

一维金属-介质光子晶体光谱特性研究

赵大鹏, 时家明, 刘必臻, 汪家春, 袁忠才, 许波

(解放军电子工程学院安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要:采用干涉矩阵方法对一维金属-介质光子晶体的光谱结构进行了研究。结果表明介质材料的厚度、折射率以及金属材料折射率的虚部对光子晶体光谱的影响可以采用驻波理论较好解释。当金属材料的厚度大于其趋肤深度时,厚度的增加会导致光子晶体的透射率和吸收率均降低,但对光子晶体透射和吸收峰的位置没有影响。

关键词:金属-介质光子晶体;光谱;干涉矩阵

中图分类号: O734

文献标识码: A

Study on the Spectrum of the One-dimensional Metallo-dielectric Photonic Crystal

ZHAO Da-peng, SHI Jia-ming, LIU Bi-liu, WANG Jia-chun, YUAN Zhong-cai, XU Bo

(Key Lab of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: The spectral structure of the one-dimensional metallo-dielectric photonic crystal is studied. The result shows that the theory about stationary wave can be used to properly explain the relationship between the spectral structure and the thickness of the dielectric material, the index of refraction of the dielectric and metallic materials composed photonic crystal. And the thicker of the metallic material deeper than the skin depth will lead to a lower transmittance and absorption, but the thickness do not affect the position of the peak of transmittance and absorption.

Key words: metallo-dielectric photonic crystal; spectrum; interference matrix

1 引言

电磁波在金属中传播时有一个重要特性,就是存在截止现象。当频率低于金属的截止频率时,电磁波就不能在金属中传播。而由金属和介质材料构成的一维金属-介质光子晶体则可以使电磁波在频率低于金属的截止频率时,仍然能够在金属-介质光子晶体中传播,而且金属-介质光子晶体的这种透明特性可以通过调节其各种参数进行控制^[1]。利用这一特性可以很容易的设计出可见光透明、红外和紫外高反的光子晶体^[1-2],用于热反射窗;可以设计出特定的吸收或发射特性,从而用于增强或抑制热辐射^[3-6]。

本文利用干涉矩阵理论系统的研究了电磁波入射角度、一维金属-介质光子晶体组成材料的厚度和折射率与光子晶体反射率、透过率和吸收率的关系,

从而为金属-介质光子晶体的应用提供理论指导。

2 计算原理

设所研究的光子晶体模型如图1所示。图中波长为 λ 的电磁波以角度 θ_0 入射到光子晶体上,在光子晶体材料的左边是折射率为 n_0 的媒质(通常为空气),右边覆于折射率为 n_{k+1} 的基底材料。光子晶体的组成材料周期性排列,如果光子晶体由折射率为 n_H 和 n_L 的两种材料组成,则有:

$$\begin{cases} n_1 = n_3 = n_5 = \cdots = n_k = n_H \\ n_2 = n_4 = n_6 = \cdots = n_{k+1} = n_L \end{cases}$$

基金项目:本项目由“新世纪优秀人才支持计划”资助;安徽省重点实验室基金项目(No. 2007A005005E)资助。

作者简介:赵大鹏(1979-),男,在读博士,主要研究方向为红外系统及功能材料设计。E-mail: zhaodapeng@126.com

收稿日期: 2008-01-25

$$\begin{cases} d_1 = d_k = 0.5d_H \\ d_3 = d_5 = \dots = d_{k-2} = d_H \\ d_2 = d_4 = \dots = d_{k-1} = d_L \end{cases}$$

其中, d_H 和 d_L 分别为两种折射率材料的组成厚度。

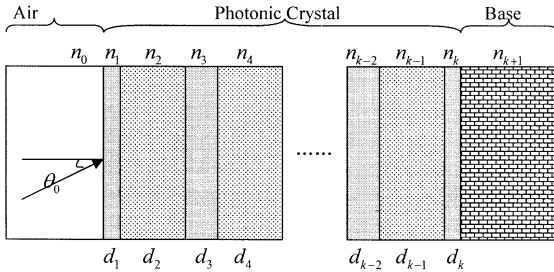


图1 一维光子晶体模型

Fig.1 the model of 1D photonic crystal

图1所示的模型可以用矩阵光学理论进行计算^[7]。根据矩阵光学理论,第 l 层媒质的干涉矩阵可以表示为:

$$M_l = \begin{bmatrix} \cos\delta_l & j \frac{\sin\delta_l}{\eta_l} \\ j\eta_l \sin\delta_l & \cos\delta_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\delta_l = \frac{2\pi}{\lambda} n_l d_l \cos\theta_l$; n_l, d_l 为第 l 层媒质的折射率和厚度;

$\eta_l = \begin{cases} n_l / \cos\theta_l, \text{TM 波} \\ n_l / \cos\theta_l, \text{TE 波} \end{cases}$; θ 为第 l 层媒质中的折射角,它满足 Snell 折射定律,即 $n_l \sin\theta_l = n_{l-1} \sin\theta_{l-1} = \dots = n_0 \sin\theta_0$ 。

光子晶体由第 1 层到第 k 的材料组成,其总的干涉矩阵可以表示为:

$$M = \prod_{l=1}^k M_l \quad (2)$$

如果将干涉矩阵 M 记为:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

则可得反射率 R 为:

$$R = \left| \frac{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} - \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})}{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})} \right|^2 \quad (4)$$

透射率 T 为:

$$T = \frac{4\text{Re}(\eta_{k+1}/\eta_0)}{|m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})|^2} \quad (5)$$

吸收率 A 为:

$$A = 1 - R - T \quad (6)$$

3 结果与分析

根据上述干涉矩阵理论,本文分别计算和研究了不同入射角、不同介质厚度、不同介质材料、不同金属厚度和不同金属材料下,一维金属-介质光子晶体的反射、透射和吸收特性。

3.1 变化电磁波的入射角度

首先我们以二氧化钛和金组成的光子晶体为例,分析电磁波的入射角不同时,光子晶体的带隙结构。这里二氧化钛的折射率取为 2.33,金的折射率取自文献[8],其实部和虚部如图 2 所示。光子晶体的结构如图 1 所示由 $(\text{TiO}_2/\text{Au})^8 \text{TiO}_2$ 组成,其中二氧化钛层的厚度为 240nm(最外两端二氧化钛层的厚度为 120nm),金层的厚度为 30nm。

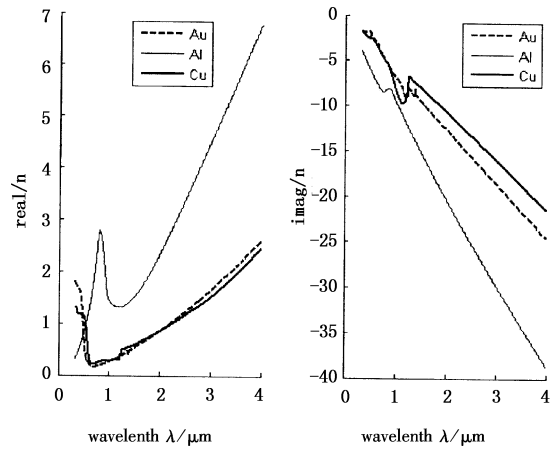


图2 三种金属的折射率

Fig.2 the index of refraction for three kinds of metals

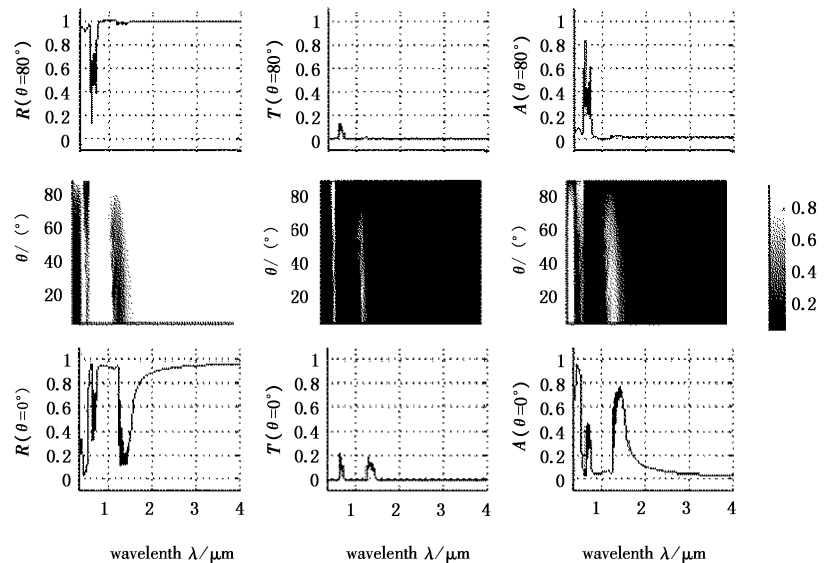


图3 光子晶体的带隙结构

Fig.3 the band gap of the photonic crystal

计算结果如图3所示。图中给出了P极化波在不同角度入射时上述光子晶体的反射率、透射率和吸收率的曲线以及带隙图,从图中可以看到该光子晶体在可见光和近红外波段上出现了透射和高吸收,随着入射角度改变,透射峰和吸收峰向高频方向发生轻微偏移,在近红外波段呈现出比较明显的通带,在更长的波长上呈现出很宽的禁带,这与240nm厚的金片所表现的光谱特征明显不同。正是利用这一点,可以采用光子晶体结构实现对金属光学特性的调制^[2-6]。

金属-介质光子晶体在原本金属高反射的频谱上呈现出透射和高吸收现象,这与多种因素有关,下文就各因素对光子晶体能带特性的影响规律进行计算分析,计算时电磁波均为法向入射。

3.2 变化介质材料厚度和折射率

我们首先考虑介质材料的厚度变化时,金属-介质光子晶体的能带结构。光子晶体结构同上文,二氧化钛层的厚度取120nm,240nm,360nm(最外两端二氧化钛层的厚度为中间层厚度的一半),计算出相应的反射率、透射率和吸收率,结果如图4所示。可以看到介质层的厚度可以调制光子晶体的能带结构,随着介质层厚度的增加,光子晶体的透射和吸收峰向长波方向偏移,峰值逐渐降低。

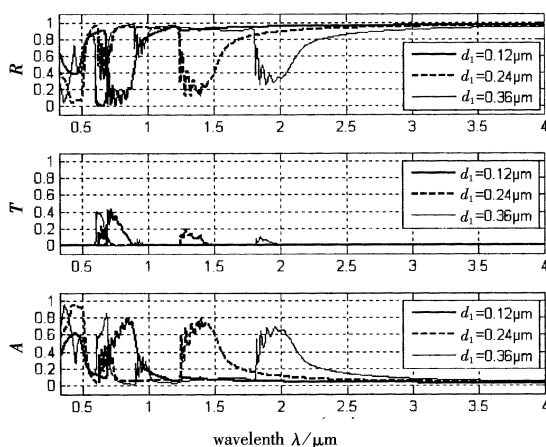


图4 d_1 变化时的能带结构

Fig.4 the band gap when d_1 is changed

一维金属-介质光子晶体的透射和吸收峰可以用驻波理论进行解释。因为频率低于金属的截止频率的电磁波是不能在金属中传播的。所以,在一维金属-介质光子晶体中电磁波只能被限制在介质中,并且只能表现为驻波。换句话说,只有满足驻波条件的电磁波才能存在,才能够在光子晶体中传播。

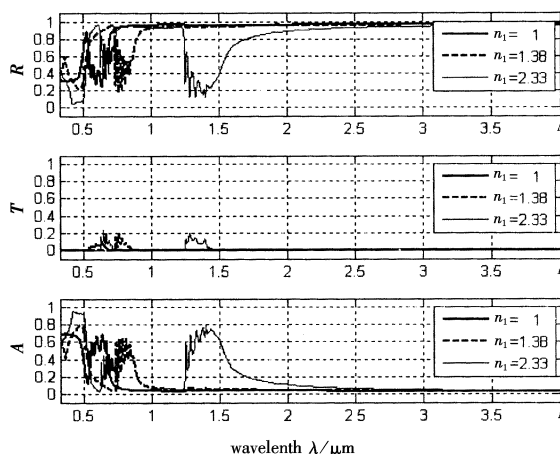


图5 n_1 变化时的能带结构

Fig.5 the band gap when n_1 is changed

对一个两端是相互平行的无限大金属平板,中间夹着介质的腔体而言,考虑趋肤深度以后,电磁波在介质中的驻波波长可以表示为:

$$\lambda = \frac{2}{m} n_1 (d_1 + 2\delta) \quad (7)$$

式中, m 表示驻波的序号; $m=1$ 时得到的是最大驻波波长; n_1 是介质的折射率; d_1 是介质的厚度; δ 是金属的趋肤深度,这里考虑的金属厚度大于金属的趋肤深度; δ 定义为电磁波在金属中的场强衰减为入射时的 $1/e$ 经过的距离,其大小取决于入射波的波长 λ 及对应波长上折射率的虚部 n'_2 ,有:

$$\delta = \frac{\lambda}{4\pi n'_2} \quad (8)$$

将 δ 的表达式代入式(7)即可以得到考虑趋肤深度后的驻波波长表达式:

$$\lambda = \frac{2n_1 d_1}{\left(m - \frac{n_1}{\pi n'_2}\right)} \quad (9)$$

利用式(9)计算得到的驻波波长与图4中所示的透射峰和吸收峰所处的波长位置相同,说明使用驻波理论可以准确的得出透射峰和吸收峰位置。

从式(9)还可以看到,如果改变介质的折射率 n_1 同样会导致光子晶体透射峰和吸收峰的位置发生相应改变,这一点从图5所示的计算结果中可以清楚的看出来,而且透射峰和吸收峰的位置与式(9)计算得到的位置相同。这里计算图5结果时采用的参数除介质折射率发生变化外其余的和图3的相同。

3.3 变化金属材料厚度和折射率

保持介质材料的厚度、折射率以及金属材料的折射率与图3所用参数相同,改变金属材料的厚度得到的光子晶体的能带结构如图6所示。从图中可

以看到,当金属材料的厚度大于其趋肤深度时,厚度越大透射和吸收的峰值越小,透射率和吸收率具有相同的变化规律,也就是说在金属-介质光子晶体中,透射的越多,其吸收的也越多。同时可以看到透射和吸收峰值的位置并没有因为金属材料厚度的改变而发生变化,这一点也可以从式(9)得到解释,式(9)中计算的峰值位置与金属材料的厚度没有任何关系。

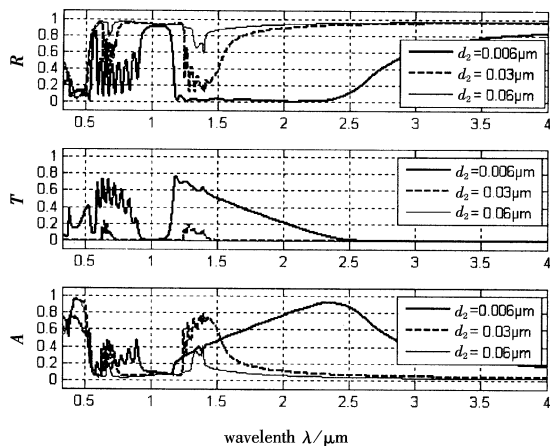


图6 d_2 变化时的能带结构

Fig.6 the band gap when d_2 is changed

不仅如此,式(9)还说明峰值位置与金属材料的实部也没有关系,只与金属材料的虚部有关,虚部越大,峰值位置越向长波方向偏移,而且由于 $\frac{n_1}{\pi n_2}$ 的值变化不大,偏移量会比较小。

为对此有更深入认识,我们选取金、铜和铝三种金属构成光子晶体进行进一步分析。金、铜和铝的折射率如图2所示,其余参数和图3所用参数相同,由此得到的计算结果示于图7。从图中可以看到随着金属材料虚部的增大,峰值位置确实向长波方向发生轻微偏移,而铜和金构成的光子晶体具有很类

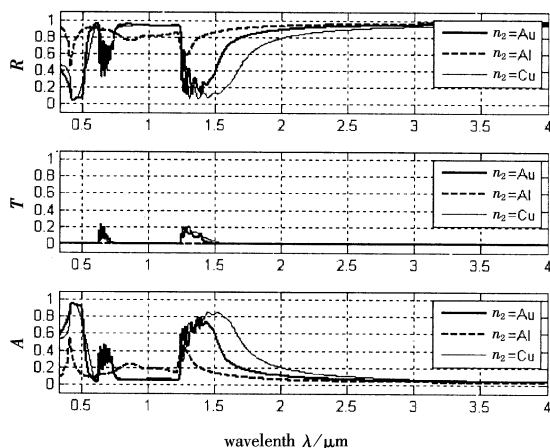


图7 n_2 变化时的能带结构

Fig.7 the band gap when n_2 is changed

似的能带结构,这是因为铜和金的折射率相差不大。同时还可以看到对不同金属而言,在峰值处其透射率和吸收率的大小也不同,这是因为对不同金属而言,在峰值波长处其趋肤深度不同,铜在峰值波长处的趋肤深度为15nm,金的趋肤深度为13nm,铝的趋肤深度为8nm。虽然三种金属的厚度相同,但相对于其各自的趋肤深度而言,它们的厚度增量不同,这使得它们产生了图6所示的效应,厚度增量越大,透射和吸收值越小。

4 结论

本文采用干涉矩阵方法系统的研究了一维金属-介质光子晶体的能带结构与其组成材料的厚度及折射率的关系。结果显示光子晶体在可见光和近红外波段上出现了透射和高吸收,在更长的波长上呈现出很宽的禁带,随着入射角度改变,透射峰和吸收峰向高频方向发生轻微偏移。介质材料的厚度、折射率以及金属材料折射率的虚部对光子晶体能带结构的影响可以采用驻波理论较好解释。金属材料的厚度对光子晶体透射和吸收峰值的位置没有影响,但当金属材料的厚度大于其趋肤深度时,厚度的增加会导致光子晶体的透射率和吸收率均降低。

参考文献:

- [1] M Scalora, M J Bloemer, et al. Transparent, metallo-dielectric, one-dimensional, photonic band-gap structures [J]. journal of applied physics, 1998, 83, (51): 2377 - 2383.
- [2] 高强, 闫敦豹, 袁乃昌, 等. 一维金属-介质光子晶体的特性[J]. 国防科技大学学报. 2005, 27(4): 45 - 47.
- [3] Xi Yong-Gang, Wang Xin, Hu Xin-Hua, et al. Modification of absorption of a bulk material by photonic crystals [J]. Chin. Phys. Lett., 2002, 19 (12): 1819.
- [4] Junfei Yu, Yifeng Shen, Xiaohan Liu, et al. Absorption in one-dimensional metallic-dielectric photonic crystals [J]. J. Phys. : Condens. Matter, 2004, 16: 51 - 56.
- [5] Arvind Narayanaswamy, Gang Chen. Thermal emission control with one-dimensional metallodielectric photonic crystals [J]. Physical Review B, 2004, 70: 125101.
- [6] David L C Chan, Marin Soljačić, J D Joannopoulos. Thermal emission and design in one-dimensional periodic metallic photonic crystal slabs [J]. Physical Review E, 2006, 74: 016609.
- [7] Yan Ji-xiang, Wei Guang-hui. Matrix optics [M]. Beijing: the Publishing House of ordnance industry, 1995, 219 - 229. (in Chinese)
- [8] Palik E D. Handbook of optical constants of Solids [M]. New York: Academic, 1985.