

ECR 离子源六极永磁体的设计研究*

孙良亭^{1,2;1)} D. Hitz³ 赵红卫¹

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100039)

3 (CEA/Grenoble, 17Rue des Martyrs, 38041 Grenoble, France)

摘要 分别从材料、结构、尺寸等方面全面地研究了 Halbach 结构六极永磁体的设计方法. 针对个别磁块可能存在的退磁问题给出了相应的解决方案. 通过优化结构, 使六极磁铁在离子源等离子体弧腔内壁产生的磁场达到最大. 用 POISSON, PERMAG, TOSCA 等多个磁场模拟程序计算模拟了六极磁场的大小与分布, 并给出了一些相应的曲线.

关键词 ECR 离子源 Halbach 结构 六极永磁体 钕铁硼永磁材料

1 引言

ECR (Electron Cyclotron Resonance) 离子源自 20 世纪 60 年代末出现以来, 一直受到国际核物理界的极大关注^[1]. 它利用轴向磁镜场与径向六极场叠加而形成的最小 B 磁场约束等离子体, 馈入微波加热电子, 再通过高能电子逐级剥离中性原子, 产生多电荷态离子. 目前, 通过高压引出的高电荷态离子束被广泛地应用在核物理、原子物理、材料物理、生物及农业等基础研究上. 传统的 ECR 离子源工作区的磁场由线包产生的轴向磁镜场与六极永磁体产生的径向场叠加而成. 这几年随着 ECR 离子源技术及理论的发展, 高磁场、高微波频率 ECR 离子源成为主流, 这就要求相应的径向场也要达到一定的强度. 随着永磁材料技术的发展, 特别是 NdFeB 永磁材料技术的发展, 使得永磁材料的价格大幅下降, 而性能有了较大的提高. 现在常用于制造六极永磁体的是 N 系列 NdFeB 材料. 永磁体所能提供的磁场大小主要受磁性材料性能、磁体尺寸及结构的影响, 不像螺线管型磁体, 只要电流能达到一定大小, 就可调节相应的磁场大小. 所以, 设计永磁体就要从材料、尺寸、结构入手, 使设计的磁场达到预定的要求. 对于六极永

磁铁的设计, K. Halbach 早在 20 世纪 80 年代初就提出了一种很有效的结构设计方案, 即 Halbach 结构^[2,5]. 本文主要讨论这种结构的六极永磁体的设计.

2 永磁材料的影响

对于 Halbach 结构的六极永磁体, 其截面结构见图 1, 它在工作区产生的径向磁场可表示为^[2]

$$B(r) = 1.5 B_r (\tau/R_{in})^2 [1 - (R_{in}/R_{ex})^2] C_m,$$
$$C_m = \cos^3(\epsilon\pi/M) \sin(3\epsilon\pi/M) / (3\epsilon\pi/M), \quad (1)$$

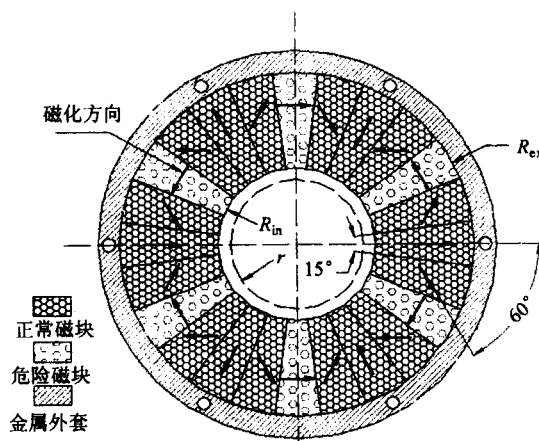


图 1 六极永磁体截面结构图

2003-10-28 收稿

* 中国科学院知识创新工程重大项目(9KJCX1-09), 国家杰出青年科学基金(10225523)资助

1) E-mail: sunlt@impcas.ac.cn

其中 B_r 为永磁材料的剩磁, r 为在永磁铁工作区的径向位置, R_{in} 和 R_{ex} 分别为六极铁的内外半径, ϵ 为填充系数, M 为组成六极铁的扇块数. 从(1)式可得出, 随 B_r 的增大, 六极铁在工作区某位置处产生的径向场是直线增加的. 用 Permag^[3] 程序模拟计算可以得到一致的结果.

由于多扇块结构(如图 1 所示), 单片扇块沿角向很薄, 它们将有可能在自身产生的强磁场和轴向磁镜场的径向分量中被退磁, 而造成整个六极铁的性能下降, 故在设计中要考虑到这一点. 在无退磁情况下, 计算磁铁中所能允许的合成场沿易轴的最小分量, 是设计解决退磁问题的第一步. 以 N45 材料为例, 它的标准剩磁为 $B_r = 1.33\text{T}$, 感应矫顽力 $H_{cj} = -875\text{kA/m}$, 在该情况下, 计算磁块中所能允许的合成场沿易轴的最小分量的经验公式为

$$B = B_r + 0.8 \times 0.88 \times \mu \times H_{cj}, \quad (2)$$

其中 0.8 为基本安全系数, 0.88 为设定在温度分别为 40°C , 60°C 时的温度系数, $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{Vs/Am}$, 这时可得 $B \approx 0.56\text{T}$. 通过 Superfish/Poisson 程序^[4], 可以计算在各个扇块中合成磁场在易轴平行方向的分量, 如果某区域小于 0.56T , 那么该区域就可能被退磁, 是危险区. 该区域面积与考察扇块的面积比值即为该扇块的危险系数. 图 1 所示的设计中采用了 24 块结构, 其中 6 块为危险扇块, 用 6 块较低剩磁但有较高的感应矫顽力的 NdFeB 材料代替它们, 就可较好地解决这一问题.

3 扇块数的影响

对于一个 Halbach 结构, 由 M 个扇块组成的 $2N$ 极永磁铁, 它的角向结构周期为 $2\pi/M$, 且相邻两块扇块的磁化方向朝同一方向增加 $(N+1)2\pi/M$. 这种结构的永磁铁在其工作间隙中产生的 $2N$ 极磁场分量由下式给出^[5]:

$$|B| = |B(r)| \cdot K, \\ K = \cos^N(\epsilon\pi/M) \frac{\sin(N\pi\epsilon/M)}{N\pi/M}, \quad (3)$$

$B(r)$ 只是 r 的函数(对于一定的 N). 对于六极永磁铁, 不难看出当 $M \rightarrow +\infty$ 时, $K = 1$. 通过增加六极永磁铁的扇块数, 对于同一 $B(r)$, 可有效地增大 $|B|$. 图 2(a) 所示的是用 Permag 程序计算的结果, 可看出随着扇块数的增加, 在六极铁内极面的磁场 $|B|$ 随之迅速增加, 而当 M 达到 36 块左右时, $|B|$ 趋于饱和, 故在通常的强磁场六极铁设计中, M

取 36.

另外, 在六极磁体外的磁场由下式给出^[5]:

$$|B|^* = B^*(r) \times K^*, \\ K^* = \cos^{-N}(\epsilon\pi/M) \frac{\sin(N\pi\epsilon/M)}{N\pi/M}, \quad (4)$$

$B^*(r)$ 也只是 r 的函数(对于一定的 N), 增加 M 可有效减小永磁铁在磁体外的漏磁, 增大六极磁场分量的有效值 K , 使其趋于理想值 1.

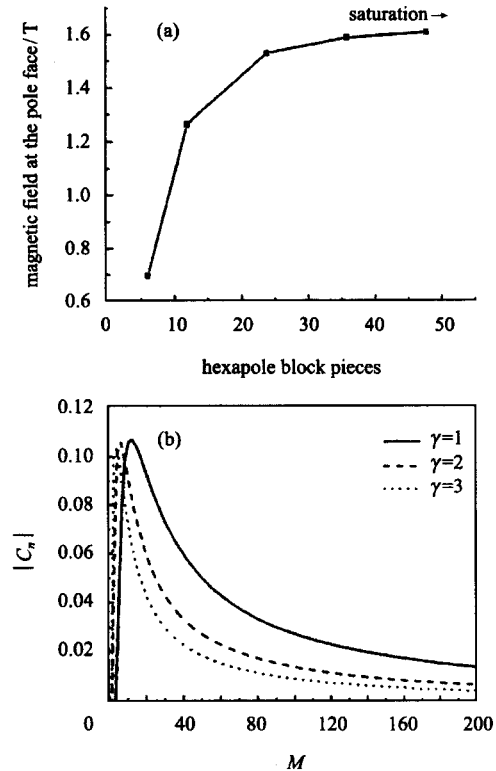


图 2 扇块数对 B_{rad} (a) 与 $|C_n|$ (b) 的影响

六极铁由多个扇形块组成, 并不是理想的六极构型, 它必然会产生一些高阶磁场分量, 在工作区的高阶磁场可表示为

$$|B(r)| = B_r \sum_{\gamma=0}^{n-1} \left(\frac{r}{r_{in}}\right)^{n-1} \frac{n}{n-1} \left[1 - \left(\frac{r_{in}}{r_{ex}}\right)^{n-1}\right] \cdot C_n, \\ n = 3 + \gamma M, \\ C_n = \cos^n(\pi/M) \frac{\sin(n\pi/M)}{n\pi/M}, \quad (5)$$

其中 n 为高阶磁场的阶数. 一般来讲, 从等离子体中损失的粒子都将会沿磁力线方向逃逸. 在多极磁场中, 磁力线指向是多极磁体的极面^[6], 因而在 ECR 离子源的弧腔内壁六极极面处, 应尽量减少多极场分量, 以增强磁场对等离子体中电子的约束, 减少逃逸. 从式(5)可看出, 如果采用 24 扇块结构, 该永磁铁工作区的高阶分量主要的是 27 极与 51 极分量,

其中危害较大的是 27 极分量. 从图 2(b)中可看出, 对于 $\gamma \geq 1$ 的高阶多极磁场分量, M 越大, 其对应的 $|C_n|$ 越小, 且越高阶的分量减小的越快. 对于 24 扇块结构六极永磁铁, 如果取 $R_{in} = 40\text{mm}$, $R_{ex} = 80\text{mm}$, 对(5)式分别取 $\gamma = 0, 1, 2$ 可分别得到 $n = 3, 27, 51$ 时 $|B(r)|/B_r$ 的函数, 它们的函数曲线见图 3, 不难看出, 高阶分量主要影响靠近六极磁体的内壁附近的区域, n 越大, 影响的区域和幅度越小. 综合以上论述, 在材料及磁体结构允许的条件下, 增加组成六极永磁铁的扇块数, 可有效增强工作区六极场且减小高阶场分量的大小.

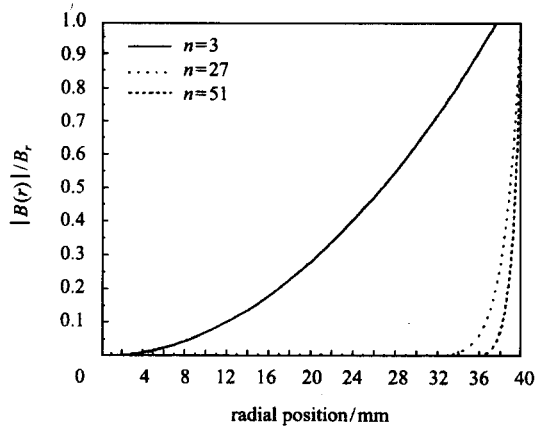


图 3 高阶磁场的影响深度

4 六极永磁铁尺寸的优化设计

4.1 磁体径向厚度 D 一定的优化设计

从(3)式可以看出, 影响工作区某一位置径向磁场大小的主要有 K 与 $|B(r)|$ 两个量, K 在前面已讨论过, $|B(r)|$ 是一个与六极磁铁物理尺寸相关的量. 从式(5)可以得出, 对于六极磁铁, $|B(r)| = 1.5B_r (r/R_{in})^2 [1 - (R_{in}/R_{ex})^2] C_3$, C_3 是与物理尺寸无关的量, 从而可简化定义

$$F(r) = (r/R_{in})^2 [1 - (R_{in}/R_{ex})^2], \quad (6)$$

作为讨论 R_{in} 与 R_{ex} 对六极永磁铁在工作区产生磁场影响讨论的参照函数, 下面就这个函数进行相关讨论.

传统 ECR 离子源在设计时, 六极永磁铁的有效工作区是在 ECR 离子源的弧腔内, 一般采用的是双层水冷弧腔结构, 其厚度为 3.0 至 6.0mm, 弧腔的外壁与六极永磁铁的内壁之间是紧配合的, 这里取其厚度为 5.5mm. 这样, 为考察六极永磁铁在弧腔内

壁表面的磁场(工作区的最大磁场) B_{rad} , 令 $R_{in} = r + 5.5$, $R_{ex} = R_{in} + D$, 则

$$F(r) = \left\{ \frac{r}{(r + 5.5)} \right\}^2 \left\{ 1 - \left[\frac{(r + 5.5)}{(r + D + 5.5)} \right]^2 \right\}, \quad (7)$$

如果 D 设计为 67mm, 则 $F(r)$ 随 r 的变化为图 4 所示, 在 $r = 43.2\text{mm}$ 处 $F(r)$ 达到最大值. 用 Permag 程序(采用 N45 材料, 24 扇块结构), 可模拟计算来验证, 其最大值出现在 $r = 43.0\text{mm}$ 处, 近似为前面的函数模拟值.

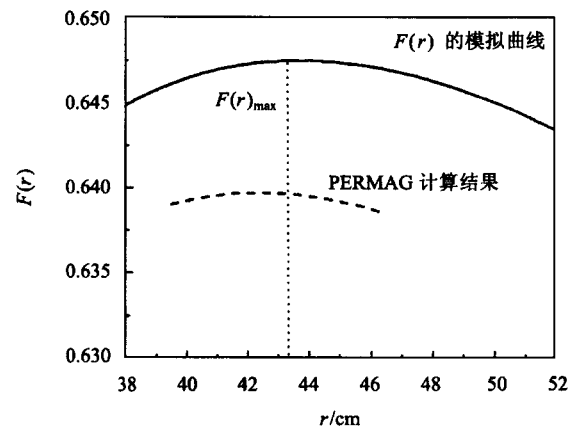


图 4 $D = 67\text{mm}$ 时 $F(r)$ 与用 PERMAG 计算的曲线

函数表达式(7)可作为六极永磁铁设计的一个有效工具, 对于设计有一定厚度的六极永磁铁, 可先通过该函数找到能产生最大工作磁场的大概弧腔内半径 r_0 , 再通过相关程序在 r_0 周围小范围内计算得到较精确的 r , 从而得到我们最终设计的物理尺寸参数. 如果设计的 r 大于或小于前面得到的 r , 设计加工得到的六极磁铁产生的有效 B_{rad} 会有所减小.

4.2 磁体外径 R_{ex} 一定的优化设计

该种情况在 ECR 离子源设计中常常遇到, 由于六极永磁铁常放在轴向线包与铁轭内, 为了不牺牲轴向磁场, 就必须限定六极永磁铁的外径, 此时要使径向磁场达到最大, 就必须在 R_{ex} 一定的情况下对六极永磁铁尺寸进行优化.

当 $R_{ex} = 114\text{mm}$ 时, 从(6)式可以得到此时函数 $F(r)$ 的曲线, 见图 5. 从图中可以得出, $F(r)$ 函数的最大值出现在 $r = 36.0\text{mm}$ 处, 也即是说, 当 $R_{in} = 41.5\text{mm}$ 时, 该六极永磁铁产生最大的 B_{rad} . 为证实其可靠性, 再次用 Permag 程序(采用 N45 材料, 24 扇块结构)计算验证, 其结果见图 5, 表明其最大值也出现在 $R_{in} = 41.5\text{mm}$ 处. 在设计中, 如果设计的 R_{in}

大于或小于 41.5mm, 那么将导致设计制造的六极永磁体产生的 B_{rad} 小于该 R_{ex} 情况下的最大值. T. Katayose^[7] 在他的 ECR 源设计文章中也曾提到过这样的结论.

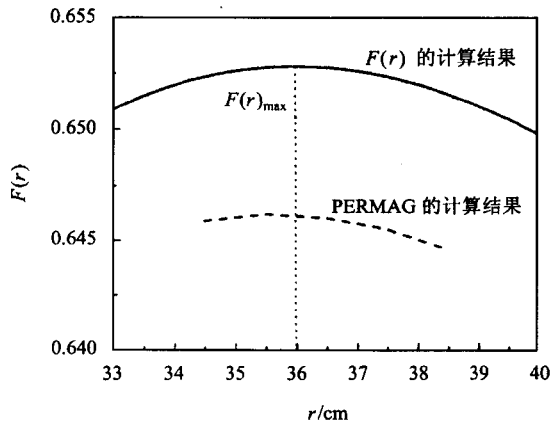


图5 $R_{\text{ex}} = 114\text{mm}$ 时 $F(r)$ 与用 PERMAG 计算的曲线

4.3 磁体内径 R_{in} 一定时的优化设计

在设计 ECR 离子源时, 如采用较大内径的弧腔, 要提高轴向磁场值和径向六极磁场场强都是比较困难的, 因此, 在设计之初, 通常就确定适合自己要求的弧腔内径, 然后在这一内径下, 设计满足要求的六极铁外径. 对于传统 ECR 离子源设计, 经常采用 $\phi 69\text{mm}$ 的弧腔内径, 如果采用 5.5mm 的弧腔壁, 则六极铁的内径应为 $\phi 80\text{mm}$, 那么

$$F(R_{\text{ex}}) = (34.5/40)^2 [1 - (40/R_{\text{ex}})^2], \quad (8)$$

该函数值随 R_{ex} 的增大, 逐渐趋于饱和, 饱和值为 $(34.5/40)^2 = 0.744$, 可见当 R_{in} 一定时, 在允许较大范围增大 R_{ex} 的基础上, 减小弧腔壁厚度(不影响机械结构的条件下)是增大 B_{rad} 的一个有效途径.

5 B_{rad} 为 1.3T 六极永磁体的设计

目前, ECR 离子源向高场、高频方向发展^[8], 这就需要相应的轴向与径向磁场都要达到相应的强度. 以设计一台 18GHz 强流高电荷态 ECR 离子源为例, 它的 ECR 共振磁场 B_{ECR} 大小为 0.64T, 根据 ECR 离子源的 Scaling Laws^[9], 径向六极场在弧腔内壁的大小 B_w 应为 $2B_{\text{ECR}}$, 即 1.28T, 取设计值为不小于 1.3T(弧腔厚度取 3.5mm).

选择 36 扇块的 Halbach 结构, 主要永磁材料用 N50M 型 NdFeB 材料 ($B_r = 1.42\text{T}$, $H_{\text{cj}} = -1114\text{kA/m}$,

$H_{\text{cb}} = -13.1\text{kOe}$), 设计磁体外半径为 80mm, 长 300mm, 那么 $C_3 \approx 0.98$, 则由前面六极磁体 $|B(r)|$ 的表达式可以得出只要 $F(r) = 0.63$ 即可达到要求. 对于 80mm 外半径, 按(6)式计算可得, 当 $r = 24.5\text{mm}$ 时, $F(r)$ 的最大值为 0.67, 可满足要求. 由于永磁体中永磁材料的工作点问题, 设计 $|B(r)|$ 时应考虑 H_{cb} 的大小, 同时考虑采用内径尽可能大的弧腔, 故而取 $r = 30.5\text{mm}$, 即 $R_{\text{in}} = 34\text{mm}$. 用 POISSON/Pandira 程序计算得到的该六极永磁体的等势线, 如图 6 所示. 由第二部分的讨论得知, N50M 材料在该磁铁中所能允许的合成场沿易轴的最小分量为 $B \approx 0.41\text{T}$, 所以该六极永磁体中有 6 块危险磁块. 故此采用较高 H_{cj} 的 NdFeB 材料永磁块代替这 6 块, 材料选取 N42SH, 主要磁性参数为: $B_r = 1.29\text{T}$, $H_{\text{cj}} = -1671\text{kA/m}$, $H_{\text{cb}} = -12\text{kOe}$. 它能承受的最大反向磁场为 $B \approx -0.19\text{T}$, 大幅度减小了该永磁体的退磁危险系数.

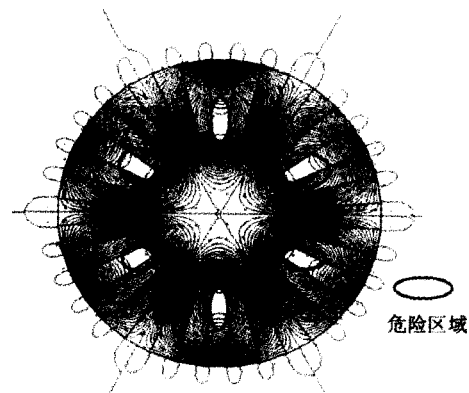


图6 六极永磁体截面磁等势线图

利用目前计算磁场分布及大小的最好程序之一 TOSCA 程序, 对上述设计的六极永磁体的磁场重新计算, 其工作区 $\phi = 0$ 位置径向磁场 $B(r)$ 沿径向的分布图显示在图 7, 可见在 $r = 30.5\text{mm}$ 处, $B(r) = 1.3\text{T}$. 图 8 为 $B(r)$ 与 $B(\phi)$ 以及它们的合成总磁场 B_t 在 $r = 30.5\text{mm}$ 半径处沿角向的分布, 其中 $B(r)$ 与 $B(\phi)$ 的分布为近似 $\sin 3\phi$ 的周期函数, 其幅值为六极场的在工作区的最大值. 图 9 为该永磁体工作区六极磁场在 $\phi = 0$ 位置沿轴向的分布, 可见磁场分布覆盖了整个六极永磁体长度 300mm 的区域, 均匀强磁场区约为 220mm, 在六极铁两端, 径向磁场大小衰减至 0.68T, 同时轴向分量增大, 这被称为六极永磁体的末端效应. 由于该效应会在 ECR 离子源的弧腔注入端及引出等离子体电极上各产生一个方向

相反的三角星型刻蚀痕, 见图 10.

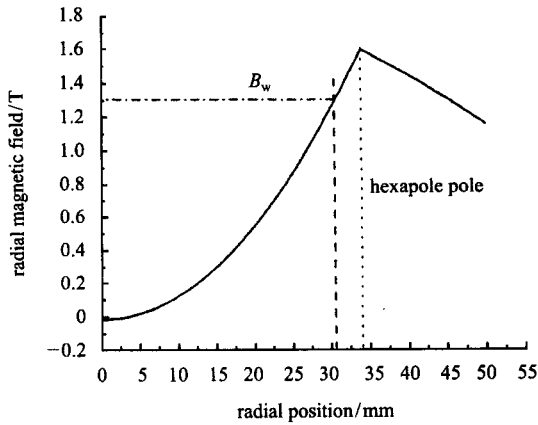


图 7 六极磁场沿径向分布曲线 ($\phi = 0$)

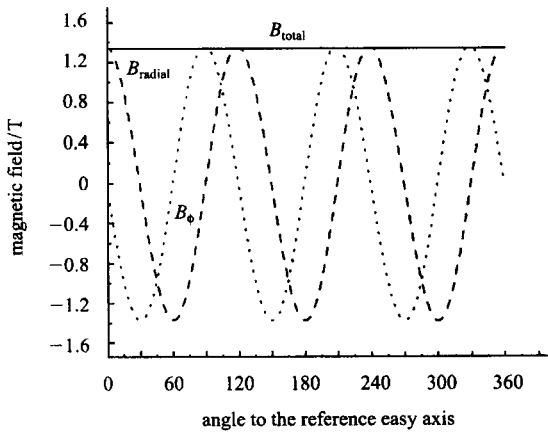


图 8 $B(r)$, B_{ϕ} , B_z 沿角向的分布

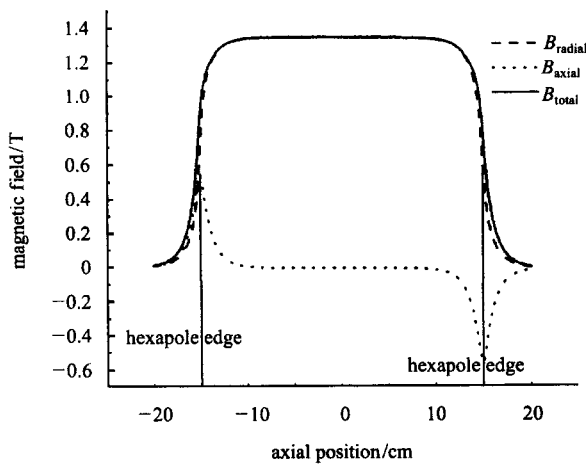


图 9 六极永磁体的边缘场现象

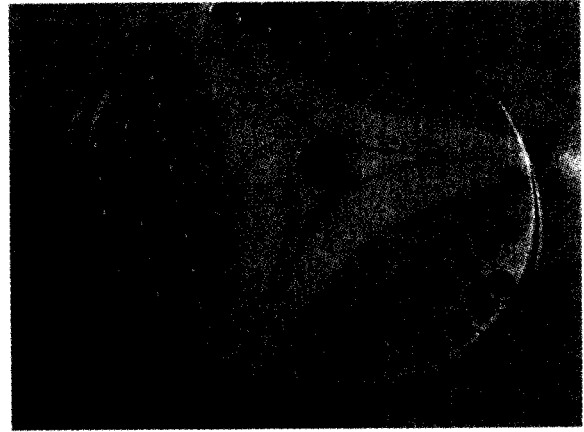


图 10 等离子体电极上的星型刻蚀

最后加工得到的六极磁铁的磁场分布, 还受到磁铁加工工艺的影响. 加工误差会使六极磁场降低, 高阶多极场的影响增强. 涂胶造成的空隙会导致磁铁的填充系数 ϵ 下降, 径向磁场降低等不良影响. 设计良好的加工工艺也是制造六极永磁铁的一个难点.

如果要设计更高磁场的高性能六极永磁铁, 就要大幅度增大永磁体的尺寸, 例如 $B_w = 1.6\text{T}$ 时 (弧腔厚度 5.5mm), R_{ex} 就要达到 200mm , 同时要求有更高性能的永磁材料. 随着永磁材料技术的发展, 价格低廉、性能优良的六极永磁铁将更容易实现.

6 结束语

随着 ECR 离子源技术的发展, 强磁场、高性能的六极永磁铁的设计研制显得尤为重要, 它能为高性能 ECR 离子源提供有效的等离子体径向约束. 本文从六极永磁铁的材料选取入手, 阐述了材料性能对永磁铁的影响, 然后又从材料选取入手, 介绍了一种解决永磁铁中部分区域退磁问题的方法. 磁铁的扇块数也是一个影响磁铁性能的至关重要的参数, 较多的扇块数, 可有效提高工作区的磁场强度, 同时也可减小高阶分量的不良影响. 文章还根据磁铁的物理尺寸, 用函数定量分析了六极永磁铁内、外径与磁铁厚度对磁铁性能的影响. 文章最后给出实例, 综合讨论了一个高性能六极永磁铁的设计, 并对该磁铁各项物理性能作了定性分析.

参考文献 (References)

- 1 Geller R. Proceedings of the 15th International Workshop on ECR Ion Source. Jyväskylä, Finland, 2002, 1—12
- 2 Kutner V B, ZHAO H W, Efremov A A. Proceedings of the 12th International Workshop on ECR Ion Source, RIKEN, Japan, 1995, 223—227
- 3 XIE Z Q, Antaya T A. The PERMAG Code. Report MSUCL-622 Michigan State University, East Lansing, 1987
- 4 Warren J L. Reference Manual for POISSON/SUPERFISH Group of Codes LA-UR-87-126, 1987
- 5 Halbach K. N.I.M., 1981, 187:109—117
- 6 Cavenago Marco, Bisoffi Giovanni. N.I.M., 1991, A301:9—18
- 7 Katayose T et al. Proceeding of the 12th International Workshop on ECR Ion Source, RIKEN, 1995, 282
- 8 Hitz D et al. Proceedings of the 12th International Workshop on ECR Ion Source. RIKEN, 1995, 126
- 9 Gammino S, Diavola G, Celona L et al. Rev. Sci. Instr., 2001, 72 (11):4090

Study on Designing of Hexapole Magnet of ECR Ion Source *

SUN Liang-Ting^{1,2;1)} D. Hitz³ ZHAO Hong-Wei¹

1 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2 (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

3 (CEA/Grenoble, 17Rue des Martyrs, 38041 Grenoble, France)

Abstract Detailed research has been done on the aspects of the design of a Halbach structure permanent hexapole, such as the permanent material adoption, the structure design, and the dimension selection and etc. A possible method has been proposed to solve the problem of demagnetization in some magnetic blocks. By optimizing the geometry structure, the magnetic field in the working aperture is made to be the maximum for a certain condition. Some useful codes like POISSON, PERMAG, and TOSCA are used to simulate the sextuple magnetic field. Some useful plots are also presented.

Key words ECR ion source, Halbach structure, hexapole permanent magnet, NdFeB

Received 28 October 2003

* Supported by KIP of CAS (9KJCX1-09), National Scientific Fund for Outstanding Youth (10225523)

1) E-mail: sunlt@impcas.ac.cn