

doi: 10.3788/gzxb20164511.1105001

基于三层光栅结构的超宽带太赫兹吸收体

郭剑琴^{1,2}, 徐德刚^{1,2}, 刘鹏翔^{1,2}, 王与焯^{1,2}, 钟凯^{1,2}, 姚建铨^{1,2}

(1 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 激光与光电子研究所, 天津 300072)

(2 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 基于等效介质膜理论及多层减反膜原理设计了用于超宽带太赫兹吸收体的三层微结构光栅, 光栅基质采用重掺硼硅材料. 用有限时域差分法分析了光栅周期、光栅宽度和深度对太赫兹吸收体反射系数的影响. 数值分析结果表明, 在低于 3 THz 波段, 吸收率高于 98% 的带宽为 1.3 THz, 吸收率高于 95% 的带宽达 2.1 THz. 用严格耦合波理论对该三层光栅的高吸收现象进行理论分析, 分析结果表明, 光栅多级衍射的相互作用减少了入射面的反射率, 增大了该吸收体的吸收率. 进一步优化三层光栅微结构的参量, 在 0.6~6 THz 范围内实现了大于 95% 的太赫兹吸收. 基于光栅结构的吸收体结构简单, 易于设计与分析, 可以应用于太赫兹成像与探测应用领域.

关键词: 光栅结构; 太赫兹吸收体; 超宽带; 严格耦合波; 重掺硼硅

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)11-1105001-6

Broadband Terahertz Absorber Based on Three-layer Gratings

GUO Jian-qin^{1,2}, XU De-gang^{1,2}, LIU Peng-xiang^{1,2}, WANG Yu-ye^{1,2},
ZHONG Kai^{1,2}, YAO Jian-quan^{1,2}

(1 Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2 Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: A terahertz absorber composed of three-layer micro-structure gratings was designed based on the effective medium theory and the theory of multi-layer antireflection coating. The absorber was designed on the heavily boron doped silicon. By using the finite-difference time-domain method, the influence of the grating period, width and depth on the reflection coefficient was analyzed. The numerical simulation results show that, in the range of 0~3 THz, more than 98% terahertz absorption can be achieved with a bandwidth of 1.3 THz and over 95% terahertz absorption can be obtained with a bandwidth of 2.1 THz. The high performance of the absorber was explained by the rigorous coupled-wave theory, which suggests that the interaction among the different grating diffraction modes reduces the reflection of the incident wave and increases the absorption rate of the absorber. By structural parameter optimization, the absorber can achieve more than 95% broadband terahertz absorption in the range of 0.6~6 THz. The absorber may be a valuable candidate for use in Terahertz imaging and detecting.

Key words: Grating structure; Terahertz absorber; Ultra-bandwidth; Rigorous coupled-wave method; Heavily boron doped silicon

OCIS Codes: 050.2770; 050.6624; 160.3918; 260.1960; 260.2065

0 引言

太赫兹具有生物指纹谱、穿透性及光子安全性等

特性, 在安全检查、医学诊断、环境科学、信息通信及基础物理研究领域有广泛的应用^[1-2]. 其中, 太赫兹吸收体作为探测、成像的关键技术之一, 成为当前太赫兹功

基金项目: 国家重点基础研究发展项目 (No. 2015CB755403)、国家自然科学基金 (No. 61471257)、天津市科技支撑项目 (No. 14ZCZDGX00030) 和天津市科委项目 (No. 13ZCZDSF02300) 资助

第一作者: 郭剑琴 (1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹辐射源. Email: guojianqin@tju.edu.cn

导师 (通讯作者): 徐德刚 (1974-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为太赫兹技术. Email: xudegang@tju.edu.cn

收稿日期: 2016-05-16; **录用日期:** 2016-07-25

<http://www.photon.ac.cn>

能器件研究的热点之一^[3-5]. 基于人工电磁超材料结构的超材料吸收体是实现高性能太赫兹吸收体的有效方法之一. 当前大多数太赫兹吸收体是基于等效金属线理论^[6-8]的金属谐振环结构, 通过将这种结构等效为电容-电感(Inductance-Capacitance, LC)组成的谐振电路进行分析, 如果入射电磁波频率与等效 LC 电路共振频率一致, 则入射电磁波将被吸收. 最初设计的太赫兹吸收体只能对单一频率的太赫兹波实现高吸收, 如 2008 年 Hu Tao 等通过电谐振环(Electrical Ring Resonator, ERR)与金属层组成的二层结构在 1.6 THz 实现了 97% 的吸收^[9-10]; 随后, 为了满足对太赫兹波宽带探测的需求, 吸收体向双带、多带高吸收率的太赫兹吸收体发展^[11-15], 其中, 2014 年 Guo 等通过理论计算表明, 其所设计的多层结构能在太赫兹波段实现带宽为 8.6 THz 的超宽带吸收, 吸收率达 92%^[16], 但该结构由四层不同介质组成, 结构复杂, 不利于应用.

随着新型材料的发展以及刻蚀技术的进步, 光栅衍射相互作用机理被应用到了太赫兹吸收体结构中, 出现了基于光栅微结构的太赫兹吸收体. 2012 年, Pu 等^[17]设计并理论分析了一种基于重掺硼硅材料的二维光栅结构, 在 1.3~2.7 THz 附近实现大于 95% 的太赫兹吸收; 2015 年, Shi 等在重掺硼硅材料上刻蚀了二层光栅结构, 增加了吸收体的带宽, 实验结果表明该结构能实现带宽为 1.9 THz 且吸收率高于 95% 的太赫兹吸收^[18-19]; 同年, Lv 等在重掺磷硅上设计了二维光栅结构并进行实验, 在 3~5.1 THz 频段吸收率大于 90% 的吸收体^[20]. 虽然这些太赫兹吸收体都能对一定带宽范围内的太赫兹实现高效率吸收, 但是吸收频率仅限于太赫兹波段的低频部分, 且带宽最宽也只有 2 THz 左右, 所以基于光栅结构的太赫兹吸收体有待进一步的设计与优化.

本文设计了一种基于重掺硼硅材料的超宽带太赫兹吸收体. 该吸收体由三层微结构光栅构成, 能在 0.6~6 THz 波段超宽带实现高吸收率的太赫兹吸收. 用有限时域差分法分析了该结构光栅周期和光栅宽度深度对各级衍射效率的影响, 也分析了光栅多级衍射的相互作用对太赫兹吸收体反射系数的影响.

1 模型构建

超宽带太赫兹吸收体的光栅结构如图 1, 图 1(a)

为该结构的俯视图, 图 1(b) 为结构的侧视图. 结构的具体参量为: 光栅周期 $p = 111 \mu\text{m}$, 第一层结构的宽度 $w_1 = 82 \mu\text{m}$, 第一层光栅的深度 $d_1 = 29 \mu\text{m}$, 第二层光栅的宽度 $w_2 = 64 \mu\text{m}$, 第二层光栅的深度 $d_2 = 41.25 \mu\text{m}$, 第三层光栅的宽度 $w_3 = 40 \mu\text{m}$, 第三层光栅的深度 $d_3 = 43 \mu\text{m}$.

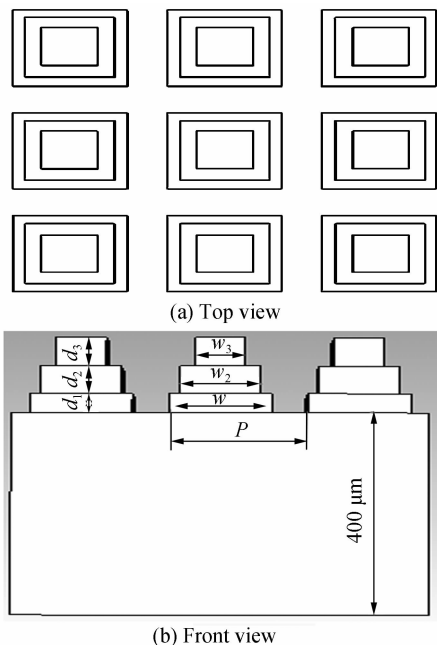


图 1 三层光栅结构

Fig. 1 The structure of the three-layer gratings 结构使用的材料是重掺硼硅(电阻率为 $0.54 \Omega \cdot \text{cm}$), 其复介电常量用德鲁特模型表示为^[21]

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + j/\tau)} \quad (1)$$

式中: ϵ 表示材料介电常量, ϵ_{∞} 表示非掺杂硅的介电常量, 值为 11.7; τ 表示载流子弛豫时间, 值为 0.0571 ps ; ω 表示等离子频率, 值为 19.1 THz, j 是虚部单位, ω_p 是入射波角频率^[21]. 由式(1)德鲁特模型计算得到的重掺硼硅材料的色散曲线如图 2(a), 其中实线为折射率实部, 虚线为折射率虚部, 低于 3 THz 波段时该材料折射率的虚部值很大. 材料折射率的虚部值与吸收率成正比, 在材料足够厚的情况下进入材料的太赫兹波可以实现完全吸收, 透过率为零, 因此低于 3 THz 波段影响重掺硼硅太赫兹吸收体特性的因素主要是材料表面反射率, 即: 吸收率 = $1 - \text{反射率}$. 块状材料的表面反射率 r 可表示为^[22]

$$r = \frac{1}{\frac{|n+1|^2 |1/n+1|^2 \exp[-2\text{Im}(\delta)]}{16} - \frac{|n+1|^2 |1/n-1|^4 \exp[2\text{Im}(\delta)]}{16|1/n+1|^2}} \quad (2)$$

式中, $\delta = 2\pi nD/\lambda$ 表示光波通过介质时位相改变量, n 为材料折射率, D 为材料厚度, λ 为入射光波长. 由式

(2)得重掺硼硅片的反射率曲线,如图 2(b).从反射率曲线可看出,重掺硼硅片表面对太赫兹的反射率大于 44%,高反射率使得它的吸收率很小.为了减小材料的表面反射率,实现高吸收率,在该材料的表面设计了三层光栅结构.

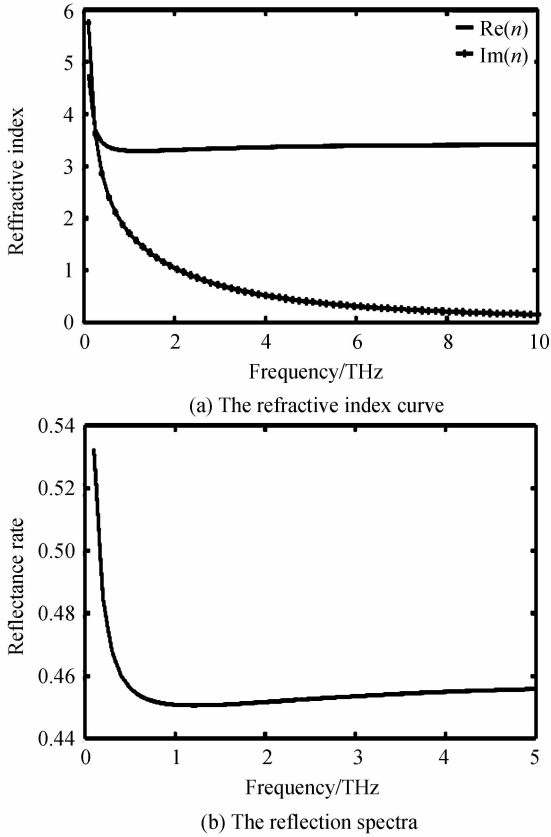


图 2 重掺硼硅材料折射率曲线和反射率曲线
Fig. 2 Curves of refractive index and reflection rate of heavily doped silicon substrate

2 理论和数值模拟分析

基于等效介质膜理论及多层减反膜设计原理,设计得到最初的亚波长光栅结构参量为:光栅周期 $p = 88 \mu\text{m}$,每层结构宽度分别为 $w_3 = 25.9512 \mu\text{m}$, $w_2 =$

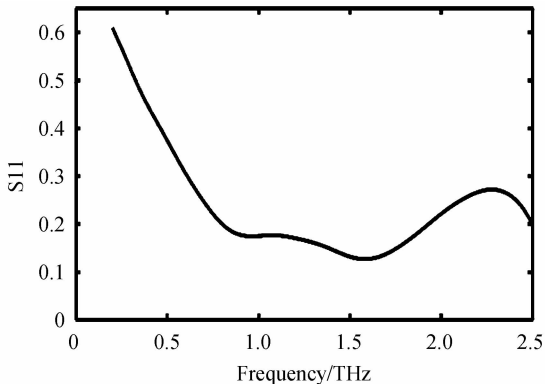


图 3 最初设计的光栅结构反射系数 S11 的曲线
Fig. 3 The reflection coefficient spectrum of the originally designed three-layer gratings

$64.636 \mu\text{m}$, $w_1 = 82 \mu\text{m}$,对应每层的厚度分别为 $d_3 = 42.6949 \mu\text{m}$, $d_2 = 28.5242 \mu\text{m}$, $d_1 = 19.0592 \mu\text{m}$.基于时域有限差分法对该结构在 $0.1 \sim 2.5 \text{ THz}$ 进行模拟,得其反射系数 S11 的曲线,如图 3.

利用有限时域差分法对结构参量进行优化,优化时基于控制变量法原理,每次只优化一个结构参量,并保持其它的结构参量不变.图 4(a)和 4(b)分别给出了优化过程中微结构材料的反射系数随第二层光栅结构的宽度和深度的变化曲线.可以看出,反射系数曲线的走势基本不变,光栅结构宽度和深度的改变仅调节结构反射系数的大小及带宽,因第一、三层光栅结构的宽度和深度对反射系数的影响与此类似,此处不再附图.

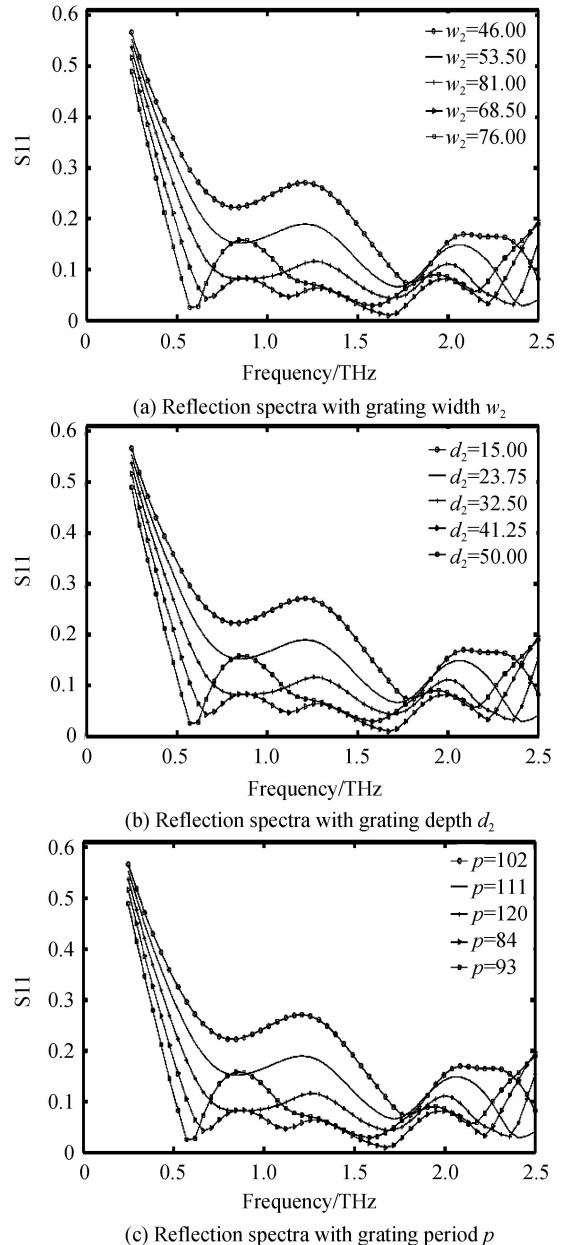


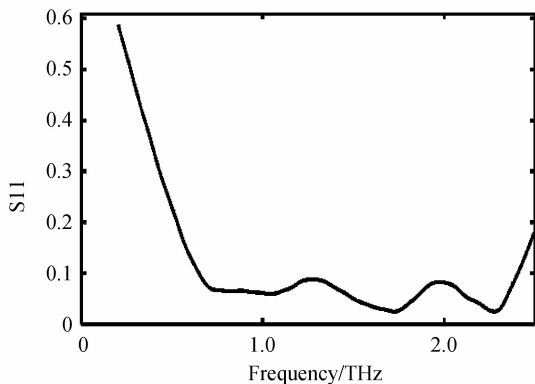
图 4 不同光栅结构参量下的反射系数
Fig. 4 The reflection spectra of the grating structure with different parameters

优化过程中发现结构周期对吸收带宽影响较大,图 4(c)给出了反射系数随光栅周期的变化曲线,可见结构周期的变化影响 1.5~2 THz 处波峰的大小,随着光栅周期的增大,此处峰值减小.对此,用严格耦合波理论进行分析,发现结构周期的变化决定着高级衍射是否发生,其中第 i 级衍射的发生需要满足

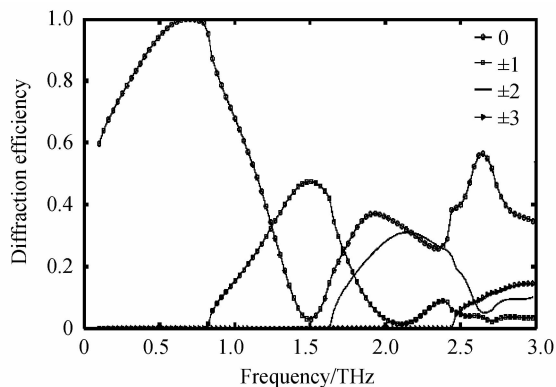
$$i \leq \frac{pn}{\lambda} \tag{3}$$

由式(3)可知,当光栅周期较小时,图 4(c)中 1.5~2 THz 处峰值大的原因是此时在 1.5~2 THz 处无法发生第 3($i=3$)级衍射.所以结构周期对反射系数的影响大,而光栅的宽度和深度仅调节结构反射系数的大小及带宽.最终得到优化后的结构参量为: $p=111 \mu\text{m}$, $w_1=82 \mu\text{m}$, $d_1=29 \mu\text{m}$, $w_2=64 \mu\text{m}$, $d_2=41.25 \mu\text{m}$, $w_3=40 \mu\text{m}$, $d_3=43 \mu\text{m}$.

随后用三维电磁仿真软件(Computer Simulation Technology, CST)对优化后的结构进行模拟,结果如图 5(a).在 0.6~2.3 THz 处,该结构的反射系数小于 0.01,即能实现大于 99% 的吸收率,且在 0.7 THz, 1.0 THz, 1.7 THz 及 2.3 THz 处出现了反射率极小值.基于严格耦合波理论,在 MATLAB 编程中考虑增强矩阵的值求解^[23],获得该结构的各级衍射率,如图 5(b),该三层光栅结构在 0.7 THz 处出现零级衍射极大值,这与模拟中的第一个谐振点对应;在 1.2 THz 处,零级衍射和一级衍射具有较大的值,这与第二个谐振



(a) The reflection coefficient spectrum



(b) The diffraction spectrum

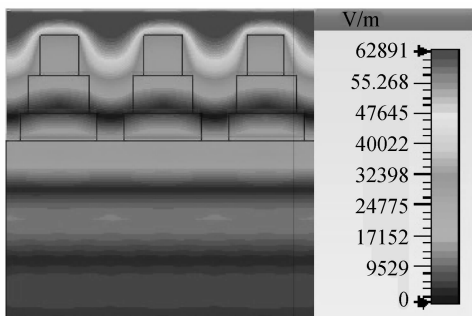
图 5 优化参量后结构的反射系数和基于严格耦合波理论获得的结构衍射效率

Fig. 5 The reflection coefficient spectrum of the structure optimized and the diffraction spectrum of the structure based on the rigorous coupled wave theory

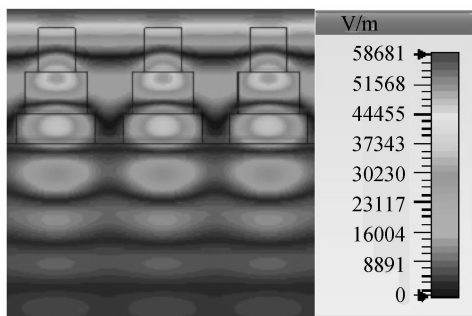
点对应;在 1.7 THz 处,一级衍射出现极大值,且零级衍射对应的值也较大,这与第三谐振点对应;在 2.3 THz 处出现二级衍射的极大值,且零级衍射值较大,这与第四个谐振点对应.同时,由该图可看出,各衍射级此起彼伏地增长,它们的共同作用使得吸收体在 0.5~2.5 THz 之间出现宽波段低反射率的现象.

用 CST 获得该结构在四处谐振点的场分布,如图 6.结构在 0.7 THz 处衍射不明显,在该频点三层光栅结构可等效为三层减反膜;结构在 1.2 THz 处开始出现高级衍射,1.7 THz 及 2.3 THz 处,衍射级次增多,衍射效应增强,这与由耦合波理论得到的分析结果相符合,严格耦合波理论很好地解释了该三层光栅结构的低反射率现象.

为了实现超宽带太赫兹吸收体,进一步分析了该结构在较高太赫兹波段的吸收率.因为在大于 3THz 波段处,材料折射率的虚部较小,对波的吸收率低,部分光能透过材料,所以在计算吸收率时不仅需要考虑材料表面反射率,还要考虑透过率,即:吸收率=1-反射率-透过率.在考虑透过率的情况下,模拟该结构在高频太赫兹波段的情况,得到图 7(a)所示的结构反射



(a) 0.7 THz



(b) 1.2 THz

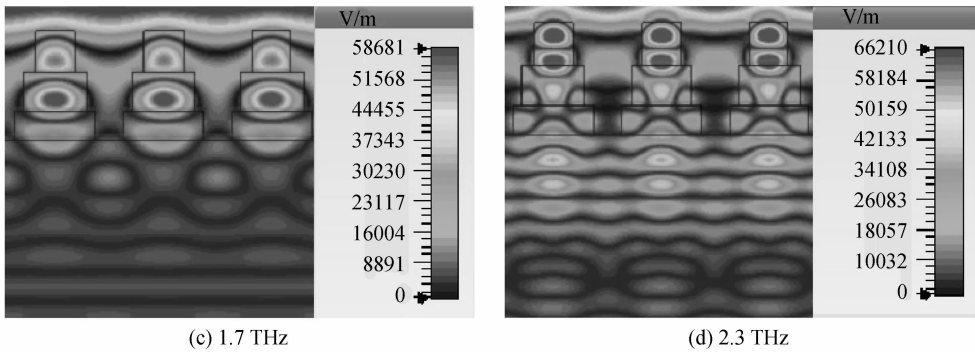


图6 三层光栅结构在不同频率的电场强度分布

Fig. 6 The electric field intensity distribution of the three-layer gratings structure at different frequency

系数图,可知该结构在0.6~5.8 THz处吸收率高且大于94%,在高频太赫兹波段图形振荡明显.高频太赫兹波段图形振荡明显是因为随频率增加材料折射率虚部减小,折射率虚部与材料对光波的吸收损耗成正比,损耗减小,材料上下表面的光场相互作用增强,这种相互作用导致了高频太赫兹频段处曲线的振荡.虽然图形振荡明显,但是随着频率的增加将出现更高级别的衍射,这些衍射级的相互作用使该结构在高频段表现出高的吸收率.

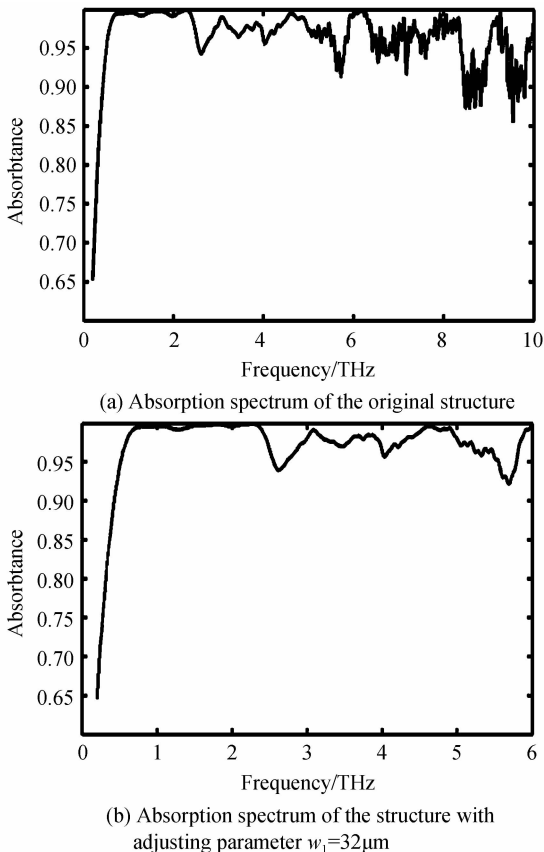
图7 原结构及调节参量使 $w_1=32\mu\text{m}$ 后的吸收率

Fig. 7 Absorption spectrum of the original structure and the adjusted structure

在0.6~6 THz带宽下优化参量 w_1 以实现较大的吸收,优化结果显示当 $w_1=32\mu\text{m}$ 时太赫兹的吸收

率大于95%,如图7(b).较之图7(a),优化后的结构牺牲了在0.6~2.5 THz的吸收率(优化前结构在0.6~2.5 THz的吸收率高达99%,而优化后的结构在该波段的吸收率小于此值)获得了在较宽频带的大于95%的太赫兹吸收,这也与光栅各衍射级衍射效率此消彼长相吻合.

3 结论

本文在重掺硼硅材料(电阻率为 $0.54\Omega\cdot\text{cm}$)上设计了一种三层光栅结构的吸收体,实现了超宽带太赫兹吸收.在低于3 THz波段,该结构在带宽为1.3 THz处的吸收率高于98%,带宽为2.1 THz处的吸收率高于95%.用严格耦合波理论对该三层光栅的高吸收现象进行了理论分析,分析结果表明光栅多级衍射的相互作用减少了入射面的反射率,增大了该吸收体的吸收率.模拟结果发现,优化后的结构在宽频段内也具有很高的吸收率,且能在0.6~6 THz实现大于95%的太赫兹吸收.该吸收体结构简单,易于设计与分析.本文方法也可用于在其他材料上设计类似的光栅结构,实现太赫兹波的宽带吸收.

参考文献

- [1] TU Shan, ZHANG Wen-tao, XIONG Xian-ming, *et al.* Principal component analysis for transgenic cotton seeds based on terahertz time domain spectroscopy system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(4): 0430001. 涂闪,张文涛,熊显名,等.基于太赫兹时域光谱系统的转基因棉花种子主成分特性分析[J].光子学报,2015, **44**(4): 0430001.
- [2] FANG He-nan, TAO Zhi-kui. Analysis of terahertz time-domain spectroscopy by optical transfer matrix method[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(1): 1401-1404. 方贺男,陶志阔.基于光学传办理乱世阵的太赫兹时域光谱分析[J].发光学报,2014, **35**(1): 1401-1404.
- [3] ZHENG Zhong-xin, YU Yao, SUN Jian-dong, *et al.* Responsivity calibration of a 4.2 K silicon terahertz bolometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(6): 0604001. 郑中信,余耀,孙建东,等.4.2 K硅辐射热太赫兹探测器的响应度校准[J].光子学报,2015, **44**(6): 0604001.
- [4] WANG Rong-rong, WU Zhen-sen, ZAHNG Yan-yan, *et al.* Transmission characteristics for THz and infrared waves in fog [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 90-95.

- 王蓉蓉, 吴振森, 张艳艳, 等. 雾天气中 THz 与红外的传输特性[J]. 光子学报, 2014, **43**(10): 90-95.
- [5] DIEM M, KOSCHNY T, SOUKOULIS C M. Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime[J]. *Physical Review B*, 2009, **79**(3): 033101.
- [6] WEN Q Y, XIE Y S, ZHANG H W, *et al.* Transmission line model and fields analysis of metamaterial absorber in the terahertz band[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(22): 20256-20265.
- [7] JIANG Ke, XIE Ji-jiang, YANG Gui-long, *et al.* Two-photon absorption attenuated THz generation in GaSe[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(3): 361-365.
姜可, 谢冀江, 杨贵龙, 等. GaSe 晶体的双光子吸收对太赫兹输出的影响[J]. 发光学报, 2015, **36**(3): 361-365.
- [8] AZAD A K, TAYLOR A J, SMIRNOVA E, *et al.* Characterization and analysis of terahertz metamaterials based on rectangular split-ring resonators [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(1): 011119.
- [9] TAO H, LANDY N I, BINGHAM C M, *et al.* A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(10): 7181-7188.
- [10] TAO H, BINGHAM C M, STRIKWERDA A C, *et al.* Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: design, fabrication, and characterization [J]. *Physical Review B*, 2008, **78**(24): 241103.
- [11] TAO H, BINGHAM C M, PILON D, *et al.* A dual band terahertz metamaterial absorber[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, **43**(22): 225102.
- [12] SHEN X, YANG Y, ZANG Y, *et al.* Triple-band terahertz metamaterial absorber: Design, experiment, and physical interpretation[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(15): 154102.
- [13] GRANT J, MA Y, SAHA S, *et al.* Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(17): 3476-3478.
- [14] YE Y Q, JIN Y, HE S. Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the terahertz regime[J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 2010, **27**(3): 498-504.
- [15] ZHU J, MA Z, SUN W, *et al.* Ultra-broadband terahertz metamaterial absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**(2): 021102.
- [16] GUO Y, YAN L, PAN W, *et al.* Ultra-broadband terahertz absorbers based on 4×4 cascaded metal-dielectric pairs[J]. *Plasmonics*, 2014, **9**(4): 951-957.
- [17] PU Ming-bo, WANG Min, HU Cheng-gang. Engineering heavily doped silicon for broadband absorber in the terahertz regime[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(23): 25513-25519.
- [18] SHI Cheng, ZANG Xiao-fei, WANG Yi-qiao. A polarization-independent broadband terahertz absorber [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**: 031104.
- [19] PENG Yan, ZANG Xiao-fei, ZHU Yi-ming, *et al.* Ultra-broadband terahertz perfect absorber by exciting multi-order diffractions in a double-layered grating structure[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(3): 2032-2039.
- [20] LV Jing, YUAN Rui-yang, SONG Xue-mei. Broadband polarization-insensitive terahertz absorber based on heavily doped silicon surface relief structures[J]. *Applied Physics*, 2015, **117**: 013101.
- [21] NAZAROV M M, SHKURINOV A P, GARET F, *et al.* Characterization of highly doped si through the excitation of THz surface plasmons[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, **5**(4): 680-686.
- [22] CHARALAMBOS C, KATSIDIS, DIMITRIOS I S. General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interference[J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(19): 3978-3987.
- [23] KAJTARAR G, KAFESAKI M, ECONOMOU E N, *et al.* Theoretical model of homogeneous metal-insulator-metal perfect multi-band absorbers for the visible spectrum[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, **49**(5): 055104.