

一维 Au/MgF₂ 光子晶体的透射性质*

刘佳誉 王永昌

(西安交通大学理学院现代物理研究所, 西安 710049)

摘要 理论上研究了一维金属/电介质光子晶体的透射率性质, 用传输矩阵方法数值计算了 Au/MgF₂ 光子带隙晶体的透射率. 发现周期性结构产生的透射共振会大幅度增加光通过层状金属的透射率. 通过调节一维 Au/MgF₂ 光子晶体中金和氟化镁的厚度以及周期数, 得到了可见波段的高透射允带, 透射率在 0.4 以上, 而对于可见波段以外的频率几乎是完全不能传输的. 这种结构在保持了高透射率的前提下还具有金属的优点, 这在传感器、护目装置、反射窗、液晶显示等诸多领域都有很大的实用价值.

关键词 金属/电介质光子晶体; 传输矩阵方法; 透射共振

中图分类号 O734 **文献标识码** A

0 引言

近年来, 人们对光子晶体的研究方兴未艾, 光子晶体技术开始应用于电子设备和光子设备中^[1,2]. 考虑到了电介质的低吸收特性, 所以传统的光子晶体是由两层折射率不相同的电介质交替排列组成. 一般来说, 金属在可见光范围内的反射率都比较高, 尤其是 Al 和 Ag, 只要厚度比趋肤深度厚一些, 就会大幅度地反射光波, 好像一层金属的屏蔽罩. 所以, 现有的加入了金属插层的光子晶体(金属/电介质光子晶体)大多应用于增加光子晶体在可见波段的反射性质. 最近 Ward 等人通过使用光子晶体结构提出一种增强块状金属反射能力的方法, 他们预测含有 Al/玻璃层的一维金属/电介质光子晶体比块状 Al 的反射能力更强^[3]. 还有一些人把研究的重点放在如何加深加宽光子晶体的禁带上, 在光子晶体中合适位置加入金属层会使得电场重新分布, 进而出现需要的宽禁带^[4-7]. Ye Yong-Hong 等人在一维 ZnS/MgF₂ 光子晶体中加入了 Ag 层得到了在可见波段的很宽低损禁带, 达到了每晶格 10 dB^[8]. 还有一些金属/电介质光子晶体可以对某些晶体(例如 BaF₂) 的闪烁光谱进行修饰, 使得其对慢衰减成分的相对抑制比大大提升^[9]. 而本文把研究重点放在了一维周期金属/电介质光子晶体的透射性质上. 通过选择 Au/MgF₂ 光子晶体的金属层和电介质层厚度以及周期数, 来实现可见波段出现较强的透射区域, 而其他波段的光几乎完全不能传输. 这种结构可以应用于传感器、护目装置、热反射窗、紫外隔离片、激光安全玻璃、光生二极管的透射电

极、液晶显示等等. 尤其是在透明导体显示领域, 标准的透明导体材料为 ITO, 其光学透射率达到了 80%, 然而电阻率却比金属高出了 3 个数量级. 尽管金属/电介质光子晶体中的金属层较厚, 它的透射率和电阻率的比值仍然比 ITO 高出了 2 个数量级^[10,11].

1 Au/MgF₂ 光子晶体的透射性质

1.1 传输矩阵模型

光波正入射到一个带金属插层的多层介质上, 不含时的麦克斯韦方程给出电磁场分布^[12]

$$\frac{\partial E(z)}{\partial z} = \frac{i\omega\mu(z)}{c} H(z)$$

$$\frac{\partial H(z)}{\partial z} = \frac{i\omega\epsilon(z)}{c} E(z)$$

式中, E 表示电场的 x 分量, H 表示磁场的 y 分量, c 是光在介质中的速率, 合并方程, 并且对于非磁性介质 $\mu(z) = 1$, 有

$$\frac{\partial^2 E(z)}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(z) E(z) = 0$$

其解为

$$E_n(z) = A_n \exp [ik(z - z_0)] + B_n \exp [-ik(z - z_0)]$$

考虑这样一个系统, 如图 1. 三层介质的介电常量均不相同, 分别为 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$. 阴影部分为金属层, 其厚度为 b ; 左侧为电介质, 其厚度为 a .

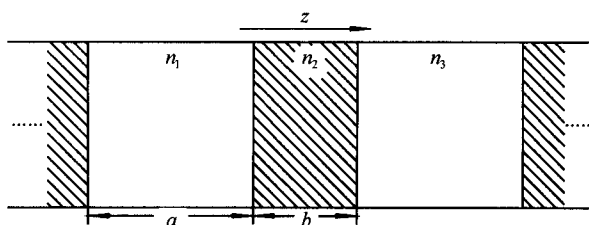


图1 传输矩阵模型

Fig. 1 Schematic representation of matrix transfer mode

*国家自然科学基金(No. 60277003)资助项目
Tel: 029-82673913 Email: lju_ubi@yahoo.com.cn
收稿日期: 2005-05-19

利用边界上电场及其一阶导数的连续条件, 可以求解出如下关系

$$\begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} A_3 \\ B_3 \end{pmatrix}$$

其中 M 是一个 2×2 矩阵, 其各个元素为

$$M = \begin{bmatrix} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{k_3}{k_1} \right) \cos(k_2 b) - \frac{i}{2} \left(\frac{k_3}{k_2} + \frac{k_2}{k_1} \right) \sin(k_2 b) \right] \exp(-ik_1 a) & \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_3}{k_1} \right) \cos(k_2 b) + \frac{i}{2} \left(\frac{k_3}{k_2} - \frac{k_2}{k_1} \right) \sin(k_2 b) \right] \exp(-ik_1 a) \\ \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_3}{k_1} \right) \cos(k_2 b) - \frac{i}{2} \left(\frac{k_3}{k_2} - \frac{k_2}{k_1} \right) \sin(k_2 b) \right] \exp(+ik_1 a) & \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{k_3}{k_1} \right) \cos(k_2 b) + \frac{i}{2} \left(\frac{k_3}{k_2} + \frac{k_2}{k_1} \right) \sin(k_2 b) \right] \exp(+ik_1 a) \end{bmatrix}$$

这里, k_1, k_2, k_3 分别是三种介质中的波矢. 由这样 N 个单元组成的样品传输矩阵为

$$M(N) = M_1 \cdot M_2 \cdots M_{N-1} \cdot M_N$$

则很容易得到

反射系数为

$$R = |r|^2 = \left| \frac{M(N)_{21}}{M(N)_{11}} \right|^2$$

透射系数为

$$T = |t|^2 = \left| \frac{1}{M(N)_{11}} \right|^2$$

这就是传输矩阵的基本思想.

1.2 层状结构对透射率的影响

对于单层的块状金属来说, 光波在金属中传播到深度为趋肤深度时, 场强已经减小为入射时的 $1/e$. 这里考虑的波长范围是 $200 \text{ nm} \sim 1200 \text{ nm}$, 这个区间内趋肤深度很小, 也就是说光波通过金属的透射率很小, 见图 2. 图 2 给出了透射率的对数随着波长的变化关系, 圆圈虚线、圆圈实线、圆圈点线分别代表厚度为 80 nm 、 100 nm 、 120 nm 的块状 Au 情况, Au 的两侧都是折射率为 1.5 的衬底. 可见单层 Au 的透射率都在 1% 之下, 并且随着 Au 厚度的增加迅速下降. 如果把块状结构改为层状结构的话, 透射率将会大大提升.

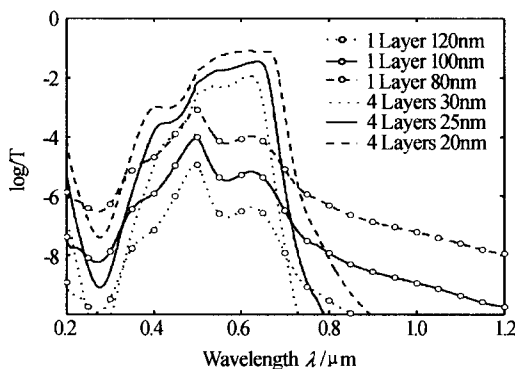


图 2 不同厚度 Au 的透射率对数随波长变化关系
Fig. 2 The logarithm of the transmission vs. wavelength in bulk Au and 4 layers Au

同样还是考虑总厚度为 80 nm 、 100 nm 、 120 nm 的 Au, 这时分别把它们等分成四层, 也就是单层厚

度分别变为 20 nm 、 25 nm 、 30 nm , 每两层中间用厚度为 110 nm 的衬底隔开, 这个时候的透射率对数分别由图 2 中的虚线、实线、点线给出. 可以看出在 $400 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$ 区域, 层状结构使得结构的透射率增强 $2 \sim 3$ 个数量级, 而在另外某些频率段, 透射率比块状 Au 下降一些. 也就是说在 $400 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$ 区域出现了明显的允带结构, 并且允带的边界变得陡峭了. 允带中透射率上升, 而允带之外区域透射率下降, 这正是实际需要的, 如何增强允带透射率并且使允带移动到可见波长范围内就成为了目前需要解决的问题.

只考虑总厚度为 120 nm 的 Au 层. 图 3 中点线、实线、虚线分别代表了单层(块状 Au)、4 层(每层厚度 30 nm)和 12 层(每层厚度 10 nm), 中间由 110 nm 厚的衬底隔开情况下透射率随着波长的变化关系. 可以看出, 虽然总厚度已经变为了趋肤深度的数倍, 然而使用了层状结构后, 透射率仍然可以达到可观的 40% . 图 3 中透射谱随着层数的增加, 峰值位置向着长波方向移动. 在红外及更低频率区域, 由于折射率的虚部开始迅速增加, 透射率下降很快. 在紫外及更高频率区域, 由于带间跃迁的开始, 折射率也会开始迅速下降. 可以清楚地看到除了允带, 其他波长范围的透射率都很小.

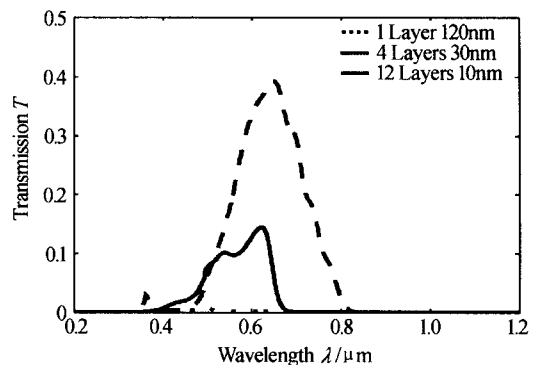


图 3 不同层数下透射率随波长的变化. 三种情况下 Au 层的总厚度均为 120 nm
Fig. 3 The transmission vs. wavelength at different periods of Au (total thickness is 120 nm)

以上发现透射共振会有效地增加透射率, 并且

限制吸收. 然而对于每层金属厚度固定的样品来说, 并不是层数越多越好, 过多的层数会使得金属的总厚度增加, 透射率下降得比较明显, 因此需要选择合适的层数和厚度以达到需求.

1.3 Au/MgF₂ 光子晶体

这里选取的金属/电介质光子晶体是由 Au 和 MgF₂ 玻璃交替排列组成的. 整个系统放置于折射率为 1.5 的衬底玻璃上, 衬底的折射率在很大的频率范围内可以认为是不变的. 图 4 绘出了系统示意图, 为 3.5 个周期的 Au/MgF₂ 光子晶体. 计算中使用的是经典的传输矩阵方法^[12], Au 的折射率使用的是文献[13]中的测量值, MgF₂ 的折射率使用的是文献[14]中的拟合公式.

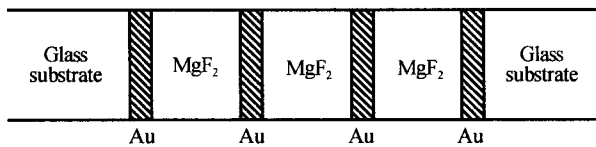


图 4 3.5 层 Au/MgF₂ 光子晶体结构
Fig. 4 Schematic representation of 3.5 periods Au/MgF₂ photonic crystal

图 5 给出了 2.5 周期的 Au(15 nm)/ MgF₂ 样品透射率随着波长的变化关系. 点线、实线、虚线分别代表 MgF₂ 的厚度为 240 nm、200 nm 和 160 nm. 虽然加入了 3 层金属, 然而透射率最大处仍有 70% 以上, 并且出现了明显的允带. 可以看出不同厚度 MgF₂ 的样品透射率并没有太大差异, 只是 160 nm 厚 MgF₂ 的样品相对于 240 nm 厚 MgF₂ 的样品来说允带位置向着短波方向移动了, 并且允带的形状没有 240 nm 那么尖锐, 变得更宽, 顶部也相对比较平缓.

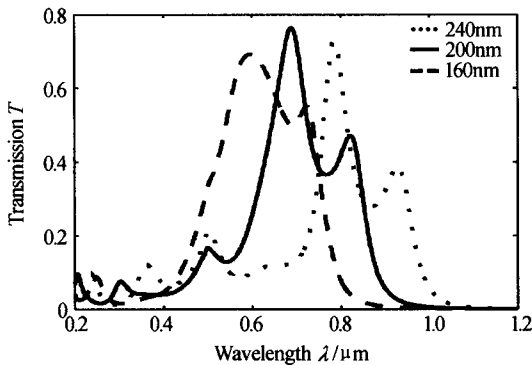


图 5 2.5 周期的 Au(15 nm)/ MgF₂ 样品在不同 MgF₂ 厚度下的透射率随波长的变化关系

Fig. 5 The transmission vs. wavelength of 2.5 periods Au(15 nm)/MgF₂ photonic crystal at different thickness of MgF₂

图 6 给出了 2.5 周期的 Au/ MgF₂(160 nm) 样品透射率随着波长的变化关系. 虚线、实线、点线分别代表 Au 层厚度为 15 nm、20 nm 和 25 nm. 可以

发现, 增加每层 Au 的厚度会使得允带宽度变窄, 同时透射率也会相应地降低. 因此可以通过改变金属层的厚度来调谐允带宽度. 这样, 通过选择合适的 Au 和 MgF₂ 的厚度, 可以让允带恰好处于可见光波的范围, 即 400 nm ~ 760 nm.

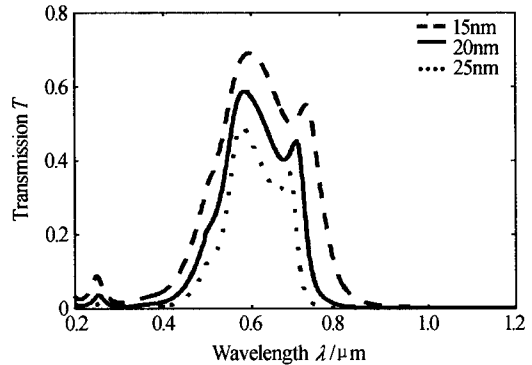


图 6 2.5 周期的 Au/ MgF₂(160 nm) 样品在不同 Au 层厚度下的透射率随波长的变化关系

Fig. 6 The transmission vs. wavelength of 2.5 periods Au/MgF₂(160 nm) photonic crystal at different thickness of Au

选择 2.5 周期的 Au(20 nm)/ MgF₂(160 nm) 样品, 可以看出在可见波段出现了高透射允带. 在这个结构基础上增加周期数, 如图 7. 虚线、实线、点线分别代表周期数为 2.5 nm、4.5 nm 和 6.5 nm 的 Au(20 nm)/ MgF₂(160 nm) 样品. 可见周期数决定了允带上面峰的数量, 周期数的增加使得金属总厚度增加、透射率随之而减少, 还可以使得允带边界变得陡峭, 允带顶部趋于平缓. 因此选择合适的周期数可以调谐允带的陡度等.

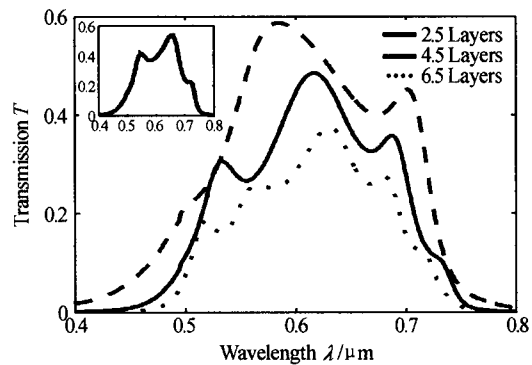


图 7 不同周期数下 Au(20 nm)/ MgF₂(160 nm) 样品透射率随波长的变化关系

Fig. 7 The transmission vs. wavelength of Au(20 nm)/ MgF₂(160 nm) photonic crystal at different periods number

图 7 中的插图为 3.5 周期 Au(20 nm)/MgF₂(160 nm) 样品, 观察从 3.5 周期样品到 4.5 周期样品的变化时发现, 整个系统的透射率并没有因此而明显减弱, 只是带边变得更加陡峭; 然而对于单层 Au 片, 增加 20 nm 厚的 Au 将会使得透射率减少一

个数量级. 对于3.5周期的Au(20 nm)/MgF₂(160 nm)样品,在660 nm处,光子晶体透射率高达53%,而单层的Au片只有不到1%,这与之前的讨论一致.在250 nm附近有一个微弱的峰,可以通过掺入其他金属来使这个峰消失.在频率更高的波段,由于发生了带间跃迁,实际上透射率已经十分接近零;在波长高于790 nm的波段透射率微乎其微.这样,就得到了可见波段的高透射金属/电介质光子晶体,尽管这个系统中Au的总厚度已经5倍于Au的趋肤深度.这个高透射允带的中心波长、宽度、陡度都是可以调谐的,一般决定于金属电介质层的厚度以及周期数.而且这个系统在保持了高透射的前提下还具有金属其它的优点,例如良好的导电性能,这在实际应用中相当有意义.

2 结论

本文使用经典的传输矩阵方法计算了一维周期性Au/MgF₂光子晶体的透射率.发现周期性结构产生的透射共振使得光通过金属层的透射率大大增强,并有效抑制了吸收.通过控制金属层和电介质的厚度以及周期数,可以调节透射区域的波长范围、宽度和陡度.计算发现,3.5周期的Au(20 nm)/MgF₂(160 nm)样品(Au层总厚度已达80 nm),在可见波段的透射率可达40%以上,符合实际需求.对于红外区域,这个结构表现为一个良好的金属反射体.对于紫外区域,由于带间跃迁的发生,这个结构能够有效地阻碍光波的传播.基于金属/电介质光子晶体在可见波段的这种奇特的透射性质可以制备一些新型的光子器件.

参考文献

- 1 欧阳征标,刘海山,李景镇.光子晶体超窄带滤波器.光子学报,2002,31(3):281~284
Ouyang Z B, Liu H S, Li J Z. *Acta Photonica Sinica*, 2002,31(3):281~284
- 2 汤亮,袁长胜,陈延峰,等.连续渐变周期的一维光子带隙结构全能反射器.光子学报,2004,33(5):573~576
Tang L, Yuan C S, Chen Y F, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(5):573~576
- 3 Ward A J, Pendry J B, Stewart W J. Photonic dispersion surfaces. *J Phys : Condens Matter*, 1995,7(10):2217~2224
- 4 Brown E R, McMahon O B. Large electromagnetic stop bands in metallodielectric photonic crystals. *Appl Phys Lett*, 1995,67(15):2138~2140
- 5 Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, *et al.* Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. *Phys Rev Lett*, 1996,76(25):4773~4776
- 6 Sievenpiper D F, Sickmiller M E, Yablonovitch E. 3D Wire mesh photonic crystals. *Phys Rev Lett*, 1996,76(14):2480~2483
- 7 Ozbay E, Temelkuran B, Sigalas M, *et al.* Defect structures in metallic photonic crystals. *Appl Phys Lett*, 1996,69(25):3797~3799
- 8 Ye Yonghong, Bader G, Truong Vo Van. Low-loss one-dimensional metallodielectric photonic crystals fabricated by metallic insertions in a multilayer dielectric structure. *Appl Phys Lett*, 2000,77(2):235~237
- 9 吴永刚,林小燕,顾春时,等.一维金属/介质光子晶体用于BaF₂晶体闪烁光谱修饰.光子学报,2005,34(1):94~97
Wu Y G, Lin X Y, Gu C S, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005,34(1):94~97
- 10 Scalora M, Bloemer M J, Pethel A S, *et al.* Transparent, metallo-dielectric, one-dimensional, photonic band-gap structures. *J of Appl Phys*, 1998,83(5):2377~2383
- 11 Bloemer M J, Scalora M. Transmissive properties of Ag/MgF₂ photonic band gaps. *Appl Phys Lett*, 1998,72(14):1676~1678
- 12 Jiang Xunya, Soukoulis C M. Transmission and reflection studies of periodic and random systems with gain. *Phys Rev B*, 1999,59(9):6159~6166
- 13 Palik E D. Handbook of Optical Constants of Solids, Vols. I and II. New York: Academic, 1985 and 1991. 286~295
- 14 Gray D E. American Institute of Physics Handbook. New York: McGraw-Hill, 1963. 6-35~6-58

Transmission Properties of One-dimensional Au/MgF₂ Metallodielectric Photonic Crystals

Liu Jiayu, Wang Yongchang

Institute of Modern Physics, Science College, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Received date: 2005-05-19

Abstract The transmission properties of one-dimensional metallodielectric photonic crystals are studied theoretically. The matrix transfer method is used to numerically simulate the transmission through the structure. The result shows that transmission resonances can increase the transmission dramatically and reduce the absorption in a certain extent. By selecting the thickness of Au and MgF₂ layers and the periods number properly, a pass band whose transmission is above 0.4 in the visible range is obtained and light can hardly pass the structure in other frequency ranges. The structure has high transmission and metal's advantages, so it can be used in many fields as sensor, eye protection devices, heat reflecting windows and liquid crystal displays.

Keywords Metallodielectric photonic crystal; Matrix transfer method; Transmission resonance



Liu Jiayu was born in 1982, in Liaoning, China. He received the Bachelor's degree in applied physics from Xi'an Jiaotong University in 2003. Now he is a master candidate in condensed matter physics. His research focuses on photonics and technology.