

# 外延阻挡杂质带探测器的抗反射

王超<sup>1,2</sup>, 姚尧<sup>1</sup>, 文政绩<sup>1,2</sup>, 郝加明<sup>1\*</sup>, 胡古今<sup>3\*</sup>, 戴宁<sup>1,4,5</sup>

(1. 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;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 上海师范大学 数理学院 物理系, 上海 200234;

4. 国科大杭州高等研究院 物理与光电工程学院, 浙江 杭州 310024;

5. 江苏省光伏科学与工程协同创新中心, 江苏 常州 213164)

**摘要:**传统外延阻挡杂质带探测器由于其材料物性和特殊的结构设计存在很强的反射, 这些能量损失非常不利于器件的探测性能。报道了一种类光栅双层超构表面微结构阵列, 并将此人工微结构引入到外延阻挡杂质带红外探测器以抑制对入射光的反射。实验结果显示, 具有超构表面微结构阵列的器件在波长 30  $\mu\text{m}$  处反射率低于 3%, 在 25.3~32.2  $\mu\text{m}$  波段范围内反射率低于 20%。同时, 该超表面减反微结构对入射光的偏振还具有很强的选择性, 符合第四代焦平面发展需求。

**关键词:**阻挡杂质带; 红外探测器; 减反; 双层超表面

中图分类号: TN36 文献标识码: A

## Antireflection coating for epitaxial blocked impurity band detector

WANG Chao<sup>1,2</sup>, YAO Yao<sup>1</sup>, WEN Zheng-Ji<sup>1,2</sup>, HAO Jia-Ming<sup>1\*</sup>, HU Gu-Jin<sup>3\*</sup>, DAI Ning<sup>1,4,5</sup>

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Department of Physics, College of Mathematics and Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

4. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;

5. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Photovoltaic Science and Engineering, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** When an infrared wave is incident on the traditional epitaxial blocked impurity band detector, part of wave energy would be reflected by the device due to its special structural design and the properties of the constituent materials. The energy loss is obviously detrimental to the performance of the device. Here, a kind of bilayer metasurface-based microstructure array is introduced into the epitaxial blocked impurity band infrared detector for suppression of reflection. Experimental results show that the reflectance of the proposed metasurface-based device is lower than 20% in the wavelength range of 25.3~32.2  $\mu\text{m}$ , particularly, which is even less than 3% at the wavelength of 30  $\mu\text{m}$ . Meanwhile, the proposed metasurface antireflection coating also has strong polarization selectivity for incident wave, which meets the requirement for the fourth-generation focal plane arrays development.

**Key words:** blocked impurity band, infrared detector, antireflection, bilayer metasurfaces

收稿日期: 2020-08-08, 修回日期: 2021-04-21

Received date: 2020-08-08, Revised date: 2021-04-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0205800), 国家自然科学基金(11933006, 61805060, 61290304)

Foundation items: National Key R&D Program of China (2017YFA0205800), National Natural Science Foundation of China (11933006, 61805060, 61290304)

作者简介(Biography): 王超(1989-), 男, 安徽芜湖人, 博士研究生, 主要研究领域为长波红外探测器的研制与性能分析

E-mail: wangchao@mail.sitp.ac.cn

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: jiaming.hao@mail.sitp.ac.cn, hugj@shnu.edu.cn

## 引言

为了探究宇宙的起源和星系的演化,探寻地外生命,人类需要对星系、星云等地外星体和物质进行观测<sup>[1-3]</sup>。为此,国际上已经发射了红外天文卫星(IRAS)、宇宙背景探测者(COBE)卫星、红外线空间天文台(ISO)和斯皮策空间望远镜(SST)等众多航天器<sup>[4]</sup>。由于观测的目标温度较低,在这些航天器中通常都载有一个非常重要的载荷—长波红外探测器<sup>[1,5]</sup>。

1979年,Petroff和Stapebroek等在杂质带光电导(Impurity band detector, IBC)型长波红外探测器内部引入阻挡层,显著提升了探测器性能,人们将这种新的探测器称为阻挡杂质带(Blocked impurity band detector, BIB)探测器<sup>[6]</sup>。阻挡杂质带探测器不但具有暗电流低、光电导增益高、响应速度快,同时还具备抗辐照性能强、波长响应宽、易于制备及方便读出等突出优点,已经逐渐发展成为覆盖中远红外波段天文探测的优选探测器<sup>[7-10]</sup>。阻挡杂质带探测器可分为离子注入型和外延型两种类型<sup>[11-12]</sup>。由于外延型比较容易控制吸收层厚度,因此受到了相对较多的关注。不过,对于外延型阻挡杂质带探测器,由于光子要通过电极层才能进入吸收层被吸收,并且电极层一般是由重掺杂的材料构成,呈现类金属的特性,因此这类器件对入射红外光具有较强的反射。为提高阻挡杂质带红外探测器对红外光的吸收,提升器件的量子效率和整体光电性能,需要对外延阻挡杂质带探测器进行减反射增吸收研究。

近年来兴起的超构表面研究,由于其一般结构设计简易,只需对结构表面进行简单修饰,就可以实现对光的振幅、相位以及偏振等信息的大幅度可调,研究发现超构表面在电磁波减反方面也有很大的应用前景<sup>[13-15]</sup>。与传统减反方法(如多层介质膜、折射率梯度渐变介质等体系)相比,基于超构表面人工微结构的电磁波减反通常具有工作波段宽、尺寸小、易集成及调谐灵活等特点<sup>[15-17]</sup>,逐渐受到了业界越来越多的关注。2017年,Li Huang等人提出了双层超构表面的减反结构,并最终在太赫兹和中红外两个波段都取得了一定的宽波段减反效果<sup>[18-20]</sup>,为人们实现电磁波减反提供了新的思路。紧接着,He Zhu等人将表面等离激元微结构与离子注入阻挡杂质带探测器相结合,获得了最高35%光电响应性能的提升<sup>[21]</sup>。本文将人工微结构先进理念引入

到外延阻挡杂质带红外探测器减反应用中。器件基本结构采用类光栅双层超构表面结构。实验结果表明,外延阻挡杂质带探测器的结构反射得到了很好抑制,其结构反射率在甚长波30 μm处小于3%,在25.3~32.2 μm波段范围内反射率低于20%,实验结果与数值模拟预测基本一致。同时,这样的超表面减反结构对入射光的偏振还具有很强的选择性,符合第四代焦平面发展需求。

## 1 实验与分析

图1(a)为传统无减反层的前照式外延阻挡杂质带探测器结构示意图,光敏元区从上到下依次为上电极层、吸收层、阻挡层和下电极层<sup>[6]</sup>。外延阻挡杂质带红外探测器属于垂直结构的探测器,入射光在吸收层被吸收产生光电子,在电场作用下产生光电流。吸收层通过重掺杂在禁带中形成杂质带吸收光子,掺杂浓度约为 $10^{17} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,为有效地实现光吸收,吸收层相对较厚,一般厚度十几到几十微米<sup>[4-6]</sup>。阻挡层用于阻断吸收层杂质带的连续性,通常采用非掺杂的本征硅,阻挡层厚度一般为3~6 μm<sup>[2]</sup>。电极层要求导电性良好因此需要形成简并掺杂。为了研究阻挡杂质带探测器的反射性质,我们首先制备了如图1(a)所示的探测器多层结构材料样品。即在本征硅衬底上外延了掺杂浓度不同(Si:P)的多层薄膜,外延片结构从上到下依次为上电极层(厚度约0.1 μm, Si:P  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )、吸收层(厚度约15 μm, Si:P  $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )、阻挡层(厚度约6 μm, Si:P  $< 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ )、下电极层(厚度约1 μm, Si:P  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )和硅衬底(厚度约400 μm, Si:P  $< 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ )。通过光刻和湿法刻蚀形成V型槽与下电极接触,使其表面覆盖一层氮化硅钝化层,再在上电极层生长铝电极,最终形成了结构如图1(a)所示外延阻挡杂质带探测器<sup>[8]</sup>。

图2(a)中红色虚线为外延阻挡杂质带红外探测器多层结构样品的实验反射谱曲线,该结果是利用红外傅里叶光谱仪(FTIR, Bruker Vertex 80v)测试所得。图2(a)中蓝色实线为与此样品完全相同结构的全波数值模拟结果。在数值模拟仿真计算中,采用了如下模型描述硅材料的介电常数<sup>[22-23]</sup>

$$\varepsilon(\omega) = (n + ik)^2 = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\varepsilon(\varepsilon + i\gamma)} \quad (1)$$

对于室温下的重掺硅,施主或者受主提供了自由载流子,大大提高了在红外区域的吸收。红外区域( $\lambda > 2 \mu\text{m}$ ),可以用Drude模型来描述其相对介电

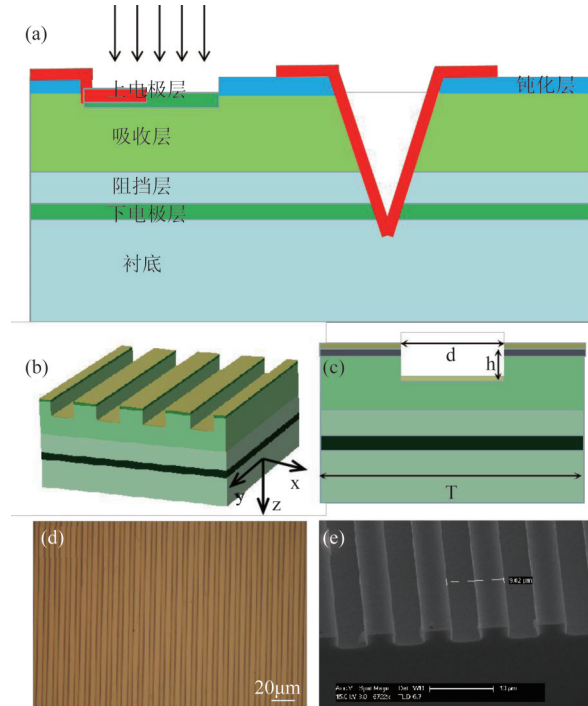


图1 (a)传统无减反外延阻挡杂质带红外探测器结构示意图,具有超构表面减反微结构的阻挡杂质带红外探测器,(b)三维示意图,(c)二维截面示意图,具有超构表面减反微结构的阻挡杂质带红外探测器样品,(d)光学显微镜图,(e)扫描电镜图。

Fig. 1 (a) Schematic of a traditional infrared epitaxial blocked impurity band (BIB) detector, (b) 3D, (c) 2D schematics of the metasurface-based antireflection structure for the BIB detector, (d) An optical microscope image, (e) a scanning electron microscopy (SEM) image of the metasurface-based antireflection structure

常数,如式(1)所示。其中 $\omega$ 是角频率, $\omega_{\infty}$ 是高频下的介电函数约为11.7, $\omega_p$ 为等离子体频率, $\gamma$ 代表损耗率。等离子体频率和损耗率可分别表示为 $\omega_p = \sqrt{Ne^2/m^* \epsilon_0}$ 和 $\gamma = e/m^* \mu$ ,其中 $\epsilon_0$ 是相对介电常数, $e$ 是电子电荷, $N$ 是载流子浓度, $m^*$ 是载流子有效质量, $\mu$ 是迁移率。基于式(1),很容易得到外延片中吸收层(Si:P  $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )、上电极层(Si:P  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )和下电极层(Si:P  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )的折射率 $n$ 和消光系数 $k$ ,其结果如图3所示。

由图2(a)中实验与理论结果不难看出,器件反射率随波长呈现起伏震荡变化,在20~40  $\mu\text{m}$ 范围内反射率的值处于20%~42%之间,器件平均反射率高达30%。也就是说,有近三分之一的能量会被器件反射而不能有效吸收,这必然大大影响器件的探测效率,因此十分有必要做相应的减反。这里需要

指出的是,图2(a)中实验测试与理论计算结果的偏差主要来源于计算所采用结构与真实样品结构之间存在较大差异,在计算中,各层材料光学参数明显不同(见图3),层与层之间界面清晰,而实验中,无论样品是采用外延生长方法还是离子注入方法制备,由于材料的扩散,层与层之间界面将变得模糊,光学性质也会发生很大变化,因此这必然导致实验与理论计算之间会产生一定的差异。

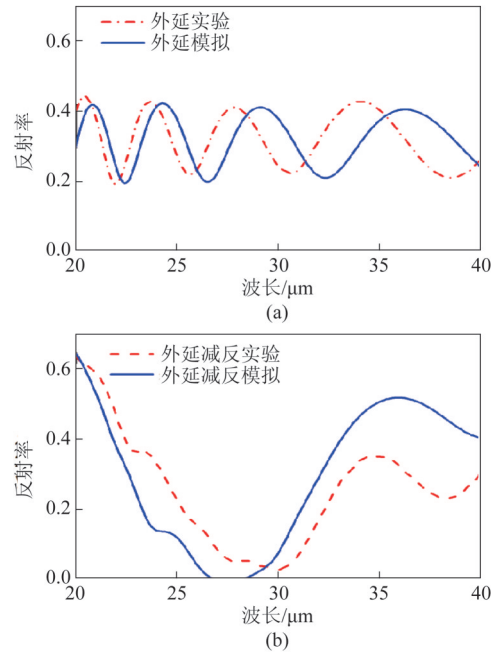


图2 (a)传统无减反外延阻挡杂质带红外探测器反射光谱,(b)超构表面减反微结构器件的反射光谱

注:蓝色实线是模拟仿真计算结果;红色虚线是实验测试结果

Fig. 2 (a) The reflection spectra of the traditional infrared BIB detector, (b) The reflection spectra of the metasurface-based infrared BIB detector

Note: Blue solid lines is numerical simulated results; Red dot lines is experimental results

为了实现对上述探测器件的有效减反,引入了超构表面的先进设计理念。图1(b)为具有超构表面减反微结构的探测器件局部三维示意图,其具体结构为在探测器表面刻蚀出一定深度的沟槽,再在表面生长一层金属构成了类光栅型双层超表面的减反结构体系。图1(c)为该超构表面单元微结构二维截面示意图。通过改变光栅周期 $T$ 、刻蚀宽度 $d$ 和刻蚀深度 $h$ 等参数可改变其等效光参,进而实现减反效果的调节。通过大量的数值模拟仿真优化设计,最终选择周期 $T$ 为9  $\mu\text{m}$ 、刻蚀宽度 $d$ 为5  $\mu\text{m}$ 、刻蚀深度 $h$ 为3  $\mu\text{m}$ 、金膜厚度为30 nm的结构为例

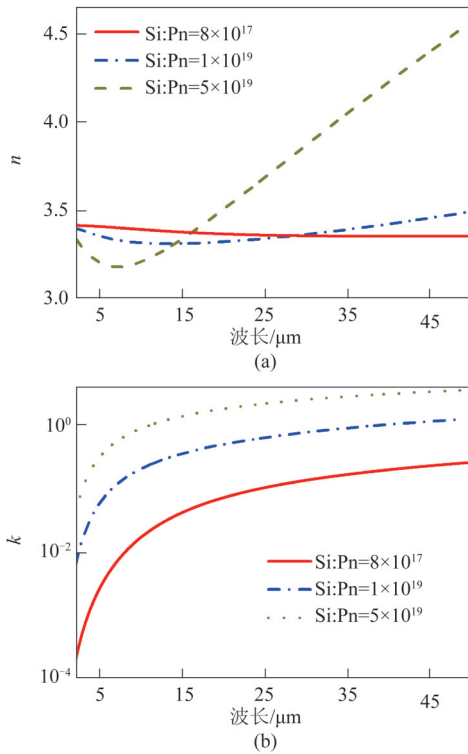


图3 不同掺杂浓度硅材料的(a)折射率 $n$ 和(b)消光系数 $k$   
Fig. 3 (a) refractive index  $n$  and (b) extinction coefficient  $k$  of silicon with different doping concentrations

展示此类超构表面微结构的减反射增吸收应用效果。图2(b)中蓝色实线表示具有此减反微结构的器件的数值模拟仿真结果。在模拟计算中,假设光栅狭缝平行于 $y$ 轴,设定电磁波为正入射(即沿 $z$ 轴方向入射),电场平行于 $x$ 轴,磁场平行于 $y$ 轴。由图2可知,其在 $27.5\ \mu\text{m}$ 处反射率近乎为零,在 $23.3\sim 31.0\ \mu\text{m}$ 波段范围内反射率低于20%,器件减反效果明显。

基于上述优化参数,我们利用光刻、深硅刻蚀和电子束沉积等微纳加工工艺,在外延硅片上制备出超构表面微结构阵列。图1(d)为具有超构表面减反微结构样品的光学显微镜照片,样品表面覆盖了一层金薄膜,因此呈现金黄色。图1(e)为该样品的扫描电子显微镜截面图,从截面图可以看出刻蚀的沟槽如设计所示结构良好,上表面和沟槽表面平整,整体减反微结构加工完好。实验测量的该样品反射谱如图2(b)中红色虚线所示。结果显示,该器件在 $30\ \mu\text{m}$ 处反射率低于3%,在 $25.3\sim 32.2\ \mu\text{m}$ 波段范围内反射率低于20%,与模拟结果相比,虽然谱线整体发生了红移,不过已进一步验证通过超构表面微结构的引入,器件确实实现了显著的减反效果。理论与实验结果之间的差异,主要有以下三个

方面的原因:1、与无减反结构时理论与实验结果差异原因类似,即计算所采用结构与真实的样品结构之间存在差别;2、测量时实际反射的入射光线与法线夹角不为零度,而是一个大约为 $\pi/6$ 立体角;3、偏振片不够理想,KRS-5偏振片在测量的红外波段只有近98%的偏振度。

接下来,研究具有该超构表面减反微结构器件光学特性与入射光偏振态之间的关系。图4(a)为利用红外傅里叶光谱仪测量所得的器件反射谱与入射光偏振态之间的关系曲线。方位角 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $90^\circ$ 表示入射光电场方向与光栅狭缝之间的夹角。 $0^\circ$ 表示电场方向垂直于光栅狭缝方向, $90^\circ$ 表示电场方向平行于光栅方向。随着方位角从 $0^\circ$ 转至 $90^\circ$ 器件反射率整体也逐渐变大,当方位角为 $90^\circ$ 时,在观察的光谱范围内器件的反射率皆大于90%,该系列结果表明所采用的超构表面减反结构具有很强的偏振选择性。图4(b)为相应的全波数值模拟仿真结果。由此可见,其与实验结果基本一致。也就是说,这种类光栅型超构表面减反结构的探测性能强烈依赖于入射光的偏振态角度,具有偏振选择性,符合第四代焦平面发展需求。

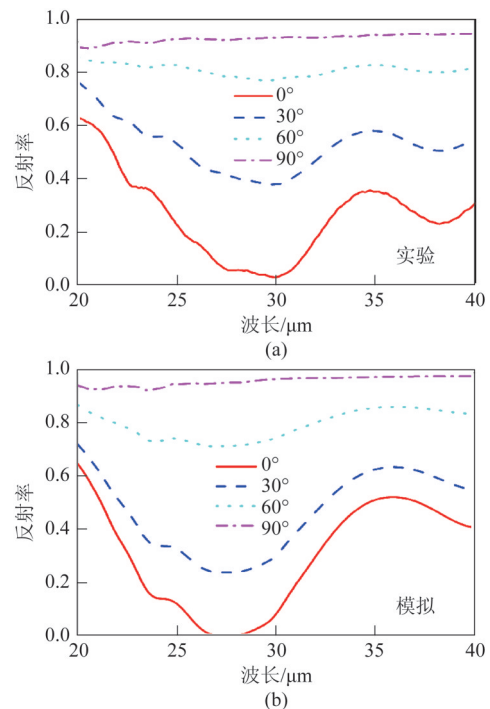


图4 实验(a)与模拟(b)得到的具有超构表面减反微结构器件反射谱与入射光偏振态方位角之间的关系图  
Fig. 4 Measured (a) and simulated (b) reflection spectra of metasurface-based infrared BIB detector for the four different incident azimuthal angles

最后,为了分析此类光栅双层超构表面减反结构的工作机理,我们利用数值模拟仿真工具计算了在不同入射条件下该结构的电磁场分布。结果如图 5 所示,分别选取了入射光波长为  $20\ \mu\text{m}$ 、 $27.5\ \mu\text{m}$  和  $40\ \mu\text{m}$  时的电磁场强度分布图。由图 5(c) 和 (d) 可见,当入射光波长为  $27.5\ \mu\text{m}$  时,微结构与环境阻抗匹配,入射光强耦合进入超构表面微结构体系,形成强局域共振效应,电磁场能量被吸收层高效吸收。而当入射光波长偏离此共振波长时,如入射光波长为  $20\ \mu\text{m}$  或  $40\ \mu\text{m}$ ,微结构阻抗失配加大,电磁波与微结构体系耦合效率变低,不能被有效地限制在器件结构内(见图 5(a-b) 或 (e-f)),因此减反功能明显下降。该系列电磁场分布图很好地解释和印证了图 2(b) 中所展示的数字模拟计算反射光谱结果,具有该人工微结构的器件在工作波长为  $27.5\ \mu\text{m}$  处反射率近乎为零,而在波长为  $20\ \mu\text{m}$  和  $40\ \mu\text{m}$  处体系都具有很强的反射。

## 2 结论

通过表面引入超构表面人工微结构外延阻挡杂质带探测器有效地抑制了入射光的反射。实验结果展示,该结构在甚长波  $30\ \mu\text{m}$  处反射率小于 3%,在  $25.3\sim 32.2\ \mu\text{m}$  波段范围内反射率低于 20%,实验结果与数值模拟预测基本一致。此外,此类光栅双层超表面结构的引入,不但可以实现外延阻挡杂质带探测器结构的有效减反,同时对入射光的偏振也具有选择性,符合新一代焦平面获取偏振信息的发展趋势。双层超表面减反结构具有调节波段宽、调谐灵活、结构尺寸小、易于加工等特点,在硅基阻挡杂质带探测器中的成功应用还可以拓展到锗基或者砷化镓基阻挡杂质带探测器中,进而提高阻挡杂质带探测器焦平面成像性能,也可以进一步拓展到其他红外和太赫兹探测器中应用。

## References

- [1] Rogalski A. Infrared detectors: status and trends[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, 27(2/3): 59-210.
- [2] LIAO Kai-Sheng, LI Zhi-Feng, WANG Chao, et al. Si:P blocked impurity band detectors for far infrared detection [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (廖开升,李志锋,王超,等。用于远红外探测的 Si:P 阻挡杂质带红外探测器研制。红外与毫米波学报), 2016, 35(1): 37-41.
- [3] Hoffman A W, Love P J, Rosbeck J P. Megapixel detector arrays: visible to  $28\ \mu\text{m}$  [C]//Focal Plane Arrays for Space Telescopes. International Society for Optics and Photonics, 2004, 5167: 194-203.
- [4] LIAO Kai-Sheng, LIU Xi-Hui, HUANG Liang, et al.

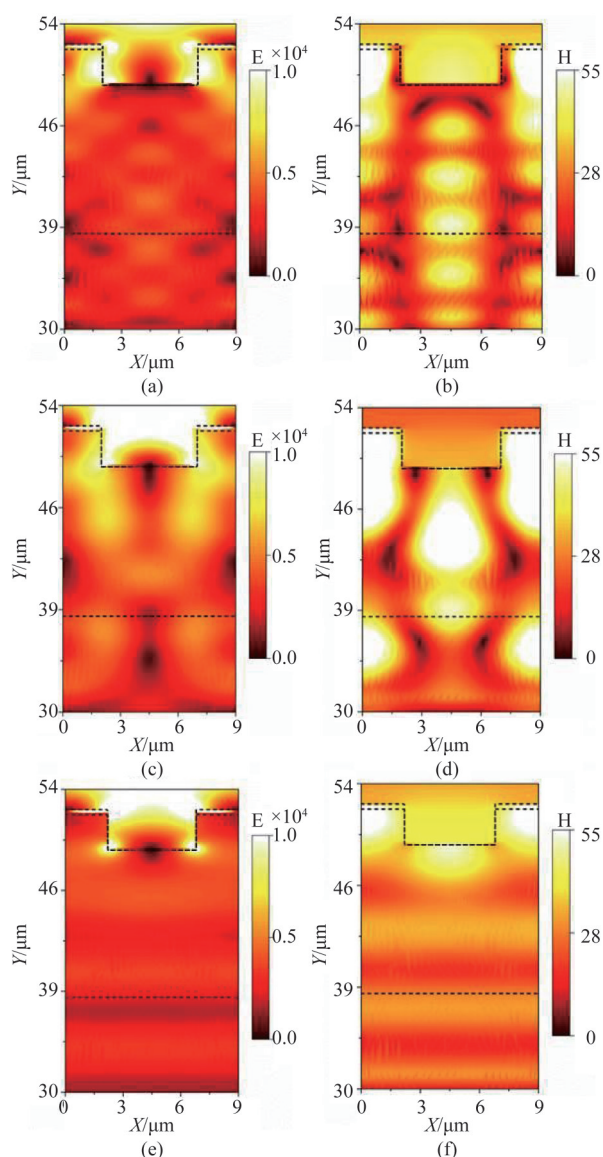


图 5 具有超构表面减反微结构器件在正入射条件下电磁场分布图。左列:电场;右列:磁场,(a,b)入射光波长为  $20\ \mu\text{m}$ , (c,d)入射光波长为  $27.5\ \mu\text{m}$ , (e,f)入射光波长为  $40\ \mu\text{m}$

Fig. 5 Electromagnetic field distributions for the metasurface-based BIB detector at the normal incidence. Left column: electric field; Right column: magnetic field. (a) and (b) at the wavelength of  $20\ \mu\text{m}$ , (c) and (d) at the wavelength of  $27.5\ \mu\text{m}$ , (e) and (f) at the wavelength of  $40\ \mu\text{m}$ .

Blocked impurity band infrared detectors for astronomy [J]. *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron* (廖开升,刘希辉,黄亮,等。天文用阻挡杂质带红外探测器。中国科学:物理学力学天文学), 2014, 44(4): 360-367.

- [5] SHEN Xue-Chu. *The spectrum and optical property of semiconductor* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press (沈学础。半导体光谱和光学性质。北京:科学出版社), 2002, 198-263.
- [6] Petroff M D, Stapelbroek M G. Blocked impurity band detectors, US Patent 4568960[P]. 1986-02-04.

- [7] Rogalski A. Semiconductor detectors and focal plane arrays for far-infrared imaging [J]. *Opto-Electronics Review*, 2013, **21**(4):406-426.
- [8] Liao K S, Li N, Wang C, *et al.* Extended mode in blocked impurity band detectors for terahertz radiation detection[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**(14): 143501.
- [9] LIAO Kai-Sheng, LI Zhi-Feng, LI Liang, *et al.* Interfacial barrier effects in blocked impurity band infrared detectors. [J].*Acta Physica Sinica*, (廖开升, 李志峰, 李梁, 等。阻挡杂质带红外探测器中的界面势垒效应。 *物理学报*), 2015, **64**(22): 227302.
- [10] WANG Chao, LI Ning, DAI Ning, *et al.* Study on ion-implanted Si:As blocked impurity band detectors for VLWIR detection[J]. *J. Infrared Millim.Waves*(王超, 李宁, 戴宁, 等。离子注入型硅掺砷阻挡杂质带长波红外探测器的研究, *红外与毫米波学报*), 2020, **39**(3): 290-294.
- [11] Chen Y L, Wang B B, Zang Y Z, *et al.* The High-Performance Imaging Verification of Si: P Blocked Impurity Band Detector for Very-Long-Wave-Infrared Spectral Range[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, **56**(3): 1-6.
- [12] Zhu J Q, Zhu H, Xu H L, *et al.* Impact of the structural parameters on the photoresponse of terahertz blocked-impurity-band detectors with planar structure [J]. *IEEE Transactions on Terahertz ence and Technology*, 2020, **10**(4):358-362.
- [13] He J W, Dong T, Chi B H, *et al.* Metasurfaces for terahertz wavefront modulation: a review[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2020, **41**: 607-631.
- [14] Chen H T, Zhou J F, O'Hara J F, *et al.* Antireflection coating using metamaterials and identification of its mechanism[J]. *Physical review letters*, 2010, **105**(7):073901.
- [15] YAO Yao, SHEN Yue, HAO Jia-Ming, *et al.* Antireflection coatings based on subwavelength artificial engineering microstructures. [J].*Acta Physica Sinica*(姚尧, 沈悦, 郝加明, 等。基于亚波长人工微结构的电磁波减反增透研究进展. *物理学报*), 2019, **68**(14):147802-1-18.
- [16] 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.
- [17] Fesharaki F, Jooshesh A, Bahrami-Yekta V, *et al.* Plasmonic antireflection coating for photoconductive terahertz generation[J]. *ACS Photonics*, 2017, **4**(6): 1350-1354.
- [18] Huang L, Chang C C, Zeng B B, *et al.* Bilayer metasurfaces for dual-and broadband optical antireflection [J]. *ACS Photonics*, 2017, **4**(9):2111-2116.
- [19] Chen H T, Zhou J F, Taylor A J, *et al.* A numerical investigation of metamaterial antireflection coatings [J]. *Int. J. THz Sci. Technol.*, 2010, **3**:66-73.
- [20] Chang C C, Huang L, Nogan J, *et al.* Invited Article: Narrowband terahertz bandpass filters employing stacked bilayer metasurface antireflection structures[J]. *Apl Photonics*, 2018, **3**(5):051602.
- [21] Zhu H, Weng Z P, Zhu J Q, *et al.* Surface plasmon enhanced Si-based BIB terahertz detectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, **111**(5): 053505.
- [22] Basu S, Zhang Z M, Lee B J. Infrared Radiative Properties of Heavily Doped Silicon at Room Temperature [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2010, **132**(2):023301-1-8.
- [23] Kuzmicz W. Ionization of impurities in silicon [J]. *Solid State Electronics*, 1986, **29**(12):1223-1227.