

长脉冲相对论扩展相互作用腔振荡器的初步研究^{*}

黄 华[†] 罗 雄 雷禄容 罗光耀 张北镇 金 晓 谭 杰

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

(2009 年 3 月 6 日收到; 2009 年 5 月 14 日收到修改稿)

提出并研制成功了基于渡越时间效应、并开耦合孔锁定的长脉冲、重复频率运行的相对论扩展相互作用腔振荡器 (relativistic extended interaction cavity oscillator, REICO). 将理论分析、数值模拟和实验研究紧密结合, 分析了长脉冲 REICO 实验中模式竞争和脉冲缩短的根源, 提出了开耦合孔的三间隙扩展相互作用腔结构, 有效抑制了长脉冲束流调制的模式竞争和脉冲缩短问题, 使调制束流脉宽由 60 ns 提高到 140 ns, 调制电流幅度由 2 kA 提高到 5 kA, 通过优化 REICO 参数, 使器件的辐射微波功率和效率有了明显提高. 采用 580 kV/4.8 kA/210 ns/20 Hz 的电子束驱动 S 波段 REICO, 实现了峰值功率大于 400 MW、频率 2.89 GHz、脉宽大于 160 ns、重复频率 20 Hz 的辐射微波稳定输出, 功率效率 27%, 能量效率 23%. 同时, 初步开展了注入微波锁定的 REICO 研究, 也获得了功率大于 400 MW、脉宽大于 100 ns 的微波辐射.

关键词: 脉冲缩短, 高功率微波, 重复频率运行, 长脉冲

PACC: 5240M

1. 引 言

2007 年, 作者综合分析了多种高功率微波 (HPM) 器件的工作特点^[1], 比如, 相对论速调管放大器 (RKA) 的优点: 束流调制、群聚和微波提取分区进行, 电子群聚能散低, 可以分开优化束流调制系统和微波提取系统, 便于模式控制、系统分区优化, 束波转换效率高, 工作稳定; 另外, RKA 也具有器件较长、作用间隙电场很强、需要电子束具有较小的时间抖动等缺点. 相对论返波管 (BWO)、磁绝缘线振荡器 (MILO) 和渡越时间振荡器 (TTO) 具有束流调制和群聚同时进行、器件长度小、不需要电子束的同步控制、结构相对简单等优点; 同时它们也具有束流群聚和微波提取连为一体、不利于分别优化和控制、束流群聚能散大, 工作模式和稳定性的控制相对较难、对工作参数的变化比较敏感、而且 BWO 和 TTTO 需要的引导磁场较高等缺点. 综合以上两类器件的优点, 同时尽量克服两类器件的缺点, 文献[2]和文献[3]提出并研制成功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). 该器件结构紧凑, 束波转换效率高, 起振

时间快, 需要的引导磁场不高 (束流参数 1 MV/20 kA 的 S 波段 REICO 需要的引导磁场 ~ 1 T). 采用 20 GW 特斯拉型加速器产生的电子束驱动 S 波段 REICO, 辐射输出了 4.1 GW/38 ns/100 Hz 的微波, 功率效率 26%, 能量效率 22%^[4].

在该研究成果的鼓励下, 作者采用长脉冲电子束源驱动 REICO 开展了实验研究, 研究中遇到了与长脉冲 RKA 实验研究中的同样问题^[5,6]: 调制束流和输出微波脉冲缩短、模式竞争等问题. 经过分析, 发现了造成束流脉冲缩短的主要根源, 并提出了开耦合孔的三间隙扩展相互作用腔振荡器 (如图 1), 有效抑制了调制束流脉冲缩短问题、增强了调制束流深度. 同时, 选择合适尺寸的耦合孔, 降低扩展相互作用腔的有载 Q 值, 并注入一定功率的微波, 可以使该 REICO 输出微波频率和相位稳定. 本文主要对这些方面的研究情况进行介绍.

2. 未开孔的长脉冲相对论扩展相互作用腔振荡器

采用在 20 GW 特斯拉型加速器平台上成功驱动的三间隙扩展相互作用腔振荡器^[2-4], 并采用相同

^{*} 国家高技术研究发展计划项目资助的课题.

[†] E-mail: hhua0457@163.com

振荡幅度,最终造成电子反射、射频击穿和模式竞争等问题,从而使得调制束流脉冲缩短.由此作者提出,如果在三间隙扩展互作用腔调制器的侧壁上开一个耦合孔(如图 1 所示)与加载匹配负载的矩形波导相接,降低 π 模和 $2\pi/3$ 模的品质因数,特别是降低非主模 $2\pi/3$ 模的品质因数,不但可以避免在腔内形成过强的电场,而且可以抑制非主模的快速建立.另外,如果合理选择该开孔调制腔的有载 Q 值,还可以有效抑制自激振荡,而从耦合孔注入微波激励振荡,使该 REICO 变为可以注入锁定频率和相位的微波器件,这样,该 REICO 可以用于 HPM 的功率合成.该研究获得了初步成功.

3.1. 粒子模拟

采用粒子模拟程序对开耦合孔的三间隙扩展互作用腔振荡器的束流调制和微波提取情况进行了研究.3 间隙调制腔和提取腔的几何尺寸与文献[2]和[4]基本相同,模拟采用的电子束参数为:束压 $V_0 = 600$ kV,束流 $I_0 = 5$ kA,电子束半径 $r_b = 2.5$

cm,厚度 3 mm,引导磁场强度 0.9 T,电压束流前沿都设为 1 ns.采用 PIC 程序对强流相对论电子束经过 3 间隙调制腔的束流调制与群聚情况进行了模拟,同时,对调制腔的直流渡越角(间隙距离)、电子束尺寸、电子束阻抗、引导磁场等参数进行了优化.模拟结果发现,在第一个腔侧壁开宽度为 3 mm 的环形耦合孔后(此时 π 模的有载 Q 值为 35, $2\pi/3$ 模的有载 Q 值为 12),调制束流频谱更纯,如图 3(b)所示,而调制束流强度没有明显降低,达到了 3.3 kA,与没开耦合孔的调制腔相比,束流起振时间有所加长,由 8 ns 增加到 10 ns.如果从环形耦合孔注入功率 300 kW 的微波,调制束流强度有所增大,达到 4 kA.在扩展互作用腔调制器后调制束流最大位置放置同轴微波提取腔(腔体参数与文献[6]相同),进行微波提取的粒子模拟.经过对束流群聚距离、渡越角、电子束等参数的优化,输出微波功率最大达到 800MW(波形如图 4 所示),束波转换效率 33%.在耦合孔注入一定强度的微波,可以进一步增大输出微波功率.

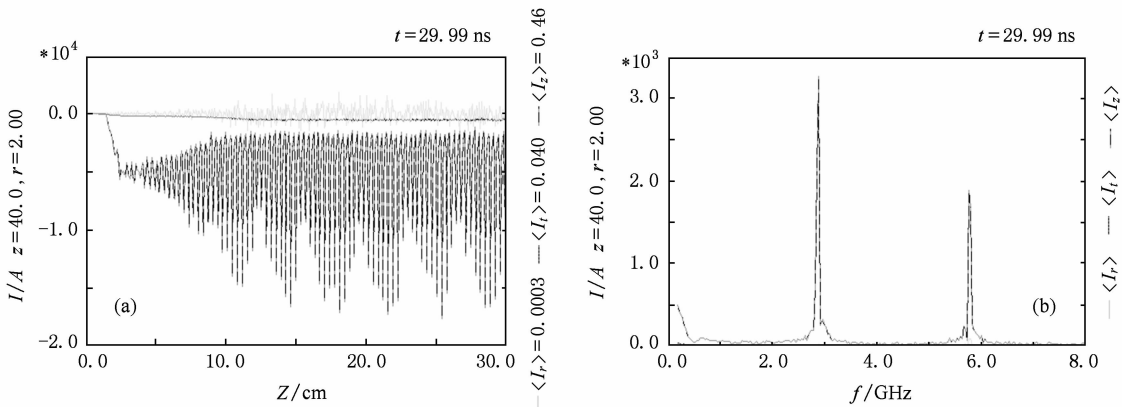


图 3 开孔 3 间隙扩展互作用腔产生的调制束流模拟波形 (a)束流波形;(b)束流频谱

3.2. 束流调制和单次运行微波实验

根据粒子模拟结果,设计了开耦合孔的三间隙扩展互作用腔振荡器调制腔,开展了束流调制和微波辐射实验.其中,耦合孔与 RKA 输入腔结构基本相似^[6],在第一间隙调制腔的前端壁上开一张角 90°的扇形孔与 BJ-32 的扁波导相耦合,波导与负载或磁控管微波种子源相接.通过调节耦合孔的径向尺寸,使开孔谐振腔的有载 Q 值达到了模拟设计要求值 35.采用磁探针阵列监测了束流经过开耦合孔的三间隙扩展互作用腔产生的调制束流,实验波形

如图 5(a)所示.经过标定,最大调制束流强度为 5 kA,脉宽 140 ns,束流脉冲缩短现象和竞争问题得到了明显的减轻,调制束流强度也有了较大幅度的增强.

在调制束流最大位置附近放置新研制的有载 Q 值约 8 的同轴输出腔,开展了微波辐射实验.实验系统结构布局如图 1 所示.其中同轴输出腔的输出微波经过同轴线后,再经过圆波导和 S 型的模式转换器后,使 REICO 输出微波由模式 TEM-TM₀₁-TE₁₁ 转换后,接圆锥喇叭向空间辐射.采用多个开口的 BJ-32 波导喇叭阵列接收辐射微波,采用接收喇叭阵列

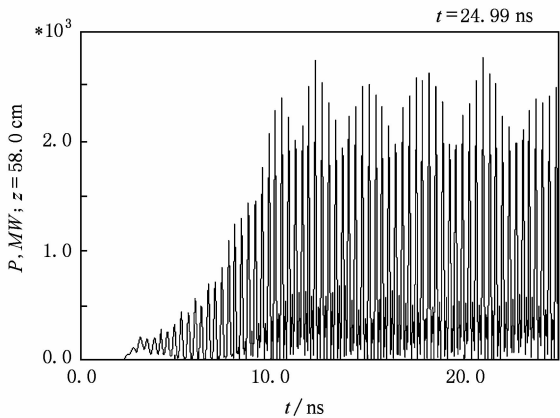


图 4 开孔的三间隙扩展相互作用腔振荡器输出微波模拟波形

的功率密度积分计算辐射微波功率. 同时,对电子束尺寸、电压、束流等参数、引导磁场强度、调制腔和提取腔间的漂移管长度等参数进行了优化调节,辐射微波功率和脉宽有了明显的改善,功率由 300 MW 提高到了 400 MW 以上,脉宽由 90 ns 提高到了 160 ns 以上,输出微波脉宽比起初改进后的调制束流脉宽还宽. 单次运行的辐射微波波形如图 5(b) 所示. 经过标定测试,空间积分的辐射微波最大功率 $P_{\text{out-max}} \geq 400$ MW,微波脉宽 $t_{\text{half}} \geq 160$ ns,微波频率 $f_0 = 2.89$ GHz, 3 dB 带宽 $\Delta f = 30$ MHz,功率转换效率 27%,能量效率 23%. 辐射微波最大脉宽可达 194 ns,此时能量效率 25%,脉冲能量约为 100 J/脉冲.

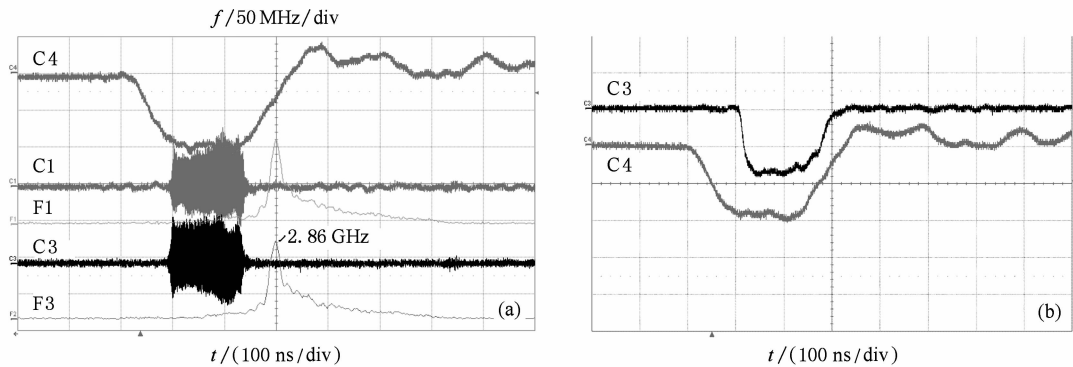


图 5 电子束经过开孔扩展相互作用腔振荡器后产生的调制束流波形(a)和辐射微波波形(b)((a) C1, C3: 调制束流波形, (b) C3: 辐射微波检波波形, F1, F3: 相应通道的频谱, C4: 电压)

3.3. 重复频率运行

采用在短脉冲 REICO 研究中研制成功的收集极,开展了长脉冲重复频率 REICO 实验研究. 先后采用重复频率 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz 的电子束驱动开耦合孔的 REICO,得到了幅度非常稳定的微波辐射. 重频 10 Hz 和 20 Hz 的辐射微波波形如图 6

和图 7 所示. 从图 6 可以看出,在驱动 REICO 的加速器电压稳定条件下,辐射微波幅度也非常稳定,单个微波脉冲功率与单次运行基本一样,达到 400 MW/157 ns 以上. 从图 7 可以看出,重频 20 Hz 运行时,加速器电压幅度出现一定的波动,REICO 辐射的微波幅度也出现了一定的波动,此时平均辐射微波功率和脉宽达到 400 MW/187 ns.

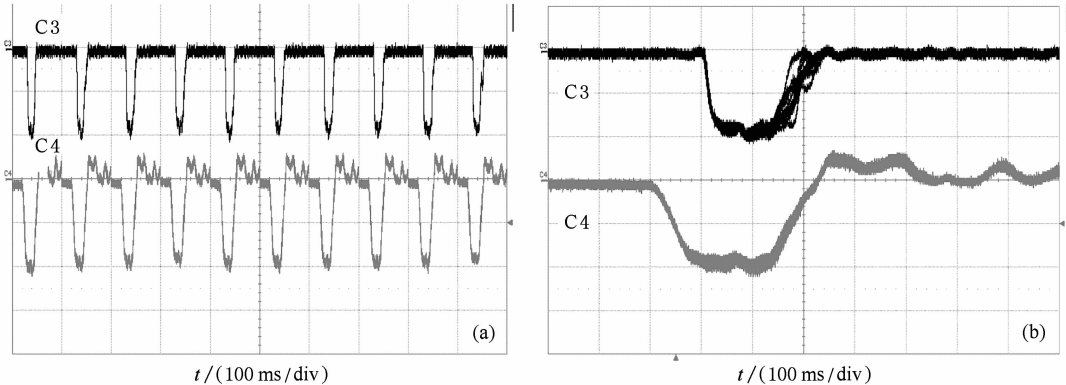


图 6 开耦合孔的扩展相互作用腔振荡器重频 10 Hz 运行时的序列波形(a)和重叠波形(b)(C3: 辐射微波检波波形, C4: 电压波形)

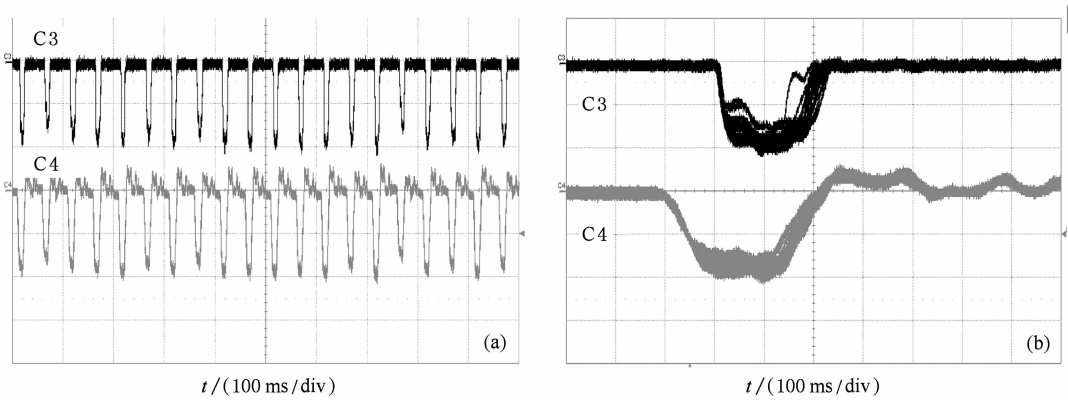


图 7 开耦合孔的扩展相互作用腔振荡器重频 20 Hz 运行时的序列波形(a)和重叠波形(b)(C3:辐射微波检波波形, C4:电压波形)

4. 注入锁定扩展相互作用腔振荡器的初步实验

在上节的开孔扩展相互作用腔振荡器情况下,从外部耦合孔注入功率约 500 kW、频率接近振荡器频率的微波,开展了外部注入微波对 REICO 的频率和相位进行锁定的实验研究. 初步实验结果发现,该 REICO 很难锁定,为此进一步增大了耦合孔的径向尺寸,尽量抑制自激振荡的产生. 当耦合孔径向宽

度增大到接近 2 cm 时,腔体的有载 Q 值约 20, REICO 自激振荡产生的微波功率有了很大程度的降低,大约降低了 6 dB,此时,再注入微波,REICO 的输出微波功率有了较大程度提高,微波功率接近 400 MW,脉宽约 180 ns,如图 8(a)所示,采用鉴相器测量输出与输入微波的相移波形如图 8(b)所示. 从图 8(b)可以看出,REICO 的相移得到一定程度的锁定,不过,该注入锁定 REICO 的相位稳定性与 RKA 相比还有较大距离. 因此,该注入锁定 REICO 还有待深入研究.

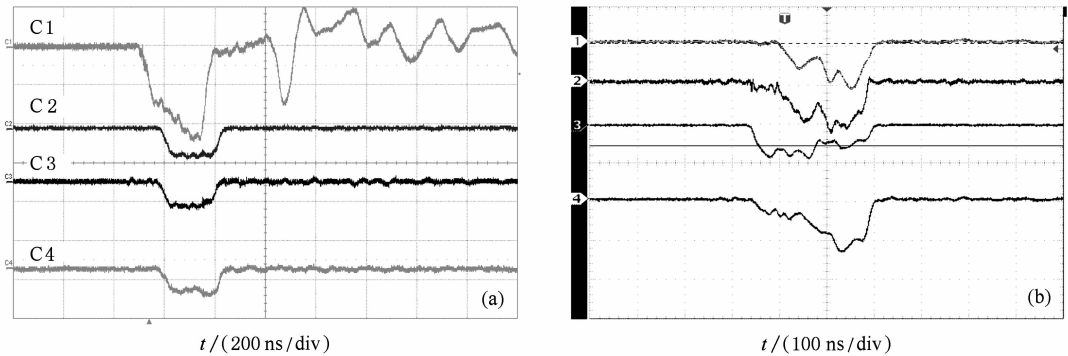


图 8 注入锁定 REICO 辐射微波波形(a)和输出输入微波的鉴相波形(b)((a) C1 为束流, C2—C4 为空间不同方位的辐射微波检波波形)

5. 结 论

首次提出并研制成功了长脉冲强流电子束驱动、开耦合孔的 S 波段相对论扩展相互作用腔振荡器. 采用在三间隙扩展相互作用腔振荡器侧壁开耦合孔的结构,有效抑制了长脉冲 REICO 中的调制束流脉

冲缩短问题和模式竞争问题,克服了射频击穿问题,使调制束流脉宽由 60 ns 提高到 140 ns,并使基波调制束流强度由 2 kA 提高到 5 kA. 采用长脉冲螺旋线型加速器的电子束驱动开孔的 REICO,单次运行得到了 500 MW/164 ns 的微波,重频 20 Hz 运行得到了 400 MW/187 ns 辐射微波,功率效率 27%,能量效率 23%.

[1] Barker R J, Schamiloglu E 2001 *High-Power Microwave Sources and Technologies* (New York, IEEE) 77

[2] Huang H, Gan Y Q, Lei L R, Jin X, Ju B Q, Xiang F, Feng D C, Liu Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1765 (in Chinese) [黄 华、甘延青、雷禄容、金 晓、鞠炳全、向 飞、冯弟超、刘 忠 2008 物理学报 **57** 1765]

[3] Gan Y Q, Huang H, Lei L R, Jin X 2008 *High power laser and particle beams* **20** 815 (in Chinese) [甘延青、黄 华、雷禄容、金 晓、张永辉、鞠炳全 2008 强激光与粒子束 **20** 815]

[4] Huang H, Jin X, Lei L Y, Gan Y Q 2008 *The 35th Conference of IEEE Trans on Plasma Science* (Calstrulse, Germany)

[5] Huang H, Fan ZH K, Tan J, Ma Q SH, Gan Y Q, Chang A B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1129 (in Chinese) [黄 华、范植开、谭 杰、马乔生、甘延青 2004 物理学报 **53** 1129]

[6] Huang H, Fan Z K, Meng F B, Tan J, Luo G Y, Lei L R, Jin X 2006 *High power laser and particle beams* **18** 990 (in Chinese) [黄 华、范植开、孟凡宝、谭 杰、罗光耀、雷禄容 2006 强激光与粒子束 **18** 990]

[7] Friedman M, Krall J, Lau Y Y, Serlin V 1990 *Rei. Sci. Instrum* **61** 171

Investigation on a long pulse relativistic extended
interaction cavity oscillator^{*}

Huang Hua[†] Luo Xiong Lei Lu-Rong Luo Guang-Yao Zhang Bei-Zhen Jin Xiao Tan Jie
(Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)
(Received 6 March 2009 ; revised manuscript received 14 May 2009)

Abstract

The mechanism of modulation and rf extraction of an S-band on an injection locked, long pulse, relativistic extended interaction cavity oscillator (REICO) is studied in this paper by experiment, theory, and simulation. The origin of pulse shortening and mode competition of the REICO driven by the long pulse intense relativistic electron beams (IREBs) is explored. The modified structure of REICO with coupler is proposed for the first time, which suppresses the pulse shortening and mode competition remarkably. The pulse width of the modulated IREB is increased from 60 ns to 140 ns, and the magnitude of the modulated IREB is increased from 2 kA to 5 kA. The microwave radiation power and efficiency are promoted obviously after adjusting the parameters of the IREB and the leading magnetic field. Using a 580 kV, 4.8 kA, 210 ns electron beam with 1.1 T leading magnetic field, more than 400MW radiated power was extracted in 160 ns FWHM pulses at 2.89 GHz. The power efficiency is 27% , and the energy efficiency is 23% . The radiated power is 400 MW and the FWHM pulse is 184 ns when pulse repetition frequency of IREBs is 20 Hz. The experimental results are well consistent with the simulations. The injection locked REICO generates high power microwave of power 400 MW with pulse width 100 ns.

Keywords: pulse shortening, high power microwave, repetitively operation, long pulse
PACC: 5240M

^{*} Project supported by the National High Technology Development Program of China.
[†] E-mail: hhua0457@163.com