

相对论扩展相互作用腔振荡器重复 频率稳定运行研究

黄 华,雷禄容,甘延青,鞠炳全,罗光耀,金 晓

(中国工程物理研究院应用电子学研究所,四川绵阳 621900)

摘 要: 分析了相对论扩展相互作用腔振荡器(Relativistic Extended Interaction Cavity Oscillator)初次实验中存在的模式竞争和重复频率运行不稳定等问题.通过改进扩展相互作用腔振荡器的长度,抑制了模式竞争问题;优化设计和选择了三轴提取腔和收集极结构与材料,解决了重复脉冲 REICO 的高功率稳定运行问题,减轻了脉冲缩短问题,稳定运行重频从 15Hz 提高到 100Hz,辐射微波脉宽由 20ns 增加到 38ns.采用 900kV/16kA/45ns 的电子束驱动 REICO,实现了峰值功率 4.1GW、频率 2.85GHz、脉宽 38ns、重频 100Hz 的辐射微波稳定输出,功率效率 26%,能量效率 22%,辐射微波平均功率 16kW.

关键词: 扩展相互作用腔;振荡器;三轴输出腔;高功率微波;重复频率运行

中图分类号: TN125.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)08-1690-04

High Power and Repetitively Pulsed Operation of a Relativistic Extended Interaction Cavity Oscillator

HUANG Hua, LEI Lu-rong, GAN Yan-qing, JU Bing-quan, LUO Guang-yao, JIN Xiao

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

Abstract: The mode competition and amplitude instability of Relativistic Extended Interaction Cavity Oscillator encountered with in the initial experiment were investigated in this paper. The modulation mode-competition was overcome by adjusting the modulation cavity gap width. The pulse repetition rates increasing from 15Hz to 100Hz and the output microwave pulse width increasing from 20ns to 38ns were improved after optimizing the structures of the electron beams collection and the triaxial output cavity. Using a 900kV, 16kA, 45ns electron beam, 4.1GW radiated power was extracted in 38ns FWHM pulses at 2.85GHz and 100pps. The power efficiency is 26%, and the energy efficiency is 22%. The radiated average power is 16kW.

Key words: extended interaction cavity; oscillator; triaxial output cavity; high power microwave; repetitively operation

1 引言

在高功率微波(HPM)器件研究中,已有多种器件产生了大于 1GW 的输出微波^[1],比如返波管振荡器(BWO)、磁绝缘线振荡器(MILO)、渡越管振荡器(TTTO)^[2,3]、相对论速调管振荡器(RKO)^[4,5]和相对论速调管放大器(RKA)^[6]等.其中,BWO、MILO 和 TTTO 等器件由于束流调制和群聚同时进行,具有器件长度小、结构相对简单等优点,同时由于束流群聚和微波提取连为一体,也具有不便于分别优化和控制、束流群聚能散大、工作模式和稳定性的控制相对较难等缺点.美国空军实验室研究的注入锁定重入腔型 RKO^[5],起振时间大于 100ns,不利于短脉冲运行.RKA 由于束流调制、群聚和微波提取分区域进行,使得 RKA 具有电子群聚能散低、

分区域优化、模式控制容易、工作稳定、束波转换效率高等优点,同时具有器件长度较长、作用间隙电场很强、电子束触发动抖要求高等缺点.

综合上述几种 HPM 器件的优点,同时尽量克服其中缺点,作者在文献[7]中首次提出了一种基于渡越时间效应的相对论扩展相互作用腔振荡器(REICO),该器件起振时间短($< 5\text{ns}$)、结构紧凑、能量效率高(22%).在 2007 年 3 月初次开展 20GW 特斯拉型加速器的电子束驱动 S 波段 REICO 研究中^[7],辐射微波功率达到 3.4GW,但作者遇到了明显的模式竞争、脉冲缩短和重复频率运行不稳定等问题.经过近一段时间的分析研究,发现了造成模式竞争、脉冲缩短和重复频率运行不稳定等问题的主要根源,并提出了相应的解决方法,开展了实验研究,使 REICO 的微波辐射功率、脉冲宽度和

稳定运行的重复频率得到了明显提高.本文主要分析首轮实验中存在的问题和改进实验研究结果,详细的理论设计见文献[7].

2 最初实验结果分析与优化设计

REICO 的实验系统框图如图 1 所示.加速器产生的脉冲高压驱动环形阴极产生电压 900kV、束流 16kA、脉宽 45ns 的空心电子束,在磁场强度为 1.2T 的恒流源引导磁场作用下穿过 3 间隙扩展互作用腔,由于渡越时间效应,电子束将在腔内激励很强的 π 模电场,使电子束发生调制和群聚,随后电子束经过一段漂移管的进一步群聚后穿过三轴提取腔,把电子束的功率转换为微波功率后从同轴线输出,最后微波经过 TEM-TM01-TE11 模式转换器和圆锥喇叭后向空间辐射.其中,整个系统的真空度大于 10^{-2} Pa.

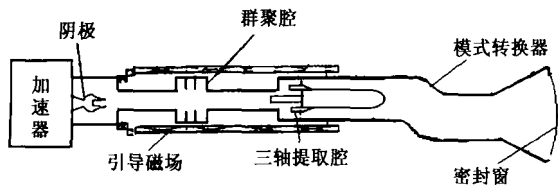


图1 REICO实验系统框图

在首轮 REICO 的束流调制实验中发现,调制束流波形为三角形,调制束流脉宽比二极管束流脉宽短许多;而且,电子束参数进行较小的改变,调制束流波形和频谱会产生较大的变化,经常会激励频率为 2.64GHz 的调制束流,其幅度有时接近主模频率 2.86GHz 的调制幅度,有时幅度小许多,如图 2 所示.该现象得到了粒子模拟的证实.经过冷腔计算和粒子模拟分析发现^[7],由于强流强相对论效应(原针对设计 REICO 的电子束参数为 500kV/5kA),对于相同的扩展互作用腔长度,随着电子能量的增加,相应的电子速度也增加,电子的渡越角减小,使得主模 π 模的净能量交换(即电子束能量转换为电磁场能量)减小,而 $2\pi/3$ 模的净能量交换增大,从而使得调制腔激励了较强幅度的 $2\pi/3$ 模工作,而主模 π 模调制幅度降低,最终造成两种模式的竞争、调制波形杂乱和调制束流脉冲缩短等问题.因此,作者增加

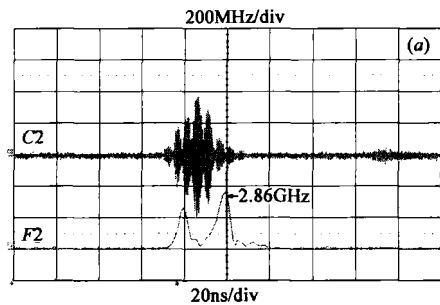


图2 REICO产生的调制束流波形及频谱最初结果

了三间隙调制腔的渡越角、即增加了调制腔的腔长,使 π 模的净能量交换系数达到最大、而使 $2\pi/3$ 模式的净能量交换系数达到最小.优化模拟结果如图 3 所示.由图 3 可以看出,3 间隙调制腔使 IREBs 产生了很强的束流调制和群聚,杂频调制得到了有效抑制,最大基波调制束流接近 10kA.

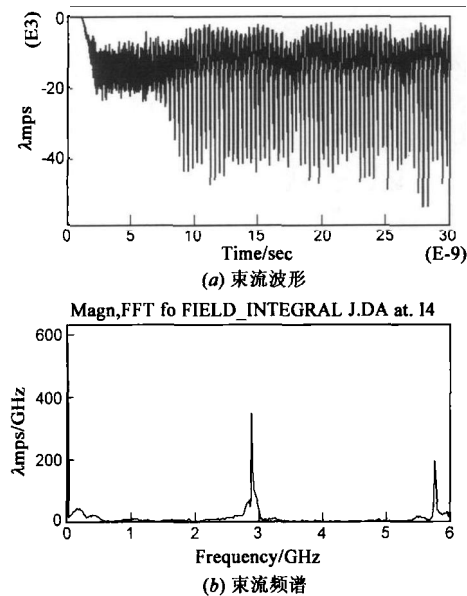
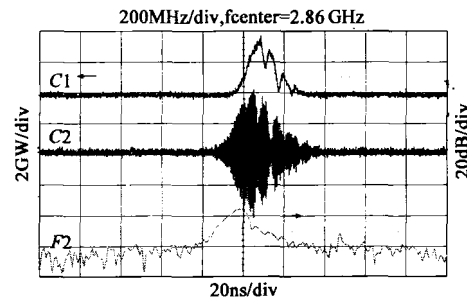


图3 3间隙调制腔的束流调制优化模拟波形

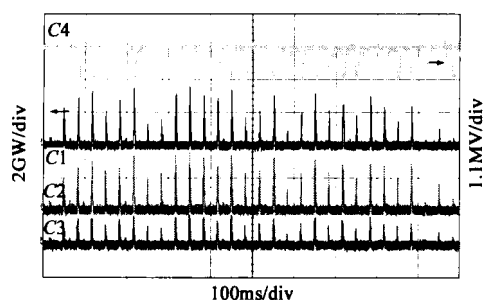
在最初的 REICO 辐射微波单次运行实验中,输出微波脉宽只有 20ns(如图 4 所示),而且从输出微波频谱以及空间不同位置的辐射微波波形可以看出,输出微波模式比较纯,频率为 2.64GHz 的 $2\pi/3$ 模没有输出,这主要是因为该模式与 3 轴输出腔不谐振(输出腔的谐振频率为 2.86GHz),而且模式转换器对该频率还有一定的滤波作用.



(C1-C2——空间不同角度的辐射微波波形, F2——C2通道的频谱)

图4 REICO单次运行时输出微波最初结果

在最初的重复脉冲电子束驱动 REICO 的微波实验中,低重频电子束驱动时获得了幅度较稳定的辐射微波.当 REICO 重复运行频率提高到 30Hz 时,辐射微波幅度参差不齐(如图 5 所示),有 16 个输出微波脉冲幅度比较大,另外 14 个微波脉冲幅度非常小.实验后拆开 3 轴输出腔^[8]发现,在腔间隙两端有明显的射频击穿痕迹,不锈钢金属腔体已经变成蓝黑色,另外还有少量电



(C1-C3——空间不同角度的辐射微波波形, C4——电压)

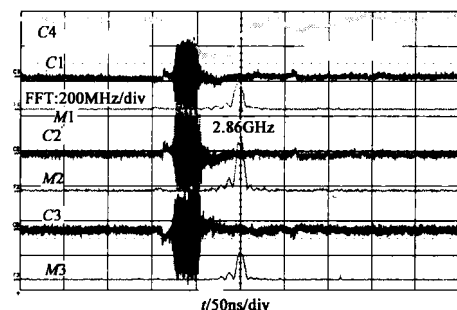
图5 REICO重频30Hz运行时的辐射微波最初结果

子回流轰击的痕迹.初步计算分析,输出功率为3.5GW时,腔间隙电场达到650kV/cm,电压达到1.1MV.这样高的间隙电场和电压,射频击穿和电子反射是很容易发生的.另外,收集极为不带水冷却的石墨,它紧靠输出腔间隙放置,这种结构尽管对提高束波转换效率比较有利,但是高重频运行时石墨产生的杂质、二次电子和等离子体等物质会造成高频间隙短路.因而,高间隙电场和石墨收集极两种因素的综合影响造成了输出微波脉宽和幅度的不稳定问题.因此,为了提高REICO高重频工作的稳定性,需要进一步改进提取腔和收集极的几何结构和电参数.

3 改进后实验结果

3.1 单次运行

针对第一轮REICO束流调制实验中存在的问题,结合高频计算程序和粒子模拟程序,分析判断了束流调制波形杂乱、两种模式调制而且不稳定的主要根源是扩展互作用调制腔的间隙距离偏小造成的.采用PIC程序对扩展互作用调制腔的渡越角进行了进一步的优化(如图3所示),根据优化结果,重新研制了扩展互作用调制腔,开展了束流调制的实验研究,实验结果有了较大改进(包括束流调制脉宽和幅度都得到了提高),得到了最大基波调制束流9.5kA,脉宽约40ns,调制束流频谱比较纯,调制束流脉冲缩短和模式竞争问题得到了明显抑制,波形如图6所示.



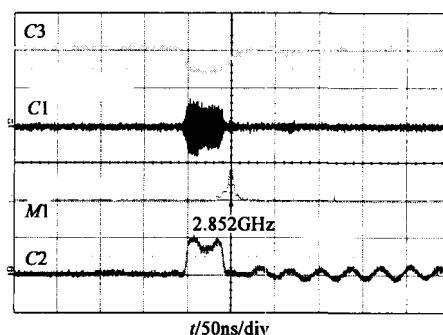
(C1-C3——不同漂移距离的调制束流波形, M1-M3——相应通道信号的频谱, C4——电压)

图6 电子束经过3间隙调制腔后的调制束流波形改进结果

针对第一轮实验中输出微波射频击穿和电子反射

等问题,对3轴输出腔的有载 Q 值、渡越角进行了调节,增大了输出腔的微波输出耦合孔,降低输出腔的有载 Q 值,使输出腔的有载 Q 值由12降低到7,同时适当减小输出腔的渡越角.这样,即时输出腔输出5GW的微波功率,间隙电场只有约500kV/cm,间隙电压小于0.9MV,这样高的间隙电场对于脉宽45ns的短脉冲电子束是安全的.另外,对原引导磁场线圈结构进行了改进设计,研制了带水冷、更低电阻的引导磁场线圈,产生的最大引导磁场约1.2T,比原线圈磁场强度提高了约20%,增强的引导磁场更有利于强流电子束的稳定传输.

在以上几个方面的综合改进下,开展了第二轮REICO的微波辐射实验研究,并经过对REICO运行的电子束参数(包括束流阻抗、束流厚度和外径等参数)、漂移管长度、引导磁场大小和位形等参数进行了详细优化调节实验后,使REICO单次运行的辐射微波脉宽有了较大增加,最大脉宽达到了约42ns,辐射微波峰值功率4.2GW(根据辐射天线增益计算微波功率为4.5GW),波形如图7所示.



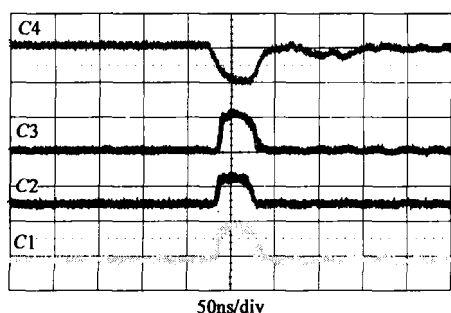
(C1-C2——空间不同角度的辐射微波波形, M1-C1通道信号的频谱, C4——电压)

图7 REICO改进后单次运行辐射微波波形

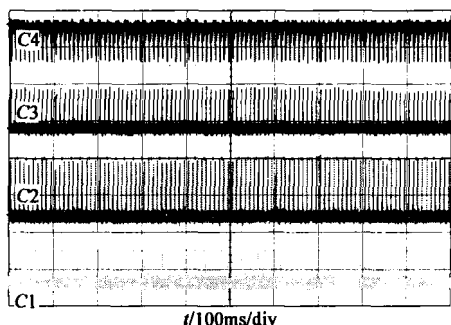
3.2 重复频率运行

在REICO单次运行输出微波比较理想后,开展了重复频率实验研究.通过选择多种收集极材料的类型和结构(选区原则是:能忍耐瞬态高温轰击,不造成收集极材料严重损坏、真空污染、不产生大量的二次电子和气体、进而造成器件束波相互作用终止等因素)发现,不锈钢和钨收集极在重复频率增加到40Hz时发生了烧蚀和形变,产生的金属蒸汽对输出腔产生了较大的污染,输出微波也不稳定.紧靠输出腔间隙放置的石墨收集极在电子束重频100Hz运行时虽然不会产生烧蚀现象,但是紧靠输出腔间隙放置的石墨产生的等离子体和粉尘容易造成输出腔间隙射频击穿,使得输出微波不稳定.为此,实验中尽量让石墨收集极远离输出腔间隙,距离由2cm增大到10cm,这样电子束轰击石墨产生的等离子体和粉尘在电子束运行时间内不会扩散到输出腔间隙,并经过多次老炼后,使REICO的重复频率稳

定运行性能有了较大的提高,微波功率幅度和脉宽比第一轮也有了很大改进,重频 10Hz、20Hz、40Hz、50Hz、100Hz 电子束驱动时 REICO 的辐射微波波形都非常稳定,重频 10Hz、100Hz 运行波形如图 8 所示,辐射微波功率和脉宽与单次运行基本相同:辐射微波峰值功率 4.1GW,脉宽 38ns,辐射微波最大平均功率 16 kW,微波频率 2.85GHz,功率效率 26%,能量效率 22%。



(a) REICO改进后重频10Hz运行时的重叠波形



(b) 重频100Hz运行时的序列波形

(C1-C3——空间不同角度的辐射微波波形, C4——电压)

图8

4 小结

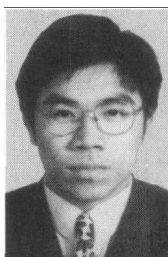
成功研制了可以重频 100Hz 运行的高功率 REICO 器件.该振荡器采用 3 个紧密耦合的圆柱腔作为电子束的起振与调制腔(工作模式为 π 模),束流经过一段漂移管的群聚后采用三轴微波提取腔输出微波.该 REICO 具有起振时间快、能量转换效率高和结构紧凑等优点.采用无箔空心阴极和 1.2T 的恒流源磁场从 20GW 特斯拉型加速器引出电压约 900kV、束流 16kA、脉宽 45ns 的环形电子束驱动 REICO,重频 100Hz 运行时稳定辐射输出了 4.1GW 的微波峰值功率,微波脉宽 38ns,辐射微波平均功率 16kW,频率 2.85GHz,功率效率 26%,能量效率 22%,重复脉冲运行稳定.实验证实该 REICO 重频 100Hz 运行时不存在技术限制,对于更高峰值功率和效率运行的 REICO 器件有待进一步的深入研究.

参考文献:

[1] Barker R J, Schamiloglu E. High Power Microwave Sources and Technologies[M]. New York: IEEE Press, 2001: 38 - 73.

- [2] Fan Zhi-kai, Liu Qing-xiang, Chen Dai-bing, Tan Jie, Zhou Hai-jing. Theoretical and experimental researches on C-band three-cavity transit-time effect oscillator[J]. Science in China Ser. G Physics, Mechanics and Astronomy, 2004, 47(3): 310 - 329.
- [3] 范植开. 渡越管振荡器的理论研究与原理性实验[D]. 北京: 中国工程物理研究院研究生部, 1999. 9 - 41.
- [4] Friedman M. Self-modulation of an intense relativistic electron beam[J]. J Appl Phys, 1984, 56(9): 2459 - 2474.
- [5] Hendricks K J, Haworth M D. Increasing the RF energy per pulse of an RKO[J]. IEEE Trans on Plas Sci 1998, 26(3): 320 - 327.
- [6] Huang Hua, Feng D C, Luo G Y, CHEN Zh G, Lei L Y, Liao Y, Tan J, Jin X, Meng F B. Repetitive Operation of an S-band, 1 GW relativistic klystron amplifier[J]. IEEE Trans on Plas Sci 2007, 35(3): 384 - 387.
- [7] 黄华, 甘延青, 雷禄容, 金晓, 张永辉, 鞠炳全. S 波段相对论速调管振荡器研究[J]. 物理学报, 2008, 57(3): 1765 - 1770.
- Huang H, Gan Y Q, Lei L R, Jin X. Investigation on an S-band, relativistic klystron oscillator[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(3): 1765 - 1770. (in Chinese)
- [8] 黄华, 孟凡宝, 范植开, 李正红. 相对论速调管放大器三轴输出腔的研究[J]. 物理学报, 2006, 55(10): 5344 - 5348.
- Huang H, Meng F B, Fan Z K, Li Z H. Analyze and design on triaxial output cavity in a relativistic klystron amplifier[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(10): 5344 - 5348. (in Chinese)

作者简介:



黄 华 男, 1970 年 10 月出生于重庆合川, 博士, 研究员, 现在中国工程物理研究院应用电子学研究所微波技术研究中心工作, 主要从事高功率微波器件研究工作, 获部级科技进步二等奖 5 项, 三等奖 3 项, 在国内外期刊发表论文 20 余篇, 合作专著一本.

E-mail: hhua0457@163.com



雷禄容 女, 1975 年出生于四川省自贡市, 硕士, 助理研究员, 现在中国工程物理研究院应用电子学研究所微波技术研究中心工作, 主要从事高功率微波器件研究工作.