

文章编号: 1001-3806(2005)01-0094-04

激光晶化制备 Fe 基纳米软磁材料的研究进展

陈岁元, 刘常升*, 才庆魁, 马利霞, 佗劲红
(东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘要: 综述了激光非晶晶化制备 Fe 基纳米软磁材料的国内外研究进展和现状。介绍了 Fe 基纳米软磁材料的双相组织结构和性能特征及应用领域; 对比分析了传统退火晶化和激光晶化制备技术的优缺点; 阐述了研究激光纳米晶化技术的重要意义和理论价值。提出了激光晶化技术制备 Fe 基纳米软磁材料需要重点系统研究的课题和方向。

关键词: 激光; 纳米晶化; Fe 基纳米软磁材料; α -Fe(Si)

中图分类号: TB383 **文献标识码:** A

Study on the preparation of Fe-based nanocrystalline soft magnetic materials

CHEN Sui-yuan, LU Chang-sheng, CAI Qing-kui, MA Li-xia, TUO Jing-hong
(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Preparation of Fe-based amorphous nanocrystalline soft magnetic materials has received much attention in a variety of fields. The double phase structure and the quality of Fe-based nanocrystalline soft magnetic materials and its application are introduced; the advantage and disadvantage are compared between the traditional annealing crystallization and preparation of the crystallization by laser. The significance, theoretical value and some unsolved problems about the technique of nanocrystallization by laser are presented. Finally, the need study key problems and direction of this preparation technology are presented.

Key words: laser; nanocrystallization; Fe-based nanocrystalline soft magnetic material; α -Fe(Si)

引 言

用晶化的方法在非晶材料中形成部分或全部纳米晶组织以改善其磁性能是纳米先进材料研究领域重要研究方向之一。纳米晶材料具有一般固体材料所没有的优异的力学和电磁性能,但是通常的纳米晶材料为粉末、薄膜或细丝,因其尺度小,产业化较困难。利用非晶晶化的方法可以制备纳米晶带材、丝材和粉末,易于产业化。而 Fe 基非晶软磁材料可通过非晶晶化技术实现纳米晶化从而改善其综合软磁性能。

由于激光具有加热速度快、冷却速度快和热交换方式上的独特性,利用激光技术研究 Fe 基非晶软磁材料的纳米晶化是非晶晶化研究领域的新方法。Fe 基非晶软磁材料经过激光辐照后产生纳米晶化相的结构和数量对其磁性能具有决定性作用,所以,需要研究晶化相的形成、组织和微观精细结构与激光工艺之间的关系,为激光晶化法制备 Fe 基纳米晶软磁合金打下理

论和工艺基础。一般的非晶材料在晶化温度附近加热时,由于是在亚稳态,需要的激活能小,故极易晶化且晶粒易长大从而得不到细小和分布均匀的纳米晶体。如非晶 FeSB 合金在晶化后,通常析出的晶体相尺寸较大,且往往同时析出 α -Fe, Fe₂B 和 Fe₃B 等相,很难形成单一的均匀结构; Fe 基非晶软磁材料激光晶化后,可形成单一的均匀纳米晶结构而显著改善其软磁性能,以拓展其在工业电力和电子工业领域的应用,具有很高的经济价值。目前,Fe 基非晶软磁材料激光纳米晶化的机理还没有建立,纳米晶相 α -Fe(Si) 具有 8 种可能的超精细结构,它们对材料的磁性和其它性能的改善作用不同,是否可通过控制激光晶化的工艺技术来获得最有价值的超精细结构的纳米晶是较复杂的科学问题。同时,建立符合激光晶化特点的纳米晶化机理、研究能够工业化应用的激光纳米晶化技术是国际性的研究课题。激光具有其独特的优点,主要表现为激光斑可用散焦,可调整大小并连续均匀照射非晶材料,有利于形成均匀的纳米晶组织,尤其是对于非晶带材可实现工业自动化处理而提高效率;激光能量和扫描速度可精确控制,由于光子热作用转换极快,可在常温常压下处理而氧化较少;比之传统退火法,激光晶化法制备 Fe 基纳米软磁材料成本较低。所以,运用激光诱导非晶晶化的方法制备 Fe 基纳米软磁材料,无疑

基金项目:沈阳市科技计划资助项目(1032040-1-01)

作者简介:陈岁元(1964-),男,副教授,博士研究生,现从事激光制备纳米材料方面研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: cslu@mail.neu.edu.cn

收稿日期:2004-04-13;收到修改稿日期:2004-06-10

为纳米软磁材料的制备提供了一条新途径。

1 Fe 基纳米软磁材料的发展过程

日本 YOSHIZAWA 等人于 1988 年发现在 FeSB 非晶合金的基体中加入少量 Cu 和 M ($M = \text{Nb, Mo, W, Ta}$) 等, 经适当温度晶化退火以后, 可获得一种性能优异的具有体心立方 (bcc) 结构的超细晶粒 ($D \approx 10\text{nm}$) 的纳米晶软磁材料, 其典型成分为 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ (商品牌号为 Finemet)。由于 Finemet 的磁性优异、结构特殊, 成为国内外研究的热点。迄今为止, 纳米晶软磁合金大都是 Fe 基合金, 主要有两大类: 一是 FeCuM SB 型 ($M = \text{Nb, Mo, W, Ta}$), 一是 FeMB 型 ($M = \text{Zr, Ta}$)^[1~3]。目前在磁性合金研究方面受到广泛重视的有以下几点: (1) 大块铁磁性非晶合金; (2) FeCuM SB 系纳米晶合金 (商品牌号为 Nanopem); (3) 非晶纳米晶薄膜及颗粒膜软磁材料; (4) 非晶纳米晶合金粉末材料, 如吸波材料、屏蔽材料及软磁铁芯材料等^[4~7]。Fe 基纳米晶软磁合金主要有 FeCuM SB 系、FePCCu + X 系、FeAM SB 系、FeAlSNiZB 系和 FeCaSNbB 系等合金, 后四者性能一般, 而获得广泛应用的是 FeCuM SB 系纳米晶软磁合金。

人们发现通过晶化, 使非晶态合金中析出一定量微晶组织, 可以改善铁基非晶态磁性材料的磁性能。在 HASEGAWA 等人的研究中, 含有少量晶化相的 $\text{Fe}_{75}\text{Ni}_4\text{Mo}_3\text{B}_{16}\text{Si}_2$ 合金里, $\alpha\text{-Fe}$ 晶粒所占体积比小于 10%, 晶粒大小约为 $100\text{nm} \sim 500\text{nm}$, 该合金高频特性很好, 在高频下损耗很低, 甚至可与超坡莫合金媲美。而 Fe 基非晶态磁性材料具有高的饱和磁感应强度 B_s , 且价格低, 研究者们对它寄予很高的希望。YOSHIZAWA 等人首先将含有 Cu 和 Nb 的 FeSB 非晶态合金退火后, 形成了在非晶基体上均匀分布着的直径为 $10\text{nm} \sim 15\text{nm}$ 的 $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$ 晶粒的纳米晶材料。它具有非常好的软磁性能, 不仅饱和磁感应强度 B_s 高而且弱场磁导率较高。典型纳米晶 Fe-Cu-Nb-Si-B 软磁合金是由非晶晶化的方法制得的, 人们对于非晶退火晶化的过程开展了大量的研究。HONO^[8] 等根据实验结果绘制了 Fe-Cu-Nb-Si-B 非晶合金晶化过程示意图, 他用原子探针场离子显微镜 (APFM) 和高分辨显微镜 (HREM) 方法直接观察 Fe-Cu-Nb-Si-B 非晶态及不同退火阶段的结构以后, 认为在中等退火温度 ($520\text{C} \sim 590\text{C}$) 存在晶化过程: 在退火初期阶段, 非晶基体中形成富 Cu 原子簇 (cluster), 由于 Cu 的富集引起在其周围 Fe 原子的涨落, 为 $\alpha\text{-Fe}$ 提供了数量众多的形核中心, 当 $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$ 晶体相形成时, 由于 Nb 和 B 难溶于其中, 故富集在剩余非晶相中; 当晶粒长大后, Si 可以不断的进入 $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$ 相中, 而富含 Nb 和 B 的非晶相

最终阻止晶粒的长大而导致形成纳米大小的晶粒。KOSTER^[9] 用动力学观点研究非晶态 Fe-Cu-Nb-Si-B 合金晶化行为时, 认为该过程发生在玻璃转变温度 T_g (glass transition temperature) 以上时, 要形成纳米晶合金需要同时满足极高的形核速率和有限的长大速率两方面的条件, 而 Cu 和 Nb 的加入满足了这个条件。KOSTER 还证实了 $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$ 晶粒长大是由非晶基体中 Nb 的扩散所控制, 晶化初期其长大速率符合扩散机制的初晶晶化机制, 即 $r = \alpha \sqrt{Dt}$ ^[10], 这种长大方式导致长大速率越来越慢, 最终使晶粒大小分布均匀。这些研究成果形成了退火晶化的初步机理, 对实际生产起到了一定的指导作用。

退火是应用最广的一种手段。一般的退火处理是采用各种加热炉进行热处理, 如真空感应炉等。但退火工艺也有自身的缺点: (1) 工艺比较复杂, 一般样品的退火至少需要半个小时, 有的需要 $2\text{h} \sim 3\text{h}$; 退火设备要求满足真空条件; 退火温度一般要求至少达到数百摄氏度; (2) 退火处理的范围没有选择性, 整个试样都要接受退火; (3) 表观监测温度和样品的实际退火温度不一致, 二者往往会有几十度的差别。如何有效地精确控制样品的实际退火温度, 是退火工艺必须解决的问题。退火晶化的析出相的粒度较大, 除 $\alpha\text{-Fe}(\text{Si})$ 晶体相形成外, 也有对磁性有害的 Fe-B 相形成。故人们寻求用其它技术方法研究非晶材料的纳米晶化。刘佐权等人^[11, 12] 应用激波处理, 实现并研究了 Finemet 的晶化。实验发现, 激波对非晶态合金具有强烈的影响, 它可以使非晶合金转变为纳米晶态材料。激波处理后的晶粒尺寸要比退火的大得多。与退火晶化比较, 激波晶化具有鲜明的特征, 既有其长处, 也有不足: (1) 转变速率极高、晶化度 (转变分数) 极高^[13, 14]。许多研究证明^[11, 9], Fe-Cu-Nb-Si-B 的退火晶化是一个典型的扩散性相变, 转变很难百分之百完成。特别是在 Finemet 中, 加入 Nb 就是为了提高非晶母相的稳定性, 退火晶化度往往只有 $50\% \sim 60\%$ 。可是, 激波晶化中, 在极短的时间内, 转变分数接近 100% 。极高的晶化度说明 Nb 稳定非晶的作用在激波晶化中失效了。10nm 左右 Finemet 的激波晶化, 晶化速率极大, 晶化度极高, Nb 和 Cu 的细化晶粒、稳定非晶和阻止晶粒长大的作用完全失效。这些现象表明激波晶化和退火晶化在机理上有相当大的差异。(2) 激波晶化的生成相呈现多样性, 但会恶化性能。激波晶化有 Fe_{23}B_6 , Fe_7B 结晶相。而 B 的析出会恶化 Fe-Cu-Nb-Si-B 的软磁性能。

1992 年, KULIK 等人^[15] 用电流密度为 $120\text{mA}/\text{m}^2 \sim 280\text{mA}/\text{m}^2$, 脉冲时间为 $25\text{ms} \sim 35\text{ms}$ 的短时电脉冲研究非晶软磁合金的纳米晶化转变, 得到了晶粒细化、韧

性较佳的软磁纳米材料。晁月盛等^[16]对非晶合金 $\text{Fe}_{78}\text{Si}_3\text{B}_{15}$ (Metglas2605s-2)进行了超短连续脉冲电流处理,通过调节脉冲电流参数,实现了基体金属相 α -Fe(Si)单相晶化析出。与等温退火相比,晶化温度降低幅度达 100°C ,且晶化相仅有无序的 α -Fe(Si)相,并无 FeB相析出的任何迹象。电脉冲处理是在电脉冲产生的焦耳热和周期性电磁作用的共同影响之下发生的低温快速纳米晶化。

2 铁基纳米晶软磁合金材料的应用领域

铁基纳米晶合金的应用独特领域可以归纳为以下几个方面^[17]。

2.1 精密电流互感器

随着电力工业高电压输电线路日趋增多,市场对电流互感器的需求量也与日俱增,且随着电流互感器要求准确度达 0.2级以上和仪表保安系数 $F_s \leq 5$,传统的硅钢不能满足这一性能要求,只有高磁导率的坡莫合金和纳米晶合金才能满足要求。由于铁基纳米晶合金价格只有坡莫合金的 40%~50%,所以,铁基纳米晶软磁合金是用作电流互感器铁芯的合适材料。

2.2 大功率开关电源变压器

铁基纳米晶合金的应用独特领域是高频大功率开关电源。其工作频率为 $20\text{kHz} \sim 50\text{kHz}$,输出功率在 10kW 以上,电源变压器效率在 90%以上,同时要求体积小、温升低,铁基纳米晶合金能够满足这些技术指标要求。铁基纳米晶合金材料具备:(1)高饱和磁感强度;(2)高磁导率;(3)高频损耗低。

2.3 开关电源

开关电源向小型化、低噪音、高速反应、高频率和高可靠性方向发展,开关电源中的磁性器件有主变压器(高频功率变压器)、电流互感器、饱和扼流圈、饱和电抗器、滤波器和尖峰信号抑制器等。应用铁基非晶纳米晶合金制作磁性器件,成本低,综合性能较好。

2.4 电抗器、滤波器及抗电磁干扰器件

由于铁基非晶纳米晶合金所具有的磁性特点,使其制作的电感元件具有抗饱和能力强、电感量大、品质因素高、温度稳定性好、体积小、高效节能等特点,因而其在卫星通讯设备、精密测控设备、工业整流设备、各种开关电源、逆变电源和计算机设备等领域具有广泛的应用前景。

3 国内外研究现状

激光热处理在科研和实际生产中已得到了广泛应用,与激波和电脉冲相比较,把激光技术应用于非晶态合金的晶化研究独具特色并具有潜在的应用前景。激

光处理分为连续激光处理和脉冲激光处理,通过激光照射非晶态合金表面来实现晶化的方法,它可以将激光束的能量集中、速度快等优点融入到非晶纳米晶化中,是一种新的非晶纳米晶化的手段。

国外关于这一方面的研究较多。SORESCU等^[18]于1993年采用XeCl准分子脉冲激光器(Lambda Physik,波长 $\lambda = 308\text{nm}$)分别照射 $\text{Fe}_{66}\text{Co}_{18}\text{B}_{15}\text{Si}_4$, $\text{Fe}_{74}\text{Ni}_4\text{Mo}_3\text{B}_{17}\text{Si}_2$, $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{B}_{18}$ 和 $\text{Fe}_{77}\text{Cr}_2\text{B}_{16}\text{Si}_5$ 非晶带,经激光辐照后,磁性能和非晶特性的改变通过透射式透射穆斯堡尔谱(TMS)和背射式透射穆斯堡尔谱(EMS)进行分析,相关形态变化及析出物的特征分别用扫描电镜技术和能量弥散X射线检测技术进行了分析和研究。研究发现,激光对于磁各向异性的作用取决于激光的参数(能量和重复频率)。GRZHON等人^[19]使用一台RUBY脉冲激光器($\lambda = 694.3\text{nm}$), CO_2 连续激光($\lambda = 10.6\mu\text{m}$)和等温退火处理 $\text{Fe}_{61}\text{Co}_{20}\text{Si}_3\text{B}_{14}$ 和 $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{13}\text{B}_{11}$ 非晶带表面,并利用X射线衍射技术对其进行了分析和研究,将等温退火处理的样品和经激光处理后的样品进行比较。研究发现,与等温退火处理的样品相比,激光加热不仅能够影响相的形成和分解顺序且可以改变晶化反应。同时,经激光处理后的样品发生了相组成的转变。SORESCU等人^[20]于1994年使用一台XeCl准分子激光器(Lambda Physik)照射 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{2.5-x}\text{B}_x$ ($x = 6, x = 9$)非晶带表面,采用波长 $\lambda = 308\text{nm}$,强度为 70mJ/pulse ,并利用透射穆斯堡尔谱学、扫描电镜技术和能量弥散X射线检测技术进行了分析和研究。结果在以最高重复频率照射的样品中观察到了晶化,最先出现的晶化相是 α -Fe。SORESCU^[21]于1998年使用准分子激光器照射Fe基和FeNi基的非晶合金,研究发现,当激光照射的参数相同时,晶化的发生取决于材料的磁致伸缩系数。SORESCU等^[22]用紫翠宝石脉冲激光(alexandrite pulsed-laser)对 $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_5\text{C}_2$ 进行照射,研究发现,激光功率较低时,合金的磁各向异性发生改变;但当功率较高时,发生了氧化,有氧化颗粒 Fe_3O_4 出现。意大利科学家BRANDA等人^[23]将 CO_2 连续激光做为等温退火的辅助手段进行处理 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{4.5}\text{B}_9$ 非晶合金薄带,并用X射线衍射技术和示差扫描量热法(DSC)对其进行了分析和研究。研究发现,拓扑有序和化学有序都会对晶化产生影响。可见,国外主要应用脉冲激光对非晶材料的晶化进行了研究,研究侧重于晶化对材料磁性的影响和结构的表征方面。

国内关于激光在Fe基非晶软磁材料纳米晶化中的应用研究远落后于国外,报道的研究成果也较少。张亚增、彭德应等用扫描电镜(SEM)和示差扫描量热法(DSC)研究了XeCl准分子激光辐照 $\text{Fe}_{81.5}\text{P}_{18.4}\text{Yb}_{0.1}$

非晶合金的晶化特征。结果发现,辐照样品的断面上有类冲击波纹样的层状规则的晶粒分布,其晶粒尺寸由辐照表面向样品内部逐渐减小,最后是近纳米尺度的微晶排布,样品的热稳定性也明显改善。利用 CO_2 激光对 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 非晶带的晶化进行了初步的研究。研究表明,在较低功率处理条件下,晶化析出相是 Fe-Si 单相固溶体 (3%), CO_2 激光对非晶带的晶化主要表现为:晶化速度快、成本低、处理后的非晶带韧性很好、可连续进行激光晶化处理、非常符合非晶带的处理等特点^[24~26]。

4 存在的问题与研究的发展方向

综上所述,纵观国内外关于激光晶化制备 Fe 基纳米软磁材料的研究已初步取得了一些结果,主要发现激光晶化相是单相 α -Fe (Si)、晶粒大小为纳米级、研究的思路和侧重点各异、还处在探索和可行性研究阶段。对整体技术还缺乏系统深入的研究。例如,激光纳米晶化的可控工艺参数与纳米晶相的结构、大小、数量之间的作用关系需要研究探明;纳米 α -Fe (Si) 晶相在不同激光工艺处理下,具有多种不同组分的超精细结构,如何查明其对材料性能的作用大小和如何控制其晶化率,经过深入研究后是否会发现新现象;非晶材料晶化后的脆性严重影响其应用,为什么激光晶化能够改善材料的脆性需要继续探讨;同时,激光纳米晶化的机理研究还是空白,因为激光的作用不仅有热效应而且有压应力效应两方面的作用机制,预示着激光纳米晶化的机理与退火纳米晶化的不同。激光作用于非晶合金带上,可以使其在很短时间,高速地、部分地转变为晶态的纳米晶体组织。其在形式上和扩散相变相同,但是激光晶化具有一系列固态扩散相变不存在的新的特性,其晶化相、动力学、结晶学和合金化等方面出现许多新的现象,这些特性和现象用固态下的扩散性的生核、长大理论难以解释,急需建立铁基纳米软磁材料的激光纳米晶化机理。这些问题的探讨和系统研究,对激光晶化制备 Fe 基纳米软磁材料技术的成熟和应用至关重要,所以,通过对 Fe 基纳米软磁材料的激光晶化技术与机理进行深入研究,建立激光纳米晶化理论,发展制备新技术,为实际应用打下基础是今后研究的主要任务和方向。

参 考 文 献

[1] YASHIZAWA Y, OGUMA S, YAMAUCHI K. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure [J]. *J A P*, 1988, 64 (10): 6044~6046.

[2] 徐 晖, 贺淑莉, 何开元 *et al* 纳米晶 FeCuNbSB 合金中晶间非晶相的居里温度研究 [J]. *金属功能材料*, 1998, 5 (5): 201~203.

[3] 何开元. FeCuMSB 纳米晶软磁合金基础研究的新进展 [J]. *金属功能材料*, 1995, 2 (3): 81~89.

[4] 李 春, 王立军. 超微晶软磁合金的开发和应用 [J]. *金属功能材料*, 1995, 2 (1): 13~16.

[5] 陈文智. 纳米晶软磁合金 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 的 X 射线光电子谱分析 [J]. *金属功能材料*, 1998, 5 (2): 83~86.

[6] 余丽萍, 李基永, 刘让苏. 块状非晶合金制备的研究进展 [J]. *金属材料研究*, 1998, 24 (3): 24~28.

[7] ZUETZEL D, RIEGER G, WECKER J. Nanocrystalline soft magnetic composite-cores with ideal orientation of the powder-flakes [J]. *J Magn Mater*, 1999, 196~197: 327~329.

[8] HONO K, HRAGA K, WANG Q *et al* The microstructure evolution of a FeSBNbCu nanocrystalline soft magnetic material [J]. *Acta Metal Mater*, 1992, 40 (9): 2137~2147.

[9] KOSTER U, SCHUNESMANN U, BRANK-BEWERDORFF M *et al* Nanocrystalline materials by crystallization of metal-metalloid glasses [J]. *Mater Sci Engng*, 1991, A133: 611~615.

[10] SCOTT M G. Amorphous metallic alloys [M]. London: F. E. Luborsky, 1983. 144~146.

[11] 刘佐权, 赵鹤云, 吕毓松 *et al* 激光作用下非晶合金 $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ 的晶化 [J]. *金属功能材料*, 1995, 2 (6): 235~238.

[12] 刘佐权, 张远第, 吕毓松. 非晶合金 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 的激光晶化及其特征 [J]. *高压物理学报*, 2000, 14 (4): 257~263.

[13] 张延中, 樊岳良. $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_{0.5}\text{Mo}_{2.5}\text{Si}_{12}\text{B}_{10}$ 超微晶合金的磁性及应用 [J]. *金属材料研究*, 1992, 18 (3~4): 50~54.

[14] 刘应开, 侯德东, 周效锋 *et al* 非晶 $(\text{Fe}_{0.99}\text{Mo}_{0.01})_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$, $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ 合金激光晶化主相 α -Fe 变化研究 [J]. *物理学报*, 1999, 48 (12): 2304~2308.

[15] KULIK T, HORUBARA T, MATYJA H. Flash annealing nanocrystallization of Fe-Si-B-based glasses [J]. *Mater Sci Engng*, 1992, A157: 107~112.

[16] 晁月盛, 滕功清, 耿 岩 *et al* 非晶合金 $\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$ 在脉冲电流作用下的单相晶化 [J]. *物理学报*, 1997, 46 (7): 1369~1374.

[17] 张甫飞, 张 洛, 纪朝廉 *et al* 纳米晶软磁合金材料及应用 [J]. *上海金属*, 2002, 24 (1): 21~26.

[18] SORESCU M, KNOBBE E T. Induced anisotropy and phase transformation in metallic glasses by pulsed-excimer-laser irradiation [J]. *Phys Rev*, 1994, B49 (5): 3253~3265.

[19] GRZHON V V, RUDNEV Y V, ANPLOGOV D I *et al* Crystallization of metal-metalloid glasses under laser heating [J]. *Scripta Materialia*, 1998, 39 (6): 815~823.

[20] SORESCU M, KNOBBE E T, BARB D. Excimer laser processing of amorphous and nanocrystalline $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{22.5-x}\text{B}_x$ ($x=6$ and 9) [J]. *J Phys Chem Solids*, 1995, 56: 79~87.

[21] SORESCU M. The role of magnetostriction in pulsed laser irradiation of amorphous alloys [J]. *J Alloys and Compounds*, 1998, 280: 251~254.

[22] SORESCU M, SCHAFER S A. Formation of magnetic particles by pulsed laser processing of $\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$ metallic glasses [J]. *Scripta Materialia*, 1997, 36 (11): 1255~1260.

[23] BRANDA F, COSTANTINIA, LANOTTE L. Crystallization of amorphous $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ [J]. *J Mater Sci*, 1997, 32: 6015~6019.

[24] 付贵勤, 董维国, 陈岁元 *et al* $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 非晶合金的激光晶化 [J]. *材料与冶金学报*, 2002, 1 (3): 237~240.

[25] 陈岁元, 刘常升, 才庆魁 *et al* 激光辐照非晶 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 微量晶化的穆斯堡尔谱研究 [J]. *物理学报*, 2003, 52 (10): 2486~2492.

[26] 陈岁元, 刘常升, 付贵勤 *et al* CO_2 激光辐照 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 非晶合金的微量晶化 [J]. *中国激光*, 2003, 30 (11): 1049~1053.