

文章编号: 0253-2239(2005)08-1121-5

用一维光子带隙结构增强硫化镉双光子吸收研究

沈 杰¹ 马国宏² 章壮健^{1*} 华中一¹ 唐星海²

(¹ 复旦大学材料科学系, 上海 200433)
(² 新加坡国立大学物理系, 新加坡)

摘要: 用真空镀膜方法制备了含有单个 CdS 缺陷层的具有不同周期和结构参量的 TiO₂/SiO₂ 一维光子晶体。用抽运-探测技术研究了 CdS 缺陷层的双光子吸收(TPA)现象。实验结果表明:一维光子晶体中 CdS 缺陷层的双光子吸收显著增强。不同周期和结构参量的一维光子晶体中 CdS 缺陷层的双光子吸收系数不同。双光子吸收的增强来源于由光局域化导致的缺陷层的电场强度的增加。缺陷层电场强度与一维光子晶体的结构有关,如周期,光子带隙的位置与宽度及缺陷模式等因素都会影响缺陷层电场强度。采用四分之一波长的高低折射率介质层和与入射波长匹配的缺陷模可以得到最大的缺陷层电场强度。

关键词: 光电子学; 双光子吸收; 抽运-探测; 光子带隙; 缺陷

中图分类号: O437 文献标识码: A

Research on Two-Photon Absorption Enhancement of CdS in One-Dimensional Photonic Band Gap Structures

Shen Jie¹ Ma Guohong² Zhang Zhuangjian¹ Hua Zhongyi¹ Tang Singhai²

(¹ Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200433)
(² Department of Physics, National University of Singapore, Singapore)

Abstract: One-dimensional photonic crystals (1D PC) with single CdS defect layer in TiO₂/SiO₂ dielectric thin films stack with different periods and structural parameters were fabricated by vacuum deposition. Two-photon absorption (TPA) of the CdS defect layer in the photonic crystals was investigated by pump-probe measurement. Experimental results show a significant enhancement of TPA coefficient in the CdS defect layer in one-dimensional photonic crystal. Different magnitude of enhanced two-photon absorption coefficient of CdS defect layer in one-dimensional photonic crystal with different photonic band gap has been observed. The enhanced two-photon absorption effect results from the electric field enhancement due to the light localization in the CdS defect layer. The electric field enhancement in defect laser was determined by the structural parameters of one-dimensional photonic crystal such as period, the position and width of bandgap and defect mode. The highest electric field intensity at defect layer is obtained with the alternated quarter-wavelength dielectric thin films of high and low refractive indexes and a defect mode matched with incident light wavelength.

Key words: optoelectronics; two-photon absorption; pump-probe; photonic band gap; defect

1 引 言

光子晶体是一种介电常量在空间周期性分布的微结构材料,其主要特征是某些频率的光波在传播时受到抑制,形成光子带隙^[1,2],带隙的位置和宽度可通过改变材料的介电常量或几何结构来调节,光子带隙还能够抑制自发辐射。因此光子晶体可以制

成高效率发光二极管、高品质因素的单模微谐振腔、低阈值激光器、低损耗反射镜、各种滤波器、光开关、光混频器、光存储器等^[3],具有广泛的应用前景。

当介电常量在空间呈一维周期性分布时,称为一维光子晶体。一维光子晶体结构简单,易于制备,同时也具有二维或三维光子晶体的一些特性^[4,5],在可

作者简介: 沈 杰(1969~),男,上海人,复旦大学材料科学系副教授,主要从事真空与薄膜技术的研究。

E-mail: shenjie@fudan.edu.cn

收稿日期: 2004-09-27; 收到修改稿日期: 2004-11-25

见光及红外波段可得到全向光子禁带。类似于晶体中的杂质或缺陷会在禁带中形成杂质能级,在一维光子晶体中掺杂缺陷层,会在光子带隙中出现缺陷模^[6]。缺陷模的光局域化使得缺陷层内的电场强度比普通材料中的电场强度要大得多,如果缺陷层是一种非线性光学材料,那么其非线性效应将得到增强^[7],因此带有非线性缺陷层的一维光子晶体可制成各种非线性光学器件。目前关于这方面的研究报道还较少。Hattori 等^[8,9]在 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 一维光子晶体中掺杂含噁的聚乙烯醇薄膜,观察到饱和吸收和简并四波混频的增强。Ye 等^[10]在 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 一维光子晶体中掺杂含二氨基嘌呤的聚乙烯醇薄膜,观察到双光子激发荧光的增强。Inouye 等^[11]也观察到 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 一维光子晶体中掺杂含 Au 纳米粒子的聚乙烯醇薄膜后的克尔(Kerr)效应增强。

CdS 作为一种常用的光学材料具有较大的非线性系数,本文用真空镀膜方法制备了含有单个 CdS 缺

陷层的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 一维光子晶体,由抽运-探测技术^[12]探测到双光子吸收(TPA),其双光子吸收系数随着缺陷层电场强度增强而明显增大。并讨论了缺陷模式、周期、能带位置和带宽等因素对缺陷层电场的影响。

2 实 验

通过真空镀膜的方法在玻璃基板上制备了 4 个及 8 个周期的具有 CdS 缺陷层的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 一维光子晶体,其结构如图 1 所示。 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 膜层采用电子束蒸发沉积在普通的载波片基板上,沉积时充入 1×10^{-2} Pa 的 O_2 ,基板温度为 330°C 。CdS 用热蒸发方式制备。 TiO_2 、 SiO_2 和 CdS 在 800 nm 处的实际折射率经测量分别为 2.21、1.45 和 2.26。制备了 2 组不同结构参量的光子晶体,其具体参量见表 1。为了对比,还制备了单层的 CdS 薄膜,厚度为 385 nm。

表 1 不同样品的结构参量,缺陷层电场强度与双光子吸收系数 β

Table 1 Thicknesses of TiO_2 (d_H), SiO_2 (d_L) and CdS (d_D), the average electric field intensity $|E|^2$ in CdS defect layer and the TPA coefficient β

Sample	Period	d_H/nm	d_L/nm	d_D/nm	$ E ^2$	$\beta/(\text{cm}/\text{GW})$
A4	4	90	130	364	1.75	60.2
A8	8	90	130	364	4.75	164.0
B4	4	98	146	335.5	1.49	18.0
B8	8	98	146	335.5	2.77	71.4

非线性效应测量采用抽运-探测技术。图 1 为抽运-探测的探测装置示意图。由一个钛宝石激光器产生一个脉宽 200 fs、82 MHz 的中心波长

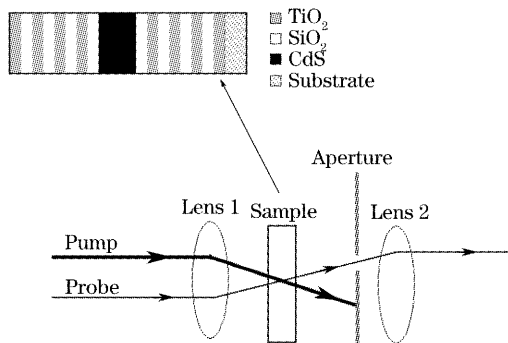


图 1 抽运-探测技术测量示意图,内部为 8 周期的含缺陷层的一维光子晶体结构示意图

Fig. 1 Geometrical layout of the pump-probe beams measurement relative to the sample. The schematic of the composition of 1D photonic crystal (8 periods) with a defect layer is shown in the inset

800 nm 的激光脉冲,在激光器输出端用分光片将光束分为抽运光(Pump)与探测光(Probe),其中抽运光通过 1620 Hz 的斩波器和由计算机控制的光学延迟线,二束光通过透镜 1 会聚于光子晶体样品表面,光斑直径为 $50 \mu\text{m}$,在样品后面加一孔径仅让探测光通过。抽运光强为 $2 \text{ GW}/\text{cm}^2$,探测光强度为抽运光的 1/10。调节光学延迟线当抽运光脉冲与探测光脉冲同时到达样品表面时,若存在双光子吸收将使样品的透射率下降。

3 结果与讨论

图 2(a)和图 2(b)为测得的一维光子晶体的透射谱,图 2(c)和图 2(d)为用传输矩阵法模拟计算的结果。可以看到,随着周期增加其缺陷模即共振透射峰随之变窄,品质因素提高。实际测得的透射谱形状与模拟计算的一致,共振透射峰的高度略低,这有可能是由沉积工艺中的误差和膜层内的散射引起的,也可能是 CdS 的线性吸收不能完全忽略引起的

(模拟计算时 CdS 的 $k=0$)。从 A 组(A4 和 A8)与 B 组(B4 和 B8)样品的对比可以看到, A 组的缺陷模基本位于能带的中央位置, 而 B 组的缺陷模位于

能带的一侧, 当然缺陷模的位置都是 800nm, 对应于激光器的中心波长。A 组与 B 组的能带中心位置(midgap)分别为 774.8 nm 和 856.6 nm。

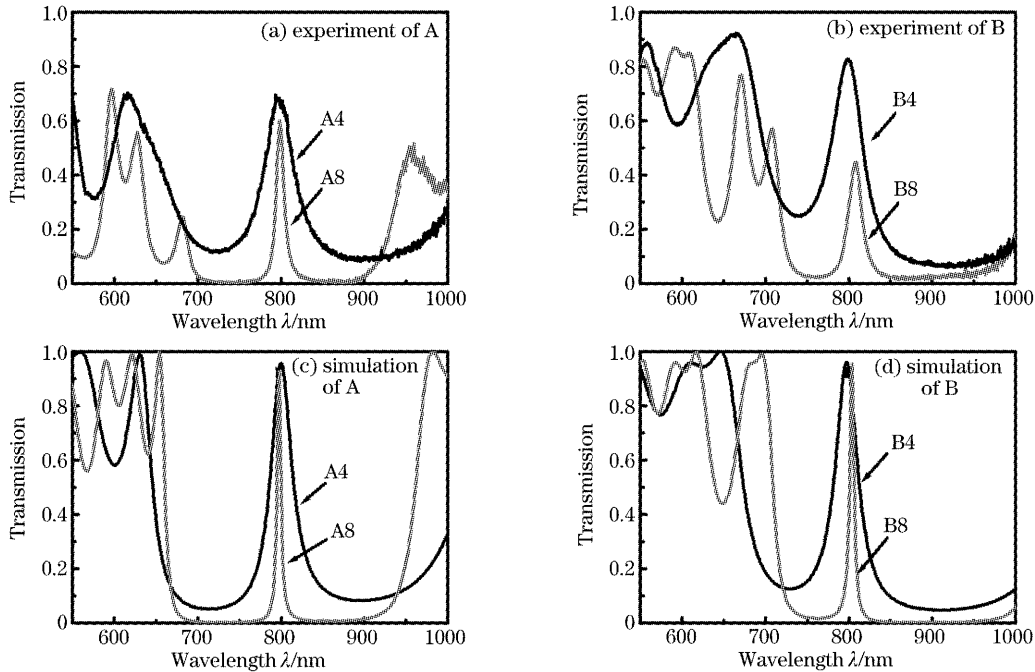


图 2 不同结构参量的一维光子晶体的透射谱。(a) A4 和 A8 的实验曲线,(b) B4 和 B8 的实验曲线, (c) A4 和 A8 的拟合曲线,(d) B4 和 B8 的拟合曲线

Fig. 2 Transmission spectra of 1D photonic crystal with different structure parameters. (a) Experimental results of sample A4 and A8, (b) experimental results of sample B4 and B8, (c) simulation of sample A4 and A8, (d) simulation of sample B4 and B8

图 3 为在一维光子晶体中作为缺陷层的 CdS 的双光子吸收系数 β 与缺陷层平均电场强度的关系, 内部为含 CdS 缺陷层的两组一维光子晶体的瞬态时间谱。图 4 为一维光子晶体内部的电场强度分

布(计算时设入射光为单位电场强度)。从图 4 可以看出, 在 CdS 缺陷层内电场强度得到增强, 且 8 个周期的要大于 4 个周期的。计算得到的平均电场强度分别为 1.75 (A4)、4.75 (A8)、1.49 (B4) 和 2.77 (B8)。

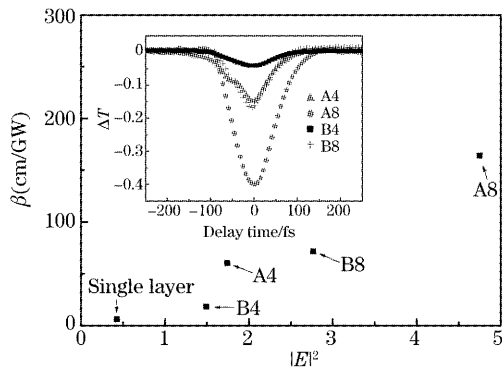


图 3 双光子吸收系数 β 与缺陷层电场强度关系, 内部为样品的瞬态时间谱

Fig. 3 Calculated average electric field intensity $|E|^2$ versus of TPA coefficient β . The inset is the transient time evolution of the four samples

由图 3 可见, 我们制备的一维光子晶体具有双光子吸收这一光学非线性效应, 且随着周期的增加, 信号增强。为了比较, 我们测量了厚度为 385 nm 的单层 CdS 膜的信号, 并计算得到其双光子吸收系数 β 为 5.8 cm/GW^[13], 普通的体材料 CdS 的 β 为 6.4 cm/GW。而处于一维光子晶体内的 CdS 的双光子吸收系数 β 根据计算(具体计算过程见文献[13])分别为 60.2 cm/GW (A4)、164.0 cm/GW (A8)、18.0 cm/GW (B4) 和 71.4 cm/GW (B8)。这一双光子吸收的增强显然是光子晶体中缺陷层电场强度增强所致。随着缺陷层电场强度的增加其双光子吸收系数 β 也相应增加。这说明可以利用带缺陷层的一维光子晶体的缺陷层电场强度增强这一特

性来设计和制作各种非线性光学器件,且可以比普通的非线性光学器件具有更强的非线性效应。此外, A 组样品的双光子吸收系数 β 明显大于 B 组样

品,显然这和光子晶体的结构有关,因为 A 组的缺陷模相对 B 组更加接近于能带的中央。

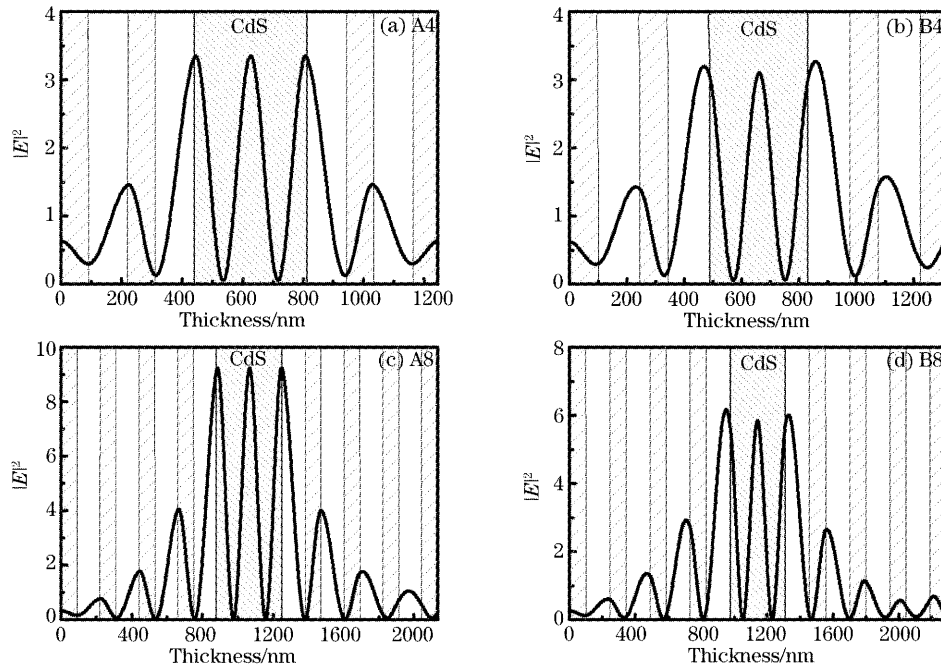


图 4 一维光子晶体内部的电场强度分布,中间为 CdS 缺陷层

Fig. 4 Calculated average electric field intensity ($|E|^2$) distribution in 1D photonic crystal structure with incidence wavelength at 800 nm. The dense diagonal pattern block in the center represents CdS defect layer

影响一维光子晶体中缺陷层电场强度的因素包括周期、缺陷模式、能带位置和带宽等。增加周期可以增加一维光子晶体中缺陷层电场强度。当缺陷模与入射光波长匹配时,其透射率达到最大,因而缺陷层电场强度也达到最大。能带的位置也会影响缺陷层电场强度。当能带向长波或短波方向移动时,要通过改变缺陷层的厚度使缺陷模始终位于 800nm 以匹配激光波长,因此只有当能带中心为 800 nm 时,缺陷模才位于能带正中,无论能带向短波还是长波方向移动,缺陷模都将移向能带边缘而削弱光局域化。填充率的影响主要体现在带宽上,当高、低折射率介质层的光学厚度相等时,带宽最大。填充率的变小或变大都将使带宽减小而削弱光局域化。因此,当高、低折射率介质层均为 $\lambda/4$ 层时,缺陷模位于能带正中且带宽最大,缺陷层电场强度也达到极大值。

4 结 论

用真空镀膜方法制备了含单个 CdS 缺陷层的不同周期与能带结构参量的二组 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 一维

光子晶体。用抽运-探测技术研究了 CdS 缺陷层的双光子吸收。实验结果表明:一维光子晶体中 CdS 缺陷层的双光子吸收显著增强。不同周期和结构参量的一维光子晶体中 CdS 缺陷层的双光子吸收系数不同。这一增强来源于由光局域化导致的 CdS 缺陷层的电场强度的增加。高、低折射率介质层均为 $\lambda/4$ 膜层,缺陷模与入射光波长匹配时,缺陷层电场强度最大,并随周期增加而增大。

参 考 文 献

- 1 Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 Sajeev John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 Thomas F. Krauss, Richard M. De La Rue. Photonic crystals in the optical regime-past, present and future[J]. *Prog. in Quant. Electron.*, 1999, **23**: 51~96
- 4 Yoel Fink, Joshua N. Winn, Shanhui Fan *et al.*. A dielectric omnidirectional reflector[J]. *Science*, 1998, **282**(5394): 1679~1682
- 5 An Liping, Liu Nianhua. Ultraslow group velocity in photonic crystal with a dispersive defect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1287~1290 (in Chinese)

- 安丽萍, 刘念华. 光子晶体中缺陷的色散导致的群速度降低[J]. 光学学报, 2003, **23**(11): 1287~1290
- 6 Huang Biqin, Gu Peifu. Extension of one-dimensional photonic crystal's band gap [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1497~1501 (in Chinese)
- 黄弼勤, 顾培夫. 一维光子晶体禁带的展宽[J]. 光学学报, 2003, **23**(11): 1497~1501
- 7 Garrett J. Schneider, George H. Wastson. Nonlinear optical spectroscopy in one-dimensional photonic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(26): 5350~5352
- 8 Toshiaki Hattori, Noraki Tsurumachi, Norio Muroi *et al.*. Enhancement of optical nonlinearity in one-dimensional photonic crystals [J]. *Prog. Crystal Growth & Charact.*, 1996, **33**: 183~186
- 9 Toshiaki Hattori, Noriaki Tsurumachi, Hiroki Nakatsuka. Analysis of optical nonlinearity by defect states in one-dimensional photonic crystals [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(2): 348~355
- 10 Jingyong Ye, Mitsuru Ishikawa, Yuji Yamane *et al.*. Enhancement of two-photon excited fluorescence using one-dimensional photonic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(23): 3605~3607
- 11 Hideyuki Inouye, Yoshihik Kanemitsu. Direct observation of nonlinear effects in a one-dimensional photonic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(8): 1155~1157
- 12 Haiyu Sang, Weijiang Wang, Jie Lin *et al.*. Measurement of the third order nonlinear optical coefficients of GaP and chirp parameter of laser pulse [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(6): 354~355
- 13 Guohong Ma, Singhai Tang, Jie Shen *et al.*. Defect-mode dependence of two-photon-absorption enhancement in a one-dimensional photonic bandgap structure [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(15): 1769~1771