

超导高频铜腔镀铌研究进展

马永胜^{1,2*} 张沛¹ 董海义^{1,2}

(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)

Latest Progress in Nb-Coating Synthesized on Wall of Superconducting RF Cu-Cavity: A Review Study

Ma Yongsheng^{1,2*} Zhang Pei¹ Dong Haiyi^{1,2}

(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 The latest progress in deposition of Nb-coatings on superconducting RF copper-cavity wall was tentatively reviewed. The discussions with specific examples focused on: i) the advantages over bulk Nb-cavity, including high thermal/mechanical stability, insensitivity to DC magnetic field, separation of RF/thermal performance, optimization of BCS-resistance and low fabrication cost; ii) the existing problem of severe Q-slope, particularly in medium acceleration gradient (10 ~ 15 MV/m), became worse with an increase of frequency; iii) the advanced coating technologies, including the high power magnetron sputtering, cathode arc deposition, e-beam plasma evaporation deposition, laser pulse deposition, for reduction of defects, increase of Nb compactness, improvement of interfacial adhesion and for synthesis of multilayers and composite coatings; and iv) the basic studies, such as the influence of trapped O₂/H₂/N₂ on surface residual resistance and Q-slope formation mechanisms. The Nb-coated cavities have been successfully operating in LEP and LHC accelerators for many years.

Keywords Thin films Superconducting RF cavities Sputtering Nb films Superconducting

摘要 随着粒子加速器超导高频技术的发展,超导高频腔的加速梯度与 Q₀值已接近纯铌材料的极限。然而,相比纯铌材超导高频腔,铜镀铌腔具有热稳定性高、机械稳定性高、对于直流磁场不敏感、RF性能和热性能可分离、优化的BCS电阻等优点。但目前铜镀铌腔在中等加速梯度(10~15 MV/m)下有较为严重的Q值下降,而且随超导腔的频率增加其下降趋势增大。近年来,镀膜超导高频腔的研究热点主要集中在:①通过采用能量更高的沉积技术,如:高功率脉冲磁控溅射、阴极电弧法、电子束等离子体蒸镀法、激光脉冲沉积等方法,降低薄膜内缺陷,提高薄膜的致密度,薄膜与衬底的结合力;②通过研究薄膜中氧、氢等杂质含量对表面剩余电阻等的影响,进而分析引起Q值下降的原理;③研发性能更优的多层膜结构以及新型沉积方法等。铜镀铌腔在LEP、LHC等粒子加速器中已经得到应用,并且稳定运行多年,证明其工程应用的可靠性与实际意义。

关键词 铌薄膜 铜腔镀铌 超导高频腔 溅射 超导

中图分类号: TL503.2

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjovst.2020.03.13

1 铜镀铌超导腔的研究意义

1.1 铜镀铌超导腔的发展背景

自20世纪60年代以来,超导高频腔技术已逐渐成为粒子加速器领域的一项重要技术。超导高频腔以其加速电压高、束流阻抗小和运行费用低等优点

成为当今国际和国内拟建的大型对撞机和光源的首选。自1965年SLAC实验室首次成功将超导技术应用到高频腔上以来,超导腔的设计建造和后续处理技术不断进步,超导腔性能不断提高,数已百计的超导高频腔安装在世界各个研究所和大学的各种

加速器装置上,并且稳定运行多年。目前的研究热点集中在如何进一步提高超导腔的加速梯度和品质因数。

自90年代以来,超导高频技术取得了长足的进展,主要分为两个技术路线:第一,使用高纯铌材料(bulk niobium)来制造超导腔用以提高超导腔的低温热稳定性,并且对超导腔内表面的后处理工艺进行了诸多改进,尤其是近年来发展出的在纯铌腔内表面掺氮或镀 Nb_3Sn 来提高超导腔的品质因数(Q_0),从而降低低温下损耗在腔壁上的RF功率^[1-2]。

第二,作为不同于纯铌超导腔的第二条技术路线,上80年代CERN发明了铜腔镀铌技术^[3],用铜腔作为基底,在高频铜腔的内表面通过磁控溅射方法镀一层 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 厚的铌薄膜,从而在低温下实现超导。Benvenuti等使用磁控溅射法在铜腔上镀铌,起初 Q 值较低并存在严重的“ Q -slope”现象,即 Q 值随着加速梯度 E_{acc} 的增加而出现下降,该技术经过多次改进,已经成功应用在CERN的LEP II (352 MHz @ 4 K)和LHC (400 MHz @ 4 K)加速器以及INFN的ALPI重离子加速器上,或将来的HIE-ISOLDE (CERN)^[6]。LEP II以及LHC已经实现多年稳定运行,镀铌层未发现脱落,也未发现超导腔性能因镀铌层变化而导致的下降^[4]。

1.2 铜镀铌超导腔的优点

相比纯铌腔,镀铌铜腔具有以下几大优点^[4,7]。

(1) 热稳定性高:在4 K温度下,高纯铜(RRR ~ 300)的热导率约为 $2000\ \text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$,比高纯铌(RRR ~ 300)的热导率($\sim 142\ \text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)高出至少1个量级。如果超导腔内表面出现局部缺陷或附着灰尘颗粒,对于纯铌腔来说容易造成局部发热而导致失超,但是对于镀铌铜腔来说,由于铜基底的热导率较高,不易形成因热量聚集而导致的局部热点,因而显著提高了超导腔的热稳定性。并且可以帮助铌薄膜抑制multipacting和场致发射^[5-6]。这一点上,镀铌铜腔与纯铌腔相比具有压倒性的优势。

(2) 机械稳定性高:由于铜腔基底的壁厚较纯铌腔大许多(2~3倍),因而机械稳定性更高,麦克风效应较纯铌腔大为减小,从而能够显著提高超导腔低电平控制的稳定度。

(3) 对于直流磁场不敏感:和纯铌相比,铌薄膜在向超导态过渡时对周围直流磁场的敏感度低至少一个量级,例如,地磁场对纯铌腔磁通引起的表面电阻贡献

为 $10^6\ \text{n}\Omega/\text{T}$,而对Nb薄膜的仅为 $10^4\ \text{n}\Omega/\text{T}$ ^[6]。因此镀铌铜腔可以不需要磁屏蔽,从而大大简化了恒温器设计^[5]。

(4) RF性能和热性能可分离:对于纯铌腔来说,为了提高热稳定性,需要RRR值较高的铌材(RRR ~ 300),但是BCS电阻值则在RRR较低(10~20)的区域内最为优化,因而对于铌材有着相互制约的要求。但是对于镀铌铜腔,铜腔基底提供了优异的热性能,而表面的铌薄膜则负责超导功能,这样就使得传热和RF两方面的需求分离并且可以分别得到满足。

(5) 优化的BCS电阻:由于镀铌层的RRR值较低(10~50),相应的BCS电阻值处于较低的区间,从而优化了腔的表面电阻值,进而改善了腔的低温功率损耗,这使得很多在2 K下运行的超导系统有望实现4 K运行。

(6) 高频腔制造难度低:相比纯铌腔的制造,铜腔制造工艺更为成熟。另一方面,如果纯铌腔的内表面在制造和后处理方面出现问题从而导致腔的低温性能不理想,能够采取的补救措施很有限。铜镀铌腔则不同,一旦出现问题,可以采用化学腐蚀去掉铌薄膜层,并重新进行镀铌,实现了铜腔基底的多次反复使用,从而提高了超导腔的成品率。

(7) 有利于环境保护:与纯铌腔化学抛光所使用的毒性较大的氢氟酸相比,铜的化学抛光处理使用的氨基磺酸毒性较小,对环境的危害更小。

(8) 造价低:高纯铌材的价格是无氧铜的30倍左右,且材料的供货周期长,这对尺寸较大(频率较低)的超导腔来说,费用上的节省还是很可观的。另外,由于不需要磁屏蔽、加工简单且成品率高、可以4 K运行等方面,也使得镀铌铜腔的制造成本更低。

(9) 在镀铌的基础上可以发展具有更高转变温度的超导薄膜,例如 $NbTiN$, $NbTi$, V_3Si , Nb_3Sn ,HTS, MgB_2 等^[5]。

1.3 铜镀铌超导腔存在的问题

除了以上所列的优点之外,也需要看到,镀铌腔在中等加速梯度(10~15 MV/m)下有较为严重的 Q 值下降(Q -slope),如图1所示,而且随频率增加下降趋势增大^[1]。但是,根据过去多年的运行经验,相信镀铌腔可以获得与纯铌腔相近的品质因数^[4]。通过镀膜获得优良的超导腔成为当前国际超导射频研究的热点,具有很大的应用前景及研究意义^[4,9]。

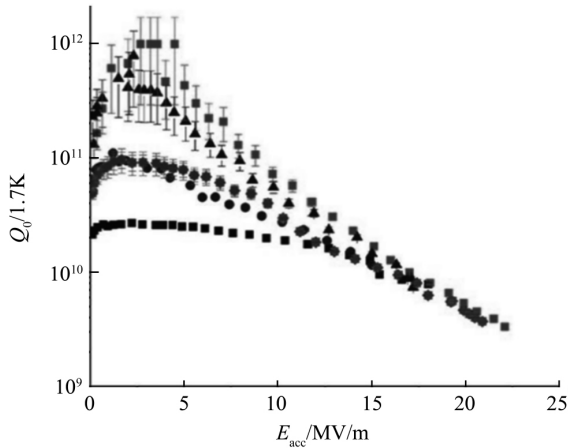


图1 升级铜腔表面清洗工艺后镀铌腔 Q 值品质因数与加速梯度的变化关系, 所有薄膜采用Kr作为溅射气体

Fig.1 Influence of the acceleration gradient on the quality factor Q

2 铜腔镀铌技术研究方向

近年来, 超导高频腔的研究热点主要集中在提高铌薄膜的致密度, 提高薄膜与衬底的结合力, 降低薄膜内缺陷, 降低铌薄膜中氧、氢等杂质含量, 研发性能更优的多层膜结构以及新型沉积方法等。下面详细介绍铜腔镀铌技术的研究现状与方向。

2.1 薄膜杂质对 Q 值的影响

各实验室在提高镀铌腔 Q 值即解决 Q -slope 问题上也做了大量研究, S. Calatroni^[5] 认为在高能量原子沉积过程中需要严格控制 H_2 分压, Anne-Marriner^[6] 认为氢是纯铌腔与镀铌腔耗散损失的主要来源, 但是在镀膜过程中通过吸气剂泵降低 H_2 含量后, Q 值降低并没有得到改善。V. Arbet-Engels 以及 C. Benvenuto 等通过研究表面电阻发现, 无氧铜与氧化铜基体镀铌表面剩余电阻相当。为防止在高梯度下失超, 纯铌腔要求高纯度铌以提高导热率; 而对于镀铌腔, 铜基体本身具有很好的导热性能, 所以较低纯度铌反而有更好的优势, 例如对杂散磁场不敏感、较低的 BCS 阻抗; 对于镀铌腔, 铌的纯度不是影响高频性能的主要原因。铜基底表面处理情况决定了镀铌腔的高频性能^[10]。也有研究表明气体杂质污染对所镀铌膜的 RRR 值降低的影响, 杂质引起的磁通钉扎效应对磁通引起的阻抗 R_n 具有抑制作用^[11-27]。CERN 在改进镀铌铜腔前后清洗流程后, Q 值有很大提高, 并且 E_{acc} 在小梯度 ($0 \sim 3$ MV/m) 时, 出现了掺氮 (N-doping) 腔的典型特征, 随着加速梯度的增加 Q 值反而增加, 如图 1 所示, 这很可能是杂质充当了散射中心, 从而降低了 RF 损失^[6]。

与此同时, 德国的 Wuppertal 大学通过高温气体扩散技术制造了镀有 Nb_3Sn 的铜腔, 但因为高温炉中的氢气扩散到了 Nb_3Sn 膜中导致 Q 值降低, 从而证明超高真空的镀膜环境至关重要^[14]。

2.2 镀膜方法相关研究

镀铌铜腔自上世纪 80 年代在 CERN 问世以来^[3], Benvenuti 等使用直流磁控溅射 (Direct Current Magnetron Sputtering) 法在铜腔上镀铌, 但 Q 值较低并存在严重的“ Q -slope”现象。Valente-Feliciano 等^[17] 研究了沉积能量对铌膜高频性能的影响。有学者认为直流磁控溅射不能提供足够高的能量, 溅射原子 Nb 在基体的流动性很差, 从而形成的薄膜具有较高的缺陷, 导致 Nb/Cu 高频腔高频性能较差, 所以发展了高能量离子沉积技术, 如高功率脉冲磁控溅射 (High power impulse magnetron sputtering (HIPIMS))、阴极电弧法 (Cathodic arc deposition)、电子束蒸发 (ECR) 等离子体蒸发法、激光脉冲沉积法^[32]。

高功率脉冲磁控溅射 (HIPIMS) 方法可以获得高密度 (10^{13} cm^{-3}) 等离子体^[29]。峰值功率密度可达 2.8 kW/cm^2 , 并可在基体获达 3.4 A/cm^2 的电流密度 (常规磁控溅射技术约为 100 mA/cm^2), 靶材粒子离子率达 100% ^[30]。HIPIMS 对于 SRF Nb/Cu 沉积技术具有很大的应用潜力, 目前已被 Jefferson Lab, Lawrence Berkley National Laboratory (LBNL) 以及 CERN 等实验室应用于 SRF Nb/Cu^[6]。从图 2 可以看出, 相比 DCMS 方法, HIPIMS 方法 Nb/Cu 腔高频性能在 $2.0 \sim 2.1 / 4.2 \text{ K}$ 时均有提高, 但仍并未有效解决 Q -slope 的问题^[15]。Gustafsson 等用 HiPIMS 在铜腔表面镀铌, 铌薄膜与铜基底结合非常

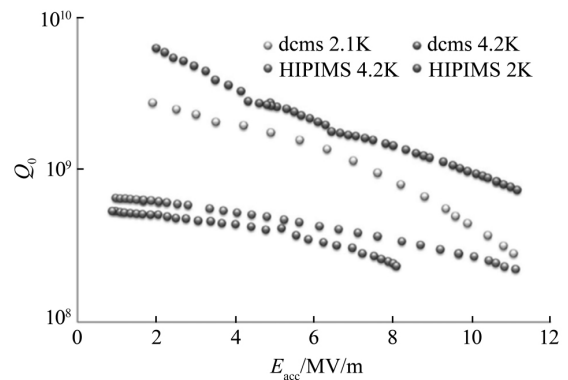


图2 两只单cell椭圆腔在DCMS和HIPIMS方法镀铌后的品质因数

Fig.2 Quality factors of two cavities with Nb-coatings grown by DCMS and/or HiPIMS

紧密产生了邻近效应,提高了镀铌铜超导腔的性能^[20]。

ECR在超高真空环境产生大通量 Nb^+ 并在偏压的作用下加速,从而产生高能 Nb^+ ,并且几乎以单个 Nb^+ 为主。这些优点使得ECR方法可以控制沉积离子的能量,同时能够避免液滴现象出现,形成

的薄膜具有很强的粘附力以及更高的纯度,例如H含量比纯铌腔低了几个量级^[6],从而获得了较高的RRR(67)值,如图3所示^[9]。ECR方法还可以获得高质量多层复合薄膜^[8]:超导-绝缘-超导SIS(super-conductor-insulator-superconductor)。

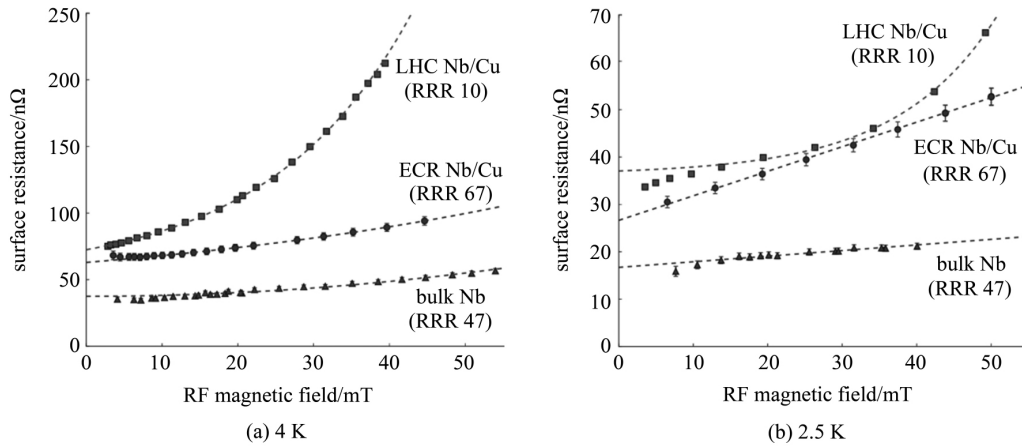


图3 400 MHz 铜腔采用ECR方法沉积铌薄膜后其表面电阻与RF磁场的关系

Fig.3 Influence of the RF magnetic field on the surface-resistance of the bulk Nb-cavity and Nb-coated Cu-cavities

阴极电弧沉积方法UHVCA是一种采用低电压、高电流、等离子体在真空中两个金属电极之间发生放电的沉积方法,其镀膜装置结构如图4所示^[23-34]。是在超高真空环境下成膜,同时通过调节偏压可以获得大于100 eV能量的垂直入射的沉积离子 Nb^+ ,可以获得较为高质量与高纯度的Nb薄膜^[33]。引起Q-slope的原因有很多解释模型,Palmeri模型认为电子平均自由长度是引起Nb/Cu与纯铌腔Q-slope的主要原因。James等用共轴阴极电弧沉积法在铜腔表面镀铌,得到的铌薄膜RRR > 100,与纯铌腔接近,且铌薄膜附着性很强,为镀铌铜腔代替纯铌腔创造了可能^[21]。

2016年F. Gontad等^[24]采用激光脉冲沉积法,基体温度在300~600 K镀铌并发现在570 K时,薄膜表面形貌以及粗糙度得到改善,但是通过扫描电镜(SEM)发现,晶体结构并未有明显改善。

CERN为HIE-ISOLDE加速器上使用的四分之一波长腔(QWR)设计制造了铜腔表面处理和镀铌设备,经过几年的尝试,最终使用直流偏压镀膜技术实现了镀铌QWR腔较好的超导性能^[16]。

2.3 镀膜工艺相关研究

利用磁铁在阴极靶体内上下移动控制不同部位的溅射参数和溅射时间,腔体内表面铌膜厚度波动

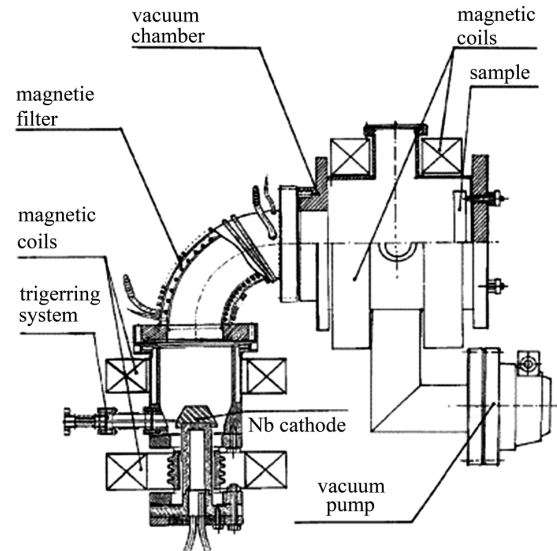


图4 过滤液滴式UHVCA沉积机构示意图,阳极与阴极间产生等离子体,在磁场的作用下液滴被过滤

Fig.4 Schematic diagram of the UHVCA coating reactor

控制在15%;利用酸洗溶液循环系统代替浸泡式,降低了化学处理对腔的污染;采用过滤后的高纯水,高压水冲洗等手段改善铜腔预处理^[13];200 mbar过滤氮气加热烘烤腔体改善腔表面清洁程度;使得Q值大大提高但依然存在Q-slope的问题。

镀膜后对腔体进行高压高纯水冲洗,可以使超导

腔射频性能得到显著改善^[22]。当溅射角增大时,由于薄膜形貌的改变以及薄膜行为的重构,导致超导性能随之下降^[25]。但是,通过阴极弧沉积法研究发现离子入射角度与 RRR 值并没有明显的相互关联^[33]。通过对比 100 级洁净与有灰尘环境下组装样品镀膜发现,在有灰尘环境下得到的薄膜孔隙率为 10^{-4} 量级,而无尘环境下为 10^{-7} 量级^[31]。采用 DCMS 方法发现:工艺气压由 1.2 降低为 0.18 Pa 时,转变温度由 2 升高为 7.9 K;基体温度在 400°C 时薄膜表面粗糙度最低,并且相应地转变温度最高为 7.9 K;溅射功率在 150 W 时,转变温度最高为 7.9 K^[28]。

2.4 复合薄膜相关研究

Roach 等^[18]研究了在铌膜表面镀 NbN/MgO 超导-绝缘-超导(SIS)多层膜,以此屏蔽过高磁场以得到更高的加速梯度。Beebe 等^[19]研究了 NbN 薄膜的晶格参数和超导转变温度之间的线性关系,为该膜应用于 SIS 多层结构打下了基础。与纯铌的转变温度 9.2 K 相比,Cu-NbN-Nb 薄膜的转变温度为 9.5 K^[26]。

2.5 Nb/Cu 腔工程运行情况

多年来,欧洲和美国多个大学和实验室对此项技术进行了深入研究,并成功地应用在 CERN 的 LEP 和 LHC 加速器以及意大利 INFN 的 ALPI 重离子加速器上。CERN 并将镀铌技术实现流程化,应用于 LEP 的 216 只镀铌超导镀铌腔由三家公司合作完成,实现了完善的工艺制造流程。其中部分镀铌腔 Q 值测试结果如图 5 所示。

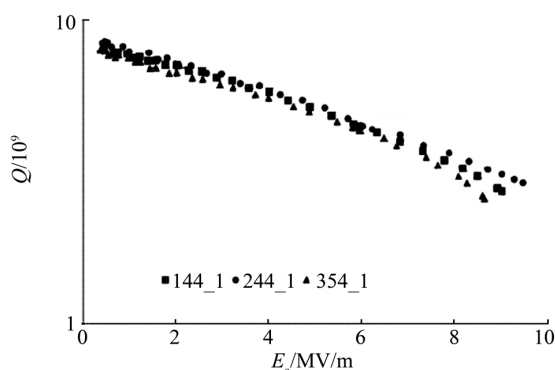


图5 325 MHz 4.5 K腔性能曲线,分别为意大利 Ansaldo(144-1),法国 CERCA, France(244-1),德国 Siemens(354-1) 三家欧洲公司镀膜结果

Fig.5 Typical behavior of the Nb-coated cavities reported by the companies in Italy, France and Germany

LHC 16 只单 cell 400 MHz 镀铌腔在 LEP 的基

础上改进了清洗工艺,加速梯度超过了 10 MV/m,如图 6 所示,并且指出高频腔的清洗结果决定了场致发射在影响加速梯度中的比重,而 Nb 薄膜本身并没有引起高频性能降低的固有缺陷^[5]。

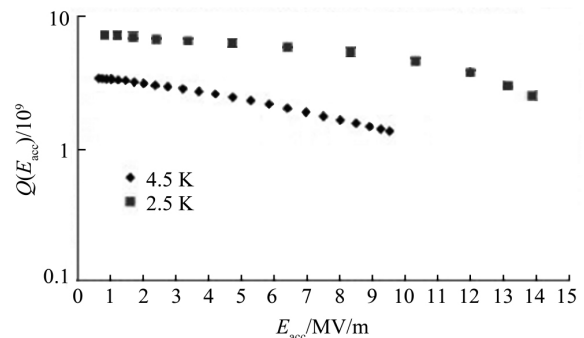


图6 LHC 400 MHz 批量镀铌腔性能曲线,性能指标 $Q = 2 \times 10^9 @ E_{acc} = 5.5 \text{ MV/m } 4.5 \text{ K}$

Fig.6 Typical performance of the commercial LHC 400 MHz cavity

LEP2 的成功运行表明大规模运用铜镀铌腔的可行性。LEP 曾使用 272 只运行在 4.5 K 下的 352 MHz TM_{010} 模 4-cell 腔,在多年的运行中没有发生较大的问题,反而是运行梯度比设计值高了 1 MV/V,达到 7 MV/m^[13]。

近年来,为了建造 LHC 的备用腔,CERN 又重新启动了椭圆腔镀铌的研究项目,另外 CERN 计划中的 FCC 对撞机也把镀铌腔作为研究的重点,相关研究已于 2015 年启动^[16]。

与国际研究现状形成对比的是,国内在铜腔镀铌膜方面的研究却较少。上世纪 90 年代末北京大学曾经进行过 QWR 的镀铌实验^[35]。2002 年北京大学用直流偏压溅射法在平板基底上镀铌,发现在铜铌之前镀一层 NbN 薄膜可将铌膜的超导转变温度提高到 9.6 K,但其物理机理尚不清楚,且整个 QWR 腔的镀膜技术仍有待进一步研究^[36]。

3 结论

铜镀铌超导腔在中等加速梯度(10 ~ 15 MV/m)下有较为严重的 Q -slope,而且随超导腔的频率增加其下降趋势增大。研究发现降低铌薄膜中的氢含量,并未改善镀铌腔 Q 值;而无氧铜与氧化铜基体镀铌表面剩余电阻相当,故有学者认为杂质引起的磁通钉扎效应对磁通引起的阻抗 R_{fl} 具有抑制作用。为提高 Nb 原子的沉积能量,从而提高铌薄膜的致密度,降低缺陷,提高镀铌腔的高频性能。HIPIMS

方法在一定程度上提高了镀铌腔的 Q 值,但 Q -slope 现象依然存在。阴极电弧 (Cathodic arc deposition) 法、ECR 等离子体蒸镀法提高了铌薄膜的 RRR 值分别至 67 和 100,但腔 Q 值还没有测试的报道。通过移动阴极靶内部磁铁位置将薄膜厚度分布控制在 15% 以内;利用高压水冲洗镀膜腔,显著改善了其高频性能;分别对比 100 级洁净间与有灰尘环境下组装样品镀膜腔发现:100 级环境下薄膜孔隙率明显降低为 10^{-7} 量级,有效改善薄膜质量。在镀铌腔应用方面,大型对撞机 LEP 和 LHC 加速器以及意大利 INFN 的 ALPI 重离子加速器已稳定运行多年,这为国内镀铌超导高频腔的应用起了良好的借鉴作用。

参 考 文 献

- [1] Grassellino A, Romanenko A, Sergatskov D, et al. Nitrogen and Argon Doping of Niobium for Superconducting Radio Frequency Cavities: A Pathway to Highly Efficient Accelerating Structures [J]. *Superconductor Science and Technology* 2013, 26(10): 145–146
- [2] Posen S, Liepe M, Hall D L. Proof-of-Principle Demonstration of Nb₃Sn Superconducting Radiofrequency Cavities for High Q_0 Applications [J]. *Applied Physics Letters* 2015, 106(8): 955–889
- [3] Benvenuti C, Circelli N, Hauer M. Niobium Films for Superconducting Accelerating Cavities [J]. *Applied Physics Letters* 1984, 45(5): 583–583
- [4] Arbet-Engels V, Benvenuti C, Calatroni S, et al. Superconducting Niobium Cavities, A Case for the Film Technology [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment)* 2001, 463(1–2): 1–8.
- [5] Calatroni S. 20 Years of Experience with the Nb/Cu Technology for Superconducting Cavities and Perspectives for Future Developments [J]. *Physica C* 2006, 441(1–2): 95–101
- [6] Anne-Marie, Valente Feliciano. Superconducting RF Materials Other Than Bulk Niobium: A Review [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2016, 29(11): 113002–1130034.
- [7] Benvenuti C, Calatroni S, Campisi I E, et al. Study of the Surface Resistance of Superconducting Niobium Films at 1.5 GHz [J]. *Physica C*, 1999, 316(3–4): 153–188.
- [8] Russo R, Catani L, Cianchi A, et al. Niobium Coating of Cavities Using Cathodic Arc [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 2009, 19(3): 1394–1398.
- [9] Aull S, Junginger T, Sublet A, et al. On the Understanding of Q -Slope of Niobium Thin Films [C]. *Proceedings of SRF2015, TUBA03* 2015.
- [10] Arbet-Engels V, Benvenuti C, Calatroni S, et al. Superconducting Niobium Cavities, A Case for the Film Technology [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A (Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment)* 2001, 463(1–2): 1–8
- [11] Benvenuti C, Circelli N, Hauer M, et al. Superconducting 500 MHz Accelerating Copper Cavities Sputter-Coated with Niobium Films [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1985, 21(2): 153–156
- [12] Benvenuti C, Calatroni S, Darriulat P, et al. Study of the Residual Surface Resistance of Niobium Films at 1.5 GHz [J]. *Physica C* 2001, 351(4): 421–428
- [13] Bloess D. Sputter-Coated Superconducting RF Cavities for LEP: A Technological Challenge [J]. *Vacuum*, 1996, 47(6–8): 597–600
- [14] Peiniger M, et al. Work on Nb₃Sn Cavities at Wuppertal [C]. *Proceedings of The Third Workshop on RF Superconductivity, SRF87E04*, 1987
- [15] Terenziani G, Aviles Santillana I, Calatroni S, et al. Nb Coating Developments with HIPIMS for SRF Applications [C]. *Proceedings of SRF2013, TUP078* 2013
- [16] Sublet A, Aull S, Bártová B, et al. Developments on SRF Coatings at CERN [C]. *Proceedings of SRF2015, TUPB027* 2015
- [17] Valente-Feliciano A-M, Phillips H L, Reece C E, et al. RF and Structural Characterization of New SRF Films [C]. *Proceedings of SRF2009, TUP0084* 2009
- [18] Roach W. Niobium Nitride Thin Films and Multilayers for SRF Applications [C]. *Bulletin of the American Physical Society* 2013
- [19] Beebe M R, Beringer D B, Burton M C, et al. Stoichiometry and Thickness Dependence of Superconducting Properties of Niobium Nitride Thin Films [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces and Films* 2016, 34(2): 0215100–0215104
- [20] Gustafsson A, et al. New Methods for Thin Film Deposition and First Investigation of the Use of High Temperature Superconductors for Thin Film Cavities [C]. *Proceedings of IPAC'10, WEPEC047* 2010
- [21] James C, Krishnan M, Bures B, et al. Superconducting Nb Thin Films on Cu for Applications in SRF Accelerators [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 2013, 23(3): 3500205–3500205
- [22] 张 焱. 超导 RFQ 模型腔的铌溅射研究和 V₃Si 超

- 导膜材制作工艺[D]. 中国原子能科学研究院 2000
- [23] Langner J ,Mirowski R , Sadowski ,et al. Deposition of Superconducting Niobium Films for RF Cavities by Means of UHV Cathodic Arc [J]. *Vacuum* ,2006 ,80 (11) : 1288 – 1293
- [24] Gontad F ,Lorusso A ,Manousaki A ,et al. Morphology and Structure of Nb Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition at Different Substrate Temperatures [J]. *Journal of Materials Science & Technology* ,2016 ,32 (11) : 1192 – 1196
- [25] Lanza G ,Bermudez J ,Frigo A ,et al. New Magnetron Configurations for Sputtered Nb Onto Cu [J]. *Physica C* 2006 ,441(1 – 2) : 102 – 107
- [26] Hao J ,Jiao F ,Xie D ,et al. Improvements of Performance on Sputter-Coated Niobium Films for Superconducting Cavities by Adding a NbN Interlayer [J]. *Physica C* , 2006 ,450(1 – 2) : 101 – 104
- [27] Benvenuti C ,Calatroni S ,Darriulat P ,et al. Fluxon Induced Surface Resistance and Field Emission in Niobium Films at 1.5 GHz [J]. *Physica C* 2001 ,361(1) : 31 – 39
- [28] 李 岚. 纳米多孔结构 Nb 基超导薄膜的制备及输运特性研究[D]. 成都: 电子科技大学 2018
- [29] M. Hřla ,Čapek J ,Zabeida O ,et al. Pulse Management in High Power Pulsed Magnetron Sputtering of Niobium [J]. *Surface & Coatings Technology* ,2012 ,206(19 – 20) : 4186 – 4193
- [30] 吴志立 ,朱小鹏 ,雷明凯. 高功率脉冲磁控溅射沉积原理与工艺研究进展 [J]. *中国表面工程* ,2012 ,25 (05) : 15 – 20
- [31] Amorosi S ,Benvenuti C ,Chiggiato P ,et al. Experimental Evaluation of Niobium film pinholes [J]. *Vacuum* 2001 , 60(1) : 275 – 278
- [32] 彭明娣. 脉冲激光沉积制备铌金属超导薄膜的研究 [D]. 北京: 北京交通大学 2018
- [33] Catani L ,Cianchi A ,Lorkiewicz J ,et al. Cathodic Arc Grown Niobium Films for RF Superconducting Cavity Applications [J]. *Physica C* ,2006 ,441(1 – 2) : 130 – 133
- [34] Bendavid A ,Martin P J ,Kinder T J ,et al. The Deposition of NbN and NbC Thin Films by Filtered Vacuum Cathodic arc Deposition [J]. *Surface & Coatings Technology* 2003 ,163 – 164(none) : 347 – 352
- [35] Hao J K ,Zhao K ,Zhang B C ,et al. Superconducting Tests and Beam Load Experiments on Niobium-Coated Copper QWR at PKU [C]. *Proceedings of The Second Asian Particle Accelerator Conference ,WEAMO 2001*
- [36] 孟铁军 ,赵 夔 ,谢大弢 ,等. 改进铜铌溅射型 QWR 超导腔性能的探讨 [J]. *物理学报* ,2003 ,(06) : 1515 – 1519