

Sm₂Co₁₇ 型永磁合金的辐照效应研究

李哲夫 贾彦彦 刘仁多 徐玉海 王光宏 夏晓彬

Irradiation effect of Sm₂Co₁₇ type permanent magnets

Li Zhe-Fu Jia Yan-Yan Liu Ren-Duo Xu Yu-Hai Wang Guang-Hong Xia Xiao-Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 226101 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.226101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.226101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高功率激光装置熔石英紫外损伤增长研究

Laser-induced damage growth of fused silica at 351 nm on a large-aperture high-power laser facility

物理学报.2016, 65(24): 246102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.246102>

强脉冲电子束辐照材料表面形貌演化的模拟

Simulation on surface morphology evolution of metal targets irradiated by intense pulsed electron beam

物理学报.2015, 64(21): 216102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.216102>

基于 1/f 噪声的 NPN 晶体管辐照感生电荷的定量分离

Quantitative separation of radiation induced charges for NPN bipolar junction transistors based on 1/f noise model

物理学报.2015, 64(13): 136104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.136104>

氦离子低温预辐照对不锈钢中氦泡生长抑制作用的 Monte Carlo 模拟研究

Inhibition effect of low-temperature pre-irradiation of helium ions on the growth of helium bubble in stainless steel: a Monte Carlo simulation

物理学报.2014, 63(10): 106102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.106102>

300 eV--1 GeV 质子在硅中非电离能损的计算

Numerical investigation of non-ionizing energy loss of proton at an energy range of 300 eV to 1 GeV in silicon

物理学报.2014, 63(6): 066102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.066102>

Sm₂Co₁₇型永磁合金的辐照效应研究*

李哲夫[†] 贾彦彦[‡] 刘仁多 徐玉海 王光宏 夏晓彬

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201204)

(2017年7月18日收到; 2017年9月6日收到修改稿)

Sm₂Co₁₇型永磁合金大量使用在上海同步辐射光源储存环的永磁型波荡器上, 在受到长期辐照后会发生磁性能损失的现象, 进而影响同步辐射光的品质. 为了探索其潜在的微观机理, 本文首先对Sm₂Co₁₇型永磁合金所处混合辐射场的粒子及相关物理量进行了计算分析, 确定引发磁性能损失的主要粒子是中子. 然后采用Ar离子模拟中子辐照损伤的方法对其进行辐照, 采用透射电镜对其辐照前后的微观形貌及微观结构进行了研究探讨, 采用振动样品磁强计对永磁合金辐照前后的饱和磁化强度进行了分析对比, 并讨论了微观结构演化与宏观磁性能变化的联系. 结果表明, Ar离子辐照后Sm₂Co₁₇型永磁合金饱和磁化强度的不可逆损失与微观结构变化有直接的关系, 其2:17相从单晶结构转变为非晶结构是造成其磁性能损失可能的微观机制.

关键词: Sm₂Co₁₇型永磁合金, 辐照效应, 饱和磁化强度, 微观结构**PACS:** 61.80.-x, 61.80.Jh, 61.82.-d**DOI:** 10.7498/aps.66.226101

1 引言

插入件是第三代同步辐射光源及自由电子激光装置的重要组成部分^[1]. 波荡器作为插入件的一种, 大量使用在上海同步辐射光源的储存环中. 波荡器的重要组成部分是磁场源器件, 其采用多组具有相同磁场强度并且按照周期性排列的永磁合金组成, 可以提高同步辐射光的亮度和相干度. 为了保证正常的电子轨迹, 对波荡器磁场强度的稳定性具有较高的要求. Sm₂Co₁₇型永磁合金比Nd₂Fe₁₄B稀土永磁合金具有更高的内禀矫顽力和良好的辐照稳定性, 在上海同步辐射光源(SSRF)的波荡器中大量使用^[2,3]. 波荡器内永磁合金的前端有一个用于固定永磁合金和射频(RF)指针的过渡装置, 该装置由铜块制成. 束流丢失或误操作情况下高能电子会轰击到该铜块上, 可引发电磁簇射产生韧致辐射光子和二次电子. 当韧致辐射光子达到或超过光核反应阈值时会产生中子和质子等粒

子. 所有产生的这些粒子共同形成一个混合辐射场, 永磁合金长期处于该混合辐射场中会出现磁性能的不可逆损失, 文献[4—6]已经报道了这个现象. 这会使波荡器的磁场发生改变, 从而影响电子的能量、方向及运动轨迹, 这些物理量的改变会影响同步辐射光的品质. 因此, 研究永磁合金由于辐照损伤所引起的磁性能损失机理对SSRF的高品质运行是十分重要的.

大量文献报道了由不同粒子辐照下永磁合金磁性能损失影响机理的研究, 得到了不同剂量、不同粒子辐照条件下永磁合金矫顽力、磁通量损失率和吸收剂量等相关物理量之间的关系^[7-23]. 也有研究者^[20,22,24-27]通过对比辐照前后饱和磁化强度研究永磁合金磁属性的变化. 研究表明, 在其各自的实验条件下, 质子、中子、碳离子、电子辐照后永磁合金的饱和磁化强度均可完全恢复, 因此认为永磁合金辐照前后并不存在微观结构上的变化. Qiu等^[11,12]、Asano等^[28]和Leitner等^[29]使用FLUKA^[30,31]软件计算分析了吸收剂量、1 MeV等

* 上海市自然科学基金(批准号: 15ZR1448500)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lizhefu@sinap.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: jiyanyan@sinap.ac.cn

效中子通量, 非弹性散射密度以及辐照后的感生放射性活度等相关物理量对永磁合金磁性能的影响. Qiu [12,32,33] 还通过计算 2.5 GeV 电子所引发复杂辐照场中粒子的能谱, 分析了辐照场的特征并采用基于效应的分析方法研究了粒子辐照对永磁合金的影响; 同时发现在该辐照场中 Nd₂Fe₁₄B 稀土永磁合金经过一定剂量的辐照后, 饱和磁化强度出现了不可逆损失, 认为这是由于永磁合金内部微观结构发生了变化, 但是并没有对其进行表征和分析.

综合上述报道可见, 目前对于辐照导致永磁合金磁性能损失机制的研究中, 多数采用不同粒子辐照并针对辐照前后永磁合金的宏观稳定性来推测其磁性能损失的机制, 而且多数是针对 Nd₂Fe₁₄B 稀土永磁合金进行研究, 而对 Sm₂Co₁₇ 型永磁合金的研究较少, 尚未有文献结合宏观磁稳定性对永磁合金辐照前后的微观结构变化进行表征和分析. 本文采用离子辐照模拟中子辐照损伤效应 [34] 的方法对永磁合金辐照效应进行了研究. 首先分析 Sm₂Co₁₇ 型永磁合金在波荡器中所处的辐照场特征, 并通过计算分析引发磁性能损失的主要粒子, 然后采用不同剂量的 Ar 离子对其进行辐照, 采用振动样品磁强计 (VSM) 对辐照前后的磁滞回线进行了测量, 最后对永磁合金的微观结构变化用透射电镜 (TEM) 进行了表征, 并讨论了二者之间的联系. 本研究为从微观结构变化角度理解永磁合金磁性能损失的机制具有一定的意义.

2 计算模型和实验

2.1 计算模型

上海同步辐射光源的电子能量为 3.5 GeV, 计算模型采用电子束间接辐照 Sm₂Co₁₇ 型永磁合金的方法 [11,12,28], 将电子束设定为单向笔形束, 在电子束和永磁合金之间设置一个铜块模拟固定在永磁合金和 RF 指针之间的过渡装置, 并将永磁合金设置在铝支架上, 电子束流的中心位置为永磁合金的中心, 其密度为 8.4 g/cm³, 建立的模型和尺寸如图 1 所示.

2.2 样品制备和辐照实验

Sm₂Co₁₇ 型永磁合金的型号为 XG30/20, 分为两种: 一种是出厂加有磁性的样品, 另外一种

是出厂没有加磁性的样品. 用线切割将带有磁性的整块样品切割成 10 mm × 10 mm × 1 mm 的小块样品. 然后, 用 2000# 金相砂纸将该样品抛光后超声清洗 20 min. 用线锯将清洗后的样品切割成 2 mm × 2 mm × 1 mm 的小块用于辐照实验和磁滞回线的测试. 另外一部分没有加磁性的 Sm₂Co₁₇ 样品, 同样线切割成上述片状小样, 然后经过 1500# 金相砂纸磨薄到 150 μm 后冲出 6 个直径为 3 mm 的小圆片状样品. 用 TenuPol-5 型双喷减薄仪将小圆片状样品在温度为 -30 °C 的 5% HClO₄ 和 95% C₂H₅OH 溶液中进行双喷; 然后在离子减薄仪中 4° 减出薄区, 用于透射电镜观察.

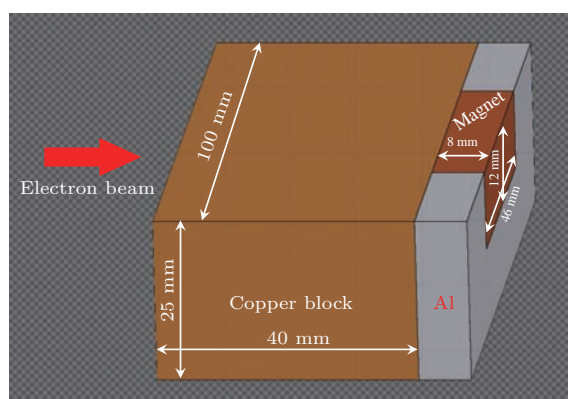


图 1 (网刊彩色) 计算模型

Fig. 1. (color online) Calculation model setup.

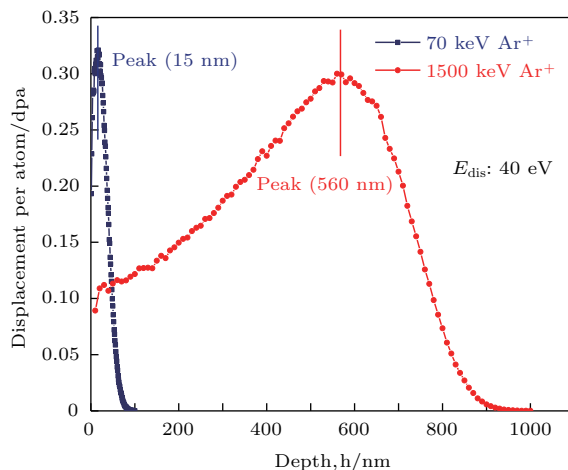


图 2 (网刊彩色) 70 keV 和 1500 keV Ar 离子辐照损伤分布

Fig. 2. (color online) Depth profiles of irradiation damage level (dpa) produced by 70 and 1500 keV Ar ions.

辐照实验分别采用中国科学院上海应用物理研究所 100 keV 同位素分离器和 4 MeV 加速器对透射电镜样品和块体样品在常温进行 Ar 离子辐照.

透射电镜试样采用 70 keV Ar 离子辐照, 束斑直径为 0.6 cm, 束流强度为 0.01 μA . 辐照时间约 3, 15, 44 min, 辐照剂量分别为 3.9×10^{13} , 1.95×10^{14} , 5.85×10^{14} ions/cm², 对应的辐照损伤程度为 0.06, 0.3, 0.9 dpa. 块体材料采用 1.5 MeV Ar 离子进行辐照, 辐照面积为 1 cm², 束流强度为 0.16 μA . 为了和透射电镜试样获得一样的辐照损伤程度, 辐照时间约 1, 5, 16 min, 其辐照剂量分别为 6.3×10^{13} , 3.1×10^{14} , 9.5×10^{14} ions/cm². 采用 SRIM 2008 [35] 计算的辐照损伤程度和入射深度的关系曲线见图 2, 计算时 Sm 和 Co 的位移能均取 40 eV [36]. 由图 2 可见, 70 keV 和 1.5 MeV Ar 离子对材料的辐照损伤深度分别为 100 nm 和 1 μm , 最大辐照损伤深度分别为 15 nm 和 560 nm.

3 结果与讨论

3.1 计算分析

3.5 GeV 电子穿过铜块后的能谱见图 3. 电子穿过铜块后产生的粒子主要包括透射的直穿电子及光子、中子和质子. 光子的通量最高, 接下来依次为电子、中子和质子. 其中, 质子和中子的能谱在大于 500 MeV 后一致, 表明二者通量接近. Sm₂Co₁₇ 型永磁合金处于由这四种粒子构成的混合辐射场中, 其吸收剂量和 1 MeV 等效中子通量分别用来衡量粒子的电离效应和位移效应 [32]. 电离效应是粒子与原子核外电子云的非弹性碰撞造成的, 而 1 MeV 等效中子通量是粒子与原子核的弹性碰撞造成的. 用吸收剂量衡量的电离效应与永磁合金的发热有关 [28], 由它造成的磁性能损失是可以通过重新充磁来恢复的; 而位移效应造成的磁性能损失不可逆, 表现为重新充磁后其饱和磁化强度比辐照前降低 [32]. 在永磁合金所处混和辐射场的四种主要粒子中, 确定电离效应和位移效应分别对应的粒子十分关键. 为此, 采用 FLUKA 软件对这四种粒子进行了计算分析, FLUKA 中定义的电磁能粒子包括电子、正电子和光子 [12,30,31], 其引起的吸收剂量见表 1. 同时, 所有粒子引发的吸收剂量也一同列于表 1. 由表 1 可见, 电磁能粒子引起的电离效应占 99.8%, 其他粒子的作用可以忽略不计. 另外两种粒子(质子和中子)主要引发位移效应, 结果见表 2. 可见, 在 1 MeV 等效中子通量衡量的位移效应中, 中子起主要作用, 占 94.3%, 是造成 Sm₂Co₁₇ 永久磁性能损失的主要粒子. 在位移效应引起磁

性能损失的机制中, 有两个机制都可以引起磁性能损失 [28,32]: 一个是级联碰撞导致的缺陷区造成反向磁畴的形核; 另一个是热峰的形成引发反向磁畴的形核造成的磁性能损失. 用 1 MeV 等效中子通量衡量的位移效应造成的反向磁畴形核见图 4. 由图 4 可见, 能量大于 28 keV 中子的 1 MeV 等效中子通量比质子的, 能造成更多的反向磁畴形核进

表 1 吸收剂量衡量的电离效应

Table 1. Particles ionization effect characterized by absorbed dose.

粒子	吸收剂量/Gy·electron ⁻¹	贡献/%
电磁能粒子	7.98×10^{-10}	99.8
其他粒子	1.00×10^{-12}	0.2
所有粒子	7.99×10^{-10}	100

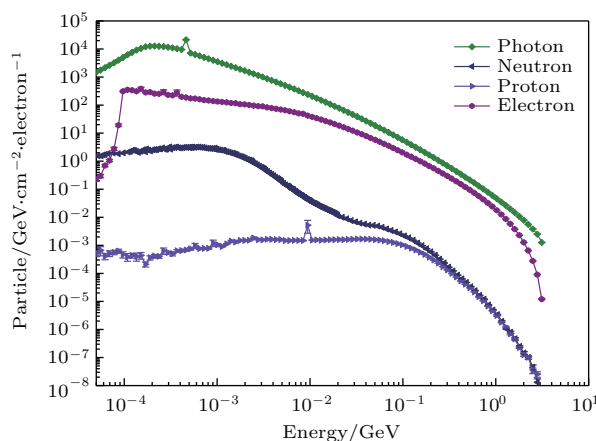


图 3 (网刊彩色) 光子、中子、质子和电子在 Sm₂CO₁₇ 型永磁合金前表面的能谱

Fig. 3. (color online) Spectra of photon, neutron, proton and electron in the front surface of Sm₂CO₁₇ type permanent magnets.

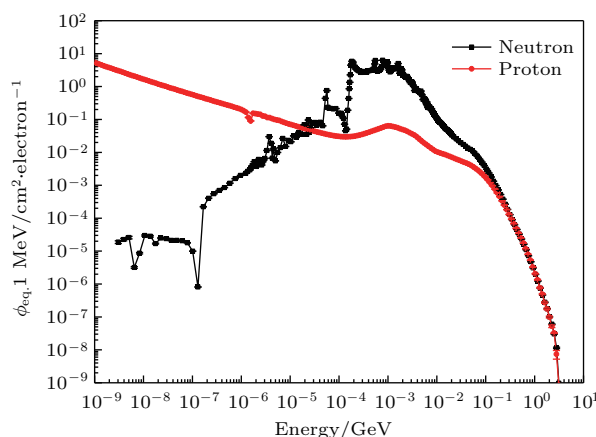


图 4 (网刊彩色) 中子和质子的 1 MeV 等效中子通量

Fig. 4. (color online) 1 MeV equivalent neutron fluence of neutron and proton.

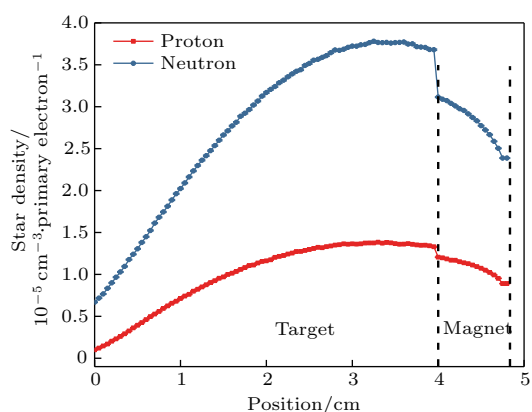


图5 (网刊彩色)中子和质子沿着束流中心线的 star density 分布

Fig. 5. (color online) Star density distribution of neutron and proton on beam axis.

而导致磁性能损失. 用 star density 衡量的沿着束流中心线的热峰分布见图 5. 可见, 在 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型永磁合金中, 中子的热峰分布大于质子的. 这表明在这两种可能引起磁性能的损失机制中, 中子均为

能够使 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型永磁合金造成永久性磁性能损失的主要粒子.

表 2 1 MeV 等效中子通量衡量的位移效应

Table 2. Particles displacement effects characterized by 1 MeV neutron equivalent fluence.

粒子	1 MeV 等效中子通量/ $\text{cm}^2 \cdot \text{electron}^{-1}$	贡献/%
中子	1.33×10^{-2}	94.3
质子	8.27×10^{-4}	5.7
所有粒子	1.41×10^{-2}	100

3.2 微观结构表征

据上 3.1 节分析可知, 中子辐照可造成永磁合金饱和磁化强度的不可逆损失. 与中子辐照相比, 离子辐照具有高效率, 低活化等优点经常用于模拟中子辐照损伤 [26,34,37]. 因此, 为了表征辐照前后 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型永磁合金的微观结构, 采用 Ar 离子辐照模拟中子辐照损伤对其进行研究. Ar 离子辐照前

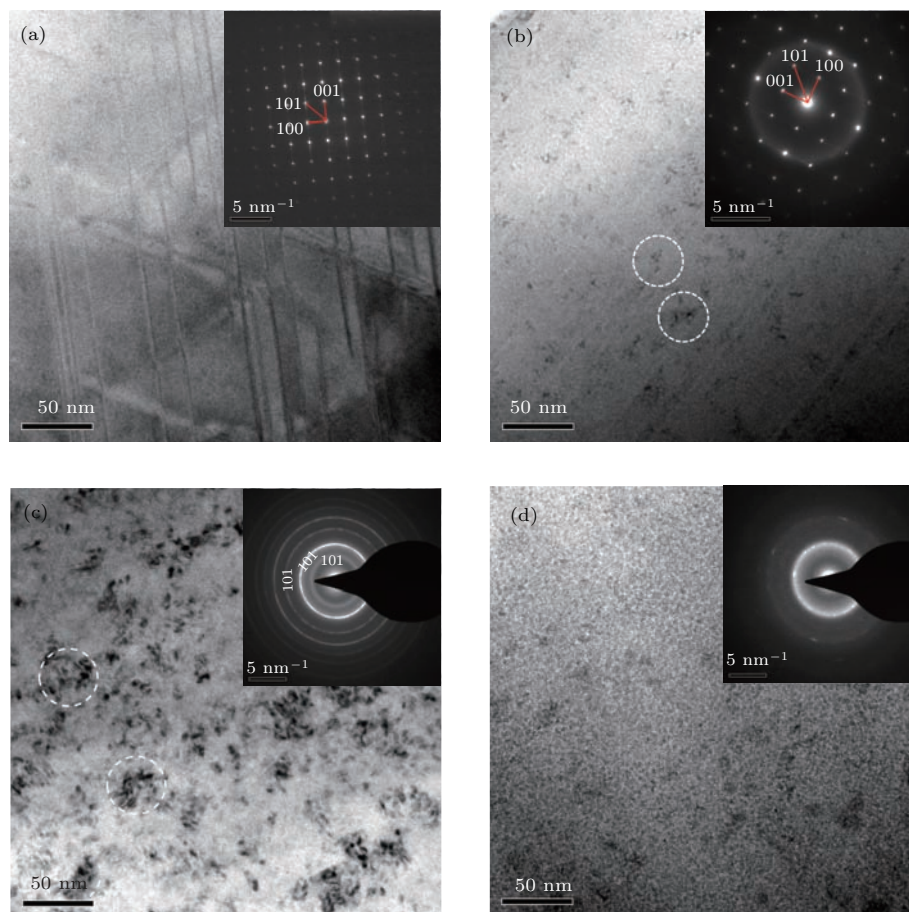


图 6 不同剂量 Ar 离子辐照 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型永磁合金样品的 TEM 图像 (a) 0 (未有辐照); (b) 6.37×10^{13} Ar ions/ cm^2 ; (c) 3.19×10^{14} Ar ions/ cm^2 ; (d) 9.55×10^{14} Ar ions/ cm^2

Fig. 6. TEM images of $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ type permanent magnet irradiated by Ar ions with different doses: (a) 0 (unirradiated); (b) 6.37×10^{13} Ar ions/ cm^2 ; (c) 3.19×10^{14} Ar ions/ cm^2 ; (d) 9.55×10^{14} Ar ions/ cm^2 .

后永磁合金微观结构的透射电镜明场像和最大辐照损伤区对应的选区衍射斑点见图 6(a)—(d). 所对应的辐照剂量分别为(没有辐照), 6.37×10^{13} , 3.19×10^{14} 和 9.55×10^{14} ions/cm². 据图 6(a) 所示, 未辐照样品表面明场像由胞状组织构成, 胞壁为 1:5 相, 胞内为 2:17 相, 胞内至少存在的两个相为菱形的 Th₂Zn₁₇ 结构和片状的 Th₂Ni₁₇ 结构^[38,39], 对应的选区衍射斑点为六方结构. 辐照后永磁合金的微观结构发生了很大的变化. 在辐照剂量为 6.37×10^{13} 和 3.19×10^{14} ions/cm² 时(图 6(b) 和图 6(c)), 样品表面出现黑斑(图中白色圆圈内), 并且随着辐照剂量的增加, 黑斑逐渐变大变密, 2:17 相的晶体结构逐渐从单晶(图 6(a)), 单晶和多晶(图 6(b)) 到完全转变为多晶结构(图 6(c)). 对于辐照剂量为 9.55×10^{14} ions/cm², 样品完全转变为非晶结构(图 6(d)).

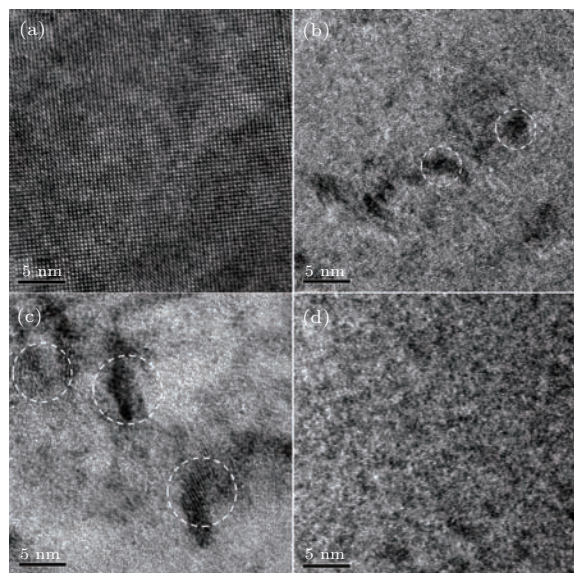


图 7 不同剂量 Ar 离子辐照 Sm₂Co₁₇ 型永磁合金样品的最大辐照损伤区的 HRTEM 图像 (a) 未辐照; (b) 6.37×10^{13} Ar ions/cm²; (c) 3.19×10^{14} Ar ions/cm²; (d) 9.55×10^{14} Ar ions/cm²

Fig. 7. HRTEM images from peak damage regions of irradiated Sm₂Co₁₇ type permanent magnet with different doses: (a) Unirradiated; (b) 6.37×10^{13} Ar ions/cm²; (c) 3.19×10^{14} Ar ions/cm²; (d) 9.55×10^{14} Ar ions/cm².

为了进一步研究材料的微观结构变化, 用高分辨电镜(HRTEM)表征辐照后 Sm₂Co₁₇ 型永磁合金最大辐照损伤区的晶格条纹像(图 7). 辐照前永磁合金的晶格条纹是连续的(图 7(a)), 随着辐照剂量的增加高分辨像出现显著的变化. 在最低辐照剂量情况下(图 7(b)), 晶格条纹仍大部分连

续, 仅有少量纳米晶(图中白色圆圈内)出现, 并且纳米晶的结构与图 6(b) 和图 6(c) 所示选区衍射斑点标定的原始单晶结构一致. 这表明, 辐照出现的纳米晶是由于辐照前样品中的单晶被打碎后形成的. 当辐照剂量增加到 3.19×10^{14} ions/cm² 时(图 7(c)), 样品有序的晶体结构被破坏, 纳米晶(图中白色圆圈内)的数量逐渐增加, 并且有一些非晶结构团簇出现. 当辐照剂量为 9.55×10^{14} ions/cm² 时(图 7(d)), 纳米晶消失, 完全成为非晶结构. 根据明场像和相应的高分辨图像可知, 随着辐照剂量增加, Sm₂Co₁₇ 型永磁合金的 2:17 相由单晶逐渐转变为单晶和纳米晶的混合物, 再转变为非晶结构.

3.3 磁滞回线测试

采用 VSM 对 1.5 MeV Ar 离子辐照前后的 Sm₂Co₁₇ 型永磁合金块体材料进行磁性能测试, 样品经不同剂量 Ar 离子辐照后的磁滞回线见图 8. 可见, 饱和磁化强度随着辐照剂量的增加逐渐降低, 未辐照样品的饱和磁化强度(M_s) 为 115.41 emu/g. 当剂量分别为 6.37×10^{13} , 3.19×10^{14} 及 9.55×10^{14} Ar ions/cm² 时, M_s 分别为 115.06, 114.91 和 112.45 emu/g. 其不可逆损失分别为 0.3%, 0.4% 及 2.5%, 饱和磁化强度的不可逆损失随着辐照剂量的增加而提高. 值得注意的是, 据图 2 的计算结果可见, 最大剂量 Ar 离子辐照后块体材料的非晶层厚度为 1 μm, 对整个块体材料来讲为部分非晶化, 从 VSM 测试结果可见, 块体材料辐照损伤层微观结构的改变已经对其饱和磁化强度产生了不可逆的影响.

依图 8 可见, Sm₂Co₁₇ 型永磁合金的矫顽力几乎没有变化, 据 3.1 节所述由位移效应引起的两种磁性能的损失机制中, 级联碰撞形成的缺陷区和热峰形成所引发的形核点越多, 反向磁畴的形核就越容易形成, 因而永磁合金的矫顽力就越低. 与此同时, 由于形核点也可单纯作为畴壁的钉扎点, 其数目越多, 畴壁的钉扎便越严重, 畴壁的移动就越困难, 因而会提高永磁合金的矫顽力. 即由级联碰撞形成的缺陷区所诱发的形核点和由热峰形成所引发的形核点具有双重作用: 既可作为反向磁畴的形核点降低矫顽力又可作为磁畴壁的钉扎点提高矫顽力^[40]. 本文 Ar 离子辐照后永磁合金的矫顽力几乎不变可能就是由于这两种因素综合作用的结果.

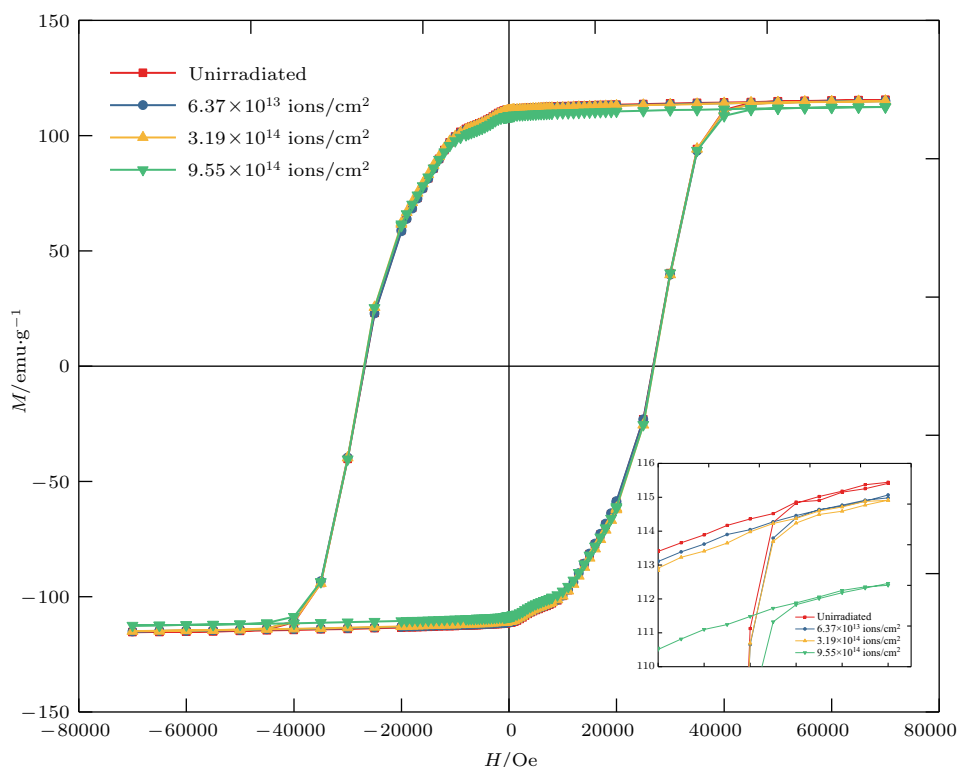


图 8 (网刊彩色) 不同剂量 Ar 离子辐照前后的磁滞回线

Fig. 8. (color online) Hysteresis loops before and after irradiation with different doses.

结合辐照前后 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型永磁合金的微观结构分析, 辐照前后 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型永磁合金的 2:17 相由单晶结构到非晶结构的转变是造成其饱和和磁化强度不可逆损失可能的影响机制。

4 结 论

本文通过计算分析了上海光源永磁型波荡器大量使用的 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型永磁合金所处辐射场的特征, 分析了组成该混合辐射场的主要粒子, 确定了对 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型永磁合金饱和和磁化强度造成不可逆损失的粒子; 并采用 Ar 离子模拟中子辐照损伤的方法对其微观结构用透射电镜进行了表征和研究; 同时对其饱和和磁化强度用 VSM 进行了测量, 结论如下。

1) $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型永磁合金所处混合辐照场的主要粒子包括透射的直穿电子、光子、中子和质子。电磁能粒子(电子、正电子和光子)引发磁铁的电离效应, 中子和质子引发位移效应, 并且中子对其饱和和磁化强度的不可逆损失起主要作用。

2) 随着 Ar 离子辐照剂量的增加, 晶体结构逐渐由单晶转变为单晶和纳米晶共存的混合结构, 完

全纳米晶结构和非晶结构、纳米晶和单晶晶体结构一致。

3) Ar 离子辐照前 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型永磁合金的晶格条纹是连续的。随着辐照剂量的增加样品有序的晶体结构被破坏, 出现纳米晶, 同时伴有非晶团簇; 当 Ar 离子辐照最高剂量时, 纳米晶消失, 成为非晶结构。

4) 饱和磁化强度随着辐照剂量的增加而降低。当辐照剂量分别为 6.37×10^{13} , 3.19×10^{14} 及 9.55×10^{14} Ar ions/cm² 时, 其不可逆损失分别为 0.3%, 0.4% 及 2.5%。

5) 永磁合金内部微观结构的变化影响其饱和和磁化强度, 辐照后 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型永磁合金饱和和磁化强度的不可逆损失与其 2:17 相由单晶结构转变为非晶结构有直接的关系, 是造成其饱和和磁化强度不可逆损失可能的微观机制。

目前, 大量研究针对永磁合金辐照前后的宏观磁稳定性推测其存在微观结构变化, 但是尚未有文献结合永磁合金的宏观磁稳定性对辐照前后的微观结构变化进行表征和分析。本文从微观结构变化角度证实了推测, 并为从微观结构方面理解

Sm₂Co₁₇型永磁合金饱和磁化强度不可逆损失的影响机制提供了新的依据。

参考文献

- [1] Cai G W, Jia Q K 2005 *High Power Laser Part. Beams* **17** 1585 (in Chinese) [蔡根旺, 贾启卡 2005 强激光与粒子束 **17** 1585]
- [2] He Y Z, Zhang J D, Zhou Q G, Qian Z M, Li Y 2010 *High Power Laser Part. Beams* **22** 1627 (in Chinese) [何永周, 张继东, 周巧根, 钱珍梅, 黎阳 2010 强激光与粒子束 **22** 1627]
- [3] He Y Z, Zhou Q G 2012 *High Power Laser Part. Beams* **24** 2187 (in Chinese) [何永周, 周巧根 2012 强激光与粒子束 **24** 2187]
- [4] Vaerenbergh P V, Chavanne J, Elleaume P 1999 *Fifth Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems* Fontevraud, France, September 13–17 1999 p246
- [5] Petra M, Den Hartog P K, Moog E R, Sasaki S, Sereno N, Vasserman I B 2003 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **507** 422
- [6] Bizen T, Asano Y, Maréchal X M, Seike T, Aoki T, Fukami K, Hosoda N, Yonehara H, Takagi T, Hara T, Tanaka T, Kitamura H 2007 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **574** 401
- [7] Luna H B, Maruyama X K 1989 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **285** 349
- [8] Okuda S, Ohashi K, Kobayashi N 1994 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **94** 227
- [9] Bizen T, Tanaka T, Asano Y, Kim D E, Bak J S, Lee H S, Kitamura H 2001 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **467–468** 185
- [10] Bizen T, Asano Y, Hara T, Marechal X, Seike T, Tanaka T, Lee H S, Kim D E, Chung C W, Kitamura H 2003 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **515** 850
- [11] Qiu R, Lee H S, Hong S, Li J L, Bizen T 2007 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **575** 305
- [12] Qiu R, Lee H S, Li J L, Koo T Y, Jang T H 2008 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **594** 111
- [13] Alderman J, Job P K, Martin R C, Simmons C M, Owen G D 2002 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* **481** 9
- [14] Kawakubo T, Nakamura E, Numajiri M 2004 *Proceedings of the Ninth European Particle Accelerator Conference* Lucerne, Switzerland, July 5–9, 2004 p1696
- [15] Anderson S, Spencer J, Wolf Z, Gallagher G 2007 *IEEE Particle Accelerator Conference* Albuquerque, USA, June 25–29, 2007 p581
- [16] Miyahara N, Honma T, Fujisawa T 2010 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **268** 57
- [17] Gao R S, Zhen L, Shao W Z, Hao X P 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 07E136
- [18] Gao R S, Zhen L, Li G A, Xu C Y, Shao W Z 2006 *J. Magn. Mater.* **302** 156
- [19] Ito Y, Yasuda K, Ishigami R, Hatori S, Okada O, Ohashi K, Tanaka S 2001 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **183** 323
- [20] Ito Y, Yasuda K, Ishigami R, Sasase M, Hatori S, Ohashi K, Tanaka S, Yamamoto A 2002 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **191** 530
- [21] Ito Y, Yasuda K, Sasase M, Ishigami R, Hatori S, Ohashi K, Tanaka S 2003 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **209** 362
- [22] Ito Y, Yasuda K, Ishigami R, Ohashi K, Tanaka S 2006 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **245** 176
- [23] Kähkönen O P, Talvitie M, Kautto E, Manninen M 1994 *Phys. Rev B* **49** 6052
- [24] Cost J R, R D Brown, Giorgi A L, Stanley J T 1988 *IEEE Trans. Magn.* **24** 2016
- [25] Okuda S, Ohashi K, Kobayashi N 1994 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **94** 227
- [26] Klaffky R, Lindstrom R, Maranville B, Shull R, Micklich B J, Vacca J 2006 *Proceedings of the Tenth European Particle Accelerator Conference* Edinburgh, Scotland, June 26–30, 2006 p3589
- [27] Kähkönen O P, Mäkinen S, Talvitie M, Rajainmäki H, Manninen M 1990 *Euro. Phys. Lett.* **12** 413
- [28] Asano Y, Bizen T, Marechal X 2009 *J. Synchrotron Rad. A* **16** 317
- [29] Santana Leitner M, Fassò A, Mao S, Nuhn H D, Roesler S, Rokni S, Vollaie J <http://www.slac.stanford.edu/pubs/slacpubs/14000/slac-pub-14020.pdf> [2010-4-29]
- [30] Böhlen T T, Cerutti F, Chin M P W, Fassò A, Ferrari A, Ortega P G, Mairani A, Sala P R, Smirnov G, Vlachoudis V 2014 *Nucl. Dt. Sheets* **120** 211
- [31] Battistoni G, Boehlen T, Cerutti F, Chin P W, Esposito L S, Fassò A, Ferrari A, Lechner A, Empl A, Mairani A, Mereghetti A 2015 *Ann. Nucl. Energy* **82** 10
- [32] Qiu R 2007 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [邱睿 2007 博士学位论文(北京: 清华大学)]
- [33] Qiu R, Li J L, Bi L, Li W Q, Zhou J J 2008 *At. Energy Sci. Tech.* **42**(S1) 375 (in Chinese) [邱睿, 李君利, 毕垒, 李文茜, 周婧劼 2008 原子能科学技术 **42**(S1) 375]
- [34] Abromeit C 1994 *J. Nucl. Mater.* **216** 78
- [35] Ziegler J F, Ziegler M D, Biersack J P 2010 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **268** 1818
- [36] Hashimoto N, Hunn J D, Byun T S, Mansur L K 2003 *J. Nucl. Mater.* **318** 300
- [37] Li J J, Huang H F, Lei G H, Huang Q, Liu R D, Li D H, Yan L 2014 *J. Nucl. Mater.* **454** 173
- [38] Tian J J, Yin H Q, Qu X H 2005 *J. Magn. Mater. Dev.* **36** 12 (in Chinese) [田建军, 尹海清, 曲选辉 2005 磁性材料及器件 **36** 12]
- [39] Li L Y, Yi J H, Huang B Y, Peng Y D 2005 *Acta Metall. Sin.* **41** 791 (in Chinese) [李丽娅, 易健宏, 黄伯云, 彭远东 2005 金属学报 **41** 791]
- [40] Tu S J 2009 *M. S. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [涂少军 2009 硕士学位论文(杭州: 浙江大学)]

Irradiation effect of $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ type permanent magnets*

Li Zhe-Fu[†] Jia Yan-Yan[‡] Liu Ren-Duo Xu Yu-Hai Wang Guang-Hong Xia Xiao-Bin

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

(Received 18 July 2017; revised manuscript received 6 September 2017)

Abstract

Insertion devices are crucial parts of the third generation of synchrotron radiation facility and free electron laser devices. The use of insertion device can improve the brightness and coherence of synchrotron radiation light. Undulator, one kind of insertion device, is largely installed in the storage ring of Shanghai synchrotron radiation facility. The main part of undulator is the device of magnetic source which consists of periodically arranged permanent magnets with the same magnetic field strength. In order to keep the normal electronic trajectory, a stable magnetic intensity in undulator is required. The $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ type permanent magnets with high intrinsic coercive force and good radiation stability are largely installed in the facility. However, the losses for magnetic properties of $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ type permanent magnets can be induced by longperiod irradiation in undulator through beam loss or mis-steering. The reduction of magnetic field could affect the electron energy, direction and the movement trajectory and so on, which seriously affects the amount of synchrotron radiation light. Microstructure of $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ type permanent magnet affects the macro magnetic properties and there is not any available report on the microstructure investigation of $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ type permanent magnet after being irradiated. Therefore, in this work, the effect of irradiation on the microstructure evolution is investigated. The radiation fields of $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ type permanent magnets and the main particles (neutron) that result in losing magnetic properties are first analyzed and confirmed by Monte Carlo code FLUKA calculation. Then, $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ type permanent magnet samples are irradiated by Ar ions at different fluences to simulate neutron irradiation damage. Meanwhile, the microstructure evolutions of irradiated samples are characterized by transmission electron microscopy. Moreover, high resolution transmission electron microscopic images are taken at the peak of radiation damage field to further investigate the radiation damage. In the respect of macro magnetic properties, hysteresis loops are measured by vibrating sample magnetometer in order to study the change of saturated magnetization. The results indicate that the decrease of saturated magnetization value is related to the change of microstructure, which proves the speculation of previous investigations. The evolution of 2:17 phase transformed from single crystals into amorphous structure is a possible microscopic mechanism for irreversible loss for saturated magnetization of $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$.

Keywords: $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ type permanent magnet, irradiation effect, saturated magnetization, microstructure

PACS: 61.80.-x, 61.80.Jh, 61.82.-d

DOI: 10.7498/aps.66.226101

* Project supported by the Shanghai Natural Science Foundation of China (Grant No. 15ZR1448500).

[†] Corresponding author. E-mail: lizhefu@sinap.ac.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: jiayanyan@sinap.ac.cn