

文章编号: 2095-4980(2021)03-0380-06

低磁场 S 波段相对论返波振荡器模拟与实验

严余军^{1,2}, 吴 洋², 周自刚^{*}, 李正红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: 为实现高功率微波(HPM)系统的小型化, 设计一个 S 波段较低磁场相对论返波管(RBWO)振荡器。针对低磁场特点, 分析慢波结构、引导磁场、束压、束流等对输出微波的影响, 通过模拟软件(PIC)优化结构。以此设计引导磁场为 0.24 T, 电子束束压为 725 kV, 束流为 6 kA, 频率为 3.53 GHz, 输出微波功率为 1.22 GW, 束波转换效率为 27%的低磁场 S 波段相对论返波管。仿真实验结果表明: 在强流电子束加速器平台上外加磁场为 0.24 T 时, 得到平均功率 1 GW、频率 3.58 GHz、脉宽 90 ns 的微波输出, 与理论值一致。进行了重频为 1 Hz, 20 s 的稳定性实验, 该实验结果为实现相对论返波管的永磁包装奠定了良好的基础。

关键词: 相对论返波管; S 波段; 高功率微波; 低磁场

中图分类号: TN125

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020441

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

YAN Yujun^{1,2}, WU Yang², ZHOU Zigang^{*}, LI Zhenghong²

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

Abstract: An S-band Relativistic Backward Wave Oscillator(RBWO) with lower magnetic field is designed in order to achieve the miniaturization of High-Power Microwave(HPM) systems. According to the characteristics of low magnetic field, the effects of slow wave structure, guided magnetic field, beam pressure, beam current, etc. on the output microwave are analyzed. The structure is optimized by using particle simulation software. On this basis, a low magnetic field S-band relativistic backward wave tube is designed, which has a guided magnetic field of 0.24 T, an electron beam voltage of 725 kV, a beam current of 6 kA, a frequency of 3.53 GHz, an output microwave power of 1.22 GW and a beam conversion efficiency of 27%. The preliminary experiment is performed on the accelerator platform with high current electron beam when the external magnetic field is 0.24 T. The microwave is output with average power of 1 GW, 3.58 GHz frequency and 90 ns pulse width. And a stability test at 1 Hz repetition frequency in 20 s is performed. The experimental results have laid a good foundation for realizing the relativistic backward wave tube of the permanent magnet packaging.

Keywords: relativistic backward wave oscillator; S-band; High Power Microwave; low guiding magnetic field

相对论返波管振荡器^[1-2](RBWO)是最具潜力的高功率微波器件, 其具有结构简单^[3]、适合重复频率、高功率和高效等优点被广泛研究, 其要求的磁场也超过 1 T。通常提供外加引导磁场有 2 种方式^[4]: 一是超导磁体磁场, 但超导磁体维护麻烦^[5], 成本高, 技术复杂, 其磁场分布固定, 给研究带来不便; 二是采用电容储能对线圈放电提供脉冲磁场, 随着实验磁场的升高, 线圈电流不断增大, 导致励磁系统庞大, 严重影响 HPM 系统总体效率。采用可控硅调相制恒流源加通水冷却螺线管供给直流磁场, 虽然可以长时间连续运行, 但功耗高, 体积比

收稿日期: 2020-09-27; 修回日期: 2021-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11875228)

作者简介: 严余军(1992-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为高功率微波技术。email:572446095@qq.com

*通信作者: 周自刚 email:zhouzigang1973@163.com

较大，制约高功率微波系统小型化发展。为提高微波源的总体效率，从器件设计上研制低磁场相对论返波管振荡器，使其向小型化发展。S 波段的相对论返波管相比 X、K 波段频率更低，应用广泛。2013 年马乔生^[6]在 0.6 T 的磁场下模拟得到功率为 1.85 GW，束波转换效率 30% 的 X 波段微波输出；2016 年谭维兵在 0.6 T 引导磁场下模拟输出功率为 1.27 GW，频率为 14.7 GHz，束波转换效率 35% 的 Ku 波段微波输出；2018 年王东阳在 1 T 的磁场下模拟得到功率为 493 MW、频率为 29.267 GHz 的 Ka 波段微波输出；2019 年吴洋设计一个低磁场返波管振荡器，在 0.7 T 的引导磁场下模拟输出微波功率 4.2 GW，频率 2.38 GHz，转换效率达到 50%。关于 S 波段的报道在整个微波波段中占比很小，引导磁场在 0.5 T 以上，设计出更低的磁场 RBWO。

本文利用 Magic 电磁粒子模拟软件优化一个 S 波段低磁场 RBWO 振荡器，仿真分析慢波结构、引导磁场、电子束束流和束压对输出微波功率的影响。在电子束束压和束流分别为 725 kV、6 kA、0.24 T 的磁场强度下，输出功率为 1.22 GW，频率为 3.53 GHz 的微波输出，束波转换效率 27%。实验研究得到，外加磁场为 0.24 T 时，得到频率 3.58 GHz，平均功率 1 GW，脉冲宽度 90 ns 的微波输出。

1 模型的建立与分析

基于结构优化和模拟，设计出低磁场 RBWO 的结构，如图 1 所示。器件主要由谐振反射腔和分段非均匀慢波结构组成。在结构中，返波管前端的谐振反射腔对工作模式的电磁波具有反射作用，对其他模式的电磁波反射系数较低^[6]。同时对电子束进行预调制和反射微波，阻止微波进入二极管，提高电子束质量，反射的微波使相对论返波管振荡器易于起振，以便 RBWO 在较低磁场下运行。

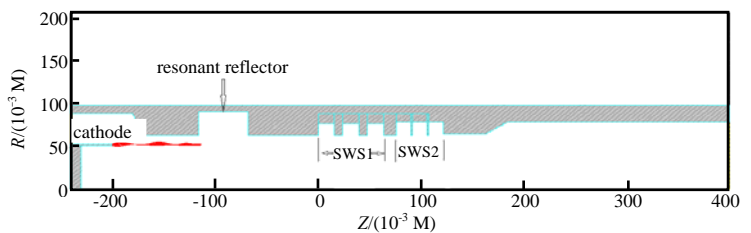


Fig.1 Geometric model of RBWO
图 1 相对论返波管结构示意图

慢波结构是相对论返波管振荡器的核心部位。为使电子束与微波充分作用，设计一个非均匀矩形慢波结构提取腔^[7]用于高效率提取电子束动能，前段矩形结构确保电子速度与微波相速同步；加深后段矩形慢波结构，提高束波相互作用阻抗。

分别用 4 种不同慢波结构进行整管模拟，研究返波管慢波结构对输出微波功率的影响，如图 2 所示。图中分别是周期长度相同，后端结构不变的慢波结构 SWS1、波纹略微加深的慢波结构 SWS2、波纹加深的慢波结构 SWS3、波纹深度最深的慢波结构 SWS4。输出功率如图 3 所示，采用 SWS1 的返波管输出功率 0.81 GW，SWS2 的输出微波功率 1.07 GW，输出微波功率最高的是 SWS3，达到 1.22 GW。输出微波功率最低的是 SWS4，只有 0.68 GW。后端慢波结构深度主要影响束波相互作用阻抗，增加慢波结构深度，相互作用阻抗变大，换能电场提高，促进束波能量转换，输出微波功率升高，提高束波转换效率。阻抗过大，电流复位回流，电子束过群聚，导致输出微波功率降低，如慢波结构的 SWS4。

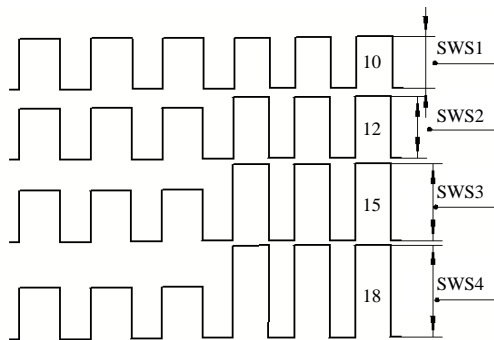


Fig.2 Different SWSs used in simulation
图 2 模拟使用的 4 种不同慢波结构

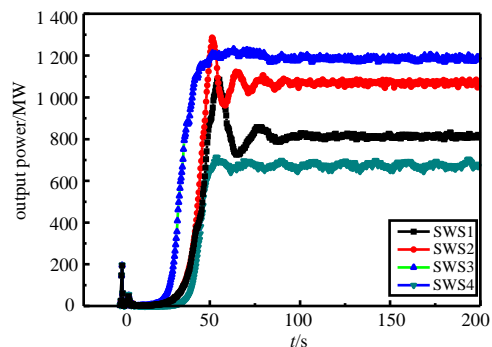


Fig.3 Output power vs. time for RBWO with different SWSs
图 3 不同慢波结构的 RBWO 的输出微波功率

2 粒子模拟结果及分析

对设计好的相对论返波管振荡器进行粒子模拟，控制其他参数不变，改变引导磁场、束压和束流。通过对其分析，找出器件的最佳工作束压、束流和引导磁场。

2.1 引导磁场对输出微波的影响

在相对论返波管振荡器中，电子束在磁场的约束和引导下穿过慢波结构，保证束波相互作用效率。为研究磁场强度对输出特性的影响，在模拟中保持其他参数不变，只改变磁场强度。得到输出微波功率随磁场强度变化曲线，如图 4 所示。随着磁场强度增加，曲线分为低磁场区、高磁场区和回旋共振区。在回旋共振区，随着磁场强度变大，电子束逐渐产生回旋共振，在 0.57~0.64 T 之间共振强度最大，输出微波功率为 0，与理论值相符；在高磁场区，随着磁场强度增大，输出微波功率有增大趋势。随着磁场强度增大，电子受到越来越强的约束，其横向速度分量减小，纵向速度分量增大，RBWO 是从电子束纵向动能中提取能量，输出微波增大；在低磁场区，即关心的区域，输出微波功率随磁场增大，在回旋共振点附近达到最大值，再迅速降低，输出微波增强，微波功率变大，束波转换效率提高。低磁场区输出微波功率的峰值对应的磁场强度为 0.24 T，将 $B=0.24$ T 作为 RBWO 的工作引导磁场。

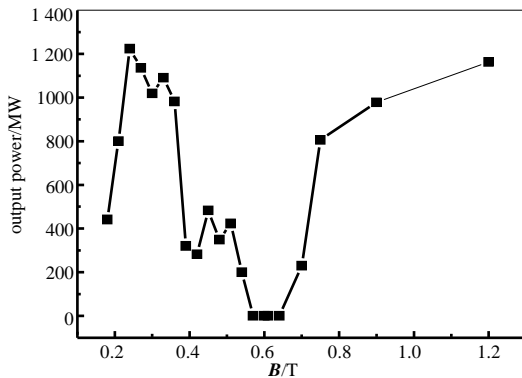


Fig.4 Output power vs. guiding magnetic field
图 4 输出微波功率随引导磁场强度变化

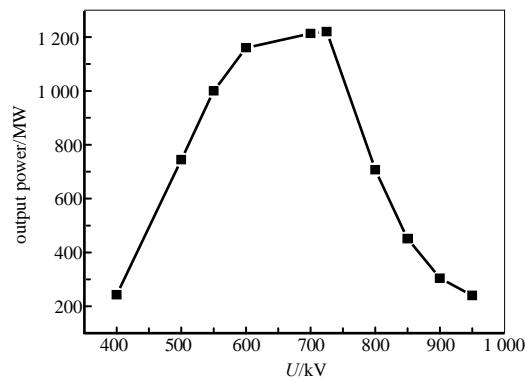


Fig.5 Relationship between the output power and the electron beam energy
图 5 输出微波与束压关系

引导磁场对电子束的运动具有引导和约束作用，它的大小直接影响微波输出功率和束波转换效率，磁场应该避开电子回旋共振磁场强度，回旋共振时的磁场强度^[8]为：

$$B_c = \frac{2m_e v_z \gamma}{e} \times \frac{\pi}{L} \tag{1}$$

式中： m_e 为电子静止质量； v_z 为电子轴向速度； γ 为相对论因子； e 为电子电荷量； L 为慢波结构周期长度。由式(1)可得，引导磁场强度 $B_c=0.61$ T 上下时发生电子回旋共振。

通过以上分析可知，该器件能够在较低磁感应强度下运行，下面利用 Magic 软件对 RBWO 进行模拟分析。

2.2 束压对输出微波的影响

束压对微波的输出影响非常大，当引导磁场强度为 0.24 T 时，模拟得到的微波与电子束能量之间的关系，如图 5 所示。当电子束能量大于消耗能量时，器件有微波输出。为保证返波管有较大微波输出，电子束束压必须确保在束波同步的范围内，束压直接影响电子束与空间谐波的作用程度，太高或太低都会降低输出微波功率。选取电子束束压为 725 kV。

2.3 束流对输出微波的影响

束流对微波有重要影响，当给定引导磁场和电子束束压时，总有一个束流对应着最佳的微波输出状态。

如图 6 所示，电子束束流大于起振电流时，返波管振荡器输出微波，不同束流对应不同微波输出状态。束流大于 6 kA 时，输出微波功率逐渐增大，其输出功率包络图前端波动比较大，且有时功率值不稳定。选择输出微波功率包络曲线平滑、单一的束流值 $I=6$ kA。

2.4 模拟结果

由以上模拟结果，确定低磁场相对论返波管结构参数、引导磁场强度、电子束束压和束流值。在引导磁场为

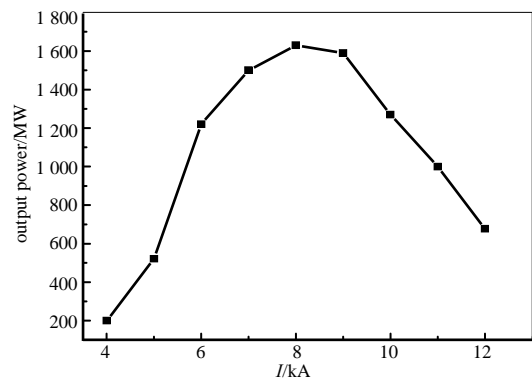


Fig.6 Relationship between the output power and the beam current
图 6 输出微波与束流关系

0.24 T, 电子束束压为 725 kV, 束流为 6 kA 时, 相对论返波管振荡器有较高的微波输出。如图 7 所示, 该 RBWO 的起振时间约为 17 ns, 得到的输出微波功率为 1.22 GW。输出的微波频率比较稳定, 为 3.53 GHz, 效率为 27%, 与理论值相似。

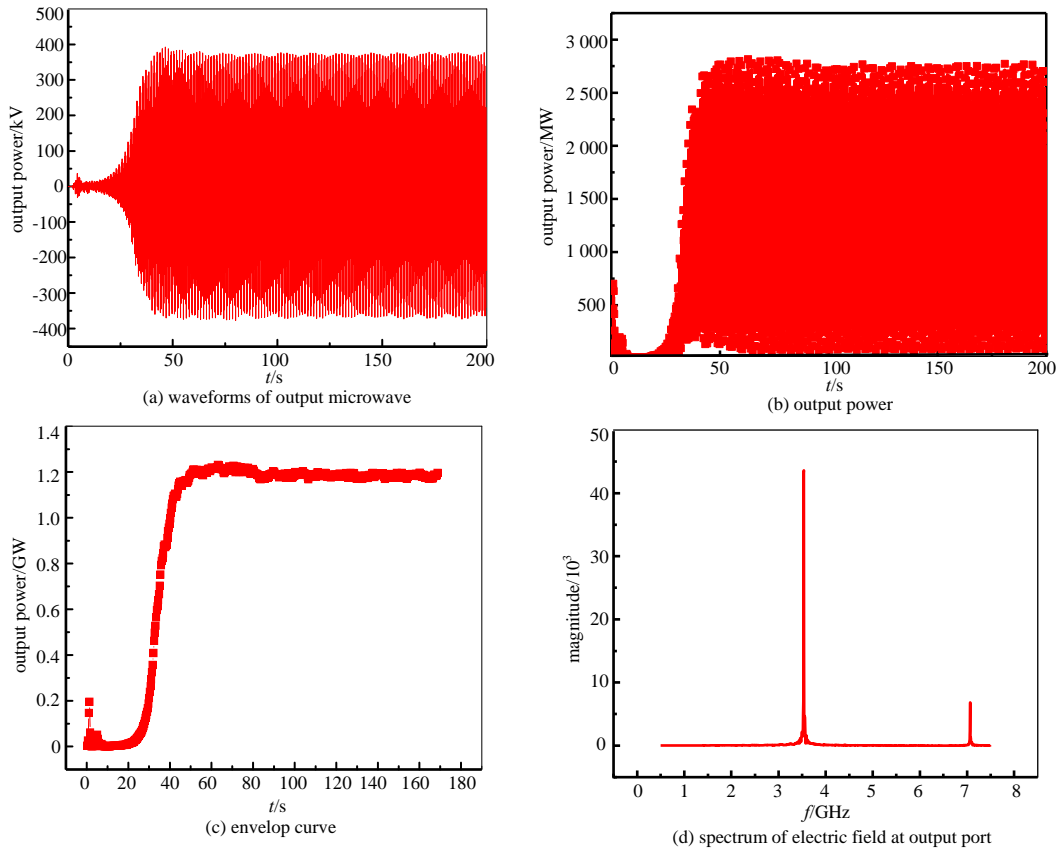


Fig.7 Simulated results
图 7 模拟结果

3 实验结果分析

3.1 试验系统

为验证模拟结果, 由加速器产生强流相对论电子束, 对器件进行实验研究。

实验系统框图如图 8 所示。实验由微波产生系统和测量系统组成。微波是脉冲功率源将高压脉冲作用于二极管上产生强流相对论电子束。电子束在引导磁场的导引下, 在返波管振荡器中发生束波相互作用, 产生的微波通过喇叭天线向空间辐射。测量系统中, 二极管附近的 Rogowski 线圈测量二极管电流, 电容分压器测量二极管电压, 微波频率和功率测量分别使用差分法和辐射场功率密度积分法。为了阻止示波器受外界电压信号的干扰, 外加一个隔离变压器为示波器提供电能, 使采集的数据更真实, 获得更好实验结果。

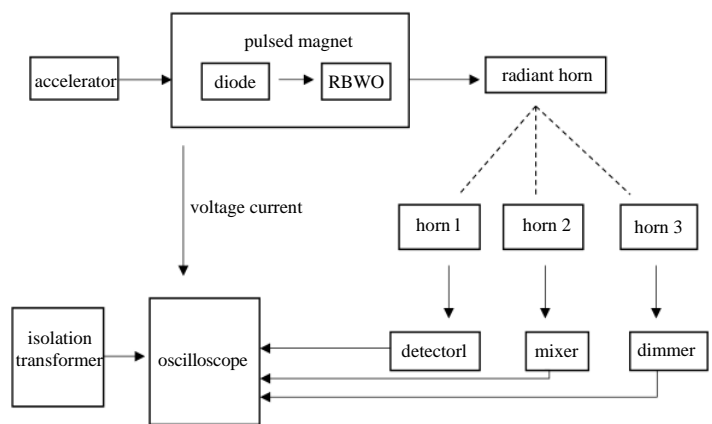


Fig.8 Schematic of experiment system
图 8 实验系统框图

3.2 微波功率测量

HPM 源的功率是高功率微波源性能的主要指标之一。实验中 HPM 源功率测量采用辐射场功率密度积分法^[9],

辐射总功率^[10] P 是以辐射喇叭天线为球心的球面上各点功率密度的积分。

$$P = \sum_{i=1}^{n-1} \pi R^2 (P_i + P_{i+1}) (\cos \theta_i - \cos \theta_{i+1}) \quad (2)$$

$$P_i = \frac{1}{A} 10^{\frac{P_i + L_r}{10}} \quad (3)$$

式中： θ_i 为接收天线与辐射天线轴向的夹角； P_i 为第 i 个测量点处的微波功率密度； P_r 为示波器测量第 i 个接收天线功率读数； L_r 为天线与示波器之间衰减数值； A 为天线有效接收面积。在脉冲功率源提供电子束束压 725 kV、束流 6 kA、超导磁体电流 8 A ($B=0.24$ T) 时，测得 $P=1$ GW，实验结果如图 9 所示。由检波器波形得到辐射微波脉宽为 90 ns，频率为 3.58 GHz。相比模拟结果，实验中超导磁场的电流不断变化，高于 8 A 时，导致磁场偏大。另外，电子束电压可能高于 725 kV，使得实验中返波管频率偏高。

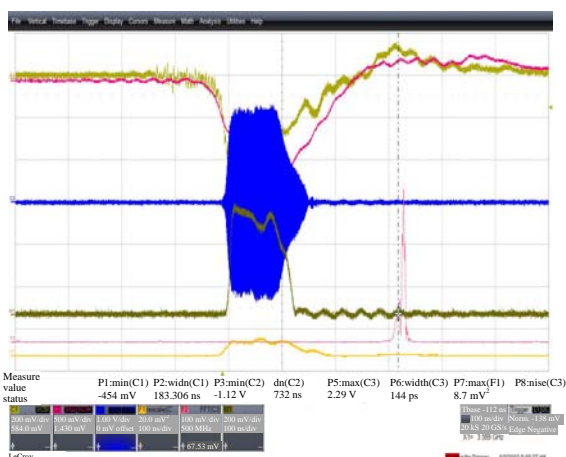


Fig.9 Typical experiment waveform
图 9 典型实验波形

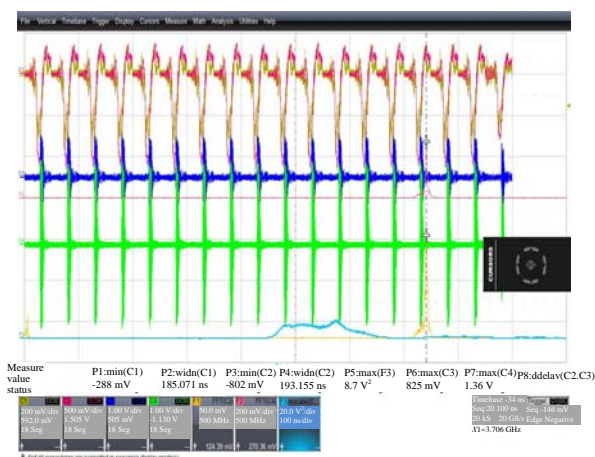


Fig.10 Repetition frequency experiment waveform
图 10 重复频率实验波形

单频微波输出状态良好，为进一步检测器件实际应用效果，进行重频为 1 Hz，20 s 的稳定性实验，如图 10 所示。其中前面 17 个波形良好，第 18 个微波峰值明显减少，第 19 和 20 没有出现。分析研究结果表明主要是由其他物理因素造成，与器件无关。返波管设计合理，达到设计目的，验证了模拟结果。

4 结论

为实现 HPM 系统小型化，励磁电源系统必须小型化。传统 RBWO 磁场强度在 0.5 T 以上，本文设计一个工作在较低磁场 S 波段相对论返波管振荡器，并采用 Magic 粒子模拟软件对其进行模拟，分析慢波结构、磁感应强度、电子束束压和束流对输出微波的影响，得到较低磁场区的输出微波。当 $B=0.24$ T，电子束束压为 725 kV，电子束流为 6 kA 时，得到频率 3.35 GHz，输出功率为 1.22 GW 的微波输出，束波转换效率为 27%。在模拟的基础上，开展实验研究：在强流电子束加速器平台上外加磁场 0.24 T 时，得到平均功率 1 GW、频率 3.58 GHz、脉宽 90 ns 的微波输出，并进行 1 Hz、20 个的重复频率运行。这是较低磁场区域时的初步实验结果，与理论值基本一致，0.24 T 磁场需要的励磁电源系统小，为实现 HPM 系统小型化打下良好基础，今后将在现有实验数据基础上继续优化器件结构，实现返波管振荡器的永磁包装。

参考文献：

- [1] 周传明,刘国治,刘永贵,等. 高功率微波源[M]. 北京:原子能出版社, 2007. (ZHOU Chuanming, LIU Guozhi, LIU Yonggui, et al. High power microwave source[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2007.)
- [2] 张克潜,李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 北京:电子工业出版社, 2001. (ZHANG Keqian, LI Dejie. Electromagnetic theory in microwave and optoelectronics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001.)
- [3] 王东阳,滕雁,史彦超,等. Ka 波段 TM02 模式低磁场相对论返波管初步实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2018,30(7):38-42. (WANG Dongyang, TENG Yan, SHI Yanchao, et al. Preliminary experimental research of Ka-band TM02 mode relativistic backward wave oscillator with low magnetic field[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018,30(7):38-42.)
- [4] 邵剑波,谢鸿全,李正红,等. Ku 波段低磁场返波管振荡器的模拟与实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(1):

- 80–85. (SHAO Jianbo, XIE Hongquan, LI Zhenghong, et al. Simulation and experiment of Ku-band backward wave oscillator with low magnetic field[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(1):80–85.)
- [5] 吴洋, 周自刚. S 波段低磁场高效率相对论返波管振荡器研究[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019(19):79–85. (WU Yang, ZHONG Zigang. Research and high efficiency of S-band relativistic backward wave oscillator with low magnetic field[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019(19):79–85.)
- [6] 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):79–81. (MA Qiaosheng, LI Zhenghong, WU Yang. Design of relativistic backward wave oscillator with low magnetic field[J]. *Journal of Microwaves*, 2013, 29(2):79–81.)
- [7] 谭维兵, 曹亦兵, 宋玮, 等. 一种 Ku 波段高效率低磁场同轴相对论返波管[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(9):74–79. (TAN Weibing, CAO Yibing, SONG Wei, et al. A Ku band coaxial relativistic backward wave oscillator with high efficiency and low magnetic field[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(9):74–79.)
- [8] 江佩洁, 李正红, 吴洋, 等. 低磁场 S 波段相对论返波管振荡器的工作特性[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31(3):62–65. (JIANG Peijie, LI Zhenghong, WU Yang, et al. Operating characteristics of S-band relativistic[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31(3):62–65.)
- [9] 张黎军, 陈昌华, 滕雁, 等. 高功率微波辐射场远场测量方法[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(5):1–7. (ZHANG Lijun, CHEN Changhua, TENG Yan, et al. High-power microwave radiation field far-field measurement method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(5):1–7.)
- [10] 江佩洁. S 波段低磁场相对论返波振荡器研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2019. (JIANG Peijie. Research of S-band relativistic backward wave oscillator with low magnetic field[D]. Mianyang, Sichuan, China:China Academy of Engineering Physics, 2019.)