

过模高功率太赫兹表面波振荡器优化设计

张海¹, 王建国^{1,2}, 童长江²

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西北核技术研究所, 710024, 西安)

摘要: 提出了一种新型过模高功率太赫兹表面波振荡器, 其中慢波系统是由一段过模圆柱波导内壁沿圆周方向平行挖去若干个均匀环形槽构成, 相邻槽间距固定不变. 该结构较之传统的单模结构能有效降低管内电场强度, 避免场击穿, 提高系统的功率容量. 同时, 提出了一种基于表面波工作机制的综合选模方案, 即通过电动力学结构选模及电子注参数选模相结合, 使系统稳定工作于单模表面波状态, 从而达到模式选择的目的. 该方法能有效解决过模慢波系统内的模式竞争问题. 利用 2.5 维粒子模拟程序 UNIPIC 对振荡器进行了物理设计和性能优化, 得到了一套最优工作参数. 在 500 kV 电子注电压、1.5 kA 电子注电流条件下, 模拟得到了 42 MW 的峰值功率输出, 振荡频率高于 0.14 THz, 模式为 TM_{01} , 信号的时域波形及频谱特性良好.

关键词: 高功率; 太赫兹波; 表面波振荡器; 模式竞争; 2.5 维粒子模拟

中图分类号: TN128 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)12-1531-06

Optimization of High Power Terahertz Surface Wave Oscillator

ZHANG Hai¹, WANG Jianguo^{1,2}, TONG Changjiang²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

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

Abstract: A novel high power terahertz surface wave oscillator was proposed to obtain the high power terahertz wave sources with high efficiency in steady state. The device consists of a large cross-section (overmoded) slow wave system (SWS) with a unique profile of wall radius specifically designed to support surface wave and to provide a strong beam-wave coupling at moderate voltage. This kind of SWS can decrease the field strength in the structure efficiently and enhance the power capacity of device in the THz regime. A comprehensive method is employed to avoid mode competition in this overmoded situation, that is, to move the operating point to the upper cut off of the transmission band of dispersion curve and to ensure only the TM_{01} mode owns the characteristic of slow surface wave. The 2.5D particle-in-cell simulation program UNIPIC is used to study the effects of device parameters which are critical to the optimization of output power in a prototype 0.14THz surface wave oscillator. A set of optimal operating parameters are achieved. Under the condition of 500 kV voltage and 1.5 kA current, the output power of 42 MW is achieved at the frequency of 0.14THz in the TM_{01} mode with perfect time plot and fine spectrum characteristic.

Keywords: high power; terahertz wave; surface wave oscillator; mode competition; 2.5D particle-in-cell simulation

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz (波长为 3 000~30 μm) 范围内的电磁波^[1]. 它在长波段与毫

米波(亚毫米波)相重合,而在短波段则与红外线相重合.由于太赫兹波具有不同于其他波段电磁辐射的特殊性质,因此在物体成像、环境监测、医疗诊断、射电天文,尤其是在卫星通讯和军用雷达等方面具有重大的科学价值和广阔的应用前景.

目前,常见的太赫兹辐射源有:固态振荡器、量子级联激光器和激光驱动型太赫兹产生器.然而,这些器件均存在一些固有的缺点,例如:固态振荡器的输出功率随频率的升高而急剧下降(在 0.4 THz 时输出功率仅为 0.7 mW);量子级联激光器在太赫兹频率下可产生 mW 量级以上的功率输出,但它必须工作于极低的温度(几十 K)下;激光驱动型太赫兹产生器是目前最常用的太赫兹功率源,然而它的输出功率也很低(小于 1 mW),且输出信号多为窄脉冲形式,不适用于大功率长脉冲应用场合.自 2000 年起,太赫兹真空电子学有了很快的发展并取得了重要的成果,主要表现为太赫兹真空电子器件的产生与发展^[2-3].到目前为止,仅采用真空电子学及等离子体电子学的方法,可以产生大功率长脉冲太赫兹辐射.本文在传统真空返波管设计基础之上,引入过模结构、 π 点工作和表面波等新机制,提出了一种 0.14 THz MW 量级太赫兹表面波振荡器(SWO),并对其进行了理论分析和优化设计.

1 太赫兹表面波振荡器工作原理

图 1 为太赫兹 SWO 的二维结构图.其中,慢波系统是振荡器的注-波互作用区.工作时,由电子枪产生的薄的环形电子注,在强磁场引导下通过前端漂移管进入慢波系统与结构波相互作用.先进入慢波系统的电子注与结构波发生作用产生强度较小的太赫兹波.辐射的能量沿着与电子注运动方向相反的方向传播,进一步与随后进入的电子注相互作用,

形成正反馈,这样电磁波被迅速放大直至达到非线性饱和.最后,太赫兹波在慢波系统的起始端被反射系统反射,重新经过慢波系统后进入输出端传输波导和模式转换器、天线辐射系统.

可见,太赫兹 SWO 是一个多参数系统,这些参数包括慢波系统的结构参数、电子注束流参数、结构波相速和群速、引导磁场大小等.通过合理设计器件结构并正确选择工作参数,可使得振荡器稳定工作在单模、单频状态,并且所产生的太赫兹波沿着慢波系统表面传播,即电场强度在接近于波纹壁处最大,而在远离波纹壁表面时迅速降低.具有这种性质的电磁波称为表面波,这种振荡器称为表面波振荡器.

2 过模慢波系统

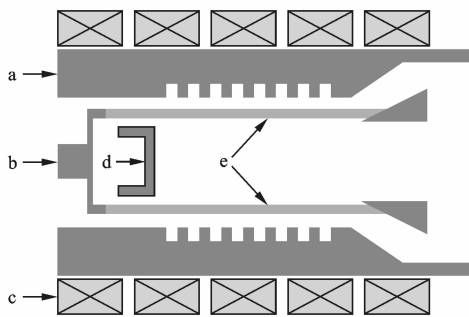
2.1 过模结构的优点

随着工作频率的提高,尤其进入太赫兹频段,器件结构尺寸迅速缩小,使得在相同传输功率情况下,器件内部功率密度不断提高,场强也不断提高,而器件内过强的场强会导致如下 2 种破坏性效应:①器件的击穿及二次电子发射;②破坏电子注的正常传输与群聚.这 2 点都将影响注-波互作用机制,导致器件效率严重下降甚至辐射终止.解决这一问题的可行途径是增加器件的横向尺寸,即采用过模结构^[4],这样可以有效降低相同功率容量下器件内部的场强,从而避免上述问题产生.

本文采用如图 2 所示的矩形过模慢波系统(SWS).它是在半径为 R 的圆柱波导内壁沿圆周方向平行挖去若干个均匀环形槽,相邻槽间距固定不变.该周期结构是关于 z 轴的旋转对称结构,其中 $D/\lambda=3$ 、 $D=2R$ 是矩形波纹波导的直径, λ 为所产生的太赫兹波在自由空间的波长.

2.2 过模慢波系统色散特性

色散特性是慢波系统最重要的高频特性之一,通过分析 SWS 色散关系曲线,可以初步确定 SWS 结构参数、工作频率及其他特性参数,如耦合阻抗、线性增长率等.本文采用等效谐振法^[5]求解了上述过模周期SWS的色散曲线,如图3所示.从图3可



a:慢波系统;b:电子枪系统;c:磁场系统;
d:反射板系统;e:强流相对论电子注

图 1 太赫兹 SWO 结构示意图

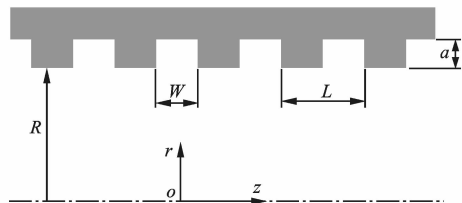
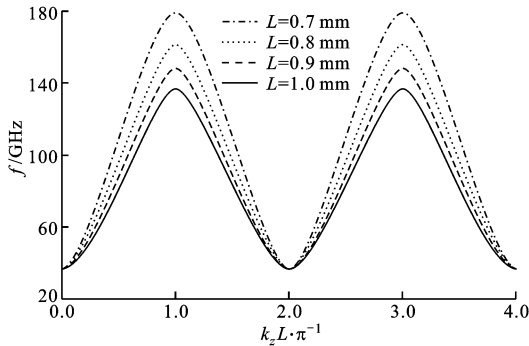
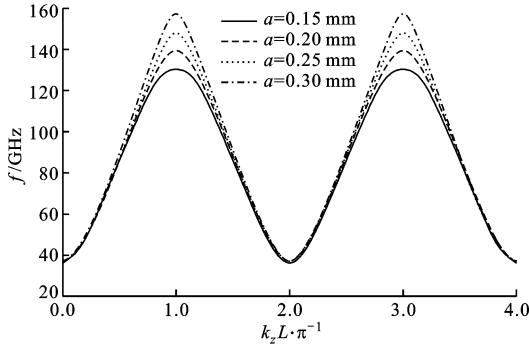


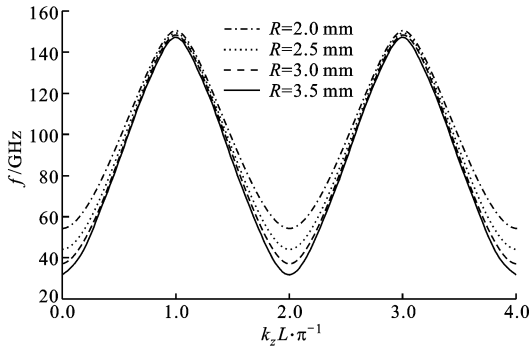
图 2 SWS 纵剖面结构图



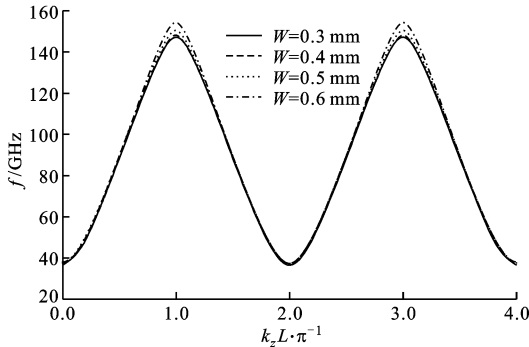
(a) 不同周期长度时 SWS 的色散关系



(b) 不同凹槽深度时 SWS 的色散关系



(c) 不同半径时 SWS 的色散关系



(d) 不同凹槽宽度时 SWS 的色散关系

图 3 不同结构参数变化情况下 SWS 的色散关系

响不大. 为了获得 0.14 THz 电磁辐射, SWS 的基本结构参数可选择为: $R = 3.0$ mm, $L = 0.9$ mm, $a = 0.2$ mm, $W = 0.5$ mm.

3 过模太赫兹 SWO 的模式选择

3.1 模式竞争问题

单模结构中, SWS 的平均直径约等于结构波的自由空间波长, 即 $D/\lambda \approx 1$. 不同横模色散曲线之间存在禁带, 模式之间不存在频率交叠现象. 对于某一工作频率, 只存在一个横模与之对应, 而对于过模结构 ($D/\lambda \geq 1.76$), 不同横模的色散曲线之间不存在禁带, 模式之间存在频率交叠现象. 图 4 所示为在上述结构参数下 SWS 的色散曲线, 其中包含了光束多普勒线和 500 keV 电子束多普勒线. TM_{01} 、 TM_{02} 、 TM_{03} 为系统内 3 个主要竞争模式. 由图 4 可见, 对于同一工作频率 (例如 0.14 THz) 可同时对应多个横模, 这说明器件内存在模式竞争问题.

3.2 模式选择方案

3.2.1 表面波工作状态 由 Floquet 定理, 无限长慢波系统内 TM_{0m} 模的纵向电场为

$$E_z = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n J_0(k_{c,m,n} r) e^{jk_{z,m,n} z} e^{-j\omega t} \quad (1)$$

式中: J_0 为 0 阶 Bessel 函数; $k_{c,m,n}$ 为横向波数; $k_{z,m,n} = k_{z,m,0} + 2\pi n/L$, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, $k_{z,m,0}$ 为 0 次谐波 (基波) 的纵向波数; L 为单周期慢波系统长度; n 为空间谐波数; m 为横向模式数. 横向和纵向波数满足如下关系

$$k_{c,m,n}^2 + k_{z,m,n}^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \quad (2)$$

可以看出, 无限长 SWS 中的 TM 波可分解为无穷阶空间谐波, 各阶谐波具有相同的频率 ω 和不同的纵向波数 $k_{z,m,n}$ (或者说有相同的群速度 v_g 和不同的相速度 v_p), 它们共同存在才能满足 SWS 的周期性边界条件. 对于某一频率 TM 波的第 n 阶空

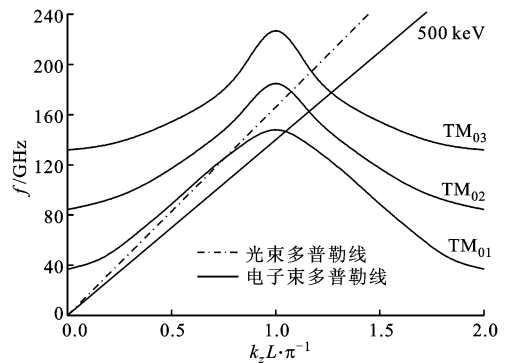


图 4 过模结构内主要竞争模式的色散关系

以看出, 随着 SWS 周期长度的减小, π 点 (工作点) 的频率上升; 随着凹槽深度的加深, π 点的频率下降, 而波导半径和凹槽宽度对 SWS 色散特性的影

间谐波,当其纵向波数 $k_{z,m,n} < \omega/c$ 时,相速度 $v_p > c$,该谐波为快波,其纵向电场 E_z 沿径向呈 J_0 分布,即在 $r=0$ 处有最大值并随半径的增大而减小,而当 $k_{z,m,n} > \omega/c$ 时, $k_{z,m,n}$ 为虚数, J_0 演化为 0 阶虚宗量 Bessel 函数 I_0 ,此时 E_z 在接近于 SWS 表面处有最大值,随着距 SWS 表面距离的增大而迅速衰减,其相速度 $v_p < c$,该谐波为慢波,可与电子注同步而相互作用,这种状态称为表面波工作状态^[6].

3.2.2 综合选模方案 为了获得 TM_{01} 单模工作状态,我们确定如下选模方案:首先,合理设计慢波系统,使得光束多普勒线与 TM_{01} 模色散曲线的交点位于第 1 半 Brillion 区 ($0 < k_{z,1,0}L/\pi < 1$),而与其他高次模色散曲线的交点位于第 2 半 Brillion 区 ($1 < k_{z,m,n}L/\pi < 2, m=2, 3, 4, \dots; n=\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$). 这样可确保 TM_{01} 模中占主导地位的基波相速小于光速,呈现纯表面波(慢波)状态,而其他高次模的基波相速大于光速,呈现体积波(快波)状态,这称为电动力学结构选模. 另外,通过正确设定电子注电压、电流、电子注半径和厚度,使得电子注多普勒线与 TM_{01} 模色散曲线的交点(工作点)位于 π 点附近,而与其他高次模色散曲线的交点远离 π 点,这称为电子注选模. 综合运用以上 2 种选模方案可以达到模式选择的目的.

如图 4 所示,在给定的 SWS 结构参数和电子注参数下,电子注与 TM_{01} 模在 π 点附近同步,而与 TM_{02} 、 TM_{03} 模在远离 π 点处同步. 这使得在工作频率处 TM_{01} 模的基波及其所有高阶空间谐波都是慢波,总场呈 I_0 分布,为表面波. 这种表面波与靠近 SWS 表面传输的环形电子注有很高的耦合阻抗,而此时在 TM_{02} 、 TM_{03} 模工作点处,由于其基波为体积波,所以总场呈 J_0 分布,为体积波(快波). 该波在沿 SWS 表面传输的电子注耦合阻抗较小. 因此,尽管慢波系统是过模的,但 TM_{01} 模因其具有较高的耦合阻抗仍能被优先激励而成为惟一的工作模式,从而达到模式选择的目的.

4 过模太赫兹 SWO 的粒子模拟

过模大功率太赫兹 SWO 是一个多参数系统,实际有效的系统工作于一个稳定的非线性状态. 本文采用 2.5 维全电磁粒子模拟(PIC)程序 UNIPIC(该程序是由西安交通大学与西北核技术研究所联合开发)对所提出的太赫兹 SWO 进行仿真设计和优化,并与高功率微波领域中比较成熟的 PIC 模拟软件 KARAT 的仿真结果进行比较.

粒子模拟中所建立的物理模型如图 5 所示. 该模型是关于 z 轴的旋转对称结构,矩形波纹 SWS 和反射板均为理想导体,右端输出窗设置为卷积理想匹配层^[7],辐射功率在此处被完全吸收并被记录. 初始时刻器件内场强为 0,电子注从左端入射进入相互作用区中与 SWS 相互作用,产生高功率太赫兹辐射.

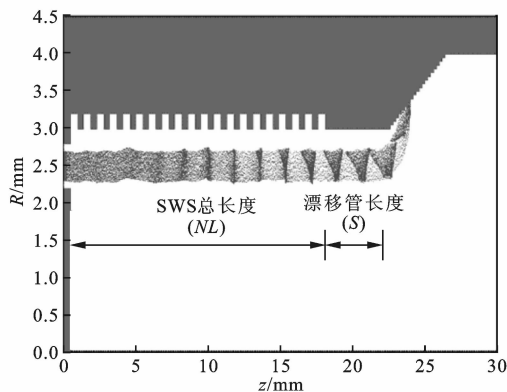


图5 太赫兹 SWO 粒子模拟结构模型

4.1 太赫兹 SWO 的参数优化

4.1.1 SWS 周期数 N 的选取 图 6 为太赫兹 SWO 输出功率随周期数 N 的变化规律. 由图 6 可见,随着 N 的增加,振荡器输出功率呈周期性变化并逐渐减小, $N=20$ 为最佳值. 其原因如下:当一束均匀电子注进入慢波系统时,由于进入时间不同,部分电子落入结构波的正相位区,被加速,另一部分电子则落入结构波的负相位区,被减速. 经过一段距离的漂移,电子注将形成群聚,如图 5 所示. 由于电子注的初始速度(或平均速度)略大于结构波相速,所以电子注的群聚中心将始终位于结构波的负相位区内从而被减速. 平均来说,电子注将失去部分动能,转化成电磁能. 由于不断辐射能量,电子注群聚中心速度减小并逐渐由负相位区向正相位区移动. 若当电子注离开慢波系统时,群聚中心恰好移至结构波正、负相位交替处,则辐射功率最大,此时慢波系统的总长度为最优长度. 可以想象,如果系统总长度小于该最优值,则群聚中心尚未回到零相位处,电子团没有被充分减速,因此辐射功率变小;反之,如果系统长度过长,群聚中心将进入正相位区,电子注被加速,吸收电磁场能量,同样使辐射功率减小. 如果继续增加(或减小)SWS 周期数,群聚中心将在结构波的正、负相位区中来回振荡,导致辐射功率呈周期性变化.

4.1.2 后漂移段长度 S 的选取 漂移段是指在

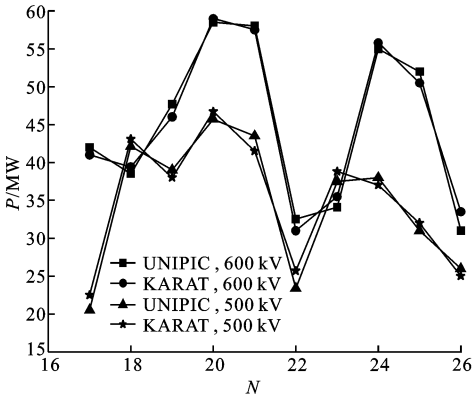


图 6 太赫兹 SWO 输出功率随周期数的变化规律

注-波相互作用区两端,电子注尚未进入(或已经离开)慢波系统时所经过的一段空间.这段空间的长度对器件的性能有显著的影响.由于本文太赫兹 SWO 的前端设置了反射板,电磁波在此被完全反射,所以仅讨论后漂移段对器件性能的影响.图 7 为振荡器输出功率随后漂移段的变化情况,可以看到 $S=4.0$ mm 为最优值.其原因可从以下 2 个方面理解:①将后漂移段视为一段传输线,从该传输线的左端向输出端看去存在一等效输入阻抗 Z_m , Z_m 与长度 S 有关,当 Z_m 与 SWS 的特性阻抗匹配时,信号在连接边界处反射最小,因此输出端所得功率最大;反之,如果两者阻抗不匹配,则部分功率被反射,导致输出功率减小,这是从线路效率角度考虑的;②从电子效率角度来讲,由于阻抗失配,使得部分结构波反射回注-波相互作用区,入射波与反射波叠加使得管内总场中存在明显的驻波成分.与理想情况下电子注与行波场相互作用不同,该驻波场会降低注-波相互作用效率,减小电子注自身辐射功率,从而影响管子的总体性能,这种现象称为渡越时间效应. S 值不同,阻抗失配程度不同,驻波场强度也不同,管子输出特性亦不同.另外,最新研究结果表明^[8-9], SWS 两端不同的反射情况会改变器件内场分布,尤其会影响结构波中前向波与反向波、零次谐波与负一次谐波之间的相位关系,从而影响注-波相互作用效率,改变器件的输出性能.

4.2 太赫兹 SWO 的输出信号及模式判定

根据以上分析,我们获得了一套太赫兹 SWO 的最优工作参数: $R=3.0$ mm; $L=0.9$ mm; $a=0.2$ mm; $W=0.5$ mm; $N=20$; $S=4.0$ mm; 工作电压 $450\text{ kV}\leq U\leq 600\text{ kV}$; 工作电流 $1\text{ kA}\leq I\leq 3\text{ kA}$. 我们选取 $U=500\text{ kV}$, $I=1.5\text{ kA}$ 对太赫兹 SWO 进行数值仿真(引导磁场 $B=4.0\text{ T}$),其结果如图 8、

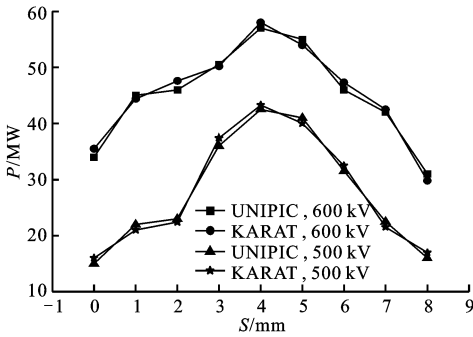
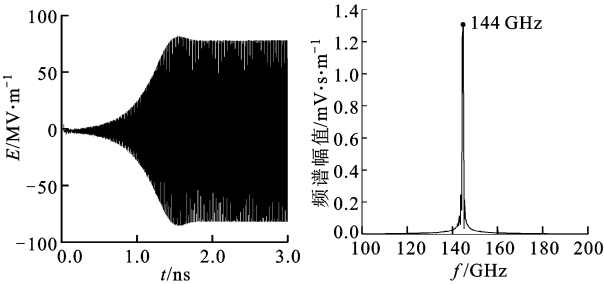


图 7 太赫兹 SWO 输出功率随漂移段的变化规律

图 9 所示.由图 8 可见,振荡器在 $t=0.5\text{ ns}$ 附近开始起振,振幅逐渐增大,在 $t=1.5\text{ ns}$ 时达到饱和,随后便开始稳定工作,信号呈正弦变化,且中心频率位于 144 GHz 附近,这恰好能满足设计目标,即 $f\geq 0.14\text{ THz}$.

图 9 为管内径向电场的空间分布(取 $1.0\text{ mm}\leq z\leq 11.0\text{ mm}$).由图 9 可见,电场在 SWS 表面附近($R=3.0\text{ mm}$)幅值最大,并沿半径方向向内逐渐减小,即电场主要集中在 SWS 表面附近,这说明振荡器稳定工作在 TM_{01} (表面波)状态下.又因为电场的相位在 10 个周期范围内连续变化了 10π ,所以可以判定振荡器近似工作于 π 点附近.这与前面所分析的 π 点表面波工作状态一致.



(a)时域波形 (b)频谱

图 8 太赫兹 SWO 内某点纵向电场的时域波形及其频谱

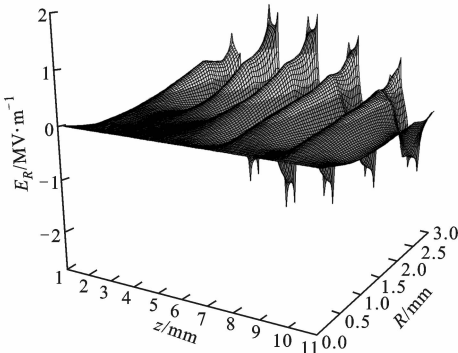


图 9 太赫兹 SWO 内径向电场的空间分布

5 结 论

高功率太赫兹表面波振荡器是太赫兹领域里一个方兴未艾的研究课题,其兆瓦量级的输出功率可用于军用雷达和导航系统中. 本文通过理论分析和数值模拟对 THz SWO 进行了物理设计和性能优化. 研究表明,通过合理设计器件结构并正确选择工作参数,使系统稳定工作于 π 点、表面波状态,可有效解决过模慢波结构内的模式竞争问题. 在 500 kV 电子注电压、1.5 kA 电子注电流及最优工作参数条件下,数值模拟得到了 42 MW 的峰值功率输出,振荡频率高于 0.14 THz,模式惟一,时域波形及频谱特性良好.

参考文献:

- [1] DRAGOMAN D, DRAGOMAN M. Terahertz fields and applications [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2004, 28(1):1-66.
- [2] GARCIA-GARCIA J, Martin F, ROBERT M E. Optimization of micromachined reflex klystrons for operation at terahertz frequencies [J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 2004, 52(10): 2366-2370.
- [3] IVES L, KORY C, READ M, et al. Development of backward wave oscillators for terahertz applications [C]//*Proceedings of Terahertz for Military and Security Applications Conference*. Orlando, FL, USA: SPIE Press, 2003:71-82.

- [4] ABE D K, CARMEL Y, MILLER S M, et al. Experimental studies of overmoded relativistic backward-wave oscillators [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, 20(3):591-504.
- [5] GUO H Z, CARMEL Y, LOU W R, et al. A novel highly accurate synthetic technique for determination of dispersive characteristics in periodic slow wave circuits [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1992, 40(11): 2086-2093.
- [6] ALEXANDOROV A F, GALUZO S Y, KANAVETS V I, et al. Surface wave excitation by electron flow in a diaphragmatic waveguide [J]. *Sov J Tech Phys*, 1981, 51(8): 1727-1730.
- [7] WANG Jianguo, WANG Yue, ZHANG Dianhui. Truncation of open boundaries of cylindrical waveguides in 2.5 Dimensional problems by using the convolutional perfectly matched layer [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2006, 34(3): 681-690.
- [8] LEVUSH B, ANTONWEN T M, BROMBORSKY A, et al. Theory of relativistic backward-wave oscillators with end reflections [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1992, 20(3): 263-279.
- [9] VLASOV A N, NUSINOVICH G S, LEVUSH B. Effect of zero spatial harmonic in a slow electromagnetic wave on operation of relativistic backward wave oscillators [J]. *Phys Plasma*, 1997, 4(5): 1402-1412.

(编辑 刘杨)