

钛离子辐照对 MgB_2 超导薄膜的载流能力和磁通钉扎能力的影响*

王银博[†] 薛驰 冯庆荣

(北京大学物理学院, 北京大学人工微结构与介观国家重点实验室, 北京大学应用超导研究中心, 100871)

(2012年1月3日收到; 2012年4月1日收到修改稿)

利用混合物理化学气相沉积法 (hybrid physical-chemical vapor deposition, HPCVD) 可以制备出高性能的 MgB_2 超导薄膜, 再对薄膜进行钛 (Ti) 离子辐照处理. 经过辐照处理后的样品被掺入了 Ti 元素, 与未处理的干净 MgB_2 样品相比, 其超导转变温度没有出现大幅度的下降, 而在外加磁场下的临界电流密度得到了明显的提高, 同时样品的上临界磁场也得到了提高. 在温度 5 K, 外加垂直磁场为 4 T 的情况下, Ti 离子辐照剂量为 $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 的样品的临界电流密度达到了 $1.72 \times 10^5 \text{ A}/\text{cm}^2$, 比干净的 MgB_2 要高出许多, 而其超导转变温度仍能维持在 39.9 K 的较高水平.

关键词: MgB_2 超导薄膜, 钛离子辐照, 钛掺杂, 混合物理化学气相沉积法

PACS: 74.70.Ad, 73.61.At, 81.15.-z

1 引言

自从 2001 年发现 MgB_2 是一种具有 39 K 的超导转变温度的超导体^[1]以来, 其较高的超导转变温度, 无晶界弱连接效应以及低廉的成本, 吸引了人们的广泛的研究兴趣^[2,3]. 然而干净二硼化镁材料本身的磁通钉扎能力很弱, 从而使其载流能力在存在外加磁场的情况下急剧下降. 人们一直尝试采用各种方法提高 MgB_2 的磁通钉扎能力, 进而提高其上临界磁场以及在强磁场下的超导临界电流密度. 利用元素或者是化合物对干净的 MgB_2 进行掺杂^[4-6]、中子辐照^[7]和高能重粒子辐照^[8]已经被证明是提高 MgB_2 材料在高场下的运输性质的有效方法. 通过各种不同的手段对 MgB_2 材料进行碳^[9-11]、硅^[12-14]以及钛^[15-19]等多种元素和化合物^[20-22]的掺杂已经被报道在一定程度上提高了 MgB_2 材料的高场载流能力. 其中对 MgB_2 进行碳掺杂的研究中发现虽然在最佳掺碳条件下能够提高 MgB_2 在高场下的载流能力, 但其超导转

变温度也被压制的相当厉害, 达到了 22 K^[22]. 而已有的掺硅和掺钛的工作也主要是对块材的二硼化镁进行的, 虽然在提高 MgB_2 载流能力的同时对 T_c 的压制较小, 但是其 J_c 和 T_c 的数值还是相对较小^[12,13,15-19], 还有提高的前景.

从已有的关于 MgB_2 掺 Ti 的研究工作知道对 MgB_2 块材掺钛不仅可以提高 MgB_2 材料的高场临界电流密度 J_c 和上临界磁场 H_{c2} 值^[23], 而且还可以改善 MgB_2 块材的微观结构, 增加微细结构的 MgB_2 晶粒, 导致掺 Ti 后的 MgB_2 样品的密度得到提高^[24]. 更值得一提的是掺 Ti 后的 MgB_2 样品对水的抗腐蚀能力也会大大提高^[25,26].

我们利用的混合物理化学气相沉积法已经被证实是一种非常有效的制备 MgB_2 薄膜的技术, 能够制备 $T_c \sim 41\text{--}42 \text{ K}$, $J_c(5 \text{ K}, 0 \text{ T}) = 2.3 \times 10^8 \text{ A}/\text{cm}^2$ 的高质量 MgB_2 薄膜^[10,21,27]. 在这种方法生成的 MgB_2 薄膜上通过 Ti 离子的注入来进行掺杂成为我们寻找合适的提高 MgB_2 高场载流能力并研究其掺杂机理的一种手段.

迄今为止, 虽然人们在关于 MgB_2 掺杂方面

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号:2006CD601004, 2011CB605904, 2011CBA00104) 和国家基础科学人才培养基金 (批准号: J0630311) 资助的课题.

[†] E-mail: wangybpp@gmail.com; qrfeng@pku.edu.cn

已经做了多方面的研究,但是对于 Ti 究竟是掺在了 MgB_2 晶粒之间,还是掺入到了晶格里面,尚无定论.其原因是人们一直以来是使用 MgB_2 块材作为研究对象.这中的原因是我们无法制备出可供研究 MgB_2 本征性质用的单晶.因此使用沿 c 方向生长的 MgB_2 单晶薄膜样品则是一个很好的方法.

在本文中,我们将报道基于混合物理化学气相沉积法在 SiC 衬底上制备的高性能 MgB_2 超导薄膜,通过钛离子辐照的方式进行钛元素的掺杂,将掺杂和离子辐照两种改善 MgB_2 材料输运性质的手段同时进行,从而使得样品在超导转变温度没有大幅度降低的情况下,其上临界磁场和在外加高磁场下的超导临界电流密度得到提升.在最佳辐照剂量为 $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 的条件和维持了 39.9 K 的较高的超导转变温度的情况下,其 J_c (5 K, 4 T) 达到了 $1.72 \times 10^5 \text{ A}/\text{cm}^2$,高出了干净 MgB_2 薄膜在相应条件下一个数量级.同时通过系列样品的 XRD 的测量,得到了 Ti 原子掺入到了 MgB_2 晶格里的证据.

2 实验方法

我们利用混合物理化学气相沉积法在 6H-SiC(0001) 衬底上制备出沿 c 轴原位外延生长的 MgB_2 超导薄膜.

实验中,我们以 5 kPa 的高纯氢气作为本底气体,以浓度 5%,流量 4 sccm 的乙硼烷 (B_2H_6) 气体作为硼源.实验过程中在钨制样品台四周放置单质镁块,中间放置 SiC 衬底,通过钨加热丝对衬底和镁块进行加热.当样品台及周围温度达到并维持在 680—720 °C 时,往反应舱中通入乙硼烷气体.乙硼烷气体遇热分解生成的硼原子与镁块遇热蒸发产生的 Mg 原子反应生成 MgB_2 并沉积在 SiC 衬底上.反应时间为 2.5 min,生成的 MgB_2 薄膜的厚度

大约在 100—130 nm.

对 MgB_2 薄膜样品进行钛离子辐照使用的是中国电子科技集团公司第四十八研究所研制的 LC-4 型离子注入机.我们一共对 5 个样品进行了处理,钛离子使用的剂量分别是 $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$, $2 \times 10^{13}/\text{cm}^2$, $5 \times 10^{13}/\text{cm}^2$, $1 \times 10^{14}/\text{cm}^2$, $2 \times 10^{14}/\text{cm}^2$.在下文中将分别用 1#, 2#, 3#, 4#, 5# 对 5 个样品进行标注,对干净的 MgB_2 薄膜样品用 0# 进行标注.

对辐照前后的样品,利用美国 Quantum Design 的多功能物性测量系统 (PPMS) 在零场和外场下分别测量了超导转变温度,利用磁学性质测量系统 (MPMS) 测量样品的磁滞回线,并利用 Bean 模型计算得到薄膜的超导临界电流密度 J_c 值^[28].利用 Dmax 12 kW 粉末衍射仪对样品的物相进行了分析.利用 FEI NanoSEM 高分辨场发射扫描电子显微镜对样品的表面形貌进行了观察.

3 实验结果和讨论

图 1(a) 是干净的 MgB_2 超导薄膜样品 SEM 的表面形貌像.从图中可以看出样品表面大部分区域比较平整,呈六边形的 MgB_2 晶粒排列的较为致密.除了少量的晶粒之外,大部分的晶粒都是沿 c 轴外延生长的.图 1 (b) 是经离子剂量为 $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 的 Ti 离子辐照后的 MgB_2 薄膜的 SEM 形貌像.可以看出样品在 Ti 离子辐照后,表面变得模糊,与未进行离子辐照的样品相比,表面的平整度和致密度有所下降,原本六边形的 MgB_2 晶粒形状也变得不明显.这种情况说明在进行离子辐照的过程中,大量的高速的 Ti 离子打向样品的表面,使其形貌产生了一定的变化.这种表面形貌的变化与进行高能粒子辐照后的 MgB_2 表面形貌变化类似^[8].

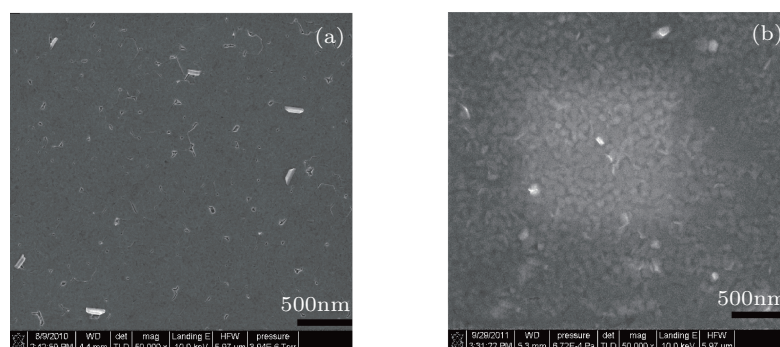


图 1 (a) 干净的 MgB_2 薄膜的 SEM 形貌像; (b) 经 Ti 离子辐照后的薄膜的 SEM 形貌像

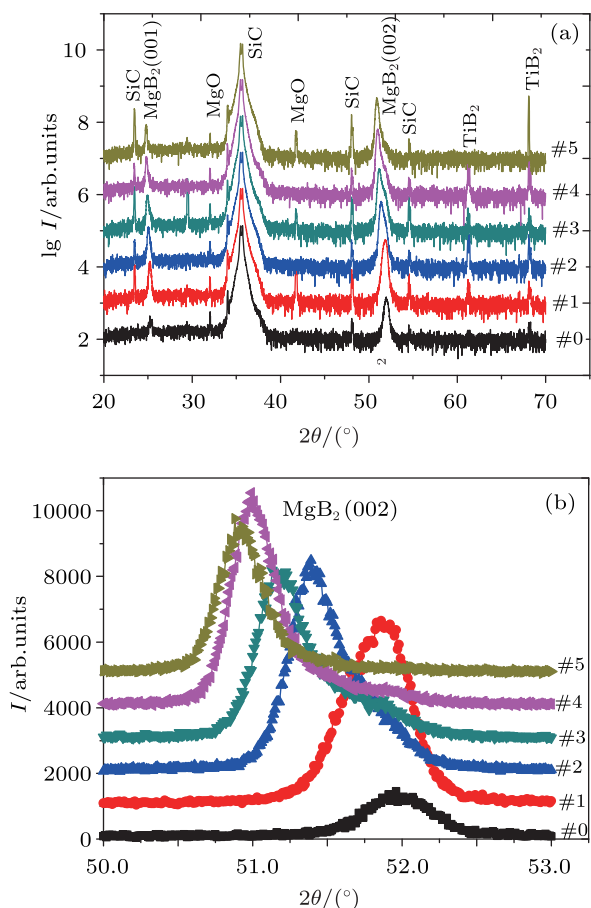


图2 (a) 一系列 MgB_2 薄膜样品的 XRD 图谱; (b) MgB_2 (002) 峰附近位置的放大图

一系列进行了不同剂量钛离子辐照和未进行钛离子辐照的干净 MgB_2 薄膜样品的 XRD 衍射图谱如图 2 所示. 其中 0# 是干净的 MgB_2 样品, 从 1#, 5# 是按钛离子的剂量逐步增加的顺序向上排列的. 从图中可以看出所有的样品中都出现了在 25° 和 52° 附近位置的衍射峰, 这两处分别是 MgB_2 的 (001) 峰和 (002) 峰. 35° 附近位置的衍射峰是衬底 SiC 的峰. 同时也可以看到从 0# 样品到 5# 样品, 随着钛离子剂量的增大, MgB_2 (001), (002) 的衍射峰的位置出现了向小角度偏移的情况. 对比掺碳的情况可以发现, 当 MgB_2 样品中掺入碳后, MgB_2 的衍射峰出现向大角度偏移的情况, 这是由于 C 原子进入到 MgB_2 晶格中, 使得 a 轴的晶格常数变小^[9]. 因此我们可以知道, MgB_2 衍射峰向小角度偏移, 说明有 Ti 的原子进入了 MgB_2 的晶格中占据了部分 Mg 位, 致使 MgB_2 的 a 轴晶格常数发生了很小幅度的增大. 这与在之前 MgB_2 带材中掺入 Ti 后没有 Ti 原子进入 MgB_2 的晶格, MgB_2 晶格常数没有改变的情况不同^[17]. 另外, 在除了 0# 样品的其他 5 个样品中, 还在 61° 和 68° 附近位置出现了衍射峰. 这两个位置对应的是 TiB_2 的衍射峰. 由此可见在进行过钛离子辐照的样品当中出现了少量 Ti 取代 Mg 生成 TiB_2 的现象.

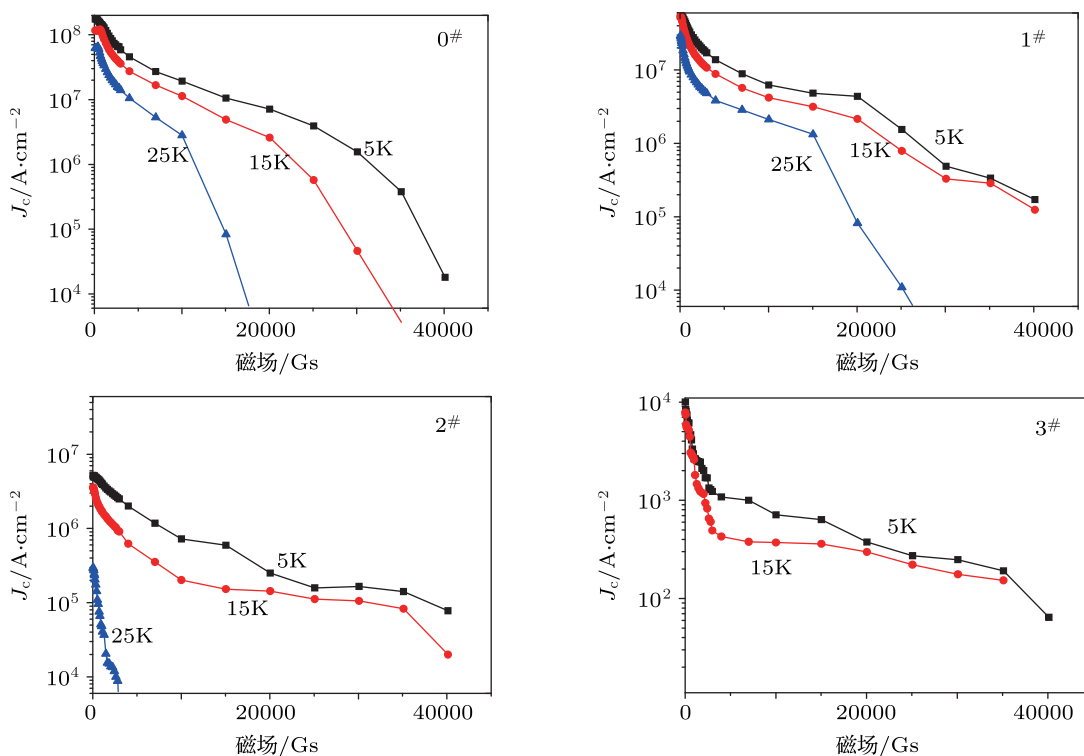


图3 0#, 1#, 2#, 3# 样品在不同温度下临界电流密度与外加磁场的关系曲线 (外加磁场的方向垂直于薄膜表面, 沿 c 轴外延方向, $1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$)

图 3 是干净 MgB_2 超导薄膜和一系列经过 Ti 离子辐照的 MgB_2 超导薄膜样品在不同温度下临界电流密度与外加磁场的关系曲线. 在对样品进行磁学性质测量的时候, Ti 的辐照剂量较大的 4# 和 5# 样品的 $M-T$ 曲线和磁滞回线的测量结果都显示样品的超导性质受到了损坏. 因此在上图中只列出了辐照剂量相对较小的超导样品的测量结果. 可以看到, 对于干净的 MgB_2 薄膜, 在 5 K, 0 T 的情况下, 其临界电流密度达到了 $1.75 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$, 与此前报道的 MgB_2 超导薄膜的最大磁测量临界电流密度 $2.3 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ 的值非常接近 [4], 也达到了 MgB_2 的理论破对电流密度 $J_d = 8.7 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ (由 Ginzburg-Landau 公式 $J_d = \Phi_0 [3/(\sqrt{3})\pi\mu_0\lambda^2(T)\xi(T)]$ 估算得到 [23]) 的大约 20%. 这也表明我们的干净 MgB_2 超导薄膜中虽然存在少量的非 c 方向生长的 MgB_2 超导晶粒, 但基本上是外延生长的. 这一系列 MgB_2 超导薄膜样品进行了 Ti 离子辐照后, 在 5 K 自场下的超导临界电流密度都有所降低, 其中 1# 样品的 J_c (5 K, 0 T) 下降到 $5.47 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$. 此值与进行碳和硅掺杂的 MgB_2 薄膜样品相比, 仍然是一个相对较高的数值 [10,14], 在 25 K 自场条件下, 1# 样品的 J_c 也达到了 $2.94 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$, 这一数值比掺 Ti 的 MgB_2 块材和带材在 20 K 自场下的临界电流密度 $3.1 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 及 $9.3 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 要高出很多 [16,17].

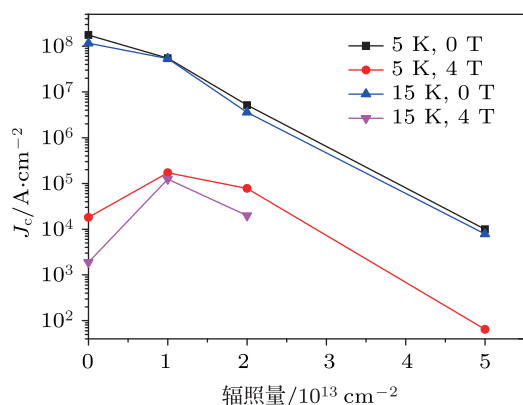


图 4 MgB_2 薄膜样品在同样温度和磁场条件下临界电流密度与钛离子辐照量的关系曲线 (外加磁场的方向垂直于薄膜表面, 沿 c 轴外延方向)

同时从图 4 还可以看出, 进行 Ti 离子辐照后的样品, 其 J_c 随着外加磁场的增大而减少的幅度要比干净的 MgB_2 薄膜样品小, 这表示虽然经过辐照后的样品在自场下的载流能力有所降

低, 但是在高场下的载流能力得到了提高. 干净的 MgB_2 样品在 5 K, 外加磁场 4 T 的情况下 J_c 为 $1.80 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$, 1# 样品在同样条件下的 J_c 则是 $1.72 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, 出现了明显的提升, 这种情况说明 Ti 离子的辐照以及 Ti 元素的掺杂提高了 MgB_2 薄膜样品的磁通钉扎能力, 辐照量继续增加的情况下临界电流密度出现了下降, 说明辐照量过大使 MgB_2 中产生过多缺陷也会损坏其超导性质. 而 MgB_2 块材在掺入 Ti 的情况下只能在低场 (0—2 T) 下提高其载流能力 [16]. 利用原位固态反应法在 MgB_2 块材中同时掺入 Ti 和 C 后, 在 20 K, 4 T 的情况下 J_c 能够达到 $1 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$, 而我们的 1# 样品在 4 T, 15 K, 情况下 J_c 为 $1.2 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$. 考虑到为掺杂 MgB_2 块材本身的 J_c 较低, 可见相对钛和碳同时掺杂, 我们的 Ti 离子辐照方式在提高 MgB_2 材料高温高场情况下的载流能力并不表现出劣势. 而从 Zhao 等的研究结果 [16] 来看, 相对仅仅掺入钛元素, 同时掺入钛和碳元素在高场下提高 MgB_2 材料载流能力的作用更明显. 因此可以看出离子辐照对 MgB_2 薄膜的作用弥补了仅仅掺入钛元素的劣势.

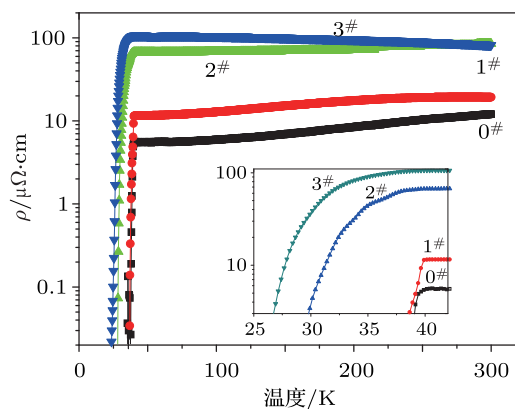


图 5 0#, 1#, 2#, 3# 样品的剩余电阻率随温度的变化曲线

图 5 为一系列 MgB_2 薄膜样品的 $R-T$ 曲线. 从图中可以看出, 随着辐照的 Ti 离子剂量的增加, 样品的剩余电阻率呈现上升的趋势, 超导转变温度 T_c 呈现下降的趋势. 正常态剩余电阻率 ρ (42 K) 由干净 MgB_2 薄膜 0# 样品的 $5.54 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ 增加到 3# 样品的 $105.94 \mu\Omega\cdot\text{cm}$. 而这一系列样品根据剩余电阻率开始迅速降低时的温度确定的超导转变温度 T_c 则分别为 40.4 K, 39.9 K, 37.7 K, 35.9 K. 可见随 Ti 注入量的增加, MgB_2 薄膜的超导转变温度并没有大幅度的降低. 作为最佳辐照剂量的 1# 样品

来看, 39.9 K 的超导转变温度比起最佳碳掺杂浓度的 MgB_2 样品的 22 K^[22] 要高出许多.

由图 5 还可以看出随着 Ti 离子剂量的增大, 这一系列样品的正常态下的导电性也在发生着变化: 0# 样品呈现出的是具有一定的金属性, 但对于 Ti 离子辐照剂量较大的 3# 和 4# 两个样品则明显地呈现出了半导体性.

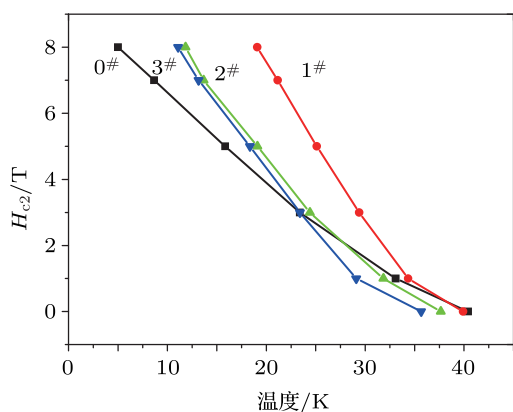


图 6 0#, 1#, 2#, 3# 样品垂直于膜面方向的上临界场与温度的关系曲线

图 6 所示为系列 MgB_2 掺 Ti 薄膜样品的垂直于膜面方向的上临界磁场与温度的关系曲线. 上临界场是利用不同外场下的电阻率温度曲线由“电阻率 90%”的判据确定的. 可以看出, 相比干净的 MgB_2 样品, 进行 Ti 离子辐照后的样品的上临界场有一定程度的提高, 同时根据曲线的斜率可以推断出辐照后样品的零温上临界场也有一定程度的提高. 不过相比在 MgB_2 薄膜中掺入 C 和 Si 的情况, 经过 Ti 离子辐照的样品上临界场提高的程度要较低^[10,14]. 利用原位固态反应法对 MgB_2 块材进行单一的 Ti 掺杂时也发现对样品上临界场基本没有影响^[16], 这说明样品上临界场的提高主要来自于离子辐照的影响, 而不是 Ti 掺杂的作用.

图 7 所示是 0#, 1# 样品的约化钉扎力密度 $f = F_p/F_{\text{max}}$ 与约化磁场强度 $h = H/H_{\text{irr}}$ 在不同温度下的 (5 K, 15 K, 25 K) 关系图. 其中钉扎力密度 $F_p = \mu_0 J_c H$, F_{max} 为 F_p 的最大值. H_{irr} 是不可逆场, 它的数, 是通过 $J^{0.5} H^{0.25}$ 与 H 的关系曲线来确定的. 虽然钉扎力与磁场强度的关系目前还没有一个完全令人满意的理论结果, 但是大多数的实验观察结果都可以用 $f = Ah^p(1-h)^q$ 的形式来表示. 其中 A 常量与样品的微结构、Ginzburg-Landau 常数以及不可逆场的值有关. 而钉扎常数 p 和 q 的数值则与钉扎中心的性质和密度有关. 在图 6 中,

实线即是按照该形式拟合得到的曲线. 对于晶界钉扎, 钉扎常数接近为 $p = 0.5, q = 2$, 而对于点钉扎, 钉扎常数则接近于 $p = 1.0, q = 2.0$ ^[29-31]. 对于我们的 1# 样品, $p = 0.53, q = 1.56$, 可见在经过 Ti 离子辐照后的样品中, 主要的钉扎机理为晶界钉扎, 这一结果与掺碳的 MgB_2 薄膜的结果不同^[32], 但是和掺硅的 MgB_2 薄膜的结果相似^[14]. 但是可以看出这一拟合结果在低场下符合较好, 而在峰值位置以及较大磁场的情况下的实验结果与拟合曲线的符合较差, 而更符合点钉扎的情况. 这说明在辐照的过程中 MgB_2 薄膜中引入的缺陷主要是点缺陷, 并且这些点缺陷在高场的情况下对提高样品的钉扎力起到了主要的作用, 但是在 1# 样品的辐照量的条件下, MgB_2 薄膜在生长过程中形成的晶界钉扎还在占主要地位.

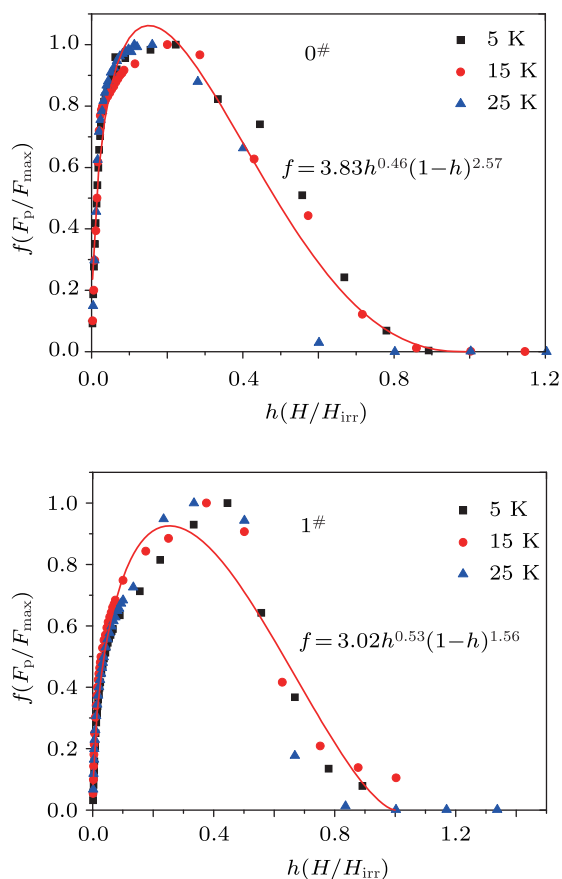


图 7 0#, 1# 样品的约化钉扎力密度 $f(F_p/F_{\text{max}})$ 与约化磁场强度 $h(H/H_{\text{irr}})$ 在不同温度下的 (5 K, 15 K, 25 K) 关系图 (其中实线是按照 $f = Ah^p(1-h)^q$ 的形式拟合后的曲线)

从上面的各种结果可以看出, 用钛离子对干净的 MgB_2 超导薄膜进行辐照同时引入钛元素掺杂能够在 T_c 没有明显减小的情况下使得 MgB_2 在外

场下的载流能力得到明显的提高. 我们知道通过中子辐照或者高能粒子辐照的方法能够提高 MgB_2 材料的超导载流能力^[7,8]. 与其他在 MgB_2 样品制备过程中掺入钛的方法相比, 比如原位固态反应法, 我们的方法结合了离子辐照和掺杂的共同作用, 从而在提高 MgB_2 材料载流能力的程度上有明显的优势, 尤其是高场的情况下 (2 T 以上).

另外, 在多个国内外科研组用原位固态法对 MgB_2 块材进行掺杂的研究中, 发现同时掺入 Ti 和 C 比单一掺入 Ti, 对 MgB_2 材料的性能有更好的提升, 特别是对高场下的载流能力和上临界场的改善^[16]. 从这里我们可以得到启发, 如果对 MgB_2 薄膜进行 Ti 和 C 离子的辐照, 有可能成为一种有效的提高 MgB_2 薄膜载流能力和上临界磁场的新途径. 相关研究论文另发.

4 结论

我们利用 HPCVD 的方法制备了具有高性能的干净的 MgB_2 超导薄膜, 之后对其进行了 Ti 离子的辐照实验. 我们发现辐照后的样品中有少量的 Ti 原子进入了 MgB_2 的晶格当中, 同时也发现了 TiB_2 的晶相. 辐照后的样品超导转变温度并没有大幅度的降低, 而其在高场的载流能力以及上临界磁场都得到了明显的提升. 其中 Ti 离子辐照剂量为 $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 的 1# 样品, 在维持, 39.9 K 的较高的超导转变温度的情况下, 其 J_c , (5 K, 4 T), 到了 $1.72 \times 10^5 \text{ A}/\text{cm}^2$, 高出了相同条件下的干净 MgB_2 薄膜 J_c 值一个数量级. 进一步在 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 到 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 的剂量下进行 Ti 离子辐照, 有望寻找到最佳的 Ti 离子辐照剂量.

- [1] Nagamatsu J, Nakagawa N, Muranaka T, Zentani Y, Akimitsu J 2001 *Nature* **410** 63
- [2] Iwasa Y, Larbalestier D C, Okada M, Penco R, Sumption M D, Xi X X 2006 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **16** 1457
- [3] Larbalestier D C, Cooley L D, Rikel M O, Polyanskii A A, Jiang J, Patnaik S, Cai X Y, Feldmann D M, Gurevich A, Squitieri A A, Naus M T, Eom C B, Hellstrom E E, Cava R J, Regan K A, Rogado N, Hayward M A, He T, Slusky J S, Khalifah P, Inumaru K, Haas M K 2001 *Nature* **410** 186
- [4] Eom C B, Lee M K, Chol J H, Belenky L J, Song X, Cooley L D, Naus M T, Patnaik S, Jiang J, Rikel M, Polyanskii A, A Gurevich, Cai X Y, Bu S D, Babcock S E, Hellstrom E E, Larbalestier D C, Rogado N, Regan K A, Hayward M A, He T, Slusky J S, Inumaru K, Haas M K, Cava R J 2002 *Nature* **411** 558
- [5] Bhatia M, Sumption M D, Coolings E W 2005 *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **15** 3204
- [6] Kim J H, Dou S X, Hossain M S A, Xu X, Wang J L, Shi D Q, Nakane T, Kumakura H 2007 *Supercond. Sci. Technol.* **20** 715
- [7] Krutzler C, Zchetmayer M, Eisterer M, Weber H W, Zhigadlo N D, Karpinski J 2007 *Physical Review B* **75** 224510
- [8] Kumar R, Agrawal H, Kushwaha R, Kanjilal D 2007 *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B* **263** 414
- [9] Soltanian S, Horvat J, Wang X L, Munroe P, Dou S X 2003 *Physica C* **390** 185
- [10] Zhuang C G, Meng S, Yang H, Jia Y, Wen H H, Xi X X, Feng Q R, Gan Z Z 2008 *Supercond. Sci. Technol.* **21** 082002
- [11] Kazakov S M, Puzniak R, Rogacki K, Mironov A V, Zhigadlo N D, Jun J, Soltmann C, Batlogg B, Karpinski J 2005 *Physical Review B* **71** 024533
- [12] Zhao Y, Ionescu M, Horvat J, Li A H, Dou S X 2004 *Supercond. Sci. Technol.* **17** 1247
- [13] Kusevic I, Babic E, Husnjak E, Saltanian S, Wang X L, Dou S X 2004 *Solid State Communications* **132** 761
- [14] Zhang C Y, Wang Y B, Hu W W, Feng Q R 2010 *Supercond. Sci. Technol.* **23** 065017
- [15] Haigh S, Kovac P, Prikhna T A, Savchuk Y M, Kilburn M R, Salter C, Hutchison J, Grovenor C 2005 *Supercond. Sci. Technol.* **18** 1190
- [16] Zhao Y, Feng Y, Shen T M, Li G, Yang Y, Cheng C H 2006 *Journal of Applied Physics* **100** 123902
- [17] Fu B Q, Feng Y, Yan G, Zhao Y, Pradhan A K, Cheng C H, Ji P, Liu X H, Liu C F, Zhou L, Yau K F 2002 *Journal of Applied Physics* **92** 7341
- [18] Yang Y, Zhao D, Shen T M, Li G, Zhang Y, Feng Y, Chen C H, Zhang Y P, Zhao Y 2008 *Physica C* **468** 1202
- [19] Anderson Jr. N E, Straszheim W E, Budko S L, Canfield P C, Finnemore D K, Suplinskas R J 2003 *Physica C* **390** 11
- [20] Zeng X H, Pogrebnikov A J, Kotcharov A, Jones J E, Xi X X, Lysczek E M, Redwing J M, Xu S Y, Li Q, Lettieri J, Schlom D G, Tia W, Pan X Q, Liu Z K 2002 *Nat. Mater.* **1** 1
- [21] Xi X X, Pogrebnikov A V, Xu S Y, Chen K, Cui Y, Maertz E C, Zhuang C G, Li Q, Lamborn D R, Redwing J M, Liu Z K, Soukiasian A, Schlom D G, Weng X J, Dickey E C, Chen Y B, Tian W, Pan X Q, Cybart S A, Dynes R C 2007 *Physica C* **456** 22
- [22] Ribeiro R A, Bud S L, Petrovic C, Canfield P C 2003 *Physica C* **384** 227
- [23] Zao Y, Feng Y, Huang D X, Machi T, Cheng C H, Nakao K, Chikumoto N, Fudamoto Y, Koshozuka N, Murakami M 2002 *Physica C* **378-381** 122
- [24] Fu B Q, Feng Y, Yan G, Zhao Y, Pradhan A K, Cheng C H, Ji P, Liu X H, Liu C F, Zhou L, Yau K F 2002 *Journal of Applied Physics* **93** 7341
- [25] Cheng C H, Zao Y, Feng Y, Zhu X T, Koshozuka N, Murakami M 2003 *Supercond. Sci. Technol.* **16** 125
- [26] Zao Y, Cheng C H, Machi T, Koshozuka N, Murakami M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 2311
- [27] Tinkham M 1996 *Introduction to Superconductivity* (2nd Ed.) (New York: McGraw-Hill) p123
- [28] Bean C P 1962 *Phys. Rev. Lett.* **8** 250
- [29] Dew-Hughes D 1974 *Phil. Mag.* **30** 293

[30] Dew-Hughes D 1987 *Phil. Mag.* **55** 459

J, Mielke C, Redwing J, Xi X X, Li Q 2006 *Phys. Rev. B* **74**

[31] Kramer E J 1973 *J. Appl. Phys.* **44** 1360

174511

[32] Chen J, Ferrando V, Orgiani P, Pogrebnjakov A V, Wilke R, Betts

The effects of Ti ion-irradiation on critical current and flux pinning in MgB₂ thin film*

Wang Yin-Bo[†] Xue Chi Feng Qing-Rong

(Application Superconductivity Research Center, State Key Laboratory for Artificial Microstructures and Mesoscopic Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 3 January 2012; revised manuscript received 1 April 2012)

Abstract

High-quality MgB₂ films are fabricated via hybrid physical-chemical vapor deposition (HPCVD) and irradiated by Ti ions. Compared with the unirradiated film, the Ti-irradiated MgB₂ film shows a high critical current density (J_c) in magnetic field and also a high upper critical field (H_{c2}), while the superconducting transition temperature (T_c) does not decrease significantly. The Ti-irradiated film with a best fluence at $1 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ shows a high J_c of $1.72 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ in 4 T perpendicular field at a temperature of 5 K and a moderately decreased T_c at 39.9 K.

Keywords: MgB₂ thin films, Ti ion-irradiation, hybrid physical-chemical vapor deposition

PACS: 74.70.Ad, 73.61.At, 81.15.-z

* Project supported by the Key Development Program for Basic Research of China (Grant Nos. 2006CD601004, 2011CB605904, 2011CBA00104), and the National Foundation Talent in Basic Science Research of China (Grant No. J0630311).

[†] E-mail: wangybpp@gmail.com; qrfeng@pku.edu.cn