



·高亮度束流物理及技术·

## 应用于光源的射频超导加速技术\*

刘克新, 郝建奎, 全胜文, 黄森林

(北京大学 物理学院 重离子物理研究所, 北京 100871)

**摘 要:** 射频超导加速器采用在液氦温度下工作的超导加速腔, 可运行在长宏脉冲或连续波模式, 同时具有较大的束流孔径, 可有效减小束腔相互作用。经过半个多世纪的发展, 射频超导技术已经日趋成熟, 广泛应用于各种光源, 并将发挥越来越重要的作用。简要介绍射频超导基本原理、应用于光源的椭球型电子超导加速腔的研制工艺、超导加速模组构成和应用用于不同类型光源的超导加速腔的主要特点。

**关键词:** 椭球超导腔; 加速梯度; 品质因数; 表面处理; 超导加速模组

中图分类号: TL503

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220075

## SRF accelerating technology applied in light sources

Liu Kexin, Hao Jiankui, Quan Shengwen, Huang Senlin

(Institute of Heavy Ion Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Superconducting accelerator, which uses SRF cavity working at cryogenic environment, can operate in macro-pulse or CW modes. Due to its large beam aperture, the interaction between beam and cavity can be reduced remarkably. After the development of more than a half century, SRF technology is quite advanced and has been applied in different kinds of light sources. In this paper, basic principle of SRF, fabrication of elliptical SRF cavity and structure of typical cryomodule of SRF accelerator are introduced.

**Key words:** elliptical SRF cavity, accelerating gradient, quality factor, surface treatment, cryomodule

射频超导加速器采用在液氦温度下工作的超导加速腔, 可运行在长宏脉冲或连续波模式, 同时具有较大的束流孔径, 可有效减小束腔相互作用。国际上最早发展射频超导技术的是美国斯坦福大学。1964年, 斯坦福大学采用 2856 MHz 3-cell 超导腔加速电子, 超导腔制造采用铜腔表面镀铅, 加速梯度只有 2~3 MV/m<sup>[1]</sup>。1968年, 斯坦福大学研制了第一只纯铌超导腔<sup>[2]</sup>, 从此铌逐渐发展成为制造超导腔的主要材料。此后, 射频超导技术的发展可大致分为以下几个方向, 即以谐振频率 1.3 GHz 超导腔为主的应用于直线加速器的高梯度(高 Q)射频超导技术、主要应用于储存环和能量回收加速器(ERL)的强流超导技术、用于加速质子和重离子的中低 $\beta$ 超导加速技术, 以及纯铌之外超导腔新材料的研发。本文主要围绕和光源密切相关的前两个方向展开讨论。

为克服二次电子共振(Multipacting, MP), U. Klein 和 D. Proch 于 1978 年提出了椭球形超导腔结构设计<sup>[3]</sup>, 使超导腔的加速梯度提高到了 5 MV/m 左右, 从此椭球形超导腔就成为高 $\beta$ 高梯度超导腔的标准腔型。此后的 30 多年间, 通过材料改进、优化加工工艺和表面处理过程, 先后解决了品质因数下降(Q-disease)、场致发射和热失超等限制加速梯度的主要问题, 加速梯度得以逐步提高。1989年, TESLA 合作组织(TeV Energy Superconducting Linear Accelerator Collaboration)的建立有效推动了高梯度超导腔的发展, 特别是 2004 年国际加速器技术推荐委员会(International Technology Recommendation Panel, ITRP)宣布国际直线对撞机(ILC)将采用射频超导技术, 并将超导腔的加速梯度目标定为 31.5 MV/m, 品质因数(Q)大于  $1 \times 10^{10}$ 。到 2011 年, 单-cell 椭球腔的加速梯度达到了 59 MV/m, 接近纯铌超导腔的理论极限, 9-cell 腔的加速梯度最高也达到了 42 MV/m 以上<sup>[4-6]</sup>, 德国、美国和日本都建立了达到 ILC 要求的超导腔批量生产能力, 国内北京大学也研制出了加速梯度为 32.4 MV/m, 品质因数大于  $1 \times 10^{10}$  的超导腔<sup>[7]</sup>。高梯度加速技术首先在 DESY 被应用于自由电子激光, 先后建造了 FLASH<sup>[8]</sup> 和 EURO-XFEL<sup>[9]</sup>。

\* 收稿日期: 2022-03-19; 修订日期: 2022-06-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0401904)

联系方式: 刘克新, kxliu@pku.edu.cn。

在高梯度下采用 CW 模式运行超导直线加速器需要非常大的低温制冷功率, 如果加速梯度为 25 MV/m,  $Q_0$  为  $1 \times 10^{10}$ , 则需要 2 K 温度下大于 50 W/m 的制冷功率, 这将大大增加超导加速器的运行成本, 在目前条件下基本上是不可能的, 因此 ILC 和 EURO-XFEL 均采用长宏脉冲的运行模式。为实现 CW 运行, 需发展具有中等加速梯度但高  $Q$  的超导体。实现高  $Q$  超导体的一条途径为大晶粒超导体, 采用大晶粒超导体可获得大于  $2 \times 10^{10}$  的品质因数<sup>[10-11]</sup>, 另一条途径则为特殊的超导体表面处理过程。2013 年, 美国费米国家实验室提出了氮掺杂方法(N-doping)提高超导体的  $Q$  值<sup>[12]</sup>, 后来又在此基础上发展了低温氮掺杂(N-infusion)技术<sup>[13]</sup>和中温烘烤技术<sup>[14]</sup>, 以在更高梯度下保持高  $Q$  值。国内北京大学、中科院高能物理研究所和中科院上海应用物理研究所也先后开展了相关研究<sup>[15-17]</sup>, 所研制的超导体在中等加速梯度下  $Q$  值均达到了  $3 \times 10^{10}$  以上。基于这项技术, 美国 SLAC 的硬 X 射线自由电子激光装置升级装置 LCLS-II 采用高  $Q$  超导体将电子束加速到 4 GeV<sup>[18]</sup>, 超导体设计指标为加速梯度 16 MV/m,  $Q > 2.7 \times 10^{10}$ , 我国“十三五”重大科技基础设施建设项目“硬 X 射线自由电子激光装置”也将采用高  $Q$  超导体, 电子束能量为 8 GeV, 超导体设计指标和 LCLS-II 相同<sup>[19]</sup>。

早期的强流射频超导技术是为补偿高能电子储存环中电子因同步辐射损失的能量而发展起来的, 如 CERN 100 GeV 的 LEP-II 和 KEK 32 GeV 的 TRISTAN, CERN 采用的是 352 GHz 铜铌溅射 4-cell 超导体<sup>[20]</sup>, 而 KEK 则发展了 509 MHz 5-cell 纯铌超导体<sup>[21]</sup>。随着储存环流强的增加, 为减小高阶模阻抗, 康奈尔大学和 KEK 发展了 500 MHz 单-cell 超导加速结构用于加速 A 量级的电子束<sup>[22-23]</sup>, 之后这一类超导加速结构广泛应用于同步辐射光源。国内中科院高能物理研究所的正负电子对撞机 BEPC-II 和上海高等研究院的第三代同步辐射光源 SSRF 也引进了这类超导加速结构并研制了备用腔和备用模组<sup>[24-25]</sup>, 正在建造的高能光源 HEPS 则首次采用了 166.5 MHz  $\beta=1$  的超导体<sup>[26]</sup>。

进入 21 世纪以来, 国际上提出了多个 ERL 光源方案, 比较典型的有美国 Cornell 大学提出的 Cornell ERL 光源和英国 Daresbury 实验室提出的第四代光源(4GLS)<sup>[27-28]</sup>。ERL 采用的超导体基本上是 TESLA 椭球腔的改进设计以适应强流产生的高阶模(HOM)的导出和吸收, 以 5-cell 和 7-cell 超导体为主, 也有采用 9-cell 超导体的方案, 谐振频率则有 1.3 GHz 和 704 MHz 等。

本文在简要介绍射频超导基本原理的基础上, 重点讨论当前一般应用于光源的椭球型电子超导加速腔的研制工艺、超导加速模组构成和应用于不同类型光源的超导加速腔的主要特点等。

## 1 射频超导基本原理

和直流状态下的超导体不同, 由于电子的惯性, 在交变电场环境下, 超导电子电流无法完全屏蔽电磁场, 因此超导体表面仍然存在表面电阻, 但比常温加速腔的表面电阻低 5~6 个数量级。由于谐振腔的品质因数和表面电阻成反比, 所以超导加速腔可以具有高达  $10^{10}$  以上的品质因数, 从而具有很低的腔耗, 使超导加速腔可以在较高的加速梯度下运行在连续波(CW)模式。

由 BCS 理论可以得出超导体的表面电阻为

$$R_{\text{BCS}} = \frac{A}{T} f^2 \exp\left(-\frac{\Delta(0)}{k_B T}\right) \quad (1)$$

式中:  $f$  为电磁场谐振频率(单位为 GHz);  $\Delta$  为超导能隙;  $k_B$  为玻耳兹曼常数;  $A$  为和超导材料有关的常数;  $T$  为温度; 表面电阻单位为  $\Omega$ 。对纯铌超导体, 表面电阻为

$$R_{\text{BCS}} = \frac{10^{-4}}{T} f^2 \exp\left(-\frac{18}{T}\right) \quad (2)$$

由式(2)可见, 表面电阻和共振频率的平方成正比, 而温度越低表面电阻越小。因此, 1.3 GHz 超导体应工作在 2 K 温度下, 而对于共振频率低于 600 MHz 的超导体则一般工作在 4 K 温度下即可具有足够小的表面电阻。

除临界温度外, 超导体的另一个重要参数为临界磁场  $H_c$ 。当超导体所处环境磁场高于临界磁场时, 超导体将出现失超, 即不再处于超导状态。射频超导体所能承受的最高磁场为超热磁场  $H_{\text{sh}}$ , 超热磁场一般大于直流临界磁场, 对铌材而言,  $H_{\text{sh}}=1.2H_c$ , 约为 0.22 T。因此, 纯铌超导体的表面峰值磁场不能大于这一超热磁场, 而对于典型的 TESLA 型椭球腔, 其峰值磁场与加速梯度的比值  $H_{\text{pk}}/E_{\text{acc}}$  约  $0.004 \text{ T} \cdot \text{MV}^{-1} \cdot \text{m}$ , 则加速梯度理论上限为 50~60 MV/m。

实际超导体表面存在所谓的剩余电阻, 此时超导体的表面电阻即由 BCS 电阻和剩余电阻两部分组成。剩余电阻的主要来源有磁通俘获、铌的氢化物、晶界以及表面附着的杂质微粒等。由于铌为第二类超导体, 因此在降温过程中可将环境磁场俘获形成所谓的量子磁通, 从而在表面形成一些以相干长度为半径的非超导区域。设一共

形成  $N$  个量子磁通, 每个的磁通量为  $\varphi_0$ , 面积为  $A$ , 环境外磁场为  $H_{\text{ext}}$ , 则有

$$AH_{\text{ext}} = N\varphi_0 \quad (3)$$

而根据超导理论, 上临界磁场  $H_{c2} = \frac{\varphi_0}{2\pi\mu_0\xi^2}$ , 因此有  $R_{\text{res}} = \frac{N\pi\xi^2 R_n}{A} = \frac{H_{\text{ext}} R_n}{2H_{c2}}$ ,  $R_n$  为常温电阻, 铌材的常温电阻与 BCS 电阻的比值及  $H_{c2}$  已知, 代入有

$$R_{\text{res}} = 0.3H_{\text{ext}} \sqrt{f} \quad (4)$$

式中:  $R_{\text{res}}$ ,  $H_{\text{ext}}$ ,  $f$  的单位分别为 nW,  $0.08 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ , GHz。

可见, 谐振频率比较高的超导腔由磁通俘获形成的表面电阻较大, 应根据需要进行更好的磁屏蔽, 一般应使剩余磁场小于  $20 \times 10^{-7} \text{ T}$  以保证超导腔品质因数达到  $1 \times 10^{10}$  以上。在表面处理过程中, 在超导腔表面形成的铌的氢氧化物是一种弱超导材料, 从而增加了表面电阻。由氢氧化物导致的表面电阻增大在超导腔发展历史上曾经引起严重的“ $Q$ -disease”现象, 即当加速梯度增加到只有几 MV/m 时即出现  $Q$  值显著下降, 后来通过在  $120 \sim 170 \text{ K}$  区间快速降温和高温烘烤除气等措施使这一问题得以解决, 加速梯度显著增加。

超导腔内表面的缺陷或杂质也会对超导腔的性能造成不利影响, 主要表现在二次电子共振 (Multipacting)、场致发射和热失超等。二次电子共振和场致发射都是超导腔表面发射电子的过程, 电子流被射频场加速从而消耗射频场能量, 造成  $Q$  值的显著下降, 同时也使电子轰击点发热并最终导致超导腔失超。二次电子共振是表面发射的电子在射频场中形成的共振过程, 和超导腔形状、材料的二次电子发射系数等因素有关, 一般随射频场的增加表现出阶段性。椭球腔的腔型设计已基本上可以避免二次电子共振, 但包含功率耦合器和高阶模耦合器的端腔组件仍有可能发生, 因此在设计时可通过模拟程序计算尽量避免二次电子共振的出现。场致发射则遵从 Fowler-Nordheim 定律, 即场致发射电流随表面电场指数增加, 因此对需要较高加速梯度的超导腔影响较大。热失超是指由于超导腔表面产生的热量无法及时传导出去而导致温度超过临界温度的现象。如果超导腔表面存在非超导的缺陷或粘附的颗粒, 因其电阻较大产生焦耳热, 而纯铌材料的导热性不是很好, 热量传导不及时导致缺陷周围局部失超, 非超导区域的增加又导致产生更大的热量, 最终使超导腔整体失超。

总之, 剩余电阻的存在可使品质因数降低。在射频超导技术不断发展过程中, 形成了一套可有效降低表面电阻的超导腔制造和表面处理工艺流程, 加以磁屏蔽和合理降温过程, 目前经处理后的超导腔的表面剩余电阻可小于  $10 \text{ n}\Omega$ , 据估计最小的表面剩余电阻仅有  $1 \text{ n}\Omega$ 。在  $4.2 \text{ K}$  温度下, 谐振频率大于  $1 \text{ GHz}$  的超导腔的 BCS 电阻大于剩余电阻, 因此应继续降温到  $2 \text{ K}$  使其 BCS 电阻与剩余电阻相当。

## 2 超导腔制造

射频超导加速腔是射频超导加速器最为关键的部件, 其设计制造一般包含腔型设计、材料检测、加工成型、电子束焊接、后处理和垂测等几个步骤。

### 2.1 腔型设计

在常温腔的设计中, 为减小腔耗常常追求高的  $R/Q$  或分路阻抗, 因此必须尽量减小束流孔径。而超导腔因为具有很低的表面电阻, 从而给腔型的设计带来更大的自由度。在超导腔优化设计过程中, 一般尽可能保持尽量低的腔内峰值电场和峰值磁场与加速梯度的比值, 即  $E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$  和  $H_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$ , 同时也需考虑应使腔的内表面比较容易清洗。1.3 GHz 超导腔的基本腔型为在 DESY 发展起来的 TESLA 腔型 (图 1)<sup>[29]</sup>, 后来为追求高梯度或强流发展了几种改进腔型, 主要是改变腔壁的斜率。用于同步辐射光源的 500 MHz 左右的超导腔则基本上基于 Cornell 大学和日本 KEK 提出的设计<sup>[22-23]</sup>, 其加速梯度一般为十几 MV/m, 主要特点为具有大口径的束流管道以减小高阶模阻抗, 此外这类超导腔的束管上装有由铁氧体材料制成的高阶模吸收器。由于用在对撞机储存环上的这类超导腔可加速  $1 \text{ A}$  左右的束流, 因此对于运行在  $300 \text{ mA}$  左右的同步辐射光源来说, 超导腔的性能指标相对来说比较容易实现。

### 2.2 材料

在射频超导技术的发展过程中, 高纯铌材的采用有效地促进了超导腔加速梯度的提高。高纯铌材具有较好的热导性, 有助于减小超导腔表面缺陷发热带来的不稳定性。目前一般用剩余电阻比, 即  $R_{\text{RR}}$  值, 表示高纯铌材的导热性质, 其在  $4.2 \text{ K}$  的热导率约为  $0.25 \times R_{\text{RR}}$ <sup>[30]</sup>, 而  $R_{\text{RR}}$  的定义为

$$R_{\text{RR}} = \frac{R(300 \text{ K})}{R(\text{normal state at } 4.2 \text{ K})} \quad (5)$$

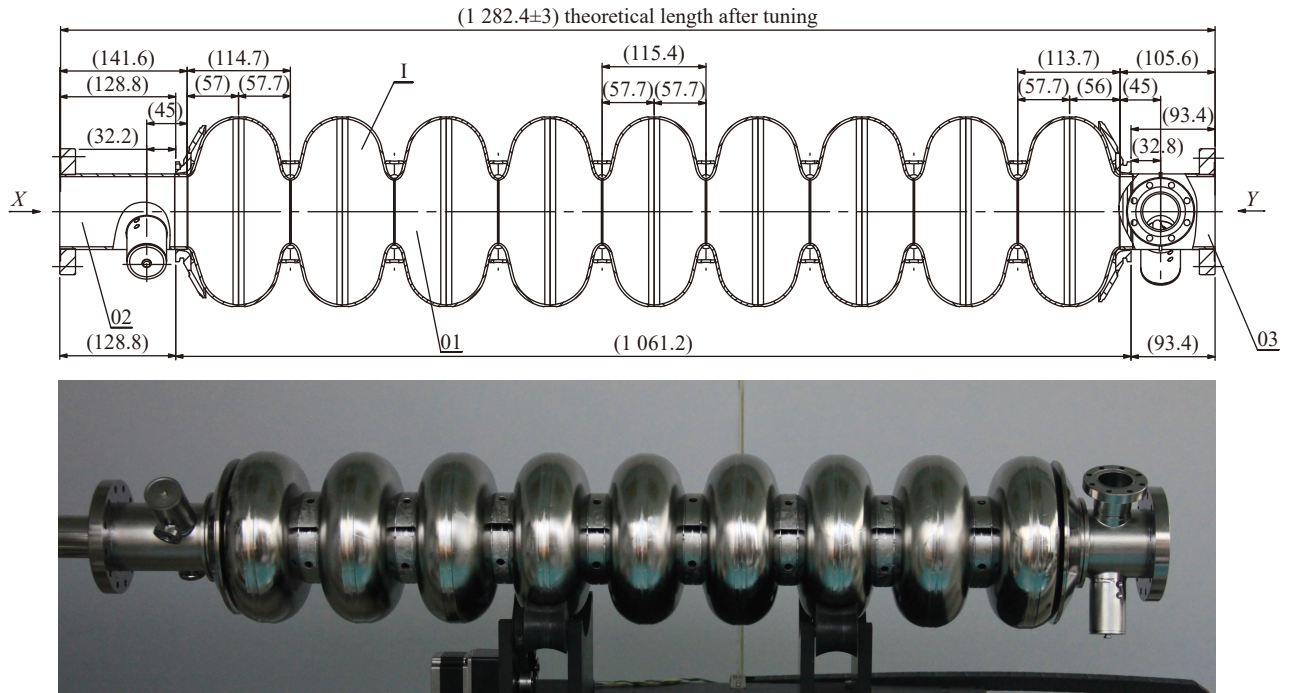


Fig. 1 Design and photo of TESLA 9-cell superconducting cavity (Unit: mm)

图1 TESLA型9-cell超导腔腔型设计和实物(单位: mm)

目前制作超导腔的高纯铌材的 $R_{RR}$ 值一般为150~300。采用电子束冶炼技术可以获得具有更高 $R_{RR}$ 值的铌材,但 $R_{RR}$ 值过高会导致铌材的机械强度下降。用于制作超导腔的铌材一般还需要进行涡流检测以确保其中没有铁磁性杂质。

目前用于制造超导腔的铌材大部分为通过锻造过程生产出的细晶材料,但也尝试采用大晶粒材料甚至单晶材料制作超导腔。由于大晶粒铌材具有更少的晶界,因此可以预期具有相对较小的表面电阻。图2为宁夏东方钽业公司(OTIC)生产的大晶粒铌材。北京大学在国家“十二五”重大科技基础设施建设项目“X射线自由电子激光试验装置”支持下,研制了六只大晶粒9-cell TESLA型超导腔,无需电抛光,仅采用缓冲化学抛光即使6只超导腔在加速梯度为16 MV/m时 $Q$ 值达到 $(1.6\sim 2.4)\times 10^{10}$ 。采用大晶粒制造超导腔不仅可以简化表面处理工艺,在铌材的制造过程中也不需要锻造过程,但其机加工性质和机械稳定性还在进一步探索之中。

### 2.3 加工成型

尽管也有采用对管材进行旋压制造无缝超导腔的尝试,但目前主流超导腔制造方法仍然是片材冲压加电子束焊接。一般的机加工过程包括采用合适工装将3~4 mm厚的铌片冲压成半碗形状,之后对“半碗”边缘进行精加工,经过酸洗后的“半碗”在电子束焊机中焊接成型。对多cell超导腔,一般先将两个“半碗”的小孔径部分焊接成“哑铃”,然后再焊接赤道部分。包括功率耦合器端口、高阶模耦合器端口和信号提取端口的端腔组件需要单独加工焊接,然后再焊接到超导腔上。对多cell超导腔,为保障其机械强度,一般还需要在cell之间焊接加强筋。

对电子束焊接的要求是不能破坏超导材料物性,焊缝的存在应尽量不影响超导腔的性能。焊接成形后超导腔的真空漏率应小于 $10^{-8}$  Pa·s $^{-1}$ ,焊缝处材料 $R_{RR}$ 值的下降不大于20%。超导腔赤道处的焊接一般采用背成型焊接技术,选择合适的电子束扫描路径可确保焊缝的均匀性、平整性和适当的成形宽度。为尽量减小端腔焊接后的形变,加工时需要考虑焊接余量,焊接后还需进行必要的再加工。

除超导性能外,超导腔制造还要兼顾其机械性能和微波性能,以TESLA型超导腔为例,超导腔最终长度应该

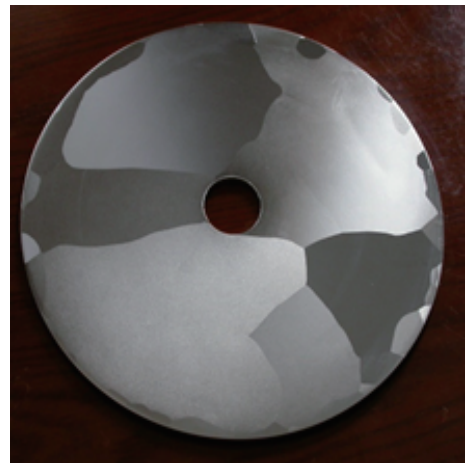


Fig. 2 Large grain niobium material produced by Ningxia OTIC

图2 宁夏东方钽业公司生产的大晶粒铌材

控制在  $1038 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ , 使其谐振频率控制在许可范围内。在超导腔的制造过程中应对各部件(半腔、哑铃、高阶模耦合器、端腔组件等)的微波性能、机械性能进行及时测量与调整。

对多 cell 超导腔, 焊接完成后需要进行场调平, 即在场调谐平台上通过机械拉伸或挤压使各 cell 的电场尽量保持均匀, 一般超导腔内  $\text{TM}_{010}$  场分布的不均匀度应小于  $\pm 5\%$ 。

## 2.4 表面处理

如前所述, 超导腔表面处理对超导腔的性能至关重要, 特别是对于需要达到高梯度或高  $Q$  的超导腔对后处理的要求更为严格。主要的表面处理手段有超声波清洗、缓冲化学抛光(BCP)、电抛光(EP)、高温烘烤、低温烘烤和高压水冲洗。

BCP 是指用  $\text{HF}(48\%)$ ,  $\text{HNO}_3(65\%)$  和  $\text{H}_3\text{PO}_4(85\%)$  以一定体积比(如 1:1:2)的配比混合而成的酸溶液将超导腔内表面腐蚀掉一层, 以有效去除表面氧化层和由于研磨或冲压造成的缺陷及带入的其他金属杂质, 缓冲化学抛光可以使普通铌材的表面粗糙度为  $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 。由于加入了缓冲剂  $\text{H}_3\text{PO}_4$  以减慢反应速度, 因此被称为缓冲化学抛光。BCP 溶液一般由酸泵压入超导腔内部与超导腔内表面进行化学反应, 反应过程中会产生大量热量, 因此需要对酸液进行冷却使其保持在较低的温度。

EP 可以看成是电镀的相反过程。将  $\text{HF}(48\%)$  和  $\text{H}_2\text{SO}_4(96\%)$  以大约 1:9 的比例混合形成的 EP 溶液注入超导腔内, 超导腔中心插入铝制阴极棒, 超导腔本身作为阳极, 在阴极和阳极之间加上几十 V 的直流电压, 即可将超导腔内表面抛光。EP 抛光后超导腔表面的粗糙度可减小到  $0.1 \mu\text{m}$  以下, 看起来类似于镜面。为了很好地控制 EP 过程和保障安全, 实际的 EP 装置是一套相当复杂的系统。

高压水冲洗在超导腔表面处理中的引入对提高超导腔加速梯度起到了十分重要的作用。一般采用常温下  $18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$  的超纯水加压到  $\sim 10 \text{ MPa}$ , 通过  $0.4 \sim 0.6 \text{ mm}$  口径的喷嘴对超导腔内表面进行冲洗, 可有效去除化学残留物和灰尘颗粒, 从而大大减小了发生场致发射的概率。清洗过程中高压喷嘴的角度可调, 超导腔也以可控速度转动。超导腔的清洗和封装应在超净环境中进行, 特别是高梯度超导腔一般应在好于百级的超净室中组装。

烘烤过程也是后处理流程中必不可少的一步。高温烘烤是在真空热处理炉中将超导腔在  $600 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$  温度下烘烤数小时, 以去除在化学缓冲抛光过程中吸附的氢和其它杂质气体, 同时还可去除冲压、焊接等机械过程在超导腔中所产生的应力, 所以又称为高温退火过程。有时会对超导腔进行  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  高温热处理, 可对超导腔进行进一步纯化并增加其热导。低温烘烤一般是将超导腔在  $120 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$  环境中烘烤约 48 h, 对克服经过化学处理的超导腔在高梯度时出现  $Q$  值随加速梯度下降 ( $Q$ -slope) 的现象很有帮助。

在烘烤过程中通入低压氮气即形成对提高  $Q$  值非常有效的所谓氮掺杂 (N-doping) 过程<sup>[12]</sup>。氮掺杂的关键是将 EP 和高温烘烤后的超导腔在  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  温度下和气压大约为  $1.33 \text{ Pa}$  的高纯氮气中再烘烤  $10 \sim 20 \text{ min}$ , 然后再用 EP 将表面去除  $5 \sim 20 \mu\text{m}$ 。氮掺杂处理后的超导腔的典型特征是如图 3 所示的“反  $Q$  下降 (anti- $Q$ -slope)”, 即  $Q$  值在低场到中场之间呈上升趋势。在氮掺杂技术之后, 又出现了低温氮掺杂技术 (N-infusion)<sup>[13]</sup>, 即在 EP 和  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  真空烘烤 3 h 后, 将超导腔在  $3.325 \text{ Pa}$  氮气压和  $120 \sim 160 \text{ }^\circ\text{C}$  温度下烘烤约 48 h, 之后无需再做任何处理。采用这一方法处理后的超导腔不仅可以实现中等加速梯度下的高  $Q$ , 也能够达到比氮掺杂方法更高的加速梯度, 在  $30 \text{ MV/m}$  以上时才出现失超, 而氮掺杂处理的超导腔一般在  $25 \text{ MV/m}$  以下即出现失超。最新提出的中温退火技术则不需要通入氮气, 只需要在  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  左右温度下真空烘烤约 3 h 即可获得在较高加速梯度下 ( $\sim 30 \text{ MV/m}$ ) 实现高  $Q$ <sup>[14]</sup>。目前该技术的机制仍在研究中, 由于在  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  温度下烘烤炉的真空度不可能很高, 因此中温退火本质上有可能仍然是氮原子参与的过程。

目前超导腔的后处理并没有严格的标准步骤和配方, 根据不同类型的超导腔有不同的处理方法, 对同一类超导腔不同实验室也发展了略有不同的后处理工艺。一般来讲, 研制高梯度超导腔需要采用 EP 技术, 而实现超导腔的高  $Q$  则需采用氮掺杂系列技术。

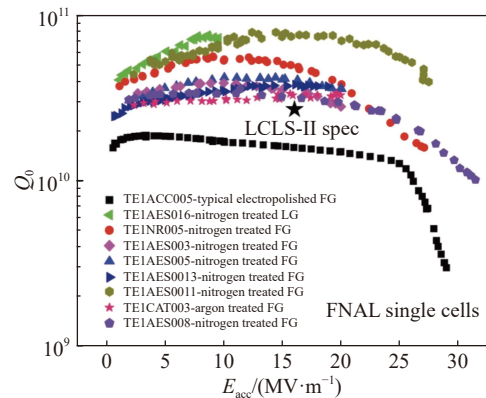


Fig. 3 Anti- $Q$ -slope of superconducting cavities after N-doping<sup>[31]</sup>

图 3 经氮掺杂处理后超导腔出现“anti- $Q$ -slope”现象<sup>[31]</sup>

北京大学在国内率先成功实现了 1.3 GHz 超导腔的氮掺杂,其流程为:在氮掺杂之前对大晶粒超导腔进行 BCP 处理,经高压水冲洗后在高温退火炉内真空状态下升温至 800 °C 并保温 3 h,之后充入氮气,压力 2.7~4.0 Pa 条件下保持 2 min,接着抽真空保温 6 min 之后自然冷却到室温,最后进行 5 μm 的 EP 轻抛。经过氮掺杂处理,超导腔在 2 K 温度下品质因数达  $4 \times 10^{10}$  以上(见图 4)。中科院高能物理研究所率先成功实现了 1.3 GHz 9-cell 超导腔的中温退火处理,其流程为:首先对超导腔进行 EP 重抛,经高压水冲洗后在 900 °C 高温退火炉内保温 3 h,之后冷却到室温并暴露在空气中 48 h,然后进行 300 °C 温度下 3 h 的中温退火处理。中温退火处理后不再进行酸洗,经高压水清洗后直接进行垂测。经中温退火后 9-cell 超导腔品质因数达到  $3 \times 10^{10}$  以上,加速梯度也超过 25 MV/m(见图 5)<sup>[32]</sup>。

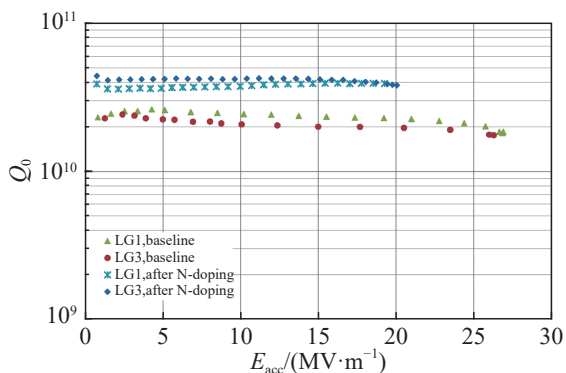


Fig. 4 Vertical test results of single cell cavities after N-doping at Peking University

图 4 北京大学单-cell 超导腔氮掺杂处理测试结果

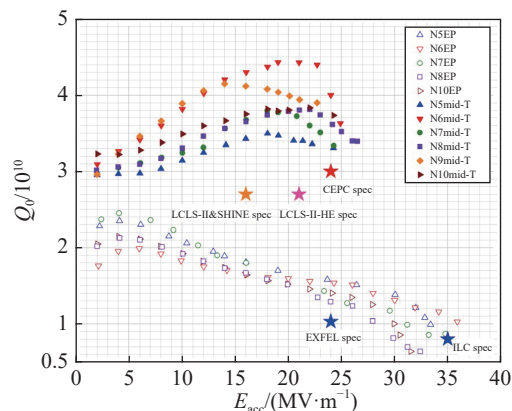


Fig. 5 Vertical test result of superconducting cavities after mid-T treatment at IHEP

图 5 中科院高能物理研究所超导腔中温处理测试结果

### 2.5 垂测

经过表面处理后的超导腔需要采用垂直测试装置(见图 6)对其进行加速梯度和品质因数的测量,得出  $Q$ - $E_{acc}$  曲线。所谓垂测装置实际上主要就是一个在地下垂直放置的恒温器,之所以垂直放置是为了方便超导腔的吊装和取出,放在地面以下是为了有效降低实验室的辐射。由于垂测装置只需在超导腔中建场,并不对电子束进行加速,因此只需要较小的微波功率源。对加速梯度或  $Q$  值不能达到要求的超导腔,需要对其进行各种检测,针对

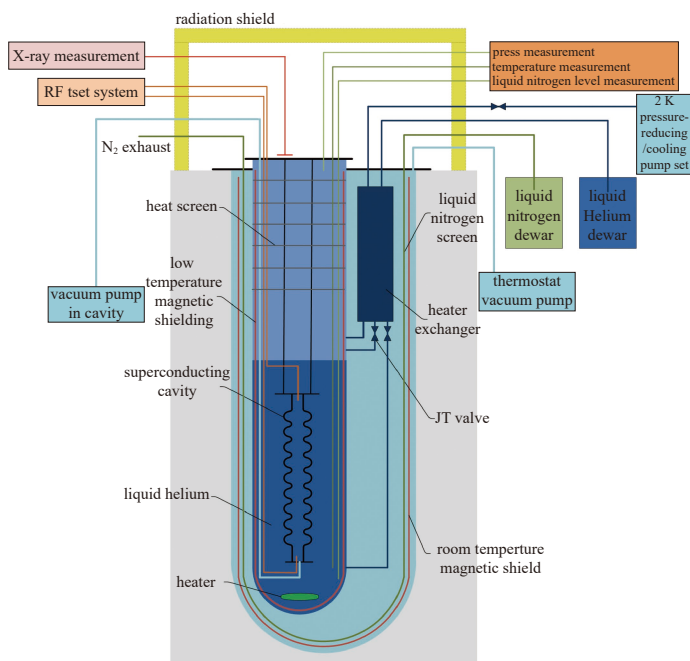


Fig. 6 Vertical test system of Peking University

图 6 北京大学垂测装置



发现的问题重新进行表面处理。

### 3 超导加速模组

和常温射频加速器不同, 射频超导加速腔运行在 4 K 或 2 K 低温下, 因此需要将超导腔安装在一个为其提供低温环境和微波功率的超导加速模组中。用于同步辐射光源的一个超导加速模组一般只包含一只单 cell 超导腔, 用于自由电子激光或长波段小型光源的超导直线加速器均采用多 cell 腔。出于所需能量、运行方便以及空间利用率等多方面因素综合考虑, 用于小型光源的一个超导加速器模组一般包含两只多 cell 超导腔, 而大型自由电子激光装置多采用在一个模组中配置 8 只 9-cell 超导腔。

一个典型的 2 K 超导加速模组, 主要包含超导腔、液氮筒、两相管、液氮屏、磁屏蔽、调谐器、功率耦合器、高阶模耦合器、信号提取探针、温度和液面探针、悬挂装置和外真空容器等。工作在 4 K 温度下的超导加速模组也有类似结构, 只是由于不需要液氮的减压降温, 因此没有两相管结构, 氦气压略高于 0.1 MPa, 而 2 K 氦压约为  $3.1 \times 10^{-3}$  MPa。为有效利用低温制冷功率, 运行在 2 K 的大型超导直线加速器模组设计有 5 K 冷屏, 而小型超导加速器则不一定需要, 图 7 所示为典型的小型超导加速模组示意图<sup>[33]</sup>。

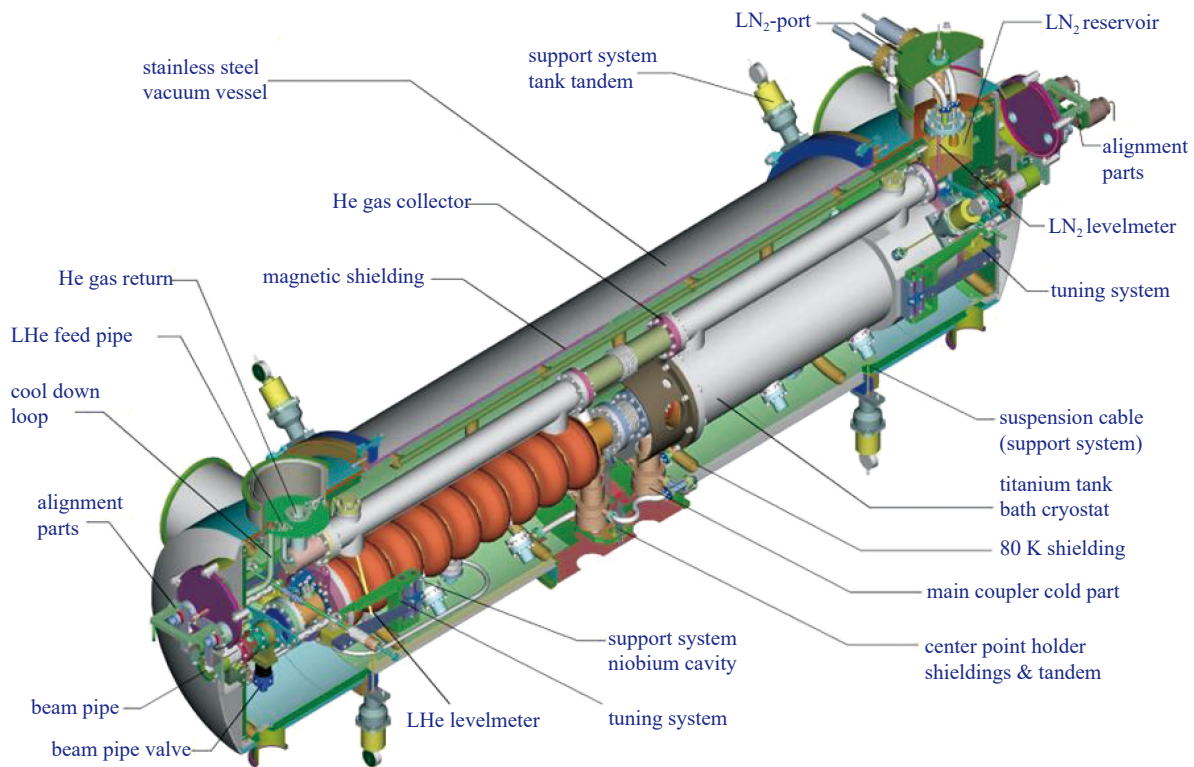


Fig. 7 Layout of an accelerating cryomodule including two 9-cell superconducting cavities

图 7 包含两只 9-cell 超导腔的加速模组示意图

调谐器的作用是通过对超导腔进行机械压缩或拉伸实现对频率的调节, 以补偿超导加速腔内建立起强射频场时由洛伦兹力导致超导腔形变而引起的超导腔谐振频率变化。由于超导腔的品质因数很高, 调谐范围小, 因此要求调谐结构具有很高的精度并能够在低温下工作。

磁屏蔽是由高磁导率材料制成的屏蔽层, 用于屏蔽地磁场和其它杂散磁场。1.3 GHz 高  $Q$  超导腔对磁屏蔽的要求很高, 屏蔽层内的剩磁应小于  $5 \times 10^{-7}$ , 同时也需要在降温时快速通过超导临界温度。

用于超导加速器的功率耦合器的主要特点为内侧联接低温高真空射频超导加速腔, 外侧则联接室温和大气环境中的微波功率源, 因此需要从室温过渡到液氮温度, 要求整个结构漏热小、微波反射率低。特别是同步辐射光源中超导加速模组的功率耦合器需要传输数百 kW 的微波功率, 因此在设计中需充分考虑冷却和二次电子共振抑制等问题, 在组装到加速模组之前还需要在微波锻练平台上进行老练。此外, 由于在低温工作状态时超导腔真空泄露是灾难性的, 因此陶瓷隔离窗的质量也至关重要。对同轴型功率耦合器, 通常采用在内、外导体之间加 1~2 kV 的直流高压抑制二次电子共振。

最后值得一提的是由于超导腔的  $Q$  值非常高,任何微小的扰动都可能使超导腔偏离谐振频率,因此需要通过幅相控制系统(前馈和反馈回路),把幅度和相位分别控制在一定的范围内,以满足超导加速器稳定运行的要求。

## 4 总 结

经过半个多世纪的发展,目前射频超导加速技术已日趋成熟,广泛应用于同步辐射光源(SR)、自由电子激光装置(FEL)、对撞机、散裂中子源以及核物理实验装置中。目前国际上新型超导腔材料的研究已经取得重要进展,采用  $Nb_3Sn$  材料研制的超导腔已经接近实用,未来射频超导加速技术将向低制造成本和低运行成本方向不断发展。国际上很多同步辐射光源都采用了射频超导加速技术,而超导直线加速器也已应用于 X 射线自由电子激光和一些长波段小型光源。国内射频超导技术虽然起步较晚,但自 20 世纪 90 年代以来,北京大学、中科院高能物理研究所、中科院兰州近代物理研究所、中科院上海应用物理研究所/中科院上海高等研究院、中国原子能科学研究院、中国工程物理研究院和中国科学技术大学等单位先后开展射频超导技术研究或应用,在高梯度高  $Q$  超导腔研制、强流超导加速器运行以及新材料超导加速腔研发等方面均已取得国际先进水平的成果。在光源中的应用方面,中科院高能物理研究所的正负电子对撞机(部分机时运行在同步辐射模式)、上海第三代同步辐射光源、北京大学和中国工程物理研究院基于射频超导直线加速器建设的高重频 THz 辐射源均采用了超导加速模组,正在建设的北京高能光源和合肥衍射极限环光源和一些计划中的光源也将采用射频超导技术,而计划于 2026 年建成的上海连续波自由电子激光装置将成为世界上规模最大的采用连续波射频超导技术的自由电子激光光源。射频超导加速技术将在先进光源中发挥越来越重要的作用。

## 参考文献:

- [1] Schwettman H A. Proceedings of 5th International Conference of High Energy Accelerators (Frascati, 1965) [C].
- [2] Turneaure J P, Viet N T. Superconducting Nb  $TM_{010}$  mode electron-beam welded cavities [J]. *Applied Physics Letters*, 1970, 16(9): 333-335.
- [3] Klein U, Proch D. Proceedings of the Conference of Future Possibilities for Electron Accelerators [C]. Charlottesville, 1979: N1-17.
- [4] Shemelin V D. Low loss and high gradient SC cavities with different wall slope angles [C]//2007 IEEE Particle Accelerator Conference. 2007: 2352-2354.
- [5] Reschke D, Aderhold S, Möller A, et al. Results on large grain nine-cell cavities at DESY: Gradients up to 45 MV/m after electropolishing [C]//Proceedings of SRF2011. 2011: 490-494.
- [6] Geng R L. Overview of high gradient SRF R&D for ILC cavities at Jefferson Lab [C]//Proceedings of SRF2009. 2009: 213-217.
- [7] 郝建奎, 全胜文, 林林, 等. 国际直线对撞机(ILC)高梯度射频超导加速腔研制 [J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2013, 43(10): 1321-1326. (Hao Jiankui, Quan Shengwen, Lin Lin, et al. The first high gradient 9-cell superconducting cavity reached ILC requirements in China [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2013, 43(10): 1321-1326)
- [8] Kostin D, Gössel A, Lange R, et al. Testing the FLASH superconducting accelerating modules [C]//Proceedings of the 13th International Workshop on RF Superconductivity SRF2007. 2007: 442-445.
- [9] Reschke D, Decking W, Walker N J, et al. The commissioning of the European-XFEL linac and its performance [C]//Proceedings of the 18th International Conference on RF Superconductivity SRF2017. 2017: 1-5.
- [10] Hao Jiankui, Quan Shengwen, Lin Lin, et al. Fabrication, treatment and test of large grain cavities [C]//Proceedings of the 18th International Conference on RF Superconductivity SRF2007. 2017: 700-702.
- [11] Singer W. Development of large grain cavities at DESY [C]//TTC2011, Beijing, 2011.
- [12] 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: 102001.
- [13] Grassellino A, Romanenko A, Trenikhina Y, et al. Unprecedented quality factors at accelerating gradients up to 45  $MVm^{-1}$  in niobium superconducting resonators via low temperature nitrogen infusion [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2017, 30: 094004.
- [14] Posen S. Update on insitu mid-T bake [R]. TTC2020, CERN, 2020.
- [15] Chen Shu, Hao Jiankui, Lin Lin, et al. Successful nitrogen doping of 1.3GHz single cell superconducting radio-frequency cavities [J]. *Chinese Physics Letters*, 2018, 35: 037401.
- [16] Zhou Quan, He Feisi, Pan Weimin, et al. Medium-temperature baking of 1.3 GHz superconducting radio frequency single-cell cavity [J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2020, 4(4): 507-512.
- [17] Chen J F, Hou H T, Liu Y F, et al. N-doping studies with single-cell cavities for the SHINE project [C]//Proceedings of the 19th International Conference on RF Superconductivity SRF2019. 2019: 102-105.
- [18] Galayda J N. LCLS-II final design report [R]. LCLSII-1.1-DR-0251-R0, 2015.
- [19] Zhu Z Y, Zhao Z T, Wang D, et al. SCLF: an 8-GeV CW SCRF linac-based X-ray FEL facility in Shanghai [C]//Proceedings of the 38th International Free Electron Laser Conference(FEL2017). 2017: 182-184.
- [20] Cavallari G, Chiaveri E, Tückmantel J, et al. Acceptance tests of superconducting cavities and modules for LEP from industry [C]//Proceedings of the 4th



- European Particle Accelerator Conference EPAC94. 1994: 2042-2044.
- [21] Saito K, Kojima Y, Furuya T, et al. R&D of superconducting cavities at KEK [C]//Proceedings of the 4th Workshop on RF Superconductivity. 1989: 635-694.
- [22] Belomestnykh S, Barnes P, Chojnacki E, et al. Running CESR at high luminosity and beam current with superconducting RF system [C]//Proceedings of EPAC 2000. 2000: 2025-2027.
- [23] Furuya T, Mitsunobu S, Tajima T, et al. Thermal cycle tests of KEK 500MHz cavities [C]//Proceedings of the 5th Workshop on RF Superconductivity. 1991: 684-693.
- [24] Wang Guangwei, Dai J P, Dai X W, et al. Fabrication and test of 500MHz Nb cavity for BEPCII [C]//Proceedings of the 15th International Conference on RF Superconductivity. 2011: 512-514.
- [25] Liu J F, Hou H T, Mao D Q, et al. Development of superconducting radio frequency cavities at SINAP [C]//Proceedings of IPAC2012. 2012: 2248-2250.
- [26] Zhang Pei, Zhang Xinying, Li Zhongquan, et al. Development and vertical tests of a 166.6 MHz proof-of-principle superconducting quarter-wave beta=1 cavity [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90: 084705.
- [27] Gruner S M, Bilderback D, Bazarov I, et al. Energy recovery linacs as synchrotron radiation sources (invited) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(3): 1402-1406.
- [28] Poole M W, Clarke J A, Seddon E A. 4GLS: an advanced multi-source low energy photon facility for the UK [C]//Proceedings of EPAC2002. 2002: 733-735.
- [29] Aune B, Bandelmann R, Bloess D, et al. Superconducting TESLA cavities [J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2000, 3: 092001.
- [30] Padamsee H, Knobloch J, Hays T. RF superconductivity for accelerators [M]. New York: John Wiley & Sons, 1998: 59-62.
- [31] Crawford A, Eichhorn R, Furuta F, et al. The joint high  $Q_0$  R&D program for LCLS-II [C]//Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference IPAC2014. 2014: 2627-2630.
- [32] He Feisi. Experimental study of simplified mid-T furnace baking at IHEP (15+5) [C/OL]//TTC 2021 Virtual Meeting. (2021-01-19). <https://indico.desy.de/event/27572/contributions/94299/>.
- [33] Büchner A, Gabriel F, Grosse E, et al. The ELBE-project at Dresden-Rossendorf [C]//Proceedings of EPAC2000. 2000: 732-734.