

大功率 0.34 THz 辐射源中慢波结构的优化设计

李爽¹⁾ 王建国^{1)2)†} 童长江¹⁾ 王光强¹⁾ 陆希成¹⁾ 王雪峰¹⁾

1) (西北核技术研究所, 西安 710024)

2) (西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

(2013年1月3日收到; 2013年2月27日收到修改稿)

为研制大功率太赫兹源, 提出以切连科夫表面波振荡器为基础, 采用过模结构来研究 0.34 THz 信号的产生. 重点研究了慢波结构的各参数对器件输出性能的影响, 对慢波结构进行了优化设计, 并采用数值模拟方法, 对慢波结构实际参数的选取和实验中所允许的加工精度提了具体要求; 最后采用粒子模拟对该结构进行了“热腔”模拟计算. 结果表明该结构能够产生频率为 0.34 THz, 输出功率约为 7.8 MW 的太赫兹信号, 并且稳定工作于表面波振荡器状态. 该结果为下一步 0.34 THz 太赫兹源的研制奠定了基础.

关键词: 表面波振荡器, 慢波结构, 太赫兹, 粒子模拟

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

DOI: 10.7498/aps.62.120703

1 引言

太赫兹 (THz) 波是指频率在 0.1—10 THz 范围内的电磁波. 由于该波段兼有毫米波与红外光两个区域的特性, 因而融合了毫米波和红外光的优点, 特别是相对适中的波束宽度、较宽的系统带宽和大的多普勒频移特性, 十分有利于目标的探测识别和干扰对抗^[1-3]. 这些特点为太赫兹波的应用提供了巨大潜力, 使得许多国家都投入了大量的人力物力进行太赫兹技术的研究. 太赫兹源是太赫兹技术应用的基础, 但是目前国内外针对大功率甚至高功率太赫兹源的研究比较少, 尤其是紧凑型、大功率太赫兹源的严重滞后阻碍了太赫兹技术的广泛应用.

西北核技术研究所对 0.14 THz 大功率源进行了理论设计、数值模拟和实验研究^[4-8], 研制了 MW 级输出功率的源. 所研制的器件采用基于相对论切连科夫辐射机制的真空电子学器件, 为了增加器件的功率容量和克服加工带来的难度, 选择表面波振荡器 (surface-wave oscillator, SWO) 结构和过模结构来产生太赫兹信号^[4,5,8-10]. 为了研制另一大气传输窗口 0.34 THz 的大功率太赫兹源, 本

文仍采用过模结构的 SWO. 对于 SWO, 慢波结构 (slow-wave structure, SWS) 的参数选择是至关重要的, 本文重点对高频系统中的 SWS 进行设计和优化, 并从理论上分析了 SWS 的加工精度要求, 为该频段大功率太赫兹源的研制提供理论指导.

2 结构方案选取

相对论切连科夫器件的特点是采用了某种慢波结构, 将器件中轴向传播的电磁波相速度降到略低于注入的电子速度. 此时, 电子在器件中就会产生切连科夫辐射. 此类器件具有高功率、高效率、适合重复频率工作和结构紧凑等优点. 本文采用的是 SWO, 其原理如图 1 所示^[10]. 工作时, 由爆炸阴极发射产生薄的环形电子注, 在强磁场引导下通过前端漂移管进入慢波结构, 与结构波发生有效的注波相互作用, 产生能量交换, 使得电磁波被放大. 在 SWO 中产生的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, 而在远离慢波结构表面时电场沿着径向迅速降低.

在色散关系曲线上, SWO 的工作点位于 π 模附近. 它具有以下的特点: 1) π 模附近谐波的群速

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

度很小, SWS 等效于一个高 Q 谐振腔, 因此在此处起振所需的起振电流相对于负一次谐波段内的要小得多, 有利于模式的选择; 2) 如果慢波结构给定, 对于给定模式的色散曲线, π 模附近的频率值相对最高; 同理, 工作在 π 模时, 慢波结构的尺寸可以相对较大, 有利于减小加工难度.

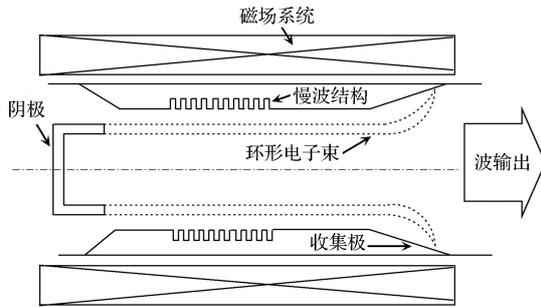


图1 SWO 原理框图

随着对器件输出功率和辐射频率需求的不断提高, 传统单模高功率微波源器件内部的功率密度不断提高, 场强也不断增强. 这可能会导致器件内部场击穿, 也可能会破坏电子束的正常传输与群聚, 影响束波作用机制, 导致器件效率严重下降. 本文的研究目标是工作在 0.34 THz 的源, 器件内的工作波长约为 0.88 mm, 这也就意味着器件的结构尺寸与微波器件相比大大缩小. 若此时仍采用单模结构, 将会对器件的加工和实验带来很大的困难. 所以, 解决这个问题一个可行途径是增加器件的横向尺寸, 即采用过模结构^[11-13]. 这样可以降低相同功率容量下器件内部的场强, 避免击穿, 实现对电子注更有效的控制.

3 慢波结构

慢波结构可以降低在其中传播的电磁波相速, 使之与电子束同步而相互作用, 且有较高的功率容量, 它是“O”形切连科夫器件的核心部件. 本文中的慢波结构采用矩形波纹结构, 实际上是一段槽深为 a 的矩形波纹壁圆柱形波导, 图 2 给出了结构纵向剖面示意图, 其中, 尺寸参数 L 代表周期长度, d 是矩形波纹宽度, a 是矩形波纹深度, R_a 为慢波结构最小内半径.

3.1 初始化设计

在设计慢波结构前, 需要对上述 4 个参数进行

初始化计算.

慢波结构的周期长度与电子束的工作状态密切相关, 若要求电子束工作在最低模式 TM_{01} 模 π 点左边, 电子束速度与周期长度有如下关系:

$$v_e = \frac{\omega}{k_z} > \frac{2\pi f_\pi}{\pi/L} = 2f_\pi L, \quad (1)$$

其中, f_π 代表器件工作在 π 模点时的频率, L 表示慢波结构的周期长度, v_e 为电子束速度, 且有 $\frac{1}{2}mv_e^2 = eV_0$, 所以当二极管的工作电压选择为 350 kV, f_π 约为 0.34 THz 时, 可以得到 $L < 0.5$ mm. 考虑到电子束在器件内的传输, 器件的内半径 R_a 不能太小, 这里选择为 3 mm, 此时器件的过模比约为 $D/\lambda \approx 6.8$, 为高过模比器件. 对于波纹深度 a , 由于所设计的器件方案为表面波振荡器, 对该值的要求比较高, 必须满足

$$a > \frac{L^2}{4R_a}. \quad (2)$$

这样才能把 π 点附近谐波 (包括基波和负一次谐波) 的相速度降至光速以下.

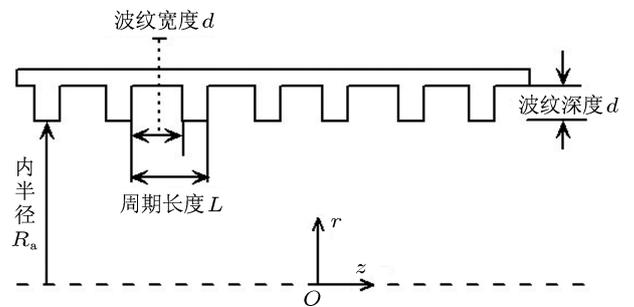


图2 慢波结构纵向剖面图

经过初始化选择, 可以得到结构参数为 $L = 0.35$ mm, $R_a = 3.0$ mm, $a = 0.1$ mm, $d = 0.2$ mm. 根据此参数, 进行了慢波结构的优化设计及色散特性分析. 图 3 给出了结构内最低模式 TM_{01} 模的色散曲线, 其中图 3(a) 为频率与相移的关系, 图 3(b) 为频率与相速度的关系. 结果表明, 对于结构内最低模式 TM_{01} 模, 每周期相移在 $[0.89\pi, 1.10\pi]$ 范围内时, 其频率值均大于 0.34 THz, 其对应的相速度与真空中光速的比值约在 $[0.72, 0.89]$ 范围内. 其中, π 模点频率值约 0.345 THz, 对应的相速度约为 0.81 倍真空中光速.

3.2 结构参数变化对慢波结构性能影响的分析

在慢波结构的加工过程中,结构的实际加工尺寸与理论设计值不可避免地存在着误差.但是,由于所设计慢波结构的尺寸参数都在亚毫米量级,略微的加工误差,都会导致比较大的结构相对误差,从而大幅改变了慢波结构的特性,影响器件产生的

太赫兹信号性能.因此,深入分析慢波结构的各尺寸变化对色散关系的影响,从理论上给出各结构尺寸所能容许的加工误差范围是非常必要的.

对于我们所考虑的慢波结构(如图2所示),有四个独立参数,对这四个独立参数的变化进行了分析,给出了各个参数变化对色散关系的影响,如图4所示.

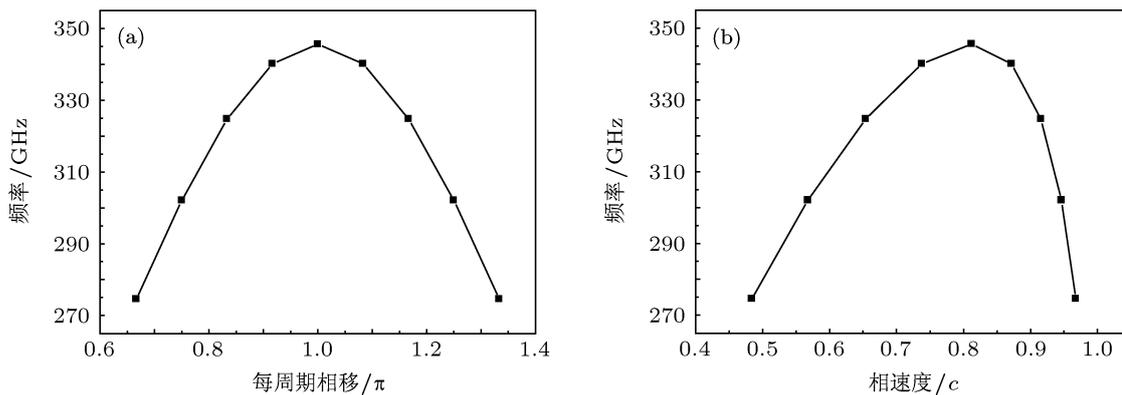


图3 慢波结构色散关系 (a) 频率与每周期相移的关系; (b) 频率与相速度的关系

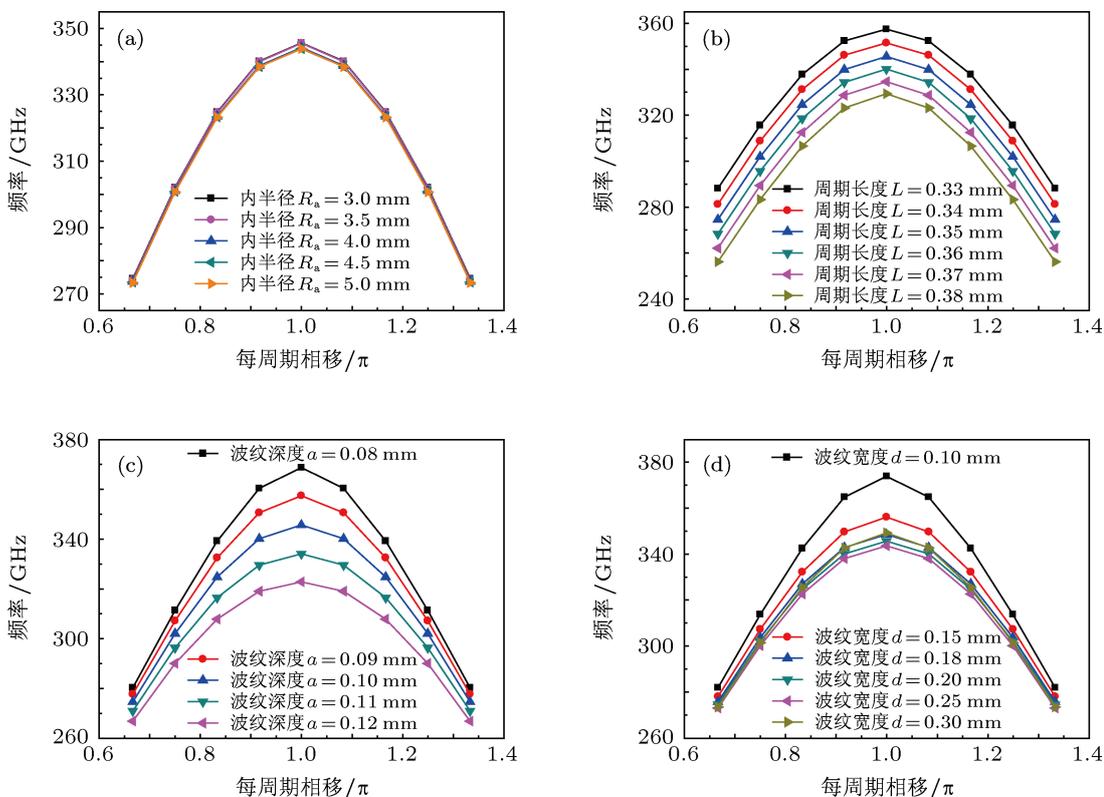


图4 SWS中四个参数对色散关系的影响 (a) 内半径对色散关系的影响; (b) 周期长度对色散关系的影响; (c) 波纹深度对色散关系的影响; (d) 波纹宽度对色散关系的影响

首先从图 4(a) 中可以看到内半径对色散关系的影响. 内半径的值在一定程度上决定了模式选择的难易程度. 这里对比了内半径取 3.0—5.0 mm 范围内的 5 个值, 而其他参数保持不变的情况. 可以看到, π 点的频率及其相速度都满足要求, 但是随着内半径值的增加, 器件内部的场分布更加复杂, 模式选择更加困难, 所以这里保持 $R_a = 3.0$ mm, 而其加工精度可以控制在 ± 0.05 mm. 图 4(b) 给出的是周期长度与色散曲线的关系. 由于 π 点的性质, 存在着 $L \approx 0.5\lambda$, 因此, 它直接影响着 π 点的频率值. 为了使器件工作在 0.34 THz 附近, 经过大量的模拟计算, 选择周期长度为 0.35 mm. 而从图 4(b) 中可以估计周期长度的加工精度应控制在 ± 0.01 mm 内. 图 4(c) 给出了波纹深度对色散关系的影响, 可以看到, 色散关系对波纹深度 a 的变化非常敏感, a 值增大能够有效地降低相速度, 并且也会降低 π 点频率值. 当周期长度为 0.35 mm 时, 深度在范围 [0.09, 0.11] mm 内是合适的. 因此, 波纹深度值选取为 0.1 mm, 而加工精度在 ± 0.01 mm 以内. 图 4(d) 给出了波纹宽度与色散曲线的关系, 从图中可以看出, 当波纹宽度位于 [0.15, 0.20] mm 范围内时, 色散曲线基本位于 0.34 THz 左右. 所以, 可以选取波纹宽度为 0.2 mm.

3.3 加工精度的影响

在实际加工中, 由于波纹深度值较小, 刀具在切割时有可能给矩形波纹带来一定的倾角, 如图 5(a) 所示. 为了减小加工中可能的误差对结果产生影响, 这里将具有一定倾斜角度的波纹对色散关系的影响进行了模拟, 并根据模拟结果对加工精度提出具体要求, 该结果有助于为控制加工误差范围提供参考.

从图 5(b) 中可以看出, 倾斜段的宽度越大, 对色散关系的影响也就越大, π 模点的谐振频率会迅速变大, 造成电子束与结构波交点的漂移, 影响对工作点的控制, 更容易产生寄生模式的振荡. 因此, 为了保证该结构工作在 0.34 THz 附近, 倾斜段的宽度不能大于 0.03 mm, 也就是慢波结构的波纹宽度不能小于 0.14 mm. 从这个角度来说, 确定对波纹深度的加工允许范围为 0.15—0.20 mm 是较为合适的.

就目前的加工工艺而言, 针对金属材料, 常用的工艺技术有传统机械加工、电火花加工等 [14].

本文设计的慢波结构中, 最小尺寸也是最敏感尺寸是波纹深度, 其要求为 1 ± 0.01 mm. 传统加工工艺的典型能力范围是 > 300 μm , 该值大于波纹深度的要求指标, 所以采用传统方法难以实现本慢波结构的加工. 而电火花工艺属于非接触加工, 加工过程没有切削力的附加影响, 非常适合于微小零件的成形加工. 其典型的能力范围可以达到 > 80 —100 μm , 精度可以达到 ± 5 μm , 能够完成本文设计的慢波结构的加工. 但是电火花技术的表面粗糙度相对较高, 一般为 2—5 μm . 因此, 采用该方法进行加工的零件, 还应在加工后采用净化、表面抛光等技术进行二次处理.

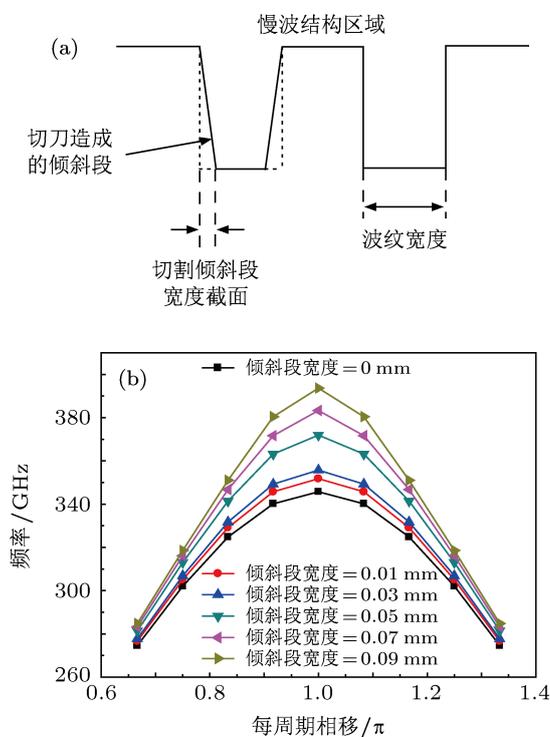


图 5 加工切割对慢波结构色散特性的影响 (a) 加工刀具对慢波结构可能的影响; (b) 倾斜矩形波纹波导的色散关系

4 粒子模拟

在完成了色散关系分析后, 利用粒子模拟 (particle-in-cell, PIC) 软件 UNIPIC 对该结构进行了模拟验证 [15–17], 通过“热腔”检测该结构能否产生频率约为 0.34 THz 的信号. 在模型中, 电子束在进入结构后将受到引导磁场的约束, 电子束在经过与慢波结构中结构波相互作用后将打在内导体收集极上被吸收.

模拟计算时, 采用了理想电子束注入的方法, 电子束厚度为 0.3 mm, 电子能量为 350 keV, 电流为

2 kA, 慢波结构周期数为 27, 引导磁场为 5 T, 计算时间为 6 ns. 诊断点主要设在圆波导输出端, 以监测太赫兹波的输出情况. 典型的计算结果见图 6.

从图 6(a) 中可以清楚地看到, 由阴极发射的均匀电子注在管内同结构波相互作用, 受到良好的速度调制和密度调制, 群聚效果理想. 图 6(b) 所示为 $t = 6$ ns 时电子注能量沿 z 轴的分布情况, 可以清楚地看到电子的能量变化过程. 此时电子注的运动状态稳定, 调制效果良好, 电子束能量逐渐减少, 通过束波相互作用将能量传递给电磁波, 产生连续稳定的功率输出. 图 6(c) 为慢波结构区域内某点径向电场的时域波形, 可见在 $U = 350$ kV, $I = 2000$ A 的电流驱动下, 该源在 $t = 3$ ns 附近开始起振, 在 $t =$

4.2 ns 时趋于饱和, 随后便开始稳定地工作. 图 6(d) 为图 6(c) 随时间变化的 FFT 结果, 该结果表明产生信号的频谱很纯, 主频为 0.342 THz. 图 6(e) 为慢波结构区域内某点纵向电场随 z 方向空间变化的 FFT 结果, 纵向相位常数为 8540 rad/m, 有 $k_z \cdot L \approx 0.95\pi$, 即器件工作于 π 点左侧, 表明该处为前向波与电子束相互作用. 图 6(f) 为输出信号功率, 其输出功率约为 7.8 MW. 上述模拟结果表明, 采用该慢波结构的相互作用区能够产生主频为 0.34 THz, 输出功率约为 7.8 MW 的信号, 并且工作于表面波振荡器状态. 这证明采用高过模比的该慢波结构的设计是可行的.

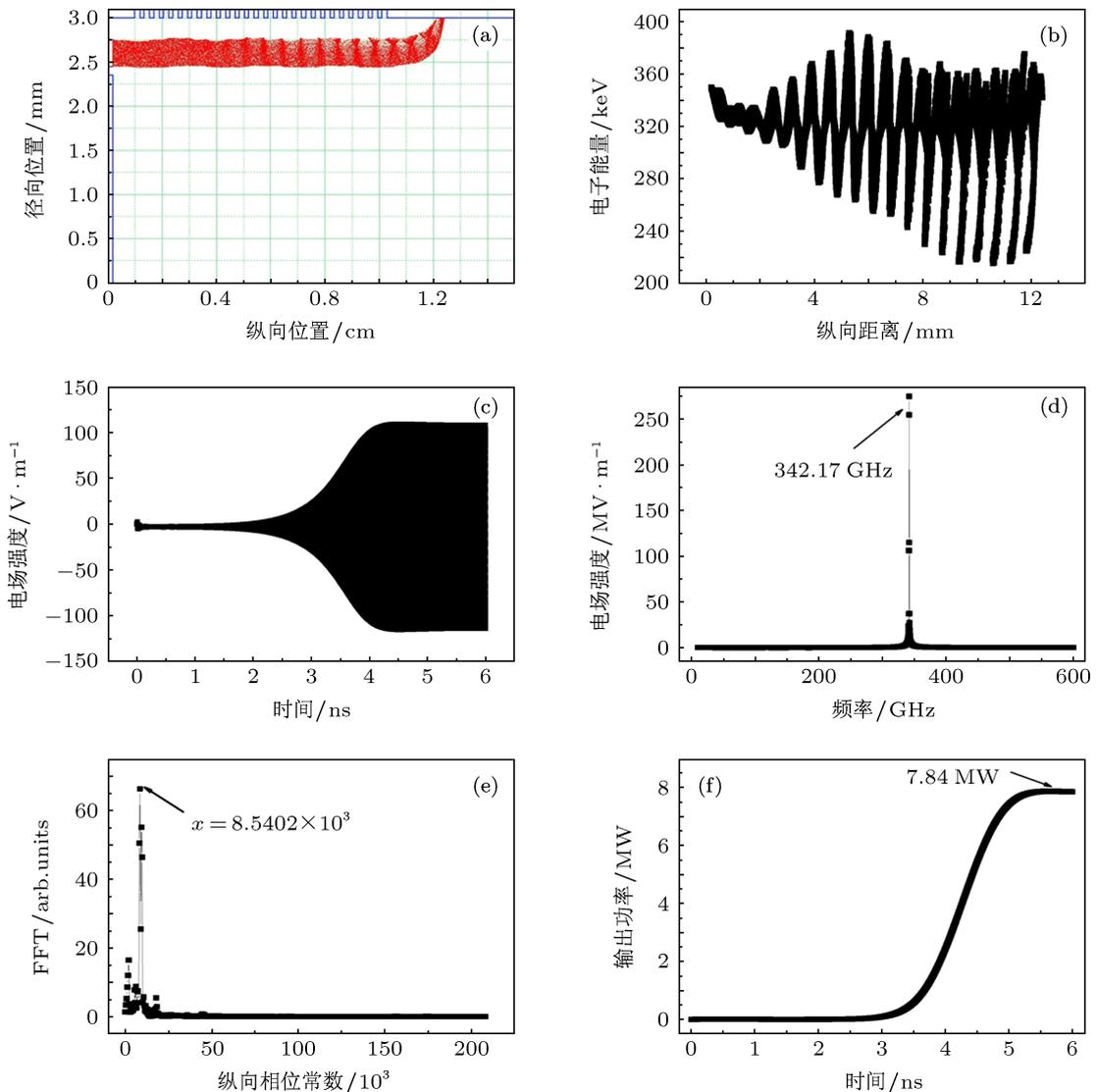


图 6 慢波结构粒子模拟结果 (a) 电子束 r - z 实空间图; (b) 电子能量相空间图; (c) E_r 时域波形; (d) E_r 随时间变化的 FFT 结果; (e) E_z 沿 z 方向变化的 FFT 结果; (f) 输出信号功率

5 结论

为研制 0.34 THz 大功率太赫兹源系统, 本文以切连科夫辐射为基础, 采用了 SWO 结构和过模结构来产生太赫兹信号. 重点研究了相互作用区中慢波结构的参数对色散关系的影响, 从而给出合理的参数设计. 这里主要关注的参数包括慢波结构的内半径、波纹的周期长度、波纹的深度和宽度四个参数. 通过数值模拟结果可以看到, 波纹深度的变化对色散曲线的影响最为剧烈, 它对 π 点的频率值和

相速度的影响都很明显, 因此它的精度要求最高. 最终选取的慢波结构参数为周期长度 0.35 mm, 内半径 3.0 mm, 波纹深度 0.1 mm, 波纹宽度 0.2 mm. 文中还通过数值模拟, 对四个参数允许的误差范围进行了计算, 得到了相应的加工精度要求, 对慢波结构的实际加工提出了指导. 最后对该源结构进行了粒子模拟, 结果表明该结构能够产生 0.34 THz 的信号, 输出功率约为 7.8 MW, 器件工作在 π 模点左侧, 稳定处于表面波状态, 达到了设计要求, 为该源系统下一步的实验工作提供了理论基础.

- [1] Dragoman D, Dragoman M 2004 *Prog. Quant. Electron.* **28** 1
- [2] Booske J H 2008 *Phys. Plasmas* **15** 055502
- [3] Xu J Z, Zhang X C 2007 *The Science, Technology and Applications of Terahertz* (Beijing: Beijing University Press) pp5-7 (in Chinese) [许景周, 张希成 2007 太赫兹科学技术和应用 (北京: 北京大学出版社) 第 5—7 页]
- [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 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]
- [7] Wang G Q, Wang J G, Tong C J, Li X Z, Wang X F 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 030702 (in Chinese) [王光强, 王建国, 童长江, 李小泽, 王雪峰 2011 物理学报 **60** 030702]
- [8] Li X Z, Wang G Q, Wang J G, Tong C J, Wang X F, Song Z M, Li S, Lu X C 2013 *High Power Laser and Particle Beams* **25** 451 (in Chinese) [李小泽, 王光强, 王建国, 童长江, 王雪峰, 宋志敏, 李爽, 陆希成 2013 强激光与粒子束 **25** 451]
- [9] Ives L, Kory C, Read M, Neilson J, Caplan M, Chubun N, Schwartzkopf S, Witherspoon R 2003 *Proceedings of SPIE Orlando, USA*, April 21, 2003 pp71-82
- [10] Vlasov A N, Shkvarunets A G, Rodgers J C, Carmel Y, Antonsen T M, Abuelfadl T M, Duan L, Cherepenin V A, Nusinovich G S, Botton M, Granatstein V L 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 550
- [11] Amin M R, Ogura K, Kitamura H, Minami K, Watanabe T, Carmel Y, Weaver J, Destler W W, Granatstein V L, Main W 1995 *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques* **43** 815
- [12] Zhang H, Wang J G, Tong C J 2008 *J. Xi'an Jiaotong Univ.* **42** 1531 (in Chinese) [张海, 王建国, 童长江 2008 西安交通大学学报 **42** 1531]
- [13] Nusinovich G S, Bliokh Y P 2000 *Phys. Plasmas* **7** 1294
- [14] Feng J J, Liao F J, Zhu M, Yan T C 2005 *Vacuum Electron.* **6** 8 (in Chinese) [冯进军, 廖复疆, 朱敏, 闫铁昌 2005 真空电子技术 **6** 8]
- [15] Wang J G, Zhang D H, Liu C L, Li Y D, Wang Y, Wang H G, Qiao H L, Li X Z 2009 *Phys. Plasmas* **16** 033108
- [16] Wang J G, Wang Y, Zhang D H 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 681
- [17] Tong C J, Li X Z, Wang J G, Wang X Z, Wang G Q 2009 *Proceedings of SPIE Beijing, China*, June 17-19, 2009 p738510

Optimization of slow-wave structure in high power 0.34 THz radiation source

Li Shuang¹⁾ Wang Jian-Guo^{1)2)†} Tong Chang-Jiang¹⁾ Wang Guang-Qiang¹⁾
Lu Xi-Cheng¹⁾ Wang Xue-Feng¹⁾

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

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

(Received 3 January 2013; revised manuscript received 27 February 2013)

Abstract

Based on surface-wave oscillator (SWO), the high power 0.34 THz source using over-moded structure is studied. The attention is paid to the influence of the parameters of the slow-wave structure (SWS) on the dispersion curve, and then the SWS is optimized. According to the simulation results, the size of SWS and the requirements for the accuracy in the SWS machining are confirmed. Finally, the source is simulated by the particle-in-cell method. Numerical results show that the structure is capable of radiating a terahertz signal with a frequency of 0.34 THz and a maximum output power of about 7.8 MW. Moreover, the structure works in the state of an SWO stably. The research of the SWS is the foundation of the design of 0.34 THz source, and it is also very meaningful for the realization of the source in engineering.

Keywords: surface-wave oscillator, slow-wave structure, terahertz, particle-in-cell simulation

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

DOI: 10.7498/aps.62.120703

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