

电子回旋共振离子源永磁体的优化设计

明建川¹ 王锦辉¹ 过骐千¹ 汪亮明¹ 朱启良¹ 白玉兰¹ 丁伽¹
郭之虞² 于金祥² 宋执中² 朱昆²

1 (北京机械工业自动化研究所 北京 100011)

2 (北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

摘要 对永磁电子回旋共振 (Electron cyclotron resonance, ECR) 离子源磁场运用 Poisson 程序进行了模拟计算, 将模拟计算结果和测量结果进行了比较。依据计算结果, 设计加工了 NdFeB (钕铁硼) 永磁体, 得到了比较好的磁场场形, 并在 ECR 离子源调试中获得了较强的束流。

关键词 永磁体, 微波离子源, 强流

中图分类号 TL503.3

20 世纪 80 年代随着强流离子注入机的发展, 以及 1990 年以来随着高功率质子加速器 (High power proton accelerator, HPPA) 成为研究热点, 强流电子回旋共振 (Electron cyclotron resonance, ECR) 离子源在国际上也得到了迅速发展。加拿大、美国、法国、意大利和日本等国先后研制出性能优良的强流 ECR 离子源^[1-6]。中国原子能科学研究院近年来也研制了强流 ECR 离子源^[7]。然而现有的这类离子源大多是用螺线管线圈产生 ECR 磁场, 造成源的体积大、功耗高、造价贵。利用永磁体代替螺线管产生磁场, 不但可以降低功耗、减少体积、节约成本, 而且离子源的运行操作也方便。1997 年的国际离子源会议上加拿大 Chalk River 实验室报道了一种采用永磁体的紧凑型强流 ECR 离子源, 可引出 60 mA 氢离子束流, 质子比为 80%^[8]。在国内, 北京机械工业自动化研究所与电子部 12 所合作, 曾于 1991 年研制成功用于离子注入机的永磁体狭缝型 ECR 离子源, 经磁分析后获得了 10 mA P⁺束和 3.5 mA N⁺束^[9]。兰州近代物理研究所和北京大学也研制了永磁体强流 ECR 离子源, 得到了较强的氢离子束^[10]。

北京机械工业自动化研究所目前正在为航空工业机械零件进行离子注入表面强化研究, 研制高能 (100 kV) 宽束 ECR 永磁体离子源。我们对于该离子源的永磁体磁场进行了优化设计计算, 根据优化设计加工定做了永磁体。对定做的永磁体的磁场进行了测量, 将实测结果和计算结果进行了比较, 两者基本一致。

1 电子回旋共振离子源永磁体的设计要求

微波频率 2.45 GHz 的电子回旋共振离子源的共振磁场强度为 87.5 mT, 但实验证明 ECR 离子源在磁场强度为 80—120 mT 左右的区间内都可以产生等离子体。当磁场强度略高于共振点时等离子体产生效率最高。一般认为径向磁场的形状以中间低、两边略高的马鞍形为好, 因这种磁场位形在两个峰之间形成等离子体磁势阱, 使电子不容易逃逸, 有利于增强等离子体密度。我们的微波源采用 NdFeB 永磁体磁环产生磁场。由于工艺的原因, 永磁体圆环的最大直径 130 mm。为了增加束流强度, 从放电室直径最大以及引出方面考虑, 设计要求永磁体圆环内径为 90 mm, 总高度 70 mm。

2 永磁体磁场的模拟计算

永久磁体的主要参数有磁场强度 H 、磁感应强度 B 、磁化强度 M 、剩余磁感应强度 B_r 、矫顽力 H_c 等。NdFeB 永磁体典型的退磁曲线如图 1 所示。根据这一退磁曲线, 可以得到不同条件下永磁体内部的磁感应强度 B 和磁化强度 M 。

对于复杂的磁铁形状以及磁环轴线外的磁场强度, 理论计算比较困难。Poisson 程序是一个二维的电磁场计算软件, 它采用迭代的方法通过解磁势和磁阻率的关系得到磁场的分布。我们根据 ECR 离子源产生电子回旋共振的要求, 使用 Poisson 程序对 ECR 离子源的磁场进行了设计。通过网格的精细划分, 边界条件的调节, 得到了和实测数据比较一致

的结果。据此设计了一套中心磁场强度为 95 mT 的永磁环，并设计了磁场强度分别为 80、90、100、110、120 mT 的五套永磁体圆环以及另一套带铁引出极的磁环作为比较。每套磁环设计要求均匀磁场区域尽量大。95 mT 磁环的磁场均匀区 (± 2.5 mT) 径向最大直径为 50 mm, 轴向最大距离约为 50 mm, 磁环的形状及磁力线分布如图 2 所示。

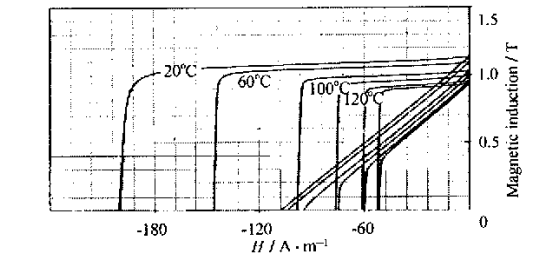


图 1 NdFeB 永磁体的典型退磁曲线示意图
Fig.1 Demagnetization curves for NdFeB magnetic material.

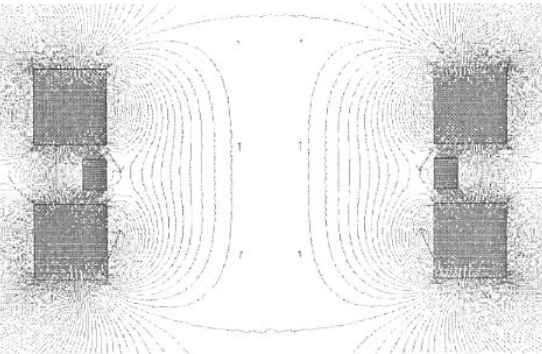


图 2 模拟计算的磁铁剖面 and 磁力线分布
Fig.2 The simulated result of magnetic field

3 磁场测量结果及其与计算值的比较

根据计算结果设计加工了永磁体，磁铁采用耐高温永磁材料，形状为圆环。为了方便磁场的调整，制作了多个不同厚度的磁环。对多个单磁环以及组合磁铁的磁场强度进行了测量，并和计算结果进行了比较（如图 3，图 4）。考虑测量条件的限制及磁场的对称性，对单个磁铁仅测量了半个空间的磁场分布（图 3），考虑到测量误差很小（高斯计测量误差 $\pm 2.5\%$ 、磁场位置测量误差 $\pm 2\%$ 、永磁体几何尺寸误差 $\pm 1\%$ 等），可以认为计算结果和实测数据基本一致。同样，对于组合磁铁，计算结果和实测结果也基本一致（图 4）。实验表明：对于永磁体，如果单个磁铁的模拟计算结果同实际相符合，不用改变计算条件就可以计算得出和实际相一致的组合磁铁的场形。

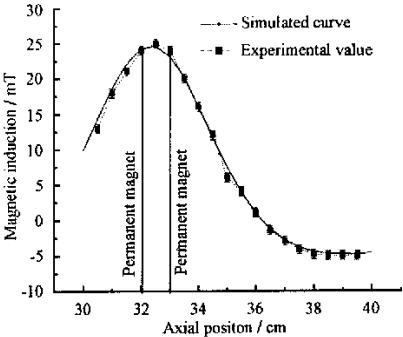


图 3 单个磁铁的轴向磁场测量值同模拟结果的比较
Fig.3 Axial magnetic field profile of a single permanent magnet

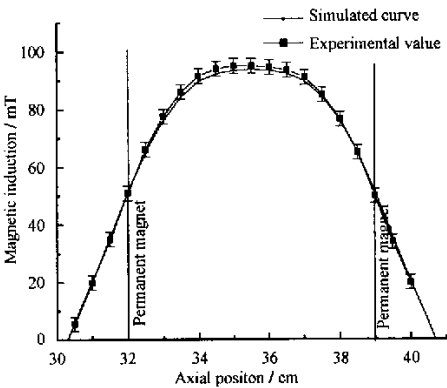


图 4 组合磁铁的中心磁场测量值和计算结果的比较
Fig.4 Axial magnetic field profile of the combined magnet

4 不同场强的磁体对离子源性能的影响

在离子源初调时，我们对磁场强度不同的几套永磁体进行了比较。在微波输入功率 50 W 左右、引出电压 40 kV、加速电压 60 kV 时，发现采用带铁引出电极的磁环效果较差，引出束流很小；采用 110 mT 磁场强度的永磁体时从离子源可以引出 1mA 的氮离子束；而磁场强度为 95 mT 的永磁体的效果最好可达 1.5 mA。

5 结论

对永磁体 ECR 离子源的磁场的设计进行了讨论。依据模拟计算结果，设计和加工了永磁体，磁场的测量结果和模拟结果一致。该离子源安装以后，起弧容易，经过调试，氮离子平均流强最高达到 20mA。

参考文献

1 Taylor T, Wills J S C. Nucl Instr Meth, 1991, A309: 37—42
2 Taylor T. Rev Sci Instrum, 1993, 63(4): 2507—2512

- 3 Sherman J, Arvin A, Hansborough L, *et al.* Rev Sci Instrum, 1998, **62**(2): 1003—1008
- 4 Lagniel J M, Beauvais P Y, Bogard D, *et al.* Rev Sci Instrum, 2000, **71**(2): 830—835
- 5 Celona L, Ciavola G, Gammino S, *et al.* Rev Sci Instr, 2000, **71**(2): 771—773
- 6 Sakudo N. Nucl Instr Meth, 1987, **B21**: 168—177
- 7 崔保群, 李立强, 蒋渭生, 等. 原子能科学技术, 2002, **36**(6): 262—265
- CUI Baoqun, LI Liqiang, JIANG Weisheng, *et al.* At Energy Sci Technol, 2002, **36**(6): 262—265
- 8 Wills J S C, Lewis R A, Diserens J, *et al.* Rev Sci Instrum, 1998, **69**(1): 65—68
- 9 陈士祥, 吴玉珍, 林美娟, 等. 第四届全国离子源学术交流会论文集, 1991. 44—45
- CHEN Shixiang, WU Yuzhen, LIN Meijuan, *et al.* Symposium on Charged Particle Sources and Beams, 1991. 44—45
- 10 宋执中, 明建川, 于金祥, 等. 原子能科学技术, 2004, **38** (增刊): 51—53
- SONG Zhizhong, MING Jianchuan, YU Jinxiang, *et al.* At Energy Sci Technol, 2004, **38**(Suppl): 51—53

Calculation and design of permanent magnet for ECR ion source

MING Jianchuan¹ WANG Jinhui¹ GUO Qiqian¹ WANG Liangming¹ ZHU Qiliang¹ BAI Yulan¹
DING Jia¹ GUO Zhiyu² YU Jinxiang² SONG Zhizhong² ZHU Kun²

¹ (Beijing Research Institute of Automation for Machinery Industry, Beijing 100011)

² (Institute of Heavy Ion Physics, Peking University and Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Ministry of Education, Beijing 100871)

Abstract The calculation of permanent magnet for ECR ion source with Poisson code has been completed and compared with the experiment results. Based on the calculation, a permanent magnet made of NdFeB has been designed, which is availed to get high current ion beam with the ECR ion source.

Key words Permanent magnet, ECR ion source, High current ion beam

CLC TL503.3