

含特异材料一维超导光子晶体的带隙特性研究*

武继江[†] 高金霞

(山东理工大学理学院, 淄博 255049)

(2012年11月13日收到; 2013年3月10日收到修改稿)

利用传输矩阵法研究了含特异材料的一维超导光子晶体的带隙特性. 研究表明, 这类超导光子晶体同样具有由传统的电介质材料构成的超导光子晶体一样的低频带隙, 且在一定的参数下该低频带隙可以相当宽. 但在一定的结构参数下, 这类超导光子晶体同完全由传统的电介质构成的光子晶体一样不存在低频带隙. 还就超导光子晶体的偏振特性、光子晶体结构参数及环境温度的变化对光子带隙结构的影响进行了研究.

关键词: 超导光子晶体, 传输矩阵法, 特异材料, 光子带隙

PACS: 41.20.Jb, 42.70.Qs, 78.67.Pt, 78.20.Bh

DOI: 10.7498/aps.62.124102

1 引言

光子晶体是指介质的折射率按一定周期发生变化的人工材料. 光在这类材料中传播时具有类似于电子在半导体材料中的行为, 如在一定频率范围内的光不能在光子晶体中传播 (即存在光子带隙), 利用光子晶体的这些性质可以有效地控制光的传播. 因此, 光子晶体被广泛应用于制作各种光学器件. 目前, 对由传统的电介质材料构成的光子晶体已进行了广泛而深入的研究, 而由非传统材料构成的光子晶体的光子带隙特性也已成为研究的热点^[1-12], 如铁电材料、液晶材料和折射率为负值的特异材料等也被用于构造光子晶体. 这其中人们对含特异材料的光子晶体的研究热情尤为突出^[11,12]. 特异材料是一种新颖、奇异的光学介质, 其折射率为负值, 具有奇特的光学与电磁学性质, 如逆 Doppler 效应、逆 Cherenkov 效应、反常折射现象和原子自发辐射率的特殊改变等. 将这种材料和传统的正折射率材料相结合可以更有效地控制光子的传输行为, 基于此也已研制出许多新型的光子器件.

除了特异材料, 近年来含超导材料的一维和二

维光子晶体也逐渐引起了人们的研究兴趣^[13-30], 并逐步成为一类重要的带隙可调谐的“超导光子晶体”. 对由超导材料和传统介质材料构成的光子晶体的研究表明, 该类光子晶体具有以下两个基本特点: 一是 TE 和 TM 偏振都存在低频带隙; 二是对 TM 偏振还存在特殊的超偏振带隙. 此外超导光子晶体的带隙还可通过温度 and 外加磁场进行改变. 超导光子晶体的这种带隙可调节的特点在超导电子学和光子学中都具有广泛的应用. 除了对周期结构的超导光子晶体进行研究外, 人们也已开始对含缺陷层结构和非周期结构超导光子晶体进行研究^[31-35]. 目前超导光子晶体构成材料主要是超导材料和传统的电介质材料, Becerra 等^[31]曾报道了由特异材料和传统的电介质材料构成的一维光子晶体中含介质-超导复合缺陷层的缺陷模特性, 但对由特异材料和超导材料构成的超导光子晶体的研究还尚未见报道.

本文研究了由特异材料和超导材料构成的一维光子晶体的带隙特性. 与通常的超导光子晶体相比, 这种新型超导光子晶体和一般超导光子晶体一样, 也可具有低频带隙, 带隙也可进行调谐, 同时还发现, 这种超导光子晶体的带隙结构在不同的结构参数下表现出不同的特性.

* 国家自然科学基金 (批准号: 11104165) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: w9513110@163.com

2 理论模型和方法

一般而言,一维光子晶体是由两种不同介质交替排列形成.考虑由超导材料 A 和特异材料 B 构成的一维光子晶体.对于特异材料 B,其折射率 n_B 为负值.为简单起见这里不考虑其色散特性,并设其与温度无关.而对于超导材料,无外加磁场时其折射率 n_A 可采用二流体模型来给出^[20,21]

$$n_A = \left(1 - \frac{c^2}{\omega^2 \lambda_L^2}\right)^{1/2}, \quad (1)$$

式中 c 为光速, ω 为光波角频率, λ_L 为和温度相关的伦敦深度,由下式决定:

$$\lambda_L = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (T/T_c)^4}}, \quad (2)$$

上式中 λ_0 为 $T = 0$ K 时的伦敦穿透深度, T_c 为超导材料的临界温度.

对由超导材料和特异材料构成的超导光子晶体光子带隙的计算,我们采用传输矩阵法^[36].根据 Bloch 理论,无限周期结构的一维光子晶体的色散关系可表示为

$$\begin{aligned} \cos(K\Lambda) &= \cos(k_A d_A) \cos(k_B d_B) \\ &\quad - \frac{1}{2} \left(\frac{k_A}{k_B} + \frac{k_B}{k_A} \right) \sin(k_A d_A) \sin(k_B d_B), \end{aligned} \quad (3)$$

式中 K 为 Bloch 波数, d_A 和 d_B 分别为超导材料和特异材料的厚度, $\Lambda = d_A + d_B$ 为超导光子晶体的周期, $k_A = \omega n_A / c$, $k_B = \omega n_B / c$.

3 数值计算与结果分析

计算中选用的超导材料 A 为铌 ($T_c = 9.2$ K, $\lambda_0 = 83$ nm)^[19], 设特异材料为非磁性材料,其相对介电常数为 -10 .利用传输矩阵方法,我们首先计算了在环境温度 $T = 4.2$ K 下垂直入射时,由传统的电介质材料和超导材料构成的一维超导光子晶体的带隙结构及其透射谱,如图 1 所示.计算中传统的电介质材料的相对介电常数取为 10,超导材料和电介质材料的厚度分别为 200 和 100 nm.

在图 1(b) 的计算中,光子晶体的周期数选为 100,并设一维光子晶体两端均为空气.由图 1 可以看出,计算得到的由传统材料构成的超导光子晶体的带隙结构和透射谱是一致的,其低频带隙特性也

表现得很明显.图 2 则为由特异材料和超导材料构成的超导光子晶体的带隙结构及透射谱.图 2 与图 1 的差异仅在于把相对介电常数 10 改为 -10 .由图 2 可以看出,含特异材料的超导光子晶体的带隙表现出自己的特点,不同于通常的超导光子晶体.但由图 1 和图 2 可以看出,在所选取的计算参数下,两种超导光子晶体均具有低频带隙,且含特异材料的超导光子晶体的低频带隙宽度要大于传统的超导光子晶体的低频带隙.

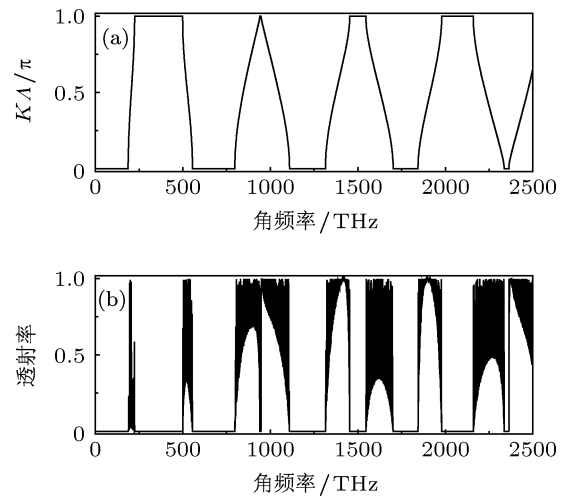


图 1 含传统电介质材料的一维超导光子晶体的 (a) 带隙结构和 (b) 透射谱

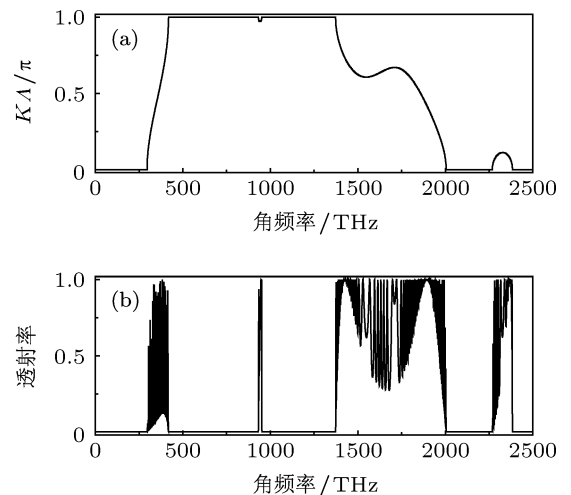


图 2 含特异材料一维超导光子晶体的 (a) 带隙结构和 (b) 透射谱

具有低频带隙是由传统的电介质材料和超导材料构成的超导光子晶体的固有特性,但这却不是含特异材料的超导光子晶体的固有特性.图 3 给出了在几种不同的介质层厚度组合下的含特异材料超导光子晶体的带隙结构.由图 3 并结合图 2(a) 可

可以看出, 组合不同的介质层厚度, 含特异介质超导光子晶体的带隙表现出不同的特点. 含特异介质超导光子晶体可以具有低频带隙, 且该低频带隙的宽度可以相当的大, 这类超导光子晶体也可能同完全由传统的电介质材料构成的光子晶体一样不存在低频带隙.

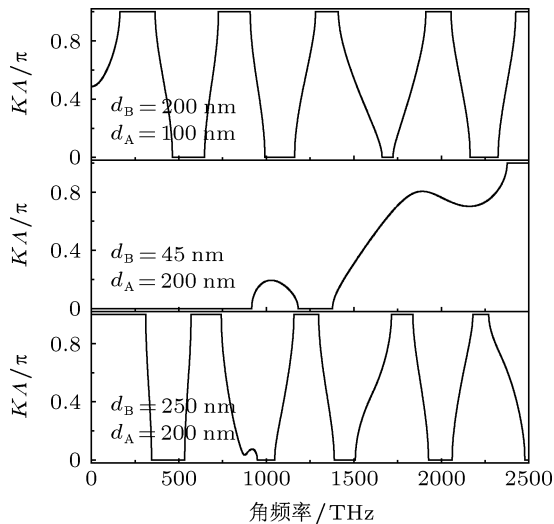


图3 不同介质层厚度下含特异材料一维超导光子晶体的带隙结构

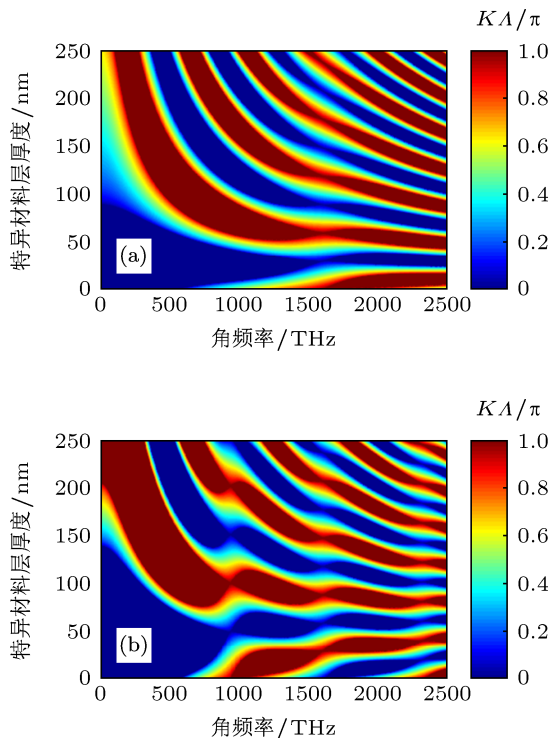


图4 含特异材料一维超导光子晶体带隙结构随特异材料的厚度变化 (a) $d_A = 100$ nm; (b) $d_A = 200$ nm

图4给出了超导层厚度 d_A 分别为 100 和 200 nm 时, 含特异材料超导光子晶体的带隙结

构随特异介质层厚度 d_B 的变化曲线. 类似于图3所显示的结果, 由图4可以看出, 在不同的构成材料厚度下, 含特异材料超导光子晶体有时出现低频带隙, 有时则没有. 由图4还可看出, 适当选择介质层厚度, 可以使低频带隙的宽度相当宽. 如在图4(a)中, 在特异材料的厚度约为 30 nm 时, 有一个相当宽的低频带隙. 类似的现象在图4(b)中也可看到.

由图4还可看出, 对其他各级带隙而言, 随着特异材料厚度的增加, 带隙基本上向低频方向移动. 带隙宽度的变化则比较复杂. 对一些低阶带隙, 带隙宽度基本上随特异材料的厚度增加而增加, 但在一定范围内, 带隙宽度基本不随特异材料厚度的变化而变化. 而对某些高阶带隙, 其带隙宽度在所使用的计算参数范围内几乎没有变化. 此外, 在图4(b)中, 当特异材料的厚度较小时, 可以看出, 低频带隙随着特异材料厚度的增加, 带隙宽度增加. 而此时出现的第一带隙特性与其他带隙不同, 随着特异材料厚度的增加, 该带隙向高频方向移动.

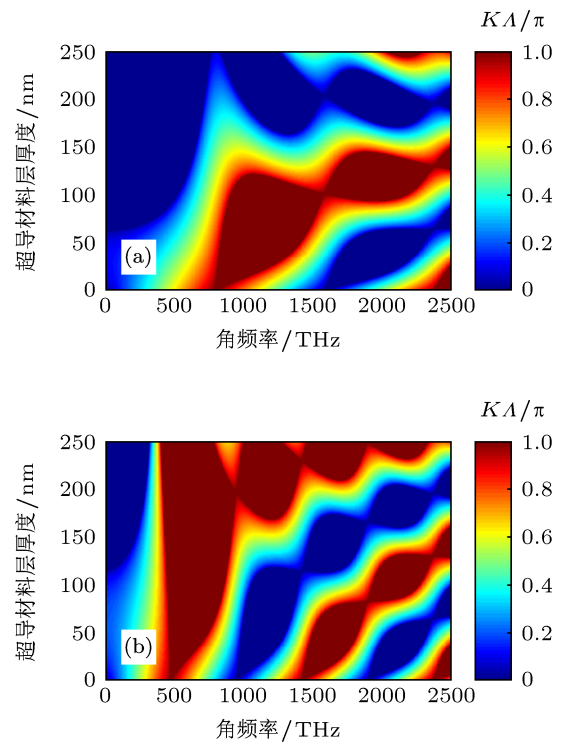


图5 含特异材料一维超导光子晶体带隙结构随超导材料的厚度变化 (a) $d_B = 50$ nm; (b) $d_B = 100$ nm

图5给出了特异材料层厚度 d_B 分别为 100 和 50 nm 时, 含特异材料超导光子晶体的带隙结构随超导介质层厚度 d_A 的变化曲线. 特异材料层厚度为 100 nm 时, 当超导层厚度较小时, 不存在低频带

隙,当超导层厚度大于某一值时才出现低频带隙,且低频带隙宽度随着超导层厚度的增加而增加.特异材料层厚度为 50 nm 时,当超导层厚度较小时也不存在低频带隙,当超导层厚度大于某一值时才出现低频带隙,且低频带隙宽度随着超导层厚度的增加而增加.对第一带隙,其左边带随着超导层厚度的增加向低频波段移动,但总的来说变化不大.而第一带隙的带隙宽度则先随着超导层厚度的增加而增加,而后又减小.

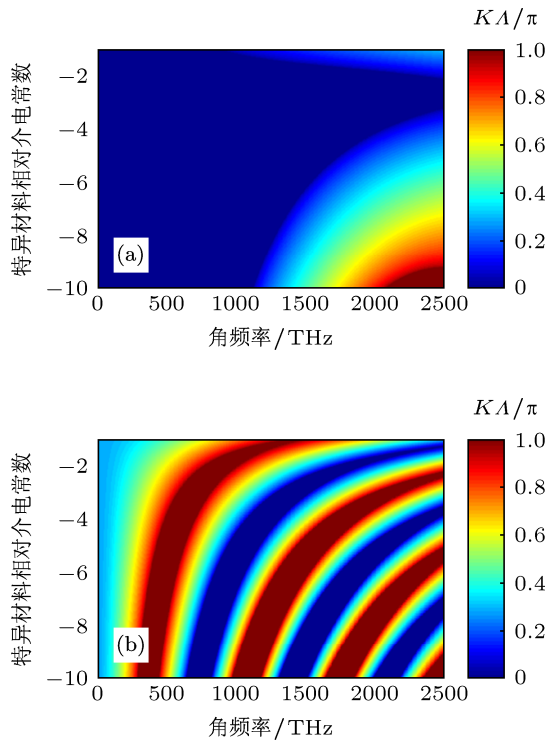


图 6 含特异材料一维超导光子晶体带隙结构随特异材料的相对介电常数变化 (a) $d_A = 50$ nm, $d_B = 30$ nm; (b) $d_A = 50$ nm, $d_B = 150$ nm

图 6 给出了含特异材料超导光子晶体的带隙结构随特异材料相对介电常数的变化曲线.图 6(a) 中特异介质层和超导层的厚度为 30 和 50 nm,图 6(b) 中特异介质层和超导层的厚度分别为 150 和 50 nm.图 6(a) 所示情况下出现了低频带隙,且随着特异材料相对介电常数的增大,低频带隙宽度先增大后减小.图 6(b) 中没有出现低频带隙,其他各级带隙随特异材料相对介电常数的变化趋势非常明显,均是随着相对介电常数的增大先增大而后又减小.组合不同的超导光子晶体构成材料层的厚度,带隙结构还将表现出其他不同的特性.

总的来说,含特异介质超导光子晶体的带隙特性随构成材料层的厚度的变化情况较为复杂,需要

根据具体情况进行分析,这与含传统电介质材料超导光子晶体带隙特性随构成材料的厚度的变化具有一定的规律性具有鲜明差异^[26].但这种丰富的变化却为实际应用提供了可能的选择.

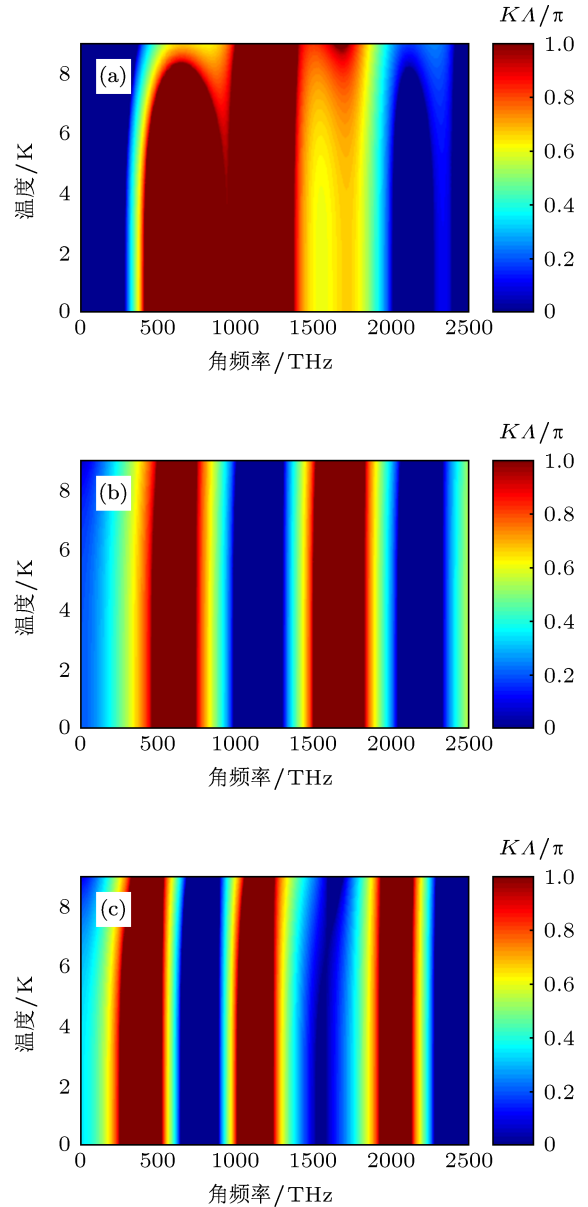


图 7 含特异材料一维超导光子晶体带隙结构随温度率变化 (a) $d_A = 200$ nm, $d_B = 100$ nm; (b) $d_A = 50$ nm, $d_B = 100$ nm; (c) $d_A = 100$ nm, $d_B = 150$ nm

图 7 给出了在几种不同的介质层厚度组合下的含特异材料超导光子晶体的透射谱随温度的变化曲线.在图 7(a) 中所示情况下,超导光子晶体存在低频带隙,低频带隙的宽度总体上随着温度的增加而逐渐增大.图 7(a) 中所示的低频带隙的这一特性与含传统电介质材料超导光子晶体的低频带隙随温度的变化特性不同.一般而言,含传统电介质

材料超导光子晶体的低频带隙随着温度的升高带隙宽度减小, 截止频率向低频方向移动^[20,22,26]. 但进一步的数值计算也表明, 在一定的结构参数下, 含特异材料超导光子晶体的低频带隙也可表现出同含传统电介质材料超导光子晶体的低频带隙一样的温度特性, 即低频带隙随着温度的升高带隙宽度减小, 截止频率向低频方向移动. 由图 7(a) 还可看出, 对低频带隙, 在温度较低时, 温度的变化对带隙宽度的影响不大, 当温度接近临界温度, 带隙宽度对温度的变化较敏感. 这一特性对两类超导光子晶体是一致的. 图 7(a) 中除低频带隙外, 还存在第一带隙, 该带隙的带隙宽度在温度较低时随着温度的升高无明显的变化, 当温度升高到约 4.5 K 附近时, 带隙发生分裂, 其中一带隙的宽度随温度的升高而逐渐减小, 另一带隙的宽度变化不大, 但向高频波段有一定的偏移. 在图 7(b) 和 (c) 所示情况下, 超导光子晶体不存在低频带隙. 由图可以看出, 除了在接近临界温度时, 两种情况下各级带隙的宽度基本不随温度的改变而发生变化. 这一点与含传统电介质材料超导光子晶体的高阶带隙随温度的变化情况一致^[26].

以上均是在垂直入射时的计算结果. 当入射角不为 0° 时, 不同偏振下的带隙结构将会不同. 图 8 给出了三种情形下含特异材料超导光子晶体中 TE 波和 TM 波在不同的入射角下的透射谱. 在图 8(a) 所示的结构参数下, TE 波和 TM 波均不存在低频带隙, 但在低频段存在一个相对较窄的全向带隙. 在图 8(b) 所示的结构参数下, 则存在全向低频带隙, 此外还存在一个相对较窄的全向带隙. 由图 8(a) 和 (b) 还可看出, TE 波的第一带隙基本不随入射角的改变而变化. 而在大角度入射下, 其他各级带隙也基本不随入射角的改变而改变. 而 TM 波的各级带隙随入射角的变化较为复杂. 在图 8(c) 所示的结构参数下, 透射谱的变化相对较简单, 存在一个相对较大的全向低频带隙. 进一步的计算表明, 类似于图 8(a) 和 (b), 透射谱随相关参数变化的趋势是一致的, 入射角较大时, 透射谱越简单, 出现近似周期性的禁带.

4 结论

对超导材料采用二流体模型, 利用传输矩阵法,

研究了由特异介质材料和超导材料构成一维超导光子晶体的带隙特性. 与由传统的电介质材料构成的超导光子晶体相比, 这类超导光子晶体同样可具有低频带隙, 且在一定的结构参数下该低频带隙可以相当的宽. 在一定条件下, 这类超导光子晶体也可同完全由传统的电介质材料构成的光子晶体一样, 不存在低频带隙. 含特异介质超导光子晶体的带隙结构随介质材料厚度及外界环境温度的变化非常复杂, 无一般性的规律, 但这类超导光子晶体丰富的带隙结构也为实际的应用提供了多重选择.

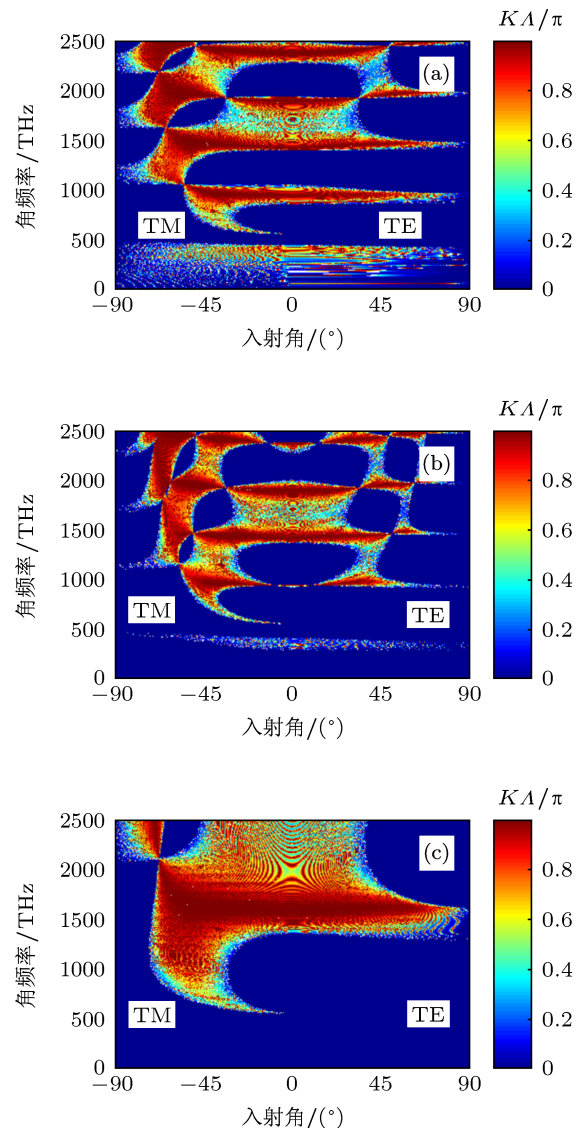


图 8 不同入射角下含特异材料一维超导光子晶体中 TE 波和 TM 波的透射谱 (a) $d_A = 100$ nm, $d_B = 100$ nm; (b) $d_A = 200$ nm, $d_B = 100$ nm; (c) $d_A = 70$ nm, $d_B = 30$ nm

- [1] Yoshino K, Shimoda Y, Kawagishi Y, Nakayama K, Ozaki M 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 932
- [2] Guo B 2009 *Phys. Plasmas* **16** 043508
- [3] Liu S B, Zhu C X, Yuan N C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2804 (in Chinese) [刘少斌, 朱传喜, 袁乃昌 2005 物理学报 **54** 2804]
- [4] Ma L, Zhang H F, Liu S B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5089 (in Chinese) [马力, 章海锋, 刘少斌 2008 物理学报 **57** 5089]
- [5] Zhang H F, Ma L, Liu S B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1071 (in Chinese) [章海锋, 马力, 刘少斌 2009 物理学报 **58** 1071]
- [6] Zhang Q, Zhou S, Li Q H, Wang X Z, Fu S F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 157501 (in Chinese) [张强, 周胜, 励强华, 王选章, 付淑芳 2012 物理学报 **61** 157501]
- [7] Liu Q H, Hu D S, Yin X G, Wang Y Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094101 (in Chinese) [刘其海, 胡冬生, 尹小刚, 王彦庆 2011 物理学报 **60** 094101]
- [8] Zhang H F, Liu S B, Kong X K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 025215 (in Chinese) [章海锋, 刘少斌, 孔祥鲲 2011 物理学报 **60** 025215]
- [9] Zhang H F, Liu S B, Kong X K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 055209 (in Chinese) [章海锋, 刘少斌, 孔祥鲲 2011 物理学报 **60** 055209]
- [10] Li W S, Luo S J, Huang H M, Zhang Q, Fu Y H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 174101 (in Chinese) [李文胜, 罗时军, 黄海铭, 张琴, 付艳华 2012 物理学报 **61** 174101]
- [11] Liu L X, Dong L J, Liu Y H, Yang C Q, Shi Y L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134210 (in Chinese) [刘丽想, 董丽娟, 刘艳红, 杨成全, 石云龙 2012 物理学报 **61** 134210]
- [12] Li W S, Luo S J, Huang H M, Zhang Q, Shi D F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 104101 (in Chinese) [李文胜, 罗时军, 黄海铭, 张琴, 是度芳 2012 物理学报 **61** 104101]
- [13] Raymond Ooi C H, Au Yeung T C, Kam C H, Lim T K 2000 *Phys. Rev. B* **61** 5920
- [14] Chen Y B, Zhang C, Zhu Y Y, Zhu S N, Ming N B 2002 *Mater. Lett.* **55** 12
- [15] Takeda H, Yoshino K 2003 *Phys. Rev. B* **67** 245109
- [16] Feng L, Liu X P, Ren J, Tang Y F, Chen Y B, Chen Y F, Zhu Y Y 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 073104
- [17] Wu C J, Chen M S, Yang T J 2005 *Physica C* **432** 133
- [18] Cheng C, Xu C, Zhou T, Zhang X F, Xu Y 2008 *J. Phys.: Condens. Mat.* **20** 275203
- [19] Wu C J, Liu C L, Kuo W K 2009 *J. Electromagnet. Wave* **23** 1113
- [20] Aly A H, Ryu S W, Hsu H T, Wu C J 2009 *Mater. Chem. Phys.* **113** 382
- [21] Wang S Y, Liu S B, Li L W 2010 *Chin. Phys. B* **19** 084101
- [22] Lee H M, Wu J C 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 09E149
- [23] Ooi C H R, Kam C H 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 458
- [24] Hsu H T, Kuo F Y, Wu C J 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 053912
- [25] Lee H M, Shyu J H, Horng L, Wu J C 2011 *Appl. Opt.* **50** 3860
- [26] Li C Z, Liu S B, Kong X K, Bian B R, Zhang X Y 2011 *Appl. Opt.* **50** 2370
- [27] Chen M S, Wu C J, Yang T J 2011 *Appl. Phys. A* **104** 913
- [28] Raymond Ooi C H, Gong Q H 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 063513
- [29] Li C Z, Liu S B, Kong X K, Bian B R, Zhang X Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 075203 (in Chinese) [李春早, 刘少斌, 孔祥鲲, 卞博锐, 张学勇 2012 物理学报 **61** 075203]
- [30] Aly A H, Sabra W, Elsayed H A 2013 *J. Supercond. Nov. Magn.* **26** 553
- [31] Becerra O G, Moncada-Villa E, Granada E J C 2012 *J. Supercond. Nov. Magn.* **25** 2163
- [32] Hu C A, Liu J W, Wu C J, Yang T J, Yang S L 2013 *Solid State Commun.* **157** 54
- [33] Zhang H F, Liu S B, Kong X K, Bian B R, Ma B 2013 *J. Supercond. Nov. Magn.* **26** 77
- [34] Zhang H F, Liu S B, Kong X K, Bian B R, Zhao X 2012 *Prog. Electromagn. Res. B* **40** 415
- [35] Zhang H F, Liu S B, Kong X K, Bian B R, Dai Y 2012 *Solid State Commun.* **152** 2113
- [36] Wang H, Li Y P 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2172 (in Chinese) [王辉, 李永平 2001 物理学报 **50** 2172]

Photonic bandgap properties of one-dimensional superconducting photonic crystals containing metamaterials*

Wu Ji-Jiang[†] Gao Jin-Xia

(College of Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

(Received 13 November 2012; revised manuscript received 10 March 2013)

Abstract

Bandgap properties of one-dimensional superconducting photonic crystals containing metamaterials are investigated by the transfer matrix method. It is shown that the low-frequency band gap can also be present in this superconducting photonic crystal similar to the usual superconducting photonic crystal containing dielectric materials. The low-frequency band gap can be widened considerably when the suitable structure parameters are chosen. However, in certain structural parameters, the low-frequency band gap can not be found in this superconducting photonic crystal just as in one-dimensional dielectric-dielectric photonic crystal. The polarization properties and the influences of the operating temperature and the structure parameters of superconducting photonic crystals on the photonic band gap are also investigated in this paper.

Keywords: superconducting photonic crystals, transfer matrix method, metamaterials, photonic band gap

PACS: 41.20.Jb, 42.70.Qs, 78.67.Pt, 78.20.Bh

DOI: 10.7498/aps.62.124102

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11104165).

[†] Corresponding author. E-mail: w9513110@163.com