

国力P波段大功率速调管 研制情况

汇报人：王少哲/李加兵

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**
- **650MHz/800kW多注速调管**
- **648MHz/1.2MW脉冲速调管**
- **324MHz/2.5MW脉冲速调管**
- **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、生产和销售的科创板上市企业。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，产品广泛应用在国防科技、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。

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



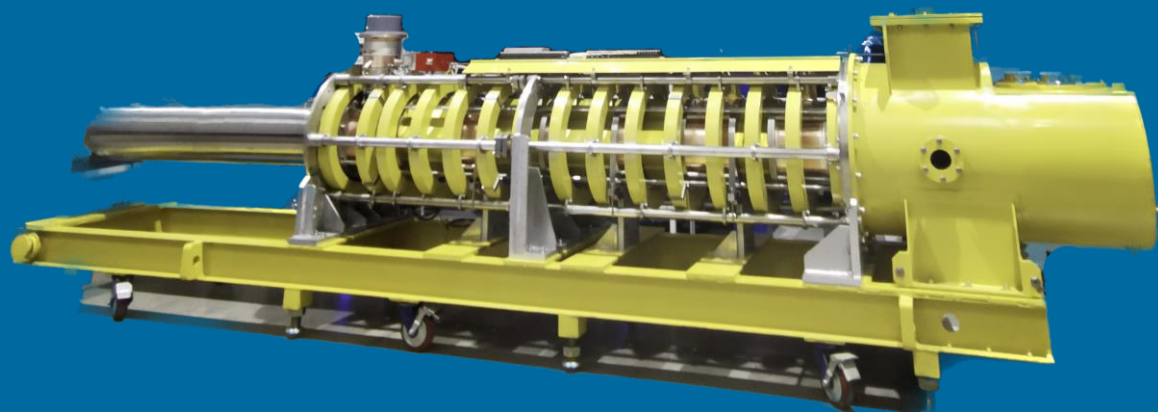
▼ 发展 —— 响应改革开放 创新产业驱动，助力解决卡脖子难题



▶ 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

■ 650MHz/800kW多注速调管

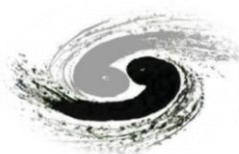
■ 648MHz/1.2MW脉冲速调管

■ 324MHz/2.5MW脉冲速调管

■ 总结

650MHz/800kW连续波速调管

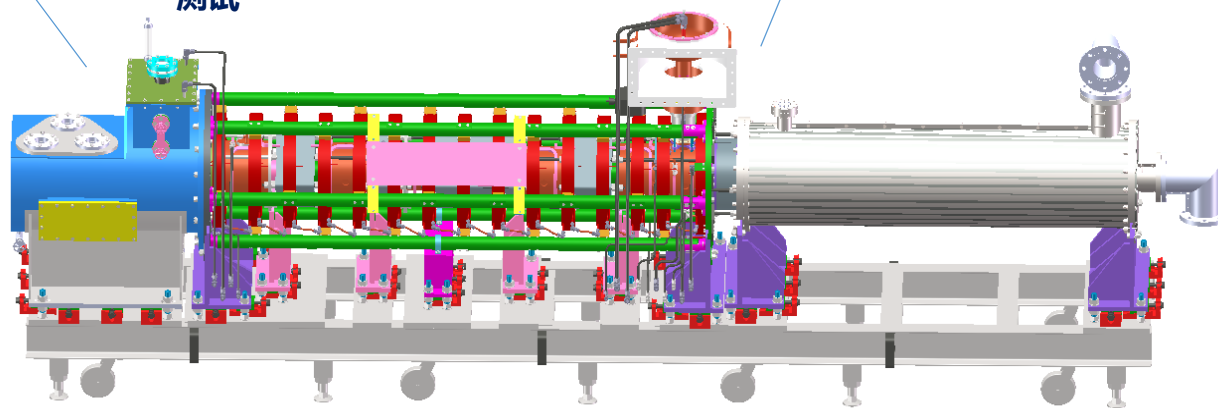
在国内首支P波段650MHz/800kW连续波速调管研制中，国力光荣承担了收集极、聚焦线圈、油缸、运行支架等速调管部件的研制任务以及总装、排气、后道、包装运输等关键工艺技术的攻关，并参与了后期测试。



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



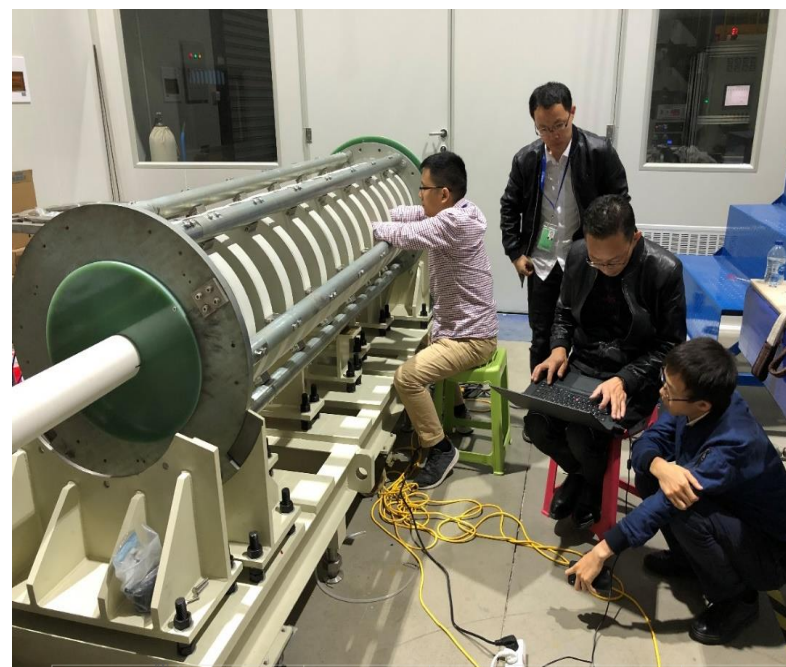
- 电子枪
- 谐振腔
- 总装(参与)
- 排气 (参与)



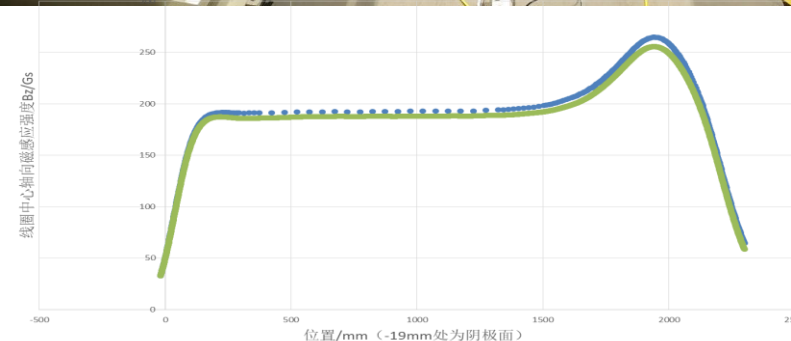
- 收集极
- 聚焦线圈
- 油缸
- 运行支架
- 总装及排气
- 后道
- 包装与运输
- 测试 (参与)

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）



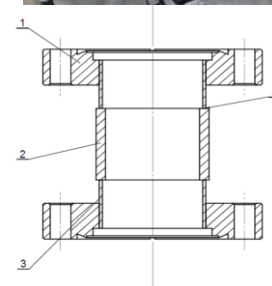
聚焦线圈研制成功

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。



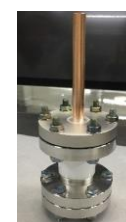
油缸及高压接线座研制成功



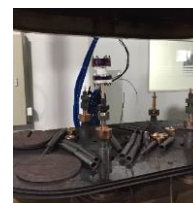
图纸



装配



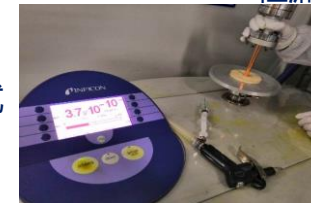
检漏



封离



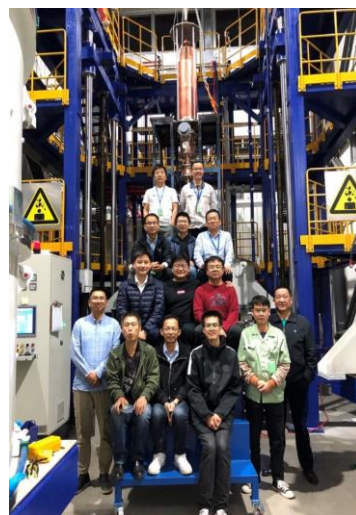
排气测试



运行支架及排气工艺关键部件性能验证

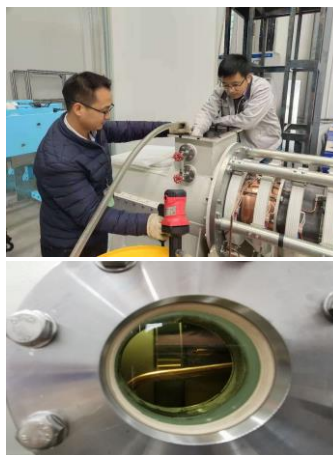
650MHz/800kW连续波速调管

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

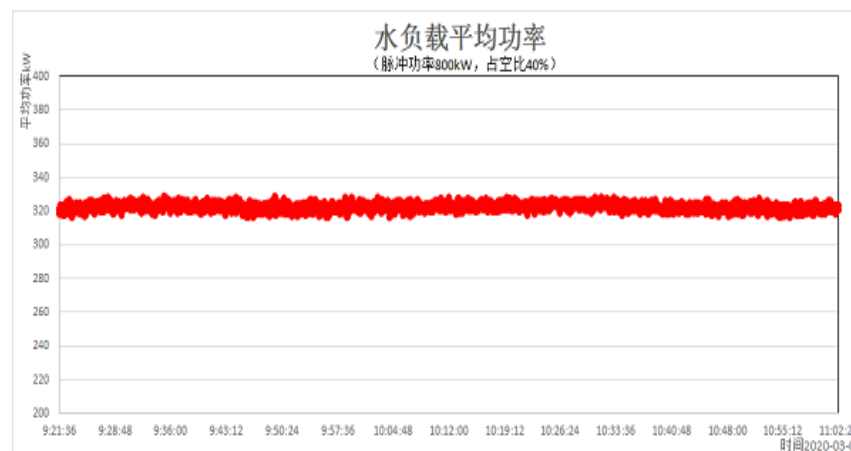


管体与支架组合及注油实验

包装与发货

650MHz/800kW连续波速调管

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。



650MHz/800kW连续波速调管——高效率

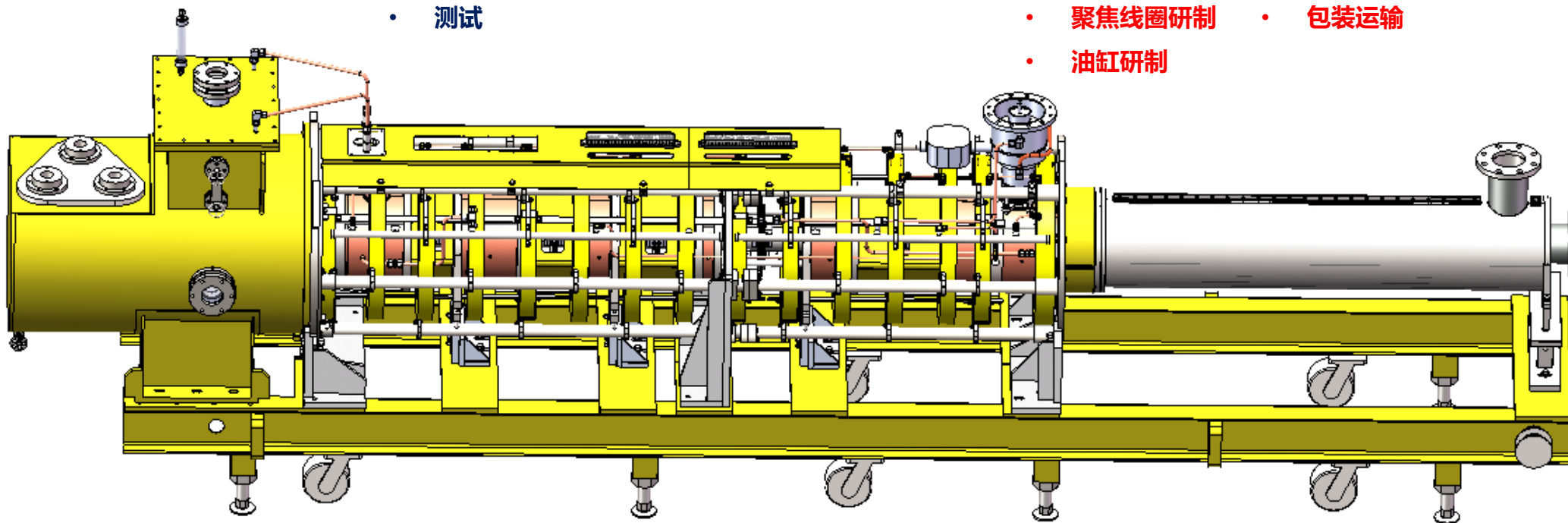
在650MHz/800kW连续波高效率速调管研制中，国力光荣承担了机械设计、电子枪、谐振腔、收集极、聚焦线圈、油缸运行支架等一众关键部件的研制以及总装、排气、后道、包装运输等关键工艺任务



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

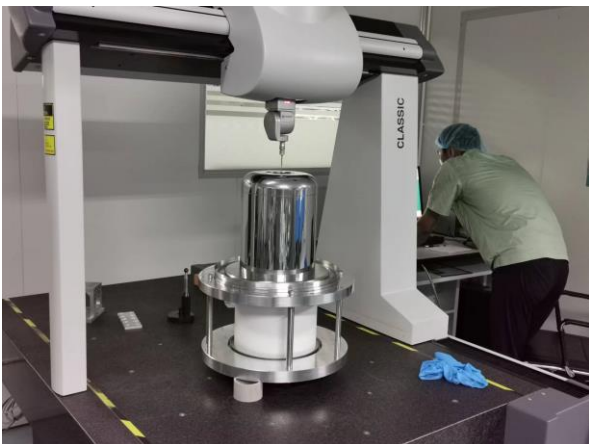


- 机械设计
- 电子枪研制
- 谐振腔研制
- 收集极研制
- 聚焦线圈研制
- 油缸研制
- 运行支架研制
- 总装
- 排气
- 后道
- 包装运输



650MHz/800kW连续波速调管——高效率

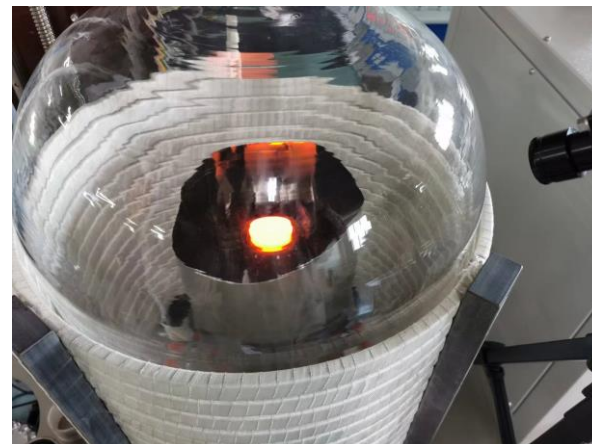
为了满足管芯的研制要求，研究院购买、使用了一批**新设备**，开发了一系列**新工艺**



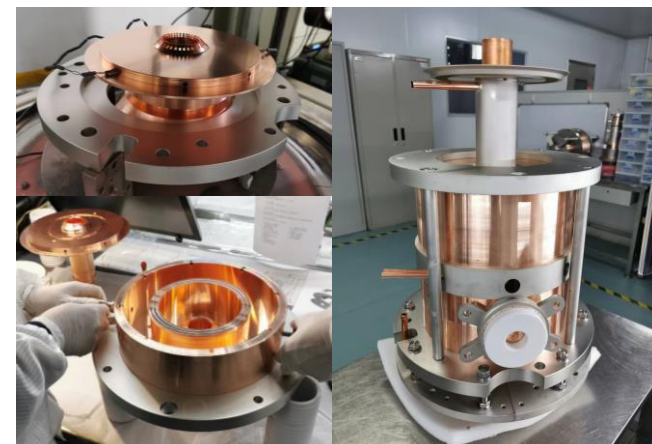
三坐标测量，严格把控关键参数



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



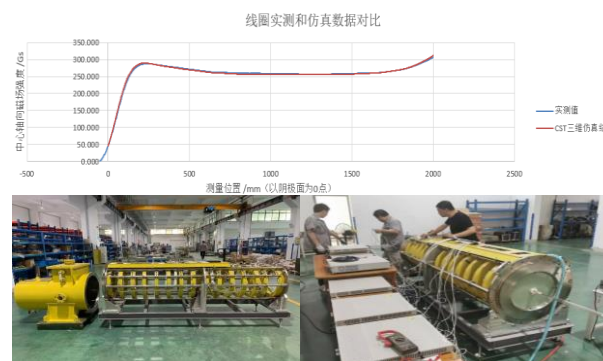
为速调管腔体设计了新的结构，摸索了新的装配、冷测、焊接和调谐工艺



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



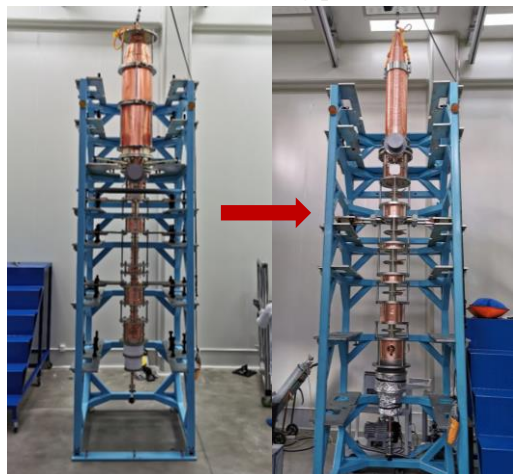
持续对聚焦线圈的制造严格把关，通过磁场测量对线圈进行调整达3次



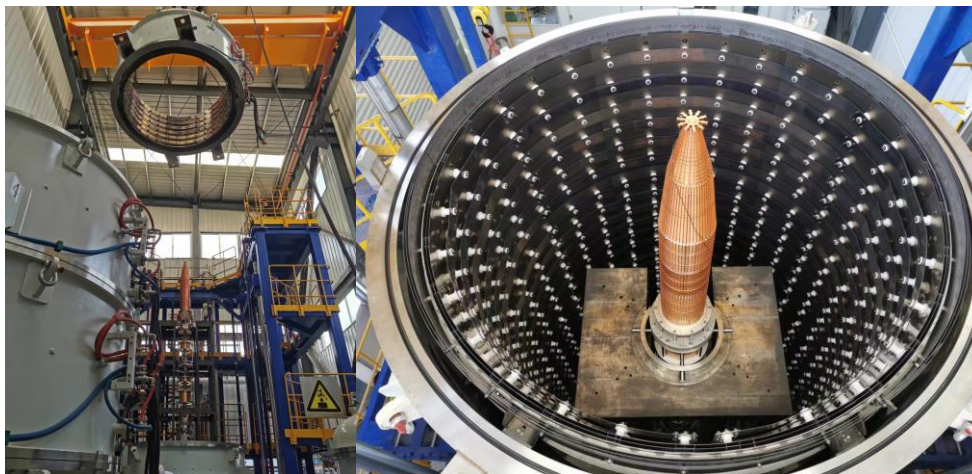
整管总装，使用了全新的结构，提高了装配精度也大大缩减了装配时间和装配人员数量

650MHz/800kW连续波速调管——高效率

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



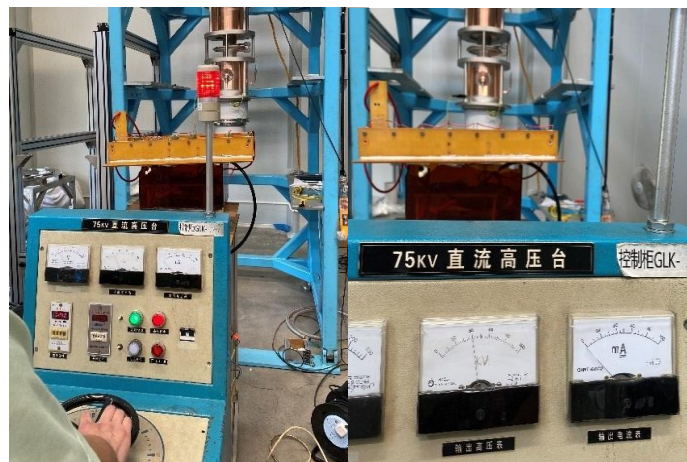
经过摸索，排气工艺更加成熟



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



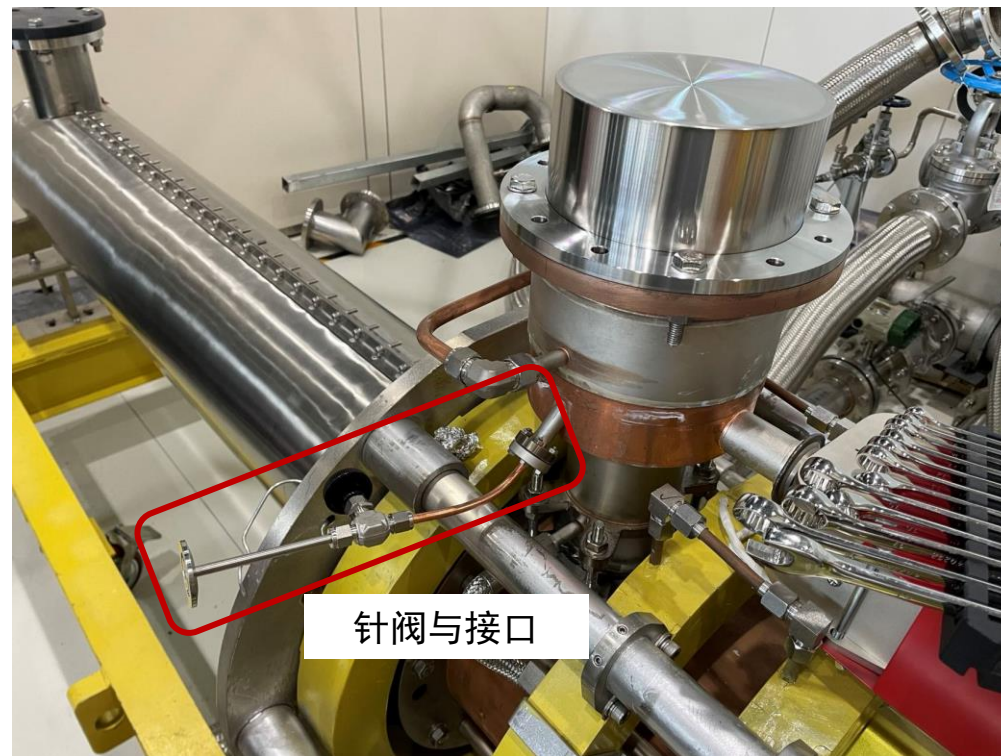
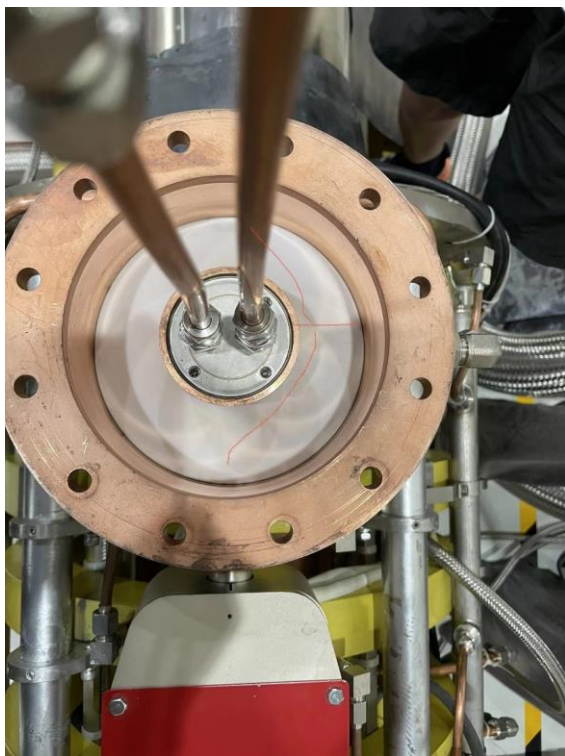
由于管电压较高，在出厂前特地增加了耐高压性能测试



油缸注油检测、水压检测等

650MHz/800kW连续波速调管——高效率

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。研究院第一时间行动起来，为输出窗处**制造阀门和接口**并寄往高能所，为管体**充氮气**储存，最大程度保护管内洁净度与阴极。



650MHz/800kW连续波速调管——高效率

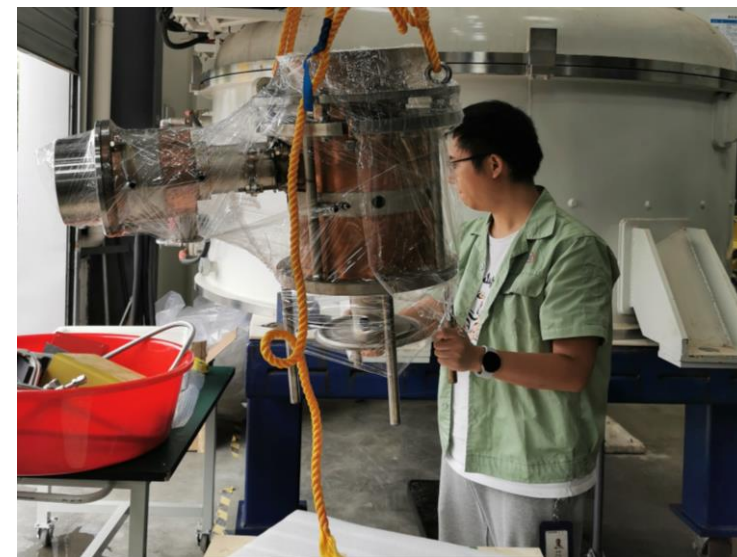
- 在得知高效率速调管需要进行返修后第一时间购买铜料，铜料份额包括了需要替换的管芯输出腔和末前腔、输出窗以及可能需要更换的第二腔。
- 在第一时间接收从高能所运回的高效率管，并将输出腔、末前腔和输出窗割下，管体剩余部件密封保存，配合高能所进行问题分析。



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

650MHz/800kW连续波速调管——高效率

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



国力大功率器件工业技术研究院
GLVAC Industrial Technology Research Institute of High Power Devices

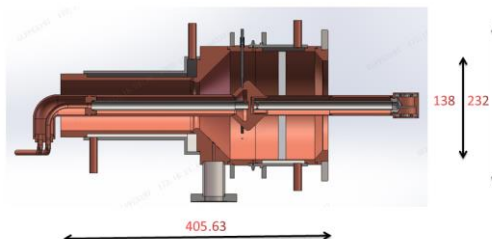
CEPC650速调管输出窗设计

报告人：熊师



输出窗机械设计

输出窗整体结构



输出窗关键尺寸如上图所示

高效率速调管输出窗优化设计评审意见

2022年12月6日，CEPC速调管研制课题组采用线下（高能所2#学术会议）和线上（腾讯会议：641-1572-0741）相结合的方式组织了高效率速调管输出窗优化设计评审会。专家组由王光伟、潘卫民、高杰、何平和屈化民等5位专家组成。专家组认真听取了课题组和合作厂家等四个技术报告，经质询及充分讨论后形成意见如下：

1. 优化水路结构，评估 T-bar 和陶瓷片外导体水冷必要性，可考虑改为风冷增加温度探头。
 2. 优化电磁场分布，考虑窗体和输出腔整体的模拟。
 3. 评估本设计中内导体插销结构的可靠性。考虑弹簧片的必要性，注意机械结构设计对陶瓷表面应力的影响。
 4. 考虑窗体内陶瓷工艺，建议 TiN 镀膜厚度 20nm。
- 在充分考虑上述建议后，开始研制加工。

专家组组长签名：

专家组成员：

王光伟 研究员 中国科学院高能物理研究所
潘卫民 研究员 中国科学院高能物理研究所
高杰 研究员 中国科学院高能物理研究所
何平 研究员 中国科学院高能物理研究所
屈化民 研究员 中国科学院高能物理研究所

2022年12月6日



650MHz/800kW连续波速调管——高效率

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



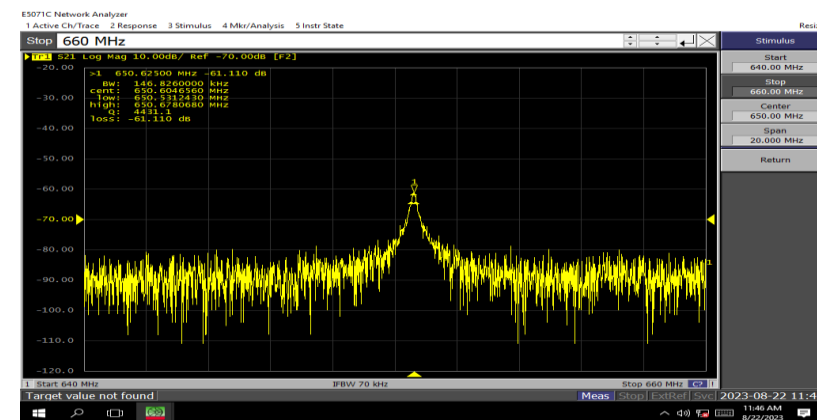
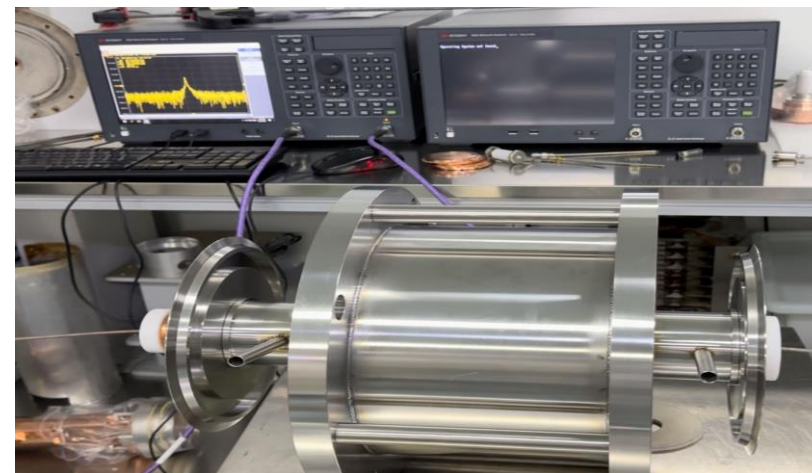
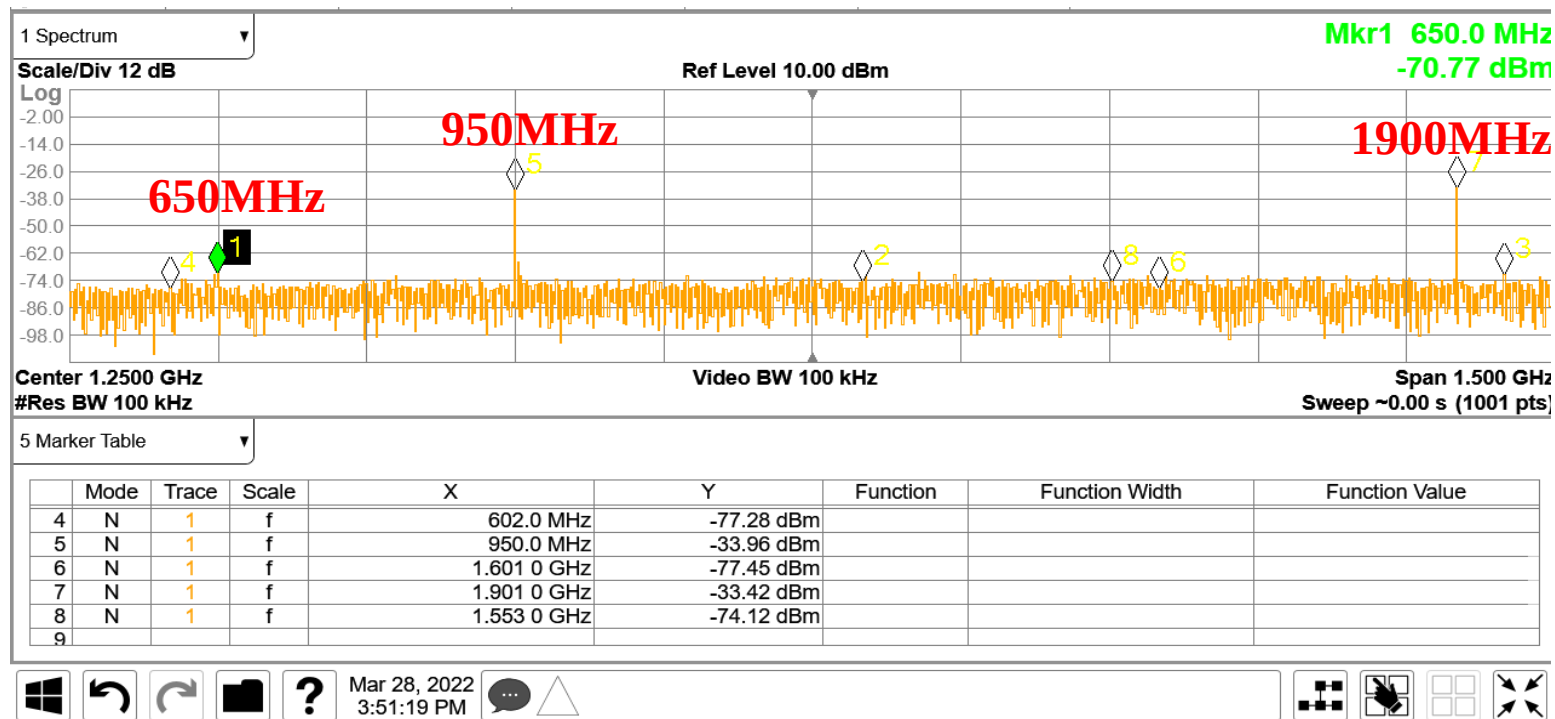
6-7腔大组件零部件加工制造与焊接检漏



最终版的输出窗与6-7腔大组件

650MHz/800kW连续波速调管——高效率

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。

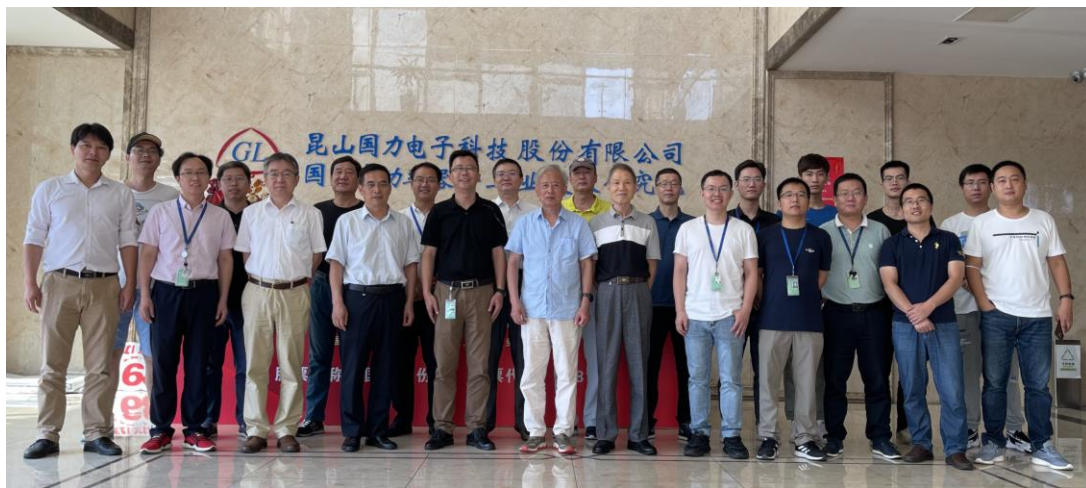
新二号腔冷测频率650.6MHz，
Q值4431，通过仿真计算，
可以有效抑制自激振荡



- 公司介绍
- 650MHz/800kW连续波速调管
- ◆ 650MHz/800kW多注速调管
- 648MHz/1.2MW脉冲速调管
- 324MHz/2.5MW脉冲速调管
- 总结

多注速调管研发方案

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。

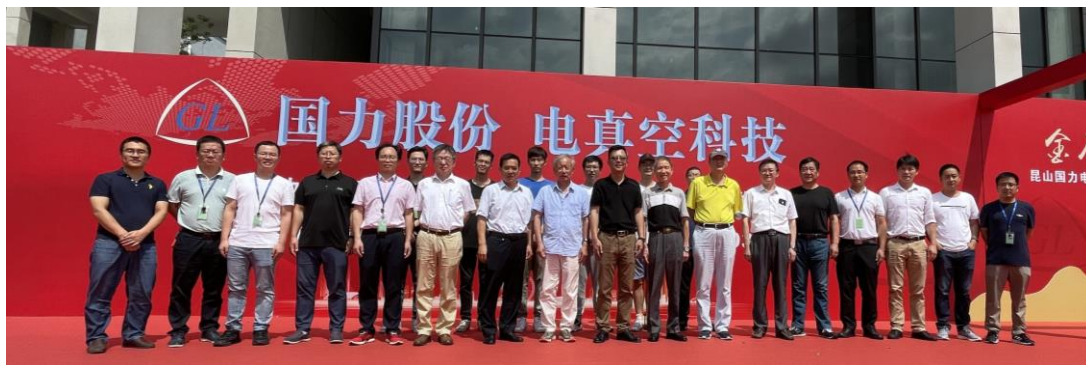


650MHz/800kW 高效率连续波多注速调管 工艺设计评审意见

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。

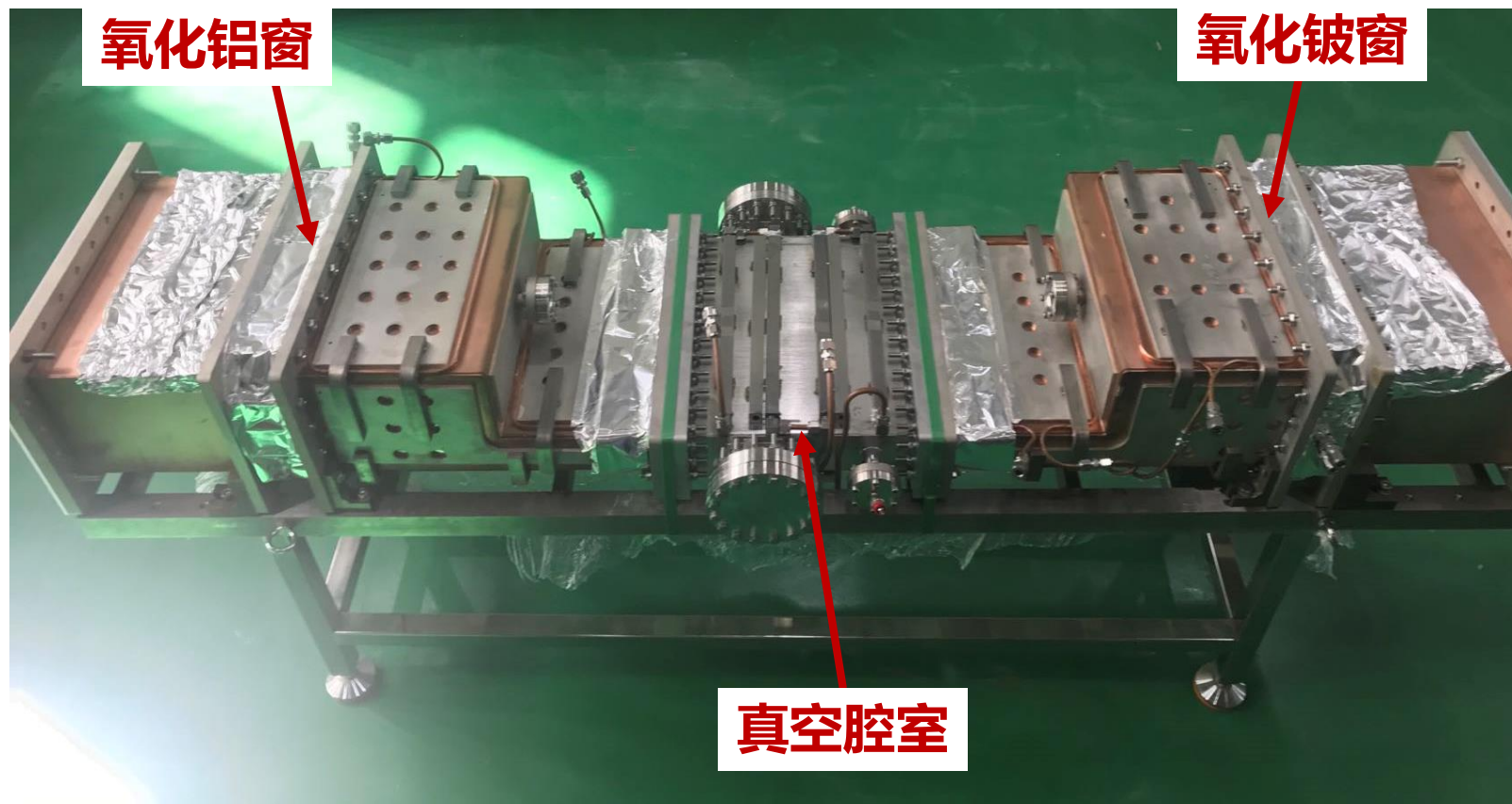
主要建议如下：

- 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。



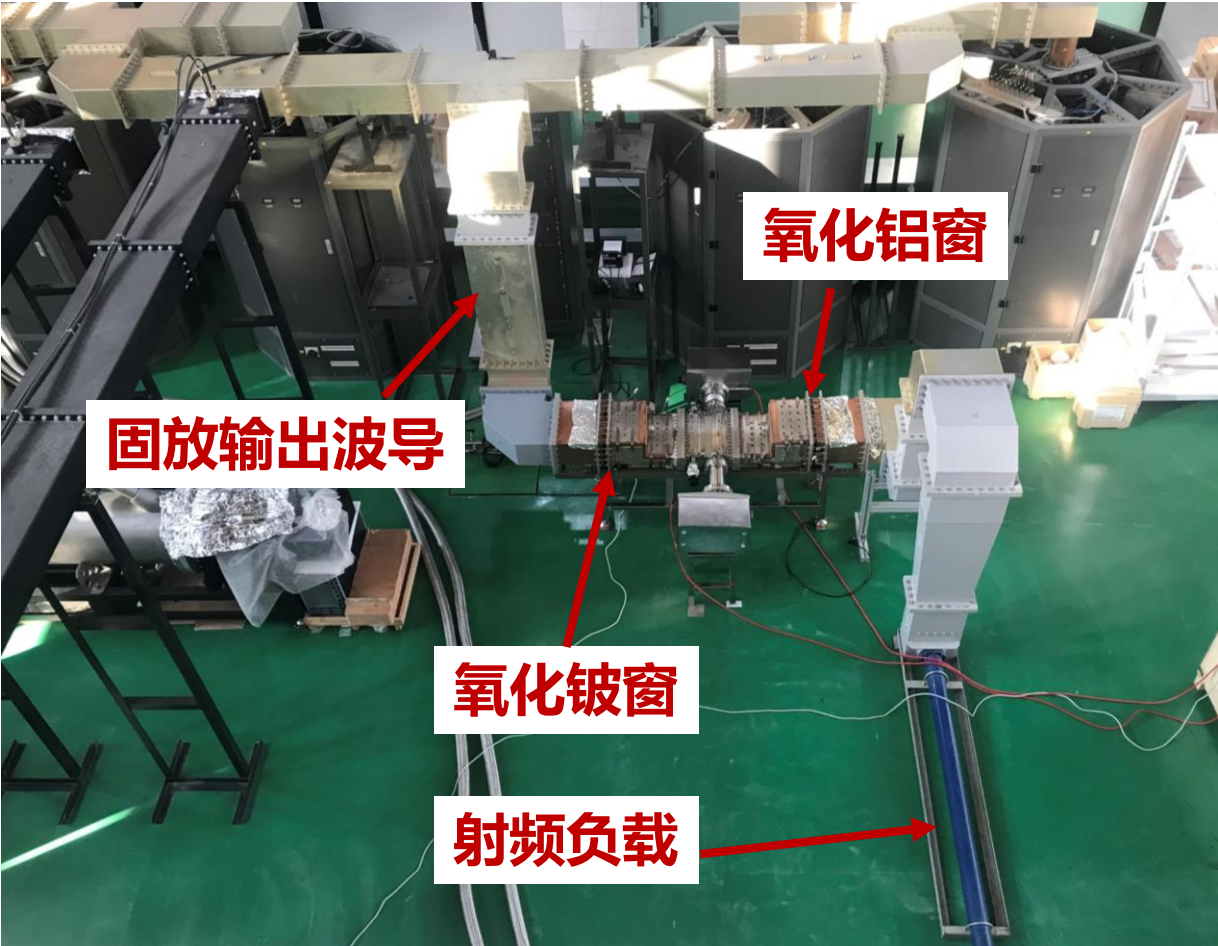
多注速调管研发——输出波导及输出窗研究

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



多注速调管研发——输出波导及输出窗研究

150kW固态放大器功率源行波热测（高能所）



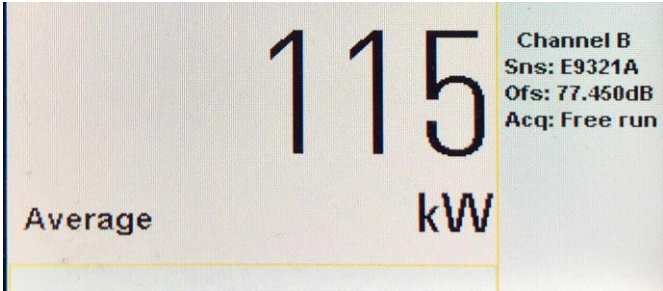
测得的连续波功率

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

多注速调管研发——输出波导及输出窗研究

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

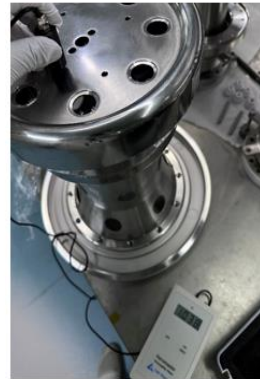
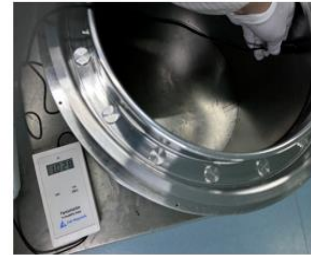
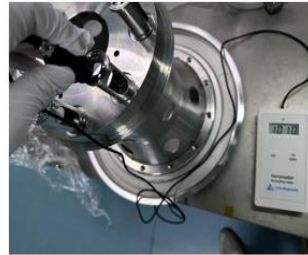


氧化铍窗片上测得的连续波功率
该处为注波电压幅度峰值位置

	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

多注速调管研发——束流管研制

电子枪部件研制



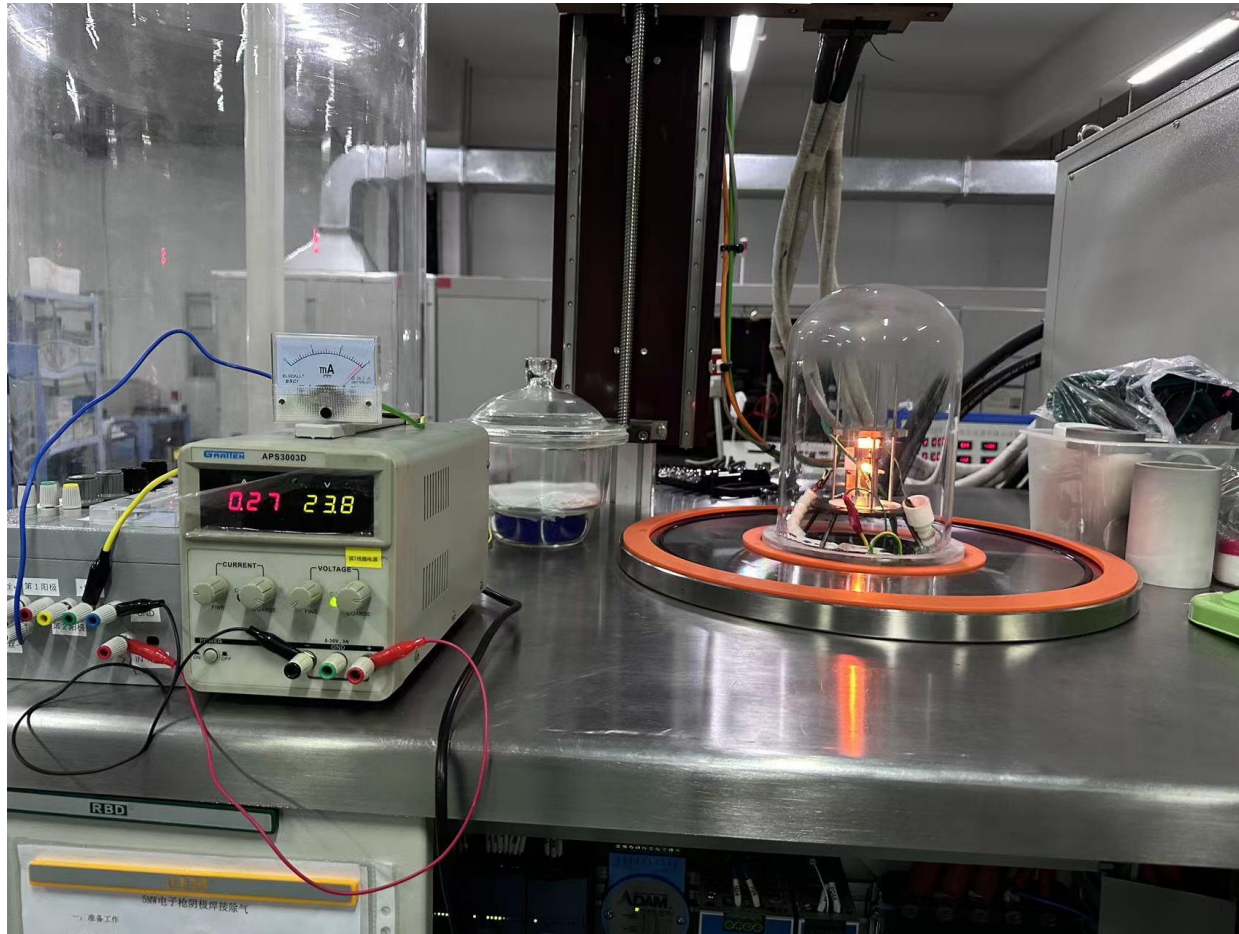
电子枪芯柱筒焊接和校平，
面平行度**优于0.03mm**

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

多注速调管研发——束流管研制

阴极发射性能测试



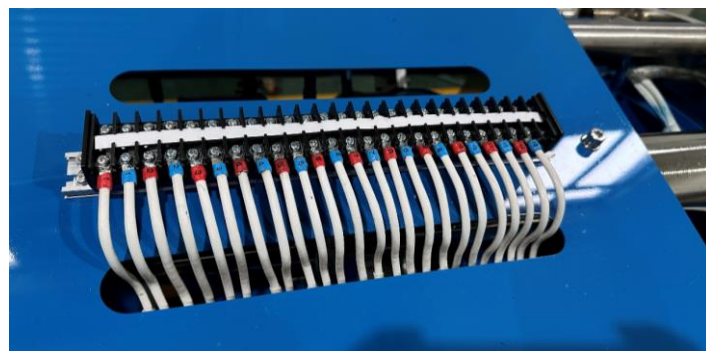
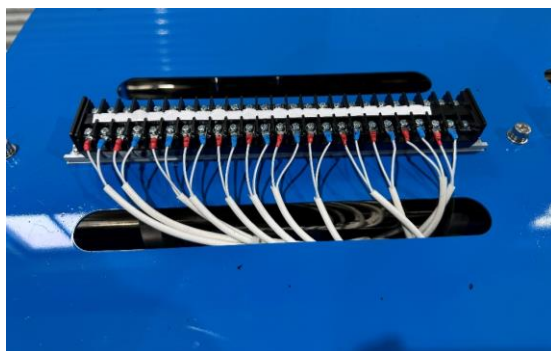
MBK 阴极激活记录

时间	热丝电压	热丝电流	真空度	温度	阴极电压	阴极电流
13:35	0.17	0.51	7.9×10^{-6}			
14:00	0.31	1.20	8.2×10^{-6}			
14:20	0.477	1.497	8.2×10^{-6}			
14:30	0.678	1.599	8.8×10^{-6}			
14:40	0.878	2.496	9.7×10^{-6}			
14:50	1.078	2.976	1.1×10^{-5}			
15:00	1.281	3.499	1.2×10^{-5}			
15:10	1.481	4.001	1.4×10^{-5}	358/370°C		
15:20	1.684	4.501	1.7×10^{-5}	397°C		
15:36	2.384	6.501	1.8×10^{-5}	450°C		
16:10	2.397	4.490	1.6×10^{-5}	461°C		
17:40	2.910	5.003	9.9×10^{-6}	517°C		
17:50	3.264	5.502	1.0×10^{-5}	582°C		
18:00	3.734	6.005	1.0×10^{-5}	647°C		
18:10	4.207	6.501	1.1×10^{-5}	704°C		
19:07	4.125	6.501	3.8×10^{-6}	699°C		
9:07	4.582	7.004	3.8×10^{-6}	741		
9:20	5.103	7.504	3.8×10^{-6}	764		
9:25	5.160	7.504	4.1×10^{-6}	804		
9:30	5.611	8.006	4.1×10^{-6}	811		
9:35	5.656	8.006	4.2×10^{-6}	851		
9:40	5.979	8.341	4.4×10^{-6}	866		
9:45	6.979	8.336	4.5×10^{-6}	879		
9:50	6.641	9.009	4.6×10^{-6}	899		
9:55	6.70	9.010	5.1×10^{-6}	943		
10:00	7.208	9.392	5.3×10^{-6}	958		
10:05	7.296	9.511	5.8×10^{-6}	1000		
10:10	7.708	10.007	6.1×10^{-6}	1007		
10:15	7.835	10.207	6.6×10^{-6}	1047		
10:20	8.273	10.508	6.8×10^{-6}	1059		
10:25	8.356	10.509	8.5×10^{-6}	1098		
10:30	8.627	10.809	9×10^{-6}	1106		
10:32	8.868	11.206	9.2×10^{-6}	1125		
10:35	9.182	11.313	1×10^{-5}	1145		
10:36	9.017	11.112	1×10^{-5}	1148		
10:36	9.065	11.213	1×10^{-5}	1150		
11:12	9.080	11.213	1.2×10^{-5}	1140 (温度计失效)		
11:13	8.112	11.5013	1.1×10^{-5}	1080		
11:20	8.527	12.00	1.1×10^{-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 $1.2 \times 10^{-5} \text{Pa}$ ，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

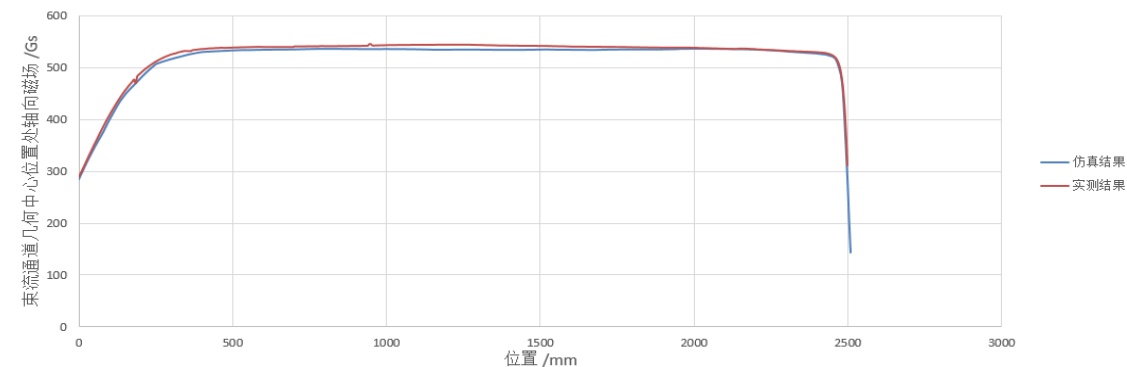
多注速调管研发——聚焦线圈系统研制

成功完成了**重达3吨**的聚焦线圈系统的研制和测试

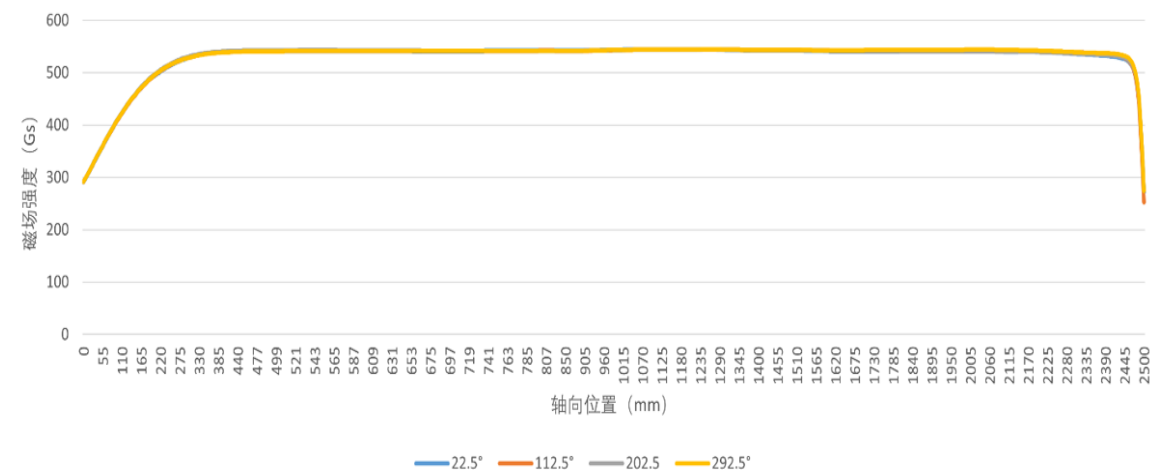


聚焦线圈系统测试现场

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



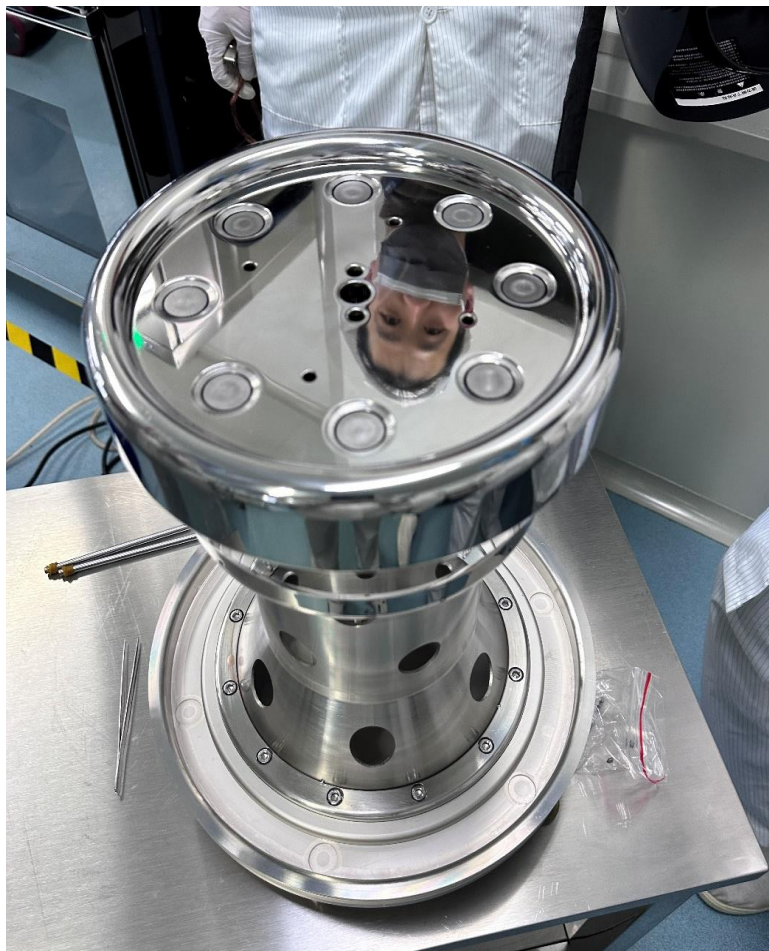
线圈磁场测量结果与仿真结果对比 以及不同位置磁场均匀性结果

多注速调管研发——束流管总装

总装与后道



束流管电子枪阴极安装



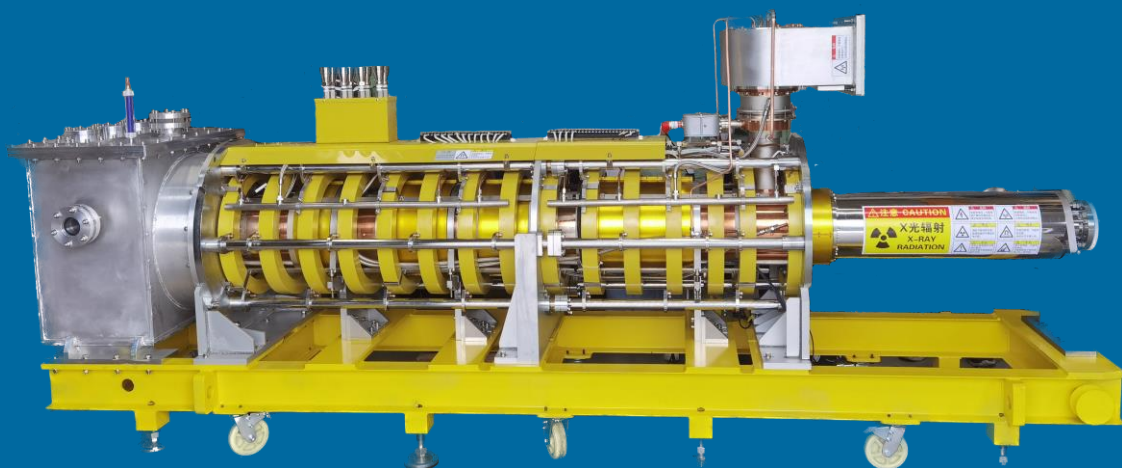
束流管完成总装

多注速调管研发——束流管研制

总装与后道



完成总装后的束流管



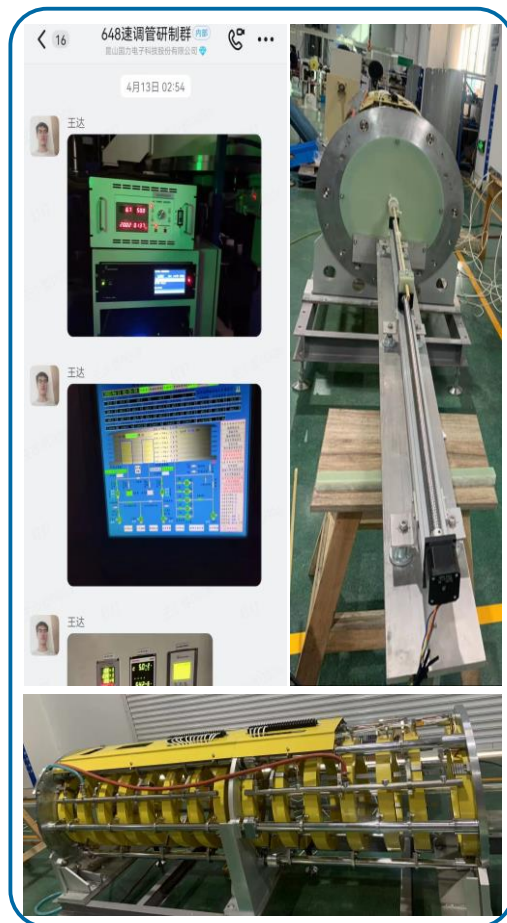
- 公司介绍
- 650MHz/800kW连续波速调管
- 650MHz/800kW多注速调管
- ◆ 648MHz/1.2MW脉冲速调管
- 324MHz/2.5MW脉冲速调管
- 总结

648MHz/1.2MW速调管研发——样管试制

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速调管研发——速调管热测

648MHz/1.2MW长脉冲速调管在散裂中子源测试大厅

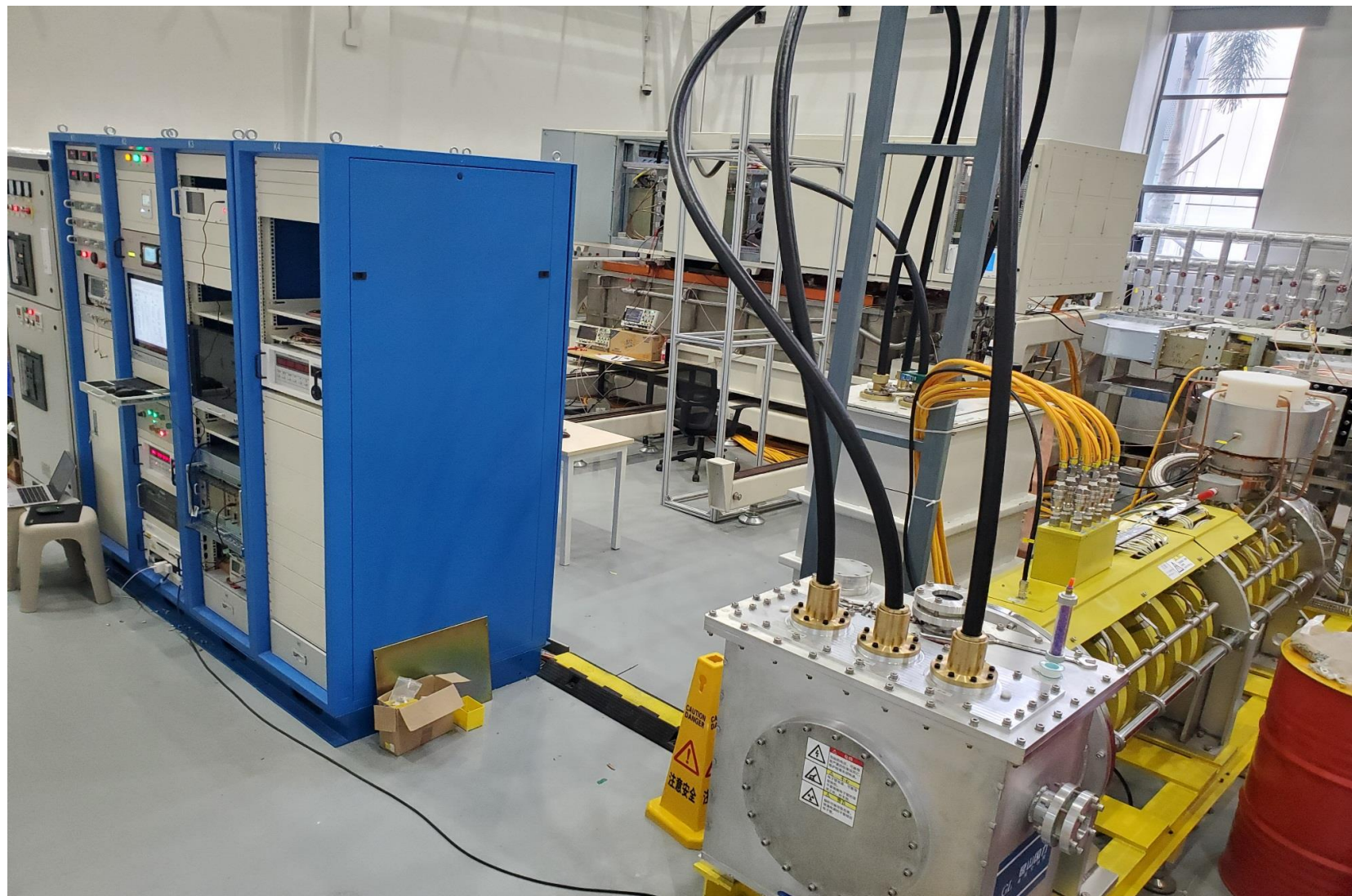
设计指标

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速调管研发——速调管热测

648MHz/1.2MW长脉冲速调管在散裂中子源测试大厅



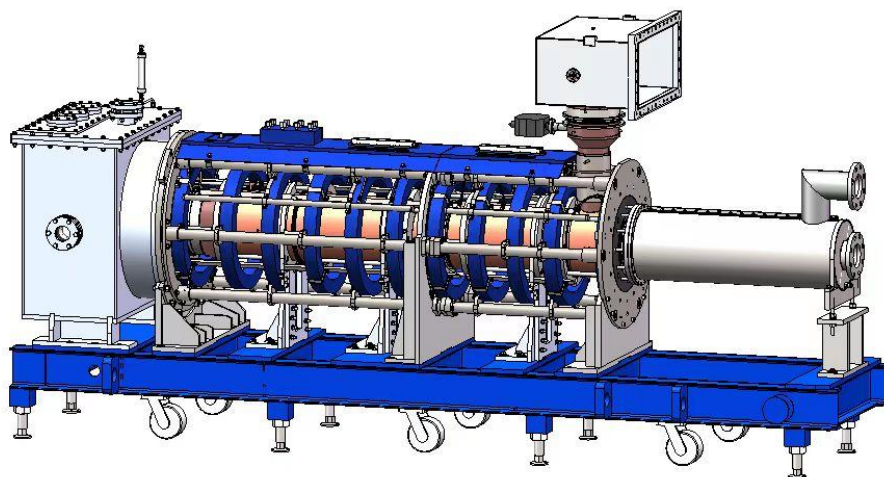
648MHz/1.2MW速调管研发——速调管热测



648MHz/1.2MW速调管实测指标（散裂中子源）

指标	实测值
速调管阴极高压	-104kV
Beam电流	22A
导流系数	0.655 μ P
RF脉冲功率	1.2MW
RF重复频率	25Hz
RF脉冲宽度	1.2ms
射频激励	27W

- 于9月22日完成了重复频率25Hz，峰值功率1.2MW，脉冲波长1.2ms的满功率24小时烤机测试。



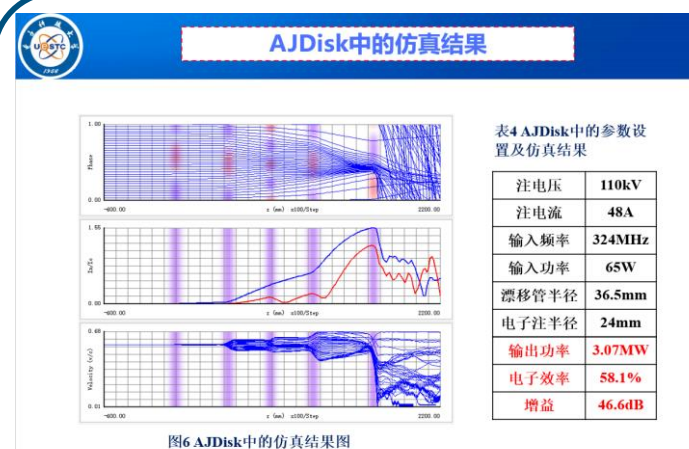
- 公司介绍
- 650MHz/800kW连续波速调管
- 650MHz/800kW多注速调管
- 648MHz/1.2MW脉冲速调管
- ◆ 324MHz/2.5MW脉冲速调管
- 总结

324MHz速调管研发——物理设计与评审

22年完成速调管物理设计评审，23年开始速调管研制

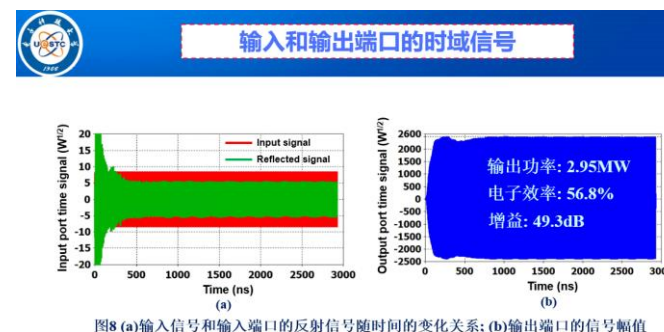
设计指标

工作频率	324MHz
带宽 (1dB)	$\pm 0.1\text{MHz}$
峰值功率	$\geq 2.5\text{MW}$
RF脉冲宽度	$650\mu\text{s}$
脉冲重复频率	25Hz
效率	$\geq 55\%$
增益	$\geq 45\text{dB}$
阴极电压	-110kV



电子科学与工程学院 微波电真空器件国家级重点实验室

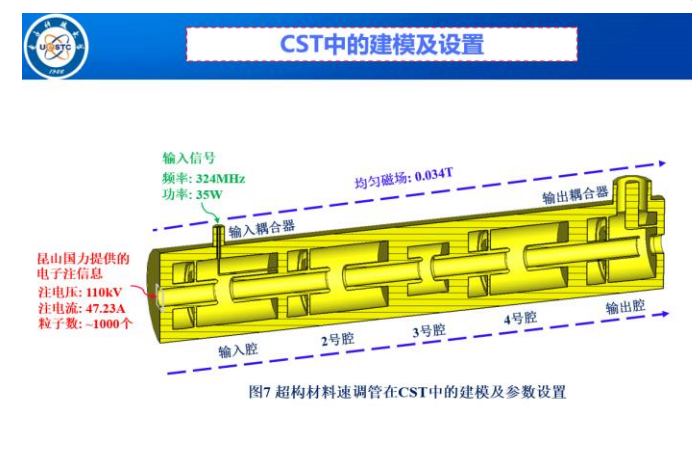
13



- 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。

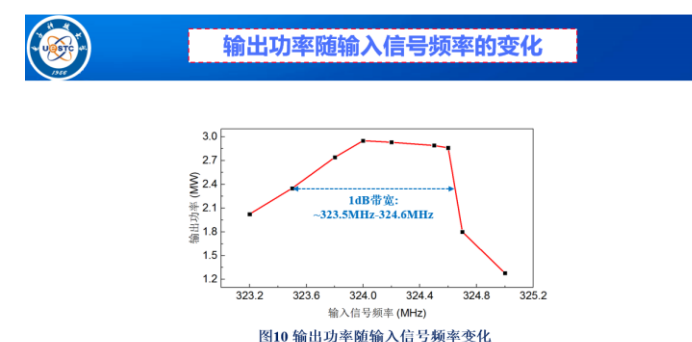
电子科学与工程学院 微波电真空器件国家级重点实验室

15



电子科学与工程学院 微波电真空器件国家级重点实验室

14



- 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。

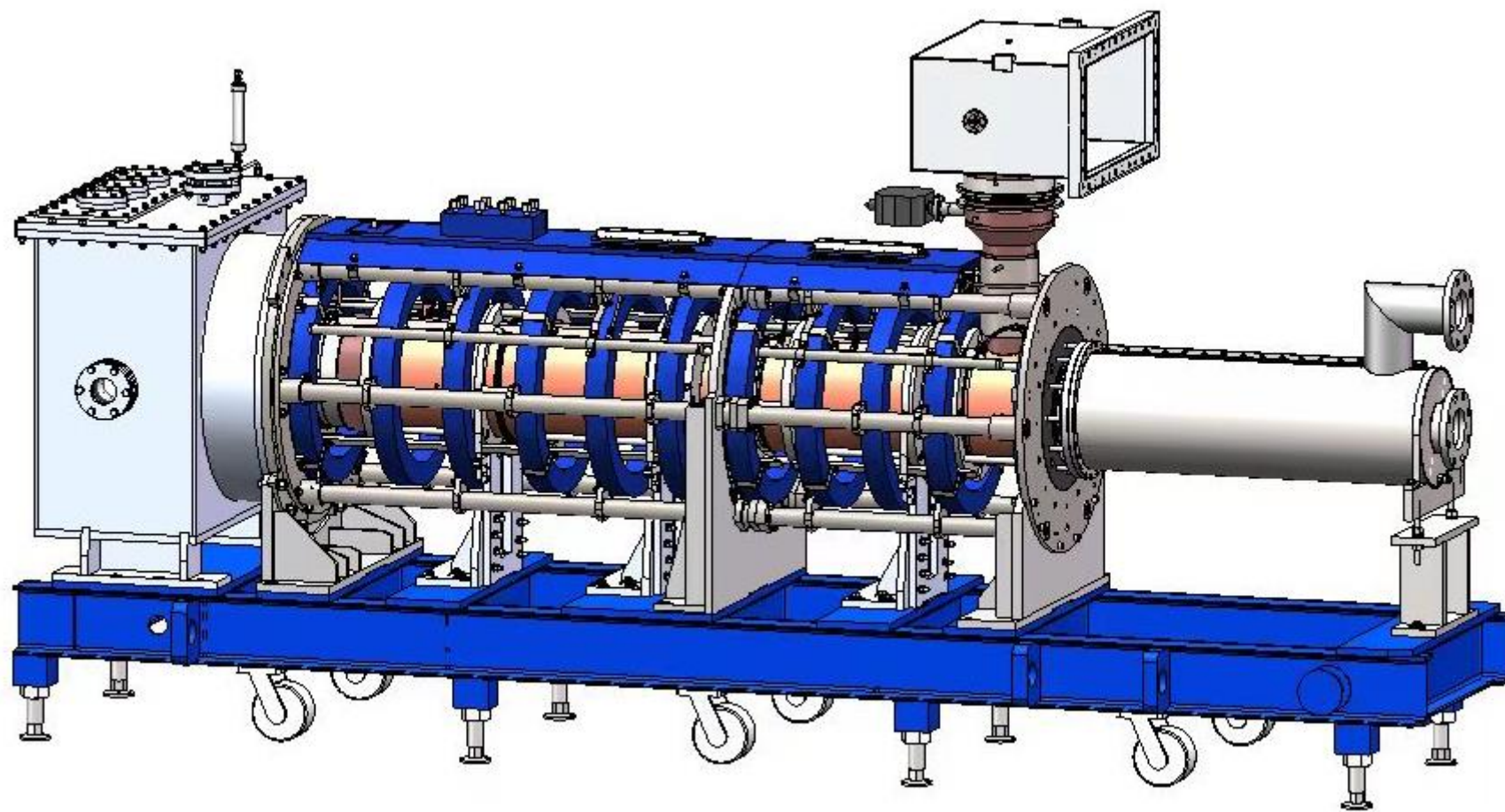
电子科学与工程学院 微波电真空器件国家级重点实验室

17

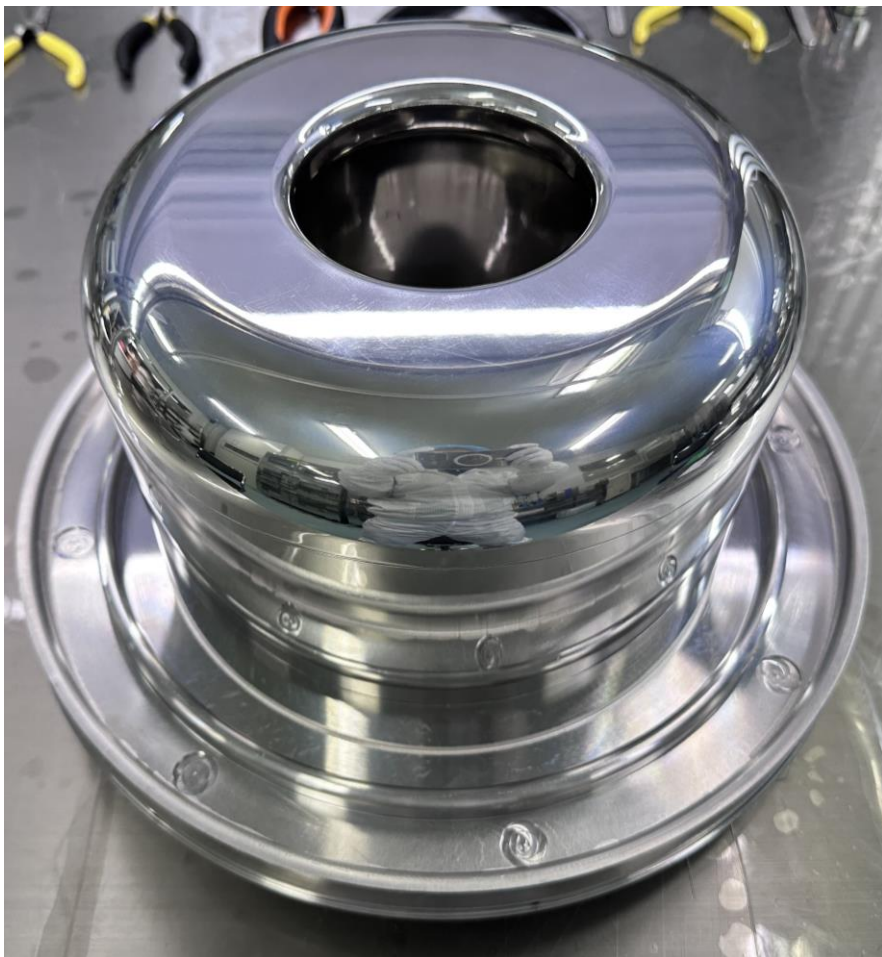
电子科大段教授团队完成物理设计并作报告

324MHz速调管研发——机械设计

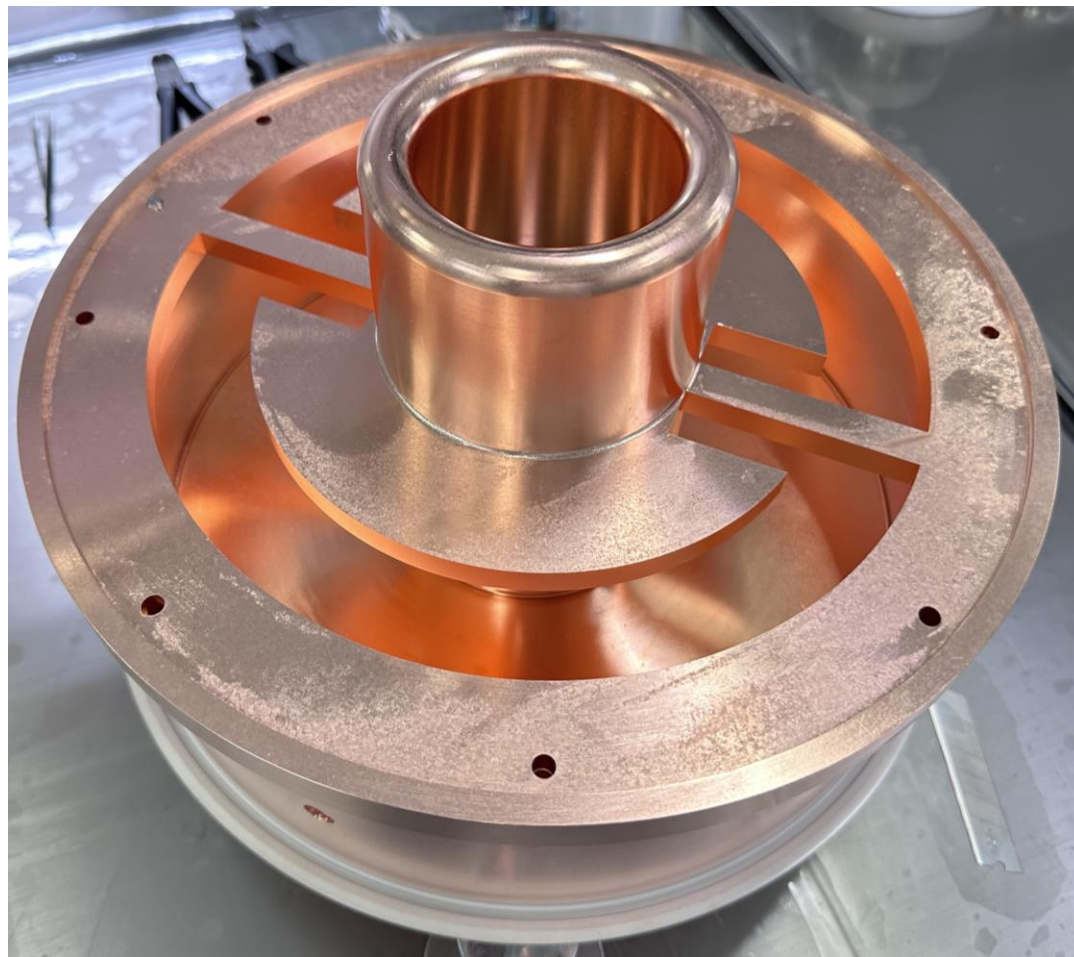
23年4月完成了324MHz速调管机械设计



324MHz速调管研发——部件加工制造



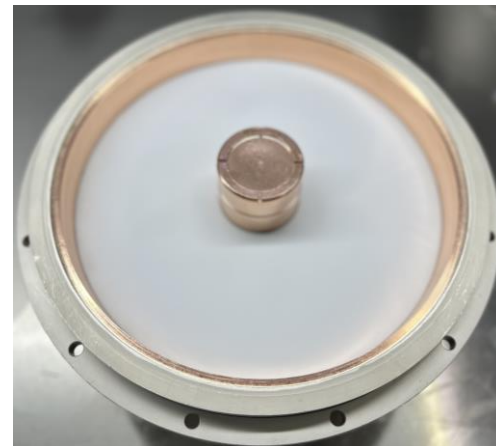
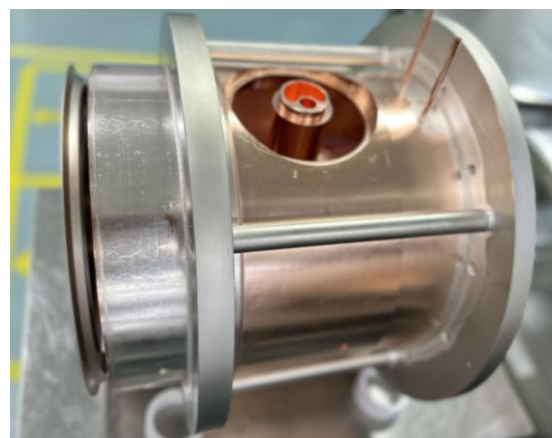
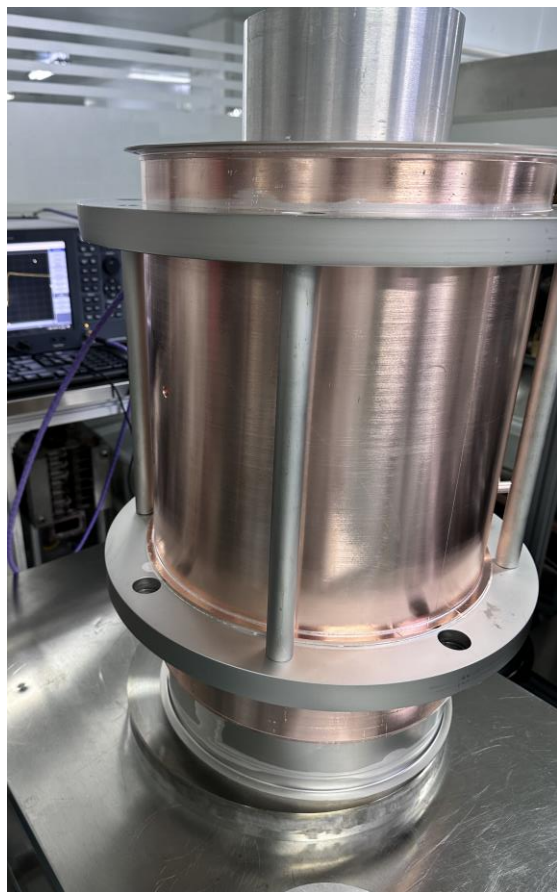
电子枪组件研制



腔体超构体结构组件研制

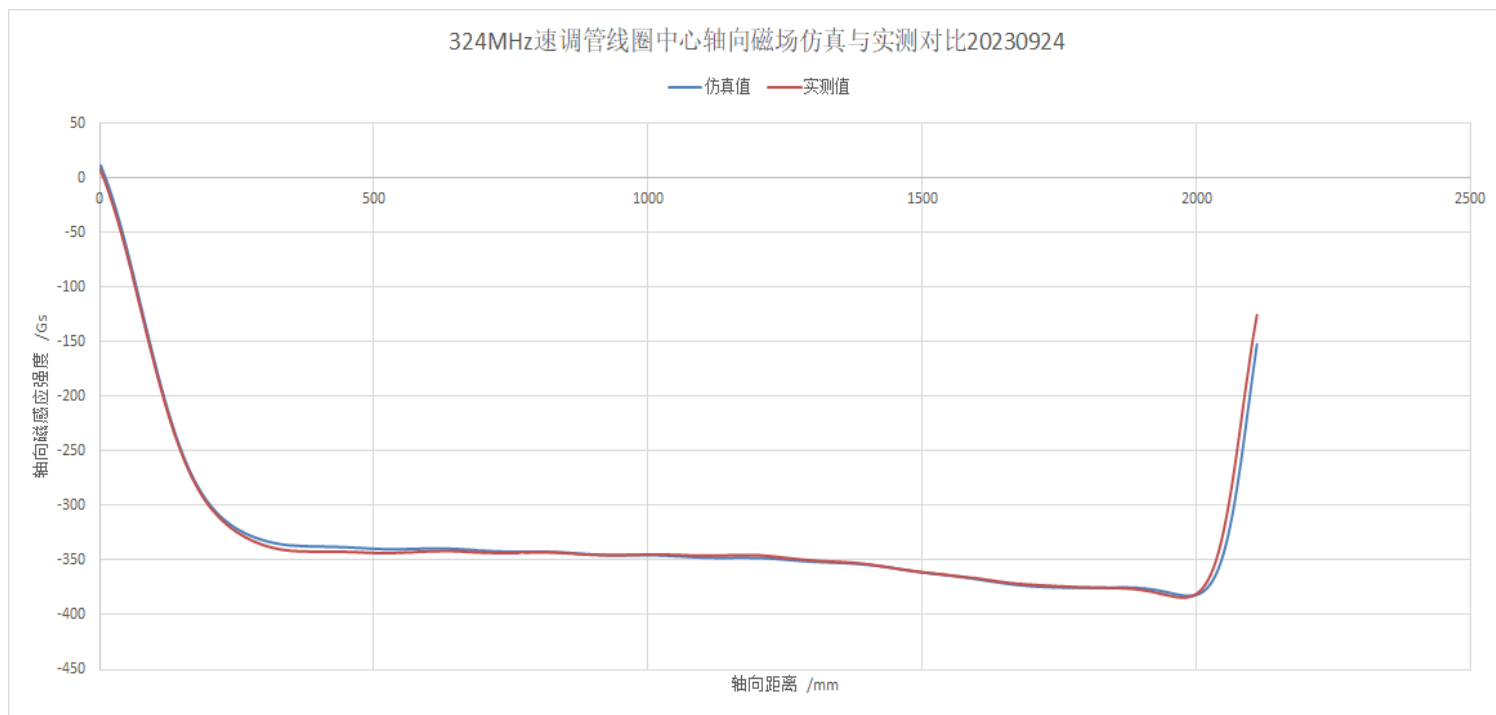
324MHz速调管研发——腔体焊接、调谐

324MHz速调管的腔体、输出窗及收集极等部件已陆续完成焊接、调谐工作



324MHz速调管研发——聚焦线圈

324MHz速调管的聚焦线圈系统完成了研制和磁场测量工作



- 公司介绍
- **650MHz/800kW连续波速调管**
- **650MHz/800kW多注速调管**
- **648MHz/1.2MW脉冲速调管**
- **324MHz/2.5MW脉冲速调管**
- ◆ 总结

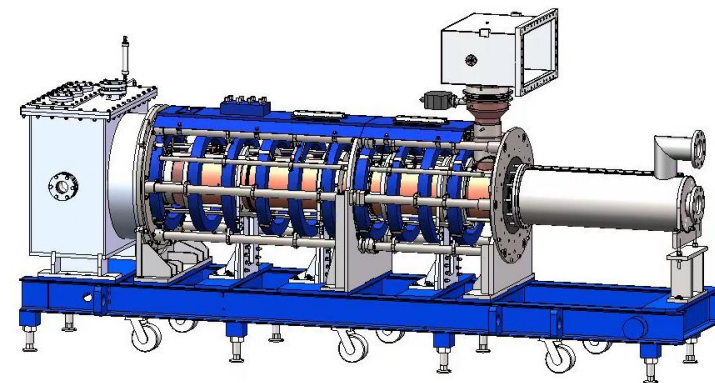
总结



2020年 650MHz/800kW速调管样管



2023年 650MHz/800kW多注速调管束流管



2023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



致谢

- 感谢高能所周祖圣、肖欧正、王盛昌以及裴国玺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
- 感谢散裂中子源慕振成、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