

CEPC 高功率高效率650MHz/800kW 连续波速调管研制进展

汇报人：王少哲

单 位：昆山国力大功率器件工业技术研究院



◆ 公司介绍

- **650MHz/800kW连续波速调管**
- **高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管**
- **650MHz/800kW多注速调管**
- **其他P波段速调管**
- **总结**



国力股份 电真空科技

昆山国力电子科技股份有限公司（简称“国力股份”，股票代码688103）是一家专业从事电子真空器件研发、生产和销售科创板上市企业。公司经过五十多年的技术沉淀，自主研发能力和核心技术覆盖了电子真空器件生产制造的各关键环节，产品广泛应用于国防科技、航空航天、雷达通讯、半导体设备、新能源汽车、轨道交通、煤炭化工、能源（光伏、风能、电力、储能、充电桩）、安检辐照、工业探伤、医疗器械、大科学等关键领域。在有源电真空领域，国力股份开拓了速调管、磁控管、闸流管、X射线管和大功率电子枪等五大方向，并能够向客户提供定制化解决方案服务。

发展历程

初心 —— 奔赴国家三线建设 自主研发，提升国家科技力量

欢送18车间同志奔赴山区建设新的基地合影留念 1966.7.21



发展 —— 响应改革开放 创新产业驱动，助力解决卡脖子难题

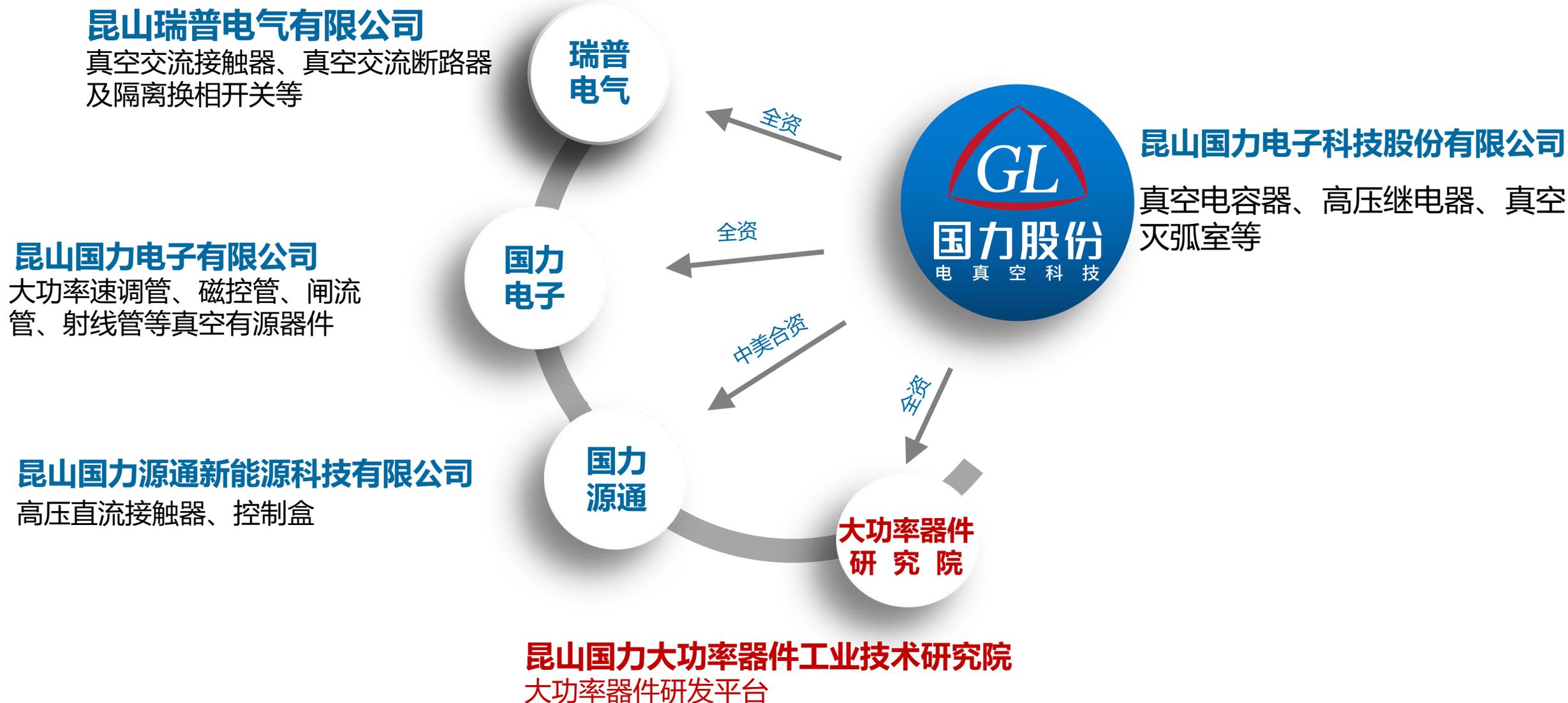


2021年
科创板上市



站在新能源、半导体、医疗等行业全新赛道上，助力
新安全格局保障新发展格局。

公司架构





- 公司介绍
- ◆ **650MHz/800kW连续波速调管**
- **高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管**
- **650MHz/800kW多注速调管**
- **其他P波段速调管**
- **总结**

650MHz/800kW连续波速调管

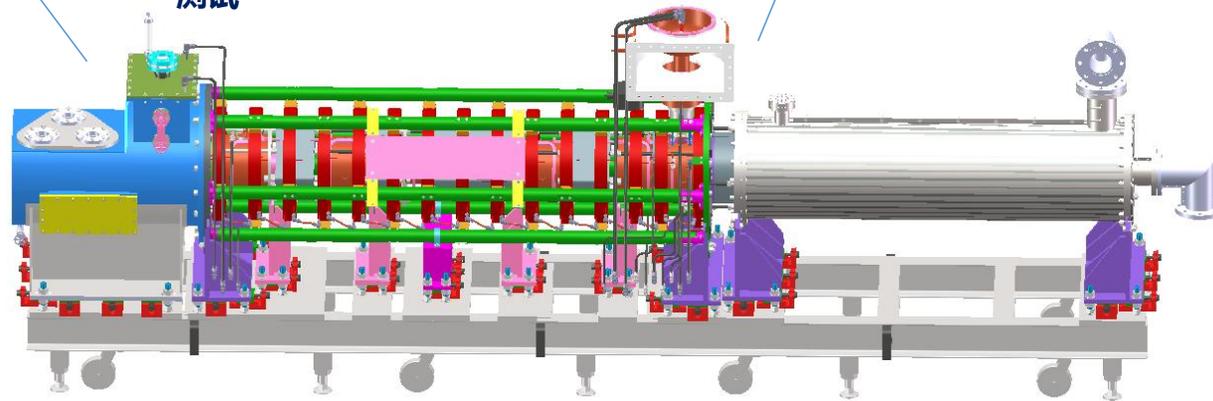
2018年，在国内首支P波段650MHz/800kW连续波速调管研制中，国力光荣承担了收集极、聚焦线圈、油缸、运行支架等速调管部件的研制任务以及总装、排气、后道、包装运输等关键工艺技术的攻关，并参与了后期测试。



- 物理设计
- 总装(参与)
- 排气(参与)
- 后道(参与)
- 测试



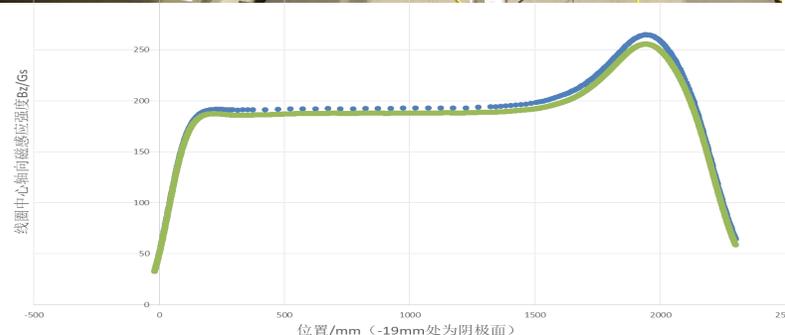
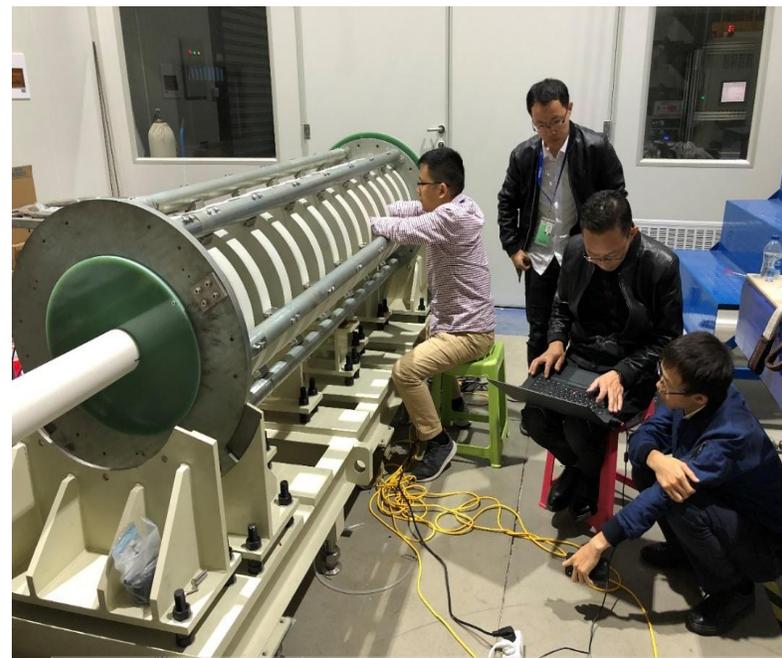
- 电子枪
- 谐振腔
- 总装(参与)
- 排气(参与)



- 收集极
- 聚焦线圈
- 油缸
- 运行支架
- 总装及排气
- 后道
- 包装与运输
- 测试(参与)

650MHz/800kW连续波速调管

成功实现了速调管相关关键部件的研发制造和关键工艺研究。



成功实现了超大尺寸（直径0.5米高1.8米）
铜单体结构件焊接（收集极研制成功）

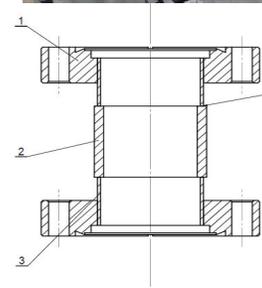
聚焦线圈研制成功

650MHz/800kW连续波速调管

成功实现了速调管相关关键部件的研发制造和关键工艺研究。



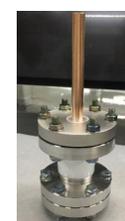
油缸及高压接线座研制成功



图纸



装配



封离



排气测试

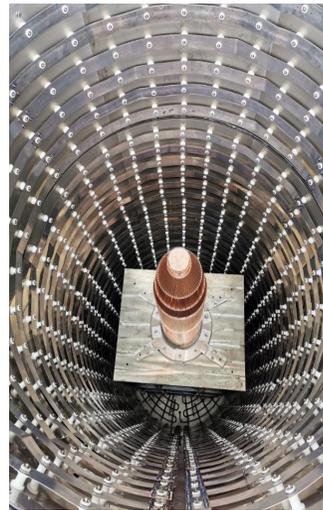
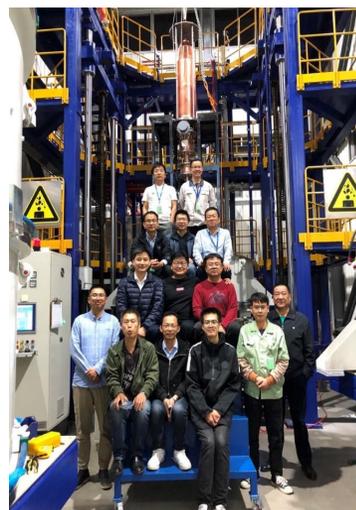


检漏

运行支架及排气工艺关键部件性能验证

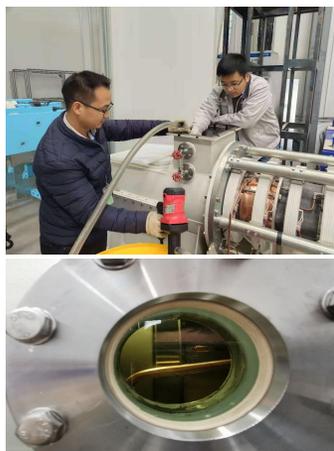
650MHz/800kW连续波速调管

与高能所、空天院各位老师一起顺利完成了总装、排气、后道、包装、运输等工艺步骤。



首支650MHz/800kW连续波速调管样管总装

排气与后道

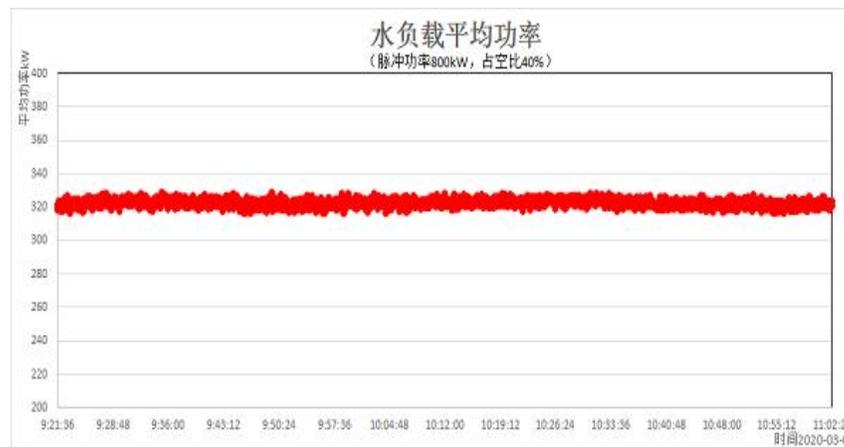


管体与支架组合及注油实验

包装与发货

650MHz/800kW连续波速调管

2020年，首支样管经过高功率测试，实现连续波400kW和脉冲功率800kW，配合国产800kW负载，速调管输出连续波692kW。





- 公司介绍
- 650MHz/800kW连续波速调管
- ◆ 高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管
- 650MHz/800kW多注速调管
- 其他P波段速调管
- 总结

高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管

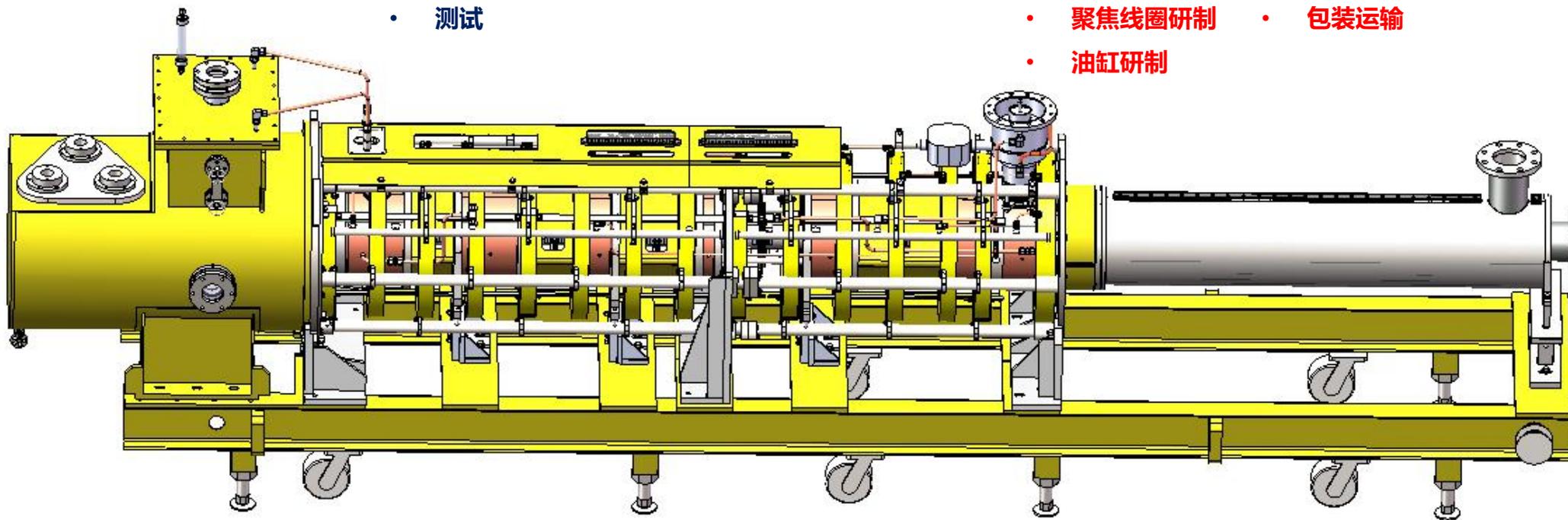
2019年，在650MHz/800kW连续波高效率速调管研制中，国力光荣承担了机械设计、电子枪、谐振腔、收集极、聚焦线圈、油缸运行支架等一众关键部件的研制以及总装、排气、后道、包装运输等关键工艺任务



- 物理设计
- 谐振腔研制 (质量把控)
- 总装 (参与)
- 后道 (参与)
- 测试

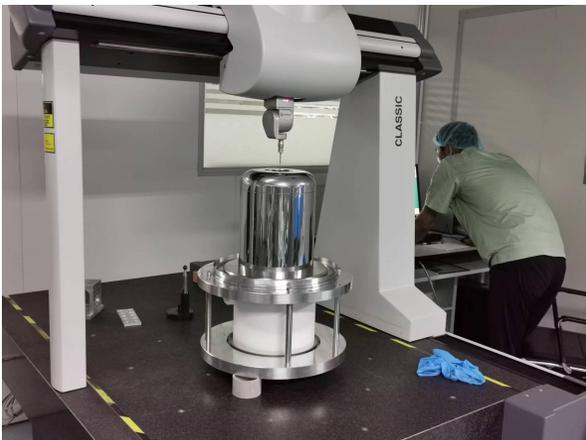


- 机械设计
- 电子枪研制
- 谐振腔研制
- 收集极研制
- 聚焦线圈研制
- 油缸研制
- 运行支架研制
- 总装
- 排气
- 后道
- 包装运输



高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管

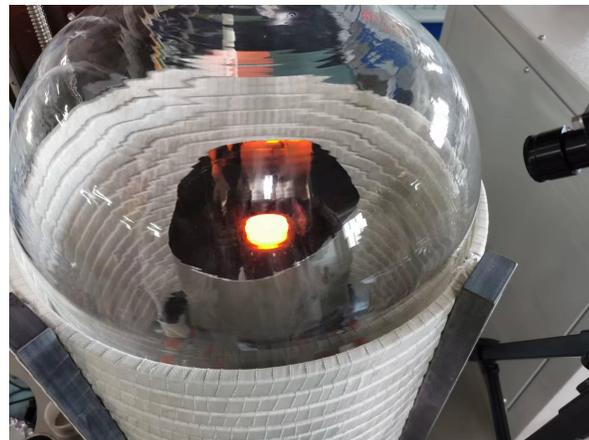
为了满足管芯的研制要求，研究院购买、使用了一批**新设备**，开发了一系列**新工艺**



三坐标测量，严格把控关键参数



新的焊接工艺，提高可靠性



购置新的阴极除气台电子枪
预除气及温度曲线测量



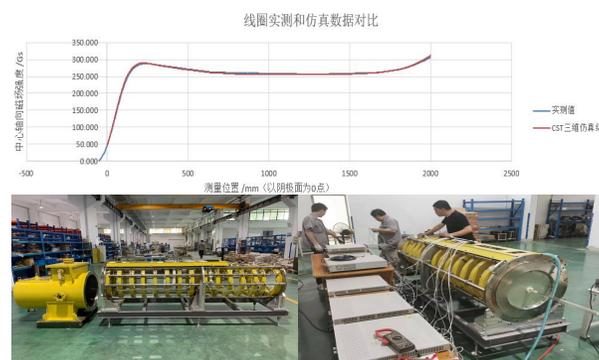
为速调管腔体设计了新的结构，摸索了新的装配、冷测、焊接和调谐工艺



邀请高能所老师来现场对我们的结构、工艺以及冷测性能进行严格把关和检验



改进收集极表面结构，提高其冷却效率



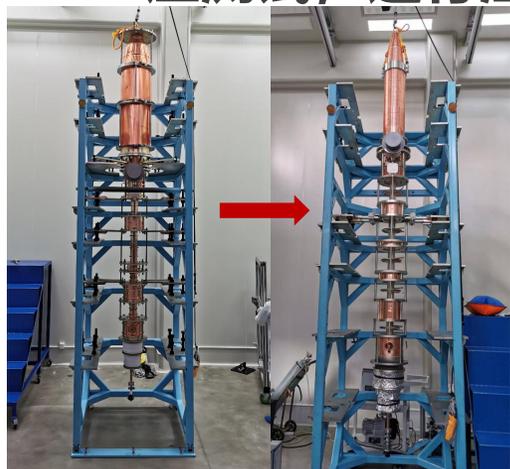
持续对聚焦线圈的制造严格把关，通过磁场测量对线圈进行调整达3次



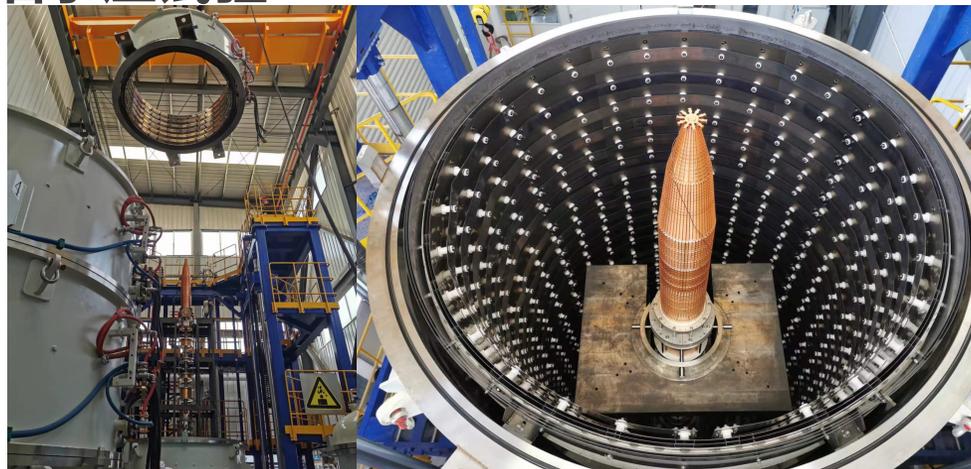
整管总装，使用了全新的结构，提高了装配精度也大大缩减了装配时间和装配人员数量

高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管

新腔型与工艺缩短装配时间和人力，排气工艺摸索更加成熟，优化后道工艺，增加耐压测试，进行注油水压试验



新的腔型与工艺使装配时间缩短



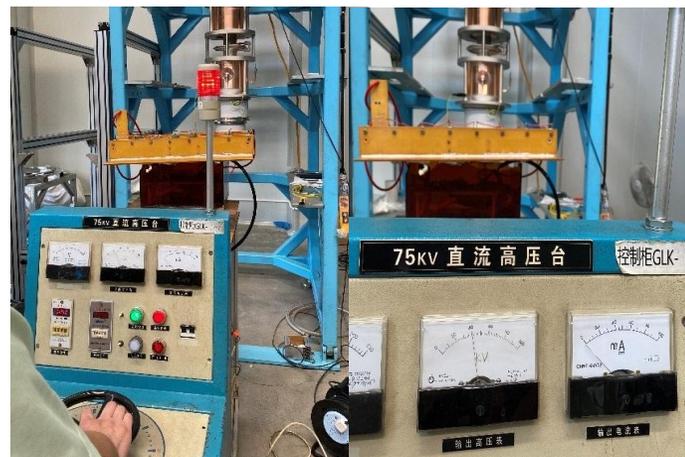
经过摸索，排气工艺更加成熟



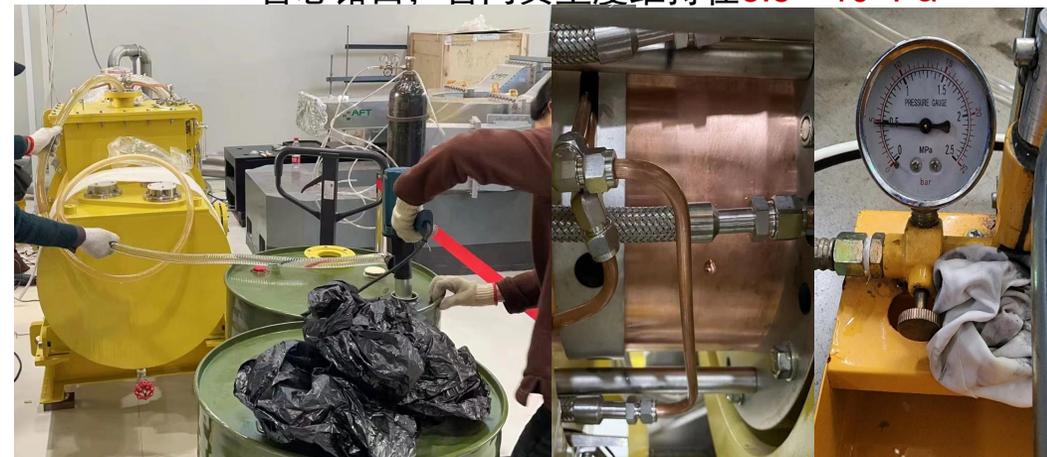
阴极激活及发射度测量，发射电流16.55mA@1kV，管芯钳口，管内真空度维持在 3.5×10^{-8} Pa



优化了后道工艺，水路安装及线圈水套安装更加科学顺畅



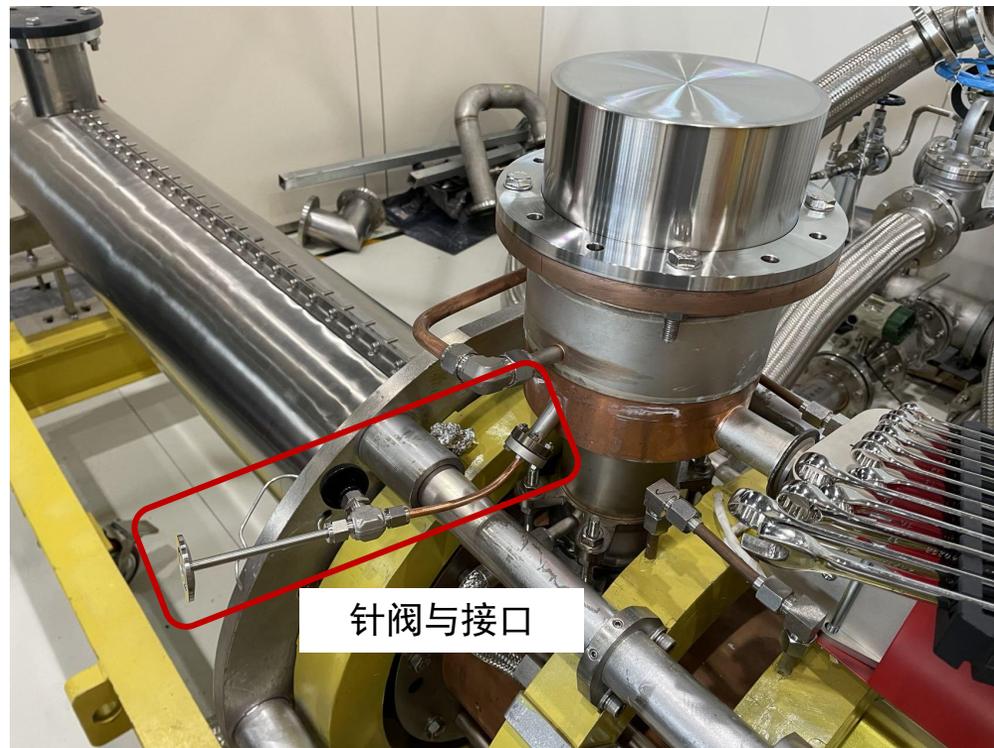
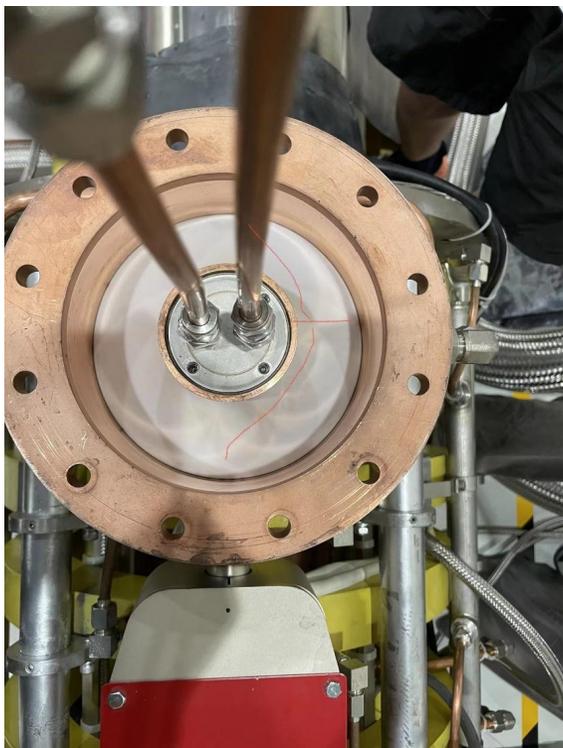
由于管电压较高，在出厂前特地增加了耐高压性能测试



油缸注油检测、水压检测等

高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管

2022年3月-7月高效率速调管在北京怀柔光源平台进行老练和测试；7月5日 **CW 630kW**，**效率70.5%**；7月5日13:00 测试现场出现异常声响，管内真空异常；高能所老师打开波导后发现**日本输出窗陶瓷表面出现裂纹。**



高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管

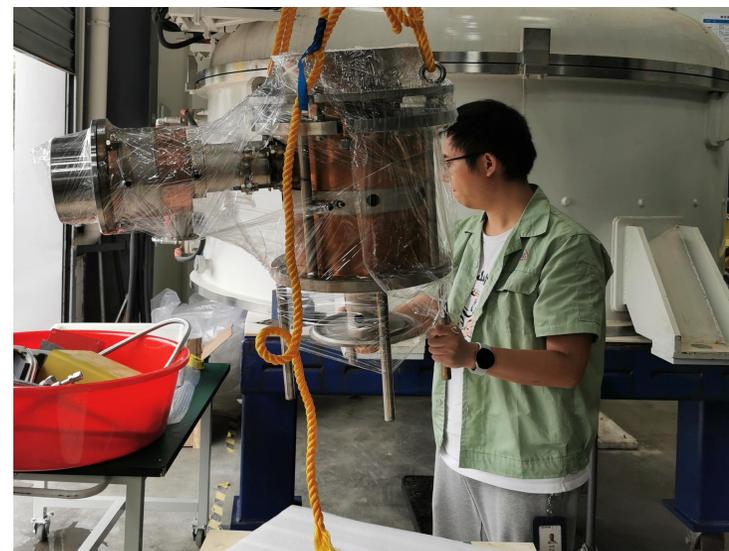
- 在得知高效率速调管需要进行返修后第一时间购买铜料，铜料份额包括了需要替换的管芯输出腔和末前腔、输出窗以及可能需要更换的第二腔。
- 在第一时直接接收从高能所运回的高效率管，并将输出腔、末前腔和输出窗割下，管体剩余部件密封保存，配合高能所进行问题分析。



第一时间订购铜料，并于22年8月15日到货，为返修速调管管做好准备



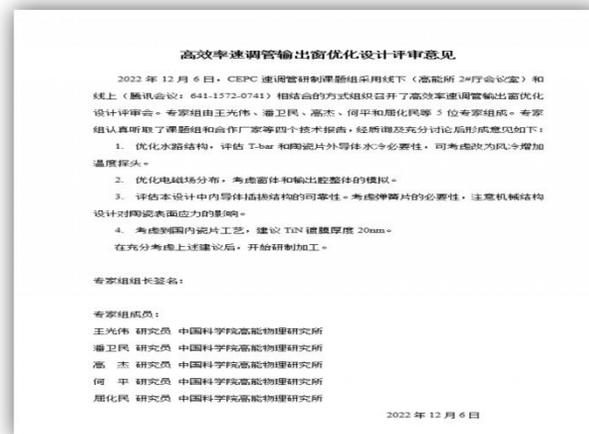
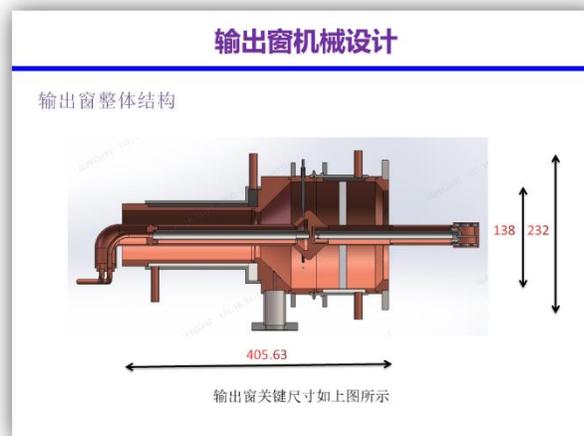
第一时间接收从高能所返回的高效率管并做妥善的安置，主要方向是保护管芯其他部件及阴极，同时做好问题部件的解剖分析



切割下的输出腔、末前腔和输出窗准备去做解剖

高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管

配合高能所输出窗的物理设计迅速给出机械设计（一周内给出），与高能所反复讨论修改，提出了可**更换陶瓷窗的机械设计**方案，针对水冷和风冷两种路线制定出**水冷、风冷和混合冷却**的多种方案供讨论和选择，并协助顺利完成设计评审



高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管

经过高能所老师的反复细致的论证后在7版（2022年12月29日）版本后开始出图加工，该方案将Tbar与陶瓷窗表面的**风冷**和同轴结构内外导体的**水冷相结合**，取长补短



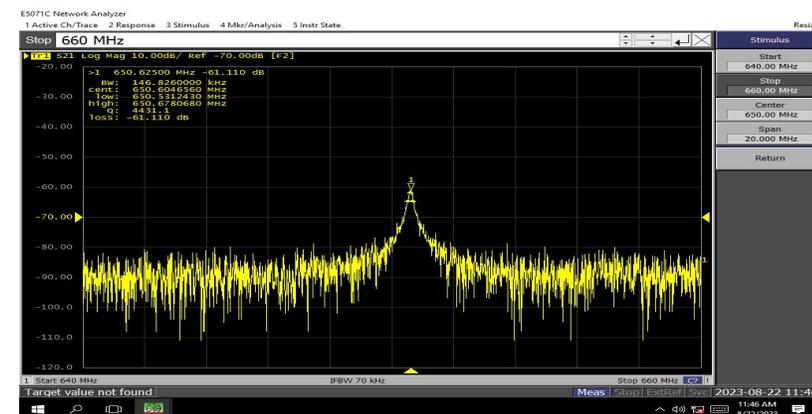
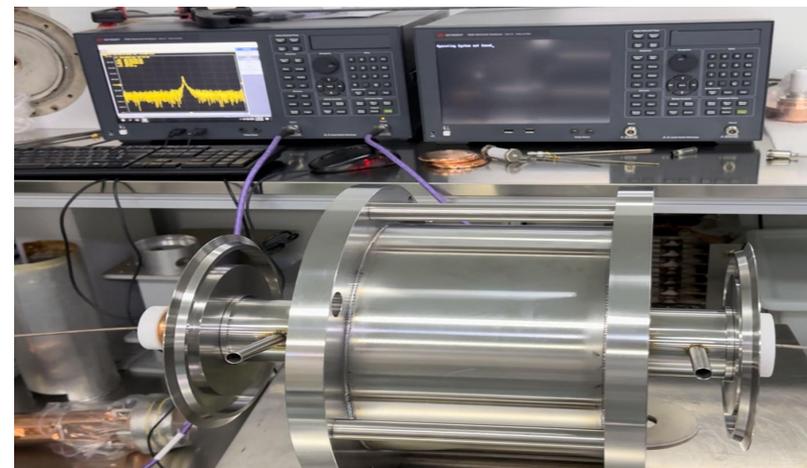
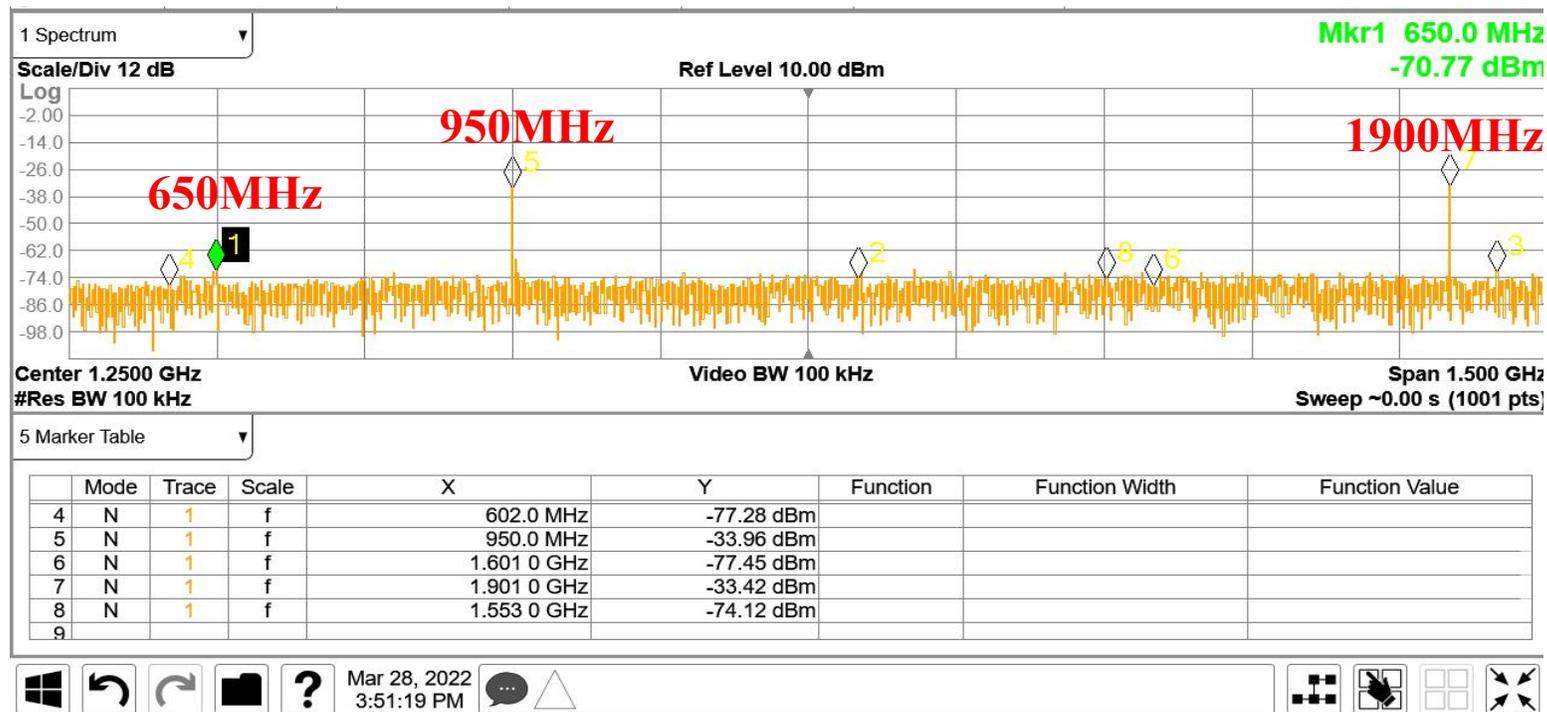
6-7腔大组件零部件加工制造与焊接检漏



最终版的输出窗与6-7腔大组件

高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管

重新研制了二号腔，来抑制速调管内部由腔体带来的自激振荡

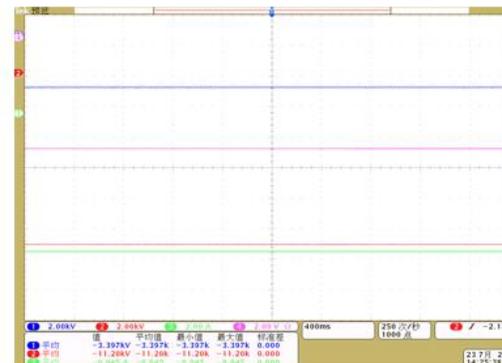
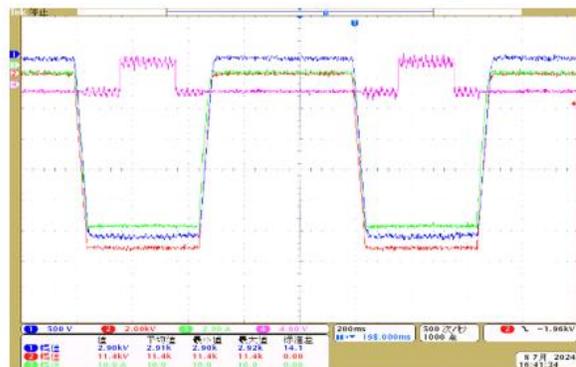
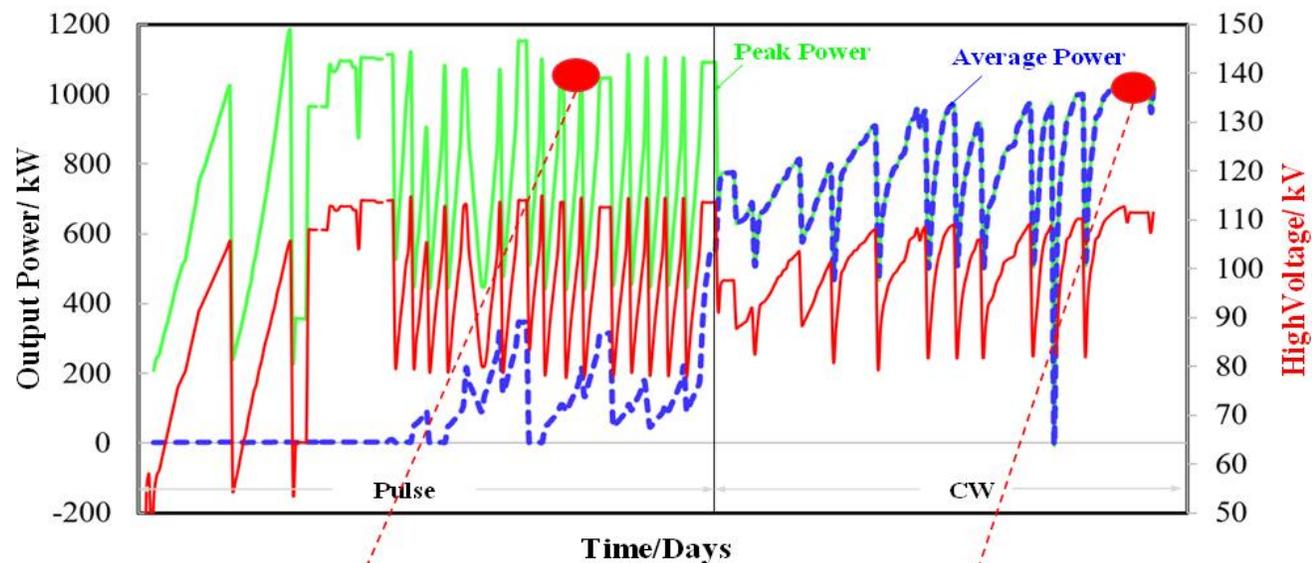


测试中，在直流状态下，电子枪79kV/5.5A，出现自激振荡，频率为950MHz及其谐波频率。

新二号腔冷测频率650.6MHz，Q值4431，通过仿真计算，可以有效抑制自激振荡

高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管

高效率测试平台650MHz/800kW高功率老炼全过程，脉冲→直流（高能所）



高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管

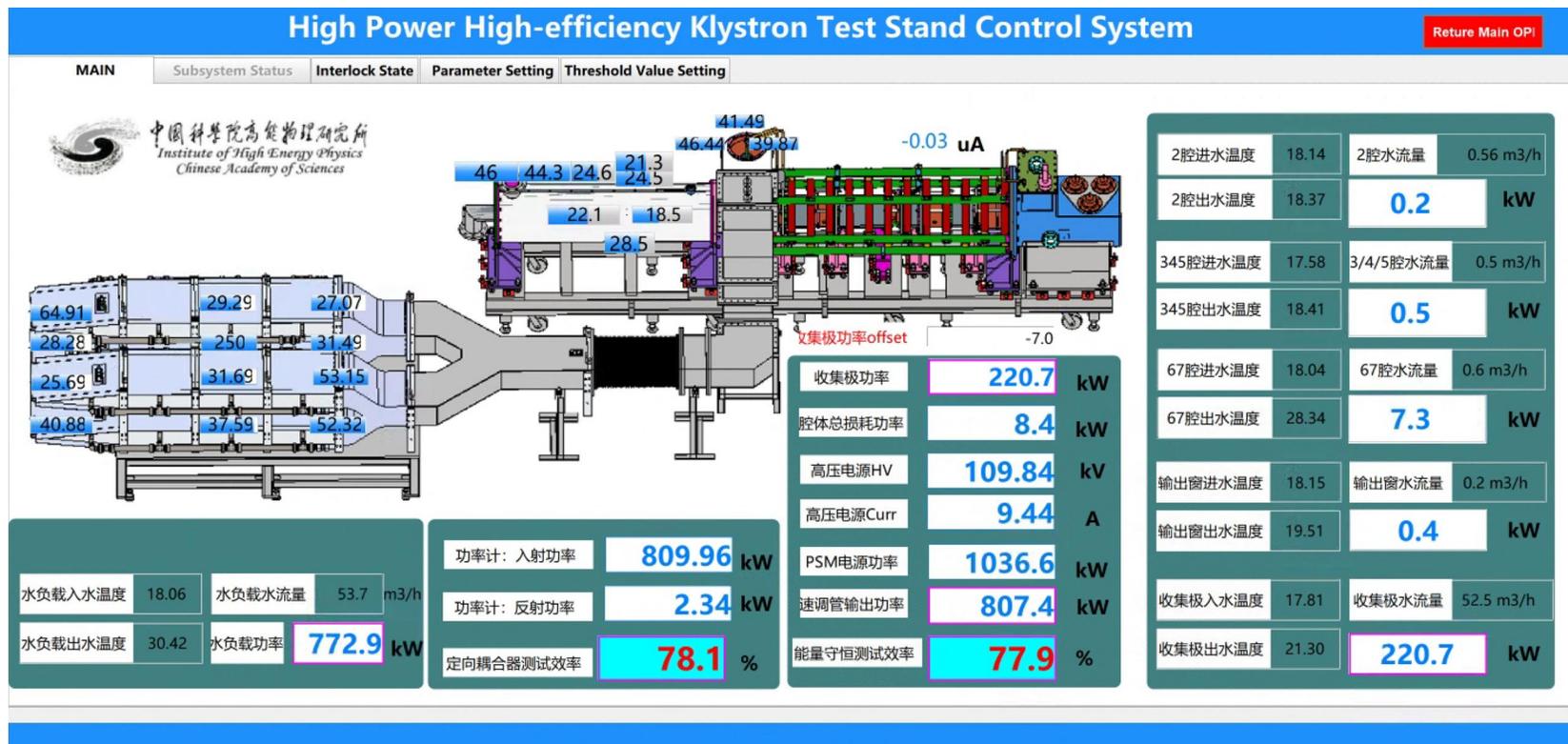
功率测量 (高能所)

■ 方法1: 通过Mega 60dB定向耦合器输出信号至安捷伦功率计测量, 定向耦合器耦合度, 线缆和衰减器插损使用Keysight E5080B网络分析仪标定, 总插损73.36dB。

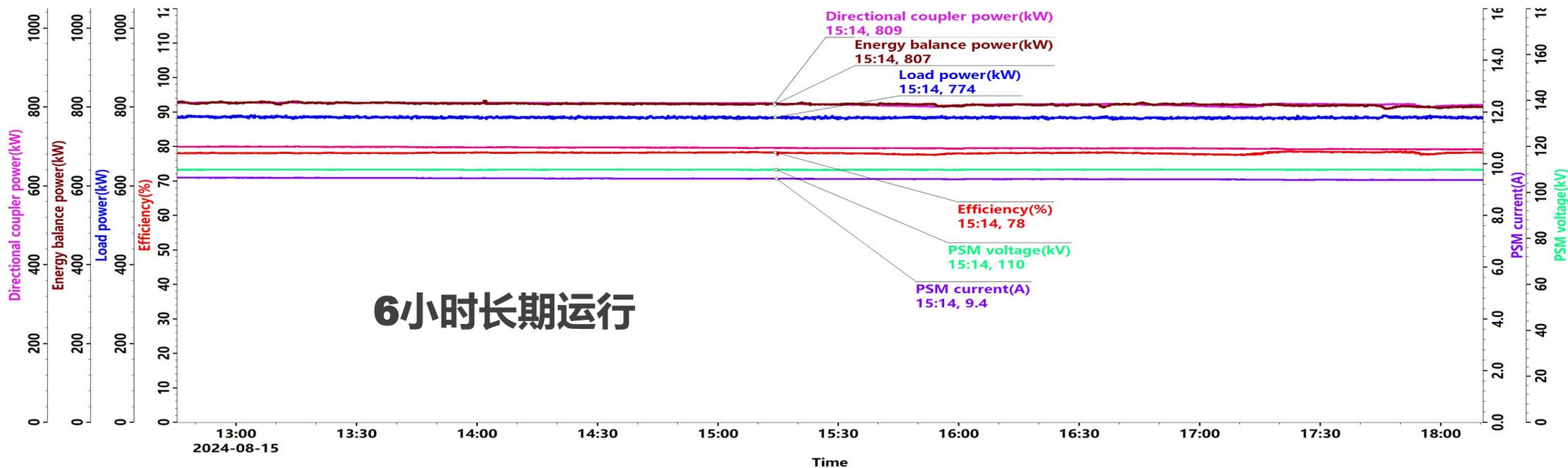
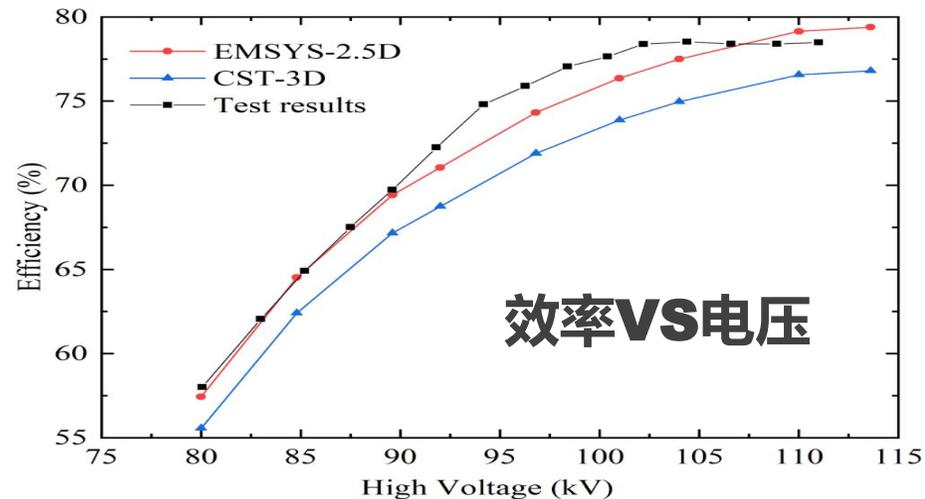
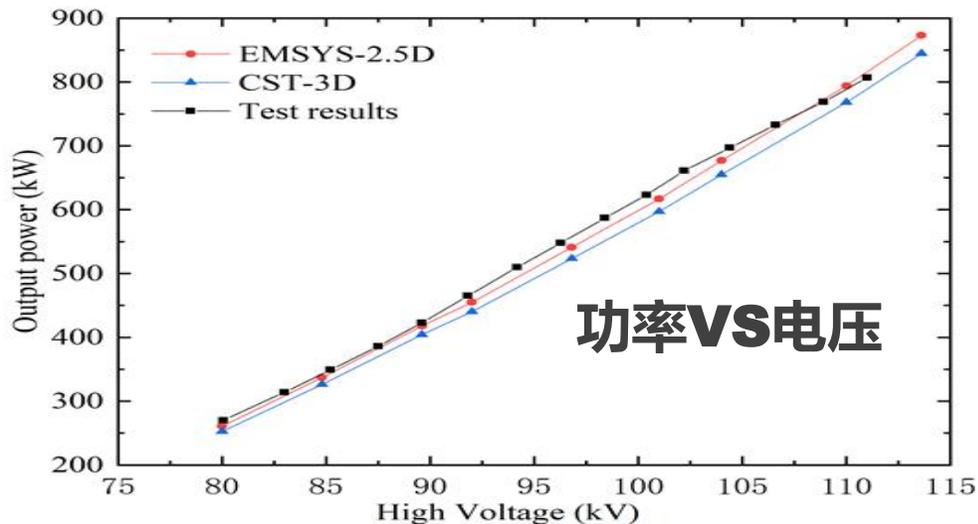
■ 方法2: 通过能量守恒

$$\text{输出功率} = \text{高压电源功率 (电压} \times \text{电流)} - \text{腔体总损耗} - \text{输出窗损耗} - \text{收集极功耗}$$

■ 方法3: 通过水负载



高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管



高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管

2024年8月18日，中国科学院高能物理研究所在北京组织召开了环形正负电子对撞机（CEPC）高功率高效率P波段连续波速调管测试会。专家组认为，该速调管在连续波工作模式下运行稳定，输出功率、效率和频率等指标均达到CEPC的设计要求。连续波输出功率803千瓦，效率78.5%，在此类速调管中处于世界领先水平。该速调管的研制成功，标志着高功率高效率连续波速调管自主研发水平再上新台阶。





- 公司介绍
- 650MHz/800kW连续波速调管
- 高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管
- ◆ 650MHz/800kW多注速调管
- 其他P波段速调管
- 总结

650MHz/800kW多注速调管

2021年9月多注速调管通过机械评审开始正式实施；由于技术难度巨大，多注速调管项目主要分两期，第一期是完成腔体、输出窗的研究以及束流管的研制；第二期是完成整管。目前第一期已经完成，第二期将于24年底完成。



650MHz/800kW 高效率连续波多注速调管 工艺设计评审意见

2021年9月11日，CEPC 速调管项目组在昆山国力电子科技有限公司组织召开了 650MHz/800kW 高效率连续波多注速调管工艺设计评审会。来自中科院空天信息创新研究院、湖北汉光科技股份有限公司和中科院高能物理研究所等 7 位专家（名单见附件），听取了项目组成员王盛昌和汪同生作的《650MHz/800kW 高效率连续波多注速调管工艺设计》报告。专家组经质询和讨论，一致认为 650MHz/800kW 高效率连续波多注速调管工艺设计方案合理可行，通过评审。请项目组根据专家的建议进一步完善结构和工艺。

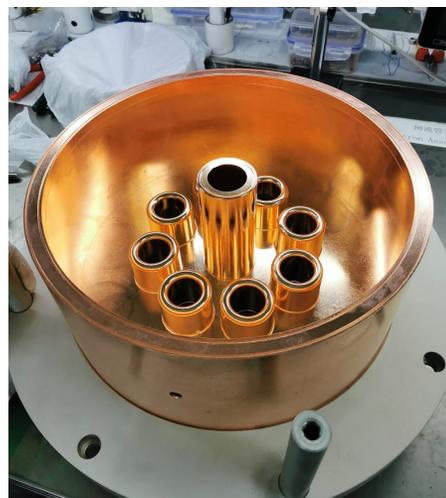
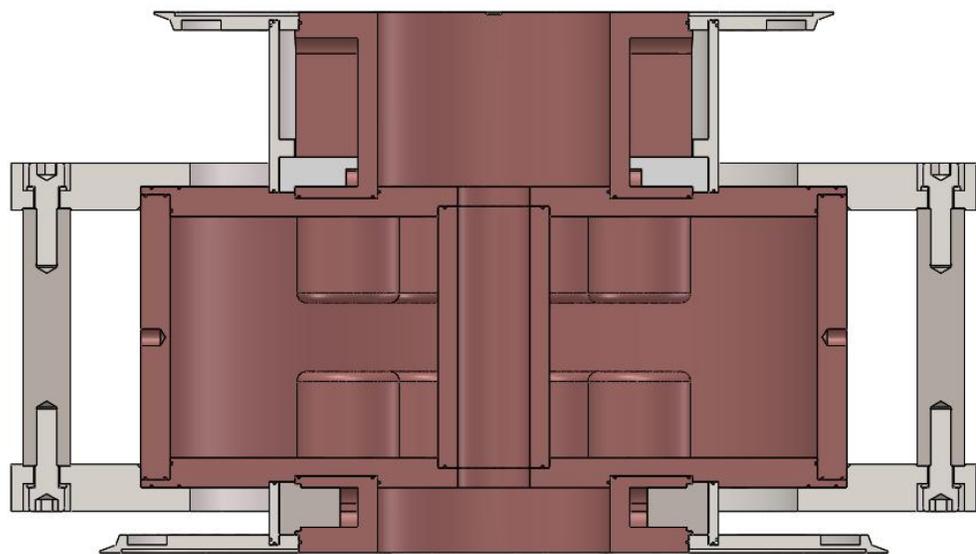
主要建议如下：

- 1、进一步优化和完善输出波导的支撑与加固方式。
- 2、进一步优化和完善整管的支撑结构和方式。
- 3、对比不同线规、线包尺寸和冷却方式得到重量和功率损耗最小的方案。

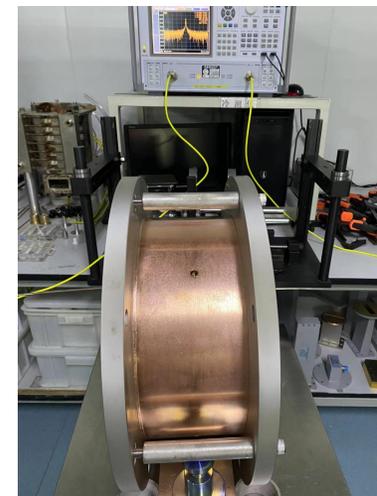


650MHz/800kW多注速调管

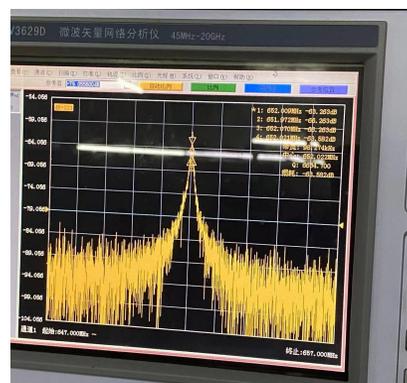
选择2号腔进行工艺实验；克服了腔体焊接过程中频率漂移问题。



装配

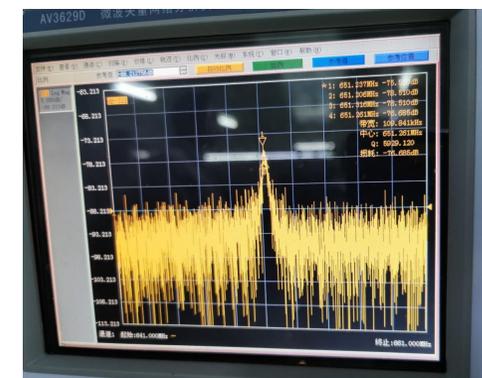


冷测



原本腔频率为652MHz

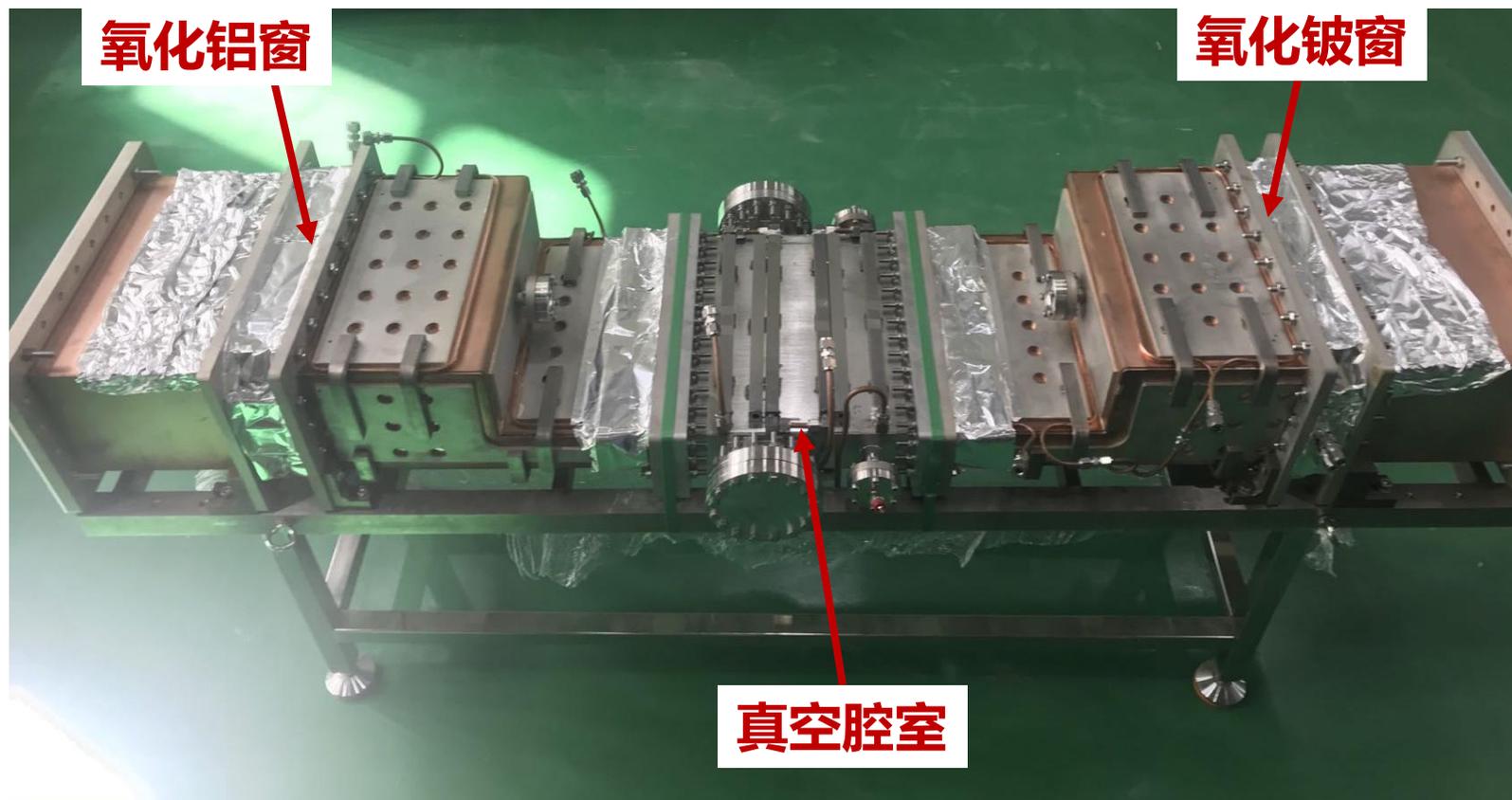
进行频率调谐



调谐到651.237MHz

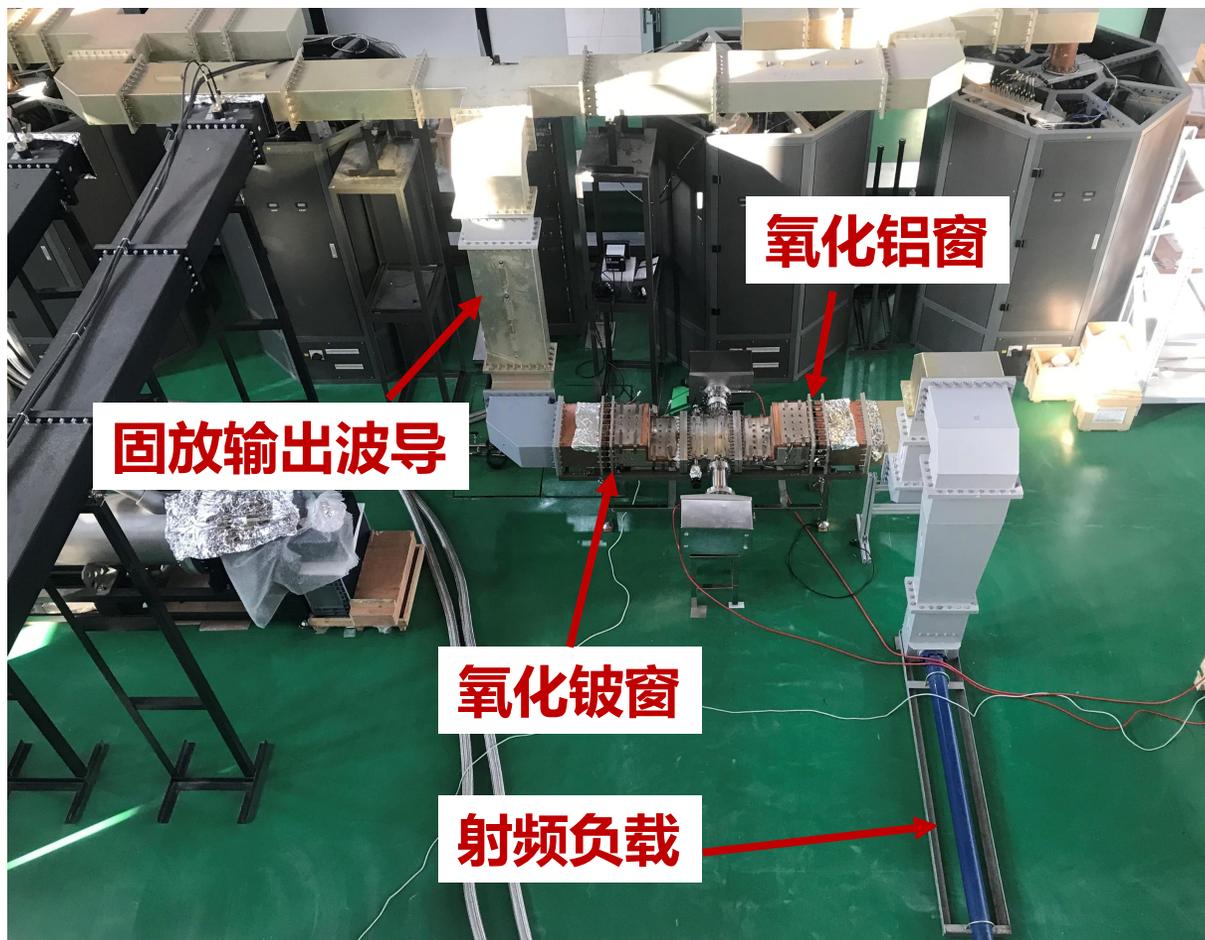
650MHz/800kW多注速调管

针对多注速调管的双窗结构、波导耦合输出，研究了波导的焊接制造工艺以及氧化铝瓷和氧化铍瓷分别作为输出窗的设计方案研证



650MHz/800kW多注速调管

150kW固态放大器功率源行波热测 (高能所)



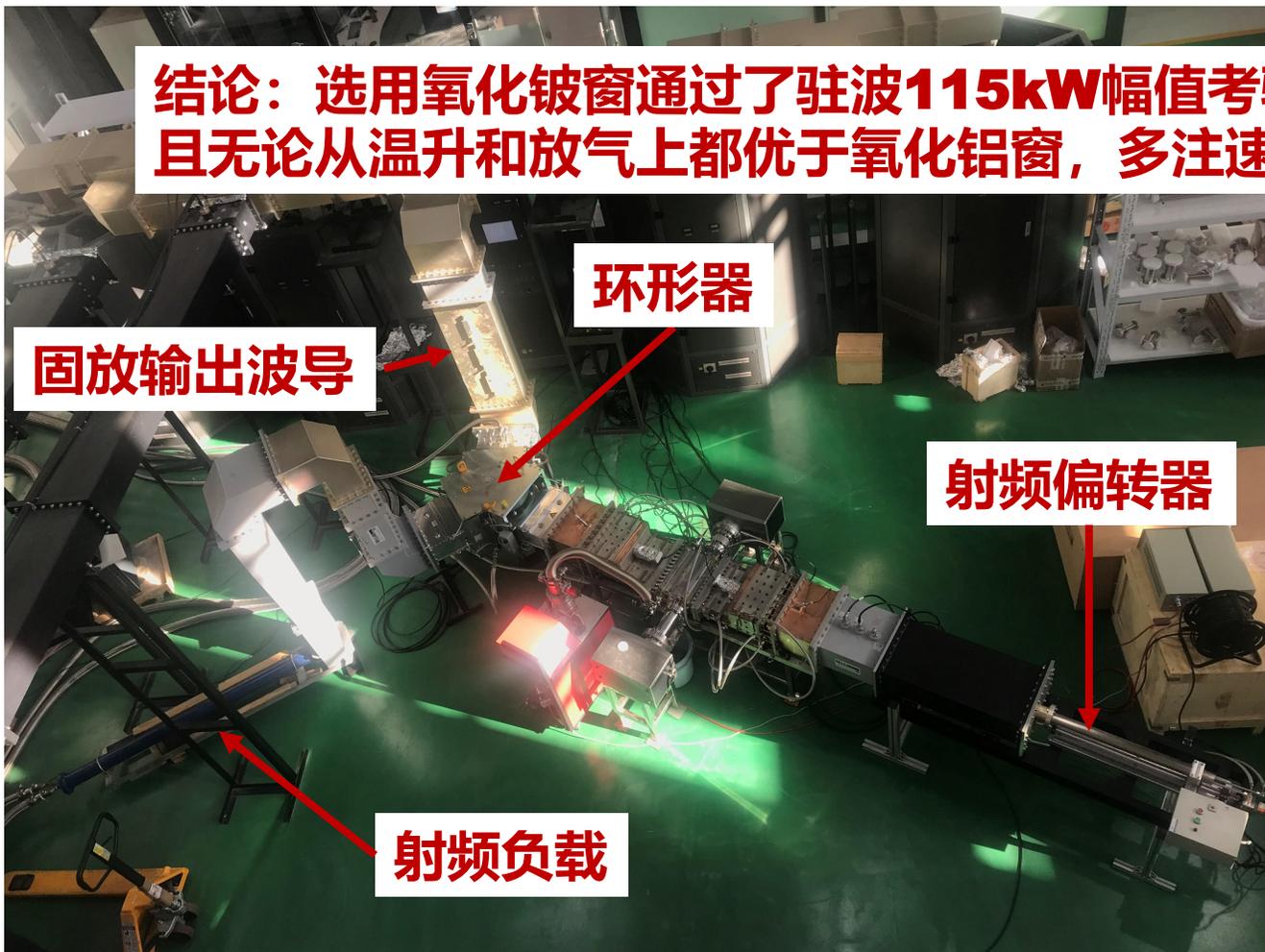
测得的连续波功率

参数	数值
固放输出功率	143 kW (CW)
氧化铝陶瓷表面温升	10.2 °C
氧化铍陶瓷表面温升	8.7°C
持续时间	4 hours

650MHz/800kW多注速调管

150kW固态放大器功率源驻波热测 (高能所)

结论：选用氧化铍窗通过了驻波115kW幅值考验，能够承受住400kW行波功率且无论从温升和放气上都优于氧化铝窗，多注速调管选用氧化铍窗

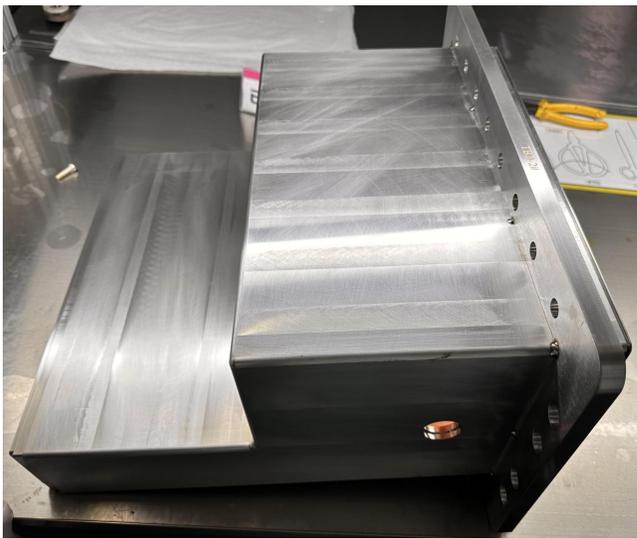


氧化铍窗片上测得的连续波功率
该处为注波电压幅度峰值位置

	氧化铝窗	氧化铍窗
固放输出功率	110 kW CW	115 kW CW
温升	37.0 °C	27.4 °C
持续时间	>2 hours	>2 hours

650MHz/800kW多注速调管

运用了不锈钢+铜复合材料技术克服了方形铜波导真空下变形问题。



650MHz/800kW多注速调管

电子枪部件研制



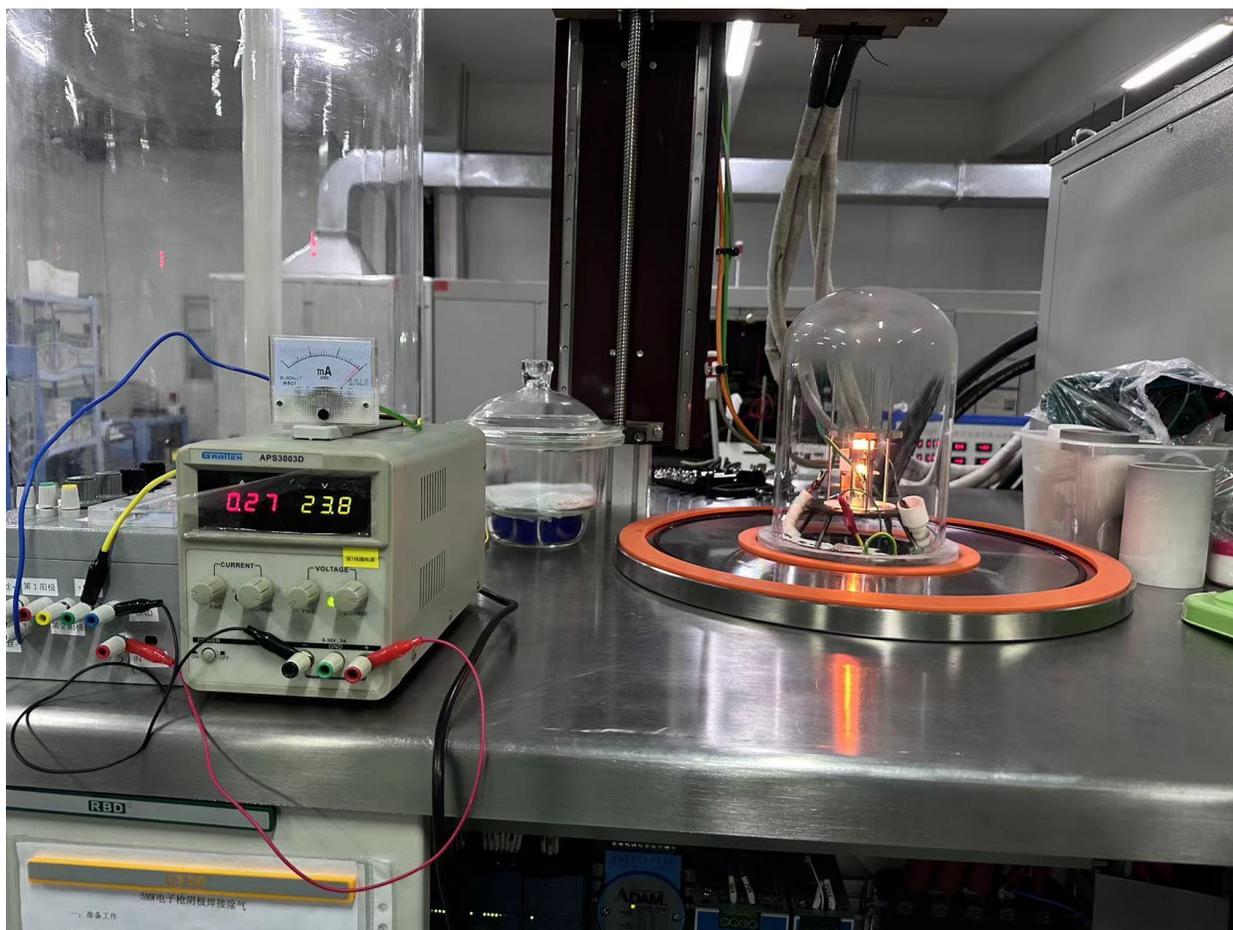
电子枪芯柱筒焊接和校平，
面平行度**优于0.03mm**

电子枪各关键部位的不锈钢零件的**相对磁导率**
严格把关，**小于1.05**

电子枪陶瓷筒上釉减少污
染物粘覆

650MHz/800kW多注速调管

阴极发射性能测试



MBK 阴极激活记录

时间	热丝电压	热丝电流	真空度	温度	阳极电压	阳极电流
13:35	0.17	0.51	7.9×10^{-6}			
14:00	0.31	1.301	8.2×10^{-6}			
14:20	0.477	1.497	8.2×10^{-6}			
14:30	0.678	1.599	8.8×10^{-6}			
14:35	1.183	2.496	9.7×10^{-6}			
15:00	1.478	3.476	1.1×10^{-5}			
15:40	1.881	3.479	1.4×10^{-5}			
15:30	2.289	4.501	1.7×10^{-5}	358/390°C		
15:36	2.384	4.501	1.8×10^{-5}	397°C		
16:10	2.397	4.490	1.6×10^{-5}	450°C		
17:40	2.910	5.003	9.9×10^{-6}	461°C		
17:50	3.264	5.502	1.0×10^{-5}	517°C		
18:00	3.734	6.005	1.0×10^{-5}	582°C		
18:10	4.207	6.501	1.1×10^{-5}	647°C		
9:07	4.125	6.501	1.1×10^{-5}	704°C		
9:07	4.582	6.504	3.8×10^{-6}	699°C		
9:20	5.103	7.504	3.8×10^{-6}	794		
9:25	5.160	7.504	4.1×10^{-6}	764		
9:30	5.611	8.006	4.1×10^{-6}	804		
9:35	5.656	8.006	4.2×10^{-6}	811		
9:40	5.979	8.341	4.4×10^{-6}	851		
9:45	5.979	8.336	4.5×10^{-6}	866		
9:50	6.641	9.009	4.6×10^{-6}	879		
9:55	6.70	9.010	5.1×10^{-6}	899		
10:00	7.208	9.592	5.3×10^{-6}	943		
10:05	7.296	9.511	5.8×10^{-6}	958		
10:10	7.708	10.007	6.1×10^{-6}	1000		
10:15	7.835	10.007	6.6×10^{-6}	1007		
10:20	8.273	10.508	6.8×10^{-6}	1047		
10:25	8.336	10.509	8.5×10^{-6}	1059		
10:30	8.627	10.809	9×10^{-6}	1098		
10:32	8.868	11.206	9.2×10^{-6}	1106		
10:35	9.182	11.313	1×10^{-5}	1125		
10:36	9.017	11.112	1×10^{-5}	1145		
10:36	9.065	11.213	1×10^{-5}	1148		
4:12	9.080	11.213	1.2×10^{-5}	1150		
12:13	8.412	11.5013	1.1×10^{-5}	1140		(温度计初读)
13:20	8.527	12.010	1×10^{-5}	1080		

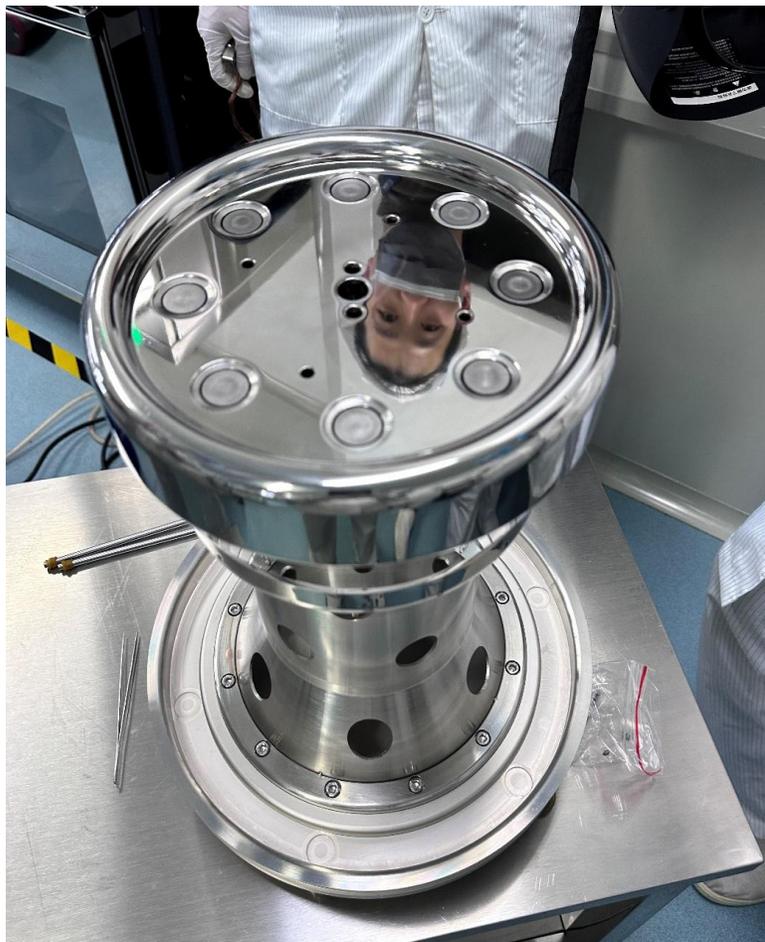
在中频除气台上进行束流管阴极发射测试，测试环境真空度优于 1.2×10^{-5} Pa，500V电压测得发射流强超过3mA（手头的电流表最大量程3mA），工作时候的电压电流为8.53V，12A，温度1080度

650MHz/800kW多注速调管

电子枪



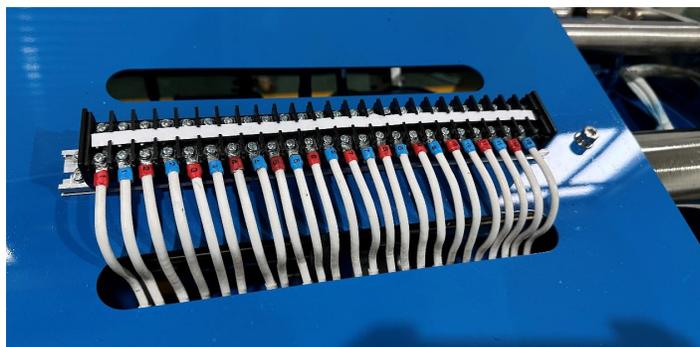
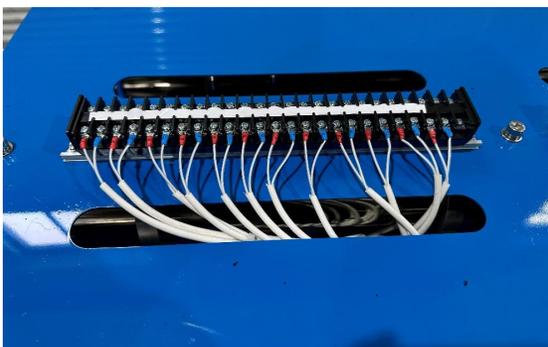
束流管电子枪阴极安装



束流管总装

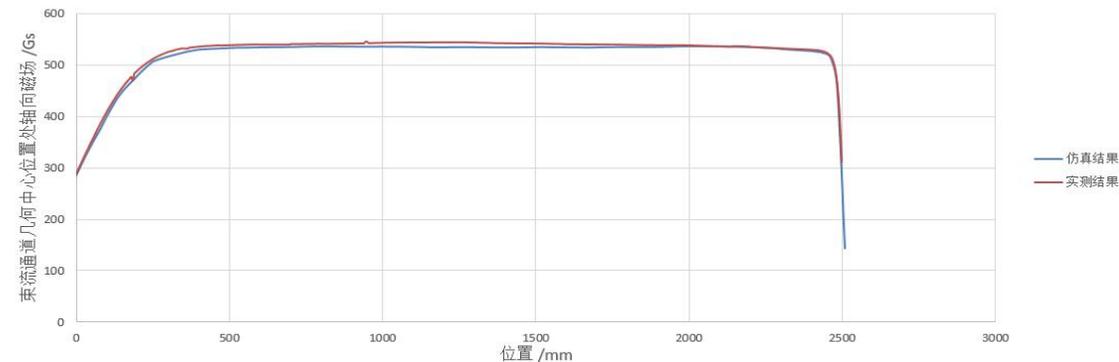
650MHz/800kW多注速调管

成功完成了**重达3吨**的聚焦线圈系统的研制和测试

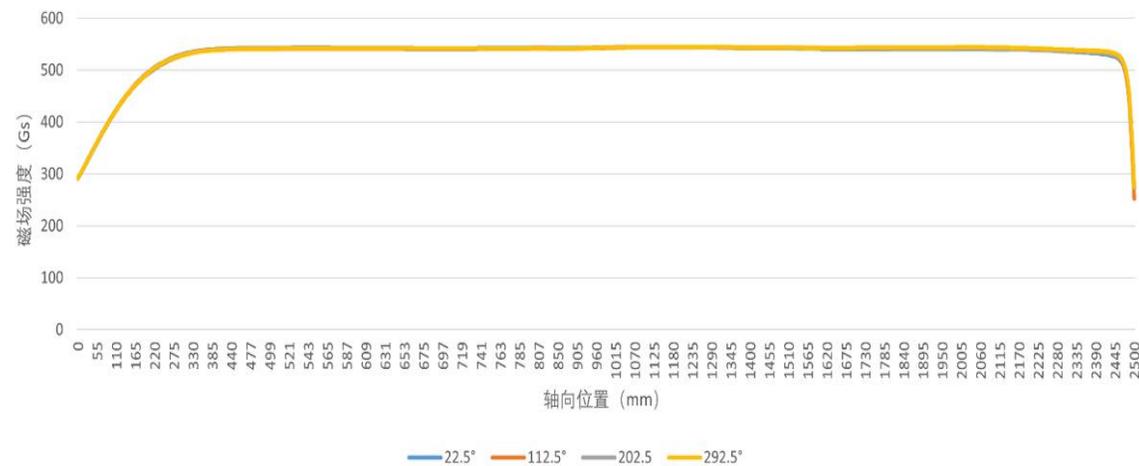


聚焦线圈系统测试现场

MBK聚焦线圈系统磁场测量与仿真值对比-2023/02/10



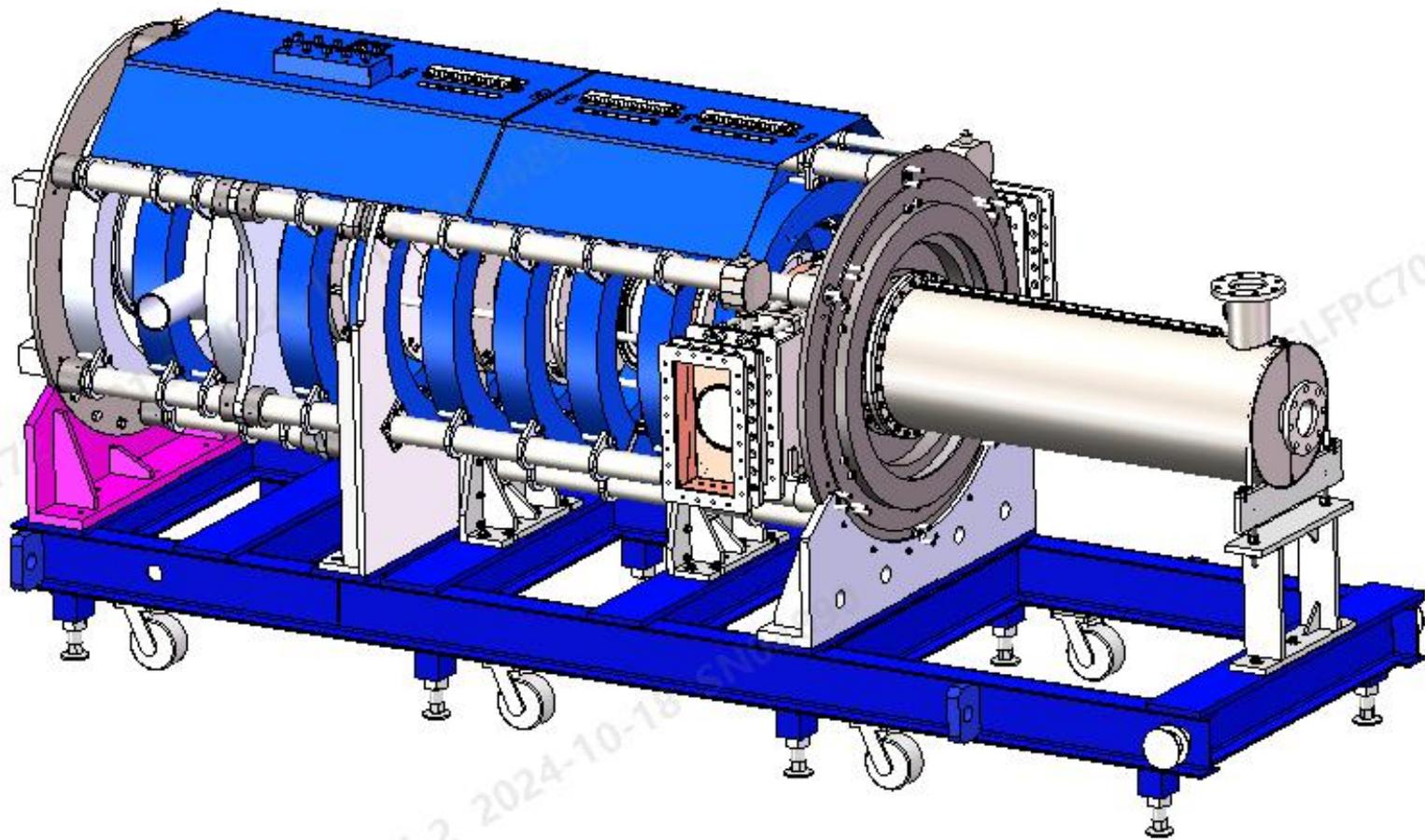
KLY04-0200-0000聚焦线圈测试数据



线圈磁场测量结果与仿真结果对比 以及不同位置磁场均匀性结果

650MHz/800kW多注速调管

预计24年底可以运至怀柔测试基地进行老炼测试。





- 公司介绍
- **650MHz/800kW连续波速调管**
- **高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管**
- **650MHz/800kW多注速调管**
- ◆ 其他P波段速调管
- 总结

648MHz/1.2MW速调管

22年，在650MHz速调管基础上研制了648MHz/1.2MW长脉冲速调管



腔体研制与总装



排气与线圈参数测量



钳口后道
客户现场验收



完成包装，押车送至散裂现场

648MHz/1.2MW速调管

648MHz/1.2MW长脉冲速调管在散裂中子源测试大厅

设计指标

工作频率	648MHz
带宽 (1dB)	$\pm 0.5\text{MHz}$
峰值功率	$\geq 1.2\text{MW}$
RF脉冲宽度	1.2ms
脉冲重复频率	25Hz
效率	$\geq 50\%$
增益	$\geq 45\text{dB}$
阴极电压	$< 105\text{kV}$



648MHz/1.2MW速调管

23年十月通过验收，速调管在接入环形器和终端匹配负载条件下满功率运行，所有技术指标均达到设计要求。

文件编号：

CSNS-II 工程 非标设备验收报告 (会议版)

项目名称：648 MHz 大功率速调管

验收组组长：段兆云

2023 年 10 月 24 日

四、验收意见（可加附件）：

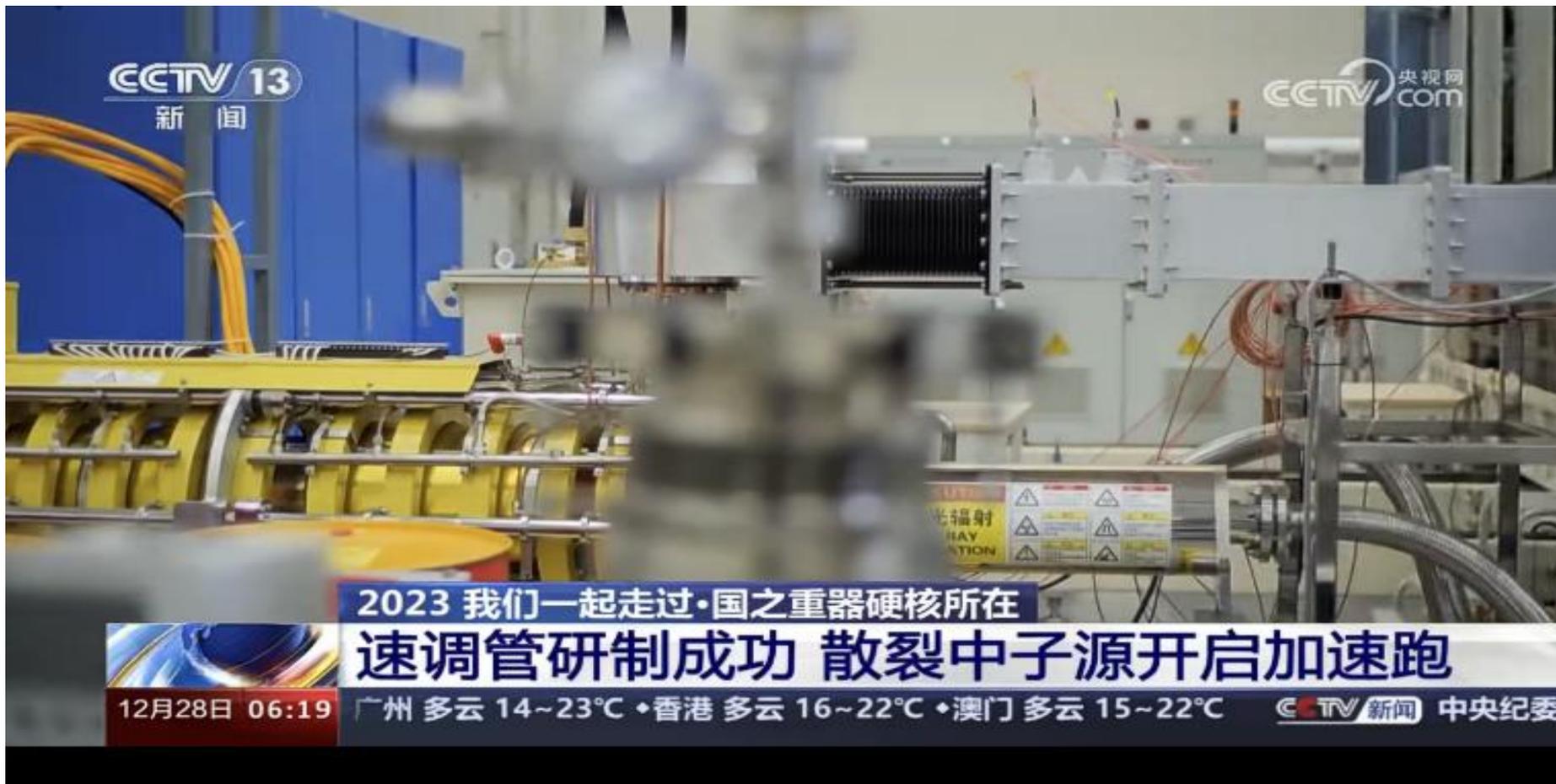
2023年10月24日，散裂中子源科学中心组织专家对648MHz大功率速调管项目进行了现场验收。验收组分别听取了慕振成所作的《648MHz速调管现场验收报告》和昆山国力王少哲所作的《648MHz/1.2MW 速调管研制总结报告》以及测试组所做的测试报告，对测试结果进行了审核认定。验收组一致认为，速调管性能指标满足合同要求，建议通过现场验收。

验收组组长：段兆云

日期：2023.10.24

648MHz/1.2MW速调管

该型号速调管在23年12月28日的央视新闻上进行了特别报道，是**CEPC预研项目支撑国家大科学装置关键核心部件国产化的典型案例。**



324MHz/2.5MW速调管研发

22年联合电子科技大学完成速调管物理设计评审，23年开始速调管研制

设计指标

工作频率	324MHz
带宽 (1dB)	±0.1MHz
峰值功率	≥2.5MW
RF脉冲宽度	650μs
脉冲重复频率	25Hz
效率	≥55%
增益	≥45dB
阴极电压	-110kV



AJDisk中的仿真结果

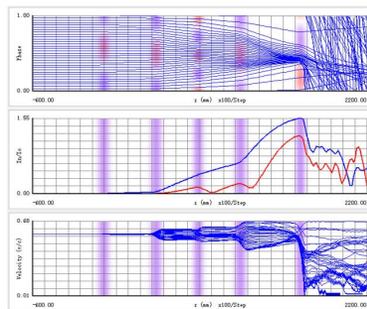


图6 AJDisk中的仿真结果图

表4 AJDisk中的参数设置及仿真结果

注电压	110kV
注电流	48A
输入频率	324MHz
输入功率	65W
漂移管半径	36.5mm
电子注半径	24mm
输出功率	3.07MW
电子效率	58.1%
增益	46.6dB



CST中的建模及设置

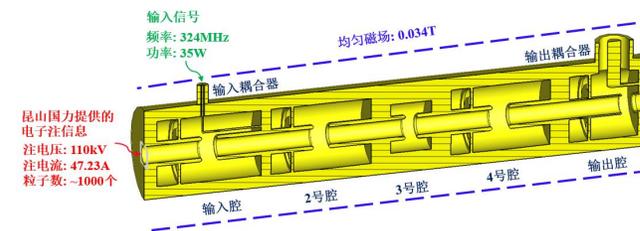


图7 超构材料速调管在CST中的建模及参数设置



输入和输出端口的时域信号

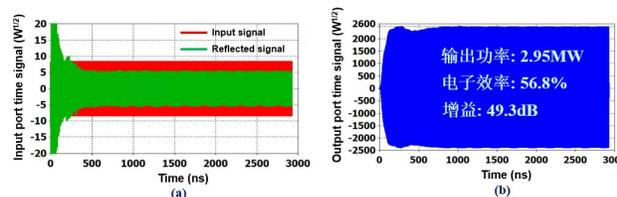


图8 (a)输入信号和输入端口的反射信号随时间的变化关系; (b)输出端口的信号幅值

- 输入端口的反射信号幅值和输出端口的信号幅值稳定后都没有出现异常波动。
- 理想电子发射情形下，输出功率为3.1MW。



输出功率随输入信号频率的变化

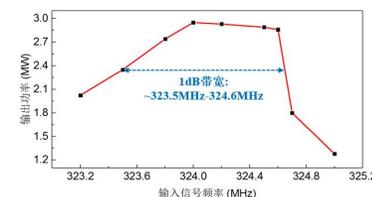


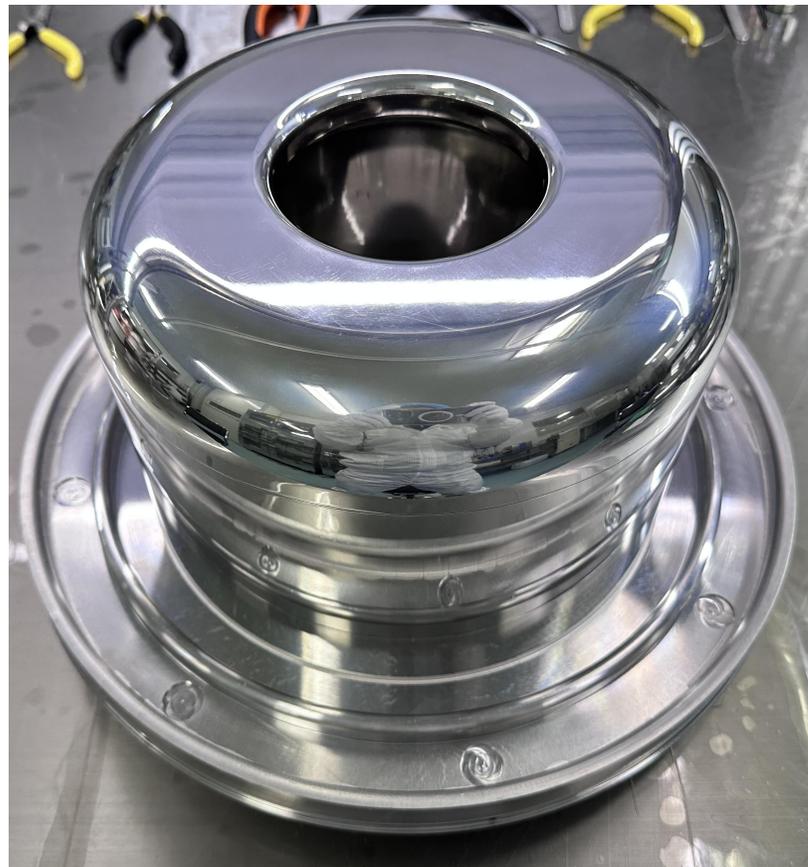
图10 输出功率随输入信号频率变化

- 在输入信号频率约为323.5MHz~324.6MHz时，输出功率大于2.37MW，位于1dB带宽范围内。

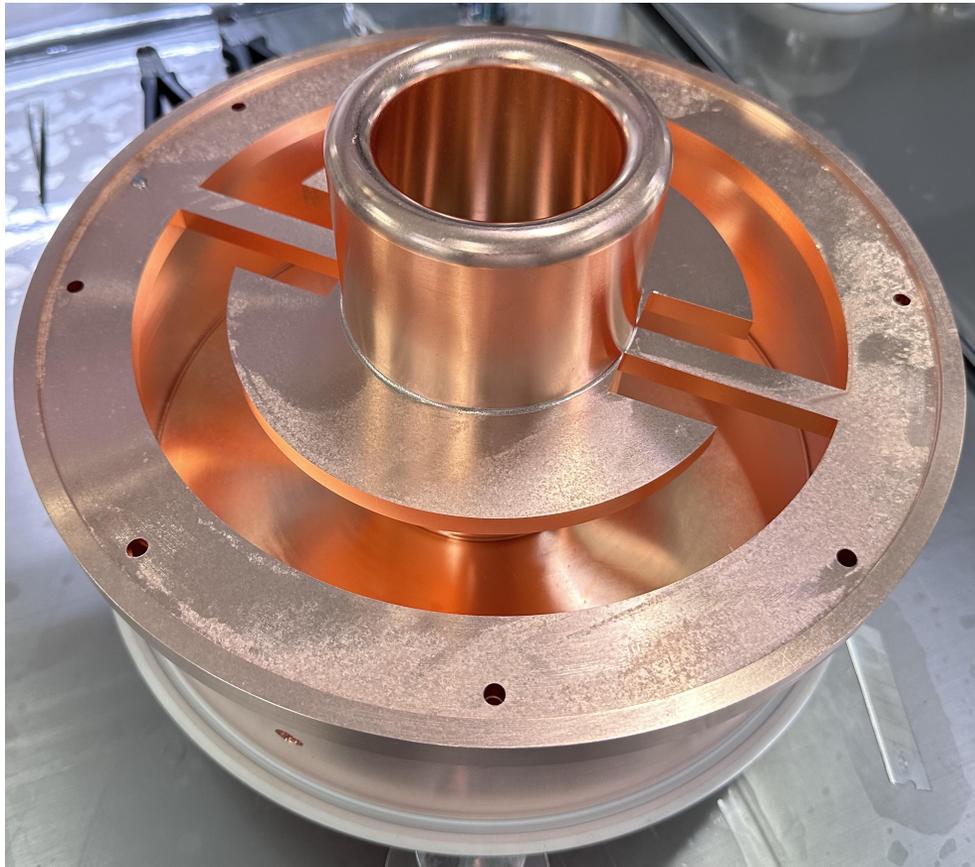
电子科大段教授团队完成物理设计并作报告

324MHz/2.5MW速调管研发

研制中国自主创新的超构材料谐振腔体，开启P波段速调管小型化之路。



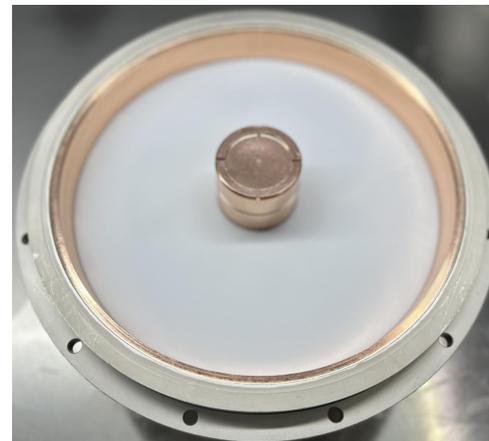
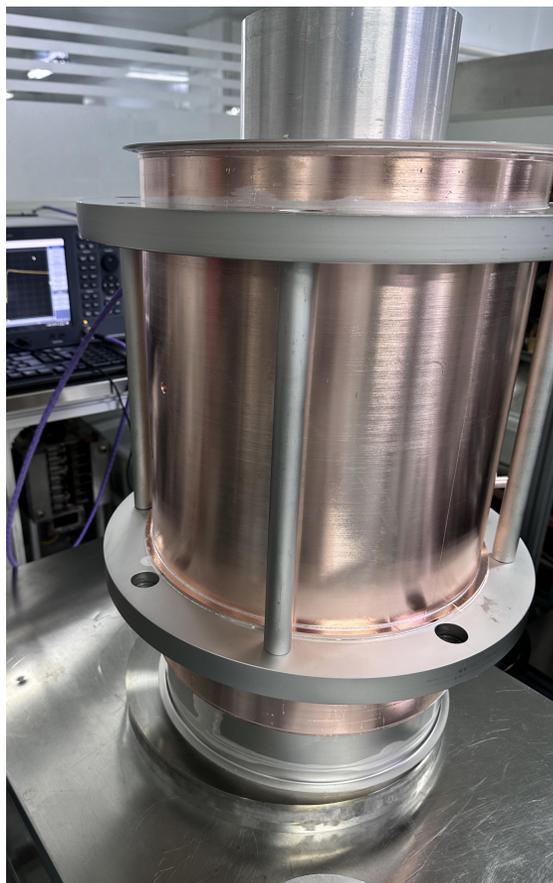
电子枪组件研制



腔体超构体结构组件研制

324MHz/2.5MW速调管研发

324MHz/2.5MW速调管的腔体、输出窗及收集极等部件



324MHz/2.5MW速调管研发

24年8月，速调管完成冷高压老炼，运至中国散裂中子源测试平台进行测试



- 公司介绍
- **650MHz/800kW连续波速调管**
- **高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管**
- **650MHz/800kW多注速调管**
- **其他P波段速调管**
- ◆ **总结**

总结



2020年 650MHz/800kW速调管样管



2023年 650MHz/800kW多注速调管束流管



2024年 324MHz脉冲速调管

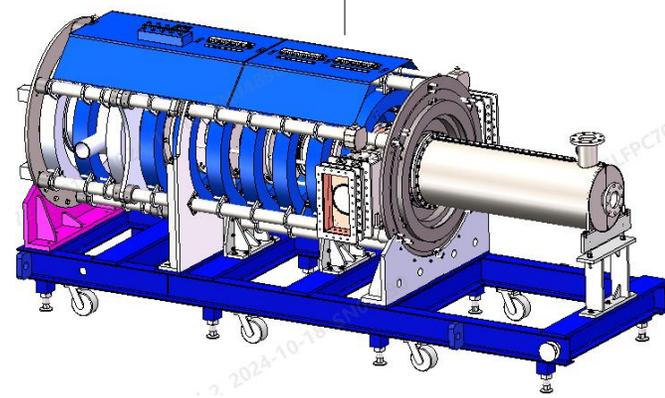
2021年 650MHz/800kW高效率速调管样管



2022年 648MHz脉冲速调管



2024年 650MHz/800kW多注速调管



致谢

- 感谢中国科学院高能物理研究所周祖圣、肖欧正、王盛昌、甘楠、刘劲东、李飞、刘宇以及裴国玺等专家老师团队的工作和指导
- 感谢中国散裂中子源王生、刘华昌、慕振成、张辉、荣林艳、王禾欣、陆志军等专家老师团队的工作和指导
- 感谢空天信息创新研究院张志强、张瑞、廖云峰等专家老师团队的工作和指导
- 感谢电子科技大学段兆云、王新、张宣铭等专家老师团队的工作和指导
- 感谢各用户单位所提的宝贵意见和建议



感谢您的观看!

【国力股份 - 电真空科技】证券代码：688103



官方网站



官方微信

昆山国力电子科技股份有限公司
Kunshan Guoli Electronic Technology Co.,Ltd

地址：江苏省苏州昆山市开发区西湖路28号

总机：(86-21)512-3687-2111

传真：(86-21)512-3687-2112

网址：www.glvac.cn