

0.14太赫兹同轴表面波振荡器研究

陈再高¹⁾²⁾ 王建国^{1)2)†} 王光强²⁾ 李爽²⁾ 王玥²⁾ 张殿辉²⁾ 乔海亮²⁾

1)(西安交通大学, 电子与信息工程学院, 西安 710049)

2)(西北核技术研究所, 西安市69信箱12分箱, 西安 710024)

(2013年12月18日收到; 2014年2月9日收到修改稿)

为了提高太赫兹表面波振荡器的输出功率, 本文提出了同轴结构的表面波振荡器模型, 并且获得了该同轴结构 TM_{01} 模的色散曲线, 采用自行研制的全电磁粒子模拟软件 UNIPIC 对提出的同轴结构表面波振荡器进行了模拟, 结果表明器件的工作频率与圆柱结构时的表面波振荡器相同, 在输出端以 TEM 模式传输太赫兹波, 输出功率相比圆柱结构的表面波振荡器输出功率水平提高了 67.8%.

关键词: 太赫兹, 表面波振荡器, 同轴结构, 粒子模拟

PACS: 07.57.Hm, 45.10.Db, 52.65.-y

DOI: 10.7498/aps.63.110703

在我们研制的相对论表面波振荡器中, 相互作用腔采用圆柱结构, 如图 1 (a) 所示, 在圆柱波导内

1 引言

太赫兹 (THz) 波是指频率在 0.1—10 THz 范围内的电磁波, 它的长波段与毫米波相重合, 而在短波段则与远红外相重合. 太赫兹技术在高速宽带通讯、雷达、隐密物质探测、药品检测、等离子体加热和探测等方面具有重要应用^[1,2], 但应用的前提是必须有一定功率水平的太赫兹源.

真空电子器件是产生大功率低频端太赫兹波的主要器件^[3], 太赫兹波段过模表面波振荡器是一种新型的太赫兹真空电子学器件, 它能够产生兆瓦量级的太赫兹波. 采用过模结构的表面波振荡器具有很高的输出功率, 特别是在太赫兹波段, 器件的效率以及输出功率水平都随着频率的升高而降低, 因此研究过模结构的表面波振荡器能够增大电子束的尺寸和提高器件的功率容量, 从而提高器件的输出功率水平. 我们项目组围绕过模表面波振荡器产生太赫兹波的理论、数值模拟和实验方面开展了大量的研究工作^[4-10], 在 CKP1000 和 CKP3000 加速器上实验得到了频率约为 0.14 THz 的太赫兹波输出^[6-8], 利用辐射远场功率密度积分法, 实测功率分别达到约 2.6 MW 和 5 MW^[9,10].

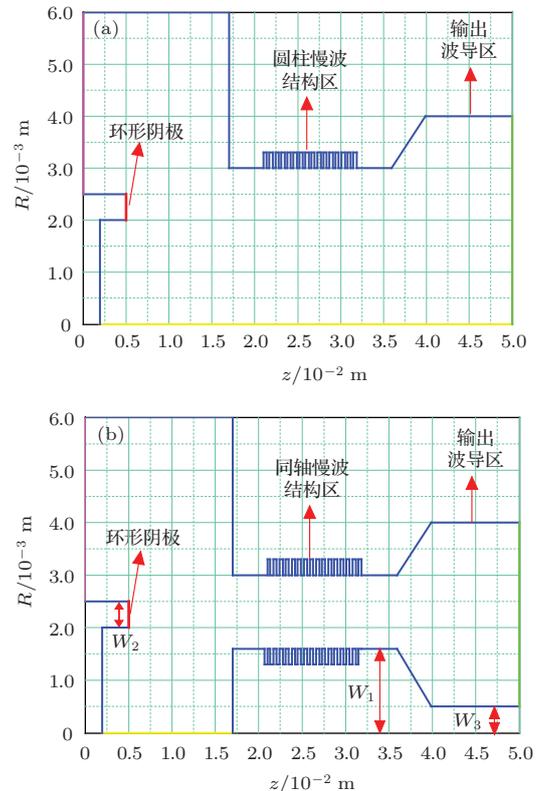


图1 圆柱结构和同轴结构表面波振荡器示意图 (a) 圆柱结构; (b) 同轴结构

† 通讯作者. E-mail: wanguiuc@mail.xjtu.edu.cn

壁上刻慢波结构,使得相互作用腔中结构波的相速度与电子束同步^[5,9,10].在相对论返波振荡器的研究中,采用了同轴慢波结构,研究表明,同轴波导中空间电荷限制流高于普通圆波导,同轴器件中的电子束可具有更高的动能,有利于获得高的效率^[11-16].本文提出同轴相对论表面波振荡器产生太赫兹波,如图1(b)所示,一是将同轴结构返波振荡器推广到表面波振荡器中,二是将X波段同轴结构推广到太赫兹波段,三是期望进一步提高表面波振荡器产生太赫兹波的效率.因此,本文对0.14 THz波段的过模同轴表面波振荡器进行了研究.

2 太赫兹表面波振荡器

2.1 工作原理

表面波振荡器与相对论返波管的作用原理比较相似,其结构示意图如图1所示,它主要由三部分构成,包括高压二极管、慢波相互作用区以及输出波导区,首先是高压二极管产生环状电子注,电子注在外加引导磁场的作用下,沿着 z 方向运动,在慢波相互作用区与慢波结构中的结构波发生相互作用,太赫兹波沿着慢波结构表面传输轴向电场具有表面波的特性,即最大值出现在慢波结构的表面,产生小信号的太赫兹波,因为表面波振荡器一般工作在 TM_{01} 模式,并且电子束的多普勒线与 TM_{01} 模式的色散曲线的交点在 π 点左边,表明所产生的太赫兹波的群速度为正,相速度也为正,太赫兹波的传播为一种行波状态,在波的传播的过程中,电子注不断的将能量转化为太赫兹波的能量,太赫兹波不断得到放大,最后达到饱和状态后输出,而与结构波相互作用后的电子注打到收集极上.

在太赫兹波段,基模结构的真空电子器件截面的电尺寸会变的非常小,随着器件电尺寸的缩小,内部功率密度会不断提高,场强增强会导致器件内部过强的场强而产生击穿破坏效应,器件的效率下降,甚至太赫兹波的辐射停止.采用过模结构的表面波振荡器增加了器件的截面直径,能够降低内部的场强,提高器件的功率容量,使得器件能够进一步的提高输出功率^[5].在慢波结构中,场强主要集中在慢波结构的外导体上,为了提高器件的输出功率,电子注相比基模结构的返波管离慢波结构的表面更加接近,采用同轴结构能够提高空间限制电荷流,减少电子注打到慢波壁上的可能性,提高电子注的传输性能.过模表面波振荡器的过模比较大,采用同轴结构的内导体对器件的整体的功率容量

改变较少,同时内导体的加入改变了两端的电特性,在参数合适时能够提高器件的输出效率.

2.2 同轴太赫兹表面波振荡器的色散曲线

本文提出的同轴结构表面波振荡器的慢波结构如图2所示,其中同轴矩形结构慢波结构的深度 h_1 为0.3 mm,内导体慢波结构的半径 h_2 为1.6 mm,外导体慢波结构的半径 h_3 为3 mm,每一个慢波周期沿着 z 方向的长度 p_1 为0.7 mm,波纹宽度 p_2 为0.35 mm,慢波结构总共由16个周期构成.采用模式分析方法计算同轴周期慢波结构的 TM_{01} 模式的场分布,其中计算得到的 TM_{01} 模式下 π 模场分布如图3所示,其对应的谐振频率为0.151 THz.

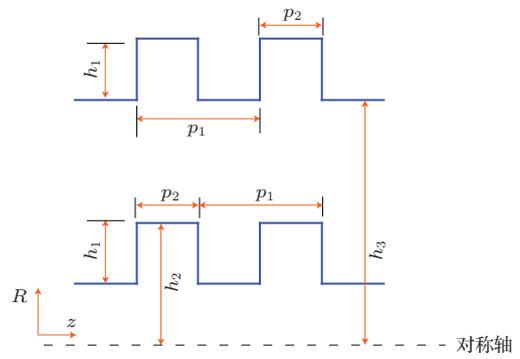


图2 表面波振荡器慢波结构参数

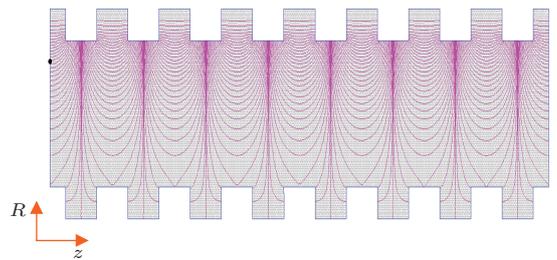


图3 TM_{01} 模式 π 模的场分布

图4为计算得到的同轴结构表面波振荡器慢波结构冷腔的色散曲线以及电子电压为312 kV时电子的多普勒线,电子束的速度 $v_b = 0.7821c$ 其中 c 为光速.从图中可以看出,电子的多普勒线与慢波结构色散曲线的交点在 $7/8\pi$ 模式与 π 模之间.这样可以使得器件工作在 TM_{01} 模式的行波状态,而与 TM_{02} 等高次模的交点在其返波状态,使得 TM_{01} 模式得到有效的激励,而其他模式因为工作在返波状态,电子注无法与它们的零次谐波同步作用,高次模式能够得到有效抑制.

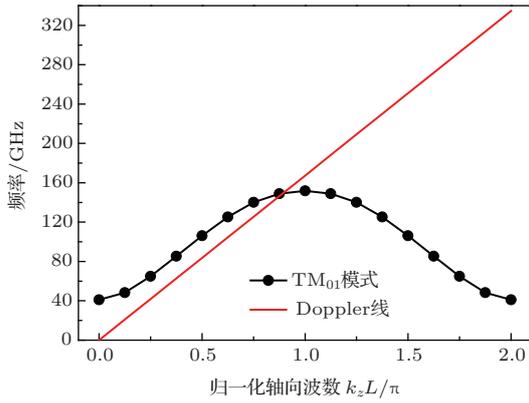


图4 冷腔的色散曲线

3 同轴表面波振荡器的全电磁PIC模拟

2.5维全电磁粒子模拟软件UNIPIC能够模拟相对论返波管(RBWO)、虚阴极振荡器、磁控管以及磁绝缘线振荡器等一系列高功率微波器件[17-19]. 为了使得UNIPIC软件能够对太赫兹波段的真空电子器件进行模拟, 在软件中实现了CPML等高效吸收边界, 对粒子推进算法也进行了相应的改进[20]. 目前, UNIPIC软件可以模拟太赫兹波段的表面波振荡器、返波管和回旋管等[4,5,9,10,21].

采用UNIPIC模拟圆柱结构的表面波振荡器, 器件结构如图1(a)所示, 慢波结构参数与同轴表面波振荡器外导体的慢波结构相同, 器件阴极发射面的宽度为0.5 mm, 爆炸发射产生电子束的束电压为312 kV, 束电流为1.67 kA. 模拟结果如图5所示, 其中图5(a)为器件的输出功率, 从图中可以看出它的输出功率水平为33.3 MW, 图5(b)为器件输出信号的频谱, 从图中可以看出它的工作频率约为0.148 THz. 同轴表面波振荡器使用的电子束参数与圆柱结构表面波振荡器相同, 慢波结构参数如图2所示; 图6给出器件的计算结果, 其中图6(a)是6 ns时粒子相空间图, 图6(b)是1.8 ns时粒子的实空间图, 可以看出, 电子束发生明显的群聚, 并在经过波束相互作用区后打在收集极上. 图6(c)是电场随时间的变化图, 图6(d)是电场的频谱分布图, 从图中可以看出器件的工作频率为0.148 THz, 与圆柱结构器件的工作频率一致. 图6(e)为器件的输出功率, 从图中可以看出平均功率可以达到56 MW, 与图5(a)的对比可以看出, 采用同轴结构的表面波振荡器比圆柱结构时的功率提高了678%,

器件的总效率达到11%, 效率提高的主要原因是采用同轴结构改善了器件的电子束的传输特性以及提高了器件的耦合阻抗. 图6(f)为器件中角向磁场的空间分布, 从图中可以看出它的波导波长约为2 mm, 并且从磁场的分布可以看出, 在同轴波导中传播的模式为TEM模.

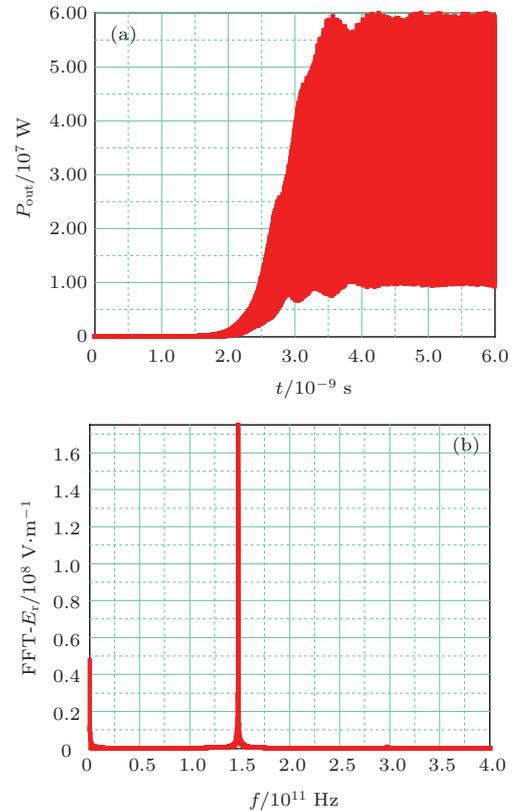


图5 圆柱结构表面波振荡器的模拟结果 (a) 输出功率; (b) 频谱

采用UNIPIC粒子模拟软件模拟了器件的输出功率随几何参数的变化, 几何参数在图1(b)中进行了标示. 模拟结果如图7至图9所示, 图7为器件的输出功率随同轴慢波结构内半径 W_1 的变化, 从图中可以看出, 当内导体半径变大时, 内外导体之间的间距变小, 空间限制电流变大, 束流质量得到改善, 有利于器件中的波束相互作用, 输出功率变大, 当内半径为1.6 mm时, 它具有较大的输出功率, 达到56 MW, 内导体的半径继续变大时, 电场会更加集中在外导体慢波结构表面处, 耦合阻抗变小, 输出功率迅速下降. 图8为输出功率随阴极面宽度 W_2 的变化, 从图中可以看出, 当阴极面宽度较小时, 束电流会随着阴极面变宽而增加, 输出功率变大, 阴极面宽度为0.5 mm时, 器件的输出功率达到最大, 由于电场主要集中在外导体慢波结构的表面处, 并且电场幅度沿着径向为指数分布, 阴极

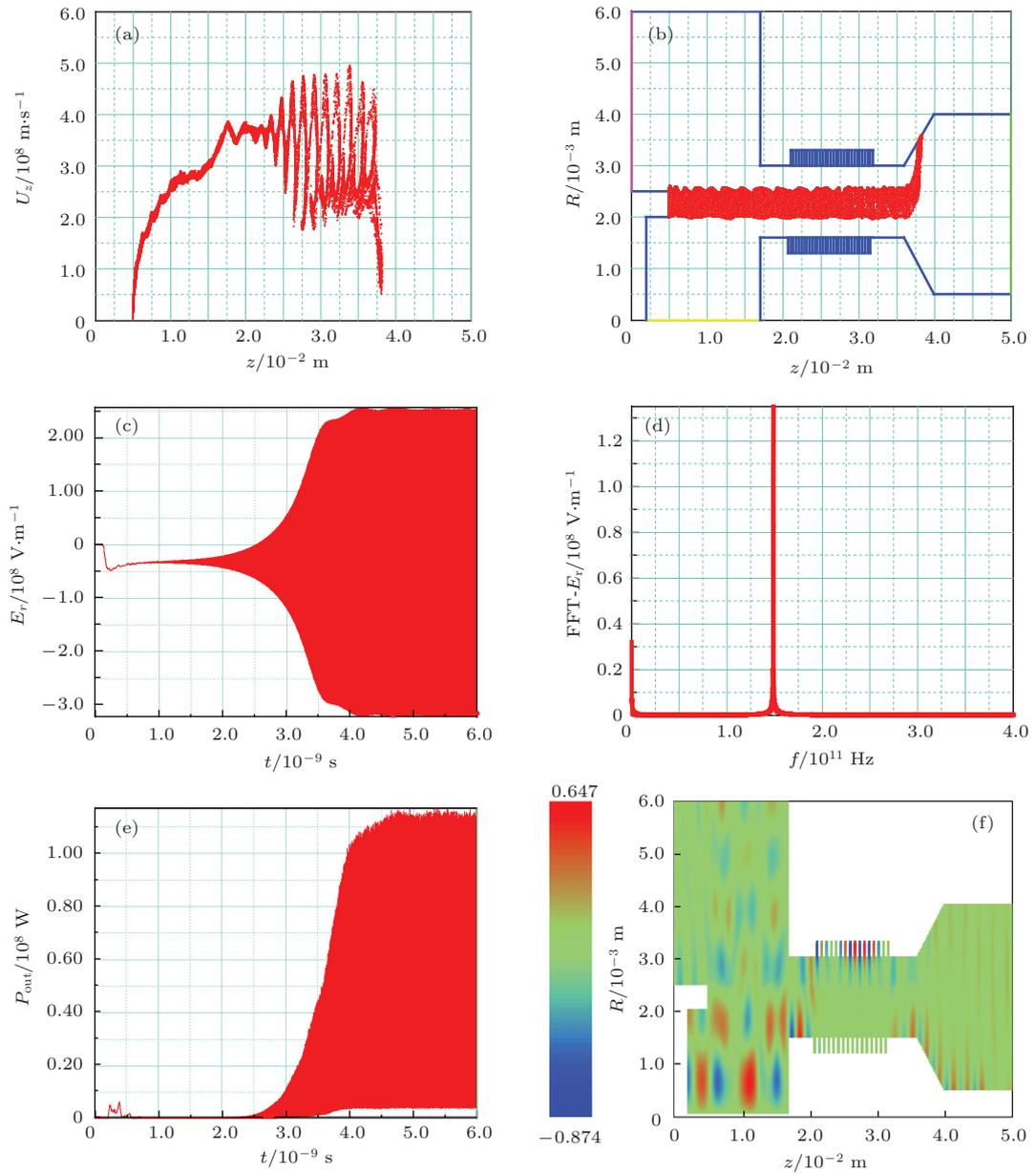


图6 (网刊彩色) 同轴结构表面波振荡器的模拟结果 (a) 粒子相空间图; (b) 粒子实空间图; (c) 电场随时间变化; (d) 电场的频谱图; (e) 输出功率; (f) 磁场分布

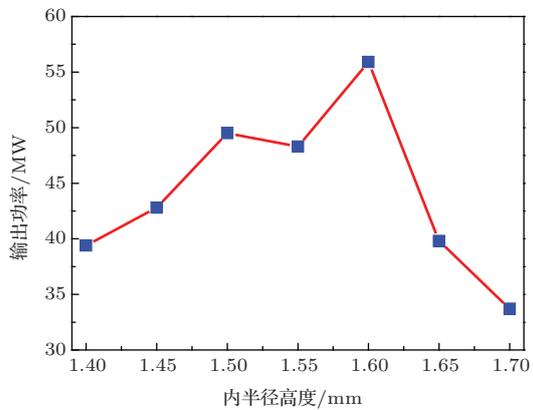


图7 平均输出功率与内导体慢波结构半径的关系

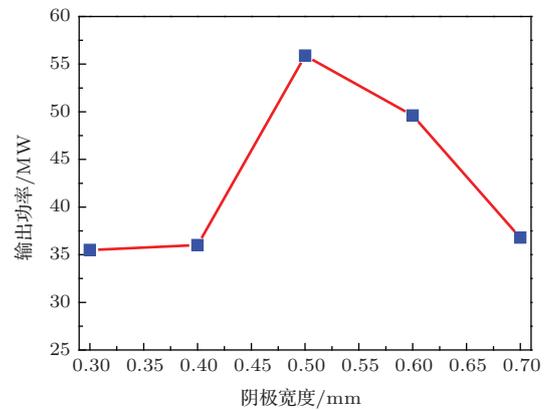


图8 平均输出功率与阴极宽度的关系

面继续变宽时,一部分电子束与电磁场的耦合阻抗变小,同时电子束受到的纵向电场分量不均匀,破坏了电子的群聚效应,器件的输出功率下降.图9为器件的输出功率随输出端口同轴线内半径 W_3 的变化,从图中可以看出,内半径小于0.6 mm时,输出功率均在50 MW以上.从上面几幅图可以看出,慢波结构和阴极发射面均对电子束与电磁波的相互作用产生较大的影响,而因为电子注激励的太赫兹波为前向波状态,端口特性对器件的工作状态影响较小.

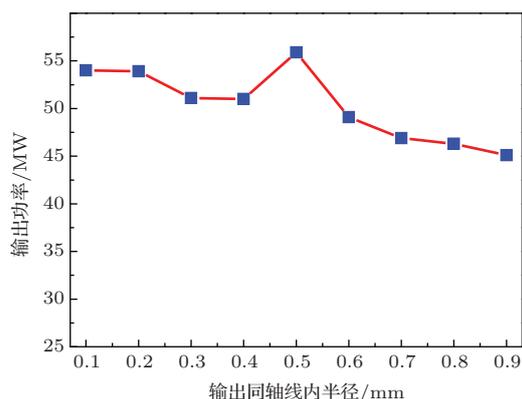


图9 平均输出功率与输出端口同轴线内半径的关系

4 结 论

提出了同轴结构的表面波振荡器,该器件能够产生0.14 THz的电磁波,并采用自行研制的2.5维全电磁粒子模拟软件UNIPIC对这种新型器件进行了数值模拟研究,结果表明,采用同轴结构的表面波振荡器,其输出的频谱与圆柱结构情况下相同,输出的功率水平相比相同慢波结构情况下的圆柱慢波结构的表面波振荡器,其输出功率提高了67.8%.下一步将采用软件对结构进行优化,使得器件的输出功率进一步的增加^[22].

参考文献

- [1] Siegel P H 2002 *IEEE Trans Microw. Theory Techn.* **50** 910
- [2] Booske J H 2008 *Phys. Plasmas* **15** 055502
- [3] Booske J H, Dobbs R J, Joye C D, Kory C L, Neil G R, Park G, Park J Temkin R J 2011 *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **1** 54

- [4] Zhang H, Wang J G, Tong C J, Li X Z, Wang G Q 2009 *Phys. Plasmas* **16** 123104
- [5] Li X Z, Wang J G, Song Z M, Chen C H, Sun J, Zhang X W, Zhang Y C 2012 *Phys. Plasmas* **19** 083111
- [6] Wang G Q, Wang J G, Li S, Wang X F, Tong C J, Lu X C, Guo W J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 150701 (in Chinese) [王光强, 王建国, 李爽, 王雪峰, 童长江, 陆希成, 郭伟杰 2013 物理学报 **62** 150701]
- [7] Wang G Q, Wang J G, Li X Z, Fan R Y, Wang X Z, Wang X F, Tong C J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8459 (in Chinese) [王光强, 王建国, 李小泽, 范如玉, 王行舟, 王雪峰, 童长江 2010 物理学报 **59** 8459]
- [8] Wang X F, Wang J G, Wang G Q, Li S, Xiong Z F 2013 *Chin. Phys. B* **23** 058701
- [9] Wang G Q, Wang J G, Tong C J, Li X Z, Wang X, Li S, Lu X 2013 *Phys. Plasmas* **20** 043105
- [10] Li X Z, Wang J G, Sun J, Song Z M, Ye H, Zhang Y, Zhang L G 2013 *IEEE Transactions on Electron Devices* **60** 2931
- [11] Wen G J, Li J Y, Xiong X Z, Li T M, Liu S G 1997 *High Power Laser and Particle Beams* **9** 347 (in Chinese) [文光俊, 李家胤, 熊祥正, 李天明, 刘盛纲 1997 强激光与粒子束 **9** 347]
- [12] Liu G Z, Chen C H, Zhang Y L 2001 *High Power Laser and Particle Beams* **13** 467 (in Chinese) [刘国治, 陈昌华, 张玉龙 2001 强激光与粒子束 **13** 467]
- [13] Teng Y, Xiao R Z, Liu G Z, Chen C H, Shao H, Tang C X 2010 *Phys. Plasmas* **17** 063108
- [14] Teng Y, Xiao R Z, Song Z M, Sun J, Chen C H, Shao H, Liu G Z 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **24** 175 (in Chinese) [滕雁, 肖仁珍, 宋志敏, 孙钧, 陈昌华, 邵浩, 刘国治 2012 强激光与粒子束 **24** 175]
- [15] Tang Y F, Meng L, Li H L, Wang B, Yin Y, Zhang F N 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **24** 2415 (in Chinese) [唐永福, 蒙林, 李海龙, 王彬, 殷勇, 张斐娜 2012 强激光与粒子束 **24** 2415]
- [16] Teng Y, Chen C H, Shao H, Sun J, Song Z M, Xiao R Z, Du Z Y 2013 *Laser and Particle Beams* **31** 321
- [17] Wang J G, Zhang D H, Liu C L, Li Y, Wang Y, Wang H G, Qiao H L, Li X Z 2009 *Phys. Plasmas* **16** 033108
- [18] Wang J G, Wang Y., Zhang D H 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 681
- [19] Wang J G, Chen Z G, Wang Y, Zhang D H, Liu C L, Li Y, Wang H G, Qiao H L, Fu M Y, Yuan Y 2010 *Phys. Plasmas* **17** 073107
- [20] Wang J G 2013 *Modern Appl. Phys.* **4** 251
- [21] Chen Z G, Wang J G, Wang Y, Qiao H L, Guo W J, Zhang D H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 068402
- [22] Chen Z G, Wang J G, Wang Y, Qiao H L, Zhang D H, Guo W J 2013 *Phys. Plasmas* **20** 113103

A 0.14 THz coaxial surface wave oscillator

Chen Zai-Gao¹⁾²⁾ Wang Jian-Guo¹⁾²⁾† Wang Guang-Qiang²⁾ Li Shuang²⁾ Wang Yue²⁾
Zhang Dian-Hui²⁾ Qiao Hai-Liang²⁾

1) (*School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China*)

2) (*Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-12, Xi'an, Shaanxi 710024, China*)

(Received 18 December 2013; revised manuscript received 9 February 2014)

Abstract

To increase the output power of the surface wave oscillator (SWO) at the terahertz band, this paper presents a new type of coaxial-structured SWO, and its dispersive curve of TM_{01} mode is calculated numerically. The working properties of this new device are numerically simulated by using the self-developed fully electromagnetic particle code UNIPIC. Numerical results show that the working frequency of the coaxial-structured SWO is identical to that of the cylindrical-structured SWO, and the output power from this new coaxial-structured SWO is 67.8% more than that from the cylindrical-structured SWO, and the output mode of the terahertz wave is the transverse electromagnetic mode.

Keywords: terahertz, surface wave oscillators, coaxial structure, particle simulation

PACS: 07.57.Hm, 45.10.Db, 52.65.-y

DOI: [10.7498/aps.63.110703](https://doi.org/10.7498/aps.63.110703)

† Corresponding author. E-mail: wanguiuc@mail.xjtu.edu.cn