

金属-DBR-金属结构中光学 Tamm 态的弱耦合特性研究

李培丽, 高 辉, 栾开智, 陆云清

南京邮电大学电子与光学工程学院 微电子学院, 江苏 南京 210023

摘 要 当金属-分布式 Bragg 反射镜-金属(M1-DBR-M2)结构中的 DBR 周期数比较大时, M1-DBR-M2 中的两光学 Tamm 态(OTS)发生弱耦合。通过研究 M1-DBR-M2 结构中 OTS 弱耦合情况下的反射光谱和 OTS 本征波长电场分布, 揭示了弱耦合情况下的 OTS 和光隧穿效应。研究表明: 在弱耦合情况下, 金属薄膜 M1 的厚度影响了 OTS 的本征波长, 而金属薄膜 M2 的厚度对 OTS 的本征波长没影响。虽然弱耦合情况下只能激发 M1-DBR 交界面处的 OTS1, 但电场局域现象并不是仅仅发生在 M1-DBR 交界面处, 光可以穿过 DBR 到达并被局域在 DBR-M2 交界面处, 存在光的隧穿效应。光隧穿效应的强弱与两 OTS 的本征波长失谐量大小有关, 本征波长失谐量越小, 光隧穿效应越强。两 OTS 的本征波长失谐量的大小, 也影响了光在 M1-DBR-M2 结构中局域的强弱, 本征波长失谐量越小, 光的局域现象越强, 反射光谱中凹峰处的反射率越小。

关键词 光学 Tamm 态; 弱耦合; 金属-分布式 Bragg 反射镜-金属

中图分类号: O436.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)02-0650-06

引 言

2005 年, Kavokin 等提出了光学 Tamm 态(OTS)的概念^[1]。OTS 是一种局域界面模, 其电磁场局域在不同材料的分界面, 随着远离该分界面电磁场强度逐渐变弱^[2-3]。OTS 广泛存在于一维光子晶体异质结和金属-分布式 Bragg 反射镜(DBR)结构中。与表面等离子体激元相比, OTS 可由 TE 或 TM 偏振光直接激发, 无需特定的人射角, 即使是在垂直入射情形下也可以激发^[4]; 其反射谱具有较窄的半高谱宽, 可用于滤波器、高灵敏度传感器、极化激元激光器(有腔或无腔)、光开关、增强 Faraday 旋转、增强 Kerr 效应等领域, 因此对 OTS 的研究在近年来倍受关注^[5-9]。在一些存在多个 OTS 的系统中, OTS 之间会发生耦合作用, 能够产生许多不同的现象, 如出现本征模式分裂, 形成不同本征波长的 OTS, 这为 OTS 的应用提供了新思路, 有着实际的或潜在的应用价值。

2012 年, 周海春等研究了对称 DBR1-M-DBR2 结构和非对称 DBR1-M-DBR2 结构中两个 OTS 的耦合作用引起的本征模式分裂和迁移现象^[10]; 2013 年, 蒋瑶等研究了非对称 DBR1-M-DBR2 结构中两个 OTS 本征模式耦合与本征波长失谐量的关系, 以控制两个 OTS 的迁移^[11]; 同年, Zhang 等

构造的 M1-QW-DBR-M2 结构中, 在加入量子阱(QW)层后, 金属-DBR 交界面处的两个 OTS 耦合后会与量子阱发生强相互作用, 又产生一个反射凹峰^[6]; 同年, 陈林坤等设计了一种 M1-(AB)⁸A-M2 结构, 利用两相同 OTS 耦合产生孪生透射峰, 实现可调双频滤波器^[12]; 2015 年, 陆苏青等通过调整 M1-(aba)¹⁰-M2 中的金属层厚度、入射角度等来实现双波偏振完美吸收, 吸收率可达到 98%^[13]; 2016 年, 吴义恒等通过一个两侧镀金属薄膜的一维光子晶体非线性微腔, 利用两个非对称 OTS 与非线性微腔耦合, 实现光二极管^[14]; 2017 年, 刘启能等研究了 Ag-光子晶体-Ag 结构中两种偏振光光学 Tamm 态的吸收率随入射角、周期数以及银层厚度的变化规律, 丰富了对双 OTS 耦合结构中两种偏振光 Tamm 态的吸收特性的认识^[15]。上述研究主要集中在双 OTS 耦合引起的本征模式分裂、迁移及其应用方面。

在 M1-DBR-M2 结构中, 当 DBR 的周期数较大时, 两 OTS 之间会发生弱耦合作用。本文针对 M1-DBR-M2 结构中两 OTS 之间发生弱耦合情况, 研究光垂直入射时的反射光谱和 OTS 本征波长的电场分布, 揭示在弱耦合情况下 M1-DBR-M2 结构中 OTS 的本征波长、反射率和光隧穿效应, 以及两 OTS 的本征波长失谐量的大小对光隧穿效应的强弱和本征波长处反射率的影响。

收稿日期: 2018-11-20, 修订日期: 2019-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(61275067), 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCX18_0855)资助

作者简介: 李培丽, 1972 年生, 南京邮电大学电子与光学工程学院教授 e-mail: lipl@njupt.edu.cn

1 实验部分

M1-DBR-M2 结构如图 1 所示，两端的金属薄膜选用 Ag，厚度分别为 d_{M1} 和 d_{M2} ，两金属薄膜之间的 DBR 是由两种半导体材料 AlAs 和 GaAs 周期性交替生长而成，折射率分别为 2.95 和 3.56，厚度分别为 d_A 和 d_B ，DBR 的周期数为 N 。在 DBR 中，与两金属薄膜直接相邻的介质层记为缺陷层 D1 层和 D2 层，其材料与 B 相同，厚度分别为 d_{D1} 和 d_{D2} 。根据光入射的布拉格条件， $n_A d_A = n_B d_B = \frac{\pi c}{2\omega_0}$ ，其中 ω_0 是 Bragg 频率，DBR 的禁带中心波长为 $\lambda_0 = 2 \times (n_A d_A + n_B d_B)$ 。

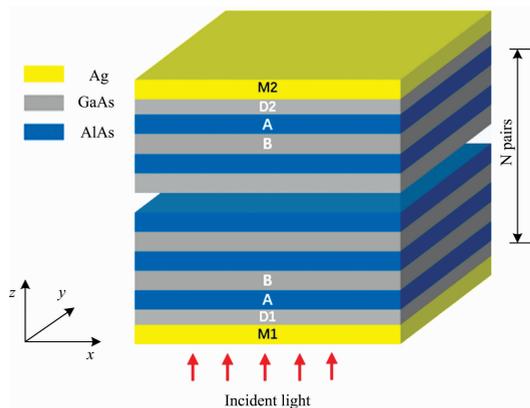


图 1 M1-DBR-M2 结构示意图
Fig. 1 Schematic of M1-DBR-M2

Ag 的介电常数采用 Drude-Lorentz 色散模型^[16]，光在 M1-DBR-M2 结构中的传输特性可用特征矩阵法来研究。在 M1-DBR-M2 结构中存在 M1-DBR 和 DBR-M2 两个界面，

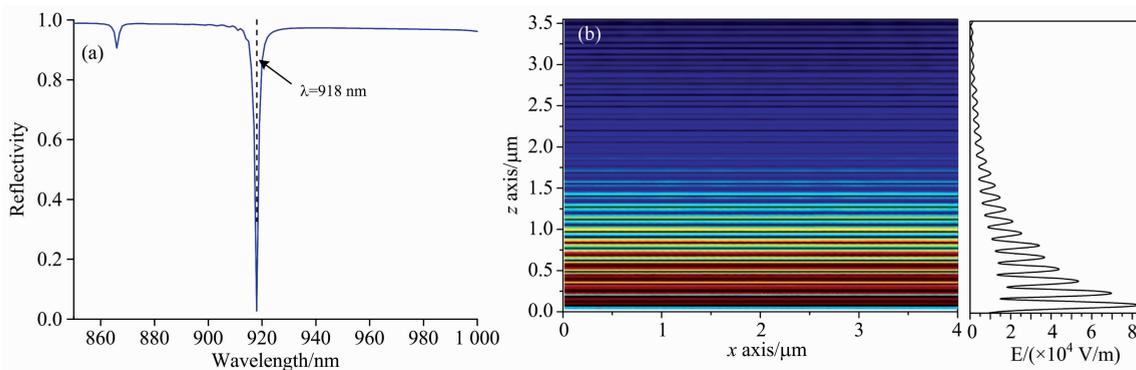


图 3 光垂直入射到 M1-DBR 结构

(a): 反射光谱; (b): 反射凹峰对应的电场分布图

Fig. 3 Light incident vertically onto the M1-DBR

(a): Reflection spectra; (b): Field intensity distribution of reflection dip

从图 3(a)和图 4(a)可以看出，当光分别垂直入射到 M1-DBR 和 M2-DBR 中，在禁带内 918 和 921 nm 处分别出现了一个反射凹峰。从凹峰对应的电场分布图中看到在 M1-DBR 界面和 M2-DBR 界面处出现明显的电场局域现象，如图

两个界面处理论上都可以产生 OTS，两个 OTS 之间会发生耦合作用。两 OTS 的耦合可以借用经典理论中的耦合谐振子方程来研究^[17]。

2 结果与讨论

在 M1-DBR-M2 结构中，取金属薄膜 M1 和 M2 的厚度分别为 50 和 35 nm，缺陷层 D1 和 D2 的厚度都为 40 nm，组成 DBR 半导体材料 AlAs 和 GaAs 的厚度分别为 76.4 和 67.5 nm，周期数为 23，可计算出 DBR 的禁带中心波长 λ_0 为 931 nm。

图 2 为光垂直入射到 DBR 结构的反射谱。由图可知，DBR 结构的禁带范围为 869~999 nm。

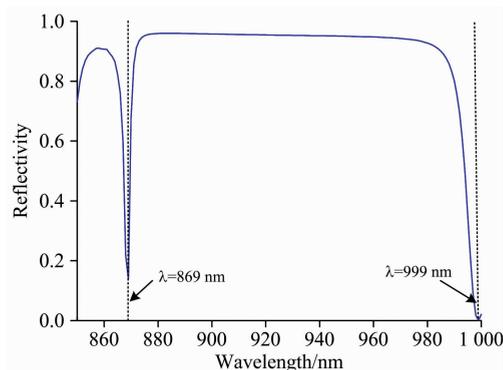


图 2 光垂直入射到 DBR 中的反射谱

Fig. 2 Reflection spectra at the vertical incidence of light onto the DBR structure

当光分别垂直入射到 M1-DBR，M2-DBR 和 M1-DBR-M2 结构时，其反射光谱和反射光谱中对应凹峰波长处的电场分布情况，分别如图 3—图 5 所示。

3(b)和图 4(b)所示，这说明在 M1-DBR 界面和 M2-DBR 界面处分别产生了本征波长为 918 和 921 nm 的 OTS1 和 OTS2。

在 M1-DBR-M2 结构中，两个 M-DBR 界面处理论上

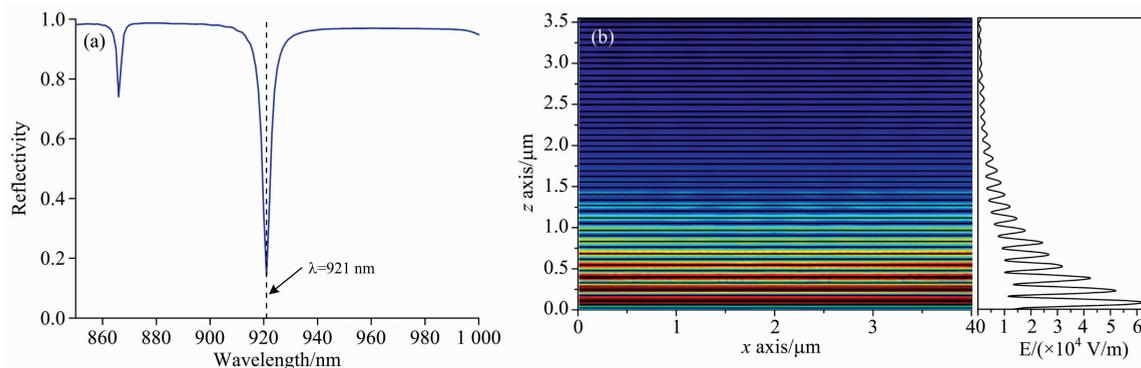


图 4 光垂直入射到 M2-DBR 结构

(a): 反射光谱; (b): 反射凹峰对应的电场分布图

Fig. 4 Light incident vertically onto the M2-DBR

(a): Reflection spectra; (b): Field intensity distribution of reflection dip

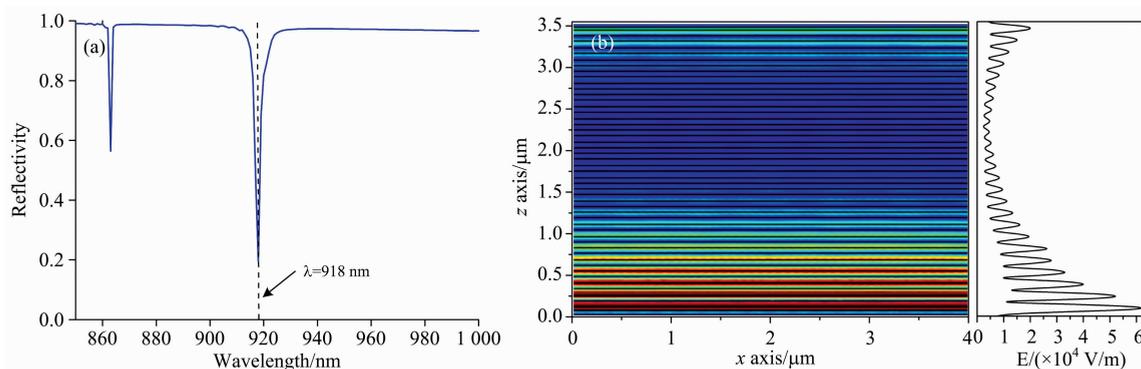


图 5 光垂直入射到 M1-DBR-M2 结构

(a): 反射光谱; (b): 反射凹峰对应的电场分布图

Fig. 5 Light incident vertically onto the M1-DBR-M2

(a): Reflection spectra; (b): Field intensity distribution of reflection dip

都可以产生 OTS。定义两 OTS 的本征频率差为本征频率失谐量，则两个 OTS 的本征波长失谐量为 3 nm。当光从 M1 端垂直入射到 M1-DBR-M2 中，由图 5(a) 中的反射光谱可看出，在 DBR 禁带范围内只出现一个波长为 918 nm 的凹峰，与 M1-DBR 结构的 OTS1 本征波长相同。这是由于在 M1-DBR-M2 结构中，由于 DBR 的周期数比较大时，发生弱耦合，光垂直入射到 M1-DBR-M2 结构中，只能激发 M1-DBR 交界面处的 OTS1，而不能激发 DBR-M2 交界面处 OTS2，因此 M1-DBR-M2 结构的反射光谱凹峰只与 M1-DBR 交界面处的 OTS1 有关。

虽然光垂直入射到 M1-DBR-M2 结构中，只能激发 M1-DBR 交界面处的 OTS1，但从图 5(b) 中对应反射凹峰的电场分布图中可以看出，电场局域现象并不是仅仅发生在 M1-DBR 交界面处，在 DBR-M2 交界面处同样存在电场局域现象。这是由于耦合作用，一部分光会隧穿 DBR，到达并被局域到 DBR-M2 交界面处，即发生了光的“隧穿”现象。用光隧穿几率表征隧穿效应的强弱，定义为穿过 M1-DBR-M2 中 DBR 中间位置的电场强度之和与 M1-DBR-M2 结构中总电场强度之比。经计算可得对应的光隧穿几率为 32%。

下面通过研究在光垂直入射到 M1-DBR-M2 结构中发生弱耦合时的反射光谱和 OTS 本征波长电场分布，研究金属层厚度对 M1-DBR-M2 结构中 OTS 的本征波长、反射率和光隧穿效应的影响。

当金属薄膜厚度分别为 20, 35, 50 和 65 nm 时，光垂直入射到 M-DBR 结构中产生的 OTS 本征波长分别为 933, 921, 918 和 917 nm。

当金属薄膜 M1 厚度分别为 20, 35, 50 和 65 nm，金属薄膜 M2 厚度为 35 nm 时，光垂直入射到 M1-DBR-M2 结构的反射光谱如图 6 所示。由于只能激发 M1-DBR 交界面处的 OTS1，所以反射光谱中只出现一个凹峰，本征波长分别为 933, 921, 918 和 917 nm。随着金属薄膜 M1 厚度逐渐增大，激发的 OTS 本征能量增大，本征波长蓝移，蓝移速度先快后慢，这与金属薄膜厚度对 M1-DBR 交界面处 OTS 的影响相同。

图 7 为金属薄膜 M1 厚度分别取为 20, 35, 50 和 65 nm 时，对应 OTS 本征波长处的电场分布图。当金属薄膜 M1 厚度为 35 nm 时，对应两 OTS 的本征波长失谐量为 0，从图 7 (b) 中可以看出，此时能隧穿到 DBR-M2 交界面处的电场最

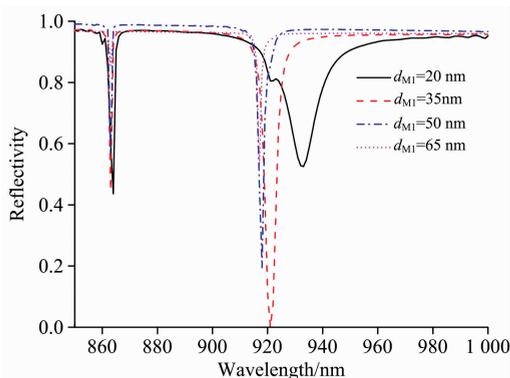


图 6 不同金属薄膜 M1 厚度下, 光垂直入射到 M1-DBR-M2 中的反射光谱

Fig. 6 Reflection spectra of light incident vertically into the M1-DBR-M2 at different thicknesses of M1

强, 即光的隧穿效应最强, 隧穿几率为 39.3%。当金属薄膜 M1 厚度分别为 50 和 60 nm 时, 对应两 OTS 的本征波长失谐量为 3 和 4 nm, 从图 7(c)和(d)中可以看出, 随着两 OTS 本征波长失谐量的增大, 能隧穿到 DBR-M2 交界面处的电场随之减弱, 光隧穿几率分别为 24.7%和 22.8%。当金属薄膜 M1 厚度为 20 nm 时, 对应两 OTS 的本征波长失谐量为 12 nm, 从图 7(a)中可以看出, 此时光几乎无法隧穿到 DBR-M2 交界面处, 即几乎不存在光的隧穿现象。

当金属薄膜 M1 厚度较小(如 20 nm)时, 光从金属薄膜一侧入射, 大部分可以穿透金属层, 在 M1-DBR 交界面处不能形成有效局域, 对应 OTS 本征波长处的反射率较大; 随着金属薄膜 M1 厚度增加至 35 nm 时, 在两个 M-DBR 交界面处都形成高强度局域, 导致反射率减小; 金属薄膜 M1 厚度进一步增大, 金属薄膜对光的吸收增大, 光传播到金属-DBR 交界面的能量减少。因此, 随着金属薄膜 M1 厚度增大, 反射光谱中凹陷的反射率先减小后增大; 当两金属薄膜厚度相等, 两 OTS 本征波长失谐量为零时, 凹陷反射率最小, 如图 6 所示。

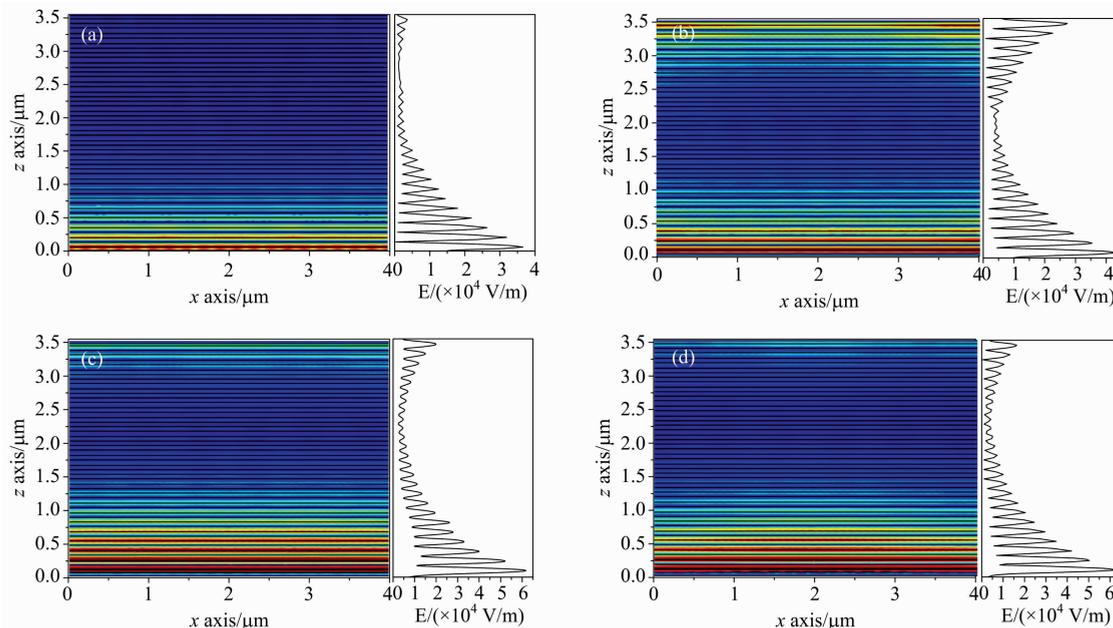


图 7 金属薄膜 M1 厚度分别为 20 nm (a), 35 nm (b), 50 nm (c)和 65 nm (d)时, 对应 OTS 本征波长分别为 933, 921, 918 和 917 nm 的电场分布图

Fig. 7 Field intensity distribution of different M1 thicknesses 20 nm (a), 35 nm (b), 50 nm (c) and 65 nm (d), correspond to wavelength of 933, 921, 918 and 917 nm, respectively

当金属薄膜 M2 厚度分别为 20, 35, 50 和 65 nm, 金属薄膜 M1 厚度为 35 nm 时, 图 8 为光垂直入射到 M1-DBR-M2 的反射光谱。由于光垂直入射到 M1-DBR-M2 中反射光谱的凹陷只与 M1-DBR 有关, 而与 DBR-M2 无关, 因此反射光谱中出现一个反射凹陷, 对应的本征波长等于 M1-DBR 的本征波长 921 nm, 不随金属薄膜 M2 厚度改变而改变, 如图 8 所示。

图 9 为金属薄膜 M2 厚度分别为 20, 35, 50 和 65 nm, 金属薄膜 M1 厚度为 35 nm 时, 对应 OTS 本征波长处的电

场分布图。虽然金属薄膜 M2 厚度改变时, OTS 的本征波长相同, 但本征波长的电场分布并不相同。如图 9 所示, 与金属薄膜 M1 厚度对本征波长的电场分布的影响类似, 当金属薄膜 M2 厚度为 35 nm 时, 对应两 OTS 的本征波长失谐量为 0, 光隧穿效应最强, 隧穿几率为 39.3%。当金属薄膜 M2 厚度分别为 50 和 60 nm 时, 对应两 OTS 的本征波长失谐量为 3 和 4 nm, 随着两 OTS 的本征波长失谐量的增大, 光隧穿效应随之减弱, 隧穿几率分别为 32%和 29.8%。当金属薄膜 M1 厚度为 20 nm 时, 对应两 OTS 的本征波长失谐量为

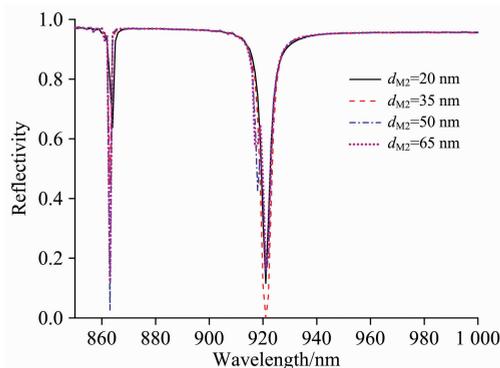


图 8 不同金属薄膜 M2 厚度下, 光垂直入射到 M1-DBR-M2 中的反射光谱

Fig. 8 Reflection spectra of light incident vertically into the M1-DBR-M2 at different thicknesses of M2

12 nm, 光隧穿效应消失。

从图 9 中可以看出, 光在 M1-DBR-M2 结构中局域的强弱与两 OTS 本征波长失谐量有关。随着两 OTS 的本征波长失谐量的减小, 光在 M1-DBR-M2 结构中的局域现象随之增强, 导致反射光谱中凹峰处的反射率减小。所以, 当金属薄膜 M2 厚度为 35 nm 时, 反射凹峰的反射率最小, 如图 8 所示。

3 结 论

针对 M1-DBR-M2 结构中两 OTS 发生弱耦合情况, 通过研究反射光谱和 OTS 本征波长电场分布, 揭示了弱耦合情况下的 OTS 和光隧穿效应。研究表明: 光垂直入射到 M1-DBR-M2 结构中, 当发生弱耦合时, 由于只能激发 M1-DBR 交界面处的 OTS1, 而不能激发 DBR-M2 交界面处 OTS2, 因此金属薄膜 M2 的厚度对 OTS 的本征波长没影响, 而改变金属薄膜 M1 的厚度可以改变 OTS 的本征波长, 随着金属薄膜 M1 厚度的增大, OTS 本征波长发生蓝移。虽然光只能激发 M1-DBR 交界面处的 OTS1, 但电场局域现象并不仅仅发生在 M1-DBR 交界面处, 在 DBR-M2 交界面处也存在电场局域现象, 即存在光的隧穿现象。M1-DBR 和 DBR-M2 交界面处形成的 OTS 的本征波长失谐量的大小, 影响了光隧穿到 DBR-M2 交界面处的强弱, 也影响了光在 M1-DBR-M2 中局域现象的强弱。两 OTS 的本征波长失谐量越小, 光的隧穿效应越强, 光在 M1-DBR-M2 结构中的局域现象越强, 导致反射光谱中凹峰处的反射率越小。随着光入射角度的增大, OTS 的本征波长发生蓝移, 光隧穿效应减弱, 凹峰的反射率随之增大。

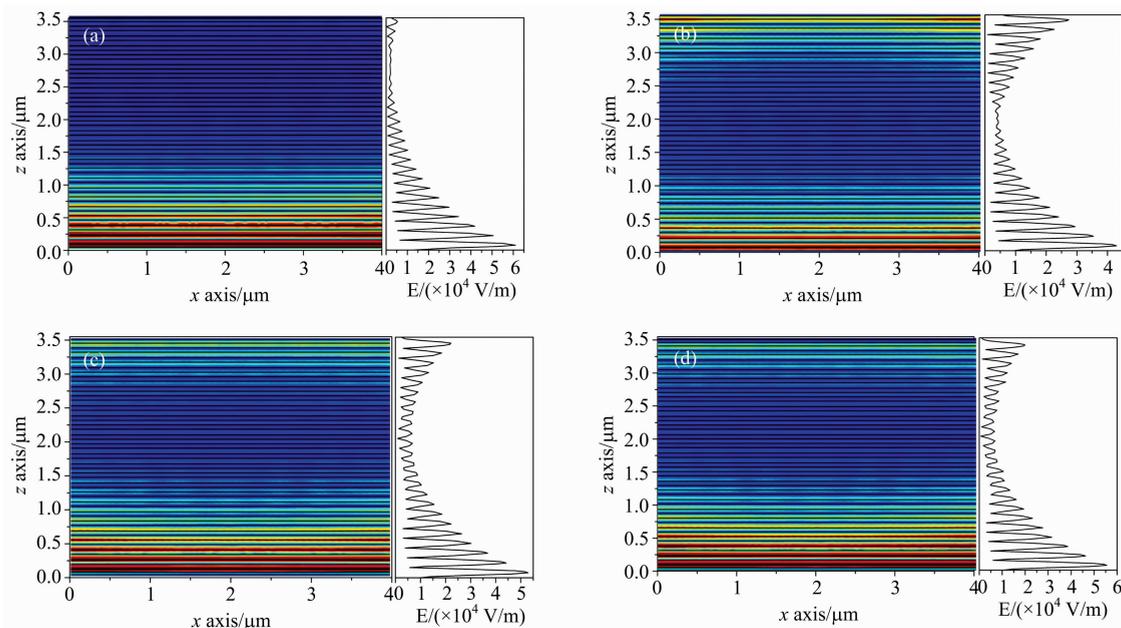


图 9 金属薄膜 M2 厚度分别为 20 nm (a), 35 nm (b), 50 nm (c) 和 65 nm (d) 时, 对应 OTS 本征波长 $\lambda=921$ nm 的电场分布图

Fig. 9 Field intensity distribution of different M2 thicknesses 20 nm (a), 35 nm (b), 50 nm (c) and 65 nm (d) correspond to wavelength of 921 nm

References

- [1] Kavokin A V, Shelykh I A, G Malpuech. Phys. Rev. B, 2005, 72(23): 233102.
- [2] Guo J, Sun Y, Zhang Y, et al. Physical Review E, 2008, 78(2): 026607.
- [3] Kaliteevski M, Iorsh I, Brand S, et al. Phys. Rev. B, 2007, 76(16): 165415.

- [4] JING Qing-li, DU Chun-guang, GAO Jian-cun(荆庆丽, 杜春光, 高健存). Acta Phys. Sin. (物理学报), 2013, 62(3): 037302.
- [5] Little C E, Anufriev R, Iorsh I, et al. Physical Review B, 2012, 86(23): 235425.
- [6] Zhang Weili, Rao Yunjiang. Chin. Phys. B, 2012, 21: 057107.
- [7] Bikbaev R G, Vetrov S Y, Timofeev I V. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(10): 2198.
- [8] Chestnov I Y, Sedov E S, Kutrovskaia S V, et al. Physical Review B, 2017, 96(24): 245309.
- [9] Zheng Y, Wang Y, Luo J, et al. Optics Communications, 2018, 406: 103.
- [10] ZHOU Hai-chun(周海春). Ph. D. Dissertation(Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (华中科技大学博士学位论文), 2012.
- [11] JIANG Yao, ZHANG Wei-li, ZHU Ye-yu(蒋 瑶, 张伟利, 朱叶雨). Acta Phys. Sin. (物理学报), 2013, 62(16): 167303.
- [12] CHEN Lin-kun, FANG Yun-tuan, ZHU Na(陈林坤, 方云团, 朱 娜). Journal of Synthetic Crystals(人工晶体学报), 2013, 42(11): 2406.
- [13] LU Su-qing, CHAO Xiao-gang, CHEN Xian-feng(陆苏青, 巢小刚, 陈宪锋). Acta Optic. Sin. (光学学报), 2015, 35(1): 0116003.
- [14] WU Yi-heng, HU Jian-xia, FANG Yun-tuan(吴义恒, 胡坚霞, 方云团). Laser Technology(激光技术), 2016, 40(1): 11.
- [15] LIU Qi-neng, DAI Hong-xia(刘启能, 代洪霞). Laser Technology(激光技术), 2017, (2): 205.
- [16] Yang G, Zhou H, Long H, et al. Optics Letters, 2010, 35(24): 4112.
- [17] Kavokin A. Applied Physics A, 2007, 89(2): 241.

Weak Coupling Properties of Optical Tamm State in Metal-DBR-Metal Structure

LI Pei-li, GAO Hui, LUAN Kai-zhi, LU Yun-qing

College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210023, China

Abstract Weak coupling effect between two optical Tamm states (OTS) in metal-DBR-metal (M1-DBR-M2) structure will occur when the periodicity of distributed Bragg (DBR) in the M1-DBR-M2 is relatively large. By studying the reflection spectrum and the distribution of the electric field of the intrinsic wavelength of OTS under the condition of weak coupling of OTS, the intrinsic wavelength, reflectivity and optical tunneling effect of OTS are revealed. The results show that the intrinsic wavelength of OTS is affected by the thickness of the metal film M1 under the weak coupling condition, while the thickness of the metal film M2 has no effect on the intrinsic wavelength of OTS. Although only the OTS1 at the M1-DBR interface can be excited, the local field phenomenon is not only localized at the M1-DBR interface. The light can go through the DBR and be localized to the DBR-M2 interface, which is optical tunneling effect. The optical tunneling effect is related to the intrinsic wavelength detuning between two OTS. The smaller the detuning of the intrinsic wavelength is, the stronger the tunneling effect is. The intrinsic wavelength detuning between two OTS also affects the local intensity of light in the M1-DBR-M2 structure. The smaller the detuning of the intrinsic wavelength is, the stronger the local phenomenon of light is, and the smaller the reflectivity at the concave peak in the reflection spectrum is.

Keywords Optical Tamm state; Weak coupling; Metal-DBR-metal

(Received Nov. 20, 2018; accepted Mar. 25, 2019)