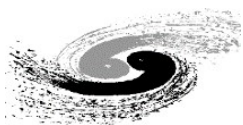




C3 progress and next steps

张敬如 孟才 杨啸辰 李敏贤 施华 李煜辉 王海静

2022.9.21



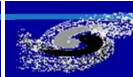
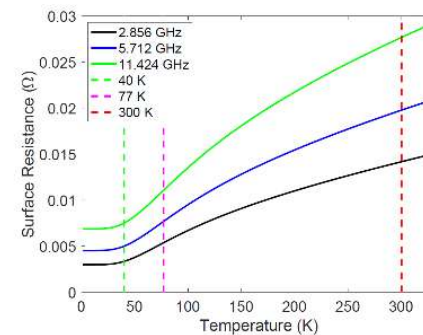
主要内容

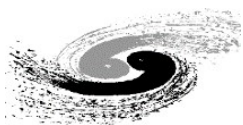
- 一．低温铜加速结构在CEPC中应用的初步可行性分析(孟才)
- 二．现有测试台条件
- 三．腔体设计
- 四．材料、加工及报价
- 五．下一步计划



背景介绍

- 高加速梯度运行是加速结构研究的前沿
 - 对于大科学装置，降低造价，如高能对撞机、FEL等
 - 对于功能性装置，节省空间，设备小型化，功能多样化，如医用加速器等
- 高加速梯度运行的一个限制因素是RF breakdown，通常的方法是加速结构采用更硬的材料，另外一个方法是低温运行
 - 低温运行一个优势是减小了表面电阻，因而提高了Q值和分路阻抗，进而提高了RF功率到束流功率的转换效率，提高了加速梯度和**束流负载的能力**
 - 低温运行的第二个优势是提高了材料的硬度，进而减小了表面变形和打火次数





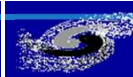
背景介绍

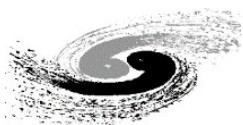
➤ 低温加速结构研究

- 1985年, S-band加速结构 (3GHz) 在低温77K测试, Q值增加因子2.7
- 1993年, X-band加速结构 (9.35GHz) 在低温77K测试, Q值增加因子2.5, 50MV/m
- 2016年, C-band加速结构 (5.712GHz) 在低温20K测试, 经过大功率测试, 梯度30.9MV/m@1 μ s
- 2017年, X-band加速结构 (11.424GHz) 在低温45K测试, 单cell, 验证了打火率的大幅下降, 使得加速梯度可以达到250MV/m, 对RF gun具有重要意义; 同时发现梯度大于150MV/m时, Q值有下降
- 2020年, X-band分布式耦合加速结构 (11.424GHz), 20cell, 常温下束流测试加速梯度140MV/m
- 2021年, X-band加速结构 (11.424GHz) 在低温77K测试, 20cell, Q值增加因子2.25, 经过束流测试, 加速梯度可达到150MV/m, 打火概率下降2个量级

➤ 2021年, 美国提出的CCC (Cool Copper Collider) 概念提出, 使得低温加速结构引起更广泛的关注

- 2021年12月22日, 高杰老师在CEPC DAY上做了《Introduction of C3-Cool Copper Collider to Multi-TeV and Key Technology Development》报告





CCA应用

CEPC

➤ 低温加速结构优势及劣势

· 优势

- ✓ 分路阻抗高，加速梯度高
- ✓ 分路阻抗高，束流负载能力强，特别适合于长束流脉冲、高束流负载情况，如FEL、对撞机
- ✓ 梯度受限于功率，只要功率高，梯度就可以增加；常温加速结构梯度目前基本达到上限

· 劣势

- ✓ 建场时间长，在强束流负载情况下，可降低此劣势
- ✓ 脉冲压缩器？

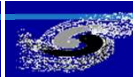
➤ CEPC参数要求

· 电荷量1.5nC

· 单束团模式/双束团模式

- ✓ 脉冲压缩器以提高峰值入腔功率

Parameter	Symbol	Unit	Baseline
e^-/e^+ beam energy	E_{e^-}/E_{e^+}	GeV	30
Repetition rate	f_{rep}	Hz	100
e^-/e^+ bunch population	N_{e^-}/N_{e^+}	$\times 10^{10}$	0.94(1.88)
		nC	1.5 (3)
Energy spread (e^-/e^+)	σ_E		1.5×10^{-3}
Emittance (e^-/e^+)	ε_r	nm	6.5



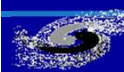
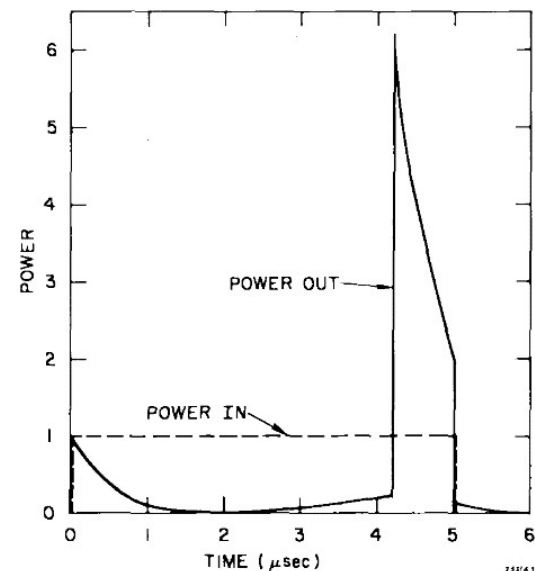
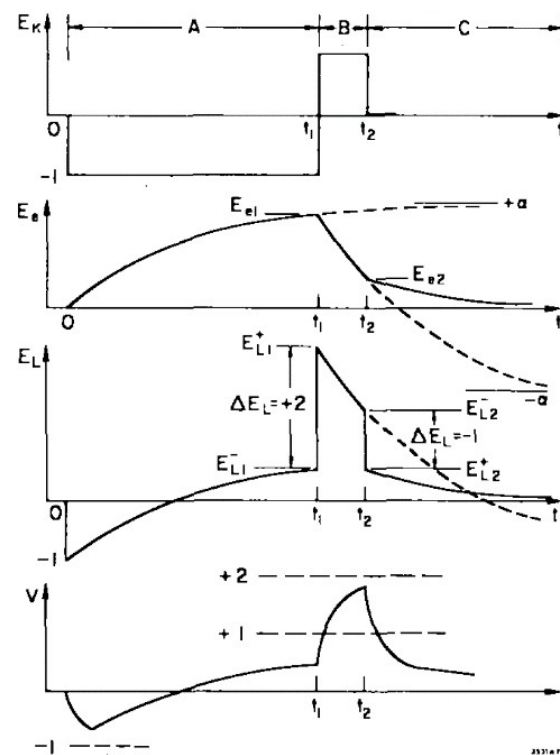
脉冲压缩器

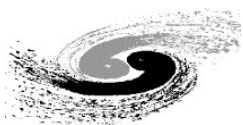
➤ 脉冲压缩器

- 可以将长RF脉冲压缩为短RF脉冲
- 以提供峰值的功率，从而馈入更高的功率进入加速结构中，进而提高加速梯度
- 通常加速梯度提升因子可达到1.6左右

➤ CEPC

- 束团结构为每脉冲1个束团，因而均采用了脉冲压缩器
- 对于高亮度Z模式，每脉冲2个束团，需要研发平顶型脉冲压缩器





直线加速器束团结构的影响



每脉冲1个束团:

- 可以采用脉冲压缩器, 提高瞬时峰值功率, 以提高加速梯度
- 举例: BEPCII、CEPC



每脉冲2个束团, 束团间隔相对于填充时间较短:

- 可以采用脉冲压缩器, 提高瞬时峰值功率, 以提高加速梯度
- 举例: KEKB



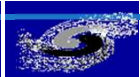
每脉冲2个束团, 束团间隔相对于填充时间较长:

- 需要采用**平顶型脉冲压缩器 (待研发)**, 提高峰值功率, 以提高加速梯度
- 举例: CEPC Z模式



每脉冲多个束团, 束流负载强:

- 不能采用脉冲压缩器
- 举例: 自由电子激光、对撞机



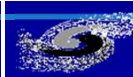


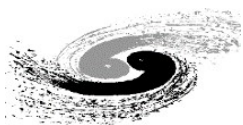
CCA应用

CEPC

Structure	Pulse compressor	RF frequency	Radius	Mode	Tube Length	Numbers of Cells	ACC. Gradient	Numbers of ACC.STR. Driven by one 80MW klystron	Energy gain per klystron	One 30GeV Linac Maximum energy gain	
		MHz	mm		m		MV/m		MeV	Numbers of klystron	Acc. Str. length(m)
S-band ACC. str.	Yes	2860	11.0	1/3	3.10	85	22	4	261	115	1426
C-band ACC. str.	Yes	5720	7.24	3/8	1.80	89	45	4	315	96	691
C-band ACC. str.	No	5720	7.24	3/8	1.80	89	27	4	189	159	1144
CCA-LA	No	5720	5.24	1/2	1.05	40	80	2	168	179	375
CCA-LA	Yes	5720	5.24	1/2	1.05	40	120	2	252	120	252
CCA-SA	No	5720	2.62	1/2	1.05	40	90	2	189	159	333
CCA-SA	Yes	5720	2.62	1/2	1.05	40	135	2	283	106	222

- 常温加速结构，得益于脉冲压缩技术的使用以及加速结构长度长，每根速调管能量增益高
 - 目前CEPC设计中采用的加速梯度已经是非常高的值了（超过目前运行的梯度）
- 低温加速结构，由于填充时间长，脉冲压缩器难以使用，另外加速结构短，虽然加速梯度高，但是每根速调管的能量增益不高
 - 即使采用脉冲压缩器，每根速调管的能量增益仍比常温加速结构低，即使用的速调管数量会更多
 - 加速器的长度/隧道的长度，会缩短



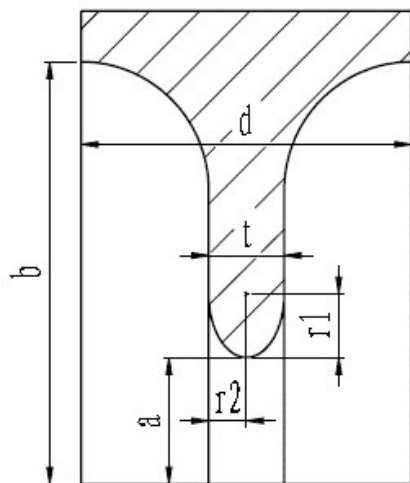


CCA应用

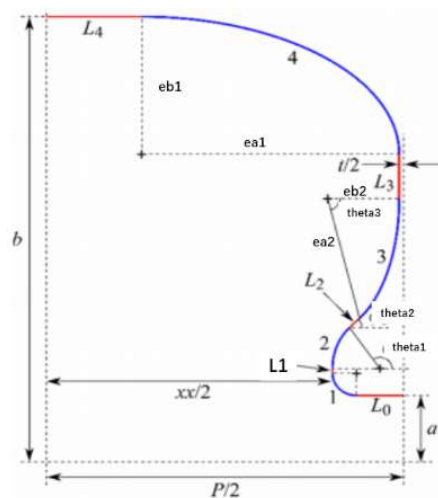
CEPC

物理角度

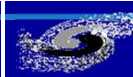
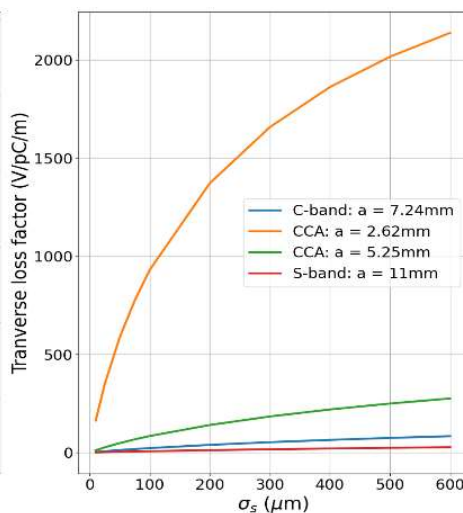
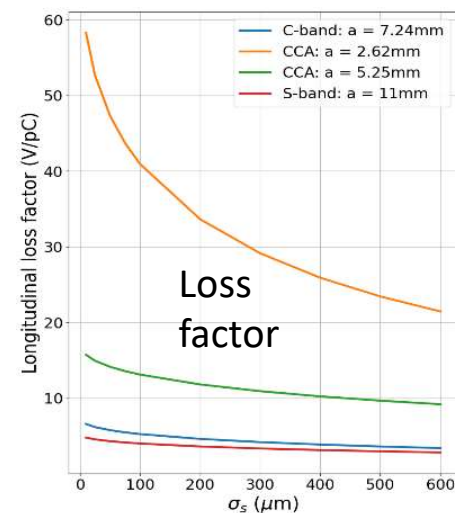
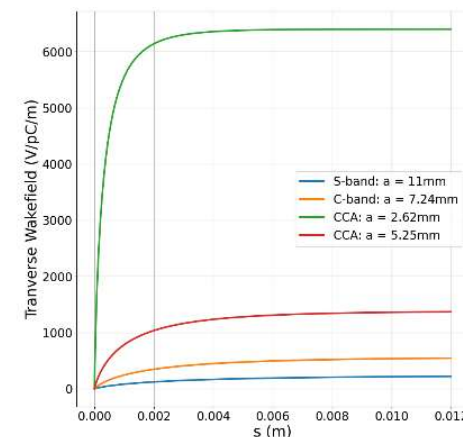
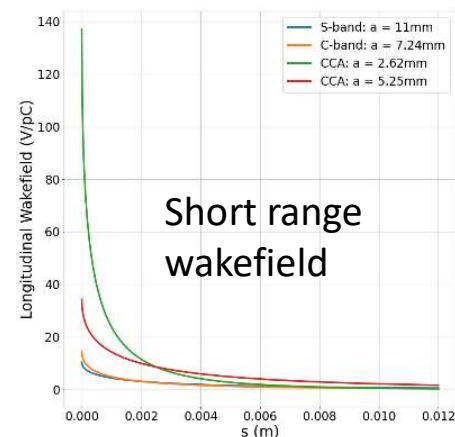
- 低温加速结构，由于孔径小，尾场效应强
- 为了抑制横向尾场，减小发射度增长，希望束长短
- 为了降低纵向尾场效应，减小能散，希望束长长

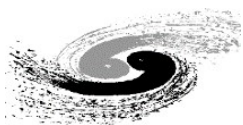


C-band Acc. Str.



CCA





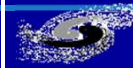
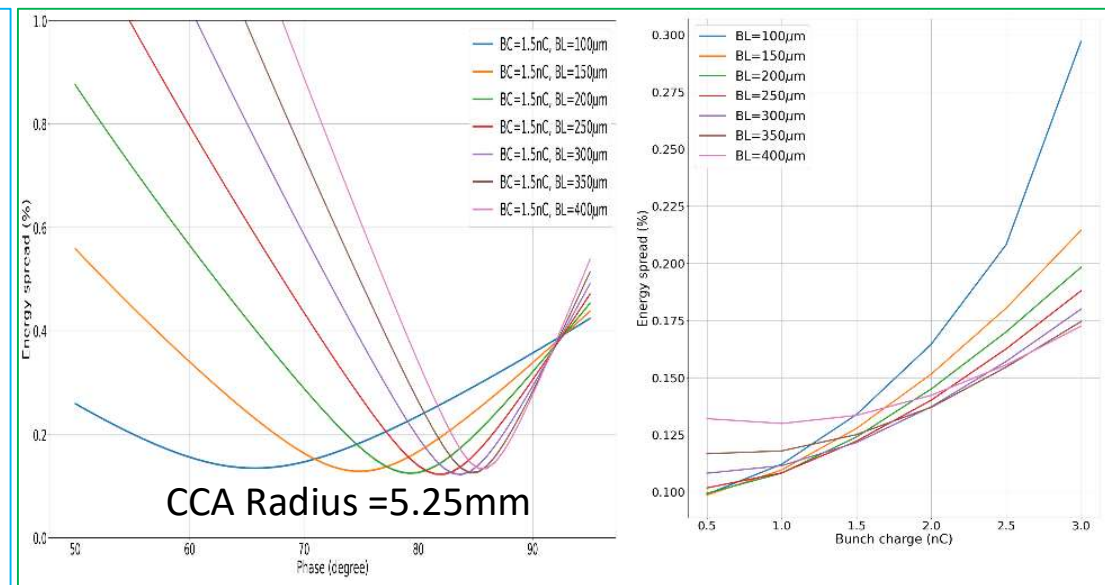
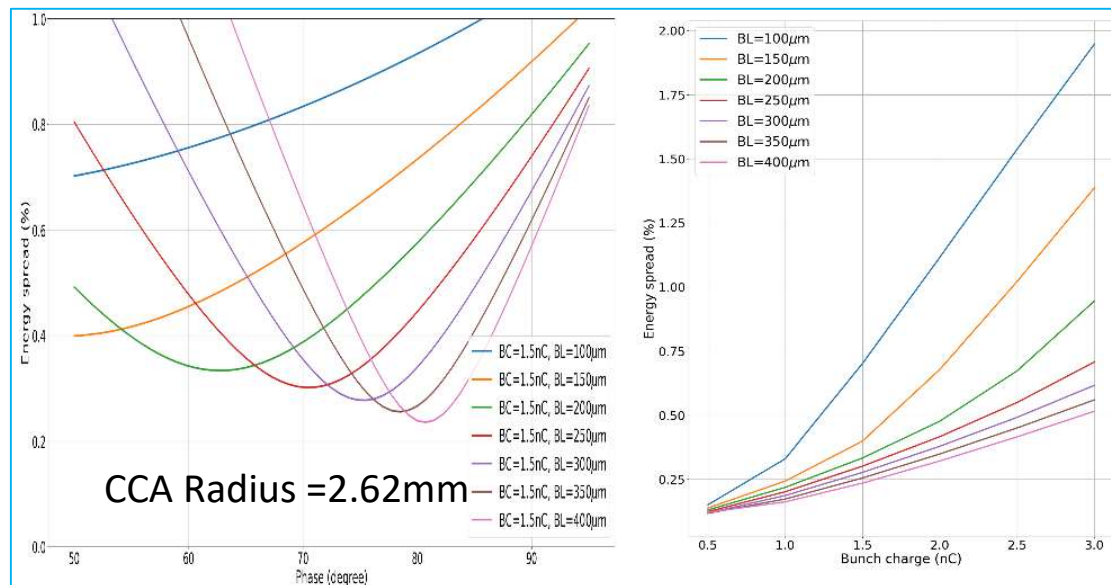
CCA应用

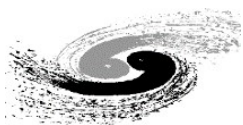
CEPC

物理角度（无脉冲压缩器方案）

纵向动力学

- ✓ 小孔径情况，考虑能量增益，建议束长大于 $300\mu\text{m}$ ，在 1.5nC 情况下能散为 0.3% ，能散超出要求
- ✓ **大孔径情况**，考虑能量增益，建议束长大于 $150\mu\text{m}$ ，在 1.5nC 情况下能散效应 0.15% ，**能散满足要求**





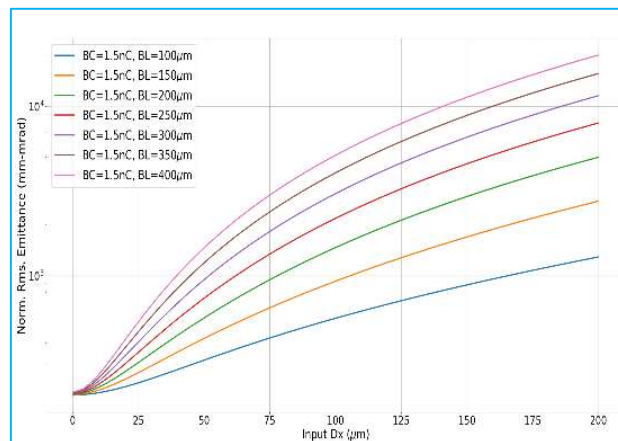
CCA应用

CEPC

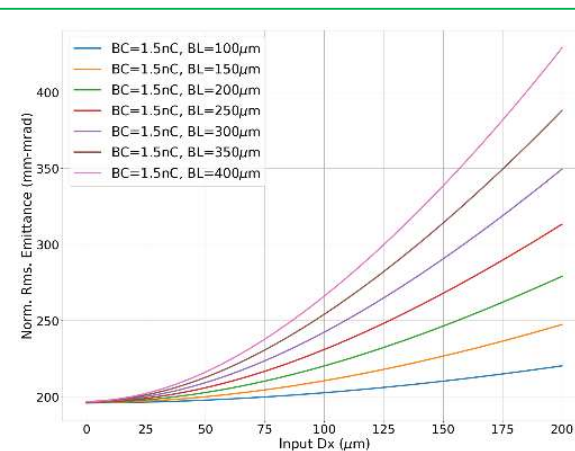
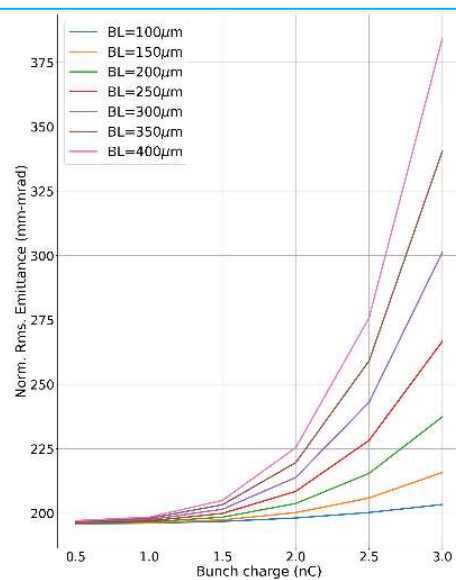
物理角度（无脉冲压缩器方案）

· 横向动力学

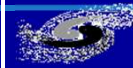
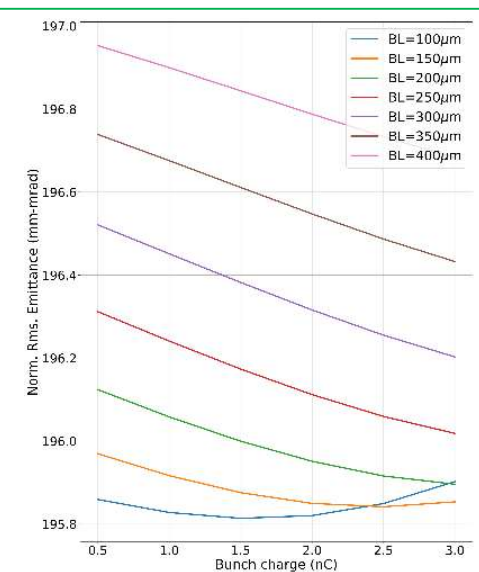
- ✓ 根据结果分析可知，小孔径情况下由于横向尾场太强，对束流轨道要求非常高（元件准直要求高），建议束长不超过150 μm ，此时能散会更大
- ✓ 大孔径情况，横向尾场效应在可接受范围

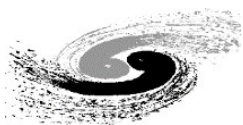


CCA Radius = 2.62mm



CCA Radius = 5.25mm



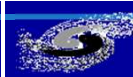
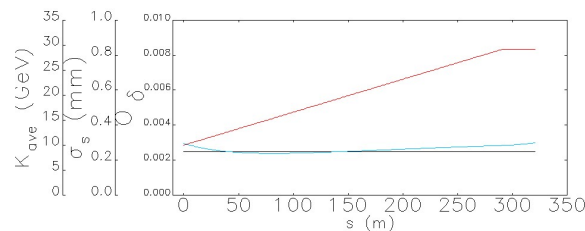
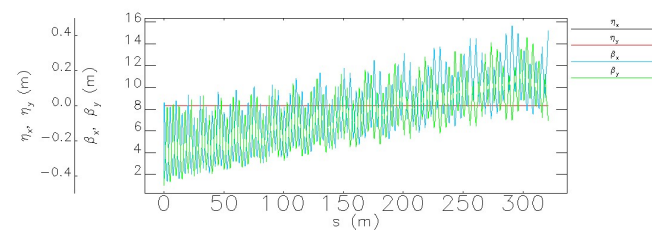


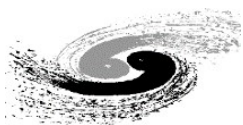
CCA应用

CEPC

- 物理设计及造价（10GeV直线，无脉冲压缩器方案）
 - 放置于连续恒温器中
 - 采用永磁四极铁
 - 采用在线可调支架（准直，及束流校正）
- 采用RF gun和低发射度Damping Ring，低温加速结构可以从1.1GeV开始，替代常温C-band加速结构
 - 要求归一化发射度小于10mm-mard

10GeV Linac	NCA	CCA
ACC.STR	128	116
Klystron	32	58
Quadrupole	24	58
Corrector	32	0
Magnet PS	48	0
BPM	16	58
ICT	8	0
Length(m)	290	145





CCA应用

无脉冲压缩器

➤ 造价高（未考虑隧道建设+运行，不考虑加速结构备份）

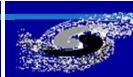
· 每10GeV，造价高2.34亿元，相比常温加速结构增长63%

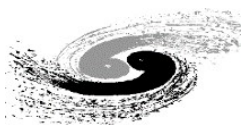
	System(ten thousand)	NC	CCA
1	RF system	10573	10822
2	RF power source	13136	23354
3	Magnets	176	598
4	Magnet power supplies	112	0
5	Vacuum system	12411	12126
6	Instrumentation	561	1025
7	Control system	160	198
8	Mechanical systems	320	3213
9	Cryogenic	0	9534
	Total	37449	60871

10GeV Linac	NCA	CCA
ACC.STR	128	116
Klystron	32	58
Quadrupole	24	58
Corrector	32	0
Magnet PS	48	0
BPM	16	58
ICT	8	0
Length(m)	290	145

Power [MW]		Alternative-10GeV		Comments
		NCA	CCA	
1	RF system	0.090	0.160	
2	RF power source	2.35	3.54	
3	Magnet power supplies	0.17	/	
4	Vacuum system	0.39	0.45	
5	Utilities	0.37	0.00	
6	General services	0.05	0.03	
7	Cryogenic	/	2.9	热损耗0.87，效率0.3
	Total	3.43	7.08	

@Jingru zhang





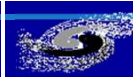
CCA应用

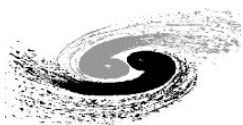
有脉冲压缩器

- 假设脉冲压缩器研发成功，能量倍增因子1.5
- 造价高（未考虑隧道建设+运行，不考虑加速结构备份）
 - 每10GeV，造价高0.96亿元，相比常温加速结构增长25%

	System(ten thousand)	NC	CCA
1	RF system	10573	8360
2	RF power source	13136	18040
3	Magnets	176	462
4	Magnet power supplies	112	0
5	Vacuum system	12411	9367.188
6	Instrumentation	561	792
7	Control system	160	153.3125
8	Mechanical systems	320	2481.875
9	Cryogenic	0	7364.5
	Total	37449	47020.88

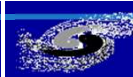
10GeV Linac	NCA	CCA
ACC.STR	128	88
Klystron	32	44
Quadrupole	24	44
Corrector	32	0
Magnet PS	48	0
BPM	16	44
ICT	8	0
Length(m)	290	110

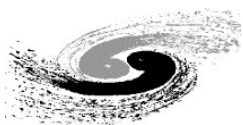




小结

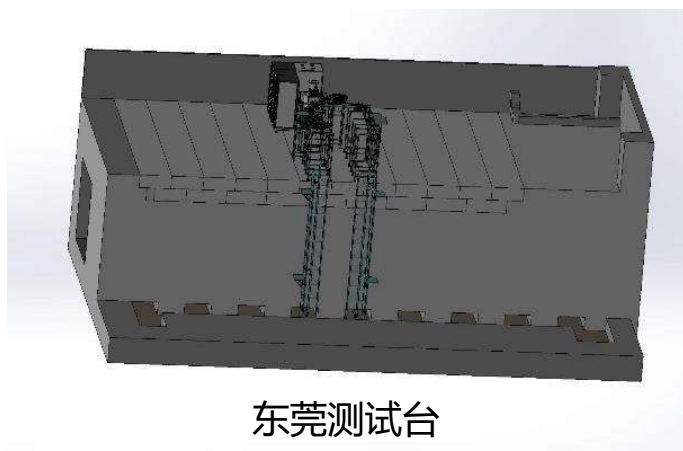
- 从物理角度，低温加速结构具有可行性，采用大孔径的方案（ $r=5.25\text{mm}$ ），具有更好的束流动力学特性；
 - 考虑到小孔径方案的兼容性，硬件设计采用小孔径方案，以验证更高梯度，同时拓展其他应用，另外若小孔径方案可行，大孔径实现相对更容易
- 从造价角度考虑，如果没有脉冲压缩器，造价、运行费均有较大增加；若有脉冲压缩器，造价有一定增加，运行费高
 - 其中造价未考虑隧道造价
- 对于长束流脉冲情况低温加速结构将体现出更大的优势（造价上），具有更好的应用潜力，例如FEL、直线对撞机、工业应用（高效率加速器， eg. SLAC-2018-Design Study Report , L-band分布式耦合加速器）等





现有大功率测试台条件

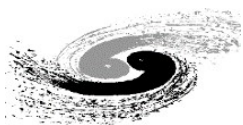
- 东莞分部C波段测试台，暂定2022年12月31日准备好
- 波导的法兰为WR187， hybrid功分器， 负载， 法拉第筒高能所北京承担， 波导（定向耦合器、弯波导、直波导、抽泣波导）、真空、控制及连锁保护）， 液氮东莞分部承担
- 50MW速调管， 入腔功率45MW， 3uS， 50Hz



东莞测试台

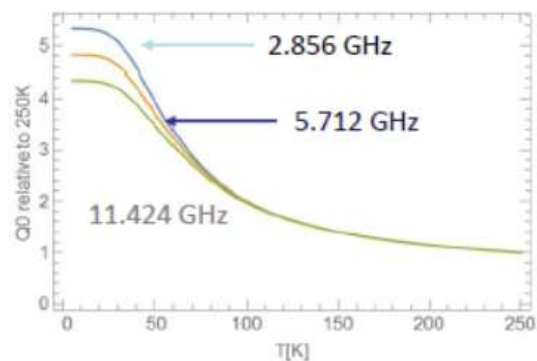
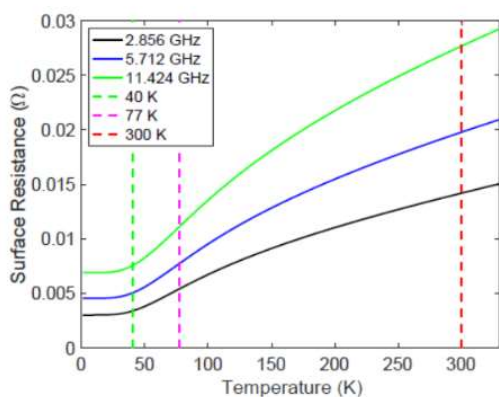


临时模型

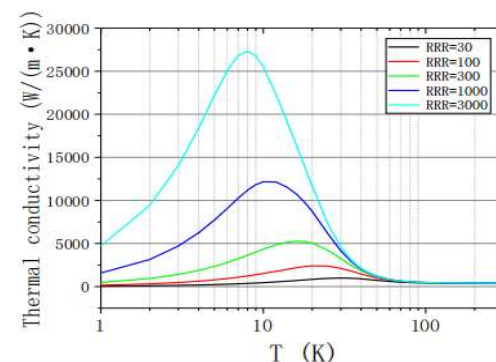


材料在低温下性能的变化

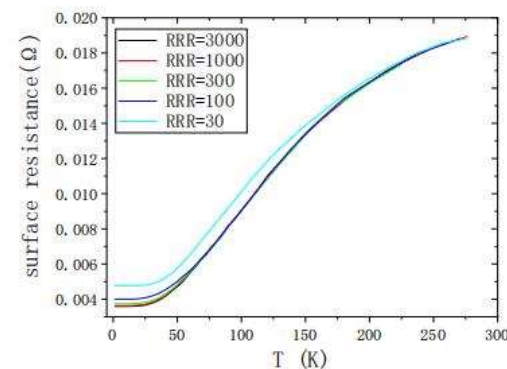
- 铜材料在低温下，由于反趋肤深度效应
 - 表面阻抗和热膨胀系数降低
 - 屈服强度和热传导率升高
- 表面阻抗的降低，使 Q_0 比常温下提升2.55@5712MHz



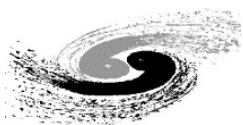
Same numbers as previous graph, normalized to Q_0 at 250K



热传导和3R值的关系



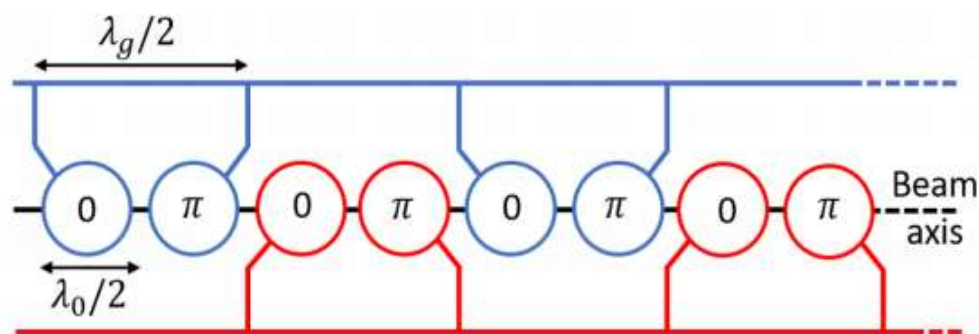
表面电阻和3R值的关系



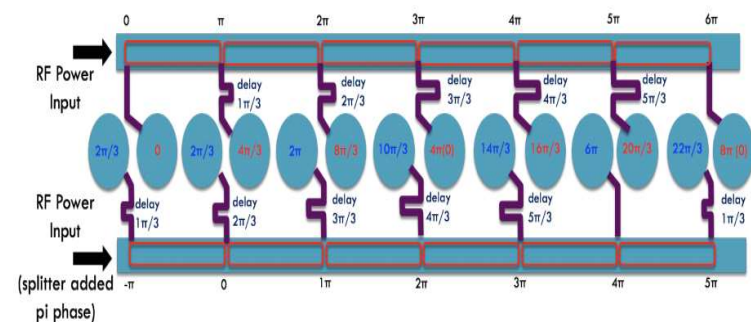
微波和束流相位的同步

• 保证微波和束流的同步， π 模式

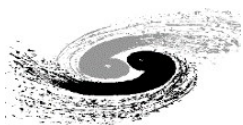
- 波导内：单边两个耦合通路之间距离 $\lambda_g/2$ （相位变化180度）
- 腔：每个腔的腔长为 $\lambda_0/2$ （半个波长）



π 模式

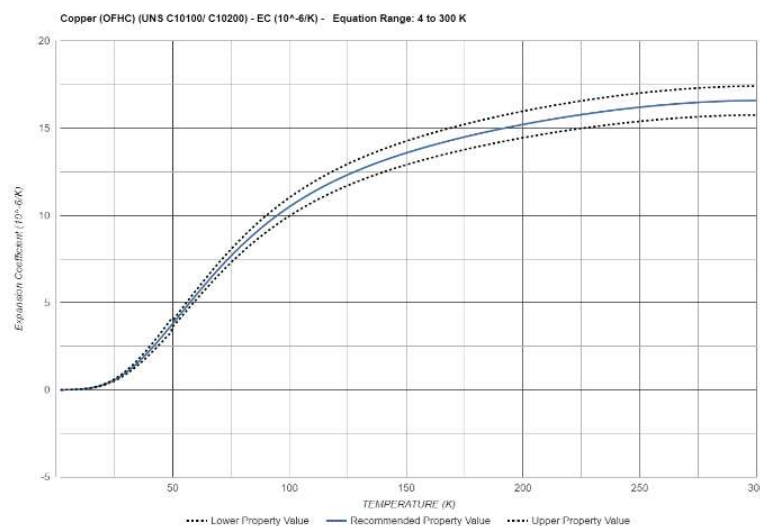


$2\pi/3$ 模式通过耦合通路之间的长度调节进腔微波的相位

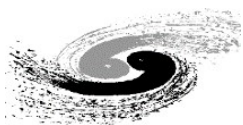


频率的变化

- 加工温度~295K (21.85°C) , 运行温度77K (-196.15°C) , 温度跨度大, 在整个温度区间内热膨胀系数非线性
- 通过积分, 降温至77k频率升高17.637MHz (5712MHz@77K, 加工冷测在 **5694.362MHz@295K**)

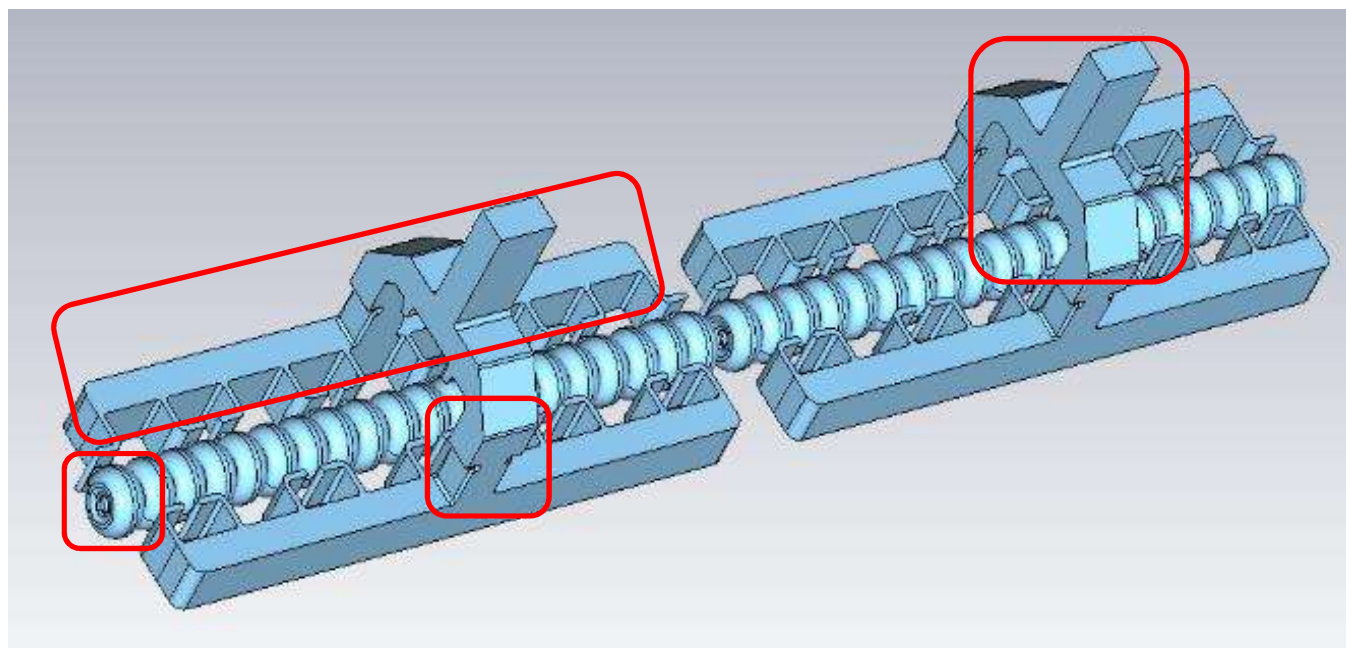


无氧铜的热膨胀积分系数



分布式耦合低温铜加速结构

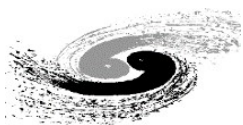
- CST优化设计完成后的真空模型
 - 每部分分别优化
 - 最后合成在一起，计算采用相同的网格划分，四面体网格，角度 5° ，单位长度波长数30，计算精度 $1e-6$



- 1、腔体部分
- 单腔
 - 带耦合孔

- 2、波导平行耦合部分
- 单个
 - 整体

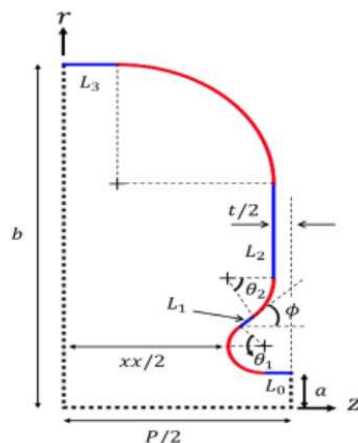
- 3、功分器
- 功分器1: 宽边, 3端口
 - 功分器2: 窄边, 3端口
 - 功分器3: 4端口



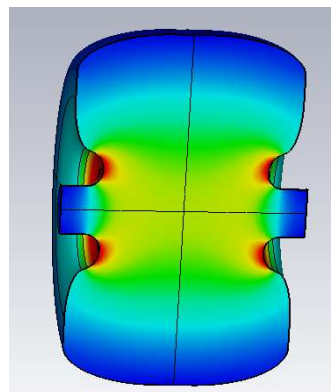
单腔

腔型优化

- @5712MHz
- 频率变化后只有p/2和b有微调
- 常温下分路阻抗119MΩ/m, 低温下
 $119 \times 2.55 = 303 \text{ M}\Omega/\text{m}$

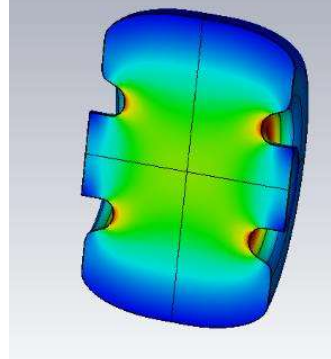


$2a=5.25\text{mm}$



$a=0.05 \times \lambda_0$

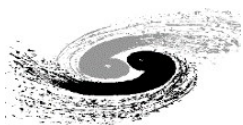
$2a=10.5\text{mm}$



$a=0.1 \times \lambda_0$

Result name	Type	Template name	Value
1 e_Abs (X)_2	1D	Evaluate Field in arbitrary Co	
2 Frequency (Mode 1)	OD	3D Eigenmode Result	5.712299631
3 Voltage (Mode 1)	OD	3D Eigenmode Result	3.9085200915e
4 Voltage (Mode 1)_1 (Mode 1)	OD	3D Eigenmode Result	3.0314626249e
5 Shunt Impedance (Perturbation) beta=1 (	OD	3D Eigenmode Result	3.1250970288e
6 T	OD-P	Mix Template Results	0.775603695
shunt impedance per meter	OD-P	Mix Template Results	119.0860794
8 ES	OD	Evaluate Field on Face	3.6088228485e
9 ES_f1	OD	Evaluate Field on Face	3.4615779599e
10 ES_f3	OD	Evaluate Field on Face	1.9125613548e
11 ES_f4	OD	Evaluate Field on Face	3.4362383821e
12 ES_f5	OD	Evaluate Field on Face	3.6089007457e
13 EOT	OD-P	Mix Template Results	1.4893948241e
14 ES OVER E0	OD-P	Mix Template Results	2.423012884
15 ES_f1 OVER E0	OD-P	Mix Template Results	2.324150658
16 ES_f3 OVER E0	OD-P	Mix Template Results	1.284119781
17 ES_f4 OVER E0	OD-P	Mix Template Results	2.307137319
18 ES_f5 OVER E0	OD-P	Mix Template Results	2.423065185

Result name	Type	Template name	Value
1 e_Abs (X)_2	1D	Evaluate Field in arbitrary Co	
2 Frequency (Mode 1)	OD	3D Eigenmode Result	5.712371464
3 Voltage (Mode 1)	OD	3D Eigenmode Result	3.7365016823e
4 Voltage (Mode 1)_1 (Mode 1)	OD	3D Eigenmode Result	2.7377040201e
5 Shunt Impedance (Perturbation) beta=1	OD	3D Eigenmode Result	2.3546624411e
6 Shunt Impedance (Perturbation) (Mode 1	OD	3D Eigenmode Result	4.386175789e
7 T	OD-P	Mix Template Results	0.732691767
shunt impedance per meter	OD-P	Mix Template Results	89.72761992
9 ES	OD	Evaluate Field on Face	3.0760250398e
10 ES_f3	OD	Evaluate Field on Face	3.0482649513e
11 ES_f4	OD	Evaluate Field on Face	3.076080328e
12 EOT	OD-P	Mix Template Results	1.423844866e
13 ES OVER E0	OD-P	Mix Template Results	2.160365299
14 ES_f3 OVER E0	OD-P	Mix Template Results	2.140868731
15 ES_f4 OVER E0	OD-P	Mix Template Results	2.160404129



腔间耦合的计算

• Formula

- 1) Super conducting cavity (~2%)

2) $k_0 = \frac{\omega_\pi^2 - \omega_0^2}{\omega_\pi^2 + \omega_0^2}$ (~1.1%-3%)

$$k_{cc} = \frac{\omega_\pi - \omega_0}{\omega_\pi + \omega_0} \cdot \frac{1}{2}$$

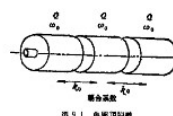
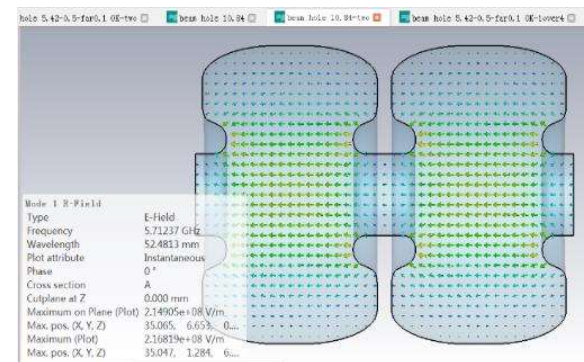


图 9.1 岛间耦合腔

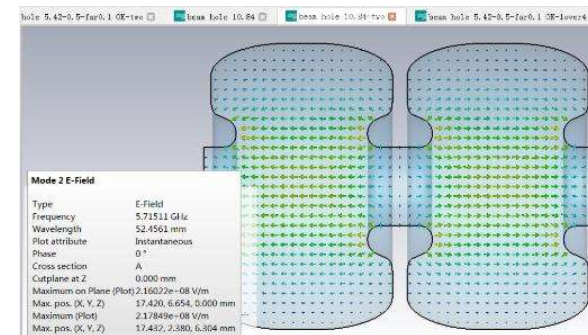
在 §2.13 中, 已对函数关系 (9.1.4) 作了分析, 由它可以得到腔体的许多特性, 例如, ω_π , $\frac{\omega_\pi}{2}$ 和 π 模式的频率分辨率 $\frac{\omega_\pi}{\sqrt{1+b_0}}$ 和 $\frac{\omega_0}{\sqrt{1+b_1}}$ 相邻腔间的耦合系数 k_0 近似等于相对带宽。

The calculation results of the two definitions are consistent

	f0	fpi	formula1 (%)	formula2 (%)
a=0.05* λ_0	5712.3	5712.31	0.000245	0.000245
a=0.1* λ_0	5712.37	5715.11	0.048	0.048



0 mode



Pi mode



填充时间

- 填充因子0.9，填充时间2.15uS

Material/Solid	Conductivity	Mu	Loss/W	Loss/%	Q
Cond. Enclosure	5.8000e+07	1	4.9471e-01	100	1.2762e+04
Sum			4.9471e-01		1.2762e+04

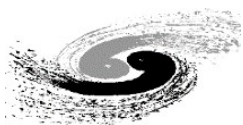
常温常规C-band参数

$$T_f = 2 * Q_0 / ((1 + \beta) * (2\pi f)) \quad 1/e$$

$$T_f = -\ln(1 - FF) * 2 * Q_0 * (1 + \beta) / (2 * \pi f) \quad \text{filling factor}$$

1/e			
beta	f	Q0	Tf (us)
1	5712	12762 (常温)	0.356
Filling factor			
0.9	5712.0	2762.0 (常温)	0.862
0.9	5712.0	31905.0 (77K)	2.155

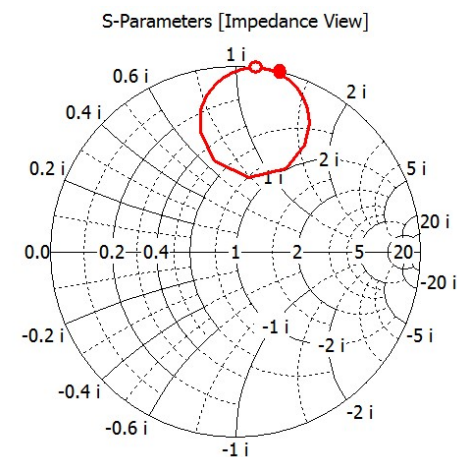
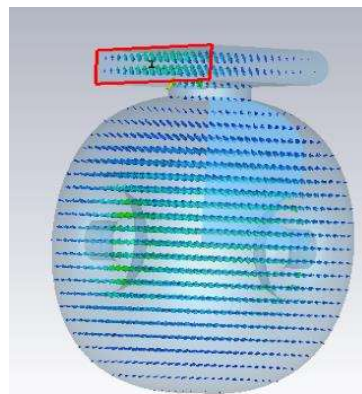
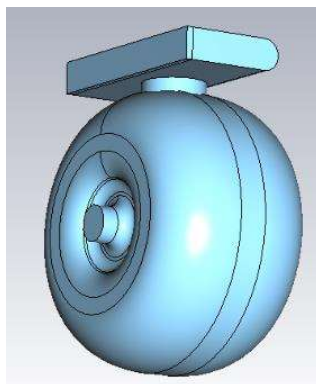
Parameters	value
Operating frequency (MHz)	5712
Phase advance per cell	$3\pi/4$
Total number of cells	85
Length of cell : d (mm)	19.675
Disk thickness: t (mm)	4.5
Shunt impedance : Rs (MΩ/m)	66.0~75.7
Group velocity: Vg/c (%)	2.8~1.4
Filling time : ft (ns)	271
Attenuation factor : τ	0.432



加耦合孔的优化

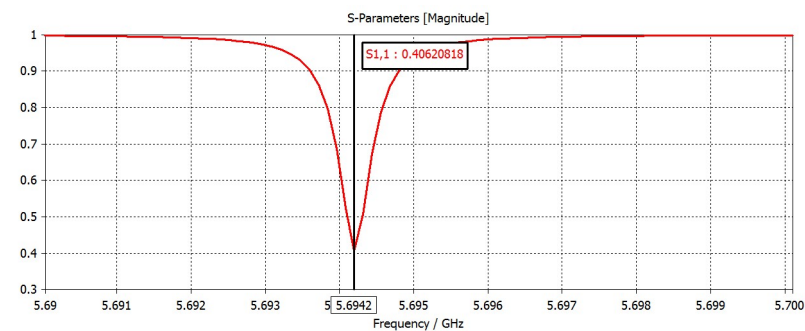
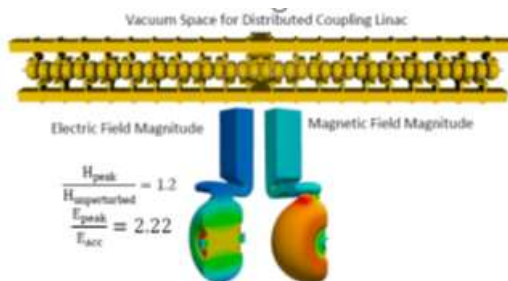
- 频域计算结果

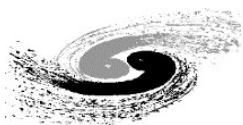
- $\beta=1$ (77k)
- $\beta=1/2.55=0.392$ (常温)



- 77K, 腔Q值是常温的2.55倍, 耦合度设计为原来的1/2.55

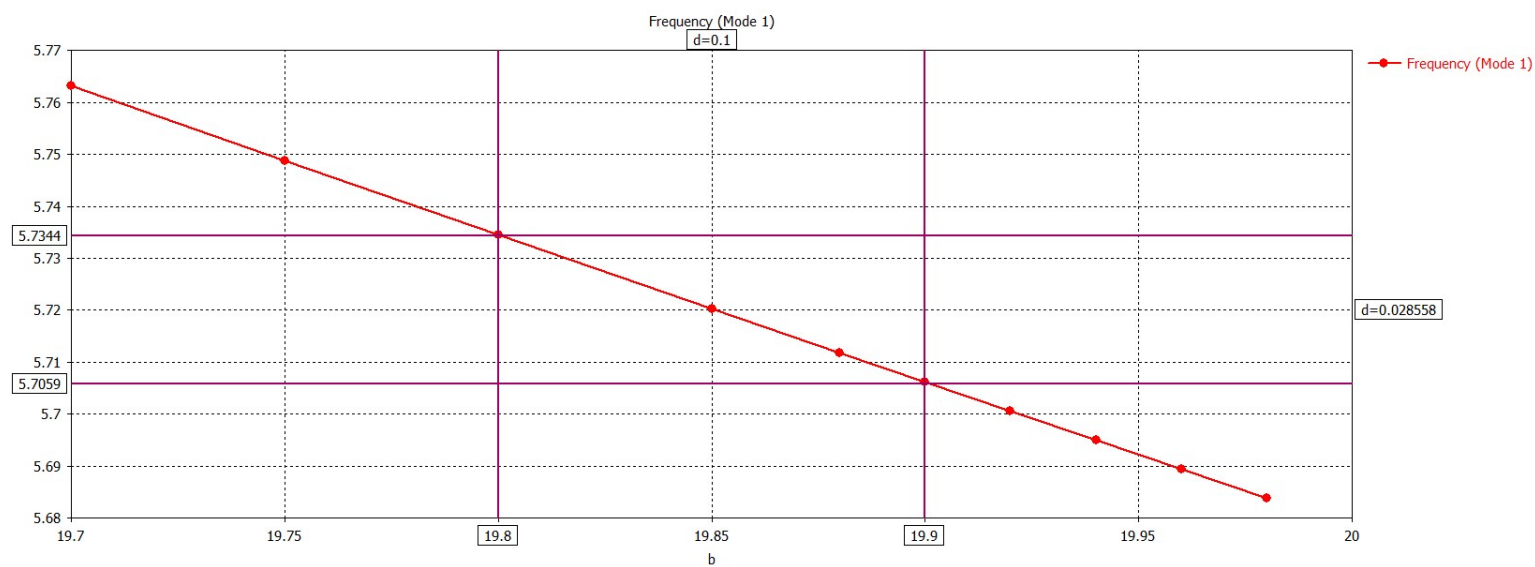
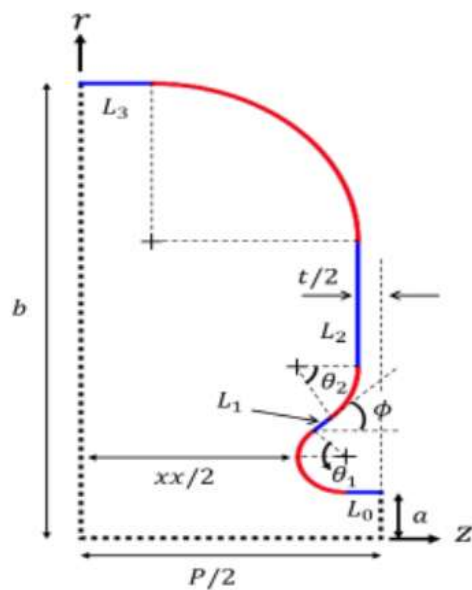
- $\beta=Q_0/Q_{\text{ext}}$





关键尺寸误差

- b : 285kHz/ μm





功率传输波导

- 为了保证同步, $\lambda_g = 2 * \lambda_0$

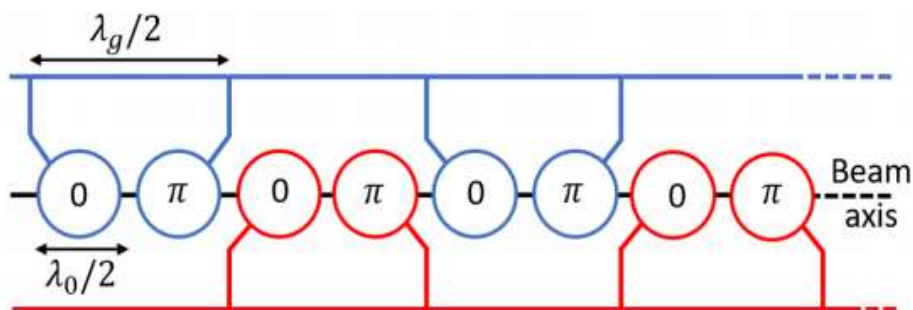
- $\lambda_0 = c / f_0$

- $\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (\frac{\lambda_0}{\lambda_c})^2}}$

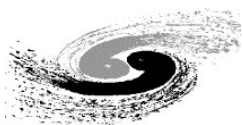
- 对TE₁₀模式, 截止波长 $\lambda_c = 2a$, a是矩形波导宽边的长度, a=30.396mm

- 窄边仍取值标准长度22.15mm

频率	光速	自由空间波长lambda0	2*自由空间波长lambda0	
5712	299792458	52.48467402	104.969348	
5694.362	299792458	52.64724266	105.2944853	
频率	a	截止波长	自由空间波长lambda0	波导波长
5712	30.302	60.604	52.48467402	104.9698
5694.362	30.3959	60.7918	52.64724266	105.294



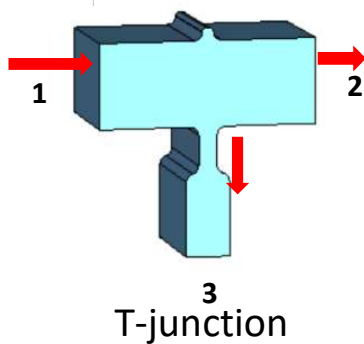
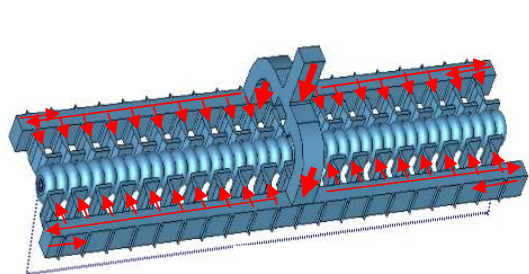
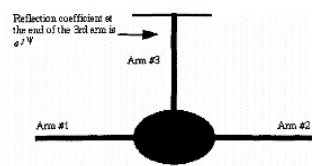
C波段WR187波导尺寸: 47.55mm*22.15mm



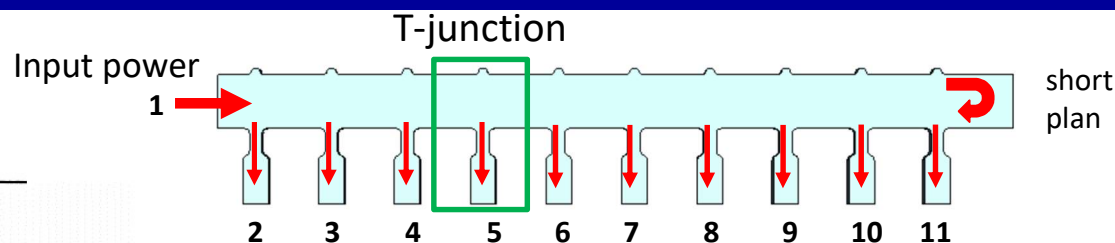
功率传输波导

• Manifold

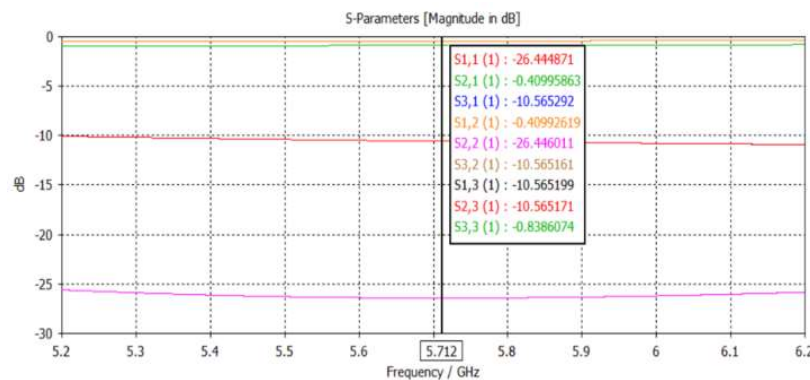
■ T-junction



$$S = \begin{pmatrix} \frac{-1}{2n+1} & \frac{1}{2n+1} - 1 & \frac{2i\sqrt{n}}{2n+1} \\ \frac{1}{2n+1} - 1 & \frac{-1}{2n+1} & \frac{-2i\sqrt{n}}{2n+1} \\ \frac{2i\sqrt{n}}{2n+1} & \frac{-2i\sqrt{n}}{2n+1} & \frac{2n-1}{2n+1} \end{pmatrix}$$



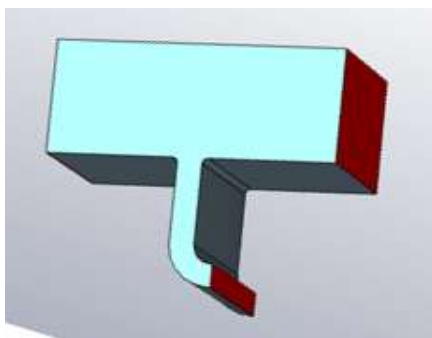
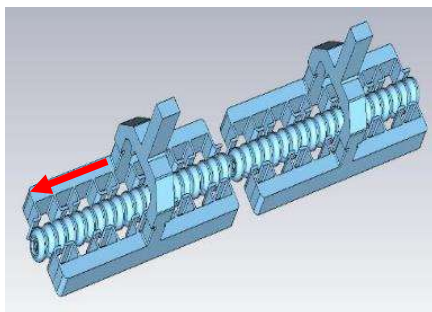
n	S ₁₁ (dB)	S ₁₂ (dB)	S ₁₃ (dB)
10	-26.44	-0.424	-10.42





功率传输波导

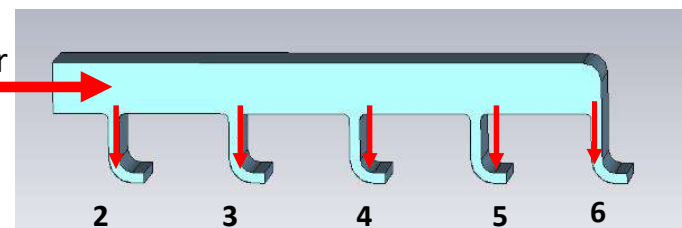
■ N=5



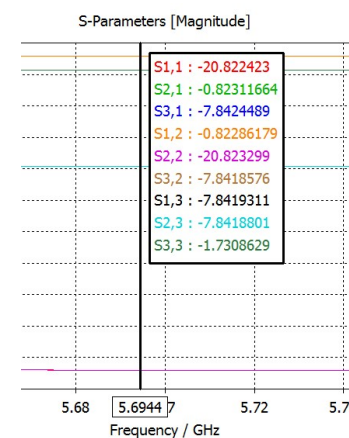
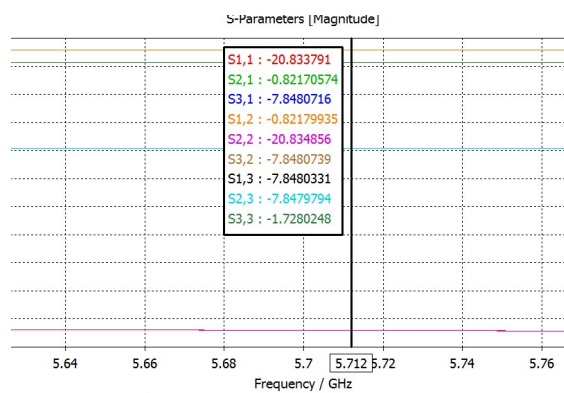
T-junction

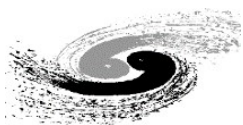
T-junction

Input power
1



n	S_{11} (dB)	S_{12} (dB)	S_{13} (dB)
5	-20.82785	-0.82785	-7.81755
10	-26.44439	-0.42379	-10.4238

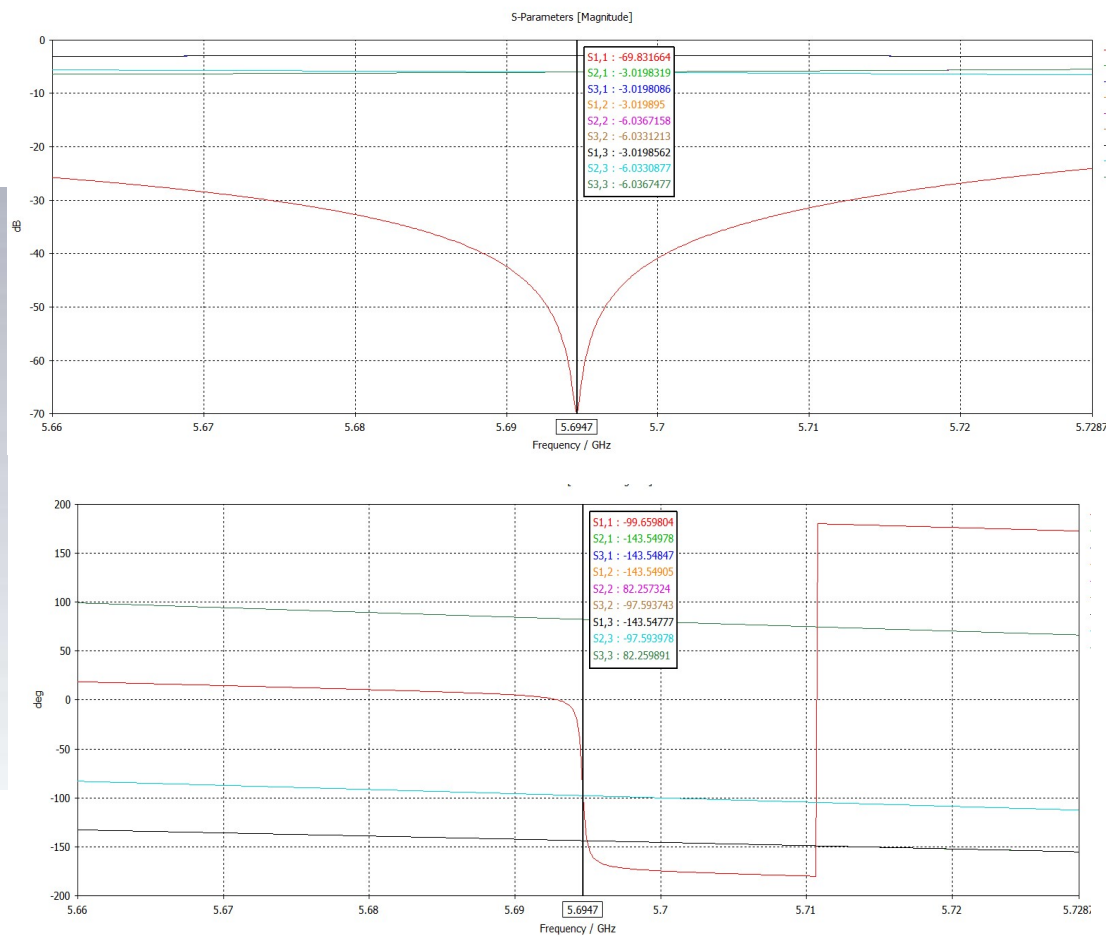
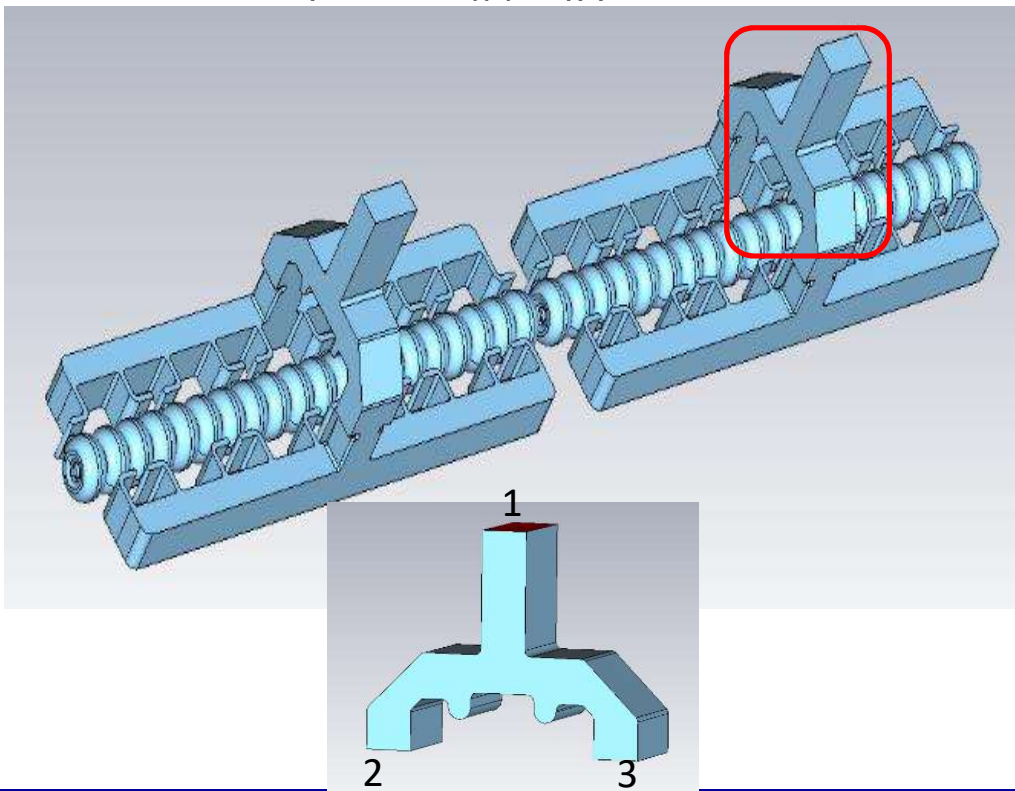


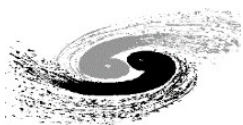


功分器1(E-T)

• 宽边

■ 2口和3口等幅同相

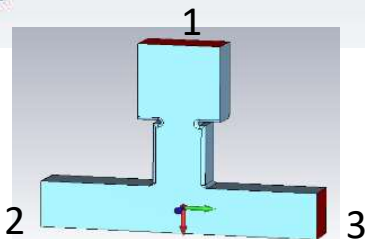
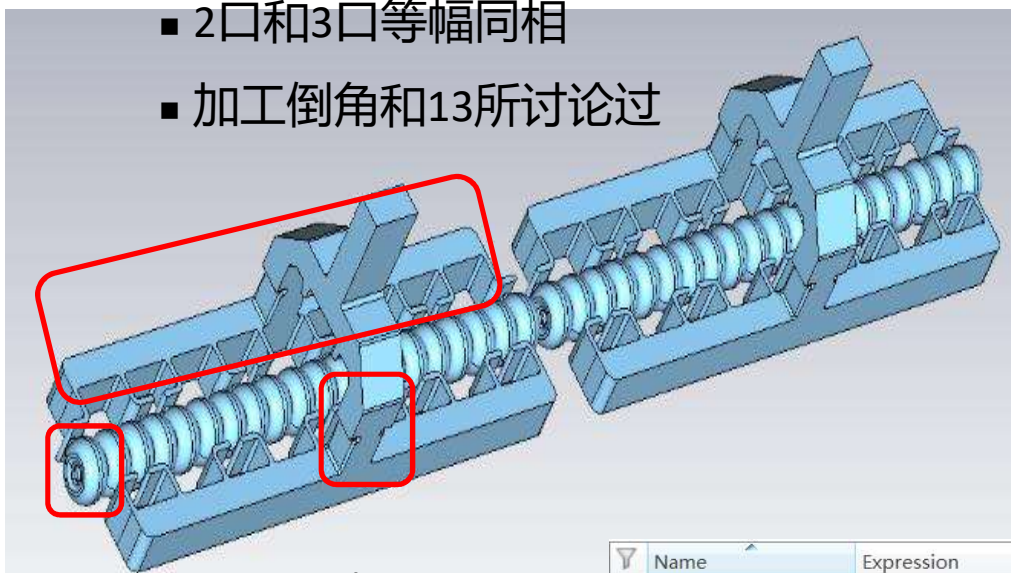




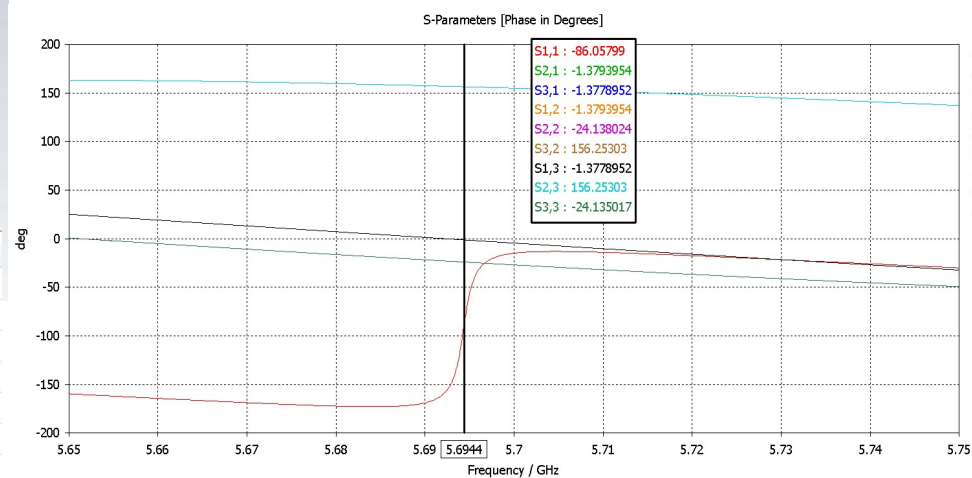
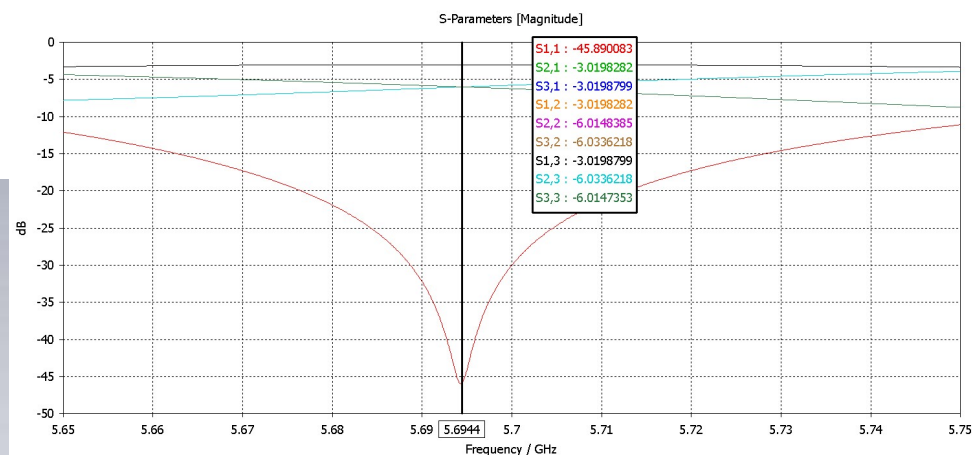
功分器2(H-T)

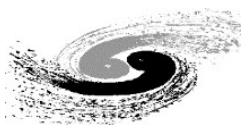
• 窄边

- 2口和3口等幅同相
- 加工倒角和13所讨论过



Name	Expression
at	= 30.3959
hight	= 43.42
Lmatch	= 3.34
Rmatch	= 2.35
Tmatch	= 30.51
wga	= 22.15
wgb	= 47.55



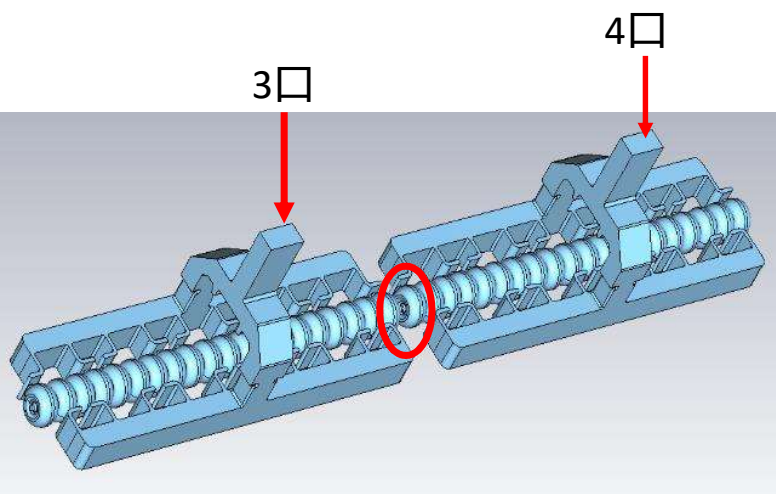
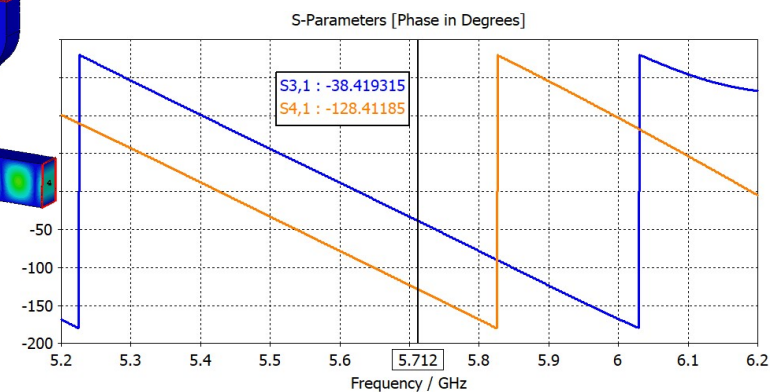
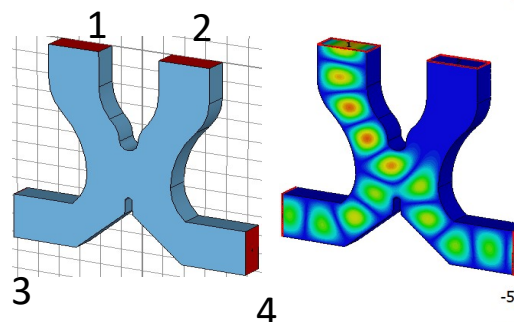
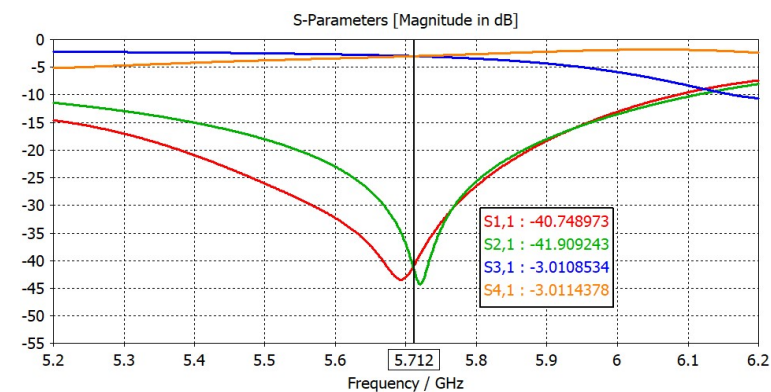


功分器

施华

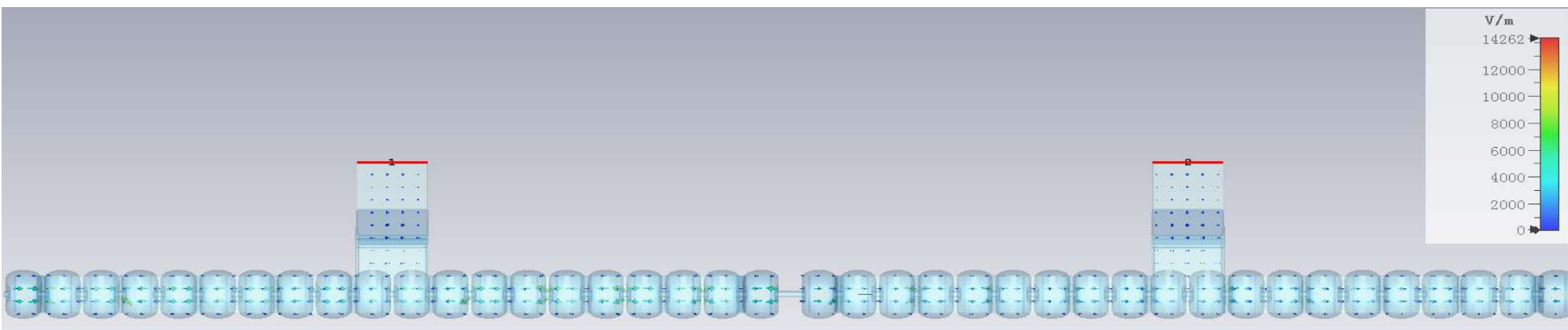
• 4端口器件

- 3、4端口等幅，有 90° 相位差，4端口相位滞后
- 在束流线上进行补偿，四分之一波长



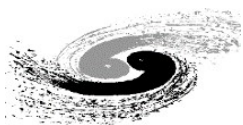


计算结果



- 入腔功率：45MW
- 40腔
- 分路阻抗 $300\text{M}\Omega/\text{m}$ (77K)
- 可验证加速梯度：116MV/m

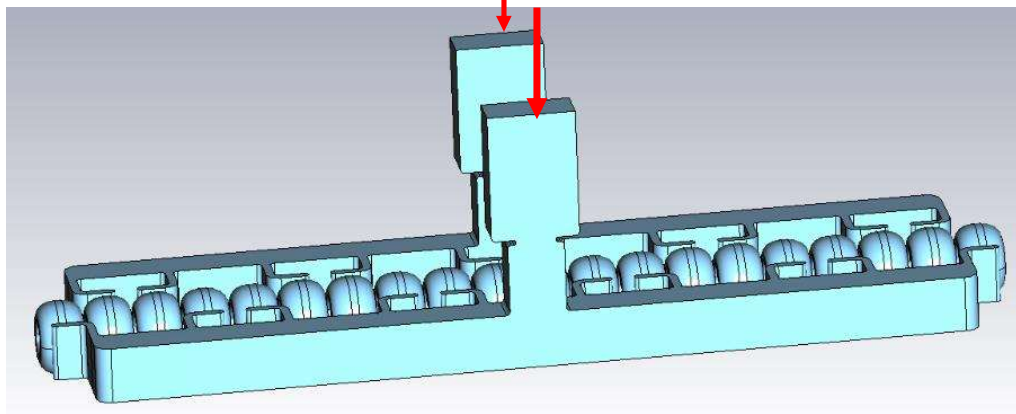
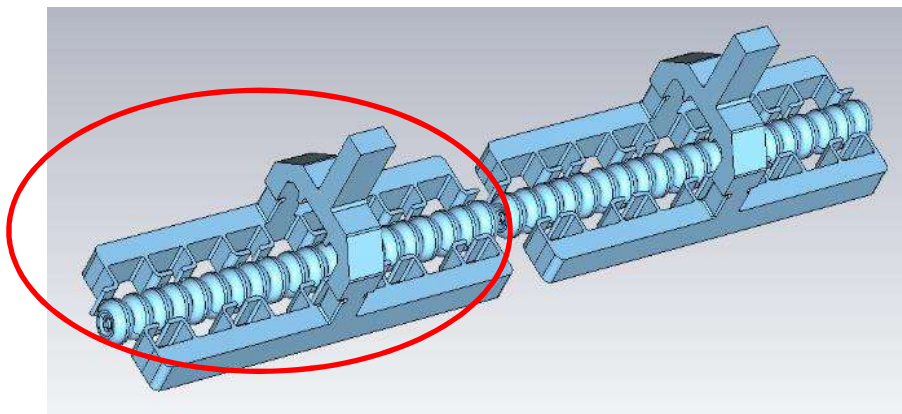
1米					
	功率源		50 MW		
	输出最大功率		50 MW		
	波导衰减后 (90%)		45 MW		
	总腔数		40		
	每腔的输入功率		1.125 MW		
	pi模式				
	分路阻抗(Mhom/m)	加速梯度(MV/m)	每腔长度(mm)	单位长度的欧姆损耗	每腔所需功率(MW)
常温	120	120	26.24	120	3.1488
77K	300	116	26.24	44.85333333	1.176951467

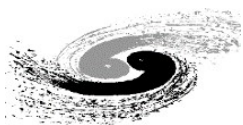


加工一半高功率实验

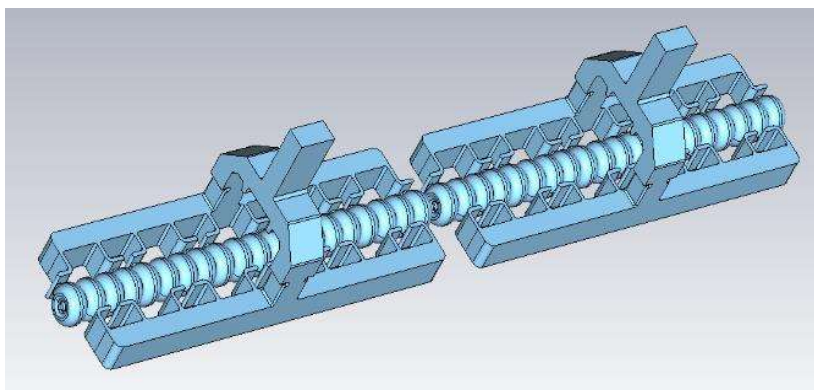
- 45MW功率进入20个腔（整管是40个），梯度可高 $\sqrt{2}$ 倍，由116MV/m $\rightarrow$ 164MV/m
- 直接接4端口功分器，避免反射功率都进入功率源

0.5米					
功率源		50 MW			
输出最大功率		50 MW			
波导衰减后（90%）		45 MW			
总腔数		20			
每腔的输入功率		2.25 MW			
pi模式					
分路阻抗(Mhom/m)	加速梯度(MV/m)	每腔长度(mm)	单位长度的欧姆损耗	每腔所需功率(MW)	
常温	120	120	26.24	120	3.1488
77K	300	160	26.24	85.33333333	2.239146667

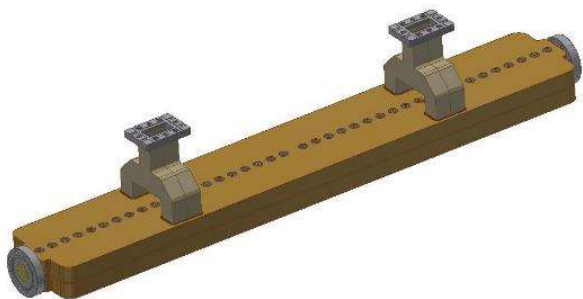




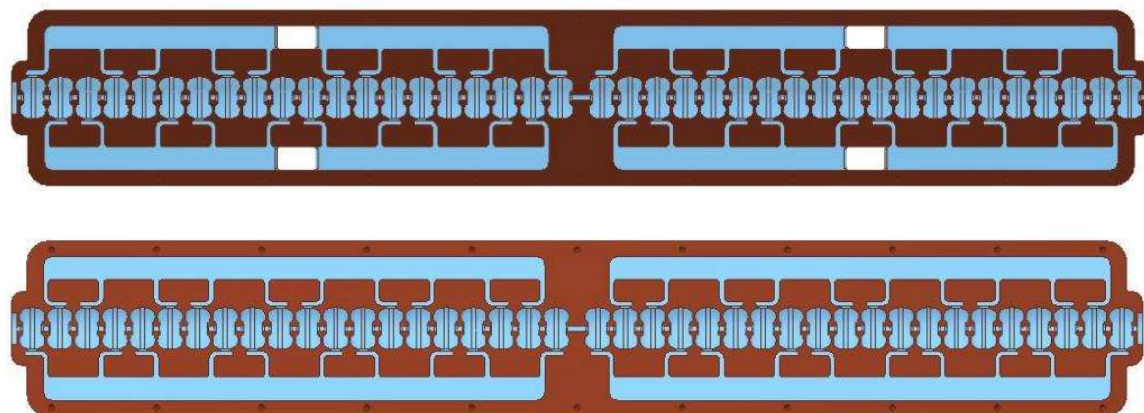
机械设计



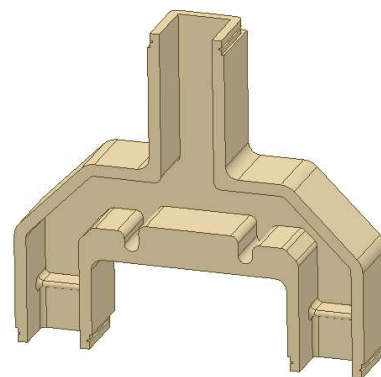
由CST生成stp文件，直接导入inventor



加速管的法兰CF50，波导的法兰为WR187



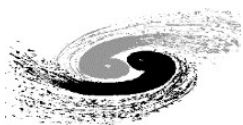
上下两半腔体



功分器

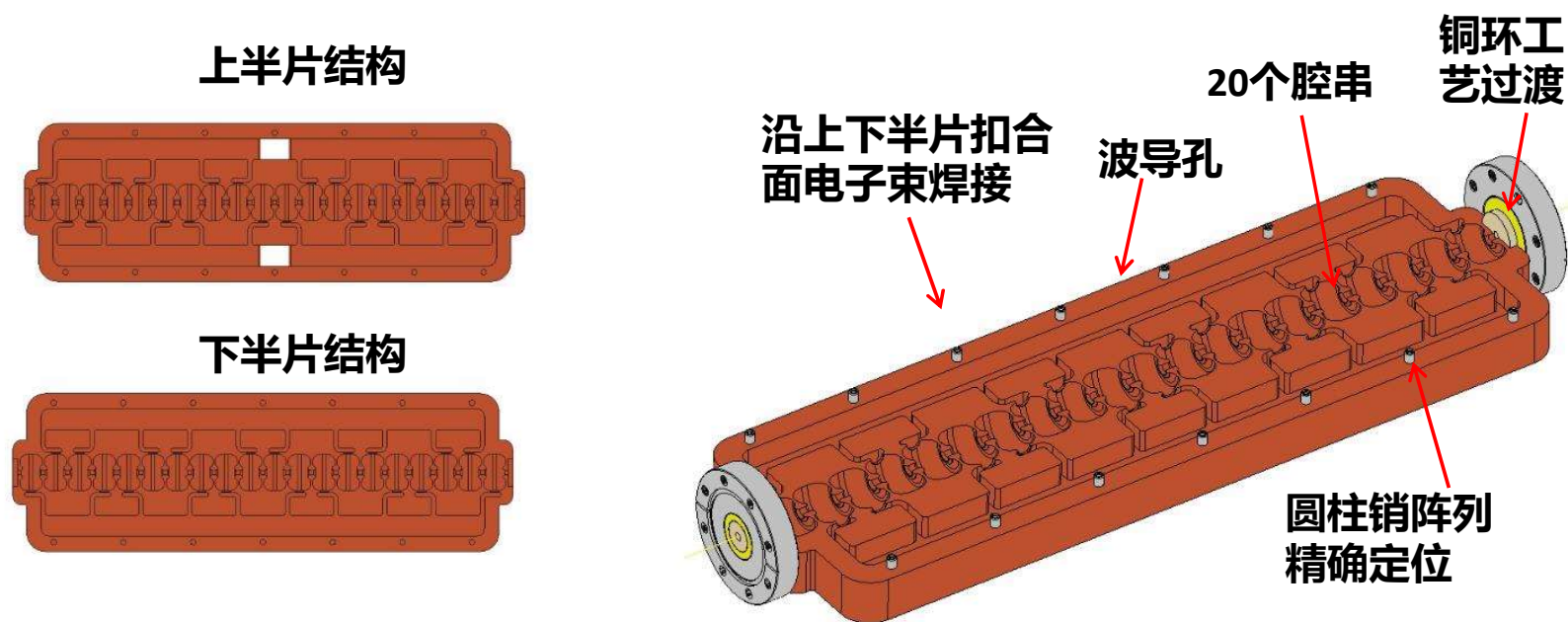


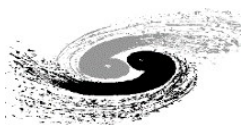
端部法兰



20腔样机设计

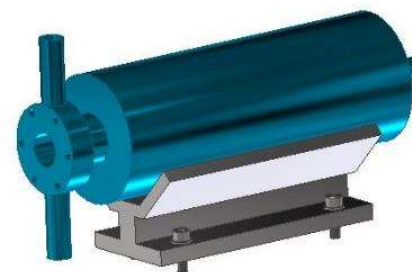
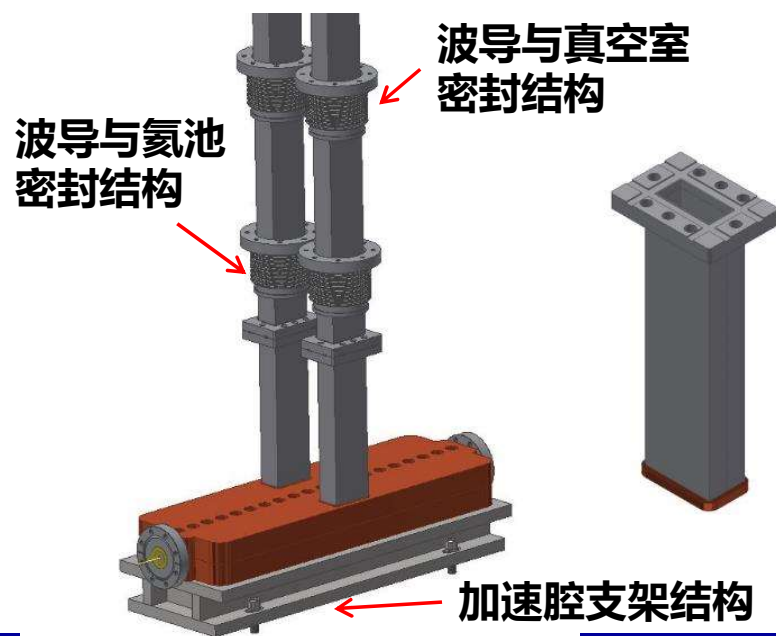
- 结构：上下半片扣合焊接，圆柱销阵列保证上下半片定位
- 工艺：为了不降低冷铜的硬度，与冷铜主体相关的均采用电子束焊接，避免钎焊造成的硬度降低等不利因素。





20腔样机设计

- 波导结构：方波导+方法兰+铜环
- 加速腔支架：框架焊接结构，304
- 法拉第筒支架：V型槽焊接机构，304



法拉第筒及支架结构



材料性能

●材料已到货

- 纯度99.998%
- 氧含量 < 百万分之5

锦州晨玥金属新材料科技有限公司

发 货 单

合同编号: HT-IHEP-SW-0186/2022

产品名称	规格/mm	数量/件
TU00 铜板	1200*300*40	2
TU00 铜板	240*180*40	1
TU00 铜板	240*180*16	1
合计		

2022.8.17

PAT博飞克分析

委托方: 锦州晨玥金属新材料科技有限公司

检测方法: GDMS (电感耦合等离子体)

报告编号: P2204210001

测试日期: 2022-04-21

样品名称: 铜

样品编号: NoID

检测仪器: ICP-MS 9600

GDMS 数据

元素	含量	元素	含量
Li	< 0.001	Ag	5
Be	< 0.001	Co	< 0.01
B	< 0.001	Cr	0.01
C	< 0.001	Fe	0.1
N	< 0.001	Mn	0.01
O	< 0.001	Ni	0.01
Al	0.01	S	0.01
Si	0.01	Se	< 0.001
P	1.0	Sn	< 0.001
S	7.5	Ta	< 0.001
Cl	0.01	Tb	< 0.001
K	< 0.01	Th	< 0.001
Ca	< 0.01	Ti	< 0.001
Sc	< 0.001	V	< 0.001
Ti	< 0.001	W	< 0.001
V	< 0.001	Xe	< 0.001
Cr	0.1	Y	< 0.001
Mn	0.01	Zr	< 0.001
Fe	0.01	As	< 0.001
Co	0.01	Br	< 0.001
Ni	0.01	Cd	< 0.001
Cu	99.998	Ce	< 0.001
Zn	0.01	Pr	< 0.001
As	< 0.001	Sr	< 0.001
Se	< 0.001	Ta	< 0.001
Br	< 0.001	Tb	< 0.001
Cd	< 0.001	Ti	< 0.001
Ce	< 0.001	V	< 0.001
Pr	< 0.001	W	< 0.001
Sr	< 0.001	Xe	< 0.001
Ta	< 0.001	Y	< 0.001
Tb	< 0.001	Zr	< 0.001
Ti	< 0.001	As	< 0.001
V	< 0.001	Br	< 0.001
W	< 0.001	Cd	< 0.001
Xe	< 0.001	Ce	< 0.001
Y	< 0.001	Pr	< 0.001
Zr	< 0.001	Sr	< 0.001

PAT博飞克分析

委托方: 锦州晨玥金属新材料科技有限公司

检测方法: EGA (气体元素分析法)

报告编号: P2204210101

测试日期: 2022-04-21

样品名称: 铜

样品编号: NoID

EGA 数据

元素	含量
H	< 0.001
C	< 0.001
N	< 0.001
O	< 0.001
S	< 0.001

Test Report

Date: Dec 24, 2021

Mitsubishi Materials Corporation

SAKAI PLANT

QUALITY ASSURANCE SECTION

T. Kamai

TOHOKU KAMAI

3-2-1, CHUO-KU, SAKAI, 590-8501 JAPAN

TEL: +81-72-241-4111

FAX: +81-72-241-0028

Commodity: 200mm x 270mm (L)

Onepiece-Free Electrode Copper Billet (ASTM C10500, C10600)

Physical Property	Unit	Value
Tolerance	mm	±0.05
Electrical Resistance	mΩ	0.01
Chemical Composition	%	99.998
Trace Elements	ppm	< 0.001



材料性能

- 和高能所采购是同一批材料
- RRR测量
 - 等离子体所测试结果：退火前110
 - 西部超导测试结果：退火前161，退火后579
- 硬度
 - ~100 （日历91-99，芬兰66-70）

RRR 值测试报告/RRR Value Test Report

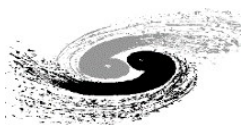
WST	No. 报告编号: RRR-2200407		
Type / 样品类别	NbTi ☐ Nb ₃ Sn ☐ Cu ☒ else/其它	Quantity / 数量	1
Room Temperature/ 室温	300 K ☐ 273 K ☒ Else/其它		
Low Temperature/ 低温	20 K ☐ 10 K ☒ 4.2 K ☐ Else/其它		
Current (A) / 测试电流	Room temperature/ 室温 <u>1</u> A	Low temperature / 低温 <u>1</u> A	
Standards / 执行标准	GB/T 25897; IEC 61788-4; IEC 61788-23		
Wire No. 线号	Position 测试位置	Dimension/mm 样品尺寸	RRR value RRR 值
JX-2	/	0.764	161

退火前

RRR 值测试报告/RRR Value Test Report

WST	No. 报告编号: RRR-2200406		
Type / 样品类别	NbTi ☐ Nb ₃ Sn ☐ Cu ☒ else/其它	Quantity / 数量	1
Room Temperature/ 室温	300 K ☐ 273 K ☒ Else/其它		
Low Temperature/ 低温	20 K ☐ 10 K ☒ 4.2 K ☐ Else/其它		
Current (A) / 测试电流	Room temperature/ 室温 <u>1</u> A	Low temperature / 低温 <u>1</u> A	
Standards / 执行标准	GB/T 25897; IEC 61788-4; IEC 61788-23		
Wire No. 线号	Position 测试位置	Dimension/mm 样品尺寸	RRR value RRR 值
JX-1	/	0.764	579

退火后



加工情况

- 加工（航天2院，13所，大兴）

- 1腔、2腔铝材料腔
- 2腔无氧铜材料腔

- 去工厂调研

- 设备价格（1200万）

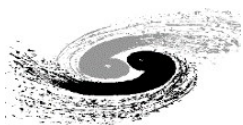
- 讨论加工工艺，可以完成加工

- 20腔价格：43万元，也可协商



成品





加工情况

• 中科元合（惠州）

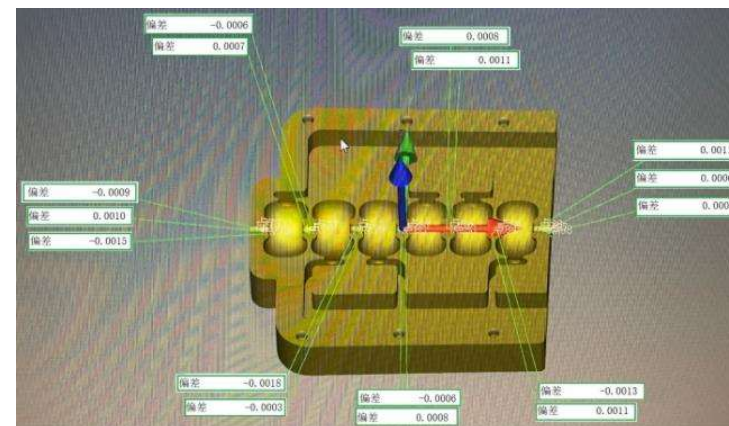
(1) 超高精密恒温加工可以满足图纸的精度要求，精度可以控制在正负0.001mm以内，所以轮廓度要求在0.005mm以内是可以实现的；(2) 加工时采用特制陶瓷刀，进行高速切削加工（每分钟20000转），可满足内表面光洁度好于Ra0.2；(3) 加工时不采用机械压紧装置，采用真空吸盘，以免工件受力变形；(4) 加工时采用高精密加工专用冷却液（乙醇混合物）进行冷却，及时带走加工热量，以免工件因加工热量导致形变，确保加工尺寸精度稳定

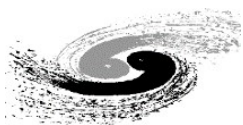
• 设备价格：~300万

• 报价：28.83万元，工期80天

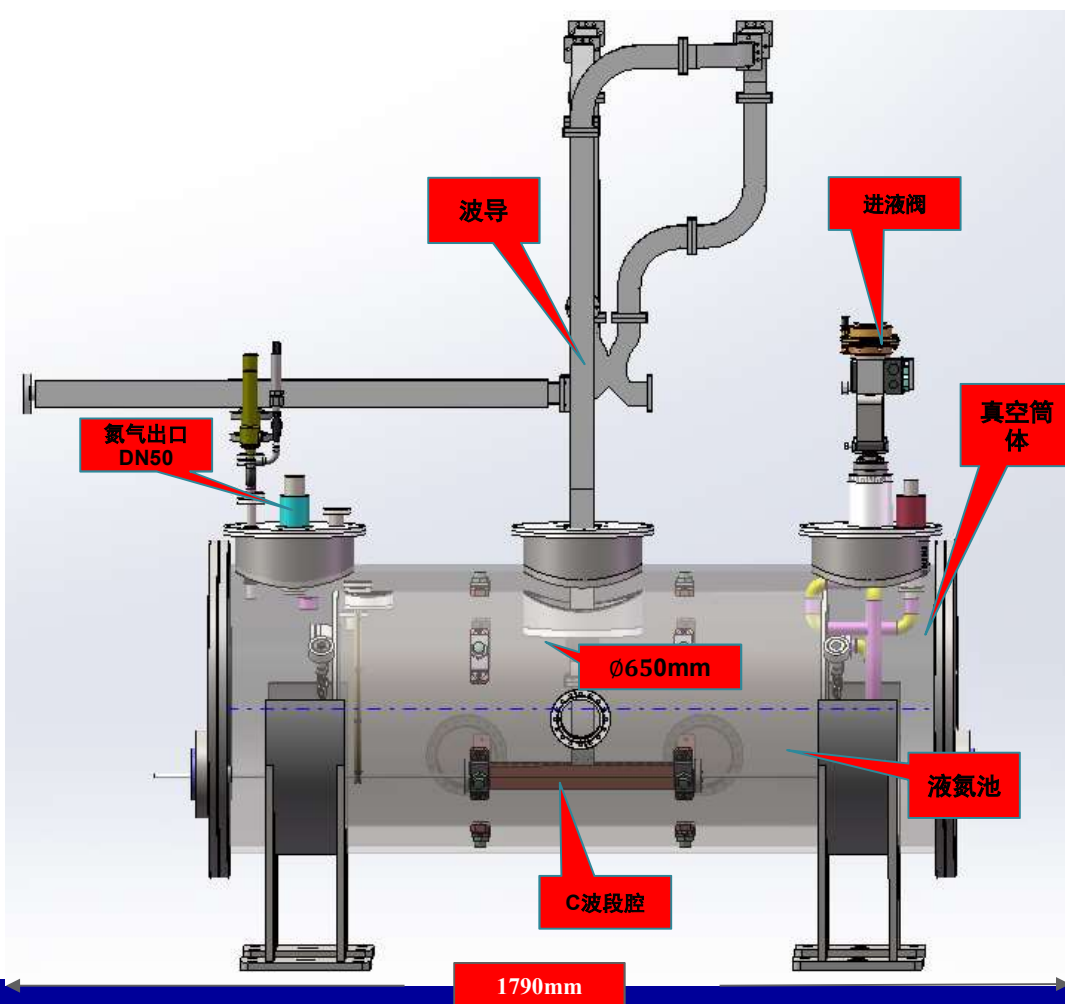


铝腔模型





C波段腔测试用液氮恒温器的设计



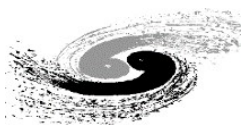
- ◆ C波段腔对低温的设计需求：
 - C波段腔最大热负荷：7.5kW。
需要液氮流量为168L/hour。
 - 腔最大耐压：10bar。
 - 腔体温度波动小于0.1K。
 - 可容纳1米长加速结构
- ◆ 恒温器的设计参数：
 - 波段液氮池的工作压力为0.101325MPa。
 - 氮池容量339L,当腔满负荷运行时,氮池内压力波动为41Pa,温度波动小于0.1K。



经费预算

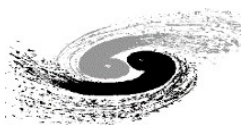
• 近期资金需求

	项目	型号	单价/万	数量	预算/万
低温	低温恒温器非标定制		30	1套	30
	低温阀门	DN32	5	1	5
	测量-温度传感器	PT100	0.1	2	0.2
	测量-压力传感器		0.4	1	0.4
	测量-液位计		0.5	2	1
	测量-真空规计		2	1	2
	控制系统			1	16
	测试装置			1	0.5
机械	支架	非标定制	0.1	2	0.2
微波	20腔腔体	非标定制	28	1	28.83(43)
	负载	非标定制	6	1	6
	3dB耦合器	非标定制	5	1	5
	C波段微波测试件			1	5
	法拉第筒		5	1	5
	总计	-----			105.13(119.3)



下一步工作计划

- 选定厂家进行工艺讨论，加工测试，精度检测及微波测试
- 低温恒温器加工
- 对现有结构在低温环境下进行性能测试
- 微波器件的加工制造
- 高功率测试台准备，波导布局，波导采购



谢谢大家！