

新型反馈式轴向同轴虚阴极振荡器*

刘 静[†] 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 2 月 11 日收到; 2009 年 6 月 28 日收到修改稿)

提出一种利用低磁场导引环形电子束在同轴波导内轴向激励虚阴极振荡的新型虚阴极振荡器. 利用反馈式结构, 使虚阴极在由反馈环、阳极箔和同轴波导构成的高品质因子准谐振腔内形成. 作用腔内环形电子束激励同轴波导 TM_{01} 模式, 在相对低品质因子的同轴提取区转化为 TEM 主模输出. 用 2.5 维 KARAT 粒子模拟软件研究得到束波功率转换效率 12%, 输出微波平均 2.7 GW, 中心频率 3.8 GHz.

关键词: 环形电子束, 轴向导引磁场, 同轴波导, 反馈环

PACC: 5235, 5265, 4180D

1. 引 言

虚阴极振荡器与其他类型的高功率微波源相比, 具有结构简单、输出功率高和低阻抗的特点, 但是较低的束波功率转换效率(通常不超过 10%)一直制约着虚阴极振荡器的广泛应用和发展^[1,2]. 为此, 国内外研究人员提出了多种改进结构, 以提高效率^[3-14]. 其中比较典型的结构包括同轴虚阴极振荡器、反馈式虚阴极振荡器和束流预调制型虚阴极振荡器.

同轴虚阴极振荡器是目前研究最为广泛的结构, 实验研究显示束波功率转换效率可达 8.7%, 输出功率约 1.2 GW 量级, 频率 2.7 GHz^[3]. 但是这种结构采用径向作用, 因而体积一般较轴向结构大; 其次采用侧向提取, 存在 TE_{11} 和 TM_{01} 模式竞争^[3,4].

反馈式虚阴极振荡器在实验中得到大于 700 MW 微波输出, 效率大于 10%, 中心频率 4.1 GHz, TM_{01} 主模式单模工作^[8]. 此外, 反馈环结构也被广泛应用在其他类型的虚阴极振荡器中, 例如同轴虚阴极中使用多种结构的反馈环, 在实验中得到了功率成倍增长的微波输出^[9]. 国内最新报道的新型径向三腔同轴虚阴极振荡器结构, 利用反馈环在径向构成多腔结构, 在模拟中得到平均功率 2.45 GW, 效率 12%, 中心频率为 4.14 GHz, 纯 TEM 主模微波

输出^[10].

束流调制型虚阴极振荡器在实验中得到了束波功率转换效率 5%, 功率近 1GW, S 波段的微波输出^[11,12].

本文提出了一种新型的反馈式轴向同轴虚阴极振荡器. 利用轴向低磁场导引的环形电子束在同轴波导内激励轴向虚阴极振荡, 并在阳极箔下游引入反馈环和内导体台阶, 形成准谐振腔结构, 以提高束波功率转换效率. 首先介绍了提出这种新型模型的物理思想, 然后用 2.5 维 KARAT 软件对该结构进行了粒子模拟, 最后结合理论分析和模拟结果对器件结构参数和工作特性给出了物理解释^[15].

2. 模型简介

传统轴向虚阴极振荡器是利用实心电子束在圆柱波导内激励 TM_{01} 主模式微波输出. 然而, 在圆柱波导内, 环形电子束较实心束具有更高的空间极限电流. 因此, 若使用环形电子束激励虚阴极振荡, 有利于提高器件注入电功率, 可能得到更高功率的微波输出^[16]. 其次, 环形电子束内部空间电荷作用较实心束小, 电子束能散小且相位更均匀. 因此, 使用环形电子束激励虚阴极振荡, 有利于增强束波功率转换效率. 但是理论和模拟研究表明: 采用实心电子束在圆柱波导内激励 TM_{01} 主模式微波输出较

* 国家高技术研究发展计划资助的课题.

[†] E-mail: ljofnudt@163.com

环形电子束具有更高的束波转换效率,对于高阶 TM_{0n} 模式,采用环形电子束才更加有效^[17].

为实现环形电子束有效地激励起 TM_{01} 微波主模虚阴极振荡,我们提出在同轴波导内环形束激励反馈式虚阴极振荡的结构,如图 1 所示. 环形电子束在导引磁场作用下沿轴向运动,穿过阳极箔后,在由反馈环(reflector)、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.

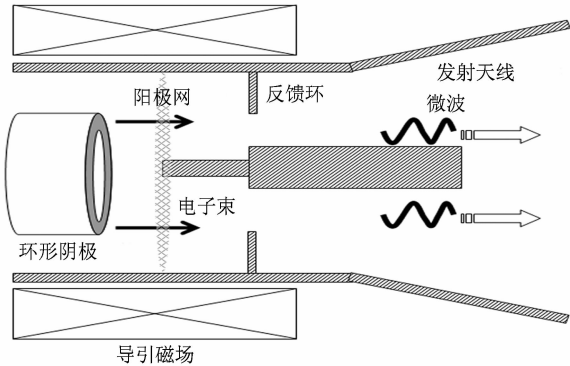


图 1 反馈式同轴虚阴极振荡器结构示意图

同轴波导相对于圆柱波导能够更进一步增强环形束的空间极限电流,可能得到更高功率的微波输出^[18]. 此外,文献[19]中指出:虚阴极区域的电场强度对束波相互作用程度影响较大,增强虚阴极区域的电场强度可以增强束波相互作用,提高束波功率转换效率. 因此,利用同轴波导将能够实现环形电子束分布在同轴 TM_{01} 模式轴向电场的极大值附近,可能获得较强的束波相互作用,从而提高束波功率转换效率. 图 2 所示为圆柱波导和同轴波导内 TM_{01} 模式轴向电场分量的径向分布及电子束分布.

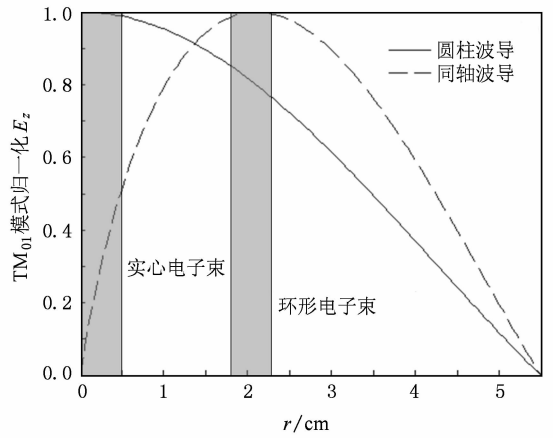


图 2 圆柱波导和同轴波导内 TM_{01} 模式轴向电场径向分布及电子束位形示意图

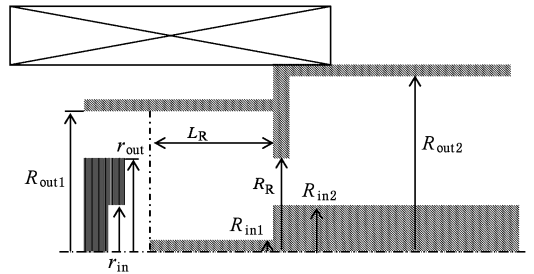


图 3 新型同轴波导内轴向虚阴极振荡器粒子模拟结构示意图

表 1 粒子模拟优化结构参数(单位:cm)

物理量	数值	物理量	数值
r_{in}	2.5	R_{in1}	0.5
r_{out}	3.5	R_{in2}	2.5
R_{out1}	5.0	L_R	5.3
R_{out2}	5.5	R_R	3.5

3. 粒子模拟

利用 2.5 维 KARAT 软件对轴向同轴虚阴极振荡器进行粒子模拟,模拟结构如图 3 所示. r_{in}, r_{out} 分别为环形电子束的内外径, R_{out1} 为二极管外径和虚阴极束波作用腔同轴波导的外导体内径, R_{in1} 为作用腔同轴波导内导体半径, L_R, R_R 分别为反馈环至阳极箔的轴向距离和反馈环半径, R_{in2}, R_{out2} 分别为微波提取腔同轴波导内导体半径和外导体内径.

在二极管电压 700 kV, 束流 37 kA, 导引磁场强度 1.1 T 的条件下,优化的结构参数和粒子模拟结果分别如表 1 和图 4 所示.

从图 4(a) 和图 4(b) 的电子束时空图和相空间图可以看出:电子在由阳极网、反馈环和同轴波导内导体形成的开口作用腔内形成强烈的轴向虚阴极振荡,透射电子受到明显的密度调制,说明环形电子束在同轴波导内可以激励虚阴极振荡. 图 4(c) 和图 4(d) 所示为电子束功率沿轴向分布及波导输出口的微波功率随时间的变化,可以看出:电子束注入功率约为 22.5GW, 激励微波的平均功率为 2.7GW, 因此,束波功率转换效率为 12% 左右;较高的电子束注入电功率和微波输出功率得益于环形电子束在同轴波导内具有比圆柱波导内更高的空间极限电流,环形束在同轴波导 TM_{01} 轴向电场极大值附近激励虚阴极振荡是实现较高的束波功率

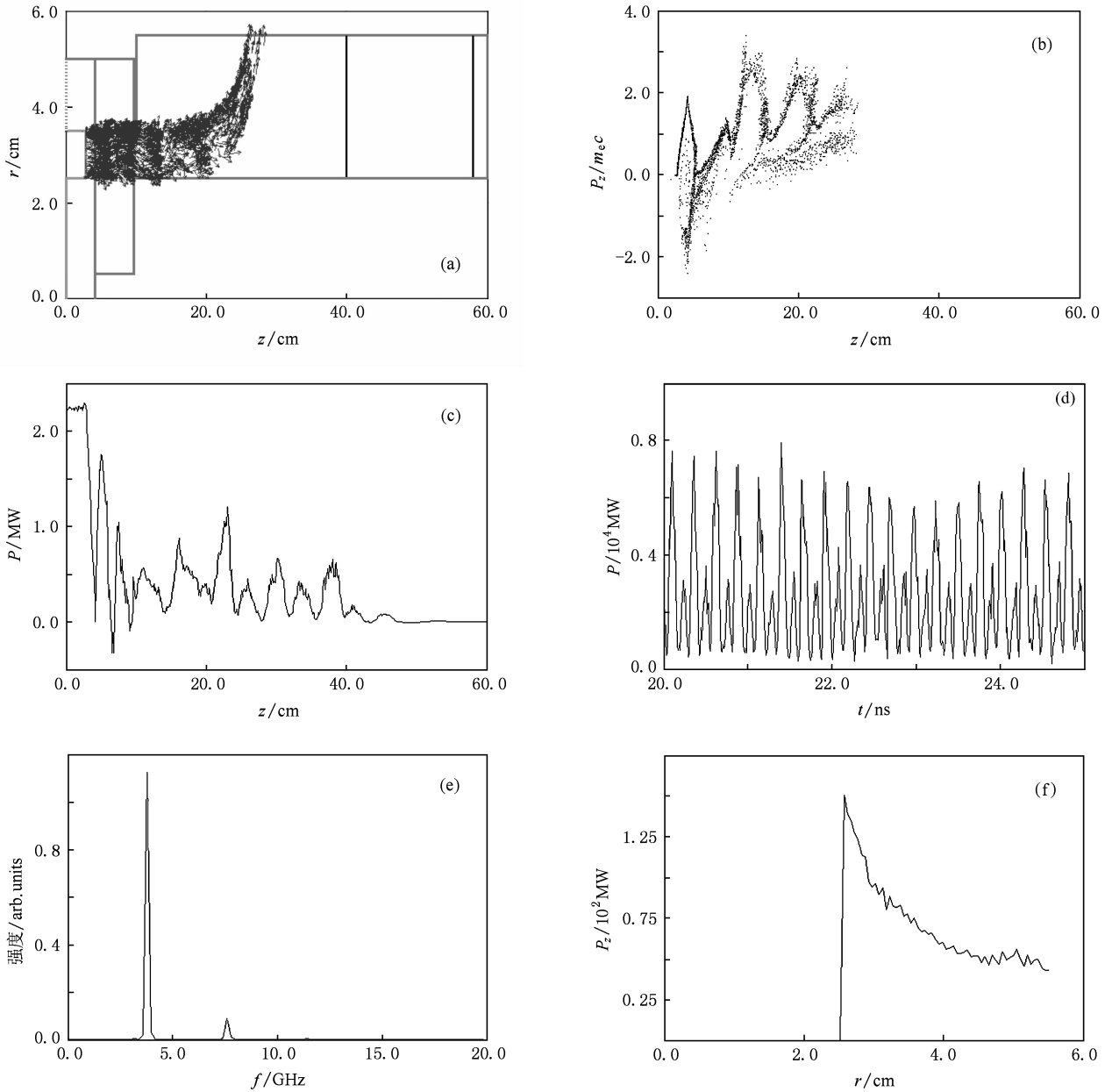


图4 粒子模拟主要结果 (a) 电子实空间图, (b) 电子相空间图, (c) 功率随轴向的变化, (d) 微波输出功率, (e) 微波功率 FFT, (f) 输出口微波功率的径向分布

转换效率的关键, 轴向磁场约束电子的径向扩散, 有利于更多的电子参与轴向的束波相互作用. 图4 (e) 说明这种结构的虚阴极振荡具有较好的单频特性, 微波中心频率在 3.8 GHz 附近; 由于借鉴了圆柱波导内轴向反馈式虚阴极的物理思想, 在同轴波导内引入反馈机理, 从而由阳极网、反馈环和同轴波导内导体形成的准谐振腔具有锁频特性, 因此微波频率单一, 频谱窄. 图4 (f) 给出了波导端口微波轴向功率的径向分布, 通过对比同轴波导内 TEM 和低阶 TM_{0n} 的场分布特性, 可以看出激励微波是以 TEM

主模输出.

为了进一步说明反馈式同轴波导内虚阴极振荡器的工作特性, 利用高频电磁场软件对束波作用腔和提取腔结构进行本征频率及相应场分布分析, 结果如图5所示. 图5 (a) 中 $D(k^2)$ 是关于波数 k 的多项式. $D(k^2) = 0$ 且 $dD(k^2)/dk = 1$ 时, 该处曲线过零点值, 为稳定谐振点^[20-22].

从图5 (a) 中容易看出, 粒子模拟得到的微波中心频率 3.8 GHz 为结构冷测本征频率, 因此电子束与该频率对应的谐振腔本征模发生谐振, 极大增强

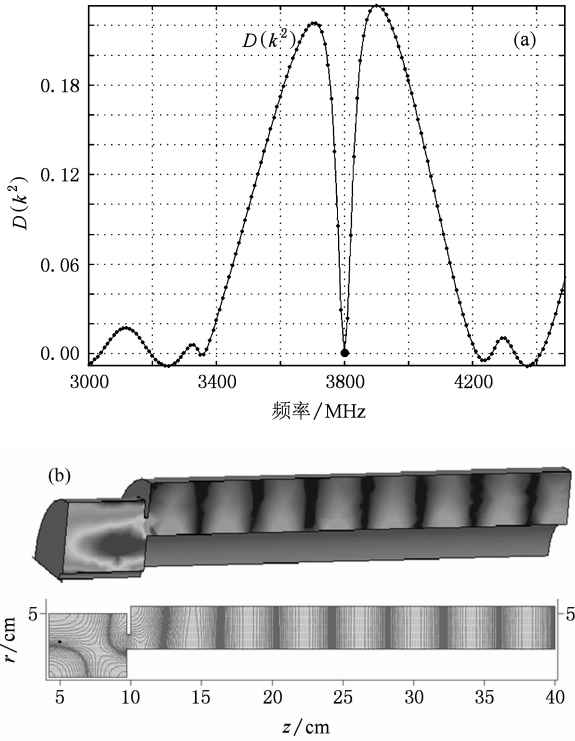


图 5 器件作用腔及提取结构本征频率及谐振点场分布数值模拟结果 (a) 本征频率分析, (b) 3.8 GHz 器件内场分布

束波相互作用, 得到高束波转换效率的微波输出. 从图 5 (b) 中容易看出, 频率为 3.8 GHz 的微波在作用腔内主要为同轴波导的 TM_{01} 模, 而在提取腔内转换为 TEM 模, 且作用腔内 TM_{01} 模式轴向电场在径向 3 cm 附近有极大值, 即粒子模拟使用的结构参数实现了环形电子束在轴向磁场引导下主要分布在同轴波导 TM_{01} 模式轴向电场的极大值附近, 从而束波相互作用强烈, 利于得到较高的束波功率转换效率.

但是, 利用现有虚阴极振荡频率的解析公式计算得到的微波频率^[23]与模拟结果差异较大:

$$f_1 = \frac{\omega_p}{2\pi} = 4.08 \sqrt{\frac{J(\text{kA/cm}^2)}{\gamma\beta}} \approx 4.53 \text{ GHz}, \quad (1)$$

$$f_2 = 4.77 \frac{1}{d} \ln(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) \approx 4.98 \text{ GHz}, \quad (2)$$

$$f_3 = \frac{1}{4T} = 7.5 \frac{\beta}{d} = 6.83 \text{ GHz}, \quad (3)$$

其中 $\omega_p = (ne^2/\epsilon_0 m\gamma)^{1/2}$ 为电子束等离子体频率, n, e, m, γ 分别是电子数密度、单位电荷、电子的质量和

电子的相对论因子, ϵ_0 是真空介电常数, $J = env$ 是电子束的电流密度, v 为电子运动速度, $\beta = v/c$ 即电子运动速度与光速的比值, d 表示虚阴极的阴阳极间距, T 为电子在阳极箔与虚阴极之间运动的周期. 一方面, 因为上述解析式是针对电子束在圆柱波导内运动激励虚阴极的情况, 而我们的模型在束波作用区使用了同轴波导. 其次, 传统轴向虚阴极使用无磁场导引的实心电子束, 而这里我们采用的是低磁场导引的环形电子束, 电子的运动特征有显著变化. 因此, 这种反馈式轴向同轴虚阴极振荡器的谐振频率特性有待于进一步的理论研究.

此外, 通过模拟我们还发现, 虽然现有结构的虚阴极振荡器束波功率转换效率得到提高, 但是微波提取效率较低. 图 6 所示为腔内功率的模拟结构及高频软件对该结构 S 参数的分析. 从图 6 (a) 可以发现: 作用腔内束波作用强烈, 相对于微波输出功率 (如图 4 (d) 所示), 仅 50% 的微波功率被提取. 图 6 (b) 中 TM_{01} -TEM 的能量转换效率仅为 37.2%, 即反馈环和内导体台阶反射作用强, 对虚阴极调制作

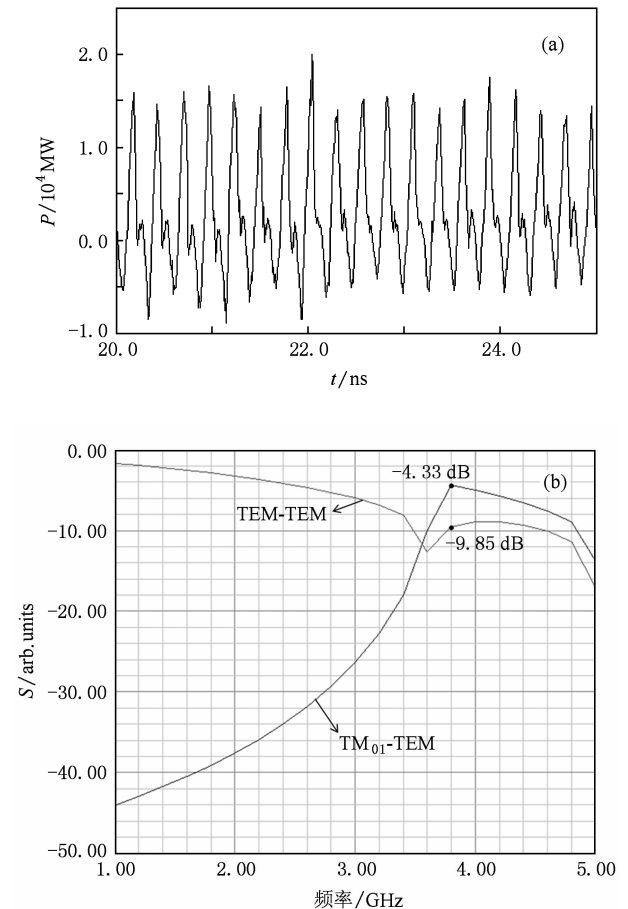


图 6 微波功率提取分析 (a) 时间序列, (b) 功率谱

用明显,但是能量在腔内非常集中,输出较少. 这需要进行进一步改进结构,如利用多环结构兼顾反射调制和提高微波输出^[8].

最后需要指出的是,为控制环形电子束在同轴波导内的传输,抑制束径向扩散,模型中使用了强度 1.1 T 的轴向导引磁场. 若采用线圈磁场将增加了器件重量和体积,因此在下一步的结构优化中需要尽量减小磁场强度,借助虚阴极束波作用区短的特点,争取实现永磁包装.

4. 结 论

本文提出了一种利用环形电子束在同轴波导内轴向激励虚阴极振荡的新型结构虚阴极振荡器. 借助反馈式结构用 2.5 维 KARAT 粒子模拟软件得到效率 12%, 输出平均功率 2.7 GW, 微波中心频率 3.8 GHz, 主模式为 TEM 模, 并对模拟结果进行了初步的物理解释.

- [1] Barker P B, Schamiloglu E 2004 *High-Power Microwave Sources and Technologies* (Beijing: Tsinghua University Press) (中译本) [Barker R J, Schamiloglu E 2004 高功率微波源与技术 (北京:清华大学出版社)]
- [2] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E 2007 *High Power Microwaves* (2nd Edition) (Boca Raton: Taylor and Francis Group, LLC)
- [3] Shao H, Liu G Z, Yang Z F 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 7
- [4] Zhang Y J, Meng F B, Fan Z K, Luo X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 975 (in Chinese) [张运俭、孟凡宝、范植开、罗 雄 2008 物理学报 **57** 975]
- [5] W Jiang, K. Woolverton, J Dickens, M Kristiansen 1999 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **27** 1538
- [6] Shu T, Wang Y, Qian B L, Tan Q M 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 1646
- [7] Li Z Q, Shu T, Wang Y, Qian B L, Zhao Y S 2003 *High Power Laser Part. Beams* **15** 1209 (in Chinese) [李志强、舒 挺、王 勇、钱宝良、赵延宋 2003 强激光与粒子束 **15** 1209]
- [8] 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
- [9] W. Jiang, J. Dickens, M. Kristiansen 1999 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **27** 1543
- [10] Luo X, Liao C, Meng F B, Zhang Y J, Wang X D 2007 *High Power Laser Part. 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]
- [11] Kitsanov S A, Klimov A I, Korovin S D 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 1179
- [12] Wang H G, Zhang Y Z, Chen Y Z 2003 *J. Natl. Univ. Def. Technol.* **25** 79 (in Chinese) [王弘刚、张亚洲、陈宇中 2003 国防科技大学学报 **25** 79]
- [13] Kwan T J 1986 *Phys. Rev. Lett.* **57** 1895
- [14] Yang W Y 2007 *High Power Laser Part. Beams* **19** 453 (in Chinese) [杨温渊 2007 强激光与粒子束 **19** 453]
- [15] Tarakanov V P 2004 *User's Manual for Code KARAT* (Virginia: Berkeley Research Associate inc.)
- [16] Miller R B, Straw D C 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 1897
- [17] Liu J, Shu T, Zhang Y W 2006 *High Power Laser Part. Beams* **18** 2039 (in Chinese) [刘 静、舒 挺、张玉文 2006 强激光与粒子束 **18** 2039]
- [18] Xiao R Z, Liu G Z, Lin Y Z, Cheng C H, Shao H, Hu Y M, Wang H J 2006 *High Power Laser Part. Beams* **18** 241 (in Chinese) [肖仁珍、刘国治、林郁正、陈昌华、邵 浩、胡咏梅、王宏军 2006 强激光与粒子束 **18** 241]
- [19] Jiang W, Masugata K, Yatsui K 1994 *Phys. Plasmas* **2** 982
- [20] Li Z H, Meng F B, Chang A B, Hu K S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3627 (in Chinese) [李正红、孟凡宝、常安碧、胡克松 2004 物理学报 **53** 3627]
- [21] Halbach K, Holsinger R F 1976 *Part. Acceler.* **7** 213
- [22] Luo X, Liao C, Luo X, Meng F B, Zhang Y J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5774 (in Chinese) [罗 雄、廖 成、孟凡宝、张运俭 2006 物理学报 **55** 5774]
- [23] Barker R J, Schamiloglu E 1991 *High Power Microwave* (Fitchburg Artech House)

A novel configuration of vircator with coaxial waveguide^{*}

Liu Jing[†] Shu Ting Li Zhi-Qiang

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

(Received 11 February 2009; revised manuscript received 28 June 2009)

Abstract

A novel configuration of vircator with coaxial waveguide generated by annular electron beam under low guiding magnetic field is presented and the 2.5-D particle-in-cell simulations are carried out using KARAT code. We obtain High power microwave with average power of 2.7GW, frequency of 3.8GHz, of which the beam-to-wave power efficiency and dominant mode are 12% and TEM mode, respectively.

Keywords: annular electron beam, axially guided magnetic field, coaxial waveguide, feedback

PACC: 5235, 5265, 4180D

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China.

[†] E-mail: ljofnuds@163.com