

质.

第二,物理学与人工智能之间的作用方式可以是双向的,即不仅物理学的理论和方法可以用于解决人工智能问题,而且人工智能的研究反过来也可以推动物理学的进一步发展.例如,对物理系统的相变研究受到物理定律和实验条件的限制,而在计算领域,却能够在任何变量之间施加任何强度的耦合,故对计算系统中的相变现象的研究很有可能导致相应的物理学领域取得新进展.

最后,物理系统与计算系统毕竟存在着不少差异,因此,当试图用物理学的方法解决计算问题时,很有必要对两类系统之间的差异和问题本身作认真研究,并在此基础上对所运用的物理学方法作出相

应的调整和改进.只有这样,才能取得真正有效的结果.

参 考 文 献

- [1] Hogg T *et al.* Artificial Intelligence, 1996, 81 :1
- [2] Huberman B A *et al.* Artificial Intelligence, 1987, 33 :155
- [3] Cheeseman P *et al.* Proc. IJCAI' 91, 1991 :331
- [4] Mitchell D *et al.* Proc. AAAI' 92, 1992 :459
- [5] Selman B *et al.* Artificial Intelligence, 1996, 81 :273
- [6] 卜东波等. 模式识别与人工智能, 1997, 10 :286 [BU Dong-Bo *et al.* Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1997, 10 :286 (in Chinese)]
- [7] Williams C P *et al.* Artificial Intelligence, 1994, 70 :73
- [8] Kirpatrick S *et al.* Science, 1994, 264 :1297
- [9] Kraus S. Artificial Intelligence, 1997, 94 :79
- [10] Shehory O *et al.* Artificial Intelligence, 1999, 110 :1

正电子慢化体的研究和进展*

郁伟中¹⁾ 袁佳平

(清华大学物理系 北京 100084)

摘 要 正电子湮没技术是一种研究材料的微观缺陷和相变的灵敏工具,在通常的正电子谱仪中,正电子能量为 MeV 量级,在样品中注入深度比较深($\sim 100\mu\text{m}$),主要研究材料体内的平均缺陷密度.慢正电子束方法把正电子的能量降低为 keV 量级(而且可以调节),注入比较浅($\sim \mu\text{m}$),所以是研究表面缺陷的探测手段.正电子慢化体是产生慢正电子的关键设备,对其研究有重要意义.文章综述了慢化体研究的历史和现状,从物理概念出发介绍使正电子慢化的四种可能方法和当今慢化体的五种几何排列方式.其中应用最广泛的是钨慢化体和百叶窗式的排列方式,效率最高的是惰性气体固体慢化体,而加电场慢化体是有待开发的高效慢化体.

关键词 慢化体,慢正电子束

THE GENERATION AND DEVELOPMENT OF THE MODERATORS FOR SLOW POSITRON BEAM

YU Wei Zhong YUAN Jia Ping

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The positron annihilation technique is a sensitive tool for studying microdefects and phase transitions in various materials. Usually the energy of positrons is on the order of MeV and the implantation depth about 100 microns, so the bulk average defect density can be studied. In a slow positron beam the positron energy is about keV and the implantation depth a few microns, so surface defects can be detected. Positron moderator is the key device for obtaining a slow positron beam. We review the history and development of the positron moderator, including four methods that convert fast positrons into slow monoenergetic positrons and five array types. The tungsten moderator is the most widely used one while the inert gas solid moderator is the most efficient. Field-enhanced

* 国家自然科学基金(批准号:19775027)资助项目

1999 - 12 - 23 收到初稿, 2000 - 09 - 11 修回

1) E-mail: yuweizhong @ chinaren.com

moderators with their high efficiency have great potential but need to be developed. The vane arrangement is the most commonly found.

Key words moderator, slow positron beam

1 研究慢正电子的目的

电子和电子束已为大家所熟悉,它已被广泛地用于计算机、电视机、电镜和电子探针等设备中.现在,电子的反粒子——正电子(e^+)也正在为大众所熟悉,如北京正负电子对撞机就是其中之一,它是用能量极高的 e^+ 和电子相互作用,主要应用于高能物理,它并不是本文所要叙述的内容.相反我们在这里要介绍一种极低能量的 e^+ 束和物质的相互作用,重点将介绍如何获得这种能量极低而且能量可调的束流.

人们从电子束和物质的相互作用中已获得了大量的信息,但从物理学的观点来看,我们从电子和物质的相互作用中获得的信息,希望能从它的反粒子(e^+)和物质的相互作用中得到验证和补充,特别是由于 e^+ 和物质的作用和电子的作用类比有很大差别,从中我们可以获得许多新的信息.

例如,著名的爱因斯坦光电效应是大家最熟悉的效应.该效应指出,固体中的电子需要吸收一定的能量才能从固体表面逸出,电子需要的能量称为逸出功,或者说电子具有正的功函数. e^+ 是电子的反粒子,根据固体理论, e^+ 应该具有负的功函数, e^+ 不需要额外的能量就可以从固体中逸出,相反还可以从固体中得到一些能量.这个理论是需要检验的,慢 e^+ 功函数研究正是为了这种需要.

研究慢 e^+ 的另一个也是更重要的目的是技术上的需要.正电子湮没方法(PAT)是一种对微缺陷极灵敏的无损检测工具^[1,2],但使用的 e^+ 具有很高的动能(MeV量级),在样品中会注入比较深(约几百微米), e^+ 主要与材料体内的电子发生湮没,给出材料体内的信息.若材料内外性质均匀,深注入可以克服表面效应;但如果内外性质不一样,或者主要想研究样品的表面性质,这种深注入就使常规的PAT遇到困难.于是一种新的技术——慢 e^+ 谱仪应运而生.这种能量可调的 e^+ 束为研究固体和表面,为测量低能散射截面及获得正电子素(Ps)原子物理方面的各种效应提供了极难得的机会^[3-5].

慢 e^+ 技术除了原有的常规 e^+ 方法所具有的许多优点(如对微缺陷和相变极灵敏,无损检测等)外,

还有许多新的优点:(1)可以研究表面性质,这是它的基本出发点;(2)它能将 e^+ 在某一处热化,然后传输到另一处,这样就可以用可控的方式将这种单色(单能)粒子束与样品相互作用,而不用担心由于放射源的存在而使样品受到污染或使测量受到干扰;(3)样品可以具有很低的总质量,比常规测量中为了热化高能 e^+ 所需质量低很多,使我们可以研究薄样品(几微米厚度)或研究固体的表面以及研究由稀薄气体组成的样品等.

近来利用超高真空技术使研究 e^+ 与表面相互作用的能力大大提高,也使人们对 e^+ 如何与表面相互作用有了新的认识,已能产生更强束流的慢 e^+ ,这些都为开展固体物理、表面物理、Ps原子物理及低能 e^+ 与分子散射等实验研究开辟了新的可能性.本文并不回顾这一课题的全部历史,只是局限于如何得到低能的 e^+ ,即研究慢化体的历史和进展.

2 快正电子的来源

首先是快 e^+ (能量为MeV量级)的获得.我们在实验中使用的快 e^+ 主要是来自放射性同位素(e^+ 源): ^{22}Na , ^{64}Cu , ^{11}C , ^{58}Co 及 ^{68}Ge 等,这是大多数不具备加速器的实验室获得 e^+ 的唯一手段.

对同位素源的选择原则主要是:较长的半衰期 $\tau_{1/2}$,有大的发射 e^+ 的分支比 η ,合适的 e^+ 能量,尽量低的价格等.对于 ^{22}Na , $\tau_{1/2}$ 为2.6年,属于比较长的一种, $\eta=89\%$,价格适中,当属首选. ^{64}Cu 的 $\tau_{1/2}$ 为12.8h, $\eta=19\%$,由于半衰期很短,给使用带来很大不便,但可在反应堆中产生,有价格便宜的优点. ^{11}C 是由Van de Graaff发生器通过 $^{11}\text{B}(p,n)^{11}\text{C}$ 反应而生产的,其他的同位素可由放射化学方法提供,表1列出了主要 e^+ 源的概况.

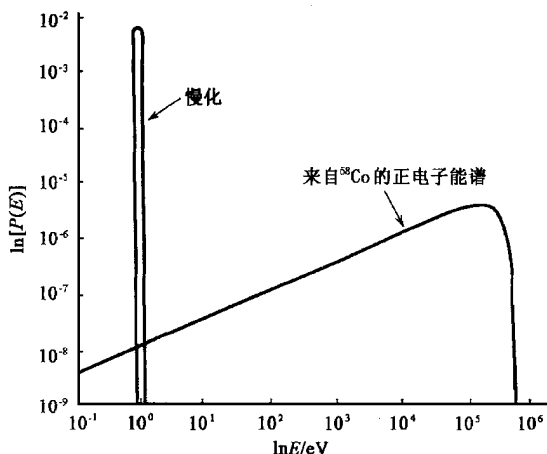
正负电子对是另一种来源,它是用高能电子等被减速时放出的韧致辐射产生的,其能量约10MeV,从后面的讨论中知道,较高能量的 e^+ 对获得慢 e^+ 更不利,因为要获得较高的慢 e^+ 产额就必须把 e^+ 阻止在靠近表面的地方,但此类 e^+ 具有高得多的平均流强和脉冲调制式工作还是很有利的,同时也克服了更换放射源的麻烦,已逐步成为国内外获得慢 e^+ 的最佳选择方案.

表1 主要的 e^+ 源

| 源 | E_{\max} 终点能(MeV) | 生产方法 | 半衰期 $\tau_{1/2}$ | 发射 β^+ 的份数(%) | 平均自由程 λ (g/cm ²) |
|------------------|----------------------|----------------------------------|------------------|----------------------|--------------------------------------|
| LINAC | ~ 10 | $e^- \rightarrow 2e^- + e^+$ | — | — | ~ 5 |
| ¹¹ C | 0.96 | ¹¹ B(p, n) | 20 min | 99 | 0.056 |
| ²² Na | 0.54 | ²⁴ Mg(d, α) | 2.6 a | 90 | 0.029 |
| ⁵⁸ Co | 0.47 | ⁵⁸ Ni(n, p) | 71 d | 15 | 0.025 |
| ⁶⁴ Cu | 0.65 | ⁶³ Cu + n | 12.8 h | 19 | 0.036 |
| ⁶⁸ Ge | 1.88 | ⁶⁶ Zn(α , 2n) | 275 d | 86 | 0.12 |

3 慢正电子的获得

如何把 MeV 能量降低到 keV 能量? 人们常常以为这是一个很简单的问题, 其实不然. 因为快 e^+ 的能量不是单能的. 以 ⁵⁸Co 为例, 是在从 0 到 0.47 MeV 最大能量范围内分布(见图1).

图1 ⁵⁸Co 源的能谱示意图

(e^+ 能量从 0 到 0.47 MeV 分布, 左侧的竖框表示用慢化体方法得到的 eV 量级慢 e^+ 的产额)

通常人们容易想到的第一个方法是和加速器提高能量相反的方法, 即利用电场、磁场降速, 减速固然是可以的, 但由于 e^+ 初始能量非单一, 会顾此失彼, 一些 e^+ 甚至会反向运动.

第二个方法是用能量分析器筛选出某一窄宽度(如 1eV) 的特定能量的 e^+ , 但涉及到效率问题, 如果从 0—10⁶ eV 平均分布的 e^+ 群中选出宽度为 1 eV 的 e^+ , 很可能效率只有 10⁻⁶.

第三个方法, 也是真正实用的方法, 是在仔细研究了 e^+ 和固体相互作用之后提出的. 实验证明, 能量比较高的 e^+ 从外部注入固体, e^+ 在固体中经过慢化, 把能量降低为 kT 量级(室温时只有 0.025 eV). 当 e^+ 扩散到固体表面时, 由于负功函数的影响, e^+ 有可能自动从表面逸出, 并从固体中吸收一些能量, 成为 eV 量级的慢 e^+ , 而且能量范围也很窄. 这是

Madanski 和 Rasetti 于 1950 年首先提出的设想^[6]. 把慢 e^+ 收集起来, 形成慢 e^+ 束, 再用电磁场聚焦和加速到所需的能量(如 0—50 keV 范围), 这时 e^+ 会打入样品中不同的深度, 并在不同的深度湮没(0 至几十 μ m), 可以研究样品中某些物理性质随深度的变化, 这就是慢 e^+ 方法, 其中把快 e^+ 变为慢 e^+ 的固体称为慢化体.

这种慢化 e^+ 的方法效率会有多高? Madanski 等进行了理论估计: 如果 e^+ 注入深度为 10⁻² cm, 假设只有离表面一个 e^+ 扩散长度(通常估计为 10³ Å 即 10⁻⁵ cm) 的 e^+ 才有可能逸出(太深的 e^+ 来不及扩散到表面就湮没了), 这样出射 e^+ 和入射 e^+ 的比率等于扩散长度与注入深度之比(10⁻⁵/10⁻²), 估计效率的理论值大约为 10⁻³.

虽然其概念是准确的, 但他们的实验并不成功, 当他们用 ⁶⁴Cu 源放出的 e^+ 流照射各种固体表面时, 观察到的慢 e^+ 流已被淹没在由源放出的快 e^+ 流而产生的本底计数中. 我们现在知道, 造成这种低效率的原因可能是实验材料具有正的 e^+ 功函数, 或者灵敏度低, 也可能是 e^+ 扩散常数太小和样品表面受到污染, 等等.

1958 年, Cherry 第一次观察到慢 e^+ ^[7], 他用 ⁶⁴Cu 源照射镀铬的云母表面而成功地产生了慢 e^+ . 他的慢 e^+ 产额(慢/快 e^+ 数之比)为 $\epsilon = 3 \times 10^{-8}$, 他利用该慢 e^+ 束去测量 e^+ 和 e^- 轰击下表面的二次电子发射产额. 但 Cherry 的论文未发表, 直到 1968 年才得到别人的介绍.

Groce 等^[8]在 1968 年也成功地产生了每秒几个慢 e^+ 的束流, 他们使用了 Au-云母慢化体, 其效率大约为 10⁻⁶, 并利用这一束流首次测量了 e^+ 与氩原子的总散射截面.

从那时起, 慢 e^+ 已成功地应用于许多实验, 同时也在不断地探索如何提高慢 e^+ 的产额.

4 慢化体和它的效率

慢化体的效率取决于三个因素: (1) 快 e^+ 的注

入深度分布情况, LINAC 产生的 e^+ 能量高, 注入深, 对慢化效率不利; (2) 热化 e^+ 中能扩散到表面的 e^+ 比例; (3) 到达表面后能从表面发射出来的 e^+ 数的比例 P_{em} . 这样慢化体的效率 ε 为

$$\varepsilon = \frac{1.7 P_{em} \rho \sqrt{D_+ \tau_{eff}}}{E_{max}^{1.14}},$$

这里 ρ 是慢化体的密度 (g/cm^3), D_+ 是 e^+ 扩散长度 (cm^2/s), τ_{eff} 是 e^+ 在慢化体中的寿命, E_{max} 是入射 e^+ 的最大能量.

一个重要的进展是 1972 年 Canter 等^[9] 发现烟熏 MgO 慢化体, 转化效率 $\varepsilon = 3 \times 10^{-5}$. 这一慢化体为观察到表面正电子素 Ps 的形成及其激发态奠定了基础. 这是第一个具有较高相对效率的稳定慢化体. 采用 MgO 是因为有报道: 在真空中用 β^+ 源照射涂有 MgO 的金属箔会得到高产额的 Ps. 它采用背散射几何形状降低 β 谱能量 (图 2), 一组薄的金叶片按百叶窗结构安放, 用燃烧着的镁条在上面熏一层 MgO. 关于 MgO 慢化体的工作原理是由于 MgO 表面电荷层能将涂层粉末内产生的 Ps 激励到 $n=2$ 的电离态, 从 MgO 慢化体出来的 e^+ 被有效地极化了.

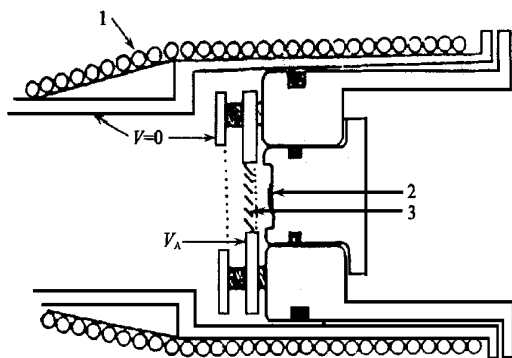


图 2 百叶窗式慢 e^+ 源

(1. solenoid 螺线管; 2. ^{58}Co 放射源; 3. (Au + MgO) 百叶窗慢化体)

MgO 慢化体的优点是制造容易, 不足之处是涂层为一层绝缘的粉末细粒, 慢 e^+ 的能量分布 ΔE 相对较大. 如 ^{22}Na 得 $\Delta E = 1.2 \text{ eV}$, ^{58}Co 得 $\Delta E = 5 \text{ eV}$, 此处 ΔE 取正常的慢 e^+ 发射能谱总积分计数的 10% 到 90% 之间的能量宽度.

1975 年, Stein 等^[10] 发现了具有很窄能量宽度的碳化硼慢化体, 其能量分布 $\Delta E = 0.25 \text{ eV}$, $\varepsilon = 10^{-7}$. 这是用 Van de Graaff 发生器的质子通过 $^{11}\text{B}(p, n)^{11}\text{C}$ 反应产生 ^{11}C , 硼靶放射出慢 e^+ . 当硼表面涂有一层裂化的泵油时, ε 有很大提高 (达 10^{-6}). 这一系统被广泛应用于散射截面的测量. 原

则上这种产生 ^{11}C 的方法能得到非常大的慢 e^+ 流量, 但总的产额受到 B 靶散热率的限制.

1980 年, Pendyala^[11] 发现了碳化金慢化体, $\varepsilon = 0.9 \times 10^{-4}$. 当用 ^{58}Co 源时, 这种慢化器对是否暴露于大气不敏感, 且能得到一个很窄的能量分布 $\Delta E = 0.3 \text{ eV}$.

自从 1976 年发现金属慢化体^[12] 以来, 1978 年 Mills 等^[13] 发现了高效的真空退火钨慢化体, 其表面处理工艺得到了迅速的发展. 用 2200°C 真空退火的 W 百叶窗慢化器获得极佳的效果. e^+ 束的能谱不是很窄, $\Delta E = 1.5 \text{ eV}$, 但其效率是很高的. W 慢化器在空气中是稳定的, 可在较差的真空条件下工作. 1988 年产生 W(100) 单晶作慢化体, $\varepsilon = 8.1 \times 10^{-4}$, 至今报道效率最高的钨单晶是 Vehanen 等^[14] 用 W(110) 单晶加氧化处理, 效率为 3.2×10^{-3} . W 慢化体是用得最广的慢化体.

SiC 是一种有希望的慢化体材料, 慢化效率比较高, 可达 1.5×10^{-3} . SiC 对表面污染不太灵敏, 不需要超高真空.

惰性气体慢化体具有迄今为止最高的效率^[15], ε 可达 7.0×10^{-3} . 它通常是这样制作的: 在金属冷指上有 Ni(100) 或其他金属, 上面放置 e^+ 源, 在真空中冷却到几 K, 通低气压的惰性气体 (Ne, Ar, Kr, Xe 等), 在 e^+ 源表面生成惰性气体固体, 适当升高温度退火就成了惰性气体慢化体, 缺点是制备困难, 慢 e^+ 能量分散度比较大.

5 加电场慢化体

加电场慢化体是一种新思想. 在绝缘体或半导体上加电场把 e^+ 拉向表面, 会使到达表面的 e^+ 数量增加, 这个设想是 Lynn 和 Mckee^[16] 在 1979 年首先提出的, 他们利用镀 200\AA 金膜的金硅面垒半导体探测器作为慢化体, Si, Ge 有正的 e^+ 功函数, 不发射 e^+ , 但金层可发射 e^+ . 实验结果并不理想, 效率的增加量并不是很大, 这是由于非外延生长的金层中有缺陷, 以及 Si(111) 和 Au 界面有 SiO_2 阻挡层, 使慢 e^+ 不容易重发射. 但人们相信, 使用外延生长法在 $50\mu\text{m}$ 的 Si 表面生长金属硅化物, 并且冷却到 77 K , 可望使效率提高到 10%. 也有人建议用 NiSi/Si(111).

第一个见到成效的加电场慢化体是 Merrison 等^[17] 惰性气体 (Ar 或 Kr) 慢化体. 它是在铜板上放置 e^+ 源, 降至低温 15 K , 低气压下通惰性气体, 在源

上产生惰性气体覆盖层,再覆盖一层 O_2 ,用电子束轰击惰性气体,在慢化体表面产生的表面电荷会提高慢化体的发射效率,但只提高了大约三倍,而且总的源强不大.

金刚石是极好的负功函数材料.若在本征金刚石上外延生长掺 B 的金刚石薄膜,在本征金刚石一侧放 ^{22}Na 源, e^+ 可以从掺 B 的金刚石薄膜上重发射.

SiC 也是加电场慢化体的极好材料,首先,不加电场时慢化效率比较高,可达 1.5×10^{-3} ,容易做成二极管型.由于加电场慢化体必然有二极管结构,在重发射一侧必然是 P 型 SiC.

加电场慢化体应该选择 e^+ 迁移率高的材料,为此我们测量了一些半导体材料的 e^+ 迁移率^[18].

6 预慢化器

Waeber 等提出了第四种慢化 e^+ 的设想^[19],这种方法是利用一种称为预慢化器的装置.其原理类似于发电厂的煤粉碎机,大块的煤一面旋转粉碎,一面筛选,剩下大的继续粉碎.我们设想有一个圆柱形的磁瓶,两个端面和侧面可以反射 e^+ ,瓶中央有一个薄金属膜, e^+ 在来回反射时必须经过它,每经过一次减少一些能量,当能量低于某一个设定值(如 $7keV$)时, e^+ 就可以从磁瓶中逃逸出来.他们认为这种预慢化器的慢化效率也许可达 80%.如果认为经过这种预慢化器的慢 e^+ 能量太分散,可以再经过二次慢化(见下一节),从预慢化器出来的 e^+ 经过二次慢化(设效率为 50%),这样总的慢化效率仍可高达 40%.

7 慢化体的几何结构

慢化体和放射性同位素以及重发射侧面的关系大致可分五类:(1) e^+ 从慢化体的同一侧面入射和出射,优点是效率比较高,缺点是同位素源处于慢 e^+ 发射的路径上,挡住了一部分慢 e^+ .(2)透射式, e^+ 从慢化体的一侧入射,从另一侧出射,要求慢化体比较薄,缺点是薄膜容易有缺陷,缺陷捕获 e^+ ,使其不容易重发射.(3)百叶窗式结构(见图 2),快 e^+ 不能垂直穿过由慢化体叶片组成的百叶窗,而慢 e^+ 在电场作用下可以弯曲地穿过叶片之间的间隙.这种方法的效率高,制作容易,已得到普遍采用.(4)源和慢化体一体化,如 ^{64}Cu ,既是源又是慢化体,但源

材料必须做成薄膜,因为内部的快 e^+ 不能扩散到表面,只能在慢化体材料中自湮没.(5)惰性气体慢化体,惰性气体冷凝在源上,效率高,但必须要处于几 K 的低温,设备复杂.

8 一次慢化和二次慢化

为了提高 e^+ 束的亮度,即单位体积中的 e^+ 数,可以把 e^+ 慢化两次或多次,由于第二次注入时 e^+ 能量低,入射浅,会有更多的 e^+ 位于表面,第二个慢化体的效率会很高,也许 50%以上.这样总体上损失一些,换来了亮度高、能量范围窄等优点.

纵观整个发展过程,从物理上加强对 e^+ 与表面相互作用的认知是慢化体研制成功的一个重要因素.这些实验表明,注入到干净单晶靶体内的 e^+ 的确能扩散到表面,并以 Ps 或自由 e^+ 形式放射出来. e^+ 主要在向前突出物上发射出来,其最大能量被解释为等于 e^+ 的表面负功函数.另外应尽量减小慢化体内的缺陷,因为缺陷会捕获 e^+ ,使它们停止扩散.慢化体的表面和体积之比应该大,使更多的 e^+ 到达表面.基于这些新的认识,一些新的具有更高效率和更窄能量分布的慢化体将出现,同时人们进行了大量的 e^+ 功函数的计算.

在国内的慢 e^+ 束方面,早期中国科学技术大学和清华大学的束流基于同位素源,使用 W 慢化体和百叶窗式的排列,慢化效率约为 10^{-4} .近来,中国科学院高能物理研究所、北京航空航天大学 and 清华大学合作正在建立基于北京正负电子对撞机的慢 e^+ 束^[20].中国科学技术大学也计划利用同步辐射光源产生慢 e^+ 束.由于这两种方法都能产生强几个量级的 e^+ 束流,预计慢化效率的问题将成为次要的问题,大体上仍使用 W 慢化体和百叶窗式的排列.

参 考 文 献

- [1] 何元金,郁伟中.物理,1982,11:241[HE Yuan Jin, YU Wei Zhong. Wuli (Physics), 1982, 11: 241 (in Chinese)]
- [2] Brandt W, Dupasquier A. Solid State Physics. Amsterdam: North Holland, 1983. 432-509
- [3] 林大航,饶建锡.物理,1985,14:363[LIN Da Hang, RAO Jian Xi. Wuli (Physics), 1985, 14: 363 (in Chinese)]
- [4] 韩荣典,叶邦角,翁惠民等.物理学进展,1999,19:305 [HAN Rong Dian, YE Bang Jiao, WENG Hui Min et al. Progress in Physics, 1999, 19: 305 (in Chinese)]
- [5] 翁惠民,周先意,叶邦角等.物理,2000,29:308[WENG Hui Min, ZHOU Xian Yi, YE Bang Jiao et al. Wuli (Physics), 2000, 29: 308 (in Chinese)]

- [6] Madanski L, Rasetti F. *Phys. Rev.*, 1950, 79 :397
- [7] Cherry W. Ph. D dissertation. Princeton University, 1958
- [8] Groce D E, Costello D G *et al.* *Bull. Am. Phys. Soc.*, 1968, 13 : 1397
- [9] Canter K F, Coleman P G *et al.* *J. Phys. B*, 1972, 5 : L167
- [10] Stein T S, Kauppila W E *et al.* *Phys. Lett. A*, 1975, 51 :327
- [11] Pendyala S, McGowan J W. *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.*, 1980, 19 :161
- [12] Pendyala S, Bartell D *et al.* *Can. J. Phys.*, 1976, 54 :1527
- [13] Mills Jr. A P, Platzman P M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1978, 41 : 1076; Mills Jr. A P. *Phys. Rev. Lett.*, 1978, 41 :1828
- [14] Vehanen A, Lynn K G *et al.* *Appl. Phys. A*, 1983, 32 :163
- [15] Gullikson E M, Mills Jr A. P. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 57 :376
- [16] Lynn K G, McKee B T A. *Appl. Phys.*, 1979, 19 :247
- [17] Merrison J P, Charlton M *et al.* *J. Phys.*, 1992, 4 :L207
- [18] 郁伟中, 袁佳平. *物理*, 1999, 28 :429 [YU Wei-Zhong, YUAN Jia-Ping. *Wuli (Physics)*, 1999, 28 :429 (in Chinese)]
- [19] Weaver W B, Shi M, Gerola D. *Mat. Sci. Forum.*, 1995, 175 - 178 :115
- [20] 王天民, 王宝义, 陈红民等. *物理*, 1999, 28 :572 [WANG Tian-Min, WANG Bao-Yi, CHEN Hong-Min *et al.* *Wuli (Physics)*, 1999, 28 :572 (in Chinese)]

稀土锰酸盐纳米颗粒复合体系的软化学制备 及磁电阻增强效应*

严纯华 黄云辉 朱涛¹⁾ 王哲明 陈省 徐志刚 廖春生

(北京大学稀土材料化学与应用国家重点实验室 北京大学 - 香港大学稀土材料
和生物无机化学联合实验室 北京 100871)

摘要 介绍了一类具有增强磁电阻效应的新型稀土锰酸盐多晶颗粒复合体系及其化学制备方法,并对增强的机理进行了初步的探讨.

关键词 稀土锰酸盐,颗粒复合,磁电阻

SOFT CHEMISTRY SYNTHESIS AND ENHANCED MAGNETORESISTANCE OF GRANULAR COMPOSITES OF LANTHANUM MANGANITES

YAN Chun Hua HUANG Yun Hui ZHU Tao WANG Zhe Ming
CHEN Xing XU Zhi Gang LIAO Chun Sheng

(State Key Laboratory of Rare Earth Materials Chemistry and Applications,
PKU-HKU Joint Laboratory in Rare Earth Materials and Bioinorganic Chemistry, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract By soft chemical processing several lanthanum manganite nano- and micro-sized granular composites have been fabricated, including $\mu\text{m}/\text{nm}$ $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$, $\text{CoFe}_2\text{O}_4/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ and $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3/\text{PPP}$ (poly para-phenyl) combined systems. Enhancement in magnetoresistance is observed in all these composites. Different compounds embedded in the granular manganites result in different temperature ranges where the enhancement occurs. It is believed that the phenomenon is associated with tunneling between various of grains and spin dependent scattering.

Key words lanthanum manganites, granular composites, magnetoresistance

* 国家自然科学基金(批准号:29525101, 29701001, 29832010)、国家重点基础研究发展规划项目(批准号:G1998061314)、国家教育部博士点基金和北大方正基金资助课题

2000 - 05 - 09 收到初稿, 2000 - 10 - 08 修回

1) 现在中国科学院物理研究所工作