

向外发射同轴型虚阴极振荡器研究*

邵 浩 刘国治

(西北核技术研究所, 西安市 69 信箱 26 分箱, 西安 710024)

(2000 年 6 月 20 日收到, 2001 年 6 月 26 日收到修改稿)

在高功率微波源研究领域提出了一种新型虚阴极器件——向外发射同轴型虚阴极振荡器. 对其相关束流特性进行了理论分析, 得到了同轴空间径向传输空间电荷限制电流, 以及虚阴极产生的条件和电子束运动的基本规律. 基于数值模拟得到的结果, 向外发射同轴型虚阴极振荡器不仅表现出较高的能量转换效率, 而且有利于增加虚阴极器件产生高功率微波的脉宽, 同时还可以应用于低频段高功率微波源. 这种虚阴极器件的可能输出微波方式也进行了讨论.

关键词: 虚阴极, 高功率微波, 脉冲功率, 电子束二极管

PACC: 5235, 5240M, 4180D

1 引 言

在高功率微波的一些重要应用中, 不仅要求具有高的微波辐射功率, 而且要求具有宽的持续辐射时间. 而微波辐射的脉宽受阳极与阴极等离子体形成和运动限制. 由于高密度电子束流轰击到阳极以及虚-实阴极之间反射电子和阳极表面的反复作用引起了阳极等离子体的形成. 当它向阴极方向传播时就使二极管间隙缩短而闭合, 同时使虚阴极处空间电荷中和, 从而削弱了振荡机理最终导致微波产生机理终止^[1,2]. 所以目前在提高微波脉冲功率和加长微波脉宽这两个方面的研究是高功率微波源研究的重要内容.

本文提出并通过理论分析与基于 PIC 算法的 2.5 维全电磁数值模拟软件——KARAT 的模拟给出了向外发射同轴虚阴极振荡器(见图 1)产生高功率微波的特点. 它不仅在数值模拟^[3]中表现出较好的效率特性, 而且从结构定性分析, 由于其向外发射电子束密度呈线性降低趋势, 所以可以预期其间隙等离子体闭合速率将会降低, 从而将可以产生脉冲时间较长的高功率微波, 有效利用输入电压脉冲, 提高总能量转化效率^[4]. 另外, 其向阳极径向发散的电子束也将在产生低频高功率微波脉冲方向具有潜在的优势.

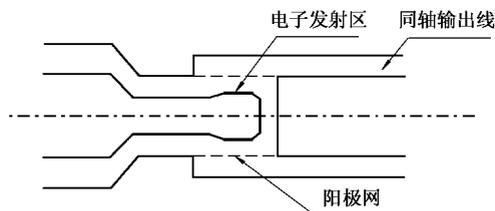


图 1 向外发射同轴虚阴极振荡器结构示意图

2 向外发射同轴型虚阴极振荡器的空间电荷限制电流分析

考虑如图 2 所示的结构, 收集极和阳极具有同样的电位, 假设纵向长度无限长, 即忽略边缘效应

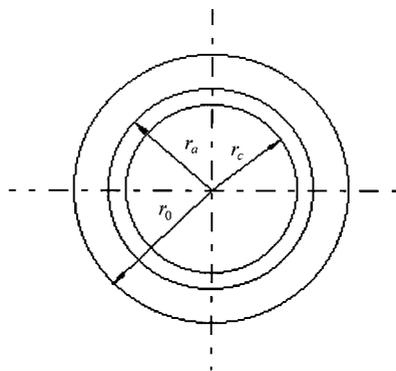


图 2 向外发射同轴虚阴极振荡器横截面示意图

* 国家高技术研究发展计划激光技术领域(批准号: B410-741)资助的课题.

($L \gg r_a - r_c$). 同时, 推导是基于电子束初始发射时的准稳态假设, 此时假设电子束发射已经开始, 但是虚阴极还没有形成^[5].

此时设单位长度上在 r_0 与 r 之间的电荷为 $-2\pi J_{SCL}^{coaxial}(r - r_0)/\beta c$, $J_{SCL}^{coaxial}$ 是单位长度上的电流. 假设收集极上单位长度有电荷量为 τ' , 可以得到在半径为 r 与 r_0 所围成的单位长度圆环内总电荷量为 $\tau = \tau' - 2\pi J_{SCL}^{coaxial}(r - r_0)/\beta c$, 由静态 Poisson 方程解出电势沿径向分布为^[6]

$$\phi(r) = \frac{J_{SCL}^{coaxial}}{2\pi\epsilon_0\beta c} \left(r_a + \frac{r_0 - r_a}{\ln(r_0/r_a)} \ln\left(\frac{r}{r_a} - r\right) \right). \quad (1)$$

由(1)式求导可得 r_0 与 r_a 之间存在电位的最小值, 表示如下:

$$\phi_m = \frac{J_{SCL}^{coaxial}}{2\pi\epsilon_0\beta c} \left(r_a + \frac{r_0 - r_a}{\ln(r_0/r_a)} \ln\left(\frac{r_{vir}}{r_a} - r_{vir}\right) \right), \quad (2)$$

式中 $r_{vir} = \frac{r_0 - r_a}{\ln(r_0/r_a)}$ 为 ϕ_m 的相对位置.

当 ϕ_m 等于二极管上所加电压 V_d 时, 理想状态下, 入射电子将被反射回阴极, 即虚阴极现象将产生, 由此可得轴向单位长度上空间电荷限制电流为

$$J_{SCL}^{coaxial} = \frac{2\pi\epsilon_0\beta c V_0}{r_a + r_{vir} \ln(r_{vir}/r_a - r_{vir})}. \quad (3)$$

当 $J_{inject} \geq J_{SCL}^{coaxial}$ 时, 将会在同轴空间形成虚阴极, 对于给定的 r_a 与 r_c , $r_a + r_{vir} \ln(r_{vir}/r_a - r_{vir})$ 随 r_0 增加而增加, 这表明增加 r_0 将会有助于虚阴极的形成.

当向外发射同轴二极管的非相对论空间电荷限制电流^[7]为 $\frac{8\pi\sqrt{2e/m}\epsilon_0 V_0^{3/2}}{9r_a H^2(r_a)}$ ($H(r_a)$ 为一个与阴阳极半径有关的二极管结构参量) 大于相同结构下的向外发射同轴虚阴极的空间电荷限制电流(3)式时, 虚阴极将会形成, 从而可得到向外发射同轴空间虚阴极形成的条件为

$$\frac{4\sqrt{2e/m}(r_a + r_{vir} \ln(r_{vir}/r_a - r_{vir}))}{9\beta c r_a H^2(r_a)} \geq 1. \quad (4)$$

上式中令 $q = r/r_c$, 则有

$$H(r) = \ln q - \frac{2}{5} \ln^2 q + \frac{11}{120} \ln^3 q - \frac{47}{3300} \ln^4 q + \frac{31033}{1848000} \ln^5 q + \dots$$

从上述推导的假设条件可以看出, 上述所有公式的获得均是在电子束一维运动假设下得到的, 即忽略了边缘效应和电子束流的自磁场对电子束运动

的影响.

从结构特点定性分析来看, 向外发射同轴圆筒中电子束密度沿径向呈降低的趋势, 即电子束密度与半径成反比, 此时束的空间电荷效应将会因束密度的降低而减弱, 它所造成的势阱电势比相同发射电流下向内发射同轴圆筒中的势阱电势要弱, 所以它的空间电荷限制电流的理论推导值要比向内发射同轴圆筒中空间电荷限制电流大得多. 另外, 空间电荷密度也会由于边缘效应的影响而降低, 导致虚阴极处的电势比理论模型下的电势要小, 兼有结构上的特点使被虚阴极减速或反射的电子一般情况下不能再回到阴阳极间隙中去, 从而可以在其中虚阴极振荡对高功率微波的产生起主要的作用, 减弱反射电子的作用, 最终起到提高效率的作用^[8,9].

从图3的电子束运动状态图可知, 在向外发射同轴圆筒中, 虚阴极确实存在, 同时其结构决定了大部分被减速的电子不能回到阴阳极间隙中去^[10].

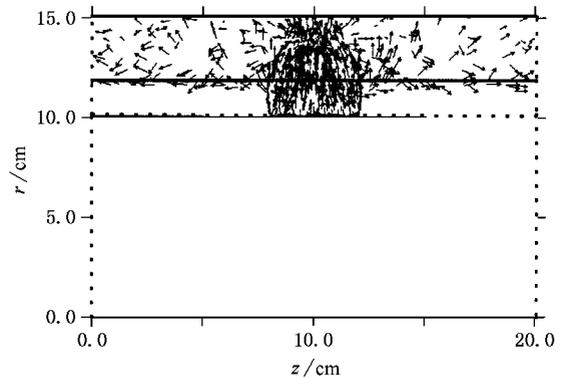


图3 向外发射同轴圆筒中电子束的运动状态图

一般情况下, 特征虚阴极的存在反映在运动方向上坐标与速度相空间图上为相空间图呈四边形的形状, 即电子束在虚阴极处被发射回阴阳极间隙, 然后又被加速返回虚阴极形成一个封闭的四边形相空间图象. 从向外发射同轴圆筒中电子束相空间图4中可知, 电子束被虚阴极减速后大部分漂移到相互作用区外围, 只有少部分电子回到阴阳极间隙被重新加速, 所以这个相空间图近似于 Reditron 器件中电子束运动的相空间图, 从而为其效率的提高提供了基本的机理.

但是为什么在向外发射同轴型虚阴极振荡器中被反射的电子会减少, 这可以从其径向电势的分布来回答. 图5为其中径向电势分布图, 从中可以得出, 空间电荷造成的势阱是存在的, 但是势阱的电势

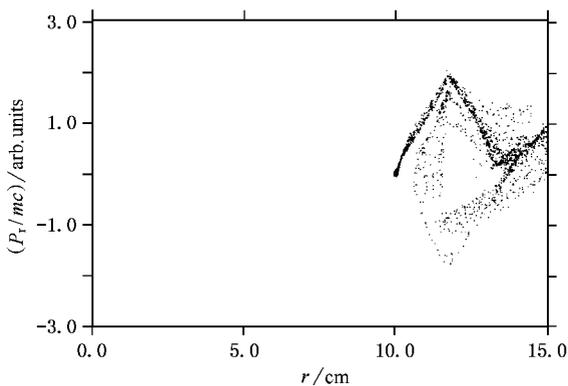


图 4 向外发射同轴圆筒内电子束运动相空间图

大致上只有间隙电压的二分之一,明显要小于其他虚阴极器件中虚阴极处电势,所以它不会造成入射电子束的强反射^[7,11]. 由于势阱的存在和其空间位置随时间的振荡以及电子束自磁场的影响,可以提供入射电子束的调制机理和束与电磁场的耦合机理,所以这种结构可以应用于微波源. 在实际应用结构的数值模拟中,可以得到下面的电子束运动图象和相空间图.

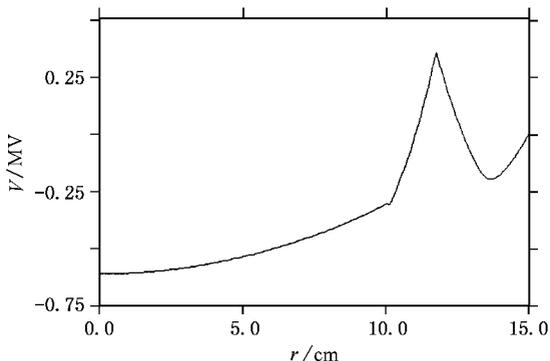


图 5 向外发射同轴圆筒中径向电势分布图

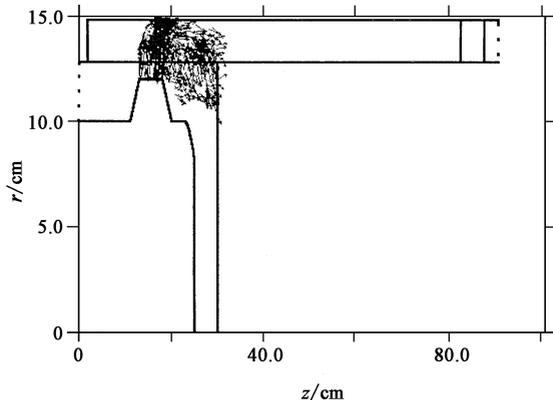


图 6 数值模拟中电子束运动图象

图 6 和图 7 中电子束状态反映了在向外发射同轴型虚阴极振荡器中电子束在空间电荷造成的势阱和自磁场的共同作用下表现出了与电磁场耦合的特点,电子束运动的相空间图表现出了虚阴极器件的特征,同时可以观察到被反射的电子仍然占比较小的比例.

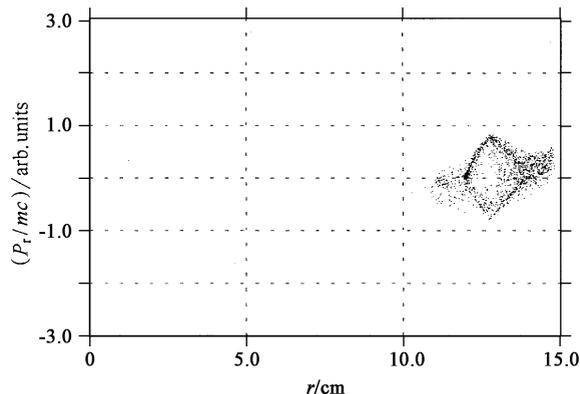


图 7 电子束相空间图

从数值模拟的电子束运动轨迹上可以看出,电子从阴极到阳极运动的过程中,受到了近似于磁绝缘线振荡器(MILO)中电子束受到的磁场作用.但是在 MILO 中自磁绝缘电流的产生必需具有以下的条件^[2,12],即

$$I_z > I_p = 8500 G \gamma \ln [\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}], \quad (5)$$

式中 I_z 为系统的轴向电流, I_p 为同轴系统的顺电势流. 从同轴型虚阴极振荡器的设计结构中可以看出,阴极发射面为环状的结构同时靠近阳极圆筒,而在阴极轴向端面上不存在电子发射面,同时该处电场也远小于阴极表面电场,所以同轴虚阴极振荡器系统中不存在轴向电流,从而径向电流不会被自磁场绝缘,但是在自磁场作用下有一定的偏转^[12].

另外,在向外发射同轴型虚阴极振荡器中,由于二极管结构的特点导致了其固有电感比较大,从而导致最终二极管电流相比平板型二极管要小,在给定的结构下一般不会达到顺电势流状态,这一点已经从同轴型二极管的实验中得到证实. 同时在实验中一般采取阴极或阳极回转结构^[7],这种结构也有利于消除电子束自磁场对其运动的影响.

3 向外发射同轴虚阴极振荡器输出微波脉宽特性

为了获得宽微波辐射脉冲,在保证入射电流满

足大于传输空间电荷限制电流的条件下 ($I_{in} > I_{SCL}$), 应尽量降低空间电荷限制电流下阳极的电流密度. 向外发射同轴虚阴极振荡器的空间电荷限制流密度表示如(3)式. 平板型虚阴极振荡器考虑等离子体运动的空间电荷限制电流密度为^[1]

$$J_{SCL}^{planar} = \frac{2.33 \times 10^{-6} V_0^{3/2}}{(d - vt)^2} \quad (6)$$

与向外发射同轴虚阴极相比, 同样的二极管电流与间隙下, 向外发射同轴虚阴极将比平板型虚阴极更易获得低的束流密度, 从而可以得到长脉冲微波输出. (见图8和图9)为在输入电压、阴极发射面积和二极管间隙相同的情况下, 得到的两种虚阴极系统的阳极电流密度三维图象.

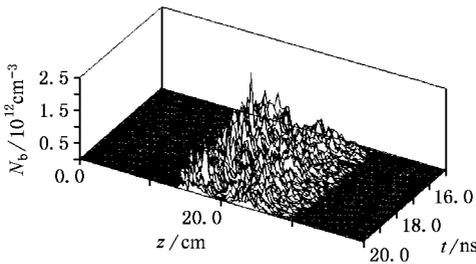


图8 向外发射同轴虚阴极电子束密度分布示意图

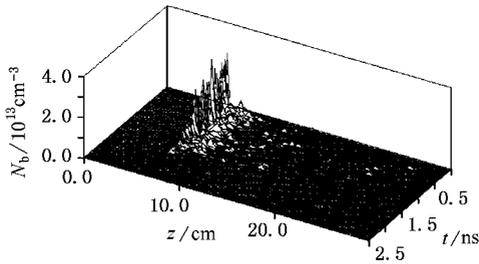


图9 平板型虚阴极振荡器中电子束密度分布示意图

从上面的模拟值可以看出, 相同条件下向外发射同轴二极管阳极电流平均密度明显较平板型虚阴极的要低, 从而将可以起到降低阳极等离子体漂移速度、延长输出微波脉宽的作用^[2,4].

4 向外发射同轴虚阴极振荡器频谱特性

在一般情况下, 虚阴极振荡器输出微波主频与虚阴极处等离子体频率有下述关系^[2]:

$$\omega_{out} \propto \omega_p \quad (7)$$

式中 $\omega_p = (4\pi ne^2/m\gamma)^{1/2}$ 是虚阴极处相对论等离子体频率. 因此在向外发射同轴型虚阴极振荡器中的

发散电子束, 为低频高功率微波脉冲产生提供了基本的条件. 从数值模拟的结果图10和图11来看, 相同二极管间隙、阻抗与近似相同的输入电压下, 从向外发射同轴型虚阴极振荡器中, 可以获得比平板型虚阴极输出主频低得多的微波辐射脉冲.

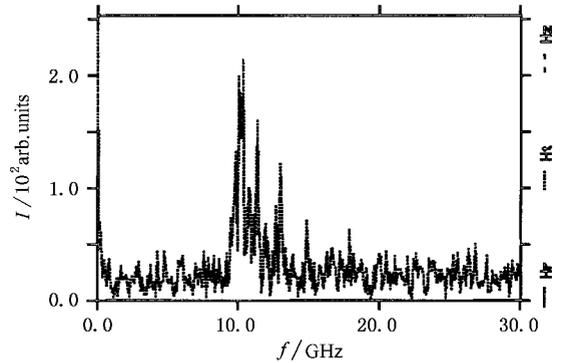


图10 平板型虚阴极振荡器的输出微波频谱曲线

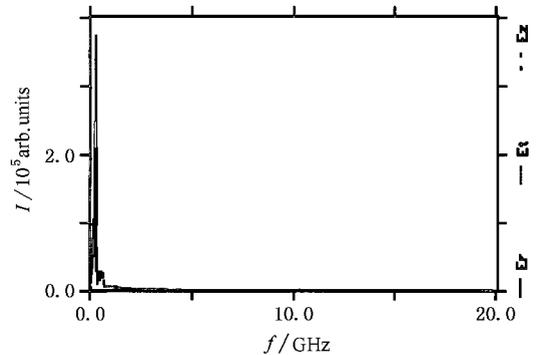


图11 向外发射同轴虚阴极的输出微波频谱曲线

图10和图11中曲线和模拟所得数值结果表明, 在相同二极管参数情况下, 向外发射同轴虚阴极输出微波主频位于几十至几百兆赫兹的频率范围内, 明显较平板型虚阴极振荡器输出微波的主频低, 同时其同轴输出方式为低频高功率微波的耦合输出提供了有利条件. 利用向外发射同轴虚阴极振荡器的这一特性, 在合适的传输与辐射装置的辅助下, 将可能得到低频高功率微波辐射脉冲, 这将使高功率微波效应源的研究有效的扩展到低频段.

5 效率特性与输出方式研究

在向外发射同轴型虚阴极振荡器中, 径向发射的电子束与一端封闭的同轴线中的传导模式微波电场分量耦合, 所以产生的微波模式与频率比较复杂.

但是由于同轴传输线没有截止频率,所有频率下对应的传导模式都将通过输出波导传输到辐射装置上,从而可以期望达到更高的微波转换效率^[13].从初步的模拟结果可以明显得出,向外发射同轴虚阴极振荡器表现出了比一般虚阴极振荡器更高的能量转换效率.图 12 至图 14 为在近似输入功率和阻抗下三种虚阴极振荡器模拟结果中电子束能-微波能的转换效率值(wave production efficiency)随时间 t 变化曲线.

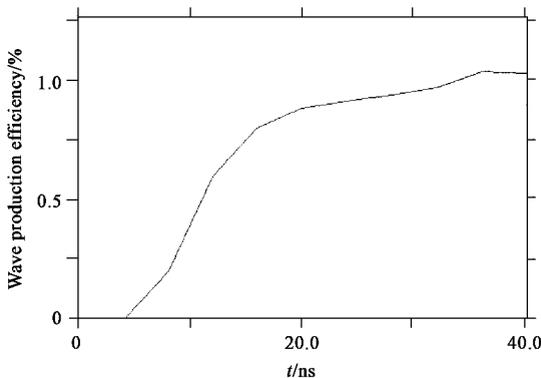


图 12 平板型虚阴极一定参量下模拟效率曲线

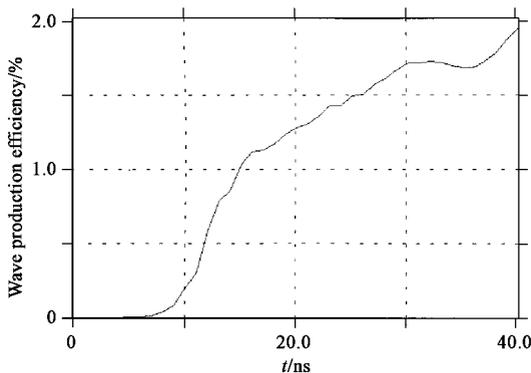


图 13 向内发射同轴型虚阴极一定参量下模拟效率曲线

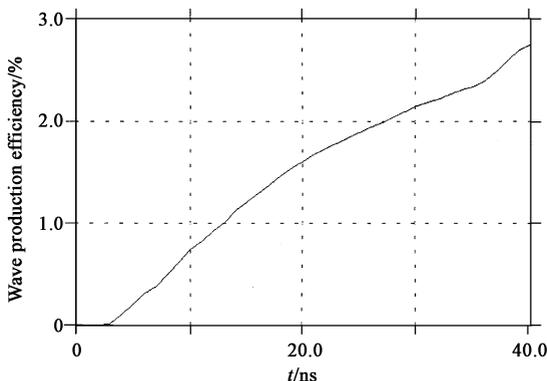


图 14 向外发射同轴型虚阴极一定参量下模拟效率曲线

基于数值模拟得到的效率曲线,可以认为,在实验中将有可能会从外发射同轴虚阴极振荡器中,获得更大的功率输出和较高的电子束能-微波能的转换效率.

由于向外发射虚阴极振荡器结构上的特点,在对其耦合输出的研究中采用了两种如图 15 和图 16 所示的微波输出方式.

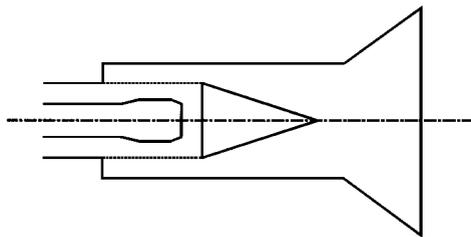


图 15 同轴线转圆波导后接喇叭天线的输出方式示意图

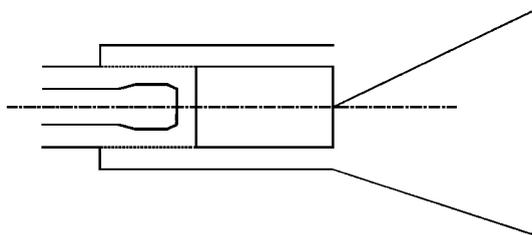


图 16 同轴线后接双喇叭天线的输出方式示意图

综合 PIC 数值模拟的结果可以得到,不同结构的输出方式将会影响系统的总体微波转换效率与输出微波脉冲主频,因此在实际应用中应考虑对不同的微波频段和模式的要求采用不同的天线辐射方式.

6 结 论

由理论分析得到了向外发射同轴空间中传输的空间电荷限制电流,以及虚阴极产生的条件.数值模拟结果表明,当向外发射同轴虚阴极系统具有与平面虚阴极系统相同的输入参量时,其输出微波脉冲主频位于几百兆赫兹的低频区,从而可以应用于低频大功率微波源.同时电子束能到微波能模拟结果的相对转换效率比平面虚阴极和向内发射虚阴极系统提高了较大的幅度.虚阴极系统电子束密度的三维分布图说明,相同间隙与输入电压和二极管阻抗的情况下,外发射同轴虚阴极具有较低的阳极电子束密度,从而使之将有利于延长输出大功率微波的脉宽.

- [1] E. G. Zhang *et al.* *High Power Laser and Particle Beams* , **8** (1996) , 355(in Chinese) [张恩官等, 强激光与粒子束 , **8** (1996) 355].
- [2] Benford J. Swegle , *High Power Microwave* (ARTECH House Inc. , New York , 1992).
- [3] V. Tarakanov , *User Manual of Code KARAT Version 70602* , Ekaterinburg , (1998).
- [4] J. Banford , D. Price , H. Sze *et al.* , *J. Appl. Phys.* , **61** (1989) , 1321.
- [5] G. Z. Liu *et al.* , *Proceeding of SPIE Intense Microwave Pulses V* (San Diego , 1997) , p. 524.
- [6] H. R. Jory , A. W. Trivelpiece , *J. Appl. Phys.* , **40** (1969) , 3924.
- [7] H. Shao *et al.* , *High Power Laser and Particle Beams* , **10** (1998) , 616(in Chinese) [邵浩等, 强激光与粒子束 , **10** (1998) 616].
- [8] Y. Y. Yang , W. Ding , *Acta Phys. Sin.* , **48** (1999) , 2275(in Chinese) [杨蕴渊、丁武, 物理学报 , **48** (1999) 2275].
- [9] W. Ding , *Acta Phys. Sin.* , **46** (1997) , 2180(in Chinese) [丁武, 物理学报 , **46** (1997) 2180].
- [10] R. B. Miller , *An Introduction to the Physics of Intense Charged Particle Beams* (Plenum Press , New York , 1982).
- [11] Z. K. Fan *et al.* , *Acta Phys. Sin.* , **49** (2000) , 1249(in Chinese) [范植开, 物理学报 , **49** (2000) 1249].
- [12] G. Z. Liu *et al.* , *Acta Phys. Sin.* , **47** (1998) , 288 (in Chinese) [刘国治等, 物理学报 , **47** (1998) 288].
- [13] S. Woolverson *et al.* , *Proceedings of SPIE Intense Microwave Pulses V* (San Diego , 1997) , p. 1214.

STUDIES OF OUTWARD-EMITTING COAXIAL VIRCATOR*

SHAO HAO LIU GUO-ZHI

(*Northwest Institute of Nuclear Technology , P. O. Box 69-13 , Xi'an , 710024 , China*)

(Received 20 June 2000 ; revised manuscript received 26 June 2001)

ABSTRACT

As a novel concept of vircator geometry proposed in this paper , the outward-emitting coaxial vircator(OECV) is at the cutting edge in the field of high-power microwave(HPM) source researches . Theoretical analyses are carried out to study the space-charge-limiting current in coaxial configuration and the terms of virtual cathode formation . According to the simulation results , OECV has the advantages in energy conversion efficiency and bears the potentialities in increasing the high-power microwave pulse width , as well as in generating HPM in relatively low bands . Two kinds of geometries for HPM emission are also given in this paper .

Keywords : vircator , high power microwave , pulsed power , electron beam diode

PACC : 5235 , 5240M , 4180D

* Project supported by the National High Technology Development Program of China(Grant No. B410-741).