

CSNS 铁氧体环性能初步测试

黄蔚玲¹⁾ 孙虹 施华 梁笏鸣 谷俊 李晓 邱颖伟

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 用于中国散裂中子源 CSNS 的环射频铁氧体同轴谐振腔, 工作频率在 1.02MHz 至 2.42MHz. 论文对决定腔性能的铁氧体环材料进行了性能测试研究. 通过改变铁氧体环的偏置磁场来改变铁氧体的磁导率, 使腔的等效电感发生变化, 从而使得 LC 并联谐振回路的谐振频率改变, 进而获得铁氧体环在不同频率, 不同高频磁场强度下的 $\mu_r Q f$ 、品质因数和功率密度值. 本文比较了几种不同铁氧体环的测量结果, 选择适合于 CSNS 的环射频铁氧体谐振腔的材料为 4M2.

关键词 CSNS 铁氧体环 磁导率 功率密度

1 概述

在 CSNS 快循环质子同步加速器中采用了铁氧体加载的同轴谐振腔对粒子进行加速. 腔体的铁氧体加载同轴传输线部分作为电感与间隙电容构成并联谐振回路, 并在腔末端的间隙处形成 RF 加速电场, 使穿过同轴内导体的束流得到能量并加速^[1]. 每个工作周期 (20ms) 内所需的高频频率变化曲线及相应的高频磁通密度分布曲线如图 1 所示.

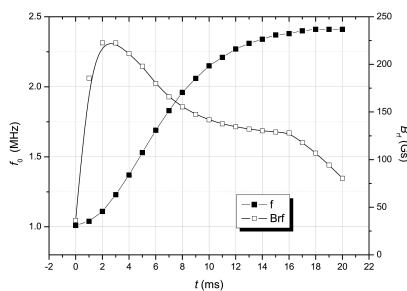


图 1 加速周期内所需的谐振频率及高频磁场强度 B_{RF} 曲线

相对于空芯电感器, 铁氧体加载电感器的电感值会增加, 但因磁滞效应及涡流效应引起的能量损耗也相应增加许多. 如果铁氧体加载的电感器与一无损电容并联, 则该 LC 谐振电路的阻抗为^[2]

$$Z = \omega Q L = (\mu' Q f) 2\pi L_0. \quad (1)$$

系数 $\mu' Q f$ 为衡量一给定铁氧体材料性能的参数.

为了解铁氧体材料性能, 针对铁氧体小环样品, 搭建了如图 2 所示的实验平台, 测量铁氧体环样品的相对磁导率 μ_r 与磁场强度 H 的关系、高频磁通密度 B_{RF} 与 $\mu_r Q f$ 的关系, 以及 B_{RF} 与功率密度 PD (Power density) 的关系, 以满足 CSNS 环射频的稳定运行需要.

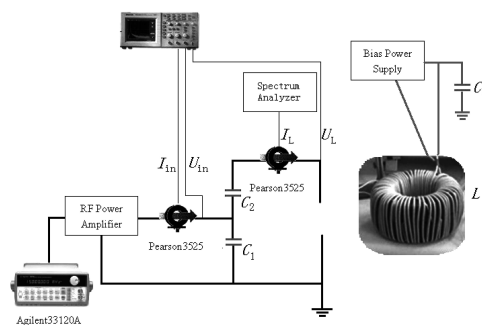


图 2 铁氧体小环测试方案图

利用信号发生器 (Agilent33120A) 产生的扫频信号作为高频放大器 (SPS2500HH/D) 的输入信号, 铁氧体环 (L) 的高频绕组依 8 字方法绕线 6 圈, 与电容 C_2 串联后, 再与电容 C_1 并联接入高频回路中, 等效电路如图 3 所示.

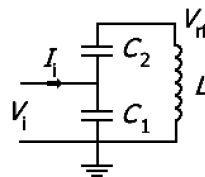


图 3 等效电路

2008-01-07 收稿

1) E-mail: huangwei@mail.ihep.ac.cn

外径 r_o , 内径 r_i , 长为 $t \cdot m$ (这里 t 为一片铁氧体环的厚度, m 为铁氧体环的片数), 高频绕线匝数为 n , 空芯同轴电感设为 L_0 ,

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} t \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right) n^2 m, \quad (2)$$

当介质为铁氧体时, 同样尺寸下的同轴电感为

$$L = \mu_r L_0, \quad (3)$$

在等效电路中, C_1 , C_2 与 L 串联谐振, 为了使功率源的输出负载为 50Ω , 需要设计匹配电容值. 由 LC 谐振回路的谐振频率

$$\omega = 2\pi f_0 = 1/\sqrt{LC}, \quad (4)$$

分路阻抗

$$R_{sh} = \omega Q L, \quad (5)$$

得到变压比

$$n = \sqrt{\frac{R_{sh}}{Z_0}} = \sqrt{\frac{R_{sh}}{50}} = \frac{C_1}{C_2}, \quad (6)$$

根据

$$C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2) \quad (7)$$

可以求得 C_1 和 C_2 的电容值.

在谐振频率下, 如果忽略电容器的损耗, 铁氧体环的功率损耗即为整个 LC 回路消耗的能量, 功率密度

$$PD = U_{in} \cdot I_{in} / V_{ferrite}, \quad (8)$$

这里 $V_{ferrite}$ 为 2 个铁氧体小环的体积. 在 CSNS 中, 环射频腔的工作占空比为 0.3, 则

$$PD = 0.3 \cdot U_{in} \cdot I_{in} / V_{ferrite}. \quad (9)$$

2 测量过程与结果分析

在铁氧体环的 $H - \mu$ 曲线测量过程中, 偏流磁场 H 由下式给出:

$$H = I_b \cdot n_b / L_a, \quad (10)$$

这里 I_b 为偏流电流强度, n_b 为偏流绕线匝数, $L_a = \pi(r_i + r_o)$ 为铁氧体环截面的平均周长.

信号发生器产生周期 20ms 的正弦波形扫频信号, 频率范围 800kHz—2.6MHz, 作为 LC 谐振回路的高频输入. 选取固定的电容 C , 缓慢增加 I_b , 利用频谱仪或示波器的 FFT 数学功能获得 LC 回路的谐振频率 f_0 , 根据公式 (4) 计算在 I_b 作用下的实际电感值, 再由公式 (3) 推算铁氧体环的相对磁导率 μ_r . 图 4 给出了 4 种材料的 $H - \mu_r$ 曲线. 从图中可以看到, BNL 与 Ferroxcube 公司的 4M2 材料的 $H - \mu_r$ 曲线基本重合, 久远公司提供的铁氧体材料初始磁导率 μ_i 值要比 4M2 材料高 2 到 4 倍左右.

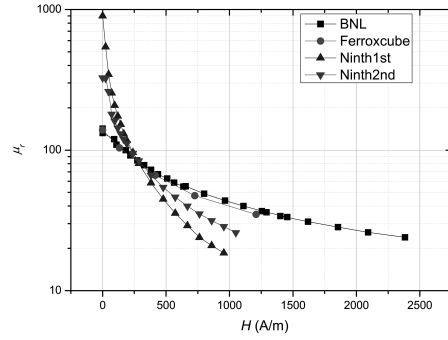


图 4 4 种材料的 $H - \mu_r$ 曲线

在高功率测量过程中, 信号发生器产生的扫频信号作为功率放大器的输入调制信号. 根据公式 (4)—(7) 选取合适的 C_1 和 C_2 , 并调节偏流源输出电流大小, 使得谐振回路的谐振频率分别为 1MHz, 1.2MHz, 1.5MHz, 1.8MHz, 2.1MHz, 2.4MHz, 在每个谐振频率下, 缓慢增加输入信号幅值, 使得铁氧体小环加载的电感两端高频电压值恰好为根据下式所计算分别为 50Gs, 100Gs, 150Gs, 200Gs, 250Gs 等定值时对应的值^[3]:

$$V_{RF} = 2\pi f \cdot r_i \cdot t \cdot n \cdot m \cdot B_{RF \max} \cdot \ln \frac{r_o}{r_i}. \quad (11)$$

通过上述方法, 测量铁氧体加载的电感两端的高频电压, 并利用示波器的 FFT 数学功能来测量谐振频率下的品质因数. 同时测量固定谐振频率下的输入电压及电流值, 运用公式 (8) 或 (9) 计算铁氧体加载电感中的功率密度.

根据图 1 给出的实际工作周期内所需的 RF 频率曲线及高频磁通密度 B_{RF} 曲线, 在谐振频率为 1.2MHz 时, 铁氧体腔内最大磁通密度需要达到 250Gs 左右, 因此铁氧体环的功率密度值成为一个关键参数. 图 5 给出了谐振频率为 1.2MHz 时, 4 种材料功率密度的比较结果, 可见, BNL 和 Ferroxcube 公司提供的 4M2 材料可以在相同的功率密度下达到更高的高频磁通密度. 并由图 6 给出的 1.2MHz 谐振频率下 4 种材料的 $B_{RF} - \mu_r Q f$ 曲线可知, 4M2 的性能要好于久远公司所提供的材料.

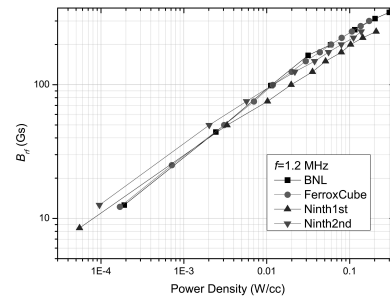


图 5 谐振频率为 1.2MHz 时, 4 种材料的功率密度曲线

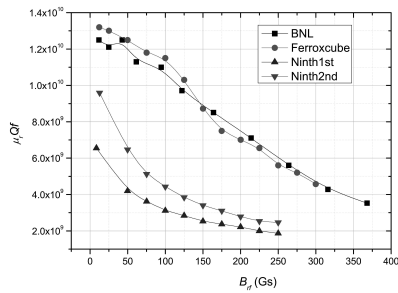


图 6 谐振频率为 1.2MHz 时, 4 种材料的 $B_{RF} - \mu_r Qf$ 曲线

3 结论

由测量结果的比较看, 4M2 在谐振频率为 1.2MHz 时, 能够在功率密度小于 0.3W/cc 的情况下达到较高

的高频磁通密度 B_{RF} . 由于 CSNS 环射频要求在 f_0 小于等于 1.5MHz 时, 高频磁通密度 B_{RF} 要达到 250Gs 左右, 久远公司提供的铁氧体材料在这一条件下损耗较大, 当铁氧体内的功率密度大于 0.3W/cc 时, 有可能使得铁氧体环内能量沉积较大, 一旦热量不能及时排出, 温度快速上升, 就会影响铁氧体环的磁导性能, 进而影响腔的稳定工作.

通过测量 4 对铁氧体环在不同频率, 不同高频磁场强度下的 $\mu_r Qf$ 、品质因数和功率密度值, 对比几种不同铁氧体环材料的性能, 选择适合于 CSNS 的环射频铁氧体谐振腔的材料为 4M2.

感谢 Brookhaven National Laboratory 加速器中心的 A. Zaltsman 对铁氧体测量实验提出的建议和帮助! 感谢久远公司为论文实验提供铁氧体材料并进行了有意义的讨论.

参考文献(References)

- 1 IHEP of CAS. Primary Conceptual Design of China Spallation Neutron Source (CSNS)-Project Design and Research of Key Technology of Accelerators, 2004. 3—48 (in Chinese)
- 2 Gardner I S K. Ferrite Dominated Cavities. CERN Accelerator School, RF Engineering for Partial Accelerators, CERN 92-03: 349—374
- 3 Zaltsman A. Ferrite Measurement and Calculation, Experiment Report, 1998

(中国科学院高能物理研究所. 中国散裂中子源 (CSNS) 初步概念设计—加速器方案设计与关键技术研究, 2004)

Measurements on Different Ferrite Materials

HUANG Wei-Ling¹⁾ SUN Hong SHI Hua LIANG Jia-Ming GU Jun LI Xiao QIU Ying-Wei

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract The resonant frequency of the ferrite-loaded cavities used in the future China Spallation Neutron Source (CSNS) sweeps from 1.02MHz to 2.42MHz. The ferrite property is very important to the accelerator structure in the CSNS ring. A primary experiment was set up to measure the $\mu_r Qf$ value and the power density of different ferrite materials. According to the comparison results, 4M2 ferrite rings were chosen to meet the requirement of CSNS.

Key words CSNS, ferrite ring, magnetic permeability, power density