

# 基于 LiF 和 NaF 的超宽带红外吸收器

陈曦<sup>1</sup>, 薛文瑞<sup>1</sup>, 赵晨<sup>1</sup>, 李昌勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006;

<sup>2</sup>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 材料的光栅型超宽带红外吸收器, 并采用频域有限差分法对其吸收特性进行了研究。研究表明, 单独采用 LiF(或 NaF) 和电介质材料构成的光栅型吸收器都具有较宽的吸收带, 但其吸收带处于不同的红外波段。同时采用 LiF、NaF 及电介质材料构成的光栅型吸收器可以把这两个吸收带衔接起来。通过优化参数, 在入射波长为 15~45  $\mu\text{m}$ 、入射角度为  $0^\circ\sim 80^\circ$  的范围内, 吸收器的吸收率达到 80% 以上, 实现了宽带吸收。结构中复合层的层数对吸收率有最大的影响, 电介质层的厚度对吸收率的影响较小。

**关键词** 光学器件; 吸收器; 磁激元; 光栅; 红外

中图分类号 O431

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0123002

## Ultra-Broadband Infrared Absorber Based on LiF and NaF

Chen Xi<sup>1</sup>, Xue Wenrui<sup>1</sup>, Zhao Chen<sup>1</sup>, Li Changyong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

<sup>2</sup>Institute of Laser Spectroscopy, State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optic Devices, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

**Abstract** Grating-type ultra-broadband infrared absorber based on LiF and NaF is designed, and its absorption characteristics are researched by using finite-difference frequency-domain method. Research results show that grating-type absorbers consist of LiF(or NaF) and dielectric material, and they all have wider absorption band. The absorption bands are located at different infrared wavebands. The two absorption bands can be connected by using LiF, NaF and dielectric material together in the absorber. In the range of incident wavelength of 15-45  $\mu\text{m}$  and the range of incident angle of  $0^\circ\sim 80^\circ$ , the absorptivity of the absorber is more than 80% with the optimization of parameters, which realizes broadband absorption. The layer number of the composite layer has the biggest effect on the absorptivity, and the minimal effect is the thickness of the dielectric layer.

**Key words** optical devices; absorber; magnetic polariton; grating; infrared

**OCIS codes** 230.0040; 350.2450; 050.2770; 240.6680

## 1 引 言

电磁吸收器是指能够对电磁波进行强烈吸收的器件。通过设计恰当的结构和选择合适的材料, 这种器件能够对入射的特定频带内的电磁波实现强烈的吸收<sup>[1]</sup>。它们在电磁隐身<sup>[2]</sup>、热辐射<sup>[3]</sup>、薄膜太阳能电池<sup>[4]</sup>、传感器<sup>[5]</sup>和探测<sup>[6]</sup>等方面有非常广泛的应用前景。

按照吸收频段划分, 电磁吸收器有微波吸收器、太赫兹吸收器、红外吸收器和可见光吸收器。在微波波段, 已经提出了可调谐型的微波二极管与金属谐振环耦合的吸收器<sup>[7]</sup>、树枝状的吸收器<sup>[8]</sup>、金属与电介质叠加而成的金字塔型的吸收器<sup>[9]</sup>等。在太赫兹波段, 已经提出了十字型的切割线型吸收器<sup>[10]</sup>、谐振环形吸收器<sup>[11]</sup>、两个不同谐振环型吸收器<sup>[12]</sup>以及金属与电介质叠加而成的金字塔型结构吸收

收稿日期: 2017-05-19; 收到修改稿日期: 2017-07-03

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)

作者简介: 陈曦(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事表面等离子体学和电磁吸收器等方面的研究。

E-mail: 1016980626@qq.com

导师简介: 薛文瑞(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事导波光学、纳米光子学和表面等离子体学等方面的研究。

E-mail: wxue@sxu.edu.cn(通信联系人)

器<sup>[13]</sup>等。在红外波段,已经提出了水平集成的多尺寸的金属-绝缘体-金属谐振腔吸收器<sup>[14]</sup>、半导体和电介质叠加而成的金字塔型的吸收器<sup>[15]</sup>、树枝状吸收器<sup>[16]</sup>等。在可见光波段,已经提出了金属光栅结构吸收器<sup>[17]</sup>、孔阵列型结构吸收器<sup>[18]</sup>等。

在红外波段,Cui等<sup>[14]</sup>采用不同尺寸的纳米条阵列构建了一种红外宽带吸收器,在8.5~11 μm波段获得了高达80%的吸收率。Xue等<sup>[15]</sup>采用半导体材料SiC和电介质材料设计了一种截断的金字塔型光栅光吸收器,在10.5~12.5 μm波段也获得了80%以上的吸收率。Peng等<sup>[19]</sup>采用金属Ti和两层电介质Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>组成吸收器,基于阻抗匹配的原理,该吸收器在2.2~6.2 μm波段实现了85%以上的吸收。Yue等<sup>[20]</sup>采用金属Au-电介质Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-金属Au堆叠组成纳米结构吸收器,在较窄的频带内获得了完美吸收。Xiao等<sup>[21]</sup>采用一种基于多腔等离子体超材料光吸收器,通过调节层数可以扩大带宽,在3.56 μm的带宽内获得了高于80%的吸收率。上述这些红外吸收器均存在带宽较窄的问题。

为了拓宽红外吸收器的带宽,本文设计了由LiF、NaF和电介质材料构成的截断的金字塔型光栅光吸收器,并实现了超宽带的吸收。

## 2 结构模型和计算方法

所设计的基于LiF和NaF材料的宽带红外线吸收器是由截断的金字塔形结构在水平方向呈周期性排列而构成的光栅,其单元如图1所示。 $P$ 为光栅的周期。截断的金字塔形结构一共包括 $L$ 个复合层,每一个复合层是由厚度为 $T_1$ 的LiF、厚度为 $T_2$ 的NaF和厚度为 $T_3$ 的电介质叠加而成的。这些复合层的宽度从上到下呈线性变化,其中顶层宽度为 $W_1$ ,底层宽度为 $W_2$ 。底层是由厚度为 $T_4 = 0.4 \mu\text{m}$ 的银板构成的,计算表明这一厚度足以阻挡电磁波的透射。这种结构可以参照类似于Ding等<sup>[9]</sup>所采用的方法来制作。图1中,最上面和最下面的网格区域是良匹配层(PML),图中的三条虚线分别表示的是反射面、总场(TF)/散射场(SF)面和透射面。左右两边的边界为周期边界条件(PBC)。横磁(TM)型电磁波以 $\alpha$ 角入射到结构上。

在图1所示结构中,银材料的介电常数遵循Drude模型<sup>[22]</sup>

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

式中 $\epsilon_{\infty}$ 为圆频率趋于无穷大时的相对介电常数,其

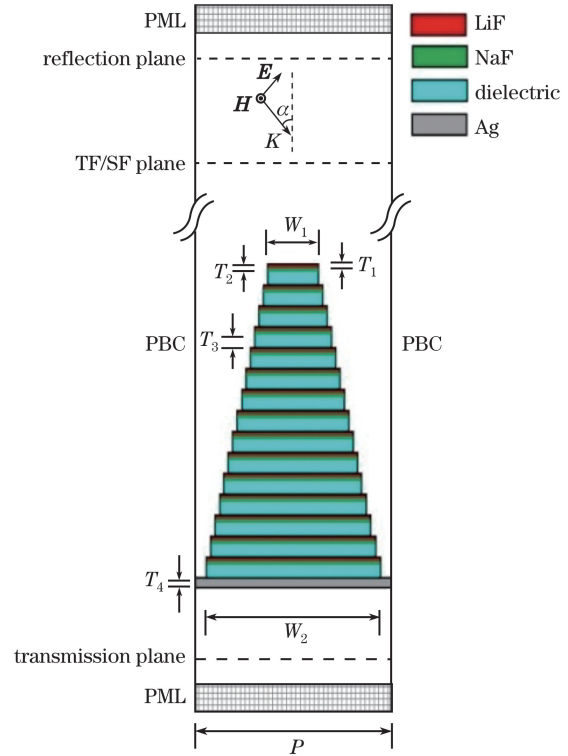


图1 光栅型吸收器的结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of the grating-type absorber  
 值为5.0; $\omega_p$ 为等离子体振荡频率,其值为 $1.4421 \times 10^{16} \text{ rad/s}$ ; $\Gamma$ 为阻尼系数,其值为 $1.4983 \times 10^{14} \text{ rad/s}$ ; $\omega$ 为圆频率。电介质材料采用的是SiO<sub>2</sub>,其介电常数 $\epsilon_d = 16$ 。

本研究采用频域有限差分法<sup>[15]</sup>进行数值模拟运算,计算中采用了良匹配层PML吸收边界条件。这种方法在二维Yee氏网格的基础上,采用中心差分的方法,把麦克斯韦方程离散化,得到一个大型的稀疏线性代数方程组

$$[\mathbf{A}][\mathbf{x}] = [\mathbf{b}], \quad (2)$$

式中 $[\mathbf{A}]$ 为系数矩阵, $[\mathbf{x}]$ 为与场分布相关的列矢量, $[\mathbf{b}]$ 为与源有关的列矢量。假设波长为 $\lambda$ 的平面电磁波相对于竖直方向以角度 $\alpha$ 入射到如图1所示的光栅型光吸收器上,通过求解(2)式就可以得到场分布。根据能流密度 $\mathbf{S}$ 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, $T(\omega)$ 接近于零。

## 3 基于LiF或NaF材料的红外线吸收特性

LiF和NaF在特定的波段范围内具有类金属

的特性,它们的介电常数与频率的关系为

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} \frac{\omega^2 - \omega_L^2 + i\gamma\omega}{\omega^2 - \omega_T^2 + i\gamma\omega}, \quad (3)$$

式中  $\epsilon_{\infty}$  为频率趋于无穷大时对应的介电常数,  $\omega_L$  为

表 1 LiF 和 NaF 的介电常数表达式中的参数

Table 1 Parameters in the expressions for the dielectric constant of LiF and NaF

Material	$\epsilon_{\infty}$	$\omega_L / (10^{13} \text{ rad/s})$	$\omega_T / (10^{13} \text{ rad/s})$	$\gamma / (10^{12} \text{ rad/s})$
LiF	2.03710	11.98220	5.79581	3.30572
NaF	7.15625	5.49945	4.61279	4.10108

图 2 和图 3 分别给出了 LiF 和 NaF 的介电常数与波长的关系,图中的圆点表示实验测得的数据,实线表示拟合得到的数据。其中,红色和绿色分别表示介电常数的实部和虚部。由图 2 和图 3 可以看出, LiF 和 NaF 拟合得到的数据和实验测得的数据几乎完全一致。

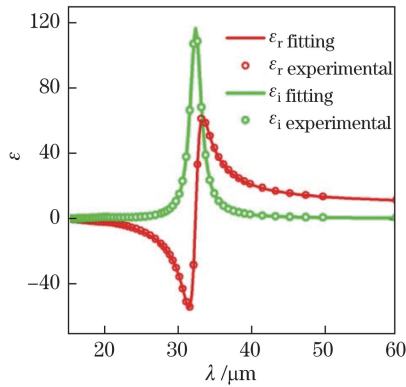


图 2 LiF 的介电常数与波长的关系

Fig. 2 Relationship between dielectric constant of LiF and wavelength

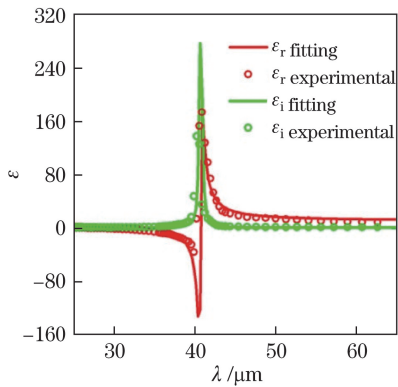


图 3 NaF 的介电常数与波长的关系

Fig. 3 Relationship between dielectric constant of NaF and wavelength

图 4 给出了采用 LiF 和电介质两种材料构成复合层时,吸收率相对于入射角度与波长的等高线图。采用的优化结构参数为:  $L = 17, W_1 = 1.2 \mu\text{m}$ ,

纵向光波模振动圆频率,  $\omega_T$  为横向光波模振动圆频率,  $\gamma$  为阻尼系数。通过与红外波段的实验数据<sup>[23]</sup>拟合,可得表 1 所示参数。

$W_2 = 3.92 \mu\text{m}, T_1 = 0.96 \mu\text{m}, T_2 = 0 \mu\text{m}, T_3 = 1.7 \mu\text{m}, T_4 = 0.4 \mu\text{m}, P = 4 \mu\text{m}$ 。从图 4 可以看出,在入射波长  $15 \sim 34 \mu\text{m}$  和入射角度  $0^\circ \sim 80^\circ$  范围内,吸收率均达到 80% 以上。当波长大于  $34 \mu\text{m}$  时,吸收率就开始大幅下降。这是由于在  $15 \sim 34 \mu\text{m}$  范围内, LiF 的介电常数的实部小于零,而虚部大于零,具有类金属的特性,可以在其相邻的两层之间形成磁激元<sup>[24]</sup>。强烈的共振效应造成了较大的损耗,导致吸收较高。当波长大于  $34 \mu\text{m}$  时, LiF 不再具有类金属的特性,不再会形成磁激元,从而使得损耗减小,吸收也随之减小。

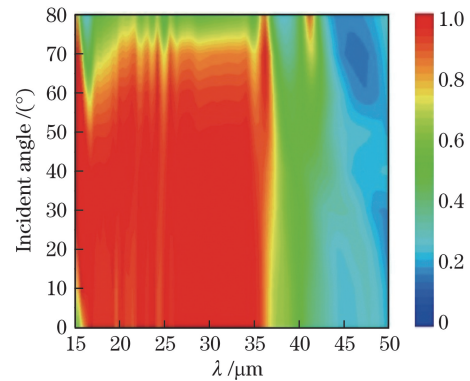


图 4 基于 LiF 材料的吸收器的吸收率相对于入射角度与波长的等高线图

Fig. 4 Absorptivity contour map of the absorber based on LiF material as a function of incident angle and wavelength

图 5 给出了采用 NaF 和电介质两种材料构成复合层时,吸收率相对于入射角度与波长的等高线图。采用的优化结构参数为:  $L = 15, W_1 = 1.2 \mu\text{m}, W_2 = 3.92 \mu\text{m}, T_1 = 0 \mu\text{m}, T_2 = 1.36 \mu\text{m}, T_3 = 1.9 \mu\text{m}, T_4 = 0.4 \mu\text{m}, P = 4 \mu\text{m}$ 。从图 5 可以看出,在入射波长  $34 \sim 42 \mu\text{m}$  和入射角度  $0^\circ \sim 80^\circ$  的范围内,吸收率均可达到 80% 以上。这是由于在  $34 \sim 42 \mu\text{m}$  范围内, NaF 的介电常数的实部小于零,而虚部大于零,具有类金属的特性,可以在其相邻的两层之间形成磁激元<sup>[24]</sup>。强烈的共振效应造成了较

大的损耗,导致吸收较高。当波长大于  $42 \mu\text{m}$  时, NaF 不再具有类金属的特性,不再会形成磁激元,从而使得损耗减小,吸收也随之减小。

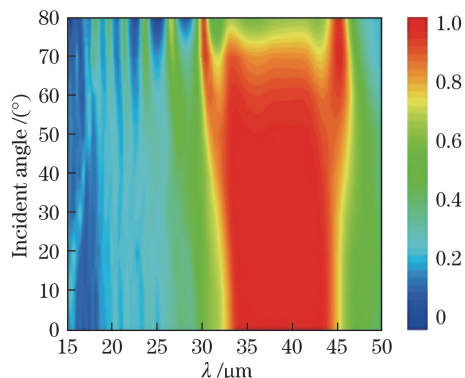


图 5 基于 NaF 材料的吸收器的吸收率相对于入射角度与波长的等高线图

Fig. 5 Absorptivity contour map of the absorber based on NaF material as a function of incident angle and wavelength

#### 4 基于 LiF 和 NaF 组合材料的红外线吸收特性

由第 3 节的研究结果可以看出,当采用 LiF 和电介质或者 NaF 材料和电介质两种材料构成复合层时,吸收器的吸收带分别处在  $15 \sim 34 \mu\text{m}$  和  $34 \sim 42 \mu\text{m}$  范围内。显然,如果采用 LiF、NaF 材料和电介质三种材料构成复合层,那么吸收带宽就会得到拓宽。在复合层的层数保持 15 层的情况下,经过一系列的仿真,得到的最优化参数为:  $L = 15, W_1 = 1.2 \mu\text{m}, W_2 = 3.92 \mu\text{m}, T_1 = 0.96 \mu\text{m}, T_2 = 1.36 \mu\text{m}, T_3 = 1.68 \mu\text{m}, T_4 = 0.4 \mu\text{m}, P = 4 \mu\text{m}$ 。图 6 给出了采用这些参数时,吸收器的吸收率随着角度和波长的等高线图。可以看出,在入射波长  $15 \sim 45 \mu\text{m}$  和入射角度  $0^\circ \sim 80^\circ$  的范围内,这种结构的吸收器保持着较高的吸收率。与图 4 和图 5 相比,吸收带宽得到了极大的拓展。

为了说明这种吸收器的吸收机制,图 7 给出了波长分别为  $18.85, 32.5, 44.4 \mu\text{m}$  三种情况下,入射波垂直入射时结构单元中磁场的归一化的强度分布图。比较图 7(a)~(c) 可以看出,在不同的波长时,磁场会被局域在金字塔的不同位置。当波长为  $18.85 \mu\text{m}$  时, LiF 的介电常数的实部小于零,而虚部大于零,具有类金属的特性,而 NaF 不具有金属特性,充当了普通电解质的作用,所以构成了金属 (LiF)-电介质 (NaF)-电介质 ( $\text{SiO}_2$ )-金属 (LiF) 的结构,可以在其相邻的两层之间形成磁激元<sup>[25]</sup>, 磁场

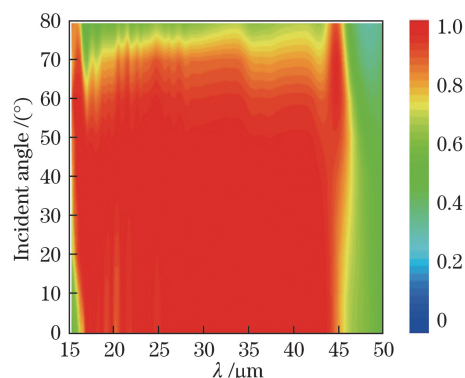


图 6 基于 LiF 和 NaF 组合材料的吸收器的吸收率相对于入射角度与波长的等高线图

Fig. 6 Absorptivity contour map of the absorber based on LiF and NaF materials as a function of incident angle and wavelength

会被局域在金字塔的顶部。随着波长的增加,磁场局域的部分逐渐下降到金字塔的底部。

图 8 给出了入射波波长分别为  $32.5 \mu\text{m}$  和  $44.4 \mu\text{m}$  时,电场  $E$  的局部分布图。从图 8 可以看出,当波长为  $32.5 \mu\text{m}$  时, LiF 和 NaF 均具有类金属的特性,所以构成了金属 (LiF)-金属 (NaF)-电介质 ( $\text{SiO}_2$ )-金属 (LiF)-金属 (NaF) 的结构,形成的磁激元主要集中在上一个复合层的 NaF 和下一个复合层的 LiF 之间,即电介质 ( $\text{SiO}_2$ ) 中。当波长为  $44.4 \mu\text{m}$  时,由于 LiF 不再具有类金属特性,充当了普通电介质的作用,而 NaF 仍然具有类金属特性,所以构成了金属 (NaF)-电介质 ( $\text{SiO}_2$ )-电介质 (LiF)-金属 (NaF) 结构,形成的磁激元扩展到了相邻两个复合层中的两层 NaF 之间,即 LiF 和电介质中。

为了说明吸收率与结构参数之间的关系,分别研究了垂直入射时各个几何参数对吸收率的影响。

其他参数保持不变,当复合层的层数  $L$  变化时,吸收率与入射波长的关系如图 9 所示。可以看出,当  $L = 5$  时,吸收率曲线有比较明显的起伏。尤其在波长大于  $40 \mu\text{m}$  时,吸收曲线开始大幅下降。当  $L = 15$  时,吸收曲线已经趋于平稳并保持着较高的吸收率。当  $L = 20$  时,吸收曲线都比较平稳。和  $L = 15$  时的情形相比,基本保持一致。考虑到制作工艺的难度以及材料的节约,本研究采用 15 个复合层。

当周期  $P$  发生改变时,吸收率与入射波长的关系如图 10(a) 所示。相对于优化值  $P = 4 \mu\text{m}$  来说,当  $P = 2 \mu\text{m}$  时,吸收率虽然在  $44.5 \sim 50 \mu\text{m}$  仍保持着较高值,但其在多个地方有大幅度的下降。当  $P = 6 \mu\text{m}$  时,吸收率有一定的波动,且在  $40 \mu\text{m}$  就开始大幅下降。

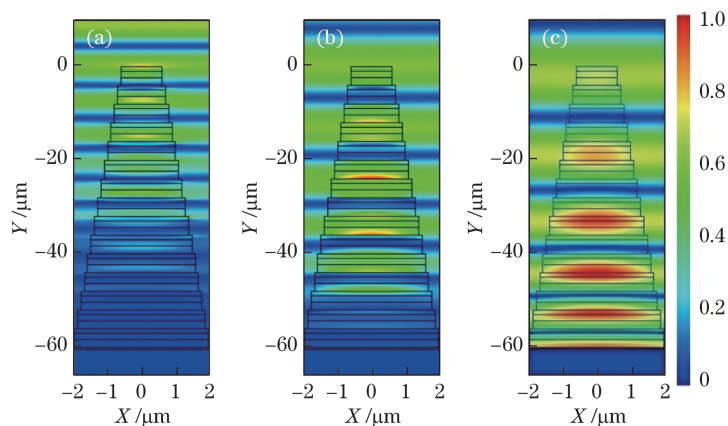


图7 入射波长为(a)18.85  $\mu\text{m}$ 、(b)32.5  $\mu\text{m}$ 、(c)44.4  $\mu\text{m}$  时,单元结构中的磁场分布  
Fig. 7 Distribution of magnetic field in the unit with the incident wavelength of (a) 18.85  $\mu\text{m}$ , (b) 32.5  $\mu\text{m}$ , (c) 44.4  $\mu\text{m}$

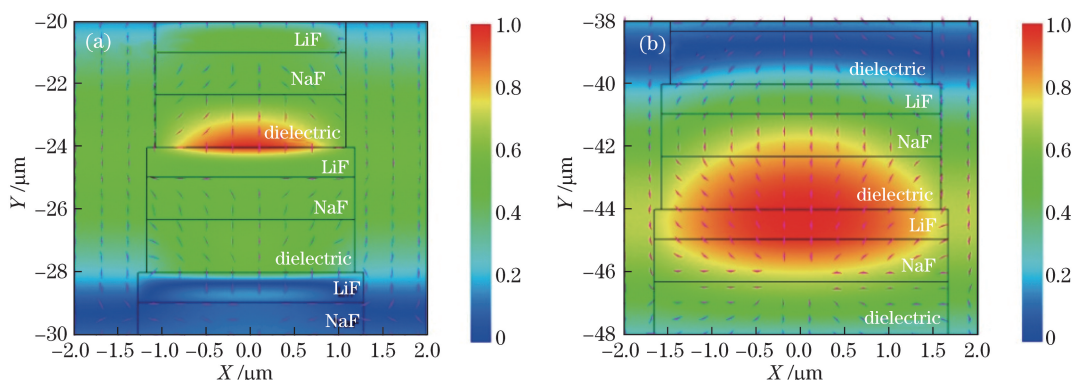


图8 入射波长为(a)32.5  $\mu\text{m}$  和(b)44.4  $\mu\text{m}$  时,电场  $E$  的局部分布图

Fig. 8 Local distribution map of the electric field  $E$  with the incident wavelength of (a) 32.5  $\mu\text{m}$ , (b) 44.4  $\mu\text{m}$

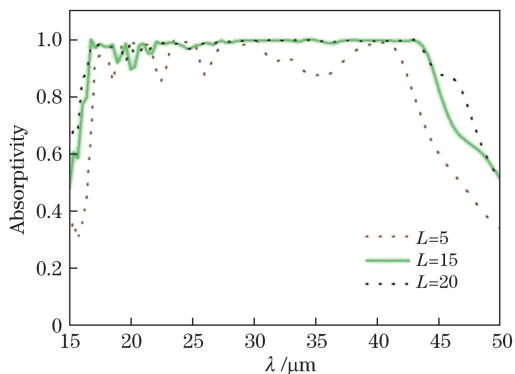


图9 不同  $L$  时,吸收率与入射波长的关系  
Fig. 9 Relationship between absorptivity and incident wavelength with different  $L$

当 LiF 的厚度  $T_1$  发生改变时,吸收率与入射波长的关系如图 10(b) 所示。相对于优化值  $T_1 = 0.96 \mu\text{m}$  来说,当  $T_1 = 0.2 \mu\text{m}$  时,吸收曲线有较大的起伏。当  $T_1 = 1.2 \mu\text{m}$  时,吸收曲线在吸收带的边缘有较小的下滑。

当 NaF 的厚度  $T_2$  发生改变时,吸收率与入射波长的关系如图 10(c) 所示。相对于优化值  $T_2 =$

1.36  $\mu\text{m}$  来说,当  $T_2 = 0.4 \mu\text{m}$  时,吸收曲线在波长为 40  $\mu\text{m}$  时就开始大幅下降。当  $T_2 = 1.6 \mu\text{m}$  时,吸收曲线在吸收带的上边缘有较小的下滑。

当电介质的厚度  $T_3$  发生改变时,吸收率与入射波长的关系如图 10(d) 所示。相对于优化值  $T_3 = 1.68 \mu\text{m}$  来说,当  $T_3 = 1.4 \mu\text{m}$  和  $T_3 = 1.8 \mu\text{m}$  时,吸收曲线在吸收带的上边缘有较小的下滑。

当顶层宽度  $W_1$  发生改变时,吸收率与入射波长的关系如图 10(e) 所示。相对于优化值  $W_1 = 1.2 \mu\text{m}$  来说,当  $W_1 = 0.8 \mu\text{m}$  时,吸收曲线在吸收带的上边缘有较小的下滑。当  $W_1 = 2.0 \mu\text{m}$  时,吸收曲线在 25  $\mu\text{m}$  处有大幅的下降。

当底层宽度  $W_2$  发生改变时,吸收率与入射波长的关系如图 10(f) 所示。相对于优化值  $W_2 = 3.92 \mu\text{m}$  来说,当  $W_2 = 3.2 \mu\text{m}$  时,吸收曲线在波长为 20  $\mu\text{m}$  时有大幅的下降,吸收带宽明显收窄。当  $W_2 = 3.96 \mu\text{m}$  时,吸收曲线基本上与优化曲线一致。但这一值已经接近于周期的优化值  $p = 4 \mu\text{m}$ ,考虑到加工的难度,本研究采用  $W_2 = 3.92 \mu\text{m}$ 。

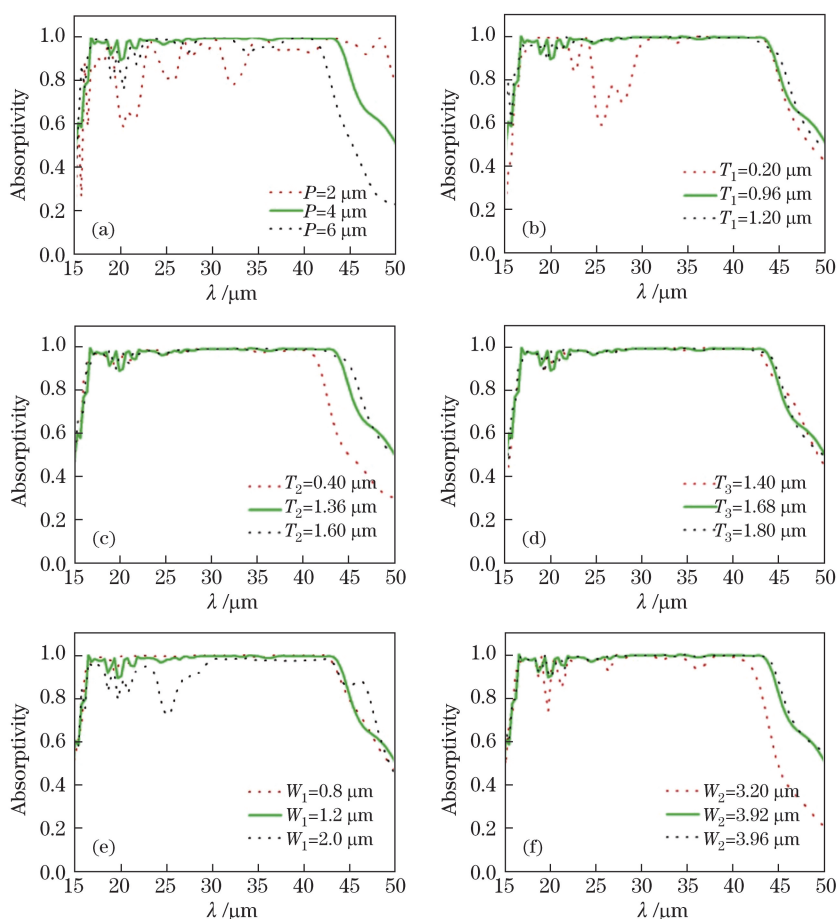


图 10 其他参数保持不变,不同(a)  $P$ 、(b)  $T_1$ 、(c)  $T_2$ 、(d)  $T_3$ 、(e)  $W_1$ 、(f)  $W_2$ 时吸收率与入射波长的关系

Fig. 10 Relationship between absorptivity and incident wavelength with different (a)  $P$ , (b)  $T_1$ , (c)  $T_2$ , (d)  $T_3$ , (e)  $W_1$ , (f)  $W_2$  while other parameters remain unchanged

## 5 结 论

设计了一种超宽带红外吸收器,它是一种光栅型吸收器,其结构单元是一个金属银板上基于 LiF、NaF 材料和电介质材料交替叠加而成的截断的金字塔形结构。计算表明,采用优化的参数( $L = 15$ ,  $W_1 = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $W_2 = 3.92 \mu\text{m}$ ,  $T_1 = 0.96 \mu\text{m}$ ,  $T_2 = 1.36 \mu\text{m}$ ,  $T_3 = 1.68 \mu\text{m}$ ,  $T_4 = 0.4 \mu\text{m}$ ,  $P = 4 \mu\text{m}$ ),在入射波长为  $15 \sim 45 \mu\text{m}$ 、入射角度为  $0^\circ \sim 80^\circ$  范围内,该吸收器的吸收率可以达到 80% 以上,可以实现超宽带吸收。复合层的层数对吸收曲线的影响较大,结构的周期、LiF 层的厚度、NaF 层的厚度、顶层宽度以及底层的宽度对吸收曲线有一定的影响,而电介质层的厚度对吸收曲线的影响较小。本研究结果可以给超宽带红外吸收器的设计、制作和应用提供一定的理论基础。

## 参 考 文 献

- [1] Cui Y X, He Y R, Jin Y, *et al.* Plasmonic and metamaterial structures as electromagnetic absorbers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(4): 495-520.
- [2] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, *et al.* Perfect metamaterial absorber[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(20): 207402.
- [3] Schurig D, Mock J J, Justice B J, *et al.* Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [4] Atwater H A, Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(3): 205-213.
- [5] Liu N, Mesch M, Weiss T, *et al.* Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(7): 2342-2348.
- [6] Knight M W, Sobhani H, Nordlander P, *et al.* Photodetection with active optical antennas[J]. *Science*, 2011, 332(6030): 702-704.
- [7] Zhu B, Huang C, Feng Y. Dual band switchable metamaterial electromagnetic absorber[J]. *Progress in Electromagnetics Research B*, 2010, 24: 121-129.
- [8] Bao S, Luo C R, Zhang Y P, *et al.* Broadband metamaterial absorber based on dendritic structure[J].

- Acta Physica Sinica, 2010, 59(5): 3187-3191.
- 保石, 罗春荣, 张燕萍, 等. 基于树枝结构单元的超材料宽带微波吸收器[J]. 物理学报, 2010, 59(5): 3187-3191.
- [9] Ding F, Cui Y X, Ge X C, *et al.* Ultra-broadband microwave metamaterial absorber[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(10): 103506.
- [10] Ye Y Q, Jin Y, He S L. Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the terahertz region[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(3): 498-504.
- [11] Landy N I, Bingham C M, Tyler T. Design, theory, and measurement of a polarization insensitive absorber for terahertz imaging[J]. Physical Review B, 2009, 79(12): 125104.
- [12] Wen Q Y, Zhang H W, Xie Y S, *et al.* Dual band terahertz metamaterial absorber: design, fabrication and characterization[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(24): 241111.
- [13] Zhu J F, Ma Z F, Sun W J, *et al.* Ultra-broadband terahertz metamaterial absorber[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(2): 021102.
- [14] Cui Y X, Xu J, Fung K H, *et al.* A thin film broadband absorber based on multi-sized nanoantennas[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(25): 253101.
- [15] Xue W R, Chen X, Peng Y L, *et al.* Grating-type mid-infrared light absorber based on silicon carbide material[J]. Optics Express, 2016, 24(20): 22596-22605.
- [16] Zhu W R, Zhao X P. Metamaterial absorber with dendritic cells at infrared frequencies[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(12): 2382-2385.
- [17] Zhao Y, He J F, Yang R C, *et al.* Two-dimensional surface plasmonic grating optical absorber with gradually varying structure[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0223005.
- 赵阳, 何建芳, 杨荣草, 等. 结构渐变的二维表面等离子体光栅光吸收器[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0223005.
- [18] Hedayati M K, Javaherirahim M, Mozooni B, *et al.* Design of a perfect black absorber at visible frequencies using plasmonic metamaterials[J]. Advanced Materials, 2011, 23(45): 5410-5414.
- [19] Peng H, Luo Y, Ying X X, *et al.* Broadband and highly absorbing multilayer structure in mid-infrared[J]. Applied Optics, 2016, 55(31): 8833-8838.
- [20] Yue W S, Wang Z H, Yang Y, *et al.* High performance infrared plasmonic metamaterial absorbers and their applications to thin-film sensing[J]. Plasmonics, 2016(10): 1557-1563.
- [21] Xiao D, Tao K Y, Wang Q. Ultrabroadband mid-infrared light absorption based on a multi-cavity plasmonic metamaterial array[J]. Plasmonics, 2016, 11(2): 389-394.
- [22] Korobkin D, Urzhumov Y, Shvets G. Enhanced near-field resolution in midinfrared using metamaterials[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2005, 23(3): 468-478.
- [23] Palik E D. Handbook of optical constants of solids[M]. San Diego: Academic Press, 1985: 675-693, 1021-1034.
- [24] Wang L P, Zhang X M. Effect of magnetic polaritons on the radiative properties of double-layer nanoslit arrays[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(12): 2595-2604.