

重庆光源储存环常温RF腔预研

李中泉

重庆光源储存环高频

07/09

2024 年超级陶浆装置研讨会

主要内容

- 研究背景
- TM020模式阻尼腔研究现状
- TM020模式阻尼腔研究进展
- Backup: 腔型参数优化

1. 研究背景

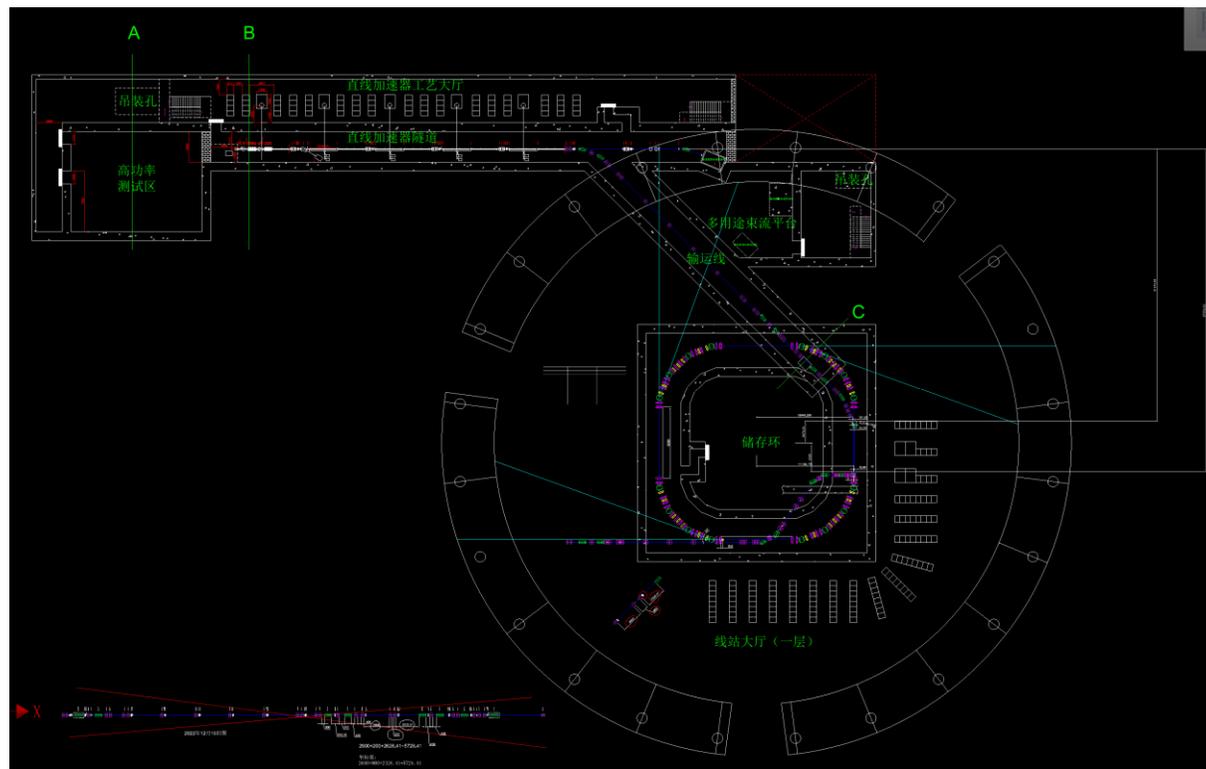
——超瞬态实验装置（重庆光源）

设计束流能量500MeV，

流强0.5~1A

计划于2025年2月进行直线安装

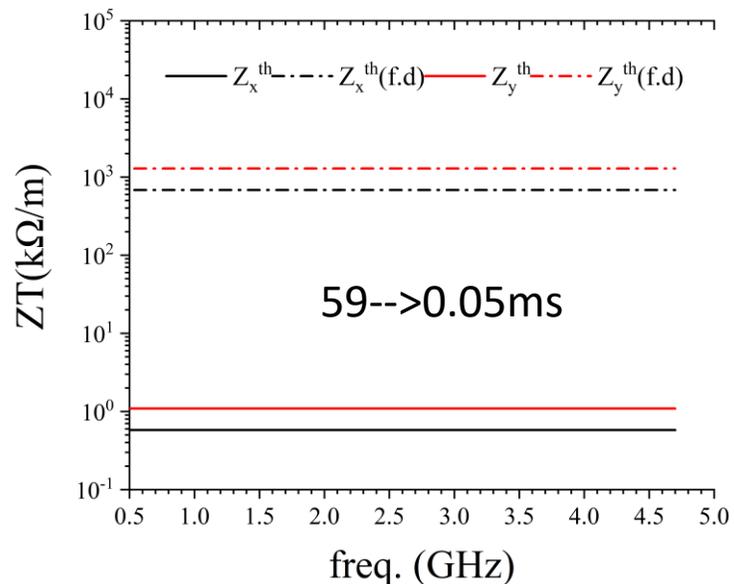
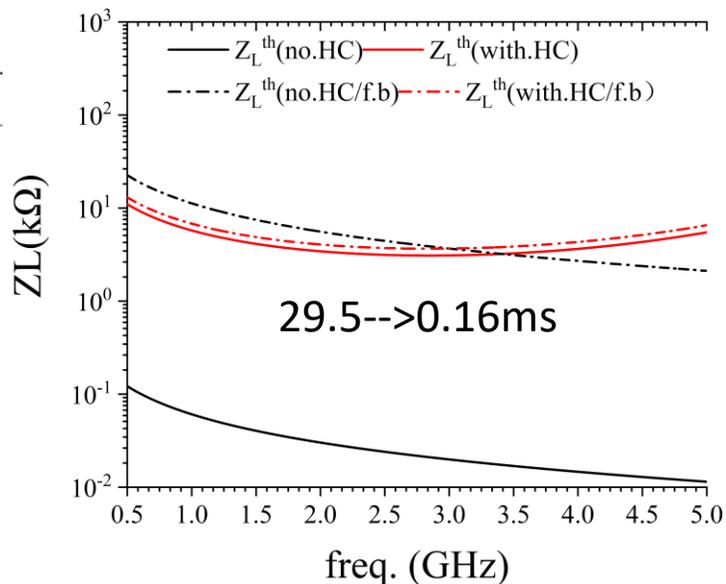
8月储存环安装



储存环高频相关物理分析

表 1: 储存环与高频系统相关的机器参数

Parameter	Unit	V1
储存环周长 (C)	m	~76.78
电子束能量 (E_0)	GeV	0.5
束流强度 (I_0)	A	0.5~1
阻尼时间 ($\tau_{x,y,s}$)	ms	59/59/29.5
阻尼时间 (反馈系统)($\tau_{x,v,s}$)	ms	0.05/0.05/0.16
每束流单圈能量损失 (U_0)	keV	4.3442
插入件损耗	kW	(5)
自然能散 (rms $\delta E/E$)		0.37×10^{-3}
纵向工作点 (Q_s)		0.0141
动量压缩因子 (α_p)		8.15×10^{-3}
工作点 ($\beta_{x/y}$)	mm	6.198/3.357
谐波数 (h)		128
基频腔谐振频率	MHz	499.784
基频加速腔压	kV	600
谐波腔谐振频率	MHz	1499.352
谐波腔腔压	kV	200
自然束团长度 (σ_l)	mm	2.7
谐波腔拉伸后束团长度 (σ_{lh})	mm	12.2



储存环高频系统采用**双频系统**，**主频腔**为束流提供由同步辐射等所带来能量损耗，**谐波腔**通过拉伸束团长度以延长束流寿命；

通过谐波腔对束团拉伸，提高纵向阻抗阈值，降低纵向高阶模的抑制要求；

3. 通过横向反馈系统提高横向阻抗阈值，降低对横向高次模的抑制要求。

技术路线选择：超导腔 VS 常温腔

❖ 第四代同步辐射光源的腔类型选择情况

- 国际上已经运行和正在建设的第四代光源，其中大部分都是采用**常温腔方案**。
- Diamond II 和 Soleil_U 升级为第四代光源中将超导腔改为常温腔。（主要考虑：常温腔可采用冗余设计提高系统的稳定性、没有了低温维持系统，大大减小运行维修难度，节省占直线节长度）

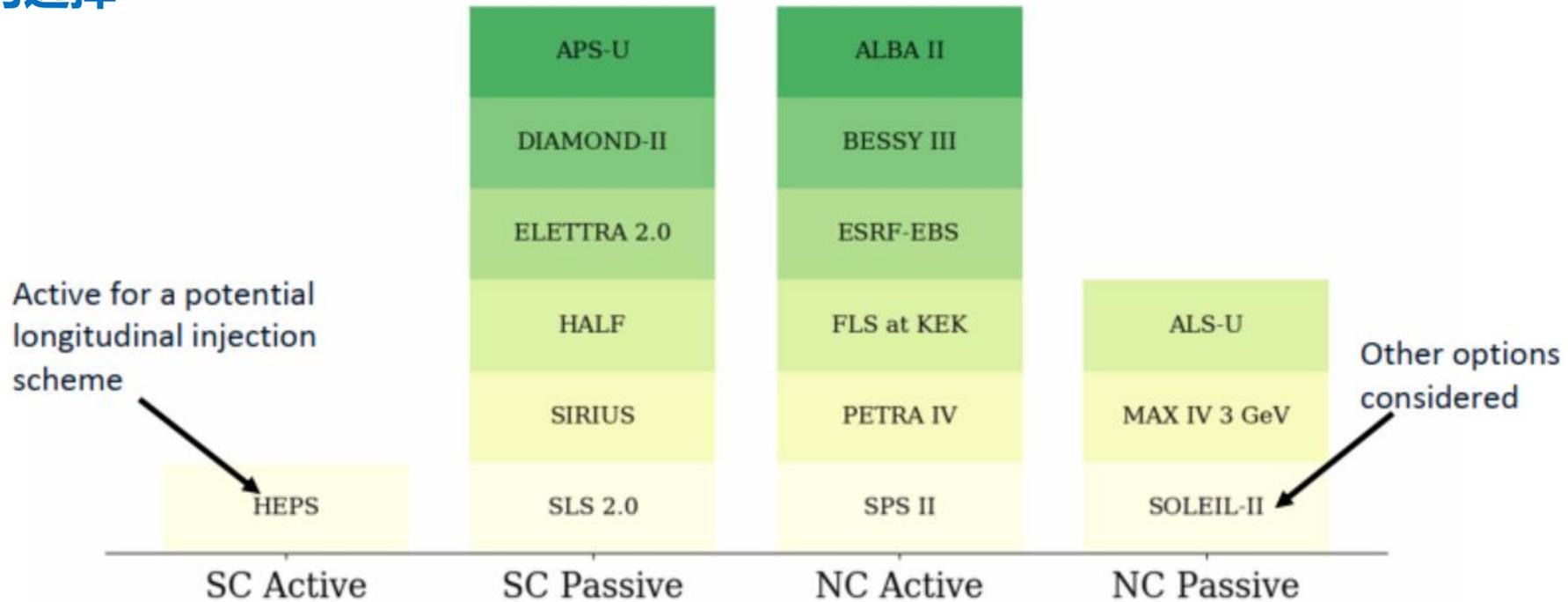
	E_0/GeV	f/MHz	I_b/mA	NC/SC		E_0/GeV	f/MHz	I_b/mA	NC/SC
HEPS	6	166.6	200	SC	Max IV	3	100	500	NC
SIRUIS	3	500	350	SC	APS-U	6	352	200	NC
NLSL-II	3	500	400	SC	ESRF_EBS	6	352	200	NC
HALF	2.2	500	350	SC	PETRA IV	6	500	200	NC
Diamond II	3.5	500	300	NC	ALS-U	2	500	500	NC
SOLEIL -U	2.75	352	500	NC	SPS II	3	119	300	NC
SLS II	2.4	500	400	NC	K-4GSR	4	500	400	NC
Spring 8 II	6	508	100	NC	Nano-Terasu	4	508/E020	300?	NC

[1] Diamond-II: Conceptual Design Report 2019.

[2] Conceptual Design Report for SOLEIL UPGRADE, 2020.

技术路线选择：被动腔or主动腔

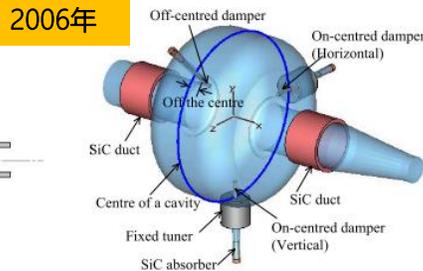
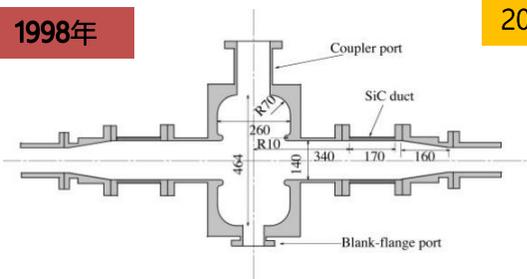
❖ 谐波腔的选择



- 国际上**中、低能**同步辐射光源谐波腔系统多采用主动式常温谐波腔。
- 采用主动式谐波腔可以更好的满足最佳束团拉伸需求，但由于束团畸变以及注入不均等原因的影响，获得的束团拉伸效果通常只有理论值的~30-70%区间。

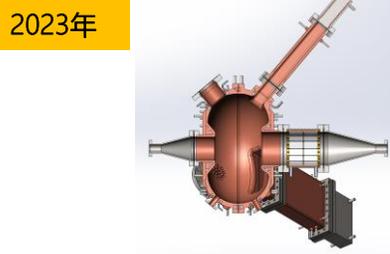
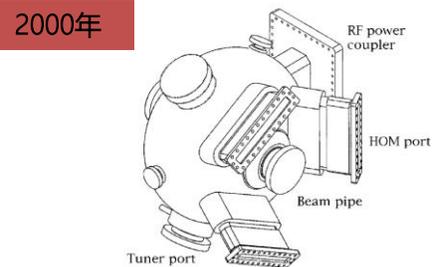
常温阻尼腔方案

- 束管型阻尼器
- 代表：KEK-PF、ASP



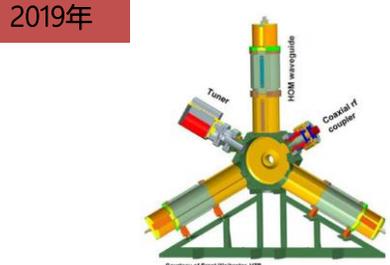
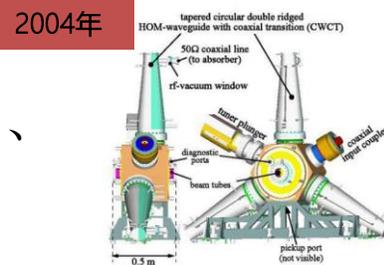
- KEK-PF 方案结构简单，但高阶模阻尼不彻底。
- ASP采用同轴馈管，阻尼效果不理想且严重影响工作模式。

- 矩形波导型
- 代表：PEP II



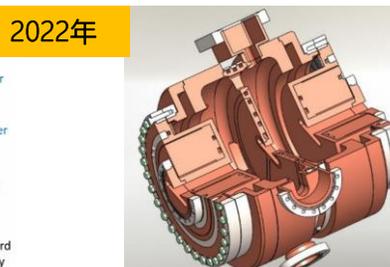
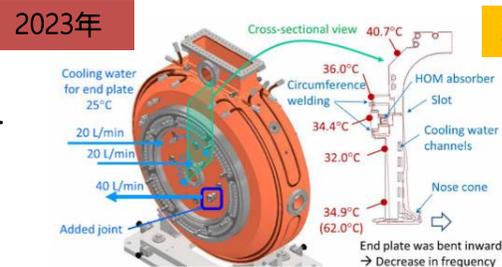
- PEP II提出波导阻尼方案，阻尼效果不理想，且结构复杂。
- 武汉先进光源的设计在PEP II基础上简化机械结构、升级阻尼抑制。

- 异型波导型
- 代表：BESSY II、PETRA IV



- BESSY II提出双脊波导阻尼方案，目的降低波导的截止频率，阻尼效果好，但结构复杂。
- PETRA IV进一步优化机械结构，机械复杂度降低。

- TM020模式阻尼
- 代表：Nano-Terasu、KEK-LS、ESRF-EBS



- spring8提出新腔型，具备高阶模深度阻尼、结构紧凑、承载腔压高和特征阻抗R/Q低等优势。
- ESRF-EBS提出滤波阻尼器方案，有效保护了工作模式功率泄露，但阻尼效果同时降低。

2. TM020模式阻尼腔研究现状

- Nano-Terasu (508MHz, FM)
- /KEK-LS (1500MHz, 3rd)
- /ESRF-EBS (1409MHz, 4th)

Nano-Terasu: 3-GeV synchrotron radiation source

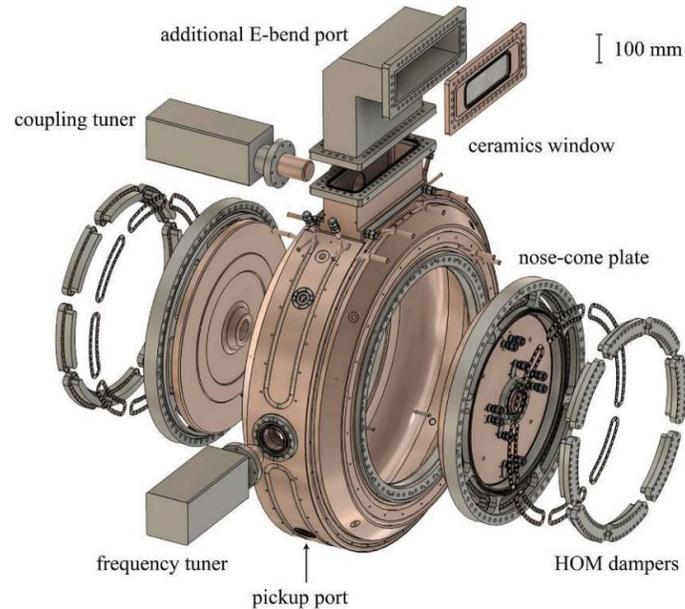


Table 1: Design Parameters of the HOM-damped Cavity for NanoTerasu Storage Ring

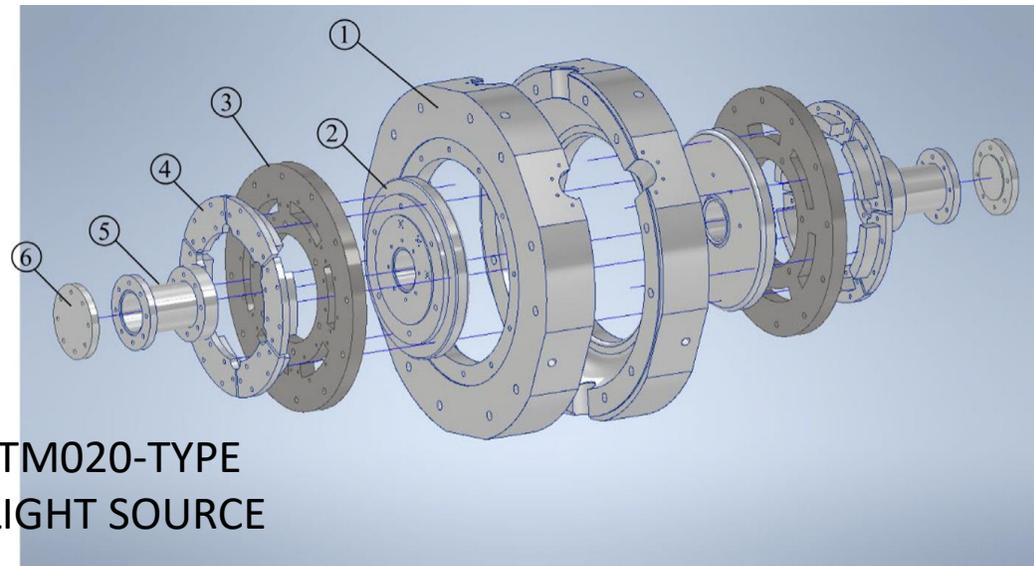
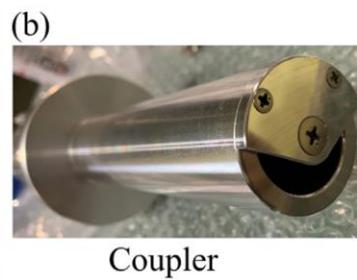
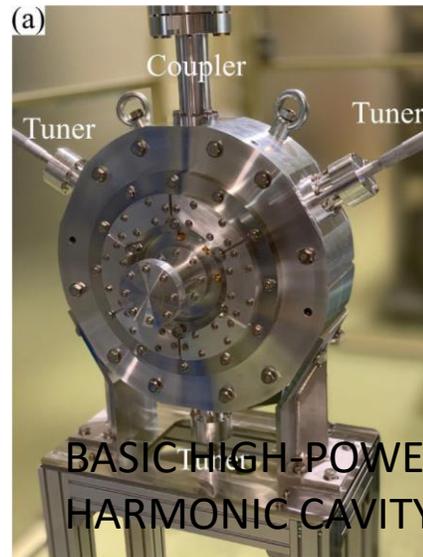
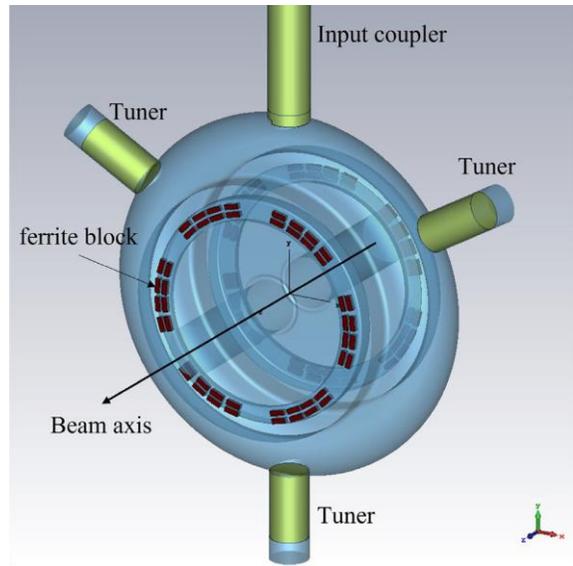
RF mode	TM020
Frequency	508.76 MHz
Unloaded Q	60,000
Coupling to waveguide	1- 5 (variable)
Shunt impedance	6.8 M Ω



1. 完成500MHz TM020模式阻尼腔设计；
2. 完成原型腔测试，并通过120kW高功率测试。

1. Inagaki[†], T., et al. (2023). "HIGH-POWER TESTS OF THE COMPACTLY HOM-DAMPED TM020CAVITIES FOR A NEXT GENERATION LIGHT SOURCE."
2. Ego, Hiroyasu, et al. "Compact HOM-damping structure of a beam-accelerating TM020 mode rf cavity." Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 1064 (2024): 169418.

A future light source at KEK /KEK-LS



BASIC HIGH-POWER DESIGN OF A 1.5-GHz TM020-TYPE HARMONIC CAVITY FOR THE KEK FUTURE LIGHT SOURCE

Principal parameters of the final cavity design shown in Fig. 17 with an input coupler design given in Fig. 8(b). Frequency-domain simulation was used.

Parameter	Value
Resonant frequency of TM020 mode	1.500 GHz
R/Q (R_{sh}/Q_0)	68.0 Ω
Unloaded Q (Q_0)	31400
Shunt impedance ($R_{sh} = V_c^2/P_c$)	2.14 M Ω
Harmonic RF voltage (V_c)	155.4 kV/cavity
Wall-loss power (P_c)	11.3 kW/cavity
Max. wall-loss density	11.0 W/cm ²
Max. electric field	6.7 MV/m

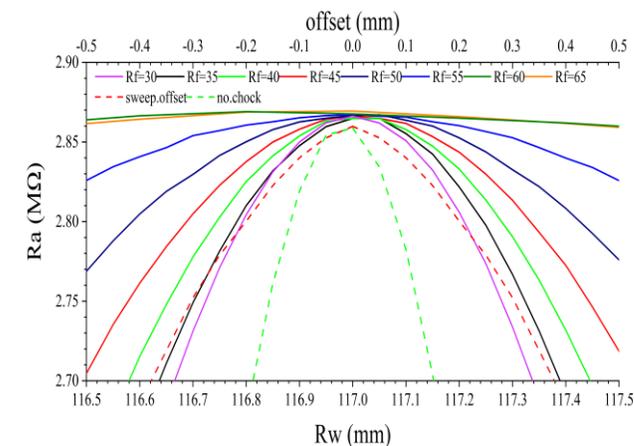
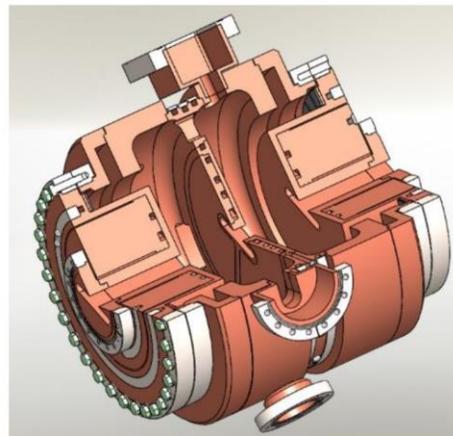
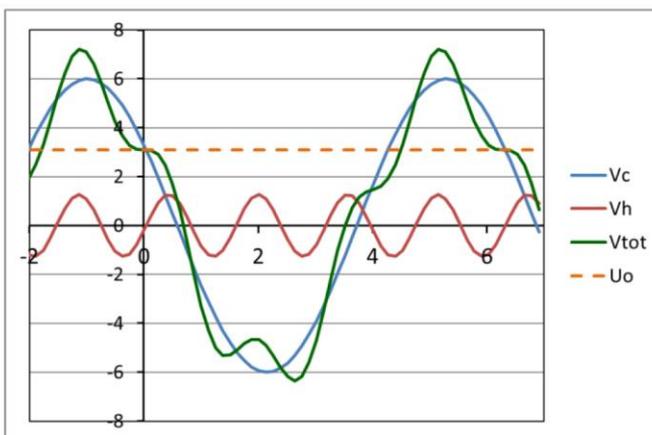
1. 初步设计了一套1.5GHz TM020模式谐波阻尼腔；
2. 通过铝材料加工原型腔，初步完成腔型验证。

1. T. Yamaguchi†, D. o. A. S., The Graduate University for Advanced Studies (2021). "OPTIMIZATION OF THE PARASITIC-MODE DAMPING ON THE 1.5 GHz TM020-TYPE HARMONIC CAVITY."

2. T. Yamaguchi†, et al., IPAC2023 WEPA132 (2023). "BASIC HIGH-POWER DESIGN OF A 1.5-GHz TM020-TYPE HARMONIC CAVITY FOR THE KEK FUTURE LIGHT SOURCE."

Harmonic RF project for ESRF-EBS

Lee Carver, Alessandro D'Elia, Jörn Jacob, Vincent Serrière, Simon White

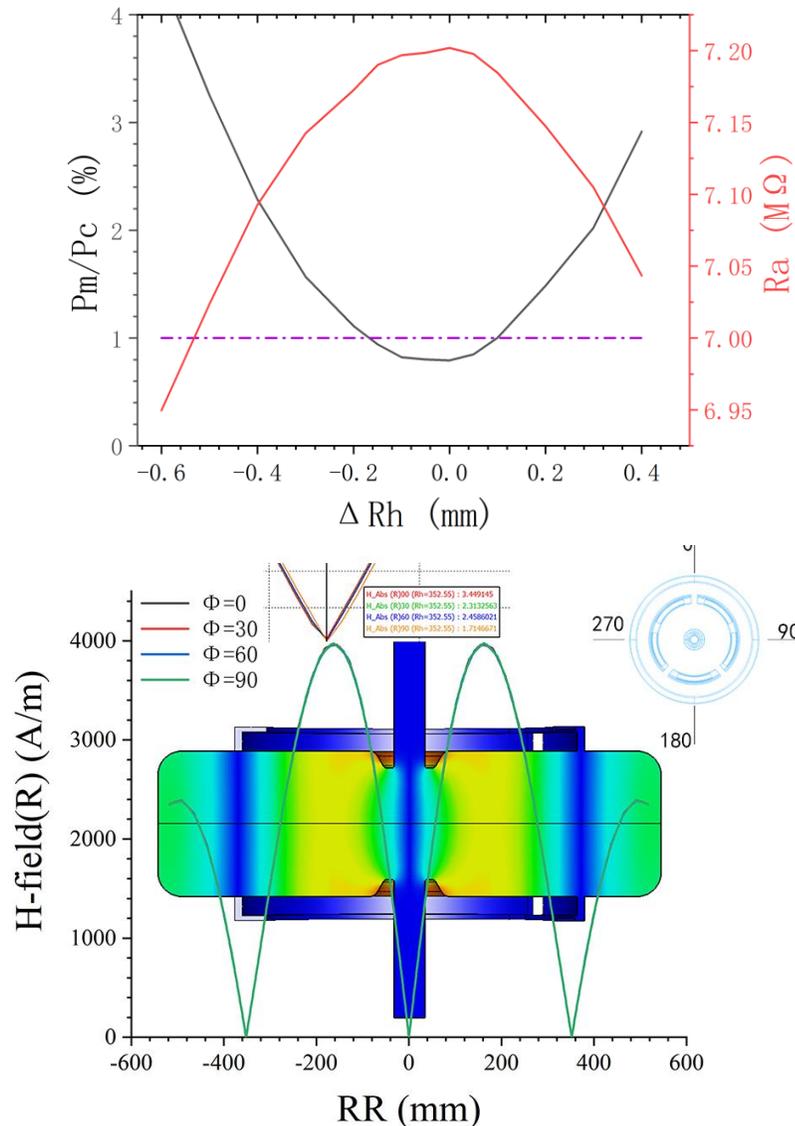


Active NC cavity design well advanced:

- ✓ 2 coupled and 2 uncoupled cells considered
- ✓ Freq = 1.409 GHz
- ✓ R/Q = 44.5 ohm/cell
- ✓ Q0 = 30500
- ✓ Smart HOM & LOM dampers almost not affecting Q0 of E020 mode
- ✓ Elaborate water cooling
- ✓ Aperture coupler: coupling $\beta = 1$
- ✓ Vacuum ports on HOM dampers also preserving Q0

1. 考虑到TM020模式对耦合槽位置的敏感度，EBS项目采用带阻滤波结构缓解电磁场泄露。
2. 利用传输线1/4波长短路原理，在阻尼器上安置1/4波长结构可以有效保护工作模式，即增大对位置参数 R_w 的容忍度。但引入带阻结构也对高阶模阻尼带来较大的负面作用。

存在的问题



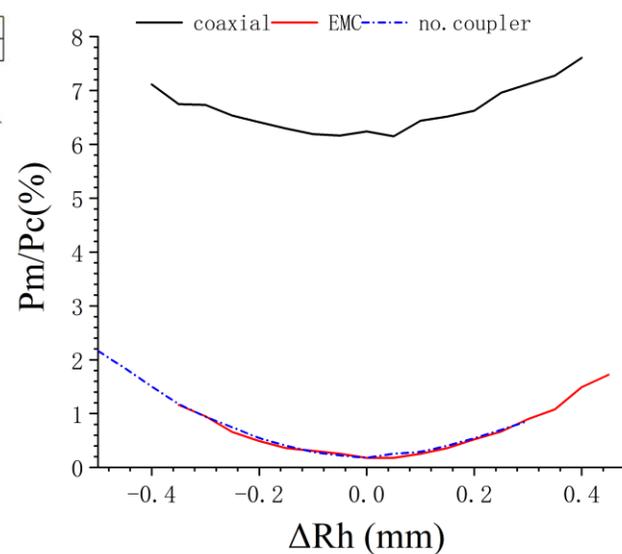
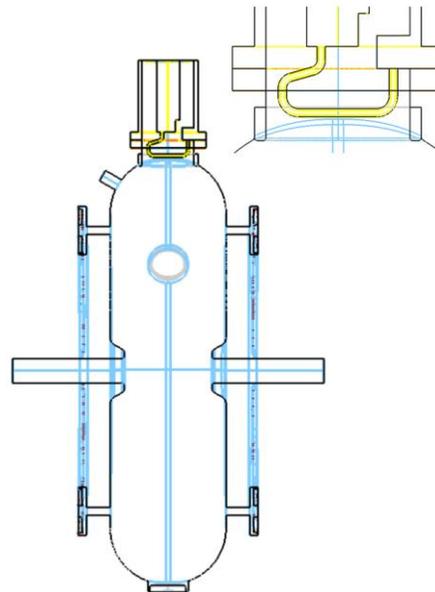
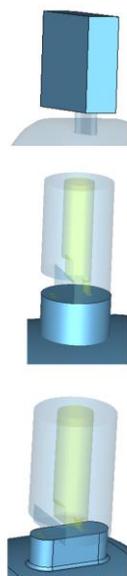
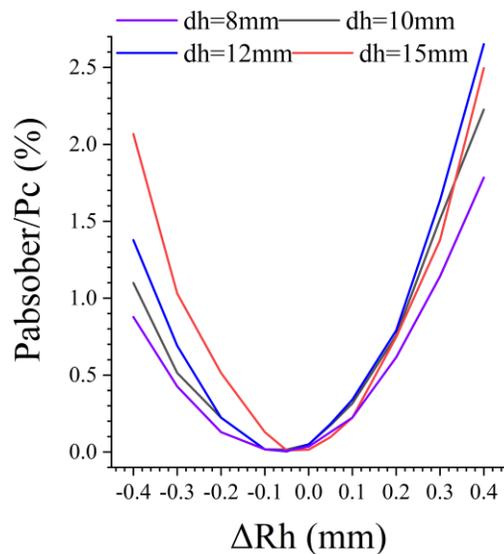
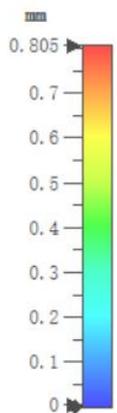
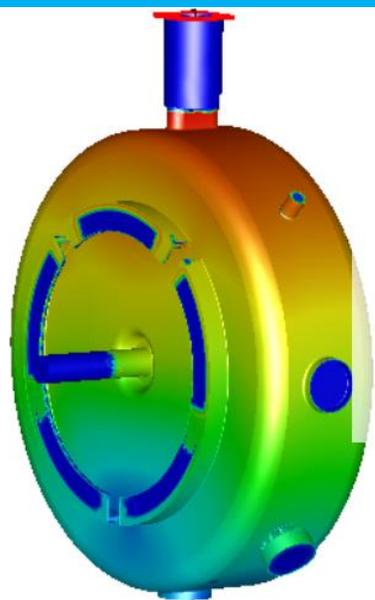
TM020模式阻尼腔的核心：利用TM020模式特有的电磁场分布，在磁场径向波节点处安置耦合槽可以实现有害模式的深度阻尼和工作模式的保护。但对于工作模式的保护，存在以下风险：

1. 波节点附近磁场变化率大，微小的**耦合槽位置偏移**便会引起大的电磁场泄漏；
2. 工作模式保护，依赖TM020模式电磁场分布的**旋转对称性**。耦合器、调谐器的引入会导致对称性破坏，进而引发电磁场泄露。

3. TM₀₂₀模式阻尼腔研究进展

——重庆光源

电磁场泄漏问题处理

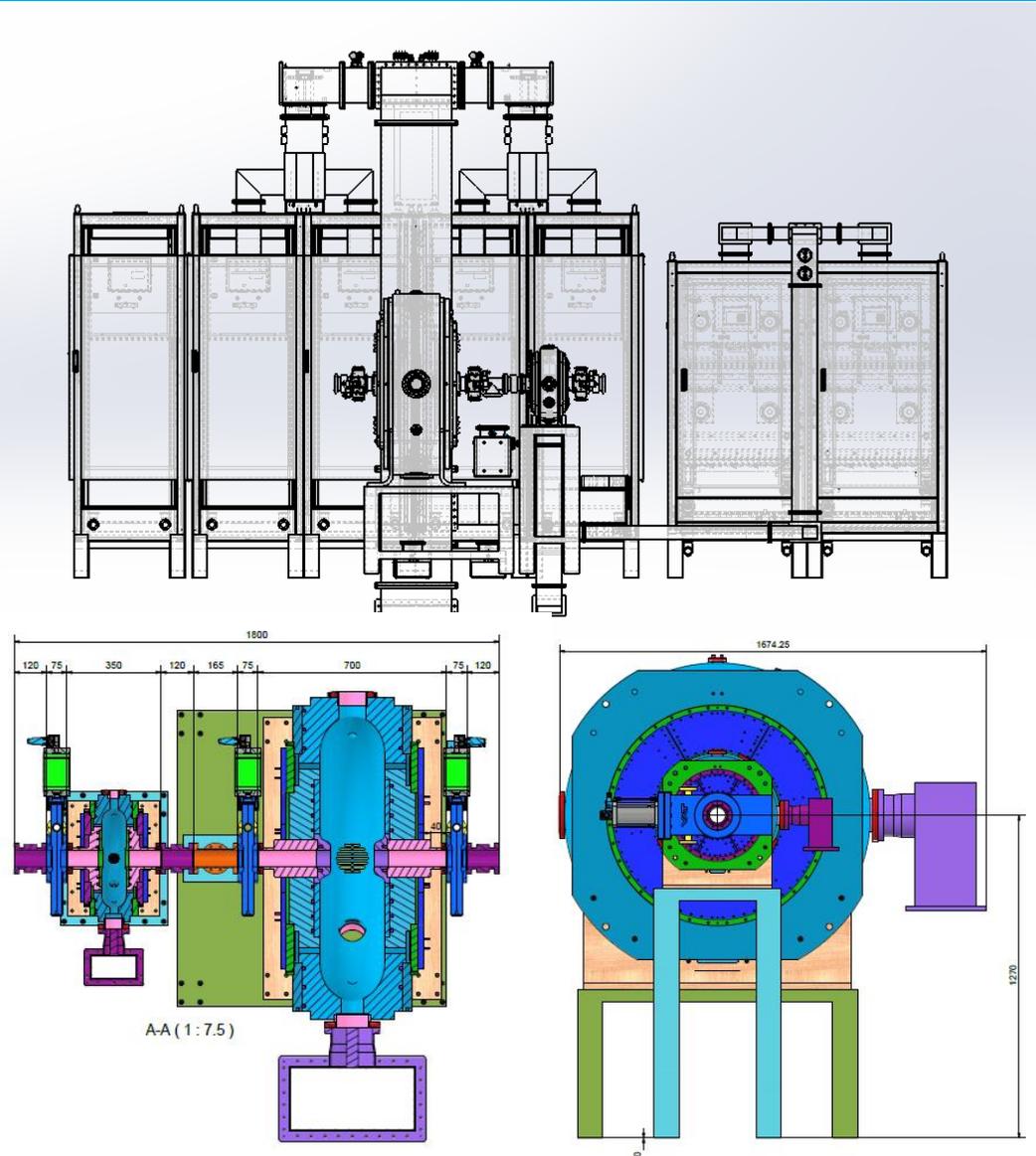


针对耦合槽偏移等问题，可以通过一体加工方案以缓解机械加工误差，并确保其偏移量 $< \pm 1.5/0.5\text{mm}$ (腔体直径1060/370mm)

针对耦合器等引起的电磁场泄漏，主要方式有：缩小耦合器孔径、方波导转同轴、电磁补偿等。

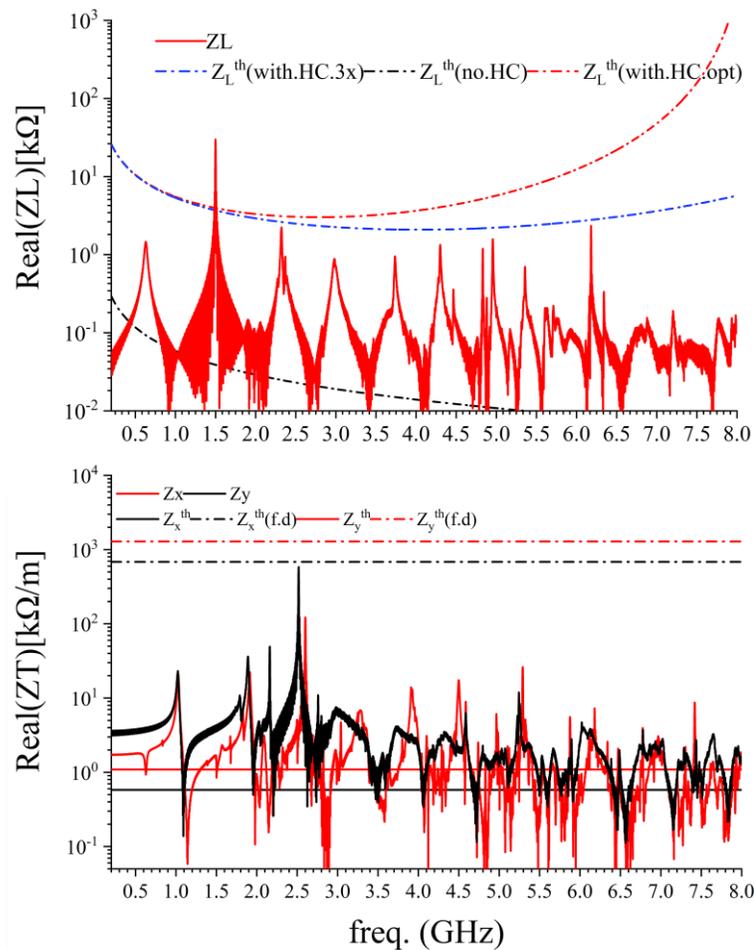
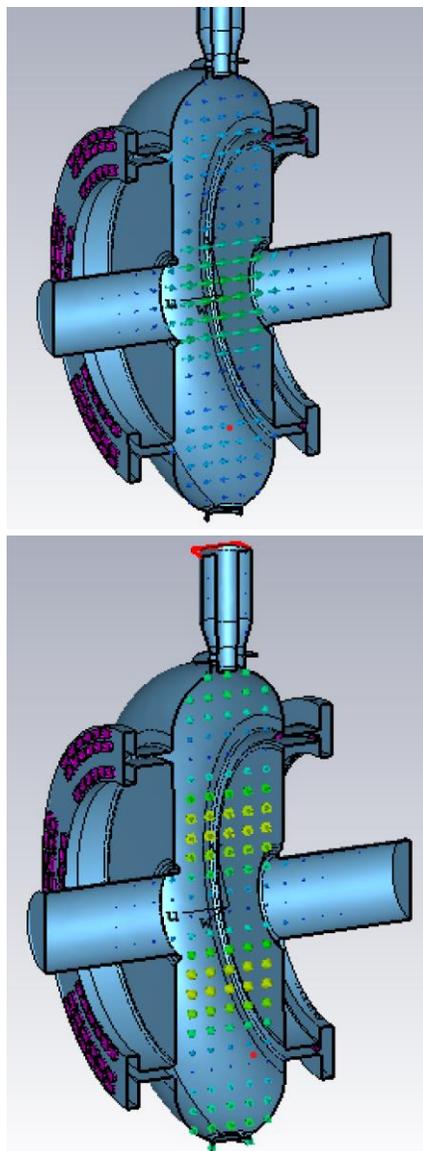
1. Li Zhongquan, et al. 'Electromagnetic field compensation to attenuate energy leakage in TM020 mode damped cavity'
2. Hao Xuerui, et al. 'High-fidelity TM020 Mode HOM-damped accelerating cavity: Overcoming electromagnetic field leakage to increase operating voltage tolerance'

500MHz 主频腔/1.5GHz谐波腔



- 500MHz TM020模式阻尼腔运行腔压0.6MV;
- 500MHz腔体直径~1060mm, 长度700mm;
- 1.5GHz谐波腔运行腔压0.2MV;
- 1.5GHz腔体直径~370mm, 长度~350mm。

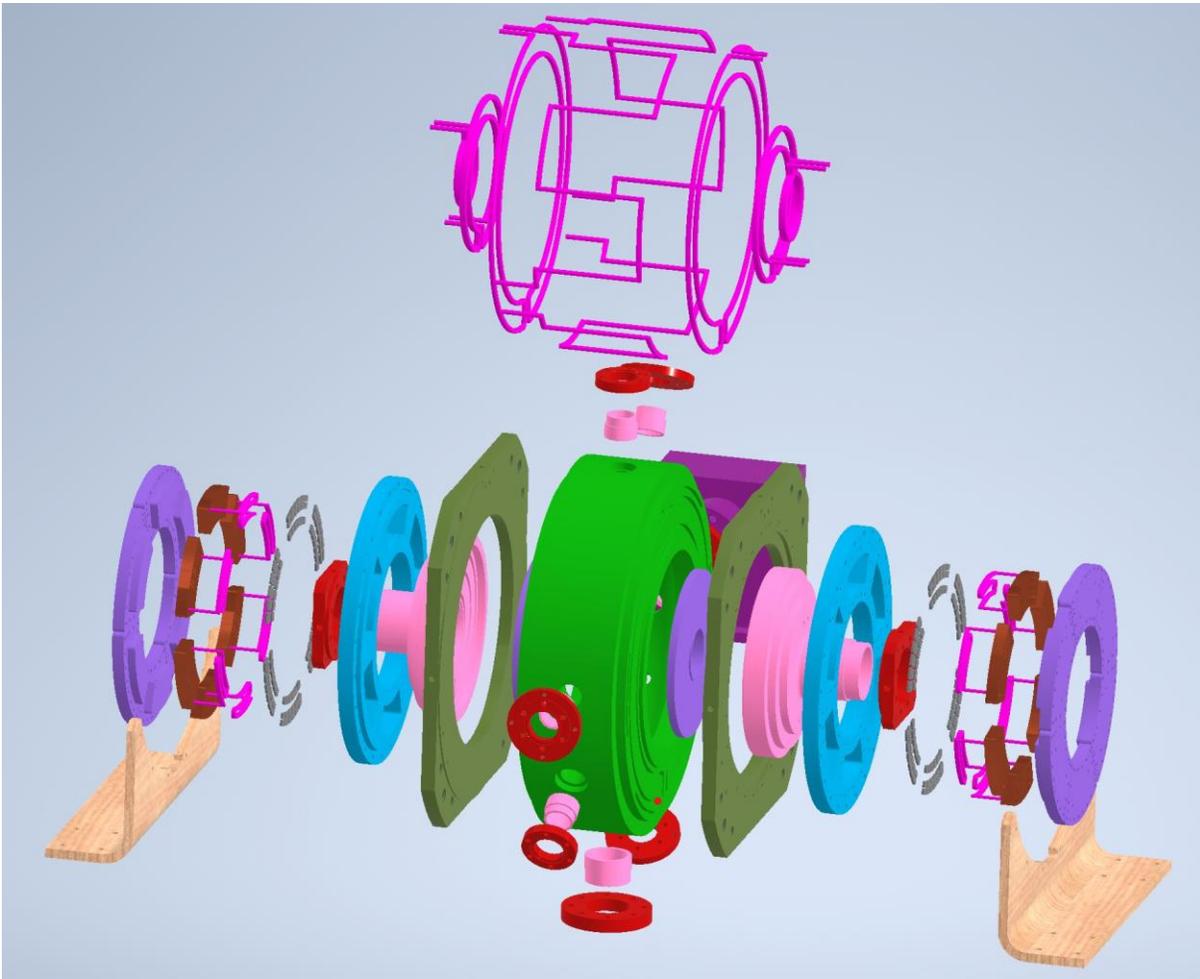
1.5GHz TM020模式阻尼腔 rf parameters



freq. [MHz]	R/Q [Ω]	Q0 [10 ⁴]	Ra [MΩ]	Pc/Pm [%]	kt [V/pC]	k0 [V/pC]
1499.8	55.65	3.60	2.00	1.53	1.15	0.17

1. 综合考虑耦合器、调谐器等条件下，TM020模式阻尼腔电磁场泄漏 < 1.5%；
2. 高阶模和低阶模得到有效阻尼，且低于对应阻抗阈值；
3. 在腔压~0.2MV(I0=1A,q=2nC)下运行时，腔体表面功率损耗~20kW，其他模式损耗~2kW。

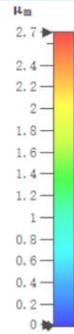
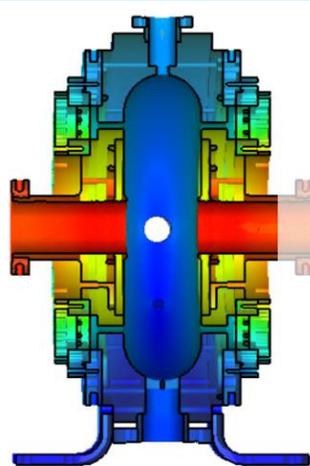
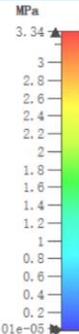
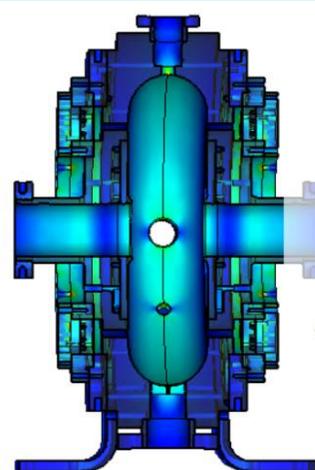
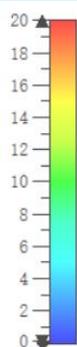
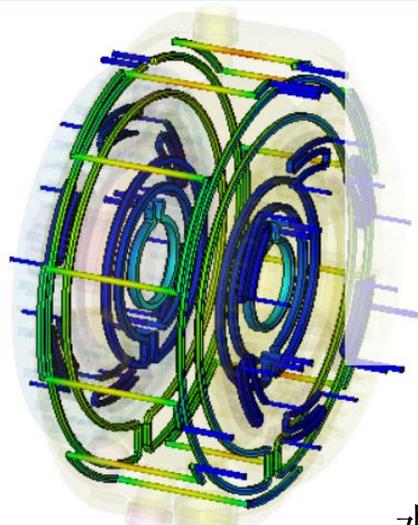
机械设计



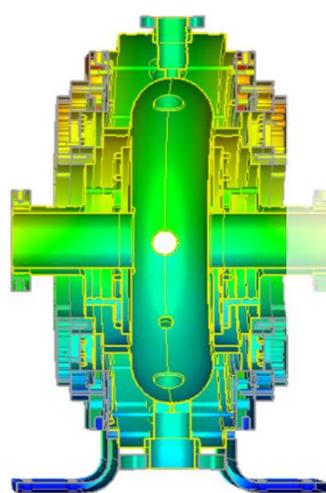
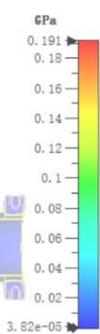
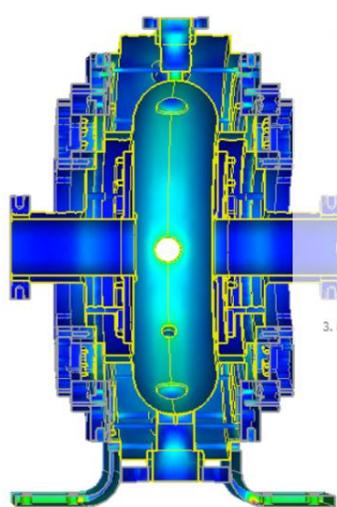
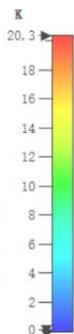
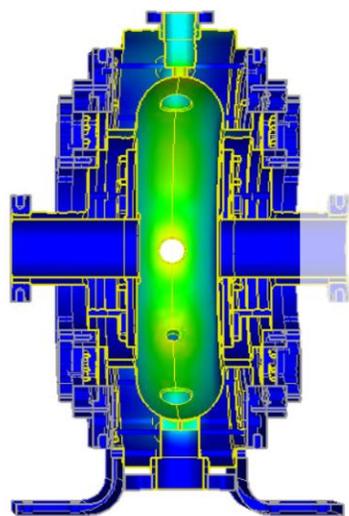
◆ 结构组成

- 腔体：圆柱1个，端盖2个；微波面材料选用C10100无氧铜
- 高次模吸收器：1套，每套包括6个高次模抑制器法兰
- 输入耦合器：1个，CW 100kW
- 调谐器器：3个，移动范围涵盖：0-10毫米，调谐精度5微米
- 信号拾取器：2个，SMA或N型接头
- 冷却水路布置：
 - 外圆柱：1+2
 - 端板：1+1
 - 鼻锥：1+1
 - 高次模抑制器：6+6

水冷系统设计及热应力分析



水管温度分布、真空应力和变形



腔体温度分布、热和真空应力和变形

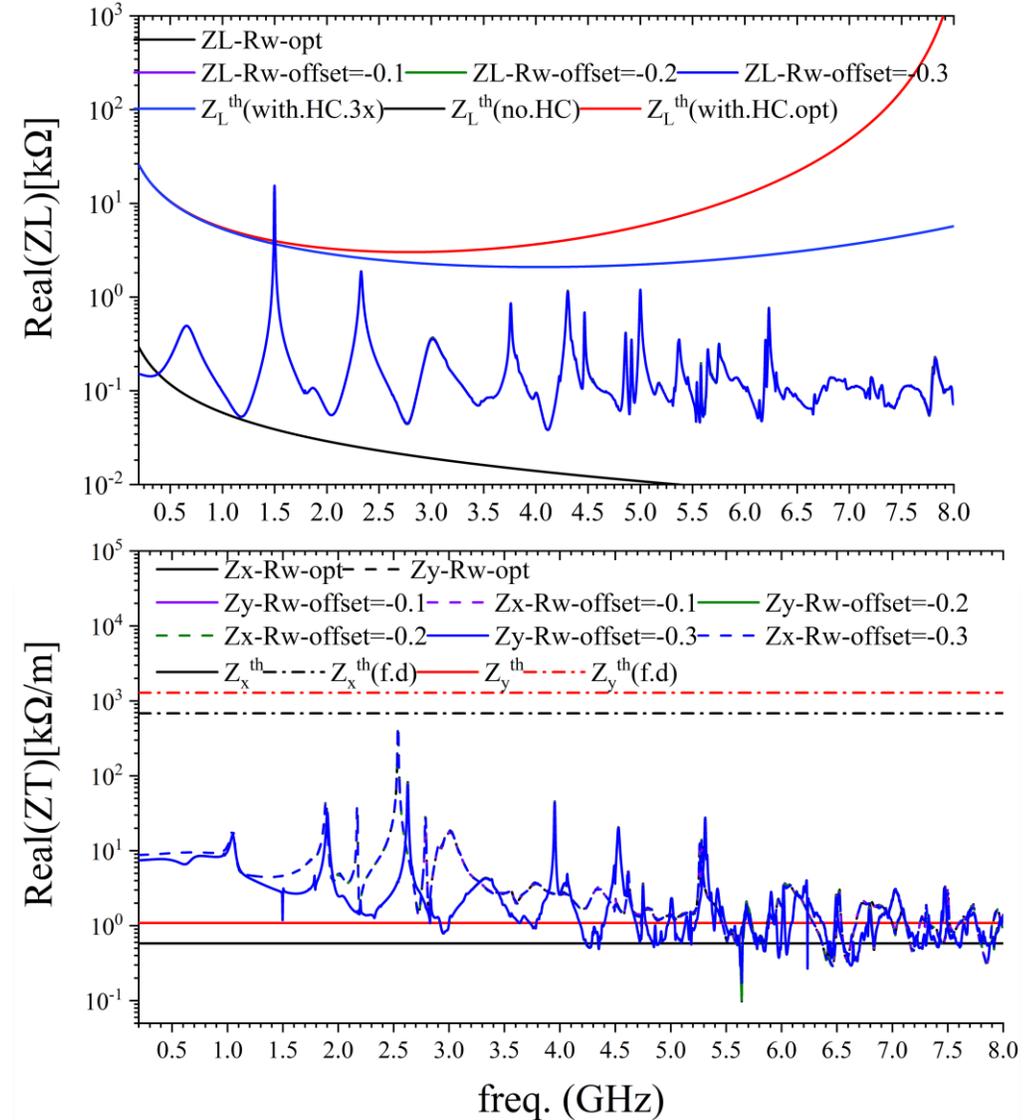
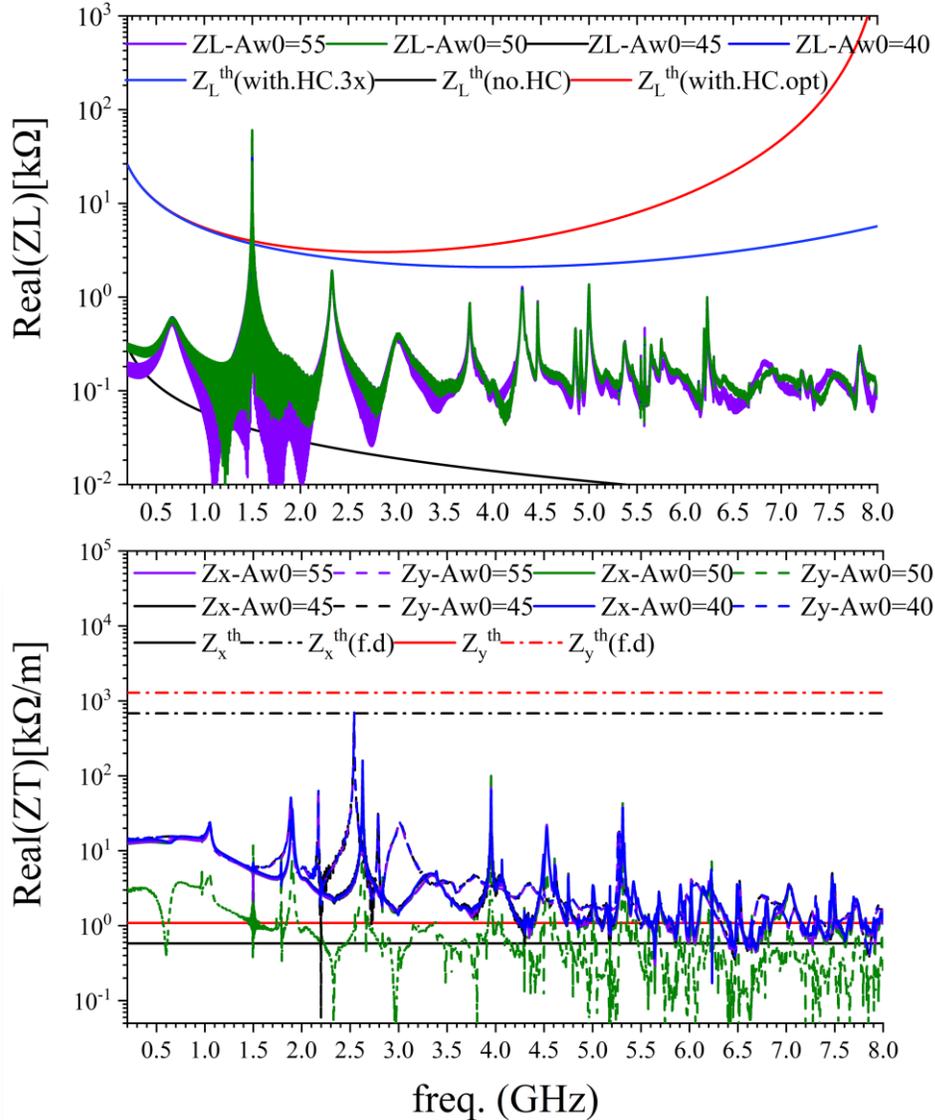
馈入功率22kW，腔体支撑架底部固定条件下：

1. 水冷管道最大温升 $< 20\text{K}$;
2. 腔体最大温升 $< 20.3\text{K}$;
3. 最大真空应力3.34Mpa，最大形变量小于 $2.7\mu\text{m}$;
4. 考虑热应力后，最大型变量 $< 0.1\text{mm}$

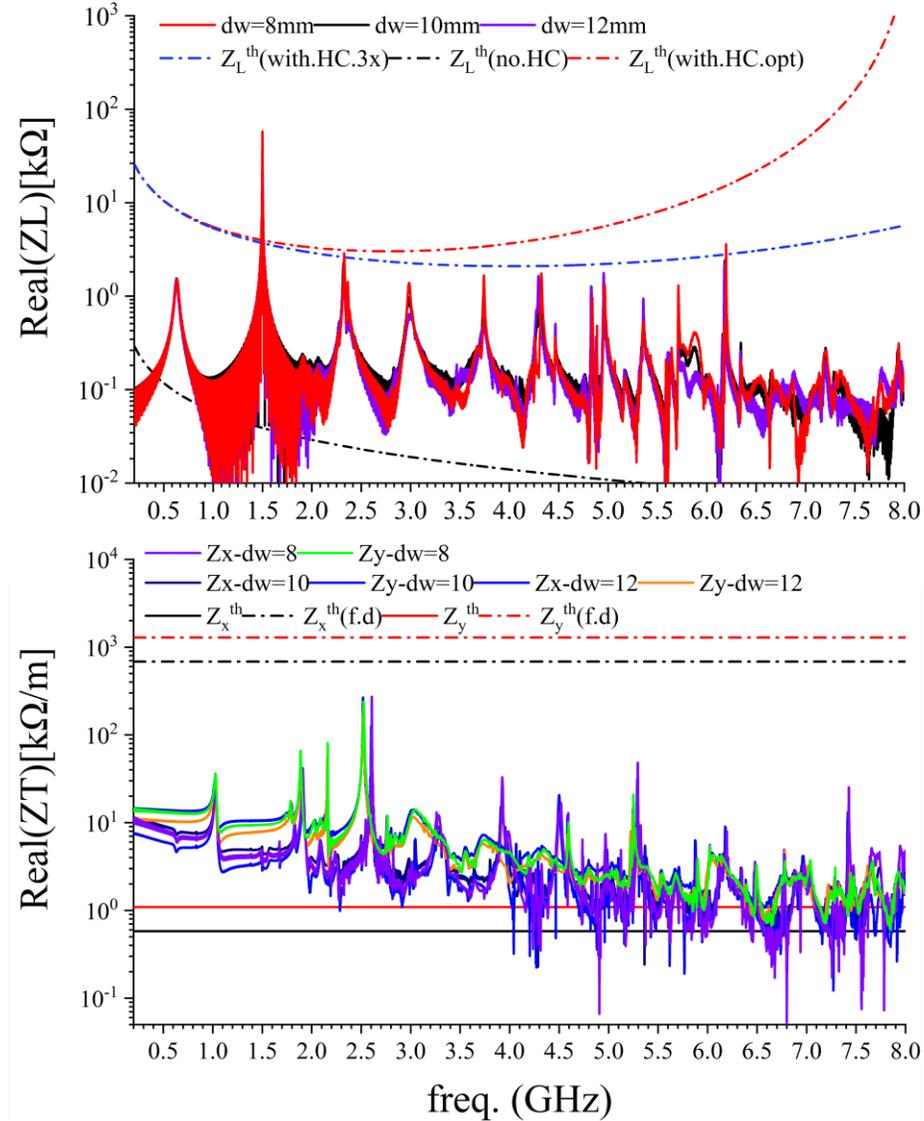
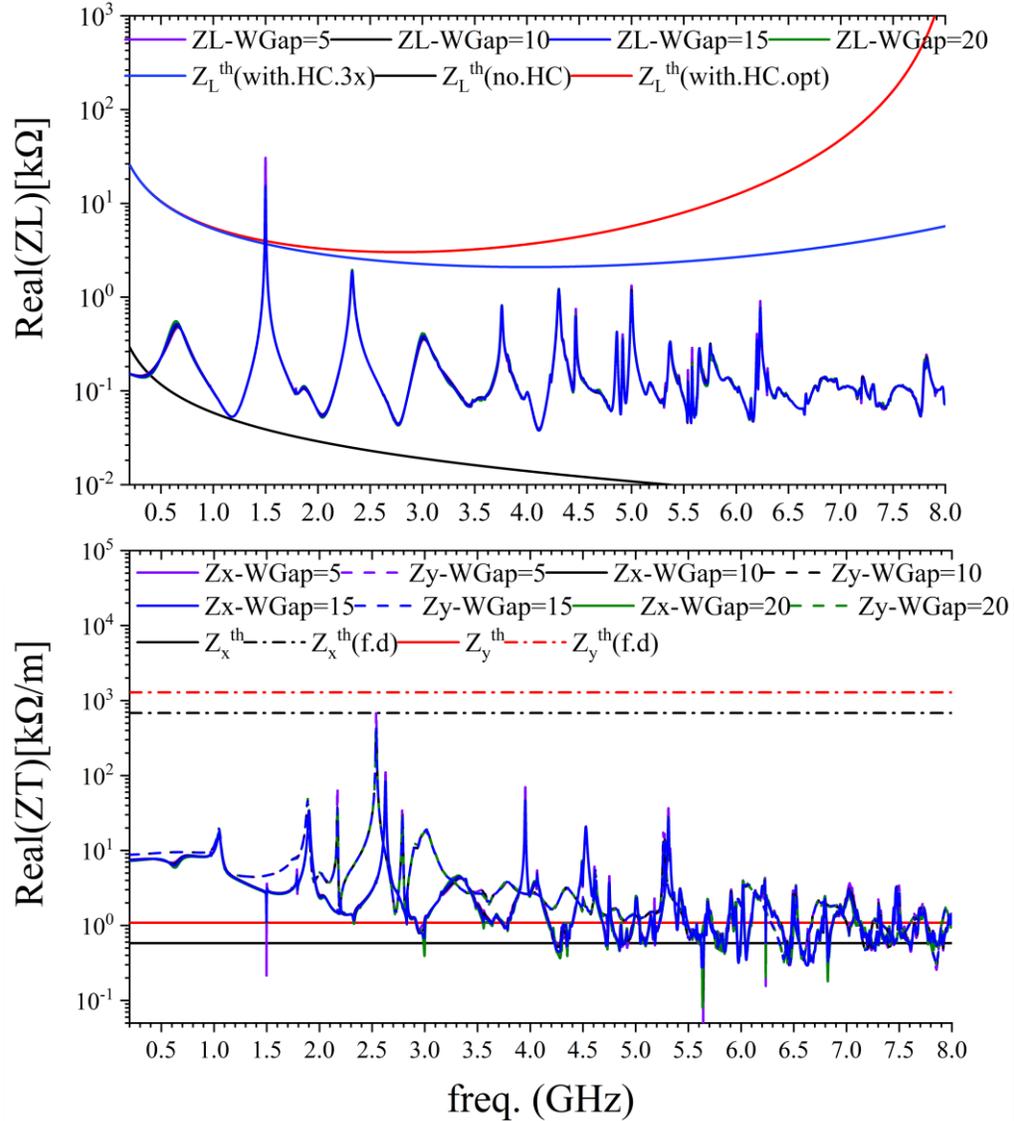
小结

- 项目组完成了500MHz TM020模式基频腔/1.5GHz TM020模式谐波腔方案设计。开展机械设计及相应高次模吸收器、耦合器、和调谐器的结构设计以及加工；
- 设计方案有效降低了耦合槽偏移和耦合器导致的电磁场泄漏问题；
- 下一步完成加工，展开高功率测试。

1. 5GHz谐波系统 (TM020) - opt. Aw0 and opt. Rw



1. 5GHz谐波系统 (TM020) - opt. WGap and opt. dw



1. 5GHz谐波系统 (TM020)

