

0.14 THz 双环超材料慢波结构表面波振荡器数值研究

郭伟杰 陈再高 蔡利兵 王光强 程国新

Numerical studies on a 0.14 THz coaxial surface wave oscillator with double-ring metamaterial slow wave structure

Guo Wei-Jie Chen Zai-Gao Cai Li-Bing Wang Guang-Qiang Cheng Guo-Xin

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 070702 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.070702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.070702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[0.14 太赫兹同轴表面波振荡器研究](#)

[A 0.14 THz coaxial surface wave oscillator](#)

物理学报.2014, 63(11): 110703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110703>

[连续波抽运气体波导产生太赫兹激光的理论研究](#)

[Research of continuous wave pumping waveguide to generate terahertz laser](#)

物理学报.2014, 63(2): 020702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.020702>

[基于振动弛豫理论提高光抽运太赫兹激光器输出功率的研究](#)

[Improvement of the output power of optical pumping THz lasers based on the theory of vibrational relaxation](#)

物理学报.2014, 63(1): 010702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.010702>

[2.9THz 束缚态向连续态跃迁量子级联激光器研制](#)

[Study of 2.9 THz quantum cascade laser based on bound-to-continuum transition](#)

物理学报.2013, 62(21): 210701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.210701>

[0.14THz 过模表面波振荡器的模式分析](#)

物理学报.2013, 62(15): 150701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.150701>

0.14 THz 双环超材料慢波结构表面波振荡器 数值研究

郭伟杰¹⁾ 陈再高^{1)2)†} 蔡利兵¹⁾²⁾ 王光强²⁾ 程国新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)

(2014 年 9 月 24 日收到; 2014 年 10 月 27 日收到修改稿)

本文研究了一种太赫兹波段双环超材料慢波结构, 并具有同轴引出结构的相对论过模表面波振荡器. 设计了超材料同轴过模慢波结构; 通过色散特性, 进行了模式选择和过模结构电子束电参数和几何参数的设计; 根据超材料同轴慢波结构的特点, 设计了具有同轴引出结构的末端同轴输出段. 粒子模拟结果表明, 在电子束电压为 600 kV 和电流为 1.0 kA, 引导磁场为 2.0 T 时, 同轴超材料慢波结构过模表面波振荡器输出稳定单频的 0.141 THz 电磁波, 峰值功率为 316.8 MW.

关键词: 太赫兹, 超材料慢波结构, 表面波振荡器, 同轴结构

PACS: 07.57.Hm, 41.20.jb, 81.05.Xj, 41.60.-m

DOI: 10.7498/aps.64.070702

1 引言

太赫兹 (THz) 波是指频率在 0.1—10 THz 范围内的电磁波, 它的长波段与微波相重合, 而在短波段则与远红外相重合. 目前, 高功率太赫兹波在安检成像、雷达、数据高速传输、等离子体加热、医药研究等方面具有广泛应用潜力^[1,2], 高功率太赫兹源的研究日益迫切. 真空电子器件是产生大功率太赫兹波的主要器件^[3]. 我们项目组围绕太赫兹波产生器的理论、数值模拟和实验方面开展了大量的研究工作^[4–11], 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^[7,8], 实测功率分别达到约 2.6 MW 和 5 MW^[9,10].

在提高太赫兹波产生效率方面, 我们项目组进行了下列研究: 超辐射^[4]等、离子体填充^[12]、同轴高频结构^[13]、器件结构和电参数的优化等^[14–17]. 为了探索获得更高效率, 本文采用超材料慢波结构设计了一种工作在 0.14 THz 的过模表面波振荡

器. 本文在理论分析的基础上, 建立了研究太赫兹超材料同轴慢波结构过模表面波振荡器的数值模拟模型, 给出了粒子模拟结果, 利用数值模拟优化器件参数, 得到了产生效率大于 26% 的高功率太赫兹源.

2 超材料慢波结构表面波振荡器设计

2.1 超材料慢波结构设计

太赫兹波段过模表面波振荡器的突出优点是相同的工作频率下, 过模结构的横向尺寸相对于基模结构大得多, 这将降低对太赫兹波段器件加工和装配的要求. 过模结构的横向尺寸较大, 在相同的击穿场强下能够具有比基模结构更高的功率容量.

表面波振荡器中, 慢波结构是束波能量转换的核心部件, 改进慢波结构是提高表面波振荡器效率的主要途径. 传统的表面波振荡器慢波结构采用带有波纹的圆波导结构 (如矩形波纹、正弦波纹、阶梯

† 通信作者. E-mail: chenzaigao@mint.ac.cn

波纹等). 本文采用超材料设计中常常使用的金属环与杆组合的方式, 设计了双层同心金属环的超材料慢波结构, 金属环慢波结构能够在高能电子束通过时避免被其击穿 [18,19].

采用超材料慢波结构的过模表面波振荡器如图 1 所示, 电子束与电磁波相互作用的慢波结构区由内外双层同心环及贯穿始末的内导体组成; 内导体位于电子束内空心部分; 环形电子束从内外环中间通过; 电子束打在内导体末端的收集极上被吸收; 输出系统采用同轴引出结构. 为了降低支撑结构对慢波结构色散特性的影响, 外层金属环与内层金属环分别采用介质薄层进行连接, 并采用金属杆将介质层分别连接到同轴慢波结构的外导体与内导体.

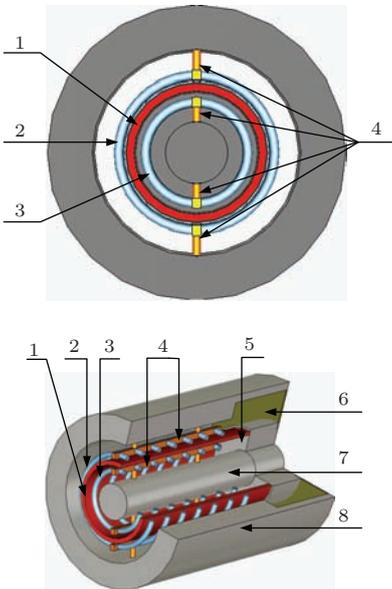


图 1 同轴超材料慢波结构表面波振荡器示意图 (1 电子束、2 慢波结构外环、3 慢波结构内环、4 支撑结构、5 电子束收集极、6 太赫兹波输出端、7 内导体、8 过模波导)

2.2 色散特性

本文设计的同轴过模超材料慢波结构各部分参量, 如图 2 所示, 其中内环半径 $R_1 = 3.75$ mm, 外环半径 $R_2 = 5.25$ mm, 内外金属环半径 $r = 0.3$ mm, 内导体半径 $R_b = 2.4$ mm, 超材料慢波结构周期为 0.9 mm. 慢波结构的作用是把其中传输的复杂行波的相速 v_p 减小到小于真空中的光速, 使结构波相速 v_p 和电子速度 v_e 能够满足同步条件, 即 $v_p \approx v_e$. 慢波结构的每一个行波都包含着无穷多个空间谐波, 电子枪产生的薄环电子注实际上是与其中某一个模式 (如 TM_{01} 模的零次空间谐波)

发生相互作用, 从而产生并放大太赫兹波.

本文采用微扰法研究内导体半径对慢波结构 TM_{01} 模的耦合阻抗的影响, 并利用 Superfish 软件计算该慢波结构的色散特性曲线. 具有不同内导体半径的慢波结构 TM_{01} 模耦合阻抗如图 3 所示, 其中 π 点位于曲线的最右端, 对应的频率约为 0.145 THz, 内导体半径为 0.0 mm 时表示无内导体存在. 从图中可以看出内导体半径不变时, 慢波结构耦合阻抗随工作频率的增加而变大, 表明器件的工作点越接近 π 点时耦合阻抗越大; 当内导体半径为 2.4 mm 时慢波结构的耦合阻抗最大, 因此选择内导体半径为 2.4 mm. 金属环半径对 TM_{01} 模 π 点频率的影响如图 4 所示, 慢波结构的其他参数保持不变, 从图中可以看出, 当环半径的变化范围为 [0.20, 0.40] mm 时, π 点频率的变化范围为 [0.14, 0.15] THz.

同轴超材料慢波结构的最低三个 TM 模式的色散关系如图 5 所示, 图中曲线为超材料慢波结构色散曲线和电子束多普勒线. 慢波结构色散曲线在接近 π 点的空间谐波为表面波. 因此, 同轴超材料慢波结构表面波振荡器的工作点设计在接近 π 点的位置.

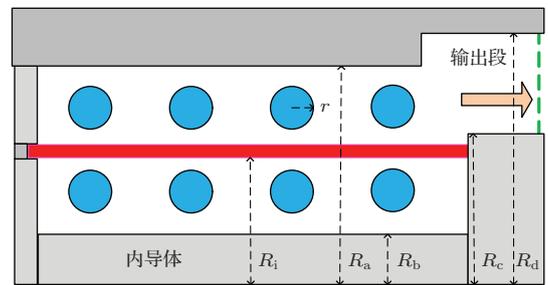


图 2 计算模型示意图

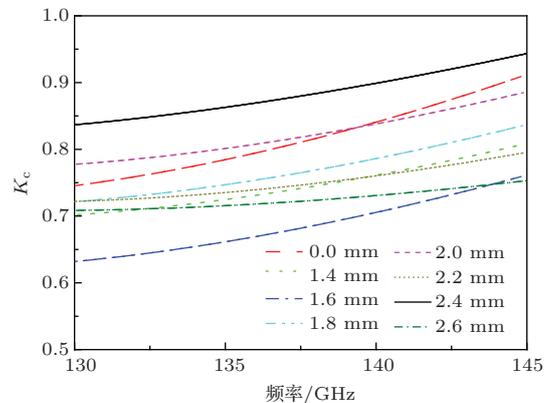


图 3 (网刊彩色) TM_{01} 模的 π 模的耦合特性

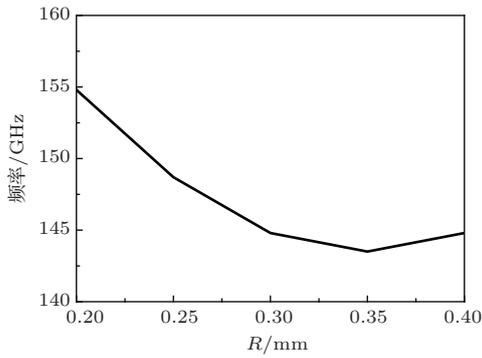


图4 金属环半径对 TM_{01} 模 π 点频率的影响

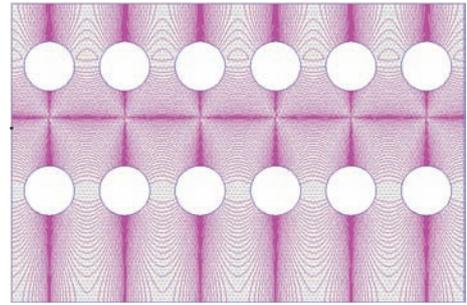


图6 内导体半径为 2.4 mm 的 TM_{01} 模 π 模的场分布

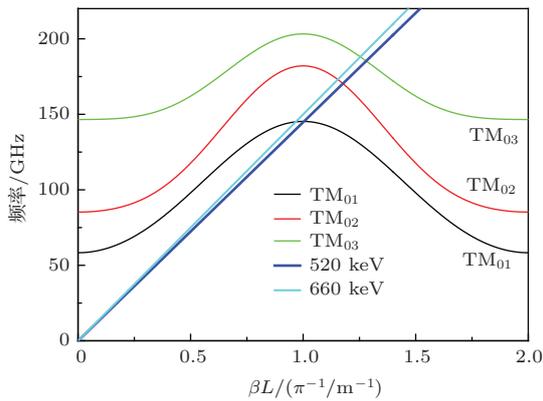


图5 (网刊彩色) 最低 3 个 TM 模式的色散曲线

2.3 电子束参数设计

从图 5 中可以看出, 3 个模式之间没有禁带, 为典型过模结构的色散关系. 为了抑制过模结构带来的模式竞争问题, 采取如下的选模方式, 工作点选取电子束多普勒线与 TM_{01} 模式色散曲线位于前向波区域的交点, 电子多普勒线与 TM_{01} 交于 π 点左侧靠近 π 点处的前向波状态, 而与 TM_{02} 和 TM_{03} 等高次模交在反向波状态. 从图 5 中可以看出, 3 个模式之间离得比较近, 工作电压过高将使高次模进入 π 模, 会与 TM_{01} 竞争耦合功率; 工作电压的最低范围须保证 TM_{01} 工作在前向波状态. 因此, 电子束的工作电压范围取 [520, 660]kV.

内导体半径为 2.4 mm 的六周期结构 TM_{01} 模式 π 模的电场分布如图 6 所示. 因为半径小于 2.4 mm 的部分为内导体, 所以只需计算 2.4 mm 至 6.0 mm 区域的场分布. 从图 6 中可以看出 TM_{01} 模式 π 模电场最大值出现在两层环中间的位置.

为了获得较高的束波转换效率, 应当考虑将电子束放在电场最大值出现的位置附近, 因此可确定 0.5 mm 厚的电子束的位置为 4.25 mm 至 4.75 mm.

2.4 慢波结构输出段设计

0.14 THz 超材料慢波结构表面波振荡器示意图如图 2 所示, 采用轴向内导体末端收集极, 这样可降低电子束在收集前的径向电场, 同时也能降低轴向引导磁场系统的复杂度. 电子束的外半径确定为 4.75 mm 时, 轴向内导体收集极半径也要相应增大. 经过详细模拟计算, 收集极半径 R_c 设计为 4.9 mm, 同轴引出结构圆波导内半径 R_d 为 8.5 mm.

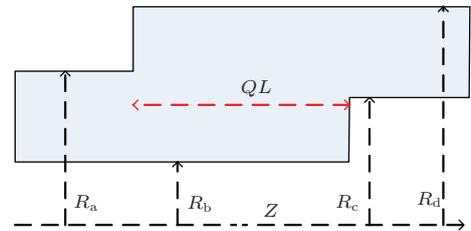


图7 慢波结构末端过渡段的计算模型

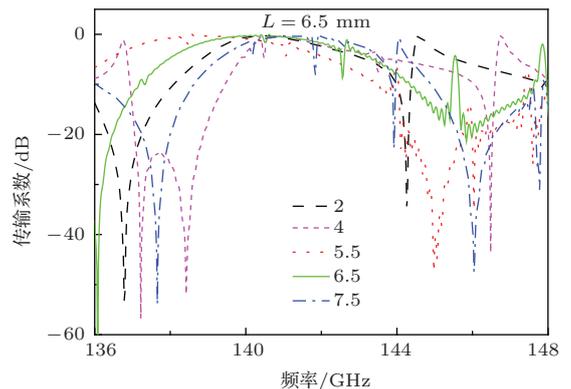


图8 (网刊彩色) 过渡段长度对传输系数的影响

器件效率受慢波结构和输出系统之间不连续性的影响较大, 所以必须设计慢波结构末端过渡段, 使其结构参数能具有最优的 TM_{01} 模传输系数. 因为过渡段与慢波结构以及输出系统连起来组成一个传输系统, 所以将它们进行整体模拟. 模型结

构如图 7 所示, 末端过渡段的内半径 R_b 由慢波结构内导体决定, $R_b = 6.0$ mm, 外半径 R_d 由输出系统同轴线内半径决定, $R_d = 8.5$ mm. 过渡段长度的变化范围为 $[2, 14]$ mm 时, 计算结果如图 8 所示, 从图中可以看出在 0.14 THz 附近, 过渡段长度为 $L = 6.5$ mm 时, 过渡段具有最大的传输系数, 传输系数在 -0.7 dB 至 0 dB 之间.

3 粒子模拟结果

超材料太赫兹产生器的实际工作状态处于非线性状态, 并且是一个多参数系统, 为了研究这些参数对工作状态的影响, 本文采用全电磁粒子模拟软件 UNIPIC 进行模拟^[16,17], 电子注采用束发射模式, 电子束电压为 600 kV, 电流为 1.0 kA; 电子束输入端设置截止颈; 在慢波结构内导体末端为收集极和输出段; 功率输出端口采用卷积完全匹配吸收边界^[20].

波束相互作用过程中, 具有横向速度的电子会打在慢波的金属结构上而被吸收. 轴向导引磁场起

着约束电子束的作用, 如果导引磁场增大到一定程度, 那么电子被环吸收的数目可以控制在一定的范围之内. 束流稳定传输所需磁场的大小随电子束电流强度的增大而增大. 束流稳定传输所需磁场的大小还受电子束电压和器件工作频率的影响. 通过粒子模拟可确定电子束电压为 600 kV 和电流为 1.0 kA 时, 轴向引导磁场的大小为 2.0 T 能够保证电子束通过慢波结构的过程中不发生横向扩散.

3.1 器件粒子模拟结果

粒子模拟结果如图 9 所示. 图 9(a) 表示电场 E_z 分量的傅里叶频谱, 谐振频点在 0.141 THz, 其时频分析结果如图 9(b) 所示, 起振后谐振频点一直稳定在 0.14 THz 附近. 图 9(c) 表示振荡器的电子束相空间变化, 电子束能量幅度有明显变化, 表明设计的新型慢波结构能够与电子束进行有效的波束互作用. 电子束打在内导体末端收集极上被吸收前的能量的幅值变化较小, 说明这种收集极具有稳定相位的作用. 输出功率如图 9(d) 所示, 其输出功率峰值为 316.8 MW, 平均效率超过 26%.

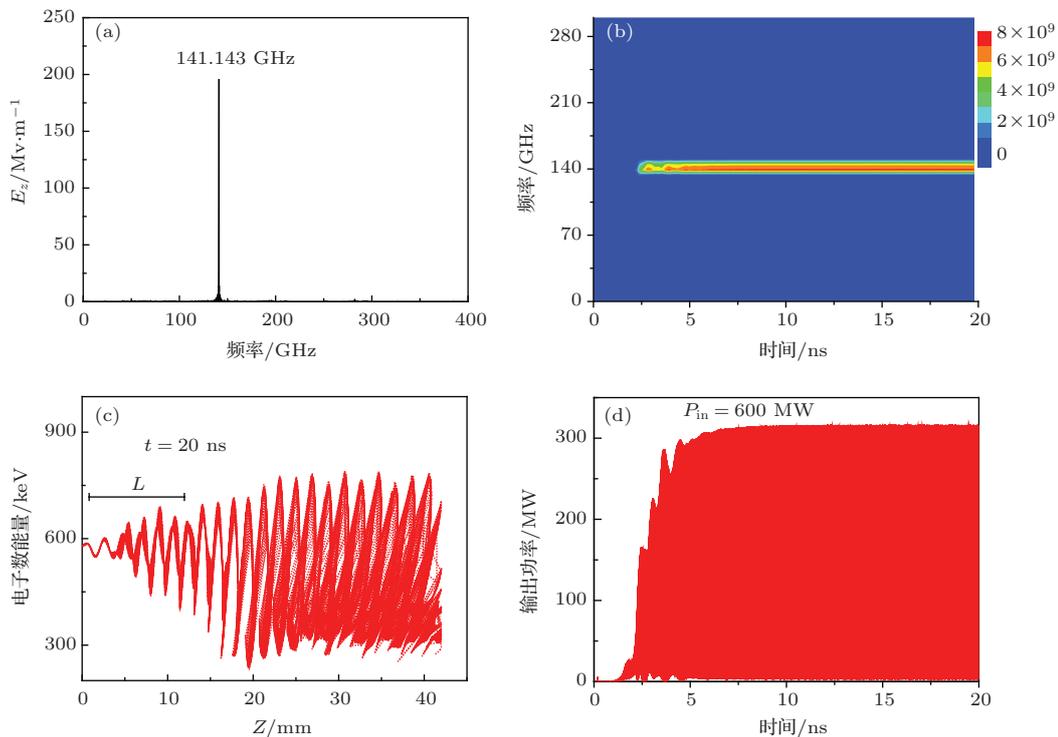


图 9 (网刊彩色) 器件粒子模拟结果 (a) 输出信号频谱; (b) 输出信号时频变换; (c) 电子束能量轴向空间分布; (d) 输出功率随时间变化

3.2 输出信号的调制特性

工作电压对输出信号频率的影响如图 10 所示, 工作电压在 $[520, 660]$ kV 范围内, 信号频率随着电

压升高而升高, 但仅有很小的调谐作用, 频率基本稳定在 0.141 THz 附近, 这是表面波振荡器的基本特性.

工作电流对输出信号频率的影响如图 11 所示, 电流对频率仅有很小的调谐作用, 频率稳定在 0.14 THz 附近. 当电压为 600 kV 时, 电流在 [600, 1400] A 范围内时, 输出信号频率随着电流升高而降低.

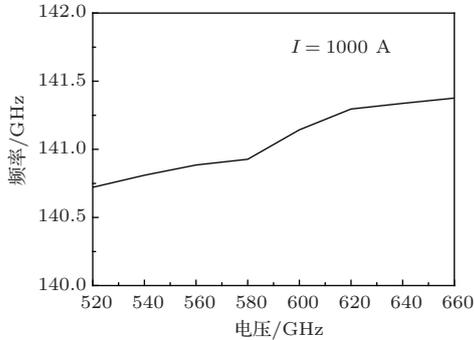


图 10 电压对输出信号的调制

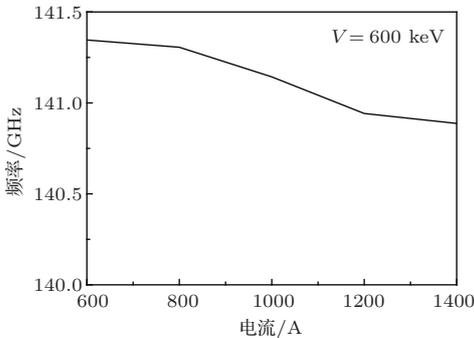


图 11 电流对输出信号的调制

3.3 内导体影响功率输出的机理探讨

为了研究内导体结构对超材料慢波结构表面波振荡器工作特性的影响, 建立无内导体的模型进行对比模拟研究. 无内导体超材料表面波振荡器的输出信号 E_z 的频谱如图 12 所示, 从图 12 与图 9(a) 的比较可以看出, 两种慢波结构器件的工作频率相差 0.2%, 这主要是因为电子束在两层金属环中间运动, 工作频率受双层金属环的影响较大, 慢波结构内导体对器件工作点的影响较小.

表面波振荡器是利用电子束与慢波结构中电磁波的相互作用产生电磁波辐射. 相互作用的强弱决定了功率高低. 无内导体器件的电子束相空间分布如图 13 所示, 与同轴结构器件的电子束相空间图 9(c) 进行比较, 可以看出在两图中位于平衡位置下方的幅值明显大于平衡位置上方, 说明能量从电子束流向慢波结构中的电磁波. 同轴结构器件的电子束流失的能量更多一些. 在慢波结构前

段, 同轴结构器件的变化幅度明显较大, 如图 9(c) 和图 13 中 L 区域所示, 说明同轴结构器件的慢波结构前段对电子束的调制更加有效, 导致同轴结构器件比无内导体器件的束波相互作用能力更强. 这个结论与前文耦合阻抗对比结论相符合.

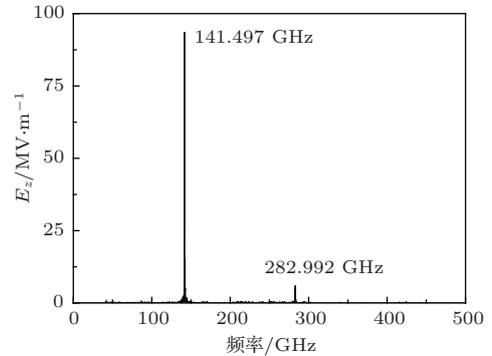


图 12 无内导体振荡器输出信号频谱

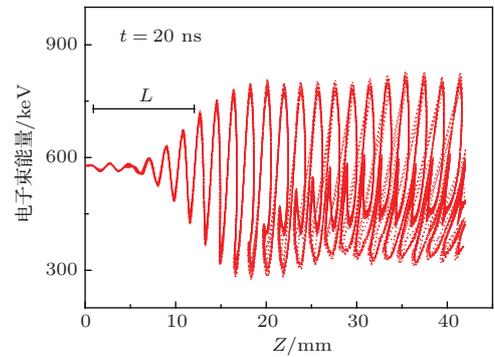


图 13 无内导体器件电子束能量纵向空间分布

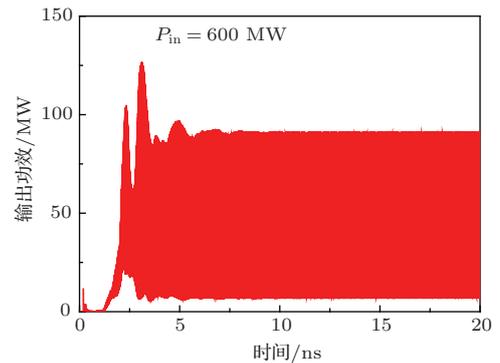


图 14 无内导体器件的输出功率时谱

采用相同参数电子束时, 两种结构器件的输出功率模拟结果分别如图 9(d) 和图 14 所示, 同轴慢波结构器件的输出功率 316.8 MW, 而无内导体慢波结构器件的只有 91.3 MW, 表明同轴结构器件的电磁波产生效率高于无内导体慢波结构器件的效率. 主要是因为相比圆柱结构的慢波结构, 同轴结

构具有更高的耦合阻抗; 同时从电子束相空间分布图可以看出同轴慢波结构能有效的提高电子束与电磁波的相互作用, 提高电子束调制幅度.

4 结 论

设计同轴双环超材料慢波结构的 0.14 THz 过模表面波振荡器, 主要有以下几个方面工作: 由内导体对超材料慢波结构耦合阻抗的影响, 选取内导体半径为 2.4 mm; 根据超材料慢波结构色散关系, 选取了表面波工作点, 并取电子束电压工作范围为 [520, 660]kV 及电子束电流 1.0 kA; 从超材料慢波结构场分布特性获得了过模结构电子束参数: 内外半径为 4.25 mm 和 4.75 mm; 优化了慢波结构末端过渡段, 选取了最优的过渡段长度为 $L = 6.5$ mm.

根据粒子模拟结果, 太赫兹超材料慢波结构过模振荡器获得稳定的单频 0.141 THz 输出波, 峰值功率达到 316.8 MW; 研究了电参数对工作频率的影响, 研究表明频率随着电压升高而略微升高, 随着电流升高而降低; 这种超材料慢波结构的轴向内导体能保证工作频率的稳定, 增强电子束与太赫兹波之间的互作用.

参考文献

- [1] Siegel P H 2002 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **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] Zhang H, Wang J G 2009 *Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Ultra-Wideband* Vancouver, Canada, September 2009 p55
- [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 2014 *Chin. Phys. B* **23** 058701
- [9] Wang G Q, Wang J G, Tong C J, Li X Z, Wang X F, Li S, Lu X C 2013 *Phys. Plasmas* **20** 043105
- [10] Li X Z, Wang J G, Sun J, Song Z M, Ye H, Zhang Y C, Zhang L J, Zhang L 2013 *IEEE Trans. Electron Dev.* **60** 2931
- [11] Zhang H, Wang J G, Tong C J 2008 *Proceedings of 2008 Asia Pacific Microwave Conference*, Hong Kong, China, December 2008 p1
- [12] Wang Y, Chen Z G, Lei Y A 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 120703 (in Chinese) [王宇, 陈再高, 雷奕安 2013 物理学报 **62** 120703]
- [13] Chen Z G, Wang J G, Wang G Q, Li S, Wang Y, Zhang D H, Qiao H L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 110703 (in Chinese) [陈再高, 王建国, 王光强, 李爽, 王玥, 张殿辉, 乔海亮 2014 物理学报 **63** 110703]
- [14] Zhang H, Wang J G 2008 *Proceedings of 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems*, Guangzhou, China, November 2008 p1461
- [15] Chen Z G, Wang J G, Wang Y, Qiao H L, Zhang D H, Guo W J 2013 *Phys. Plasmas* **20** 113103
- [16] Wang J, Zhang D, Liu C, Li Y, Wang Y, Wang H, Qiao H, Li X 2009 *Phys. Plasmas* **16** 033108
- [17] Wang J, Chen Z, Wang Y, Zhang D, Liu C, Li Y, Wang H, Qiao H, Fu M, Yuan Y 2010 *Phys. Plasmas* **17** 073107
- [18] Pendry J, Holden A, Stewart W, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [19] Schamiloglu E *Proc. 4th Euro Asian Pulsed Power Conference/BEAMS Conference O5B1*, Karlsruhe, Germany 2014
- [20] Wang J G, Wang Y, Zhang D H 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 681

Numerical studies on a 0.14 THz coaxial surface wave oscillator with double-ring metamaterial slow wave structure

Guo Wei-Jie¹⁾ Chen Zai-Gao^{1)2)†} Cai Li-Bing¹⁾²⁾ Wang Guang-Qiang²⁾ Cheng Guo-Xin²⁾

1) (School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiao tong University, Xi'an 710049, China)

2) (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 24 September 2014; revised manuscript received 27 October 2014)

Abstract

This paper presents a relativistic coaxial overmoded surface wave oscillator (SWO) working at the terahertz band in the double-ring metamaterial slow wave structure (SWS). A relativistic electron beam passes through the SWS between the inner and outer rings. A coaxial overmoded SWS made up of metal metamaterial is designed to generate the high-power terahertz wave by increasing the beam-wave interaction efficiency and enlarging the transverse size of the terahertz device. It consists of double rings periodically arrayed along the z -direction, and a coaxial conductor with a radius of 2.4 mm. By its dispersive relation the proposed device is studied, from which we choose the 0.14 THz as the operating frequency of the device. Then the parameters of the geometric structure and the electron beam are optimized; the transitional section for extracting the terahertz signal is designed of the largest propagation coefficient. Particle simulation code UNIPIC is employed to verify the initial expectation and potential advantages. When the beam voltage and current are increasing, the operating frequency of the device remains almost constant, and this is the typical characteristic of the SWO. Particle simulation results show that the coaxial inner conductor has a stable operating mode of double-ring metamaterial SWS and can increase the beam-wave interaction efficiency of the SWO at the terahertz band. For a guiding magnetic field of 2.0 T, with the electron beam of 600 kV and a current of 1.0 kA, a 0.141 THz wave output power of 316.8 MW is obtained.

Keywords: terahertz, metamaterial slow-wave structure, surface-wave oscillator, coaxial structure

PACS: 07.57.Hm, 41.20.jb, 81.05.Xj, 41.60.-m

DOI: 10.7498/aps.64.070702

† Corresponding author. E-mail: chenzaigao@nint.ac.cn