

等离子体填充金属光子晶体 Cherenkov 辐射源模拟研究

傅涛 欧阳征标

Simulation of cherenkov radiation source in a plasma-filled metallic photonic crystal

Fu Tao Ouyang Zheng-Biao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 074208 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.074208

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074208>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

表层厚度渐变一维耦合腔光子晶体的反射相位特性及其应用

Reflection phase characteristics and their applications based on one-dimensional coupled-cavity photonic crystals with gradually changed thickness of surface layer

物理学报.2016, 65(7): 074201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074201>

基于磁光子晶体的低损耗窄带 THz 滤波器

Low loss and narrow-band THz filter based on magnetic photonic crystals

物理学报.2016, 65(2): 024210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024210>

基于磁流体光子晶体的可调谐近似零折射率研究

Tunable near-zero index of self-assembled photonic crystal using magnetic fluid

物理学报.2016, 65(1): 014213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014213>

混合准周期异质结构的带隙补偿与展宽

Photonic bandgap compensation and extension for hybrid quasiperiodic heterostructures

物理学报.2016, 65(1): 014214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014214>

一种高增益低雷达散射截面的新型圆极化微带天线设计

A novel circularly polarized patch antenna with low radar cross section and high-gain

物理学报.2015, 64(22): 224219 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224219>

等离子体填充金属光子晶体 Cherenkov 辐射源模拟研究*

傅涛¹⁾²⁾ 欧阳征标^{1)†}

1) (深圳大学电子科学与技术学院, 深圳大学太赫兹技术研究中心, 深圳市微纳光子信息技术重点实验室, 深圳 518060)

2) (深圳大学光电工程学院, 光电子器件与系统(教育部/广东省)重点实验室, 深圳 518060)

(2015年11月10日收到; 2016年1月8日收到修改稿)

等离子体填充能够明显提高真空电子器件的效率和功率, 研究等离子体填充器件具有重要的科学价值. 本文基于对等离子体填充金属光子晶体慢波结构色散特性的分析, 利用粒子模拟方法展示了等离子体填充慢波结构中的注波相互作用过程. 重点研究了慢波结构中中场分布特性、等离子体密度和外部工作条件对频率及输出功率的影响. 研究发现, 填充一定密度等离子体后, 慢波结构内纵向和横向电场强度明显增大, 注波相互作用增强, 输出频率受等离子体影响不大. 金属光子晶体结构具有的频率选择特性使器件工作于 TM_{01} 模态. 阴极电压增加使输出功率增大, 频率略有增加. 引导磁场增加使输出功率先增大后减小, 而频率基本不受影响. 等离子体填充后器件的输出功率上升, 当增加压强至 100 mTorr (1 mTorr = 0.133 Pa) 时, 输出功率提高约 20%, 但只有适当密度下才有较好的角向场分布. 通过理论与模拟相结合, 发现填充一定密度的等离子体能够提高器件输出功率和效率, 为发展新型高功率毫米波振荡辐射源奠定了理论和仿真基础.

关键词: 等离子体填充, 金属光子晶体, Cherenkov 辐射, 慢波结构

PACS: 42.70.Qs, 52.65.-y, 52.40.Fd, 11.55.Fv

DOI: 10.7498/aps.65.074208

1 引言

等离子体是一种各向异性色散介质, 其特性可通过调节工作参数来改变^[1]. 光子晶体是一种具有周期介质结构的特殊材料, 具有与构成介质有关的光子带隙是它的突出特性^[2,3]. 因此, 在等离子体填充的介质光子晶体中, 通过调节等离子体密度、填充率、碰撞频率以及外部磁场的大小等都可以改变禁带的位置和宽度^[4-8]. 进一步, 对于等离子体填充介质缺陷结构光子晶体, 缺陷层的介电常数及等离子体参数既能影响缺陷模式峰值的大小, 也能影响缺陷模的频率而实现调谐^[9]. 同理, 等离子体对于金属光子晶体缺陷结构也有调谐作用^[10,11].

在真空电子领域, 等离子体填充能有效改善

相对论电子器件的辐射特性. 研究表明等离子体填充的相对论返波管不仅功率提高了 8 倍、效率提高到 40%^[12], 而且辐射信号的频率也随等离子体密度的增加而上移^[13]. 等离子体填充的高功率微波器件相比于真空情况下具有更高的相互作用效率, 并提出了相关理论来解释此种现象^[14]. Wang 等^[15,16] 曾对等离子体加载的自由电子激光进行了深入的理论和实验研究, 发现了一个最佳的等离子体密度, 能够使器件的辐射功率和效率得到较大的提高.

随着对光子晶体特性的了解, 人们发现金属光子带隙结构慢波结构能解决非金属介质结构的表面电荷沉积影响器件工作的稳定性等问题, 金属光子晶体结构逐渐被应用于构建真空电子波源的慢波结构^[17-20]. 我们曾对等离子体填充的二维金属

* 国家自然科学基金(批准号: 61275043)、国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 61501302, 61307048)和深圳市科信局(批准号: CXB201105050064A)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zbouyang@szu.edu.cn

光子晶体腔体的模场特性进行了研究, 结果表明, TM_{01} 工作模式的电磁场能够被很好地限制在金属柱构成的腔体内^[21]; 并通过研究等离子体填充的金属光子晶体慢波结构的色散特性, 发现填充一定密度的等离子体对其工作频率有一定的影响^[22]. 基于上述研究基础, 本文提出了等离子体填充金属光子晶体慢波结构的方案, 通过真空区域填充等离子体以提高注波相互作用的效率, 利用三维粒子仿真模拟软件构建物理模型, 重点研究等离子体填充的慢波结构内注波相互作用场的物理特性, 分析阴极电压、引导磁场强度以及等离子体密度对高功率毫米波源的频率和功率的影响, 为发展新型高功率毫米波振荡辐射源提供仿真基础.

2 物理模型及色散特性

图 1 给出了 PIC 模拟物理模型的二维切面图, 其中黄色代表理想导体, 绿色为慢波结构腔体内填充的氩气. 左图中阴极发射的电子注在引导磁场 ($B = 4 \text{ T}$) 的作用下进入内径 $r_{in} = 6.3 \text{ mm}$ 的

盘荷加载金属光子晶体慢波结构并与其进行注波相互作用, 在右侧输出端口位置测量相互作用产生的电磁波, 结构四周由吸收边界包围以吸收辐射的电磁波. 图 1 中, 右图为两圈金属柱构成的三角晶格光子晶体腔体, 内圈金属柱沿半径 $R_{in} = 7.6 \text{ mm}$ 的圆均匀分布. 其中, 晶格常数 $a = 3.8 \text{ mm}$, 金属杆半径 $r = 0.5 \text{ mm}$.

基本物理模型是, 强流相对论电子注被注入到中性气体中, 使之电离为等离子体, 这些等离子体在 Cherenkov 辐射场作用下产生受迫振动, 进而产生与 Cherenkov 辐射相干的二次辐射, 从而会提高腔内的场强度和输出功率. 物理上, 等离子体的产生过程分为三部分: 电子碰撞电离、电子的雪崩及离子的碰撞电离. 电子注中电子碰撞中性气体, 产生正离子和次级电子, 在适当条件下, 这两种次级粒子都会使更多的气体分子电离, 引发雪崩现象. 对于低压气体, 雪崩过程一般可以忽略. 对于低能量的离子, 其对电离的贡献可以忽略. 所以, 对于低压的氩气, 本文主要考虑电子碰撞对电离的贡献.

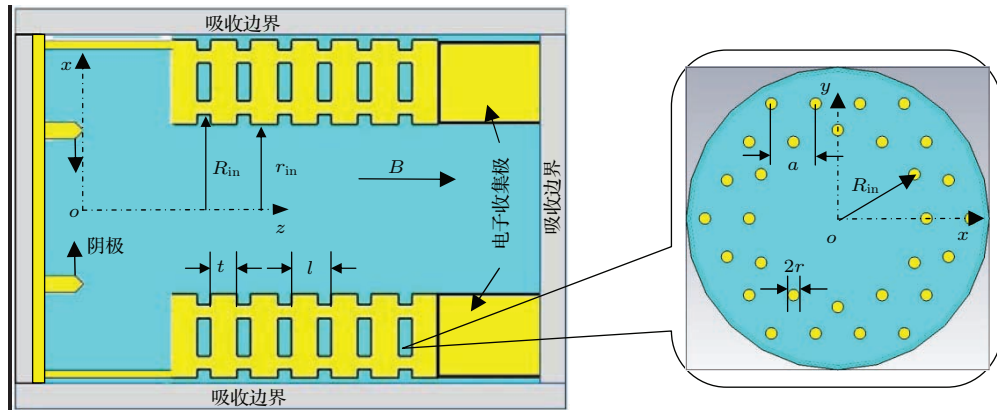


图 1 (网刊彩色) 三维 PIC 模拟模型简图

Fig. 1. (color online) The sectional schematic view of the simulated slow-wave structure.

图 1 中, 内部气体被阴极发射的高压电子束电离, 电离产生的等离子体密度 n_p 与气体的压强 P 、电离电压 V (即阴极电压) 和电流 I 密切相关:

$$I = cn_p e s \sqrt{1 - \left(1 + \frac{eV}{mc^2}\right)^{-2}}, \quad (1)$$

其中, e , s , m 和 c 分别代表单个电子的电荷量、阴极发射截面面积、单个电子的质量和真空光速. 为了分析稳定系统中慢波结构的辐射特性, 下文在未说明情况时 $P = 50 \text{ mTorr}$ ($1 \text{ mTorr} = 0.133 \text{ Pa}$), $V = 550 \text{ kV}$, $I = 2 \text{ kA}$. 盘荷加载慢波结构的金属

膜片厚度 $t = 2.0 \text{ mm}$, 周期长度 $l = 3.0 \text{ mm}$, 周期数为 12, 以阴极发射面为 z 轴 0 点, 此时慢波结构长度 $z_s = 36 \text{ mm}$ ($4\text{--}40 \text{ mm}$).

图 2 为有无等离子体时慢波结构的色散曲线. 通过对比发现, 当填充等离子体密度 $\omega_p = 1 \times 10^{10} \text{ rad/s}$ 时 (相对填充密度较小), 相同波矢下的频率略有升高, 但差别不大. 图中直线 AB 为 550 kV 相对论电子注的色散线. 由于电流密度大, 慢空间电荷波效应的色散关系表示为^[23]

$$\omega = k_z v_e - \omega_{pe}, \quad (2)$$

式中, v_e 为电子速度, ω_{pe} 为等离子体振荡角频率. 直线 AB 与等离子体填充色散曲线的交点 B 即为进行 Cherenkov 互作用的频点. 此时, 波矢 k_z 、频率 f 分别位于 10.126 cm^{-1} 和 35.4 GHz 附近.

在做 PIC 模拟时, 选择电子注的色散线与慢波结构的色散曲线交于图 2 中 TM_{01} 模的 π 模附近, 则此模式将被激励. 从物理机理上看, 这就是要使电子注的辐射模式与慢波结构的传播模式在频率和波矢上实现匹配, 以使电子注辐射能存储于慢波结构中, 最终通过慢波结构输出端输出辐射波.

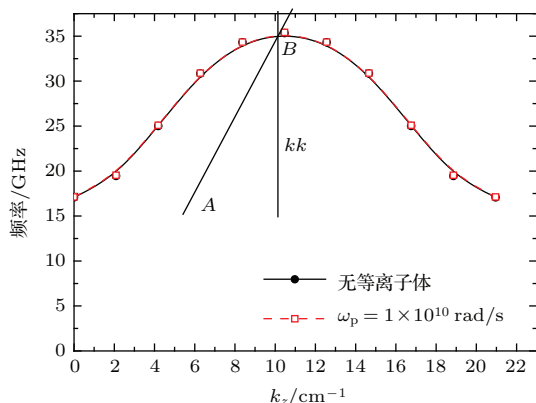


图 2 有无等离子体填充金属光子晶体慢波结构色散曲线
Fig. 2. Comparison of metal-photonic-crystal slovo-wave structure with and without plasma.

3 结果分析

3.1 慢波结构内场特性分析

粒子模拟中, 在慢波结构表面 $(x, y) = (4.975, 0) \text{ mm}$ 处设置一条沿 z 轴方向的观察线, 记录 $t = 20 \text{ ns}$ 时刻的 E_z 电场强度在线段上的变化, 并对电场进行空间傅里叶变换. 在 $z = 2.45 \text{ cm}$ 处设置沿 x 轴观察线, 可以得到电场沿 x 轴分布. 在 $(x, y, z) = (6.3, 0, 6-7) \text{ mm}$ 观察电场随时间的变化.

为了对比相同时刻和位置有无等离子体填充情况下的电场分布特性, 图 3 (a) 给出了 E_z 场强沿 z 轴的分布, 从图中可以看出, 相对于无等离子体填充情况, 有等离子体填充后的电场场强峰值从 46.34 MV/m 增大至 79 MV/m , 有明显增强. 对图 3 (a) 所示的电场进行空间傅里叶变换得相互作用波矢 $k_z = 10.193 \text{ cm}^{-1}$, 与图 2 中 B 点对应的波矢值基本一致. 注意到 π 模点的波矢数值为 $\pi/l = 10.4 \text{ cm}^{-1}$, 可知该点位于 π 模附近. 此外, 对于图 3 (a) 显示的结果可以从物理上做如下理

解. 设欧姆损耗可以忽略, 则谐振腔的品质因子为 $Q = \omega W/P_r$, 其中 ω 为波的频率, W 为腔的储能, P_r 为辐射功率. 品质因子越高, 则辐射场强度相对于谐振腔中的场的强度越弱, 由此解释了图 3 (a) 中腔中的场强比输出端的场强大很多的原因. 由于谐振腔存在辐射损耗和欧姆损耗, 谐振腔中的场不会始终增长, 最后在电子注交给谐振腔的功率等于各种损耗时, 谐振腔内的场达到一个稳定状态, 同时, 输出辐射场也达到一个稳定值. 这就解释了为什么所研究的结构能实现稳定的辐射.

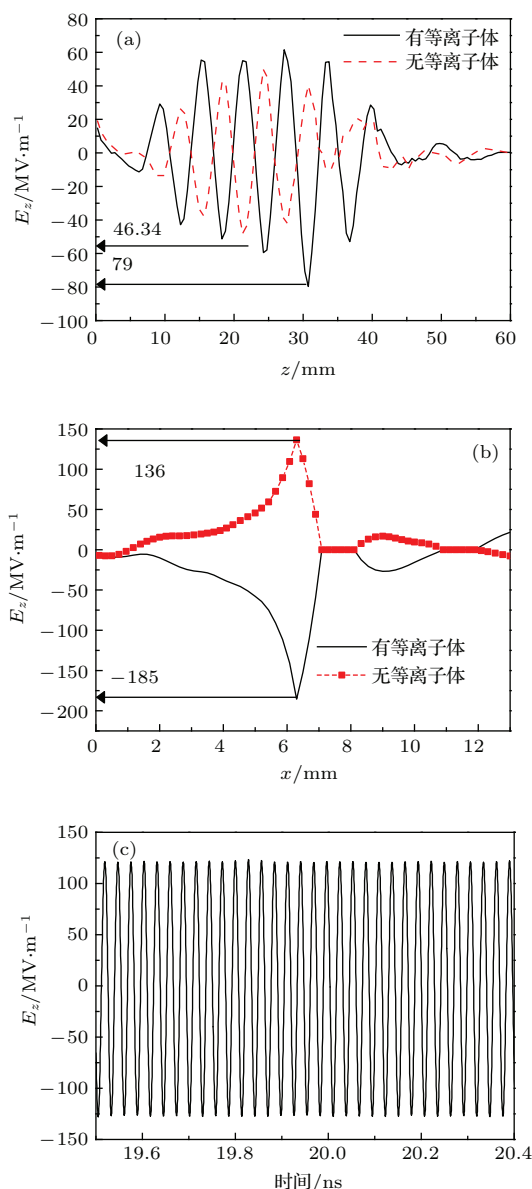


图 3 慢波结构内 E_z 场特性: (a) 沿 z 轴场分布; (b) 沿 x 轴场分布; (c) 时间波形
Fig. 3. E_z Field properties in the slovo-wave structure: (a) Field intensity versus z ; (b) field intensity versus x ; (c) field intensity versus time.

图 3(b) 给出了沿 x 轴方向的电场幅值分布, 相对于无等离子体填充情况, 填充等离子体后的最大电场幅值从 136 MV/m 增加到 185 MV/m, 且当 $x > 6.3$ mm 后电场幅值迅速降低. 进一步证明了等离子体填充能够加强慢波场幅值, 提高相互作用效率, 且电场被很好地限制在光子晶体腔体内.

另外, 从图 3(a) 和图 3(b) 可以看到, 在初始阶段, 即在腔的输入端口处, 有无等离子体, 场的符号相同, 但很快两者反相, 并在很长的空间内维持反相. 该现象可以这样理解: 等离子体的带电粒子有一定的惯性, 导致腔中的场跟着出现一个相位滞后, 由于该惯性是确定的, 因此滞后的相位也是一个常数, 在所使用的参数条件下, 该滞后相位刚好是 180° .

图 3(c) 给出了随时间变化的电场波形图, 对其做傅里叶变换得工作频率 $f = 35.5$ GHz, 该频率和图 2 中电子注与色散曲线交点的频率基本一致 (35.4 GHz). 以上结果表明, 等离子体填充能有效提高注波相互作用的效率, 模拟所得结果与理论分析所得结果基本一致.

3.2 阴极电压和引导磁场强度对辐射特性的影响

为了得到稳定的输出功率及频率, 防止过饱和现象的发生, 下面在优化周期单元数 ($N = 9$) 的基础上, 对阴极电压、引导磁场和等离子体密度变化对频率和功率的影响进行了系统研究.

图 4(a) 给出了阴极电压对慢波器件工作频率和输出功率的影响. 随着工作电压的升高, 慢波器件的工作频率略有增大. 这一现象可以从方程 (2) 得到解释. 同时随着电压增加, 电子注的能量也随之增加, 因而功率也将提高. 图 4(b) 给出了器件工作频率和输出功率随约束磁场幅值大小的变化关系. 当外加磁场较低时, 外部磁场对电子注的约束能力弱, 电子不能克服其内部的空间电荷发散力, 使电子注的速度零散大, 质量较差, 器件的输出功率较低. 而当磁场增加后, 磁场对电子的约束力变大, 电子注的质量得到提升, 所以器件的输出功率增加. 当外部磁场大于 2.5 T 时, 功率逐渐下降, 主要原因是器件发生了回旋共振吸收现象, 影响了注波相互作用效率 [24,25]. 器件工作频率随磁场变化很小, 这与方程 (2) 相符合. 从方程 (2) 可以看到, 工作频率与腔内的波矢、电子注速度、电子注的 ω_{pe} 有关, 与磁场并无关系.

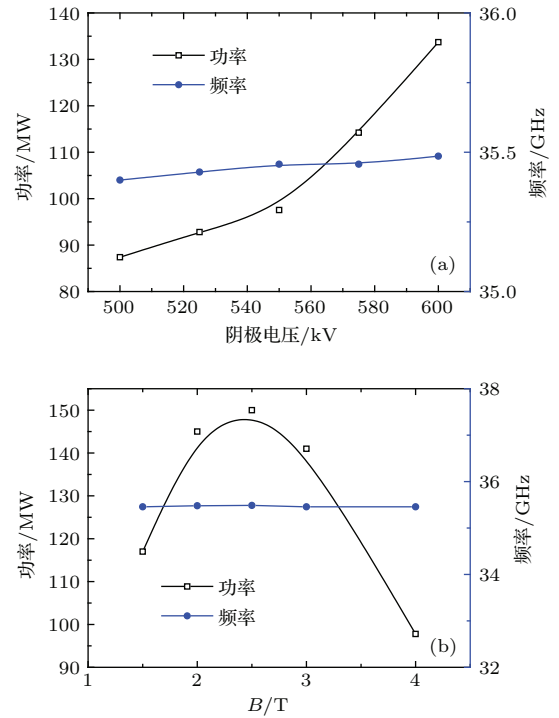


图 4 (a) 阴极电压和 (b) 外部磁场强度对辐射功率和频率的影响
 Fig. 4. Output power and frequency versus (a) the cathode voltage V and (b) the intensity B of the confining magnetic field.

3.3 等离子体密度对辐射特性的影响

图 5 为不同压强时, 慢波结构输出端口的输出功率及频率随压强的变化. 可以看出, 输出功率随气体压强增加快速上升, 以 $P = 80$ mTorr 为转折点, 进一步增加压强, 输出功率的增加趋于变缓. 说明随着压强升高, 等离子体密度逐渐趋于饱和从而使输出功率增加缓慢. 总体上看, 等离子体填充后器件的输出功率由无等离子体时的 86 MW 上升到 $P = 100$ mTorr 时的 104 MW, 提高约 20%. 图 5 还给出了频率随压强的变化规律, 结果表明输出微波信号的频率随压强升高有微弱提高, 但变化较小, 工作频率主要处于 35.5 GHz 附近, 与慢波结构电磁波色散特性理论分析得到的结果基本一致.

当 $P = 50$ mTorr 时, 电离氩气所产生的电流最终稳定在 $I = 30$ A 左右. 假设电离气体在相互作用区域均匀分布, 通过 (1) 式易知,

$$n_p = I^{-1}ces \left[1 - \left(1 + \frac{eV}{mc^2} \right)^{-2} \right]^{1/2} = 5.7215 \times 10^{15} \text{ m}^{-3},$$

转换成等离子体角频率 $\omega_p = 4.2661 \times 10^9$ rad/s.

同理, 当 $P = 80$ mTorr 时, $\omega_p = 6.033 \times 10^9$ rad/s. 可见, 随着压强的增加, 背景等离子体振荡频率有所增加, 但是输出频率却变化不大. 这是因为等离子体密度较小, 不能对器件的工作频率产生很大影响 [23]. 因此, 等离子体填充主要是提高器件的相互作用效率及输出功率.

为了进一步分析等离子体改善器件性能的机理, 图 6 给出了不同压强下 $x-y$ 平面包含电离电子在内的电子密度及其对应的电场 z 方向分布图. 从图中可以看出, 随着压强升高, 电离产生的等离子体密度和分布空间增大, 并且逐步覆盖高频结构注波相互作用空间. 填充一定密度的气体有利于改善 TM_{01} 模沿金属光子晶体慢波结构内部的角向场分

布的均匀性, 使电场被极好地限制在慢波结构表面, 进一步增强系统的注波相互作用.

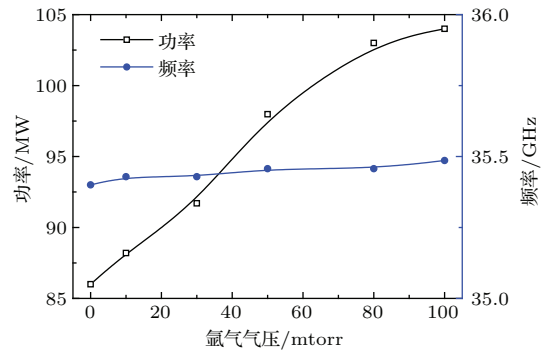


图 5 输出功率和频率随压强的变化

Fig. 5. Output power and frequency versus the argon pressure.

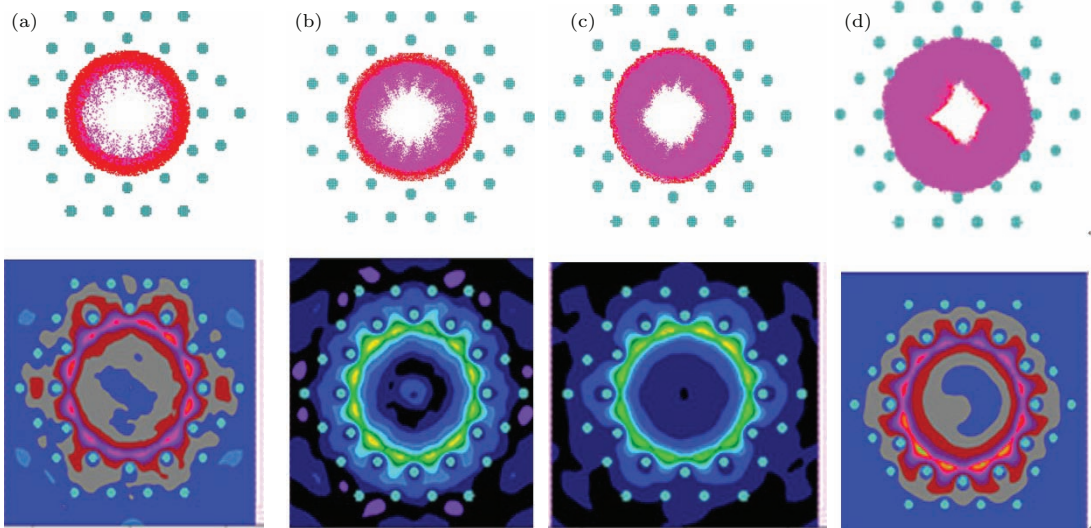


图 6 (网刊彩色) 不同压强下 $x-y$ 平面包含电离电子及对应电场分布图 (a) 0.5 mTorr; (b) 10 mTorr; (c) 50 mTorr; (d) 100 mTorr

Fig. 6. (color online) Distributions of electron and E_z field with different argon pressures: (a) 0.5 mTorr; (b) 10 mTorr; (c) 50 mTorr; (d) 100 mTorr.

4 结 论

本文构建了基于金属光子晶体慢波结构的注波相互作用三维粒子模拟物理模型, 研究了其中的注波相互作用的物理过程, 分析了在电子注的激励下, 结构的场分布特性、频率特性以及等离子体对注波相互作用的影响. 采用光子晶体结构构建的慢波结构具有良好的模式和频率选择特性, 使得器件能较好地工作于 TM_{01} 单模状态. 通过背景等离子体填充的相对论 Cherenkov 振荡器三维粒子模拟研究发现: 一定密度等离子体的引入能提高振荡器的输出功率和注波相互作用的效率, 使慢波结构内工作模

式的场分布更加均匀; 气体压强在一定范围内变化时, 输出功率随填充气体压强的增加而增加, 工作频率随压强上升而略有升高, 与色散特性分析得到的结果基本一致; 此外, 工作电压和外加磁场的变化对器件输出功率有较大的影响, 输出功率随外加电压增加而变大, 且频率略有增加, 磁场使输出功率先增大后减小, 而对频率几乎没有影响.

参考文献

- [1] Chen F F 1974 *Introduction to Plasma Physics* (Los Angeles: Plenum Press) p101
- [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [3] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059

- [4] Sakai O, Sakaguchi T, Tachibana K 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 241505
- [5] Sakaguchi T, Sakai O, Tachibana K 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 073305
- [6] Sakai O, Tachibana K 2007 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **35** 1267
- [7] Qi L M, Yang Z Q, Lan F, Gao X, Li D Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 034210
- [8] Qi L M, Yang Z Q, Lan F, Gao X, Shi Z J, Liang Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 351 (in Chinese) [齐丽梅, 杨梓强, 兰峰, 高喜, 史宗君, 梁正 2010 物理学报 **59** 351]
- [9] 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]
- [10] Lo J, Sokoloff J, Callegari T, Boeuf J P 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 251501
- [11] Fu T, Yang Z Q, Tang X P, Shi Z J, Lan F 2014 *Phys. Plasma* **21** 013106
- [12] Minami K, Kobayashi S, Hayatsu Y, Sato T 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 1196
- [13] Lou W R, Carmel Y, Antonsen T M, Destler J W W, Granatstein L V 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 2481
- [14] Liu W X, Yang Z Q, Liang Z 2004 *Int. J. Infrared Milli.* **25** 1053
- [15] Wang H Y, Yang Z Q, Zhao L X, Liang Z 2005 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33** 111
- [16] Wang H Y, Yang Z Q, Liang Z 2005 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **539** 37
- [17] Smirnova E I, Kesar A S, Mastovsky I, Shapiro M A, Temkin R J 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 074801
- [18] Jang K H, Jeon S G, Kim J, Won J H, So J K, Bak S H, Srivastava A, Jung S S, Park G S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 211104
- [19] Nashed A I, Chaudhuri S K, Afavi-Naeini S 2012 *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **2** 642
- [20] Nanni E A, Lewis S M, Shapiro M A, Griffin R G, Temkin R J 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 235101
- [21] Fu T, Yang Z Q, Lan F, Shi Z J 2014 *High Power Laser and Particle Beams* **26** 043001 (in Chinese) [傅涛, 杨梓强, 兰峰, 史宗君 2014 强激光与粒子束 **26** 043001]
- [22] Fu T, Yang Z Q, Ouyang Z B 2015 *Acta Chin. Sin.* **64** 174205 (in Chinese) [傅涛, 杨梓强, 欧阳征标 2015 物理学报 **64** 174205]
- [23] Goebel D M, Adler E A, Ponti E S, Feicht J R, Eisenhart R L, Lemke R W 1999 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **27** 800
- [24] Miller S M, Antonsen T M, Levush B, Alexander N V 1996 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **24** 859
- [25] Gao X, Yang Z Q, Qi L M, Lan F, Shi Z J, Li D Z, Liang Z 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2452

Simulation of cherenkov radiation source in a plasma-filled metallic photonic crystal*

Fu Tao¹⁾²⁾ Ouyang Zheng-Biao^{1)†}

1) (Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photon Information Technology, THz Technical Research Center of Shenzhen University, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

2) (Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

(Received 10 November 2015; revised manuscript received 8 January 2016)

Abstract

Plasma filling can significantly improve the efficiency and power of a vacuum device. In this paper, we first analyze the dispersion properties of a plasma-filled metal-photonic-crystal slow-wave structure (SWS), and then investigate the interaction procedure between a relativistic electron beam and the Cherenkov radiation in the plasma-filled metallic-photonic-crystal by the particle in cell method. We pay our attention to the influences of plasma density, cathode voltage, and guiding magnetic field on output frequency and power. The results show that the electric field strength in the SWS increases obviously at a fixed plasma density of 50 mTorr (1 mTorr = 0.133 Pa). The device works at a stable single TM_{01} mode due to the good mode properties of the metal photonic crystal even if plasma is filled in it. The maximum value of E_z field along the z axis of the device increases from 46.34 MV/m without plasma to 79 MV/m with plasma. The value along the x axis increases from 136 MV/m without plasma to 185 MV/m with plasma. The working frequency (35.5 GHz) of the device, obtained from simulation, is consistent with the theoretical estimation (35.4 GHz). The power increases with the cathode voltage between 500 kV and 600 kV while the frequency increases only a little. When the magnetic field B increases, the output power first increases and then decreases. But the frequency is not affected due to the dispersion property. The output power of the device increases 20% when the air pressure increases from 0 to 100 mTorr. However, there is a pretty distribution of the field E_z along the angular direction only in an appropriate plasma density around 50 mTorr. According to the theory and simulation, the output power and efficiency can be improved in an appropriate range of plasma density. These results provide a basis for developing the plasma-filled vacuum devices.

Keywords: plasma-filled, metal photonic crystal, Cherenkov radiation, slow-wave structure

PACS: 42.70.Qs, 52.65.-y, 52.40.Fd, 11.55.Fv

DOI: 10.7498/aps.65.074208

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61275043), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61501302, 61307048), and Shenzhen Bureau, China (Grant No. CXB201105050064A).

† Corresponding author. E-mail: zbouyang@szu.edu.cn