

高功率窄脉冲毫米波返波管粒子模拟与实验研究*

陈洪斌^{1;1)} 胡林林¹ 刘天文¹ 孟凡宝¹ 周传明² 李爱萍¹ 张运俭¹ 陆巍¹ 杨周炳¹

1 (中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

2 (中国工程物理研究院科技委 绵阳 621900)

摘要 采用数值模拟方法优化设计出BWO(Backward Wave Oscillator)慢波结构,并在RADAN303加速器平台上进行了实验研究,在电子束电压177kV、电流785A、磁场强度1.7T的条件下,产生毫米波辐射功率18MW、频率39.8GHz、脉冲宽度3ns、模式为TE₁₁的毫米波输出。

关键词 返波振荡器 慢波结构 毫米波

1 引言

在20世纪70年代初期,返波振荡器成为最早的由强电流相对论电子束驱动的微波器件之一,有效地演示了相干高功率微波的产生^[1, 2]。在毫米波段的返波管实验中,第一次实验是俄罗斯科学家Ivanov V.S.报道^[3]的采用电压700kV、电流0.5kA的电子束产生37GHz毫米波,输出功率10MW,效率为3%。在国际上,已有许多较为发达的国家开展了此项目研究,如美国、俄罗斯、日本和德国等,并且已有较好的实验结果^[4-7]。

高功率窄脉冲毫米波具有广阔的应用前景,如用于高测距分辨率雷达,等离子体和固体的非线性现象的研究,毫米波对生命物质的影响研究等等。同时,高功率窄脉冲毫米波源还具有体积小、重量轻、可靠性高、使用方便等特点。本文目的是开展高功率窄脉冲条件下的毫米波产生技术的研究。

2 数值模拟

采用KARAT程序对返波管束波相互作用进行数值模拟,其物理模型如图1所示,由于工作于基模的正弦慢波结构难于加工,因此采用矩形慢波结构。慢波结构分为4个部分:预群聚段+非均匀+均匀+非均匀,共14个周期。二极管电压波形如图2所示,电压脉冲

幅值为170kV,脉宽约为4ns。电流幅值为700A,电子束半径2.5mm,脉冲引导磁场强度为1.7T。图3给出了电子束在时刻1.6ns, 3.1ns和4.1ns时沿z方向的P_z动量分布,从模拟过程可看出:电子束在0.55ns左右开始群聚,图3(c)中此时电子束已经产生很强烈的群聚。输出微波的频谱如图4所示,从图4中可以看出微波中心频率为39GHz;图5表示在z=8cm处进行功率流积分得到的辐射微波功率随时间的分布图,微波脉宽约为3ns,峰值功率达到25MW,功率转换效率为21%。

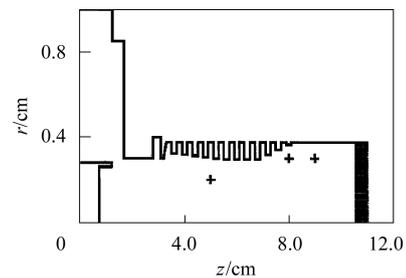


图1 物理模型

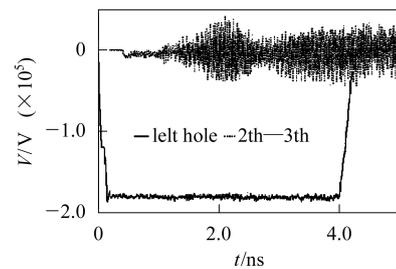


图2 模拟电压波形

2006-04-13 收稿

* 国家863计划项目资助

1) E-mail: chen_hongbin1971@yahoo.com.cn

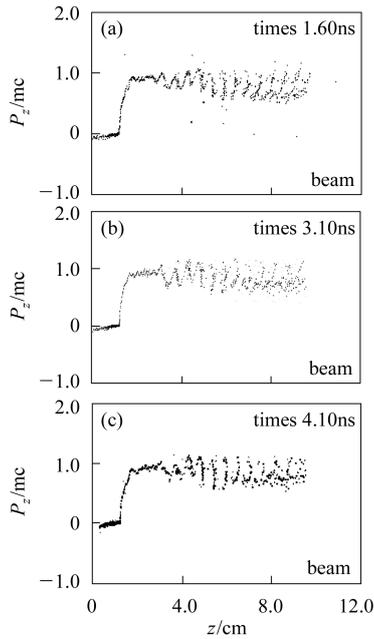


图 3 (a),(b),(c) 分别为电子束在时刻 1.6ns, 3.1ns 和 4.1ns 时沿 z 方向的 P_z 动量分布

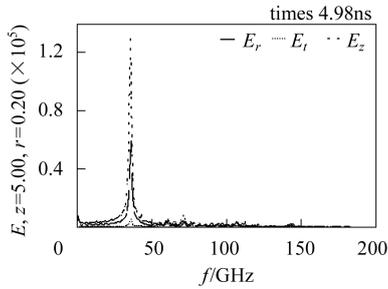


图 4 输出毫米波电场频谱图

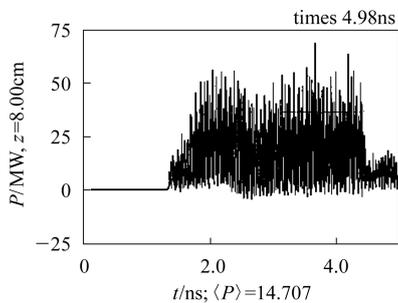


图 5 在 $z=8\text{cm}$ 处的波印廷矢量积分

3 实验设计

毫米波返波管的总体实验布局如图 6, 其工作原理如下: 在脉冲源的驱动下, 二极管阴极发射出电子束, 经阴阳极之间电场加速, 电子束在导引磁场的作用下, 与慢波结构的电磁场相互作用产生 TM_{01} 模式

的电磁波, 模式变换器将 TM_{01} 模式变为 TE_{11} 模式后经辐射天线辐射出去。

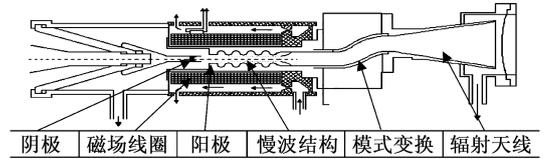


图 6 总体实验原理图

脉冲源采用从俄罗斯引进的 RADAN303, 其工作原理为: 由 Tesla 变压器给 Blumlein 线充电, 由控制触发电路产生触发信号触发 Blumlein 线主开关, 使 Blumlein 线一端短路后在负载上形成高压脉冲。在 50Ω 负载情况下, 调节 Blumlein 线主开关的击穿间隙可以控制脉冲源的输出电压, 电压范围 $10\text{--}170\text{kV}$ 。

外加纵向导引磁场强度 1.7T 。采用 1.2kHz 的有源逆变电路和升压脉冲变压器给磁场储能电容器充电, 储能电容器值为 $100\mu\text{F}$, 磁场线圈电感 $\sim 300\mu\text{H}$ 。磁场脉冲宽度几百 μs 。

二极管阴极采用冷爆炸发射石墨环形阴极。直径为 $3.5\text{--}5\text{mm}$ 。阴阳极之间的距离为 $2.2\text{--}4\text{mm}$ 。利用 KARAT 程序对返波管结构进行了数值模拟, 结构如图 7。辐射天线长度 183mm , 辐射口径 $\sim \phi 50\text{mm}$, 输出采用有机玻璃密封真空。

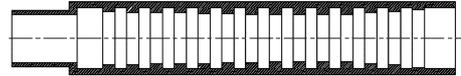


图 7 返波管慢波结构图

二极管电压采用电容分压器 + 50dB 衰减器 + 20m 射频电缆测量。电子束电流采用法拉第筒进行测试, 测试小电阻采用精密电桥进行测试, 电阻值为 0.18Ω 。色散线采用截止频率 21GHz 的标准矩形波导。由于辐射毫米波脉冲宽度 $\sim 3\text{ns}$, 采用 8m 色散线足够将两路信号分隔开。模式测量采用测量出辐射天线的水平和垂直面方向图, 根据方向图判断辐射模式。

4 实验结果

实验得到的电子束电压和电流波形如图 8。辐射毫米波频率采用色散线法进行测试, 得到两路信号的时间差为 31.4ns , 通过计算得到毫米波频率为 39.8GHz 。采用功率积分方法测试辐射功率, 得到的测试结果为最大辐射功率 18MW , 脉冲宽度 3ns , 功率转换效率 12.9% , 典型的辐射天线测试中心点的测试波形如图 9, 束压的标定结果为 177kV 。由法拉第筒测得

的束流为 785A. 归一化辐射功率与阴极外半径、阴阳极之间距离关系曲线分别如图 10、图 11 所示. 辐射天线的垂直面和水平面方向图分别为图 12 和图 13, 将测试天线旋转 90° 后, 在水平面距离辐射天线 2.6m 处测得的数值比没有旋转前小 5%—10%, 结合方向图可判断辐射的是 TE₁₁ 模式.

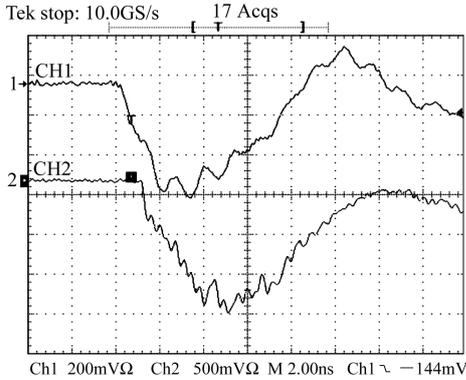


图 8 电子束电压和电流波形
CH1-电压, CH2-电流.

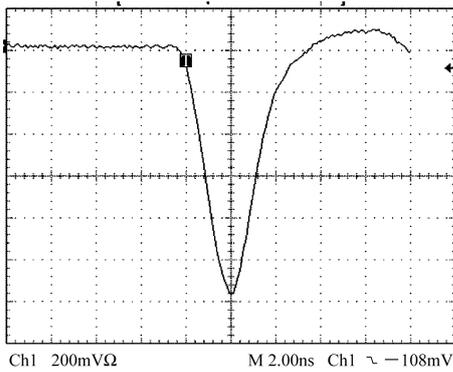


图 9 毫米波辐射波形

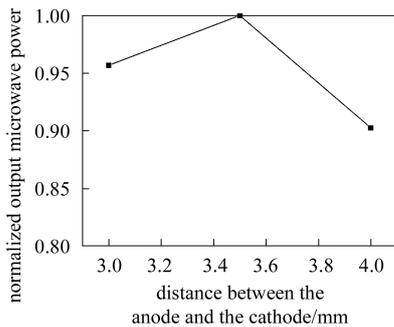


图 10 归一化辐射功率与阴阳极距离的关系曲线

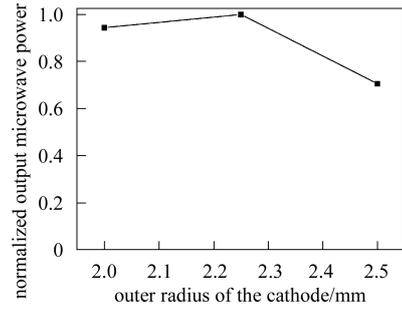


图 11 归一化辐射功率与阴极外半径的关系曲线

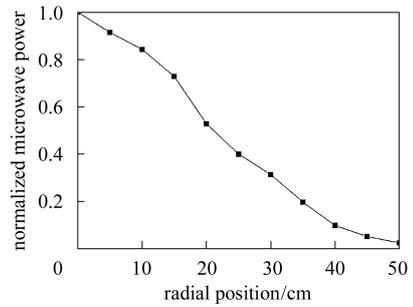


图 12 垂直方向图

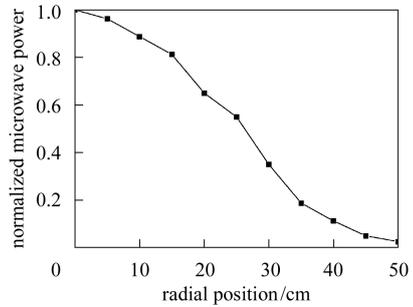


图 13 水平方向图

5 小结

本文利用 KARAT 程序对毫米波返波管进行了粒子模拟, 并对实验各个部分进行了设计, 最后在脉冲加速器 RADAN303 上开展了毫米波返波管的实验研究. 在电子束电压 177kV、电流 785A、脉宽 4ns、磁场强度 1.7T 的条件下, 实验测得辐射毫米波峰值功率 18MW、脉冲宽度 3ns、微波频率 39.8GHz、微波输出模式为 TE₁₁. 功率转换效率为 12.9%, 能在重复频率 10Hz 下运行. 实验结果与粒子模拟结果比较一致. 该项目的研究对基于超辐射机理的高功率毫米波返波管器件研究具有一定的参考价值.

对范植开副研究员和五室超宽带组所有同事支持和帮助, 表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- 1 Nation J A. Appl. Phys. Lett., 1970, **17**: 491
2 Kovalev N F et al. Phys. Rev. Lett., 1974, **33**: 1278
3 Ginzburg N S et al. Optics Communications, 2000, **175**: 139—146
4 Ginzburg N S et al. Phys. Rev., 1999, **E60**: 3297—3303
5 Ginzberg N S. Phys. Rev. Lett., 1997, **24**: 2365—2368
6 Bonifacio R et al. Phys. Rev., 1989, **A40**: 4467—4475
7 Bonifacio R et al. Opt. Comm., 1988, **68**: 369—374

Particle Simulation and Experimental Study of the High-Power Narrow-Pulse Millimeter Wave BWO*

CHEN Hong-Bin^{1;1)} HU Lin-Lin¹ LIU Tian-Wen¹ MENG Fan-Bao¹ ZHOU Chuan-Ming²
LI Ai-Ping¹ ZHANG Yun-Jian¹ LU Wei¹ YANG Zhou-Bing¹

1 (Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

2 (Department of Science and Technology, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract The BWO(Backward-Wave Oscillator) slow-wave structure was optimized by the KARAT code, and the experiment was performed at the RADAD303 accelerator flat under the condition of the electron beam with the voltage of 177kV, the current of 785A, and magnetic field of 1.7T. TE₁₁ mode millimeter wave was generated, whose peak power is 18MW, frequency 39.8GHz and pulse duration 3ns.

Key words BWO(Backward-Wave Oscillator), slow-wave structure, millimeter wave

Received 13 April 2006

* Supported by Item of National 863 Programm in China

1) E-mail: chen_hongbin1971@yahoo.com.cn