

# P波段大功率速调管国力研制情况介绍

汇报人：李永明

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**
- **648MHz/1.2MW长脉冲速调管**
- **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



## 发展 —— 响应改革开放 创新产业驱动，助力解决卡脖子难题



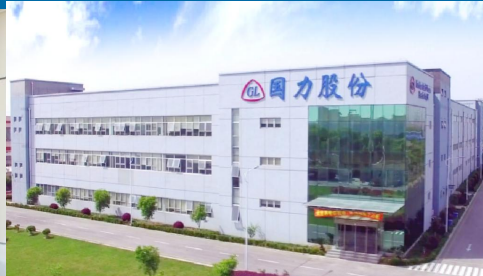
2000年

成立昆山国力真空电器有限公司



2004年

成立昆山瑞普电气有限公司



2016年

更名为昆山国力电子科技股份有限公司



2016年

成立昆山国力源通新能源科技有限公司



2016年

成立昆大功率器件工业技术研究院



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

## ■ 648MHz/1.2MW长脉冲速调管

## ■ 324MHz/2.5MW脉冲速调管

## ■ 总结



# 650MHz/800kW连续波速调管

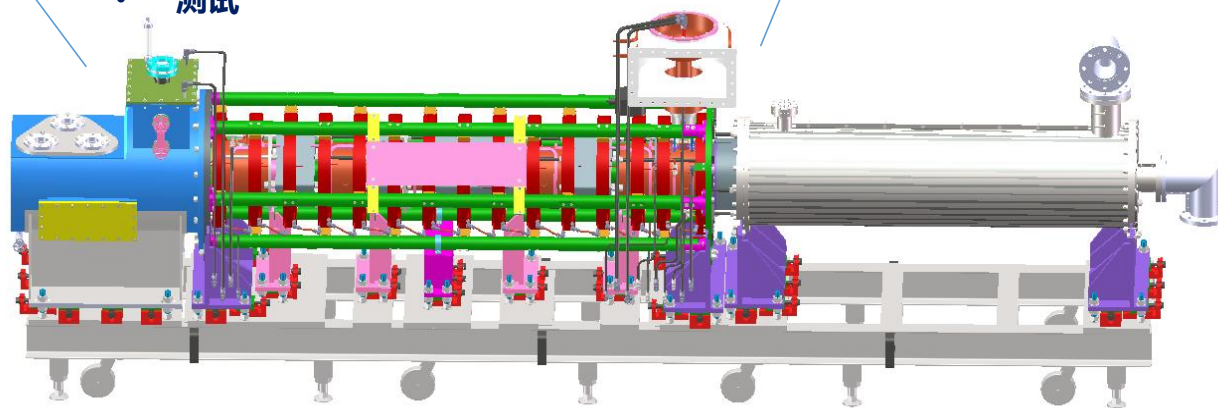
2018年，在国内首支P波段650MHz/800kW连续波速调管研制中，国力负责收集极、聚焦线圈、油缸、运行支架等速调管部件的研制任务以及总装、排气、后道、包装运输等关键工艺技术的攻关，并参与了后期测试。



- 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)

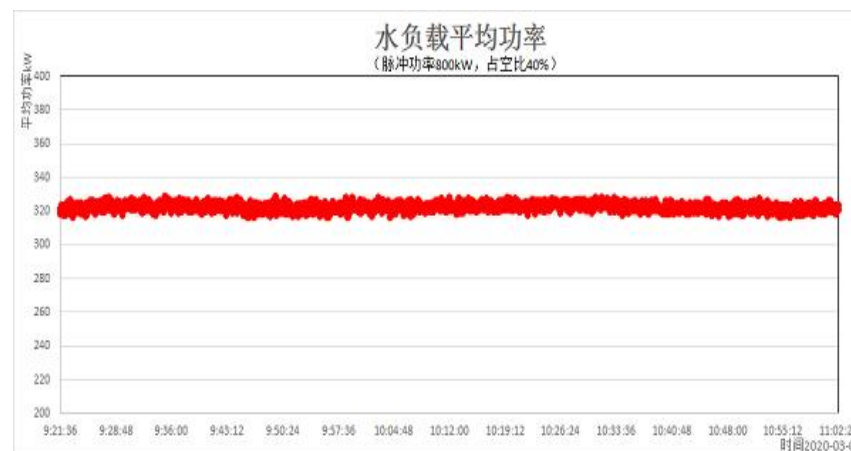


- |        |          |
|--------|----------|
| • 收集极  | • 总装及排气  |
| • 聚焦线圈 | • 后道     |
| • 油缸   | • 包装与运输  |
| • 运行支架 | • 测试(参与) |

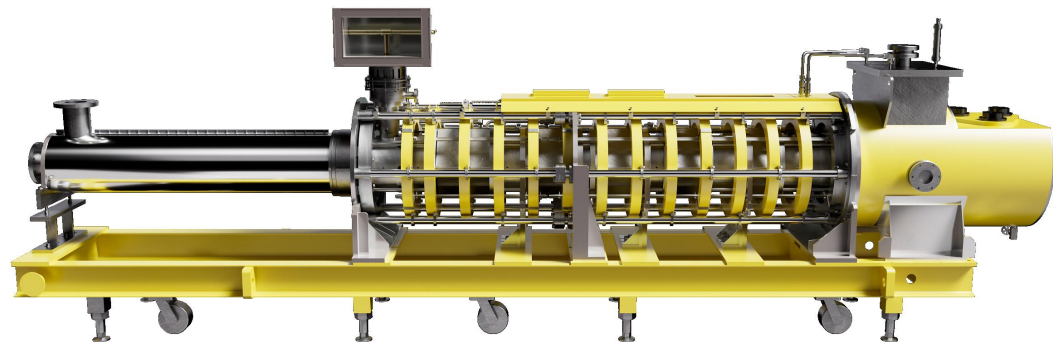


# 650MHz/800kW连续波速调管

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
- 648MHz/1.2MW长脉冲速调管
- 324MHz/2.5MW脉冲速调管
- 总结



# 高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管

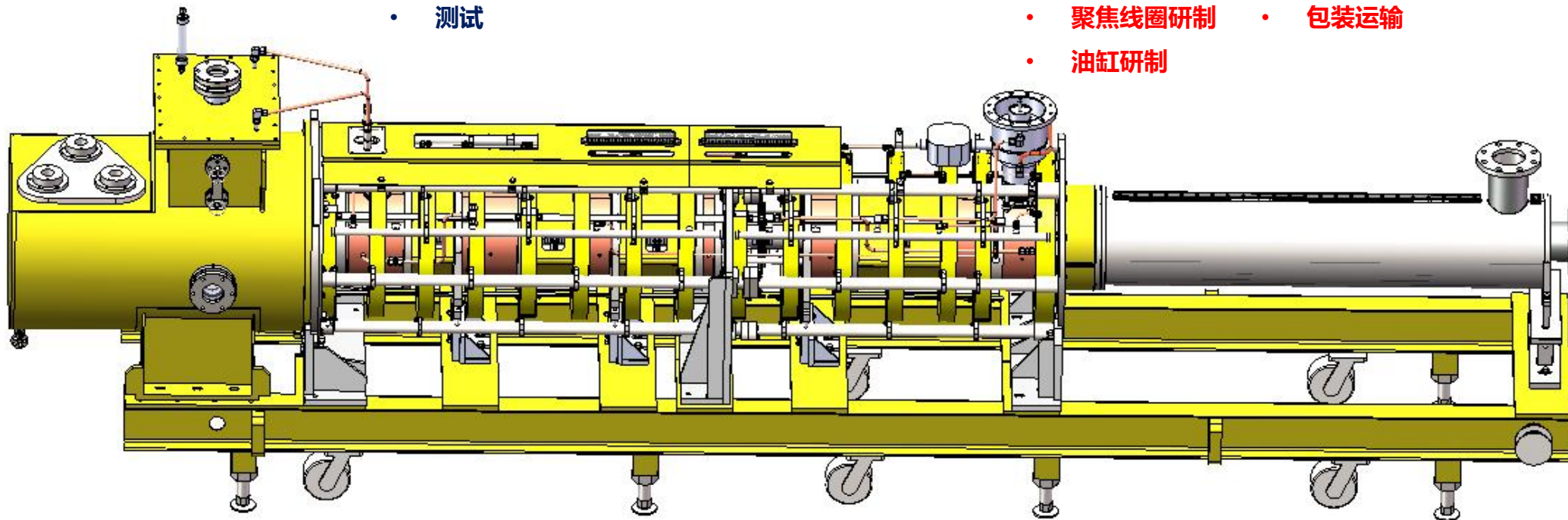
2019年，在650MHz/800kW连续波高效率速调管研制中，国力负责机械设计、电子枪、谐振腔、收集极、聚焦线圈、油缸运行支架等一众关键部件的研制以及总装、排气、后道、包装运输等关键工艺任务



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



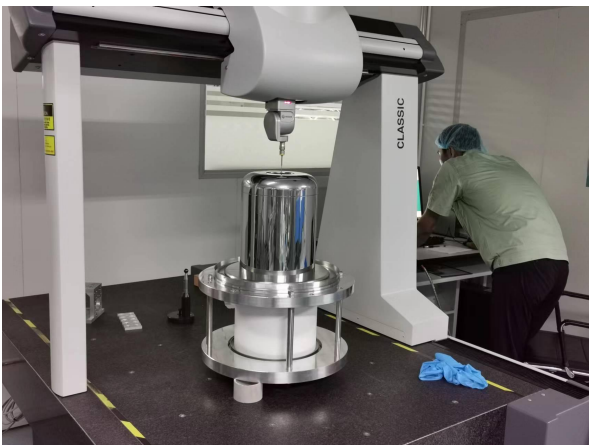
- 机械设计
- 电子枪研制
- 谐振腔研制
- 收集极研制
- 聚焦线圈研制
- 油缸研制
- 运行支架研制
- 总装
- 排气
- 后道
- 包装运输





# 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**



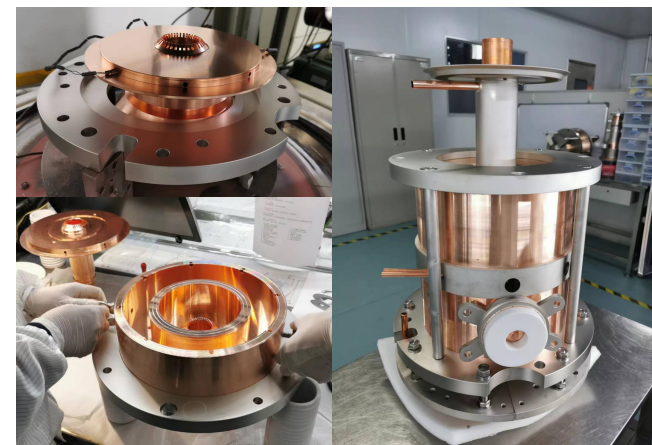
三坐标测量，严格把控关键参数



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



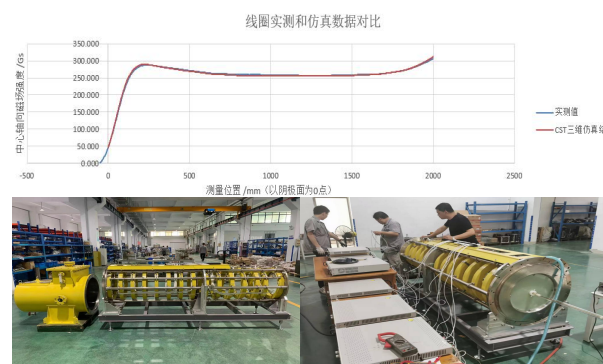
为速调管腔体设计了新的结构，摸索了新的装配、冷测、焊接和调谐工艺



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

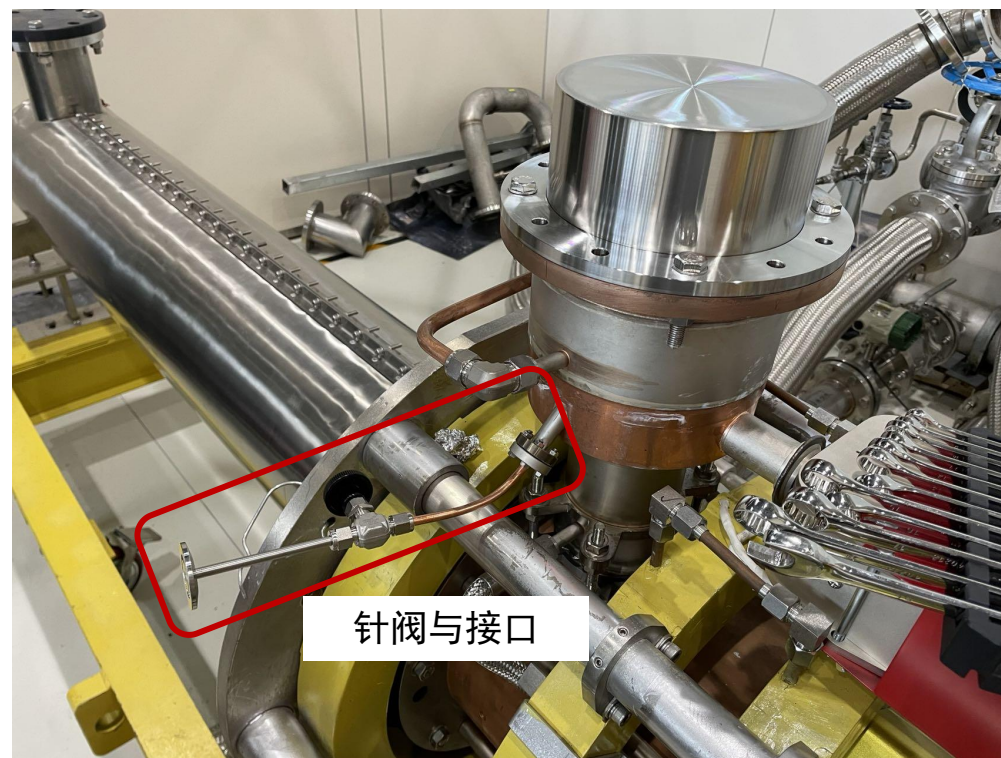
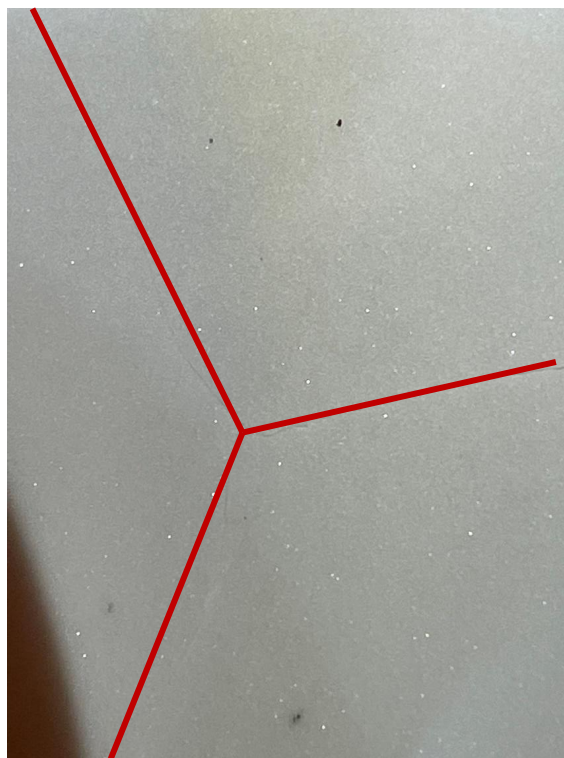
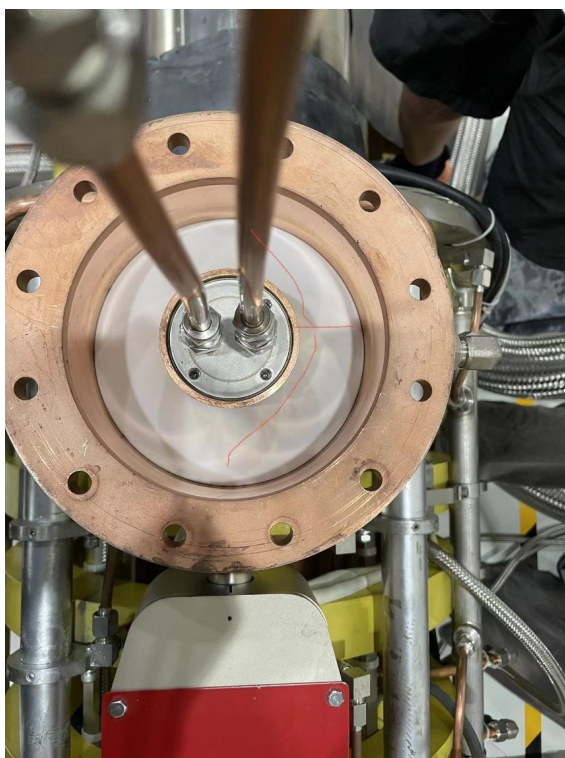


整管总装，使用了全新的结构，提高了装配精度也大大缩减了装配时间和装配人员数量



# 高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管

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

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

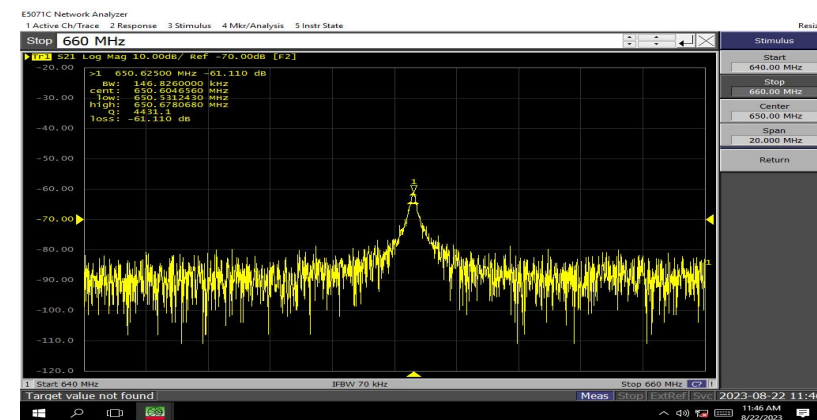
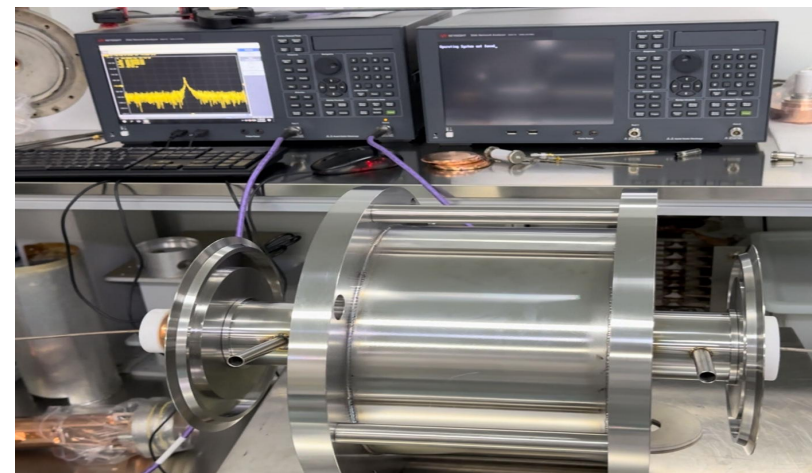
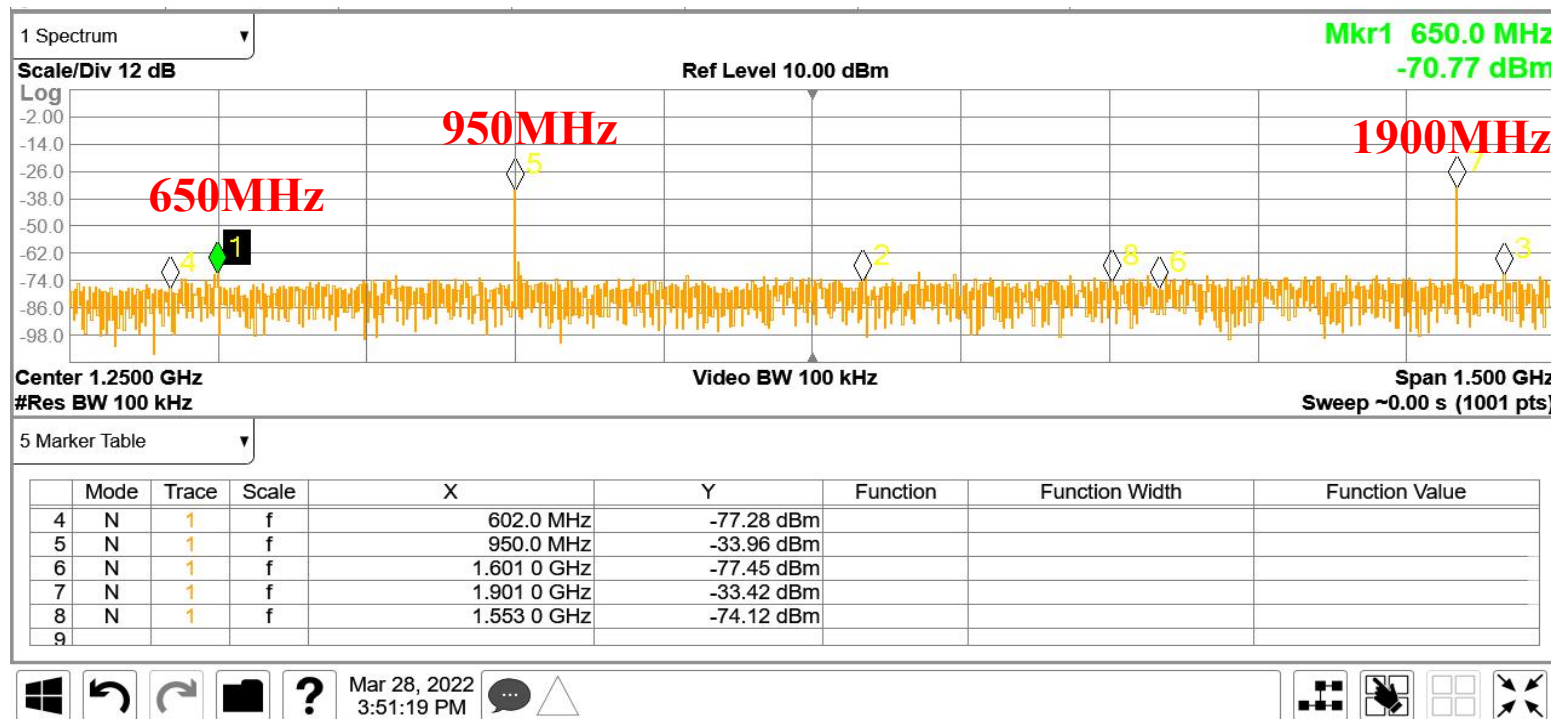


最终版的输出窗与6-7腔大组件



# 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



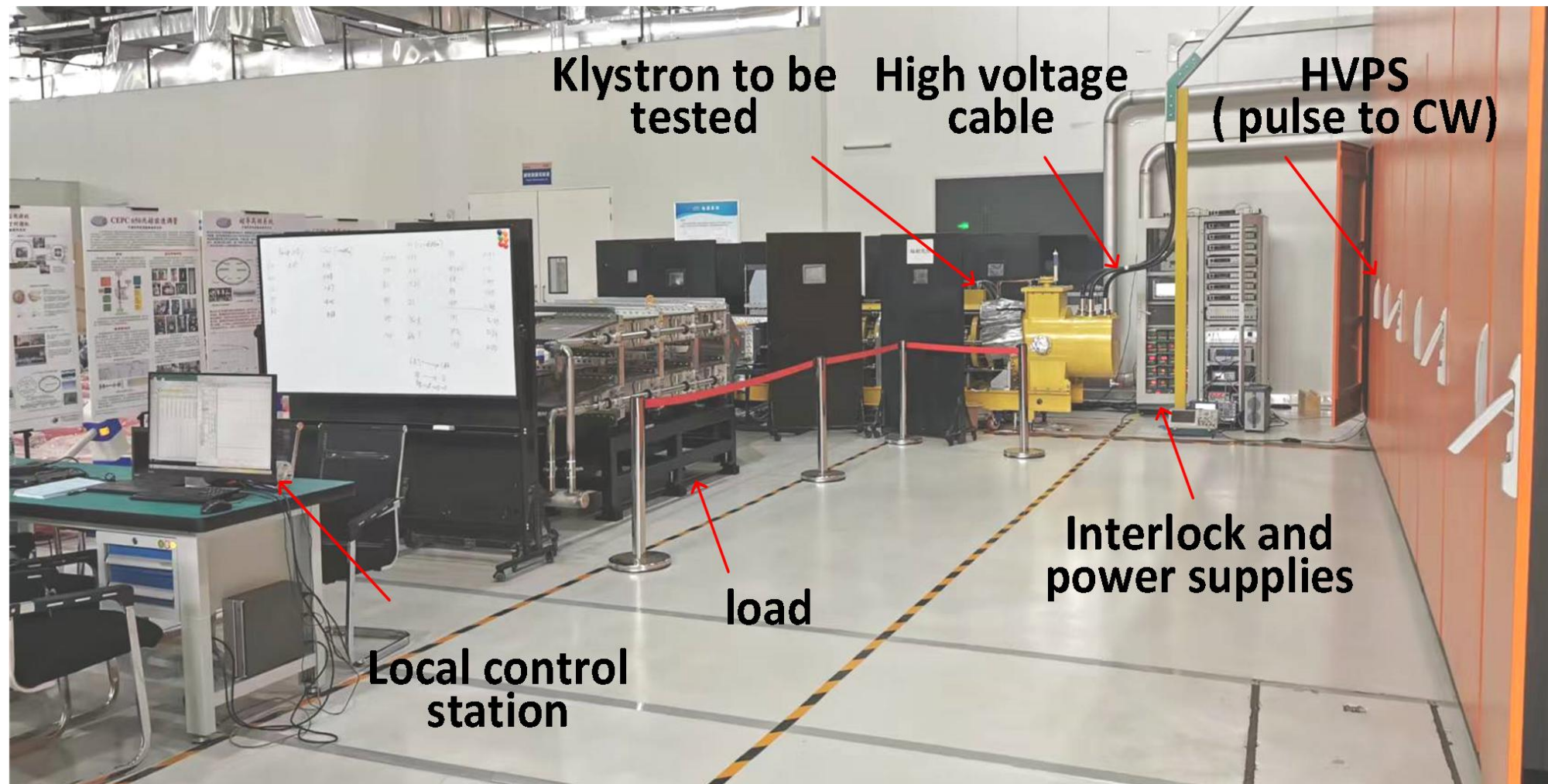
测试中，在直流状态下，电子枪79kV/5.5A，出现自激振荡，频率为950MHz及其谐波频率。

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

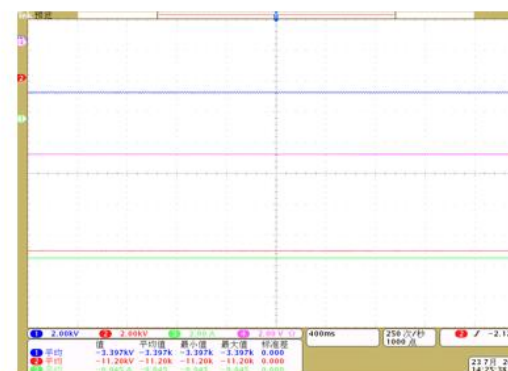
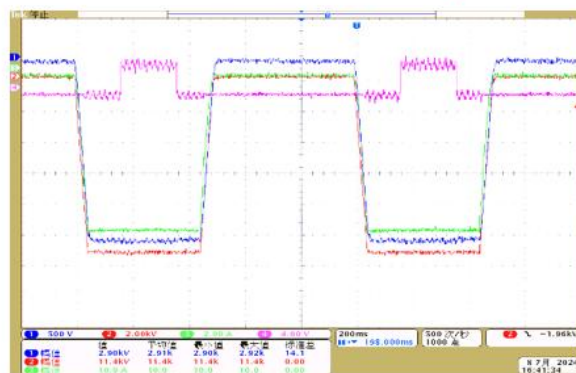
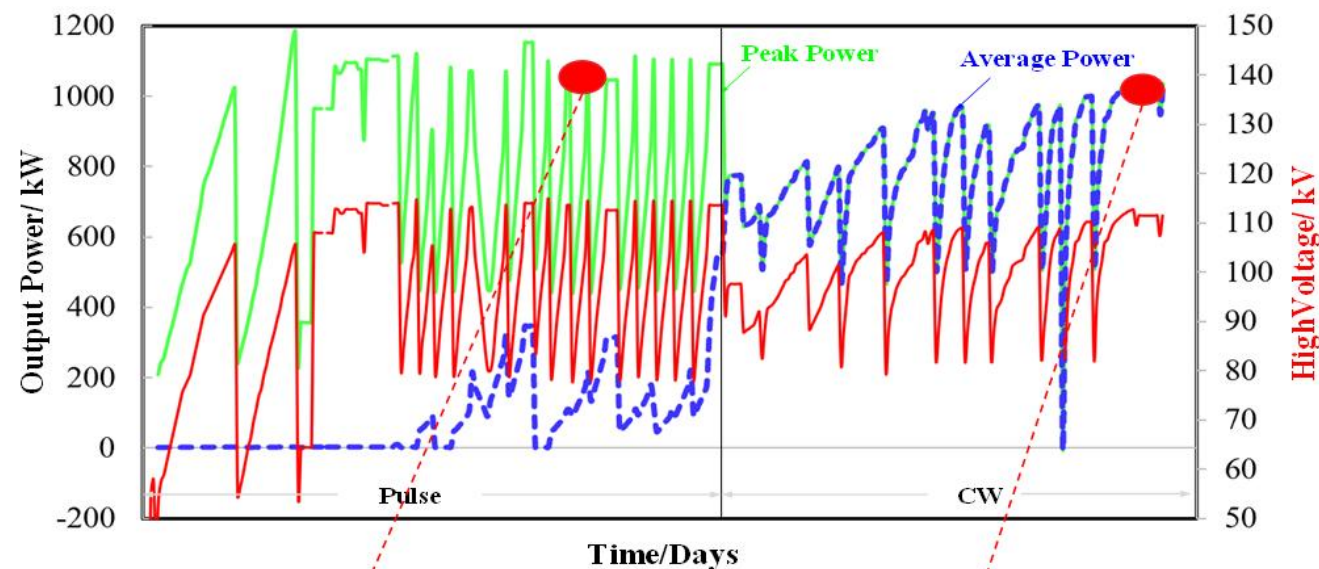
2024年1月11日至8月18日，速调管进行了高功率老炼和测试（高能所）





# 高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管

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





# 高功率高效率650MHz/800kW连续波速调管

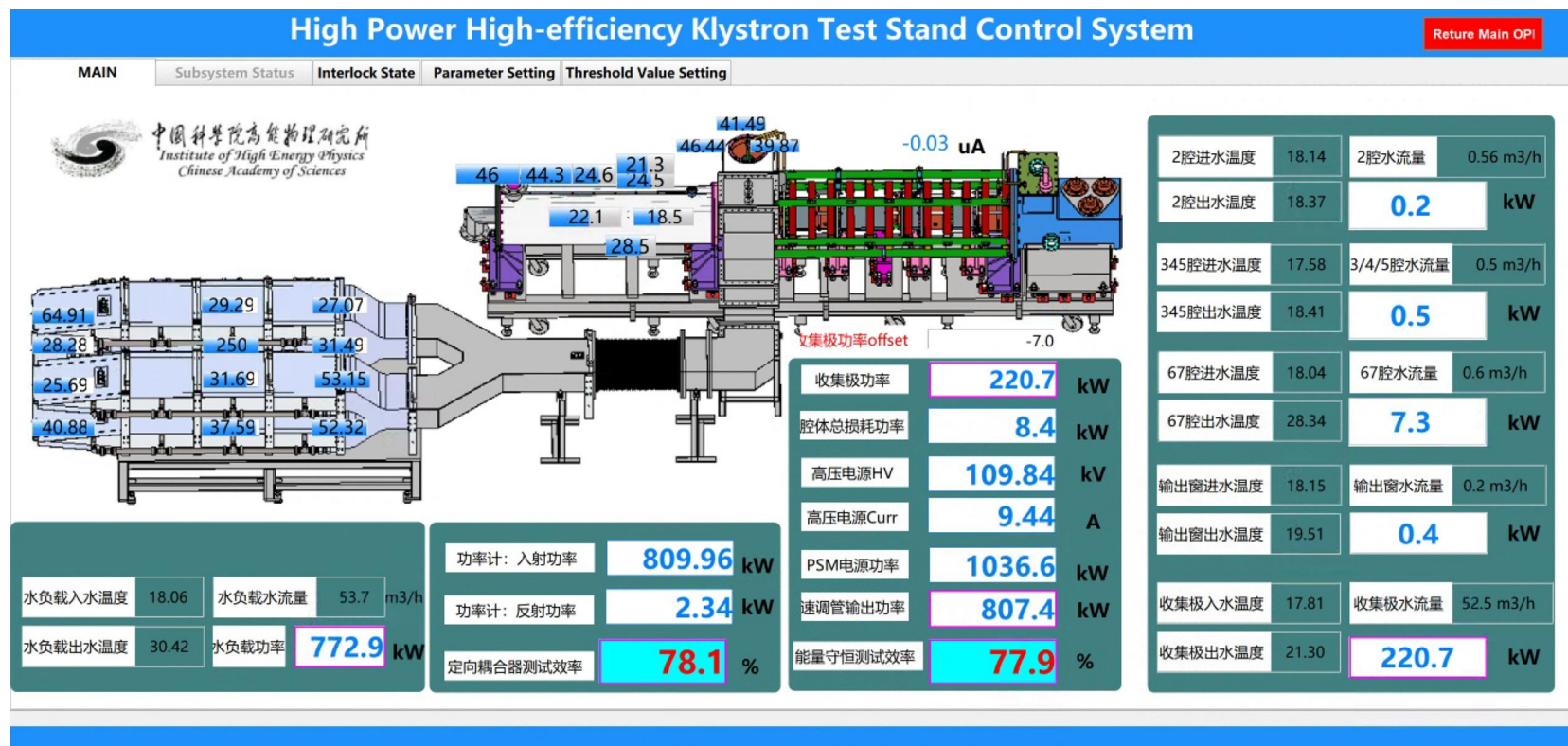
## 功率测量 (高能所)

- 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

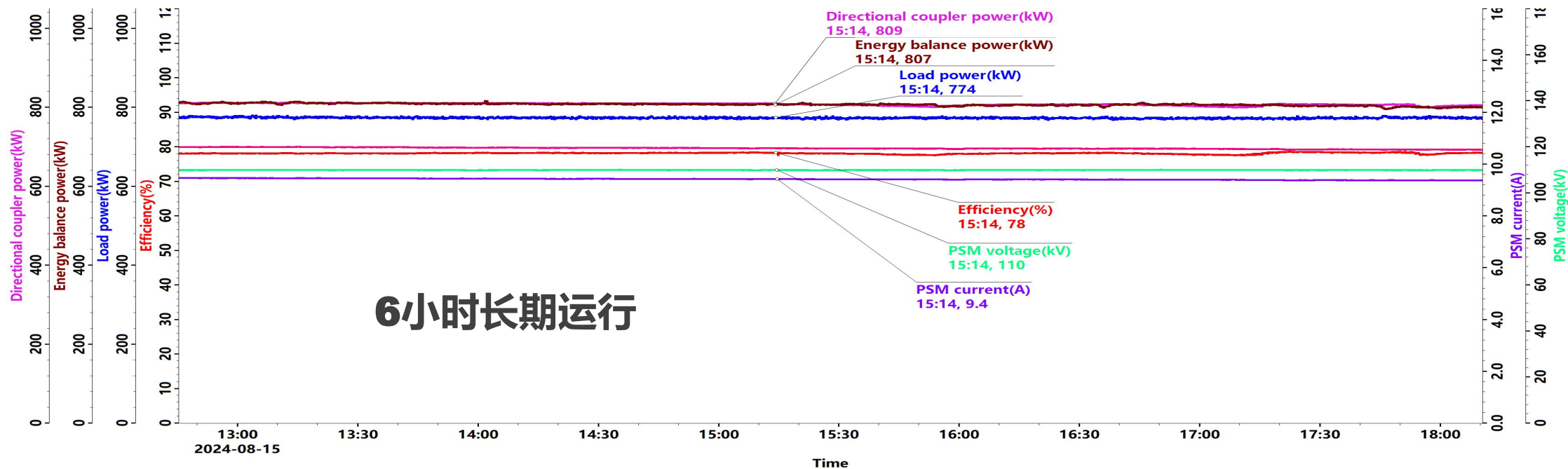
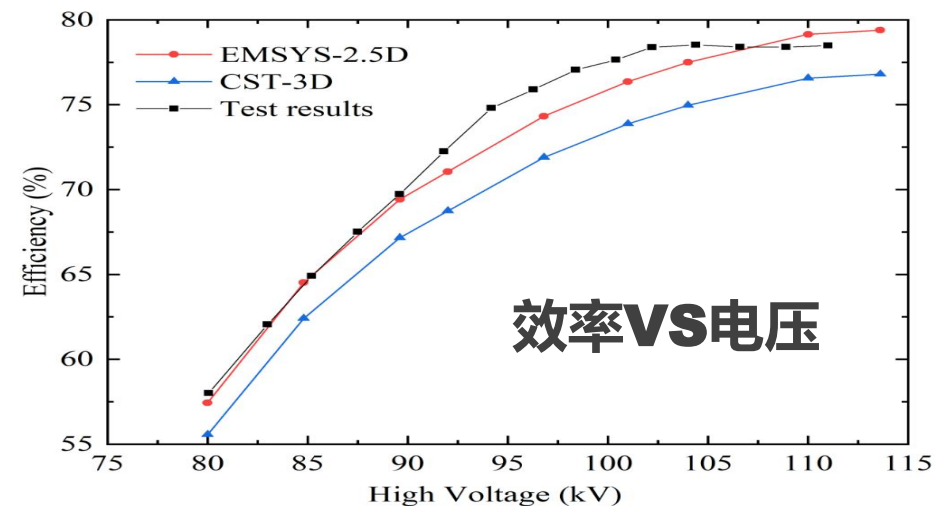
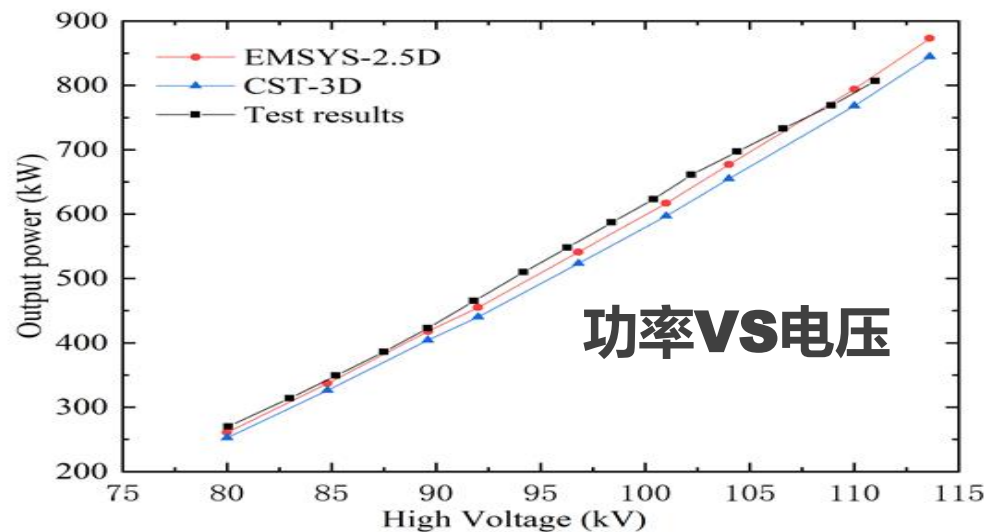
输出功率=高压电源功率（电压×电流）-腔体总损耗-输出窗损耗-收集极功耗

- 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 and 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制水平再上新台阶。







- 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
- 648MHz/1.2MW长脉冲速调管
- 324MHz/2.5MW脉冲速调管
- 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。



## 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：

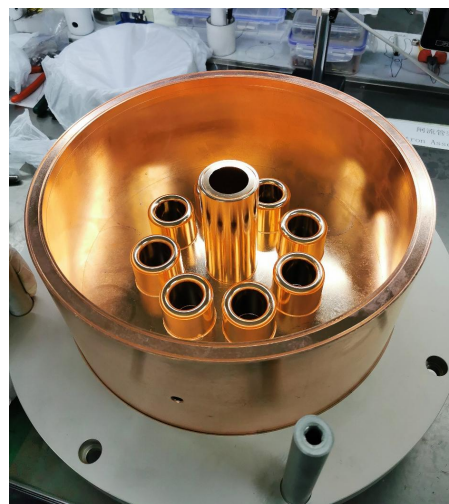
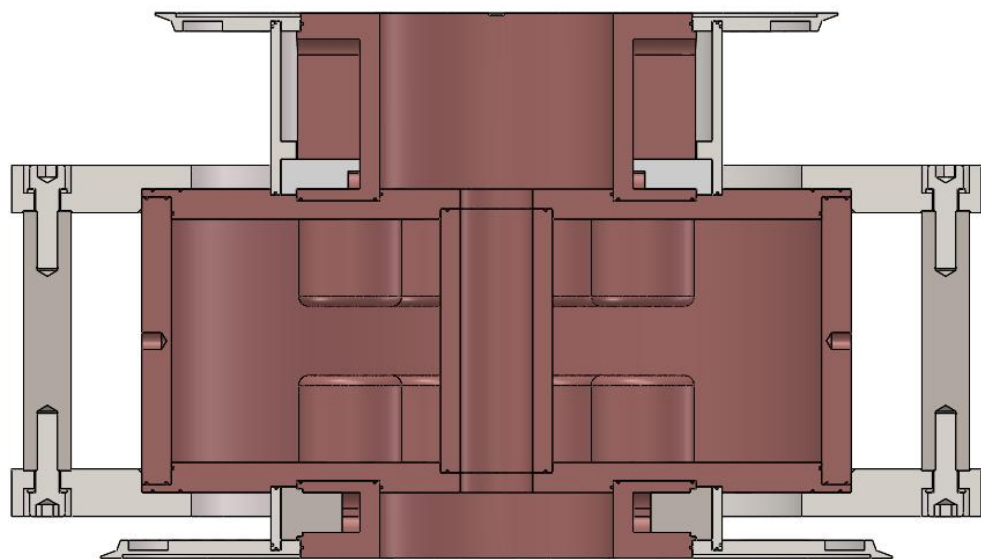
- 1、进一步优化和完善输出波导的支撑与加固方式。
- 2、进一步优化和完善整管的支撑结构和方式。
- 3、对比不同线规、线包尺寸和冷却方式得到重量和功率损耗最小的方案。



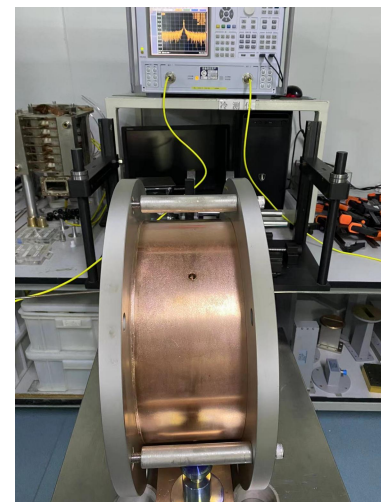


# 650MHz/800kW多注速调管

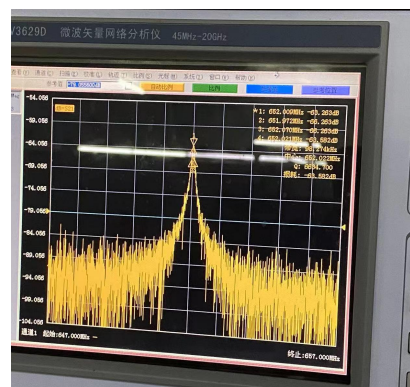
选择2号腔进行工艺实验；克服了腔体焊接过程中频率漂移问题。



装配

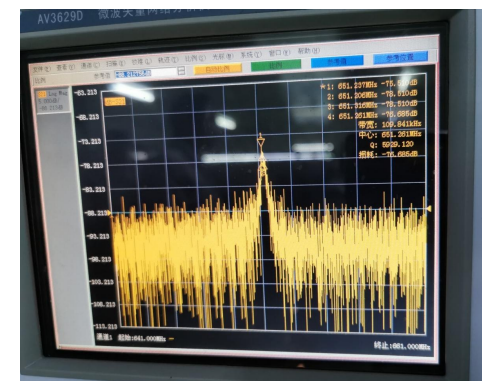


冷测



原本腔频率为652MHz

进行频率调谐

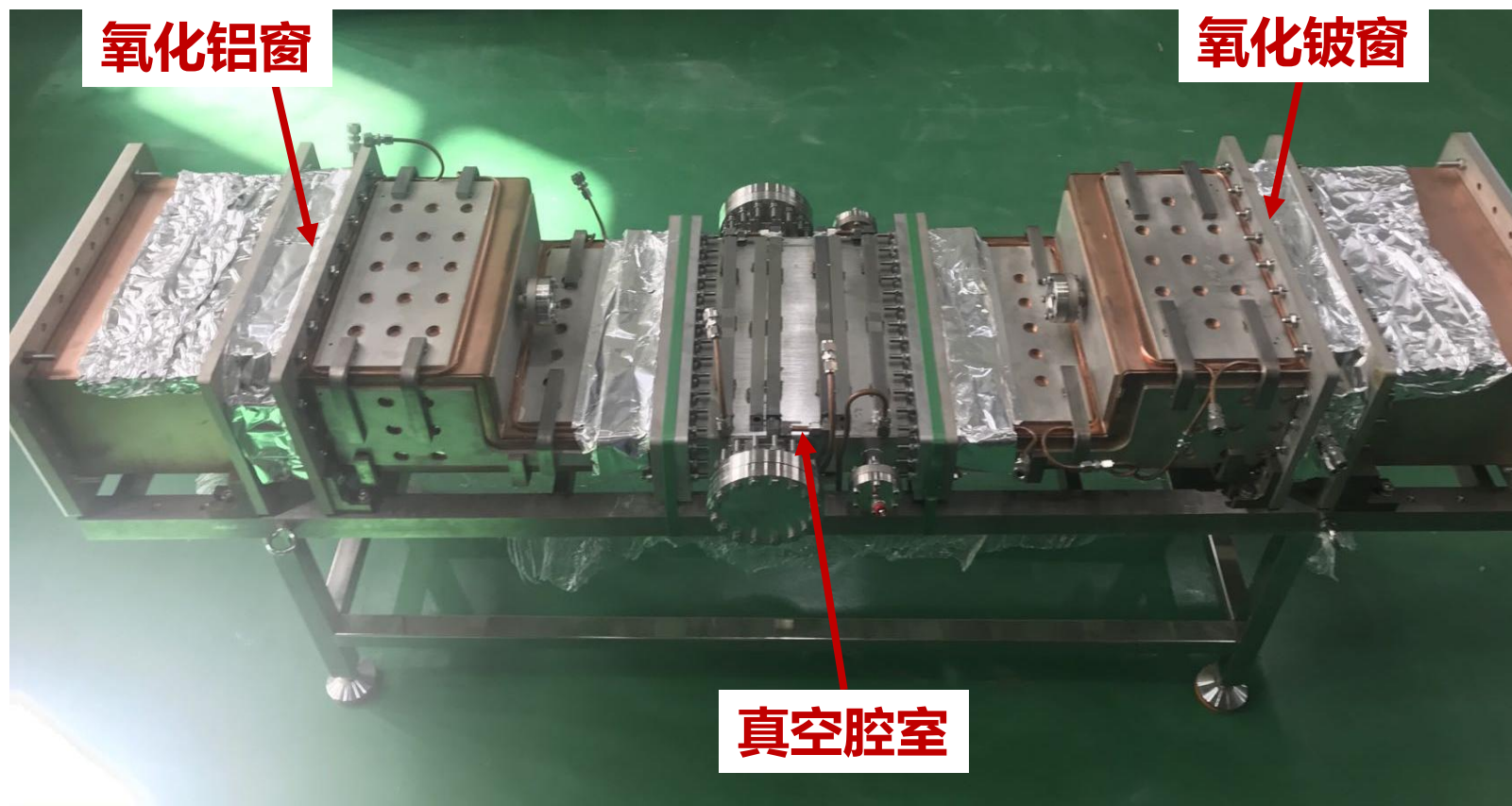


调谐到651.237MHz



# 650MHz/800kW多注速调管

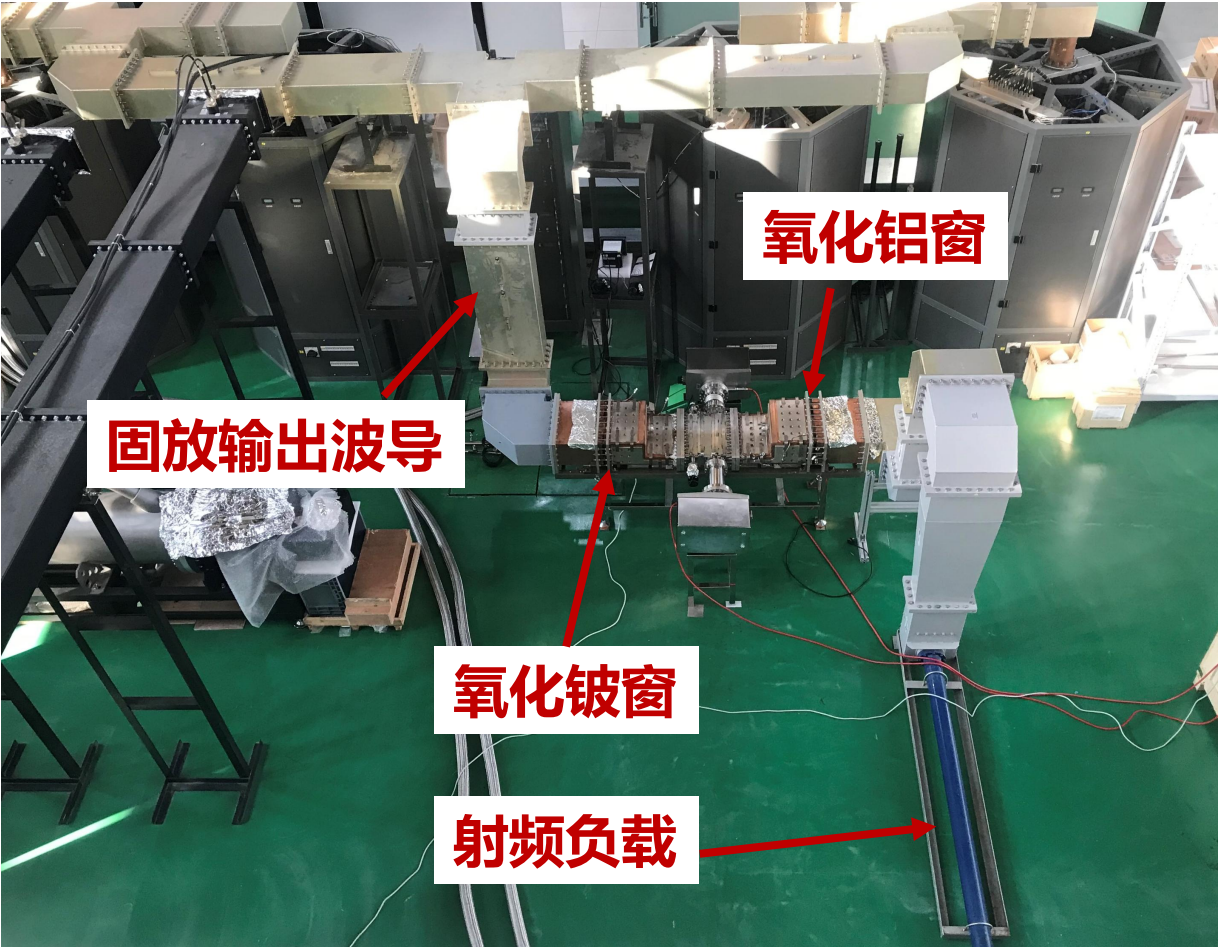
针对多注速调管的双窗结构、波导耦合输出，研究了波导的焊接制造工艺以及氧化铝瓷和氧化铍瓷分别作为输出窗的设计方案研证





# 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

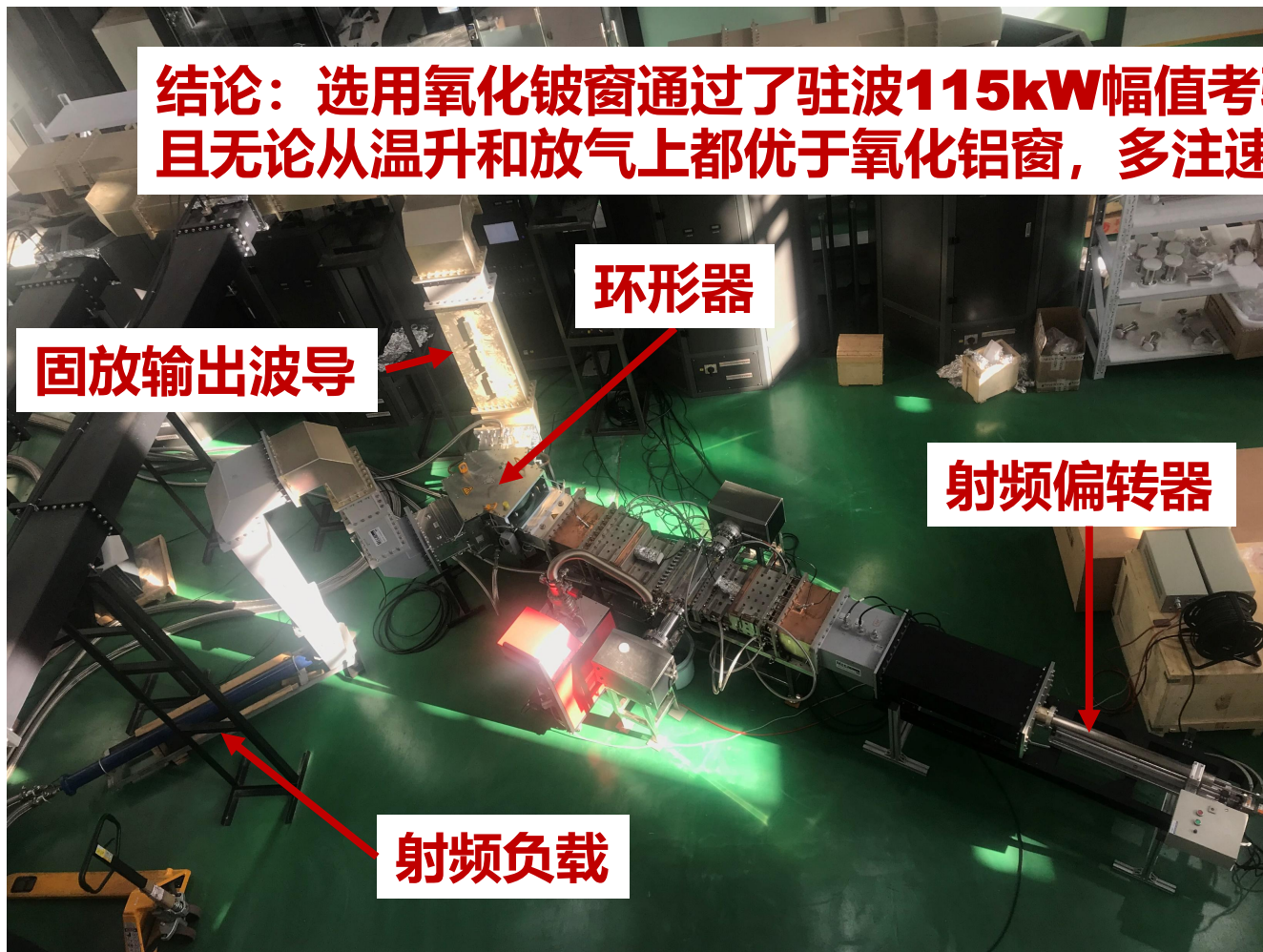
| 参数        | 数值          |
|-----------|-------------|
| 固放输出功率    | 143 kW (CW) |
| 氧化铝陶瓷表面温升 | 10.2 °C     |
| 氧化铍陶瓷表面温升 | 8.7°C       |
| 持续时间      | 4 hours     |



# 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



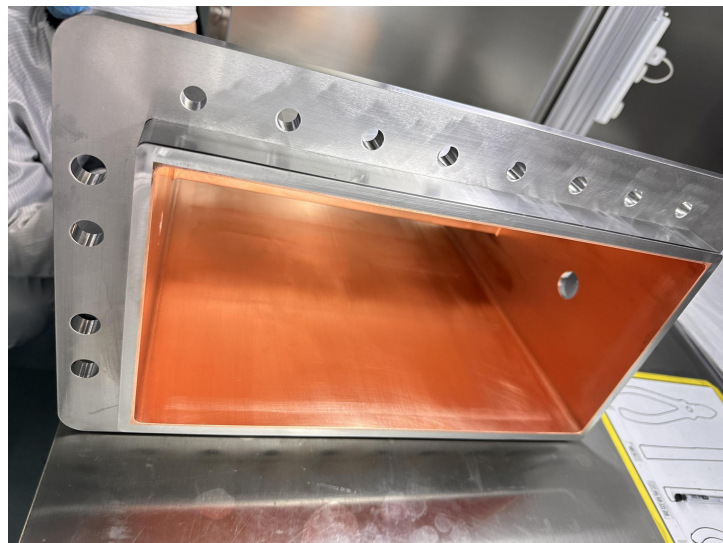
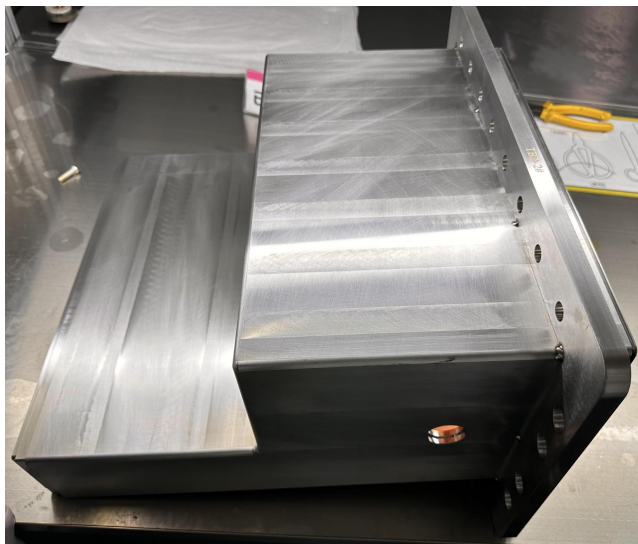
氧化铍窗片上测得的连续波功率  
该处为注波电压幅度峰值位置

|        | 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

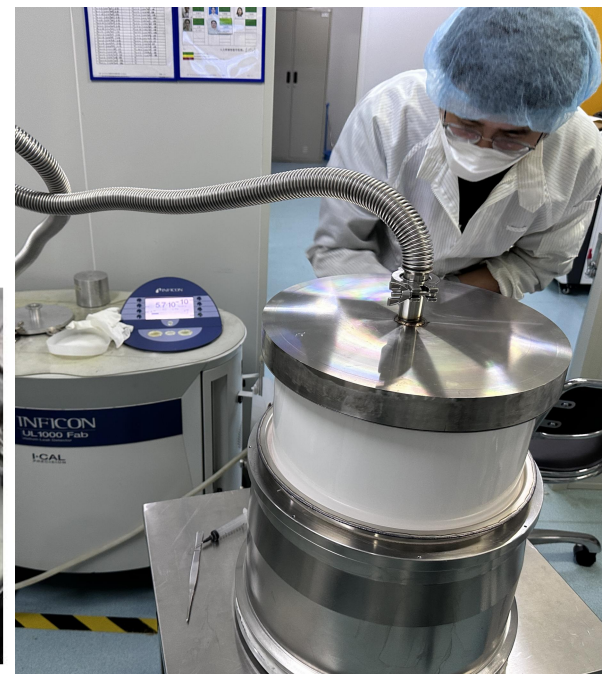
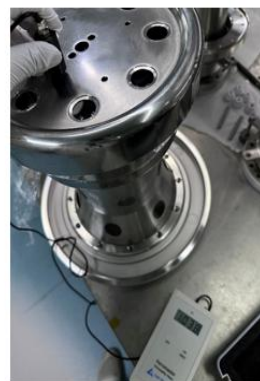
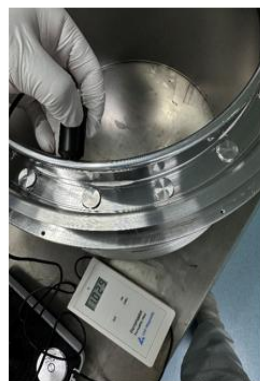
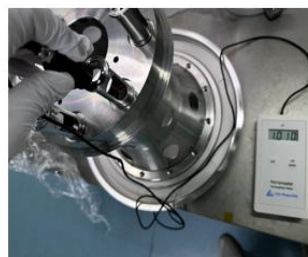
运用了不锈钢+铜复合材料技术克服了方形铜波导真空下变形问题。





# 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    | $7.9 \times 10^{-6}$ |                |      |      |
| 14:00    | 0.31  | 1.20    | $8.2 \times 10^{-6}$ |                |      |      |
| 14:20    | 0.477 | 1.497   | $8.2 \times 10^{-6}$ |                |      |      |
| 14:30    | 0.678 | 1.599   | $8.8 \times 10^{-6}$ |                |      |      |
| 14:40    | 0.878 | 2.486   | $9.7 \times 10^{-6}$ |                |      |      |
| 14:50    | 1.183 | 2.976   | $1.1 \times 10^{-5}$ |                |      |      |
| 15:00    | 1.478 | 3.499   | $1.2 \times 10^{-5}$ |                |      |      |
| 15:40    | 1.861 | 4.001   | $1.4 \times 10^{-5}$ | 358/390°C      |      |      |
| 15:50    | 2.289 | 4.501   | $1.7 \times 10^{-5}$ | 397°C          |      |      |
| 15:56    | 2.384 | 4.501   | $1.8 \times 10^{-5}$ | 450°C          |      |      |
| 16:10    | 2.397 | 4.490   | $1.6 \times 10^{-5}$ | 461°C          |      |      |
| 17:40    | 2.910 | 5.003   | $9.9 \times 10^{-6}$ | 517°C          |      |      |
| 17:50    | 3.264 | 5.502   | $1.0 \times 10^{-5}$ | 582°C          |      |      |
| 18:00    | 3.734 | 6.005   | $1.0 \times 10^{-5}$ | 647°C          |      |      |
| 18:10    | 4.207 | 6.501   | $1.1 \times 10^{-5}$ | 704°C          |      |      |
| 第2次 9:07 | 4.125 | 6.501   | $3.8 \times 10^{-6}$ | 699°C          |      |      |
| 9:07     | 4.582 | 7.004   | $3.8 \times 10^{-6}$ | 746/           |      |      |
| 9:20     | 5.103 | 7.504   | $3.8 \times 10^{-6}$ | 764            |      |      |
| 9:25     | 5.160 | 7.504   | $4.1 \times 10^{-6}$ | 804            |      |      |
| 9:30     | 5.611 | 8.006   | $4.1 \times 10^{-6}$ | 811            |      |      |
| 9:35     | 5.656 | 8.006   | $4.2 \times 10^{-6}$ | 851            |      |      |
| 9:40     | 5.979 | 8.341   | $4.4 \times 10^{-6}$ | 866            |      |      |
| 9:45     | 5.979 | 8.336   | $4.5 \times 10^{-6}$ | 879            |      |      |
| 9:50     | 6.641 | 9.009   | $4.6 \times 10^{-6}$ | 899            |      |      |
| 9:55     | 6.70  | 9.010   | $5.1 \times 10^{-6}$ | 943            |      |      |
| 10:00    | 7.208 | 9.592   | $5.3 \times 10^{-6}$ | 958            |      |      |
| 10:05    | 7.296 | 9.511   | $5.8 \times 10^{-6}$ | 1000           |      |      |
| 10:10    | 7.708 | 10.007  | $6.1 \times 10^{-6}$ | 1007           |      |      |
| 10:15    | 7.835 | 10.007  | $6.6 \times 10^{-6}$ | 1047           |      |      |
| 10:20    | 8.273 | 10.508  | $6.8 \times 10^{-6}$ | 1059           |      |      |
| 10:25    | 8.356 | 10.509  | $8.5 \times 10^{-6}$ | 1098           |      |      |
| 10:30    | 8.627 | 10.809  | $9 \times 10^{-6}$   | 1106           |      |      |
| 10:32    | 8.868 | 11.206  | $9.2 \times 10^{-6}$ | 1125           |      |      |
| 10:35    | 9.182 | 11.313  | $1 \times 10^{-5}$   | 1145           |      |      |
| 10:36    | 9.017 | 11.112  | $1 \times 10^{-5}$   | 1148           |      |      |
| 10:36    | 9.065 | 11.213  | $1 \times 10^{-5}$   | 1150           |      |      |
| 11:12    | 9.080 | 11.213  | $1.2 \times 10^{-5}$ | 1140 C (温度计不动) |      |      |
| 11:13    | 8.112 | 11.5013 | $1.1 \times 10^{-5}$ | 1080           |      |      |
| 13:20    | 8.527 | 12.00   | $1 \times 10^{-5}$   | 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

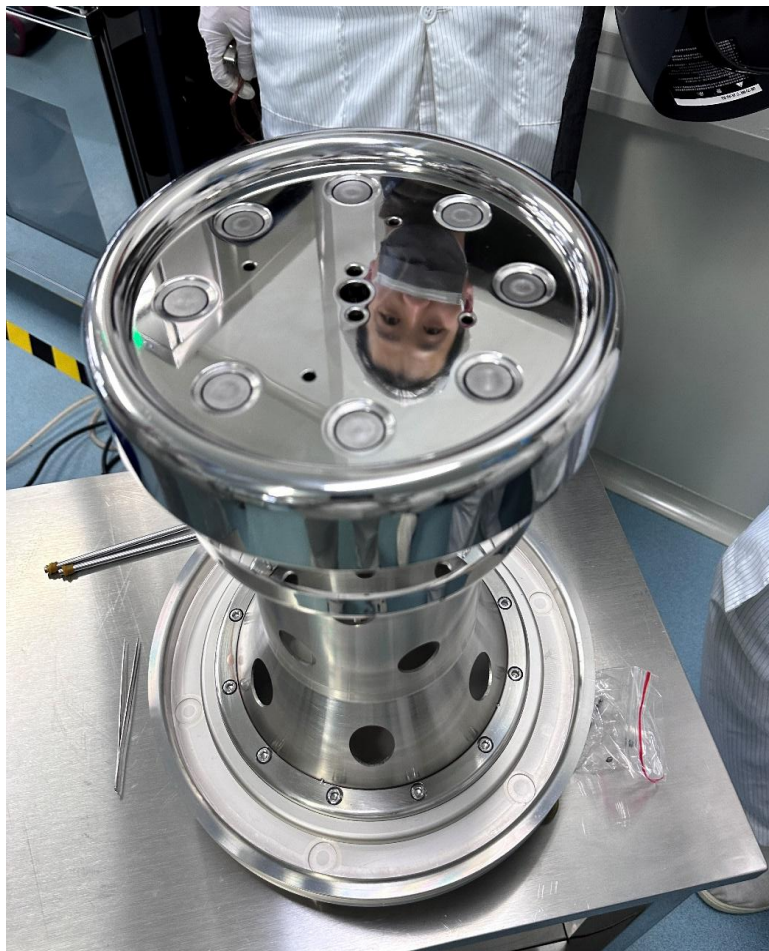


# 650MHz/800kW多注速调管

## 电子枪



束流管电子枪阴极安装

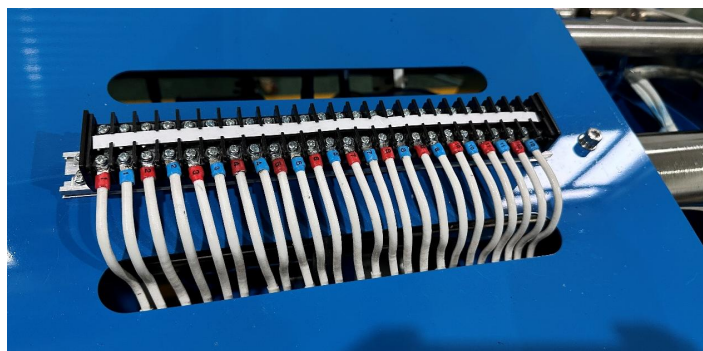
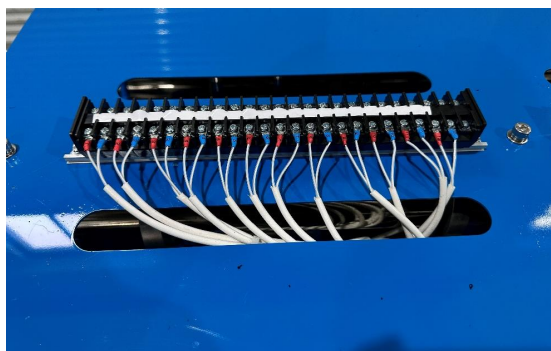


束流管总装



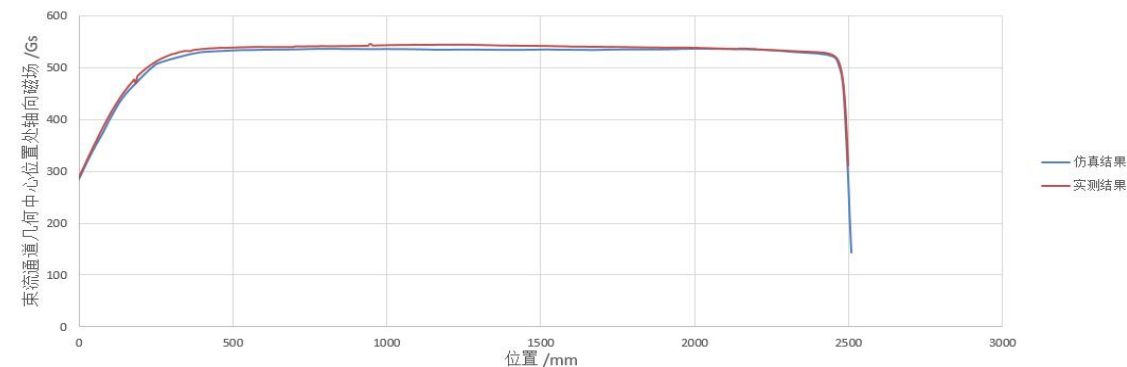
# 650MHz/800kW多注速调管

成功完成了**重达3吨**的聚焦线圈系统的研制和测试

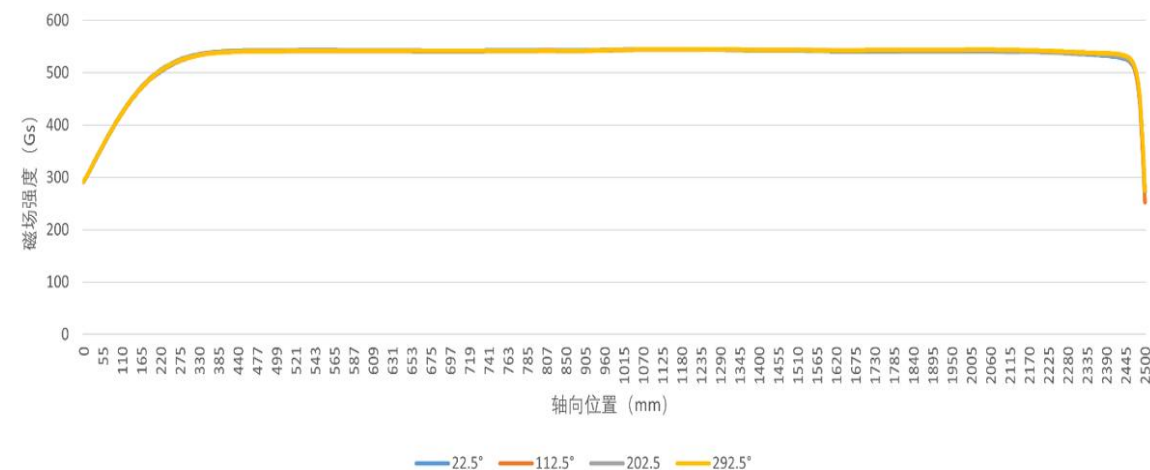


聚焦线圈系统测试现场

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

目前多注速调管正在总装和排气阶段。







- 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
- ◆ 648MHz/1.2MW长脉冲速调管
- 324MHz/2.5MW脉冲速调管
- 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。

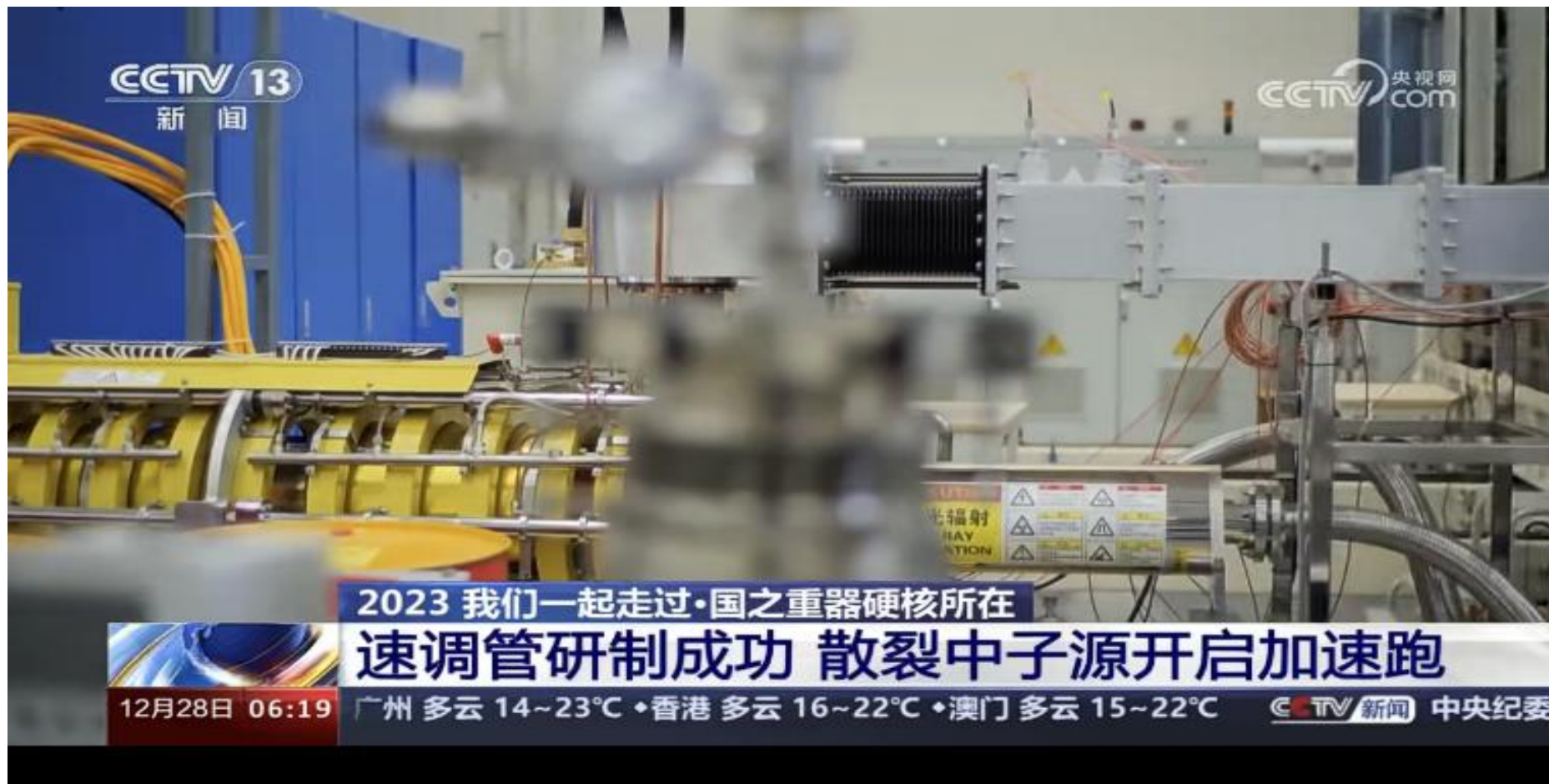
验收组组长：段兆云

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**。







- 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
- 648MHz/1.2MW长脉冲速调管
- ◆ 324MHz/2.5MW脉冲速调管
- 总结



# 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） | $\pm 0.1\text{MHz}$ |
| 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              |



### AJDisk中的仿真结果

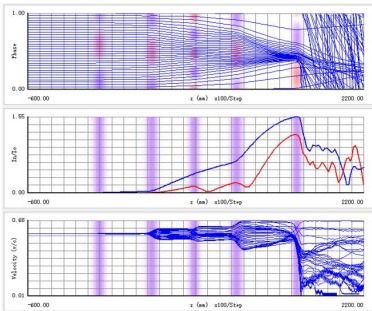


图6 AJDisk中的仿真结果图

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 |

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

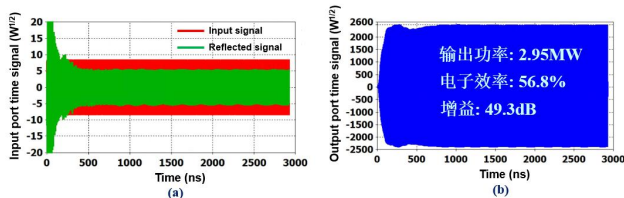


图8 (a)输入信号和输入端口的反射信号随时间的变化关系; (b)输出端口的信号幅值

- 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。

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



### CST中的建模及设置

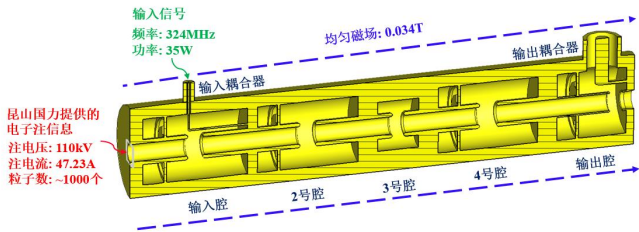


图7 超构材料速调管在CST中的建模及参数设置

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



### 输出功率随输入信号频率的变化

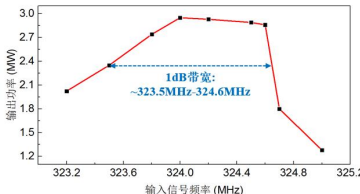


图10 输出功率随输入信号频率变化

- 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

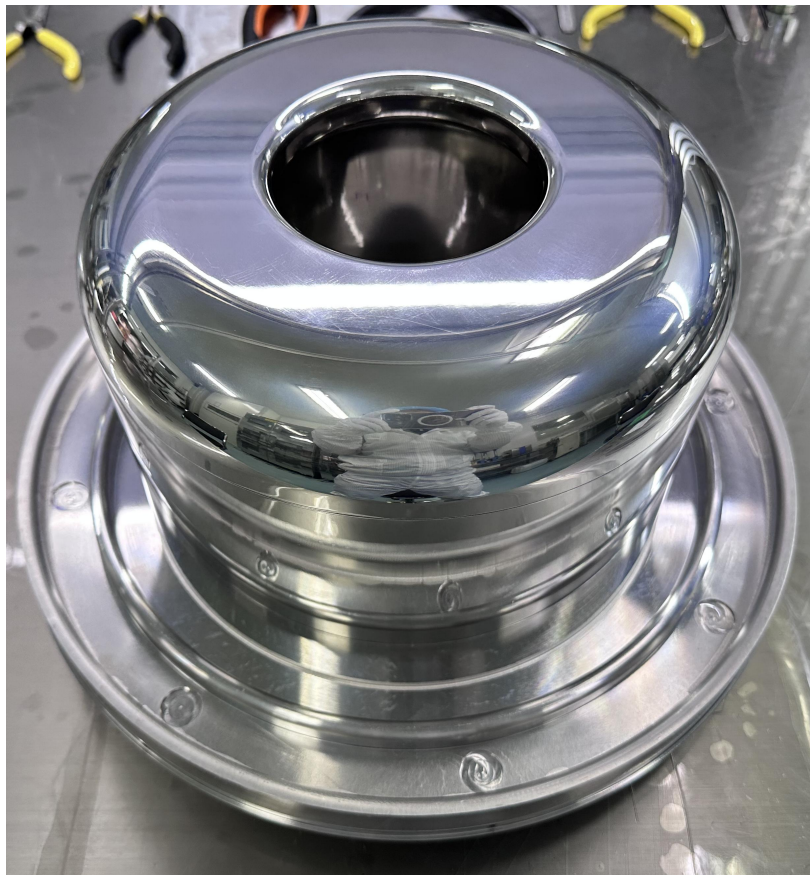
17

电子科大段教授团队完成物理设计并作报告

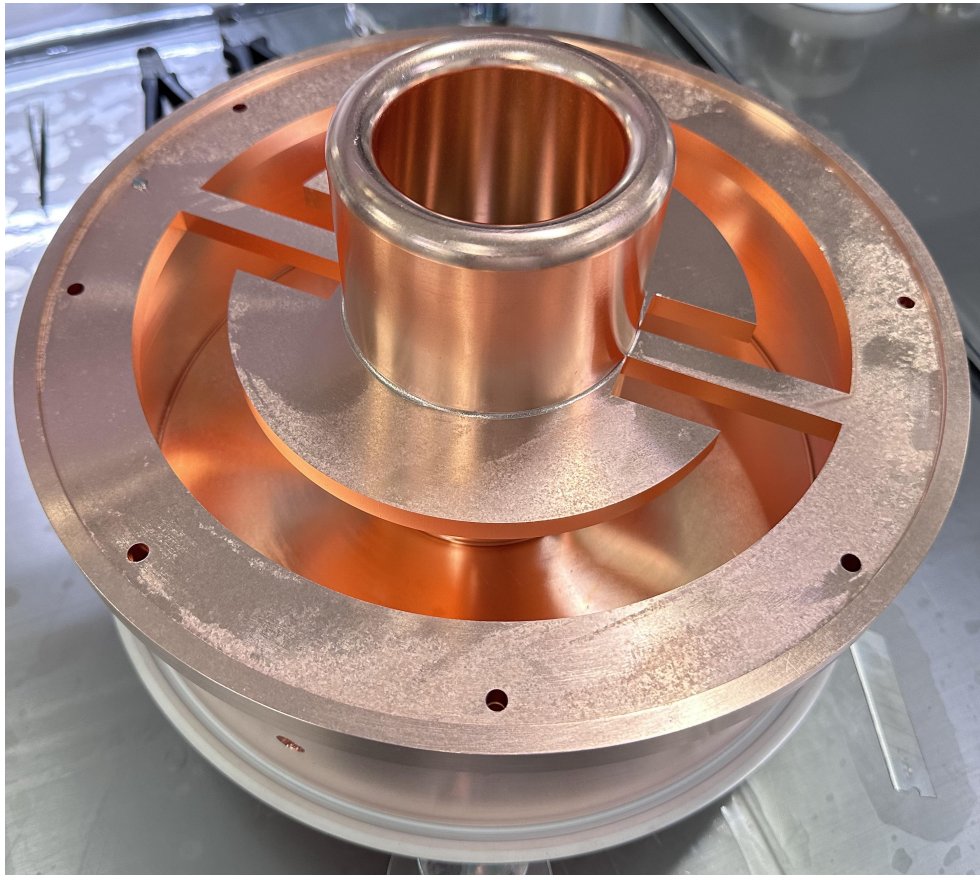


# 324MHz/2.5MW速调管研发

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

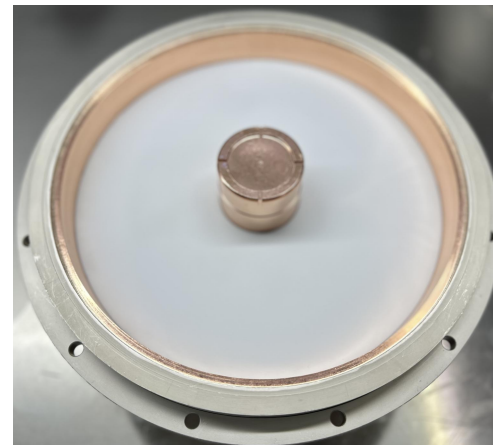
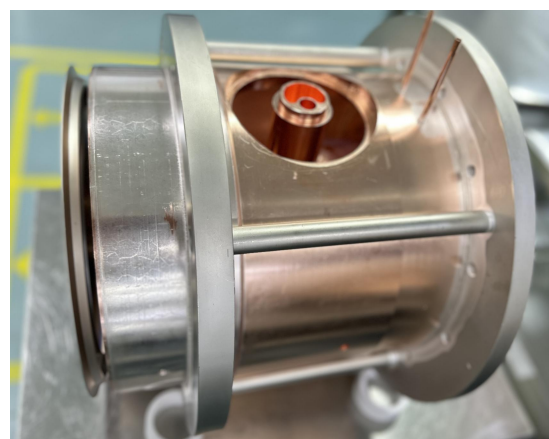
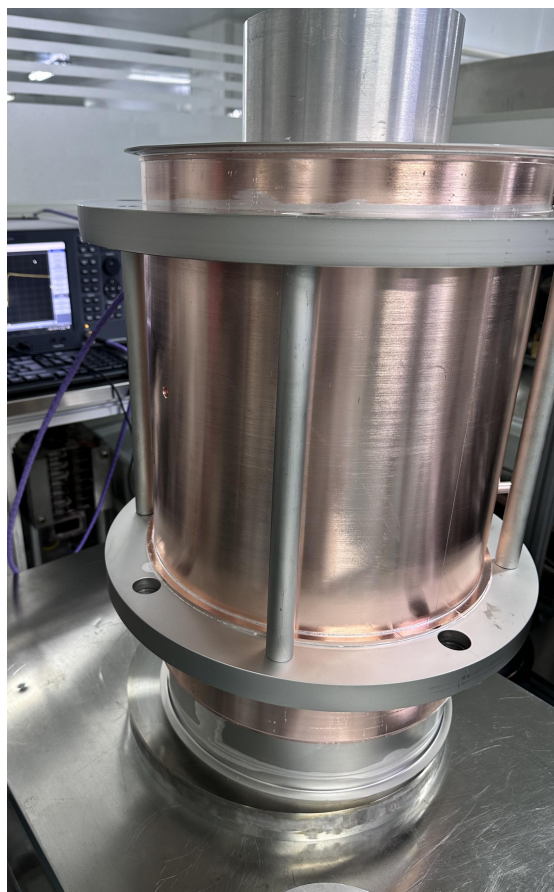


腔体超构体结构组件研制



# 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。2025年6月7日，由中国散裂中子源（CSNS）加速器射频团队牵头，国力股份联合电子科技大学电子科学与工程学院段兆云研究小组、CEPC速调管团队共同研制的国际首支紧凑型P波段大功率超构材料速调管，**以全指标达标的卓越表现一次通过验收**





# 324MHz/2.5MW速调管研发

该成果被**新华社、央视网、新华网、中国新闻网**等国家级主流媒体重点报道，全网累计点击量超过**1200万**；《中国科学报》《科技日报》《南方日报》等权威报纸在头版刊发相关成果，《澳门日报》等港澳媒体亦广泛关注，成为“近年来真空电子器件领域最具代表性的技术突破”。



## 中国散裂中子源新设备通过验收 实现国际首次突破

央视新闻客户端 | 2025-06-08 09:49:21 浏览量822636

记者从中国科学院高能物理研究所获悉，2025年6月7日，中国散裂中子源（CSNS）直线加速器首支紧凑型P波段大功率超构材料速调管，在中国科学院高能物理研究所东莞研究部通过各项指标测试，顺利完成验收。这是中国散裂中子源关键技术的一项重要突破。





- 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
- 648MHz/1.2MW长脉冲速调管
- 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



2024年 324MHz脉冲速调管

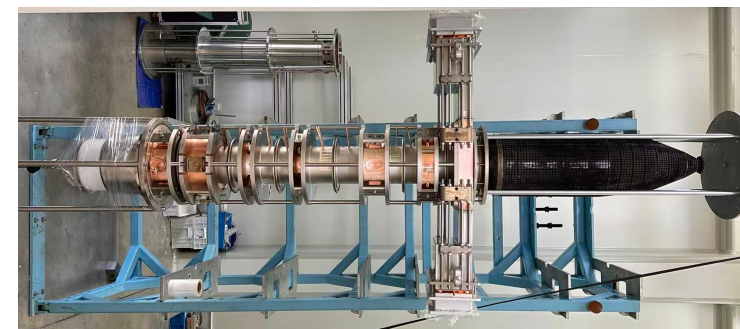
2021年 650MHz/800kW高效率速调管样管



2022年 648MHz脉冲速调管



2025年 650MHz/800kW多注速调管





# 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