

锁频锁相的高功率微波器件技术研究

黄华 吴洋 刘振帮 袁欢 何琥 李乐乐 李正红 金晓 马弘舸

Review on high power microwave device with locked frequency and phase

Huang Hua Wu Yang Liu Zhen-Bang Yuan Huan He Hu Li Le-Le Li Zheng-Hong Jin Xiao Ma Hong-Ge

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 088402 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172684

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172684>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[螺旋线行波管三维返波相互作用理论与数值模拟](#)

Study of three-dimensional nonlinear backward-wave interaction model and numerical simulation for helical traveling wave tube

物理学报.2017, 66(2): 028401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.028401>

[Ka波段带状注相对论扩展相互作用速调管放大器的分析与设计](#)

Analysis and design of a Ka-band sheet beam relativistic extended interaction klystron amplifier

物理学报.2015, 64(10): 108404 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.108404>

[长脉冲X波段多注相对论速调管放大器的初步实验研究](#)

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

物理学报.2015, 64(1): 018401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018401>

[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>

综述

锁频锁相的高功率微波器件技术研究*

黄华[†] 吴洋 刘振帮 袁欢 何琬 李乐乐 李正红 金晓 马弘舫

(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)

(2017年12月18日收到; 2018年1月28日收到修改稿)

综述了中国工程物理研究院应用电子学研究所锁频锁相的高功率微波器件最新研究成果, 主要包括稳频稳相的相对论速调管放大器和注入锁相的相对论返波管振荡器. 针对高功率长脉冲相对论速调管研究中遇到的问题, 介绍了该放大器的束波相互作用特点、杂频振荡抑制、脉冲缩短、高频段高功率运行、高增益等物理、设计与实验中的关键技术研究概况, 使其功率、相位稳定性、增益等性能有了显著提高, S波段环形单注相对论速调管实现了高功率稳相输出, 重频 25 Hz 运行时输出功率大于 1 GW, 脉宽大于 150 ns、相位波动 18°, 高增益运行时在注入微波功率数 kW 条件下也实现类似功率和相位水平; 采用同轴多注器件结构, 突破了速调管高频段运行条件下高效率电子束引入和高功率束波转换技术等难题, 使 X 波段相对论速调管在注入功率 30 kW 条件下实现了功率大于 1 GW 的放大输出, 效率为 34%, 相位波动为 15°. 在掌握相对论返波管技术的基础上, 利用返波管的高效率和结构紧凑的优点, 开展了注入调制电子束锁相的相对论返波管研究, 采用百 kW 级的种子微波实现了对 GW 量级输出微波的相位锁定. 该研究结果对功率合成、粒子加速和多功能雷达等技术具有重要的推动作用.

关键词: 高功率微波, 锁频锁相, 相对论速调管放大器, 相对论返波管振荡器

PACS: 84.40.Fe, 52.35.-g, 52.35.Mw

DOI: 10.7498/aps.67.20172684

1 引言

高功率微波 (high power microwave, HPM) 器件技术是 20 世纪 80 年代高功率脉冲功率技术与电真空器件技术相结合的产物, 它是采用脉冲功率源产生的强流相对论电子束驱动电真空器件激励的 HPM 辐射. 20 世纪 90 年代, 国外多种 HPM 器件产生了大于 1 GW 的输出微波^[1], 到了 21 世纪初, 我国的 HPM 器件研究也达到了相应的技术水平^[2]. 产生 HPM 的器件种类很多, 按产生微波辐射的机理可分为^[3] 1) 契伦柯夫辐射器件: 电子穿过慢波结构时电子运动速度高于慢波结构中相速时产生的电磁辐射, 如相对论返波管振荡器 (relativistic back-wave oscillator, RBWO)、相对论行波管放大器、相对论磁控管; 2) 渡越辐射器件: 当电子穿过

象导电栅网或导电间隙等媒质的扰动时, 便产生了渡越辐射, 如相对论速调管放大器 (relativistic klystron amplifier, RKA) 和 3) 韧致辐射器件, 当电子在外部磁场和/或者电磁场中振荡时便会发生韧致辐射, 如回旋管、自由电子激光和虚阴极振荡器等. 按输出微波的相位和频率特点可分为锁频锁相 HPM 器件 (如 RKA 和注入锁定 RBWO) 以及 HPM 振荡器, 由于锁频锁相 HPM 器件的输出微波频率或相位可通过改变注入微波的参数进行调控, 从而使得该类 HPM 器件在功率合成、粒子加速和多功能雷达等领域具有较好的应用前景, 在 HPM 研究领域得到了大力发展.

中国工程物理研究院应用电子学研究所从 1990 年以来陆续开展了多个波段、多种类型的 RKA 研究, 针对研究中遇到的问题, 持续深入开展

* 国家自然科学基金 (批准号: 11475158, 11605191) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: huanghua10@caep.cn

了RKA的束波相互作用机理、杂频振荡抑制、脉冲缩短、高频段高功率运行、高增益等物理、设计与实验技术研究^[4-25],使RKA的功率、相位稳定性、增益和效率等性能有了显著提高.而且,后续多家单位也陆续开展了多种类型的RKA研究^[26-30].在深入掌握RBWO物理的基础上,利用RBWO的效率高和结构紧凑的优点,提出并开展了注入调制电子束锁相的BWO研究,成功得到了实验验证^[31-33].本文简要综合阐述这些方面的S和X波段最新研究成果.

2 稳频稳相的相对论速调管放大器技术

2.1 环形束RKA

对于工作于低频微波波段(如L, S波段)的高功率RKA,虽然要求工作模式约束在谐振腔内、传输电子束的圆柱漂移管尺寸不能太大,但漂移管能够满足功率大于10 GW以上的环形电子束传输.所以,低频段的高功率RKA一般采用环形电子束驱动圆柱漂移管结构的圆柱或单重入腔RKA.同时,RKA设计中还有两个考虑:第一,为了提高RKA的功率容量、减轻空间电荷效应对束波转换效率和电子反射的不良影响,漂移管直径在满足主模截止条件下一般选择尽量大一些;第二,为了提高RKA输出微波频谱纯度、降低杂频振荡和相位波动的风险,一般对于输出中等高功率(1—2 GW)、采用功率约100 kW的微波种子源和3腔RKA放大即可实现预定的性能参数.对于第一个设计考虑,由于强流长脉冲电子束在谐振腔内会激励高阶模式,一般经过大于100 ns的电子束激励时间后很容易在器件内激励起幅度超过主模的高阶模振荡,造成主模工作的抑制或终止,如果输出腔设计不合理,引起电子反射,会加速自激振荡的形成.该现象轻微时引起输出微波相位波动,严重时造成输出微波脉冲缩短、频率完全失去控制.针对这种问题,项目组开展了深入的物理机理、模拟和实验研究,提出了多种优化抑制措施^[5-8,11,12,15,16].同时,深入分析了强流脉冲电子束特性驱动RKA的瞬态过程及其相位波动特性,经过优化设计高频系统参数,降低了电子束波动对RKA输出微波幅度和相位的波动灵敏度,提高了RKA输出微波的稳定性^[13,14].

S波段3腔RKA结构如图1所示.其中,高频系统由输入腔、中间腔和输出腔等3个谐振腔组成,输入微波通过矩形波导注入到输入腔并对电子注进行速度调制,电子注在后面的漂移管中群聚,经过中间腔的再调制后,高度群聚的电子注进入输出腔中,电子束的部分动能转换为高频场能量并输出到外接负载,实现利用注入电子注的能量来放大微波能量的目的.在起初实验中观测中间腔后电子束的交变电流波形如图2所示,其中电子束电压700 kV、电流6 kA,电子束脉宽190 ns.交变束流中除了基波电流分量外,还有较大的3.6 GHz杂频分量,其中杂频分量主要集中在包络的后半部分,基波电流分量在杂频分量出现后迅速减小,使得输出微波脉宽只有77 ns.粒子模拟中发现了同样的问题,经过进一步的RKA冷腔分析发现,由于漂移管尺寸过大,在输入腔和中间腔之间形成了一个可以相互耦合传输、谐振频率为3.6 GHz的杂模场,该杂模场在谐振腔间隙为 TM_{11} 模式,在漂移管中为 TE_{11} 模式,可以在两腔间传输,形成一个激发杂模的正反馈回路,其振荡原理与两腔振荡器相同.

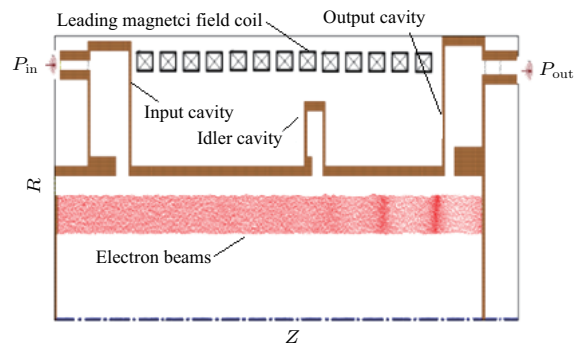


图1 S波段3腔RKA结构图

Fig. 1. Schematic diagram of three-cavity RKA for S-band.

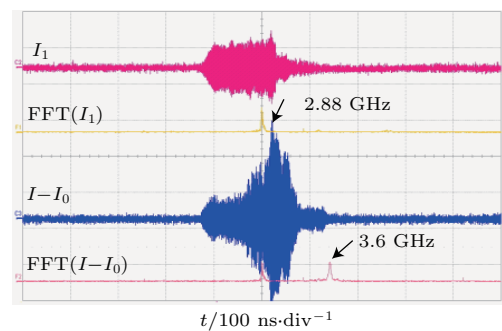


图2 杂频振荡激励时的调制束流波形

Fig. 2. Modulation current waveform excited by multi-frequency oscillation.

因此, 根据抑制振荡器的原理, 如果增大振荡腔的损耗, 可以显著减缓或抑制杂频振荡的激励. 为此, 我们在输入腔和输出腔间的漂移管中插入损耗大于 10 dB 的微波损耗材料^[11,13,14], 或者在腔间加入一个带环形电子束通道槽、同时隔离微波的挡环^[12], 都使自激振荡和主模的脉冲缩短问题得到了明显抑制, 其中加损耗材料前后的调制束流波形结果如图 2 和图 3 所示.

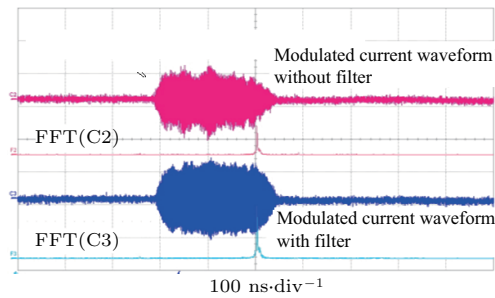


图 3 杂频振荡抑制后的调制束流波形
Fig. 3. Modulated current waveform after suppression of multi-frequency oscillation.

采用一维非线性束波相互作用理论, 分析了强流电子束脉冲前沿由于电子能量变化激励腔体产生自激振荡幅度、相位波动的瞬态变化规律^[15], 结果如图 4 所示. 分析发现: 脉冲前沿的电子能量变化导致输出相位持续变化, 同时将导致输出相位在脉冲平顶内持续一段时间的抖动, 而且脉冲前沿越短, 相位波动幅值越大, 相位波动持续时间越长. 理论分析了脉冲电压顶部波动和 RKA 高频系统等参数对 RKA 输出微波幅度和相位影响的变化规律及其灵敏度. 结果表明^[14], 脉冲电压幅度波动是造成 RKA 输出微波相位抖动的主要因素之一, 而输入腔、中间腔和输出腔等高频系统的谐振频率和有载(或无载) Q 值等参数对强流 S 波段 3 腔 RKA 输

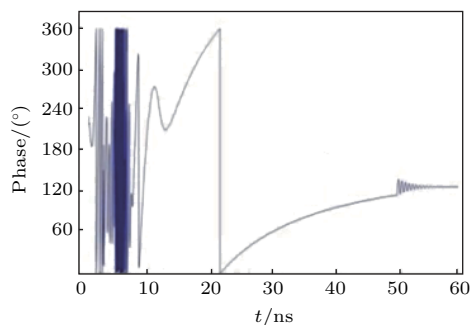


图 4 电压脉冲前沿为 50 ns 时的微波相位瞬态曲线
Fig. 4. Microwave phase transient curve at the front 50 ns of pulse voltage.

出微波功率影响不是很灵敏, 输入输出腔的谐振频率在 $\pm(30-40)$ MHz、有载 Q 值相对差异在 50% 范围内对输出微波功率影响不大于 10%, 中间腔的谐振频率和无载 Q 值对输出微波功率影响稍微灵敏一些. 这主要是 RKA 的强流负载效应造成输入输出腔的匹配设计有载 Q 值很低导致的. 另外, 通过对 RKA 的 3 个谐振腔高频参数的优化布局, 可明显降低电压波动对 RKA 输出微波相位的影响, 如图 5 所示, 15% 的电压波动引起的相位波动由 100° 减小到 40° ^[16].

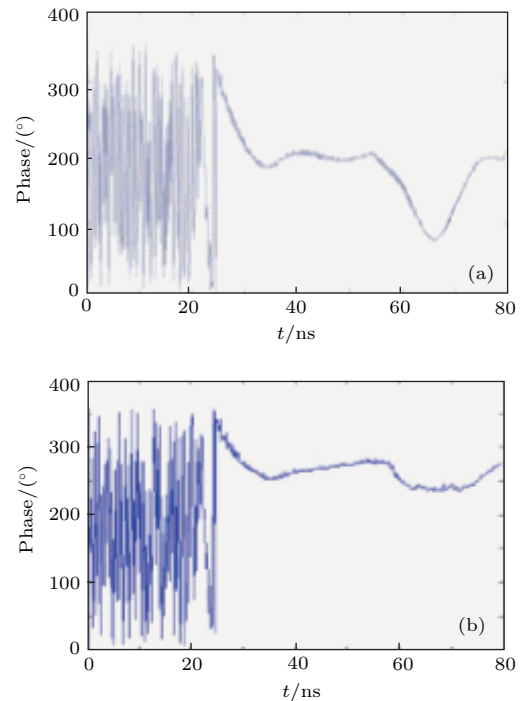


图 5 电压波动 15% 引起 RKA 的 (a) 优化前和 (b) 优化后的相位变化
Fig. 5. RKA phase change curve (a) before optimization and (b) after optimization with voltage fluctuation of 15%.

采用上述分析的漂移管中加载吸波材料、优化高频系统的 Q 值、频率、谐振腔间的漂移距离以及电子束阻抗和几何尺寸等参数, 同时改善器件的装配精度、电真空工艺以及收集极的散热处理, 使 RKA 输出微波幅度和相位稳定性有了显著提高^[13,14,16]. 采用电压 820 kV、束流 7.5 kA、脉宽 190 ns 的环形电子束、注入微波功率约 80 kW 驱动 S 波段 3 腔 RKA, 重频 25 Hz 运行得到了峰值功率 GW 级、脉宽 166 ns、相位抖动 18° 的输出微波 (2 号 RKA 管的波形如图 6 所示); 研制的 3 支 RKA 输出微波包络较一致, 幅度差小于 10%, 脉宽 120 ns 内的相位差抖动标准差最大 12° (如图 7 所示 2 号管和

3号管的相位差波形($\Delta\varphi_{32} = \varphi_3 - \varphi_2$), 达到了多支RKA 较好的锁频锁相.

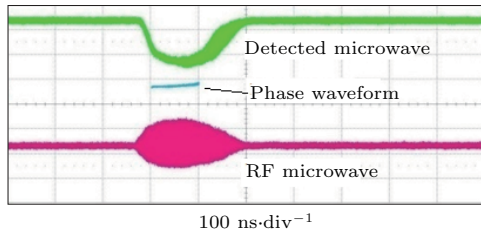


图6 2号S波段3腔RKA重频25 Hz/1 s运行时输出微波重叠波形

Fig. 6. Output microwave overlapped waveforms at pps of 25 Hz/1 s for No. 2 S band three-cavity RKA.

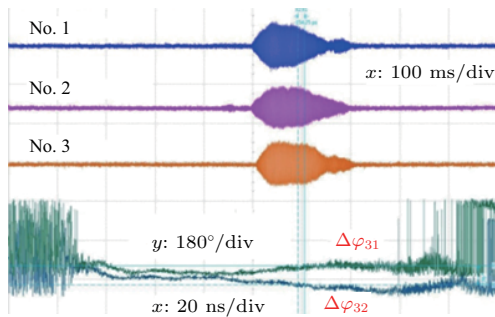


图7 三支RKA输出微波及相位一致性波形

Fig. 7. Output microwave and phase consistency waveforms of three RKAs.

2.2 多注RKA

随着应用需求的发展, 对RKA的品质因子 Pf^2 (P 为输出微波功率, f 为微波频率) 提出越来越高的要求, 但是对于常规结构的RKA, 由于空间电荷效应, 对一定尺寸的漂移管存在传输束流的上限值; 另一方面RKA的漂移管须对工作频率的微波截止, 因此高频段RKA的漂移管半径很小, 限制了常规圆柱结构RKA向高频段高功率方向发展. 为了探索RKA高频段高功率运行能力, 2009年, 项目组结合多注器件的特点, 提出并开展了X波段高功率同轴多注RKA研究 [9,17-23]. 电子束及漂移管采用多注结构, 高频系统采用同轴扩展相互作用结构, 在增大器件径向尺寸的同时(即提供了多注电子束传输及相互作用的横向截面), 可增大作用间隙的轴向尺寸, 降低间隙电场强度而提高功率容量. 这种结构很容易控制同轴和圆柱漂移管带来的工作与非工作模式传输激励的自激振荡, 同时通过同轴高频系统的模式控制, 可以使高频段RKA的功率容量得到数十倍提升, 而且还具有较高的束波相互作用效率. 其中需要解决的关键技术问题包括高

效率的强流电子束引出与传输、高频系统的模式控制、高效率的微波注入与提取等.

起初在实验中遇到了强流多注电子束引入多注漂移管效率低、束流发射不均匀和扭变等问题, 造成多注RKA整管束波相互作用效率很低(不大于10%). 经过理论、模拟和实验发现 [21,22], 由于阴极底座的电子发射、二极管区的束流旋转漂移和引导磁场的不均匀等问题, 造成引入到多注漂移管和相互作用区的束流损失较大(引入效率约70%), 降低了多注RKA的整管效率. 为此, 提出了相应的解决措施: 优化阴极及其底座形状, 减小阴极底座发射; 适当控制阴阳极间距、提高二极管区引导磁场强度和均匀性; 阴极柱沿电子束角向旋转的反方向旋转一定角度等. 通过上述措施, 明显抑制了阴极底座的束发射, 提高了束流引入效率和束流发射均匀性, 模拟引入效率从最初的82%提高到99%, 实验引入效率从70%提高到90%以上, 有力促进了多注RKA整管效率提高和工作稳定性的改善. 改善后的阴极束流发射轨迹如图8所示, 图8(a)和图8(b)分别为电子发射的纵截面和横截面的轨迹和空间密度分布图, 其中黄色为石墨阴极头的发射电子, 红色为阴极支撑杆的发射电子; 图8(c)为空间动量分布图, 其中红黄颜色发射电子含义与前相反.

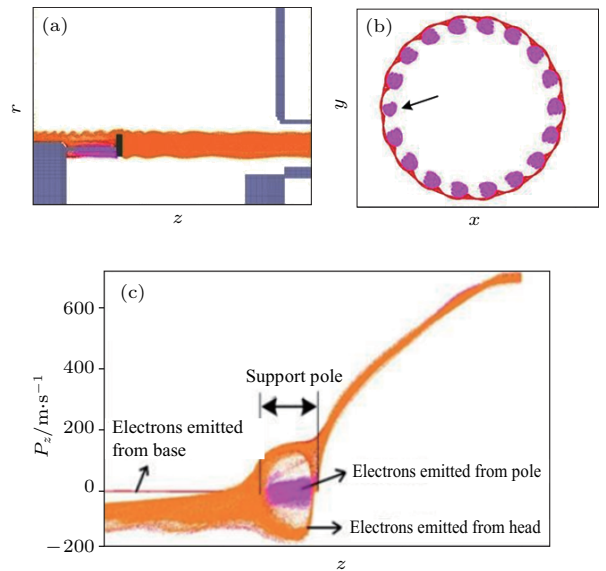


图8 改进多注阴极的束流产生分布图 (a) 发射电子的纵截面; (b) 发射电子的横截面轨迹; (c) 发射电子的空间密度分布

Fig. 8. Electron generation distribution of improved multi-beam cathode: (a) Longitudinal trajectory of emitted electrons; (b) across trajectory of emitted electrons; (c) space distribution of emitted electrons.

X波段同轴多注RKA的结构原理如图9所示. 为降低对输入微波功率的需求, 提高器件增益, 设计采用两个中间腔以增强工作模式对电子束的调制, 同时第2个中间腔和输出腔采用多间隙扩展相互作用结构以降低间隙场强, 避免射频击穿; 为了保证大功率微波的高效率注入、激励均匀的基模, 输入腔采用了对称开耦合孔的微波输入方式; 输出腔采用腔外壁开环形耦合孔、输出同轴TEM模, 最后通过TEM-TM₀₁模变过渡到圆波导模式, 保证了输出模式的均匀分布提取, 同时也保证了高功率容量. 为与实验对比, 模拟分析了脉冲电子束驱动多注RKA的相位特性. 电压最大值600 kV, 束流最大值5 kA, 上升沿70 ns, 平顶105 ns, 下降沿80 ns, 电子束的阻抗始终保持不变. 计算得到在平顶阶段输出微波功率1.2 GW、效率40%、脉宽(半高宽)160 ns. 由输出微波的频谱(如图11)和相位波形(如图10)可知, 存在一个主频与输入微波频率相一致, 但在主频峰两侧存在一系列边频, 同时在输出微波相位波形的前后沿出现了波动. 这是因为: 在电子束电压的上升沿, 电子速度逐渐增大; 电压下降沿, 电子速度逐渐减小. 这样不同时刻的电子从输入腔传输到输出腔的运动时间 Δt 也由大变小,

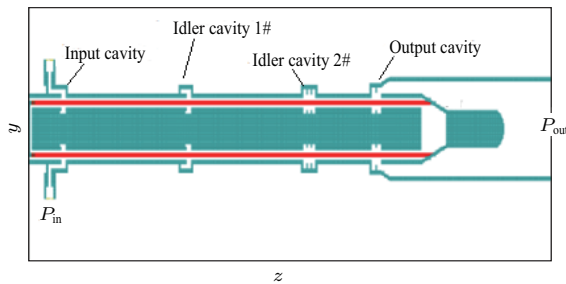


图9 X波段同轴多注RKA结构

Fig. 9. Schematic diagram of X-band multi-beam RKA.

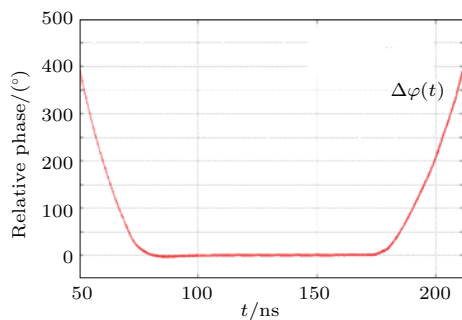


图10 脉冲电子束驱动多注RKA的输出微波相位特性曲线模拟结果

Fig. 10. Simulation results of microwave phase of multi-beam RKA driven by pulsed electron beam.

经过电压平顶的稳态过程后又由小变大. 根据输入微波经过腔体和漂移管的传输放大到达输出波导后产生相移的近似变化规律 $\Delta\varphi \propto \omega\Delta t$ 可知(ω 为RKA工作角频率), 会造成输出微波相位先向下、中间平顶和后向下的变化过程, 如图10所示.

在器件仿真设计中, 采用实验相同的电子束参数, 并没有出现实验中比较明显的杂模振荡和脉冲波形后端的相位波动现象, 而实验中发现, 相位锁定50 ns后, 输出微波相位发生了显著的波动, 相位波动大于80°, 其频谱在主频峰两侧还存在两个边频9.352 GHz和9.383 GHz. 分析发现, 该种现象可能是由于模拟中设定电子束的束流品质较好, 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, 更容易产生电子回流. 同时, 常用的粒子仿真软件也没有考虑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. 为了抑制或者减缓电子回流、电子束扩散和相位抖动, 实现输出微波相位稳定, 对多注二极管和高频系统结构进行了以下改进设计: 1) 优化阳极入口漂移管位形, 减小电子径向发射分量, 同时减小电子束的能散和波动; 2) 适当增大阴极直径, 以增大电子束直径, 减小电子束的空间电荷密度, 从而减弱空间电荷效应影响; 3) 增加阴阳极间距离以增大电子束的阻抗, 从而在电压保持不变的情况下, 减少束流

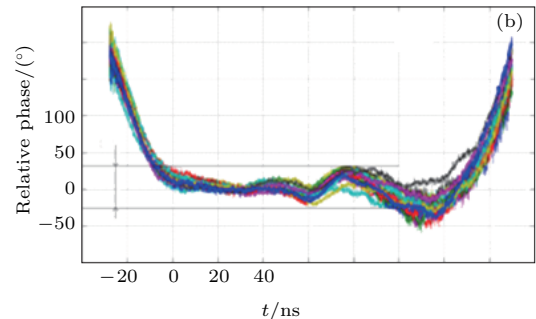
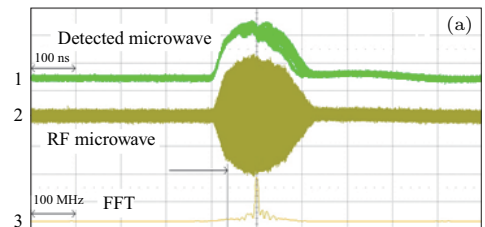


图11 X波段多注RKA重频25 Hz/s输出微波重叠波形(a)和相差波形(b)

Fig. 11. Overlapped waveforms of (a) output microwave and (b) relative phase difference of X-band multi-beam RKA at pps of 25 Hz/s.

以减弱空间电荷效应的影响; 4) 增大轴向引导磁场的强度、提高引导磁场的均匀性, 减轻群聚电子束散焦和二次电子产生概率; 5) 优化输出腔的腔型和特征参数, 降低输出腔间隙电压以减少电子回流, 同时使输出腔的提取效率没有明显降低. 实验中经过综合采取上述措施, 使X波段多注RKA的输出微波脉冲缩短、相位波动和工作稳定性得到明显提高, 输出微波波形和输出输入微波的相对相差曲线如图11所示. 从图11可知, 器件每一炮输出微波的一致性相对较好, 能够实现重频稳定工作; 当输入微波功率30 kW时, 测量得到重频输出微波功率达到GW级, 脉宽为160 ns, 整管效率34%; 在0—60 ns相位稳定性较好, 60 ns之后相差抖动略有增大; 重频25 Hz/1 s运行时在0—100 ns范围内相对相差抖动极差小于±30°, 标准相位差约15°.

2.3 高增益RKA

长期以来, 受非工作模式自激振荡的影响, RKA增益普遍偏低, 输出相位抖动较大. 发展高增益RKA, 就必须抑制非工作模式的自激振荡. 2010年, 项目组提出了在S波段3腔RKA基础上增加一个中间腔的方法以提高器件增益, 并对其中主要遇到的自激振荡机理开展了深入的理论、模拟与实验研究[10,24,25], 建立了反映高次模自激振荡物理过程的两腔强耦合模型, 推导出描述高次模自激振荡过程的非线性自治方程组, 文献[10]从理论上定量给出了高次模自激振荡的起振条件为

$$I_{\text{startup}} = \frac{\frac{I_A \beta_0^3 \gamma_0^3}{4\pi}}{\left[\rho \cdot Q \cdot L_1 \sin\left(\frac{\omega}{v_0} L_1 + \varphi_c\right) \right]}, \quad (1)$$

式中 I_A 为阿尔芬电流, $\beta_0 = v_0/c$ 为电子相速(c 为光速), γ_0 为相对论因子, ρ 为高次模式的特性阻抗, Q 为腔体品质因数, L_1 和 φ_c 分别为相邻谐振腔间的漂移段长度和相位差.

依据高次模式自激振荡的物理模型, 建立了一套有效的自激振荡抑制方法, 得到模拟和实验的验证. 在高增益RKA研制过程中, 主要采取的模式控制措施有: 1) 优化漂移管长度 L_1 , 以改变高次模与电子束的相位关系; 定义归一化电流 $I = I_0/I_{\text{start-up}}$, 图12是归一化电流 I 与漂移管长度 L_1 的关系, 在器件设计时应当保证漂移管长度选择使得归一化电流 $I < 1$; 2) 加载微波吸收体, 降低高次模式 Q 值. 为不影响工作模式, 采取在漂移

管壁加载吸收体的方式. 在有效解决高增益RKA中高次模式自激振荡的基础上, 器件增益突破了60 dB, 图13是S波段高增益RKA的电子束和输出微波波形.

为进一步解决高增益RKA输出微波相位抖动较大的问题, 对高增益RKA实验采集的射频波形进行详细的时域、频域和相位分析, 准确获取了器件输出微波的频率、相位和时频特性. 结合粒子模拟, 研究确认了电子回流是影响输出微波相位特性的主要因素, 在有效控制电子回流的情况下, 锁相精度达到±10°, 锁相时间达90 ns, 如图14所示[24,25].

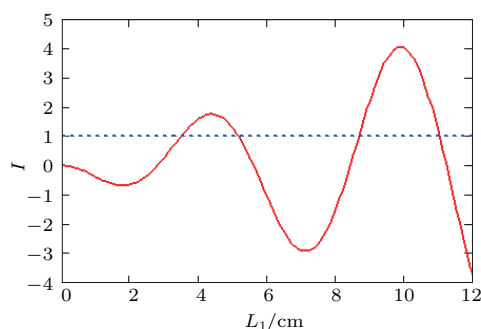


图12 归一化电流与漂移管长度关系

Fig. 12. The normalized current as a function of drifting length.

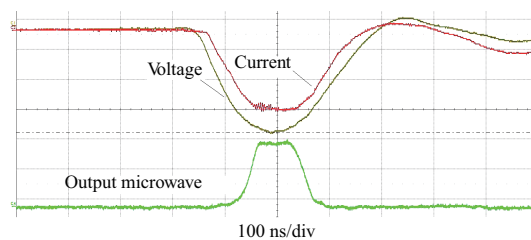


图13 高增益RKA电子束及输出微波检波波形

Fig. 13. Waveforms of electron beam and output microwave for high gain RKA.

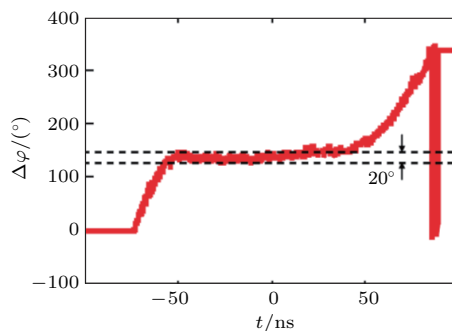


图14 高增益RKA输出微波相位抖动波形

Fig. 14. Fluctuation waveform of output microwave phase for high gain RKA.

3 注入锁相的相对论返波管振荡器

如2.2节所述,传统结构的高功率RKA在向高频段发展时会遇到器件尺寸与工作频率共渡的问题,为实现高频段(例如X, Ku波段)高功率微波器件的相位控制,自2013年以来,项目组在研制X波段长脉冲RBWO的基础上开始探索注入锁定RBWO的研究工作^[31].采用调制电子束实现RBWO相位锁定的技术路线,相比传统的注入微波锁相,具有调制电子束直接参与束波互作用、电子束调制深度可通过漂移管群聚增强等特点,对注入微波功率的要求大大降低.对于过模速调型微波振荡器件,过模调制电子束的产生是器件的核心,项目组创新性地提出了一种过模调制腔结构,利用工作于 TM_{02} 模式的谐振反射器实现调制腔与二极管、输出慢波段的隔离,相比于传统速调管的截止漂移管,过模调制结构的漂移管半径增大2.3倍,使得漂移管能传输的空间电荷限制电流大大提高.过模调制腔的模拟模型如图15中的前部所示,它由两个反射腔、漂移段和输入波导组成.

由于过模调制腔仍采用圆柱漂移管和环形电子束,相比于同轴和多注等结构,具有结构简单、电子束易于成型和聚焦等优点,可用于过模调制锁相振荡器初始调制电子束的产生.同时,过模调制腔内的驻波电场分布与扩展互作用结构类似,其特性阻抗更高,调制效率也更高.相比于单间隙腔,调制效率提高近1.5倍,降低了振荡器锁相注入微波功率的要求.调制锁相RBWO整管模型如图15,器件在结构上分为过模微波调制腔、中间腔、漂移段和微波输出腔四部分.调制锁相返波管的工作原理是:微波种子源产生的微波注入到输入腔,在腔内激励起驻波电场,对穿过其间隙的电子束进行调制;电子束在随后的漂移管中将速度调制转换为密度调制,并利用中间腔进一步增强电子束的调制;带调制的电子束进入到过模RBWO中,即能锁定振荡器输出微波的频率和相位.为实现过模RBWO的模式控制,在漂移管壁加载微波吸收体,用于衰减透射微波,切断高次模式的反馈通路,实现器件模式控制.这样,过模微波调制腔与返波管振荡器在结构上相对独立,可以分别优化调节到最佳状态.

图16(a)是实验中标准信号源以及锁相器件输

出微波的射频波形和频谱,输出微波射频波形包络平坦,频谱纯净,说明器件的模式得到有效控制;种子源信号和输出微波的频率及谱宽完全一致.图16(b)是注入微波功率90 kW时,连续三炮锁定辐射微波与种子微波源间的相差曲线,输出微波在锁相50 ns内相位抖动小于 $\pm 20^\circ$,锁相时RBWO输出功率达到GW级,从而证明采用调制电子束锁相方法可以有效降低振荡器锁相种子微波功率的要求,百kW级的种子微波即可实现对GW量级输出微波的相位锁定.

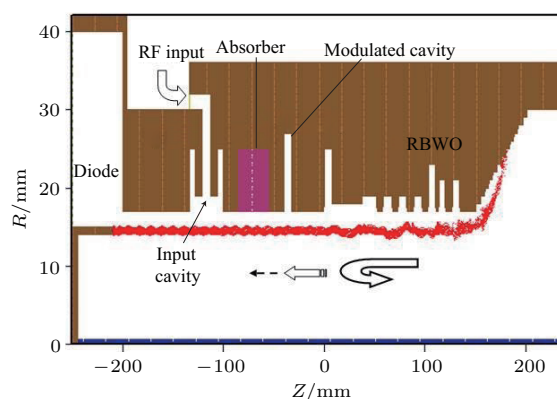


图15 X波段调制锁相RBWO原理图

Fig. 15. Schematic diagram of X-band injection locked phase RBWO.

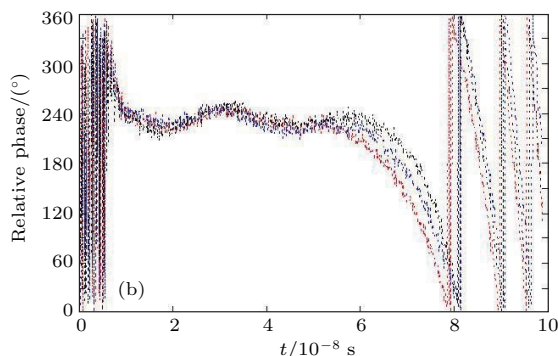
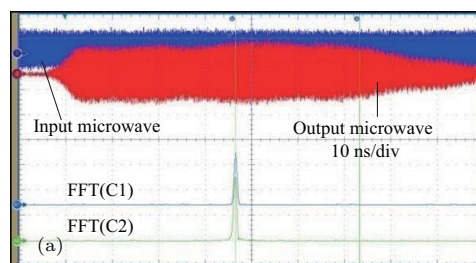


图16 X波段调制锁相RBWO(a)输入输出微波及(b)相差波形

Fig. 16. (a) Input/output microwave and (b) phase difference waveform for X-band injection locked phase RBWO.

4 结 语

结合高功率脉冲电子束特点,从物理、模拟和实验深入研究并验证了强流脉冲电子束驱动高功率微波放大器——RKA实现输出微波稳频稳相的技术可行性,并通过提出同轴多注结构和合理控制强流电子束空间电荷效应及自激振荡的不良影响,也分别实现了GW级高频段(X波段)和高增益(约60 dB)的HPM放大稳频稳相输出.同时通过综合吸取速调管和返波管的优点,提出并实现了高功率RWBO的锁相微波输出,使器件结构更加紧凑.这些研究结果不但拓展了一大族HPM器件的科学技术研究,也为HPM器件在功率合成、粒子加速和高性能雷达等领域的应用成为可能.

为了使锁频锁相HPM器件走出实验室、满足工程实际应用,锁频锁相HPM器件还需要进行精细化研究和设计,深入研究高性能长寿命的强流阴极、电子束收集极及紧凑型、低能耗的电子束传输等技术,进一步提高HPM器件的电真空工艺和硬管化水平,降低对微波种子源的功率需求(小于10 kW),追求实现小型的固态化种子源,提高HPM器件与脉冲功率源的阻抗匹配性,从而满足锁频锁相器件结构紧凑、能量效率高、运行稳定和寿命长的工程应用需求.

参考文献

- [1] Barker R J, Schamiloglu E 2001 *High-Power Microwave Sources and Technologie* (New York: IEEE) Chapter 2
- [2] Zhou C M, Liu G Z, Liu Y G, Li J Y, Ding W 2007 *High-Power Microwave Source* (Beijing: Publish House of Atomic Energy (in Chinese) [周传明, 刘国治, 刘永贵, 李家胤, 丁武 2007 高功率微波源 (北京: 原子能出版社])
- [3] Gold S H, Nusinovich G S 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 3945
- [4] Huang H, Wang P S, Gan Y Q, Chen H B, Wang W D, Lei F Y 1997 *High Power Laser and Particle Beams* **9** 573 (in Chinese) [黄华, 王平山, 甘延青, 陈洪斌, 王文斗, 雷方燕 1997 强激光与粒子束 **9** 573]
- [5] Wang P S, Lei F Y, Huang H, Gan Y Q, Wang W D, Gu B L 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 4594
- [6] Huang H, Feng D C, Luo G Y, Lei L R, Jin X, Meng F B 2007 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **35** 384
- [7] Huang H, Luo X, Lei L R, Jin X 2010 *Acta Electron. Sin.* **38** 1473 (in Chinese) [黄华, 罗雄, 雷禄容, 金晓 2010 电子学报 **38** 1473]
- [8] Huang H, Guo Y H, Jin X, He H, Lei L R, Luo X, Chang A B, Li Z H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 035201 (in Chinese) [黄华, 郭焱华, 金晓, 何琥, 雷禄容, 罗雄, 常安碧, 李正红 2011 物理学报 **60** 035201]
- [9] Liu Z B, Huang H, Jin X, Chen H B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 128402 (in Chinese) [刘振帮, 黄华, 金晓, 陈怀璧 2011 物理学报 **60** 128402]
- [10] Wu Y, Xu Z, Xu Y, Jin X, Chang A B, Li Z H, Huang H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 044102 (in Chinese) [吴洋, 许州, 徐勇, 金晓, 常安碧, 李正红, 黄华 2011 物理学报 **60** 044102]
- [11] Chen Z F, Huang H, Chang A B, Xu Z, He H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 238402 (in Chinese) [陈昭福, 黄华, 常安碧, 许州, 何琥 2014 物理学报 **63** 238402]
- [12] Huang H, Chen Z F, He H 2014 *The 19th Conference on Vacuum Electronics of China* Huangshan, China, August 23–25, 2014 (in Chinese) [黄华, 陈昭福, 何琥 2014 中国电子学会真空电子学分会第19届学术年会论文集 中国黄山, 8月23—25日, 2014]
- [13] Huang H, Chen Z F, Xu Z 2015 *IEEE International Conference on Plasma Science* Turkey, May 22–25, 2015
- [14] Huang H, Yuan H, He H 2016 *The 20th Conference on Vacuum Electronics of China* Xiamen, China, August 23–25, 2016 (in Chinese) [黄华, 袁欢, 何琥 2016 中国电子学会真空电子学分会第20届学术年会 中国厦门, 8月23—25, 2016]
- [15] Yuan H, Huang H, Liu Z B, Meng F B, Chen C H 2017 *Acta Electron. Sin.* **45** 1957 (in Chinese) [袁欢, 黄华, 刘振帮, 孟凡宝, 陈昌华 2017 电子学报 **45** 1957]
- [16] Yuan H, Huang H, He H, Ge Y, Meng F B, Chen C H 2017 *High Power Laser And Particle Beams* **29** 113001 (in Chinese) [袁欢, 黄华, 何琥, 戈弋, 孟凡宝, 陈昌华 2017 强激光与粒子束 **29** 113001]
- [17] Liu Z B, Huang H, Jin X, He H, Lei L R 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 3419
- [18] Liu Z B, Huang H, Lei L R, Jin X, Zhu L, Wang G P, He H, Ge Y, Yuan H, Chen Z F 2015 *Phys. Plasma* **22** 093105
- [19] Liu Z B, Huang H, Jin X, Yuan H, Ge Y, He H, Lei L R 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 018401 (in Chinese) [刘振帮, 黄华, 金晓, 袁欢, 戈弋, 何琥, 雷禄容 2015 物理学报 **64** 018401]
- [20] Liu Z B, Huang H, Jin X, Lei L R, Zhu L, Li L L 2016 *Phys. Plasmas* **23** 093110
- [21] Li L L, Huang H, Liu Z B, Wang G P, Yuan H 2016 *High Power Laser and Particle Beams* **28** 123003 (in Chinese) [李乐乐, 黄华, 刘振帮, 王淦平, 袁欢 2016 强激光与粒子束 **28** 123003]
- [22] Wang G P, Jin X, Huang H, Liu Z B 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 044102 (in Chinese) [王淦平, 金晓, 黄华, 刘振帮 2017 物理学报 **66** 044102]
- [23] Yuan H, Liu Z B, Huang H, Meng F B, Chen C H 2017 *High Power Laser and Particle Beams* **28** 123003 (in Chinese) [袁欢, 刘振帮, 黄华, 孟凡宝, 陈昌华 2017 强激光与粒子束 **28** 123003]
- [24] Wu Y, Li Z H, Xie H Q 2014 *Phys. Plasmas* **21** 113107
- [25] Wu Y, Xu Z, Xie H Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 084102 (in Chinese) [吴洋, 许州, 谢鸿全 2015 物理学报 **64** 084102]
- [26] Song W, Liu G Z, Lin Y Z, Shao H 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 1322 (in Chinese) [宋玮, 刘国治, 林郁正, 邵浩 2008 强激光与粒子 **20** 1322]

- [27] Zhang Z H, Shu T, Zhang J, Liu J, Bai X C 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 614 (in Chinese)
[张泽海, 舒挺, 张军, 刘静, 白现臣 2010 强激光与粒子束 **22** 614]
- [28] Dang F, Zhang X, Zhong H H, Zhang J, Ju J C 2016 *Phys. Plasmas* **23** 073113
- [29] Xiao R Z, Chen C H, Sun J 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 101502
- [30] Ju J C, Zhang J, Shu T, Zhong H H 2017 *IEEE Electron Dev. Lett.* **38** 270
- [31] Wu Y, Li Z H, Xu Z 2015 *Phys. Plasmas* **22** 083103
- [32] Wu Y, Li Z H, Xu Z 2015 *Phys. Plasmas* **22** 113102
- [33] Wu Y, Chen Y D, Zhao D 2016 *Chin. Phys. C* **40** 067002

REVIEW

Review on high power microwave device with locked frequency and phase*

Huang Hua[†] Wu Yang Liu Zhen-Bang Yuan Huan He Hu Li Le-Le Li Zheng-Hong
Jin Xiao Ma Hong-Ge

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 18 December 2017; revised manuscript received 28 January 2018)

Abstract

There are many kinds of high power microwave devices. According to the phase and frequency characteristics of the output microwave, they can be divided into the phase and frequency locking high power microwave (HPM) devices and HPM oscillator. Among them, the frequency and phase of HPM devices with locked frequency and phase can be adjusted by the injecting microwave, which has achieved great progress of the HPM research. In this paper, the latest progress of HPM devices with locked frequency and phase which have been developed by the Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics in recent years are reviewed, covering relativistic klystron amplifier (RKA) and relativistic backward-wave oscillator (RBWO) with injection-locked. Aiming at the problems encountered in the research of high power and long pulse RKA, in this paper we briefly introduce the key technologies in design and experiment, including the beam-wave interaction merits, the suppression of multi-frequency oscillation, pulse shortening, high frequency and high power operation, high gain, etc. The performances of RKA, such as power, phase stability and gain, have been improved remarkably. High-power output with stable frequency and phase has been realized by single-annular beam RKA in S-band, whose output power reaches more than 1 GW with a pulse width of 165 ns and phase fluctuation of 18° at a repetitive pulse of 25 Hz/1 s. The high gain RKA also achieves a similar output power and phase stability under the condition of injected microwave power of several kW. In X-band RKA, a structure of coaxial multi-beam has been used to break through the limitations of high frequency and high power capacity, which generates more than 1 GW output power with an input power of 30 kW, the beam-wave conversion efficiency is 34% and the phase fluctuation is 15° with a pulse width of 140 ns. On the basis of an in-depth understanding of RBWO technology, and using the advantages of high efficiency and compact structure, the RBWO research of injection modulated electron beam is proposed and carried out. More than 1 GW output microwave with locked phase is realized by 100 kW seed microwave. These results not only extend scientific and technological research of a large family of HPM devices, but also make it possible for HPM devices to be used in power synthesis, particle acceleration, high-performance radar, etc.

Keywords: high power microwave, locked frequency and phase, relativistic klystron amplifier, relativistic back-wave oscillator

PACS: 84.40.Fe, 52.35.-g, 52.35.Mw

DOI: 10.7498/aps.67.20172684

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11475158, 11605191).

† Corresponding author. E-mail: huanghua10@caep.cn