

基于复合凹槽的光栅型红外线吸收器*

陈曦¹, 薛文瑞^{1*}, 赵晨¹, 李昌勇²

(1. 山西大学 物理电子工程学院, 山西 太原 030006;

2. 山西大学 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 激光光谱研究所, 山西 太原 030006)

摘要:设计了一种基于 LiF 和 NaF 材料的复合凹槽的光栅型红外吸收器. 采用频域有限差分法 (FDFD) 分析了这种吸收器的吸收机理, 以及结构参数、入射波的波长和入射角度对其吸收特性的影响. 结果表明, 对于入射的不同波长的红外线, 这种吸收器会形成不同的光学谐振腔, 能够在较宽的波长范围内对红外线形成强烈的吸收. 在采用优化参数的条件下, 在 18~70 μm 的波长范围和 0~80° 的入射角范围内, 这种吸收器具有良好的吸收效果. 文章的研究工作给光栅型红外线吸收器的设计、制作和应用提供了理论基础.

关键词:吸收器; 光栅; 频域有限差分法; 红外; 表面等离子

中图分类号: O431 **文献标识码:** A

Grating-type infrared absorber based on composite grooves

CHEN Xi¹, XUE Wen-Rui^{1*}, ZHAO Chen¹, LI Chang-Yong²

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, 030006, China;

2. State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optic Devices,
Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A grating-type infrared absorber based on LiF and NaF material composite grooves is designed. The finite-difference frequency-domain (FDFD) method is used to analyze the absorption mechanism. In addition, the influence of the structure parameters of the absorber, the wavelength of the incident wave and the incident angle on the absorption characteristics are investigated. The results show that this absorber will form different optical resonators for incident light of different wavelengths in infrared region, which can strongly absorb infrared light over a wide wavelength range. The absorber has a good absorption performance in the range of 18~70 μm wavelength range and 0~80° of incident by using the optimized parameters. The research work of this paper provides a theoretical basis for the design, fabrication and application of the grating-type infrared absorber.

Key words: absorber, grating, FDFD, infrared, surface plasmon

PACS: 42.82.Gw, 52.25.Os

引言

自从 Dallenbach 等人在微波吸收器方面开展的创新性工作^[1]以来, 人们对电磁波吸收器的研究越来越深入^[2-3]. 工作波段已经从微波^[4]拓展到了太赫兹^[5]、可见光^[6]和红外线^[7]波段, 应用范围也逐

渐拓展到了电磁隐身^[8]、热辐射^[9]、薄膜太阳能电池^[10]、传感器^[11]和探测^[12]等领域.

电磁波吸收器的吸收原理分为损耗型^[13]、干涉型^[14]、谐振型^[15]以及表面等离子共振型^[16]等几种类型. 损耗型利用材料的介质损耗、磁滞损耗和电阻损耗, 把入射到内部的电磁波转换成热能而被吸收.

收稿日期: 2017-07-05, 修回日期: 2017-09-05

Received date: 2017-07-05, revised date: 2017-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(61378039, 61575115); 国家基础科学人才培养基金(J1103210)

Foundation items: Supported by the national natural science foundation of China (61378039, 61575115), the project for national basic science personnel training fund of China (J1103210)

作者简介 (Biography): 陈曦 (1992-), 女, 山西怀仁人, 硕士研究生, 主要从事微纳光子学、表面等离子体学和电磁吸收器等方面的研究. E-mail: 1016980626@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: wxue@sxu.edu.cn

干涉型利用电磁波的反相干涉作用,使入射波和从不同层反射回来的电磁波能量互相干涉而抵消.共振型是利用单元结构中一定尺寸的腔结构与相应波长的入射电磁波产生共振来吸收电磁波.表面等离子共振型是利用金属中的自由电子和光子在金属与电介质界面上发生的表面等离子共振效应来吸收电磁波.

红外线吸收器是电磁波吸收器研究中的一个热点.2013年,Cao T.等人提出了一种二维的红外线吸收器^[17],其结构单元由电介质($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_4$)隔开的两层金薄膜构成,实现了偏振无关的完美吸收,在 $8.5\text{--}11\ \mu\text{m}$ 波长范围,吸收率超过了80%.同年,Zhang N.等人提出了一种二维的红外线吸收器^[18],其结构单元包括两对金属铝-电介质圆盘和一层金属铝基板,利用红外线在金属铝-电介质-金属铝结构中的两种共振特性,分别在 $9.03\ \mu\text{m}$ 和 $13.32\ \mu\text{m}$ 波长处实现了高达98%的双频段吸收,且吸收峰的位置可以通过调节电介质的介电常数来调节.2016年,Xiao S.等人提出了一种二维的红外线吸收器^[19],其结构单元由石墨烯环带、绝缘层和半导体材料衬底构成,通过石墨烯环带的不同组合以及石墨烯本身的特性,实现了可调节的红外吸收.同年,我们小组提出了由半导体材料(SiC)和电介质材料交替叠加的截断的金字塔型光栅型红外线吸收器^[7],在 $10.5\text{--}12.5\ \mu\text{m}$ 波段实现了较高的吸收.

为了解决红外波段的电磁波吸收器中普遍存在的吸收率不足以及吸收带宽不够宽的问题,本文采用LiF和NaF材料,设计了一种基于复合凹槽的光栅型吸收器.在红外波段,获得了足够高的吸收率且拓宽了吸收带宽.本文第一部分介绍结构和计算方法,第二部分为结果和讨论,第三部分是结论.

1 结构与计算方法

该设计的基于复合凹槽的光栅型红外线吸收器的单元结构如图1所示.它是在金属银板上,以NaF材料为背景,在其表面等间距地挖出 N 个深度线性渐变的凹槽,再在凹槽的两壁和底部涂覆厚度相同的LiF材料构成的.假设光栅的周期为 p ,空气凹槽的宽度为 t_1 ,LiF材料的厚度为 t_2 ,NaF材料的厚度为 t_3 ,空气凹槽最小深度为 d_1 ,空气凹槽最大深度为 d_2 .底层金属银板的厚度取为 $d_3 = 3\ \mu\text{m}$,计算表明这一厚度足以抵挡红外线的透射.这种结构可以采用Polyakov等人^[20-21]提出的电子束光刻和电子束蒸发沉积方法来制作.

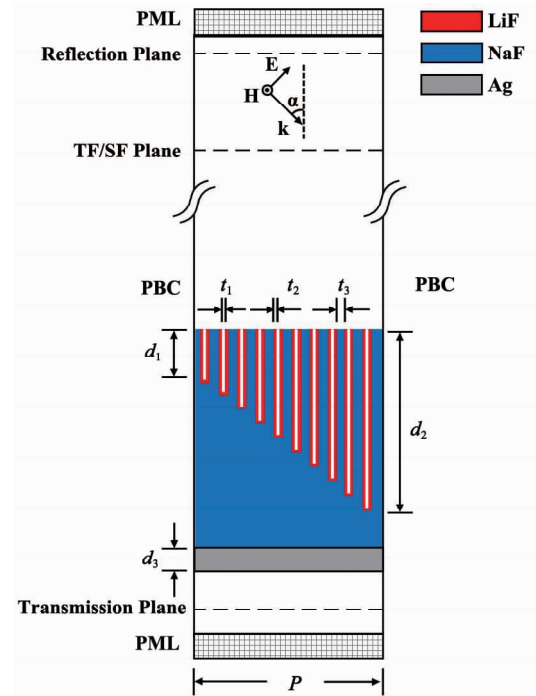


图1 基于复合凹槽的光栅型红外线吸收器的单元结构示意图

Fig. 1 The unit structure of the grating-type infrared absorber with composite grooves

在图1所示的结构中,银材料的介电常数遵循Drude模型^[22]:

$$\varepsilon_{\text{Ag}}(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\Gamma\omega}, \quad (1)$$

其中 ω 为圆频率, ε_{∞} 为 ω 趋于无穷大时的相对介电常数,其值为5.0; ω_p 为等离子体振荡频率,大小为 $1.4421 \times 10^{16}\ \text{rad/s}$; Γ 为阻尼系数,大小为 $1.4983 \times 10^{14}\ \text{rad/s}$.LiF材料和NaF材料的介电常数可以经过拟合实验数据^[23-24]得到,其介电常数随波长的变化关系曲线如图2所示,其中红色的线代表的是LiF的介电常数,蓝色的线代表的是NaF的介电常数, ε_r 是它们的实部, ε_i 是它们的虚部.从图2可以看出,LiF在 $16\text{--}33\ \mu\text{m}$ 的范围,NaF在 $35\text{--}41\ \mu\text{m}$ 的范围内,它们的介电常数的实部是负的,具有类金属特性,具备形成表面等离子激元的条件,可以对入射红外线形成吸收.为了拓宽吸收带宽,我们把两种材料进行了结合.

采用频域有限差分法(FDFD)进行数值模拟运算^[7].计算中采用了良匹配层吸收边界条件(PML).图1中从上到下的三条虚线分别表示的是反射面(Reflection Plane)、总场/散射场面(TF/SF Plane)和透射面(Transmission Plane).左右两边的

边界为周期边界条件(PBC).假设波长为 λ 的平面电磁波相对于垂直方向以角度 α 入射到如图1所示的光栅型光吸收器上,通过FDFD方法就可以得到场分布.根据能流密度(\vec{S})在反射面和透射面上的分布,就可以得到反射系数 R 和透射系数 T .根据能量守恒定律就可以得到该光栅型光吸收器的吸收率 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$,其中 $R(\omega)$ 和 $T(\omega)$ 分别是反射率和透射率, $T(\omega)$ 接近于0.

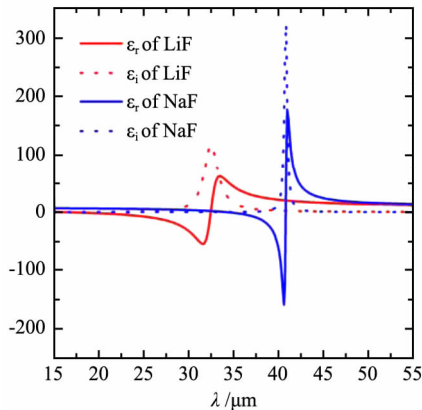


图2 LiF和NaF的介电常数随波长的变化曲线图

Fig. 2 Relation between the dielectric constant of LiF and NaF with the wavelength

2 结果和讨论

经过大量的数值运算,我们发现:当光栅的周期 $p = 30 \mu\text{m}$,空气凹槽个数的 $N = 10$,空气凹槽的宽度为 $t_1 = 1.5 \mu\text{m}$,LiF材料的厚度为 $t_2 = 0.45 \mu\text{m}$,NaF材料的厚度为 $t_3 = 0.6 \mu\text{m}$,空气凹槽最小深度为 $d_1 = 75 \mu\text{m}$,空气凹槽最大深度为 $d_2 = 120 \mu\text{m}$,底层金属银板的厚度取为 $d_3 = 3 \mu\text{m}$ 时,可以得到优化的吸收率的等高线图,如图3所示.可以看出,在入射波长为 $18 \sim 70 \mu\text{m}$,入射角度为 0 到 80° 的范围内,吸收率高于 80% 的区域几乎覆盖了整个计算范围,说明此吸收器具有良好的吸收效果.

为了阐述这种吸收器的吸收原理,图4呈现了在入射角度(a) $\alpha = 0^\circ$ 和(b) $\alpha = 80^\circ$ 的条件下,采用优化结构参数时,吸收器的反射、透射和吸收谱线曲线图.其中,红色的曲线代表的是反射曲线,黑色的曲线代表的是透射曲线,绿色的曲线代表的是吸收曲线.图4(a)中插图是透射率的放大图,从插图可以看出透射非常低.从图4(a)中可以看出,在 $18 \sim 70 \mu\text{m}$ 的波长范围内,吸收率均大于 0.7 .其中,在

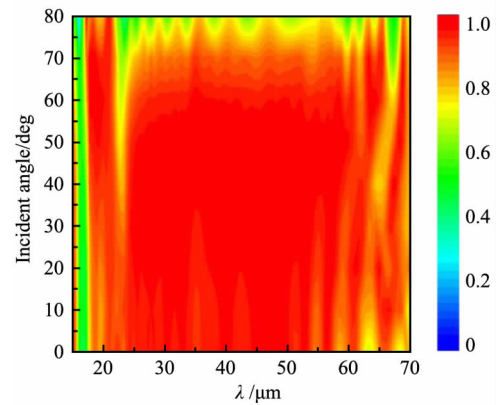


图3 吸收率随入射角度和入射波长变化的等高线图

Fig. 3 Contour map of the absorption with angle and wavelength

$22 \sim 54 \mu\text{m}$ 的波长范围内,吸收率均大于 0.9 .在短波长和长波长波段,吸收曲线有较大幅度的波动.对比图4(a)和图4(b)可以看出,在 $\alpha = 80^\circ$ 的条件下,虽然透射也非常低,但是反射明显增强,吸收明显降低.

为了解释上述现象,图5给出了在垂直入射条件下,当波长分别为 28.2 、 37.62 和 $64.5 \mu\text{m}$ 时,单元结构内的归一化的磁场分布图.结合图2和图5,可以看出:

当入射波长为 $28.2 \mu\text{m}$ 时,LiF的介电常数的实部为负值,其具有类金属特性,而NaF的介电常数的实部为正值,为一种普通的电解质.当红外线进入凹槽后,由于LiF具有类金属特性,会在LiF所形成的凹槽内形成表面等离子激元(SPP).凹槽相当于一个开放式的光学谐振腔,当SPP满足共振条件时,场被束缚在凹槽内,形成了强烈的吸收.对于结构左下方NaF所占据区域,在此波长下,为一种普通的电解质区域,其下方为金属银,其上方为凹槽区域.由于凹槽区域的平均折射率较小,所以这个区域相当于另外一个光学谐振腔,当红外线满足共振条件时,场被束缚在了这个区域,也会形成强烈的吸收.

当入射波长为 $37.62 \mu\text{m}$ 时,LiF的介电常数的实部为正值,为一种普通的电解质,而NaF的介电常数的实部为负值,其具有类金属特性.当红外线进入凹槽后,由于NaF具有类金属特性,会在NaF的两壁上形成SPP.当SPP满足其共振条件时,场就会被束缚起来,形成了强烈的吸收.对于结构左下方NaF所占据区域,在此波长下,NaF具有类金属特

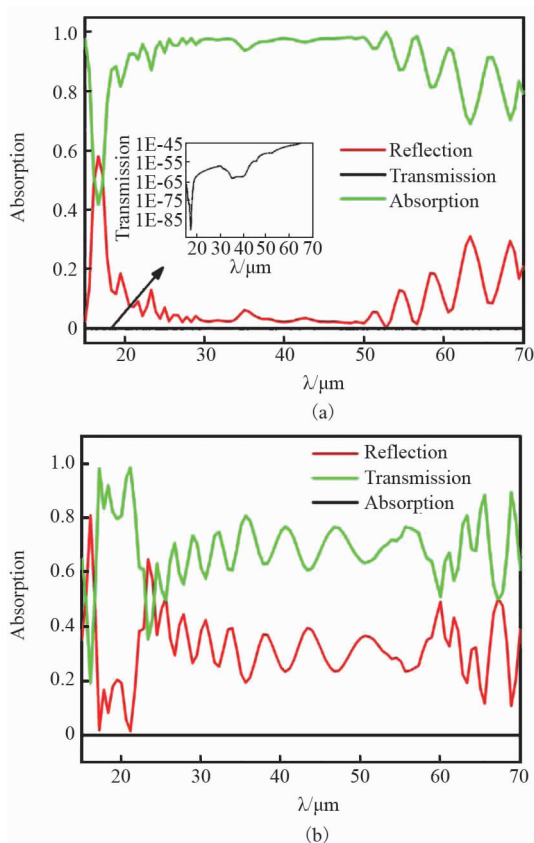


图4 在入射角度(a) $\alpha = 0^\circ$ 和(b) $\alpha = 80^\circ$ 的条件下,采用优化结构参数时,随入射波长变化的吸收器的反射、透射和吸收谱线图

Fig. 4 Dependence of the reflection, transmission and absorption on the wavelength with the optimized structural parameters and incident angle (a) $\alpha = 0^\circ$ and (b) $\alpha = 80^\circ$

性,红外线进入的深度非常有限.

当入射波长为 $64.5 \mu\text{m}$ 时, LiF 和 NaF 的介电常数的实部均为正值,均为普通的电解质. 凹槽所在的区域不能形成光学谐振腔. 对于结构左下方 NaF 所占据区域,在此波长下,为一种普通的电解质区域,其下方为金属银,其上方为凹槽区域. 由于凹槽区域的平均折射率较小,所以这个区域相当于一个光学谐振腔,当红外线满足共振条件时,场被束缚在了这个区域,也形成了强烈的吸收.

为了说明吸收率与结构参数之间的关系,在垂直入射的条件下,我们分别研究了各个几何参数对吸收率的影响.

当槽的个数 N 变化时,吸收率与入射波长的关系如图6所示. 可以看出,当 $N = 5$ 时,吸收率曲线有比较明显的起伏. 尤其在波长大于 $55 \mu\text{m}$ 时,吸收曲线就开始大幅的波动. 当 $N = 10$ 时,吸收曲线已经趋于平稳并保持着较高的吸收率. 当 $N = 15$

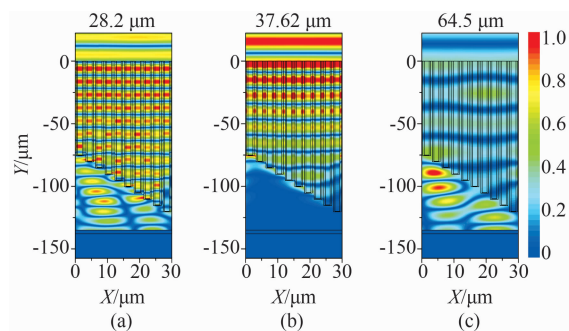


图5 在垂直入射的条件下,当波长为(a) $28.2 \mu\text{m}$, (b) $37.62 \mu\text{m}$ 和(c) $64.5 \mu\text{m}$ 时,单元结构中的磁场分布图

Fig. 5 Distribution of the magnetic field within the unit structure when the incident wavelength is (a) $28.20 \mu\text{m}$, (b) $37.62 \mu\text{m}$ and (c) $64.5 \mu\text{m}$ under the condition of vertical incidence

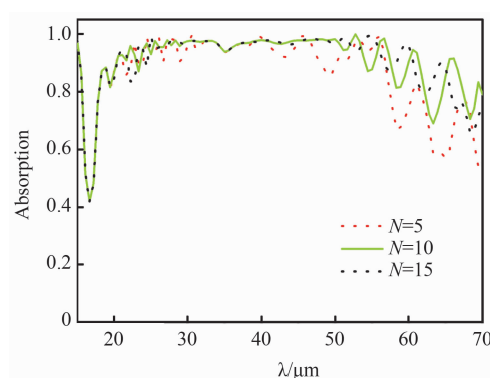


图6 在其他参数不变,改变凹槽的个数 N 时,吸收率与入射波长的关系图

Fig. 6 Dependence of the absorption on the incident wavelength with different grooves N when other parameters are fixed

时,吸收曲线都比较平稳. 和 $N = 10$ 时的情形相比,基本保持一致. 考虑到制作工艺的难度,本文在一个周期内设置了10个槽.

当光栅周期发生改变时,吸收率与入射波长的关系如图7(a)所示. 相对于优化值 $p = 30 \mu\text{m}$ 来说,当 $p = 20 \mu\text{m}$ 时,吸收率在 $50 \mu\text{m}$ 大幅度的下降. 当 $p = 40 \mu\text{m}$ 时,在 $36 \mu\text{m}$ 就有大幅的波动.

当空气槽的厚度发生改变时,吸收率与入射波长的关系如图7(b)所示. 随着空气槽的厚度逐渐增大,吸收率逐步增大,吸收曲线逐步趋于平稳. 当 $t_1 = 1.5 \mu\text{m}$,吸收效果已经非常平稳,考虑到制作的工艺以及吸收的效果,本文选择了 $t_1 = 1.5 \mu\text{m}$.

当 LiF 的厚度发生改变时,吸收率与入射波长的关系如图7(c)所示. 随着 LiF 的厚度逐渐减小,吸收率逐步增大,吸收曲线逐步趋于平稳. 考虑到制

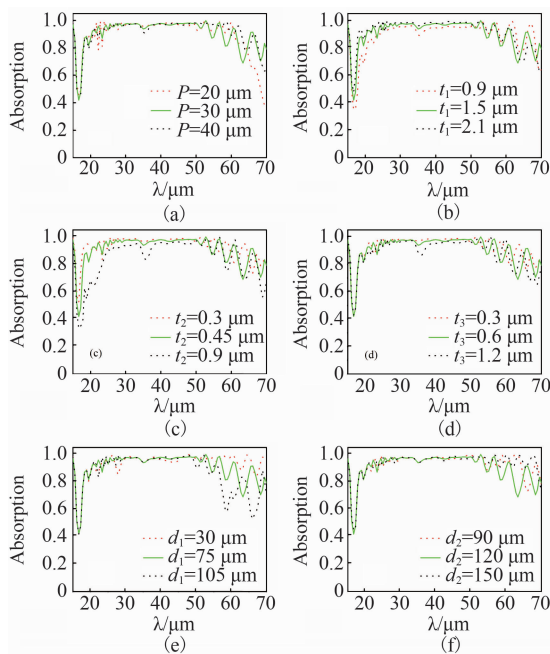


图7 其他参数不变时,分别改变(a)光栅周期,(b)空气槽的宽度,(c)LiF的厚度,(d)NaF的厚度,(e)槽的最小深度和(f)槽的最大深度时,得到的吸收率与入射波长的关系图

Fig. 7 Dependence of the absorption on the incident wavelength with different (a) period, (b) the width of the air grooves, (c) the thickness of the LiF, (d) the thickness of the NaF, (e) minimum depth of the groove of the structure and (f) maximum depth of the groove while keeping other parameters unchanged

作的工艺以及吸收的效果,本文选择了 $t_2 = 0.45 \mu\text{m}$.

当 NaF 的厚度发生改变时,吸收率与入射波长的关系如图 7(d) 所示. 随着 NaF 的厚度逐渐减小,吸收率逐步增大,吸收曲线逐步趋于平稳. 考虑到制作的工艺以及吸收的效果,本文选择了 $t_3 = 0.6 \mu\text{m}$.

当槽的最小深度发生改变时,吸收率与入射波长的关系如图 7(e) 所示. 相对于优化值 $d_1 = 75 \mu\text{m}$ 来说,当 $d_1 = 30 \mu\text{m}$ 时,吸收曲线在波长为 $28 \mu\text{m}$ 时有一些下降. 当 $d_1 = 105 \mu\text{m}$ 时,吸收曲线在 $50 \mu\text{m}$ 处有大幅的波动.

当槽的最大深度发生改变时,吸收率与入射波长的关系如图 7(f) 所示. 相对于优化值 $d_2 = 120 \mu\text{m}$ 来说,当 $d_2 = 90 \mu\text{m}$ 和 $d_2 = 150 \mu\text{m}$,吸收曲线基本上与优化曲线一致.

3 结论

设计了一种具有复合凹槽的光栅型红外线吸

收器,复合凹槽由 LiF 和 NaF 材料构成,它们的深度是线性渐变. 采用 FDFD 方法对这种吸收器的吸收特性进行的研究表明:其吸收机理是光学谐振效应,即对于入射的不同波长的红外线,这种吸收器会形成不同的光学谐振腔,能够在较宽的波长范围内对红外线形成强烈的吸收. 适当减小光栅所在区域 LiF 和 NaF 的厚度,增大空气槽的宽度,均可以提高吸收率. 光栅的周期、槽的个数以及槽的最小深度都有一定的影响,槽的最大深度对吸收率的影响最小. 采用优化的结构参数,即 $p = 30 \mu\text{m}$, $N = 10$, $t_1 = 1.5 \mu\text{m}$, $t_2 = 0.45 \mu\text{m}$, $t_3 = 0.6 \mu\text{m}$, $d_1 = 75 \mu\text{m}$, $d_2 = 120 \mu\text{m}$ 以及 $d_3 = 3 \mu\text{m}$ 时,在入射波长为 $18 \sim 70 \mu\text{m}$ 和入射角度为 $0 \sim 80^\circ$ 的范围内,这种吸收器的吸收率具有良好的吸收效果. 文章所研究的吸收器有望在红外波段的传感和探测等方面得到应用.

References

- [1] Dallenbach W, Kleinstueber W. Reflection and absorption of decimeter-waves by plane dielectric layers[J]. *Hochfrequenztechnik Hochfrequenztechnik und Elektroakustik*, 1938, **51**: 152.
- [2] Watts C M, LIU Xian-Liang, and Padilla W J. Metamaterial electromagnetic wave absorbers[J]. *Advanced Materials*, 2012, **24**(23): OP98 - OP120.
- [3] CUI Yan-Xia, HE Ying-Ran, JIN Yi, et al. Plasmonic and metamaterial structures as electromagnetic absorbers[J]. *Laser Photonics Reviews*, 2014, **8**(4): 495 - 520.
- [4] DING Fei, CUI Yan-Xia, GE Xiao-Chen, et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber. [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**: 103506.
- [5] HE Sai-Ling, CHEN Tuo. Broadband THz absorbers with graphene-based anisotropic metamaterial films[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, **3**(6): 757.
- [6] Titl A, Mai P, Taubert R, et al. Palladium-based plasmonic perfect absorber in the visible wavelength range and its application to hydrogen sensing [J]. *Nano Letters*, 2011, **11**(10): 4366 - 4369.
- [7] XUE Wen-Rui, CHEN Xi, PENG Yan-Ling, et al. Grating-type mid-infrared light absorber based on silicon carbide material[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(20): 22596.
- [8] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(20): 207402.
- [9] Schurig D, Mock J J, Justice B J. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977.
- [10] Atwater H A, Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices[J]. *Nature Mater*, 2011, (9): 205.
- [11] Liu N, Mesch M, Weiss T, et al. Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor[J]. *Nano Letters*, 2010, **10**: 2342.

(下转第 97 页)

碲镉汞母液接触时将发生表面回熔, 衬底表面这些腐蚀点及粗糙度将会继续发生变化, 值得开展进一步的研究.

References

- [1] Lawson W D, Nielson S, Putley E H, *et al.* Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe-CdTe [J]. *J. Phys. Chem. Solids*. 1959, **9**:325 - 329.
- [2] SUN Quan-Zhi, SUN Rui-Yun, WEI Yan-Feng, *et al.* Batch production technology of 50mm × 50mm HgCdTe LPE materials with high performance [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (孙权志, 孙瑞贇, 魏彦锋, 等. 50 mm × 50 mm 高性能 HgCdTe 液相外延材料的批生产技术. *红外与毫米波学报*) 2007, **36**(1), 49 - 53.
- [3] WANG Han, HONG Jin, YUE Fang-Yu, *et al.* Optical homogeneity analysis of Hg_{1-x}Cd_xTe epitaxial layers: How to circumvent the influence of impurity absorption bands [J]. *Infrared Physics & Technology*. 2017, **82**:1 - 7.
- [4] Sun C. H, Zhang P, Zhang T. N, *et al.* ZnS Thin Films Grown by Atomic Layer Deposition on GaAs and HgCdTe Substrates at Very Low Temperature [J]. *Infrared Physics & Technology*. 2017, **85**:280 - 286.
- [5] HUANG Gen-Sheng, CHEN Xin-Qiang, YANG Jian-Rong, *et al.* Growth and characterization of liquid phase epitaxy Hg_{1-x}Cd_xTe films [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (黄根生, 陈新强, 杨建荣, 等. 碲镉汞液相外延薄膜生长技术与性能. *红外与毫米波学报*) 2000, **19**(2), 145 - 148.
- [6] Bensussan P, Tribillet P. 50 years of successful MCT research and production in France [J]. *Proc. of SPIE*. 2009, 72982N.
- [7] Péré-Laperne N, Rubaldoa L, Kerlain A, *et al.* 10 μm pitch design of HgCdTe diode array in Sofradir [J]. *Proc. of SPIE*. 2015, 9370.
- [8] Reine M. B. History of HgCdTe infrared detectors at BAE Systems [J]. *Proc. of SPIE*. 2009, 72982S.
- [9] Figgemeier H, Bruder M, Mahlein K. M, *et al.* Impact of critical processes on HgCdTe diode performance and yield [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2003, **32**(7):588 - 591.
- [10] Kinch M. A. 50 years of HgCdTe at Texas Instruments and Beyond [J]. *Proc. of SPIE*, 2009, 72982T.
- [11] Tennant W. E, Arias J. M. HgCdTe at Teledyne [J]. *Proc. of SPIE*, 2009, 72982V.
- [12] Bratt P. R, Johnson S. M, Rhiger D. R, *et al.* Historical perspectives on HgCdTe material and device development at Raytheon Vision Systems [J]. *Proc. of SPIE*. 2009, 72982U.
- [13] HU Wei-Da, LIANG Jian, YUE Fang-Yu, *et al.* Recent progress of subwavelength photon trapping HgCdTe infrared detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (胡伟达, 梁健, 越方禹, 等. 新型亚波长陷光结构 HgCdTe 红外探测器研究进展. *红外与毫米波学报*) 2016, **35**(1), 25 - 36.
- [14] Sheng F F, Yang J R, Sun S W, *et al.* Influence of Cd-rich Annealing on Defects in Te-rich CdZnTe Materials [J]. *Journal of Electronic Materials*. 2014, **43**(7):2702 - 2708.
- [15] Sheng F F, Zhou C H, Sun S W, *et al.* Influences of Te-rich and Cd-rich precipitates of CdZnTe substrates on the surface defects of HgCdTe liquid-phase epitaxy materials [J]. *Journal of Electronic Materials*. 2014, **43**(5):1397 - 1402.
- [12] Knight M W, Sobhani H, Nordlander P, *et al.* Photodetection with active optical antennas [J]. *Science*, 2011, **332**:702.
- [13] FAN Zhi-Yong, Kapadia R, Leu P W, *et al.* Ordered arrays of dual-diameter nanopillars for maximized optical absorption [J]. *Nano Letters*, 2010, **10**:3823.
- [14] Urade Y, Nakata Y, Nakanishi T, *et al.* Broadband and energy-concentrating terahertz coherent perfect absorber based on a self-complementary metasurface [J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(19):4472.
- [15] Aydin K, Ferry V E, Briggs R M, *et al.* Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers. [J]. *Nature Communications*, 2011, **2**(1):517.
- [16] LIANG Lei-Xia, XUE Wen-Rui, YANG Rong-Cao. Optical absorber from surface plasmonic grating with depth-linear-gradient grooves [J]. *Acta Optica Sinica* (梁磊霞, 薛文瑞, 杨荣草. 槽深线性渐变的表面等离子光栅光吸收器. *光学学报*) 2017, **37**(1):0123002.
- [17] CAO Tun, ZHANG Lei, Simpson R E, *et al.* Mid-infrared tunable polarization-independent perfect absorber using a phase-change metamaterial [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, **30**(6):1580 - 1585.
- [18] ZHANG Nan, ZHOU Pei-Heng, CHENG Deng-Mu, *et al.* Dual-band absorption of mid-infrared metamaterial absorber based on distinct dielectric spacing layers [J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(7):1125 - 1127.
- [19] XIAO Shu-Yuan, WANG Tao, LIU Yue-Bo, *et al.* Tunable light trapping and absorption enhancement with graphene ring arrays [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2016, **18**:26661 - 26669.
- [20] Polyakov A, Padmore H A, LIANG Xiao-Gan, *et al.* Light trapping in plasmonic nanocavities on metal surfaces [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2011, **29**(6):06FF01.
- [21] Polyakov A, Thompson K F, Dhuey S D, *et al.* Plasmon resonance tuning in metallic nanocavities [J]. *Scientific Reports*, 2012, **2**(12):933.
- [22] Korobkin D, Urzhumov Y, Shvets G. Enhanced near-field resolution in midinfrared using metamaterials [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2006, **23**(3):468 - 478.
- [23] Palik E D. Handbook of optical constants of solids [M]. San Diego: Academic Press, 1985, 675 - 693.
- [24] Palik E D. Handbook of optical constants of solids [M]. San Diego: Academic Press, 1991, 1021 - 1034.

(上接第 91 页)