

一维受限反铁磁光子晶体的性质

宋玉玲¹ 王选章^{1,2}

(¹哈尔滨工业大学理学院应用物理系, 黑龙江, 哈尔滨 150001)
(²哈尔滨师范大学物理系, 黑龙江, 哈尔滨 150025)

摘要 采用传输矩阵法计算了一维受限反铁磁光子晶体的带结构和透射比。研究结果表明:除来源于结构周期性的光子带隙外,体系还存在一种频率带隙,与反铁磁材料的共振性质以及受限尺寸有关。适当调节反铁磁各向异性轴的方向和受限尺寸,在反铁磁共振频率处可以出现比大块反铁磁材料的带隙宽约 15 倍的频率带隙。一定条件下,在大块反铁磁材料带隙的频率区间上,一些电磁波模式是在受限光子晶体中传播的。最后分析了几种典型的透射谱,与带结构吻合。

关键词 光子晶体;带结构;传输矩阵;反铁磁材料

中图分类号 O431 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082812.2404

Properties of a One-Dimensional Confined Antiferromagnetic Photonic Crystal

Song Yuling¹ Wang Xuanzhang^{1,2}

(¹Department of Applied Physics, School of Science, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)
(²Department of Physics, Harbin Normal University, Harbin, Heilongjiang 150025, China)

Abstract Band structures and transmittance of a one-dimensional confined antiferromagnetic photonic crystal were calculated by the transfer matrix method. Besides photonic band gaps, the results demonstrate the existence of another type of frequency gaps which principally depends on the antiferromagnetic resonant character and the confined dimension. In the vicinity of the antiferromagnetic resonant frequency, a relatively wider frequency gap can be obtained by properly changing the antiferromagnetic anisotropic-axis orientation and the confined dimension. It is about 15 times wider than that of bulk antiferromagnetic material. On certain conditions, the confined photonic crystal can be transparent in the frequency gap of corresponding bulk antiferromagnetic material for some discrete modes. The typical transmission spectra are presented and agree with the calculated band structures.

Key words photonic crystal; band structure; transfer matrix; antiferromagnetic material

1 引 言

近年来,以磁性介质作为组分元或缺陷的磁性光子晶体由于具有独特的光学和磁光性质,已经受到科学界广泛的关注^[1]。磁性光子晶体的带结构较普通光子晶体的有显著的差别,可以通过改变外加恒磁场^[2]或温度等因素来调节。Vasseur 等^[3]理论

分析了由两种铁磁材料构成的光子晶体的磁学参数对光子带隙的影响,发现当两种介质的磁参量差值越大越容易出现带隙。刘江涛、车明等^[4,5]研究了磁性光子晶体的带隙随磁导率的变化规律,发现体系的带隙宽高比(带隙宽与带隙中心位置频率比)都比同种结构的非磁性光子晶体的大。人们还分析了

收稿日期: 2008-03-21; 收到修改稿日期: 2008-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(10374024)资助课题。

作者简介: 宋玉玲(1981—),女,博士研究生,主要从事磁性光子晶体方面的研究。E-mail: songyuling81@126.com

导师简介: 王选章(1957—),男,博士生导师,主要从事凝聚态物理的磁学和光学性质方面的研究。

磁光介质/电介质多层膜的透射谱^[6]以及二维磁性光子量子阱共振隧穿光谱^[7]等方面的性质。在微波磁性材料中,铁磁体的工作频率在共振频率附近,反铁磁体的共振频率处于毫米和远红外波段上。如果对待毫米和红外信号感兴趣的话,可以选择反铁磁材料。和一般的反铁磁薄膜不同,中间带有缺陷层的一维反铁磁光子晶体展现出大的旋磁效应^[8]。另外,在讨论反铁磁材料和电介质组成的多层膜时,发现在反铁磁共振频率附近体系的带隙结构和透射谱与大块反铁磁体的类似^[9]。分析磁性光子晶体时,一般取在垂直于周期方向上无界的结构,目前还没见到对受限磁性光子晶体的研究。本文提出一种受限反铁磁光子晶体,并讨论了它的性质。

2 理论模型

受限反铁磁光子晶体模型如图 1 所示。它是由相距为 h 的两个平行金属板之间填充厚度分别为 d_a 、 d_d 的反铁磁层和电介质层交替排列的周期结构。AF 和 D 分别代表反铁磁层和电介质层。 $d = d_a + d_d$ 为多层膜的周期长度。入射区的材料、反铁磁层、电介质层和出射区的材料的介电常数分别为 ϵ_r 、 ϵ_a 、 ϵ_d 和 ϵ_i ; 反铁磁层的磁导率为张量 μ_a , 其它是普通电介质取磁导率为 1。电场强度平行于 y 轴的平面偏振光垂直入射到多层膜外表面, y 轴垂直纸面向外。

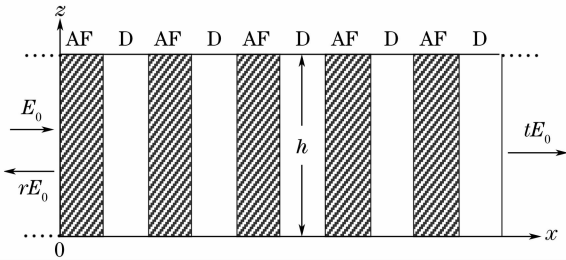


图 1 一维受限反铁磁光子晶体示意图

Fig. 1 Schematic view of a 1D confined antiferromagnetic photonic crystal

体系处在无外恒磁场的环境中,采用以下的表达式:

$$\mu = 1 + \frac{2\omega_m\omega_a}{\omega_r^2 - \omega^2}, \quad (1)$$

那么,当反铁磁各向异性轴沿 j ($j = x, y$ 或 z) 方向时磁导率 μ_a 的张量元 $\mu_{jj} = 1$, 另外两个张量元均为 μ_a 。(1) 式中, $\omega_m = \gamma M_0$, $\omega_a = \gamma H_a$, $\omega_e = \gamma H_e$ 以及反铁磁共振频率 $\omega_r = \sqrt{2\omega_a\omega_e + \omega_a^2}$; M_0 、 H_a 和 H_e 分别为子格饱和磁化、各向异性场和交换场, γ 是旋磁

比。当计入阻尼时,只要把频率 ω 变换成 $\omega + i\tau$ 即可, τ 为阻尼系数。为了方便讨论,用 $\Omega_i = \omega_i/2\pi c$ 替换 ω_i , 其中 c 为真空光速。

数值分析时,以 $\text{FeF}_2/\text{ZnF}_2$ 受限光子晶体为例。 FeF_2 的介电常数 $\epsilon_a = 5.5$, $M_0 = 0.704 \text{ T}$, $H_a = 20 \text{ T}$ 和 $H_e = 54 \text{ T}$ 。又 $\gamma = 1.97 \times 10^{11} \text{ rad s}^{-1} \text{ T}^{-1}$ 获得反铁磁共振频率 $\Omega_r = 52.88 \text{ cm}^{-1}$ 。 ZnF_2 的介电常数 ϵ_d 为 8.0。

3 带隙的计算和分析

根据传输矩阵法^[9,10]求出通过一个双层的传输矩阵 \mathbf{T} :

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} A & B \\ B^* & A^* \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 $A = \delta_1 [i(1 + \Lambda^2)\sin(2\pi k''_m d_d)/2\Lambda + \cos(2\pi k''_m d_d)]$, $B = \delta_1^{-1} [i(1 - \Lambda^2)\sin(2\pi k''_m d_d)/2\Lambda]$, $\delta_1 = \exp(i2\pi k'_m d_a)$, $\Lambda = k'_m/k''_m \mu_{zz}$, k'_m 和 k''_m 分别为反铁磁层和电介质层内电磁波的波数。

波导的色散方程表示为

$$\cos(2\pi kd) = \text{Tr}(\mathbf{T})/2 = (A + A^*)/2, \quad (3)$$

(3) 式中 k 为布洛赫波数。 k''_m 的表达式为:

$$k''_m{}^2 = \Omega^2 \epsilon_d - A_n^2, \quad (4)$$

以及当反铁磁各向异性轴沿三坐标轴时 k'_m 的表达式分别为

$$k'_m{}^2 = \mu(\Omega^2 \epsilon_a - A_n^2), \quad (\text{along the } x \text{ axis}) \quad (5a)$$

$$k'_m{}^2 = \Omega^2 \epsilon_a \mu - A_n^2, \quad (\text{along the } y \text{ axis}) \quad (5b)$$

$$k'_m{}^2 = \Omega^2 \epsilon_a - A_n^2/\mu, \quad (\text{along the } z \text{ axis}) \quad (5c)$$

其中 $\Omega = \omega/2\pi c$, $A_n = n/2h$, 每一个 n 值对应一种电磁波模式。因此,受限光子晶体中可以传播一系列的电磁波模式。

与普通的反铁磁多层膜相比,体系由于存在金属边界,使得在波数 k'_m 和 k''_m 的表达式中出现 $-A_n^2$ 项。这给体系带来一些新颖的特性,尤其是在反铁磁共振频率附近。电磁波在介质中传播,要求其波数为实数或者它的实部远大于虚部,否则出现带隙。本文将按照上述机制分析受限光子晶体在不同情况下的带隙结构。

一种带隙是由于体系的色散方程(3)式等号右边的函数绝对值大于 1,使得布洛赫波数 k 为虚数产生的。它是介质周期排列的结果,为光子带隙。另一种带隙主要是由于反铁磁材料的共振性质 ($\mu < 0$) 以及两金属板间距离产生的。这种频率带隙对应于波数 k'_m 和 k''_m 为虚数。由于光子带隙已

经清楚,下面将分三种情况对第二种带隙进行讨论。

当反铁磁各向异性轴沿 x 方向时,根据(4)式和(5a)式,电磁波的频率通带由二组条件决定:

1. $\{\mu > 0, \Omega > \Omega_{AF} = A_n / \sqrt{\epsilon_a}\}$ 或 $\{\mu < 0, \Omega < \Omega_{AF}\}$

2. $\Omega > \Omega_D = A_n / \sqrt{\epsilon_d}$ 。当这二组条件不能同时满足时,频率带隙就出现了。图 2 描绘了 $\text{FeF}_2/\text{ZnF}_2$ 受限光子晶体的带结构随参量 A_n 的变化规律。阴影区为频率带隙,在以后的带结构图中同样表示。从图中可以看到,在大块 FeF_2 带隙频率范围 $\Omega_r < \Omega < \Omega_{r+} = (\Omega_r^2 + 2\Omega_m\Omega_a)^{1/2}$ (对应于 $\mu < 0$) 内出现的却是一个通带,位于宽大的频率带隙中并夹于频率 Ω_{AF} 和 Ω_D 之间。

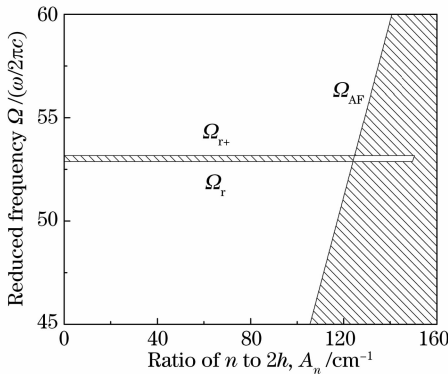


图 2 反铁磁各向异性轴沿 x 方向时 $\text{FeF}_2/\text{ZnF}_2$ 受限光子晶体的带结构

Fig. 2 Band structure of $\text{FeF}_2/\text{ZnF}_2$ confined photonic crystal in the antiferromagnetic anisotropic axis along the x direction

当反铁磁各向异性轴平行于 y 方向时,在电磁波频率大于 Ω_D 的频段内从 $\Omega_- = \{[(\Omega_{r+}^2\epsilon_a + A_n^2 - \sqrt{\Delta})/2\epsilon_a]^{1/2}$ 到 Ω_r 之间以及在频率 $\Omega_+ = \{[(\Omega_{r+}^2\epsilon_a + A_n^2 + \sqrt{\Delta})/2\epsilon_a]^{1/2}$ 之上的区间为电磁波通带,其中 $\Delta = [(\Omega_{r+}^2\epsilon_a + A_n^2)^2 - 4\epsilon_a A_n^2 \Omega_r^2]$ 。图 3 给出这种情况时 $\text{FeF}_2/\text{ZnF}_2$ 受限光子晶体的带结构。在反铁磁共振频率 Ω_r 处出现一个带隙,但值得注意的是它比大块 FeF_2 的带隙要宽,尤其是在参量 A_n 较大时。而这种宽的带隙是反铁磁材料的共振性质与板间距离共同作用的结果,见式(5b)。

当反铁磁各向异性轴沿 z 方向时,由(4)式和(5c)式知:体系通带处于频率大于 Ω_D 的范围内,且要求电磁波频率大于 Ω_+ 或在 Ω_- 和 Ω_{r+} 之间,计算结果如图 4。与图 3 比较发现,狭长的频率带隙不再起始于反铁磁共振频率,而是略升到 Ω_{r+} 即 53.17 cm^{-1} 频率处。因此,在频率大于 Ω_D 的范围

里, μ 为负值时对应的频段的光是可以透过受限光子晶体的,这完全相反于大块反铁磁材料。

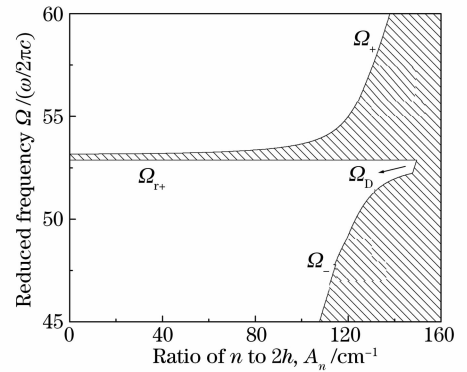


图 3 反铁磁各向异性轴沿 y 方向时 $\text{FeF}_2/\text{ZnF}_2$ 受限光子晶体的带结构

Fig. 3 Band structure of $\text{FeF}_2/\text{ZnF}_2$ confined photonic crystal in the antiferromagnetic anisotropic axis along the y direction

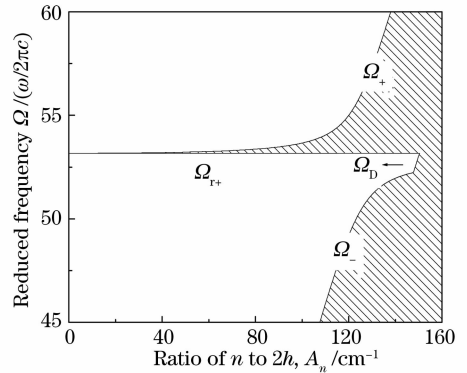


图 4 反铁磁各向异性轴沿 z 方向时 $\text{FeF}_2/\text{ZnF}_2$ 受限光子晶体的带结构

Fig. 4 Band structure of $\text{FeF}_2/\text{ZnF}_2$ confined photonic crystal in the antiferromagnetic anisotropic axis along the z direction

4 透射谱

在分析透射谱时,假设体系中含有 N 个双层。根据传输矩阵法得到电磁波通过受限反铁磁光子晶体的透射系数 t 为

$$t = 4\Lambda\Lambda_2(D_{12}D_{21} - D_{11}D_{22}) / \{\delta_1(g_1 - \Lambda_2g_2) [(D_{11} - D_{12}) - \Lambda_1(D_{11} + D_{12})] + \delta_1^{-1}(g_1^* + \Lambda_2g_2^*) [(D_{21} - D_{22}) - \Lambda_1(D_{21} + D_{22})]\}, \quad (6)$$

(6)式中 D_{ij} 是 \mathbf{T}^{N-1} 的矩阵元, $\Lambda_1 = k'_{.m}/k_{.m}^{(t)}\mu_{.z}$, $\Lambda_2 = k''_{.m}/k_{.m}^{(t)}$, $k_{.m}^{(j)} = (\Omega^2\epsilon_j - A_n^2)^{1/2}$ ($j = r, t$) 为入射区或出射区电磁波的波数,而

$$g_1 = \cos(2\pi k''_{.m}d_d) + i\Lambda\sin(2\pi k''_{.m}d_d), \quad (7a)$$

$$g_2 = \Delta \cos(2\pi k''_m d_d) + i \sin(2\pi k''_m d_d). \quad (7b)$$

前面对无限长受限反铁磁光子晶体带结构的分析已经获得一些新颖的特性,尤其是在反铁磁共振频率附近。为了验证这些结果,图 5 给出了 $\text{FeF}_2/\text{ZnF}_2$ 受限光子晶体在含有 8 个双层时电磁波的透射比 $T = |t|^2$ 曲线。薄膜的厚度均为 $15 \mu\text{m}$,参量 A_n 固定为 130 cm^{-1} 。入射区和出射区材料均为 GaAs,介电常数为 13。图 5(a)、(b)和(c)是反铁磁各向异性轴分别沿 x, y 和 z 轴时的计算结果。当反铁磁各向异性轴沿 x 方向时,在低频率区中出现了极窄的透射峰,位于 $\mu < 0$ 的频区,这和图 2 预示的一致;在反铁磁各向异性轴沿 y 方向时,在共振频率处出现的是一个频率带隙,但其宽度是大块 FeF_2 的 15 倍多;而当反铁磁各向异性轴平行于 z 轴时,也出现一个窄频率带隙,不同的是它位于大块反铁磁体带隙的上方。这意味着在大块 FeF_2 的带隙频段光子晶体可以传播电磁波。这些结果与带结构的分析结果完全吻合。另外,在透射图中频率在 80 cm^{-1} 附近存在一个准带隙,为光子带隙。如果在计算中增加体系中双层的数量,这个带隙会更清楚。

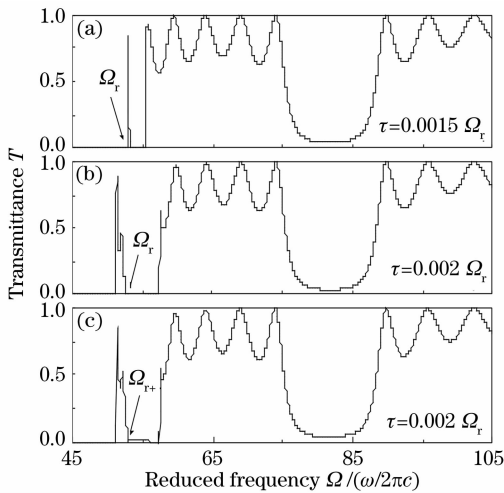


图 5 $\text{FeF}_2/\text{ZnF}_2$ 受限光子晶体的透射谱,(a),(b)和(c)分别为反铁磁各向异性轴沿 x, y 和 z 方向时的计算结果

Fig. 5 Transmission spectra of the $\text{FeF}_2/\text{ZnF}_2$ confined photonic crystal with the antiferromagnetic anisotropic axis along the x (a), y (b) and z (c) directions, respectively

5 结 论

计算了受限反铁磁光子晶体的带结构和透射谱。分析结果表明,体系中存在的电磁波模式是离散的,存在两种带隙。详细讨论了反铁磁共振频率附近的性质,通过调节反铁磁材料的特性和金属板间距离,可以产生不同于大块反铁磁材料的性质。因此,实现控制电磁波在受限光子晶体中的传输行为,对处理红外和毫米波信号是有意义的。

参 考 文 献

- Lyubchanskii I L, Dadoenkova N N, Lyubchanskii M I *et al.*. Magnetic photonic crystals [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, **36**: R277~R287
- Ziyou Zhou, Xiaoyue Huang, Vanga Raghav *et al.*. Tunable photonic crystals based on ferroelectric and ferromagnetic materials by focused ion beam [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(12): 693~695
- Vasseur J O, Dobrzynski L, Djafari-Rouhani B *et al.*. Magnon band structure of periodic composites [J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **54**(2): 1043~1049
- Liu Jiangtao, Zhou Yunsong, Wang Fuhe *et al.*. Guide modes in magnetic photonic crystal heterostructures composed of different lattices [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 665~669
刘江涛,周云松,王福合等.不同晶格磁性光子晶体异质结的界面传导模[J].*光学学报*,2005,**25**(5):665~669
- Che Ming, Zhou Yunsong, Wang Fuhe *et al.*. PBG structures of two-dimensional magnetic photonic crystals in square lattice [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(10): 4770~4775
车明,周云松,王福合等.二维正方形格子磁性光子晶体的带隙结构[J].*物理学报*,2005,**54**(10):4770~4775
- Nikitov S A, Tailhades Ph, Tsai C S. Spin waves in periodic magnetic structures-magnonic crystals [J]. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2001, **236**: 320~330
- Liu Jing, Sun Junqiang, Huang Dexiu *et al.*. Influence on resonant tunneling spectral character of two-dimensional magnetic optical quantum wells [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(5): 649~654
刘靖,孙军强,黄德修等.二维磁性光子量子阱对共振隧穿光谱特性的影响[J].*中国激光*,2007,**34**(5):649~654
- Wang Xuanzhang. The faraday effect of an antiferromagnetic photonic crystal with a defect layer [J]. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2005, **17**: 5447~5452
- Wang Jingju, Zhou Xuefei, Wan Weilong *et al.*. Transmission by antiferromagnetic-nonmagnetic multilayers [J]. *J. Phys.: Condens. Matter*, 1999, **11**: 2697~2705
- Chen Yihang, Xu Qingzhen. Twin defect modes in one-dimensional photonic crystals with defect layers of multiple single-negative-materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1498~1502
陈溢杭,徐清振.多个单负材料缺陷一维光子晶体的孪生缺陷模[J].*光学学报*,2007,**27**(8):1498~1502