

重复运行短脉冲S波段相对论速调管放大器*

黄华¹⁾ 冯弟超 罗光耀 陈志刚 雷禄容 廖勇 张运俭 于爱民
谭杰 杨周炳 金晓 孟凡宝

(中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

摘要 介绍了利用HVG-1二极管产生的强流短脉冲电子束源,开展短脉冲重复频率为100Hz的S波段相对论速调管放大器(RKA)实验研究.利用无箔空心石墨阴极和0.82T的恒流源引导磁场,引出了电压约700kV、电流约6.5kA、脉宽(半高宽)25ns的环形电子束.该电子束经过输入腔和中间腔的调制后,得到了5kA/22ns的基波调制电流.经过输出腔后,得到了大于1GW/20ns的辐射微波,频率2.95GHz,平均功率2.4kW,效率约24%,增益34dB.没有观察到限制该GW级功率水平的S波段RKA的因素.

关键词 相对论速调管放大器 短脉冲电子束 高功率微波 重复频率运行

1 引言

近年来,由于高功率微波在定向能传输、高功率雷达、激光聚变等领域的潜在应用,促进了多种高功率微波器件的发展,而且已有多种器件产生了大于1GW的输出微波^[1].其中,相对论速调管放大器(RKA)最大输出峰值功率15GW^[2],单次实验效率已达60%^[3],是至今输出微波功率最大的两种器件之一(另外一种器件是多波契伦柯夫发生器(MWCG)).我们已进行多年的RKA研究^[4-6],在S波段长脉冲(大于100ns)中等束流(小于5kA)的条件下取得了500MW/100ns^[6,7]辐射微波.然而,许多高功率微波应用需要重复脉冲、高的平均功率,只有少数高功率微波实验能够重复脉冲运行,而且一般的重复脉冲微波功率小于1GW^[8],或者平均功率小于等于1kW.为了探索S波段RKA的重复脉冲高功率运行特性,我们利用从俄罗斯引进的HVG-1加速器平台开展了重复频率100Hz的S波段强流短脉冲电子束的RKA实验研究.下面,先介绍理论计算和粒子模拟的结果,随后描述束流调制和微波提取的实验情况.

2 总体参数计算和粒子模拟

根据HVG-1加速器条件,选择电子束参数为:电压700kV、电流7kA.根据该电子束参数,可计算出S波段RKA的高频系统和束波相互作用参数分别为:输入腔的冷测有载品质因数 Q_{LC} 为21,输出腔的冷测有载品质因数 Q_{LC} 为7.4,与原研究的中等束流RKA参数计算结果没有太大的差别^[6,7].这说明RKA具有较宽的束流束压动态范围,原设计的S波段长脉冲RKA高频系统可以适用于比较强的电子束.其中,引导束流的布里渊磁场为0.35T.

同时,采用粒子模拟程序(KARAT)对短脉冲的强流相对论电子束经过S波段RKA的高频系统的束流调制情况和微波的提取进行了模拟,结果如图1所示.其中,电子束脉冲底宽35ns(前沿10ns,后沿15ns).从模拟结果可知,35ns的强流短脉冲电子束经过两个群聚腔间隙的调制后,产生了5.2kA的基波调制电流,调制深度约74%.经过输出腔间隙后,产生了大于1GW的微波输出,其中峰值功率约1.5GW,输出微波的前沿为12ns,束波转换效率约31%.

2006-06-26 收稿

* 国家高技术研究发展计划激光技术领域基金(863-803-4-3)资助

1) E-mail: hhua0457@163.com

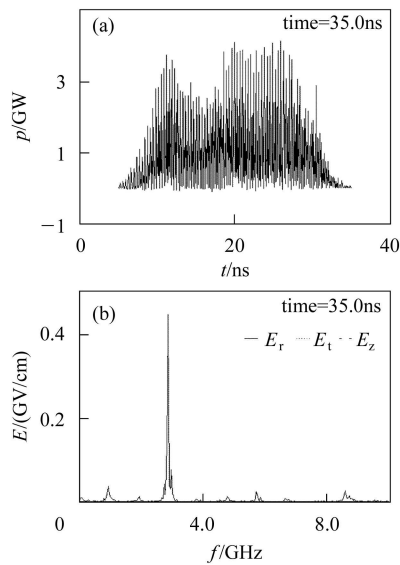


图1 S波段RKA微波提取的模拟
(a) 输出微波波形; (b) 输出微波电场频谱.

3 束流调制实验

RKA的电子束源由HVG-1加速器驱动,该加速器额定功率为9GW,电压450kV,匹配阻抗为 25Ω .为了达到RKA的导流系数及效率要求,二极管进行了非匹配的设计,因此,加速器输出电压和功率不是最佳输出,输出线路具有较大的反射,如图2所示.为了达到较强的阴极发射能力,阴极头采用了较薄的石墨材料,并用0.82T的恒流源引导磁场,从二极管引出了约700kV/6.5kA的环形电子束.

由标称值为500kW的S波段磁控管振荡器提供微波源,通过一个波导环行器和双定向耦合器后注入输入腔.均匀的电子束经过输入腔间隙驻波场的调制后,在随后的漂移管中发生群聚.在实验确定的输入腔间隙后电子束最佳群聚位置处放中间腔间隙,利用磁探针监测束流经过中间腔间隙后基波调制电流沿纵向的变化.实验结果如图2所示.在距中间腔间隙后12cm,得到了5kA的基波调制电流,调制深度约77%,束流调制脉宽22ns,与粒子模拟结果吻合得较好,在此位置插入输出腔间隙.采用该强度的基波调制电流,如果输出腔谐振并与输出负载匹配,那么从该调制电流可以得到1.8GW的最大微波输出功率($P_{out} = V_0 I_1 / 2$).另外,由调制电流的频谱可以看出,调制电流的频谱很纯,不存在长脉冲RKA研究中的自激振荡及杂模调制问题(示波器带宽4GHz),进一步验证了文献[6]分析的杂模调制原因在短脉冲电子束运行时不能激励.

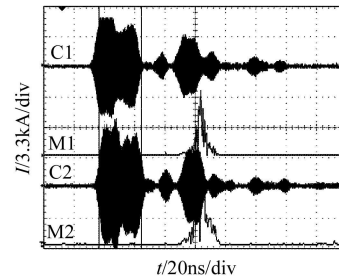


图2 电子束经过中间腔间隙后产生的调制电流
C1,C2为不同轴向位置的调制电流波形, M1,M2为相应通道的频谱, shot.2866.

4 微波提取

在S波段长脉冲RKA研究中,研制了冷测有载 Q 值为15的输出腔.显然该有载 Q 值对强流短脉冲电子束不是最佳匹配的有载 Q 值.为此我们对输出腔进行了进一步的参数调节.经过一系列的优化调节,研制出了冷测有载 Q 值约10的输出腔.另外,为了适应重复频率运行,对收集极结构进行了改进,同时加上了冷却水套,对输出腔和收集极进行冷却.整个RKA的输入腔、中间腔和输出腔浸没在均匀的引导磁场中.S波段强流短脉冲RKA实验系统的连接如图3所示.为了使微波可靠输出,采用了工作带宽较宽的TEM-TM₀₁-TE₁₁模式变换器,输出微波通过喇叭向空间辐射,在输出微波的同轴波导外导体壁上安装了一个双定向耦合器监测输出与反射的微波.在频率2950MHz时的辐射喇叭驻波系数为1.4,符合应用要求,这样通过喇叭辐射到空间的微波功率与定向耦合器的监测功率就基本相等.输出微波经过BJ-32开口波导、电缆、同轴衰减器和检波器后用宽带数字示波器显示.

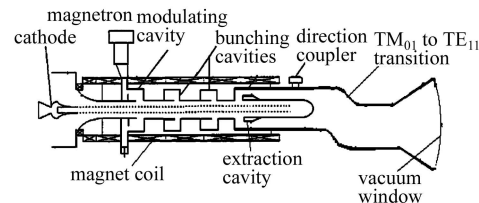


图3 S波段RKA实验结构框图

在中间腔间隙后电流群聚的最大位置放置新研制的低 Q 值输出腔,进行了微波提取及重复脉冲运行的实验研究.在最初的实验中,输出微波功率、脉宽和重复频率运行的稳定性都比较差,功率只有300MW,脉宽10ns,而且在重复脉冲50Hz和100Hz运行时有很多的漏脉冲.开始8个脉冲还比较稳定,后面的90个

脉冲工作存在较大的问题, 100Hz 时的波形如图 4 所示. 实验后拆开 RKA 输出腔及传输段、输入腔后发现, 输出同轴线的同心支撑环表面存在严重的射频击穿和烧蚀痕迹, 输入腔的密封窗表面也有严重的烧蚀痕迹. 该支撑环和密封窗是由聚四氟乙烯制成, 这种材料的耐压不高, 而且微波损耗较大, 传热性能很差. 为此, 支撑环采用了几乎没有微波损耗的硬泡沫, 对密封窗结构进行了改进.

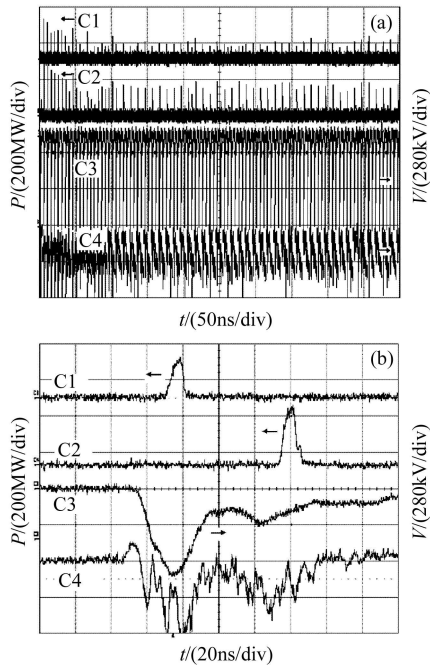


图 4 100Hz 运行不稳定时输出微波波形
(a) 序列, (b) 第二个脉冲. C1 为定向耦合器监测功率波形, C2 为辐射功率波形, C3 为束压, C4 为输入腔的反射微波.

改进后的输出微波功率、脉宽和重复频率运行的稳定性有了较大的提高. 经过空间功率积分, 辐射微波功率约 1.2GW, 脉宽约 20ns, 微波转换效率约 24%, 增益 34dB, 脉冲缩短问题得到了较大程度的改进. 重复频率 100Hz 时的波形如图 5 所示. 从图可以看出 100Hz 时输出的 100 个脉冲重复性非常好, 每个脉冲波形基本一致. 可以算出, 此时辐射输出微波的平均功率约 2.4kW, 每个脉冲能量约 24J. 同时, 我们对引导磁场强度进行了调试, 实验结果见图 6. 从图可以看出, 实验结果与粒子模拟结果基本一致, 在引导磁场 0.82T 时输出微波最大, 在增大引导磁场后输出微波功率没有明显增大, 这主要是因为引导磁场增大后电子束距管壁距离增大, 减小了束波相互作用效率.

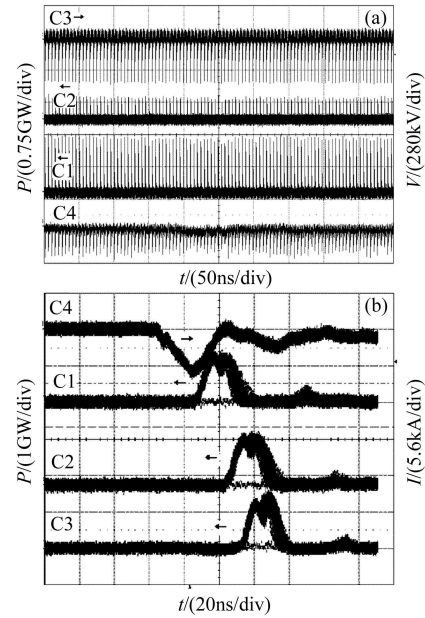


图 5 100Hz 稳定运行时强流短脉冲 RKA 的输出微波波形

(a) 序列波形, C1-定向耦合器监测功率波形, C2-辐射功率波形, C3-束压, C4-输入腔的反射微波. (b) 重叠波形, C1—C3-空间不同角度的辐射微波波形, C4-束流.

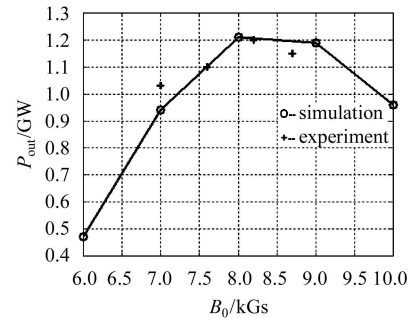


图 6 输出微波功率随引导磁场强度的变化

5 小结

利用 HVG-1 加速器二极管产生重复脉冲 100Hz 的强流短脉冲电子束源驱动 S 波段 RKA, 产生了全脉宽的调制电流和高功率微波输出. 采用无箔空心石墨阴极和 0.82T 的恒流引导磁场, 引出了电压约 700kV、电流约 6.5kA、脉宽 25ns 的环形电子束, 经过输入腔和中间腔的调制后, 得到了 5kA/22ns 的基波调制电流, 经过输出腔间隙后, 得到了 1.2GW/20ns 辐射微波输出功率, 辐射输出微波的平均功率约 2.4kW, 效率 24%, 增益 34dB. 实验证实了 S 波段 RKA 在 GW 级重复脉冲运行时不存在限制因素.

感谢丁恩燕、罗敏和陆巍给予的帮助!

参考文献(References)

- 1 Barker R J et al. High-Power Microwave Sources and Technologies. New York: IEEE Press, 2001. 45
- 2 Friedman M et al. Intense Microwave and Particle Beams. II ed. Proc. SPIE, 1992, **1629**: 8
- 3 Friedman M et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**(6): 1214
- 4 HUANG Hua, WANG Ping-Shan, WU Zhong-Fa et al. High Power Laser and Particle Beams, 1998, **10**(1): 135 (in Chinese)
(黄华, 王平山, 吴中发等. 强激光与粒子束, 1998, **10**(1): 135)
- 5 HUANG Hua, MENG Fan-Bao, CHANG An-Bi et al. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(10): 1291 (in Chinese)
- 6 HUANG Hua, FAN Zhi-Kai, MENG Fan-Bao et al. High Power Laser and Particle Beams, 2006, **18**(6): 990 (in Chinese)
(黄华, 范植开, 孟凡宝等. 强激光与粒子束, 2006, **18**(6): 990)
- 7 HUANG Hua. Theoretical and Experimental Investigation on S-band Long Pulse Relativistic Klystron Amplifier. Beijing: Beijing Graduate School, CAEP, 2006 (in Chinese)
(黄华. S波段长脉冲相对论速调管放大器设计的理论与实验研究. 北京: 中国工程物理研究院研究生部, 2006)
- 8 Levine J S, Harteneck B D. Appl. Phys. Lett. 1994, **65**(17): 2133

Repetitive Operation of an S-Band, Short Pulse Relativistic Klystron Amplifier^{*}

HUANG Hua¹⁾ FENG Di-Chao LUO Guang-Yao CHEN Zhi-Gang LEI Lu-Rong LIAO Yong
ZHANG Yun-Jian YU Ai-Ming TAN Jie YANG Zhou-Bin JIN Xiao MENG Fan-Bao

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

Abstract The operation of a repetitively pulsed relativistic klystron amplifier at 100Hz has been reported. The electron beam was reproducibly modulated to >74%. Using a 700kV, 6.5kA, 25ns electron beam and a 500kW Magnetron as inputs, we extracted 1.2GW radiation power in 20ns FWHM pulses at 2.95GHz. The average power is 2.4kW. The efficiency is 24%, and the gain is about 34dB. Limitations attributing directly to the repetitive pulsing at these levels have not been observed.

Key words relativistic klystron amplifier, short pulse electron beam, high power microwave, repetitive operation

Received 26 June 2006

^{*} Supported by National High Technology Development Program of China (863-803-4-3)

1) E-mail: hhua0457@163.com