

金属-光子晶体-金属结构中的双波 TE 偏振完美吸收

陆苏青 巢小刚 陈宪锋 唐斌

常州大学数理学院, 江苏 常州 213164

摘要 设计了一个一维金属(M_1)-光子晶体(PC)-金属(M_2)结构,利用传输矩阵理论,通过 M_1 -PC- M_2 结构反射谱中的dip(凹处)来确定光学Tamm态(OTS),数值计算表明在金属与光子晶体界面处存在两个OTSs,当 $45\text{ nm} \leq d_{M_1} \leq 52\text{ nm}$ 时, M_1 -PC- M_2 结构可同时实现对两个OTSs的横向电场(TE)偏振完美吸收,吸收峰的峰值波长约为743.1 nm与745.7 nm,吸收率均在95%以上。当入射角从 0° 增大到 60° ,该结构对两个OTSs的吸收率均在95%以上,同时实现对两个OTSs的TE偏振完美吸收,并且两个吸收峰的峰值波长发生蓝移。当光子晶体周期数在7到15之间变化时,均可实现双波TE偏振完美吸收。

关键词 物理光学;光学Tamm态;传输矩阵;双波;横向电场偏振;完美吸收

中图分类号 O436.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0116003

TE Polarization Perfect Absorption with Dual-band in Metal-Photonic Crystal-Metal Structure

Lu Suqing Chao Xiaogang Chen Xianfeng Tang bin

School of Physics and Mathematics, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China

Abstract Design of a one-dimensional metal-photonic crystal-metal(M_1 -PC- M_2) structure is presented. The existence of optical Tamm state (OTS), corresponding to dips in the reflection spectra of the structure, which is determined by the transfer-matrix method. Numerical results show that two OTSs appear at the interface between the metal film and photonic crystal, transverse electric (TE) polarization perfect absorption with dual-band as high as over 95% is achieved when $45\text{ nm} \leq d_{M_1} \leq 52\text{ nm}$, and two absorption wavelengths are near 743.1 nm and 745.7 nm. As the incident angles increase from 0° to 60° , the absorption of two OTSs can still stay above 95%, the M_1 -PC- M_2 structure achieving TE polarization perfect absorption of two OTSs simultaneously, and the blue-shifts of both absorption peaks occurs. When the number of period of photonic crystal is between seven and fifteen, TE polarization perfect absorption with dual-band is always accomplished.

Key words physical optics; optical Tamm states; transfer matrix method; dual-band; transverse electric polarization; perfect absorption

OCIS codes 160.4670; 160.4760; 160.5298; 230.4170

1 引 言

在太阳能、热传感、隐身技术等诸多领域^[1-4],都需要对电磁波能量有较高的吸收率。然而由于反射和散射效应,实现对某个电磁波频率的高吸收并非易事。2008年,Landy等^[5]首次提出了完美吸收的概念,他们在以电磁谐振器为基本周期单元的超材料完美吸收器中,实现了对电磁波高达96%的吸收,吸收频率约为11.5 GHz。随后,人们相继设计出双波段完美吸收器^[6]、多波段完美吸收器^[7]、广角度完美吸收器^[8]、可调完美吸收器^[9],吸收频率从微波频段扩展到可见光频段。

光学Tamm态(OTS)是一种新型电磁界面模式,广泛存在于光子晶体异质结或金属与光子晶体的分界

收稿日期: 2014-07-08; 收到修改稿日期: 2014-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(61107055)

作者简介: 陆苏青(1988—),女,硕士研究生,主要从事凝聚态物理专业方面的研究。E-mail: lusuqing-20@163.com

导师简介: 巢小刚(1977—),男,硕士,副教授,主要从事光子晶体与非线性光学方面的研究。E-mail: cxg210@sohu.com

面处,远离该分界面,电磁场强度逐渐减弱。与传统的表面模相比,OTS可有横向电场(TE)、纵向磁场(TM)两种偏振模式,可用普通偏振光直接激发,无需特定的入射角^[10]。OTS已应用于光开关^[11]、光的单向传输^[12]、超透射^[13]、单波段非广角完美吸收^[14]以及双OTS与腔模耦合^[15]等。与文献[5-9]中完美吸收器的物理机制不同,本文利用OTS的TE模,在一维金属层-光子晶体-金属层结构中实现双波TE偏振完美吸收,并且通过调节入射光的角度来调节两吸收峰的峰值波长。

2 模型结构

本文采用结构为金属(M₁)-光子晶体(PC)-金属(M₂),其结构如图1所示,其中光子晶体是一维对称光子晶体(PQP)^[16],周期数n=10,每个周期的第一层与第三层是同种P介质,中间一层为Q介质,其中P、Q介质的折射率分别为n_p=1.47,n_q=2.37,Q介质的厚度为d_q=400 nm。金属M₁后面的一个P层会对OTS产生很大影响^[17],通过大量数值模拟,在存在OTS的该P层厚度范围内任取一值200 nm,这就确定了光子晶体中P介质的厚度d_p=200 nm。图1中M₁与M₂代表金属层,M₁、M₂与光子晶体形成两个界面,这样可以在M₁-PC-M₂结构内激发两个OTS,两金属层厚度变化对OTS本征波长的影响相同,不失一般性,M₂的厚度固定,取d_{M2}=100 nm,M₁的厚度d_{M1}为控制参数。本文的金属层采用银层,Ag的介电常数采用Drude模型: $\epsilon = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\nu)}$,其中背景介电常数ε_∞=3.7,等离子体频率ω_p=1.38×10¹⁶s⁻¹(相当于等离激元的能量ħω_p为9 eV),阻尼碰撞频率ħν=0.0018 eV^[18]。

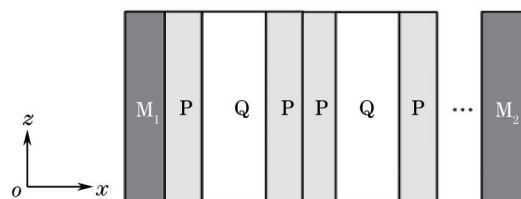


图1 晶体结构示意图

Fig.1 Structure diagram of the crystal model

3 结果分析

3.1 光正入射时,M₁厚度d_{M1}对OTS的影响

当没有银层时,利用传输矩阵理论^[18]得到一维对称光子晶体的反射谱如图2中实线所示,其禁带范围约为740~798 nm。当加上银层,取M₁的厚度d_{M1}=36 nm,M₁-PC-M₂结构的反射谱如图2中虚线所示,此时在光子晶体的禁带内出现两个凹处,这两个凹处所对应的波长就是银层与光子晶体界面处OTS的本征波长^[18]。图3显示在M₁-PC-M₂结构内始终存在两个OTS,本征波长较短的OTS命名为OTS1,而本征波长较长的命名

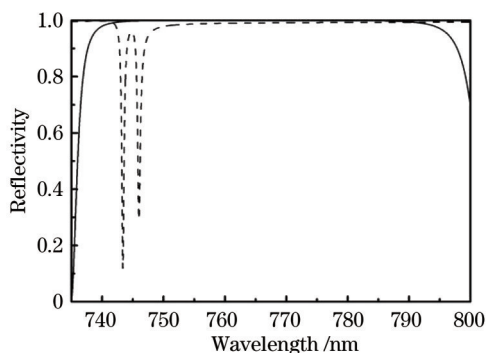


图2 光子晶体反射谱(实线)与M₁-PC-M₂反射谱(虚线)

Fig.2 Reflection spectra of photonic crystal (solid line) and M₁-PC-M₂(dashed line)

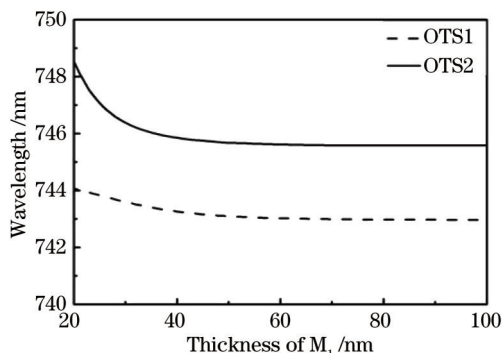


图3 d_{M1}变化对OTS波长的影响

Fig.3 Effect of the d_{M1} variation on the wavelength of OTS

为OTS2。当银层 M_1 厚度 d_{M_1} 发生变化时,银层-光子晶体界面处的OTS将有不同程度的穿透能力,从而会影响OTS的本征波长。从图3中可以看出,当 d_{M_1} 小于40 nm时,随着银层 M_1 厚度 d_{M_1} 的增大,OTS1与OTS2的本征波长均明显变短(发生蓝移),但OTS2本征波长的变化快于OTS1,两者相互靠近,两OTS本征波长的间隔在不断缩小,直到 d_{M_1} 大于40 nm时,OTS1与OTS2的本征波长变化开始变得非常缓慢,分别趋于约743.1 nm与745.6 nm,两者的波长间隔维持约2.5 nm不变。

3.2 光正入射时, M_1 厚度 d_{M_1} 对吸收率的影响

当光波正入射到 M_1 -PC- M_2 结构上时,其反射率 R 与透射率 T 可用传输矩阵理论计算得到,因而其吸收率 $A=1-R-T$ 。计算了 M_1 厚度 d_{M_1} 对OTS1与OTS2吸收率的影响,如图4所示。从图中可见当 d_{M_1} 等于46 nm与49 nm时,OTS1与OTS2的吸收率分别达到最大值。图5显示了当 $d_{M_1}=46$ nm时,银层-光子晶体-银层结构的反射谱(虚线表示)、透射谱(点划线)与吸收谱(实线表示),反射谱在光子晶体禁带(740~798 nm)的两个凹处分别对应OTS1与OTS2,这两个凹处恰好对应吸收谱中的两个吸收峰,吸收率分别为98.7%与97.3%。图6(a)、(b)显示了 $d_{M_1}=46$ nm时,在 M_1 -PC- M_2 结构内,OTS1(743.15 nm)与OTS2(745.73 nm)的场强 $|E/E_0|^2$ 分布, E_0 是入射光的电场,图中竖直虚线表示两金属层与光子晶体的界面,可以发现在界面处OTS1与OTS2被强烈激发, $|E_{OTS1}/E_0|^2$ 与 $|E_{OTS2}/E_0|^2$ 在界面附近的最大值在150以上,OTS1与OTS2的强局域性导致它们的反射率与透射率均接近于零,所以吸收率接近1。

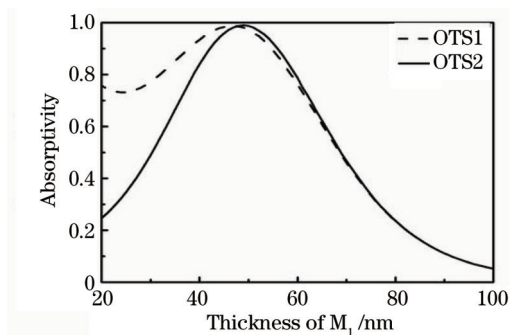


图4 d_{M_1} 变化对吸收率的影响
Fig.4 Effect of the d_{M_1} variation on the absorptivity

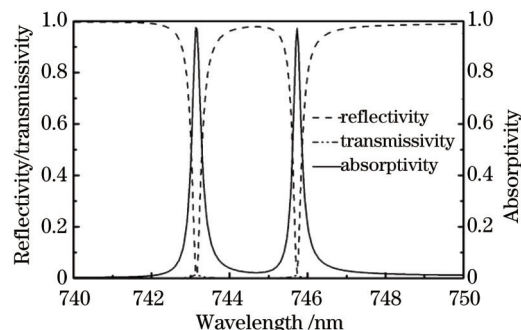


图5 $d_{M_1}=46$ nm时 M_1 -PC- M_2 的反射谱、透射谱与吸收谱
Fig.5 Reflection spectra, transmission spectra and absorption spectra of M_1 -PC- M_2 when $d_{M_1}=46$ nm

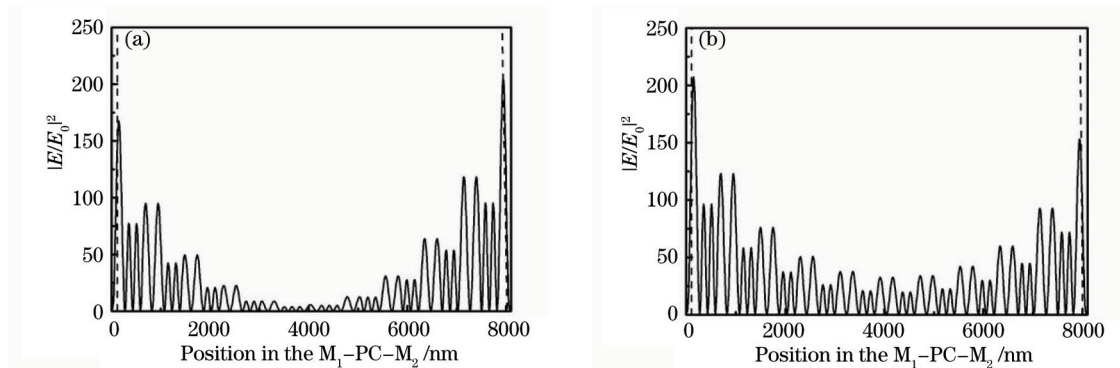


图6 (a) OTS1和(b) OTS2场强分布
Fig.6 (a) Distribution of field intensity of OTS1 and (b) distribution of field intensity of OTS2

由上节讨论知,当 d_{M_1} 大于40 nm时,OTS1与OTS2的本征波长对 d_{M_1} 的变化并不敏感。如表1所示,当 d_{M_1} 从45 nm增大到52 nm时,OTS1与OTS2的吸收率均保持在95%以上,两个OTS同时实现TE偏振完美吸收,而OTS1与OTS2吸收峰分别从743.16 nm蓝移到743.08 nm、745.75 nm蓝移到745.66 nm,两吸收峰峰值波长的偏移均仅为0.01%,几乎保持不变。

表 1 正入射时金属层 M_1 厚度对 OTS 本征波长和吸收率的影响

Table 1 Effect of the thickness of M_1 on the wavelengths and absorptivity

Thickness of M_1/nm	OTS1		OTS2	
	Eigen wavelength λ_1/nm	Absorptivity /%	Eigen wavelength λ_2/nm	Absorptivity /%
45	743.16	98.3	745.75	95.8
46	743.15	98.7	745.73	97.3
47	743.13	98.6	745.72	98.2
48	743.12	98.6	745.70	98.7
49	743.11	98.0	745.69	99.0
50	743.10	97.2	745.68	98.7
51	743.09	96.1	745.67	98.1
52	743.08	95.0	745.66	96.9

3.3 入射角对吸收峰值波长的影响

当 $d_{M_1}=46\text{ nm}$ 时,利用传输矩阵理论数值计算了入射角对 OTS1 与 OTS2 本征波长的影响。计算结果图 7 显示随着入射角的增大,光子晶体禁带的下边界、OTS1 与 OTS2 本征波长均发生蓝移,因此 $M_1\text{-PC-}M_2$ 结构中的两个完美吸收峰也发生蓝移。表 2 显示当入射角从 0° 增大到 60° ,OTS1 与 OTS2 的吸收率均保持在 95% 以上,并且 OTS1 与 OTS2 的吸收峰峰值波长分别从 743.15 nm 蓝移到 651.81 nm 、 745.73 nm 蓝移到 653.62 nm ,这意味着通过调节入射角就可以调节银层-光子晶体-银层结构的吸收峰峰值波长,与文献[14]中调节完美吸收器吸收峰值波长的方法相比,操作更为简单方便。与文献[9]报道的单吸收峰位置随入射角变化相比,本文建议的完美吸收器性能更佳。大量的数值计算表明,当 d_{M_1} 从 45 nm 增大到 52 nm 时,银层-光子晶体-银层结构均可同时对 OTS1 与 OTS2 的 TE 偏振完美吸收,并且吸收峰的峰值波长随入射角的增大发生蓝移。

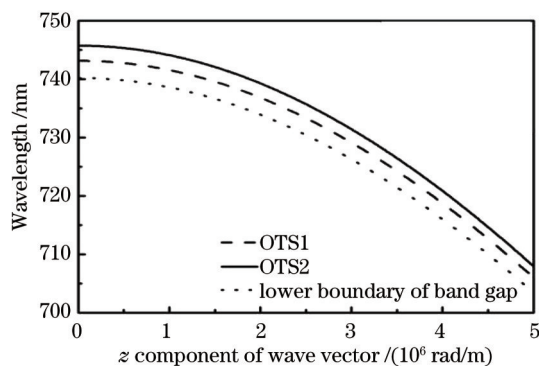


图 7 入射波矢变化对 OTS 波长的影响

Fig.7 Effect of the wave vector variation on the wavelength of OTS

表 2 入射角变化对波长和吸收率的影响

Table 2 Effect of the angle variation on the wavelength and absorptivity

Incident angle $\theta/^\circ$	OTS1		OTS2	
	Eigen wavelength λ_1/nm	Absorptivity /%	Eigen wavelength λ_2/nm	Absorptivity /%
0	743.15	98.7	745.73	97.3
10	739.69	98.7	742.22	97.3
20	729.63	98.6	732.03	97.5
30	713.94	98.7	716.14	97.7
40	694.20	98.6	696.22	98.2
50	672.61	98.2	674.49	98.9
60	651.81	96.0	653.62	98.6
70	634.53	88.9	636.33	94.1
80	623.12	67.5	624.94	74.0

3.4 光正入射时,周期数对吸收率的影响

光子晶体周期数 n 对 OTS1 与 OTS2 吸收率的影响如图 8 所示。随着周期数的从 7 增大到 15, 两者吸收率均下降, 但均始终保持在 90% 以上, 仍然可以实现双波 TE 偏振完美吸收。

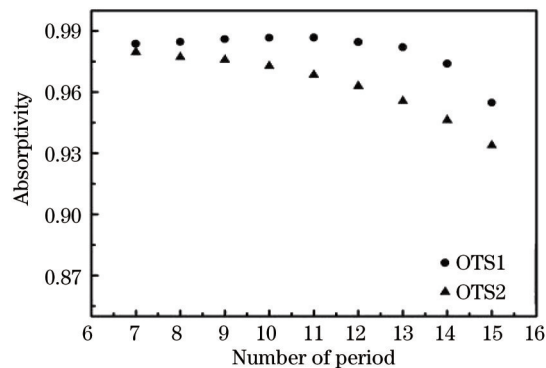


图 8 光子晶体周期数对吸收率的影响

Fig.8 Effect of the number of period of PC on absorptivity

4 结 论

设计了一维 M_1 -PC- M_2 结构, 基于 OTS 该结构可以实现双波 TE 偏振完美吸收, 通过调节入射角的角度来调节两完美吸收峰的峰值波长。随着光子晶体周期数从 7 增大到 15, 完美吸收器性能稳定。与其他双波完美吸收器相比, 文中 M_1 -PC- M_2 结构更为简单, 吸收峰位置更易调节, 该结构为制造高性能完美吸收器提供了良好的理论指导。

参 考 文 献

- 1 J M Zhao, Y J Feng, B Zhu, *et al.*. Sub-wavelength image manipulating through compensated anisotropic metamaterial prisms [J]. *Opt Express*, 2008, 16(22): 18057-18066.
- 2 Li Xiang, Wen Shangsheng, Yao Rihui, *et al.*. Analysis of optical performance on polymer solar cell based on transfer matrix method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0631002.
李 祥, 文尚胜, 姚日晖, 等. 基于传输矩阵法的聚合物太阳能电池光学性能分[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0631002.
- 3 X L Liu, T Starr, A F Starr, *et al.*. Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance [J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 104(20): 207403.
- 4 Chen Fei, Li Ming, Ji Xu, *et al.*. Influence of glass thickness of reflector on the concentrating characteristics in the solar-energy trough system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1208002.
陈 飞, 李 明, 季 旭, 等. 太阳能槽式系统反射镜玻璃厚度对聚光特性的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1208002.
- 5 N I Landy, S Sajuyigbe, J J Mock, *et al.*. Perfect metamaterial absorber [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(20): 207402.
- 6 M H Li, H L Yang, X W Hou. Perfect metamaterial absorber with dual bands [J]. *PIER*, 2010, 108: 37-49.
- 7 L Huang, H Chen. Multi-band and polarization insensitive metamaterial absorber [J]. *PIER*, 2011, 113: 103-110.
- 8 X P Shen, T J Cui, J M. Zhao, *et al.*. Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber [J]. *Opt Express*, 2011, 19(10): 9401-9407.
- 9 J Zhou, L Jin, E Y B Pun. Tunable multichannel nonreciprocal perfect absorber based on resonant absorption [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(13): 2613-2615.
- 10 M Kaliteevski, I Iorsh, S Brand, *et al.*. Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror [J]. *Phys Rev B*, 2007, 76(16): 165415.
- 11 Li Lei, Liu Guiqiang, Chen Yuanhao. An optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0123002.
黎 磊, 刘桂强, 陈元浩. 光子晶体异质结构耦合波导光开关[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0123002.
- 12 Dong Huiyuan, Wang Jin. Surface-plasmon-polariton manipulation using photonic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0916002.

- 董慧媛, 王 进. 利用光子晶体调控表面等离极化激元[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0916002.
- 13 I V Treshin, V V Klimov, P N Melentiev, *et al.*. Optical Tamm state and extraordinary light transmission through a nanoaperture [J]. *Phys Rev A*, 2013, 88(2): 023832.
- 14 Y K Gong, X M Liu, H Lu, *et al.*. Perfect absorber supported by optical Tamm states in plasmonic waveguide [J]. *Opt Express*, 2011, 19(19): 18393–18398.
- 15 Y T Fang, L X Yang, W Kong, *et al.*. Tunable coupled states of a pair of Tamm plasmon polaritons and a microcavity mode [J]. *J Opt*, 2013, 15(12): 125703.
- 16 F Villa, J A G Armenta, F R Mendieta. One-dimensional photonic crystals: Equivalent systems to single layers with a classical oscillator like dielectric function [J]. *Opt Commun*, 2003, 216(4–6): 361–367.
- 17 H C Zhou, G Yang, K Wang, *et al.*. Multiple optical Tamm states at a metal-dielectric mirror interface [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(24): 4112–4114.
- 18 J Park, H Kwi. High order plasmonic Bragg reflection in the metal-insulator-metal waveguide Bragg grating [J]. *Opt Express*, 2008, 16(1): 413–425.

栏目编辑: 张浩佳