

0.34 THz 大功率过模表面波振荡器研究

王光强 王建国 李爽 王雪峰 陆希成 宋志敏

Study on 0.34 THz overmoded surface wave oscillator

Wang Guang-Qiang Wang Jian-Guo Li Shuang Wang Xue-Feng Lu Xi-Cheng Song Zhi-Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 050703 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.050703

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.050703>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I5>

---

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

Mode analysis of 0.14 THz overmoded surface wave oscillator

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

## 0.34 THz 大功率过模表面波振荡器研究

王光强<sup>1)2)</sup> 王建国<sup>1)†</sup> 李爽<sup>1)2)</sup> 王雪峰<sup>1)2)</sup> 陆希成<sup>1)2)</sup> 宋志敏<sup>1)2)</sup>

1)(西北核技术研究所, 西安 710024)

2)(高功率微波技术重点实验室, 西安 710024)

(2014年5月19日收到; 2014年10月11日收到修改稿)

论文对 0.34 THz 大功率过模表面波振荡器进行了模拟设计和初步实验研究. 针对高过模比 ( $D/\lambda \approx 6.8$ ) 慢波结构, 根据小信号理论选择了合适的慢波结构尺寸和电子束距壁距离, 实现了器件在表面波  $TM_{01}$  模的  $\pi$  点附近谐振. 根据 PIC 模拟结果, 表面波振荡器可以实现频率和功率分别为 0.34 THz 和 22.8 MW 的太赫兹输出. 采用微细电火花加工技术完成了不锈钢慢波结构的一体化精细加工, 并基于小型化脉冲功率驱动源搭建了实验装置. 初步的实验结果表明, 在电子束电压和电流分别约为 420 kV 和 3.1 kA 时, 0.34 THz 大功率过模表面波振荡器输出脉冲的频率范围为 0.319—0.349 THz, 辐射功率不小于 250 kW, 脉宽约为 2 ns. 最后分析讨论了实验输出功率与模拟结果相差较大的原因, 为表面波振荡器的性能改善奠定了基础.

关键词: 太赫兹, 表面波振荡器, 过模, 慢波结构

PACS: 07.57.Hm, 41.20.Jb

DOI: 10.7498/aps.64.050703

## 1 引言

随着太赫兹科学技术的不断发展, 它在通信和成像以及由此衍生而来的其他应用领域都对太赫兹源的功率提出了越来越高的要求<sup>[1]</sup>. 真空电子器件在微波段发展非常成熟, 在太赫兹波段也已成为当前研究的热点之一<sup>[2]</sup>, 主要包括切连科夫器件<sup>[3,4]</sup>、扩展相互作用器件<sup>[5]</sup>和回旋管<sup>[6-8]</sup>等. 但是, 真空电子器件的尺寸随着频率的升高迅速减小, 使得太赫兹器件的功率容量降低, 加工和装配难度增大, 带来了诸多亟需解决的新的物理问题<sup>[9]</sup>. 近年来, 美国和欧盟启动了多个太赫兹真空电子器件的研究计划<sup>[10]</sup>, 力图在 0.1—1 THz 范围内解决这些问题, 实现太赫兹输出功率量级的突破.

鉴于大功率太赫兹脉冲在干扰与对抗和隐藏放射性物质探测<sup>[11]</sup>等国家安全方面的应用潜力, 本文以太赫兹表面波振荡器<sup>[12,13]</sup>(Surface Wave Oscillator, SWO)为研究对象, 采用高过模比结构 ( $D/\lambda \approx 6.8$ ) 设计了 0.34 THz 大功率表面波振荡

器, 实现了振荡器关键部件的精细加工, 并初步开展了单次太赫兹脉冲的产生和测量实验研究.

## 2 过模表面波振荡器的设计和模拟

SWO 是一种群速度近似为零的慢波切连科夫器件, 谐振点位于  $\pi$  模附近, 具有品质因子高、起振电流小和相同慢波结构尺寸下工作频率高等特点. 在太赫兹波段的 SWO 中引入过模结构, 并开发强选择性的束波相互作用机理, 实现单模太赫兹的激励, 可有效增加器件的功率容量, 克服加工和装配困难, 并已在 0.14 THz SWO 研制中取得了很好的效果<sup>[14-17]</sup>. 基于上述研究基础和小型化脉冲功率源 CKP3000<sup>[18]</sup> 的输出性能, 0.34 THz 大功率 SWO 的结构设计如图 1 所示, 包括无箔二极管、环形阴极、准直段、慢波结构、输出结构和引导磁体等关键部件. CKP3000 可实现最大峰值功率约 3 GW、具有 5—6 ns 平顶的电压脉冲输出, 作用在无箔二极管上预计可达到的电子束电压范围为 350—500 kV.

† 通信作者. E-mail: wanguiuc@mail.xjtu.edu.cn

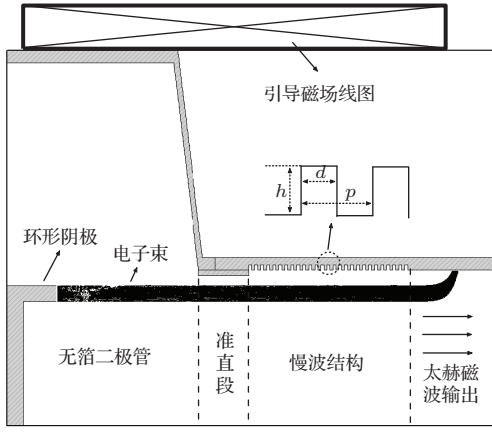


图1 0.34 THz 表面波振荡器二维结构示意图

为了在圆柱金属内壁上实现精细加工, 提高加工效费比和器件实验可行性, 慢波结构采用了矩形波纹结构, 内半径  $R_0$  选择为 3 mm, 过模比达到了近 6.8. 高过模比导致慢波结构中各本征模式的色散曲线更加接近, 因此 0.34 THz 过模 SWO 设计的关键是实现有效的模式选择来避免模式竞争. 通常, 过模慢波结构中  $\pi$  点附近的  $TM_{01}$  模属于表面波, 纵向电场集中在慢波结构壁处; 而  $TM_{02}$  模则属于体积波, 纵向场最大值位于轴线处. 但是, 随着过模程度的增加, 越靠近  $\pi$  点,  $TM_{02}$  模中除基波外的其他谐波都将逐渐转变为表面波, 导致纵向电场也会在慢波结构壁附近出现极大值. 因此, 为实现 0.34 THz SWO 的  $TM_{01}$  模单模激励, 一方面需要通过冷腔色散特性分析来设计合理的慢波结构参数和电子束电压, 使器件谐振点位于  $TM_{01}$  模色散曲线的  $\pi$  点附近, 频率达到 0.34 THz, 但又要远离  $TM_{02}$  模的  $\pi$  点; 另一方面则需要通过热腔色散特性分析选择合适的电子束距壁距离, 实现电子束与  $TM_{01}$  模电场的有效耦合, 尽量降低与  $TM_{02}$  模的耦合. 根据返波管线性理论<sup>[19]</sup>, 在全电荷微扰下, 过模 SWO 的热腔色散方程可表示为

$$\sum \left( \tau_n^2 + \frac{2(m-n)\pi}{p} \beta_n \right) A_n \times \int_{-p/2}^{p/2} \left[ \left( 1 - \frac{2\tau_n^2 c^2 \alpha}{\pi(\omega - \beta_n v_e)^2} I_0(\tau_n R_b) K_0(\tau_n R_b) \right) \times I_0(\tau_n R_0(z)) + \frac{2\tau_n^2 c^2 \alpha}{\pi(\omega - \beta_n v_e)^2} I_0^2(\tau_n R_b) \times K_0(\tau_n R_0(z)) \right] \cos \frac{2(m-n)\pi}{p} z dz = 0, \quad (1)$$

其中, 空间电荷因子  $\alpha$  和慢波结构壁半径  $R_0(z)$  的

表达式分别为

$$\alpha = \frac{I_b e}{4\epsilon m_0 v_e c^2 \gamma_b^3}, \quad (2)$$

$$R_0(z) = R_0 + \frac{d \cdot h}{p} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2h}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi d}{p}\right) \cos\left(\frac{2n\pi z}{p}\right), \quad (3)$$

式中,  $\tau$ ,  $\beta$  和  $A$  分别为各次谐波的横向波数、纵向波数和幅度, 下标  $n$  表示谐波次数,  $c$  和  $\epsilon$  分别为真空中光速和介电常数,  $R_b$  为电子束的平均半径,  $p$ ,  $h$  和  $d$  分别为慢波结构的周期、波纹深度和宽度,  $I_b$  为电子束电流,  $m_0$ ,  $v_e$ ,  $e$  和  $\gamma_b$  分别为电子质量、速度、电荷和相对论因子,  $\omega$  为波角频率,  $I_0$  和  $K_0$  分别为 0 阶第一类和第二类修正贝塞尔函数. (1) 式中色散关系  $\omega$ - $\beta$  的求解可以采用通用的矩阵等效法, 但需要解决过模结构引入的同一纵向波数下具有相差很小的多频解, 以及修正贝塞尔函数的量级跨度很大等问题. 电流  $I_b = 0$  时, 空间电荷因子  $\alpha = 0$ , (1) 式即退化为冷腔色散方程. 根据 CKP3000 驱动源可能提供的电子束电压范围, 采用 (1) 式和电磁场计算软件最终优化设计得到的慢波结构参数为<sup>[20]</sup>  $p = 0.36$  mm,  $h = 0.1$  mm 和  $d = 0.18$  mm, 电子束距壁距离为 0.3 mm, 其中距壁距离的选择综合考虑了现有电子束的实验准直精度, 以尽量避免它对慢波结构可能造成的轰击损伤. 此时, SWO 的冷腔色散曲线分别如图 2 所示, 350 kV 和 500 kV 的电子束多普勒线与  $TM_{01}$  模的谐振点分别为  $1.04\pi$  和  $0.965\pi$ . 在电子束电压为 380 kV, 电流为 2.2 kA 时, SWO 的热腔色散曲线如图 3 所示. 很明显,  $TM_{01}$  模太赫兹波的最大增长率是  $TM_{02}$  模的近 9 倍, 有效耦合的纵向波束范围也远大于  $TM_{02}$  模, 器件理论上实现了很好的模式选择.

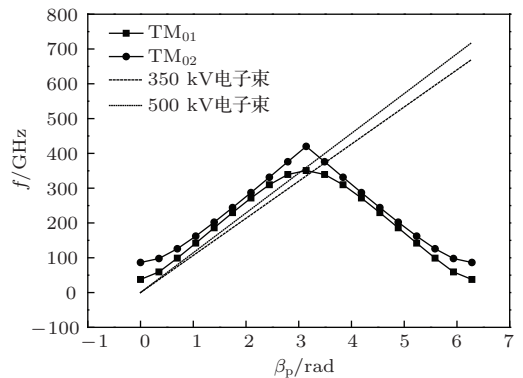


图2 冷腔色散曲线

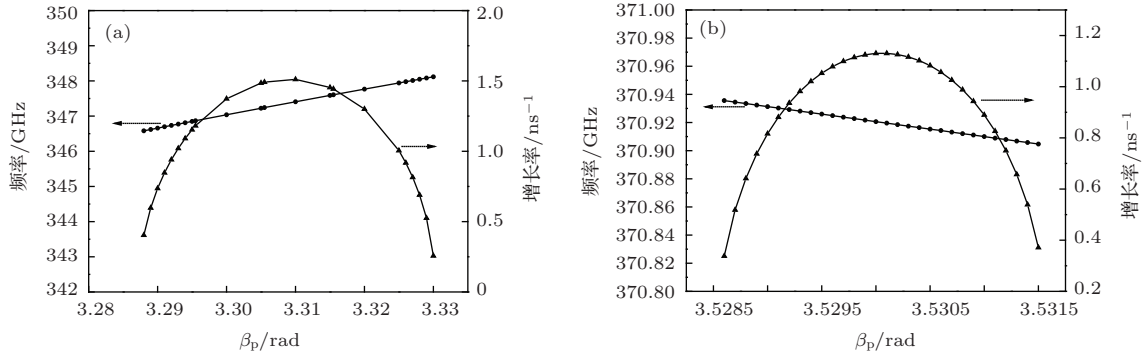


图3 热腔色散曲线 (a)  $TM_{01}$  模; (b)  $TM_{02}$  模

由于电子束距壁距离仅为0.3 mm, 为了进一步避免电子束准直精度不够和电子束边缘电子发散导致慢波结构的轰击破坏, 0.34 THz SWO在慢波结构前端设置了准直段, 用于约束进入慢波结构的电子束半径, 并可起到一定的场的反射作用。

采用2.5维全电磁PIC(Particle-in-cell)软件UNIPIC<sup>[21]</sup>对SWO中的无箔二极管<sup>[22]</sup>、准直段和慢波结构周期数等结构参数进行了模拟优化, 并考虑未来重频工作的要求, 最终给出0.34 THz过模SWO的其余关键参数为: 准直段内半径2.9 mm, 阳极半径7 mm, 电子束厚度0.3 mm, 慢波结构周期数27. 在5.5 T引导磁场和CKP3000实际馈入电压作用下, 电子束的电压和电流分别达到380

kV和2.1 kA, 所设计SWO的部分PIC模拟结果如图4所示. 此时过模SWO的起振时间仅为2.5 ns, 产生脉冲的频率约为0.34 THz, 功率为22.8 MW, 脉宽约为3 ns. 而且, 脉冲的频谱纯度很高, 相干性好,  $\Delta f/f < 0.6\%$ ; 器件的纵向波束 $\beta \approx 8643.1 \text{ m}^{-1}$ , 即SWO的谐振点约为 $\beta p \approx 0.99\pi$ , 的确工作在 $\pi$ 点附近; 图4(d)表明慢波结构中 $E_z$ 的径向分布与 $TM_{01}$ 模表面波的理论符合很好, 电子束只与 $TM_{01}$ 模发生了有效相互作用. 因此, 本文设计的高过模比0.34 THz SWO实现了很好的横向和纵向模式选择, 得到了兆瓦级大功率太赫兹脉冲输出, 与理论分析相符合, 证实了设计思路的正确性和方案的可行性。

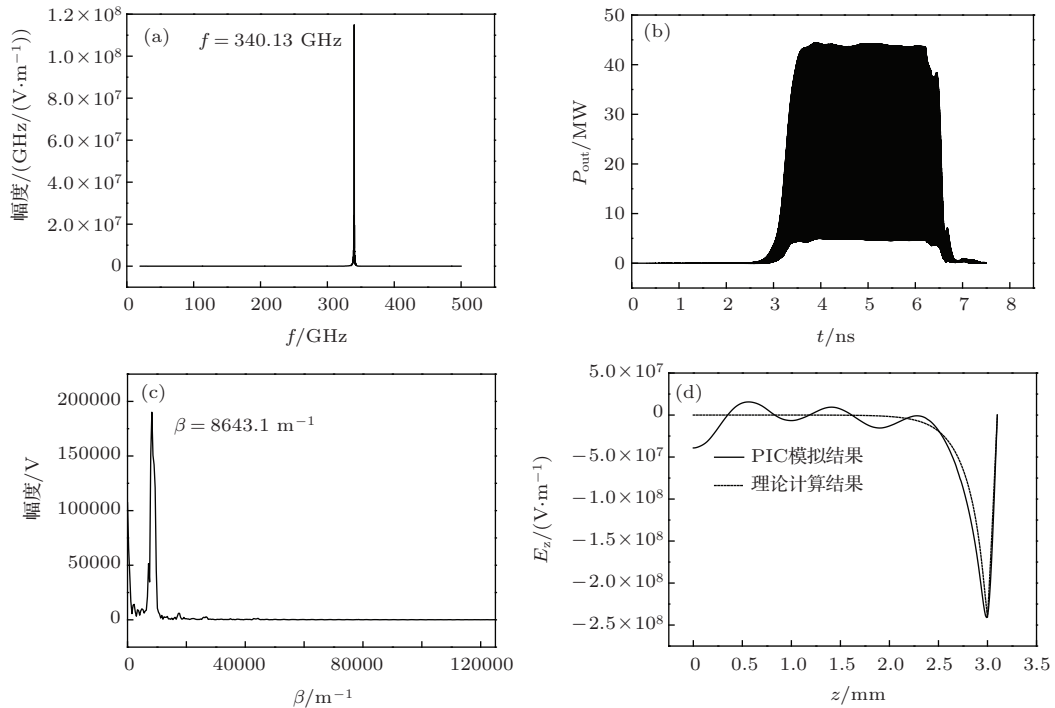


图4 0.34 THz过模SWO的模拟输出结果 (a) 频谱; (b) 功率谱; (c)  $E_z$ 沿 $z$ 方向分布的FFT结果; (d) SWS中某处 $E_z$ 的径向分布

### 3 太赫兹脉冲产生的初步实验

0.34 THz大功率过模SWO的实验装置如图5所示,系统体积不超过3 m(长)×0.6 m(宽)×1 m(高). 尽管采用了高过模比结构,振荡器的关键部件环形阴极和慢波结构的最小尺寸只有百微米量级,对加工技术和精度提出了很高的要求. 图6给出了扫描电镜观测下的环形阴极实物图,它由改性石墨材料采用精细机械加工而制备的爆炸发射阴极,此类阴极已成功应用于微波至毫米波段的相对论契伦科夫器件的重频实验<sup>[17,23]</sup>. 由图可知,阴极的外半径约为5.47 mm,与设计值5.4 mm相差约1.3%,且在正交方向上的外径偏差仅为1‰;阴极发射面厚度约为0.31 mm,与设计值偏差约3.3%,且厚度均匀,表明阴极加工的同轴度和精度较高. 慢波结构采用了微细电火花加工技术一次性完成整体加工,加工中采用紫铜圆柱形电极,并在表面反刻出与慢波结构的尺寸和电火花放电间隙相匹配的棱柱结构,通过非接触脉冲放电直接完成金属内壁矩形槽的刻蚀,有效保证了加工精度的稳定性和一致性. 由于电极材料的限制,慢波结构

材料选择了无磁不锈钢,最终的慢波结构及微观观测结果如图7所示. 波纹深度均值为0.103 mm,周期长度均值为0.355 mm,与设计值偏差均不超过3%;矩形波纹的表面有刻蚀凹坑和斑点,形成的表面粗糙度约为1 μm,因此总体来看,该加工件的精度和质量基本满足设计要求. 阴极引杆等二极管其他部件和输出波导等部件也由无磁不锈钢精细机加而成,实现了较高的表面光洁度和同轴度. 辐射结构采用了圆锥喇叭天线,介质窗材料为聚四氟乙烯,它在0.1—1 THz频段的吸收系数不超过3.5 cm<sup>-1</sup>. 以下实验中轴向引导磁场大小均为5.5 T,系统真空度约为10<sup>-4</sup> Pa.

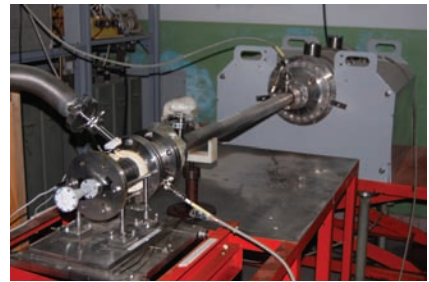


图5 0.34 THz 过模 SWO 实验装置图

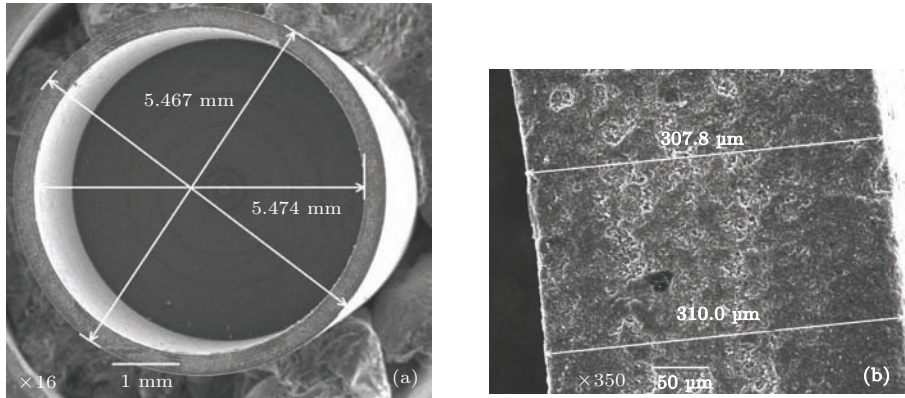


图6 环形阴极实物图 (a) 截面图; (b) 厚度

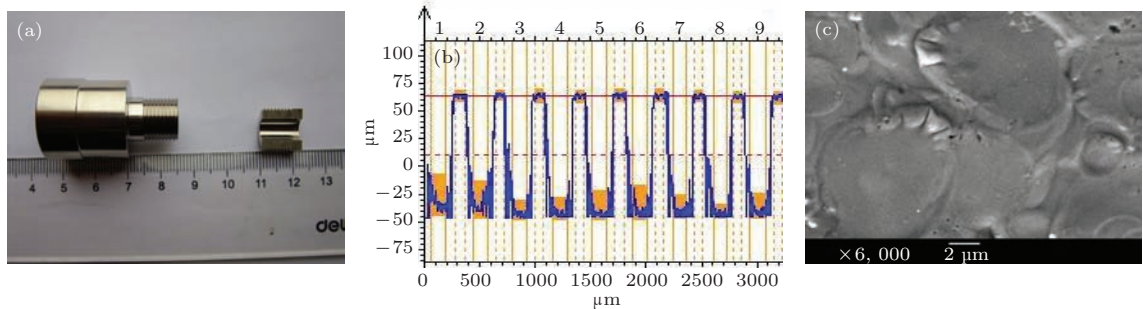


图7 慢波结构实物图 (a) 外观; (b) 三位形貌扫描; (c) 矩形槽底的SEM观测结果

首先进行了电子束的产生和传输实验. 由于电子束距离慢波结构内壁只有 0.3 mm, 二极管产生高质量和合适参数的电子束, 并能够有效通过慢波结构是波束互作用的关键, 因此要确保电子束与系统具有良好的同心度, 避免轰击慢波结构. 实验中, 采用电容分压器测量电子束电压, 电流通过法拉第筒进行截断测量, 电子束的质量和系统对心效果则由轰击纸质靶材来获得. 经过大量的实验诊断和结构微调, 最终获得了较好的系统同心度. 图 8 给出了对心后 10 个电子束电压和电流的叠加测试波形. 很明显, 电子束电压和电流的上升沿小于 1 ns, 都具有近 5 ns 的准平顶, 有利于束波相互作用, 且不同发次下两者的幅度波动不超过  $\pm 5\%$ . 根据电容分压器的标定结果, 无箔二极管产生的电子束电压约为 420 kV; 而法拉第筒由于缺少小型标准强流电子束源而无法进行标定, 电子束电流由电压的第一反射峰(图 8 中已圈出)与主电压波形的时间和幅度关系<sup>[24]</sup>推算得到, 约为 3.1 kA, 都达到了起振电压和电流的要求.

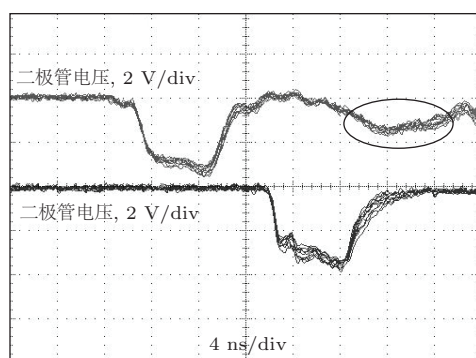


图 8 电子束电压(上)与电流(下)

经过一定发次的阴极老炼后, 进行了太赫兹脉冲的初步产生和测量实验. 脉冲检测在辐射场远场进行, 由截止波导或角锥喇叭接收信号后, 经衰减器馈入二极管检波器进行检波. 辐射脉冲的频率和功率初步诊断分别采用截止波导滤波法<sup>[14]</sup>和辐射场功率密度积分法<sup>[17]</sup>. 分别采用截止频率为 319 GHz 和 349 GHz 的开口波导接收, 通过检波器的输出有无来判断辐射脉冲所在的频率范围. 经 319 GHz 截止波导接收后, 检波器有近 20 mV 的明显输出, 典型的检波波形如图 9 所示, 脉宽约为 2 ns; 而采用 349 GHz 截止波导接收, 检波器无脉冲输出. 因此, 0.34 THz 过模 SWO 产生了频率在 0.319—0.349 THz 范围内的太赫兹脉冲信号, 与设

计要求和模拟结果相符. 由于 SWO 属于圆周对称的契伦科夫器件, 它的辐射场理论上具有圆周对称性, 因此辐射脉冲的功率初步诊断可以采用空间辐射场功率密度积分的方法. 检测得到 0.34 THz 过模 SWO 的辐射场功率密度分布如图 10 所示. 测量系统中使用的固定衰减器、直波导和二极管检波器均在返波振荡太赫兹源上进行了标定. 截止波导滤波法给出了太赫兹脉冲的频率范围是 0.319—0.349 THz, 根据标定结果, 由图 10 积分得到太赫兹脉冲的辐射功率为 261—418 kW, 即获得了不小于 250 kW 的功率输出.

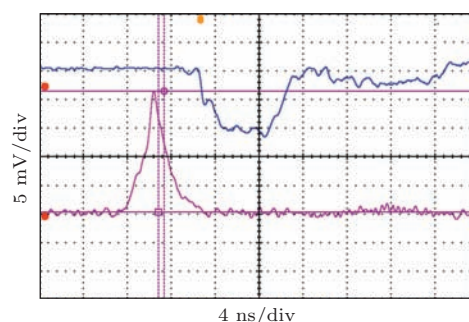


图 9 截止波导滤波系统的检波波形

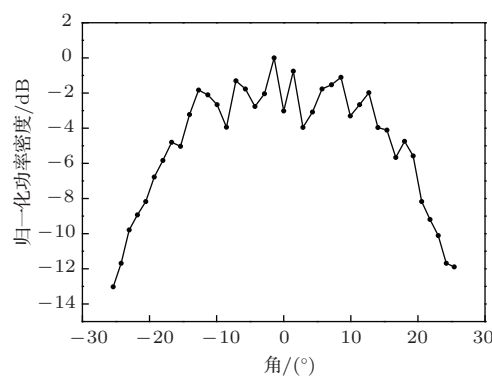


图 10 辐射场功率密度分布

SWO 实验装置输出太赫兹脉冲的频率范围与模拟结果相符, 证明器件实现了预期的模式选择, 进一步证实了采用高过模比结构的可行性和模拟设计方法的可靠性. 但诊断功率仅为百千瓦量级, 与 PIC 模拟结果相差甚远, 输出脉宽也比模拟结果缩短近 1 ns. 通过对目前实验装置和模拟状态的对比, 分析认为这种差异物理上是由以下几个原因造成的: 1) 电子束流质量不高. 图 11 给出了电子束轰击铜靶后的扫描电镜观测图. 由图可知, 一方面电子束角向均匀性不好, 具有一定的能散, 右侧电子

束明显强于左侧;另一方面电子束厚度小于预期,都使得有效束波相互作用减弱,降低器件效率. 2) 慢波结构及输出波导的表面损耗. 原模拟设计中金属材料均视为理想导体,而在0.34 THz波段常见金属的表面阻抗增大,趋肤深度减小到与表面粗糙度相当甚至更小,都将引入不可忽略的损耗<sup>[25]</sup>,影响SWO的起振和功率输出. 3) 慢波结构加工精度. 目前慢波结构采用微细电火花加工技术,微电极在波纹深度腐蚀过程中的放电能力逐渐减弱,造成波纹宽度沿径向变窄,而且尽管波纹深度和周期的平均值均达到了精度要求,但尺寸波动幅度较大. 因此,改进阴极材料或结构,提高电子束流质量,采用铜材料或精密电镀技术制作高精度高电导率慢波结构,将是0.34 THz过模SWO提高实验功率输出的关键.

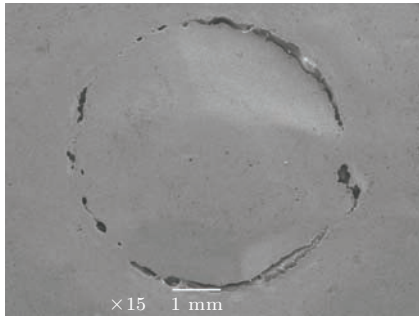


图11 电子束轰击铜箔的扫描电镜观测图

## 4 结 论

为研制大功率太赫兹源,本文以切连科夫辐射为基础,采用高过模比慢波结构研制了工作在 $TM_{01}$ 模的0.34 THz大功率SWO. PIC模拟结果表明,过模SWO可以产生频率为0.34 THz,功率达22.8 MW的太赫兹脉冲. 基于小型化脉冲功率驱动源CKP3000,搭建了0.34 THz过模SWO实验装置,开展了脉冲产生实验. 初步的诊断结果表明,SWO辐射脉冲频率在0.319—0.349 THz范围内,辐射功率不小于250 kW,脉宽约为2 ns,进一步证实了大功率太赫兹SWO的可行性. 但由于电子束流质量、金属壁损耗和慢波结构加工精度等问题,0.34 THz大功率SWO的实验功率输出水平远未达到预期,但本文的研究为大功率过模SWO的深入研究和改进奠定了基础.

过模相对论SWO工作在慢波结构色散曲线的最高点,最大程度的增大了结构半径和电子束半

径,有效降低了高频结构的加工难度和增大束波相互作用面积,能实现MW级功率太赫兹波输出. 对于本文研究的强相对论SWO,实现宽脉宽和高重频的太赫兹脉冲输出将具有更广泛的实用价值. 此外,如果过模SWO采用弱相对论空心电子束,还可以降低阴极发射电流密度,解决传统笔形束器件的功率容量和热量沉积问题. 不过,过模SWO仅在慢波结构表面附近发生束波相互作用,输出性能对慢波结构的尺寸更加敏感,对加工精度要求很高,正如文中实验与模拟结果偏差分析中所指出的. 而且,过模并不改变慢波结构的波纹尺寸,如何实现高精度的圆柱慢波结构加工将是SWO器件发展需要解决的主要难题.

## 参考文献

- [1] Siegel H P 2002 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **50** 910
- [2] 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. Techn.* **1** 54
- [3] Bratman V L, Denisov G G, Ofitserov M M, Korovin S D, Polevin S D, Rostov V V 1987 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **PS-15** 2
- [4] Min S H, Kwon O J, Sattarov M A, So J K, Park S H, Baek I K, Choi D H, Shin Y M, Park G S 2011 *Proceedings of 36th International conference on IRMMW-THz* Houston, USA, October 2-7 2011 p1
- [5] Bratman V L, Fedotov A E, Makhlov P B 2012 *Phys. Plasmas.* **19** 020704
- [6] Bratman V, Glyavin M, Idehara T, Kalynov Y, Luchinin A, Manuilov V, Mitsudo S, Ogawa I, Saito T, Tatematsu Y, Zapevalov V 2009 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **37** 36
- [7] Chen Z, Wang J, Wang Y, Qiao H, Guo W and Zhang D 2014 *Chin. Phys. B* **23** 068402
- [8] Chen Z, Wang J, Wang Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 108401
- [9] Booske J H 2008 *Phys. Plasma* **15** 055502
- [10] Paoloni C, Brunetti F, Carlo A D, Mineo M, Tamburri E, Terranova M L, Ulisse G, Durand A, Marchesin R, Pham K, Krozer V, M Kotiranta, Rossi A D, Dolfi D, Guiset P, Legagneux P, Schnell J P, Fiorello A, Dispenza M, Secchi A, Zhurbenko V, Megtert S, Bouamrane F, Cojocar C S, Gohier A 2011 *Proceedings of International Vacuum Electronics Conference*, Bangalore, India, February 21-24 2011 p55
- [11] Nusinovich G S, Pu R F, Antonsen T M, Sinitzyn O V, Rodgers J, Mohamed A, Silverman J, Sheikhly M A, Dimant Y S, Milikh G M 2011 *J Infrared Milli Terahertz Waves* **32** 380
- [12] David K A, Yuval C, Susanne M M, Alan B, Baruch L, Thomas M A, William W D 1998 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26** 591

- [13] Chen H B, Zhou C M, Hu L L, Ma G W, Xu D M, Song R, Jin X 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 865 (in Chinese) [陈洪斌, 周传明, 胡林林, 马国武, 许冬明, 宋睿, 金晓 2010 强激光与粒子束 **22** 865]
- [14] 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]
- [15] 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]
- [16] 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, 李爽, 陆希成 2013 强激光与粒子束 **25** 451]
- [17] Wang G Q, Wang J G, Tong C J, Li X Z, Li S, Wang X F, Lu X C 2013 *Phys. Plasmas* **20** 043105
- [18] Li X Z, Wang J G, Sun J, Song Z M, Ye H, Zhang Y C, Zhang L J, Zhang L G 2013 *IEEE Trans. Electron Devices* **60** 2931
- [19] Sweigle J A, Poukey J W, Leifeste G T 1985 *Phys. Fluids* **28** 2882
- [20] Li S, Wang J G, Tong C J, Wang G Q, Lu X C, Wang X F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 120703 (in Chinese) [李爽, 王建国, 童长江, 王光强, 陆希成, 王雪峰 2013 物理学报 **62** 120703]
- [21] 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
- [22] Li S, Wang G Q, Tong C J, Wang X F 2013 *Proceedings of Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference Chengdu, China, July 21–25 2013* p408
- [23] Xiao R Z, Tan W B, Li X Z, Song Z M, Sun J, Chen C H 2012 *Phys. Plasmas* **19** 093102
- [24] Huo S F, Chen C H, Sun J, Song Z M, Song W, Xiao R Z 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **11** 2959 (in Chinese) [霍少飞, 陈昌华, 孙钧, 宋志敏, 宋玮, 肖仁珍 2011 强激光与粒子束 **11** 2959]
- [25] Wang G Q, Wang J G, Wang X F, Tong C J, Li S, Lu X C 2013 *Pro. SPIE* **890904**

## Study on 0.34 THz overmoded surface wave oscillator

Wang Guang-Qiang<sup>1)2)</sup> Wang Jian-Guo<sup>1)†</sup> Li Shuang<sup>1)2)</sup> Wang Xue-Feng<sup>1)2)</sup>  
Lu Xi-Cheng<sup>1)2)</sup> Song Zhi-Min<sup>1)2)</sup>

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

2) (Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Xi'an 710024, China)

( Received 19 May 2014; revised manuscript received 11 October 2014 )

### Abstract

The simulation design and preliminary experiment on a 0.34 THz large-power overmoded surface wave oscillator are presented in this paper. For the slow wave structure (SWS) with large overmoded ratio ( $D/\lambda \approx 6.8$ ), a small signal theory is derived for appropriate dimensions of SWS and gap between electron beam and SWS, and makes the device oscillate near the  $\pi$  point of surface wave at  $TM_{01}$  mode. PIC (particle in cell) simulation results show that this SWO (small wave oscillation) can generate the terahertz wave with frequency and output power of 0.34 THz and 22.8 MW, respectively. SWS with stainless steel is integrally and precisely fabricated by employing micro-EDM technology, and the experimental setup is built based on a miniaturized pulse power driving source. Results of preliminary experiment and diagnostics show that a terahertz pulse is radiated at a frequency range of 0.319–0.349 THz, a power of no less than 250 kW, and a pulse duration of about 2 ns at beam voltage of about 420 kV and beam current of about 3.1 kA. Finally, the reason for discrepancy between the measured power and the simulation result is analyzed and discussed, laying the foundation for the performance improvement of terahertz surface wave oscillator.

**Keywords:** terahertz, surface wave oscillator, overmoded, slow wave structure

**PACS:** 07.57.Hm, 41.20.Jb

**DOI:** 10.7498/aps.64.050703

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