

220 GHz三次谐波光子带隙谐振腔回旋管振荡器的研究*

黄丽萍^{1)2)†} 洪斌斌¹⁾²⁾ 刘畅³⁾ 唐昌建^{1)2)‡}

1)(四川大学物理科学与技术学院, 成都 610064)

2)(四川大学高能量密度物理及技术教育部重点实验室, 成都 610064)

3)(解放军后勤工程学院基础部, 重庆 400016)

(2013年10月28日收到; 2014年3月5日收到修改稿)

提出了一种220 GHz三次谐波光子带隙谐振腔回旋管振荡器的物理结构. 利用光子晶体高频带隙确定了回旋管高阶电磁模式类 TE_{63} 和三次电子回旋模的相互作用状态. 通过非线性理论, 研究了腔内类 TE_{63} 和类 TE_{92} 模的弱模式竞争, 得到了有利于回旋管三次谐波起振的工作条件和起振过程的非线性特征, 其结果与粒子模拟基本一致. 研究表明, 利用光子带隙谐振腔的禁带特征, 回旋管中高阶电磁模与高次电子回旋模能够发生有效的相互作用关系被得到证实.

关键词: 光子晶体谐振腔, 回旋管, 模式竞争, 粒子模拟

PACS: 84.40.Ik, 41.20.-q

DOI: 10.7498/aps.63.118401

1 引言

在毫米波源家族中, 回旋管是最具开发潜力的高功率微波器件, 利用高强度的脉冲磁场技术, 已经能够在THz频段产生kW级的输出, 在无损探测、精确制导、热核聚变的等离子体加热等方面具有重要的意义^[1-3]. 然而因受谐振腔小尺度的制约, 以及过模工作引起的模式竞争等困难的限制, 回旋管在频率、功率及效率等重要技术指标上难以兼顾提高. 同时, 由于回旋管的工作频率与磁场密切相关, 因而对于毫米波源, 其研究受到了很大的限制. 显然, 利用超尺度相互作用谐振腔, 实现回旋管的高阶横向模式工作, 提高工作频率; 实现高次电子回旋谐波下的有效运行, 降低磁场, 是解决回旋管高技术指标的关键性问题.

近年来, 受光子晶体独特电磁特性的启发, 许多学者将光子晶体带隙应用于新型微波毫米波电

路和器件的设计^[4-8]. MIT实验研究表明, PBGC (photonic-band-gap-cavity) 具有优秀的模式选择特征, 有望使器件能在高阶模上单模工作, 具有结构尺寸大、功率容量大、输入耦合器简单及腔体易于加工等优点^[9]. 同时, 采用高次谐波工作可以大大降低对磁场的要求. 由此, 本文试图利用光子带隙理论和回旋管的非线性理论, 通过对220 GHz三次谐波PBGC回旋管振荡器的研究, 探索高阶电磁模与高次回旋模有效互作用的可能性.

2 光子带隙谐振腔PBGC的模式选择

PBGC是通过在普通金属腔内填充中心缺陷(去除中心部分的金属圆柱)的理想2D正三角格子金属圆柱光子晶体结构形成的, 其横截面示意图如图1所示. 缺陷部分的内切圆半径为^[10,11]

$$R_e = \sqrt{ia} - r, \quad (1)$$

* 国家ITER专项(批准号: 2013GB107002)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: hliping@126.com

‡ 通讯作者. E-mail: tchangjian@scu.edu.cn

式中 i 由抽取金属柱子的数目决定, 当抽取 7 根时 $i = 3$. r 是金属圆柱的半径, a 是两金属圆柱间的中心距离, 如图 1 所示. 光子晶体全局带隙指频率落在带隙内的电磁波, 无论其传播方向如何, 都是被禁止传播, 就这一特性而言, 光子晶体表现出类似金属圆柱谐振腔的特性, 故可以将 PBGC 等效成一个半径为 R_e 的具有模式选择特性的金属圆柱谐振腔, TE_{mn} 模式下的本征谐振频率为

$$f_{mn} = cx'_{mn}/2\pi R_e, \quad (2)$$

式中, x'_{mn} 为 m 阶贝塞尔函数一阶导数 $J'_{mn}(x)$ 的第 n 个根. 将 (1) 式代入 (2) 式中得

$$f_{mn}a/c = 1 / \left[(2\pi/x'_{mn}) (\sqrt{i} - r/a) \right]. \quad (3)$$

由此, 如果给出光子晶体结构的参数和对应的频率范围, 就能够确定腔体内的模式. 如图 2 所示, TE 波在光子晶体的腔内具有 ①, ②, ③ 号等三个全局带隙区 [12]. 当器件设计在带隙区间 ① 时, 区间内的模式较多, 但对应的频率较高; 当器件设计在带隙区间 ② 时, 区间内模式较少, 但对应的频率较低; 当器件设计在带隙区间 ③ 时, 区间内模式较多, 且对应的频率较低. 综合以上考虑, 如果需要在高频区考虑, 则可选取带隙 ① 的边缘处, 这样可以充分利用窄带隙的特点, 模式较少, 频率较高. 利用 (3) 式, 当取 $r/a = 0.45$, 带隙范围为 $\Delta f = 218\text{—}231$ GHz. $a = 2.33$ mm 时, 归一化频率为 1.71, 对应的频率 $f = 220$ GHz.

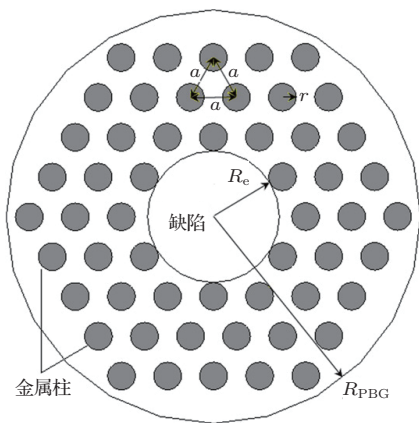


图 1 抽取 7 根柱子的基于二维正三角格子金属光子带隙谐振腔横截面示意图

由图 2 可知, 在上述参数条件下, 利用三维高频结构仿真软件 HFSS 在 200—250 GHz 的频率范围内对其本征模进行扫描, 在腔内只存在类 TE_{63} 和类 TE_{92} 两个模式, 其频率分别是 220.62 GHz 和 221.18 GHz, 如图 3 和图 4 所示, 而这两个模式的

邻近模式都没有出现. 这样, 高频带隙区 ① 之外的电磁模式便得到了很好地过滤, 光子带隙谐振腔也成功实现了预期的模式选择.

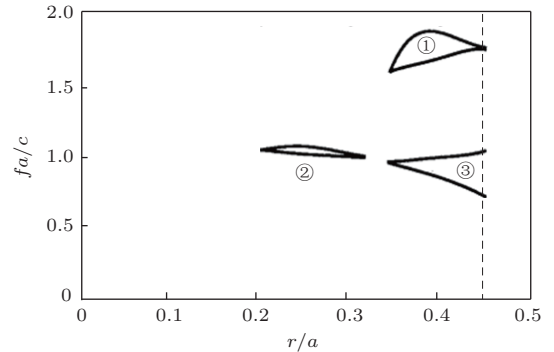


图 2 光子晶体 TE 波全局带隙图 (横坐标 r/a 是半径周期比, 纵坐标 fa/c 是归一化频率)

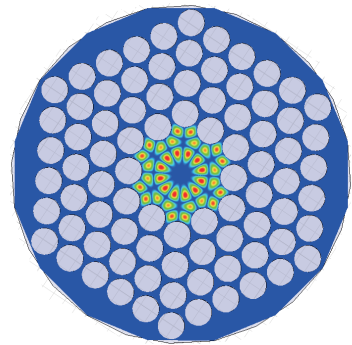


图 3 $r/a = 0.45$, $a = 2.33$ mm 时光子带隙谐振腔中类 TE_{63} 模式电场幅值横向分布图

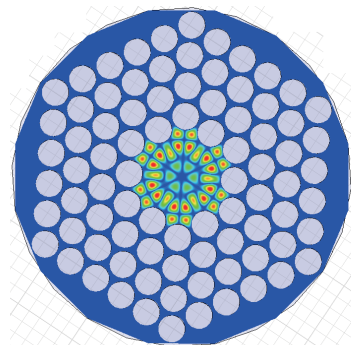


图 4 $r/a = 0.45$, $a = 2.33$ mm 时光子带隙谐振腔中类 TE_{92} 模式电场幅值横向分布图

3 类 TE_{63} 与类 TE_{92} 的模式竞争

利用等效半径理论将 PBGC 等效成具有模式选择特性的普通金属谐振腔是一种良好的近似, 其普通金属谐振腔与 PBGC 仅在本征频率上略有差别, 但模式分布完全一致. 由此可以建立光子带隙

谐振腔回旋管的自治非线性理论模型^[13]以分析腔内的注-波相互作用过程. 根据波与电子注的相互作用过程, 可以知道, 两个不同转向的角向行波场与电子注之间的相互作用差别仅来源于注-波耦合系数 C_0^\pm . 注-波耦合系数是决定着注-波相互作用有效性的关键物理量, 其数学表达式为^[14-16]

$$C_0^\pm = x_{mn}'^2 C_{mn}^2 J_{m \mp s}^2 (\bar{k}_{mn} \bar{R}_0), \quad (4)$$

其中, \bar{k}_{mn} 为归一化角波数, \bar{R}_0 为归一化电子注半径, s 为谐波次数, k_{mn} 是横向波数, 归一化系数

$$C_{mn} = \left[\sqrt{\pi (x_{mn}'^2 - m^2)} J_m (k_{mn} R_e) \right]^{-1} [17].$$

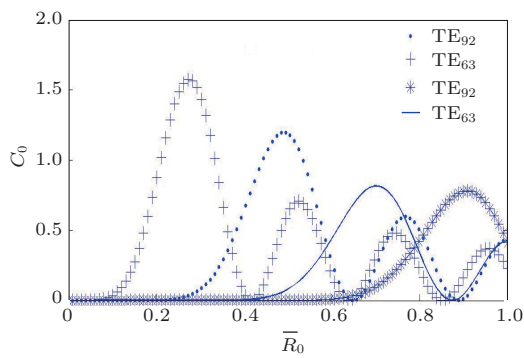


图5 $s = 3$ 时, 类 TE₆₃, 类 TE₉₂ 模式的注-波耦合系数随归一化电子注半径的变化

类 TE₆₃ 和类 TE₉₂ 两个模式对于电子回旋三次谐波 ($s = 3$) 的耦合系数随归一化电子注半径 \bar{R}_0 的变化关系如图 5 所示. 其中, TE₆₃⁺, TE₆₃⁻, TE₉₂⁺, TE₉₂⁻ 分别表示类 TE₆₃ 和类 TE₉₂ 的右旋和左旋角向行波. 由图 5 可以看出, 对于电子回旋三次谐波, 当 $\bar{R}_0 = 0.2$ 时, C_{63}^+ 最大且 C_{92}^+ 为零, 由上述的分析

可知, 比较相邻模式的注-波耦合系数, 选择合适的 \bar{R}_0 , 可以抑制模式间的竞争.

4 注-波相互作用

PBGC 回旋管的基本工作参数为表 1 所示. 根据此表的设计参数, 可以计算出图 2 中③号带隙区的频率范围为 90—140 GHz. 如果取类 TE₆₃ 的三次谐波为工作模式时, 则一次谐波 (73.4 GHz) 与二次谐波 (146.8 GHz) 均不在③带隙区内, 因而一、二次谐波失去生长的条件而不能起振, 这就有效避免了低次谐波的竞争, 以保证类 TE₆₃ 处于三次谐波下的运行.

根据注-波相互作用理论^[12]编写计算程序, 得到了 PBGC 回旋管在表 1 的技术参数下, 起振曲线如图 6 所示. 由图中可以看到, 类 TE₆₃ 的饱和输出功率约为 60 kW, 换能效率为 5% 左右, 而竞争模式类 TE₉₂ 的输出功率几乎可以忽略.

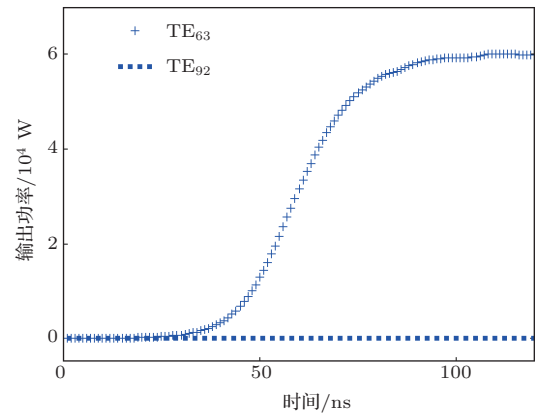


图6 $s = 3$ 时, 类 TE₆₃, 类 TE₉₂ 模式输出功率随时间的变化

表 1 光子晶体带隙谐振腔 PBGC 工作参数

腔长/mm	(工作电压/电流)/(kV/A)	模式	磁场/T	Q	频率/GHz	纵横速度比	谐波数
30	200/6	类 TE ₆₃	4	9000	220	1.8	3

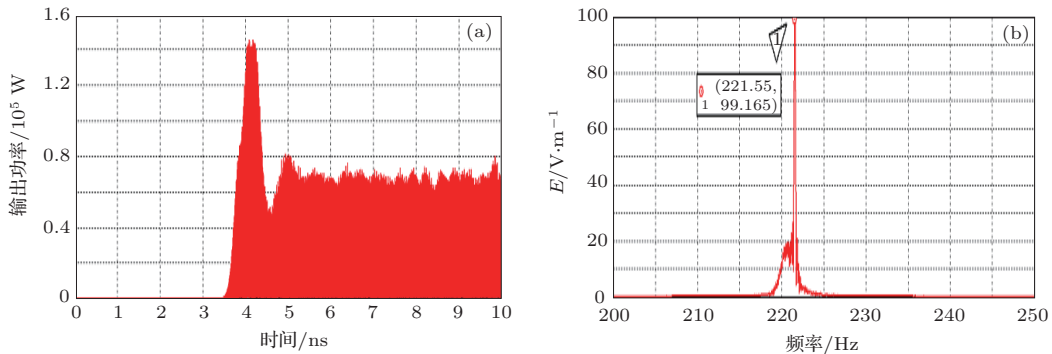


图7 (a) 粒子模拟输出功率随时间的变化图; (b) 粒子模拟输出功率随时间的幅频特性图

利用 CST 软件的 PIC(Particle-in-cell) 模块, 模拟仿真 PBGC 的带电粒子与电磁场自洽相互作用过程. 图 7(a) 是输出功率随时间的变化情况, 平均输出功率为 60 kW, 输出功率与自洽非线性计算结果基本一致. 图 7(b) 是谐振腔中场的频谱图, 由图可以看出回旋管的振荡频率为 221.55 GHz.

5 结 论

研究表明, 通过研究 PBGC 的带隙结构特征, 能够使 PBGC 回旋管有效工作在三次回旋模. 同时, 通过调整耦合系数即电子束的位置可以有效地解决带隙内的弱模式竞争. 利用非线性理论和粒子模拟研究了 PBGC 回旋管的起振过程, 其结果基本一致的. 目前的研究认为, PBGC 回旋管通过高次电子回旋模和高阶电磁模式的协同引入, 可望从根本上改变回旋管的工作状态, 并在降低工作磁场、提高工作频率和功率容量等多方面具有较强的支持.

参考文献

- [1] Granatstein V L, Levush B, Danly B G, Parker R K 1997 *Plasma Science, IEEE Transactions on* **25** 1322
- [2] Chu K R 2004 *Reviews of Modern Physics* **76** 489
- [3] Bratman V, Glyavin M, Idehara T, Kalynov Y, Luchinin A, Manuilov V, Zapevalov V 2009 *Plasma Science, IEEE Transactions on* **37** 36
- [4] Shapiro M A, Brown W J, Mastovsky I, Sirigiri J R, Temkin R J 2001 *Physical Review Special Topics-Accelerators and beams* **4** 042001
- [5] Smirnova E I, Kesar A S, Mastovsky I, Shapiro M A, Temkin R J 2005 *Physical review letters* **95** 074801
- [6] Sirigiri J R, Kreisler K E, Machuzak J, Mastovsky I, Shapiro M A, Temkin R J 2001 *Physical Review Letters* **86** 5628
- [7] Cui N D, Liang J Q, Liang Z Z, Wang W B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 034215
- [8] Feng S, Wang Y Q 2011 *Chin. Phys. B* **20** 054209
- [9] Smirnova E I, Chen C, Shapiro M A, Sirigiri J R, Temkin R J 2002 *Journal of Applied Physics* **91** 960
- [10] Liu C, Luo Y T, Tang C J, Liu P K 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8174 (in Chinese)[刘畅, 罗尧天, 唐昌建, 刘濮鲲 2009 物理学报 **58** 8174]
- [11] Hao B L, Liu P K, Tang C J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1862 (in Chinese)[郝保良, 刘濮鲲, 唐昌建 2006 物理学报 **55** 1862]
- [12] Smirnova E I, Chen C 2001 *Massachusetts Institute of Technology*
- [13] Danly B G, Temkin R J 1986 *Physics of Fluids* **29** 561
- [14] Gaofeng L, Xiaoan C, Changjian T 2011 *Journal of Physics D: Applied Physics* **44** 295102
- [15] Luo Y T, Tang C J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014104 (in Chinese) [罗尧天, 唐昌建 2011 物理学报 **60** 014104]
- [16] Yu S, Li H F, Xie Z L, Luo Y 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2459 (in Chinese) [喻胜, 李宏福, 谢仲怜, 罗勇 2000 物理学报 **49** 2459]
- [17] Fliflet A W 1986 *International Journal of Electronics Theoretical and Experimental* **61** 1049

Study on 220 GHz third harmonic photonic band gap cavity gyrotron oscillator*

Huang Li-Ping^{1)2)†} Hong Bin-Bin¹⁾²⁾ Liu Chang³⁾ Tang Chang-Jian^{1)2)‡}

1) (*College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

2) (*Key Laboratory of High Energy Density Physics and Technology of Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610064, China*)

3) (*Department of Foundation studies, Logistics Engineering University, Chongqing 400016, China*)

(Received 28 October 2013; revised manuscript received 5 March 2014)

Abstract

A design of 220 GHz third harmonic photonic band gap cavity gyrotron oscillator is proposed. Higher photonic crystal band gap is used to ensure the interaction between the high order electromagnetic mode (TE₆₃-like) and the third harmonic electron cyclotron mode in gyrotron. The weak mode competition between TE₆₃-like and TE₉₂-like mode is studied by using a nonlinear theory, and the working conditions that ensure the start-up of the gyrotron to work in the third harmonic mode, as well as the nonlinear characteristics during the start-up process, are achieved. These results are in good agreement with the PIC (particle-in-cell) simulation. Our study shows that by using the photonic crystal as the high-frequency structure of gyrotron, high-order electromagnetic modes can interact with harmonic electron cyclotron modes efficiently.

Keywords: photonic crystal cavity, gyrotron, model competition, particle simulation

PACS: 84.40.Ik, 41.20.-q

DOI: 10.7498/aps.63.118401

* Project supported by the National Magnetic Confinement Fusion Science Program, China (Grant No. 2013GB107002).

† Corresponding author. E-mail: hliping@126.com

‡ Corresponding author. E-mail: tchangjian@scu.edu.cn