

文章编号: 2095—0411 (2014) 02 - 0083 - 04

基于光学 Tamm 态的广角度完美吸收^{*}

陈宪锋, 李淑娟, 张 艳, 金子涵

(常州大学 数理学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 基于光学 Tamm 态设计了一个金属 - DBR 结构, 利用传输矩阵理论, 通过光子带隙中的反射谱 dip 位置来确定光学 Tamm 态 (OTS) 的本征波长, 并进而研究了 OTS 的有关特征。在金属 - DBR 结构的界面处, 存在着 TE、TM 模式的两种光学 Tamm 态, 且可以用一般电磁波入射来激发。金属层厚度对 OTS 的本征波长及其相应的吸收率影响较大。随着金属层厚度的增加, OTS 的本征波长将出现蓝移现象, 即波长变短, 最后逐渐趋近于一个稳定值, 而结构对 OTS 的吸收率则出现一个峰值效应。当金属 Ag 层的厚度为 39nm 时, 结构对 OTS 的吸收率接近于 1, 即完美吸收。进一步的研究表明, 这一结构参数的金属 - DBR 结构, 可以实现广角度的完美吸收。

关键词: 光学 Tamm 态; 传输矩阵法; 完美吸收

中图分类号: O 437

文献标识码: A

doi: 10. 3969/j. issn. 2095—0411. 2014. 02. 020

Wide-Angle Perfect Absorption Based on the Optical Tamm States

CHEN Xian-feng, LI Shu-juan, ZHANG Yan, JIN Zi-han

(School of Physics and Mathematics, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Based on the optical Tamm states, a metal - DBR structure is presented. The existence of the eigen - wavelength of the optical Tamm states is demonstrated by the dip of the reflectivity map in the photonic band gap. The properties of the optical Tamm states are investigated by applying the transfer matrix method. OTSs can be directly excited in both TE and TM polarizations, even at normal incidence, especially in the metal - Distributed Bragg Reflectors (DBR) interface. The Ag thickness have a big effect on on the absorption and wavelength. The eigen - wavelength of the OTSs has a blue - shift (the wavelength decreases) as the Ag thickness increase, and then gradually tend to a stable value while the peaking effects were found in the absorption. The perfect absorber will appear when the Ag thickness is 39nm and the absorbance reach the maximum value 1. Further study shows that the wide - angle perfect absorption appears under the parameters of the metal - DBR structure.

Key words: optical Tamm states (OTS); transfer matrix method; perfect absorption

完美吸收这一概念是由 Landy 等人于 2008 年首次提出^[1], 他们通过调节结构参数使其达到阻抗匹配, 从而实现对入射光的完美吸收。完美吸收的吸收率接近于 1, 而反射率及透射率近乎于 0。基于完美吸收的原理, 可以制造折射率传感器、全光

开关等^[2]。完美吸收对于很多纳米器件来说有重要的应用, 如太阳能电池、热探测器、时间反演激光器等^[3]。

光学 Tamm 态 (OTS) 的概念是由 Kavokin A V 等人于 2005 年首次提出的^[4]。在固体物理中

^{*} 收稿日期: 2013 - 11 - 22。

作者简介: 陈宪锋 (1970—), 男, 江苏张家港人, 硕士, 副教授, 主要从事光子晶体研究。

的 Tamm 态指的是一种电子局域表面态, 而 OTS 是一种新型电磁界面模式, 即 OTS 的电磁场局域在两类不同材料的分界面处, 随着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 TE、TM 两种偏振模式。特别是对于金属 - DBR 界面处的 OTS, 可用普通偏振光直接激发, 无需特定的入射角^[5]。与金属表面的等离激元 (SPP) 相比, 虽然都是对光的局域限制, 但是 OTS 具有不同的色散特性, 如其色散曲线呈抛物线形, 对应的有效质量约为自由电子质量的 10^{-5} 量级^[6]。在反射谱中, OTS 与光子带隙范围内尖锐的反射 dip 相联系, 具有较窄的半高谱宽, 可用于滤波器及高灵敏度传感器的设计。此外, OTS 还在极化激元激光器、快速光控制、光开关、增强的 Faraday 旋转与 Kerr 效应等领域也有着潜在的应用价值^[7-8]。

虽然近年来对 OTS 进行了大量的研究, 但都没有涉及吸收方面的相关工作。本文基于光学 Tamm 态设计了一个金属 - DBR 结构, 通过结构优化, 在广角度范围内实现了结构的完美吸收。

1 模型结构

本文设计的金属 - DBR 结构如图 1 所示, 其中 DBR 结构是由两种不同材料 A、B 周期性排列构成的光子晶体, 而金属层 M 取为 Ag, 在金属与 DBR 之间有一层覆盖层 D, 它对 OTS 的产生有很大的影响^[9]。

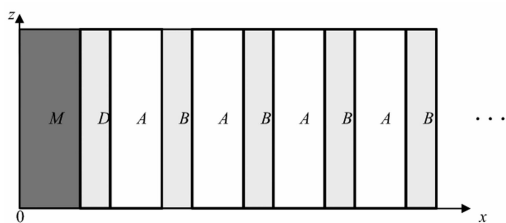


图 1 金属 - DBR 结构示意图

Fig. 1 The structure diagram of the metal-DBR

数值模拟中, 取介质层 A 为 SiO_2 , 折射率 $n_1 = 1.47$, 厚度 $d_1 = 255\text{nm}$; B 为 TiO_2 , 折射率 $n_2 = 2.37$, 厚度 $d_2 = 158\text{nm}$ 。由于两种介质的光学厚度满足 $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0/4$, 中心波长 $\lambda_0 = 1.5\mu\text{m}$, 这样的光子晶体就是一个分布式 Bragg 反射镜 (DBR)。金属 Ag 的介电常数采用 Drude 模型, $\epsilon = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\nu)}$, 根据文献 [10] 的研究, 背景介电常数 $\epsilon_\infty = 3.7$, 等离激元频率 $\omega_p = 1.38 \times$

10^{16}s^{-1} (相当于等离激元的能量 $\hbar\omega_p$ 为 9eV), 而阻尼碰撞频率 $\hbar\nu = 0.0018\text{eV}$, 该表达式在 $400 \sim 2000\text{nm}$ 波长范围内理论与实验结果极好地吻合。

2 结果与分析

由于该金属 - DBR 结构的 OTS 可以用一般的电磁波入射来直接激发, 故可以利用传输矩阵理论, 通过研究光子带隙中的反射谱 dip 来确定光学 Tamm 态^[11]。

2.1 光学 Tamm 态 (OTS)

对于金属 - DBR 结构, 金属 Ag 的厚度取为 40nm , 覆盖层 D 取为 $n_D = 2.37$, 厚度为 100nm , 利用传输矩阵理论研究其反射谱。正入射时的反射谱如图 2 中的插图所示, 可以看出在 1380nm 处有一个很深的 dip, 这是由于入射电磁波激发了金属 - DBR 界面处的 OTS, 入射光与 OTS 出现了强烈耦合, 使得入射电磁波的反射率 R 出现急剧下降, 出现一个极小值 dip, 该反射谱 dip 处的波长值即为 OTS 的本征波长。

利用传输矩阵理论可以研究不同偏振的 OTS 特性, 图 2 绘出了 TE 偏振的光学 Tamm 态的色散特性曲线。图中横轴为 OTS 波矢沿界面的切向分量 k_x , OTS 的本征波长用实线表示, 在图中亦同时给出了半无限周期光子晶体 (DBR) 的禁带范围 (图中的上下两条虚线分别表示第一 Bragg 禁带的上下边界)。可以发现 OTS 的本征波长位于 DBR 的禁带中, 故其电磁场分布将在 DBR 中倏逝衰减 (如图 3 所示)。由图 2 还可以发现, 即使外界电磁波沿界面的波矢分量 k_x 小于真空波矢 $\frac{\omega}{c}$, 例如 k_x 接近于零 (意味着电磁波垂直入射) 也可以激发 OTS, 这就是说这种结构不需要特殊的辅助棱镜也可以激发出这种表面模。

图 3 给出了波长为 1380nm 的电磁波垂直入射时结构内部的纵向电磁场分布, 可发现在金属 - DBR 界面处的 OTS 被强烈地激发, 相对于入射光的电场强度 E_{in} , 覆盖层中场强 $|E(x)/E_{\text{in}}|^2$ 最大值可以增强 130 倍。从图中还可以发现, 电磁场在左侧金属层中是指指数衰减, 在右侧的 DBR 结构中虽然有振荡现象, 但随着 AB 层结构的增加也是倏逝衰减, 这是一种新的表面波模式。

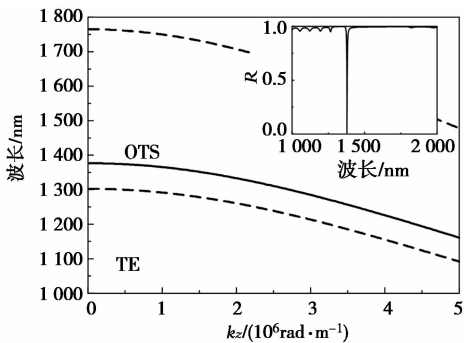


图 2 金属-DBR 界面处的 OTS 色散曲线

Fig. 2 The dispersion curve of OTS on the interface between metal and DBR

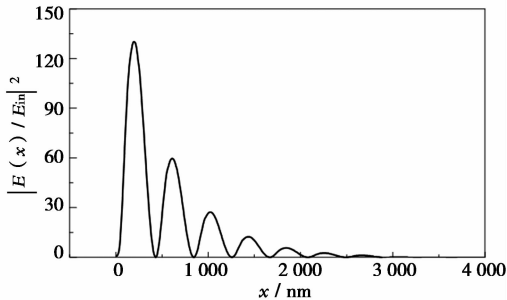


图 3 OTS 的空间电磁场分布

Fig. 3 The electromagnetic field distribution of the OTS

2.2 金属层对吸收率和 OTS 波长的影响

当金属层厚度发生变化时, 金属 - DBR 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; 同时由于金属层的阻尼损耗, 将对入射电磁波产生一定程度的吸收。图 4 给出了金属层厚度变化时, 结构对正入射电磁波的吸收率及 OTS 本征波长的变化规律。在数值模拟中, 我们取覆盖层的折射率 $n_D = 2.37$, 厚度为 $d_D = 100\text{nm}$ 。

在图 4 (a) 中, Ag 层厚度分别取 30、40、50、60nm, 可见随着 Ag 层厚度的增加, 吸收峰的位置逐渐左移 (波长减小)。研究表明, 吸收峰的位置与反射谱的 dip 位置相对应, 这是由于结构的吸收率 A 、反射率 R , 透射率 T 满足 $A + R + T = 1$, 而 T 又近似 0 的缘故。尤其是当 Ag 层厚度在 40nm 时, 吸收率达到最大值接近于 1, 即出现完美吸收现象, 此时的 OTS 本征波长约为 1380nm。图 4 (b) 则进一步揭示了金属层厚度对吸收率和 OTS 本征波长的影响, 当 Ag 层厚度超过 50nm 时, OTS 本征波长变化越来越小, 最后趋于定值 1376nm。这是由于电磁波在 Ag 层中的穿透深度约为 30nm, Ag 层厚度过小时, 金属外

侧介质对表面态的影响加剧, 使得 OTS 本征波长出现了较大变化 (波长变长); 而当 Ag 层厚度超过 50nm 时, 金属外侧介质对表面态的影响则越来越小, OTS 本征波长就趋于定值 1376nm, 图 5 清晰地给出了 Ag 层厚度变化对吸收率影响的立体图。

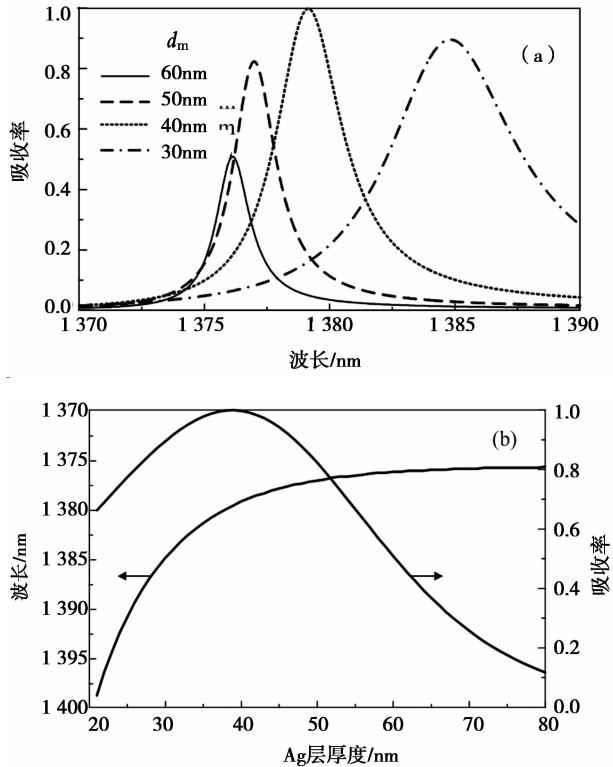


图 4 金属层厚度变化对吸收率和 OTS 波长的影响

Fig. 4 The effects of the Ag thickness on the absorption and wavelength

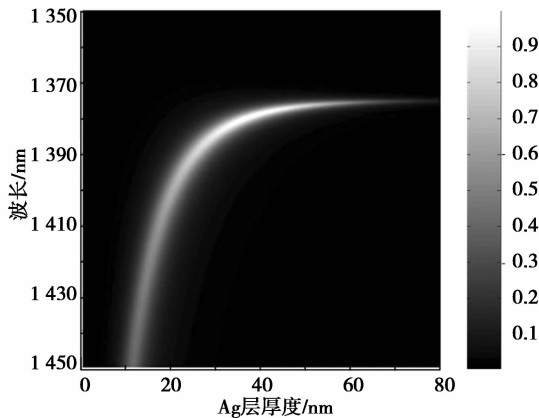


图 5 Ag 层厚度变化对吸收率的影响

Fig. 5 The effects of the Ag thickness on the absorption

2.3 完美吸收

从图 4 (b) 可以发现, 当金属的阻尼碰撞频率 $\hbar\nu = 0.0018\text{eV}$ 时, 正入射时结构出现完美吸收

的最佳金属 Ag 层厚度为 39nm。

固定金属 Ag 层厚度为 39nm, 其他结构参数不变, 图 6 绘出了结构对不同入射角入射的电磁波的吸收率立体图。从该图可以发现, 当入射角小于 25°时, 虽然 OTS 的本征波长随着角度的增大而变小, 但是结构对该波长的电磁波的吸收率几乎都维持在 0.98 以上, 即均可以实现完美吸收。进一步的研究表明, 随着入射角度的增大, 吸收率极大值将出现降低的趋势, 在 30°时依然可以达到 0.90。

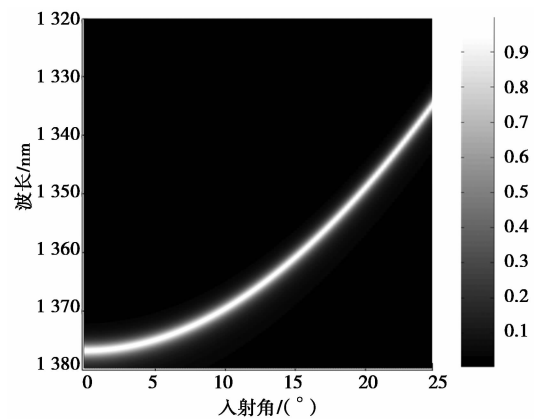


图 6 角度变化对吸收率的影响

Fig. 6 The effects of the angle variation on the absorption

3 结 论

基于光学 Tamm 态设计了一个金属 - DBR 结构, 利用传输矩阵法, 研究了该结构的反射谱和吸收谱, 该结构的光学 Tamm 态本征频率与反射谱中的 dip 位置相对应, 在这种结构中, 存在两种 OTS 的偏振模式, 且可以直接用普通的偏振光来激发。研究了金属 Ag 层厚度对结构吸收率及其 OTS 本征波长的影响, 当 Ag 层厚度为 39nm 时, 结构可以实现广角度的完美吸收。

参考文献:

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. Phys Rev Lett, 2008, 100 (20): 207402.
- [2] Yongkang Gong, Xueming Liu. Perfect absorber supported by optical Tamm states in plasmonic waveguide [J]. Optics Express, 2011, 19 (19): 18393 - 18398.
- [3] Longhi S Pi. symmetric laser absorber [J]. Phys Rev Lett, 2010, 82 (3): 031801.
- [4] Kavokin A V, Shelykh I A, G Malpuech. Lossless interface modes at the boundary between two periodic dielectric structures [J]. Phys Rev B, 2005, 72 (23): 233102.
- [5] 荆庆丽, 杜春光, 高健存. 表面等离子共振现象的新应用——微弱磁场的测量 [J]. 物理学报, 2013, 62 (3): 037302.
- [6] Kaliteevski M, Iorsh I, Brand S. 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.
- [7] Little C E, Anufriev R, Iorsh I. Tamm plasmon polaritons in multilayered cylindrical structures [J]. Phys Rev B, 2012, 86 (23): 033302.
- [8] ZhangW L, RaoY. Optical Tamm state polaritons in a quantum well microcavity with gold layers [J]. Chin Phys B, 2012, 21 (5): 057107.
- [9] Haichun Zhou, Guang Yang. Multiple optical Tamm states at a metal. dielectric mirror interface [J]. Optics Letters, 2010, 35 (24): 4111 - 4114.
- [10] Junghyun Park, Hwi Kwi. High order plasmonic Bragg reflection in the metal. insulator. metal waveguide Bragg grating [J]. Optics Express, 2008, 16 (1): 413 - 425 .
- [11] Hai Liu, Xiudong Sun. Optical magnetic field enhancement through coupling magnetic plasmons to Tamm plasmons [J]. Optics Express, 2012, 20 (17): 19160 - 19167.