

# 金属插层对一维光子晶体中光传输特性的影响

周 鹏 游海洋 王松有<sup>†</sup> 李合印 杨月梅 陈良尧

(复旦大学先进光子学材料与器件国家重点实验室 光科学与工程系, 上海 200433)

(2002 年 1 月 20 日收到 2002 年 3 月 4 日收到修改稿)

利用传输矩阵方法,从理论上研究了金属插层对由 Si/SiO<sub>2</sub> 组成的一维光子晶体中光传输特性的影响.结果表明:由 (Si/SiO<sub>2</sub>)<sub>n</sub> 组成的一维光子晶体,考虑到材料的实际吸收及折射率随波长发生变化的情况,当  $n \geq 9$  时,该体系出现全反射带(光子带隙).在 (Si/SiO<sub>2</sub>)<sub>n</sub> 光子晶体中的 SiO<sub>2</sub> 层的中间插入金属银层,构成 (Si/SiO<sub>2</sub>/Ag/SiO<sub>2</sub>)<sub>n</sub> 金属型一维光子晶体,光子带隙的宽度明显加宽,且在该带隙中 s 光和 p 光在 0—60° 入射角下均具有较低损耗.利用这一特性,可以制作出宽带反射镜.

关键词:光子晶体,金属层,传输矩阵

PACC: 4270Q, 7865

## 1. 引 言

光子晶体是一种折射率按一定周期发生变化的人工微结构材料,光在这类材料中传播时具有类似于电子在半导体材料中运动的某些行为,如光的频率在一定范围内不能在光子晶体中传播,即存在光子禁带结构.光子晶体的这种特性具有广泛的应用前景,尤其是在光通信领域中,可以制作反射镜、滤波片及激光器的谐振腔等,因此引起了人们的极大的兴趣.利用光子晶体制作的反射镜其反射率几乎是 100%,但这种介电结构组成的光子晶体的全反射带的宽度有限,通常为中心波长的 25%,利用在介质型光子晶体中插入金属层组成“金属型”光子晶体,可以明显的增加禁带的宽度<sup>[1-4]</sup>,以往的研究大都集中在微波、毫米波和远红外波段<sup>[1,5,6]</sup>,在此波长间隔里,金属材料几乎没有吸收,可以制作优良的反射镜.利用金属型光子晶体制作的反射镜具有许多优点,如尺寸小,重量轻,宜于制备,成本较低等.

对于光子晶体的理论计算方法,比较成熟的有平面波法<sup>[7,9,10]</sup>和传输矩阵法等<sup>[8,11]</sup>.对于一维光子晶体,传输矩阵法具有计算简单,结果与实际相符等优点,因此被广泛采用.本文旨在利用传输矩阵方

法,考虑到材料的介电常数随波长变化和吸收情况,从理论上研究由 Si 和 SiO<sub>2</sub> 组成的一维光子晶体和在 SiO<sub>2</sub> 层中插入金属层情况下光的传播特性.

## 2. 一维光子晶体带隙结构的理论分析方法

由两种折射率相差较大的介电材料交替排列组成的一维光子晶体,若组成光子晶体的结构中有金属材料,则这种光子晶体称为金属型光子晶体.对应的复介电常数和厚度分别为  $(n_a, a)$ 、 $(n_b, b)$  和  $(n_c, c)$ ,光从左向右以一定角度入射,结构如图 1 所示.

光在一维光子晶体中的传播可以用 Maxwell 方程及相应的边界条件决定.根据传输矩阵方法, s 光和 p 光的传输矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} \cos\beta & \frac{-i}{q} \sin\beta \\ -iq \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix}. \quad (1)$$

对 s 光  $q = n \cos\theta$ , 对 p 光  $q = n / \cos\theta$ ,  $\beta = 2\pi n d \times \cos\theta / \lambda$ ,  $\theta$  和  $\lambda$  分别为入射角和光在入射介质中的波长.

对于由  $N$  个界面组成的一维光子晶体,其总的特征矩阵为

$$M = (M_j)^N, \quad (2)$$

<sup>†</sup> 通讯联系人: songyouwang@fudan.edu.cn

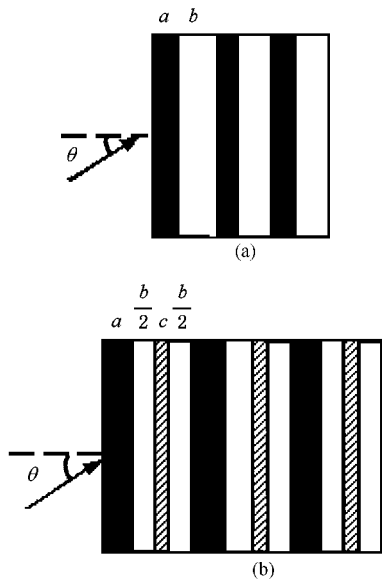


图 1 一维周期性光子晶体结构图(  $a$  为 Si,  $b$  为  $\text{SiO}_2$ ,  $c$  为金属插层)

因此,反射系数和透射系数分别为

$$r_{p,s} = \frac{(M_{11} + q_{l,p,s} M_{12})q_{i,p,s} - (M_{21} + q_{l,p,s} M_{22})}{(M_{11} + q_{l,p,s} M_{12})q_{i,p,s} + (M_{21} + q_{l,p,s} M_{22})} \quad (3)$$

$$t_{p,s} = \frac{2q_{l,p,s}}{(M_{11} + q_{l,p,s} M_{12})q_{i,p,s} + (M_{21} + q_{l,p,s} M_{22})} \quad (4)$$

式中  $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{21}$ ,  $M_{22}$  为多层膜组成的光子晶体的特征矩阵中的矩阵元.

$$q_{i,t_s} = n_{i,t_s} \cos\theta_{i,t}, \quad q_{i,t_p} = n_{i,t_p} / \cos\theta_{i,t}.$$

相应的反射率和透射率分别为

$$R_{p,s} = |r_{p,s}|^2, \quad (5)$$

$$T_{p,s} = |t_{p,s}|^2. \quad (6)$$

因此吸收率可以根据反射率和透射率求得

$$A_{p,s} = 1 - R_{p,s} - T_{p,s}. \quad (7)$$

而对于金属型光子晶体,如图 1(b)所示,由于金属存在有吸收,因此其折射率采用复数形式表示,则上述公式仍成立.

### 3. 光在实际介电材料和金属插层组成的一维光子晶体中的传输特性

在理论计算光子能带结构时,一般考虑材料介电常数为实数或常数.对于二维光子晶体考虑到介电常数随波长变化已经有过报道<sup>[9,10]</sup>.而以前对一

维光子晶体的理论研究中,为了计算的方便,对材料的介电常数通常仅取为常数<sup>[11,12]</sup>,但由于材料实际存在色散效应,因此真实材料的折射率是随波长变化的,并且存在吸收.本文采用 Si 和  $\text{SiO}_2$  及 Ag 材料,考虑到它们介电常数随波长的变化及材料的吸收情况,详细研究了由 Si/ $\text{SiO}_2$  组成的一维光子晶体的透射特性以及在  $\text{SiO}_2$  层中插入金属 Ag 后对透射特性的影响.研究体系的结构分别为  $[\text{Si}(46.26\text{nm})/\text{SiO}_2(120.24\text{nm})]_n$  和  $[\text{Si}(46.26\text{nm})/\text{SiO}_2(60.12\text{nm})/\text{Ag}(x)/\text{SiO}_2(60.12\text{nm})]_n$ .计算时材料的介电常数分别取自文献 [13] 和 [14].

图 2 给出了计算中所采用的材料的折射率和消光系数的曲线.从中可以看出,三者的折射率均随光的波长变化而变化,其中  $\text{SiO}_2$  的折射率变化的较小(对应于图中右边的坐标轴),Si 和 Ag 的折射率随波长变化的较大,在所研究的波段  $\text{SiO}_2$  的消光系数为零, Si 的消光系数除在 500nm 以下波长区域内不为零外,其他也为零,只有 Ag 的消光系数强烈地依赖于波长,因此在研究金属型光子晶体时,必须考虑  $n$  和  $k$  随波长的变化.

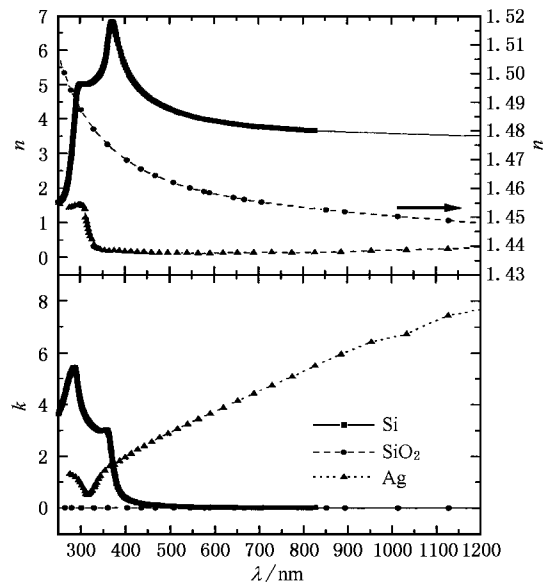


图 2 计算中所用的 Si,  $\text{SiO}_2$  和 Ag 的折射率和消光系数的曲线

对于由  $[\text{Si}(46.26\text{nm})/\text{SiO}_2(120.24\text{nm})]_n$  组成的体系,取参考波长  $\lambda = 700\text{nm}$ ,对应的光学厚度为  $\lambda/4$  波片.计算表明,随着  $n$  的增加,体系的透射率在 560—950nm 的范围内逐渐减小,当  $n \geq 9$  时在该波段内的透射率几乎为零,即出现了严格的光子带隙,图 3 给出了当  $n = 10$  (即 20 层)时的透射曲线.由于 Si 在

该波段内存在有吸收,因此体系对应的反射率并不是 100%,其对应的反射率和吸收率曲线如图 4 所示.

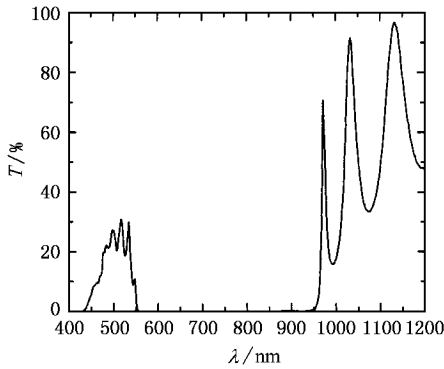


图 3  $n = 10$  时 Si/SiO<sub>2</sub> 光子晶体透射率曲线

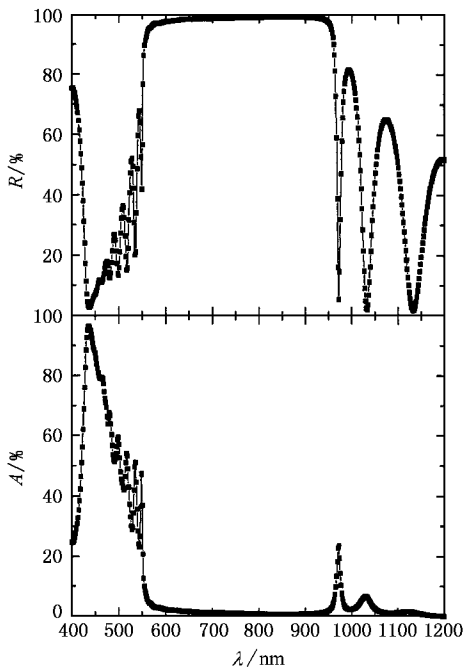


图 4 [ Si/SiO<sub>2</sub> ]<sub>10</sub> 光子晶体的反射率和吸收曲线

在 [ Si/SiO<sub>2</sub> ]<sub>n</sub> 体系内,通过在 SiO<sub>2</sub> 1/4 波片层中加入一定厚度的金属插层,组成金属型光子晶体,其结构为 [ Si/SiO<sub>2</sub>/Ag/SiO<sub>2</sub> ]<sub>n</sub>. 由于金属存在有吸收,因此对于金属型光子晶体其在带隙内的反射率不可能达到 100%,但可以显著的扩展光子带隙的宽度. 计算表明当  $n \geq 2$ , Ag 层的厚度大于 15nm 时,体系就明显地表现出了光子带隙. 随着 Ag 层厚度的增加,带隙的宽度在不断地增加,且截止带的长波带边和短波带边处的透射峰逐渐减小,如图 5 所示. 由于该峰是光波通过金属层时引起的共振隧穿效应而产生的,随着金属层厚度的增加,产生共振的强度逐渐减

小,从而透射峰的幅度减小,峰的位置也随 Ag 层厚度的增加而出现蓝移. 在截止带的短波带边处的透射峰的强度随 Ag 层厚度的增加而减小,但峰的位置没有变化. 当 Ag 层的厚度达到 100nm 时已观察不到该共振峰,波长大于 500nm 的光几乎没有透射波,

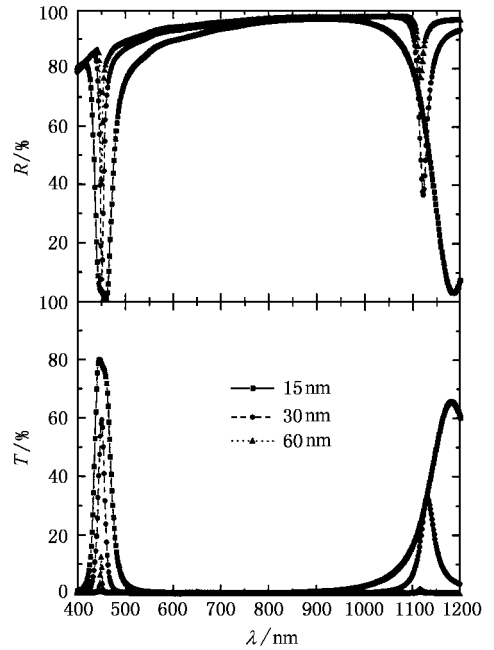


图 5 [ Si/SiO<sub>2</sub>/Ag( x )SiO<sub>2</sub> ]<sub>1</sub> 金属型光子晶体的反射率和透射率随插入层 Ag 厚度变化的曲线

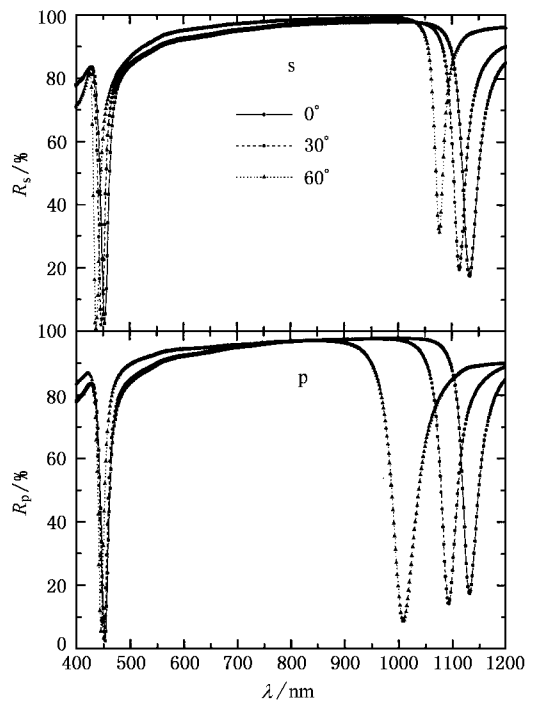


图 6 Ag 层厚度为 30nm 时不同入射角情况下 s 和 p 光的反射率曲线

而反射波的反射率达到 95% 以上,因此,利用此性质可以制作宽带光全反射镜.

另外计算表明,当插入层位于 Si 层时,无论 Ag 层多厚,均不会出现光子带隙.

对于一定厚度的 Ag 层,利用前面的公式,可以研究 s 光和 p 光的反射特性.图 6 是 Ag 层厚度为 30nm 时在不同入射角情况下的 s 光和 p 光的反射率曲线.从图中可以看出,s 光的禁带宽度较 p 光的禁带宽度宽,两者的截止带长波带边随入射角的增加而发生蓝移,短波带边不随入射角的变化而变化,因此截止带的宽度较小,但 s 光和 p 光的共同光子禁带宽度仍大于 400nm.

## 4. 结 论

利用传输矩阵方法,研究了由 Si, SiO<sub>2</sub> 和 Ag 介

电材料组成的一维光子晶体及金属型光子晶体中光波的传播特性.结果表明由 [ Si/SiO<sub>2</sub> ]<sub>n</sub> 组成的一维光子晶体当 n 大于等于 9 时表现出光子晶体的特征,对于在 SiO<sub>2</sub> 1/4 波片层中间插入金属 Ag 层组成 [ Si/SiO<sub>2</sub>/Ag/SiO<sub>2</sub> ]<sub>n</sub> 结构的一维金属型光子晶体,当 n = 2 时出现光子晶体的禁带,其光子禁带的宽度较 [ Si/SiO<sub>2</sub> ]<sub>n</sub> 光子晶体的禁带宽度宽.随着 Ag 层厚度的增加,禁带宽度逐渐变宽,长波带边处由于 Ag 层的共振隧穿而引起的透射峰逐渐降低,在厚度大于 100nm 时,共振峰消失.对 30nm 厚度的 Ag 层,s 和 p 光的反射特性表明,两者的传播特性虽略有不同,但具有 400nm 宽的共同的截止带,因此利用金属型光子晶体的特性可以制作宽带全方向反射镜.

- [ 1 ] Ozbay E, Temelkuran B, Sigalas M, Tuttle G *et al* 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 3797
- [ 2 ] Pendry J, Holden A, Stewart W and Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [ 3 ] Sievenpiper D, Sickmiller M and Yablonovitch E 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 2480
- [ 4 ] Yong-Hong Ye, Georges Bader and Vo-Van Truong 2000 *Appl. Phys. Lett.* **7** 235
- [ 5 ] Brown E R and Memahon O B 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 2138
- [ 6 ] Sigalas M M, Chan C T, Ho K M and Soukoulis C M 1995 *Phys. Rev. B* **52** 11744
- [ 7 ] Ho K M, Chan C T, Soukoulis C M 1990 *Phys. Rev. Lett.* **65** 3152
- [ 8 ] Pendry J B, Mackinnon A 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 2772
- [ 9 ] Zhang W Y, Hu A, Lei X Y, Xu N and Ming N B 1996 *Phys. Rev. B* **54** 10280
- [ 10 ] Zhang W Y, Hu A and Ming N B 1997 *J. Phys.:Condens. Matter.* **9** 541
- [ 11 ] Wang H and Li Y P 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2172 [ in Chinese ] 王辉、李永平 2001 物理学报 **50** 2172 ]
- [ 12 ] Chen K M, Spark A W, Luan Hsin-chiao, Lim D R, Wada K and Kimerling L C 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 3805
- [ 13 ] Palik E D 1985 *Handbook of Optical Constant of Solids* ( London: Academic Press Inc. Ltd ) p350
- [ 14 ] Deng S H, Wang S Y, Li J, Liu Z, Chen Y L, Yang Y M, Chen L Y, Liu H, Zhang X X and Lynch D 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 169 [ in Chinese ] 邓世虎、王松有、李晶、刘铸、陈岳立、杨月梅、陈良尧、刘辉、张西祥、David Lynch 2001 物理学报 **50** 169 ]

# Effect of the inserted metal layer on the characteristic of light transmission of one-dimensional photonic crystals

Zhou Peng You Hai-Yang Wang Song-You<sup>†</sup> Li He-Yin Yang Yue-Mei Chen Liang-Yao

(*State Key Laboratory for Advanced Photonics Materials and Devices ,Department of Optical Science and Engineering ,  
Fudan University , Shanghai 200433 , China*)

( Received 20 January 2002 ; revised manuscript received 4 March 2002 )

## Abstract

The transmission of light wave through one-dimensional metallodielectric photonic crystals was simulated by the transfer matrix method. The metallodielectric photonic crystal was constructed by inserting metal Ag layers into Si/SiO<sub>2</sub> quarter-wave multilayers. The simulation results of the ( Si/SiO<sub>2</sub> )<sub>n</sub> system show that the photonic band gap appears at  $n \geq 9$ . By inserting metal Ag layers into the SiO<sub>2</sub> quarter-wave layers, a new metallodielectric photonic crystal ( Si/SiO<sub>2</sub>/Ag/SiO<sub>2</sub> )<sub>n</sub> can be made, the new structure shows a wider band gap than that in the structure of [ Si/SiO<sub>2</sub> ]<sub>n</sub>. Its reflectance spectra over an incident angle range of 0—60° show a 400nm wide low-loss omnidirectional high reflection band for both s and p polarized light. The characteristics of the structures may be used as a low-loss omnidirectional reflector.

**Keywords** : photonic crystals , metal layer , transfer matrix method

**PACC** : 4270Q , 7865

<sup>†</sup>Email : songyouwang@fudan.edu.cn