

## 同轴波导虚阴极振荡器二极管参数优化的研究\*

刘静<sup>†</sup> 舒挺 李志强

(国防科技大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

(2009年12月3日收到;2010年12月21日收到修改稿)

采用粒子模拟研究了同轴波导虚阴极振荡器二极管参数对微波效率和频率的影响,得到了由二极管参数改变引起的二极管阻抗变化及其对微波效率的影响规律. 借鉴具有慢波结构的高功率微波器件中微波模式特性阻抗的计算方法,给出同轴波导虚阴极振荡器中微波主模式特性阻抗的理论计算公式. 将理论计算结果与由粒子模拟对器件进行优化后得到的二极管阻抗进行比较,发现当反映电子束特性的二极管阻抗与微波主模式特性阻抗匹配时,虚阴极振荡器具有较高的束波功率转换效率. 进一步用特性阻抗对其他几种典型结构的虚阴极振荡器进行分析,验证了该方法的合理性,为设计高效率虚阴极振荡器提供了理论指导.

**关键词:** 虚阴极振荡器, 同轴波导, 二极管参数, 特性阻抗

**PACS:** 52. 35. Mw, 52. 65. Rr, 41. 75. Ht

## 1. 引言

虚阴极振荡器是一种重要的高功率微波源器件,国内外关于该类器件的研究主要集中于提高电子束-微波的功率转换效率<sup>[1-6]</sup>. 而二极管作为虚阴极振荡器的一个主要组成部分,其结构参数和电参数对器件工作性能有至关重要的影响. 设计中通常采用粒子模拟的方法研究二极管参数对微波效率和频率的影响<sup>[7-10]</sup>. 一维模型在一定程度上能够反映微波频率对阴极发射面宽度和阴阳极间距等参数的依赖关系<sup>[11]</sup>. 但是,微波效率对二极管参数依赖关系的理论研究目前尚未见相关报道.

本文将慢波结构高功率微波器件中有着广泛应用的特性阻抗的概念<sup>[12,13]</sup>,借鉴到虚阴极振荡器中,从研究二极管阻抗与微波主模式特性阻抗关系的角度,分析二极管参数对虚阴极辐射微波效率的影响,为设计高效率虚阴极振荡器提供指导.

首先,通过对反馈式同轴波导虚阴极振荡器进行粒子模拟研究,得到阴阳极间距和阴极面积等参数对微波效率和频率的影响规律,进而得到二极管阻抗对微波效率和频率的影响规律<sup>[14]</sup>. 其次,给出同轴波导内虚阴极振荡器激励微波  $TM_{01}$  主模式的

特性阻抗的理论计算公式. 然后,比较分析粒子模拟和理论计算的结果,得到同轴波导虚阴极振荡器具有较高效率时,二极管阻抗与微波主模式特性阻抗的匹配关系,从而为器件的优化设计提供指导. 最后,通过列出其他几种结构的虚阴极振荡器中,优化后二极管阻抗与激励微波主模式特性阻抗的关系,说明从理论上用特性阻抗研究虚阴极振荡器内二极管参数优化的合理性.

## 2. 二极管参数对反馈式同轴波导虚阴极振荡器效率和频率的影响

反馈式同轴波导虚阴极振荡器结构如图 1 所示<sup>[15-17]</sup>. 在这种结构的虚阴极振荡器中,环形电子束在磁场导引下沿轴向运动,穿过阳极箔后,在由反馈环、阳极箔和同轴波导形成的准谐振腔内激励轴向虚阴极振荡. 辐射微波在束波作用腔内为同轴  $TM_{01}$  模式,微波输出口为 TEM 模.

设计虚阴极振荡器时,首先需要根据实验室现有加速器的电参数确定二极管电压,根据微波频率和器件紧凑化的要求确定波导管外径,随后需要优化二极管参数得到能够与束波作用结构强烈耦合的电子束. 因此我们主要考虑阴极发射面积,即电

\* 国家高技术研究发展计划资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: ljofnuds@163.com

子束厚度  $w$  和阴阳极间距  $d$  这两个二极管参数对同轴波导虚阴极振荡器性能的影响,如图 2 所示.

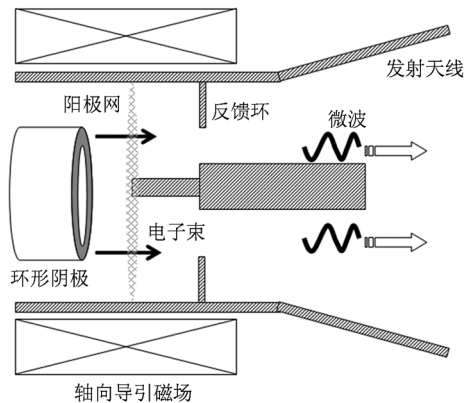


图 1 反馈式同轴波导虚阴极振荡器结构示意图

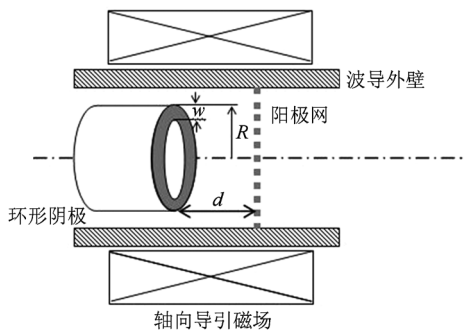


图 2 同轴波导虚阴极振荡器二极管参数示意图

### 2.1. 电子束厚度对效率和频率的影响

在二极管电压 700 kV, 同轴波导结构和阴阳极间距一定的情况下, 改变环形阴极发射面宽度, 变化范围为 0.4—1.4 cm, 发射面的径向中心保持在 3.0 cm 处, 模拟得到阴极发射面宽度对微波效率和频率的影响, 变化规律如图 2 所示.

从图 3 可以看出, 当阴极发射面宽度为 0.8 cm 时, 效率有极大值 13.1%, 即关于微波效率, 阴极发射面宽度存在优化值; 当阴极发射面宽度在 0.4—1.4 cm 的范围内变化时, 微波频率基本稳定在 3.85 GHz 附近.

微波频率对阴极发射面宽度的变化规律, 可以由平板二极管二维 Child-Langmuir 公式及虚阴极激励微波一维模型导出的近似公式描述<sup>[18]</sup>

$$f \propto \frac{1}{d} \left( 1 + 0.25 \frac{d}{R} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

其中,  $d, R$  分别为阴阳极间距和阴极外径.

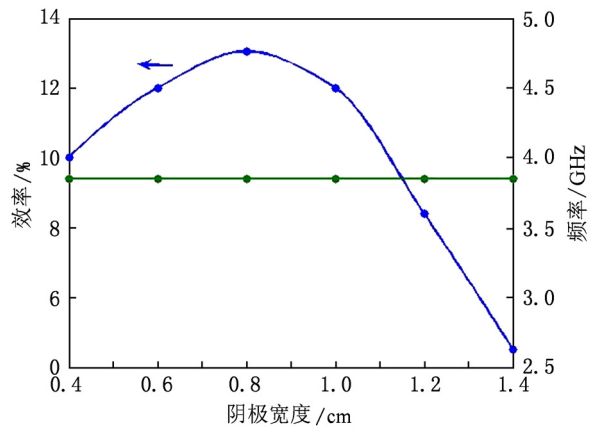


图 3 阴极发射面宽度对微波效率和频率的影响

(1) 式表明, 微波频率随阴极发射面宽度的增加而略微减小, 但是同轴波导虚阴极振荡器采用了轴向导引磁场和反馈机理, 准谐振腔结构具有锁频作用, 因此微波频率不随阴极发射面宽度的改变连续变化, 而是在一定的宽度范围内, 以固定频率出现.

为研究微波效率对阴极发射面宽度的依赖关系, 将阴极发射面宽度对二极管阻抗的影响以及由改变阴极发射面宽度引起的二极管阻抗对效率的影响示于图 3 和图 4.

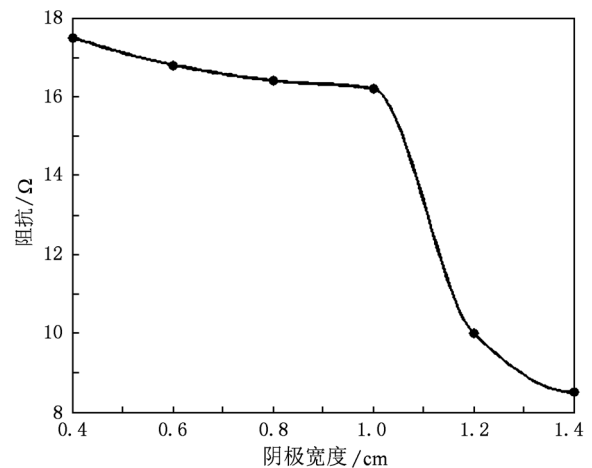


图 4 二极管阻抗与阴极发射面宽度的依赖关系

从图 4 和图 5 可以看出, 当阴极发射面宽度从 0.4 cm 逐渐增大到 1.4 cm 时, 二极管阻抗逐渐减小, 这是由于增大阴极发射面积, 电子束流也相应增加; 当二极管阻抗为 16.4 Ω 时, 效率有极大值, 即改变阴极发射面宽度, 当二极管阻抗在 16.4 Ω 附近变化时, 虚阴极具有较高的效率.

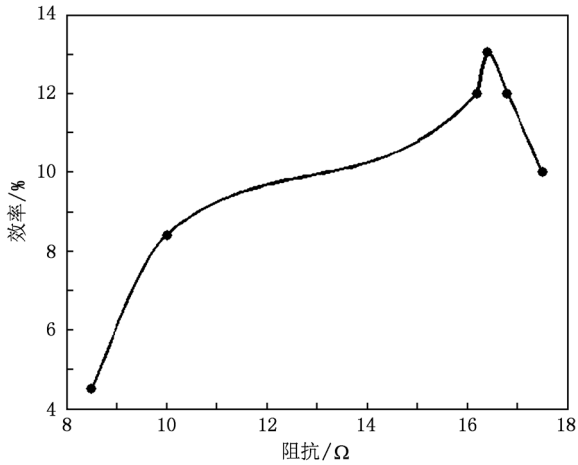


图5 改变阴极发射面宽度引起二极管阻抗对效率的影响

### 2.2. 阴阳极间距对效率和频率的影响

在二极管电压 700 kV, 环形阴极发射面宽度 1.0 cm, 环形阴极外径 3.5 cm 及同轴波导结构一定的情况下, 改变阴阳极间距, 变化范围为 0.5—1.4 cm, 模拟得到阴阳极间距对微波效率和频率的影响, 变化规律如图 6 所示.

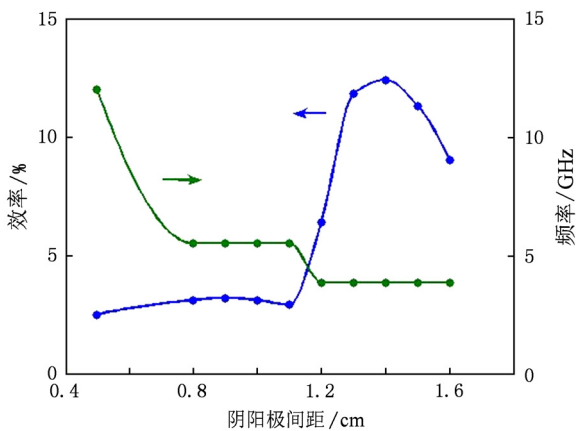


图6 阴阳极间距对微波效率和频率的影响

从图 6 可以看出, 当阴阳极间距为 1.4 cm 时, 效率有极大值 12%, 即关于微波效率, 阴极发射面宽度存在优化值; 当阴阳极间距在 0.8—1.1 cm 的范围内变化时, 微波频率为 5.5 GHz, 当阴阳极间距在 1.2—1.4 cm 的范围内变化时, 微波频率为 3.9 GHz. (1) 式近似给出了微波频率对阴阳极间距的变化规律, 即当阴极外径固定不变时, 阴阳极间距越大, 微波频率越低, 因此模拟结果中阴阳极间距在 0.8—1.1 cm 范围内变化时微波频率较其在 1.2—1.4 cm 范围内变化时低; 但是, 在同轴波导虚

阴极振荡器中, 因为采用了轴向导引磁场和反馈机理, 准谐振腔结构具有锁频作用, 所以微波频率不随阴阳极间距的改变连续变化, 而是在一定范围内, 以固定频率出现.

阴阳极间距对二极管阻抗的影响及由阴阳极间距的变化引起二极管阻抗对效率的影响示于图 7 和图 8.

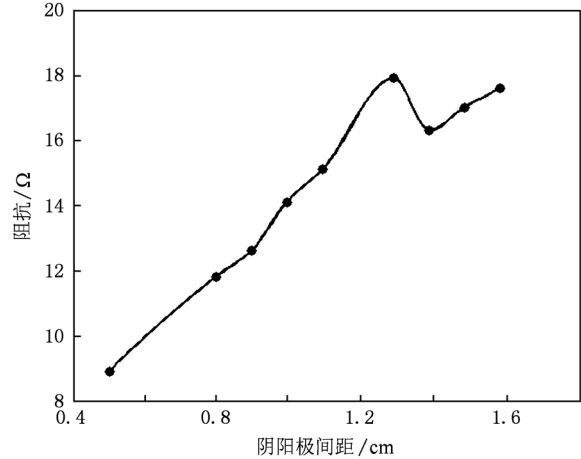


图7 二极管阻抗与阴阳极间距的依赖关系

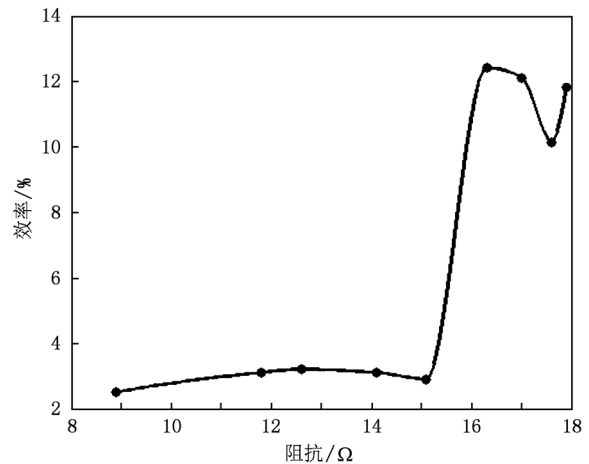


图8 改变阴阳极间距导致二极管阻抗对效率的影响

从图 7 和图 8 可以看出, 当阴阳极间距从 0.5 cm 逐渐增大到 1.3 cm 时, 二极管阻抗也逐渐增大, 随着阴阳极间距的进一步增大, 二极管阻抗稍微下降后又呈现性增加的趋势; 当改变阴阳极间距为 1.4 cm, 二极管阻抗为 16.3 Ω 时, 虚阴极的效率有极大值.

### 3. 同轴波导 TM 模式特性阻抗的理论公式

在慢波结构的高功率微波器件中, 微波模式的

特性阻抗是指导设计高效率器件结构的重要参数,其定义为<sup>[12,13]</sup>

$$Z_{\text{wave}} = \frac{\left[ \int_{-l/2}^{l/2} E_{\text{zm}}(r_m) dz \right]^2}{\omega \epsilon_0 \iiint_v E^2 dv}, \quad (2)$$

其中  $E_{\text{zm}}, r_m$  为轴向电场在径向分布的最大值及其对应的径向位置,  $\omega$  是激励的微波频率,  $l$  为电子束与微波的相互作用长度.  $Z_{\text{wave}}$  是表征电子束 - 微波相互作用强度的参量.

同轴波导虚阴极振荡器内激励微波为  $\text{TM}_{01}$  主模式,其轴向电场和径向电场分量可以表示为

$$E_z = E_{z0} \left[ J_0(k_c r) - \frac{J_0(k_c R_{\text{in}})}{N_0(k_c R_{\text{out}})} N_0(k_c r) \right] e^{-jk_z z}, \quad (3)$$

$$E_r = -\frac{jk_z}{k_c} E_{z0} \left[ J'_0(k_c r) - \frac{J_0(k_c R_{\text{in}})}{N_0(k_c R_{\text{out}})} N'_0(k_c r) \right] e^{-jk_z z}, \quad (4)$$

其中  $E_{z0}$  是与激励源及边界条件有关的电场幅度,  $J_0, N_0$  分别是零阶第一类和零阶第二类 Bessel 函数,  $R_{\text{out}}, R_{\text{in}}$  分别为同轴波导外导体内径和内导体外径,  $k_c, k_z$  分别为径向和轴向相位常数,且满足

$$\frac{J_0(k_c R_{\text{in}})}{J_0(k_c R_{\text{out}})} = \frac{N_0(k_c R_{\text{in}})}{N_0(k_c R_{\text{out}})}, \quad (5)$$

$$k_z = \sqrt{\left( \frac{2\pi f}{c} \right)^2 - k_c^2}. \quad (6)$$

当同轴波导内外导体的半径及微波频率确定后,由(4)和(5)式可以求得径向和轴向相位常数,进一步代入(3)式即可得到轴向电场的径向极大值及其对应的径向位置,从而得到(2)式分子的积分函数. 另外,将径向和轴向相位常数分别代入(3)式和(4)式,可以得到电场分布,则(2)式分母的积分函数表示为

$$E^2 = E_z^2 + E_r^2. \quad (7)$$

## 4. 分析与计算

### 4.1. 同轴波导虚阴极振荡器

利用(2)式计算同轴波导虚阴极振荡器内  $\text{TM}_{01}$  模式特性阻抗还需要确定分子与分母的积分范围. 在慢波结构的高功率微波器件中,分子积分是电场

轴向分量的极大值在束波作用区内沿轴向进行,慢波结构的长度即为束波相互作用区长度  $l$ ;分母积分是在束波作用区内作体积分.

在虚阴极振荡器中,我们尝试对积分范围作如下规定:束波相互作用区长度对应阳极网与虚阴极之间的距离,束波相互作用区则对应由阳极网、虚阴极及波导壁构成的区域. 虚阴极振荡器内电子虽然是在阴极和虚阴极之间来回振荡,但是阳极网作为金属边界,将激励的  $\text{TM}_{01}$  模式微波屏蔽,电子与  $\text{TM}_{01}$  模式微波的相互作用主要集中在阳极网和虚阴极之间的区域. 因此,对特性阻抗的积分范围作上述规定是合理的.

另外,在慢波结构的高功率微波源中,常常使用分布在轴向电场径向极大值位置的薄环形电子束激励微波,因此计算(2)式中  $E_{\text{zm}}(r_m)$  的积分,在  $r_m$  对应的轴线上进行即可. 但是在同轴波导虚阴极振荡器中,采用的是一定厚度的环形电子束,轴向电场在电子分布区域内不均匀,因此需要考虑电子束的实际结构,从而对(2)式分子中反映束波相互作用的电场积分作适当修正.

将同轴波导虚阴极振荡器的结构参数  $R_o, R_{\text{out}}, R_i, R_{\text{in}}, f$  和  $l = d_{A-K}$ <sup>[15,16]</sup> 代入(5)和(6)式可以求解出径向和轴向相位常数  $k_c, k_z$ ,进一步代入(3)式和(4)式可以求解出轴向电场和径向电场的分布  $E_z(r, z), E_r(r, z)$ ,最后将以上结果代入(2)式可得

$$Z_{\text{wavw}} = 18.5 \Omega. \quad (8)$$

若考虑一定厚度的电子束,即电子分布区域内电场轴向分量在  $E_{\text{zm}}(r_m)$  附近的区域内变化,则(4)式中分子积分项需要根据电子的实际分布作适当修正. 若假设电子均匀分布,则用电子束分布区域的平均电场代替内的  $E_{\text{zm}}(r_m)$ , (2)式改写为

$$Z_{\text{wave}} = \frac{\left[ \int_{-l/2}^{l/2} [E_z(r)] dz \right]^2}{\omega \epsilon_0 \iiint_v E^2 dv} = \frac{\left[ \int_0^l [E_z(r)] dz \right]^2}{2\pi \omega \epsilon_0 \int_0^{R_{\text{out}}} \int_0^l (E_r^2 + E_z^2) r dr dz}, \quad (2')$$

$$Z_{\text{wave}} = 14.1 \Omega. \quad (9)$$

(8)式和(9)式实际上是考虑电子分布的两种极端情况,同轴波导虚阴极振荡器内  $\text{TM}_{01}$  模式特性阻抗应该介于 14.1—18.5  $\Omega$  之间.

将由阴极发射面宽度和阴阳极间距改变分别

引起的二极管阻抗对虚阴极效率的影响,即图 4 和图 7 中的变化曲线绘于同一图中,如图 9 所示.

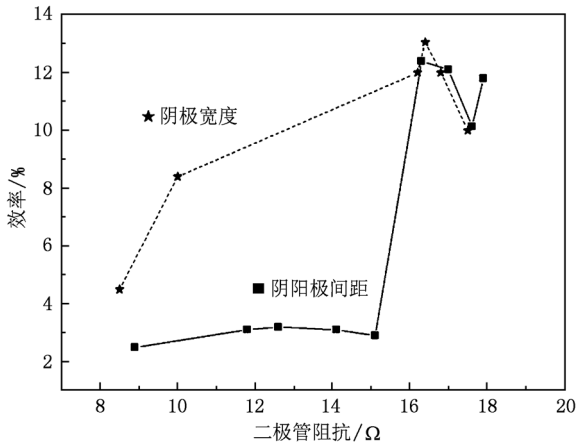


图 9 由阴极发射面宽度和阴阳极间距变化引起的二极管阻抗对微波效率的影响

从图 9 中可以发现:在 700 kV 的二极管电压下,改变阴极发射面宽度和阴阳极间距,模拟得到的二极管阻抗对效率的优化值为 16.3Ω,位于由理论计算得到的特性阻抗(14.1Ω, 18.5Ω)的区间内.

#### 4.2. 其他典型结构虚阴极振荡器

下面将特性阻抗应用到其他几种典型结构的虚阴极振荡器.其中,圆柱波导内轴向提取的虚阴极振荡器激励微波  $TM_{01}$  主模式的特性阻抗的计算方法与上述同轴波导虚阴极振荡器的情况类似,不再累述.而同轴虚阴极振荡器内,求解微波  $TM_{01}$  和  $TE_{11}$  模式特性阻抗时,束波作用发生在径向,因此(2)式中分子是对电场径向分量在  $r$  方向进行积分

$$Z_{\text{wave}}^{TM_{01}} = \frac{\left[ \int_{r_{vc}}^{R_{\text{out}}} E_r(r) dr \right]^2}{\omega \epsilon_0 \iiint_v E^2 dv} = \frac{2 \left[ \int_{r_{vc}}^{R_{\text{out}}} E_r(r) dr \right]^2}{\pi \omega \epsilon_0 D^2 \int_0^{R_{\text{out}}} (E_r^2 + E_z^2) dr}, \quad (10)$$

$$Z_{\text{wave}}^{TE_{11}} = \frac{\left[ \int_{r_{vc}}^{R_{\text{out}}} E_r(r) dr \right]^2}{\omega \epsilon_0 \iiint_v E^2 dv} = \frac{2 \left[ \int_{r_{vc}}^{R_{\text{out}}} E_r(r) dr \right]^2}{\pi \omega \epsilon_0 D^2 \int_0^{R_{\text{out}}} (E_r^2 + E_\phi^2) dr}, \quad (11)$$

其中,  $r_{vc}$  是虚阴极平衡位置对应的半径,  $D$  是同轴阴极发射宽度.

从(10)式和(11)式可以看出:同轴虚阴极内,微波主模式的特性阻抗与阴极发射宽度有关系:  $Z_{\text{wave}}^{TM_{01}, TE_{11}} \propto 1/D^2$ , 因此与模式特性阻抗匹配的二极管阻抗与阴极发射宽度的 2 次方也成反比关系,这与文献[7]中模拟得到的结果一致.

轴向提取的虚阴极振荡器和同轴虚阴极振荡器内粒子模拟得到的二极管优化阻抗和微波主模式特性阻抗的计算结果列于表 1 中.

表 1 其他虚阴极振荡器二极管阻抗与微波主模式特性阻抗的理论计算结果

| 模型                         | 模拟优化后器件的二极管阻抗/Ω | 主模式特性阻抗/Ω   |
|----------------------------|-----------------|---|
| 轴向提取虚阴极振荡器 <sup>[19]</sup> | 20.5            | $TM_{01}$ 模<br>16.5—26.9                          |
| 同轴虚阴极振荡器 <sup>[7]</sup>    | 27              | $TM_{01}$ 模、 $TE_{11}$ 模<br>13.54—30.5 15.92—35.8 |

从表 1 可以看出:轴向提取的虚阴极振荡器和同轴虚阴极振荡器二极管的优化阻抗均在微波主模式特性阻抗给定的范围内.其中,同轴虚阴极振荡器特性阻抗的下限对应电子均匀分布时的情况,上限是考虑电子束箍缩并根据粒子模拟的结果,在箍缩后束宽度大致为发射面宽度 2/3 时得到的,特性阻抗的准确求解需要明确电子的分布情况.

以上粒子模拟与理论计算结果表明:二极管阻抗接近于束波作用腔内微波模式的特性阻抗,是高效率的虚阴极振荡器的二极管参数优化的潜在目标.二极管阻抗反映了电子束的特性,而特性阻抗反应的是束波作用过程中微波主模式的特性,二者的关系正好体现了虚阴极振荡器电子束与微波作用区域内由于此二者的匹配从而实现强相互作用的内在物理原因.

## 5. 结 论

通过粒子模拟得到同轴波导虚阴极振荡器二极管参数对微波效率和频率的影响关系,经过分析进一步得到由二极管参数变化引起的二极管阻抗对微波效率的影响关系.从理论上分析得到同轴波导虚阴极振荡器内微波主模式的特性阻抗,并与参数优化对应的二极管阻抗进行了比较,得到虚阴极振荡器具有较高效率时二极管阻抗应与微波主模

式特性阻抗匹配的结论. 将此分析方法应用到其他结构的虚阴极振荡器中, 验证了该方法的合理性. 微波主模式特性阻抗与二极管阻抗匹配为虚阴极振荡器二极管的参数优化找到了合理的理论解释,

虽然理论计算是给定一个阻抗范围, 但是该范围对设计器件的二极管参数具有指导意义, 详细的结构参数可以在此基础上利用粒子模拟软件作优化, 利于提高器件设计的效率.

- [1] James B, Swegle J A, Schamiloglu E 2007 *High Power Microwaves* (Second Edition) (Taylor & Francis Group, LLC)
- [2] Zherlitsyn A G, Melnikov G V, Isakov P Ya 2007 *Journal of communication technology and electronics* **52** 798
- [3] Chen Y, Mankowski J, Walter J, Kristiansen M, Gale R 2007 *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* **14** 1037
- [4] Li Z Q, Zhong H H, Fan Y W, Shu T, Yang J H, Yuan C W, Xu L R, Zhao Y S 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 2566
- [5] Luo X, Liao C, Meng F B, Zhang Y J, Wang X D 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 92 (in Chinese) [罗雄、廖成、孟凡宝、张运俭、王晓东 2007 强激光与粒子束 **19** 92]
- [6] Shao H, Liu G Z, Yang Z F 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 230 (in Chinese) [邵浩、刘国治、杨占锋 2006 强激光与粒子束 **18** 230]
- [7] Shao H, Liu G Z 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2387 (in Chinese) [邵浩、刘国治 2001 物理学报 **50** 2387]
- [8] Sung K Y, Jeon W, Jung Y, Lim J E, Uhm H S, Choi E H 2005 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33** 1353
- [9] Choi E H, Choi M C, Choi S H, Song K B, Jung Y, Seo Y H, Shin H M, Uhm H S, Lim D W, Kim C H, Lee J M, Ahn J W 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 1728
- [10] Grigoryev V P, Koval T V 1999 *IEEE International University Conference Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies* 198
- [11] Song K B, Lim J E, Seo Y, Choi E H 2009 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **37** 304
- [12] Liu Y, Gong H R, Wei Y Y, Gong Y B, Wang W X, Liao F J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7845 (in Chinese) [刘漾、巩华荣、魏彦玉、宫玉彬、王文祥、廖复疆 2009 物理学报 **58** 7845]
- [13] Dong Y H, Ding Y G, Xiao L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5629 (in Chinese) [董玉和、丁耀根、肖刘 2005 物理学报 **54** 5629]
- [14] Tarakanov V P User's Manual for Code KARAT 2004 *Virginia: Berkeley Research Associate inc.*
- [15] Liu J, Li Z Q, Shu T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2629 (in Chinese) [刘静、李志强、舒挺 2010 物理学报 **59** 2629]
- [16] Liu J, Li Z Q 2008 17th *International Conference On High-Power Particle Beams*, Xi'an, China
- [17] Jiang W, Woolverton K, Dickens J, Kristiansen M 1999 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **27** 1538
- [18] Shu T, Wang Y, Qian B L, Tan Q M 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 1646

# Theoretical and numerical study on optimization of diode parameters in virtual cathode oscillator<sup>\*</sup>

Liu Jing<sup>†</sup> Shu Ting Li Zhi-Qiang

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 3 December 2009; revised manuscript received 21 December 2010)

## Abstract

The dependences of microwave efficiency and frequency on the parameters of diode in virtual cathode oscillator (VCO) are studied with particle-in-cell simulations, which further gives the effects of diode impedance on microwave efficiency and frequency. The characteristic impedance of microwave mode in virtual cathode oscillator is derived as in other high power microwave generators with slow-wave configurations and is used to analyze the optimization of diode parameters. It is shown that the optimal values of diode parameters are obtained when the diode impedance matches with the characteristic impedance of microwave mode in VCO with coaxial wave guide as well as in VCOs with other configurations. This is a good theoretical explanation for the optimization of diode in VCO and can be used to guide the design of devices.

**Keywords:** Virtual cathode oscillator, Coaxial waveguide, Diode parameters, Characteristic impedance

**PACS:** 52.35.Mw, 52.65.Rr, 41.75.Ht

---

<sup>\*</sup> Project Supported by the National High Technology Research and Development Program of China.

<sup>†</sup> E-mail: ljofnuds@163.com