

0.3T Ku 波段返波管的低磁场特性研究

邵剑波^{1,2}, 谢鸿全¹, 李正红², 马乔生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应用电子学研究所, 高功率微波技术重点实验室, 四川绵阳 621900)

摘 要: 为了实现相对论返波管振荡器(RBWO)永磁包装, 本文采用 Magic 模拟软件在 0.5T 低磁场相对论返波管(RBWO)器件结构基础上, 通过在器件慢波结构末端添加一个部分反射腔, 减小电子束质量对束波转换影响, 即减小引导磁场的影响, 实现了 Ku 波段相对论返波管振荡器 0.3T 磁场下运行. 当电子束束压 600kV、电子束束流 7kA 时, 模拟得到器件输出微波功率 740MW, 效率 18%. 尽管该器件的效率低于 0.5T 磁场下的效率(25%), 然而 0.3T 引导磁场在工程上更容易实现. 结合小型化的脉冲功率源进行实验研究, 当二极管束压 580kV、束流 6.5kA, 实验获得功率 600MW, 频率 13.10GHz, 脉宽 25ns 的微波输出, 该器件的研制可以促进高功率微波(HPM)系统小型化的发展.

关键词: 相对论返波管; 小型化; Ku 波段

中图分类号: TN125

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2016)09-2057-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.09.005

Study of a Ku-Band Backward Wave Oscillator Characteristics with Low Magnetic Field of 0.3T

SHAO Jian-bo^{1,2}, XIE Hong-quan¹, LI Zheng-hong², MA Qiao-sheng²

(1. College of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

2. Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: In order to realize the relativistic backward wave oscillator(RBWO) permanent magnet packaging, simulation software Magic is used and based on the structure of the relativistic backward wave oscillator(RBWO) with low magnetic field of 0.5T, through adding a partially reflecting cavity at the end of the device's slow wave structure to reduce the effect of the quality of electron beam on the beam-wave conversion, that is, to reduce the effect of guiding magnetic field, so this paper realized the Ku band relativistic backward wave oscillator normal operation at 0.3T. When the electron beam is 600kV and the beam current is 7kA, the output microwave power of 740MW and the efficiency of 18% are obtained in the simulation software Magic. Although the efficiency of the RBWO at 0.3T is lower than that at 0.5T(25%), guiding magnetic field of 0.3T is easier to realize in engineering. Experiment on the miniaturization of pulse power source, when the diode is 580kV and the beam is 6.5kA, achieves output power of 600MW and the frequency of 13.10 GHz with the corresponding pulse width of 25ns.

Key words: relativistic backward wave oscillator (RBWO); miniaturization; Ku-band

1 引言

近年来, 相对论返波管振荡器(RBWO)作为利用受激切伦科夫辐射机理的典型振荡型微波器件得到了广泛的研究, 它是最早研制成功的强相对论微波器件, 同时也是输出功率最大的器件之一^[1-3]. Ku 波段的相对论返波管比 C、X 波段频率高, 更能提高其品质因子

(Pf^2). 所以, 对该波段的研究具有重要的实用价值. 但是为了能够获得较高的耦合阻抗, 要求较强的外加引导磁场使得环形电子束紧贴着慢波结构传输, 一般的脉冲螺旋管磁体通常只能工作在单次脉冲状态, 制约了 RBWO 的重复频率运行, 为了实现器件的重复频率运行, 则需要采用超导磁体来提供引导磁场, 或者从器件设计上研制低磁场相对论返波管振荡器. 由于超导

磁场系统体积庞大对高功率微波源(HPM)系统小型化的发展极为不利,因而本文从器件设计上降低 RBWO 引导磁场,对器件在低磁场条件下工作进行了详细研究.从1998年 A. V. Gunin 报道了在 0.7T 的稳衡磁场下得到了频率为 10GHz、功率为 0.5GW、脉宽为 10ns 的微波输出以来^[3],低磁场返波管振荡器得到广泛关注并进行了深入研究.2001 年第二十一试验训练基地研究所的范菊平等报道了在 0.7T 的磁场下,得到了频率 8.874GHz、功率 750MW、效率约 15% 的微波输出;2006 年国防科技大学张军等在约 0.7T 的引导磁场下实现了约 1.2GW 的 X 波段微波输出,在此基础上,2010 年国防科技大学李川等在 0.7T 磁场下模拟实现了功率 1.1GW、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 0.6T 磁场下模拟得到了功率 1.85GW、效率 30% 的 X 波段微波输出^[4],并在 0.5T 磁场下得到功率 800MW、频率约 9.13GHz 的实验微波输出,同时开展了永磁包装相对论返波管实验,在 0.46T 永磁磁体上得到功率 510MW、频率 8.0GHz、效率 12% 的微波输出^[5].2011 年俄罗斯 Korovin S D 研究小组在 0.7T 磁场下得到功率 1.4GW、效率 25% 的 X 波段微波输出,A. V. Gunin 等报道了在 0.6T 磁场下得到 X 波段微波功率 1.3GW^[6].可以看出,在 0.5T 以上磁场情况下运行的相对论返波管已经实现了高功率、高效率微波输出,而现有的 0.46T 永磁磁体质量大、体积大,在实验操作上不方便,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.

本文在 0.5T 相对论返波管基础上设计了一个可以工作 0.3T 磁场下的 Ku 波段返波管振荡器.当电子束束压和束流分别为 600kV 和 7kA 时,得到频率 13.18GHz、功率 740MW、效率 18% 的模拟微波输出.结合小型化的脉冲功率源^[7],当外加磁场 0.3T 时,得到平均功率 600MW、频率 13.10GHz、脉宽 25ns 的实验微波输出.

2 模型建立与分析

2.1 引导磁场的选择

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临界值.对于束半径为 r ,束厚度为 Δ 的环形电子束,其临界磁场为^[8]

$$B_0 \geq \left(\frac{2\rho m}{\varepsilon_0 \gamma_0} \right)^{1/2} \quad (1)$$

其中 $\rho = \frac{I}{ev \cdot 2\pi\Delta r}$ 为电子束密度, γ_0 为束相对论因子.

由式(1)可知,电子束密度越小,纵向速度越大,则越有利于 RBWO 的低磁场运行.这里,电子束束压和束流分别为 600kV、7kA,阴极半径和厚度分别为 2.0cm 和 0.1cm,因此 $B \geq 0.204T$.同时,该器件中电子束外半径

距离慢波结构最小距离为 0.4cm,该距离大于电子的回旋半径,保证电子束正常传输情况下不会打到慢波结构的内壁上,有利于器件的长脉冲运行.

2.2 0.3T 相对论返波管振荡器设计

采用 Magic 模拟软件并参考 0.5T 磁场下相对论返波管振荡器的优点^[3,4],设计一个 0.3T 引导磁场下工作的 Ku 波段相对论返波管振荡器(图 1).

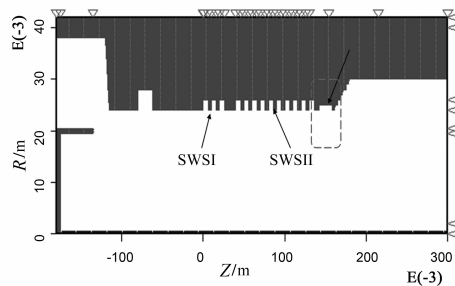


图1 相对论返波管结构示意图

首先,在慢波结构前添加一个谐振腔,该谐振腔对工作模式的电磁波具有较高的反射系数而对其它模式的电磁波反射系数较低^[5](图 2),可以看出,该谐振腔在频率 13.08GHz 处 S21 有最小值,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.

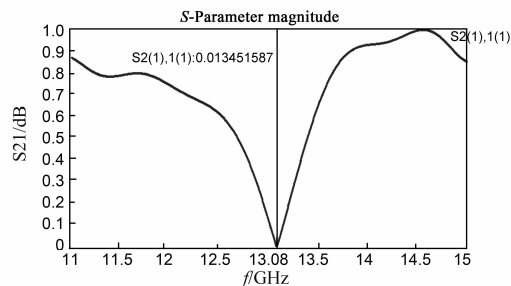


图2 S21曲线

其次,器件慢波结构末端添加一个部分反射腔,减小电子束质量对束波转换影响,即减小引导磁场的影响,实现器件 0.3T 磁场下运行.图 3 为有无部分反射腔磁场对输出微波影响关系曲线.可以看出,加上部分反射腔后器件的低磁场区域工作曲线左移,最佳工作磁场变小,牺牲了相对论返波管的部分功率输出,实现了器件在 0.3T 磁场下工作.

第三,采用分段慢波结构使电子束与慢波结构充分作用^[9].第一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;在第二段慢波结构电子束与慢波区的高频场充分作用实现换能.

另外,由于 Ku 波段器件频率高,而器件工作频率与器件尺寸成反比,所以高频 RBWO 的尺寸小、结构紧凑,

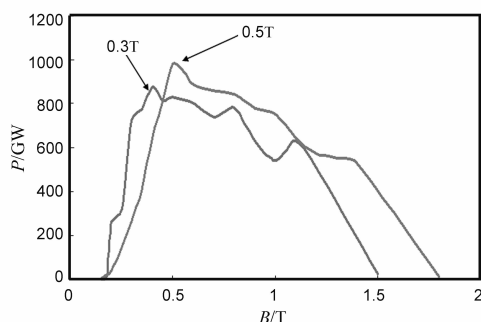


图3 有无反射腔磁场与输出微波关系曲线

不仅加工困难,而且容易造成高场强下击穿,使微波脉冲缩短.因此该器件采用过模慢波结构^[10]来有效降低慢波叶片表面的电场强度,增大器件的功率容量.又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.该器件慢波结构平均半径为 2.5cm、波纹深度为 0.2cm、轴向周期为 1.0cm,其色散特性如图 4,对应的工作频率为 13.1GHz.图 5 为输出微波 740MW 时的慢波结构表面电场强度分布图,其峰值低于 60MV/m,有利于避免射频击穿的出现.

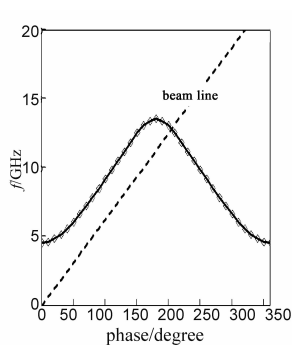


图4 色散曲线

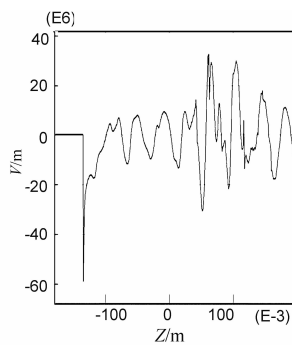


图5 器件内电场分布

3 0.3T RBWO 的优化设计

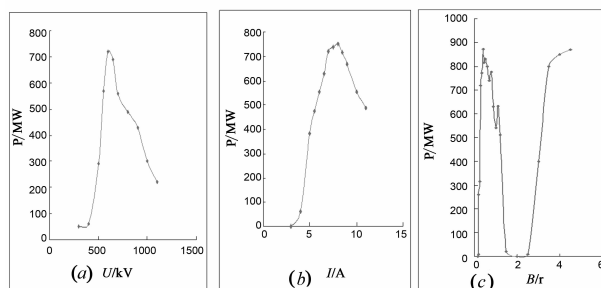
对构造好的相对论返波振荡器进行 PIC 粒子模拟,电子束束流、束压、引导磁场都是影响微波输出的重要参数,通过对其分析,找到器件的最佳工作束压、束流和引导磁场.

3.1 二极管束压对输出微波的影响

束压是影响微波输出的一个重要参数.当引导磁场为 0.3T、束流为 7kA 时,模拟得到的输出微波与束压之间的关系如图 6(a).

为了保证器件得到最大的微波输出,二极管束压必须选在束波同步的范围内.如图 6(a)所示,微波功率在电子束压 400~600kV 之间快速增长,超过 600kV 微波功率便会下降,因而太高或太低的电子束能量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 600kV.



(a)输出微波功率与电子束能量之间的关系;(b)输出微波功率与束流之间的关系;(c)输出微波功率与引导磁场强度之间的关系

图6 影响输出功率参数

3.2 束流对输出微波的影响

束流对微波输出也非常重要.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 6(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,束波相互作用增强,微波输出呈增长趋势;其次,由于输出微波影响导致电子的回流,微波输出呈下降趋势.

3.3 轴向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 6(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^[12].在低磁场区域,首先随着磁场强度的增大,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,由于很强的磁场强度,对电子束的约束很强,电子束与慢波结构相互充分作用,因而微波输出在增大到一定趋势后就保持不变了.

3.4 模拟结果

当电子束束压 600kV、束流 7kA、引导磁场 0.3T 下模拟得到器件中电子群聚的相空间分布图与实空间分布图分别如图 7、图 8 所示.从图中可以看出,电子束得到了很好的调制,在谐振腔,电子群聚不明显,此时电子处于速度调制阶段;经过漂移段,电子群聚现象逐渐加强转换为密度调制;在慢波结构末端电子大部分处于低能量区,实现了微波场与电子换能.

粒子模拟结果如图 9:在电子束束压为 600kV,电流为 7kA,引导磁场为 0.3T 时,如图 9(a)所示,该相对论返波振荡器的起振时间约为 5ns,得到的微波输出 740MW.图 9(b)为输出口的功率频谱图,输出微波的频

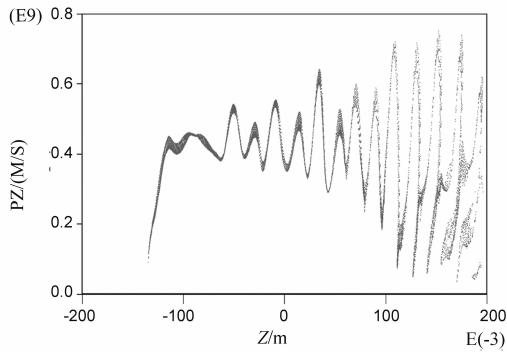


图7 电子相空间分布图

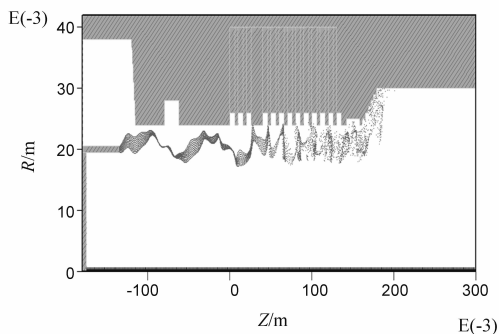


图8 电子实空间分布图

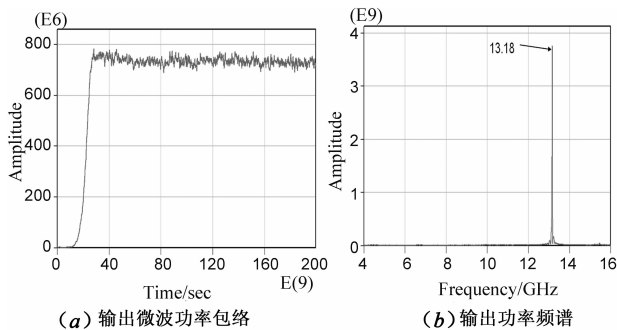


图9 模拟结果

率比较单一,为 13.18GHz,与理论值一致.

4 0.3T 磁场设计

实验使用磁场由电容器组对螺线管放电产生,该引导磁场等效电路如图 10 所示^[12]. 首先对电容器组充电,接着充电完的电容器组对电感 L 放电在回路中产生电流 I ,电流产生的磁场与电流成正比关系,即 $B \propto I$;电感 L 储能 P 与电流 I 的关系为 $P \propto I^2$,可以得出 $B^2 \propto I^2 \propto P$,即

$$\left(\frac{B_1}{B_2}\right)^2 = \left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (2)$$

由式(2)可知,励磁电源电功率消耗与磁场的平方成正比关系,较之一般工作 0.5T 以上的低磁场 RBWO 器件,0.3T 磁场电功率消耗为 0.5T 磁场电功率消耗的 9/25. 电功率消耗的明显减小对于励磁电源的体积、重量也大大减小,这为器件小型化发展奠定了良好的基础.

对螺线管磁体参数进行测量以确保需要的磁场强度. 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波形,如图 11(a). 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场强度之间的关系,如图 11(b),从图中可以看出,充电电压与螺线管线圈产生的轴向磁场成正比关系,充电 400V 就能产生 0.3T 磁场.

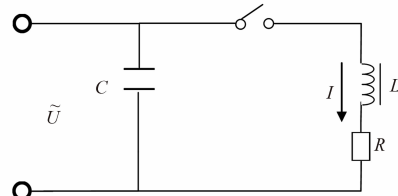
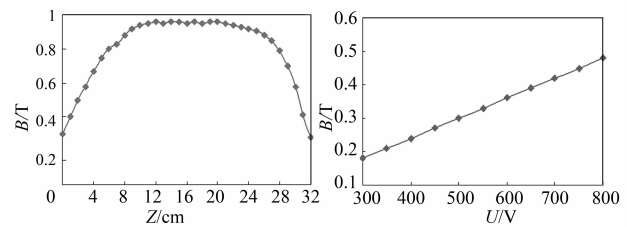


图10 等效电路图



(a) 磁场波形分布 (b) 电容器充电电压与磁场强度关系

图11

5 初步实验结果分析

基于以上分析,对 0.3T 相对论返波管振荡器进行初步实验研究. 实验中,微波频率采用混频法进行测量,由开口接受波导接受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以得到微波频率,如图 12 所示,得到频率为 13.10GHz. 与粒子模拟结果 13.18GHz 吻合较好. 如表 1 所示.

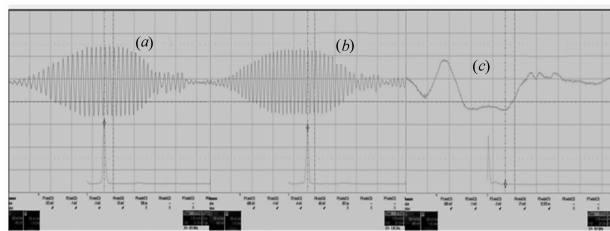
表1 微波器件输出微波频率测量

Eigen frequency (GHz)	Mixed frequency (GHz)	Output microwave frequency (GHz)
14.0	0.9	
12.0	1.0	13.10
13.10	0	

图 13 为当引导磁场强度 0.3T、二极管束压 580kV、束流 6.5kA 时得到的典型实验波形. 通过计算得到辐射微波功率 600MW,微波脉宽 25ns.

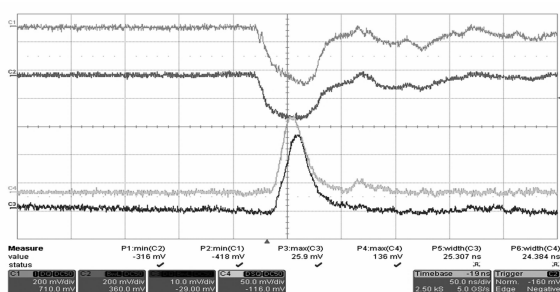
6 结论

本文设计一个 0.3T 磁场下工作的 RBWO 器件,结合 0.5T 磁场下相对论返波管振荡器的优点,通过在器件末端添加一个部分反射腔实现器件 0.3T 磁场运行. 采用 2.5 维粒子模拟 (PIC) 软件对其进行模拟,分析了



(a) 本征频率 14 GHz, 差频 0.95 GHz;
 (b) 本征频率 12 GHz, 差频 1.06 GHz;
 (c) 本征频率 13.10 GHz, 差频 0 GHz

图 12 混频微波频率



(C1, C2 分别为电压电流波形, C3 为参考点检波波形,
 C4 为测试点检波波形)

图 13 典型实验波形

电子束压、电子束流以及引导磁场强度对输出微波的影响,当电子束压 600kV、电子束流 7kA 时,得到频率为 13.18GHz,输出功率为 740MW 的微波输出,效率 18%。在紧凑型脉冲功率源上进行实验验证,得到平均功率为 600MW,频率 13.10GHz,脉宽 25ns 的微波输出,效率 16%。尽管该器件的效率低于 0.5T 磁场相对论返波管振荡器,然而 0.3T 引导磁场在工程上更容易实现,可以促进 HPM 系统小型化的发展。本文开展了 0.3T 引导磁场下 Ku 返波管振荡器的初步实验,验证了器件能够在 0.3T 磁场下工作,下一阶段在现有的实验数据基础指导下进一步优化器件,从而得到更高效率的微波输出。

参考文献

- [1] Larald D M, Edl S. Enhanced frequency agility of high-power relativistic backward wave oscillator[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1996, 24(3): 852 - 858.
- [2] A V Gulin, A I Klimov, et al. Relativistic X-band BWO with 3-GW output power[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 1998, 26(3): 326 - 330.
- [3] 马乔生, 李正红, 吴洋. 低引导磁场相对论返波管振荡器设计[J]. 微波学报, 2013, 29(2): 79 - 82.
- [4] Ma Q S, Liu Z, Li Z H, et al. Development of the relativistic backward wave oscillator with a permanent magnet[J]. Chinese Physics C, 2012, 36(8): 753 - 755.
- [5] 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.

- [6] Vlasov A N, Ilyin A S, Carmel Y. Cyclotron effects in relativistic backward-wave oscillators operating at low magnetic fields[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1998, 26: 605 - 609.
 - [7] Song F L, Gan Y Q, Zhang Y, et al. Compact low impedance Marx generator for high power microwave applications[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(So): 177 - 180.
 - [8] Levush B T M, Antonsen Jr A N, Vlasov, et al. High-efficiency relativistic backward wave oscillator; theory and design[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1996(24): 843 - 847.
 - [9] 陈再亮, 王建国, 王玥, 朱湘琴, 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.
 - [10] Xiao R Z, Zhang L J, Liang T Z, et al. Limitation of cross-excitation instability in a relativistic Cerenkov generator with coaxial slow wave structure[J]. Phys Plasma, 2008, 15: 053107.
 - [11] 胡林林, 陈洪斌, 马国武, 等. 俄罗斯基于超辐射机理相对论返波管实验研究进展[J]. 电子学报, 2006, 34(S1): 2510 - 2531.
- Hu Lin-lin, Chen Hong-bin, MA Guo-wu, et al. Experiment development of relativistic backward wave oscillator based on superradiance regime in russia[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(S1): 2510 - 2531. (in Chinese)
- [12] 黄华, 雷禄荣, 甘延清, 等. 相对论扩展相互作用腔振荡器重复频率稳定运行研究[J]. 电子学报, 2009, 37(8): 1690 - 1693.
- Huang Hua, Lei Lu-rong, Gan Yan-qing, et al. High power and repetitively pulsed operation of a relativistic extended interaction cavity oscillator[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(8): 1690 - 1693. (in Chinese)

作者简介



邵剑波 男, 1989 年生于四川眉山, 硕士研究生. 主要研究方向: 高功率微波器件研究.
 E-mail: 465392949@qq.com



谢鸿全 男, 1974 年生, 教授. 主要研究方向为高功率微波技术和电磁场理论, 已发表学术论文 60 余篇, 其中 40 余篇次被三大检索收录.