

# 正电子湮没技术在纳米材料中的应用

曾小川<sup>1</sup> 宋武林<sup>1,2\*</sup> 周玉华<sup>1</sup> 谢长生<sup>1</sup>

(1 华中科技大学 材料科学与工程学院模具技术国家重点实验室, 武汉 430074;

2 华中科技大学 分析测试中心, 武汉 430074)

**摘要** 纳米材料在现实应用中表现出越来越优异的性能, 其微结构往往对宏观性能有着重要影响。从正电子湮没技术基本原理出发, 结合正电子湮没技术在材料微观结构领域的独特优势, 介绍了其在纳米金属、合金以及纳米半导体等材料中的微结构研究工作, 阐述了纳米材料微结构对基础学科和实际应用的重要意义。

**关键词** 正电子湮没; 纳米材料; 微结构; 缺陷

中图分类号: O657; TB302.5 文献标识码: A 文章编号: 2095-1035(2011)02-0013-07

## Applications of Positron Annihilation Technology in Nanomaterials

ZENG Xiaochuan<sup>1</sup>, SONG Wulin<sup>1,2</sup>, ZHOU Yuhua<sup>1</sup>, XIE Changsheng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Die and Mould Technology, Faculty of Material Science and Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Analytical and Testing Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** Nanomaterials exhibit more and more excellent performances in real applications. Their microstructures normally determine their macro properties. In this paper, firstly the introduction of positron annihilation technology was given by describing fundamental principles and elucidating characteristic advantages of positron annihilation technology in microstructure analysis of materials. Then the applications of positron annihilation technology in characterization of microstructures of nanometals, nanoalloys and nanosemiconductor materials were reviewed. The importance of microstructure analysis of nanomaterials by positron annihilation technology for basic scientific disciplines and real applications were also explained.

**Keywords** positron annihilation; nanomaterials; microstructure; defects

## 1 引言

纳米科学技术是 20 世纪 80 年代末发展起来的新科技, 纳米材料通常是指晶粒大小分布在 0.1~100 nm 尺寸范围内的超细材料。纳米材料由于其所在的特殊尺寸所表现出来的在力学<sup>[1]</sup>、磁学<sup>[2]</sup>、热学<sup>[3]</sup>、光学<sup>[4]</sup>和催化化学<sup>[5]</sup>等方面的出众性能, 一直

受到各国科学家的热捧。

纳米材料在这样一个小尺寸上表现的优异性能, 主要由于其尺寸的表面效应、小尺寸效应、量子尺寸效应以及宏观的量子隧道效应引起的。而纳米材料在小尺寸上的微观结构, 尤其是缺陷分布对材料的综合性能有着不可忽视的影响。我们知道纳米颗粒其中一个主要特征就是颗粒界面积与其占有体

收稿日期: 2011-03-29 修回日期: 2011-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(项目编号: 51071073)资助项目。

作者简介: 曾小川, 在读研究生, 主要从事纳米铝粉缺陷的研究。E-mail: xie25@126.com

通讯作者: 宋武林, 男, 教授, 主要从事材料激光表面改性、材料分析测试等研究。

积的百分比,也就是比表面积比一般颗粒要大很多。而界面本身是一种缺陷,同时又包含有几种其他类型的缺陷组合,正电子湮没技术作为在20世纪60年代发展起来的应用于材料表征领域的技术<sup>[6]</sup>,它是一门把核物理和核技术应用到固体物理和材料科学研究的新技术,该技术主要利用正电子与材料中的电子湮没( $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ )放射出 $\gamma$ 射线的状态来表征材料缺陷的。

目前常用的分析测试手段(如透射电镜、扫描电镜、X射线衍射、中子衍射、X射线光电子能谱等)用来表征纳米材料的结构和性能等方面已经获得很多可靠的信息,而对于材料的微结构缺陷,例如界面缺陷的鉴别,浓度的测定,各类缺陷的尺寸和数量在外界条件下的变化等则是正电子湮没技术独特的优点所在,特别是缺陷尺寸在原子量级时候,大部分测试手段不能探查得到,而正电子就能发挥它的优势,因为它本身对结构缺陷大小及其变化十分敏感,而且正电子湮没技术对样品没有严格的限制,这使得它能广泛应用于各种对象的研究,因此用来做纳米材料微结构分析也是一个有用工具。本文以几类常见的纳米材料(纳米金属、合金和化合物半导体)为例介绍了正电子湮没技术在其中的成功应用。

## 2 正电子湮没技术简介

### 2.1 理论基础

正电子作为第一个被发现的反物质,在与电子作用时有着独特的行为。正电子,顾名思义,具有某些与电子相反和相同的性质,它与电子有着相同的电荷量、质量和自旋量,但是电性相反,正电子在与电子相遇后会通过湮没过程( $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ )而消失。实验室中正电子由放射性元素衰变产生,进入材料后通过与电子、原子、声子等发生非弹性碰撞而损失能量使其动能达到热化水平,然后以热运动速度扩散。正电子在材料中的热化散射距离在1977年由Brandt和Paulin<sup>[7]</sup>从实验中得出,

$$N(r) = N_0 \exp(-\alpha r) \quad (1)$$

$$\alpha \approx 16 \frac{\rho [g/cm^3]}{E_{max} [MeV]} cm^{-1} \quad (2)$$

式中, $\rho$ 为材料密度, $E_{max}$ 为入射正电子的最大能量。热化后的正电子在扩散过程中与材料中的电子发生湮没以产生 $\gamma$ 光子的形式消失,正负电子湮没主要有三种途径:产生一个 $\gamma$ 光子、两个 $\gamma$ 光子和三个 $\gamma$ 光子。发射单个 $\gamma$ 光子时需要第三粒子的参与来吸收反冲动量,故单光子湮没的几率是很小的。在双

$\gamma$ 光子和三 $\gamma$ 光子的湮没事件中,根据费曼原理,双 $\gamma$ 湮没与三 $\gamma$ 湮没的事件比为371:1,因此湮没的主要过程都是以双 $\gamma$ 湮没为主,在以下的讨论中也只考虑双 $\gamma$ 光子湮没的情况。

正负电子湮没时的一些湮没参数与湮没处的电子状态有关,其中正电子在材料中的湮没率与湮没位置的电子密度有如下关系:

$$\lambda = \pi r_0^2 c n_e \quad (3)$$

其中, $r_0$ 是电子经典半径, $c$ 是光速, $n_e$ 是正电子湮没处的电子密度。而正电子寿命 $\tau$ 是湮没率 $\lambda$ 的倒数,即与电子密度成反比。如果任何外部条件的变化导致材料内部某处的电子密度发生变化,正电子寿命亦会随之改变,这时通过正电子寿命来获得材料微观信息以及与之联系的宏观性能间的关系。

凝聚态材料中在有空位型缺陷出现时,该缺陷往往带相应的负电荷或电中性,这时缺陷对正电子产生吸引势,正电子优先在缺陷中被捕获,这就构成正电子的捕获态湮没。且空位中的电子密度相比完整晶体要低一些,在缺陷中湮没的正电子就能够带出缺陷处的结构信息,建立在捕获态基础上的二态捕获模型有如下的微分方程:

$$\frac{dn_f(t)}{dt} = -\lambda n_f(t) - K n_f(t) + \gamma n_d(t) \quad (4)$$

$$\frac{dn_d(t)}{dt} = -\lambda n_d(t) - \gamma n_d(t) + K n_f(t) \quad (5)$$

式中, $n_f$ 和 $n_d$ 分别表示自由态和捕获态的正电子数, $\lambda_f$ 和 $\lambda_d$ 则分别表示正电子在自由态和捕获态的湮没率。在一定条件下解上述微分方程就可以得到一些我们感兴趣的参量。更多捕获态的模型只是二态捕获模型的简单推广,我们后面不讨论。

### 2.2 实验部分

由放射性元素衰变特性可知,正电子一般来自于放射性元素的 $\beta^+$ 衰变,而且正电子湮没实验通常使用 $^{22}Na$ 作源,其衰变如图1所示。

$^{22}Na$ 衰变过程中一般以发射能量为1.28 MeV的 $\gamma$ 光子作为产生正电子的起始信号,同时放出最大动能为0.545 MeV的正电子(两者间的时间差3 ps通常忽略)。

目前应用在纳米材料中的正电子湮没技术主要有两种:正电子寿命谱和多普勒展宽谱。在正电子寿命谱中,考虑到正电子与材料中的电子湮没放出双 $\gamma$ 射线时的能量和动量守恒,每束 $\gamma$ 射线的能量为 $E = m_0 c^2 = 0.511$  MeV,就以该能量状态的 $\gamma$ 射线作为正电子湮没的终止信号,探测起始信号和终

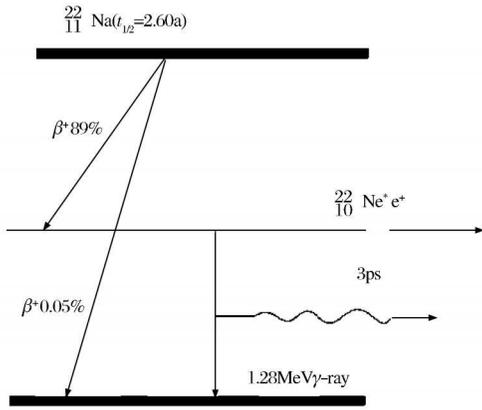


图 1 <sup>22</sup>Na 的衰变图

Figure 1. Schematic diagram of the nuclear decay of <sup>22</sup>Na.

止信号之间的时间差就得到正电子寿命谱。实验室常用的寿命谱仪分: 快-快符合和快-慢符合两种, 随着时代的发展, 这些设备也在不断改进中, Li Hui 等<sup>[8]</sup> 通过两个闪烁探测体, 一个延时器和一个数字示波器的简化装置就可以实现更好分辨率的寿命谱测量, 其装置原理图如图 2 所示。

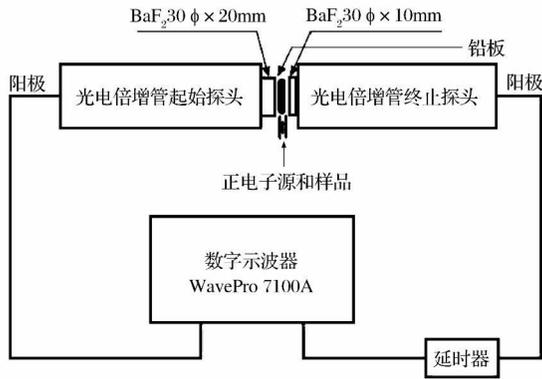


图 2 数字正电子寿命谱仪简图

Figure 2. Schematic diagram of a digital positron lifetime spectrometer (DPLS).

多普勒展宽仪主要是利用正负电子在湮没时电子动量不为零而引起在湮没时两条  $\gamma$  射线的夹角相对  $180^\circ$  产生一定偏移的原理, 如图 3 所示。

其中  $P_L$  为总动量的平行分量, 引起的多普勒能移  $\Delta E = cP_L/2$ , 对偏移量的测量是多普勒展宽仪的基本工作原理, 它反应的是湮没处的电子动量分布。而在缺陷中正电子主要与低动量的价电子湮没, 这是多普勒能谱仪能分辨缺陷化学环境的一个重要应用。多普勒展宽仪的分辨率一般不高, 近年来新发展的双探头符合多普勒展宽仪在降低信噪比方面有较大改进<sup>[9]</sup>, 图 4 是其装置简图。

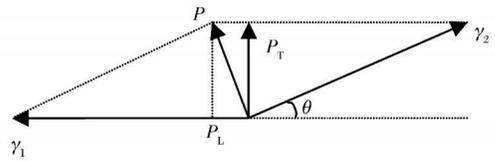


图 3  $2\gamma$  湮没中动量守恒的矢量图

Figure 3. Schematic diagram of the vector distribution abiding to momentum conservation law in the two photon electron positron annihilation process.

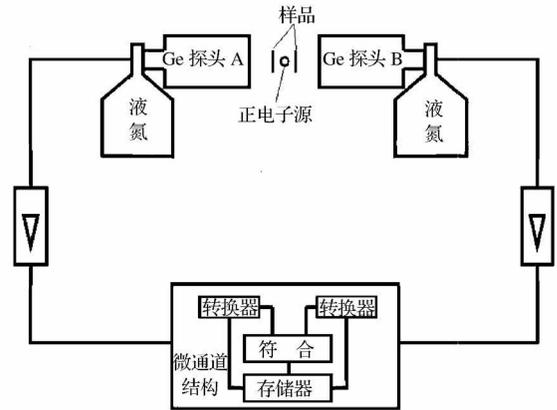


图 4 符合多普勒展宽仪装置简图

Figure 4. Schematic of a coincidence doppler broadening spectrometer (CDBS).

### 2.3 谱的解析

实验中得到的寿命谱  $y(t)$  是理想谱  $N(t)$  和仪器分辨函数  $R(t)$  的卷积:

$$y(t) = R(t) * N(t) + B \quad (6)$$

$B$  表示本底,  $*$  表示卷积。理想寿命谱  $N(t)$  可以表示成各个分寿命成分的指数迭加:

$$N(t) = \sum_i I_i \exp(-\lambda_i t) \quad (7)$$

通过计算机的分析, 利用在捕获模型上建立的解谱程序 PATFIT, 可以得出各个成分的寿命  $\tau_i$  及其相对强度  $I_i$ , 该程序的成功性已得到普遍的认可和应用。近来出现了利用拉普拉斯逆变换技术求缺陷大小分布的 CONTIN 程序<sup>[6]</sup> 以及利用最大熵原理的 MELT 程序——它更可以得到正电子寿命的连续分布<sup>[10]</sup>。

在多普勒展宽谱的解谱中, 鉴于多普勒展宽仪的分辨率相对较差, 我们常用线形参数法来分析多普勒线形展宽谱的变化, 如图 5 所示。

人们常用  $S = A/C$ ,  $W = B/C$  这两个参数来分别表示低动量电子的动量信息和高动量电子的动量信息, 也就是当正电子被缺陷捕获时  $S$  参数将增加, 而  $W$  参数将减小。多普勒展宽谱就是利用这些参

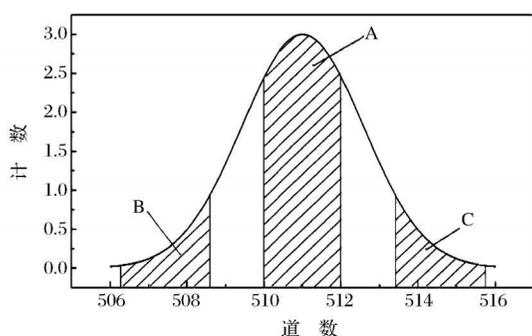


图 5 多普勒展宽谱的线形参数定义示意图

Figure 5. Diagram of the definition of the line shape parameters of a doppler broadened spectrum.

数的变化来反应缺陷的信息,而且当缺陷周围原子不一样时,不同原子的外层电子动量不一样,这样不同缺陷周围环境也可以用湮没光子动量的不同来表示,这使得多普勒展宽技术能提供缺陷周围的化学信息。

### 3 在纳米材料中的应用

目前纳米材料中利用正电子湮没技术研究的热点大部分集中在纳米金属、合金和无机物半导体上,由(2)式可以得出正电子在材料中的热化散射距离在 100 nm 左右,大于纳米晶粒的尺寸,故热化后正电子将大部分被晶界捕获<sup>[11]</sup>。正电子湮没技术在纳米材料中主要研究其晶粒界面结构和界面缺陷的分布。

#### 3.1 在纳米金属中的应用

最早将正电子湮没技术引入纳米材料中的是 Schaefer 等人<sup>[12]</sup>,他们研究的纳米多晶 Fe 的粒径有 6 nm 左右,在纳米材料中正电子寿命分解为三个成分,分别对应点阵空位大小的自由体积,10~15 个空位大小的微孔洞和形成正电子素的大孔洞这三种类型的缺陷,且这三种缺陷都分布在晶界上。随后 Qin 等<sup>[13]</sup>在研究纳米 Ag 的晶粒界面稳定性时,分别讨论了压力和退火对界面缺陷的影响,结果显示  $I_1$  和  $I_2$  随压力和退火温度的增加而不可逆转的减小,说明界面类空位和空位团在力学和热力学上是不稳定的。然而在 Wurschum 的文献<sup>[14]</sup>中用正电子寿命谱对比了电积法制备的纳米 Pb 晶粒和气相合成法或塑性变形制备的纳米 Pb,结果说明纳米金属的结构和热稳定性与合成技术和条件有关。章婷等<sup>[15]</sup>对纳米铜在退火实验中发现纳米粉在压成块后界面缺陷具有良好的热稳定性,在温度升至 900 °C 的高温下退火也不能完全消除。这些文献都

证明了纳米晶粒的界面是存在三种类型的缺陷,并且共同说明界面的稳定性与制备方法和制备条件有关,同时还有人认为界面结构稳定性与晶粒大小有一定的关系。Chattopadhyay 等<sup>[16]</sup>在研究高能球磨下纳米 Nb 的  $bcc \rightarrow fcc$  同素异构转变时发现当纳米 Nb 粒径降至 10 nm 时,晶界和晶粒间结构和性能发生重大改变。相变时晶界原子的重排和电子动量的再分布引起正电子寿命的急剧增加(图 6 所示)和多普勒线形参数的降低(图 7 所示),他们通过体积模量和负等静压模型的计算得出晶粒粒径低于临界尺寸(10 nm)时,晶界在力学和热学上都变得不稳定。

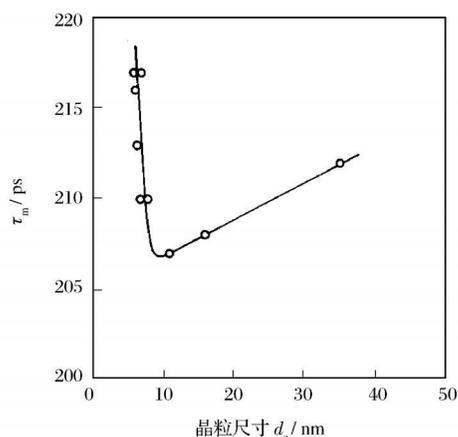


图 6 正电子平均寿命随晶粒尺寸的变化关系  
Figure 6 The variation of the mean positron lifetime ( $\tau_m$ ) as a function of the grain size of nanocrystalline Nb.

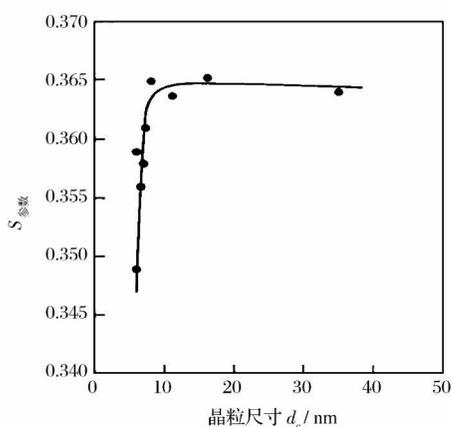


图 7 S 参数随晶粒尺寸的变化关系  
Figure 7 The variation of S parameters with the grain size of nanocrystalline Nb.

表面效应是纳米材料在实际应用中的一个显著特征,正电子湮没技术在研究纳米金属的界面结构组成及其稳定性方面取得一定成效,为将来更进一

步开发纳米材料表面效应的实际用途提供了背景。

### 3.2 在纳米合金中的应用

纳米合金的制备大都通过非晶态合金在不同温度下晶化得到的, 结晶都是形核长大过程, 纳米晶粒在非晶态中形核长大后可能有留下非晶态的组织或形态。利用正电子对缺陷大小和化学环境的敏感性, 可以清楚地了解到纳米合金中界面的形态和化学组成。

在纳米合金中的正电子湮没同纳米金属相似, 都是研究界面上的结构和组成。Wurschum 等<sup>[17]</sup>利用放射性原子示踪法探测纳米晶  $Fe_{90}Zr_{10}$  的晶界结构时, 第一次展示了在纳米合金中存在两种不同的界面: 一种非晶层界面和另一种常规界面。殷俊林等<sup>[18]</sup>在用正电子湮没寿命谱仪分析  $Fe_{73.0}Cu_{1.0}Nb_{1.5}Mo_{2.0}Si_{13.5}B_{9.0}$  纳米晶合金时, 表示该合金纳米晶化后存在两类结构: 一类是非晶结构, 另一类是纳米晶结构。这与上一文献报道吻合, 而且他们认为缺陷在种类上也分为两种: 一种是类空位, 另一种是有 10 个空位大小的空位团。Weigand 等<sup>[19]</sup>在用正电子湮没技术研究  $Pd_{85}Zr_{15}$  纳米晶合金时, 多普勒展宽谱探测到 Zr 元素在晶界发生偏析, 正电子寿命谱结果显示随着退火温度提高一部分纳米孔洞消失了, 在温度升到 1100 K 退火后正电子平均寿命的变化在一定温度下是可逆的(如图 8 所示), 这说明正电子被晶界捕获的变化可逆, 而多普勒展宽谱却得出界面成分没有随温度而变化(如图 9 所示)。

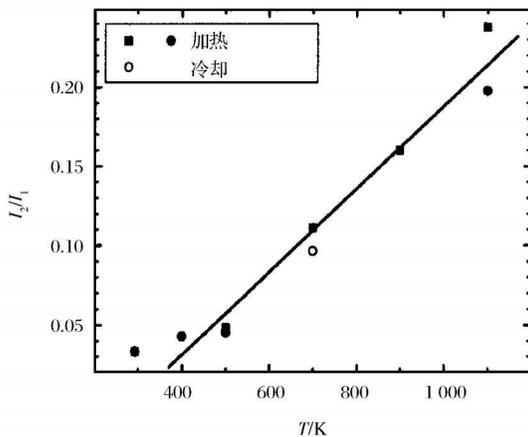


图 8  $I_2/I_1$  在 1100 K 退火 5 d 后随温度的可逆变化  
Figure 8 Reversible change of the intensity ratio ( $I_2/I_1$ ) with temperatures after the specimen annealed at 1100K for 5 days.

Divinski 等<sup>[20]</sup>在研究含 Pb 质量分数为 1% 的 Cu-Pb 合金时, 正电子寿命谱发现空位型缺陷和空

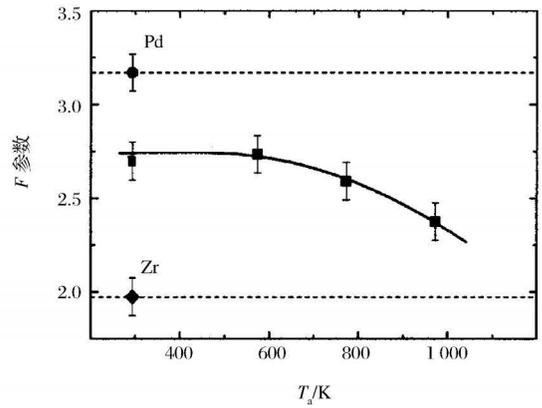


图 9 多普勒展宽 F 参数(湮没光子的高动量部分)在等时退火中的变化

Figure 9 The Change of the F parameters (high momentum portion of an annihilation photon) of the doppler broadened spectrum of n  $Pd_{85}Zr_{15}$  after isochronal annealing.

位团的存在, 由多普勒展宽谱结果表示纳米孔洞在含 Pb 夹杂物附近优先形核。Lechner 等<sup>[21]</sup>通过正电子湮没寿命研究发现在非晶态  $Al_{88}Y_7Fe_5$  中的结构自由体积大部分小于一个点阵空位, 通过多普勒展宽谱研究表明 Y 原子富集在 Al 纳米微晶的生长前端。这些研究都说明了在纳米合金中合金元素会在界面形成偏析, 为界面缺陷的形成和聚集提供平台。

### 3.3 在半导体纳米化合物中的应用

半导体具有许多独特的物理性质, 而且在半导体中微观缺陷对性能的影响比其它材料中微观缺陷的影响更大, 因此更引起人们的注意。正电子湮没技术在半导体缺陷探测中有着诸多重要的应用, 列举以下几篇文献来说明。

Kar 等<sup>[22]</sup>利用正电子作探针去揭示纳米 CdS 晶粒的缺陷特征来研究其量子限域效应。结果观察到正电子寿命随着纳米体系带隙的变宽(在出现有限尺寸效应时)而显著增加; 由于纳米晶界的过度无序, 晶界中没有单空位大小的缺陷, 几乎都是空位团, 多普勒展宽的线形参数也反应了在纳米 CdS 出现有限尺寸效应时电子动量的再分布。他们还研究了正电子寿命与 CdS 纳米棒直径之间的关系, 结果得到他们之间存在明显的定性关系(图 10)。最后证明正电子湮没技术是研究半导体纳米颗粒的成功工具。

Dutta 等<sup>[23]</sup>用机械球磨和退火实验来研究高纯度纳米 ZnO 中缺陷的产生和回复, 正电子寿命成分

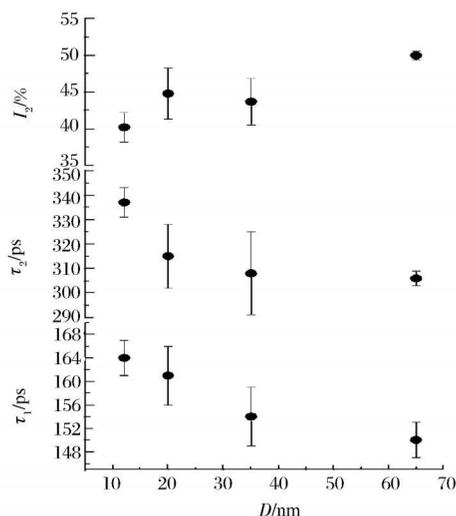


图 10 正电子寿命  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  以及相对强度  $I_2$  与 CdS 纳米棒直径的关系

Figure 10. The positron lifetime  $\tau_1$  and  $\tau_2$  and relative intensity  $I_2$  vs the grain size of the CdS nanorods.

分为三个成分  $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $\tau_3$ 。三寿命中  $\tau_2$  表示缺陷的本质特征。球磨材料在高于 425 °C 退火后晶粒长大了, 正电子平均寿命显著降低, 这表示缺陷尤其是阳离子空位的浓度降低, 而光吸收谱却显示高于 700 °C 退火后缺陷浓度没有降低, 最后得出是氧离子空位造成光学吸收谱的不同, 从而证明阴离子空位不是正电子有效的捕获点。Sharma 等<sup>[24]</sup> 也报道了固态热解法制备纳米 ZnO 的正电子湮没研究结果, 得出正电子寿命和多普勒展宽谱都与晶粒尺寸有相关关系, Zn 空位会随着晶粒长大而迁移至晶界, 而光致发光谱显示了 Zn 空位和 O 空位都出现在 ZnO 中。

Biswas<sup>[25]</sup> 在研究不同温度以及不同浓度  $Mn^{2+}$  掺杂的 ZnS 纳米颗粒, 正电子寿命分为三成分, 随着掺杂浓度的增加,  $I_2$  的增加和湮没电子动量的增加共同证明了  $Mn^{2+}$  团聚和缺陷的重组, 并且通过样品在真空和空气环境中的正电子湮没结果对比证明了部分正电子会湮没在晶粒内部。

正电子湮没技术在纳米半导体材料中取得众多成功的应用, 主要集中在物理基础, 掺杂改性以及微观结构等方面, 但是利用正电子湮没得到的这些基础信息与材料宏观性能间的联系报道相对较少, 这需要人们去进一步开发。

## 4 结语

对于纳米材料的微结构和界面成分的分析在材料科学基础领域以及实际应用中都有重要的意义。

正电子湮没技术对微结构及其组成有着相当的灵敏度, 再加上它的研究对象可以十分广泛, 不仅限于上述三类纳米材料, 使得人们在纳米材料研究中能够利用这一有价值的实验手段来获取想要的信息, 从而为纳米材料的开发应用做出贡献!

## 参考文献

- [1] Gusev A. The effects of the nanocrystalline state in solids [J]. USPEKHI FIZICHESKIKH NAUK, 1998, 168 (1): 55-83.
- [2] Sekino T, Nakajima T, Niihara K. Mechanical and magnetic properties of nickel dispersed alumina based nanocomposite [J]. Materials Letters, 1996, 29(1-3): 165-169.
- [3] Kwok Q S M, Fouchard R C, Turcotte A, et al. Characterization of Aluminum Nanopowder Compositions [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2002, 27(4): 229-240.
- [4] Lambeth D N, Velu E M T, Bellesis G H, et al. Media for 10Gb/in(2) hard disk storage: Issues and status [J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(8): 4496-4501.
- [5] Valentini F, Palleschi G. Nanomaterials and analytical chemistry [J]. Analytical Letters, 2008, 41(4): 479-520.
- [6] 郁伟中. 正电子物理及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-110.
- [7] Brandt W, Paulin R. Positron implantation profile effects in solids [J]. Physical Review B, 1977, 15(5): 2511-2518.
- [8] Li H, Shao Y D, Zhou K, et al. A simplified digital positron lifetime spectrometer based on a fast digital oscilloscope [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2011, 625(1): 29-34.
- [9] Asoka Kumar P, Alatalo M, Ghosh V J, et al. Increased Elemental Specificity of Positron Annihilation Spectra [J]. Physical Review Letters, 1996, 77(10): 2097-2100.
- [10] 陈志权. 正电子湮没技术基本原理 [DB/OL]. <http://www.geocities.jp/chenzq1969/pas.htm>, 2006-9-9.
- [11] Segers D, Petegem S V, Löffler J F, et al. Positron annihilation study of nanocrystalline iron [J]. Nanostructured Materials, 1999, 12(5-8): 1059-1062.
- [12] Schaefer H E, Wurschum R. Structure of nanometer sized polycrystalline iron investigated by positron lifetime spectroscopy [J]. Physical Review B, 1988, 38(14): 9545-9554.
- [13] Qin X Y, Zhu J S, Zhang L D, et al. Formation process of interfaces and microdefects in nanostructured Ag studied by positron lifetime spectroscopy [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 1998, 10(13): 3075-3088.
- [14] Wurschum R, Grub S, Gissibl B, et al. Free volumes and thermal stability of electro deposited nanocrystalline Pb

- [J]. *NanoStructured Materials*, 1997, 9(1-8): 615-618.
- [15] 章婷, 邱诚, 张宏俊, 等. 纳米 Cu 固体材料微结构的正电子湮没研究[J]. *武汉大学学报: 理学版*, 2010, 56(6): 627-631.
- [16] Chattopadhyay P P, Nambissan P M G, Pabi S K, et al. Polymorphic bcc to fcc transformation of nanocrystalline niobium studied by positron annihilation[J]. *Physical Review B*, 2001, 63(5), 054107: 1-7.
- [17] Wurschum R, Michel T, Scharwaechter P, et al. Fe diffusion in Nanocrystalline alloys and the influence of Amorphous Intergranular Layers [J]. *NanoStructured Materials*, 1999, 12(1-4): 555-558.
- [18] 殷俊林, 尤富强, 高国华, 等. 纳米晶合金  $Fe_{73.0}Cu_{1.0}Nb_{1.5}Mo_{2.0}Si_{13.5}B_{9.0}$  中缺陷的正电子湮没寿命谱研究[J]. *热处理*, 2003, 18(4): 8-10.
- [19] Weigand H, Sprengel W, Rower R, et al. Interfacial free volumes and segregation effects in nanocrystalline  $Pd_{85}Zr_{15}$  studied by positron annihilation[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(17): 3370-3372.
- [20] Divinski S V, Ribbe J, Baither D, et al. Nanocrystalline and microscale free volume in ultrafine grained  $Cu-1wt. \%Pb$  alloy deformed by equal channel angular pressing[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(19): 5706-5717.
- [21] Ledner W, Puff W, Wilde G, et al. Vacancy type defects in amorphous and nanocrystalline Al alloys: Variation with preparation route and processing[J]. *Scripta Materialia*, 2010, 62(7): 439-442.
- [22] Kar S, Biswas S, Chaudhuri S, et al. Finite size effects on band structure of CdS nanocrystallites studied by positron annihilation[J]. *Physical Review B*, 2005, 72(7), 075338: 1-7.
- [23] Dutta S, Chattopadhyay S, Jana D, et al. Annealing effect on nanocrystalline ZnO powder studied from positron lifetime and optical absorption spectroscopy[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(11), 114328: 1-6.
- [24] Sharma S K, Pujari P K, Sudarshan K, et al. Positron annihilation studies in ZnO nanoparticles[J]. *Solid State Communications*, 2009, 149(13-14): 550-554.
- [25] Biswas S, Kar S, Chaudhuri S, et al.  $Mn^{2+}$ -induced substitutional structural changes in ZnS nanoparticles as observed from positron annihilation studies[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, 20(23), 235226: 1-10.

## 2011 重庆分析生化展将于 9 月底举办

由中国仪器仪表协会实验室仪器分会、重庆市生物化学与分子生物学会、中国分析测试研究院、重庆市高校技术物资协会主办, 成都风向标科技展览有限公司承办, 四川省分析测试学会、重庆市食品安全促进会支持的“2011 重庆分析测试仪器、生化技术及实验室装备展览会[简称: 2011 重庆分析生化展]”将于 2011 年 9 月 27~29 日在重庆展览中心举办。

据了解, 重庆市生物化学与分子生物学会挂靠第三军医大学, 是链接重庆地区化工、生命科学、制药、食品、农业、生物工程等科技工作者纽带的组织。重庆市高校技术物资协会依托西南大学、重庆理工大学设备处, 对重庆地区高校实验室设备处具有较强影响力。中国仪器仪表协会实验室仪器分会 2011 年年会则确定与展会同期召开。

另一方面, 重庆市作为科教重地相继迎来历史发展机遇。日前《成渝经济区区域规划》也获国务院正式批复, 这是在实施“十二五”规划的开局之年和推进新一轮西部大开发的重要时刻, 依据《规划》, 成渝经济区将建成西部地区重要的经济中心、全国重要的现代产业基地、深化内陆开放的试验区、统筹城乡发展的示范区和长江上游生态安全的保障区, 到 2020 年, 成为我国综合实力最强的区域之一。藉此背景下 2011 重庆分析生化展的筹办, 将为企业、用户、市场搭建科技贸易与技术交流平台。[咨询: 028-84087596]