# 1.3 GHz 高频铜腔磁控溅射镀铌工艺研究

马永胜<sup>1\*</sup> 段海长<sup>1,2</sup> 戴劲<sup>1</sup> 张<sup>1,2</sup> 杨雨晨<sup>1</sup> 何平<sup>1,2</sup> 董海义<sup>1,2</sup> (1. 中国科学院高能物理研究所北京 100049; 2. 中国科学院大学北京 100049)

## Niobium Coating by Magnetron Sputtering in 1.3 GHz High Frequency Copper Cavity

MA Yongsheng<sup>1\*</sup>, DUAN Haichang<sup>1,2</sup>, DAI Jin<sup>1</sup>, ZHANG Pei<sup>1,2</sup>, YANG Yuchen<sup>1</sup>, HE Ping<sup>1,2</sup>, DONG Haiyi<sup>1,2</sup> (1. Institute of High Energy Physics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Compared to high-frequency superconducting niobium cavities, superconducting high-frequency niobium coating cavities have a series of advantages such as insensitivity to DC magnetic field, high thermal stability, low cost, and the copper cavity niobium coating process is the basis for the preparation of Nb<sub>3</sub>Sn and NbN, as well as superconducting-insulating-superconducting (SIS) composite films on the surface of copper cavities. Therefore, a DC magnetron sputtering method was used to deposit niobium films on the inner wall of the high-frequency cavity of the copper in order to explore the copper cavity niobium coating process. The internal defects, surface morphology, and crystalline structure of the niobium film were characterized by means of FIB, SEM, and XRD. The results show that by controlling the dusting free of the coating vacuum chamber, reducing the coating time and discharge air pressure, and controlling the movement of the magnetic ring, a niobium film with uniform axial distribution in the copper cavity, a *T*c value of 9.26 K, and good surface continuity was obtained. The results of the vertical test of the copper-plated niobium cavity showed that the cavity performance reached 5 MV/m at  $Q_0>10^8$ , corresponding to the peak magnetic field is 24 mT, achieving superconductivity in the coated cavity. This provides a good basis for further improving the quality of the niobium film, improving the performance of the coated superconducting cavity, and attempting to coat other superconducting materials (NbN, Nb<sub>3</sub>Sn) on copper substrates.

**Keywords** High frequency cavity, DC magnetron sputtering, Niobium thin film, Superconductivity, Thin film defects, Microstructure

摘要 相比于纯铌超导高频腔, 铜腔内壁镀铌超导腔具有对直流磁场不敏感、热稳定性高、造价成本低等一系列优点, 并且铜腔镀铌工艺是铜腔表面制备 Nb<sub>3</sub>Sn、NbN 以及超导-绝缘-超导(SIS)复合膜的基础。因此使用直流磁控溅射法在铜基 底高频腔内壁进行铌膜沉积, 以探索铜腔镀铌工艺。并借助于 FIB、SEM、XRD 对铌膜的内部缺陷、表面形貌、晶相结构进 行表征分析。研究结果显示: 通过控制镀膜真空室的洁净、降低镀膜时间和放电气压, 以及控制磁环的运动方式, 获得了铜腔 轴向分布均匀, *T*c 值达 9.26 K, 表面连续性较好的铌膜。铜镀铌腔垂直测试结果显示, 腔性能在 *Q*<sub>0</sub>>10<sup>8</sup> 下达到了 5 MV/m, 对 应峰值磁场 24 mT。该结果为后续进一步改善镀铌质量, 提高镀膜超导腔性能, 以及尝试在铜基底上进行其他超导材料(NbN、 Nb<sub>3</sub>Sn)的镀膜奠定了良好的基础。

**关键词** 高频腔 直流磁控溅射 铌薄膜 超导 薄膜缺陷 微观结构 **中图分类号:** TL503.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.13922/j.cnki.cjvst.202208015

超导高频腔(简称超导腔)是现代粒子加速器 的重要组成部分<sup>[1]</sup>,主要应用于散裂中子源、自由电 子激光、新一代的同步辐射光源、粒子对撞机等粒 子加速器中。另外,超导薄膜还广泛应用于探测器

收稿日期:2022-08-16

\*联系人: Tel:18701366288; E-mail: mays@ihep.ac.cn

等直流与高频领域<sup>[2]</sup>。良好的表面状态及表面质量 是超导腔实现较高性能和运行效率的决定因素之 一,近年来超导腔的发展主要集中在其表面处理, 其中一个重要研究热点是在铌腔或铜腔表面制备铌 薄膜或 A15 相的 Nb<sub>3</sub>Sn、V<sub>3</sub>Si,以及 MgB<sub>2</sub>、NbTiN、 NbN 等超导薄膜<sup>[3-8]</sup>。

与纯铌相比,无氧铜具有更好的导热性能、加 工工艺成熟、价格便宜等特点。铜镀铌超导腔,即 在铜腔内表面镀铌薄膜,发挥了两种材料的优点, 且对于直流磁场不敏感、RF 性能和热性能可分离、 优化的 BCS 电阻等一系列优点<sup>19</sup>。在铜腔表面制备 铌薄膜的工艺也是将来发展 Nb<sub>3</sub>Sn<sub>x</sub> NbTiN<sub>x</sub> NbN 等以及制备超导-绝缘-超导(SIS)复合薄膜的基础。 因此镀膜超导腔对国际上提出的大型粒子加速器 如 FCC<sup>[10]</sup>、CEPC<sup>[11]</sup>等正负电子对撞机具有非常实 用的经济价值。但是,镀膜腔超导性能还远未达到 能够替代纯铌腔的阶段。其中,铜镀铌超导腔的Q。 值随着加速梯度的增大存在快速下降的现象,称为 "O-slope"。截止目前,铜镀铌超导腔的 O-slope 问 题仍然存在,并且随着高频腔频率的增大 O-slope 下降趋势增大。这些原因阻碍了铜镀铌超导腔在 粒子加速器中的广泛应用。对于铜镀铌超导腔的 研究,目前处于国际领先地位的是欧洲核子研究中 心(CERN),下图 1是 CERN 用于研发镀铌铜腔的 磁控溅射设备图。在这种圆柱形结构中,铜腔同时 用作真空室, 铌阴极为直径 48 mm 的圆柱形管, 其 表面大约100G的磁场由位于阴极靶内部的永磁体 产生。经过多年对铌薄膜的磁控溅射研究, 1.3 GHz 椭球镀膜腔达到了16 MV/m 左右的加速梯度<sup>[12]</sup>。



图1 CERN 磁控溅射设备图<sup>[16]</sup>

Fig. 1 Diagram of the magnetron sputtering equipment at  $CERN^{[16]}$ 

国内镀膜超导腔的研制起始于 20 世纪 90 年代, 北京大学采用二极溅射的方法开展四分之一波长 谐振铜腔(QWR)镀铌的研制<sup>[13-14]</sup>,于 1999 年获得 了一只铜基底镀铌 QWR 腔,改进后的最大加速梯 度为 6 MV/m。中国科学院近代物理研究所<sup>[15]</sup> 通过 对二极溅射技术改进后的三极溅射方式制备 QWR 铜基底镀铌腔,表征结果显示获得的铌膜结构致密, 表面粗糙度低,超导转变温度 *T*c 达到 9.3 K。

1.3 GHz 高频超导腔在粒子加速器中有广泛的 应用,同时体积相对适中,非常适合用于内壁沉积 超导薄膜技术的研究。1.3 GHz 单 cell 铜腔由束管 与椭圆 cell 部位组成,具有体积较小、cell 椭球表面 与阴极靶之间存在渐变角、半径变化大等特点这些 特点使得整腔镀膜存在很大的难点。需要解决薄 膜厚度的均匀性、薄膜斜角生长下阴影效应引起的 缺陷增加、薄基结合力等一系列工艺问题。而采用 磁控溅射法,在腔内部插入圆柱形靶材,通过移动 靶内部的磁环相对于高频腔的位置可控制铌薄膜 厚度的分布,同时控制腔体不同部位的薄膜生长角 度、沉积速率,从而提高铌薄膜在铜腔轴向的厚度 均匀性,降低阴影效应引起的薄膜缺陷。因此2018 年中国科学院高能物理研究所基于先进光源与测 试平台(PAPS)开始对 1.3 GHz 椭球形高频铜腔镀 铌工艺展开研究。本文采用磁控溅射法在铜衬底 高频腔内壁沉积铌薄膜,通过研制一套磁控溅射镀 铌设备,深入研究铜腔镀铌工艺。

#### 1 试验

#### 1.1 镀膜装置与工艺

对高频腔内壁镀膜, 直流(脉冲)磁控溅射法具 有镀膜结构简单, 可操作性强、适宜于工程化应用 等特点。所以采用该方法进行铜腔内壁镀铌, 镀膜 系统示意图如图 2 所示: 阴极靶采用空心圆柱型高 纯铌靶(RRR~300), 外径 22.5 mm, 内径 17.5 mm。 在铌靶中心放置两块 s-s 相对的永磁体磁环, 其矫 顽力 *Hc*=1100 kA/m, 在磁场约束作用下等离子体在 磁环周围形成, 进而通过控制磁环相对于高频腔的 位置来实现铌薄膜的生长分布, 优化整腔镀膜厚度 的均匀性。另外为及时将铌靶中的热量导出, 冷却 水温度设定为 15℃, 冷却水流速为 3 L/min, 镀膜装 置实物图如图 3 所示。



图2 直流磁控溅射实验装置示意图



相比于国际传统的镀膜结构,该镀膜装置将高 频腔放置于另一真空腔体中,在真空腔体与铜腔之 间采用钽制成的片状加热体,可以用于真空抽气时 的烘烤以及在镀膜时为铜腔加热,并通过热电偶实 时监测腔壁的温度,加热片和温度探头位置示意图 如图 2 所示。该结构的主要优势有:①可获得更高 的衬底温度。②避免铜腔在大气环境中的烘烤温 度大于 200℃时,外表面氧化物污染高频腔内表面, 从而引起打火而导致高频腔失超等。将高频铜腔 放在真空室内的缺点是使镀膜系统结构变复杂。

本实验采用纯度为 5N(99.999%)的 Kr 气作为 放电气体,以降低薄膜中残留的杂质浓度<sup>[17]</sup>,另外 Kr 易于抑制等离子体的不稳定性<sup>[18]</sup>。在镀膜过程 中使用残余气体质谱仪分析 Kr 纯度或残余气体占 比,图 4 所示为采用差分方法测量镀膜腔室内充入 Kr 气后各种气体成分的谱图。真空室内充入 Kr 后 杂质气体分压低于 10<sup>-7</sup> Pa 量级。



图3 铜腔镀铌设备 Fig. 3 Setup of Nb coating on the RF copper cavity



图4 充 Kr 后, H<sub>2</sub>、CO 分压

Fig. 4 Spectrogram after charging Kr gas

为提高铌薄膜的质量和镀铌超导铜腔的超导 射频性能,需获得尽可能高的本底真空度<sup>[19-22]</sup>。对 于超高真空的获得,高温烘烤是提高真空度最有效 的方法。由于无氧铜材料无法耐受过高温度(高温 将使铜材料退火而降低强度),烘烤最高温度设为 400℃,以有效降低铜腔内部或表面的残余气体。镀 膜系统采用两台 350 L/s 分子泵抽气,经过图 5 所示 温度曲线烘烤后,在系统降温到 200℃ 时真空度达 到 3×10<sup>-7</sup> Pa,温度降至常温后真空度达到 5×10<sup>-8</sup> Pa 水平,此时残余气体主要以 H<sub>2</sub>、CO 为主。

衬底表面的处理对于提高铌薄膜的超导性能 非常关键<sup>[23]</sup>。同时,基底的粗糙度对薄膜的粗糙度 有很大的影响<sup>[24]</sup>。本实验中的基底表面处理流程为 机械抛光、超声波清洗、酸洗<sup>[25-26]</sup>。机械抛光用于 去除基底表面肉眼可见的划痕和缺陷,超声波清洗 在去油液作用下去除油污染,最后采用 CERN 铜表 面酸洗配方 SUBU 处理<sup>[27]</sup>。



Fig. 5 Curve of vacuum and baking temperature before coating

#### 1.2 样片腔铌薄膜制备

在高频铜腔镀膜前,采用尺寸与安装方式相同 的样片腔(采用不锈钢制作,用于安装铜、硅基底等 样片)进行镀膜参数的调试与优化。将无氧铜、单 晶硅等基底样片固定于样片腔的不同部位,用于表 征腔内各个位置的薄膜生长特性。将样片腔/铜腔 固定在镀膜室下端 CF400 法兰的底座上,如图 6 所 示。阴极靶固定在上端 CF400 法兰上且与镀膜腔 室同轴。将下端 CF400 法兰与样片腔/铜腔一起垂 直向上移动,然后与镀膜腔室封接。在安装中需保 证样片腔/铜腔与阴极靶同轴,以保证等离子体的正 常放电以及薄膜厚度在样片腔/铜腔内壁圆周方向 的均匀性。通过上下往复匀速移动磁环来控制等 离子体在阴极靶表面附近的移动,从而控制薄膜在

图6 1.3 GHz 腔放置在镀膜腔室底座。(a)样片腔,(b)铜腔 Fig. 6 1.3 GHz cavity placed in the base of the coating chamber. (a) sample cavity, (b) copper cavity

样片腔/铜腔内壁以较低的速率生长,并且薄膜厚度 在上下束管具有相同的均匀性。镀膜结束后待真 空腔内温度冷却至室温后,通入高纯氮气(5N)以破 坏真空取样。

#### 1.3 1.3 GHz 铜腔镀膜

通过样品腔的镀膜试验及其参数优化,合理的 镀膜参数为:衬底温度 200℃,真空度 3×10<sup>-7</sup> mbar (腔内温度 200℃),放电气压 0.5 Pa,占空比 0.6,脉 冲频率 35 kHz,放电电流 3 A,放电电压 450-580 V (随高频腔轴向形状结构变化而变化),镀膜时长 100 min,磁环在高频腔范围内以 1 mm/s 速度上下 扫描,赤道位置薄膜厚度 1 μm 左右,而束管位置 3 μm 左右。

#### 1.4 铌膜的表征与测试

采用德国布鲁克(Bruker)公司生产的 D8 Advance 高分辨 XRD 分析铌膜的晶相结构,并根据 Scherrer 公式计算出铌膜的晶粒尺寸。采用日本日立公司 生产的 S-4800 扫描电子显微镜对铌膜表面形貌以 及断面形貌进行观察。采用德国 Carl Zeiss 公司生 产的 Auriga 聚焦离子束扫描电镜(FIB)对铌膜内部 缺陷、微观结构进行观察。对于铌薄膜的 *T*c 值使 用的是美国量子设计公司型号 MPMS-3 的磁性测 量系统进行测试,实验中使用了零场冷(ZFC)和场 冷(FC)两种降温方式,测试的背景场大约为 100 Oe (远小于铌的 *H*el=170 mT)。

#### 2 结果与讨论

#### 2.1 沉积时长对铌膜内部缺陷的影响

薄膜缺陷的存在极大地提高了铌薄膜在高频 电磁场下的损耗,从而显著降低超导性能,是铜镀 铌腔 Q<sub>0</sub>值下降的重要原因。镀膜过程中的工作气 压、基底偏压、沉积时长、放电功率以及真空室清 洁度等对薄膜缺陷有显著影响<sup>[28]</sup>。实验研究结果表 明,铌膜内部缺陷密度随镀膜时间增加而增大,如 图 7 所示,在铌膜 1/2 厚度以下范围内缺陷空洞仅 有 2 个,但在厚度 1/2 以上范围内缺陷空洞数量明 显增大,达到 16 个,缺陷密度达 10.23/μm<sup>2</sup>,并且缺 陷空洞的孔径也在增大。这主要是由于在等离子 体震荡中,部分原子或分子逐渐聚集形核长大成为 颗粒;另外,溅射原子随机漂移扩散至镀膜室内壁 形成的的薄膜,随着放电时间增长而增大,最终导 致薄膜内部应力增加而脱落,脱落的薄膜以杂质形 式落在衬底上,充当形成缺陷的种子源,导致铌膜 内部缺陷随薄膜沉积时长增加而增多。



- 图7 薄膜内部缺陷 FIB 表征(*T*=600℃, *p*=0.47 Pa, *I*=1.53, 占 空比 0.99, *F*r=35 kHz, *t*=80 min, 磁铁相对高频腔的位置 固定, 样片位于 1.3 GHz 样片腔 iris 位置)
- Fig. 7 FIB characterization of internal film defects (T=600°C, p=0.47 Pa, I=1.53, duty cycle 0.99, Fr=35 kHz, t= 80 min, magnet position fixed relative to HF cavity, sample located at 1.3 GHz sample cavity iris position)

#### 2.2 真空室洁净度薄膜结合性能的影响

在实验前期,随着镀膜次数的增加,安装铜腔 的不锈钢真空腔室内有脱落的薄膜沉积。导致铌 薄膜在束管部位存在局部脱落问题,如图 8(a)所示。 因此每次镀膜实验前用 HF 酸、超声波清洗阴极铌 靶,并清洗连接腔体,最终铌薄膜脱落问题得到解 决,如图 8(b)所示。铌膜肉眼初步观察质量优异、



- 图8 铜腔镀铌后内壁观察对比。(a)Nb14 铜腔内壁铌薄膜 局部脱落,(b)Nb17 铜腔镀铌后的铜腔内表面
- Fig. 8 Comparison of observation of the inner wall of the copper cavity after niobium plating. (a) partial removal of niobium film from the inner wall of the Nb14 copper cavity, (b) inner surface of the copper cavity after niobium plating of the Nb17 copper cavity

结合力良好,并且在 50 MPa 高压水冲洗下和液氮 反复浸泡后薄膜无脱落起皮现象。

#### 2.3 铌薄膜的晶相结构

薄膜生长的晶体取向与沉积条件和衬底晶体 取向相关。A.R. Wildes<sup>[29]</sup>在总结外延生长和使用 溅射方法在单晶石英(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)基底上制备铌薄膜时, 发现铌膜的晶体取向主要有(110)、(001)、(111)、 (211)四种。本实验中的铌薄膜是在多晶无氧铜基 底表面生长所获得,XRD晶相图如图 9所示。 XRD结果表明,铌薄膜主要以(110)(200)(211) (220)取向生长。使用 XRD数据分析软件计算得 到的各个晶向下的晶粒度与晶粒尺寸如表 1 所示, 其中晶粒尺寸由式(1)计算得到。从表中可以看到, Nb(110)晶面的晶粒尺寸最大,为47 nm,但是晶粒 度却较低,为 30.9%。

$$D = K\lambda/\beta \cos\theta \tag{1}$$

式中,D为晶粒尺寸 (nm)。K为 Scherrer 常数,其 值为 0.89, 一般取 1。 $\lambda$ 为 X射线波长, Cu 靶为 0.154056 nm。 $\beta$ 为积分半高宽度,在计算的过程中, 需转化为弧度 (rad)。 $\theta$ 为衍射角。



图9 Nb17(下束管上端) 铌薄膜的 XRD 衍射图

Fig. 9 Nb17 (upper end of the lower beam tube) niobium film XRD

#### 表1 XRD 表征计算得到的铌薄膜各晶向晶粒度与尺寸

 
 Tab. 1
 XRD characterization of the calculated grain size and dimensions of niobium films in each grain direction

Crystal orientation	2 <i>θ/</i> (°)	Graininess%	Grain size/nm
(110)	39	30.9	47.0
(200)	56.1	94.1	39.1
(211)	70	82.2	27.5
(220)	82.9	92.8	30.1

### 2.4 高频腔内不同位置对铌薄膜超导转变温度的 影响

图 10 是 Nb17 薄膜升温测试过程中磁化强度 随温度的变化曲线 M(T),由于在超导转变温度附近, FC 曲线的取点不够密,结果误差大,因此根据 ZFC 曲线来确定 *T*<sub>conset</sub> 的数值:样品 Nb17(高频腔 cell 位 置)的 *T*<sub>conset</sub> 为 9.08 K,如图 10 左所示;样品 Nb17 (高频腔上束管位置)的 *T*<sub>conset</sub> 为 9.26 K,如图 10 右 所示。相比于高频腔束管部位, 椭球 cell 部位的半 径更大, 因此在镀膜过程中, cell 部位的铌原子入射 角范围分布更广, 极端情况下可能接近 90°, 导致该 位置的薄膜生长质量相比于束管部位产生更多表 面缺陷。这些表面缺陷在高频微波的作用下, 会导 致场致发射或者热溃失超等问题。所以铌薄膜的 超导转变温度束管区域高于 cell 区域, 并达到了铌 材的理论超导转变温度值。



图10 高频腔不同位置的 ZFC 和 FC 的 *m*(*T*) 测试曲线。(a)样品#Nb17 高频腔 cell 位置,(b)样品#Nb17 高频腔上束管位置 Fig. 10 *m*(*T*) test curves of ZFC and FC at different positions of RF cavity. (a) sample #Nb17 RF cavity cell position, (b) sample #Nb17 RF cavity upper beam tube position

#### 3 总结

采用直流磁控溅射法实现了 1.3 GHz 铜腔镀铌。 镀膜装置能够实现 10<sup>-8</sup> Pa 数量级的超高真空本底, 同时结合真空炉的设计思路, 镀膜腔室内温度能够 达到 600℃以上。通过移动磁体组件控制等离子体 在高频腔内的位置, 从而可以很好地控制薄膜的生 长速率以及薄膜的厚度, 从而实现了铌膜厚度在高 频腔轴向方向的均匀性。

在镀膜参数摸索阶段,首先采用与无氧铜原型 腔尺寸相同的样片腔,并在其内壁安装样片的方式 镀膜,便于薄膜表面形貌、晶相结构、超导转变温度 等参数的测试与表征。通过实验结果分析发现镀 膜腔室内的超高洁净环境是保证薄膜附着稳定、降 低薄膜内部缺陷密度的必要条件。

通过镀膜参数的优化, 在解决薄膜脱落问题后, 确定镀膜参数为: 衬底温度 200℃, 本底真空度 8×10<sup>-8</sup> Pa(腔内温度 200℃), 放电气压 0.5 Pa, 占空 比 0.6, 脉冲频率 35 kHz, 放电电流 3 A, 放电电压 450-580 V(随高频腔形状结构而变化), 镀膜时长 100 min 等, 完成编号 Nb19 铜腔的镀膜。镀膜结果 显示良好, 并完成了多次垂直测试。铜镀铌腔性能 在  $Q_0$ >10<sup>8</sup> 下达到了 5 MV/m, 对应峰值磁场 24 mT, 但同样存在 Q-slope 问题。作为国内研制的第一只 1.3 GHz 单 cell 铜镀铌薄膜超导腔, 虽与国外镀膜腔 的结果存在一定差距, 但该腔垂测结果表明已实现 超导, 且未见明显缺陷, 这为后续进一步改善铌膜 质量, 提高镀膜超导腔性能, 以及尝试在铜基底上 进行其他超导材料(NbN、Nb<sub>3</sub>Sn)的镀膜奠定了良 好的基础。

#### 参考文献

- [1] Eremeev G, Clemens W, Macha K, et al. Nb<sub>3</sub>Sn multicell cavity coating system at Jefferson Lab[J]. Rev Sci Instrum, 2020, 91(7): 073911
- [2] Beebe M R, Valente-Feliciano A, Beringer D B, et al. Temperature and microstructural effects on the superconducting properties of niobium thin films[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4): 1–4
- [3] Burton M, Beebe M, Lukaszew R A, et al. RF results of Nb coated SRF accelerator cavities via HiPIMS[C]. proceedings of the LINAC, F, 2018
- [4] Deambrosis S M, Keppel G, Ramazzo V, et al. A15 superconductors: an alternative to niobium for RF cavities[J]. Physica C:Superconductivity, 2006, 441(1-2): 108–13
- [5] Chromik Š, Benacka Š, Gaži S, et al. Superconducting

properties of MgB<sub>2</sub> thin films prepared by sequential deposition of boron and magnesium[J]. Vacuum, 2002, 69(1-3): 351-4

- [6] Ni Zhimao. Metal substrate MgB<sub>2</sub> thin film preparation and RF performance study[D]. Beijing: Peking University, 2017 (倪志茂. 金属衬底 MgB2薄膜制备与射频性能 研究[D]. 北京: 北京大学, 2017(in chinese))
- [7] Marino M. Study of nbtin coatings by reactive magnetron sputtering for the production of 1.5 GHz superconducting accelerating cavities [R]. 1997
- [8] Fabbricatore P, Fernandes P, Gualco G, et al. Study of niobium nitrides for superconducting RF cavities[J]. Journal of applied physics, 1989, 66(12): 5944
- [9] Ma Yongsheng, Zhang Pei, Dong Haiyi. Latest progress in Nb-coating synthesized on wall of superconducting RF Cu-cavity: a review study[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2020, 40(03): 255-61 (马永胜,张沛, 董海义. 超导高频铜腔镀铌研究进展[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(03): 255-61(in chinese))
- [10] Abada A, Abbrescia M, AbdusSalam S S, et al. Fcc-ee: The lepton collider[J]. The European Physical Journal Special Topics, 2019, 228(2): 261–623
- [11] Group T C S. Cepc conceptual design report [J]. 2018, Volume I - Accelerator
- [12] Rosaz G, Aull S, Ilyina E, et al. Srf cavity coatings: Review of alternative materials and coating techniques [J]. 2017
- [13] Hao Jiankui, Zhao Kui, Zhang Baocheng, et al. Study of copper-niobium sputtered superconducting quadratic A study of one-fourth wavelength resonant cavities by copper-niobium sputtering[J]. Nuclear Technology, 2000, 1: 36-8 (郝建奎, 赵夔, 张保澄, 等. 铜铌溅射超导四分之一波长谐振腔的研究[J]. 核技术, 2000, 1: 36-8(in chinese))
- [14] Hao Jiankui, Zhao Kui, Zhang Baocheng, et al. Development and preliminary experiments of copper-niobium sputtered low B superconducting cavities[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2001, 25(6): 582-7 (郝 建奎, 赵夔, 张保澄, 等. 铜铌溅射型低 B 超导腔的研制 及初步实验[J]. 高能物理与核物理, 2001, 25(6): 582-7(in chinese))
- [15] Pan F, Tan T, Xiong P, et al. Nb sputtered 325 MHz QWR cavities for CIADS; proceedings of the Journal of Physics: Conference Series, F, 2020[C]. IOP Publishing
- [16] Rosaz G, Ilyina K, Calatroni S, et al. A15 materials thin

films and HiPIMS progress at CERN for SRF cavities[R]. Geneva, Switzerland: CERN, 2016

- [17] C. Benvenuti , S. Calatroni , Campisi I E, et al. Study of the surface resistance of superconducting niobium films at 1.5 GHz[J]. Physica C 316 1999 153–188, 1999, 316 153–88
- [18] Anders A. Deposition of niobium and other superconducting materials with high power impulse magnetron sputtering: Concept and first results[J]. 2011
- [19] Malev M, Welsser D. Performance of Nb-coated 150 NHz QWR crippled by electron-stimulated desorption[J]. 6th SRF USA
- [20] Svedberg E B, Jemander T S, Lin N, et al. Epitaxial growth of UHV magnetron sputtered Mo thin films on MgO(001) substrates, oxygen segregation and surface reconstructions[J]. Surface Science, 1999, 443(1): 31–43
- [21] Benvenuti C, D. Bloess, Chiaveri E, et al. Superconducting cavities produced by magnetron sputtering of niobium on copper[J]. SRF 87 USA, 1987
- Benvenuti C, Calatroni S, Darriulat P, et al. Study of the residual surface resistance of niobium films at 1.5 GHz[J].
   Physica C Superconductivity, 2001, 351(4): 421–8
- [23] Bloess D. Sputter-coated superconducting RF cavities for LEP: A technological challenge[J]. Vacuum, 1996, 47(6-8): 597–600
- [24] Valente-Feliciano, Anne-Marie. Superconducting RF materials other than bulk niobium: A review[J]. Superconductor Science & Technology, 2016
- [25] Yang F, Zhang P, Dai J, et al. Surface preparation by mechanical polishing of the 1.3-GHz mono-cell copper cavity substrate prior chemical etching for niobium coating[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2020
- [26] Yang F, Zhang P, Dai J, et al. Study of surface treatment of 1.3 GHz single-cell copper cavity for niobium sputtering[J]. 2020
- [27] C Pira C A, A Katasevs, O Kugeler, et al. Evaluation of cleaning process [J]. 2018
- [28] Ma Yongsheng, Yang Yuchen, Jing Yongmiao, et al. A review of advances in the study of thin film defects[J]. Surface Technology, 2021, 50(3): 91-100 (马永胜, 杨雨 晨, 景泳森, 等. 薄膜缺陷研究进展综述[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 91-100(in chinese))
- [29] Wildes A R, Mayer J, Theis-Bröhl K. The growth and structure of epitaxial niobium on sapphire[J]. Thin Solid Films, 2001, 401(1): 7–34