

# 俄罗斯基于超辐射机理相对论返波管实验研究进展

胡林林<sup>1</sup>, 陈洪斌<sup>1</sup>, 马国武<sup>1,2</sup>, 刘天文<sup>1</sup>, 宋 睿<sup>1</sup>, 孟凡宝<sup>1</sup>, 周传明<sup>3</sup>

(1 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院研究生部, 四川绵阳 621900; 3. 中国工程物理研究院科技委, 四川绵阳 621900)

**摘 要:** 基于超辐射机理相对论返波管能产生高峰值功率、高峰值转换效率、快速上升前沿的纳秒/亚纳秒微波脉冲, 正成为高功率微波源系统小型化的新技术途径. 本文介绍了近几年来俄罗斯方面对超辐射返波管器件的实验研究情况, 重点报道了 Ka 波段和 X 波段超辐射返波管器件的最新进展, 并指出发展趋势及存在的一些关键技术问题.

**关键词:** 超辐射; 相对论返波管; 高功率微波

**中图分类号:** TN125.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12A-2510-04

## Experiment Development of Relativistic Backward Wave Oscillator Based on Superradiance Regime in Russia

HU Lin lin<sup>1,2</sup>, CHEN Hong bin<sup>1</sup>, MA Guowu<sup>1,2</sup>, LIU Tianwen<sup>1</sup>, SONG Rui<sup>1</sup>, MENG Faibao<sup>1</sup>, ZHOU Chuangming<sup>3</sup>

(1 Institute of Applied Electronics of CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China;

2 Department of Graduate Student, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China;

3 Technological Committee, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract:** The relativistic backward wave oscillator (RBWO) based on superradiance (SR) mechanism is becoming a new technical scheme of compact high power microwave system owing to its generation of nanosecond or subnanosecond pulse with high peak power, high peak conversion efficiency and fast leading edge. The recent experimental development of SR RBWO in Russian was briefly introduced. The latest development in Ka band and X-band was reported in detail, and the developing trend and some key technical problems were presented.

**Key words:** superradiance; relativistic backward wave oscillator; high power microwave

## 1 引言

超辐射 (Superradiance, SR) 现象的研究源于量子光学领域. 1954 年, 美国物理学家 Dicke 在研究原子激光的受激辐射时发现<sup>[1]</sup>: 在多个原子的受激辐射过程中, 当原子辐射相位相同时, 相干叠加产生的自发辐射光强将与原子数的平方成正比, 这种现象称之为超辐射. 超辐射光具有强度大和谱线锐度高等优点. 1988 年以来, 俄罗斯科学家 Ginzburg, Bonifacio 等人提出利用短电子束脉冲的超辐射效应在电真空器件中产生高功率微波脉冲的思想.

通常高功率微波器件中采用的电子束为长度远大于波长的连续或准连续电子束, 其产生的相干辐射为电子束自群聚引发的受激辐射, 辐射定标律为输出功率与电子数的  $4/3$  次方成正比. 而对于电子束长度为几个波长的短电子束脉冲, 由电子束不同部分相互作用引起的自群聚, 能在整个电子束空间内产生强相干辐射, 辐射定标律为输出功率与电子数的平方成正比. 根据量子振荡集体自发辐射单程相干放大的类似

机理, 这种辐射即为超辐射. 同时, 由于电子束的强聚束作用, 进一步压缩了脉冲宽度, 束波功率转换效率可超过 100%.

不同的受激辐射机理, 如 Bremstrahlung 辐射、Cyclotron 辐射、Cherenkov 辐射超辐射等都能实现超辐射, 上世纪 90 年代以来, 俄罗斯方面已从实验上观测到所有这些类型的超辐射现象, 其中以基于 Cherenkov 超辐射机理的相对论返波管 (Relativistic Backward Wave Oscillator, RBWO) 所产生的辐射功率最大. 1998 年开始, 俄罗斯应用物理研究所、电物理研究所、大电流研究所、高能研究中心等几家单位联合对基于 Cherenkov 超辐射机理的 RBWO 进行了深入的理论研究, 并开展了一系列实验研究, 辐射功率和功率转换效率逐年提高. 目前, 在 Ka 波段和 X 波段的粒子模拟和实验上都实现了峰值功率转换效率大于 100%, 而且频率从 X 波段到 G 波段均有报道.

本文将对近几年来俄罗斯方面超辐射 RBWO 的实验研究进展进行全面的评述, 重点报道 Ka 波段和 X 波段的最新进展, 并指出超辐射 RBWO 的发展趋势和存在的一些关键技术问题.

## 2 超辐射 RBWO 的实验研究

上世纪 90 年代初以来, 俄罗斯在高功率微波技术的重要研究方向: 纳秒及亚纳秒脉冲产生技术获得了迅速发展, 研制出了 SINUS 和 RADAN 系列纳秒/亚纳秒脉冲加速器, 为开展了基于 Chrenkov 超辐射机理 RBWO 的研究提供了实验平台。

1998 年, Ginzburg N S 等第一次实验观测到了亚纳秒强电流电子束脉冲产生的超辐射现象<sup>[2]</sup>。实验采用 RADAN303 小型加速器, 经脉冲整形后得到能量 200~250 keV、束流 1~2 kA、脉宽 0.5~1.2 ns、直径 5.5 mm 的电子束。慢波结构周期 3.5 mm, 波纹深度 0.75 mm。纵向引导磁场由超导产生, 磁场强度高达 8.5 T。实验结果为: 微波峰值功率 60 MW, 频率 38 GHz, 脉冲宽度~300 ps, 重复频率可达 25 Hz。在此之后的几年里, 在提高峰值功率、峰值功率转换效率及重复频率方面均得到很大进展, 工作频率在 X 波段(8~12 GHz)、Ka 波段(27~40 GHz)、W 波段(80~100 GHz)及 G 波段(140 GHz~220 GHz)均有相关报道, 尤其以 X 波段和 Ka 波段成果最为显著。

### 2.1 Ka 波段实验

2001 年, Alexei Klimovd 等实现了 Ka 波段在相对较低的磁场(2 T)时的高功率输出<sup>[3,6]</sup>。为增大功率容量, RBWO 的慢波结构采用了带 Bragg 反射器的过模结构设计(见图 1), 共 18 个周期, 由三段组成: 第一段 9 个周期, 波纹深度逐渐增大; 中间为 6 个周期的均匀段; 第三段波纹深度逐渐减小, 以实现圆输出波导的宽带匹配。Bragg 反射器使向阴极反射传播的能量不超过 2%。实验以 RADAN-303BP 为平台, RADAN-303BP 具有脉冲压缩和增大脉冲峰值电压的电感-电容单元, 输出阻抗 45  $\Omega$ , 经阶梯传输线连接至磁绝缘同轴电子真空二极管。石墨阴极爆炸发射产生的环形电子束直径为 8.6 mm, 电子束参数为 290 keV, 2.1 kA。

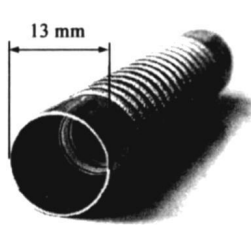


图 1 Ka 波段 18 周期 SWS

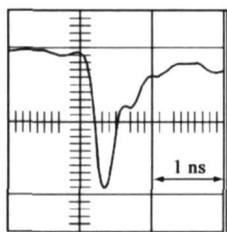


图 2 微波信号波形

实验测到的微波波形如图 2 所示。辐射功率的标定采用的是空间功率积分法, 磁场感应强度为 2 T 时, 峰值功率为 240~280 MW; 磁场感应强度大于 5 T 时, 微波功率增大近 50%, 达到 360~420 MW。高磁场和低磁场下功率转换率的粒子模拟值分别为 85% 和 65%, 而实验值为 70% 和 45%。

2002 年, D M Grishin 等实现了高重复频率下的 Ka 波段超辐射<sup>[4,6]</sup>。实验装置采用混合调制器, 如图 3(a) 所示, 以 SM-3NS 纳秒发生器作脉冲源, 利用半导体断路开关(SOS)和氢气 Peaking 开关(100 atm)形成脉冲输出(见图 3(b))。在重频 3500 Hz 条件下, 二极管电压脉冲幅度的展宽不超过 2%~3%。直流螺线管线圈产生 1 s 脉冲 2 T 纵向引导磁场, 用泵循环变压油冷却, 幅值波动稳定在 2% 内。超辐射微波脉冲用

6 GHz 带宽数字示波器 TDS820 记录, 脉冲串的能量由量热计测量。图 3(b) 显示了在重复频率 1000 Hz 下的检波器信号波形, 脉宽为 250 ps, 上升沿 190 ps。量热法测得微波能量为 80 mJ/脉冲, 由此标定出峰值功率~300 MW, 功率转换效率为 50%。重复频率 3500 Hz 时, 脉冲串的平均功率为 200 W。

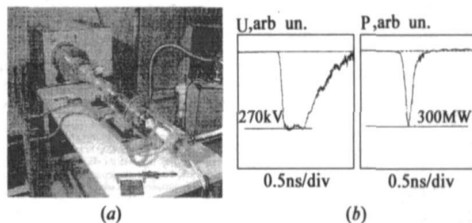


图 3 (a)重频 3.5 kHz Ka 波段 SR RBWO 实验装置(脉冲源为 SM-3NS); (b)二极管电压波形和检波器信号波形

2003 年, 在 2002 年实验改进的基础上进行了单次实验, 实现了大于 100% 的功率转换效率<sup>[5,6]</sup>。实验的脉冲源为 RADAN-303BP, 采用高电压脉冲的气体触发间隙, 加速器参数稳定(离散度小于 1%)。慢波结构增加到 25 个周期。实验的关键在于: 脉冲螺线管线圈需产生 6.5 T 的磁场感应强度, 并且绕制线圈、二极管阴极和慢波结构要保持很高的同心度, 位形公差不得超过 0.05 mm。

微波信号的测量采用了快响应锗晶体检波器(微波波形见图 4)。微波功率用量热法标定, 使用的量热计的响应能量范围为 0.05~0.5 J。实验结果: 微波脉宽 200 ps、微波能量  $\geq 300$  mJ/脉冲, 峰值功率  $1.1 \pm 0.15$  GW, 功率转换效率 150%。慢波结构中微波功率密度高达  $1.5 \text{ GW/cm}^2$ , 束波能量转换率为 20%~30%。

### 2.2 X 波段实验

2002 年 Anton A Eltchaninov 等进行了 X 波段超辐射 RBWO 实验<sup>[5,6]</sup>, 取得了功率转换效率超过 100% 的实验结果。慢波结构采用了带 Bragg 反射器的非均匀过模结构, 共 22 个周期, 平均直径 40 mm, 周期 13 mm, 最大波纹深度 2.3 mm。实验以 SINUS150 紧凑型电子加速器(见图 5(a))为驱动源, 脉冲宽度

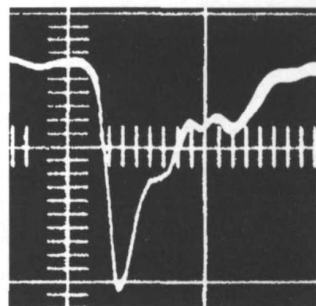


图 4 快响应锗检波器记录的微波波形(1 ns/div)

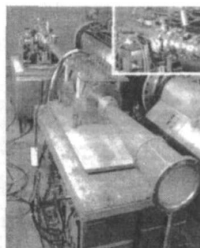


图 5 X 波段 SR 实验。(a)实验装置照片(脉冲源 SINUS150); (b)二极管电压和检波器信号波形

4ns, 二极管电压 230kV~330kV, 电流 1.6kA~2.6kA, 电子束最大功率为 0.9GW(10%). 电子束外径 34.5mm, 轴向磁场 2.4T.

实验采用热离子半导体检波器测量微波波形, 检波器信号经低色散空气绝缘的同轴电缆传输, 由 3GHz 带宽的示波器 TDS694C 记录, 得到的波形见图 5(b), 脉冲宽度为 500ps. 微波功率采用量热法标定, 量热计带有填充酒精的玻璃管, 能充分吸收微波能量. 实验测得单次脉冲的能量为 0.6J, 并且由此可以标定出微波峰值功率为 1.2GW(12%). 功率转换效率达到 140%(30%).

为验证短微波脉冲的能量空间累积效应, 2002~2003 年, Anton A Eltchaninov 等人又进行了“单程”X 波段超辐射 RBWO 实验<sup>[5,6]</sup>. 实验采用了超长的过模慢波结构(见图 6), 其横向尺寸  $D/\lambda \sim 1.2$ , 长度  $L = 65\text{cm} \sim 20\lambda$ , 周期 1.3cm, 共 50 个周

期, 波纹深度从 0.1cm 线性增大到 0.35cm.

实验装置见图 7(a), 脉冲源为 SINUS200, 二极管电压 300~330keV, 束流 5.5~6kA. 高压输入与微波管的轴线方向垂直, 强流电子束经纵向排列的薄金属栅网注入

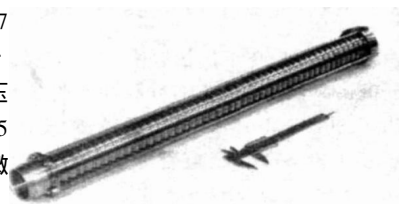
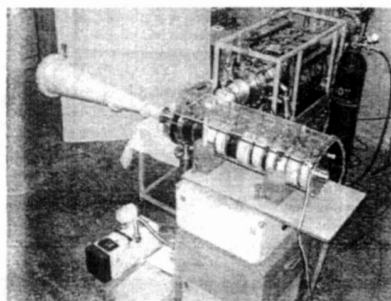
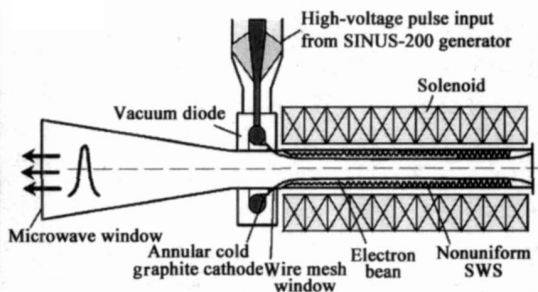


图 6 50 周期 X 波段 SR RBWO

慢波结构, 在电子收集极边缘激励起的微波脉冲逆电子束传播方向向发射极辐射(原理图见图 7(b)), 类似于通常的中等功率“单程”返波管. 脉冲螺旋管产生的磁场强度在阴极处为 1.7T, 慢波结构处为 5T.



(a)



(b)

图 7 单程短脉冲 X 波段 SR RBWO 实验. (a) 实验装置照片(脉冲源为 SINUS-200); (b) 原理示意图

二极管电压波形和检波器信号如图 8(b) 所示. 实验得到微波脉冲中心频率 9.30GHz, 脉宽 0.6~0.7ns. 量热法测得脉冲能量为 2~2.4J, 峰值功率~3GW, 功率转换效率为 150%~180%.

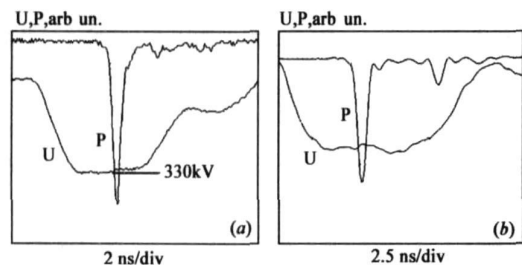


图 8 “单程” BWO 实验: 二极管电压和检波器信号图波形

2005 年, Sergei K Luybutin 等进行了低磁场下的 X 波段超辐射 RBWO 实验研究<sup>[5]</sup>, 他们采用 SINUS 作脉冲源, 电子束参数为: 束能~600keV、电流~5.5kA、脉宽 7ns、聚焦磁场 0.6T, 实验得到的微波峰值功率超过 2GW, 平均功率达到 2.5kW, 功率转换效率~60%, 重复频率达到 730Hz.

### 2.3 其他波段实验

在主要进行 X 波段和 Ka 波段实验的同时, 俄罗斯文献中也报道了几次 W 波段和 G 波段的实验结果<sup>[2,8]</sup>. 1999 年 W 波段实验得到微波峰值功率 10~15MW, 上升前沿 < 120ps, 频率 75GHz; 2000 年报道的 G 波段实验结果: 峰值功率 5~10MW, 上升沿 < 75ps, 频率 150GHz. 两次实验得到的功率值均为粒子模拟值的一半, 其原因在于高频率下快速的上升沿带

来测量上的困难, 示波器和电缆受带宽限制来不及响应. 因此实际结果应大于测量值.

### 3 超辐射相对论返波管的发展趋势及关键技术

利用基于超辐射机理 RBWO 产生快上升前沿纳秒及亚纳秒微波/毫米波已成为研制高功率微波源的一条新的技术路线. 短短五六年的时间内, 超辐射 RBWO 的峰值功率、功率转换效率迅猛提高, 在 Ka 波段和 X 波段突破峰值功率转换效率小于 100% 的极限, 辐射功率达到 GW 量级, 并实现了高重频工作. 在未来, 超辐射 RBWO 的研究可能沿以下几个方向进行: (1) 采用早期的单程 BWO 结构(如图 7), 微波能量的提取和电子束入射段在同一方向, 这样可以避免由于波导的色散引起的脉冲波形展宽, 脉冲宽度更窄, 转换效率更高, 但是由于二极管的电压注入方向与阴极发射端面垂直, 在发射端面上瞬态场建立的时间不同会导致环形电子束的不均匀, 增大了二极管的设计难度; (2) 低磁场小型化, 采用过模结构降低引导磁场, 减小整个系统的重量, 在毫米波段可能做成为台式源, 在 X 波段可实现小型化车载; (3) 采用大过模结构, 利用回旋超辐射机理作用, 可以不受尺寸的限制, 频率提高到 THz 频段, 形成高功率 THz 辐射源.

超辐射 RBWO 的发展依赖以下几种关键技术: (1) 理论上建立和完善分析 Cherenkov 超辐射的模型和理论体系, 进一步研究超辐射产生的条件和依据, 以及超辐射 RBWO 的粒子模拟水平; (2) 重频纳秒及亚纳秒脉冲压缩技术; (3) 纳秒及亚纳秒电子二极管的设计; (4) 纳秒及亚纳秒上升沿脉冲的快速响

应微波测量技术; (5) 过模 BWO 高次模输出与转换技术及模式识别技术; (6) 慢波结构高精度机械加工技术及磁场、二极管、慢波结构高同心度的结构设计。

#### 4 结束语

本文综述了基于超辐射机理 RBWO 的实验研究工作, 重点报道了 Ka 波段和 X 波段超辐射 RBWO 的最新实验进展, 对超辐射 RBWO 发展的趋势提出了个人看法, 并指出了存在的一些关键技术问题, 为开展返波管器件中的超辐射机理研究提供了详实的资料。超辐射 RBWO 的高功率、高峰值功率转换效率及快速上升前沿的优点, 决定了它在军用和民用上都有重要的应用前景。同时, 在理论方面的研究可促进电子束瞬态动力学和非线性辐射过程理论的发展。目前 RBWO 器件正处于走出实验室进入实用阶段。利用超辐射机理可以降低高功率微波源的体积和重量, 为研制机载和便携式高功率微波源提供了一条新的技术路线, 也可用于脉冲雷达和超级干扰机的研制, 同时可作为材料和生物科学研究的辐射源。随着一些理论研究和关键技术问题的解决, 超辐射 RBWO 在不久的将来还会达到一个新的水平, 获得更大的应用和发展。

#### 参考文献:

- [1] Dicke R H. Coherence in spontaneous radiation processes[J]. Phys Rev, 1954, 93(1): 99–100.
- [2] Ginzburg N S, et al. Generation of powerful subnanosecond microwave pulses by intense electron bunches moving in a periodic backward wave structure in the superradiative regime[J]. Physical Rev E, 1999, 60(3): 3297–3303.
- [3] Alexei I Klimov, et al. Highly efficient generation of sub-

nanosecond microwave pulses in Ka band relativistic BWO [J]. IEEE Trans on Plasma Sci, 2002, 30(3): 1120–1125.

- [4] D M Grishin, et al. High power subnanosecond 38 GHz microwave pulses generated at a repetition rate up to 3.5 kHz[J]. Technical Physics Letters, 2002, 28(10): 806–809.
- [5] Anton A Eltchnaniov, et al. Production of short microwave pulses with a peak power exceeding the driving electron beam power[J]. Laser and Particle Beams, 2003, 21: 187–196.
- [6] Anton A Eltchnaniov, et al. Review of studies of superradiative microwave generation in X band and Ka band relativistic BWOs (review) [J]. IEEE Trans on Plasma Sci. 2004, 32(3): 1093–1099.
- [7] Sergei K Luybutin, et al. Nanosecond hybrid modulator for the fast repetitive driving of X-band, gigawatt power microwave source[J]. IEEE Trans on Plasma Sci, 2005, 33(4): 1220–1225.
- [8] Michael I Yalandin, et al. Generation of subnanosecond microwave pulses in the range of 38–150 GHz[J]. IEEE Trans on Plasma Sci, 2000, 28(5): 1615–1619.

#### 作者简介:

胡林林 男, 1979 年出生于湖北荆州, 2005 年获中国工程物理研究院无线电物理专业理学硕士学位, 主要从事高功率微波器件研究。E-mail: hu\_linlin@yahoo.com.cn

陈洪斌 男, 1971 年出生于重庆丰都, 博士, 副研究员, 主要从事高功率微波器件及脉冲功率技术方面的研究。

马国武 男, 1981 年出生于四川凉山, 2004 年毕业于清华大学工程物理系, 获学士学位。现为中国工程物理研究院硕士研究生, 主要从事高功率微波器件研究。