宽相对较窄的反射带,不过总体而言该系列样品吸光能力有限.

图 3(d)显示的是最终成品即金属微结构-氧化铜介质膜-金属样品(如图 1(f)所示)的实验测量反射光谱,图 3(h)为与之相对应的数值模拟仿真结果.两图中的结果皆清楚地展示该系列样品在近红外波段表现出了非常高效的吸光性能.以 CuO 厚度为 100 nm 的样品为例(如图 3(d)中实线所示),其在 1.2 μm 处反射率低于 1%,也就是说对于该工作

波长的入射光器件吸收率高达 99% 以上.数值模拟仿真结果在波长和现形上与实验结果虽有所差异,但也非常好的验证了结构的该超吸收现象.进一步研究发现,该结构对中间介质层的厚度非常敏感,随着氧化铜厚度变厚,吸收峰位会红移,如当氧化铜的厚度变为 150 nm (210 nm)时,反射率最小值位置移至 1.9 μm (2.5 μm).该性质为实现调控器件吸收工作波长提供了一条切实可行的途径.

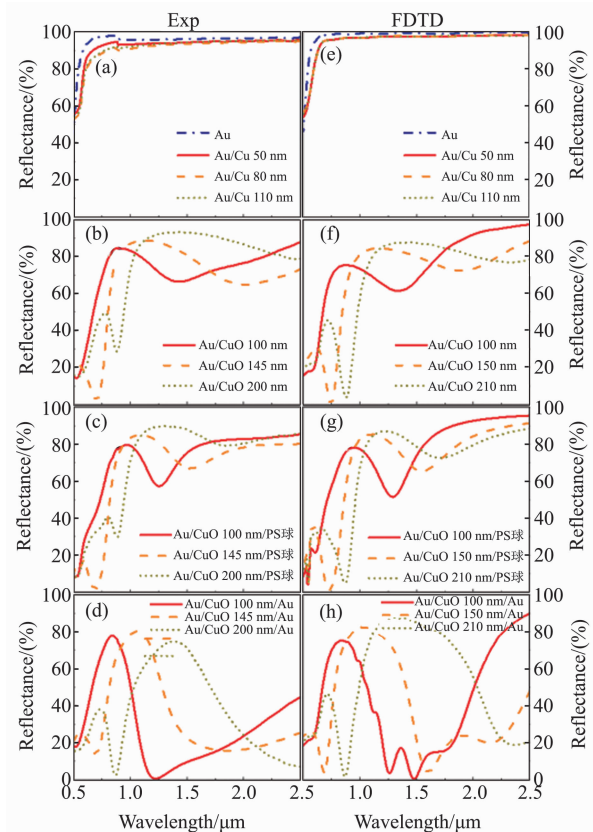


图 3 不同阶段样品的反射光谱曲线.左列为实验的测试结果,右列为数值模拟仿真计算结果.(a,e)金膜与金/铜薄膜系列样品,(b,f)金/氧化铜薄膜系列样品,(c,g)金/氧化铜/聚苯乙烯小球阵列系列样品,(d,h)金/氧化铜/金微结构系列样品

Fig. 3 The reflection Spectra of the samples studied in different stage. Left column: experimental results; Right column: simulated results. (a, e) Au/Cu thin films, (b, f) Au/CuO thin films, (c, g) a series of Au/CuO/array of PS microspheres samples, (d, h) a series of Au/CuO/Au-pattern structures

2.3 近红外超吸收物理机理

为了进一步研究金属微结构-氧化铜介质膜-金属样品结构在近红外波段完美吸收的物理机理,利用数值模拟工具计算了超吸收条件下该结构的电磁场分布图.下面以氧化铜厚度为 100 nm 的样品为例做具体分析.模拟计算中结构参数设置如下:纵向(z 轴方向)0 ~ 100 nm 为金层,100 ~ 200 nm 为氧化铜

层, 200 ~ 230 nm 为金微结构层(模拟与实际溅射厚度有所差异). 为了清楚详细地展示电磁场分布, 一共设置了三个监视器, 分别是俯视角横截 xy 面 Monitor1 ($z = 180$ nm), 纵截 xz 面 Monitor2 ($y = 0$ nm) 和纵截 yz 面 Monitor3 ($x = 210$ nm). 图 4(a, c, e) 分别画出了正入射条件下波长为 $1.2 \mu\text{m}$ 上述三个不同视角的电场分布, 图 4(b, d, f) 依次记录了相同条件三个不同视角的磁场分布. 图中颜色梯度表示电磁场的强度, 矢量箭头方向表示电磁场的方向. 由图可知, 所有不同视角的结果皆清晰地展示入射光强耦合进入由金属微结构-氧化铜介质膜-金属所组成的深亚波长微腔, 形成微腔强局域电磁共振. 在该微腔的共振陷光作用下, 随着时间的推移, 入射光的能量逐渐被结构中的金属欧姆损耗所吸收, 并转化成热能.

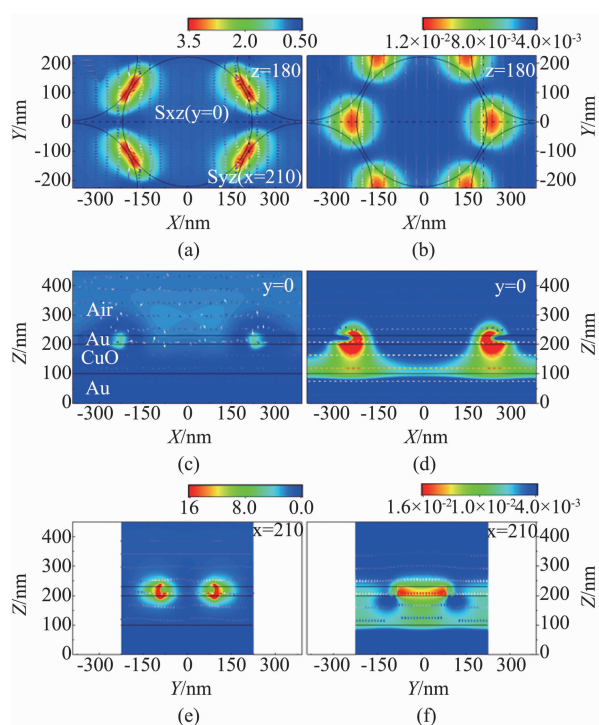


图4 正入射共振吸收波长处电磁场分布图. 左列为电场, 右列为磁场. (a, b) 为 xy 横截面俯视图 ($z = 180$ nm), (c, d) 为 xz 纵截面图 ($y = 0$ nm), (e, f) 为 yz 纵截面图 ($x = 210$ nm)
Fig. 4 Electromagnetic field distributions for normal incident light with the wavelength of $1.2 \mu\text{m}$. Left column: electric field; Right column: magnetic field. (a) and (b) top view with monitor in xy plane and $z = 180$ nm, (c) and (d) cross section view with monitor in xz plane and $y = 0$ nm, (e) and (f) cross section view with monitor in yz plane with $x = 210$ nm

3 结论

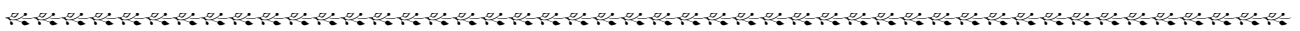
报道了一种近红外波段大面积新型超吸收器. 器件基本单元为金属微结构—介质膜—金属结构.

器件制备采用纳米微球化学自组装方法制备顶层金属微结构, 该方法不但省时省力, 而且可制备大面积样品. 详细地报道了系列样品的制备过程, 并对每个阶段的样品进行了形貌表征和光谱测试. 结果显示, 样品成品面积约 $1.5 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$, 远大于其它加工方法制备的同类型吸收器^[15-18]. 光谱测量结果展示, 制备的样品在近红外波段具有非常高效吸光性能, 峰值吸收率超过 99%. 研究了中间介质层的厚度对器件吸光性能的影响, 发现随着氧化铜厚度变厚, 吸收峰位会红移. 对不同阶段的样品我们还做了相关的理论数值模拟仿真, 理论分析结果不但与实验结果相一致, 而且更好地帮助我们理解了器件高效光吸收的物理机制.

References

- [1] Coutts T J. A review of progress in thermophotovoltaic generation of electricity [J]. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 1999, **3**(2-3): 77 - 184.
- [2] Rephaeli E, Fan S. Absorber and emitter for solar thermophotovoltaic systems to achieve efficiency exceeding the Shockley-Queisser limit [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(17): 15145 - 15159.
- [3] Bermel P, Ghebrebhan M, Chan W, *et al.* Design and global optimization of high-efficiency thermophotovoltaic systems [J]. *Opt. Express*, 2009, **18**(S2), A314 - A334.
- [4] Richards P L, Bolometers for infrared and millimeter waves [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, **76**(1): 1 - 24.
- [5] Ma W, Jia D L, Wen Y Z, *et al.* Diode-based microbolometer with performance enhanced by broadband metamaterial absorber [J]. *Opt. Lett.* 2016, **41**(13), 2974 - 2977.
- [6] Ergin T, Stenger N, Brenner P, *et al.* Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths [J]. *Science*, 2010, **16**(5976): 337 - 339.
- [7] Kahn J M, Barry J R, Wireless infrared communications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, **84**(2): 265 - 298.
- [8] Carruthers J B, Kahn J M. Angle diversity for nondirected wireless infrared communication [J]. *IEEE Transactions on communications*, 2000, **48**(6): 960 - 969.
- [9] Soref R. Mid-infrared photonics in silicon and germanium [J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(8): 495 - 497.
- [10] Lal S, Link S, Halas N J. Nano-optics from sensing to waveguiding [J]. *Nat. Photonics*, 2007, **1**(1): 641 - 648.
- [11] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, *et al.* Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. *Physical review letters*, 2000, **84**(18): 4184 - 4187.
- [12] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index [J]. *Science*, 2004, **305**(5685): 788 - 792.
- [13] Soukoulis C M, Wegener M. Past achievements and future challenges in the development of three - dimensional photonic metamaterials [J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(9): 523 - 530.
- [14] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, *et al.* Perfect metama-

- terial absorber [J]. *Physical review letters*, 2008, **100** (20):207402.
- [15] Hao J M, Wang J, Liu X L, *et al.* High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(25):4184.
- [16] Liu N, Mesch M, Weiss T, *et al.* Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor[J]. *Nano Lett.* 2010, **10**:2342 – 2348.
- [17] He Y R, Deng H X, Jiao X Y, *et al.* Infrared perfect absorber based on nanowire metamaterial cavities [J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(7):1179 – 1181.
- [18] Watts C M, Liu X, Padilla W J. Metamaterial electromagnetic wave absorbers [J]. *Advanced Materials*, 2012, **24** (23):98 – 120.
- [19] Garcia-Meca, C. Hurtado J, Marti J, *et al.* Low-loss multilayered metamaterial exhibiting a negative index of visible of refraction at visible wavelengths [J]. *Phys. Rev. Lett.* 2011, **106**(6):067402 – 4.
- [20] Zhao J, Wu Y Q, Xue C F, *et al.* Fabrication of high aspect ratio nanoscale periodic structures by the soft X-ray interference lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2016, **170**:49 – 53.
- [21] Gansel J K, Thiel M, Rill M S, *et al.* Gold helix photonic metamaterial as broadband circular polarizer [J]. *Science* 2009, **325**(5947):1513 – 1515.
- [22] Yu Z N, Kuratoka N, Tran H, *et al.* Defect Tracking for nanoimprint lithography using optical surface scanner and scanning electron microscope [J]. *Applied Physics A*, 2016, **122**(9):1 – 5.
- [23] Palik E D. *Handbook of optical constants of solids* [M]. Academic Press, 1998:875 – 882.



(上接第 739 页)

- [7] Tian Z B, Singh A, Rigg K, *et al.* Mid-infrared interband cascade photodetectors with high quantum efficiency [C]// *In Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XI-II. International Society for Optics and Photonics*, 2016, **9755**:975512.
- [8] Lei L, Li L, Ye H, *et al.* Long wavelength interband cascade infrared photodetectors operating at high temperatures [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, **120**(19):193102.
- [9] Yang R Q, Xu J M. Analysis of transmission in polytype interband tunneling heterostructures [J]. *Journal of applied physics*, 1992, **72**(10): 4714 – 4726.
- [10] Harrison P, Valavanis A. *Quantum wells, wires and dots: theoretical and computational physics of semiconductor nanostructures* [M]. John Wiley & Sons, 2016.
- [11] Heller E R, Fisher K, Szmulowicz F, *et al.* Superlattice parameters for optimum absorption in InAs/In_xGa_{1-x}Sb superlattice infrared detectors [J]. *Journal of applied physics*, 1995, **77**(11): 5739 – 5746.
- [12] Van de Walle C G. Band lineups and deformation potentials in the model-solid theory [J]. *Physical review B*, 1989, **39**(3):1871.
- [13] Saha, Sumit, Jitendra Kumar. Rate equation modelling and investigation of quantum cascade detector characteristics [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2016, **98**:70 – 77.
- [14] Hua L I G. Resonant tunneling devices and their circuit applications [J]. *Physics*, 2001, **7**: 013.
- [15] Li J V, Yang R Q, Hill C J, *et al.* Interband cascade detectors with room temperature photovoltaic operation [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **86**(10): 2683.
- [16] Nguyen J, Ting D Z, Hill C J, *et al.* Dark current analysis of InAs/GaSb superlattices at low temperatures [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, **52**(6):317 – 321.
- [17] Tian Z B, Schuler-Sandy T, Krishna S. Dark current in antimony-based mid-infrared interband cascade infrared photodetectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **70**: 44 – 47.