



·高功率微波技术·

S 波段多注相对论速调管放大器长时间运行研究

黄 华, 李士锋, 孙利民, 谭 杰, 王 朋, 刘振帮, 向启帆

(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, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 为了实现高功率微波源低磁场及长时间稳定运行, 开展了 S 波段 GW 级多注相对论速调管放大器 (RKA) 的理论模拟设计与实验研究。首先, 采用一维大信号非线性理论软件优化设计了 S 波段 4 腔多注 RKA, 找到了器件工作的最佳参数: 采用电压 550 kV、束流 4.7 kA 的 14 注 RKA, 获得功率 1.1 GW、效率 43% 的输出微波。随后, 采用粒子模拟软件对理论设计的束波相互作用参数进行了验证, 获得了输出功率 992 MW, 器件效率为 37%。最后, 根据模拟参数开展了器件重频长时间运行实验研究。采用紧凑同轴 Marx 功率源驱动 S 波段四腔多注 RKA, 在电压 530 kV、束流 5.4 kA、重频 20 Hz、运行时间 1 s、引导磁场强度 0.39 T、注入微波功率 1.7 kW 的条件下, 获得了功率 934 MW、脉宽 69 ns 的输出微波, 束波转换效率 33%。在器件重频 20 Hz、运行时间 10 min 条件下, 证实了平均功率 889 MW、平均脉宽 42 ns 的输出微波。该研究结果为 S 波段 RKA 的低磁场和长时间运行打下了技术基础。

关键词: 高功率微波; 相对论速调管放大器; 强流相对论电子束; 长时间运行; 多注电子束

中图分类号: TN62

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220184

Longtime operation of S-band multi-beam relativistic klystron amplifier

Huang Hua, Li Shifeng, Sun Limin, Tan Jie, Wang Peng, Liu Zhenbang, Xiang Qifan

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

Abstract: To realize a high power microwave source of longtime operation with a low guiding magnetic field, an S-band, GW level multi-beam relativistic klystron amplifier (RKA) has been investigated by means of theoretical modeling, numerical simulation and experiment. Firstly, a four-cavity multi-beam RKA was optimized with a one-dimension large signal code, and optimal working parameters are obtained. Under the conditions of 530 kV voltage, 4.7 kA current, and 14 beams, a 1.1 GW averaged microwave power with efficiency 43% was generated with the code. Subsequently, the beam-wave interaction parameters obtained from the code were verified with a PIC code, and a 992 MW output microwave power with efficiency 37% was obtained. At last, a long time operation experiment was conducted. In such an experiment, a 934 MW averaged microwave power with 69 ns pulse width and 33% efficiency was generated under the conditions of 530 kV voltage, 5.4 kA current, 20 Hz repetition frequency for 1 s, 0.39 T guiding magnetic field and 1.7 kW input microwave power. In addition, for the experiment of 20 Hz repetition frequency and 10 min operating time, a 889 MW averaged microwave power was obtained with 42 ns averaged pulse width. The investigation results make a strong foundation for the S-band RKAs of low guiding magnetic field and longtime operation.

Key words: high power microwave, relativistic klystron amplifier, intense relativistic electron beams, longtime operation, multi-beam

高功率微波器件经过 30 多年的发展, 其研究追求由早期的高峰值功率变化为现在低磁场和长时间稳定运行^[1-3], 以便更实用化, 相对论速调管放大器 (RKA) 的发展趋势也不例外。同时, 由于 RKA 具有相位和频率稳定的优点, 它还是功率合成的首选器件^[4]。功率合成的模块数往往很大, 功率合成系统为了达到整个系统需要的等效辐射功率需求, 模块数高达几十甚至上百, 对高功率微波系统的低磁场运行提出了更高的要求^[5]。为了满足

* 收稿日期: 2022-06-12; 修订日期: 2022-08-12

基金项目: 国家高技术发展计划项目

联系方式: 黄 华, hhua0457@163.com。

上述需求,本文开展了 GW 级 S 波段低磁场 RKA 及其长时间运行的理论设计与实验研究,以探索 RKA 的低磁场和实用化运行技术。

1 器件类型的选择

高功率 RKA 的器件类型主要有环形束^[6-7]和多注束 RKA^[8-9]两种,选择器件运行的电子束功率不大于 3 GW,比较两种器件的布里渊引导磁场的大小:选择电子束阻抗为 550 kV/5.4 kA,环形电子束外半径 2.2 cm、厚度 0.3 cm,14 注多注电子束直径为 0.8 cm,计算得知环形束的布里渊磁场为 0.18 T,多注实心束的布里渊磁场 0.106 T,由此可见多注实心束比环形束 RKA 的布里渊磁场减小了 43%,引导磁场接近减小了一半,非常有利于 HPM 系统的小型化,所以器件类型选择为多注实心束 RKA。实验选择的引导磁场一般为 3 倍布里渊磁场。

为了进一步降低器件的引导磁场,降低空间电荷效应对器件束波相互作用效率的影响和引导磁场的需求,RKA 的谐振腔采用同轴结构,可以进一步增大腔体尺寸和电子束漂移空间。对于多注 RKA 腔数的选择考虑,RKA 的每一个腔体的增益约 15 dB,考虑采用数 kW 的注入微波放大到 GW 级,总增益不到 60 dB,所以采用 4 腔 RKA 结构即可达到整管的增益要求,这样的腔数配置也可避免激励自激振荡的风险。

2 器件设计流程

借助 AJDISK 一维大信号软件快速计算能力^[10],开展多参数大范围优化仿真获取最大的效率和增益。基于 AJDISK 的设计流程如下:

- (1) 利用 CST 软件对多注谐振腔进行本征仿真,获得腔体特征阻抗 R/Q 、间隙耦合系数 M ;
- (2) R/Q 、 M 代入 AJDISK 中,通过调节各个谐振腔频率、轴向位置、输入输出外观品质因数以及输入功率观察电子束群聚过程和器件的效率与增益;
- (3) Magic 程序中利用损耗介质等效腔体的负载,调节损耗介质材料属性获得与 AJDISK 一致的 Q 值,并改变结构尺寸实现需要的频率,通过三维模拟仿真验证 AJDISK 设计参数的可信性;
- (4) 在 CST 中建立实际输入输出耦合装置,开展设计器件的性能分析、各类参数的扫描分析。

3 腔体参数提取

输入腔采用双重入式结构,间隙宽度为 14 mm,本征计算得到谐振频率 2.875 GHz 的场分布,并提取出一个电子束通道内轴向电场分布。利用 Matlab 对轴向电场分布进行数值计算得到输入腔特征阻抗 $R/Q=13.2 \Omega$ 、间隙耦合系数 $M=0.89$ 。用同样的方法获得其它各个谐振腔的高频参数,结果见表 1。

4 AJDISK 快速优化

在 AJDISK 程序中输入获得的腔体初始参数,程序输入分工作参数区和腔体参数区。手动改变参数,选择一组较好结果的参数,得到电子束的相位空间图(图 1(a))、束流调制深度(图 1(b))蓝色曲线为基波调制束流,红色曲线为二倍频调制束流)和电子速度分布(图 1(c)),同时得到基波调制深度 1.09,此时电子束电压为 550 kV,总束流为 4.7 kA,输出功率为 1.13 GW,器件效率达到 43.6%,增益 52 dB,通过电子束速度分布曲线可以看出相互作用过程中电子束无电子反转发生。同时,利用 AJDISK 程序开展了电子束电压、束流变化对器件性能影响分析。

4.1 电压变化

当电子束电压减小时,速度变慢群聚加快,所以电子束很快达到群聚最大点。通过减小输入功率可以减弱电子束的群聚,从而匹配该器件,当输入功率减小到 70 W 时,器件

表 1 各谐振腔的高频参数

cavity	gap width/mm	$(R/Q)/\Omega$	M	initialization frequency/GHz
input cavity	14.0	13.2	0.886	2.875
idler cavity 1#	12.0	14.2	0.866	2.885
idler cavity 2#	13.5	15.2	0.865	2.908
output cavity	16.0	18.1	0.841	2.876

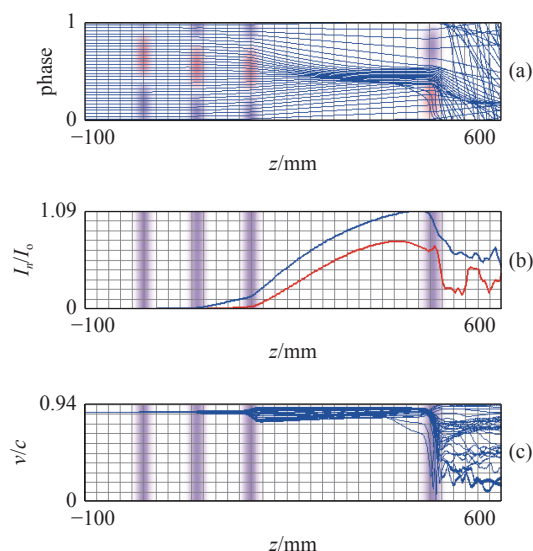


Fig. 1 Optimization curves of AJDISK code

图 1 AJDISK 优化结果曲线

依然可以产生 42% 的电子效率。进一步分析电子束电压为 550 kV 时器件效率, 此时增大输入功率可以使器件进一步提高相互作用效率。另外, 当输入功率不变时, 电子束电压变化对器件效率影响结果如表 2 所示。电子束电压在 520~570 kV 之间变化时, 效率大于 40%, 部分出现较为严重的电子束反转。

表 2 电压变化对电子束调制和器件效率的影响

Table 2 Voltage effects on electron beam modulation and device efficiency

voltage/kV	modulation depth	efficiency/%	electron reversal (v/c)
520	1.10	42.6	-0.05
530	1.10	40.9	-0.08
540	1.10	42.9	0
550	1.09	43.6	0
560	1.07	42.0	-0.07
570	1.04	40.0	-0.17
580	0.99	39.8	-0.03

4.2 束流变化

束流减小时由于电子束导流系数降低而使得空间电荷力减弱, 群聚减弱所以最大调制电流位置后移, 导致输出腔感受到的电流调制深度减小, 但是电流降低后不易产生电子反转。电流增大后最大群聚位置前移, 导致电子束过群聚, 易产生电子束反转。详细电流变化对电子束调制和效率影响如表 3 所示。

表 3 束流变化对电子束调制和器件效率的影响

Table 3 Current effects on electron beam modulation and device efficiency

current/A	modulation depth (I_1/I_0)	efficiency/%	electron reversal (v/c)
278×14	0.98	37.0	0.25
298×14	1.04	40.0	-0.03
318×14	1.08	42.0	-0.04
338×14	1.09	43.6	0
358×14	1.09	42.0	-0.13
378×14	1.08	40.9	-0.12
398×14	1.07	43.5	-0.16

5 基于 Magic 程序的设计参数验证

根据 AJDISK 优化得到的高频参数和腔体位置建立三维等效模型, 其中主要是利用损耗介质代替输入输出耦合装置实现 Q 值的精准调控, 这样获得的参数与一维的完全一致。在 Magic 中当输入功率为 5.05 kW 时, 输出功率达到 992 MW, 电子束功率为 2.66 GW, 此时器件效率为 37%, 与一维模拟结果相差 6% 为可接受误差。

6 CST 中带输入输出耦合实际模型仿真

上一节研究表明一维设计结果是可信的, 为此我们采用 CST 程序的粒子仿真模块开展器件实际三维模型的建立和性能仿真。在 CST 中建立各个谐振腔的实际结构, 输入腔采用扇形通道注入, 输出采用同轴波导提取输出, 如图 2 所示。该器件中各个谐振腔的高频系统参数和漂移管参数见表 4 所示。

在电子束电压 550 kV、束流 338 A×14 注=4732 A、输入信号频率 2.88 GHz、输入功率 4.0 kW 和聚集磁场 0.3 T 的模拟条件下, 获得了 945 MW 输出功率, 此时器件效率为 36%、增益为 54 dB。图 3 给出了器件仿真相关结果。

7 长时间重频运行的设计考虑

根据 RKA 高频系统的仿真设计, 开展了器件高频系统的机械结构设计。其中, 输入腔的输入波导通过拐弯从二极管阳极筒外壁伸出, 这样便于磁场线包的一体化设计; 输出腔后的收集极考虑了水冷结构^[4], 为了增大冷却速度, 通水水管采用直径 5 mm、六路进水和六路出水, 结构设计如图 4 所示。为了增大真空系统的抽速, 减小抽气管道的阻力, 把抽口直径 15 cm 的分子泵直接与脉冲功率源二极管腔外导体壁连接, 分子泵转速为 45 000 r/min。为了便于 HPM 系统长时间运行, 电子束引导磁场采用超导引导磁场系统, 通过调节超导磁场的励磁电流来调节引导

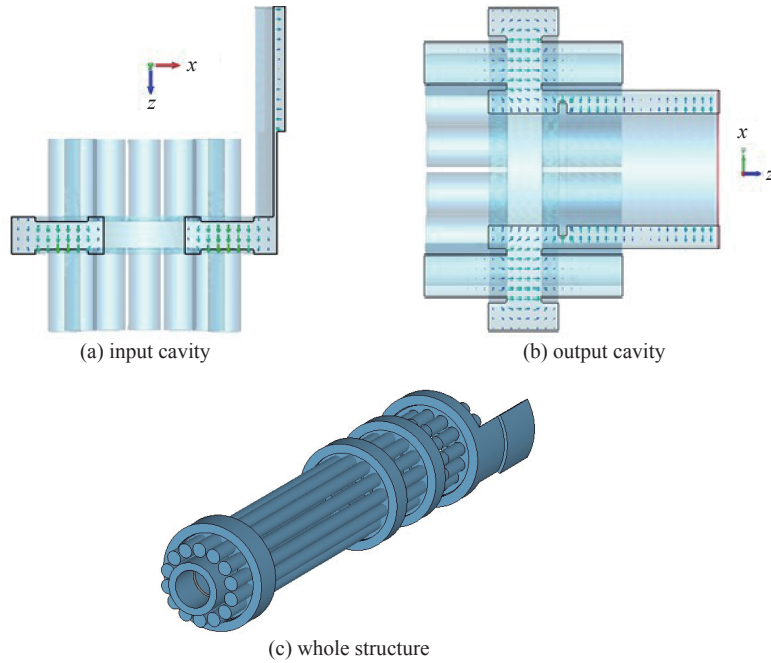


Fig. 2 Three dimensions' simulation diagram of four-cavity RKA

图 2 4 腔 RKA 三维仿真结构图

表 4 4 腔 RKA 高频系统参数与漂移管参数

Table 4 High frequency parameters and drifting tube parameter of four-cavity RKA

cavity	gap width/mm	oscillation frequency/GHz	axial position/mm
input cavity	14	2.88	0
idler cavity 1#	12	2.891	90
idler cavity 2#	13.5	2.936	180
output cavity	16	2.879	485

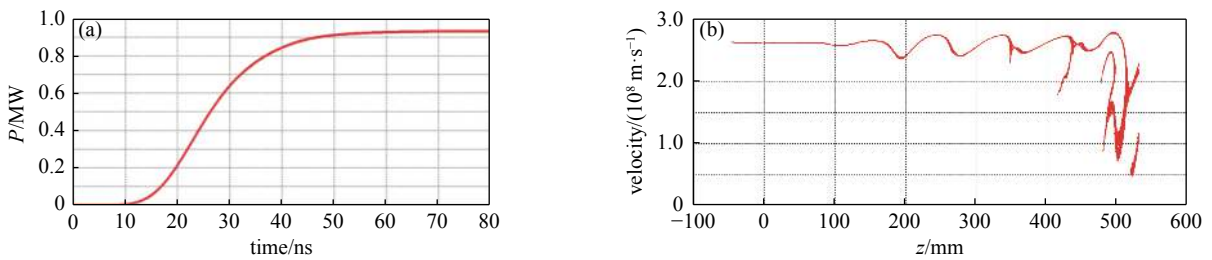


Fig. 3 Output microwave waveform (a) and electron velocity (b) of four-cavity RKA simulation by CST

图 3 CST 中 4 腔 RKA 仿真的输出微波波形 (a) 和速度分布图 (b)

磁场强度。

8 器件的长时间微波实验研究

8.1 实验系统介绍

根据模拟设计加工了 RKA 高频系统, 高频系统经过冷测调试后谐振频率达到设计要求, 并采用新研制的紧凑同轴 Marx 脉冲功率源驱动 RKA 开展微波实验研究, 实验系统布局与文献 [6] 相似。脉冲功率源二极管产生的多注电子束在 0.32 T 引导磁场引导下经过 4 腔 RKA 的调制、群聚后在输出腔激励输出微波。RKA 的输出微波经过与文献 [4] 相同的模变和辐射喇叭向空间辐射。实验系统真空度为 6×10^{-4} Pa。采用 BJ-32 开口波导喇叭(长度 65 cm)阵列接收 RKA 空间辐射输出微波。接收喇叭接收到的微波经过定向耦合器、电缆和同轴衰减器等器件衰减后用宽带高速数字示波器显示。根据空间功率积分得到 RKA 辐射输出

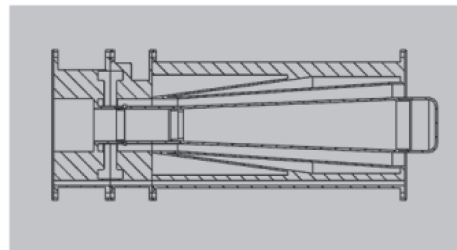


Fig. 4 Output cavity with water cooling collector

图 4 带水冷收集极的输出腔

微波。接收喇叭接收到的微波经过定向耦合器、电缆和同轴衰减器等器件衰减后用宽带高速数字示波器显示。根据空间功率积分得到 RKA 辐射输出

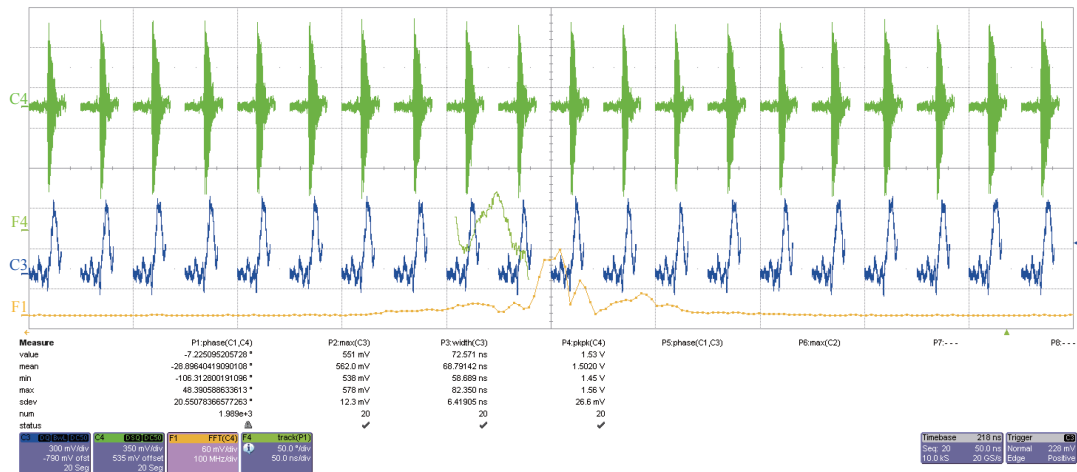
微波功率。

8.2 实验结果

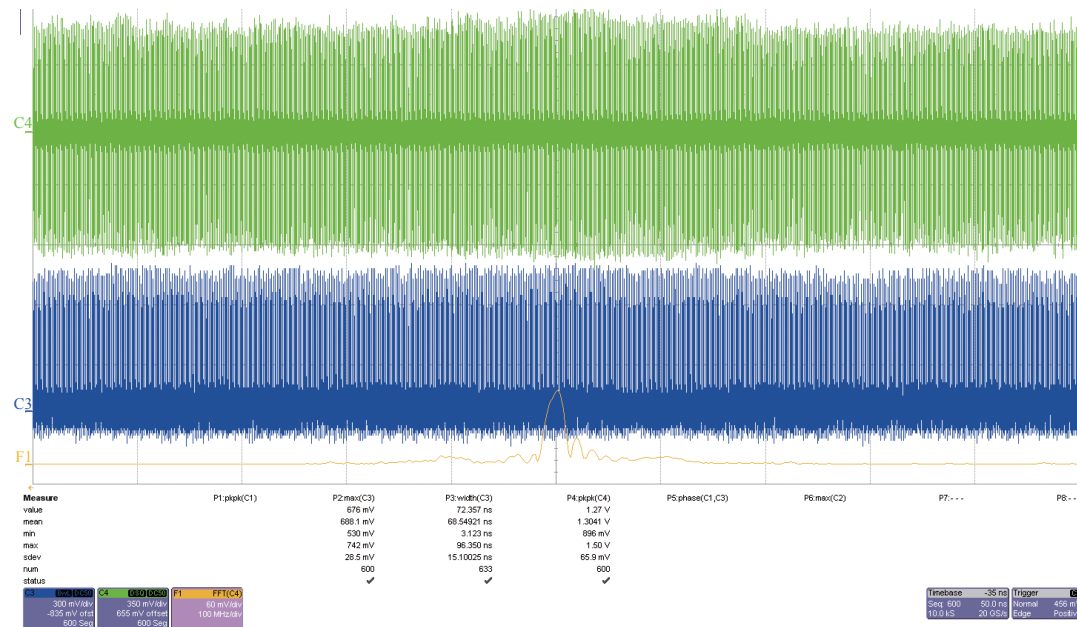
开展 RKA 高功率微波实验之前, 首先测试了多注二极管电子束的引入效率。由于 RKA 输入波导从二极管阳极筒外壁引出, 这样阳极筒直径由 204 mm 减小到 186 mm, 由此减小了电子束的引入效率, 引入效率由 95% 减小到 82%, 这样减小了器件的整管束波互作用效率。经过调节二极管阴阳极间距, 得到电子束电压 530 kV, 二极管总束流 5.5 kA, 引入 RKA 漂移管束流 4.5 kA, 器件的工作阻抗与设计阻抗接近。

器件阻抗调好之后, 接上 RKA 整管, 开展了器件的微波调试实验。经过调节器件的工作频率、注入功率、引导磁场强度、电子束驱动功率等参数, 得到了器件的最佳工作参数。RKA 单次运行时的输出微波功率为 908 MW, 微波脉宽 89 ns, 微波种子源的输入功率为 2.4 kW, 器件增益约 56 dB, 整管的束波转换效率为 31%。

RKA 器件单次运行工作参数调好之后, 开展了 RKA 长时间重频运行的实验研究, 先后开展了重频 20 Hz 运行 1 s、30 s、2 min、10 min, 输出微波序列波形分别如图 5 和图 6 所示。由图 5 可知, 器件重频工作稳定, 30 s @600 炮输出微波也很稳定, 输出微波平均功率 858 MW, 功率抖动的标准差为 2.2 MW, 微波平均脉宽 69 ns, 脉宽抖动的标准差为 15 ns。由于示波器一帧显示的脉冲数量有限, 器件 10 min 运行时采用了示波器分帧显示的方法进行波形的记录, 每一帧记录 2400 个波形(运行 2 min), 数据记录采用全部统计计算, 根据全部统计记录的波形数量计算器



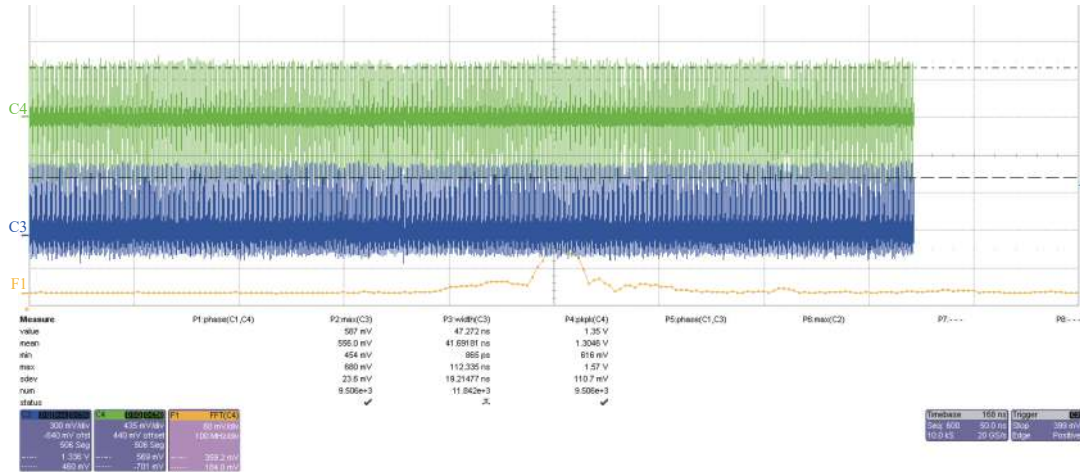
(a) serial waveform at 20 Hz@1 s



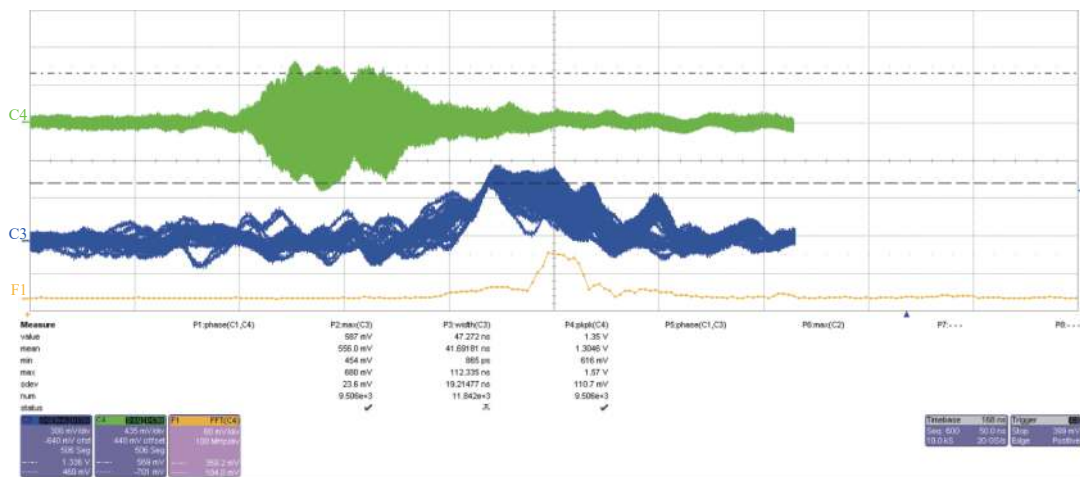
(b) serial waveform at 20 Hz@30 s

Fig. 5 Output microwave waveforms at different working time. C3-detected waveform, C4-radio frequency waveform

图 5 RKA 不同连续工作时间的输出微波波形



(a) output microwave serial waveforms



(b) output microwave overlay waveforms

Fig. 6 Last frame waveforms at 20 Hz@10 min. C3-detected waveform, C4-radio frequency waveform

图 6 RKA 重频 20 Hz@10 min 连续工作时最后一帧的输出微波波形

件的运行时间, 或者根据脉冲功率源设置的重频和运行炮数计算运行时间。器件 10 min 运行时的最后一帧(第五帧)波形如图 6 所示, 根据脉冲功率源的设置(重频 20 Hz、运行炮数 12000 炮)可知器件运行时间为 10 min, 根据最后一帧波形的统计数据可知器件平均输出功率为 889 MW, 功率抖动的标准差为 6.4 MW, 微波平均脉宽为 42 ns, 脉宽抖动的标准差为 19 ns, 电子束的统计平均电压和束流分别为 508 kV 和 5.1 kA, 器件的统计平均效率为 34%。由微波平均脉宽可以看出, 器件长时间运行时存在脉冲缩短问题, 造成了长时间运行时微波平均脉宽的减小, 脉宽离散增大。

9 结 论

为了实现高功率微波源低磁场及长时间稳定运行, 开展了 S 波段 GW 级多注相对论速调管放大器(RKA)的理论模拟设计和实验研究。采用一维大信号非线性理论软件优化设计了 S 波段 4 腔多注 RKA, 对器件工作的最佳电压、束流、注入微波功率等参数进行了优化, 找到了器件工作的最佳参数。采用粒子模拟软件对理论设计的束波相互作用参数进行了验证, 获得了输出功率 992 MW, 器件效率为 37%, 与一维大信号理论设计结果相差 6%。采用紧凑同轴 Marx 功率源驱动 S 波段多注 RKA, 开展了重频长时间运行实验研究。在电压 530 kV、束流 5.4 kA、重频 20 Hz、运行时间 1 s、脉宽 110 ns、引导磁场强度 0.32 T 和注入微波功率 1.7 kW 的条件下, 获得了功率 934 MW、脉宽 69 ns 的输出微波, 束波转换效率 33%。当器件重频 20 Hz、运行时间 10 min 条件下, 获得了平均功率 889 MW、平均脉宽 42 ns 的输出微波。该研究结果为 S 波段 RKA 的低磁场和长时间运行打下了坚实的技术基础。

参考文献:

[1] Barker R J, Schamiloğlu E. High-power microwave sources and technologies[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 2001.

- [2] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E. High power microwaves[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [3] Zhou Chuanming, Liu Guozhi, Liu Yonggui, et al. High-power microwave source[M]. Beijing: Atomic Press, 2007.
- [4] 黄华, 吴洋, 刘振帮, 等. 锁频锁相的高功率微波器件技术研究[J]. *物理学报*, 2018, 67: 088402. (Huang Hua, Wu Yang, Liu Zhenbang, et al. Review on high power microwave device with locked frequency and phase[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67: 088402)
- [5] Sun Limin, Huang Hua, Li Shifeng, et al. Investigation on high-efficiency beam-wave interaction for coaxial multi-beam relativistic klystron amplifier[J]. *Electronics*, 2022, 11: 281.
- [6] 黄华, 陈昭福, 袁欢, 等. S波段长脉冲相对论速调管重复频率运行稳定性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 103002. ((Huang Hua, Chen Zhaofu, Yuan Huan, et al. Research on stability of repetitive operation of S-band, long-pulse relativistic klystron[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 103002)
- [7] Huang Hua, Chen Zhaofu, Li Shifeng, et al. Investigation on pulse-shortening of S-band, long pulse, four-cavity, high power relativistic klystron amplifier[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26: 033107.
- [8] Li Shifeng, Huang Hua, Duan Zhaoyun, et al. Demonstration of a Ka-band oversized coaxial multi-beam relativistic klystron amplifier for high power millimeter-wave radiation[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, 43(1): 131-134.
- [9] Liu Zhenbang, Song Falun, Jin Hui, et al. Coherent combination of power in space with two X-band gigawatt coaxial multi-beam relativistic klystron amplifiers[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, 43(2): 284-287.
- [10] 丁耀根. 大功率速调管的理论与计算模拟[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 86-110. (Ding Yaogen. Theory and computer simulation of high power klystron[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 86-110)
- [11] Huang Hua, Jin Xiao, Lei Lurong, et al. High power and repetitively pulsed operation of a relativistic extended-interaction-cavity oscillator[C]//Proceedings of the 17th International Conference on High Power Particle Beams. Mianyang, China, 2008: 1-3.