

# 提高射频超导加速腔性能的表面干式处理研究<sup>\*</sup>

郝建奎<sup>†</sup> 焦 飞 黄森林 朱 风 赵 夔

(北京大学重离子物理教育部重点实验室,重离子物理研究所,北京 100871)

(2004 年 10 月 26 日收到,2004 年 11 月 22 日收到修改稿)

射频超导谐振腔以其优越性在加速器领域起到了常温加速腔无法替代的作用. 超导腔的表面特性直接影响到加速腔的性能. 为进一步提高超导腔的加速性能,北京大学利用超高真空氩离子清洗技术发展了一种超导腔表面的干式处理方法. 与传统的湿处理方法(化学抛光 BCP 和电抛光 EP)相比,干式处理方法具有其特有的优点,有可能成为一种新的超导腔表面处理方法,对提高加速腔的性能起到推动作用. 进一步的研究正在进行之中.

关键词:射频超导,表面处理,溅射,抛光

PACC:7400,8160,8115C

## 1. 引 言

射频超导谐振腔可以运行在连续波模式下,这一优势是常温加速腔无法做到的<sup>[1]</sup>. 超导腔的加速梯度  $E_{acc}$  和品质因数  $Q$  是两个最重要的性能参数. 超导腔的表面状况直接影响到超导腔的低温性能. 现在常用的表面处理方法主要有高压水清洗(HPR)、化学抛光(BCP)、电抛光(EP)等. 在表面处理的同时,还需进行热处理. 根据处理温度的不同,大致分为三种处理方法. 低温热处理,温度在 100—150℃,主要是改善加速腔的高场  $Q$  值下降( $Q$ -drop). 700—800℃热处理,高真空下使铌腔在此温度下退火,使铌的晶格重新排列,提高超导性能,同时去除铌中吸附的氢,以避免氢引起的  $Q$  值降低( $Q$ -disease). 高温热处理,温度达 1400℃,并采用钛作为吸气材料,在此温度下退火,来增加铌的热导,并使铌材均匀化.

北京大学射频超导室设计研制的 DC-SC 光阴极注入器<sup>[2,3]</sup>是一种把直流枪和超导结合在一起的新型光阴极注入器,非常适合作为高平均功率自由电子激光(FEL)的注入器. 在进行低温实验时,谐振腔进入超导态后,往超导腔中馈入功率,由于存在次级电子倍增(multipacting)效应,进腔功率被电子带走,超导腔很难达到高场强,需要对超导腔进行高功

率锻炼<sup>[4-6]</sup>,以降低二次电子发射产额,消除 multipacting 的影响. 高功率锻炼通常需要一到几个小时. 在 2004 年 6 月进行的电子束加速增能实验中,出现的 multipacting 现象跟以往不同. 在小功率时还比较正常,随着馈入功率的增大,腔的信号出现了不稳定,提取信号波形如图 1 所示.

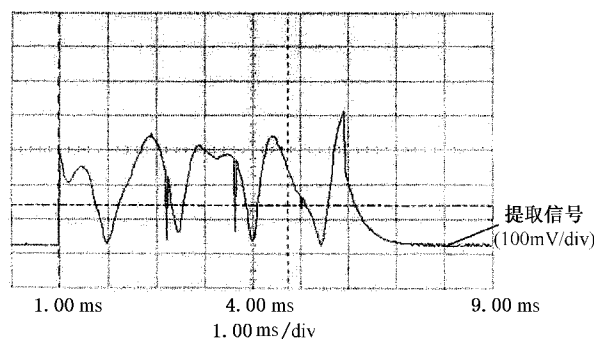


图 1 multipacting 锻炼波形的不稳定

我们对 multipacting 锻炼过程中的这种不稳定性进行了研究. 经分析认为,产生此现象的主要原因是束管局部(极小区域)焊接后没有退火所致. 在此之前进行低温载束实验的过程中,超导腔由于意外原因需要对束管重新进行电子束焊接. 由于 DC-SC 超导腔设计的特殊性,在半腔法兰处跟外筒是用钎焊焊接在一起的. 钎焊时采用的是低温钎焊,焊口处不能承受超过 700℃ 的温度,因此束管与腔电

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展规划项目(批准号 2002CB713602)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: jkhao@pku.edu.cn

子束焊接后没有进行真空退火,从而引起焊口处晶格排列不是很好,影响腔的超导性能.在入射功率增大时,超导腔的谐振频率漂移,产生不稳定性.

要解决此不稳定性最有效的办法就是使超导腔在真空下高温退火,使超导腔铌材的晶格排列更加有序.但如前所述,钎焊焊口处不能承受高温.针对这种特殊情况,我们制定了一种新的处理方法.利用溅射技术,使超导腔在电子束焊口处局部产生高温,在真空下退火,以消除晶格无序的影响.实验证明,此处理方法有效地解决了超导腔的不稳定性,同时也对超导腔整体产生了抛光作用,提高了超导腔的性能,由此产生了一种干式处理方法.

## 2. 超导腔的溅射处理

为解决超导腔大功率下的不稳定性,根据北京大学射频超导实验室进行铜铌溅射超导腔<sup>[7,8]</sup>和太阳能薄膜<sup>[9,10]</sup>的大量经验,决定对束管重新焊接后的超导腔进行溅射退火处理.其原理是利用气体放电,把超导腔作为阴极,氩离子轰击超导腔表面,把腔体表面进行抛光.合理调整参数,使放电只集中在束管电子束焊口附近,使焊口附近产生高温,从而避免钎焊焊口处温度过高.在真空下对超导腔进行高温退火,从而消除束管处晶格排列不整齐的影响.

### 2.1. 实验装置

超导腔溅射处理的实验装置采用制备铜铌溅射超导腔的超高真空溅射室.溅射装置原理图和装置图如图2所示.超导腔作为阴极,接负高压,钛棒作为阳极,接地.高纯氩气作为工作气体.超高真空

溅射室为全金属密封,本底真空可达  $10^{-7}$  Pa. 钛棒的顶部稍微超过腔与束管的焊接处,目的是减少钛棒与腔的上部之间的放电.之所以采用钛棒作为阳极,是因为钛具有很强的吸附气体的能力,可以把溅射出的杂质气体吸附干净.真空泵组采用了涡轮分子泵和溅射离子泵.

### 2.2. 超导腔的溅射处理

在进行超导腔处理之前,先对溅射室进行了烘烤,以提高本底真空.经过一天的烘烤,本底真空达到  $10^{-6}$  Pa,开始对超导腔进行溅射处理.

根据帕邢定律<sup>[11]</sup>,击穿电压  $V$  只是气压  $P$  与极间距  $d$  的乘积  $Pd$  的函数.由于钛棒和铌腔腔壁之间的距离比较小,只有 3cm 左右,而溅射气压又不能过高,因而溅射时工作在帕邢曲线的左半部分.随着  $Pd$  乘积的增大,击穿电压  $V$  减小.由于受溅射电源所限,溅射时我们适当增大氩气的工作气压,以降低溅射电压.

由于超导腔上还连接有 DC 枪的高压结构,形状不规则,很容易在其与溅射室外壁之间打火,需要很长时间的打火锻炼.经过一天的打火锻炼,腔上易放电的毛刺被打掉,超导腔与钛棒之间开始能够稳定地进行放电起弧.经过大约 3h,溅射电流逐渐从 0.2A 增大到 1.0A,已经可以在大电流下稳定工作.之后在 1.5—1.8A 进行了 1h 的溅射处理,溅射电压为 0.5kV,溅射气压在 20Pa 左右,电子束焊口附近温度接近 800°C,溅射过程结束.

超导腔溅射结束后,开始让腔在真空下退火.经过 48h 的真空退火,腔的温度降到室温.溅射室的真空达到了  $8 \times 10^{-7}$  Pa 的超高真空.

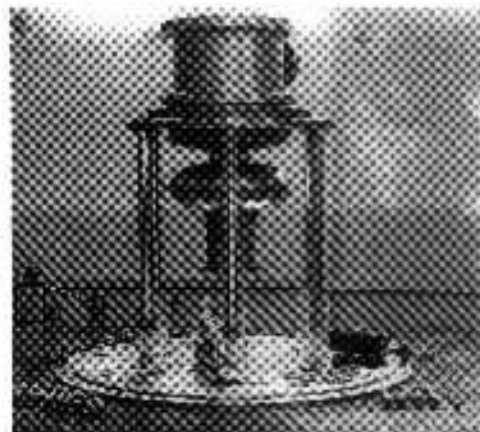
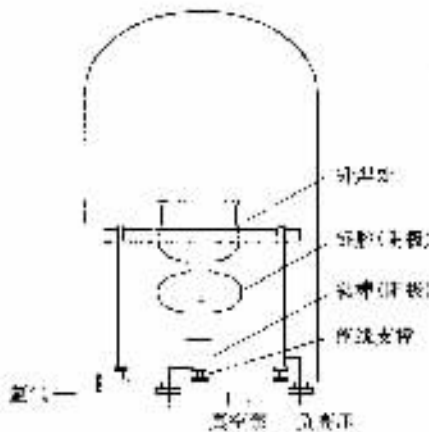


图2 溅射处理原理图和装置图

### 2.3. 超导腔的后处理

经过两天的退火后,打开真空室,取出超导腔,进行进一步的处理。后处理包括少许化学抛光和高压水清洗。化学抛光采用  $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_3\text{PO}_4 = 1:1:4$  的抛光液,整个抛光过程在水浴中进行,以控制温度,避免温度太高导致反应速度过快。化学抛光后把超导腔移到超净室,进行了 3h 的去离子水高压水清洗,以清除化学抛光后残留在腔壁上的酸液和其他杂质微粒。经过后处理的超导腔放置在超净室中,控干水后进行后面的安装和低温实验。

### 3. 超导腔溅射处理后的低温实验

超导腔的溅射处理及后处理完成之后,在超净室中把超导腔与液氮槽安装到一起,然后安装到低温恒温器,真空密封好后整个系统抽到高真空,准备进行低温载束实验。

超导腔经过预冷和液氮降温,腔体温度达到 4.2K,进入超导状态。温度平稳后,开始逐渐增大进腔功率。当进腔功率增大到一定值时,出现了 multipacting 现象,腔的反射信号和提取信号如图 3 所示。随着进腔功率增大,腔内磁场满足电子谐振条件,产生 multipacting,电子带走能量,腔内场强降低,谐振条件不满足,电子倍增暂时停止,进腔功率再次增大,达到一定场强, multipacting 再次出现。采用大功率锻炼的方法对腔进行处理。经过 1h 的锻炼, multipacting 现象消除了。再增大进腔功率, multipacting 也没有再次出现。

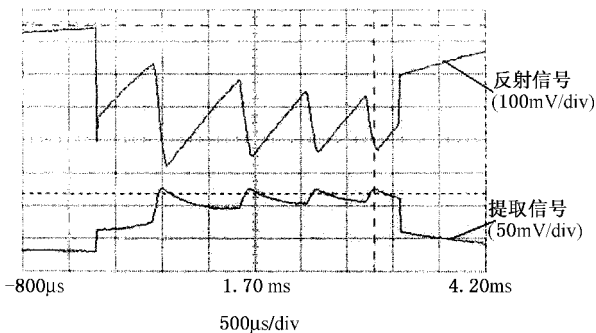


图3 溅射处理后的超导腔 multipacting 锻炼

消除 multipacting 现象后,开始进行电子束载束实验。超导腔的  $Q$  值为  $2 \times 10^8$ ,在进腔功率为 15W

时,加速梯度达到  $3.5\text{MV/m}$ ,引出电子束得到了 270keV 的增能。由于直流引出高压仅为 30kV,4.2K 温度下超导腔的  $Q$  值比较低,加速梯度上不去,因而电子束增能不是很高。目前正在进行减压降温实验,使超导腔工作在 2K 温度,提高腔的  $Q$  值和工作加速梯度,以获得更大的增能和更好的束流品质。

### 4. 结果分析及进一步讨论

低温载束实验表明,经过溅射处理后的超导腔机械性能和超导性能良好,比处理前有根本性提高,处理之前的不稳定性已经被消除。溅射处理的作用体现在以下几个方面。

高温退火作用。使超导腔在超高真空下高温退火,铌的晶格发生了变化,重新进行结晶,排列的更加有序,有助于解决超导腔的不稳定性,提高腔的超导性能。本实验也很好体现了这一点。

高温下,铌表面吸附的气体尤其是氢气能够被释放出来。氢会与铌结合成弱超导体,使超导腔  $Q$  值降低,即  $Q$ -disease<sup>[12-14]</sup>。高温退火把氢释放出去,能够有效地减少  $Q$ -disease 的发生。目前国际上具有超导加速腔的著名实验室都采用高温退火的方法对超导腔进行处理。例如德国电子同步辐射实验室( DESY )采用  $800^\circ\text{C}$  高温退火<sup>[15]</sup>,真空炉真空在  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  Pa。

实验中还发现,溅射对腔表面具有抛光作用。经过溅射处理后,腔的内表面变得更加光亮,图 4 是溅射处理后腔内表面的照片。这种效应在以前作溅射镀膜时已经发现,溅射镀膜完毕后,铌靶表面被溅射抛光。



图4 溅射处理后的超导腔内表面

为进一步验证溅射抛光的作用,我们对铌样品片进行了对比实验。图 5 是溅射处理前后铌样品片表面

的扫描电镜( SEM )照片. 上面是传统化学抛光( HF:  $\text{HNO}_3 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 1 : 1 : 2$  )后的铌表面显微照片, 下面是

溅射抛光后的显微照片. 图 5 显示, 溅射处理后的铌表面光洁度有所改善.

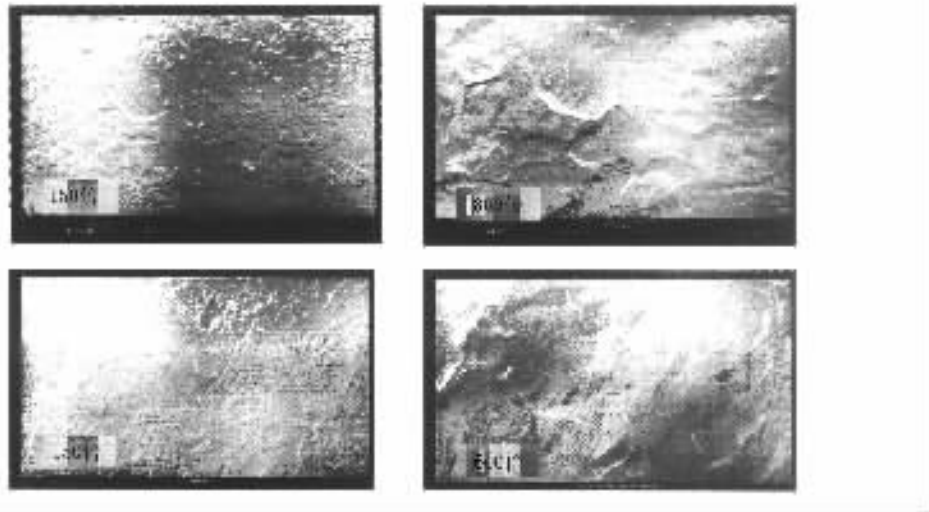


图 5 化学抛光(上图)和溅射抛光(下图)后铌样品表面的 SEM 图

相对于化学抛光和电抛光, 溅射抛光具有下列优点: 没有酸处理, 安全问题容易解决, 是一种“干式处理”方法. 溅射功率可以很高, 电压可达千伏, 电流可达安培量级. 溅射时只需调节气压和溅射电压电流, 比较容易控制. 在超高真空室中进行. 溅射抛光有可能成为一种新的超导腔表面处理方法, 与目前

采用的湿式电抛光比较, 它的最大优点是在超高真空环境下进行处理. 溅射时的工作气体为高纯氩气, 对铌的超导性能无有害影响. 下一步将进行更加深入的溅射处理实验研究, 以进一步证实干式处理的作用.

- [ 1 ] Padamsee H, Knobloch J and Hays T 1998 *RF Superconductivity for Accelerators* ( New York : John Wiley & Sons , Inc. ) p6
- [ 2 ] Zhao K *et al* 2001 *Nucl. Instru. Meth. A* **475** 564
- [ 3 ] Zhao K *et al* 2002 *Nucl. Instru. Meth. A* **483** 125
- [ 4 ] Takeuchi S *et al* 1996 *Nucl. Instru. Meth. A* **382** 153
- [ 5 ] Porcellato A M 1996 *Nucl. Instru. Meth. A* **382** 121
- [ 6 ] Palmieri V *et al* 1996 *Nucl. Instru. Meth. A* **382** 112
- [ 7 ] Hao J K *et al* 2001 in Proc. of the 10th Workshop on RF Superconductivity , 2001 , Tsukuba , Japan , pp91 - 94.
- [ 8 ] Hao J K *et al* 2001 *IEEE Proc. of P A C* p1169
- [ 9 ] Zhao K *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1390 ( in Chinese ) [ 赵 坤 等 2001 物理学报 **50** 1390 ]

- [ 10 ] Xie D T *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **51** 1377 ( in Chinese ) [ 谢大韬 等 2002 物理学报 **51** 1377 ]
- [ 11 ] Xu X j and Zhu D C 1996 *Gases Discharge Physics* ( Shanghai : Fudan University Press ) p108 ( in Chinese ) [ 徐学基、诸定昌 1996 气体放电物理 ( 上海 : 复旦大学出版社 ) 第 108 页 ]
- [ 12 ] Saito K and Kneisel P 1992 *Proc. of the 3rd EPAC* p1231
- [ 13 ] Kulik I O and Palmieri V 1998 *Particle Accelerators* Vol. 60 p257 - 264
- [ 14 ] Kneisel P 1993 *J. Vac. Sci. Technol.* Jul/Aug 1993 , A **11** 1575
- [ 15 ] Aune B *et al* 200 *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams* **13** 092001

# Studies on surface dry treatment for improving the performance of RF superconducting cavities \*

Hao Jian-Kui Jiao Fei Huang Sen-Lin Zhu Feng Zhao Kui

( MOE Key Laboratory of Heavy Ion Physics , Ministry of Education ; Institute of Heavy Ion Physics , Peking University , Beijing 100871 , China )

( Received 26 October 2004 ; revised manuscript received 22 November 2004 )

## Abstract

RF superconducting ( SC ) cavities are more frequently used in particle accelerators with excellent performance which cannot be substituted by normal conducting cavities. The surface status of superconducting cavities directly affects the properties of the cavity. In order to improve the accelerating performance of superconducting cavities , Peking University made researches and developments on a “ dry treatment method ” on the surface of SC cavities. It uses argon ion cleaning technique in ultra-high vacuum. Compared with the traditional wet methods ( Chemical polishing and electrical polishing ) , dry method has special advantages. It might become a new surface treatment method to improve the performances of SC cavities. Further researches are in progress .

**Keywords** : RF superconductivity , surface treatment , sputter , polishing

**PACC** : 7400 , 8160 , 8115C

---

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No.2002CB713602 ).