

长脉冲X波段多注相对论速调管放大器的初步实验研究

刘振帮 黄华 金晓 袁欢 戈弋 何琥 雷禄容

Experimental study on a long pulse X-band coaxial multi-beam

Liu Zhen-Bang Huang Hua Jin Xiao Yuan Huan Ge Yi He Hu Lei Lu-Rong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 018401 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.018401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于离轴高增益速调管的X波段高功率合成技术研究

X-band high power microwave combination technology based on the off-axis relativistic klystron amplifiers

物理学报.2014, 63(23): 238405 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.238405>

0.14THz 基模多注折叠波导行波管的理论与模拟研究

Theoretical and simulation study of 0.14 THz fundamental mode multi-beam folded waveguide traveling wave tube

物理学报.2014, 63(23): 238404 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.238404>

基于三端口网络模型的折叠波导行波管注波互作用理论研究

Research on the beam-wave interaction theory of folded waveguide traveling wave tubes based on three-port network model

物理学报.2014, 63(23): 238403 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.238403>

S波段长脉冲相对论速调管放大器中杂模振荡导致的脉冲缩短抑制研究

Investigation and suppression of pulse shortening problem caused by non-working mode self-excitation in an S-band long pulse relativistic klystron amplifier

物理学报.2014, 63(23): 238402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.238402>

相对论返波管超辐射产生与辐射的数值模拟研究

Numerical simulation of generation and radiation of super-radiation from relativistic backward wave oscillators

物理学报.2014, 63(3): 038402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.038402>

长脉冲X波段多注相对论速调管放大器的初步实验研究

刘振帮[†] 黄华 金晓 袁欢 戈弋 何琥 雷禄容

(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, 绵阳 621900)

(2014年7月10日收到; 2014年8月27日收到修改稿)

设计了工作在长脉冲的X波段同轴强流多注相对论速调管放大器, 对长脉冲强流多注电子束在多注器件结构中的传输、电子束经过输入腔和中间腔后的束流调制以及经过输出腔的微波提取等过程进行了实验研究, 采用了相应的设计措施以减轻实验中出现的脉冲缩短现象, 得到了初步的长脉冲实验结果. 在输入微波功率60 kW、频率9.378 GHz、电子束电压700 kV、束流4.2 kA、轴向引导磁感应强度1 T的条件下, 重频5 Hz输出微波功率为670 MW, 脉宽89 ns, 效率为23%, 增益为40 dB, 输出微波频率与输入微波一致. 从实验上验证了几十千瓦级输入微波驱动X波段同轴多注RKA输出几百兆瓦长脉冲高功率微波的可行性, 为后续更高功率研究打下了基础.

关键词: 相对论速调管放大器, X波段, 长脉冲, 同轴多注

PACS: 84.40.Fe, 41.20.-q, 41.20.jb, 52.59.Ye

DOI: 10.7498/aps.64.018401

1 引言

相对论速调管放大器(relativistic klystron amplifier, RKA)具有高功率、高效率、输出微波相位和幅度稳定等优点, 是一类非常重要的高功率微波器件, 同时也是已知的能够产生大于10 GW高功率微波(HPM)输出的器件类型之一, 其在新型加速器、高功率雷达、新型通信系统等领域中都有广泛的应用^[1-3]. 现阶段RKA的研究主要集中在L, S等较低频段, 而应用需求的发展需要RKA往更高频段方向扩展^[4,5], 因此设计了工作在X波段的同轴多注RKA, 三维电磁粒子模拟设计实现X波段同轴多注RKA输出微波功率大于1 GW. 在仿真设计的基础上开展了相关实验研究, 在短脉冲实验研究中通过器件结构改进设计以抑制射频频击穿, 实验输出微波功率从约400 MW提高到了约800 MW^[6], 输出微波脉宽约40 ns(电子束脉宽50 ns), 没有观测到脉冲缩短现象. 在此基础上开展了

X波段同轴多注RKA的长脉冲研究, 仿真设计能够实现X波段同轴多注RKA在输出微波功率GW量级的水平上, 输出微波脉宽大于100 ns, 但是在初步的长脉冲实验中遇到了严重的脉冲缩短问题, 对调制束流和输出微波脉冲缩短的原因进行了分析, 通过实验调节和采取适当的结构设计措施, 使束流脉冲缩短问题得到了明显改善.

2 RKA器件结构

实验采用的多注RKA结构如图1所示, 图1(a)为器件y-z剖面图, 图1(b)为漂移管处的x-y剖面图和电子束在x-y面的束斑. 多注RKA设计中采用16注电子束. 为了提高器件增益和输出微波功率采用两个中间腔结构, 输入腔为单间隙单重入结构, 中间腔I为单间隙单重入结构, 中间腔II为三间隙扩展相互作用结构, 输出腔为双间隙提取结构.

[†] 通信作者. E-mail: liuzb08@gmail.com

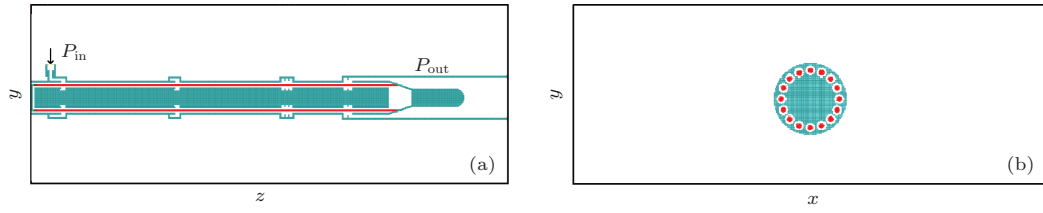


图1 多注 RKA 结构示意图 (a) 器件纵向剖面图; (b) 漂移管横向剖面图

器件输出微波功率 P_{out} 和输出微波频率 f 如图2所示, 在电子束电压 V 为 600 kV, 束流 I 为 5 kA 时, 输出微波功率为 1.3 GW, 输出微波在 120 ns 内没有出现脉冲缩短现象.

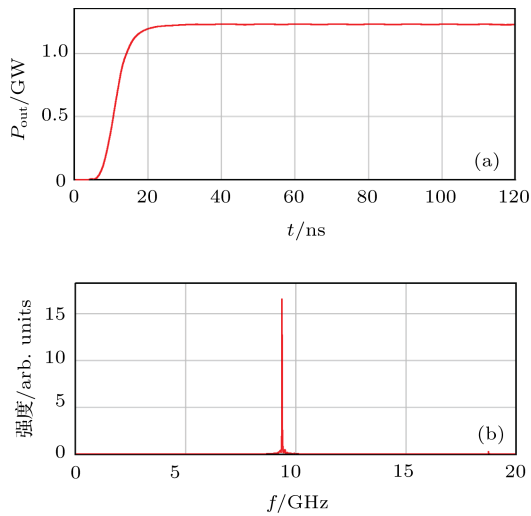


图2 输出微波功率和输出微波频率 (a) 输出功率; (b) 微波频谱

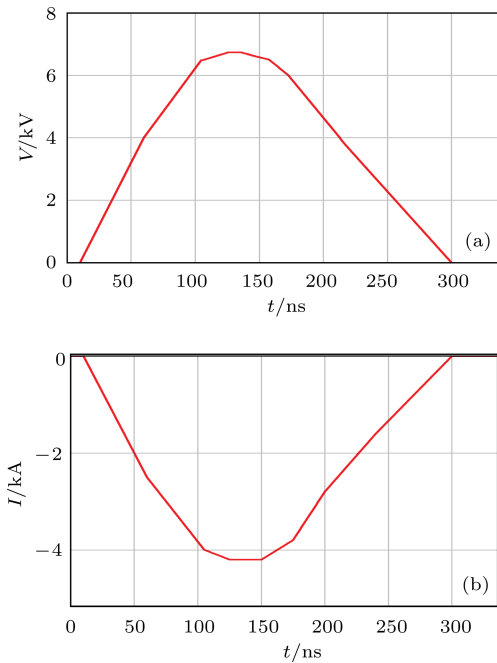


图3 粒子仿真时电子束电压和束流波形 (a) 电压波形; (b) 束流波形

为了与实验相比较, 将实际加速器产生的电子束电压和束流波形代入程序中进行仿真计算, 粒子仿真时电子束电压和束流波形如图3所示, 电子束电压为 700 kV, 束流为 4.2 kA, 束流脉冲宽度为 180 ns, 输出微波波形和频谱如图4所示.

此时输出微波功率为 1.1 GW, 输出微波的脉冲宽度约为 140 ns. 由于设计的 X 波段 RKA 存在最佳的电子束电压和束流工作区域, 当电子束电压和束流偏离该区域较远时, 器件输出微波功率较小, 而实验中电子束电压和束流波形的前后沿较长, 在前后沿部分电压和束流很小的情况下, 器件输出微波功率较低.

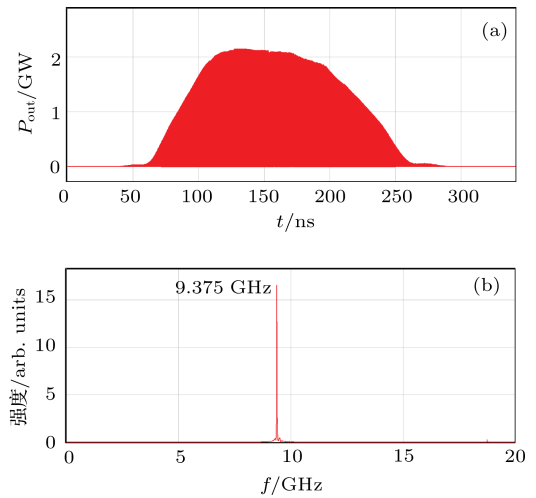


图4 输出微波功率和输出微波频率 (a) 输出功率; (b) 微波频谱

3 长脉冲实验研究

3.1 长脉冲强流多注电子束的传输

在长脉冲加速器平台上开展实验研究, 实验系统结构如图5所示, 阴极为石墨材料, 采用螺线管线圈产生磁感应强度为 1 T 的轴向磁场引导电子束在 RKA 漂移管中传输, 采用一个 X 波段的大功率速调管放大器作为微波种子源. 输出的微波通过耦合孔输出到同轴传输线 (TEM 模) 内, 随后经过

TEM-TM₀₁ 模式变换器后, 通过末端的圆锥喇叭向空间辐射, 微波辐射模式为 TM₀₁ 模式.

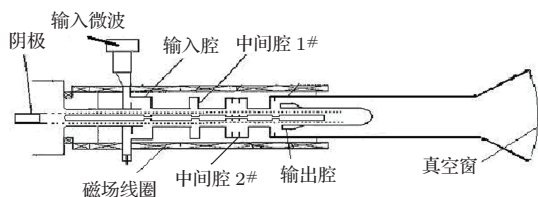


图5 多注RKA实验系统结构示意图

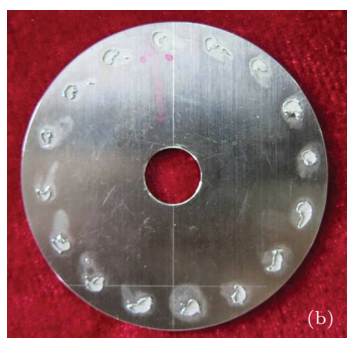
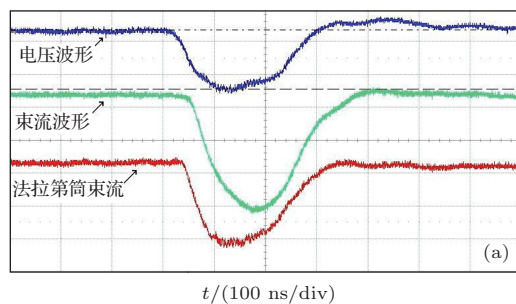


图6 电子束电压、束流波形、法拉第筒束流以及电子束束斑 (a) 电子束波形; (b) 电子束束斑

实验中设定轴向引导磁感应强度为1 T, 分别对电子束进入器件输入腔之前的束流和在器件中传输在输出腔前端的束流进行测量. 石墨阴极在长脉冲加速器上产生的电子束电压波形、束流波形以及在器件末端采用法拉第筒测量得到的束流波形如图6(a)所示, 图6(b)为末端测量得到的电子束束斑. 阴极直径为5 mm, 各电子束直径约为5 mm, 每一束漂移管通道直径为10 mm, 各电子束圆心构成的圆直径为29 mm, 同轴腔外导体内径为38.5 mm, 内导体外径为20.2 mm.

由电子束束斑可知, 16注阴极产生了16注电子束, 并且各束电子束较为均匀, 但是在测量中发现还是存在一些边缘部分电子轰击到漂移管壁上引起束流损失, 实验结束后拆开器件也可以观察到在漂移管壁存在电子束轰击的轻微痕迹, 在不加输

入微波调制的情况下, 在输出腔前测量得到的电子束束流只有进入输入腔前的约90%. 测量得到电子束电压为700 kV, 电子束束流为4.2 kA, 束流脉宽约180 ns.

3.2 实验中的脉冲缩短现象与机理分析

实验中采用磁探针监测电子束经过输入腔和中间腔后产生的调制束流波形和幅度. 初步设定输入微波功率为70 kW, 此时轴向引导磁感应强度约为0.9 T, 电子束在经过输入腔和中间腔I时产生的调制束流波形还没有产生明显的脉冲缩短现象, 但是在通过中间腔II时出现了严重的脉冲缩短现象. 输入腔和中间腔II的调制束流波形如图7所示.

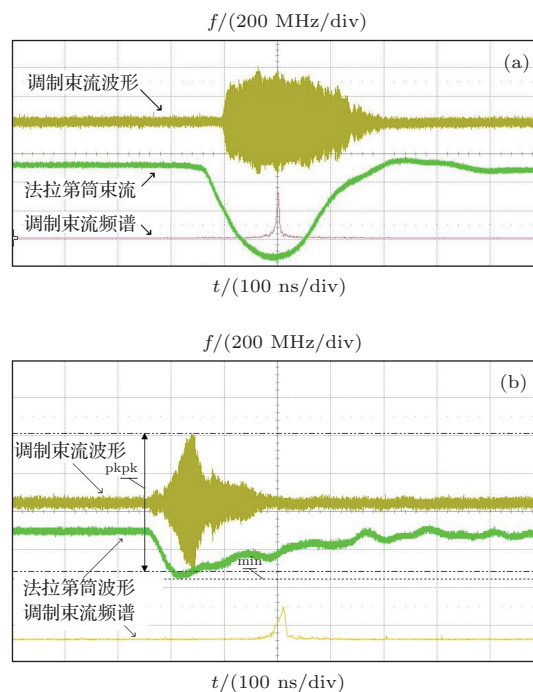


图7 调制束流波形 (a) 输入腔调制束流; (b) 中间腔II调制束流

由图7可知输入腔之后的调制束流没有出现脉冲缩短现象, 调制束流脉冲宽度约为180 ns, 与电子束束流脉宽相当. 中间腔II之后的调制束流出现了严重的脉冲缩短, 调制束流脉冲宽度只有约50 ns. 对比粒子仿真设计的结果, 调制束流的脉冲宽度应该大于140 ns, 因此可以确定中间腔II之后的调制束流出现了脉冲缩短现象. 对图7(a)与(b)法拉第筒的束流波形与幅度进行对比, 可以明显看出中间腔II之后的电子束束流幅度减小, 而且束流脉冲宽度也变窄, 此时末端束流只有约3 kA. 分别测量得到输入腔之后的调制束流约为200 A, 中间

腔II之后的调制束流约为3.5 kA. 当接上输出腔进行微波提取时, 尽管输出微波功率可达约600 MW, 但是脉冲宽度只有40 ns, 微波脉冲宽度比束流脉冲宽度窄许多, 此时输出微波波形如图8所示.

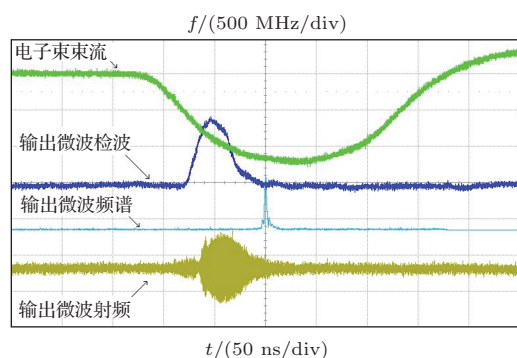


图8 输出微波波形

由图7调制束流的频谱和图8输出微波频谱可以看出, 只存在一个峰值频率为9.378 GHz, 与输入微波频率相一致, 没有杂频干扰. 改变输入微波的频率, 输出微波频率会产生相同的变化, 因此脉冲缩短现象的产生应该不是由杂频振荡而引起的.

美国洛斯阿拉莫斯国家实验室在长脉冲RKA研究中也遇到了输出微波脉冲缩短问题^[7], 他们分析出现脉冲缩短的原因是腔体间隙宽度较短, 间隙场强和电压过高, 造成电子反转和射频击穿, 使得输出微波脉宽变短. 但是根据粒子仿真计算的结果, 设计的X波段多注RKA在输出微波功率为1 GW的情况下, 中间腔和输出腔间隙电场场强最大值均低于击穿阈值800 kV/cm, 并且粒子模拟得到的电子动量分布也没有出现大量的电子反转. 在实验后拆开器件, 对腔体内部结构进行观察, 在中间腔没有发现间隙电场击穿痕迹或者电子轰击的痕迹, 但在输出腔观察到了电子束前向轰击的痕迹, 而电子束回流轰击的痕迹很少. 进一步分析发现, 在没有外部输入微波的情况下, 末端法拉第筒的束流波形和幅度没有出现明显缩短. 在外加输入微波的情况下, 严重的脉冲缩短现象是在中间腔II之后出现的, 因此分析出现脉冲缩短的原因可能是由于强调制之后的电子束产生群聚, 而电子束群聚后产生较强的空间电荷效应使电子束发生扩散, 导致电子束的有效半径增大, 部分电子束会轰击到漂移管壁和谐振腔间隙, 从而引起等离子体的产生和出现二次电子倍增等现象, 造成束流崩溃、束波互作用

的终止. 在粒子模拟设计中, 在相同的参数条件下, 并没有观察到脉冲缩短现象, 主要原因是由于仿真计算中设定电子束的束流质量较好, 而实验中石墨爆炸发射产生的电子束, 其束流质量相对较差, 同时常用的粒子仿真软件也没有考虑到电子束轰击到导体壁上产生等离子体和二次电子倍增等现象所带来的影响.

3.3 减轻脉冲缩短的措施与实验结果

根据上述脉冲缩短的机理分析, 为了抑制或减缓束流扩散和脉冲缩短现象, 增大输出微波的脉宽, 对实验系统结构进行了改进设计. 1) 优化二极管结构^[8], 使得电子尽量沿前向发射, 提高发射电子束的束流质量, 同时减小电子束的能散.

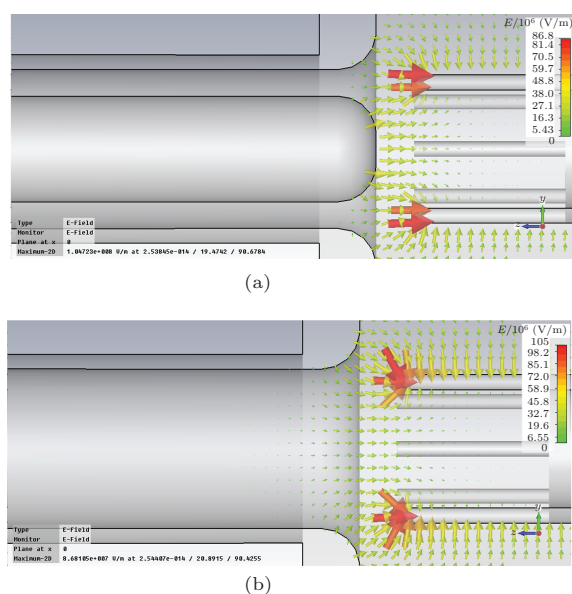


图9 二极管处电场分布 (a) 无内导体; (b) 有内导体

由图9可知, 当二极管存在内导体, 优化内导体阳极端面倒角尺寸, 且内导体处在适当的位置时, 阴极发射端面处沿径向的电场分量会减小, 沿轴向的电场分量增强, 可以减小电子发射时的径向速度, 从而可以减小电子束的扩散. 实验中适当调节二极管内导体结构以提高束流质量. 2) 增大阴极直径, 以增大电子束的直径, 减小电子束的空间电荷密度, 从而减弱空间电荷效应的影响. 3) 减小注入微波的功率, 以减弱电子束的群聚, 但是束流调制减弱, 会使得输出微波功率降低. 4) 增大轴向引导磁场的强度, 可以减缓束流扩散, 不过增加引导磁场强度是有限的.

为获得较大的输出微波功率, 既要保证束流脉冲宽度没有明显的缩短, 又要保证足够强的调制束流. 实验中对二极管结构进行了调节, 以改善电子束的束流质量. 同时适当增大阴极直径以增大电子束直径, 从而减弱空间电荷效应的影响, 增大阴极直径为6 mm, 漂移管直径保持不变, 实验测量得到电子束的电压和束流基本保持不变. 由于初步实验所使用的磁场线圈能够达到的最大磁感应强度为1 T, 因此没法再进一步增大. 对输入微波的功率和频率进行了调试, 以寻求一种最佳的实验状态, 一方面要增大调制束流的脉宽, 另一方面要保证调制束流的大小以保证输出微波功率, 经过实验调试确定输入微波频率为9.378 GHz, 输入微波功率为60 kW. 通过以上措施使得调制束流的脉冲宽度得到了明显的改善, 中间腔II之后的调制束流约为3.6 kA, 脉冲宽度约为100 ns, 达到了微波提取的要求.

此时接上输出腔进行微波提取, 同时测试了RKA的辐射微波方向图, 每隔一定角度测试一组数据, 输出微波波形和辐射微波方向图如图10所示.

由图10(a)可知输出微波频谱较纯, 没有杂频干扰. 辐射微波方向图中曲线为所设计天线的数值仿真方向图, 黑色的点为实验测量数据点. 由图10(b)可知实验测量得到的方向图与仿真计算得到的结果基本相符合. 同时开展了5 Hz重频的实验研究, 重频输出微波的波形如图11所示.

由图11可知输出微波频谱较纯, 不存在杂频干扰, 输出微波频率为9.378 GHz, 与输入微波频率相一致. 同时5 Hz重频每一炮的输出微波波形也较为一致, 测量得到输出微波的脉宽为89 ns. 对辐射微波功率采用空间功率密度积分法进行测量, 得到重频5 Hz输出微波功率为670 MW, 器件束波相互作用效率为23%.

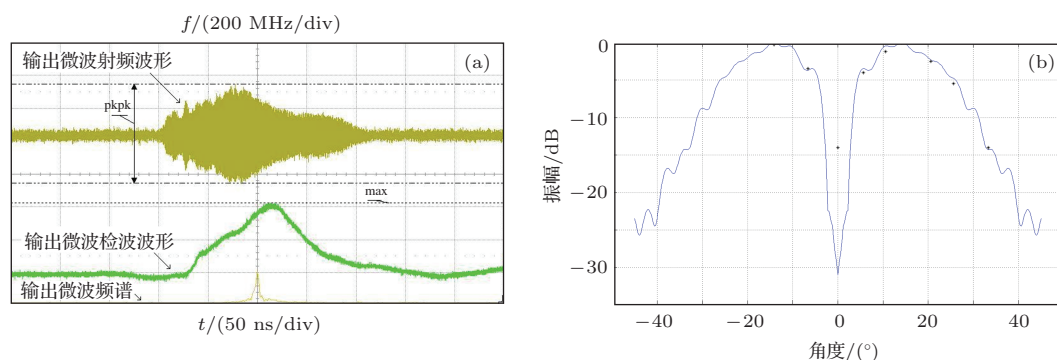


图10 输出微波波形和方向图 (a) 微波波形; (b) 微波方向图

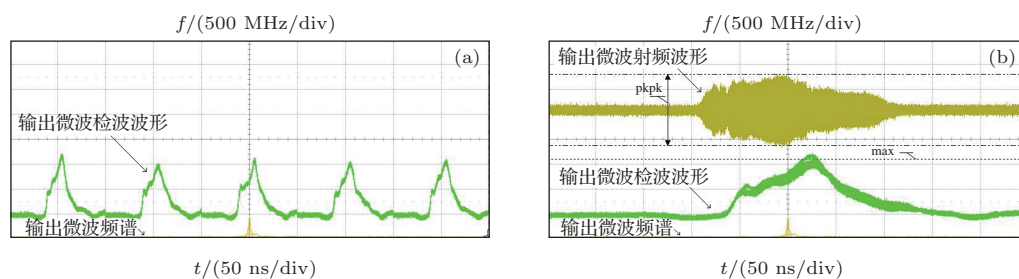


图11 重频5 Hz输出微波波形 (a) 序列波形; (b) 重叠波形

4 结 论

开展了长脉冲X波段强流多注RKA实验研究, 采取了适当的结构设计和实验措施, 有效减轻了调制束流和输出微波的脉冲缩短. 在种子源输入微波功率为60 kW, 频率为9.378 GHz, 电子束

电压为700 kV, 束流为4.2 kA, 轴向引导磁感应强度为1 T的条件下, 重频5 Hz输出微波功率为670 MW, 束波相互作用效率为23%, 器件增益为40 dB, 从实验上验证了几十千瓦级输入微波驱动X波段多注RKA输出几百兆瓦长脉冲高功率微波的可行性. 与粒子仿真设计结果相比较, 实验输出微波仍然存在脉冲缩短现象, 同时输出微波功率和器件效

率都偏低. 实验中在输入微波对电子束进行调制后, 束流损失还是较为严重, 达到输出腔的束流只有约 80%, 使得输出微波功率和器件效率降低. 同时在实现长脉冲微波输出实验后, 拆开器件观察, 中间腔没有发现射频击穿和电子束轰击痕迹, 但在输出腔间隙观察到了轻微的电子轰击痕迹, 并且输出腔间隙的不锈钢金属变成浅蓝灰色, 表明电子束扩散仍然存在, 同时电子束在输出腔激励起的高频电压还是太高. 因此下一步实验中需要对输出腔结构参数作进一步优化, 以降低间隙电压, 同时需要进一步提高调制电子束的通过率, 以提高器件效率和输出微波功率, 保证输出微波脉宽.

参考文献

- [1] Benford J, Swegle J A 2008 *High Power Microwave Second Edition* (translated by Jiang W H, Zhang C) (Beijing: National Defense Industry Press) pp293–335 (in Chinese) [Benford J, Swegle J A 2008 高功率微波 (第二版) (中译本) (江伟华, 张弛译) (北京: 国防工业出版社) 第 293—335 页]
- [2] Robert J. B, Edl S 2005 *High Power Microwave Sources and Technologies* (translated by group of High Power Microwave Sources and Technologies) (Beijing: Tsinghua university Press) pp57–63 (in Chinese) [Robert J. B, Edl S 2005 高功率微波源与技术 (中译本) (高功率微波源与技术翻译组译) (北京: 清华大学出版社) 第 57—63 页]
- [3] Pasour J, Smithe D, Ludeking L 2003 *The American Institute of Physics Conf. Proc* **691** 141
- [4] Luo J R, Cui J, Zhu M, Guo W 2013 *Chin. Phys. B* **22** 067803
- [5] Ding Y G 2010 *Design, Manufacture and Application of High Power Klystron* (Beijing: National Defense Industry Press) pp57–60 (in Chinese) [丁耀根 2010 大功率速调管的设计制造和应用 (北京: 国防工业出版社) 第 57—60 页]
- [6] Liu Z B, Huang H, Jin X, Zhao Y C, He H, Lei L R, Chen Z F 2013 *Physics of Plasmas* **20** 113101
- [7] Fazio M V, Haynes W B, Carlst En B E 1994 *IEEE Trans. Plas. Sci.* **22** 740
- [8] Liu Z B, Jin X, Huang H, Chen H B Wang G P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 248401 (in Chinese) [刘振帮, 金晓, 黄华, 陈怀璧, 王淦平 2012 物理学报 **61** 248401]

Experimental study on a long pulse X-band coaxial multi-beam

Liu Zhen-Bang[†] Huang Hua Jin Xiao Yuan Huan Ge Yi He Hu Lei Lu-Rong

(Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 10 July 2014; revised manuscript received 27 August 2014)

Abstract

An X-band coaxial multi-beam relativistic klystron amplifier is designed in order to increase the output microwave power and the operating frequency of the amplifier tube. Based on the results from PIC simulation, the experiment is performed on the long pulse accelerator. In the experiment, the transmittal and bunching of electron beam are analyzed, and then the amplifier is driven by a beam of 4.2 kA at 700 kV, and an external source injects microwave power of 60 kW into an input cavity, then 670 MW microwave power of 5 Hz repeating frequency is extracted, the amplifier gain is about 40 dB, the pulse width is 89 ns, and the conversion efficiency is 23%. The experiment proves that several tens kW-level input power can drive the X-band coaxial multi-beam relativistic klystron amplifier to generate several hundred MW-level long pulse output power.

Keywords: relativistic klystron amplifier, X-band, long pulse, coaxial multi-beam

PACS: 84.40.Fe, 41.20.-q, 41.20.jb, 52.59.Ye

DOI: 10.7498/aps.64.018401

[†] Corresponding author. E-mail: liuzb08@gmail.com