

金属柱平板慢波系统高频特性研究*

史宗君[†] 杨梓强 侯 钧 兰 峰 梁 正

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

(2010年4月13日收到; 2010年8月28日收到修改稿)

对于离散金属柱结构构建的周期性平板慢波系统, 本文利用3维FDTD方法结合HFSS仿真软件深入分析了该慢波系统的高频特性. 研究了金属柱高度、周期长度对色散特性的影响, 计算了耦合阻抗, 并与传统光栅慢波系统特性进行了对比分析. 分析表明金属柱慢波系统既有与传统光栅慢波系统相似的高频特性, 又具有独自的特点, 位于离散金属柱周期间隙中的电子注相互作用耦合阻抗具有对称性; 金属柱结构用作真空电子器件的高频系统可增加发生有效相互作用的电子注厚度, 降低起振电流密度, 提高器件效率. 本文的分析结果为设计低电流密度工作的多电子注短毫米波器件提供了依据.

关键词: 金属柱平板慢波系统, 3维FDTD算法, 色散特性, 耦合阻抗

PACS: 68.60.-p, 02.70.Bf, 52.59.Rz

1. 引言

周期性慢波系统是真空电子学 Cherenkov 辐射源的核心部件, 例如行波管、返波管等^[1-5]. 随着频率提高, 如在毫米波及亚毫米波段, 这些器件中由于表面慢波随离开光栅表面距离的增加而剧烈衰减, 仅一薄层电子注参与有效相互作用, 因此通常要求电子注尽可能靠近慢波系统表面运动, 所以传统光栅慢波系统会截获靠近其表面的电子, 这将会降低整个系统的效率, 并且器件起振需要的电流密度大. 带有底板的离散金属柱慢波系统可能会改善这种情况. 由于柱之间有一定间隙, 这会降低电子截获率; 如果同时再降低电子注的高度, 让电子注进入到柱之中, 慢波系统中的场将充分和电子进行能量交换, 增加电子注的有效作用厚度, 相对于光栅结构将减低起振电流密度. 由于柱之间周期缝隙的存在, 可以设计进入柱之间的多排电子注的低功率短毫米波器件, 多电子注工作虽然阴极加工复杂但起振电流的降低延长了阴极的使用寿命. 最近 Bratman 等人^[6]将多根条状金属形成的慢波系统用在了低功率 Orotion 器件的实验研究中, 降低了器件起振电流密度, 这种金属慢波结构用在其他真空电

子器件中需要详细分析其色散关系与耦合阻抗等高频特性.

由于复杂慢波结构的高频特性用常规的场匹配方法不便于求解, 采用有限差分法与仿真软件等方法处理复杂的周期结构非常有效^[7-9]. 已有不少文献^[9-13]采用二维时域有限差分法 (finite difference time domain, FDTD) 分析了二维光子晶体结构的带隙特性, 而对三维周期结构一般采用 HFSS 或 CST 仿真软件分析其高频特性^[14-15]. 本文在此基础上提出采用三维 FDTD 方法分析具有底板结构的金属柱慢波系统的色散特性, 利用 HFSS 仿真软件计算耦合阻抗, 并与传统光栅慢波系统的高频特性进行对比.

2. 物理模型

图1给出了传统矩形光栅慢波系统变化到金属柱所构成的慢波系统的示意图. 金属柱在水平的两个方向为周期排列, 竖直方向为有限高度, 整个慢波系统是开放的. 一定厚度的电子注可以进入柱之间的缝隙, 在减小截获率的同时又可与缝隙间的场相互作用. 如果能够深入了解这种新慢波系统的高频特性, 应用于短毫米波真空电子器件中, 极有希

* 国家自然科学基金 (批准号: 10975031, 11075032) 资助的课题

[†] E-mail: zongjunhao@yahoo.cn

望降低起振电流密度的同时提高器件的效率.

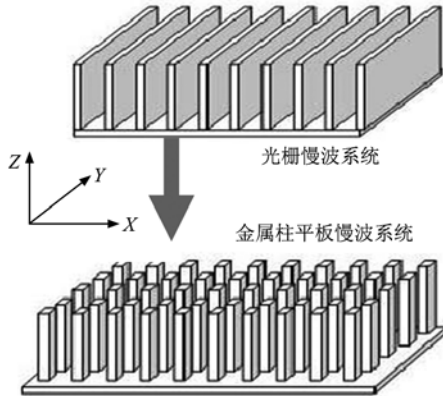


图1 传统光栅慢波系统到金属柱慢波系统

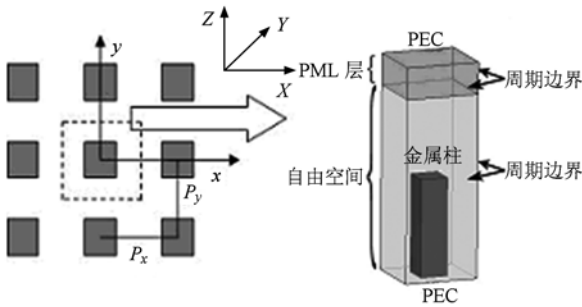


图2 FDTD 计算模型

2.1. FDTD 计算模型

本文采用 FDTD 方法分析这种复杂的三维慢波结构,将通常的二维 FDTD 扩展到三维,并在模型顶端添加周期性完全匹配层(PML),底面添加理想导体层(PEC).图2为金属柱结构的一个周期单元,类似于光子晶体的一个晶胞.其顶部为 PML 完全匹配层,PML 层的顶部和自由空间的底部为 PEC 边界,空间内部为一个长方体金属柱,PML 层和自由空间的四周为周期边界,使之与图1的慢波系统等效,当然这种周期性三维 PML 层还可以运用在其他的一些开放式周期系统之中.

2.2. FDTD 的迭代公式

按照 Floquet 定理,计算空间内的任一点的场满足如下方程:

$$\varphi(x, y, z) = \varphi(x, y, z) e^{-j m p_x - j n p_y}, \quad (1)$$

其中 $\varphi(x, y, z)$ 为空间的电场或者磁场, m, n 为 x 方

向和 y 方向的周期个数; p_x 和 p_y 分别为 x 方向和 y 方向的周期长度.将(1)式代入到麦克斯韦方程组之中即可得到周期结构内场的迭代方程.周期性 PML 层是以 Berenger 于 1995 年提出的三维 PML 层^[16]为基础,在 x, y 两个方向加入 Floquet 定理周期边界条件,建立起金属柱慢波系统之上的开放空间.以 PML 层中的电场分量 E_{xy} 为例,每个网格点记为 $(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为 x, y, z 三个方向的网格步长,则 FDTD 的迭代公式为

$$\begin{aligned} E_{xy}^{n+\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) &= E_{xy}^{n-\frac{1}{2}}\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) \cdot e^{-\frac{\sigma_y}{\epsilon} \Delta t} \\ &+ \frac{1-e^{-\frac{\sigma_y}{\epsilon} \Delta t}}{\sigma_y \Delta y} \left[H_{zx}^n\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) \right. \\ &+ H_{zy}^n\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) \\ &- j \frac{k_y(1-e^{-\frac{\sigma_y \Delta t}{\epsilon}})}{2\sigma_y} \\ &\times \left[H_{zx}^n\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) \right. \\ &+ H_{zy}^n\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k\right) \\ &+ H_{zx}^n\left(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k\right) \\ &\left. \left. + H_{zy}^n\left(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k\right) \right] \right], \quad (2) \end{aligned}$$

其中 E_{xy} 为 PML 层中 x 方向电场分在 y 方向的值, δ_y 为 PML 层中 y 方向的电导率, ϵ 为自由空间介电常数, H_{zx} 和 H_{zy} 为 PML 层中 z 方向磁场分出的两个分量.因为 PML 层中电磁场随距离衰减很快,上式使用了指数差分.模型其他部分的场分量迭代公式与之类似.

2.3. 模型边界设置

图3为模型四周的边界设置,在传统的 Yee 网格基础上稍作修改,采用了半网格^[12]的方法,把四周分为两个电边界和两个磁边界,其中磁边界为半个网格.这样能够保证在场信息不丢失的情况下计算空间最小;电场与磁场的节点个数相等,便于网格的划分.周期性边界由磁边界场量等于电边界场量来得到,即

$$\varphi_N(i, j, k) = \varphi_1(i, j, k). \quad (3)$$

由图1可以看出,慢波结构的底面为金属板,因此在

模型中将底面设置为 PEC 层,即将底面的切向电场和法向磁场置零.

图 4 为模型中自由空间和 PML 层分界面的设置情况.分界面上的切向场分量(即图中“N”处,如 E_x, E_y)由 PML 层和自由空间上的分量共同得到,而法向分量 H_z 可以直接由分界面上的量得到,也就是说,图中 PML 层中标号为“0”的地方实际上与图中自由空间标号为“N”的地方具有相同的电磁场,所以 PML 层中从标号“1”的地方开始才运用 PML 层迭代公式.

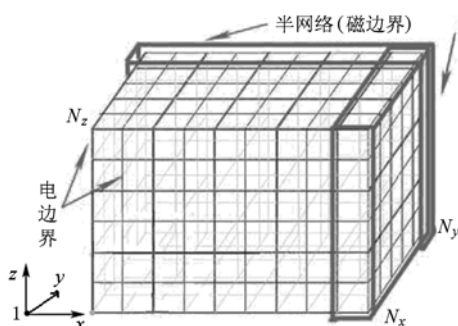


图3 边界条件的设置

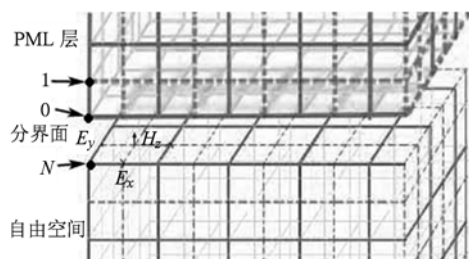


图4 自由空间和PML层分界面

模型中的金属柱可以通过设置具有一定体积大小的 PEC 来完成,改变自由空间的长度与宽度便可以改变慢波系统的周期.通过计算不同波数所对应的本征频率,便可以绘出特定结构的色散曲线.

3. 数值计算

3.1. 仿真实验

为了验证这个三维 FDTD 程序的正确性,下面将三维 FDTD 程序和 HFSS 高频仿真软件^[8]对色散曲线的结果做一个比较. HFSS 所用结构模型与

FDTD 模型相同,均是无限长的开放周期结构.用作比较的模型周期 $p = 0.2 \text{ mm}$,金属柱(正方形) $a^2 = 0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$,金属柱高度 $h = 0.15 \text{ mm}$,波传播方向为 x 方向.从图 5 可以看出,FDTD 和 HFSS 的计算结果符合得很好,只是在图形中间部分 HFSS 所得的结果较 FDTD 高一些,这也许和 FDTD 网格划分的粗细有关,但足以说明此三维 FDTD 程序的正确性.

3.2. 计算结果

图 6 为柱的计算模型及色散曲线随高度 h 的变化.如果保持金属柱的宽度 a 和周期 p 不变,其高度 h 越大,色散曲线就越低越平.图 7(a)为保持柱的高度 h 不变,改变 x 方向周期 p_x ,色散曲线会随着周期长度增加而变低变尖,这和传统慢波系统光栅周期长度增加的情况相似,图 7(b)为波沿 x 方向传播,改变 y 方向周期 p_y 的结果,从图中可以看出 y 方向的周期变化对色散曲线影响不大.

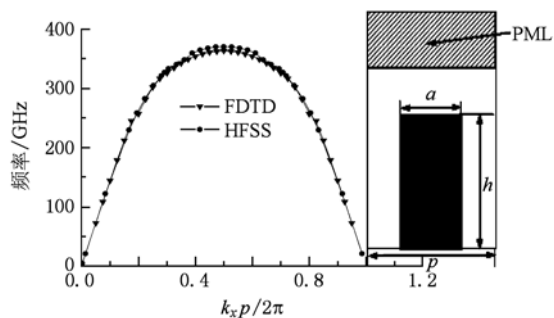


图5 三维 FDTD 和 HFSS 计算色散曲线的结果比较

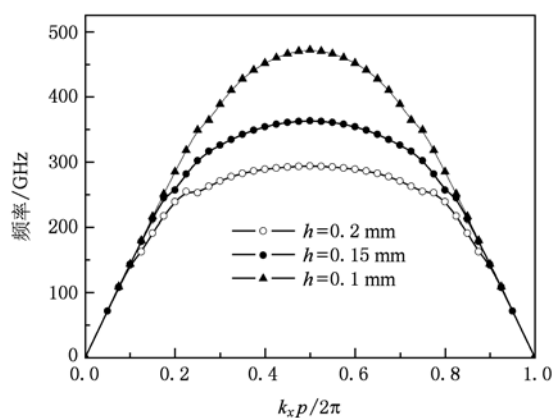


图6 金属柱计算模型($a = 0.1 \text{ mm}$, $p = 0.2 \text{ mm}$)及色散曲线随着柱的高度变化而变化

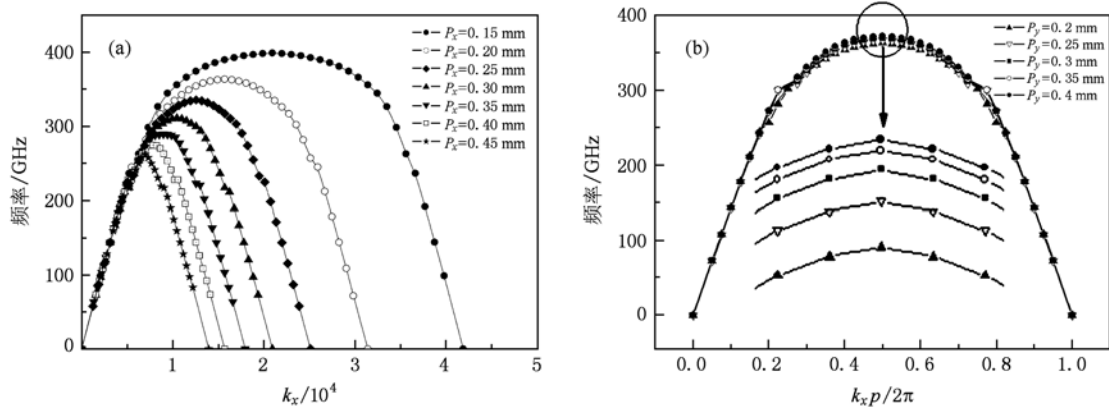


图7 色散曲线随周期的变化 (a) x方向周期变化;(b) y方向周期变化

4. 耦合阻抗仿真计算及对比分析

耦合阻抗 K_c 是慢波系统的一个重要工作参数^[17],它表征了系统中传输的功率与纵向电场之间的关系,决定了电子注与电磁波之间的能量耦合状况,本节借助 HFSS 软件模拟分析计算了传统光栅慢波系统与金属柱慢波系统的耦合阻抗,并进行

了对比分析.

计算模型如图8所示,取一个周期单元,金属四周的端面分别设为主(master),从(slave)边界,通过设置波传播 x 方向的主、从边界上的相位差,利用本征模的求解方法计算本征频率点及其对应模式的电场分布,通过 HFSS 的后处理计算耦合阻抗. 仿真选用两种结构的参数一致,周期 $p = 0.2 \text{ mm}$,金属高度 $h = 0.15 \text{ mm}$,间隙 $a = 0.1 \text{ mm}$.

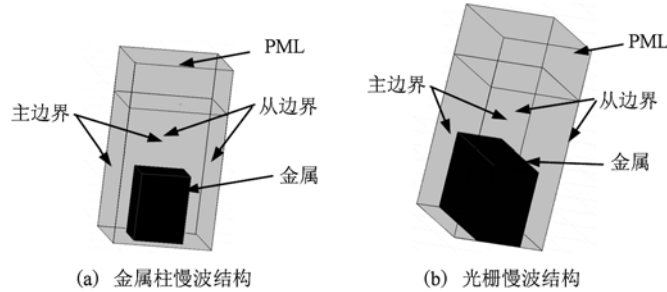


图8 单个周期慢波结构 HFSS 仿真模型

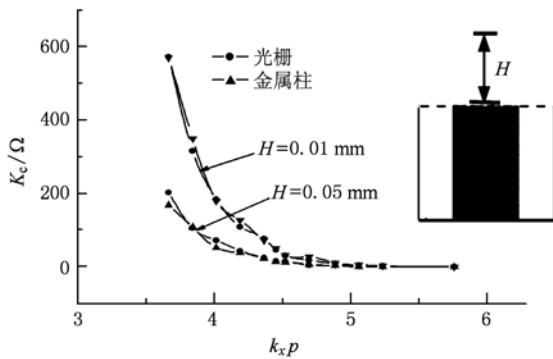


图9 两种慢波结构不同电子注位置对耦合阻抗的影响

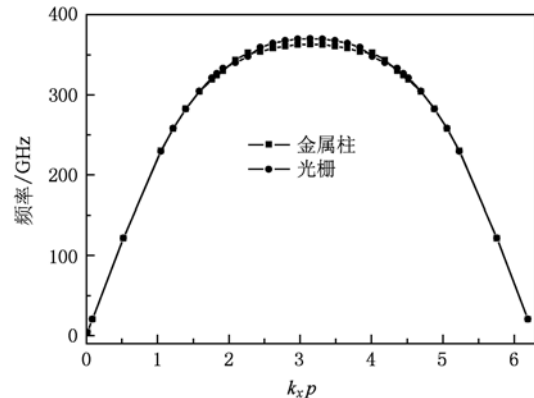


图10 金属柱与光栅慢波结构色散曲线

图9为利用本征模的求解方法,计算得到的两种慢波结构电子注位于结构对称中心距离慢波结构金属表面不同高度耦合阻抗的变化趋势,电子注距离慢波结构上表面的距离从“0”开始计算,从图中可以看出在 π 模附近贴近慢波结构表面耦合阻抗较大,两种慢波结构的耦合阻抗的变化特性基本一致,恰当选择频率工作与电子注参数注波相互作用耦合阻抗可以达到几百 Ω . 由于金属柱慢波结构柱之间的缝隙降低了电子截获,可以预期采用金属柱慢波结构注波相互作用效率较之光栅慢波结构有望提高. 图10给出了两种慢波结构耦合阻抗对应的频率变化特性,从图中可以看出这种新型系统与传统

开放式光栅慢波系统有着相似的色散特性.

图11给出了频率分别为330与230 GHz两种结构的耦合阻抗随电子注位置的变化,从图中可以看出耦合阻抗随电子注高度的增加剧烈减小. 这是由于慢波结构中电子注同步的谐波幅度随离开结构表面的距离成指数衰减,电子注位置离开慢波结构表面越远,与慢波相互作用的耦合阻抗将按指数平方减小^[17]. 为发生有效注波相互作用,电子注应尽可能的靠近慢波结构表面; π 模附近的频率点330 GHz在电子注位置大于0.06 mm后耦合阻抗基本稳定在20 Ω ,在远离 π 模的频率点 $f=230$ GHz,耦合阻抗最大只有几 Ω .

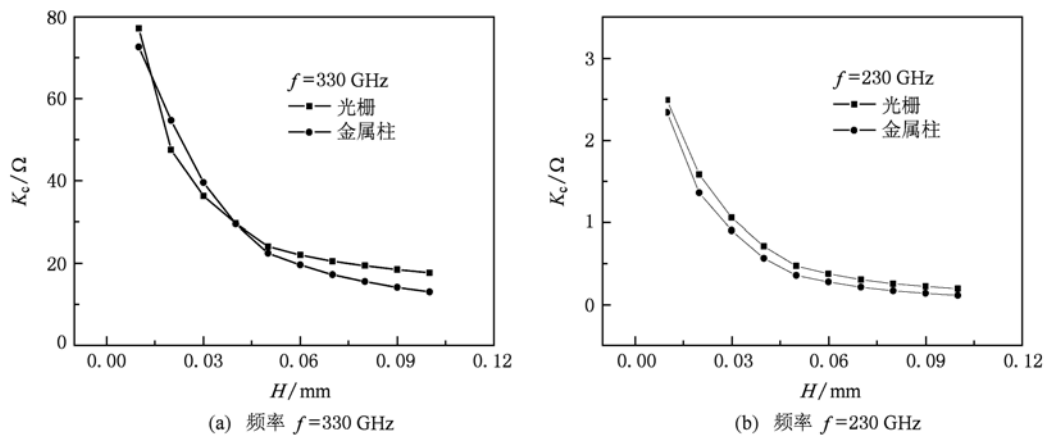


图11 两种结构的耦合阻抗随电子注位置的变化

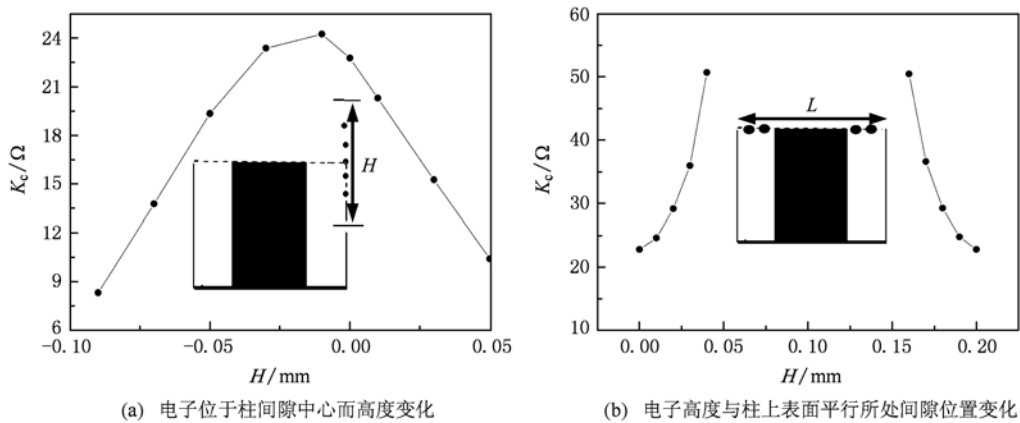


图12 电子注位于金属柱慢波结构柱之间的缝隙中不同位置对耦合阻抗的影响

由于金属柱慢波结构的特殊性,电子注可以进入柱之间的缝隙中,以工作频率330GHz为例,图12给出了一个周期单元中缝隙中电子注位置的变化对耦合阻抗的影响,图中黑点代表电子所处不同位置的示意图,图12(a)为电子注位于柱间隙中心而

高度改变的情况,从图中可以看出耦合阻抗相对于柱上表面位置具有对称性,对于电子注只能位于金属上表面的光栅结构而言,利用间隙工作的金属柱慢波结构,发生有效相互作用的电子注的厚度增加了一倍,因此器件起振需要的电流密度将随之降低.

图 12(b) 为电子注高度与柱上表面平行而处于间隙不同位置耦合阻抗的变化特性, 从图中可以看出位于柱两边缝隙中的电子注耦合阻抗同样具有对称性, 距离金属柱越近耦合阻抗越大, 利用周期间隙可以设计多排电子注工作的真空电子器件.

5. 结 论

本文运用 3 维 FDTD 方法结合 HFSS 仿真软件对金属柱慢波结构进行了深入分析, 得到了不同高度和不同周期长度下其色散曲线的变化情况, 利用 HFSS 仿真技术分析了金属柱与光栅慢波结构的耦

合阻抗. 结果表明随着柱高度的增加, 色散曲线会变低变平; 随着波数方向周期长度的增加, 色散曲线会变低变尖; 两种慢波系统耦合阻抗随电子注高度的增加剧烈减小, 周期间隙中的电子注相互作用耦合阻抗具有对称性, 由此可让电子注部分进入柱之中增加发生有效相互作用的电子注厚度, 以降低起振电流密度, 提高器件效率. 本文探讨的金属柱慢波系统既有与传统光栅慢波系统相似的高频特性, 又具有独自的特点, 这种新型慢波系统用作真空电子学 Cherenkov 辐射源高频系统, 尤其用作短毫米波低功率器件中可降低器件起振电流密度提高能量转化效率.

- [1] Shfflel D, Nation A, Kerslick G S 1990 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **18** 546
- [2] Xiao L, Su X B, Liu P K 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5150 (in Chinese) [肖 刘、苏小保、刘濮鲲 2006 物理学报 **55** 5150]
- [3] Wang D, Chen D B, Qin F, Fan Z K 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6962 (in Chinese) [王 冬、陈代兵、秦 奋、范植开 2009 物理学报 **58** 6962]
- [4] Gao X, Yang Z Q, Qi L M, Lan F, Shi Z J, Li D Z, Liang Z 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2452
- [5] Levush B, Antonsen T M, Jr, A Vlasov M, Nusinovich S, Miller S M, Carmel Y C, Granatstein V L, Destler WW 1996 *IEEE Transactions on Plasma Sci.* **24** 843
- [6] Bratman V L, Dumesh B S, Fedotov A E, Makhlov P B, Movshevich B Z, Rusin F S 2010 *IEEE Trans. on Plasma Sci.* **38** 1466
- [7] Taflove A, Brodwin M E 1975 *IEEE Trans. on MTT* **23** 623
- [8] Xie Y J, Li L, Zhou J H, Lei Z Y 2007 *Ansoft HFSS Basic and Application* (Xian: Xi Dian University Press) p23 (in Chinese) [谢拥军、李 磊、周建华、雷振亚 2007 Ansoft HFSS 基础及应用(西安:西安电子科技大学出版社)第 23 页]
- [9] Lin B Q, Yuan N C 2006 *Chinese Journal of Radio Science* **21** 233 (in Chinese) [林宝勤、袁乃昌 2006 电波科学学报 **21** 233]
- [10] Smirnova E I, Chen C, Shapiro M A, Sirigiri J R, Temkin R J 2002 *Journal of Applied Physics* **91** 960
- [11] Min Qiu, Sailing He 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 8268
- [12] Zou J h, Liang Z, Shi Z J 2005 *Chinese Optics Letters* **3** 205
- [13] Sakai O, Tachibana K 2007 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **35** 1267
- [14] Gao X, Yang Z Q, Hou J, Qi L M, Lan F, Shi Z J, Li D Z, Liang Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1105 (in Chinese) [高 喜、杨梓强、侯 钧、元丽梅、兰 峰、史宗君、李大治、梁 正 2009 物理学报 **58** 1105]
- [15] Balk M C, Kory C L, Dayton J A 2009 *Vacuum Electronics Conference, IVEC 09 IEEE International* p505
- [16] Jean-Pierre Berenger 1996 *J. Computational Physics* **127** 0181, p363—379
- [17] Liu S G, Li H F, Wang W X, Mo Y L 1983 *An Introduction to Microwave Electronics* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press) p109—110 (in Chinese) [刘盛刚、李宏福、王文祥、莫元龙 1983 微波电子学导论(成都:电子科技大学出版社)第 109—110 页]

Study of high frequency characteristics of metallic-pole-planar slow wave structure *

Shi Zong-Jun[†] Yang Zi-Qiang Hou Jun Lan Feng Liang Zheng

(Research Institute of High Energy Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

(Received 13 April 2010; revised manuscript received 28 August 2010)

Abstract

The discrete metallic-pole-planar slow wave structure (SWS) is introduced in this paper, and the high frequency characteristics are studied. And procedures based on three-dimensional finite-difference time-domain (3-D FDTD) arithmetic are used to calculate the dispersive characteristics of the new SWS, and HFSS simulation software is used to analyze the coupling impedance. Results show the high frequency characteristics of the pole structure not only have a general similarity in comparison with these of the grating, but also have itself advantages. For the electrons moving between multiple poles of the structure, the interaction impedances are symmetry; relatively thick electron beams can efficiently interact with the high-frequency field while it used as the high frequency system of vacuum electronic devices. This kind of SWS is promising to lower the starting current density and have better efficiency than the traditional grating SWS. According to the results, a sub-millimeter radiation source driven by the multiple beams can be designed at a low operating current density.

Keywords: metallic-pole-planar SWS, 3-D FDTD, dispersion characteristic, coupling impedance

PACS: 68.60.-p, 02.70.Bf, 52.59.Rz

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10975031, 11075032).

[†] E-mail: zongjunhao@yahoo.cn