

文章编号: 2095-4980(2013)01-0032-06

## 340 GHz 太赫兹返波振荡器

冯进军, 唐 焯, 李含雁, 刘京恺, 蔡 军, 胡银富, 邬显平

(中国电子科技集团公司 第 12 研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 介绍太赫兹返波振荡器的发展, 重点对 340 GHz 返波振荡器的设计、模拟和微细加工等研究工作进行了详细介绍。采用平行流电子枪、均匀永磁聚焦系统和折叠波导慢波结构来实现 340 GHz 返波振荡器, 计算和模拟结果表明, 当调谐电压 14 kV~16.2 kV, 工作电流 8 mA 时, 在 337 GHz~347 GHz 的频率范围内可得到 10 mW 输出功率。高频结构加工采用 UV LIGA 技术, 已经加工出高频结构样品, 并对真空环境应用做了研究, 以保证较小的表面粗糙度, 减小高频率情况下的射频损耗。

**关键词:** 太赫兹; 真空器件; 返波振荡器; 微机电系统技术; LIGA 技术

**中图分类号:** TN752

**文献标识码:** A

## 340 GHz Terahertz Backward Wave Oscillators

FENG Jin-jun, TANG Ye, LI Han-yan, LIU Jing-kai, CAI Jun, HU Yin-fu, WU Xian-ping

(The 12th Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

**Abstract:** The development of Terahertz Backward Wave Oscillator(BWO) is reviewed. The 340 GHz BWO is investigated including the design and simulation of electron gun, focusing system and slow wave structure. The folded waveguide slow wave structure, the parallel electron beam gun and the permanent magnetic system are chosen in the system, and the simulation results show that the operation frequency can be tuned from 337 GHz to 347 GHz with 8 mA beam current and the variation of operation voltage from 14 kV to 16.2 kV, and the maximum output power is 10 mW. The Slow Wave Structure(SWS) is fabricated by UV Lithographie, Galvanoformung, Abformung(LIGA), and the work on the vacuum condition is carried out to ensure the small surface roughness and reduce the transmission loss in the high frequency.

**Key words:** Terahertz; vacuum devices; Backward Wave Oscillator; Micro-Electro-Mechanical Systems; Lithographie, Galvanoformung, Abformung

太赫兹微波管是生化材料探测、隐藏金属武器检测、太赫兹雷达、通信、医疗成像、材料科学和宇宙科学等应用系统的关键器件<sup>[1]</sup>, 这些需求引起了全球范围内在大功率、小型化微波管的设计、模拟、优化、精密工艺技术、太赫兹测试技术等方面的广泛研究, 特别是利用先进的微加工技术, 如 LIGA 技术、深反应离子刻蚀技术、薄膜技术等研究场发射阴极、高频结构、输能系统等部件<sup>[2]</sup>。器件工作频率主要集中在太赫兹大气窗口, 如 94 GHz, 140 GHz, 220 GHz, 670 GHz, 850 GHz, 一直到 1 030 GHz<sup>[3-13]</sup>。美国已经启动了多个有关太赫兹真空器件和系统的研究计划, 如 HiFIVE, SWIFT 和 THz Electronics 等, 欧洲也启动了以放大器为主的 OPTHER 计划<sup>[14]</sup>。NG 公司研制的太赫兹正反馈折叠波导行波管振荡器, 采用微机电系统(MEMS)技术制作高频慢波结构(SWS), 工作频率为 670 GHz, 在 3% 的占空比下输出功率可达 80 mW<sup>[8]</sup>; 220 GHz 的行波管也获得了 30 W 的脉冲功率。俄罗斯 ISTOK 公司已研制出一组覆盖 36 GHz~1 400 GHz 的返波振荡器(BWO)<sup>[15]</sup>, 技术指标见表 1(永磁聚焦)和表 2(线包聚焦)。

CCR 公司在进行太赫兹返波振荡器的研究工作, 并受到美国国家航空航天局的资助, 目标是研究效率高、质量小、频率从 300 GHz 到 1 THz 以上的返波振荡器。对于 600 GHz~700 GHz 的返波振荡器, 带宽将达到大约 15%, 输出功率 6 mW~8 mW, 用于外差接收机的本振, 需要实现本振源的小型化、低功率、宽带。但现有的返波振荡器很重(质量超过 20 kg), 功耗大(270 W), 要求水冷, 而且输出模式的纯度较差。所以 CCR 公司研究的目标是: a) 使用先进的微细加工技术将频率提高到 1 THz; b) 使用多级降压收集极提高效率并去掉水冷; c) 改进

收稿日期: 2012-12-18; 修回日期: 2012-12-29

输出耦合,提高耦合效率和模式纯度;d)减小磁系统的质量和体积。设计和加工的慢波电路具有 1 500 个金属圆柱,柱的直径为 20 μm,高 80 μm,间距为 20 μm,给加工技术提出了很大的挑战。

随着频率的提高,高频结构和能量耦合系统的结构尺寸已经达到几十微米量级,同时为了减小传输损耗,要求结构表面粗糙度在几十到几百纳米量级,所以必须采用 MEMS 等微加工技术。

对返波振荡器这种信号源的研制,作者所在的研究组从 W 波段返波振荡器开始研究,然后将频率扩展到 220 GHz 和 340 GHz,并以简单的圆形电子注为主,开展带状电子注电子光学系统的理论和实验研究。本文主要研究 340 GHz 返波振荡器,开展了设计、模拟、微细加工制造等方面的研究工作,进行了相关技术分析,并利用 UV LIGA 技术加工出了折叠波导高频结构,对适用于真空微波电子器件的特性进行了研究。

### 1 设计研究

返波振荡器是微波电真空器件的一种,它利用慢波结构上的返波与电子注相互作用而产生微波振荡。理论研究指出返波振荡器中的慢波是负色散波,即波的群速和相速方向相反,并且是异常色散的波,随着频率的增加,波的相速也增加,正是利用返波的这些特性,可以实现在较宽频率范围内的振荡。

折叠波导慢波结构见图 1,由于其全金属结构,色散特性好,高频损耗小,耦合匹配好,与微细加工技术兼容等特点被选作高频慢波结构。设计结构尺寸时,考虑工作频段需要与下截止频率有一段距离,暂定下截止频率为 300 GHz,于是得到折叠波导的宽边尺寸为 0.5 mm;根据工作电压,确定系统的相光速比,进而定出了折叠波导的周期及直段长度;由系统所需的输出功率,初步确定系统的耦合阻抗,进而确定折叠波导的窄边尺寸;最后由系统的工作电流及电流密度确定电子注通道半径。最终,初步设计了折叠波导慢波结构的尺寸,宽边  $a=0.5$  mm,窄边  $b=0.1$  mm,直段  $h=0.3$  mm,周期  $p=0.24$  mm,半径  $r_c=0.1$  mm。

对上述折叠波导高频慢波结构的尺寸进行了冷特性与高频相互作用模拟研究,并与理论计算结果进行对比。理论计算时,利用  $m$  次空间谐波的色散关系,见式(1)。由于采用 1 次返波与电子注互作用,因此本文中  $m=1$ 。

$$\omega^2 = \omega_c^2 + c^2 \left( \frac{p}{\frac{\pi p}{2} + h} \right)^2 \left( \beta_m - \frac{(2m+1)\pi}{p} \right)^2 \quad (1)$$

式中:  $\omega$  为角频率;  $\omega_c$  为截止角频率;  $c$  为光速;  $p$  为折叠波导的周期;  $h$  为折叠波导的直波导长度;  $m$  为空间谐波的次数;  $\beta_m$  为  $m$  次空间谐波的相位常数。

对冷特性的模拟是在微波工作室中进行的,计算高频结构一个周期不同相移量所对应的频率,求出色散曲线,

表 1 ISTOK 公司永磁聚焦的返波管

Table1 Specifications of ISTOK BWO with permanent magnet system

BWO type	f/GHz	power/mW	U/V	beam current/mA	diameter/mm	length/mm	mass/kg
OB-69	36-55	15-40	400-1 200	20-25	76	64	1
OB-70	52-79	12-30	400-1 200	20-25	76	64	1
OB-71	78-119	6-30	500-1 500	20-25	76	64	1
OB-86	118-178	6-20	500-1 500	20-25	76	64	1
OB-24	177-260	6-15	700-1 900	15-22	82	84	1

表 2 ISTOK 公司线包聚焦的返波管

Table2 Specifications of ISTOK BWO with solenoid magnet system

BWO type	f/GHz	power/mW	U/V	beam current/mA	magnetic field/T	cooling	mass/g
OB-30	258-375	1.0-10.0	1.0-4.0	25-40	0.7	liquid	300
OB-32	370-535	1.0-5.0	1.0-4.5	25-40	0.9	liquid	300
OB-80	530-714	1.0-5.0	1.5-6.0	30-45	1.0	liquid	300
OB-81	690-850	1.0-5.0	1.5-6.0	30-45	1.0	liquid	300
OB-82	790-970	0.5-5.0	1.5-6.0	30-45	1.1	liquid	300
OB-83	900-1 100	0.5-3.0	1.5-6.0	30-45	1.1	liquid	300
OB-84	1 070-1 200	0.5-2.0	1.5-6.0	30-45	1.1	liquid	300
OB-85	1 170-1 400	0.5-2.0	1.5-6.0	30-45	1.1	liquid	300

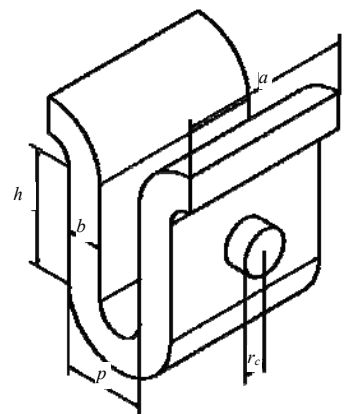


Fig.1 Schematic dimensions diagram of 340 GHz folded waveguide SWS with pencil beam tunnel  
图 1 340 GHz 圆形电子注折叠波导结构尺寸示意图

见图 2。图 2(a)为高频慢波结构的基波和 1 次空间谐波的布里渊曲线，为了减小工作电压，该返波振荡器采用 1 次返波与电子注相互作用。-1 次和 -2 次前向波是行波管工作的方式，满足正色散特性，而零次和 1 次返波是返波振荡器工作的方式，满足负色散特性。图 2(b)中纵坐标

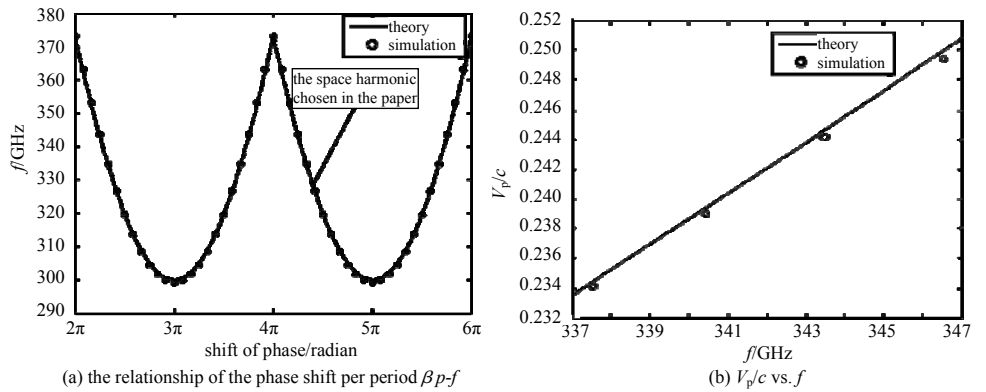


Fig.2 Dispersion properties of high frequency structure  
图 2 高频结构的色散特性

$V_p$  是相速，返波振荡器不同于行波管，由于波的相速和群速是反向的，在较宽的频带范围内都具有较强的色散特性，从而实现了较宽的调谐范围。

在粒子工作室下建立上述模型，输入相应电压、磁场和工作电流等设置，即可对相互作用进行模拟。以工作电压 15 kV 为例，模拟得到的输出信号见图 3(a)，对输出信号进行傅里叶分析，即可得到该工作电压下的振荡频率，见图 3(b)。

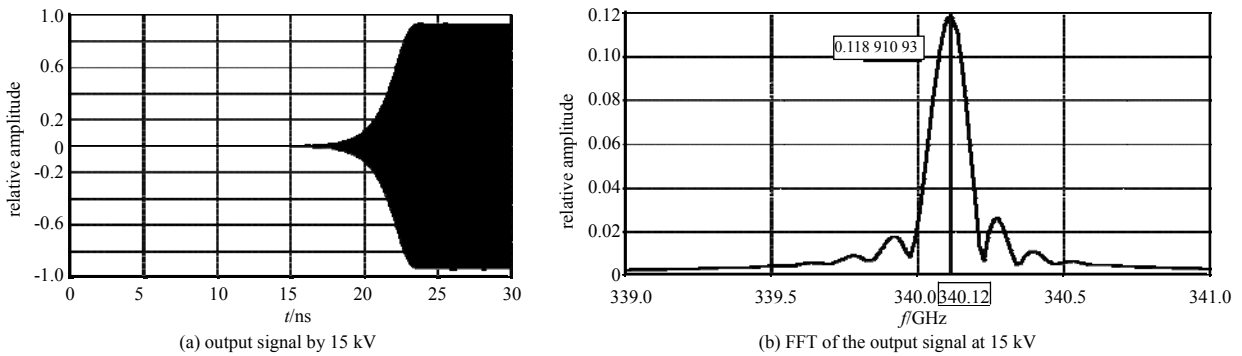


Fig.3 Starting process of backward wave oscillation and the spectrum purity of output signal  
图 3 返波振荡的起振过程和输出信号频谱纯度

从图 3(a)可看出，在 15 kV 下系统得到稳定的振荡，表明该结构在该工作电压及电流下可以起振。对输出信号进行傅里叶分析，分析结果表明振荡的频率点为 340.12 GHz。对不同的工作电压分别进行模拟，并将傅里叶分析得到的起振点列表。理论计算调谐电压时，考虑电子注与波完全同步，利用式(2)即可得到系统的工作电压曲线，将该表放入理论计算得到的电调谐特性曲线中，即可进行理论计算与模拟计算结果的对比，见图 4。

$$\frac{1}{2}mv^2 = qU \quad (2)$$

式中： $v$  为电子速度； $q$  为电子电荷； $U$  为加速电压。

由图 4 可以看出，理论计算结果与模拟计算结果基本吻合，模拟出的起振频率点总体较理论计算结果偏低，这是由于理论计算中忽略了速度参量。实际为了使电子注与波良好地交换能量，要求电子注的速度略大于波的速度。由于返波振荡器对于不同的工作频率是有其相应的工作电压的，慢波系统根据电子的速度来激励起对应频率的波，从而建立起振荡，因此只要将系统工作电压范围确定，保证使系统起振的工作电压在该范围内即可。

电子光学系统作为返波振荡器的核心部分，本文也对其进行了设计、模拟及研制工作。为了有效地保证电子注与电磁波的相互作用，返波振荡器需要采用均匀永磁聚焦系统，并将电子

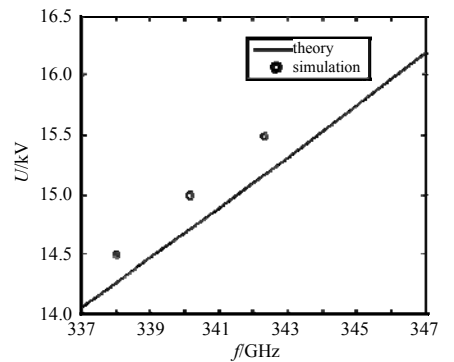


Fig.4 Characteristic of tuning by theory and simulation  
图 4 理论计算与模拟计算下的电调谐特性曲线

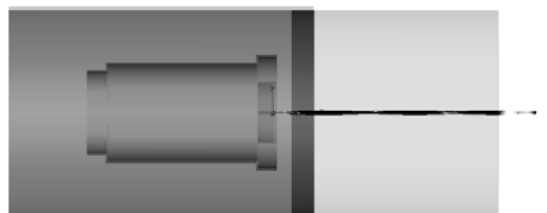


Fig.5 Solid module and beam trajectory in electron gun  
图 5 电子枪实体模型和电子注轨迹

枪和 高频系统完全浸没到同一聚焦磁场中。同时由于采用了均匀磁场,为了使电子注脉动最小,采用平面阴极有利于实现良好的电子流通。平面阴极的优点在于,如果将其和 高频结构一同浸没在均匀聚焦场,可以保证电子注横截面尺寸没有波动或波动最小,从而保证了电子注与高频场的互作用效率。

在 CST 软件下建立电子枪模型,设置均匀磁感应强度 0.58 T,模拟结果见图 5。从图 5 看出,电子注通过了聚焦极和管体,且脉动很小,实现了良好的流通。模拟结果显示计算得到的工作电流 7.98 mA,满足系统要求。

系统所需磁场现已制作完毕,见图 6,并测试其磁感应强度,测试结果见图 7。测试结果显示,该系统可在 80 mm 长的工作区域内,保持磁感应强度在 0.58 T 左右,且波动小于 1.5%。但是由于磁感应强度很强,工作区域很长,因此该磁系统的体积较大,质量较大。



Fig.6 Picture of the permanent magnet for BWO  
图 6 返波振荡器用磁系统照片

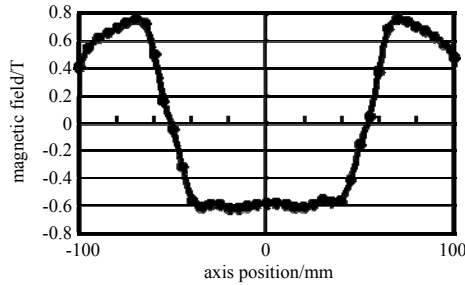


Fig.7 Measured magnetic field of the permanent magnet focus system  
图 7 永磁聚焦系统磁场的测试结果

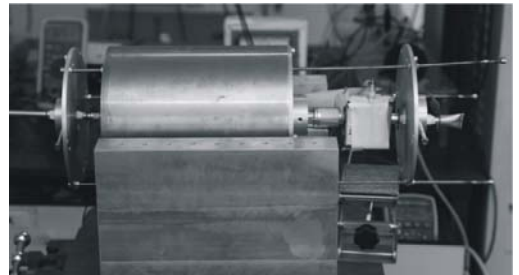


Fig.8 Assembled BWO for the beam transmission test  
图 8 用来测试流通率的返波振荡器样管

按照上述设计,制作了流通样管,建立了测试系统,流通率正在测试中,见图 8。输能窗作为该系统的另一核心部件,对其进行了设计及模拟研究。由于在 340 GHz 频段,要求输能窗具有较低的介电常数及微波损耗,故采用了金刚石作为系统的输能窗,并对其进行了设计及模拟研究。模拟时设置金刚石的介电常数为 5.6,在这里需要指出的是,5.6 是金刚石在低频段工作时测得的介电常数,当其工作在 340 GHz 频段时,其介电常数还需进一步测试,但现有的测试手段无法在该频段确定其介电常数,因此只能暂时借鉴该材料在低频段的介电常数。

输能窗采用盒型窗结构,适当调整窗片及圆波导尺寸,可在 325 GHz~345 GHz 的频带范围内得到良好的匹配,反射系数小于 0.05,图 9 为模拟得到的反射系数( $S_{11}$ )结果。目前,正在进行窗片的金属化工艺,金属化完成后可以进行窗片的封接和测试。

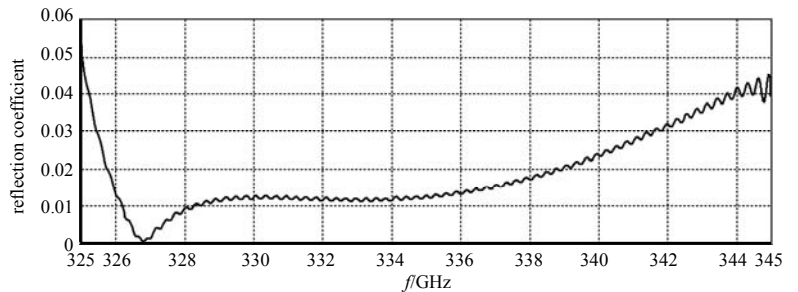


Fig.9  $S_{11}$  parameters from the simulation results  
图 9 模拟得到的  $S_{11}$  参数

## 2 慢波结构加工的实验研究

340 GHz 折叠波导结构最小尺寸为 100  $\mu\text{m}$ ,以铜为材料时器件表面趋肤深度为  $\delta = 0.66/\sqrt{f} = 0.113 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,这对加工的尺寸精确度和表面粗糙度提出了更高要求,传统的加工工艺已经不能满足要求了。为此本课题组采用微细加工中的 UV LIGA 技术制作系统所需的折叠波导高频慢波结构。UV LIGA 技术是利用常规光刻机上的深紫外光对厚胶(通常为 SU-8 胶)进行光刻,形成电铸模,结合电镀获得金属微结构。基于 SU-8 胶的 UV-LIGA 光刻工艺需要经过以下几步:基片预处理、涂胶、软烘(前烘)、曝光、后烘、显影、电铸、去胶。进行实验的样品基底均为双抛铜片,铜片经过 2 次 UV LIGA 工艺和电铸可形成折叠波导慢波结构的半腔,2 个半腔经键合形成完整的折叠波导。

曝光是 SU-8 胶光刻工艺中的关键。图 10 和图 11 分别为过曝光 and 正常曝光时形成的光刻胶模。过量曝光会导致胶模图形顶部过曝光,产生梯形结构,即上宽下窄,



Fig.10 Image of resist molds patterned by over-exposure dose  
图 10 过曝光量时形成的光刻胶模



Fig.11 Image of resist molds patterned by optimal exposure dose  
图 11 正常曝光时形成的光刻胶模

见图 10, 设计时图形尺寸为  $100\ \mu\text{m}$ , 过曝光图形顶部图形尺寸为  $110\ \mu\text{m}$ , 这是因为过曝光使得线条周围未光照的部分光刻胶分子发生了交联反应, 使得顶部图形变宽; 当紫外光进入吸收介质内部后, 光强随着进入的深度而衰减, 从而底部的线条变窄。胶模倾角使得电铸的金属结构具有倾角, 电铸后倾角还会增大去胶的难度。正常曝光时, 折叠波导 SU-8 胶模的侧壁垂直度为  $90^\circ$ , 宽度的尺寸精确度为  $\pm 3\ \mu\text{m}$ 。

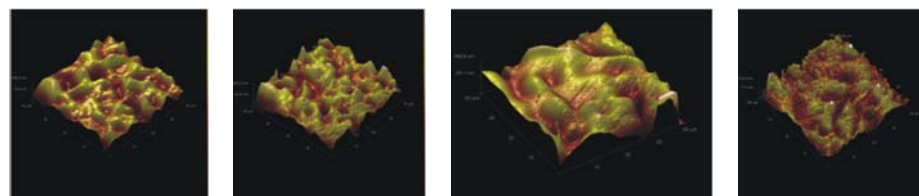
光刻完成后采用直流电源进行电铸, 电铸层要求晶粒细小且致密, 电铸铜的含氧量应接近无氧铜的含氧量, 如果含氧量太高, 在后续的工艺中如退火、真空焊接, 电铸层表面容易起泡, 从而引起结构的毁坏。采用熔盐去除 SU-8 胶, 去离子水冲洗, 压缩吹干, 样品经切割后见图 12(a)。切割后的样品在氢炉中退火, 目的在于去除表面的氧化物和残留物, 并钝化样品表面毛刺, 以此改善表面粗糙度。分 4 组在不同条件下对样品进行退火, 退火后采用原子力显微镜观察样品侧壁表面的粗糙度, 见图 13, 样品侧壁表面的粗糙度  $R_a$  分别为  $79.6\ \text{nm}$ ,  $64.7\ \text{nm}$ ,  $44.9\ \text{nm}$  及  $87.2\ \text{nm}$ 。另外在退火后发现电铸层表面有气泡现象, 见图 13(b)。



(a) before annealing in pure hydrogen (b) after annealing in pure hydrogen

Fig.12 SEM image of completed metal structures after cutting

图 12 切割后的金属结构样品



(a)  $R_a=79.6\ \text{nm}$  (b)  $R_a=64.7\ \text{nm}$  (c)  $R_a=44.9\ \text{nm}$  (d)  $R_a=87.2\ \text{nm}$

Fig.13 Roughness of sidewall surface of four samples after annealing in different conditions

图 13 在不同条件下退火的 4 种样品的表面侧壁粗糙度

采用共聚焦显微镜观察样品的侧壁垂直度, 结果见图 14, 约为  $90^\circ$ 。在高频结构加工方面, 需要对电铸铜工艺进行进一步的深入研究, 以解决退火中起泡以及能在真空中应用的其他问题, 使得 UV LIGA 工艺形成的器件能够真正应用到电真空器件领域中。

### 3 结论

本文介绍正在研制的  $340\ \text{GHz}$  频段返波振荡器的进展情况, 通过理论及模拟研究给出系统的冷特性, 通过模拟研究确定系统振荡的频率点并绘制了电调谐特性曲线图, 计算和模拟结果表明, 当调谐电压  $14\ \text{kV}\sim 16.2\ \text{kV}$ , 工作电流  $8\ \text{mA}$  时, 在  $337\ \text{GHz}\sim 347\ \text{GHz}$  的频率范围内可以得到  $10\ \text{mW}$  输出功率, 输能窗的制作正在进行中。对设计出的高频慢波结构采用微细加工的方法进行加工, 通过工艺摸索已经初步制作出折叠波导的半腔结构。

#### 参考文献:

- [1] Sherwin M S, Schmutternmaer C A, Bucksbaum P H. Opportunities in THz Science[EB/OL]. (2004-12-14)[2012-12-01]. <http://www.jlab.org/FEL/LPC/04lpc-austin.pdf>.
- [2] FENG Jinjun, REN Dapeng, LI Hanyan, et al. Study of High Frequency Folded Waveguide BWO with MEMS Technology[J]. Terahertz Science and Technology, 2011, 4(4):164-180.
- [3] Dayton James A, Kory Carol L, Mearini Gerald T, et al. Applying Microfabrication to helical Vacuum Electron Devices for THz Applications[C]// Proceeding of 2009 International Conference on Vacuum Electronics. Rome:IEEE, 2009:41-49.
- [4] Shin Y M, Barnett L R, Luhmann Jr N C. Experimental Numerical and Analysis Studies of the staggered Double Vane Structure for THz Application[C]// Proceeding of 2009 International Conference on Vacuum Electronics. Rome:IEEE, 2009:106-107.
- [5] Srivastava A, So J K, Sattolov M, et al.  $100\ \text{GHz}$  LIGA-fabricated coupled cavity device[C]// Proceeding of 2009 International Conference on Vacuum Electronics. Rome:IEEE, 2009:102-103.

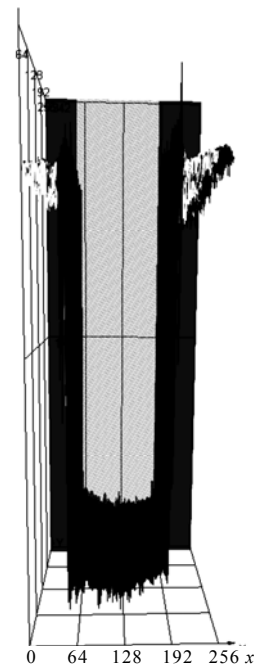


Fig.14 Perspective view of the high frequency structure by the co-focusing microscopy

图 14 采用共聚焦显微镜观察到的高频结构三维图形

- [ 6 ] Mineo M,Paoloni C. Design study of corrugated waveguide slow wave structure for THz amplification[C]// Proceeding of 2009 International Conference on Vacuum Electronics. Rome:IEEE, 2009:104–105.
- [ 7 ] Tucek J,Basten M,Gallagher D,et al. 220 GHz Folded Waveguide Circuits for High Power Amplifiers[C]// Proceeding of 2009 International Conference on Vacuum Electronics. Rome:IEEE, 2009:108–109.
- [ 8 ] Tucek J,Gallagher D,Kreischer K,et al. A Compact,High Power,0.65 THz Source[C]// Proceeding of 2008 International Conference on Vacuum Electronics. Monterey,CA:IEEE, 2008:16–17.
- [ 9 ] Sengelene Sean,Jiang Hongrui,Booske John H,et al. A Selective Metallized,Microfabricated W-band Meander Line TWT Circuit[C]// Proceeding of 2008 International Conference on Vacuum Electronics. Monterey,CA:IEEE, 2008:18–19.
- [10] Lukin Konstantin A,Khutoryan Eduard M,Park Gun-Sik. Superradiant Smith-Purcell Radiation in BWO/DRO Device[C]// Proceeding of 2008 International Conference on Vacuum Electronics. Monterey,CA:IEEE, 2008:388–389.
- [11] Borsuk Gerald M,Levush Baruch. Vacuum Electronics Research perspective at the Naval Research Laboratory[C]// Proceeding of 2010 International Conference on Vacuum Electronics. Monterey,California,USA:IEEE, 2010:3–4.
- [12] CHEN Zhang, WANG Yajun. Design For 0.14 THz Watt Level Folded Waveguide Traveling Wave Tube[C]// Proceeding of International Vacuum Electronics and Vacuum Electron Sources Conference 2012, Monterey,CA:[s.n.], 2012:391–392.
- [13] WANG Yajun,CHEN Zhang. The Analytical Design of a Folded Waveguide Slow-wave Structure for THz TWT[C]// Proceeding of International Vacuum Electronics and Vacuum Electron Sources Conference 2012, Monterey,CA:[s.n.], 2012:395–396.
- [14] 冯进军. 集成真空电子学[J]. 真空电子技术, 2010(2):1–7. (FENG Jinjun. Integration Microwave Vacuum Electronics[J]. Vacuum Electronics, 2010(2):1–7.)
- [15] Korolev Alexander N,Zakurdayev Anatoli D,Golenitskij I I,et al. Traditional and Novel Vacuum Electron Devices[J]. Proceeding of IEEE Transactions on Electron Devices, 2001,48(12):2929–2937.

#### 作者简介:



**冯进军**(1966–), 男, 山西省运城市人, 研究员, 博士生导师, 1988 年毕业于清华大学电子物理与激光专业, 2001 年获北京真空电子技术研究所物理电子学专业博士学位, 现为 IEEE EDS 真空电子学技术委员会委员, IEEE Beijing Section 副主席, IEEE EDS Beijing Chapter 主席, 中电 12 所副总工程师, 国防科技重点实验室副主任, 主要从事真空电子学、微波电子学、等离子体电子学、MEMS 技术、太赫兹真空电子学、高频集成真空电子学等领域的研究工作, 研究的器件包括毫米波空间行波管、W 波段行波管、高功率回旋器件、太赫兹真空器件、铯束管等。在国内首先研制出效率超过 50% 的毫米波空间行波管, 研制出国内第 1 个 W 波段 10 W 连续波行波管和国内第 1 个 W 波段 100 W 脉冲行波管。在国内外学术会议和期刊发表论文 150 余篇。email:fengjj@ieee.org.

**胡银富**(1982–), 男, 安徽省旌德县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事短毫米波、太赫兹电真空器件以及集成行波管的相关研制。

**唐 焯**(1983–), 女, 长春市人, 硕士, 工程师, 主要从事短毫米波行波管以及太赫兹返波振荡器的研制。

**李含雁**(1976–), 女, 浙江省嵊州市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事微细加工工作, 利用 MEMS 技术制作太赫兹真空器件高频结构。

**刘京恺**(1987–), 男, 长沙市人, 助理工程师, 主要从事折叠波导行波管和返波振荡器的研究。

**蔡 军**(1978–), 男, 河北省唐山市人, 博士, 高级工程师, 主要从事 W 波段行波管和太赫兹真空电子器件的研究。

**邬显平**(1940–), 男, 浙江省奉化市人, 研究员, 博士生导师, 获国防科技进步二等奖 1 项和部级科技进步二等奖多项, 现为中国电子学会会士, IEEE 高级会员, 主要从事微波毫米波电子学、微波测量技术、微波混沌和强流电子光学, 在国内外学术会议和期刊上发表论文 30 余篇。