

基于一维缺陷光子晶体的角度测量仪的设计

于志明¹, 周静²

(1. 连云港师范高等专科学校物理系, 江苏 连云港 222006; 2. 北京师范大学物理系, 北京 100875)

摘要:提出用一维缺陷光子晶体来测量角度特别是小的角度变化的设计方案。用 Si 薄膜和 SiO₂ 薄膜组成一维缺陷光子晶体, 用特征矩阵法研究该光子晶体的禁带中的缺陷模的波长和强度随入射角缓慢变化而变化的规律, 由此提出根据缺陷模的波长、强度、偏振性与入射角的关系进行角度测量的原理。本设计特别适用于极小的角度变化的测量。

关键词:角度测量; 一维光子晶体; 缺陷模; 特征矩阵

中图分类号:TH741.2+3 **文献标识码:**A

A Design for the Angle Measurement Device With 1D Defect Photonic Crystal

YU Zhi-ming¹, ZHOU Jing²

(1. Department of Physics, Lianyungang Teachers' College, Lianyungang 222006, China;

2. Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In this paper we put forward a design for the angle measurement device with 1-D defect photonic crystal. The 1-D defect photonic crystal is made up of Si thin film and SiO₂ thin film. We investigate the variety law of the defect modes as the incident angle has small changes by means of eigen matrix. Accordingly we put forward three ways of angle measurement: using the relationships between the wavelength of defect modes and incident angle, using the relationships between the transmittances of defect modes and incident angle and using the relationships between the polarizations of defect modes and incident angle. The virtue of our design is that it can measure very small angle change precisely.

Key words: angle measurement; 1D photonic crystal; defect mode; eigen matrix

1 引言

光子晶体是光子带隙材料, 波长在带隙中的光不能在光子晶体中传播。光子在光子晶体的行为与电子在半导体晶体中的行为相似, 人们可以像控制半导体晶体中电子的行为那样来控制光子晶体中光子的行为, 这使得光子晶体具有广泛的应用前景^[1-2]。

一维光子晶体因其制备较容易、研究方法较成熟而倍受人们的关注, 特别是在一维光子晶体中掺入一定的缺陷层, 可以在禁带中产生很窄的缺陷模, 该缺陷模有广泛的应用^[3-8]。当前, 人们已经将一维缺陷光子晶体运用到了测量领域, 如用于温度的

测量^[9]、应力的测量^[10]、压力的测量^[11]。本文提出用一维缺陷光子晶体来测量角度, 用 Si 薄膜和 SiO₂ 薄膜组成一维缺陷光子晶体, 用特征矩阵法研究了该一维光子晶体的禁带中的缺陷模的波长和强度随入射角缓慢变化而变化的规律, 由此提出根据缺陷模的波长、强度、偏振性与入射角的关系进行角度测量的方法, 分析了各种方法的特点^[12-13]。本设计为角度测量特别是极小的角度变化的测量提供了一种新方法。

作者简介:于志明(1960-), 男, 副教授, 主要从事大学物理的教学和研究。E-mail: 8800237_cn@sina.com

收稿日期:2008-06-27

2 一维缺陷光子晶体角度测量仪的结构

我们设计的一维缺陷光子晶体角度测量仪的结构如图1所示。

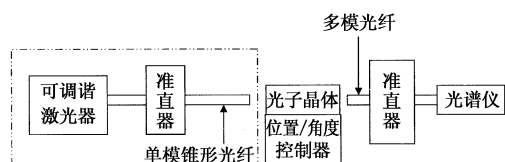


图1 一维缺陷光子晶体角度测量仪的结构

图1中虚框内的装置安装在一转动器件上,通过转动来改变光子晶体前的入射光的入射角。图1中的光子晶体采用由Si薄膜和SiO₂薄膜组成的有缺陷层的一维光子晶体,其结构式为:(AB)⁵D(BA)⁵,其中A,D为Si薄膜,B为SiO₂薄膜,D作为缺陷层,其厚度与A不同。据文献[9],利用等离子体增强化学气相沉积法,可以隔层沉积Si薄膜和SiO₂薄膜,通过严格控制沉积的时间,可以得到不同厚度的Si薄膜和SiO₂薄膜,当温度为250℃时,Si薄膜厚度的生长速度为20nm/s,SiO₂薄膜厚度的生长速度为40nm/s。为便于制作,本设计中A表示的Si薄膜的厚度取400nm,B表示的SiO₂薄膜的厚度取800nm,而D表示的Si薄膜的厚度取为40nm。

3 缺陷模的波长和强度随入射角缓慢变化而变化的规律

我们用特征矩阵法,研究了上述一维光子晶体的缺陷模的波长和强度随入射角缓慢变化而变化的规律。在计算中我们取Si薄膜的折射率为3.5,SiO₂薄膜的折射率为1.459,忽略薄膜的色散和吸收。我们的计算发现,当用波长为1400~2000nm、强度均匀的光垂直入射时,在我们设计的一维缺陷光子晶体的透射谱中有一很宽的禁带,禁带的波长范围为1573~1885nm,在禁带中有一品质因数很高的缺陷模,缺陷模的波长为1765nm,强度(即透射率)为43%,如图2所示。

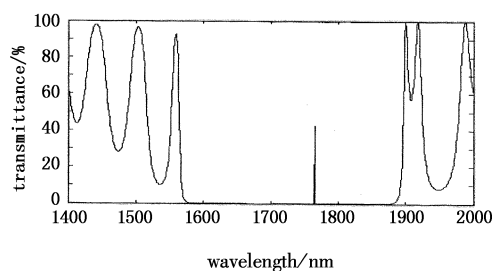


图2 禁带中的缺陷模

由于垂直入射,图2中的缺陷模既是P偏振光

的缺陷模,又是S偏振光的缺陷模。我们的计算发现,如入射角从0°开始逐渐缓慢增大,例如每次增加千分之一度,则图2中的缺陷模的强度在开始时增大,当增大到最大值(100%)(P偏振光的缺陷模的强度达到最大值(100%)时的入射角为0.855°,S偏振光的缺陷模的强度达到最大值(100%)时的入射角为0.925°)后,继续缓慢增大入射角,则缺陷模的强度逐渐减小到0,然后缺陷模的波长变短1nm,缺陷模的强度由0变为最大(100%),再由最大(100%)变为0,缺陷模的波长再变短1nm,如此循环。在近似相同的条件下,S偏振光的缺陷模的强度从一个最大值(100%)到达下一个最大值(100%)的过程中要增加的入射角比P偏振光的缺陷模的要大。图3是入射角在0°~17°范围内,P偏振光和S偏振光的缺陷模的强度取最大值(100%)时的入射角与缺陷模的波长的关系曲线。

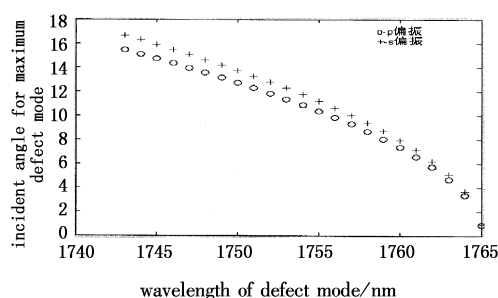


图3 缺陷模的强度最大(100%)时相应的入射角与缺陷模的波长的关系

随着入射角的增大,P偏振光的缺陷模的波长向短波方向移动的幅度要比S偏振光的缺陷模的大,这使P偏振光的缺陷模和S偏振光的缺陷模在透射谱中的位置错开。图4是在入射角为30.076°时P偏振光和S偏振光的透射谱,其中P偏振光的缺陷模的波长为1686nm,而S偏振光的缺陷模的波长为1696nm,二者相差10nm。

由于各偏振光的缺陷模的强度和波长都与入射角有关,我们可以利用这些关系实现对角度的测量。

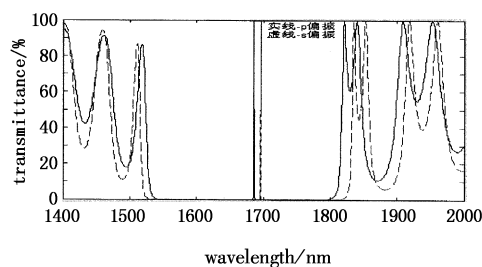


图4 入射角为30.076°时的透射谱

4 角度测量方法

4.1 根据缺陷模的波长与入射角的关系测量角度

随着入射角的缓慢增大,各偏振光的缺陷模的波长慢慢变短,图5是入射角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内,P偏振光和S偏振光的缺陷模的波长与入射角的关系曲线。

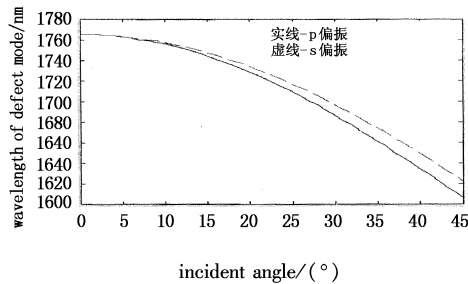


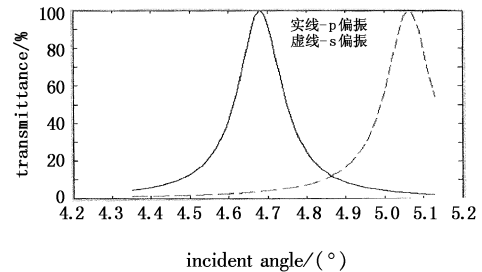
图5 缺陷模的波长与入射角的关系

显然,利用缺陷模的波长与入射角的变化关系可以测量入射角。但我们的研究表明,有一些入射角相对应的缺陷模的强度可能很小,这会使这些角度的测量变得困难。

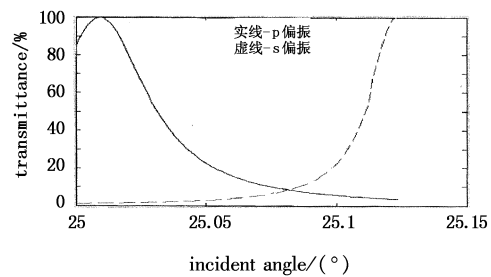
4.2 根据一定波长的缺陷模的强度与入射角的关系测量角度

研究发现,对于一定波长的缺陷模,其强度在入射角有很小(如千分之一度的变化)的变化时,就会发生较大的变化,利用这一变化可以实现对极小的角度变化的测量。对于不同波长的缺陷模,其强度随入射角变化的快慢是不同的。图6(a)是在入射角在 $4.350^\circ \sim 5.130^\circ$ 范围内,波长为1762nm的P偏振光的缺陷模的强度和波长为1763nm的S偏振光的缺陷模的强度与入射角的关系曲线,其中P偏振光的缺陷模的强度从50%增大到100%要增加的入射角约 0.072° ,而S偏振光的缺陷模的强度从50%增大到100%要增加的入射角约 0.073° 。图6(b)是在入射角在 $25.000^\circ \sim 25.125^\circ$ 范围内,波长为1709nm的P偏振光的缺陷模的强度和波长为1716nm的S偏振光的缺陷模的强度与入射角的关系曲线,其中P偏振光的缺陷模的强度从50%~100%要增加的入射角约 0.022° ,而S偏振光的缺陷模的强度从50%~100%要增加的入射角约 0.012° 。

由图6可见,当入射角取在缺陷模的强度最大值(100%)附近时,入射角很小(千分之一度甚至更小)的变化,就会使缺陷模的强度发生明显的变化,利用缺陷模的这一特点,可以测量极小的角度变化。



(a)



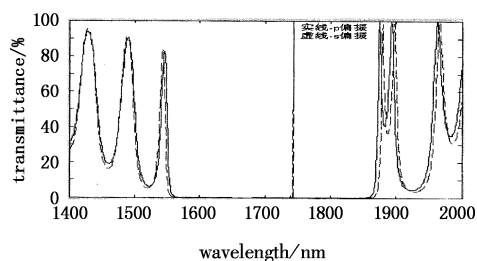
(b)

图6 缺陷模的强度与入射角的变化关系

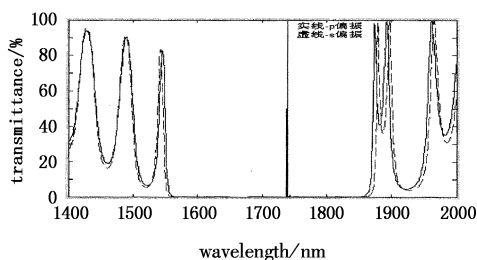
4.3 根据缺陷模的偏振性与入射角的关系测量角度

当入射角为 0° 时,P偏振光的缺陷模和S偏振光的缺陷模有相同的波长和强度。随着入射角的缓慢增大,P偏振光的缺陷模的波长和强度与S偏振光的缺陷模的波长和强度都要发生不同的变化,两种偏振光的缺陷模的波长差和强度差都随入射角的变化而变化,这些变化关系原则上都可以用来作为角度测量的依据。我们的研究发现,有时在入射角很小的变化过程中,在P偏振光和S偏振光的透射谱中会出现从只有一种强度最大(100%)的偏振光的缺陷模,变化到只有另一种强度最大(100%)的偏振光的缺陷模的情况。图7(a)是在入射角为 16.663° 时,P偏振光和S偏振光的透射谱,其中只有S偏振光的缺陷模,缺陷模的波长为1743nm、强度为100%,此时,P偏振光的缺陷模的强度为0。图7(b)是在入射角为 16.800° 时,P偏振光和S偏振光的透射谱,其中只有P偏振光的缺陷模,缺陷模的波长为1739nm、强度为100%。此时,S偏振光

的缺陷模的强度为 0, 两图对应的入射角之差为 0.137° 。计算发现, 当入射角为 6.168° , 只有强度为 100% 的波长为 1762nm 的 S 偏振光的缺陷模, 当入射角为 6.571° , 只有强度为 100% 的波长为 1761nm 的 P 偏振光的缺陷模, 二者入射角相差 0.403° ; 当入射角为 15.054° , 只有强度为 100% 的波长为 1747nm 的 S 偏振光的缺陷模, 当入射角为 15.068° , 只有强度为 100% 的波长为 1744nm 的 P 偏振光的缺陷模, 二者入射角相差 0.014° 。利用缺陷模的这一特点, 也可以测量微小的角度变化。



(a) 入射角为 16.663°



(b) 入射角为 16.800°

图7 入射角为 16.663° 和 16.800° 时的透射谱

5 结 语

本文提出了用一维缺陷光子晶体测量角度的方法。用特征矩阵方法研究了由 Si 薄膜和 SiO_2 薄膜组成的有缺陷层的一维光子晶体禁带中的缺陷模的波长和强度随入射角缓慢变化而变化的规律, 基于这一变化规律提出了根据缺陷模的波长、强度、偏振性与入射角的关系进行角度测量的方法。本设计对于将光子晶体应用到与角度变化相关的测量控制领域, 进一步扩大光子晶体的使用范围具有重要意义。

参考文献:

[1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics electronics [J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58 (20): 2095 - 2061.

[2] John S Strong. Localization of photons in certain disordered dielectric super-lattices [J]. Phys. Rev. Lett., 1987, 58 (23): 2486 - 2489.

[3] Gu Pei-fu, Li Yi-yu, Li Ming-yu, et al. Band structure and light propagation in photonic crystals [J]. Acta Optical Instruments Sin, 2005, 27(3): 55 - 59. (in Chinese)

[4] Ouyang Zhengbiao, Liu Haishan, Li Jingzhen. Photonic crystal super narrow optical filters [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(2): 281 - 284. (in Chinese)

[5] Fang Yun-tuan, Shen Ting-gen, Tan Xi-lin. Study on one-dimensional photonic crystal with impurity defects [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(11): 1557 - 1560. (in Chinese)

[6] Shen Ting-gen, Fang Ming-yang, Fang Yun-tuan, et al. Research of photon crystals in the condition nanometer defects [J]. Laser & Infrared, 2004, 34(6): 470 - 474. (in Chinese)

[7] Li Ye, Kong Fan-min, Li Kang, et al. Analysis of the transmission property of one-dimensional metallo-dielectric photonic crystals [J]. Acta Optical Technique Sinica, 2008, 34(1): 65 - 67. (in Chinese)

[8] Zhang Le-xin, Zhang Ran, Li Zhi-quan. Theoretical study of reflecton properties and fabricating of one dimension porous silicon photonic crystals [J]. Acta Optical Technique Sinica, 2007, 33(4): 584 - 590. (in Chinese)

[9] Tong Kai, Cui Wei-wei, Wang Mei-ting, et al. Temperature measurement with one dimensional defect photonic crystal [J]. Acta Opt Sin, 2008, 57(2): 762 - 766. (in Chinese)

[10] Xu Zhen-yu, Gong Yi-ling, Zhang Ruo-jing. Principles of photonic crystal strain gauge [J]. Acta Quarterly Mechanics Sin, 2005, 26(2): 231 - 234. (in Chinese)

[11] Xu Zhen-yu, Zhang Ruo-jing, Gong Yi-ling. The principles of pressure sensors based on photonic crystal [J]. Acta Phys Sin, 2004, 53(3): 724 - 727. (in Chinese)

[12] Wang Hui, Li Yong-ping. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals [J]. Acta Phys Sin, 2001, 50(11): 2172 - 2178. (in Chinese)

[13] Gu Guo-chang, Li Hong-qiang, Chen Hong-tao, et al. Properties of light propagation in 1-D periodic dielectric structure [J]. Acta Opt Sin, 2000, 20(6): 728 - 734. (in Chinese)