

复合缺陷型电磁带隙谐振腔

柏宁丰 洪 玮 孙小菡[†]

(东南大学电子器件与系统可靠性研究中心, 南京 210096)

(2009 年 11 月 27 日收到; 2010 年 8 月 17 日收到修改稿)

提出了一种复合缺陷型电磁带隙(EBG)谐振腔, 通过对该 EBG 结构的带隙分析, 指出该谐振腔可在大尺寸下实现单模工作, 提供更大的容差空间, 且具有高 Q 值. 数值模拟结果表明, 基于复合缺陷 EBG 结构构成的谐振腔, 单模工作条件可以放宽到外圈金属柱直径与周期之比为 0.6, 内圈金属柱直径与周期比为 0.9; 而传统中心缺陷型 EBG 结构的小于 0.3.

关键词: 电磁带隙, 复合缺陷, 谐振腔, 单模

PACS: 84.40.Fe, 71.20.Tx

1. 引言

将电磁带隙(EBG)^[1,2]结构应用到微波真空电子器件(VED)中, 是极具创新性的工作. 美国 MIT 等离子体研究室最早开展了此项工作, 并于 2001 年发表研究结果, 引起了众多科学家的关注. 随后, 美国参与 MURI 计划的高校相继发表有关将 EBG 结构应用到微波 VED 中的理论、实验结果. MIT 等离子体研究室首次将 EBG 结构应用于高功率微波器件中, 研制出基于 2D-EBG 结构的回旋振荡管^[3], 设计了回旋管互作用电路和一个用于 90GHz 超大密集模式选择器的 EBG 波导. 2003 年又报道用于动态核极化试验中的回旋速调放大管, 采用 EBG 空腔抑制了模式竞争, 工作频率为 140 GHz, 连续波输出功率达到 100 W; 对于 10 kV, 100 mA 电子束, TE02 模作为工作模式, 可获得饱和增益 32dB ($\alpha = 1.4$), 9% 的效率和 86 W 输出功率^[4]. 在相同模式下, EBG 波导的模场尺寸比原有各类器件所能提供的模场尺寸要大, 而且定向性和噪声性能都远远优于后者. 之后, 又设计了 6 周期的 EBG 腔体结构、17.14GHz 的单模工作回旋管^[5]. Termik 等人已实现将 EBG 腔引入到加速器中, 大大提高了波注互作用的效率^[6], 他们还将 Omniguide 结构引入行波管

中, 展宽了输出带宽^[7].

最近, 在返波振荡器中也已采用 EBG 结构. Guillermo 等人将 EBG 波导作为慢波结构, 用于返波振荡器中, 设计出了频率在 1THz 以上的辐射源^[8]. Seong 等人成功地将 EBG 结构应用在反射速调管的设计中^[9], 理论计算表明 EBG 波导可以更好地实现模式变换^[10]. 国内将 EBG 应用在太赫兹、微波及光波无源器件中的研究报道较多^[11-13].

基于金属 EBG 结构设计波导或谐振腔时, 若要保证单模工作条件, 构成 EBG 结构的金属柱直径与周期之比需小于 0.3, X 波段金属柱直径为毫米量级, 加工精度要求在 1 丝以内. 这已成为制约金属 EBG 结构应用的主要因素. 因此, 有必要寻找更加合理的 EBG 结构, 放宽其尺寸与加工精度的要求. 本文提出一种新型复合缺陷结构, 探究解决以上问题的方法.

2. 模型与理论分析

在二维正方或六角晶格金属柱阵列中抽出中间一根柱, 构成了一阶缺陷金属 EBG 结构, 形成典型的 EBG 波导^[4,5]. 图 1 给出我们提出的一阶复合缺陷型 EBG 结构. 图 1 中在二维正方或六角晶格中心区域, 紧靠缺陷的第一圈柱处使用大直径金属

[†] 通讯联系人. E-mail: xhsun@seu.edu.cn

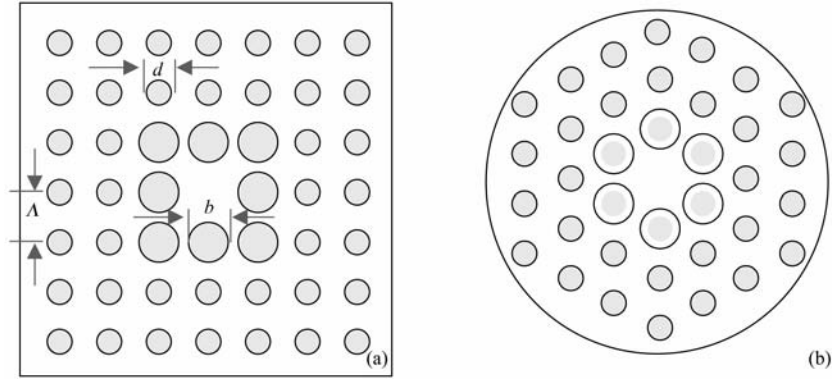


图1 (a) 正方晶格、(b) 六角晶格一阶复合缺陷结构. 中心去除一个金属柱构成一阶缺陷, 其周围一圈的金属柱直径为 b , 其余柱直径为 d , 晶格周期为 A

柱, 而其余层仍采用小直径金属柱, 晶格周期为 A .

金属柱直径/周期比 (d/A) 为 0.3, 0.6 时, 六角晶格单一缺陷 EBG 结构带隙如图 2(a), (b) 所示; 引入图 1 所示复合缺陷结构后, 当 $d/A = 0.3, b/A = 0.6$ 时, 中心周边一圈缺陷为大直径/周期比的金属柱, 带隙如图 2(c) 所示, 而当 $d/A = 0.6, b/A = 0.3$ 时中心缺陷为小直径/周期比, 带隙如图 2(d) 所示. 从图 2 中可以看出, 因为引入了复合缺陷, 这种结构的带隙相比原先只有单一中心缺陷时, 本征频率发

生了变化. 引入复合缺陷结构后, 最低阶频率与直径/周期比为 b/A 的一阶中心缺陷型结构本征频率相同, 但在高频部分出现了新的本征频率. 这说明在复合缺陷中心缺陷型结构中, 对本征频率影响最大的部分是围绕缺陷的第一圈金属柱直径/周期比. 同时, 引入大直径/周期比的复合缺陷后, 其基模对应的频率已经是大直径/周期比结构对应的频率, 其对应的周期与波长之比较大, 非常有利于高频器件的设计加工.

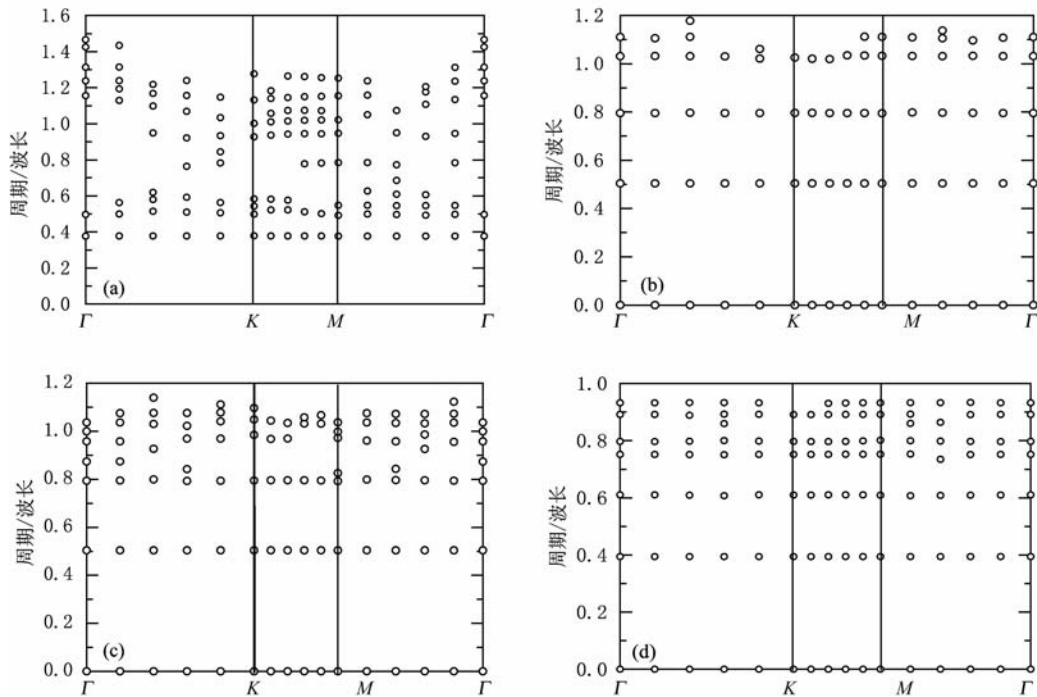


图2 一阶缺陷型金属 EBG 结构带隙图 (波长为 λ): (a) $d/A = 0.3$; (b) $d/A = 0.6$. 一阶复合缺陷型六角晶格金属 EBG 结构带隙图: (c) $d/A = 0.3, b/A = 0.6$; (d) $d/A = 0.6, b/A = 0.3$

3. 仿真与讨论

3.1. 金属柱直径周期比的影响

首先分析正方晶格和六角晶格一阶复合缺陷型金属 EBG 结构的谐振特性. 在外圈直径/周期比固定的条件下, 改变内圈直径/周期比, 经模拟得到图所示

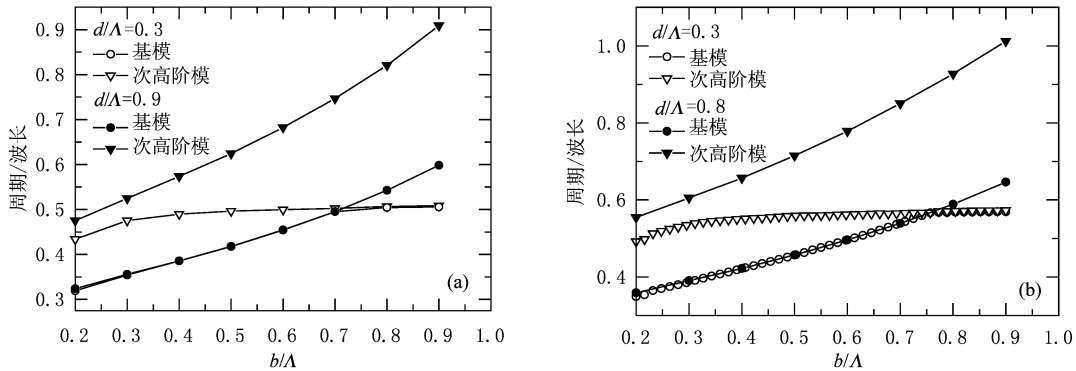


图3 一阶复合缺陷型 EBG 结构对应的最低两阶本征频率随 b/Λ 变化情况 (a) 正方晶格结构; (b) 六角晶格结构对应的频率变化

同样分析正方晶格和六角晶格一阶复合缺陷型金属 EBG 结构的谐振特性, 固定 b/Λ 的比值, 改变 d/Λ 比值, 相应的可以得到图所示频率变化图. 当 d/Λ 较小时, 最低两阶频率基本重合, 说明此时没有形成缺陷模; 当 d/Λ 增大时, 两个模式渐渐分开, 但最低阶模式基本保持不变, 而次高阶模式在 d/Λ 增大到一定程度后, 也会保持不变, 此时已形成稳定的模式分布. 因此, b/Λ 越大, 允许单模工作时的 d/Λ 也越大. 对于图 3(a) 所示正方晶格结构, $b/\Lambda = 0.6$, 其单模工作时 $d/\Lambda \in (0.2, 0.5)$; $b/\Lambda = 0.9$, 其单模工作时 $d/\Lambda \in (0.4, 0.7)$. 对于图 3(b) 所示六角晶格结构, $b/\Lambda = 0.6$, 其单模工作时 $d/\Lambda \in (0.2, 0.5)$; $b/\Lambda = 0.9$, 其单模工作时 d/Λ 的范围从频率相应上无法准确判断, 下限在 0.4, 上限在 0.7 至 0.8 之间, 具体分析还需要借助模场进行判断. 需要注意的时, 保持单模工作时, d 一定小于 b , 其基模的工作频率取决于 b/Λ 的比值, 并且与 $d = b$ 时该结构的基模工作频率基本相等.

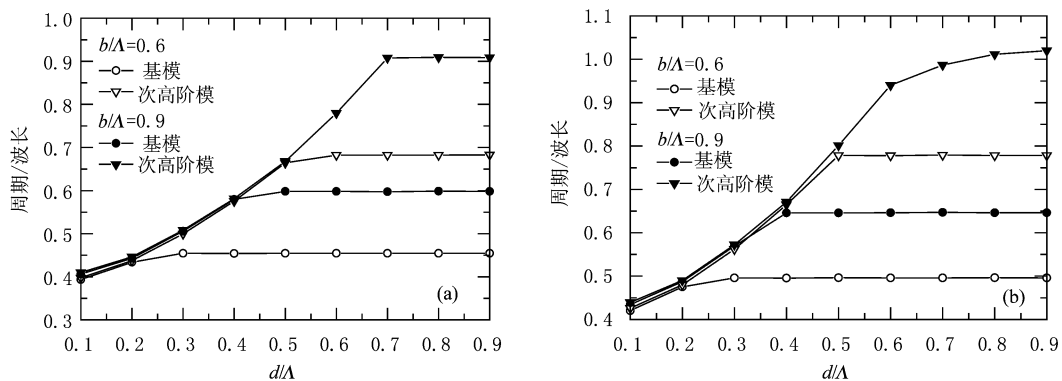


图4 一阶复合缺陷型结构对应的最低两阶本征频率随 d/Λ 变化情况 (a) 正方晶格结构; (b) 六角晶格结构

的其随频率变化情况. 当外圈直径/周期比为 0.3 时, 在 b/Λ 超过一个定值时, 图所示结构对应的最低两个本征频率十分接近, 因为基模不具有简并态, 说明此时在该结构中不存在基模, 存在的是不在缺陷区域的模式. 当外圈直径/周期比为较大时, 其最低两个模式的频率不会接近, 也就是说无论 b/Λ 如何变化, 始终存在两个模式. 因此要实现单模工作状态, 必须要找到合适的外圈直径/周期比.

3.2. 本征模场分析

经过以上分析可知,利用中心一圈柱的直径/周期比变化实现单模工作的大直径/周期比金属柱 EBG 结构是完全可行的,接下来研究端面模场分布. b/Λ 决定了该结构的基模工作频率,而 $d > b$ 时,采用大 b/Λ 比结构会出现多模. 因此一阶复合缺陷 EBG 结构要实现单模工作的条件为 $b > d$,且 b/Λ 也应该在一定范围内. 图 5、图 6 分别给出了正方、六角晶格一阶复合缺陷型金属 EBG 结构在 $d/\Lambda =$

0.3, b/Λ 分别为 0.6, 0.8 时对应的最低阶和次高阶模场分布. 可以看出在 b/Λ 为 0.8 时,该结构不存在限制在中心区域的模场;而当 b/Λ 为 0.6 时,仅存在基模为中心限制模式,次高阶模则限制在外层. 在传统结构中,当 $b = d$, $b/\Lambda = 0.6$ 时该结构的次高阶模式也会限制在缺陷区域,因此引入复合缺陷结构后,其模式已发生变化,出现了 b/Λ 较大时依然可以存在单模的情况. 但是,如果外层 d/Λ 仍然为 0.3,其制作难度还是没有降低,还需要能够将外圈 d/Λ 的比值增大以降低加工难度,增加制作容差.

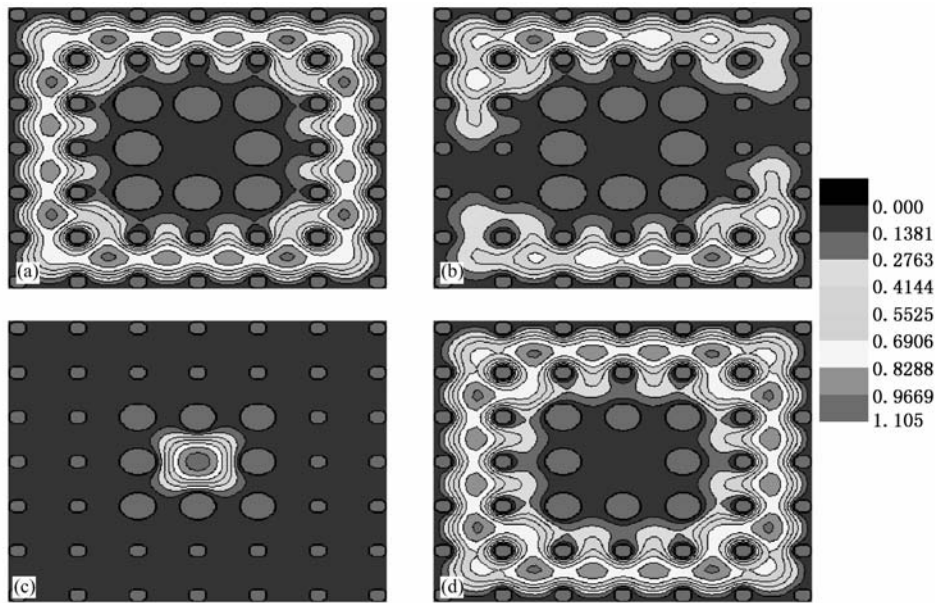


图5 正方晶格一阶复合缺陷型金属 EBG 结构模场图 $d/\Lambda = 0.3, b/\Lambda = 0.8$: (a) 最低阶模式; (b) 次高阶模式. $b/\Lambda = 0.6$: (c) 最低阶模式; (d) 次高阶模式

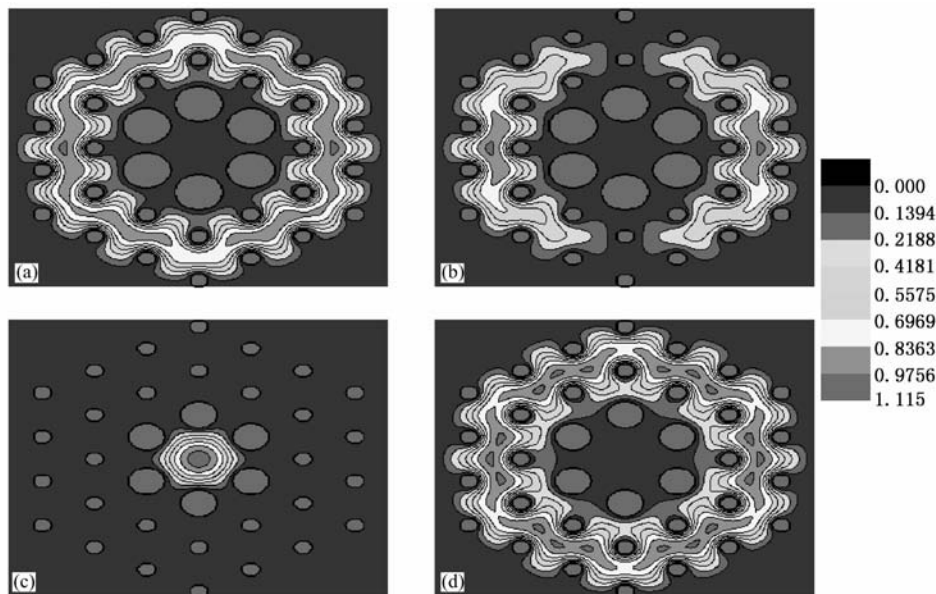


图6 六角晶格一阶复合缺陷型金属 EBG 结构模场图 $d/\Lambda = 0.3, b/\Lambda = 0.8$: (a) 最低阶模式; (b) 次高阶模式, $b/\Lambda = 0.6$: (c) 最低阶模式; (d) 次高阶模式

从 3.1 节知,一阶复合缺陷型 EBG 结构在 b/Λ 较大时,选择较大的 d/Λ 可获得单模.为此,选择 $b/\Lambda = 0.9$,改变 d/Λ 比值,可以得到图 7 与图 8 所示模场图.图 7 给出了正方晶格一阶复合缺陷型金属 EBG 结构在 $b/\Lambda = 0.9, d/\Lambda = 0.6$ 及 0.7 时的最低阶模式和次高阶模式模场图;图 8 给出了六角晶格一阶复合缺陷型金属 EBG 结构在 $b/\Lambda = 0.9, d/\Lambda = 0.6$ 及 0.7 时的最低阶模式和次高阶模式模场图.

图示结果与频率分析的结论相吻合,说明 b/Λ 越大,允许单模工作时的 d/Λ 也越大,并且对于一定的 b/Λ 而言,单模工作的 d/Λ 也必须一定的范围内.综合频率分析和模场分析的结果,构造单模工作的复合缺陷一阶中心缺陷型金属 EBG 结构,可以选用 $b/\Lambda = 0.9, d/\Lambda = 0.6$ 的结构参数.此时可以充分的利用大直径/周期比所带来的优点,并能够保证在整个器件中只有单模工作.

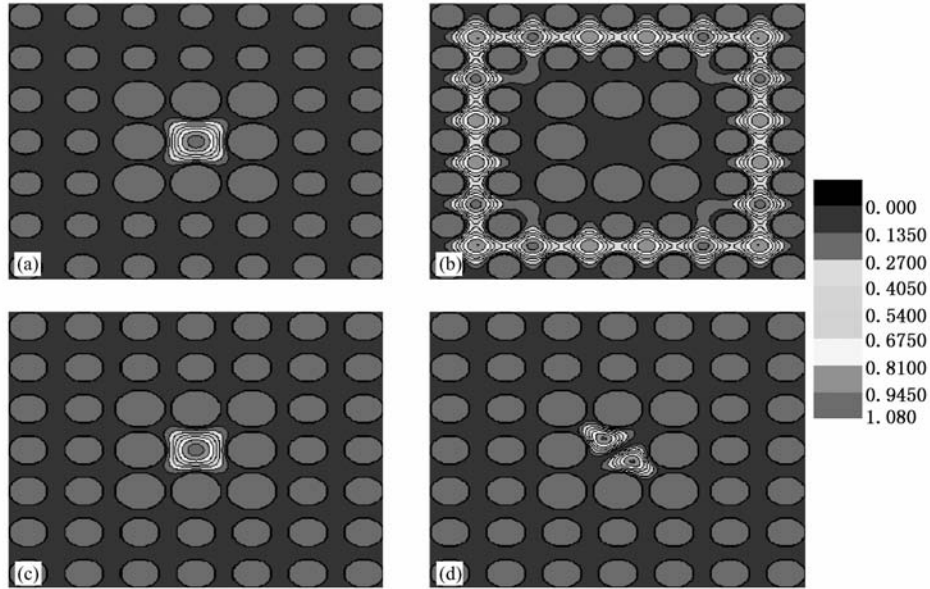


图 7 正方晶格一阶复合缺陷型金属 EBG 结构模场图 $b/\Lambda = 0.9, d/\Lambda = 0.6$: (a) 最低阶模; (b) 次低阶模. $d/\Lambda = 0.7$: (c) 最低阶模; (d) 次低阶模

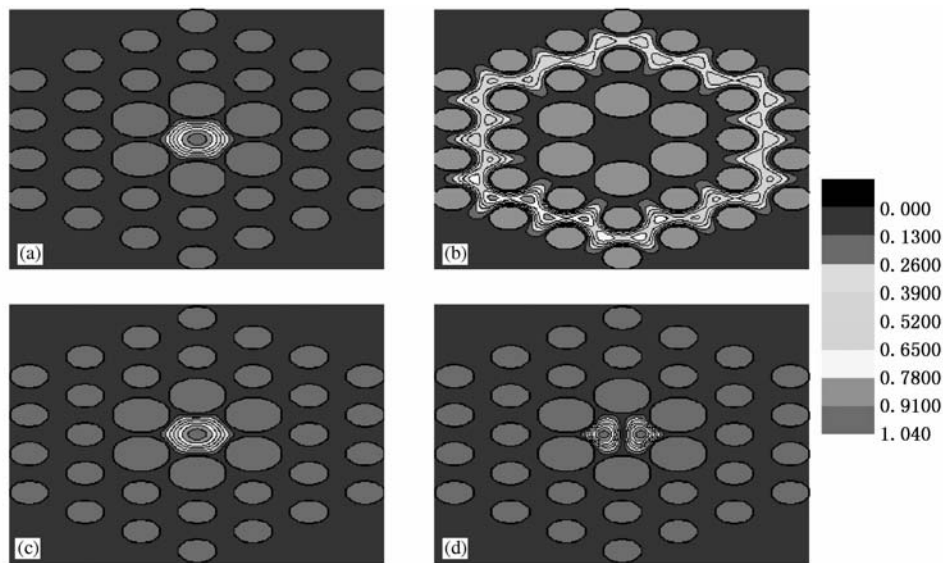


图 8 六角晶格一阶复合缺陷型金属 EBG 结构模场图 $b/\Lambda = 0.9, d/\Lambda = 0.6$: (a) 最低阶模; (b) 次高阶模. $d/\Lambda = 0.7$: (c) 最低阶模; (d) 次高阶模

3.3. Q 值分析

固定 d/Λ 值, 改变 b/Λ , 可以得到不同 b/Λ 比值下, 六角晶格一阶复合缺陷型金属 EBG 谐振腔 Q 值的变化. 图 9 给出了 $d/\Lambda = 0.3$ 以及 0.6 时, 该谐振腔 Q 值随 b/Λ 改变的情况. 可以看出, 当 $d/\Lambda = 0.3$ 时, b/Λ 小于 0.7 时 Q 值随 b/Λ 变大而增大; 但是当 b/Λ 大于 0.7 时, Q 值发生了突降, 说明此时模

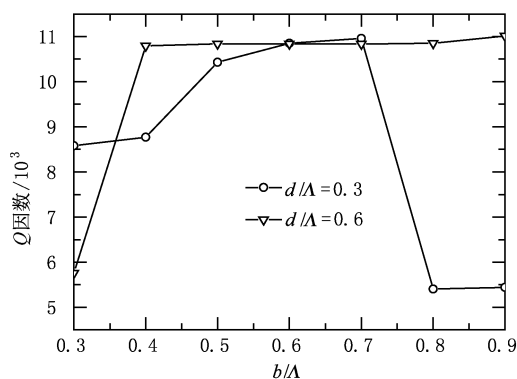


图9 固定 d/Λ , 六角晶格金属 EBG 复合缺陷结构中 Q 值随 b/Λ 变化图

式已经不再限制在缺陷区域; 当 $d/\Lambda = 0.6$, b/Λ 小于 0.4 时, Q 值随 b/Λ 增大而增大, 但 b/Λ 大于 0.4 时, Q 值则基本保持不变, 这说明其基模模场已经稳定, 不再随 b/Λ 改变而变化. 这些结论与上面频率分析以及模场分析的结论是一致的.

4. 结 论

本文提出了一阶复合缺陷型金属 EBG 谐振腔, 通过对该结构的理论分析, 指出大直径/周期比金属柱结构, 可保证该谐振腔工作在单模, 且次低阶模模场离中心区域更远, 可制作理想的单模器件. 基于这种复合缺陷结构所形成的 EBG 谐振腔可以提供更大的容差空间. 因此, 该结构的优点在于: 1) 高 Q 值; 2) 利用更大直径的金属柱实现相同工作频率, 提高了加工的冗余度. 该谐振腔单模工作条件可以放宽到外圈金属柱直径与周期之比为 0.6 , 内圈金属柱直径与周期比为 0.9 , 而传统一阶缺陷金属谐振腔实现单模工作, 则要求金属柱直径与周期之比小于 0.3 .

- [1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Sirigiri J R, Kreischer K E, Machuzak J, Mastovsky I, Shapiro M A, Temkin R J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5628
- [4] Sirigiri J R, Shapiro M A, Temkin R J 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 258302
- [5] Smirnova E I, Mastovsky I, Shapiro M A, Temkin R J, Earley L M, Edwards R L 2005 *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **8** 91302
- [6] Choi E M, Marchewka C D, Mastovsky I, Sirigiri J R, Shapiro M A, Temkin R J 2006 *Phys. of Plasm.* **13** 023103
- [7] Smirnova E I, Carlsten B E, Earley L M 2008 *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Monterey USA, April 22—24, 2008, p85 (Piscataway: Inst. Of Elec. and Elec. Eng. Computer Society)
- [8] Vela G O, Miller M S, Grow R W, Baird J M 2006 *IEEE International Vacuum Electronics Conference*, Monterey USA, April 25—27, 2006, p425 (Piscataway: Inst. Of Elec. and Elec. Eng. Computer Society)
- [9] Jeon S, Jang Y M S, Jong K, Gun H, Park S 2005 *IEEE trans. on Plasm. Sci.* **33** 679
- [10] Jeon S G, Shin Y M, Jang K H, Han S T, So J K, Joo Y D, Park G S 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 021112
- [11] Zhang R, Li H, Cao J C, Feng S L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4618 (in Chinese) [张戎、黎华、曹俊诚、封松林 2009 物理学报 **58** 4618]
- [12] Wang W, Cao X Y, Wang S, Wang R, Zheng Q R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4708 (in Chinese) [王伟、曹祥玉、王帅、王瑞、郑秋容 2009 物理学报 **58** 4708]
- [13] Bai N F, Liu X, Xiao J B, Zhang M D, Sun X H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4933 (in Chinese) [柏宁丰、刘旭、肖金标、张明德、孙小菡 2005 物理学报 **54** 4933]

Composite defect electromagnetic band gap cavity

Bai Ning-Feng Hong Wei Sun Xiao-Han[†]

(*Research Center for Electronic Device & System Reliability, Southeast University Nanjing 210096, China*)

(Received 27 November 2009; accepted 17 August 2010)

Abstract

We demonstrate an approach to create a high Q factor two-dimensional (2D) electromagnetic band gap (EBG) structure with composite defects in the center of the structures. By theoretical calculation, we show that a single-mode 2D EBG structure can be created with different ratios of diameter, d , to the lattice period, Λ , in this structure. This structure can achieve high Q factor and single mode operation with large d/Λ of the defect at the first circle around the removed rod in the center. With our structure, the single mode operation can be achieved within $d/\Lambda < 0.9$ at the defect rods and $d/\Lambda < 0.6$ at the others. In comparison, the condition of $d/\Lambda < 0.3$ should be strictly satisfied for the traditional design. These results provide very important guidelines for designing of the 2D EBG structure which can be used in traveling-wave tube device.

Keywords: electromagnetic band gap, composite defect, cavity, single mode

PACS: 84.40.Fe, 71.20.Tx

* Corresponding author. E-mail: xhsun@seu.edu.cn