文章编号：2095-4980(2015)01-0080-06

Ku 波段低磁场返波管振荡器的模拟与实验

邵剑波[1,2]，谢鸿全[1]，李正红[2]，马乔生[2]，吴　洋[2]

(1.西南科技大学 理学院，四川 绵阳 621010；2.中国工程物理研究院 高功率微波技术重点实验室，四川 绵阳 621999)

摘　要：为了实现高功率微波(HPM)系统小型化，结合传统低磁场相对论返波管振荡器(RBWO)的设计理论，设计一个 Ku 波段较低磁场的相对论返波振荡器。分析束压、束流、引导磁场等对输出微波的影响，并采用粒子模拟软件(PIC)优化结构。当轴向引导磁场为 0.4 T，电子束束压和束流分别为 600 kV 和 7 kA 时，得到频率为 13.08 GHz，功率为 1.0 GW 的微波输出。在强流电子束加速器平台上开展实验验证模拟结果：外加磁场 0.4 T 时，得到平均功率为 850 MW、频率 13.05 GHz、脉宽 24 ns 的微波输出。该实验结果为实现较低磁场 GW 级微波输出打下了良好的基础。

关键词：相对论返波管；Ku 波段；低引导磁场

中图分类号：TN125　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA201501.0080

Simulation and experiment of Ku-band backward wave oscillator with low magnetic field

SHAO Jianbo[1,2]，XIE Hongquan[1]，LI Zhenghong[2]，MA Qiaosheng[2]，WU Yang[2]

(1.College of Science，Southwest University of Science and Technology，Mianyang Sichuan 621010，China；2.Science and Technology on High Power Microwave Laboratory，China Academy of Engineering Physics，Mianyang Sichuan 621999，China)

Abstract：A Ku-band backward wave oscillator with low magnetic field is designed in order to realize the High Power Microwave(HPM) system miniaturization, according to the basic theory of traditional Relativistic Backward-Wave Oscillator(RBWO) with low magnetic field. The effects of beam voltage, beam current and the guiding magnetic field on the output power are analyzed. The structure is optimized by using particle simulation(PIC). A microwaves output power of 1.0 GW with the frequency of 13.1 GHz is obtained under the guiding magnetic field of 0.4 T, the diode voltage of 600 kV and the beam current of 7 kA. The preliminary experiment is performed at low magnetic field condition. Under a guiding magnetic field of 0.4 T, the microwave power of 850 MW with 13.05 GHz frequency and 24 ns pulse width is obtained. The experiment has laid a good foundation to realize the GW microwave output with lower magnetic field.

Key words：Relativistic Backward Wave Oscillator；Ku-band；low guiding magnetic field

近年来，相对论返波管振荡器(RBWO)由于具有高功率、高效率、结构简单等特点得到了广泛的研究并取得了巨大的进步，输出功率已达到 10 GW，效率达到 50%以上，但是其要求的磁场也超过 2 T[1]。提供外加磁场通常有 2 种方式：一是用超导磁体产生，但是超导磁体技术复杂，成本高，并且设计好的超导磁体磁场分布固定，这给 HPM 源实验研究带来不便；二是采用电容器对励磁线圈放电产生脉冲磁场，但是线圈产生磁场与电容器充电成正比关系，需要的磁场越强，则励磁电源越大[2]。庞大的励磁系统严重影响了 HPM 系统的总体效率，制约了其向小型化和重复频率运行方向的发展，为了提高相对论返波管振荡器微波源的总体效率，设法从器件设计上研制低磁场相对论返波管振荡器，使得其向小型化发展。Ku 波段的相对论返波管相比 C,X 波段频率更高，带宽更宽，更容易应用于现代通信，因而对 Ku 波段的研究具有重要的应用价值。1998 年 Gunin 报道了在 0.7 T 的稳衡磁场下得到了频率为 10 GHz、功率为 0.5 GW、脉宽为 10 ns 的微波输出[3]；2001 年第 21 试验训练基地研究所的范菊平等报道了在 0.7 T 的磁场下，得到了频率 8.874 GHz、功率 750 MW、效率约 15%的微波输出[4]；2006 年国防科技大学张军等在约 0.7 T 的引导磁场下实现了约 1.2 GW 的 X 波段微波输出；2008 年中国工程物理研究

收稿日期：2014-05-19；**修回日期：**2014-08-20
基金项目：国家自然科学基金资助项目(61271109)

院的马国武在引导磁场 1.2 T 条件下，模拟得到 2.27 GW,17.5 GHz 的微波输出；2010 年国防科技大学李川等在 0.7 T 磁场下模拟实现了功率 1.1 GW、束波转换效率 29%的 Ku 波段微波输出；2013 年中国工程物理研究院马乔生在 0.6 T 磁场下模拟得到了功率 1.85 GW、效率 30%的 X 波段微波输出[5]。关于 Ku 波段的研究报道在整个微波波段中所占比例很小，引导磁场也在 0.7 T 以上，因而设计出更低磁场相对论返波管振荡器成为当前发展的重要方向。

本文利用 2.5 维全电磁粒子模拟程序模拟优化一个 Ku 波段低引导磁场相对论返波管振荡器，分析了电子束束压、束流与引导磁场对输出微波的影响[6]。在引导磁感应强度为 0.4 T，电子束束压和束流分别为 600 kV 和 7 kA 时，得到频率为 13.08 GHz，输出功率为 1.0 GW 的微波输出。开展实验得到，外加磁场 0.4 T 时，得到平均功率为 850 MW，频率 13.05 GHz，脉宽 24 ns 的微波输出。

1　模型的建立与分析

基于粒子模拟与优化结构设计出低引导磁场相对论返波管振荡器如图 1。该器件采用带谐振反射腔、分段慢波结构的返波管振荡器[7]。相对论返波管被外部的引导磁场包围，在返波管的结构中，电子束与慢波结构中 TM01 模的−1 次空间谐波满足同步条件。慢波结构前的谐振腔对工作模式的电磁波具有较高的反射系数，而对其他模式的电磁波反射系数较低，从图 2 可以看出，反射腔在频率 13.08 GHz 处 S_{21} 有最小值，S_{21}=0.013，反射效率接近 100%，有利于工作模式 Q 值的提高。同时它可以对微波进行发射和对电子束进行预调制，这就使其更易于起振，以便相对论返波管可以在较低磁场下运行。图 3 为无谐振腔和有谐振腔时的磁场分布，从图中可以看出，在谐振腔附近加上谐振腔的磁感应强度低于 0.38 T，而没有谐振腔的磁感应强度则有 0.396 T。因此，带有谐振腔的 RBWO 为器件在低磁场下运行提供了有利条件。

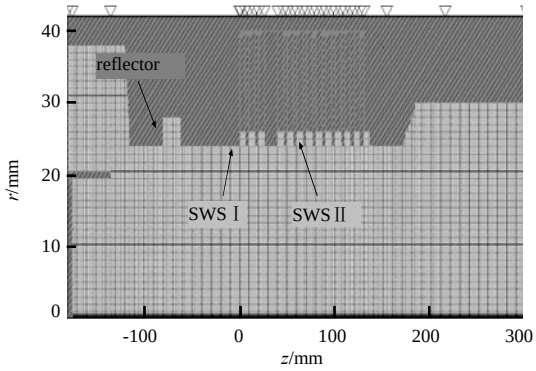


Fig.1 Geometric model of RBWO
图 1 相对论返波管结构示意图

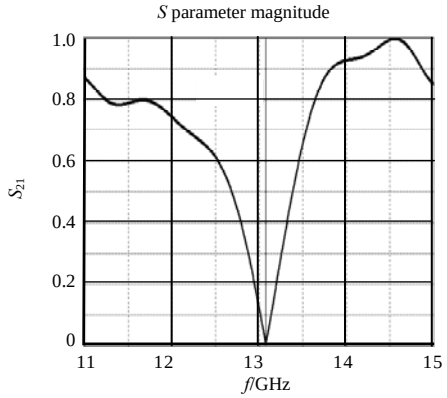
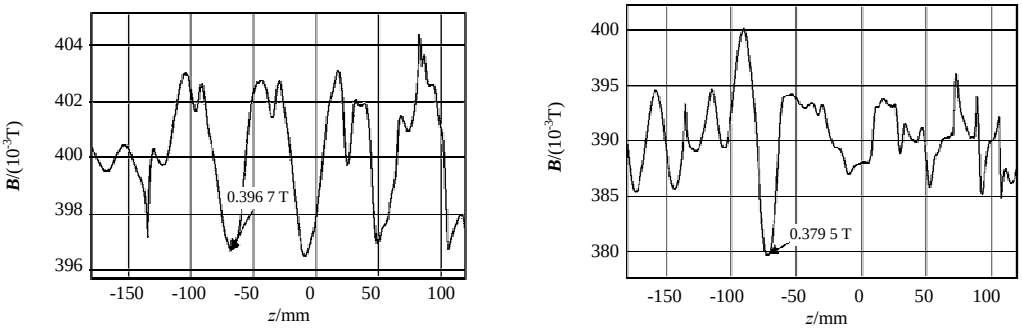


Fig.2 S_{21} curve
图 2 S_{21} 曲线



(a) magnetic field distribution of no cavity　　(b) magnetic field distribution of the cavity

Fig.3 Distribution of magnetic field
图 3 磁感应分布

慢波结构是相对论返波振荡器的核心结构，该慢波结构采用了分段慢波结构，使电子束与慢波区充分作用。第 1 段慢波结构的主要作用是对电子束进行速度调制；通过漂移段电子束进行密度调制；在第 2 段慢波结构，

电子束与慢波区的高频场充分作用，实现换能[8]。取器件慢波结构参数为：平均半径 r_0=25 mm，波纹深度 r_1=2 mm，轴向周期 Z_0=10 mm。该结构的色散特性如图 4 所示。由图可知，器件工作点对应的工作频率为 13.1 GHz。另外，器件设计过程中采用过模结构来增大器件的功率容量。由于传输同样大小的束流时，过模器件中电子束的空间电荷效应比单模器件弱，因此在一定程度上为过模器件工作在低引导磁场下创造了有利条件。

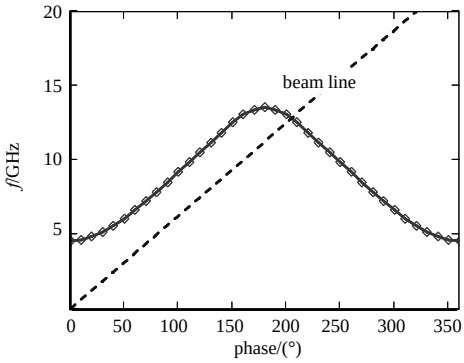


Fig 4 Dispersion curve
图 4 色散曲线

电子束在 RBWO 中的传输需要一个轴向引导磁场来对它进行引导，并且该引导磁场存在一个极小值。对于束半径为 r，束厚度为 Δ 的环形电子束，其临界磁场为[9]：

$$\boldsymbol{B}_0 \geqslant \left(\frac{2\rho m}{\varepsilon_0 \gamma_0}\right)^{1/2} \tag{1}$$

式中：$\rho = \dfrac{I}{ev2\pi\Delta r}$ 为电子束密度；γ_0 为束相对论因子。由上式可知，从对电子束约束角度来说，电子束密度越小，纵向的速度就越大，则越有利于 RBWO 的低磁场运行。同时，该器件采用过模结构，因而阴极半径较大，相同的束流和电子束厚度条件下，电子束密度较小，这对器件引导磁感应强度的要求降低[10]。为了电子束能够在器件内传输，取电子束束压和束流分别为 600 kV,7 kA，阴极半径和厚度分别为 20 mm 和 1 mm，根据式(1)可知 $\boldsymbol{B}\geqslant 0.234$ T，本文取磁感应强度 0.4 T 时可以约束以上参数的电子束流，从而保证电子束能顺利传输通过器件，并且该器件中电子束外半径距离慢波结构最小距离为 4 mm，该半径大于电子的回旋半径，因而保证电子束正常传输情况下不会打到慢波结构的内壁上，而且有利于器件的长脉冲运行。

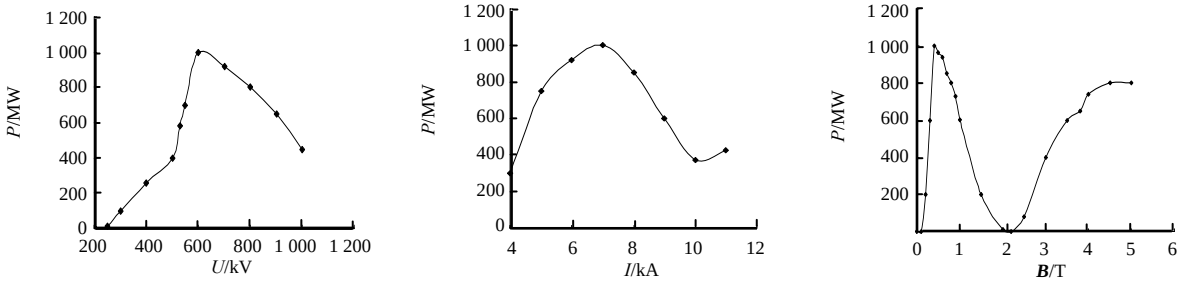
通过以上分析可得，该器件能够在较低磁感应强度 $\boldsymbol{B}=0.4$ T 下工作，下面就利用粒子模拟对 RBWO 进行模拟分析。

2 粒子模拟结果及分析

对构造好的相对论返波振荡器进行 PIC 粒子模拟，保持其他参数不变的情况下，改变如下参数，例如束压、束流和引导磁场。通过对其分析，找到器件的最佳工作束压、束流和引导磁场。

2.1 束压对输出微波的影响

束压对微波的输出是一个非常重要的参数。当引导磁场为 0.4 T，束流为 7 kA 时，模拟得到的输出微波与电子束能量之间的关系如图 5(a)所示。



(a) relationship between the output power and the electron beam energy

(b) relationship between the output power and the beam current

(c) relationship between the output power and the guiding magnetic field

Fig.5 Impact parameters of the output power
图 5 影响输出功率参数

为保证器件得到最大的微波输出，电子束束压必须选在束波同步的范围内。见图 5(a)，太高或太低的电子束束压都可能导致电子束与空间谐波的作用不充分，从而降低输出微波的功率。因此选取电子束束压为 600 kV。

2.2 束流对输出微波的影响

束流对微波的输出也非常重要。对于给定的引导磁场和电子束束压，总有一个特定的束流值对应着最大的微

波输出。

如图 5(b)所示，随着束流的增加，输出微波表现为拱形曲线。首先，随着束流的增加，束波互作用增强，微波输出呈增长趋势；其次，随着电子的回流导致电子束的过度调制，微波输出呈下降趋势。

2.3 引导磁场对微波输出的影响

在相对论返波管振荡器中，必须使用引导磁场对电子束进行约束和引导，使其能够穿过慢波结构，因此引导磁场对微波输出至关重要。

如图 5(c)所示，磁场对微波输出的关系曲线分为低磁场区域和高磁场区域[11]。在低磁场区域，首先随着磁感应强度的增大，电子束受到的约束变强，导致其拉摩半径变小，电子束趋于相同的半径，保证了电子束与慢波结构结构波的相干性，因此输出微波增大。其次，由于回旋共振吸收导致输出微波减小。在高磁场区域，由于很强的磁感应强度，对电子束的约束很强，保持了电子束与慢波结构的相互作用，因而微波输出在增大到一定趋势后就保持不变。为了实现 RBWO 的低磁场运行，选择能够实现较大微波输出的低磁场区域，因此 $\boldsymbol{B}=0.4$ T 。

2.4 模拟结果

图 6 是模拟得到器件中电子群聚的实空间图和相空间分布图。从图中可以看出，在谐振腔，电子群聚不明显，此时电子处于速度调制阶段；经过漂移区时，电子群聚现象逐渐加强，此时电子处于密度调制阶段。因而在该区与高频场发生有效的互作用，并把能量传给高频场。

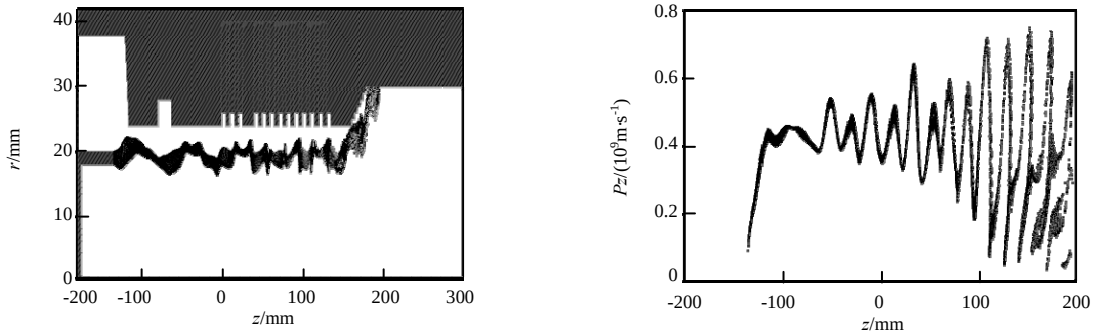
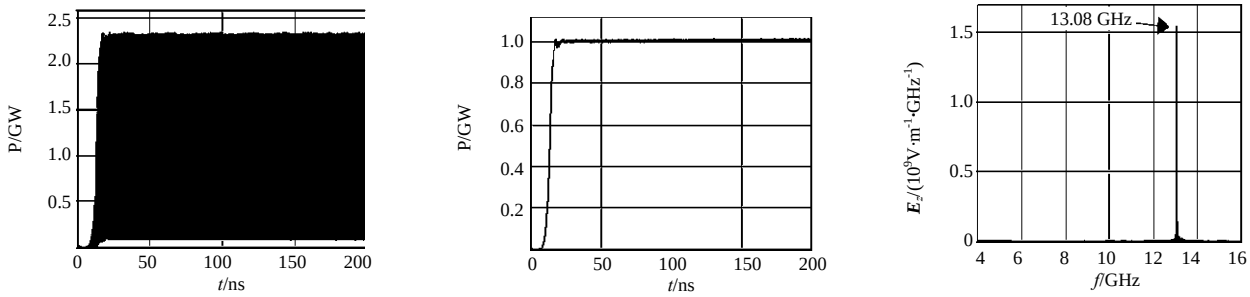


Fig 6 Real space of all particles and phase space of all particles
图 6 电子实空间分布图和电子相空间分布图



(a) output peak power　(b) envelope waveform of microwave power　(c) spectrum of output power

Fig.7 Simulated results
图 7 模拟结果

粒子模拟结果表明：在电子束束压为 600 kV，电流为 7 kA，引导磁场为 0.4 T 时，返波管振荡器具有较高的微波输出。如图 7(a)~7(b)所示，该相对论返波振荡器的起振时间约为 7 ns，得到的微波输出功率为 1.0 GW。图 7(c)为输出口的功率频谱图，从图中可以看出输出微波的频率比较单一，为 13.08 GHz，与理论值相似。

3　实验结果分析

为验证模拟结果，本文采用强流电子加速器产生 580 kV,6.5 kA 的环行强流相对论电子束，对相对论返波管器件进行实验研究。

实验时使用的引导磁场是由电容器组对一个脉冲螺线管作用产生，由于该电容器组要求的储能很高，因而会严重影响加速器的重复运行。需要的磁感应强度越大，励磁电源体积也就越大，考虑到散热、实验操作等一系列问题，这将会妨碍 RBWO 功率与效率的提高。表 1 为产生一定大小磁感应强度与需要消耗的能量之间的关系，从表中可以看出，磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 与耗能 P 之间的关系为平方关系，即 $\boldsymbol{B}\sim P^2$。为了提高相对论返波管振荡器总体效率，器件工作在较低的磁感应强度下。

对螺线管磁体参数进行测量以确保能提供需要的磁感应强度。首先，在螺线管磁体上加载一个恒定的小电流来测定线圈轴线上的轴向磁场位形(见图 8)。然后，在加载高压情况下，使用特斯拉计测定了不同充电电压与磁感应强度之间的关系(见图 9)。

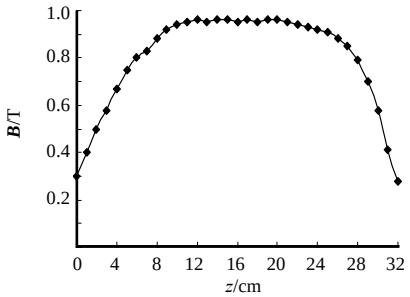


Fig.8 Configuration of magnetic field distribution
图 8 磁感应强度位形分布

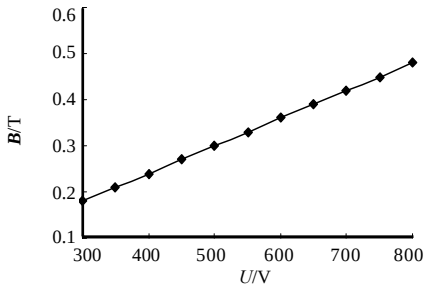


Fig.9 Relationship between the charging voltage and the magnetic field
图 9 电容器充电电压与磁感应强度关系

微波频率采用混频法进行测量，由开口波导接收的微波经过电缆和衰减器的衰减，在混频器中与微波信号发生器产生的本征信号混频，产生中频信号，通过测量中频信号的频率，就可得到微波频率。得到频率为 13.05 GHz，与粒子模拟结果 13.1 GHz 吻合较好，如表 1 所示。

表 1 微波器件输出微波频率测量
Table1 Output microwave frequency measurement

eigen frequency /GHz	mixed frequency /GHz	output microwave frequency/GHz
14.00	0.95	13.05
12.00	1.06	
13.05	0	

图 10 为引导磁感应强度为 0.4 T 时的典型实验波形。c1,c2 分别为电压电流波形，c3 为测试点检波波形，c4 为参考点检波波形。计算可知辐射微波功率约为 850 MW，微波脉宽为 24 ns。

4 结论

传统低磁场 RBWO 磁感应强度在 0.7 T 以上，为了实现 HPM 系统小型化，励磁电源系统就必须小型化，本文设计一个工作在较低磁场 Ku 波段相对论返波管振荡器，并采用 2.5 维粒子模拟(PIC)软件对其进行模拟，分析了电子束束压、束流以及引导磁感应强度对输出微波的影响，得到低磁场区域的最大微波输出。当轴向引导磁感应强度为 0.4 T，电子束束压为 600 kV，电子束流为 7 kA 时，得到频率为 13.08 GHz，输出功率为 1.0 GW 的微波输出。在强流电子加速器上进行实验验证，得到平均功率为 850 MW，频率 13.05 GHz，脉宽 24 ns 的微波输出。这只是在较低磁场区域下得到的初步实验结果，该实验结果与理论模拟结果基本一致，0.4 T 磁场需要的励磁电源系统小，容易操作，为实现 HPM 系统小型化打下了良好的基础，下一阶段将在现有的实验数据指导下进一步优化器件结构，从而实现器件在更低磁场下 GW 级微波输出。

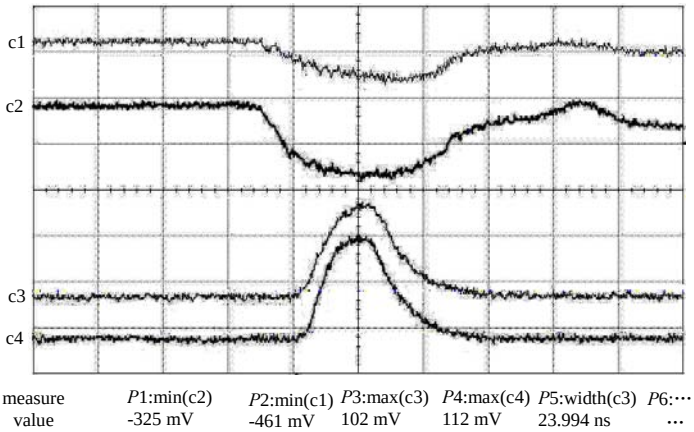


Fig10 Typical experiment waveform
图 10 典型实验波形

参考文献:

[1] 马乔生,金晓,绪明,等. X 波段 10 GW 高功率返波管振荡器设计[J]. 物理学报, 2011,60(10):105201. (MA Qiaosheng, JIN Xiao.XU Ming,et al. Design of X-band backward wave oscillator with 10 GW output power[J]. Acta Phys. Sin.,2011, 60(10):105201.)

[2] Korovin S D,Rostov V V,Totmeninov E M. Studies of relativistic backward wave oscillator with low magnetic field[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 2000,28(3):485-494.

[3] 马乔生,张永辉,常安碧,等. 重复频率强流电子束的产生和传输实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2005,17(4):609-613. (MA Qiaosheng,ZHANG Yonghui,CHANG Anbi,et al. Experimental study on the generation and transmission of the high-current repetitive electron beam[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005,17(4):609-613.)

[4] 陈昌华. 带 Bragg 反射器高功率相对论返波管理论和实验研究[D]. 西安:西北核技术研究所, 2003. (CHEN Chang hua. Theoretical and experimental researches on high power relativistic backward-wave-oscillator with Bragg reflector[D]. Xi'an,China:Northwest Institute of Nuclear Technology, 2003.)

[5] 陈代兵,孟凡宝,王冬,等. L 波段双频磁绝缘线振荡器的粒子模拟[C]// 强辐射技术论文集. 银川,宁夏, 2007. (CHEN Daibing,MENG Fanbao,WANG Dong,et al. L-band dual-band magnetically insulated transmission line oscillator particle simulation[C]// Strong Radiation Technology Proceedings. Yinchuan,Ningxia, China:[s.n.], 2007)

[6] ZHANG Jun,ZHONG Hui-huang,LUO Ling. A novel overmoded slow-wave high-power microwave generator[J]. IEEE Trans. Plasma Science. 2004,32(6):22-36.

[7] 陈再亮,王建国,王玥,等. 相对论返波管超辐射产生与辐射的数值模拟研究[J]. 物理学报, 2014,63(3):038402-1-7. (CHEN Zailiang,WANG Jianguo,WANG Yue,et al. Numerical simulation of generation and radiation of super-radiation from relativistic backward wave oscillators[J]. Acta Phys. Sin., 2014,63(3):038402-1-7.)

[8] Ginzburg N S,Rozental R M,Sergeev A S,et al. Dual band operation of the relativistic BWO[C]// Proc of 4th IEEE International Conference on Vacuum Electronics. Florida,USA:[s.n.], 2003:181-182.

[9] 吴洋,金晓,马乔生,等. X 波段重频过模返波振荡器实验研究[J]. 物理学报, 2011,60(8):084101-1-5. (WU Yang,JIN Xiao,MA Qiaosheng,et al. Experimental study on X-band repetitively oversized backward wave oscillator[J]. Acta Phys. Sin., 2011,60(8):084101-1-5.)

[10] 刘俊,周亚军,戴晶怡,等. 0.22 THz 折叠波导慢波结构微细 WEDM 加工技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(3):330-333. (LIU Jun,ZHOU Yajun,DAI Jingyi,et al. Micro-WEDM technology of 0.22 THz folded waveguide slow wave structure[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):330-333.)

[11] XIAO R Z,CHEN C H. Efficiency enhancement of a high power microwave generator based on a relativistic backward oscillator with a resonant reflector [J]. Journal of Appl. Phys., 2009,10(5)5:053306.

作者简介:

邵剑波(1989-), 男, 四川省眉山市人, 在读硕士研究生, 主要从事高功率微波技术研究.email:465392949@qq.com.

谢鸿全(1974-), 男, 四川省南部县人, 博士, 教授, 主要从事高功率微波技术、电磁场理论和高等教育评估.

李正红(1968-), 男, 四川省新津县人, 博士, 研究员, 主要从事高功率微波技术研究工作.

马乔生(1973-), 男, 云南省剑川县人, 博士, 研究员, 主要从事高功率微波技术与脉冲功率技术研究.

吴　洋(1985-), 男, 四川省广元市人, 博士, 主要从事高功率微波技术与脉冲功率技术研究.