

自由电子脉塞用超导磁体系统*

张永 高广箴 王子凯 王淑媛 乔秀芬 赵宝志

(中国科学院电工研究所)

廖正久 乔郁芳

(中国科学院电子学研究所)

一、前言

众所周知:自由电子脉塞的波长与磁场强度有如下关系:

$$\lambda \approx 10.7/B_0$$

式中 λ 为波长(单位为mm), B_0 为磁场强度(单位为T)。例如4mm波长自由电子脉塞要求2.65T的磁场;2mm波长则要求5.3T的磁场。即波长愈短要求磁场愈强。目前,美苏等国在发展短波长,大功率自由电子脉塞方面,广泛采用超导磁体。我国在使用常规磁体的情况下发展了自由电子脉塞,但向更短波长方面发展时,必须使用超导磁体。因为使用脉冲常规磁体对研制自由电子脉塞是不方便的。因此,国内各单位正发展采用超导磁体的自由电子脉塞。我们结合具体情况,为发展自由电子脉塞技术和超导应用,研制了4mm波段自由电子脉塞用超导磁体系统。

二、磁体系统的设计

根据自由电子脉塞的一般原理和结构特点,对其轴线上磁场分布的要求,可示意地表示在图1中。整个系统由阴极、谐振腔、输出窗、阴极区磁体和谐振腔区磁体等五部分组成。

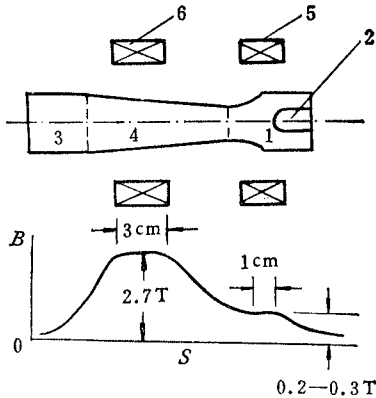
研制的4mm波段自由电子脉塞,要求在谐振腔中心处,均匀磁场区为30mm,磁场强度约为2.7T,磁场均匀性优于0.5%。考虑到灵活性,谐振腔中磁场可调制成梯度场,最大梯度约为3%。阴极区磁场强度为(0.2—0.3)T,并且要求在10mm的中心区内较均匀。阴极区与谐振腔之间的中心距离为250mm左右。

根据基本要求,设计中在谐振腔区用主超导磁体提供强均匀磁场,用梯度调制超导磁体使磁场产生梯度。而在阴极区,则用常规磁体调制该区磁场。

谐振区的主超导磁体由一个亥姆霍兹(Helmholtz)线圈对组成。根据基本要求和现实条件,通过设计、计算比较,最后选用表1所示的参量。

梯度调制超导磁体,由一双反向的线圈对组成,装配在主超导磁体中间。由电流的方向确定梯度的正负;用电流的大小改变梯度的大小。根据设计,计算和实验表明,可获得的最大磁场梯度约为 $\pm 3\%$ 。

* 1985年9月26日收到。



1 阴极区, 2 阴极, 3 输出窗, 4 谐振腔, 5, 6 磁体。

图 1 自由电子脉塞原理结构及其对磁场分布要求的示意图

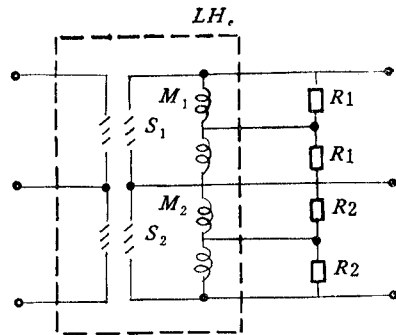


图 2 磁体系统电气原理接线

表 1 各磁体的设计参数

| 设计参数 | | 主超导磁体 | 梯度调制超导磁体 | 阴极区常规磁体 |
|--------------|----------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|
| 绕组几何尺寸 | 内半径 (mm) | 70 | 70 | 60 |
| | 外半径 (mm) | 133 | 84 | 210 |
| | 总高 (mm) | 126 | 42 | 180 |
| 选用导线 | 导线材料 | NbTi $\phi 0.4$ mm | NbTi $\phi 0.4$ mm | Cu 1.84×6.4 mm ² |
| | 铜超比 | 1:1 | 1:1 | |
| 匝数 | | 1036 \times 2 | 954 \times 2 | 620 \times 2 |
| 最大工作电流 (A) | | 30 | 30 | 25 |
| 最强磁场 (T) | | 3 | 0.2 | 0.3 |
| 谐振工作区磁场均匀度优于 | | 0.5% | — | 1% |
| 谐振工作区可调梯度 | | — | $\pm 3\%$ | — |
| 绕组总重量 (kg) | | 16 | 1.1 | 120 |

阴极区磁场为一反向的常规线圈对。根据设计计算表明, 阴极区磁体与主超导磁体配合, 可在阴极区中心处 1cm 内形成 (0.2—0.3) T 的均匀磁场。此外, 还可用调节螺杆改变阴极区常规磁体与主超导磁体之间的距离。

4mm 脉塞用磁体系统中各磁体的设计参数列于表 1。

为了获得高稳定的磁场, 主超导磁体和梯度调节超导磁体均并入热控式超导开关, 实行闭环运行。其主要电气原理接线如图 2 所示。

根据自由电子脉塞研究工作的要求, 杜瓦留有直径为 90 mm 的室温通孔。为了延长工作时间, 杜瓦为低漏热型的, 实现的具体措施是采用液氮槽保护与多层高真空绝热相结合的结构。液氮槽和液氦槽的颈管为小口径, 并用波纹管过渡, 采用环氧吊装结构。此外, 还采用了可拔电流引线装置, 以减少闭环运行后的引线漏热。最后选用的杜瓦尺寸如

表 2 杜瓦容器的主要几何尺寸

| | 外径 (mm) | 内孔直径 (mm) | 高度 (mm) | 容积 (l) |
|-----|------------------|-----------|------------------|--------|
| 液氮槽 | 上部 421 下部 362 | 132 | 313 | 25 |
| 液氮槽 | 540 | 485 | 360 | 16 |
| 外杜瓦 | 600 | 90 | 本体 450 高度 850 | |

表 2 所列。

杜瓦设计中,进行了机械强度核算和漏热估算,液氮槽和液氦槽可承受的压力不低于 2atm, 估算液氮蒸发率小于 100ml/h, 在正常稳定的情况下,可连续工作 120h 以上。

三、实验结果

4mm 波段超导磁体系统在 1984 年年底已完成了试制,并进行了实验。实验结果表明,主超导磁体可以在谐振腔中心区 3cm 内提供 0—3 T 的强均匀磁场。均匀度优于 0.5%。梯度调节超导磁体具有较好地改变谐振腔中心区磁场梯度的能力。借助超导开关,主超导磁体与梯度调节超导磁体均可以实现超导闭环运行,从而获得了高度稳定的磁场。典型磁位形分布曲线如图 3 所示。图中实线为主超导磁体和常规磁体的合磁场分布曲线。虚线为超导磁体经过梯度调节后的磁场分布曲线,谐振腔中最大磁场梯度约为 3%。这基本符合 4mm 波段自由电子脉塞的要求。

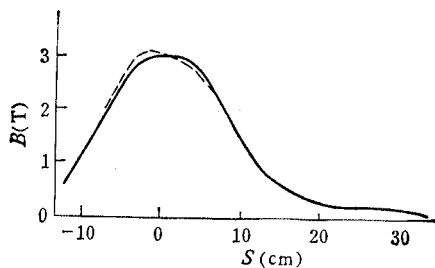


图 3 典型的磁位形分布曲线

对闭环运行超导磁体系统中的杜瓦进行了液氮蒸发实验,结果如图 4 所示。图 4 表明,在平静稳定的情况下,液氮蒸发率约为 0.05 l/h,在不进行补液的情况下,实验持续了 216h,即 9d。

所有实验表明,所研制的脉塞用超导磁体系统满足设计要求,并且有体积小,磁场稳定,磁位形可调和使用方便等优点。它将为我国发展短波长自由电子脉塞提供了必要的条件。

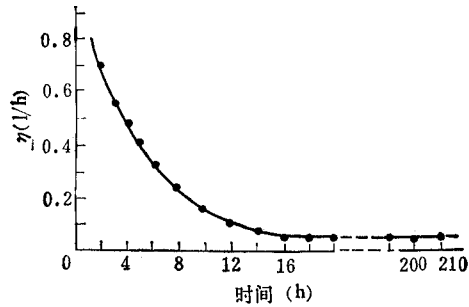


图 4 杜瓦中液氮蒸发率的实测曲线

参 考 文 献

- [1] A. V. Gaponov, et al., *Int. J. Electronics*, 51(1981), 277.
 [2] T. Idehara, et al., *J. Appl. Phys.*, 52(1981), 3276.

A SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEM FOR FREE-ELECTRON CYCLOTRON MASER

Zhang Yong, Gao Guangzhen, Wang Zhikai, Wang Shuyuan,
Qiao Xiufen, Zhao Baozhi

(*Institute of Electrical Engineering, Academia Sinica*)

Liao Zhengjiu, Qiao Yufang

(*Institute of Electronics, Academia Sinica*)

The superconducting magnet system is a important part of the free-electron cyclotron maser. In this paper a new super conducting magnet system is designed and tested. It consists of a main superconducting magnet, a gradient superconducting magnet, a normal magnet, a cryostat and some other accessories. The advantages of the designed magnet system are small in size, high stable magnet field and suitable field profile. It is very suitable for 4 mm wave free-electron cyclotron maser.