

慢正电子束技术的应用与发展

韩荣典 叶邦角 翁惠民 周先意 范扬眉 杜江峰

摘要 本文介绍了慢正电子束技术和最新发展,慢正电子束作为探针的基本特性,以及在多种学科中的应用等。

关键词 慢正电子束 表面 缺陷 寿命 S参数 界面

APPLICATION AND DEVELOPMENT OF SLOW POSITRON TECHNIQUE

Han Rongdian¹ Ye Bangjiao¹ Weng Huimin¹

Zhou Xianyi^{1,2} Fan Yangmei¹ Du Jiangfeng¹

(1 Department of Modern Physics, University of
Science and Technology of China, Hefei 230026)

(2 International Material Physics Center, Chinese Academy
of Science, Shenyang 110015)

Abstract A slow positron technique and its development have been described in the paper. The basic characteristics of the slow positron technique and its applications in various subjects have been discussed in detail.

Keywords Slow positron beam, Surface, Defect, Lifetime, Sparameter, Interface

0 引言

21世纪科学的发展将是微观与宏观的相互渗透与密切结合,凝聚态物理、材料科学等的研究,将由现在的宏观统计方法(包括宏观量子统计)深入发展到物质的原子层次物性研究,微观粒子(颗粒、孔隙)的量子效应越来越显示出重要作用,这些研究将对物质科学、信息科学及计算机等学科的发展起到关键作用。

由于上述课题涉及微观体系的多粒子问题,加之材料样品在制备过程中条件复杂,且难于精确控制,造成原子所处环境多变,微结构复杂,使得所研究的问题变得复杂而困难,必须采用多种手段从各不同角度进行观测,再综合分析,才能获得满意的结果。探测微观信息的手段已有不少,例如各种电镜、光学显微镜、卢瑟福背散射、中子衍射、深能级瞬发谱、二次离子谱等,虽然各自给出了许多有价值的结果,但这些方法基本上不能给出原子尺度局域缺陷及微观物相变化的信息,也无法探测表面最外面几层原子的状况,并且多为破坏性测量或造成较大的辐照损伤。慢正电子束技术恰好弥补了这些手段的不足。图1表明了慢正电子谱学与其它方法之间的比较。

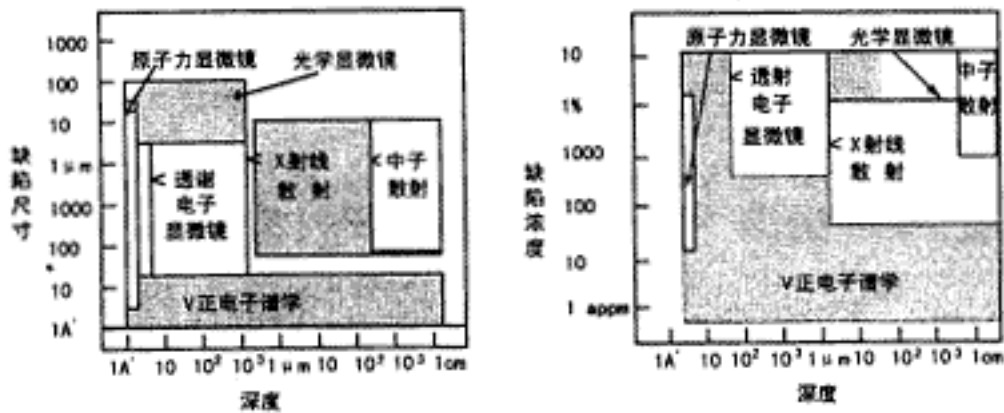


图1 正电子谱学与其他技术在研究材料中缺陷的比较

正电子慢化技术是在1950年Madanski和Rasetti^[1]提出的设想的基础上在1958年被Cherry^[2]在实验上首次实现的,此后,许多科学家在提高慢化效率上取得了进展,七十年代末,Bell实验室的Mills等找到了一种高效的正电子慢化体^[3],正电子慢化技术才获得了突破性进展。目前主要的慢正电子束流装置有两大类:一类是基于放射性同位素的,如²²Na,其束流强度通常很难超过 10^6 e⁺/s;另一类是基于加速器或反应堆的,通常流强可达 $10^7 \sim 10^{10}$ e⁺/s,即所谓的强流慢正电子束。

由于慢正电子束技术对复杂材料的分析有明显的优越性,因此有着十分广泛的应用前景,并不断发展新技术和拓宽应用领域。正电子探针(尤其是慢正电子束流)不但在基础研究中发挥了巨大的作用,同时也在工业方面有着巨大的应用潜力,受到各国工业界的重视。1994年欧洲召开了一次物理学和工业界人士共同参加的正电子技术研讨会,美国、日本等发达国家的科学家和工业界巨头应邀出席了研讨会;同年在召开第十届国际正电子湮没会议(北京)前夕,日本邀请了95位做慢正电子研究工作的科学家和日本工业界人士,日本提供食宿和会场,进行四天自由讨论,可见各发达国家工业界对此课题极为重视。表1给出了欧洲各正电子研究组的技术和应用状况。

表1 欧洲各国的正电子研究组、技术和研究领域

研究机构	负责人	使用的技术	应用领域
Vienna University	V.Groger	B L	m n
TU Graz	H.Sormann	T	f e
Rijksuniversiteit Ghent	D.Segers	B L D	m s
Acad. Of Sci. Sofia	t.Troev	B L A1	m e f
Geneva University	A.A.Manuel	L A2	m s e h i b
PSI Villigen	W.B.Waeber	B A2 R	u
ETH Zurich	J.Brunner	L	l p
Inst. Phys.Materials, Brno	M.Sob	B T	m e l
Charles Univ. Prague	I.Prochazka	B L	m s i
Stuttgart University	H.E.Schaefer	B L	m n k
MPI Metallforschung Stuttgart	H.Stoll	B L H G	m f

Bundeswehr Univ. Munich	W.Triftshauer	B L D A2 M P	m s l e
Bonn University	K.Maier	B L Z	i s l
Fraunhofer Inst. Saarbrucken	J.Schreiber	L	m
Halle University	R.K.Rehberg	L D	m n s k
Res. Center Rossendorf	G.Brauer	B L D	m s p
Ris Nat. Lab	M.Eldrup	B L A1	m n k p
Complutense, Madrid	N.de Diego	B L	m s
UMR-CERS-CEA, Saclay	R.I.Grynszpan	B L	m n l p
INSTN CE Saclay	C.Corbel	B L	m s
CENG/SPMM/MP, Grenoble	P.Moser	B L	m p
Aix-Marseilles Univ.	G.Moya	B L	m
Univ. of East Anglia	P.G.Coleman	S D R M	m s f o
Bristol Univ.	M.A.Alam	B L A2	m s e t k
Royal Holloway Coll. London	P.R.Evans	D B Ps	s l g
Univ.College, London	M.Charlton	L Ps	g f
AEA Technology, Harwell	M.T.Hutchings	B	m
Eotvos Lorand Univ. Budapest	A.Vertes	B L	p e t
Politecnico di Milano	A.Dupasquier	B L A1	m s
Trento Univ.	A.Zecca	B L D R	m s n p h
ENEA, Bologna	M.Biasini	B L A2	m s e
IRI, Delft Univ. of Tech.	A.van Veen	B L D M A2	m s l p e
Coimbra Univ.	A.P.de Lima	B L D	m
Wroclaw Univ.	M.Debowska	B L A1	p e
Acad. Of Sci., Wroclaw	H.Stachowiak	T	e o
Pedagogical Univ., Czestochowa	J.Filipecki	L A1	n p
Inst. Of Nucl. Phys, Cracow	J.Dryzek	B A1	m s
Inst. Fiz., UMCS, Lublin	T.Goworek	L A1	i p
Acad. Of Sci., Moscow	V.P.Shantarovich	L A1	m s p k
Inst. Surface Chem., Kiev	V.P.Andonkin	L A1	e
Helsinki Univ. of Tech.	P.Hautojarvi	B L D	m s l c
Acad. Of Sci., Bratislava	K.Kristiakova	B L G	m n p h
注：			
技 术		应 用	领 域
B:多普勒展宽	M:正电子显微	m:金属中的缺陷	e:电子结构
L:寿命	P:脉冲化寿命	s:半导体中的缺陷	t:相变
D:深度轮廓	Z:极化正电子束	i:绝缘体	g:气体
A1:一维角关联	G:寿命-动量关联	f:基本特性	n:粉末, 纳米, 类晶体

A2:二维角关联	Ps:Ps束	l:多层膜, 涂层	k:陶瓷材料
R:正电子俄谱仪	T:理论	b:磁性	h:高温超导体
H:高能(MeV)正电子	S:表面测量	c:触酶材料	o:表面研究
		p:聚合物和玻璃	u:用户实验室

迄今为止,国际上已经召开了十一届正电子湮没会议(ICPA)和八届慢正电子国际会议(SLOPOS)。慢正电子技术已越来越成熟,在许多研究领域和工业界,慢正电子技术已成为最重要的手段之一,发挥着越来越大的作用。各国科学家利用正电子可产生电子偶素(Ps),与电子可分辨性(大大压低次级电子本底)等特点,研制和发展了各种先进的正电子谱仪,例如正电子俄歇谱仪、高低能正电子衍射、正电子反射(透射或湮没)显微镜、正电子微束($\varphi < 1 \mu\text{m}$)等等。这些技术都有电子相应技术不可比拟的优点,但同时发现,若要完善这些技术必须建立强流正电子束线。因此,各国科学家与一些国家政府大力推进强流正电子束的研究与建设。目前日本有六个实验室(包括二个工业研究所)、美国和德国各有三个实验室已经建立或正在积极研制和建造强流慢正电子束线,此外英、意、瑞士、荷兰、比利时等国也竞相发展强流慢正电子束技术。我国的中国科学技术大学早在1990年就建成了基于同位素源的慢正电子束装置,目前,中国科技大学和北京高能物理研究所也都计划建立基于加速器的强流慢正电子束线。

近年来,慢正电子束技术不断发展创新,应用领域不断扩大,已经成为凝聚态物理学、化学和材料科学研究的主要研究工具。本文主要介绍了慢正电子束技术的最新发展以及在多种学科中的应用。

1 慢正电子束的产生和基本特性

1.1 正电子的特性及基本测量方法

1930年狄拉克在理论上预言了正电子的存在。1932年Anderson^[4]在宇宙射线的云室径迹照片中发现了正电子。1951年Deutsch^[5]测量正电子在气体中的寿命时测到一个长寿命成分,并确定它来自 e^+e^- 束缚态,从而发现电子偶素(Ps)。Ps可处于两种自旋态,即p-Ps态和o-Ps态,p-Ps态的平均寿命为125 ps,衰变成2 光子,而o-Ps态的平均寿命为140 ns,主要以3 模式衰变。正电子在材料中与电子发生湮灭,其寿命为0.1~1000 ns,取决于电子的密度。基于不同的湮灭模式和寿命,有三种基本的探测手段。

第一种就是寿命测量,通常用 ^{22}Na 同位素作正电子源,由于它在发射正电子的同时发出1.28 MeV 光子,通过测量正电子在材料中湮灭所发出的0.511 MeV 光子与1.28 MeV 光子的时间关系,就可获得正电子在材料的寿命谱,通过解寿命谱,就可获得材料内部电子分布信息。实验简图见图2(a)。

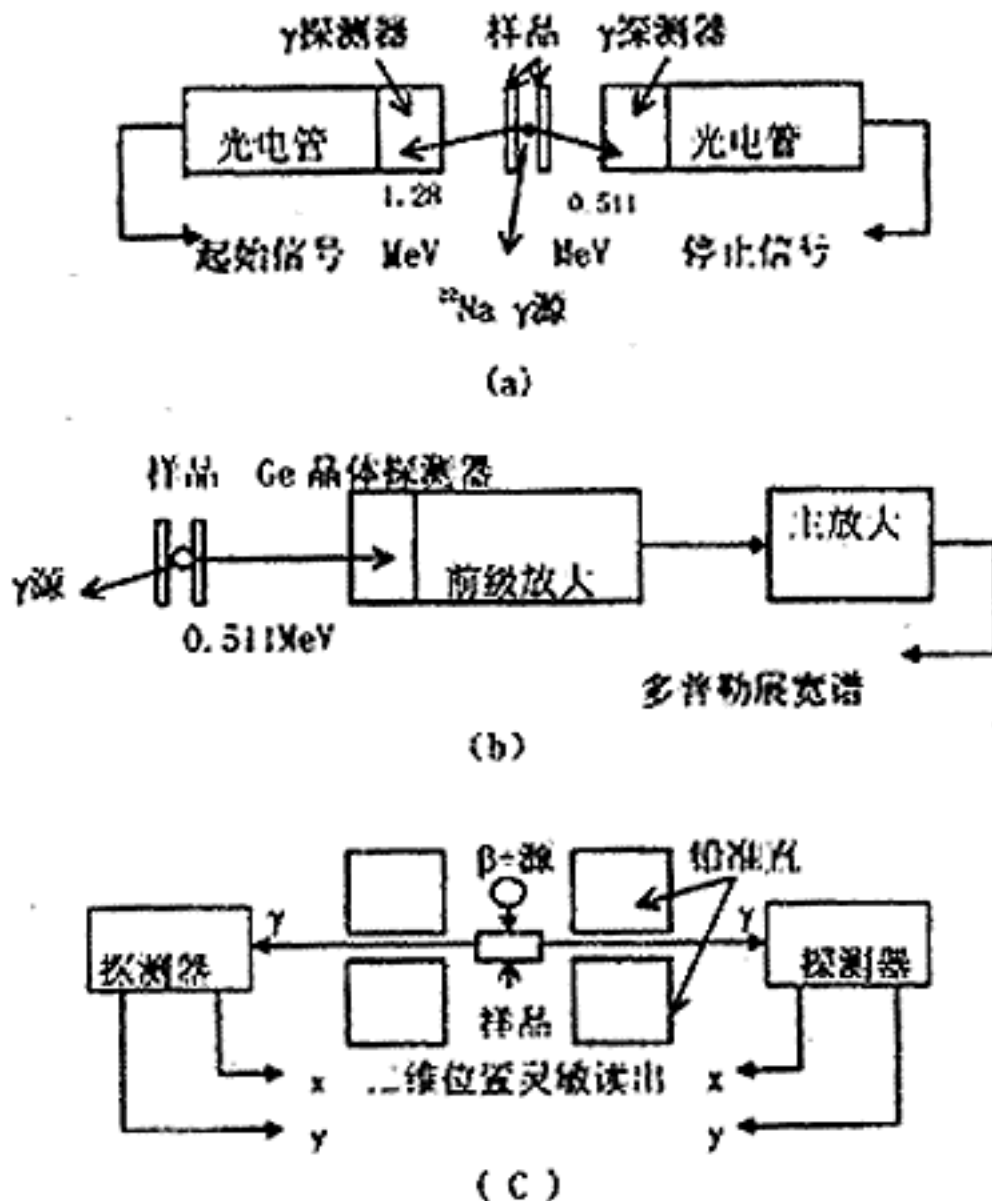


图2 三种基本的实验正电子湮没测量技术

第二种方法就是测量0.511 MeV 光子的多普勒展宽，多普勒展宽所带来的能量加宽 ΔE 为：

$$\Delta E = v_{cm} mc^2 \cos \theta / c \tag{1}$$

这里 v_{cm} 是电子在质心系中的运动速度， θ 是电子运动方向与光子发射方向的夹角。用典型的 v_{cm} 值 10^6 m/s 和 $\theta = 45^\circ$ ，就得到 $\Delta E \approx 1.2 \text{ keV}$ ，使用高分辨的 Ge 探测器可以探测这个展宽。实验简图见图2(b)，由多普勒展宽谱的线型参数，可获得材料内部电子

径向动量分布的信息。

第三种测量方法是测量正负电子湮没所产生的2 光子的角关联，即测量2 发射方向的夹角与180°的偏离

$$\Delta\theta = \pm v_{cm}/c$$

(2)

典型的 值是3 mrad。实验测量简图见图2(C)。由此可研究电子的横向动量分布。

1.2 慢化技术的发展

常用的正电子源有两大类，一类是放射性同位素，另一类是高能电子加速器中的对产生。通常，丰质子核素大都具有 +衰变，但大部分是短寿命的，无法利用。只有少数象

^{22}Na 、 ^{64}Cu 、 ^{58}Co 、 ^{68}Ge 等具有足够长的半衰期的核素才可真正有用。表2列出了主要几种正电子源的基本特性。 ^{22}Na 通常在回旋加速器中用约20 MeV氘轰击Mg靶产生，而 ^{64}Cu 通常用反应堆的热中子与 ^{63}Cu 进行核反应产生，在热中子通量为 $10^{14} \sim 10^{15}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 下，可获得每克天然铜达70 ~ 700 Ci的放射性活度。

表2 常用同位素正电子源的一些基本性质

同位素	+分支比	最大能量(MeV)	半衰期	产生机制
^{22}Na	0.89	0.545	2.6 y	$^{24}\text{Mg}(\text{d}, \gamma)$
^{58}Co	0.15	0.474	71 d	$^{58}\text{Ni}(\text{n}, \text{p})$
^{68}Ge	0.86	1.89	275 d	$^{66}\text{Zn}(\gamma, \text{e}^+)$
^{64}Cu	0.19	0.653	12.6 h	$^{63}\text{Cu}(\text{n}, \text{p})$
^{44}Ti	0.95	1.47	47.3 y	$^{45}\text{Sc}(\text{p}, 2\text{n})$
^{26}Al	0.85	1.17	8×10^5 y	
^{11}C	0.99	0.96	20.3 m	$^{11}\text{B}(\text{p}, \text{n})$
^{81}Rb	0.27	1.05	4.6 h	$^{79}\text{Br}(\text{p}, 2\text{n})$

从放射源出来的正电子的能量通常比较高，如 ^{22}Na ，其最大能量为0.545 MeV。正电子慢化的概念首先是由Madanskii^[1]在1950年提出的，其思想是：把从放射源放出的高能正电子打入某些固体，正电子在固体中热化，若该固体对正电子具有负的功函数，正电子就有可能从固体表面逸出，通常逸出正电子的能量很低，为eV量级，再把这些正电子收集起来，用磁场聚焦和电场加速到所需要的能量，就获得了能量可调的单能慢正电子束。获得慢正电子的关键是选择合适的慢化体，取得较高的慢化效率。Cherry^[2]在1958年在一个铬板表面实现，慢化效率仅为 3×10^{-8} ，由于其论文未正式发表，故没有引起人们的注意。1968年Groce^[6]等人成功地利用LINAC产生了每秒几个慢正电子束流，使用金-云母慢化体，其慢化效率为 10^{-6} ，并用该束首次测量了正电子与氦原子的总散射截面。1972年Canter^[7]等人发现了烟薰MgO慢化体，它的慢化效率为 3×10^{-5} ，情况才发生变化。

通常，正电子的慢化效率取决于正电子在材料中的扩散系数 μ 和寿命 τ ，以及正电子扩散到表面的发射几率 P_{em} ，对最大能量为 E_{max} 的正电子在密度为 ρ 的材料中的慢化效率 ϵ 为：

$$\epsilon \approx (1.7 P_{em} \rho \sqrt{D\tau} / E_{max}^{1.14}) \quad (3)$$

由于正电子在所有固体材料中的寿命差别不大($100 \sim 200$ ps)，因而选择高密度、大的扩散系数和高的发射几率的慢化体可提高慢化效率。

1975年Stein等^[8]发现了具有很窄能量宽度的碳化硼慢化体。1980年Pendyala^[9]发现了碳化金慢化体。Dale等^[10]发现了高效的真空退火钨慢化体，这是至今为止效率较高的，使用最广泛的慢化体。常用的各种常用的慢化体的性能见表3。退火处理的单晶和多晶W是一种理想的慢化体，正电子的能宽为 $E(\text{FWHM})=1.5$ eV。通常用 > 2000 在超高真空下退火，在空气中稳定，可在低真空下工作。1996年Lee等人^[11]使用10 mm厚的钨膜作反射式慢化体，效率为 2×10^{-4} 。至今报道的效率最高的钨单晶是Vehanen等人^[12]用W(100)单晶加氧化处理，获得了的慢化效率达 3.2×10^{-3} 。另外一种能有希望成为较好慢化材料的是SiC^[13]，由于它具有较高的负功函数，且表面对污染不太灵敏，故既不需要超高真空，也不需要小心退火，慢化效率可达 1.5×10^{-3} 。

表3 主要的慢化体及其基本性质

慢化体	负功函数(eV)	慢化效率	材料形态	使用状况
MgO	1 ~ 2	3×10^{-5}	多晶、粉末	第一种有效慢化体
Cu(111)	0.6	1×10^{-3}	单晶	U.H.V.慢化体
B	0.1	1×10^{-3}	多晶	非U.H.V.慢化体
W(110)	3.0	3×10^{-3}	单晶	
W	2	2×10^{-4}	多晶退火	最有效的非UHV慢化体

Ne	?	7×10^{-3}	5 K固态Ne	最有效的慢化体
----	---	--------------------	---------	---------

1986年Gullikson和Mills^[14]提出了一些固态惰性气体(如Ne、Ar、Kr和Xe等)具有很高的“热”正电子产额。即在金属表面上放置正电子源,在真空下冷却至几K,通以低气压惰性气体,这样就在正电子源表面形成惰性气体固体。他们用²²Na源测量了Ne的慢化效率,发现达 7×10^{-3} 。1995年美国的D.Vasumathi等人^[15]使用Kr在一高亮度束流中作为慢化体,对²²Na正电子源具有高达的 4×10^{-4} 慢化效率,并具有很窄的纵向能量展宽,为 2.5 ± 0.1 eV。

除了寻找各种高效的慢化材料外,许多研究者还提出用加电场的方法来提高慢化效率,即在绝缘体和半导体的表面上加上电场把正电子拉向表面,会使到达表面的正电子数量增加。1979年Lynn等人^[16]就提出了这个想法。1987年Beling^[17]等讨论了使用外延金属半导体NiSi/Si(111)的作为场加强慢化体的可能性。有可能SiC是一种理想的场加强型慢化体。1997年日本筑波的Suzuki等人^[18]用高电压(5~10 kV)加到慢化体中来抽取正电子的方法来提高正电子的产额,预计比原有方法可提高一个数量级。

此外,采用不同的慢化体放置几何也相当重要。图3是三种主要的慢化体放置几何:背散射式(a)、透射式(b)、两者的组合式(c)、惰性气体固体式(d)和自慢化式(e)。第一种背散射式是正电子从慢化体的同一侧入射和出射,慢化效率较高,但源由于处在正电子的出射路径上,故挡住了一部分慢正电子。第二种透射式效率高,但要求慢化体较薄,慢化体膜的缺陷会影响正电子重发射。第三种是百叶窗式结构,效率高,制作容易,已得到普遍使用。第四种是惰性气体慢化体,惰性气体冷凝在源上,效率高,但必须要处于几K的低温,制作较难。第五种是源与慢化体一体化,如⁶⁴Cu,既是源又是慢化体,要求源材料必须可制成薄膜。

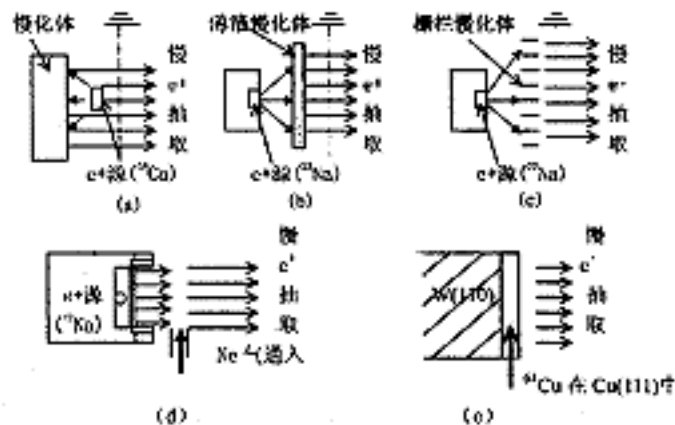


图3 五种主要的慢化体放置方式。(a) ^{58}Co 源使用的背散射式；(b) ^{22}Na 源使用的透射式；(c) ^{22}Na 源使用的百叶窗式慢化体；(d)惰性气体固体式；(e)自慢化式

1.3 慢正电子束的产生和发展

按产生慢正电子束流的方式来分，主要有基于放射性同位素的、基于各种能量的加速器的和基于反应堆的三大类。

基于放射性同位素的慢正电子束流强度由于受到源强等的限制，一般都很难超过 $10^6\text{e}^+/\text{s}$ 。中国科学技术大学近代物理系已于1990年建成了我国第一台慢正电子束装置^[19]， $^+$ 源采用20 m Ci的 ^{22}Na 源，慢化体采用超高真空退火的钨箔，用百叶窗式放置，经抽取电压获得慢正电子束，强度约为 $10^5\text{e}^+/\text{s}$ ，可调节的能量为0~25 keV。1995年香港大学也建成了一台慢正电子装置^[20]。1998年北京的高能物理研究所也成功地建立了一台慢正电子束装置^[21]。

通常，实验室基于放射源的慢正电子束流的流强一般不超过 $5 \times 10^6\text{e}^+/\text{s}$ ，这是由于受到源强(屏蔽问题)， $^+$ 源的自吸收和低的慢化效率限制。例如， ^{22}Na 由于有较大的 $^+$ 分支比和较长的半衰期，使用较为普遍。但由于较严重的自吸收，通常源强不超过500 m Ci。

真正在实验上大幅度提高正电子束流强度的是基于电子加速器。1982年美国Lawrence Livermore National Laboratory的Howell^[22]等人在120 MeV电子直线加速器上建立了一台流慢正电子束装置。120 MeV的电子轰击1.2 cm厚的钽转换体，产生韧致辐射，再由该辐射产生 e^-e^+ 电子对，从而得到 e^+ 束，经由退火后的钨慢化体制成的百叶窗式慢化后，得到强度约为 $9 \times 10^8\text{e}^+/\text{s}$ 慢正电子束流，最大慢化效率为 1.5×10^{-6} 。

1990年日本筑波的国立无机材料研究所建成了一条基于Linac的强流慢正电子束装置^[23]，加速器的电子能量为75 MeV，他们采用钽作电子韧致辐射的转换体，用25 μm 厚的W在2500 退火温度后作慢化体，获得了在 e^- 平均流强为4 μA 下的正电子强度约为 $1 \times 10^7\text{e}^+/\text{s}$ 。1993年比利时的Gent大学建立了一台基于300 Hz脉冲长度为3 μm 的Linac的准连续慢正电子束流^[24]，典型的束流强度是 $4 \times 10^7\text{e}^+/\text{s}$ 。1995年日本东京的Gakugei大学建立了一台类似的正电子束流^[25]，使用的电子能量是100 MeV，强度为 $3 \times 10^7\text{e}^+/\text{s}$ 。1997年美国Oak Ridge国立实验室的J.Xu等人用随时间变化的势加到100 nm厚的Mo重慢化体上，使之背向发射的正电子比正向发射的正电子获得更大的加速度。他们获得了脉冲宽度为15 ns的流强为 $3.9 \times 10^{11}\text{e}^+/\text{s}$ 的慢正电子束流^[26]。

除了基于Linac来建立慢正电子束流装置外，人们还建立了基于小型回旋加速器的强流慢正电子束装置。1995年日本的两家单位利用小型回旋加速器建立了强流慢正电子束装置。日本住友重工业公司的Hirose^[27]和理化所(RIKEN)的Itoh^[28]分别利用小回旋加速器产生的10和18 MeV的质子由 $^{27}\text{Al}(\text{p},\text{n})^{27}\text{Si}$ 产生 $^+$ 放射性同位素 ^{27}Si ，该反应的阈能是5.8 MeV， ^{27}Si 的半衰期只有4.1 s，分支比是100%， $^+$ 的最大能量是3.85 MeV。Hirose发现透射型Al比反射型Al更好，对质子束流从10 μA 增加到1 mA，他们估计可获得的正电子流强分别从 $4 \times 10^7\text{e}^+/\text{s}$ 增加到 $4 \times 10^9\text{e}^+/\text{s}$ 。1997年建成后，他们测量了质子束流为30 μA 下的实际慢正电子流强为 $2 \times 10^6\text{e}^+/\text{s}$ ^[29]。1997年日本的T.Kumita^[30]等人用 ^{27}Si 同位素建立了一台束流强度为 $5 \times 10^5\text{e}^+/\text{s}$ 的极化正电子束。 ^{27}Si 由回旋加速器中18 MeV的质子轰击Al产生，即 $^{27}\text{Al}(\text{p},\text{n})^{27}\text{Si}$ 反应，平均极化率约为38%。

基于反应堆的慢正电子束流装置的建立基于两种方法：一是用热中子活化法得到

短寿命放射性同位素,如 ^{64}Cu ;另一种是利用 ^{113}Cd 的热中子俘获产生的 γ 射线,再由射线的对产生获得正电子。Van Veen^[31]等人用第一种方法建立了一台束流强度达 $2 \times 10^8/\text{s}$ 慢正电子束流装置,他们使用的反应堆热中子通量为 $8 \times 10^{12}/\text{s}/\text{cm}^2$,圆柱型铜的表面积达 1000 cm^2 。Triftshauer^[32]等人用第二种方法建立了一台束流强度达 $10^9\text{e}^+/\text{s}$ 慢正电子束流装置,反应堆热中子通量为 $3 \times 10^{12}/\text{s}/\text{cm}^2$ 。他们使用1 mm厚的圆柱形Cd来产生韧致辐射,Cd的表面积为 225 cm^2 ,用在2800 K下在超高真空室中退火的 $25 \mu\text{m}$ 的钨箔既作为对产生的转化体又同时作为慢化体。在法国的Grenoble,用同样的方法获得了更强的束流。许多人还建议由反应堆辐照产生短寿命的同位素 ^{18}F 来获得慢正电子束^[33~35]。

1993年DESY的K.Flottmann建议用同步辐射来进行对产生,可获得强度 $4 \times 10^{14}\text{e}^+/\text{s}$ 的正电子束,慢化后可获得 $10^{10-12}\text{e}^+/\text{s}$ 慢正电子束^[36]。1996年G.Barbiellini利用CERN的LEP2中由85 GeV电子产生的同步辐射 γ 束,来获得极高的正电子流强,对1~2 MeV正电子能量,流强达 $10^{13}\text{e}^+/\text{s}/\text{MeV}$,当正电子能量在2~18 MeV区间时,束流强度略小于 $10^{13}\text{e}^+/\text{s}/\text{MeV}$,正电子能量大于18 MeV时,束流强度单调减少^[37]。

此外,许多研究者还使用放射性束装置来产生慢正电子束流^[38~41]。基于各种加速器和反应堆产生的慢正电子束流的主要特性比较见表4。

表4 各种不同的源产生的慢正电子束的性能比较

源	产生方式	流强(e^+/s)	基本特征
同位素+源(如 ^{22}Na)	+衰变	$< 10^6$	小型、便宜、流强低,大多是连续束
长寿命放射性束(RI)	+衰变	$10^4 \sim 10^6$	小型、便宜、流强低,连续束
直线加速器(Linac)	对产生	$10^6 \sim 10^9$	体积大、价格贵,流强高,脉冲束
小型回旋加速器	+衰变	$10^7 \sim 10^9$	小型、便宜、流强高,连续束
同步辐射光	对产生	$10^{10} \sim 10^{13}$	体积大、价格贵,流强很高,脉冲束
反应堆	+衰变	$10^7 \sim 10^9$	体积较大、价格贵,流强高,连续束

到1982年,世界上才建成了两台慢正电子束装置。到1985年,全世界的慢正电子束装置就达20台。此后,各发达国家仍不断建造强度更强的慢正电子束装置。到90年代中期,全世界的慢正电子束装置已达50多台,日本就达6台之多。表5给出了世界上最主要的几家已建、正在建设或计划建造的强流慢正电子束线。

表5 世界主要的一些慢正电子束流装置

单位	类型	束流强度	状况	参考文献
日本KEK	Linac(2 GeV)	$-4 \times 10^6\text{e}^+/\text{s}$	已建	[42]
日本筑波无机材料所	Linac(75 MeV)	$-10^7\text{e}^+/\text{s}$	已建	[23]
日本京都大学	Linac	$-10^8\text{e}^+/\text{s}$	已建	
日本大阪大学	Linac	$-5 \times 10^8\text{e}^+/\text{s}$	已建	
日本东京Gakugei大学	Linac	$-5 \times 10^6\text{e}^+/\text{s}$	已建	[43]

日本三菱公司	Linac	$-10^6 e^+/s$	已建	
日本理化所(RIKEN)	Cyclotron(^{11}C)	$-10^6 e^+/s$	已建	[28]
日本住友公司	Cyclotron(^{27}Si)	$-2 \times 10^6 e^+/s$	已建	[29]
美国BNL	Reactor(^{64}Cu)	$-10^7 e^+/s$	已建	
美国LLNL	Linac	$-10^8 e^+/s$	已建	
美国ORNL	Linac	$-4 \times 10^{11} e^+/s$	已建	[26]
美国LLNL	$^{22}Na(100 \text{ mCi}, 3 \text{ MV})$	$-6 \times 10^5 e^+/s$	已建	[108]
瑞士PSI	Linac	$-10^{11} e^+/s$	已建	[44]
瑞士PSI	$^{58}Co(500 \text{ mCi}, 60 \text{ kV})$	$-10^7 e^+/s$	已建	[45]
瑞士IRI	Reactor(^{64}Cu)	$-10^8 e^+/s$	已建	[31]
德国UBM	Reactor(^{114}Cd)	$-2 \times 10^8 e^+/s$	已建	[32]
欧洲CERN(LEP2)	Synchrotron radiation	$-10^{13} e^+/s/MeV$	已建	[37]
美国MHC	$^{58}Co(1 \text{ Ci}), ^{22}Na(170 \text{ mCi})$	$-5 \times 10^6 e^+/s$	已建	[46]
比利时Gent大学	Linac	$-4 \times 10^7 e^+/s$	已建	[47]
中国科学技术大学	$^{22}Na(20 \text{ mCi})$	$-10^5 e^+/s$	已建	[19]
中国科学技术大学	Linac(200 MeV)	$-10^9 e^+/s$	计划中	
日本JAERI正电子工厂	Linac	$-10^{11} e^+/s$	计划中	
美国ORNL	Reactor (^{79}Kr)	$-10^{11} e^+/s$	计划中	
瑞士PSI	Cyclotron (^{19}F)	$-10^{11} e^+/s$	计划中	
ILL	Reactor (n,) e^+	$-10^{11} e^+/s$	计划中	
INEL	Reactor(^{58}Co)	$-10^{11} e^+/s$	计划中	

1.4 亮度增强技术

慢正电子束最主要的参数是 ϵ 、慢 e^+ 转换效率，束流直径 d 和角度歧离 θ_d 。这些参数组合可给出束流的归一化每伏亮度 r_v ，

$$r_v = \epsilon / 4d^2 \theta_d^2 E$$

(4)

利用 $\theta_d = (E_T/E)^{1/2}$ ，这儿 E_T 是横向动能，有：

$$r_v = \epsilon / 4d^2 E_T$$

(5)

1980年Mills^[48]首先提出了所谓的亮度增强技术。正电子束亮度增强实验示意图见图4所示。1985年Frieze^[39]等人成功地用静电场聚焦束流两次和二次慢化,使得亮度增加100倍,该系统已经应用于做低能正电子衍射研究。1986年Canter^[49]等人获得了亮度增强约500倍的系统,他们的束斑只有0.2 mm²的面积。他们计划进一步获得亮度增强达25000倍的系统。1995年美国的D.Vasumathi等人^[50]建立了一个亮度增强装置,从²²Na正电子源发射的正电子首先用W(100)慢化,二级慢化采用Ni(100),获得了亮度增强约500倍的束流,微束的直径仅为3 μm。此后他们改用Kr作为第一级慢化体,获得了很窄的纵向能量展宽。1995年Zecca^[51]等人建立了一套微束装置,其束斑的半高宽小于15 μm,亮度增强达25000倍。

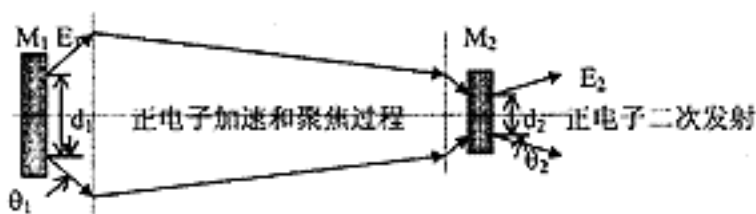


图4 正电子亮度增强实验示意图

1.4 慢正电子束的基本特性

慢正电子束技术的建立给正电子研究领域带来了一场革命,为研究固体和表面、界面,获得正电子偶素,测量低能散射截面等提供了极好的手段。慢正电子束测量技术有如下特点:

(1)对缺陷及原子尺度的微结构变化极为灵敏;(2)无损探测,可用于某些研究及生产过程的在线观测(控制);(3)可探测真实表面(几个原子层)的物理化学信息(多数其它技术实际上测的是表层即多原子层的信息,而不是真正意义上的表面信息。);(4)探测物体内部局域电子密度及动量分布;(5)正电子是电子的反粒子,容易与电子分辨,又可形成电子偶素(Ps),用正电子探针可以获得电子探针无法得到的更多的物理信息,在许多实验中可大大降低电子本底;(6)慢正电子技术具有能量可调性,因而可获得缺陷或结构不均匀性沿样品深度的分布,加之正电子具有分辨不同原子密度区域的能力。

此外,慢正电子技术还具有许多新的优点,如将正电子用可控的方式在某一处热化并传输到另一处,使用的样品具有很小的总质量,可以研究非常薄的样品及由稀薄气体组成的样品等。

2 慢正电子束技术在多种学科中的应用

2.1 缺陷研究

固体表面和近表面的物质结构状况,往往决定着许多物理与化学性质。在样品(或材料)制备过程中会产生一些缺陷或引进一些不希望的杂质。同时为了达到某种应用的目的,用离子束、电子束、激光束或其它方法对表面进行处理,改变表面的组分与结构或人为地引进缺陷。半导体,尤其是在复合半导体中,本征缺陷浓度超出了驻留杂质浓度的1~2个数量级。此外,器件生产过程,如低温下注入或外延掺杂也会产生大

量缺陷。

单能慢正电子在能量范围为0 ~ 30 keV范围注入固体材料中，其注入轮廓可用高斯函数的导数表示：

$$P(x) = -\frac{d}{dx} \exp[-(x/x_0)^2] \quad (6)$$

平均注入深度为：

$$\bar{x} = \frac{a}{\rho} E^n, \quad (7)$$

其中E为正电子能量，单位为keV； ρ 为材料的密度，单位为g/cm³；a是常数，若x的单位用Å，则a约为360 ~ 400，n一般为1.4 ~ 1.6，平均注入深度随能量变化大约从1 nm到几个μm。因而单能正电子束可以分层探测表面层或近表面层的缺陷信息。

在金属和半导体材料中，正电子被空位型缺陷捕获后发生湮灭。捕获系数μ是与缺陷有关的一个重要物理量，

$$\mu = 4\pi r_d D_+ \quad (8)$$

式中r_d是捕获半径，D₊是正电子在材料中的扩散系数，与温度有关，在金属中，Bergersen得到 [52]：

$$D_+ = D_0 \left(\frac{300K}{T} \right)^{1/2} \quad (9)$$

正电子在金属材料中被空位型缺陷捕获而湮灭，其寿命强烈地依赖于空位团的几何尺寸 [53]。M.Puska等人计算了在Al和Fe正电子寿命随空位团尺寸的变化 [54]，见图5。

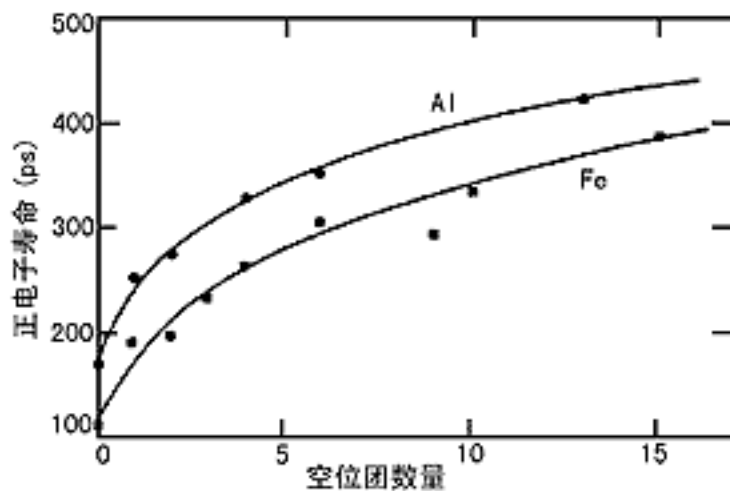


图5 在金属Al和Fe中的正电子寿命与空位团的大小的关系

用慢正电子束测量半导体缺陷有两大优点：(1)对空位有独特的灵敏度使之可以直接鉴别；(2)不受材料的掺杂与导电性的影响。半导体的缺陷类型可用S参数 S_d/S_b 的比例来鉴别，如对GaAs，单空位、双空位、空位团的 S_d/S_b 值分别为1.02 ~ 1.03、1.03 ~ 1.04和 > 1.5。

作为一个例子，我们测量了 P^+ 离子与 P_2^+ 分子注入Si后形成的缺陷。图6(a)是 P_2^+ 离子注入Si(100)样品所形成的缺陷在不同的 e^+ 能量下随退火温度变化的曲线^[55]，表明以单空位为主。图6(b)是 P_2^+ 和 P^+ 注入后未退火样品的S随 e^+ 能量的变化，S为注入样品与参考样品的S参数差，表明以双空位和空位团居多。当退火温度从450 升高到750 时，双空位和空位团离解释放出单空位，因而缺陷增多。随退火温度的继续升高，缺陷逐渐恢复。实验结果与蒙特卡洛模拟结果完全符合。

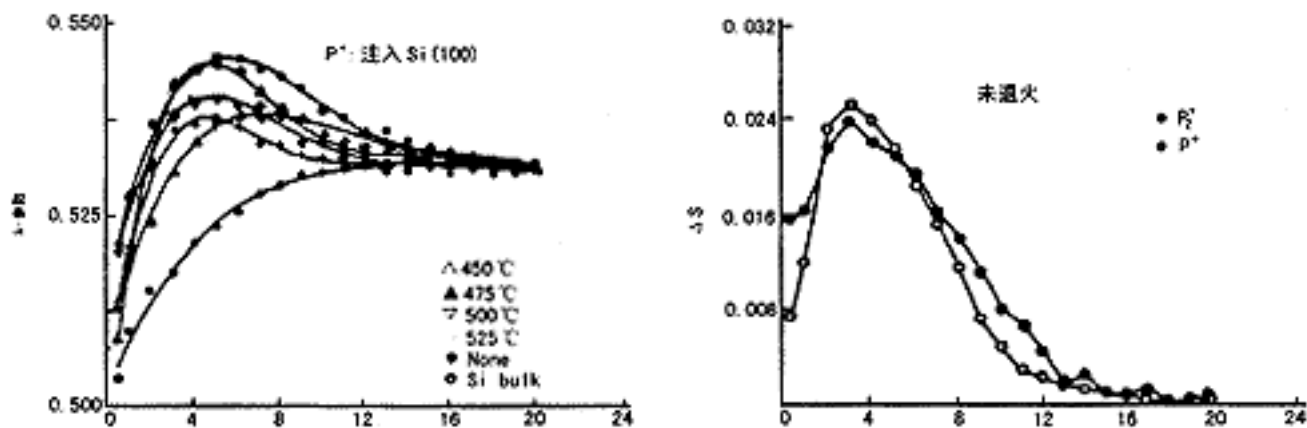


图6 是 P^+ 离子和 P_2^+ 分子注入Si形成的缺陷在不同的 e^+ 能量下随退火温度变化的曲线。

(a) P_2^+ 分子注入Si;(b) P^- 和 P_2^+ 注入Si

我们利用低能正电子束系统测量脉冲激光沉积法、磁控溅射法和多源共蒸法制备的高温超导体外延薄膜 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 的低能正电子寿命谱^[56]。结果表明，除块材中普遍存在的正电子浅捕获中心外，还大量含有块材中缺乏的正电子深捕获中心，并且其尺度随温度的降低而增大。脉冲激光沉积法制备高温超导体外延薄膜 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 的正电子寿命和沉积条件(衬底温度及空气分压)的关系研究表明：这种深捕获缺陷的种类与沉积条件无关。而缺陷浓度随衬底温度的降低及空气分压增高而增加。

最近，荷兰的A.van Veen等人^[57]发展了一套多普勒展宽技术中的两参数分析方法来研究金属中的缺陷，即用S和W参数的二维图表示缺陷。他们S参数的选择是在511 keV中心能宽1.65 keV，W参数的左右能量窗翼分别为(504.7, 508.7)和(513.3, 517.3)。这样一来无缺陷Si的(S, W)位置是(0.53, 0.032)，空位型缺陷Si的(S, W)位置是(0.66, 0.028)。他们用多普勒展宽技术测量了单晶Al的温度从300 K加热到870 K的(S, W)参数，见图7，当温度从450 K~730 K变化时，(S, W)是线性的，表明仅仅存在一种类型的缺陷(即单空位缺陷)，从730 K再增加，(S, W)曲线发生变化，说明另一种缺陷即双空位缺陷开始出现，而单用S参数却无法发现这第二种缺陷。

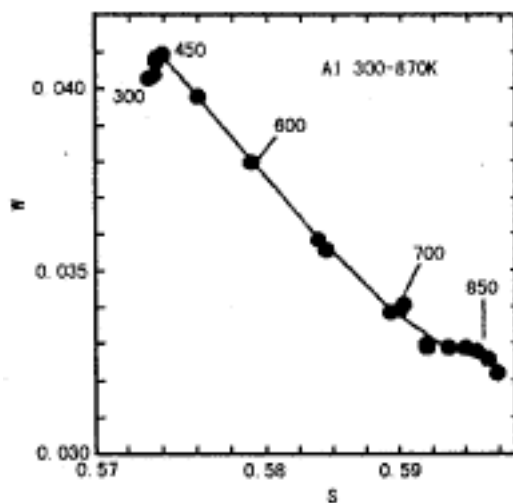


图7 单晶Al的温度从300 K加热到870 K的(S, W)参数

2.2 微结构研究

凝聚态物理, 材料科学的深入研究已经涉及到原子层次的微结构问题, 包括电子结构和费米面形貌。工业界的生产也急需微结构与物性相关的知识, 如微结构对大规模集成芯片的影响。量子点特性, 表面界面微结构的变化; 固体浅表面界面, 离子注入区, 各种应变层等非均匀结构系统和微结构变化, 包括缺陷的种类、浓度、大小; 空洞的成长、成团、迁移和离解; 位错的结构和密度等。用俄歇电子能谱、透射电镜、卢瑟福背散射等测试手段都已成熟, 但慢正电子束技术对缺陷灵敏性及无损检验等特性具有独到之处。

在半导体Si和SiGe的外延生长中, A.H.Reader [58] 用慢正电子技术测量了Si的MBE和APCVD方法形成边缘层的不同深度处的缺陷的浓度, 表明采用不同的外延方法, 缺陷浓度的变化从 $10^{16}/\text{cm}^3 \sim 10^{18}/\text{cm}^3$ 。

我们用慢正电子束研究了金属玻璃的晶化过程, 测量了金属玻璃 $\text{Pd}_{79.5}\text{Ni}_4\text{Si}_{16.5}$ 淬火热态, 结构弛豫和结晶化态样品的S参数, 结果发现, 淬火热态金属玻璃中存在大量的空位型缺陷, 结构弛豫态样品与晶化样品在结构上的差别主要在表面或近表面区域, 因而其结晶化过程最先开始于表面层 [59]。

对半导体P型Si(100)用 As^+ 以不同角度注入产生的缺陷, 我们用慢正电子束技术测量了不同角度注入下形成的缺陷浓度, 以 15° 小角度注入所产生的缺陷浓度比 60° 注入时大5倍左右, 两种浓度类型也不同, 前者以点缺陷为主, 后者以多空位团簇为主。对于以 15° 角注入样品所产生的缺陷, 用快速热退火可以很好地消除, 使其微结构接近于完整的晶格 [60]。

2.3 异质结构膜、表面及界面

在材料科学和电子工程中, 异质结构膜、表面及界面的性质有着重要的作用。慢正电子束是一个理想的研究各种膜与界面的微结构的技术。对多层膜, 两相之间的固体反应强烈地依赖于每层的空位型缺陷。最近Oshima [61] 用慢正电子束研究了Hf-Ni多层膜中非晶化现象, 发现Hf层中的高浓度空位型缺陷引起强烈的Ni原子的块扩散, 这促进了固态非晶化。M.Tashiro [62] 等用慢正电子束研究了Fe/Hf和Ni/Hf的多层膜, 他们发现对Hf/Ni和Ni/Hf两种膜, S参数在 $0 \sim 7 \text{ keV}$ 范围存在着显著的差异, 这个差别束缚了正电子在第一层的湮没。

我们用慢正电子束测量了不同膜厚、不同退火条件下Al/GaAs的S参数 [63]。用所得解析式拟合实验数据, 发现Al/GaAs界面系统与线型全吸收型面模型符合得很好, 通过拟合得出了界面S参数及其与膜厚和退火温度的关系, 由此在一定程度上揭示了界面微结构及其动力学特性, 部分结果与X射线衍射取得了一致。此外, 我们与香港大学合作测量了Au/GaAs(Si)、Ni/GaAs(Si)和W/GaAs(Si)界面的S参数 [64], 发现界面行为依赖于注入轮廓, 对Au/GaAs和W/GaAs需要用三层PAEI模型拟合, 而Ni/GaAs的界面变窄。

美国的P.A.Kumar [65] 研究了 SiO_2 -Si界面的行为, S参数随能量的关系曲线清楚地表明表面、氧化层、界面和基底Si的区别, 见图8; SiO_2 -Si界面的S参数对界面的钝化态非常敏感, 正电子非常容易被界面捕获中心捕获, 因而界面的S参数非常小。

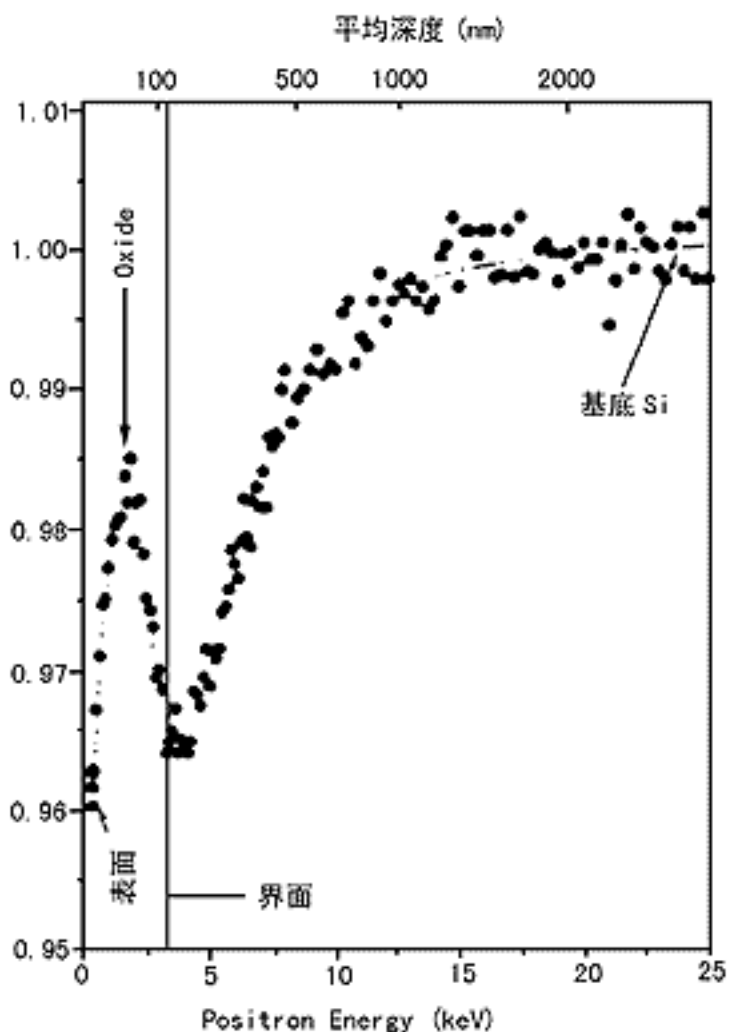


图8 SiO_2 -Si材料的表面、氧化层、界面和基底的S参数

Vehanen等人^[66]研究了在玻璃基底上的 Al_2O_3 、ZnS和 Al_2O_3 的三明治型的多层膜的S参数，如图9，他们用 $m=2$ 的高斯型注入轮廓来拟合实验数据，得到了很好的结果。并得到了各层的S参数，如表面 $S=0.415$ ，在 Al_2O_3 中 $S=0.398$ ，在ZnS中 $S=0.430$ ，在玻璃基底上 $S=0.416$ 。该结果的重要性在于说明高斯型注入轮廓应用于多层膜不会带来明显的密度改变

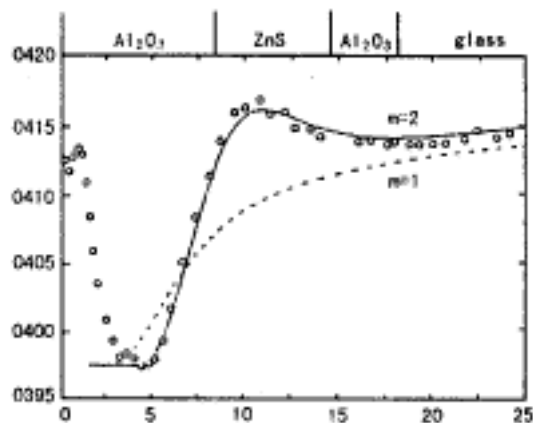


图9 玻璃基底上的 Al_2O_3 、ZnS和 Al_2O_3 的三明治型的多层膜的S参数

我们用慢正电子多普勒展宽技术研究了一组Co/Ti/Si多层膜，Co/Ti/Si是在p型Si(100)晶片上由离子溅射的方法蒸上一层20 nm的Ti，再蒸上36 nm的Co，测量了在不同退火温度下(550 ~ 900)的S参数，见图10(a)(b)。由图可知S参数对薄膜形成和晶体特性很灵敏。用三层膜模型拟合S-E数据，表明由三元反应形成的外延 CoSi_2 是单晶，且Si和 CoSi_2 之间的晶格匹配十分好。而由Co与Si直接反应生成的是多晶，并且在介面上具有较高的缺陷浓度 [67]。

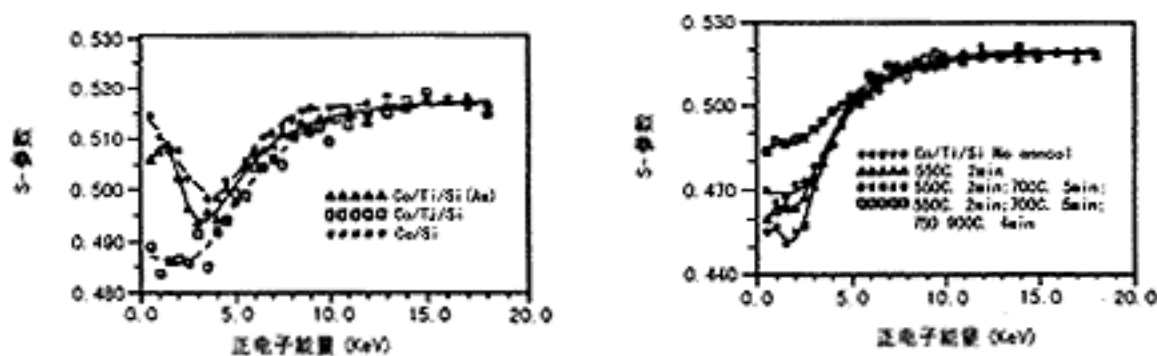


图10 不同多层膜样品的S参数。(a)Co/Ti/Si, Co/Ti/Si(As)和Co/Si样品的S参数；(b)Co/Ti/Ni样品在不同的退火温度下的S参数

2.4 材料科学

除了半导体和超导体材料上的大量实验研究外，用慢正电子束在其他学科，如在纳米材料、多孔材料、聚合物材料和反应堆结构材料等领域也有广泛应用。

纳米材料以其独特的物理性能，受到广泛的重视。我们用多普勒展宽技术研究了由 Xe^+ 离子束注入增强型沉积的纳米TiN薄膜，发现存在两种缺陷：一种来自于TiN薄膜的界面，另一种则是纳米空位，它们的浓度与尺寸强烈地依赖于注入 Xe^+ 离子的能量与剂量 [68]。

我们测量了Fe-25Cr-40Ni合金的高温氧化过程，发现活性元素在氧化过程中起着重要的作用 [69]。当Y(镱)和Ce(铈)含量达到0.01 ~ 1 wt%时，对合金的氧化层生长很灵

敏；当含量大于0.05 wt%时，氧化层生长率减少至1/2到1/3，且Y比Ce对阻止氧化更有效。这是由于含Ce合金的空位型缺陷浓度较低，且阳离子向外扩散被控制。实验最终表明，改变合金中活性元素的含量可调节合金的氧化过程。

TiNi合金在包含51 at%Ni时可获得最好的形状记忆性能，被广泛使用于工程上。用一维角关联和多普勒展宽研究Ni含量为50.0%、50.5%、51.0%、51.5%时发现，含量51.0% Ni的合金其线型参数最小，亦即微缺陷最小^[70]。D.Segers等人^[71]测量了形状记忆Cu-Al-Ni合金的S参数，发现退火从马氏体转换到基态时，S参数发生了戏剧性变化。如对CAN合金(83Cu-13Al-4Ni)，当温度从100 K增加到370 K时，S参数变化很小，从370 K开始，S参数急剧减少，从430 K又开始增加。而温度从600 K下降时，S参数减少但没有发生剧变，如图11所示。

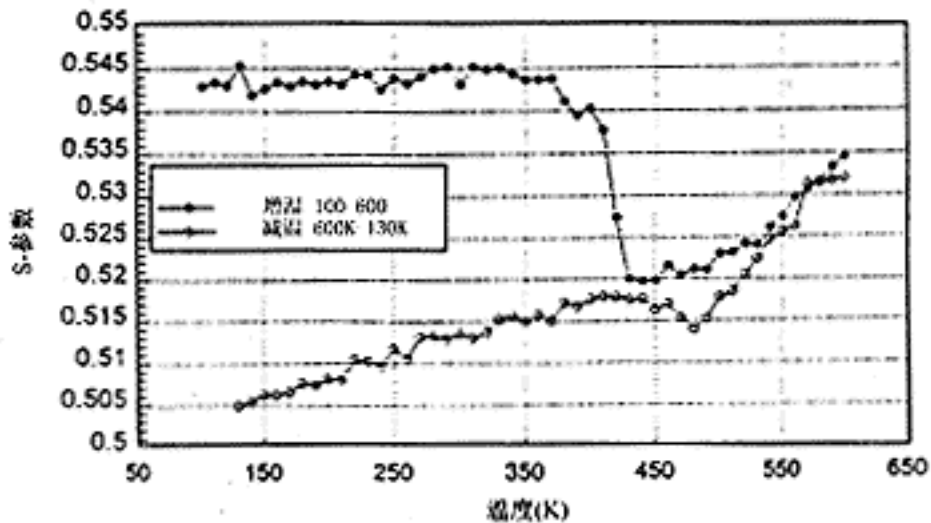


图11 形状记忆CAN合金(83Cu-13Al-4Ni)的S参数

多孔硅是非常重要的电子材料，它的发光效应引起了人们极大的兴趣。多孔硅的性能与表面多孔层的关系极大。日本的Y.Itoh^[72]用正电子湮没谱仪研究多孔硅，发现一个长寿命(几十ns)分量。把多孔硅置于N₂、空气、O₂和真空中分别测量发现，在O₂中，该寿命大大减少。这是由于O₂分子被多孔空间和表面吸收，造成o-Ps的自旋转化，这个转化率随温度(从85 K ~ 300 K)增加而增大。

在半导体工业，低温分子束外延(LT-MBE)生长的Si薄膜可以解决Si的掺杂问题^[73]，但存在一个外延生长厚度 h_{epi} ，超过这个厚度，则晶体生长变成非结晶生长，而这个 h_{epi} 可用迅速的热退火(RTA)消除，但用LT-MBE生长的Si薄膜的质量至关重要，用通常的电子显微镜和离子散射技术也可检测，用这两种方法测量450 °C、600 °C退火下生产的Si膜与控制Si膜，发现无法区分；而用慢正电子束方法可以清楚地表明，见图12， $T_{RTA}=450$ °C完全不同于 $T_{RTA}=600$ °C与控制Si膜。在450 °C缺陷密度达到 $10^{18}/\text{cm}^3$ 。研究表明，氢原子的含量在MBE生长过程中在 $T_{RTA}=450$ °C时起到至关重要的作用。

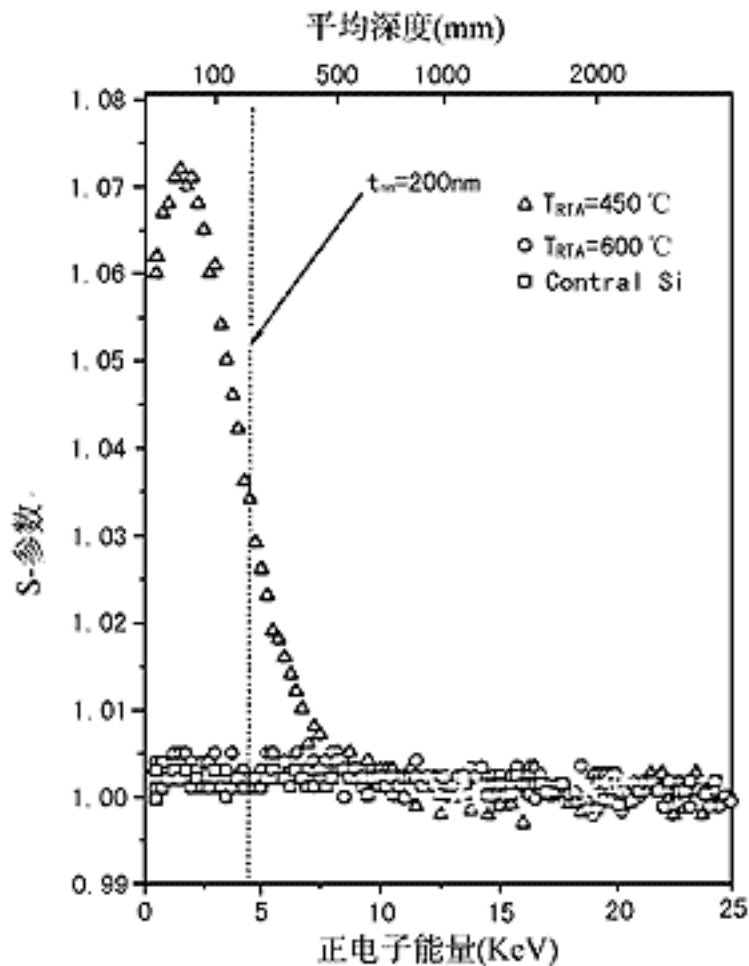


图12 慢正电子束技术得到的LT-MBE生长的Si膜， $T_{RTA}=450$ 完全不同于 $T_{RTA}=600$ 与控制Si膜

2.5 Ps化学，正电子化学

Ps化学是正电子研究的一个重要领域。几十年来，Ps化学具有很强的生命力，并在化学领域中具有不可替代的地位。这是因为：(1)多步化学反应的中间过程是十分重要的，而中间过程又是极具活性的、短寿命的，用通常的化学方法极难测量，尽管ESR和NMR等方法也可确定中间过程，但若中间过程信号峰由反应物与产物相混合时，就无能为力了；(2)中间态通常是活性基、不稳定价离子和复杂体系，而Ps有很高的化学活性，很容易受这种化学中间态影响。这将导致Ps寿命甚至强度的改变。Ps方法通常不破坏或干扰研究系统的动力学平衡，可以自动地记录反应过程的寿命与强度的变化。

正电子湮没寿命谱是一个纳米量级的探针，可用于确定聚合物中的自由体积。相对于其它方法，正电子可以探测到约 $1\mu\text{m}$ 量级的尺度和 10^{-10}s 量级的时间，对自由体积非常灵敏。通过测量o-Ps的寿命M.Eldrup^[74]等给出了自由体积半径R与寿命的定量关系。

此外，R.A.Naslud^[75]等发现在聚合物中，o-Ps的强度在不同温度下随时间而减少，这种减少与源与样品的取向关系很大。

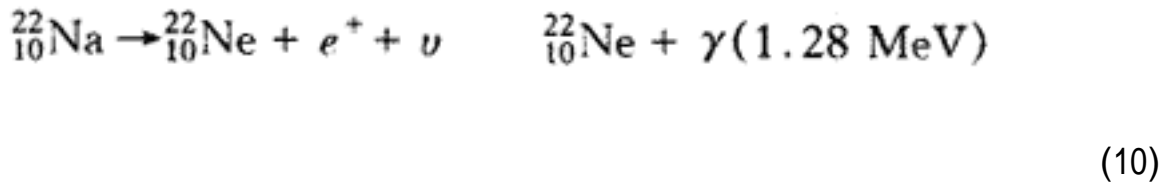
用慢正电子束可以研究聚合物近表面自由体积空洞的性质，这在工业上，如涂层、粘合剂和气体分离等都具有重要的应用。Y.C.Jean^[76]等用慢正电子束测量了环氧树脂的o-Ps寿命和强度随正电子能量E的关系，发现 I_3 随E的变化是一个指数规律，

I_3 随E增大而减少，发现自由体积空洞直径从表面的2.9 μm 减少到体内的2.4 μm 。

3 正电子湮没技术

3.1 正电子湮没寿命谱仪

常规的正电子湮没寿命谱仪通常使用 ^{22}Na 源，它的衰变方式是：



正电子的平均能量为0.546 MeV，进入到凝聚态物质中，首先在1 ps左右的时间内减速至热能，平均射程约10~100 μm 。正电子最终与周围介质中的一个电子发生湮没，主要以2 γ 方式湮没，3 γ 湮没仅占2 γ 湮没的0.27%。以1.28 MeV γ 光子作起始信号，以0.511 MeV γ 光子作终止信号，就可测量正电子的寿命。

正电子湮没谱仪(PAS)广泛地应用于凝聚态物理、材料科学等领域。基于慢正电子束的PAS技术可探测不同深度的缺陷分布、种类及大小。对常规连续慢正电子束进行斩波和聚束，可获得正电子寿命和强度随能量或深度变化的曲线，因而就获得缺陷类型和密度随深度变化的规律。

最近日本的R.Suzuki^[77]等人建立一套三维扫描正电子寿命谱仪(3D-SPLS)，见图13，可控制注入的正电子束斑在样品的不同位置 and 不同能量(即深度)，由此可获得样品的缺陷的三维分布图。这在半导体工业特别有用，因为一个大的Si单晶，通常直径达15 cm，生成过程中带入的缺陷是不均匀分布的。此外，一些器件的生产过程中，其表面刻蚀、离子注入、涂层和薄膜覆盖均带来缺陷，一般沿表面和深度都是不均匀分布的。日本的3D-SPLS是基于短脉冲强流束($10^8\text{e}^+/\text{s}$)，采用多探头陈列的闪烁体和光电倍增管。他们计划获得50 \times 50个寿命谱。经蒙特卡洛模拟每个谱至少需要 10^4 计数。

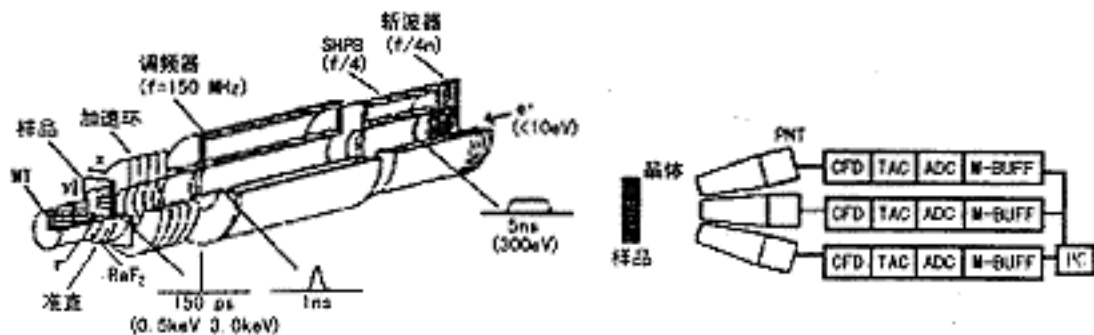


图13 日本的三维扫描正电子寿命谱仪(3D-SPLS)

最近F.Becvar [78] 等人建立一台高分辨正电子寿命谱仪，它由两个BaF₂闪烁体探测器组成，使用快慢符合电路。其时间分辨达150 Ps(对²²Na)，并可获得较高的符合计数率；该系统可用于测量 ~ 40 Ps的短正电子寿命和 ~ 10%低强度分量。

3.2 多普勒展宽技术

当正电子进入材料内部与电子湮没成 γ 时，射线的能量将与511 keV有一多普勒加宽，各种光子的多普勒加宽将展宽整个湮灭的光子峰位，这就是多普勒展宽。通常用S参数来表征多普勒展宽，即中心区域的峰计数与峰总计数之比。由S参数随正电子能量的关系，可获得不同深度处的缺陷分布。图14是我们的慢正电子多普勒展宽测量示意图。图15是S参数的定义。

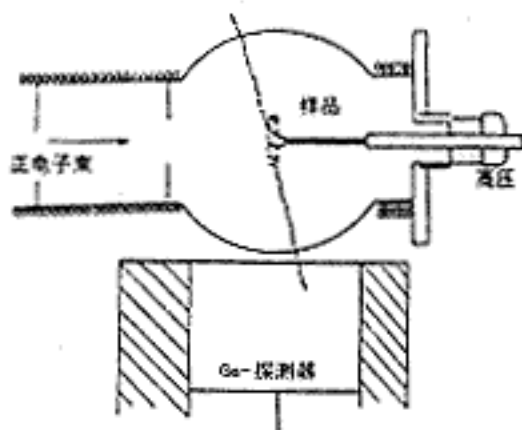


图14 中国科大慢正电子多普勒展宽测量示意图

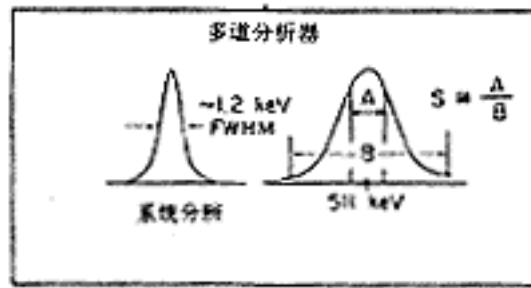


图15 S参数的定义

二元多普勒展宽技术可以同时测量2 湮灭的2个 光子，这样分辨可以提高一2因子。二元测量中，两个探测器通常是相同种类的，如两个Ge探测器或两个BaF₂探测器。二元多普勒展宽方法还可以获得核心电子动量分布信息，可以区别e⁺是与价电子还是与核心电子湮没。

最早的2 多普勒展宽测量系统是由J.R.MacDonald在1978实现的^[79]。P.A.Kumar给出了关于2 多普勒展宽测量的系统的研究^[80]。2 多普勒展宽技术的基本原理是：由两个探测器获得的2 湮没信号E₁和E₂，由E_T=E₁+E₂=2m_ec²-E_b来压低本底，而E₁-E₂=p_Lc，p_L是e⁺e⁻的横向动量。图16是典型的2 多普勒展宽图，中心椭圆区域相应于E₁+E₂~2m_ec²来自于高动量电子，在该区域几乎无本底。因而可研究核心电子的动量分布。

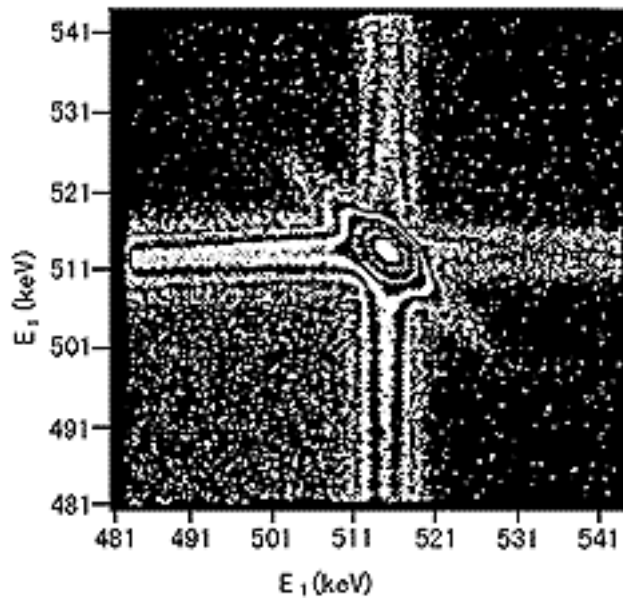


图16 典型的2 多普勒展宽谱

荷兰的A.C.Kruseman [81] 等人采用2个Ge探测器进行符合测量,发现双Ge测量的本底要比单Ge测量小100倍。这就可以研究多普勒展宽谱的高动量部分,即核心电子的贡献。图17给出了各种测量条件下的多普勒展宽谱的比较。他们使用该技术测量了金属氧化半导体(MOS)系统,发现了一些新的结果。

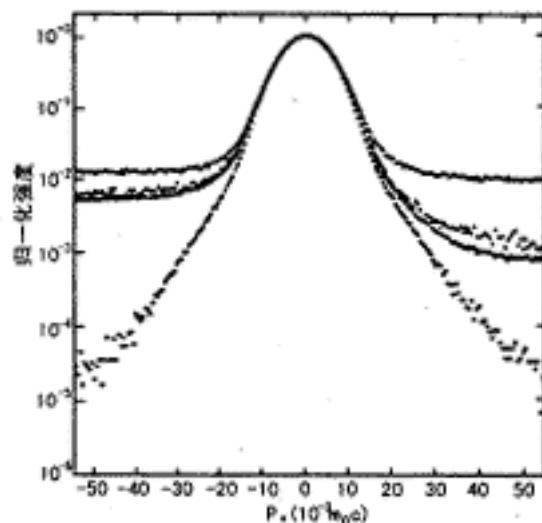


图17 各种测量条件下的多普勒展宽谱的比较。从上到下分别为：单 多普勒展宽谱,单 去脉冲堆积后多普勒展宽谱,单 探测器但满足符合条件并去脉冲堆积后的多普勒展宽谱,双 符合多普勒展宽谱

芬兰的K.Saarinen [82] 等人用2 符合测量研究了基于InP的化合物半导体材料。他们使用了一个高纯Ge探测器和一个NaI闪烁探测器,峰本底比从单Ge测量时的 10^2 提高到符合测量时的 10^4 。他们发现Si中的2p电子比GaAs和InP中要少得多;3d电子的动量分布变宽,而4d电子的谱形要变窄。

3.3 角关联测量技术(ACAR)

e^+e^- 湮没产生的2 的夹角与 180° 有一微小的偏离。实验同时测量 e^+e^- 湮没产生的2 关联信号,可以获得电子动量分布信息,并且可进一步得到费米面形貌,研究能带结构等。

同多普勒展宽技术相类似之处是二维角关联(2D-ACAR)可以由 e^+e^- 湮灭的动量分布来获得电子结构的信息 [83],特别对单晶材料。比之多普勒展宽技术,2D-ACAR技术具有以下两个优点:

(1)可以获得更多的信息,因为是二维探测,故动量密度仅仅积分一次,即:

$$N(p_x, p_y) = \int \rho^{2r}(\mathbf{p}) dp_z;$$

(11)

而多普勒展宽技术主要是一维探测，故获取的是两次积分后的信息，即：

$$D(\dot{p}_x) \iint O^{2r}(\mathbf{p}) dp_y dp_z \quad (12)$$

(2)2D-ACAR比多普勒展宽技术具有更高的分辨。通常2D-ACAR技术具有 $0.5 \times 10^{-3} m_e c$ 量级的分辨，而多普勒展宽技术的分辨为 $4 \times 10^{-3} m_e c$ 。

2D-ACAR技术的主要缺点是必须有较多的计数，因而需要较强的正电子源强并且需要较长的测量时间，此外它经常要与寿命谱仪和多普勒展宽技术联合使用。

二维角关联测量通常需要双组探测器阵列分布，因而造价较高。如日本筑波大学[84]的2D-ACAR谱仪由二组各128个BGO闪烁体组成，每个都配有光电倍增管，总角分辨是1.05 mrad，每个谱的计数要达到 8×10^6 个。由测量结果进行图象重组，可获得三维动量密度分布谱。

一个典型的2D-ACAR谱是由Chen[85]测量的在Si(111)样品，见图18。图a是15 keV正电子在Si(111)样品体内湮没，因而动量分布展宽；图b是p-Ps在表面态的湮没，有一个微小的不对称；图c是样品加热至600 大部分捕获的正电子在表面被吸收形成Ps。

1997年日本KEK的T.Kurihara等人尝试用闪烁纤维作为位置灵敏探测器用于2D-ACAR研究[86]，闪烁纤维的直径只有6 μm ，因而可获得图像分辨达20线/mm。

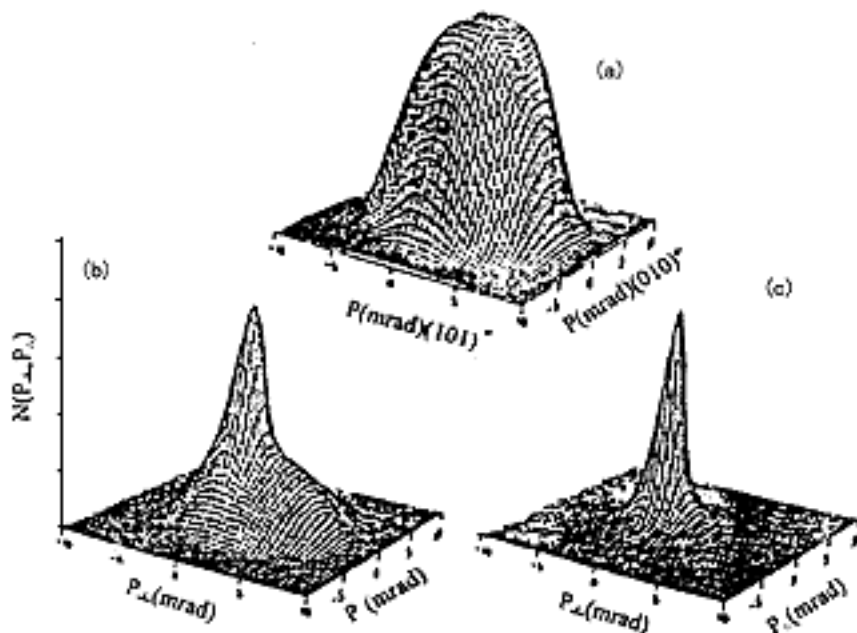


图18 一个典型的测量Si(111)样品得到2D-ACAR谱

3.4 二元测量技术

1996年德国的A.Siegle^[87]等人设计了一套寿命-动量关联(age-momentum correlation)二元测量技术,同时测量2个湮没光子的寿命和多普勒展宽 E_r 或角关联(ACAR),可以获得正电子寿命与动量分量的关联关系。这种寿命-动量关联(AMOC)技术不仅可获得通常单独的寿命和动量,而且,可获得在时间范畴上 e^+e^- -动量分布,这可用于研究不同正电子态之间的跃迁,AMOC技术可直接取得 e^+ 和Ps反应发生瞬间的信息,如在Ps化学领域。此外,AMOC可观察到Ps的慢化过程。图19给出了典型的AMOC谱,即多普勒展宽随时间的变化过程。

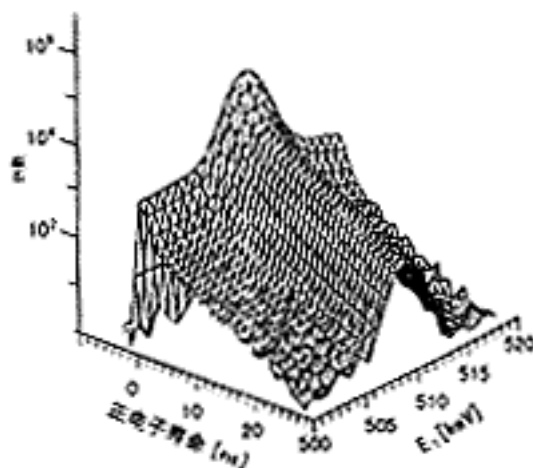


图19 一个典型的AMOC谱,即寿命-多普勒展宽二维谱

H.Schneider等人^[88]利用基于寿命-多普勒展宽的AMOC技术测量了熔凝石英的Ps随寿命的变化规律,发现 S_t 参数随寿命的变化在 $t = \tau_{p-Ps}$ 附近有一个突变,在寿命小于 τ_{p-Ps} 的 S_t 参数对应于 p -Ps的自湮灭贡献,随寿命增大, o -Ps湮灭占主要部分。根据 $S_t(t)$ 在 $t=0$ 处的值可以很容易地判断在材料表面是否有Ps形成。

此外, M.Alatalo^[89]等人建立一套二重多普勒展宽谱仪。香港大学也已经建立一套二重多普勒展宽谱仪,即用二套高纯锗测量 e^+e^- 产生的2个光子的关联的多普勒展宽谱。这种技术既可减少干涉,又可获得一维多普勒展宽无法获得的信息。其它2个多普勒展宽测量技术见本章第2节介绍。

3.5 低高能正电子衍射

低能正电子衍射(LEPD)在半导体表面可获得比电子衍射(LEED)更好的效果。早期工作的LEPD分辨较差,典型的角分辨为 ~ 20 mm deg。应用二次慢化正电子束, Frieze^[90]等人获得了角分辨为 ~ 1 mm deg的LEPD,这已同商用的LEED相媲美,在他们测量的LEPD谱中的(01)和(10)束上强度改变表明了作用势的不同。

美国的J.C.Palathingal^[91]等人用高分辨LEPD测量Si(100)单晶的透射谱,用1 mm直径的窄缝选择正电子束,发散角 $< 0.01^\circ$,这使得束流强度减至 $10^2 e^+/\text{sec}$ 。详细结果见

参考文献。

3.6 正电子诱发电子俄歇谱仪

Weiss [92] 等人在1988年首先发展了正电子湮没诱发的俄歇电子谱仪(PAES), 其优点是在俄歇峰周围无二次电子本底, 此外, 峰形不受非弹能量损失影响, 因而PAES特别适宜于俄歇线型分析。

日本的T.Ohdaira [93] 等研制了一套基于强流束的高分辨正电子湮没诱发电子俄歇谱仪(PAES), 采用 \sim ns量级的短脉冲正电子束, 用飞行时间(TOF)法测俄歇电子的能量。

英国的N.Overton [94] 等人也建立一台PAES并用于研究金属, 半导体和碱金属卤化物的表面结构。

美国Texas大学Arlington分校的Weiss [95] 在1995年建立了一台能量分辨为2%的高分辨PAES谱仪, 由一低能静电正电子束(10 eV)、一个大型圆柱形能量分析器和一个超高真空样品室组成, 配备60 m Ci的 ^{22}Na , 可获得 $\sim 8 \times 10^4$ e⁺/s束流强度, 图20是他们用于测量CuM_{2.3}VV得到的高分辨PAES线型谱。

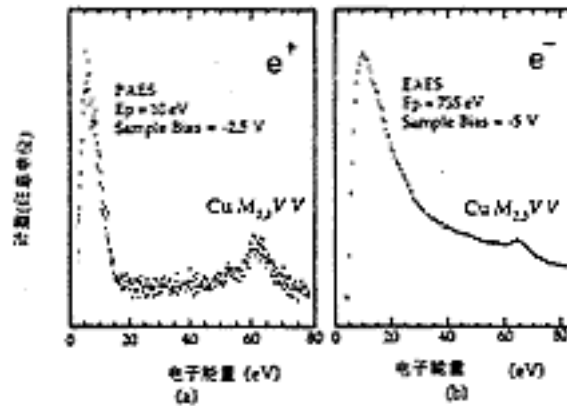


图20 测量CuM_{2.3}VV得到的高分辨PAES谱:(a)正电子俄歇谱PAES, (b)电子俄歇谱EAES

他们分别用电子湮没诱发的俄歇电子谱仪(EAES)和PAES测量了Ag(100)样品, EAES用1.6 keV的能量, PAES用1.6 keV的能量, 图21清楚地表明PAES没有二次电子本底 [96]。

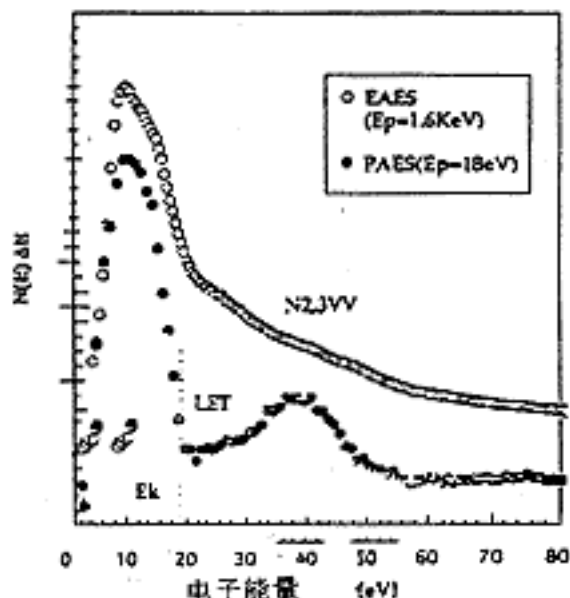


图21 Ag(100)的电子俄歇谱EAES谱和正电子俄歇谱PAES谱

3.7 正电子显微镜, 正电子湮没显微镜和正电子表面再发射显微镜

1983年Hulett^[97]等人根据Mueller发展的场发射电子显微镜(FEEM)提出了正电子再发射显微镜(PRM),它具有比FEEM更多的优点。PRM可以研究增强亮度膜本身的结构,因为通过正电子捕获和湮没,可以对膜的空位和位错进行显像。PRM可以以单原子态的区域显像空位,这是其它方法不可比拟的;其次,由于正电子发射的能量与空位电位在相同的量值,PRM图像可以突出显示化学差异,如样品的不同区域化学成分的不同,导致Ps形成截面不同,Ps形成大的区域其显像图象强度变弱。

Brandes^[98]等人对PRM成像进行了细致的研究。他测量Ni膜在未退火和退火后的显像,发现未退火显像中灰度较深区(即来自近表面缺陷)在退火后的显像中已消失。他们获得的分辨为 $300 \pm 100\text{nm}$ 。为了提高分辨率,除需提高场强外,微道板斑点上正电子计数需达到 7×10^9 个,这就需提高束流的强度。

反射型PRM可用来研究较厚样品的表面结构。Michigan大学^[99]研究组建立了一台放大倍数56,位置分辨为 $2.3 \mu\text{m}$ 的反射型PRM。这种类型的PRM还可研究薄膜在生长过程中的动力学,显像膜生长区的图象,并用再发射正电子能谱确定其成分。

透射型PRM的图象与透射电子显微镜类似,其优点是可以确定晶体晶格位置的不纯原子是否被替换或形成空隙,而透射电子显微镜却做不到这一点。

1995年德国的K.Uhlmann等人建立了一台扫描正电子显微镜^[100],系统采用 $1 \text{ Ci } ^{22}\text{Na}$ 正电子源,采用脉冲化技术,束流可调谐的能量为 $1 \sim 30 \text{ keV}$,束斑直径为 $1 \mu\text{m}$,可扫描 $0.6 \times 0.6 \text{ mm}^2$ 的面积。

3.8 极化正电子束流及正电子自旋弛豫技术

1979年Zitzwitz^[101]等人发现正电子在MgO中慢化后仍然保持其极化特性。通过牺牲一些束流强度,1984年Van House^[102]等人获得了70%的极化正电子束,用于测量金属表面电子的自旋态。

1997年日本的T.Kumita^[103]等人用小型回旋加速器产生的 ^{27}Si 同位素建立了一台束流强度为 $5 \times 10^5 \text{ e}^+/\text{s}$ 的极化正电子束。 ^{27}Si 同位素的半衰期为4.1 s,最大 $^+$ 能量为

3.85 MeV，由回旋加速器中18 MeV的质子轰击Al产生，即 $^{27}\text{Al}(p,n)^{27}\text{Si}$ 反应，Al的厚度为2 mm，足以停止18 MeV的质子，由 ^{27}Si 同位素发射的 β^+ 进入W慢化体慢化，产生的慢正电子首先被加速到10 eV的能量，然后输送到27 m长、磁场100 G的极化器中进行极化，平均极化率约为38%。整个谱仪的框图见图22所示。

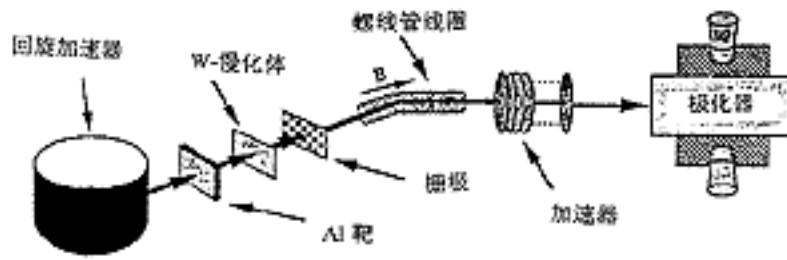


图22 日本基于小型回旋加速器的极化正电子

正电子自旋弛豫技术(e+SR)可用于研究样品的e+自旋极化，在凝聚态中可研究Ps形成。1996年T.Gessmann [104] 建立一台基于 $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ 放射源的e+SR谱仪。用该谱仪测量了石英晶体在室温下的Ps形成，表明，用该技术不仅能获得电子动量密度，而且与其它方法所得到的结果相符合，此外，还可获得注入e+形成Ps数量的信息。

3.9 微束

通常的慢正电子束由于受到源的几何与慢化体的限制，其束斑直径约为1~6 mm。采用多次慢化虽然损失一些束流的强度，但可减少束斑半径，这个想法首先由Mills提出。1986年Canter等人 [105] 得到了 μm 量级的微束，可测量 0.2 mm^2 的栅网区域。1988年House和Rich也得到了透射正电子显微镜(TPM) [106]。

德国慕尼黑已经将采用二次慢化方法得到 μm 量级的微束，用于二维扫描，可以得到不同区域S随e+能量结果。

意大利的A.Zecca等 [107] 在1995年建立了第一台脉冲正电子微束谱仪。该谱仪采用 ^{22}Na 作慢正电子源，束流经三次聚焦，获得束斑直径为 $20\ \mu\text{m}$ 的微束，时间分辨为350 ps。可获得 $5 \times 10^3\ \text{e}^+/\text{smCi}$ 的计数率，采用 BaF_2 闪烁体作为探测器，正电子可调节的能量范围是0.5~10 keV。使用时他们采用1Ci的 ^{58}Co 源，获得了 $7.5 \times 10^5\ \text{e}^+/\text{s}$ 的流强。该系统可对样品表面进行扫描，他们测量了 $30\ \mu\text{m}$ 粗的间距为 $300\ \mu\text{m}$ 金丝栅网，获得了非常清晰的图象，见图23所示。

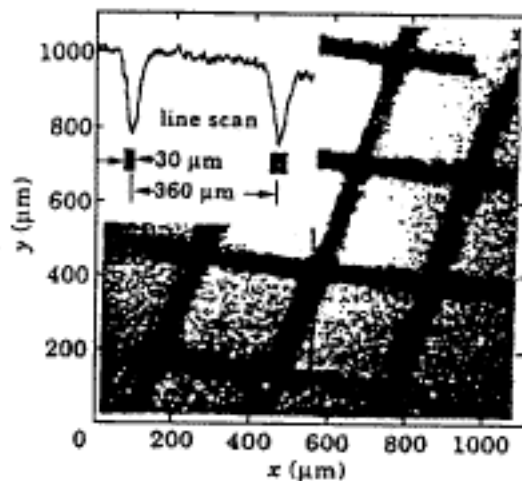


图23 300 μm \times 300 μm 金丝栅网的正电子显像图

1997年美国的LLNL建立了一台三级聚焦慢化装置^[108]，最初的正电子流强是 $10 \times 10^{10} \text{ e}^+/\text{s}$ ，束斑直径为1.5 cm，经第一级慢化后流强是 $5 \times 10^9 \text{ e}^+/\text{s}$ ，束斑直径为2 mm，经第二级慢化后流强是 $5 \times 10^8 \text{ e}^+/\text{s}$ ，束斑直径为50 μm ，再经第三级慢化他们获得了流强是 $1 \times 10^7 \text{ e}^+/\text{s}$ ，束斑直径小至1 μm 的脉冲微束，可调谐能量为0 ~ 50 keV，用于测量几 μm 量级的三维缺陷分布。

4 结束语

慢正电子束技术不仅能给出原子尺度局域缺陷及微观物相变化的信息，也能探测表面最外面几层原子的状况，并且为非破坏性测量。因而，近年来，慢正电子束技术不断发展创新，应用领域不断扩大，已经成为凝聚态物理学、化学和材料科学研究的研究工具之一。国际上已有几十家研究单位建立了慢正电子束装置。而且，今后的几年内，将还有一批慢正电子束装置投入运行。

我国的慢正电子束研究及应用方面是在八十年代末在中国科学技术大学率先开始的，建成了基于放射源的慢正电子束流装置，近十年来，中国科技大学的研究组用慢正电子束对材料研究方面已取得了一些重要结果。到目前为止，我国还有清华大学、北京高能所及武汉大学等也在该领域进行了一些研究工作。我国在慢正电子研究方面与国际上还有一定的差距。我国目前尚无一台强流慢正电子束装置。可喜的是，几年来，中国科技大学的研究组一直在进行建立强流慢束的预研究和系统设计，准备在200 MeV的电子直线加速器建立我国第一台强流慢正电子束装置。我们期望，在不远的将来，我们在慢正电子领域可接近或达到目前国际先进水平。

基金项目：本文由国家自然科学基金(资助号19875050)，中国科学院院长基金和留学回国基金资助

作者单位：韩荣典 叶邦角 翁惠民 周先意 范扬眉 杜江峰 中国科学技术大学
近代物理系 合肥230026

周先意 中国科学院 国际材料物理中心，沈阳 110015

参 考 文 献

- 1 Madanski L and Rasetti F. Phys.Rev., 1950, 79:397
- 2 Cherry W. Ph.D dissertation, Princeton University(1958)
- 3 Mills A P. Jr., Applied Physics Letter, 1979,35:427
- 4 Anderson C D. Phys.Rev.,1932, 41,405; 1933, 43:491
- 5 Deutsch M. Phys.Rev., 1951,82:455; 1951, 83:866
- 6 Groce D E, Costello D G, McGowan J W, et al. Bull.Am.Phys.Soc.,1968, 13:1397
- 7 Canter K F, Coeman P G, Griffith T C and Heyland G B. J.Phys.B,1972, 5:L167
- 8 Stein T S, Kauppila W E and Roelling L O. Phys.Lett.A, 1975, 51: 327
- 9 Pendyala S and McGowan J W. J.Electr.Spectr.Relat.Phenom., 1980,19:161
- 10 Dale J M, Hulett L H and Pendyala S. Surface Interface Anal., 1980,2:199
- 11 Lee K H, Itoh Y, Kanazawa I, et al. Phys.Stat.Sol.(a), 1996,157:93
- 12 Vehanen A, Lynn K G, Schultz P J and Eldrup M. Appl.Phys.A ,1983,32:163
- 13 Stormer J, Goodyear A, Anwand W, et al. J.Phys.,1996, 8:L89
- 14 Gullikson E M, and Mills A P, Jr. Phys.Rev.Lett., 1986, 57:376
- 15 Vasumathi D, Amarendra G, Canter K F, and Mill A P, Jr. Appl.Surface Sci.,1995, 85:154
- 16 Lynn K G, and McKee B T A. Appl.Phys.,1979, 19:247
- 17 Beling C D, Simpson R I, Stewart M G, et al. Phys. Status Solidi, 1987,102:537
- 18 Suzuki R, Ohdaira T, Mikado T, et al. Materials Science Forum,1997, Vols.255-257:114
- 19 Guo X J, Han R D, Wen H M. Chinese Physics Letter, 1991
- 20 Weng H M, Hu Y F, Beling C D, and Fung S. Applied Surface Science,1997, 116:98
- 21 王宝义, 于润升, 陈红民等.全国第七届正电子湮灭技术会议文集, 1999年4月7-11日, 福建泉州, P5
- 22 Howell R H, Alvarez R A, and Stanek M. Appl.Phys.Lett.,1982, 40:751
- 23 Akahane T, Chiba T, Shiotani N, et al. Appl.Phys.A, 1990, 51:146
- 24 Segers D, Paridaens J, Van Hoecke T, et al. Applied Surface Science, 1995, 85:172
- 25 Kanazawa I, Ito Y, Hirose M, et al. Applied Surface Science, 1995, 85:124
- 26 Xu J, Suzuki R, Hulett L D, and Lewis T A. Applied Surface Science, 1997, 116:34
- 27 Hirose M, Washio M, Takahashi K. Applied Surface Science, 1995, 85:111
- 28 Itoh Y, Lee K H, Nakajyo T, et al. Applied Surface Science, 1995, 85:165
- 29 Hirose M, Nakajyo T, Washio M. Applied Surface Science, 1997,116:63
- 30 Kumita T, Chiba M, Hamatsu R. et.al. Applied Surface Science, 1997, 116:1
- 31 Van Veen A, Labohm F, Schut H, et al. Applied Surface Science, 1997, 116:39
- 32 Triftshauser G, Kogel G, Triftshauser W, et al. Applied Surface Science, 1997, 116:45
- 33 Taqqu D. Helv.Acta ,1990, 63:442
- 34 Zimmermann U. Helv.Acta 1990,63:435
- 35 Waeber W B, Shi M, Gerola D, et al. PSI Annual Progress Report 1993, Wurenlingen, 1994
- 36 Flottmann K.DESY, 1993,93-161
- 37 Barbiellini G and Peteucci G. Applied Surface Physics, 1997, 116:49
- 38 Lahtinen J, Vehanen A, Huomo H, ert al. Nucl.Instr.Methods B, 1986, 17:73
- 39 Frieze W E, Gidly D W and Lynn K G. Phys.Rev.B, 1985, 31:5628
- 40 Brandes G B, Canter K F and Mills A P. Phys.Rev.Lett., 1988, 61:492
- 41 Aruga T, Takamura S, Hirose M and Itoh Y. Phys.Rev.B, 1992, 46:1441

- 42 Kurihara T, Shirakawa A, Enomoto A, et al. Applied Surface Science, 1995, 85:178
- 43 Ito Y, Hirose M, Takamura S, et al. Nucl. Instrum. Methods A, 1991, 305:269
- 44 Taqqu D. Applied Surface Science, 1997, 116:28
- 45 Waeber W B, Shi M. Applied Surface Science, 1997, 116:91
- 46 Brown B L. Applied Surface Science, 1997, 116:104
- 47 Segers D, Paridaens J, Hoeche T V, et al. Applied Surface Science, 1995, 85:172
- 48 Mills A P, Jr. Applied Physics, 1980, 23:189
- 49 Canter K F, in Positron Studies of Solids, Surfaces and Atoms, edited by A.P.Mills, Jr., et al., World Scientific, Singapore, 1986:p102
- 50 Vasumathi D, Amarendra G, Canter K F, et al. Applied Surface Science, 1995, 85:154
- 51 Zecca A, Brusa R S, Duarte M P, et al. Europhys. Lett., 1995, 29:617
- 52 Bergensen B, Pajanne E, Kubica P, et al. Solid State Commun., 1974, 15:1377
- 53 Corbel C, Puska M and Nieminen R M. Radiat.Eff., 1983, 79:305
- 54 Puska M J and Nieminen R M. J.Phys. F, 1983, 13:333
- 55 韩荣典, 周先意, 翁惠民等.核技术, 1994, 17:321
- 56 Zhou X Y, Stormer J, Wang R L, et al. Phys. Rev.B, 1996, 54: 1398; Zhou X Y, Kugelmann W B, Stormer J, et al. Phys.Lett.A, 1997, 225:143; Zhou XI Y, Lu X, Jiang H, et al. J.Phys.: Condensed Matter 1997, 9:L61
- 57 Veen A van, Kruseman A C, Schut H, et al. Materials Science Forum, 1997, 255-257:76
- 58 Reader A H, Schut H, Hakvoort R A, et al. Journal de Physique IV, 1995, 5:C1-27
- 59 韩荣典, 翁惠民, 周先意等.高能物理与核物理, 1993, 17:300
- 60 翁惠民, 黄千峰, 韩荣典等.核技术, 1998, 21:109
- 61 Oshima N, Nakajyo T, Kanazawa I, et al. Applied Surface Science, 1995, 85:329
- 62 Tashiro M, Nakajyo T, Murashige Y, et.al. Applied Surface Science, 1997, 116:263
- 63 翁惠民, 周先意, 徐纪华等.高能物理与核物理, 1993, 17:775
- 64 Ling C C, Weng H M, Hu Y F, et al. Applied Surface Science, 1997, 116:256
- 65 Kumar P A and Lynn K G. Journal de Physique IV, 1995, 5: C1-15
- 66 Vehanen A, Saarinen K, Hautajarv P, Huomo H. Phys.Rev.B, 1987, 35:4606
- 67 Weng H M, Qin G, Han R D, et al. Materials Science Forum, 1995, 175:233
- 68 Weng H M, Wang D Z, Han R D, et al. Materials Science and Engineering B, 1994, 26:163
- 69 Yu F H, Yang G H, Han R D, et al. ACTA Metallurgica Sinica B, 1992, 5:383
- 70 Wang J C, Materials Science Forum, 1995, 175-178:557
- 71 Segers D, Hurtado I, Dorikens-Vanpraet L, et al, JOURNAL DE Physique IV, 1995, C1-163
- 72 Itoh Y, Murakami H and Kinoshita A. Materials Science Forum, 1995, 175-178:173
- 73 Kumar P A, Gossmann H J, Unterwald F C, et al. Phys. Rev. B, 1993, 48:5345
- 74 Eldrup M, Lightbody D, Sherwood J N. Chem.Phys., 1981, 63:51
- 75 Naslud R A, Jones Ph L and Crowson A. Materials Science Forum, 1995, 175-178:739
- 76 Jean Y C, Cao H, Dai G H, et al. Applied Surface Science, 1997, 116:251
- 77 Suzuki R, Mikado T, Ohgaki H, et al. Materials Science Forum, 1995, 175-178:217
- 78 Becvar F, Lestak L, Novotny T, et al. Materials Science Forum, 1995, 175-178:947
- 79 MacDonald J R, Lynn K G, Boie R A, et al. Nucl. Instr. Methods, 1978, 153:189
- 80 Asoka-Kumar P, Alatalo M, Ghosh V J, et al. Phys. Rev. Lett., 1996, 77:2097
- 81 Krusemen A C, Schut H, Veen A V, et al. Applied Surface Science, 1997, 116:192

- 82 Saarinen K, Kauppinen H, Laine T, et al. Applied Surface Science, 1997, 116:273
- 83 Dupasquier A and Mills A P. Positron Spectroscopy of Solids, North-Holland, Amsterdam, 1994
- 84 Uedono A, Kawano T, Li X H, et al. Materials Science Forum, 1995, 175-178:553
- 85 Chen D M, Berko S, Canter K F, et al. phys.Rev.Lett,1987, 58:921
- 86 Kurihara T, Shirakawa A, Enomoto A, et al. Applied Surface Science, 1997, 116:181
- 87 Siegle A, Stoll H, Castellaz P, et al. Applied Surface Science,1997, 116:140
- 88 Schneider H, Aseegeer, Siegle A, et al. Applied Surface Science, 1997,116:145
- 89 Alatalo M, Kauppinen H, Saarinen K, et al. Phys.Rev.B, 1995, 51:4176
- 90 Frieze W E, Gidley D W, Lynn K G. Phys. Rev.B, 1985, 31:5628
- 91 Palathingal J C, Peng J P, Lynn K G, et al. Materials Science Forum, 1995, 175-178:193
- 92 Weiss A, Mayer R, Koymen A R, et al. Phys.Rev.Lett, 1988, 61:2245
- 93 Ohdaira T, Suzuki R, Mikado T, et al. Applied Surface Science, 1997, 116:177
- 94 Overton N, Knights A P, Goodyear A, et al. Materials Science Forum, 1995, 175-178:189
- 95 Zhou H Q, Yang S, Jung E S, Weiss A. Materials Science Forum, 1995, 175-178:255
- 96 Jung E, Zhou H Q, Kim J H, et al. Applied Surface Science,1997, 116:318
- 97 Hulett L P, Dale J M, Pendyala S. Materials Science Forum,1984, 2:133
- 98 Brandes G, Canter K F and Mills A P. Phys.Rev.Lett., 1988, 61:492
- 99 House J and Rich A. Phys.Rev.Lett., 1988, 61:488
- 100 Uhlmann K, Triftshauser W, Kogel G, et al. Fresenius J. Anal. Chem., 1995, 353:594
- 101 Zitzewitz P W, House J V, Rich A, et al. Phys.Rev.Lett.,1979, 43:1281
- 102 House Van, Rich A. Phys.Rev.Lett, 1984, 60:169
- 103 Kumita T, Chiba M, Hamatsu R, et al. Applied Surface Science, 1997, 116:1
- 104 Gessmann Th, Harmat P, Major J, et al. Applied Surface Science, 1997, 116:114
- 105 Canter K F.in Positron Stadies of Solids,Surface and Atoms, ed.by A.P.Mills (World Scientific,Sigarare)
- 106 van House J, and Rich A. Phys.Rev.Lett.,1988, 60:169
- 107 Zecca A, Brusa R S, Duarte M P, et al. Europhys. Lett., 1995, 29:617
- 108 Howell R H, Cowan T E, Hartley J, et al., Applied Surface Science, 1997, 116:7

收稿日期：1999-06-14；修改日期：1999-06-14

作者: 韩荣典, 叶邦角, 翁惠民, 周先意, 范扬眉, 杜江峰, Han Rongdian, Ye Bangjiao, Weng Huimin, Zhou Xianyi, Fan Yangmei, Du Jiangfeng

作者单位: 韩荣典, 叶邦角, 翁惠民, 范扬眉, 杜江峰, Han Rongdian, Ye Bangjiao, Weng Huimin, Fan Yangmei, Du Jiangfeng(中国科学技术大学, 近代物理系, 合肥, 230026), 周先意, Zhou Xianyi(中国科学技术大学, 近代物理系, 合肥, 230026; 中国科学院 国际材料物理中心, 沈阳, 110015)

刊名: 物理学进展 [ISTIC](#) [PKU](#)

英文刊名: PROGRESS IN PHYSICS

年, 卷(期): 1999, 19(3)

被引用次数: 8次

参考文献(110条)

1. Madanski L; Rasetti F [查看详情](#) [外文期刊] 1950
2. Cherry W [查看详情](#) 1958
3. Mills A P. Jr [查看详情](#) 1979
4. Anderson C D [查看详情](#) [外文期刊] 1932
5. Deutsch M [查看详情](#) 1951
6. Groce D E; Costello D G; McGowan J W [查看详情](#) 1968
7. Canter K F; Coeman P G; Griffith T C; Heyland G B [查看详情](#) [外文期刊] 1972
8. Stein T S; Kauppila W E; Roelling L O [查看详情](#) [外文期刊] 1975
9. Pendyala S; McGowan J W [查看详情](#) [外文期刊] 1980
10. Dale J M; Hulet L H; Pendyala S [查看详情](#) [外文期刊] 1980
11. Lee K H; Itoh Y; Kanazawa I [查看详情](#) 1996
12. Vehanen A; Lynn K G; Schultz P J; Eldrup M [查看详情](#) [外文期刊] 1983
13. Stormer J; Goodyear A; Anwand W [查看详情](#) 1996
14. Gullikson E M; Mills A P [查看详情](#) [外文期刊] 1986
15. Vasumathi D; Amarendra G; Canter K F; Mill A P [INSTALLATION OF A KR MODERATOR IN THE HIGH-BRIGHTNESS BEAM AT BRANDEIS](#) [外文期刊] 1995(1/4)
16. Lynn K G; McKee B T A [查看详情](#) 1979
17. Beling C D; Simpson R I; Stewart M G [查看详情](#) [外文期刊] 1987
18. Suzuki R; Ohdaira T; Mikado T [查看详情](#) [外文期刊] 1997
19. Guo X J; Han R D; Wen H M [查看详情](#) 1991
20. Weng H M; Hu Y F; Beling C D; Fung S [查看详情](#) [外文期刊] 1997
21. 王宝义; 于润升; 陈红民 [全国第七届正电子湮灭技术会议文集](#) 1999
22. Howell R H; Alvarez R A; Stanek M [查看详情](#) [外文期刊] 1982
23. Akahane T; Chiba T; Shiotani N [查看详情](#) [外文期刊] 1990
24. Segers D; Paridaens J; Van Hoecke T [POSITRON DOPPLER BROADENING MEASUREMENTS WITH A LINAC-BASED SLOW POSITRON BEAM](#) [外文期刊] 1995(1/4)
25. Kanazawa I; Ito Y; Hirose M [PRODUCTION OF AN INTENSE SLOW POSITRON BEAM BY USING AN ELECTRON LINAC AND ITS APPLICATIONS](#) [外文期刊] 1995(1/4)
26. Xu J; Suzuki R; Hulet L D; Lewis T A [查看详情](#) 1997
27. Hirose M; Washio M; Takahashi K [查看详情](#) [外文期刊] 1995
28. Itoh Y; Lee K H; Nakajyo T [查看详情](#) 1995
29. Hirose M; Nakajyo T; Washio M [查看详情](#) [外文期刊] 1997

30. [查看详情](#)[外文期刊] 1997
31. [Van Veen A;Labohm F;Schut H](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1997
32. [Triftshauser G;Kogel G;Triftshauser W](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1997
33. [Taqqu D](#) [查看详情](#) 1990
34. [Zimmermann U](#) [查看详情](#) 1990
35. [Waeber W B;Shi M;Gerola D](#) [查看详情](#) 1994
36. [Flottmann K](#) [查看详情](#) 1993
37. [Barbiellini G;Peteucci G](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1997
38. [Lahtinen J;Vehanen A;Huomo H;ert al](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1986
39. [Frieze W E;Gidly D W;Lynn K G](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1985
40. [Brandes G B;Canter K F;Mills A P](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1988
41. [Aruga T;Takamura S;Hirose M;Itoh Y](#) [查看详情](#) 1992
42. [Kurihara T;Shirakawa A;Enomoto A](#) [AN OVERVIEW OF THE SLOW-POSITRON BEAM FACILITY AT THE PHOTON FACTORY, KEK](#)[外文期刊] 1995(1/4)
43. [Ito Y;Hirose M;Takamura S](#) [查看详情](#) 1991
44. [Taqqu D](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1997
45. [Waeber W B;Shi M](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1997
46. [Brown B L](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1997
47. [Segers D;Paridaens J;Hoeche T V](#) [POSITRON DOPPLER BROADENING MEASUREMENTS WITH A LINAC-BASED SLOW POSITRON BEAM](#)[外文期刊] 1995(1/4)
48. [Mills A P](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1980
49. [Canter K F;A.P.Mills, Jr](#) in [Positron Studies of Solids, Surfaces and Atoms](#) 1986
50. [Vasumathi D;Amarendra G;Canter K F](#) [INSTALLATION OF A KR MODERATOR IN THE HIGH-BRIGHTNESS BEAM AT BRANDEIS](#)[外文期刊] 1995(1/4)
51. [Zecca A;Brusa R S;Duarte M P](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1995
52. [Bergensen B;Pajanne E;Kubica P](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1974
53. [Corbel C;Puska M;Nieminen R M](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1983
54. [Puska M J;Nieminen R M](#) [查看详情](#) 1983
55. [韩荣典;周先意;翁惠民](#) [查看详情](#) 1994
56. [Zhou X Y;Stormer J;Wang R L](#) [POSITRON ANNIHILATION IN THE EPITAXIAL SUPERCONDUCTING THIN-FILM GDBA2CU3O7-DELTA STUDIED BY USING A PULSED POSITRON BEAM](#)[外文期刊] 1996(2)
57. [Zhou X Y;Kugelmann W B;Stormer J](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1997
58. [Zhou XI Y;Lu X;Jiang H](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1997
59. [Veen A van;Kruseman A C;Schut H](#) [Positron analysis of defects in metals](#)[外文期刊] 1997(0)
60. [Reader A H;Schut H;Hakvoort R A](#) [查看详情](#)[外文期刊] 1995
61. [韩荣典;翁惠民;周先意](#) [查看详情](#) 1993
62. [翁惠民;黄千峰;韩荣典](#) [查看详情](#) 1998
63. [Oshima N;Nakajyo T;Kanazawa I](#) [MULTILAYERED NI/HF AND SOLID-STATE AMORPHIZATION STUDIED USING THE SLOW POSITRON BEAM TECHNIQUE](#)[外文期刊] 1995(1/4)
64. [查看详情](#)[外文期刊] 1997
65. [翁惠民;周先意;徐纪华](#) [查看详情](#) 1993

66. [Ling C C;Weng H M;Hu Y F 查看详情](#)[外文期刊] 1997
67. [Kumar P A;Lynn K G 查看详情](#)[外文期刊] 1995
68. [Vehanen A;Saarinen K;Hautojarv P;Huomo H 查看详情](#)[外文期刊] 1987
69. [Weng H M;Qin G;Han R D 查看详情](#)[外文期刊] 1995
70. [Weng H M;Wang D Z;Han R D 查看详情](#)[外文期刊] 1994
71. [Yu F H;Yang G H;Han R D 查看详情](#) 1992
72. [Wang J C 查看详情](#)[外文期刊] 1995
73. [Segers D;Hurtado I;Dorikens-Vanpraet L POSITRON DOPPLER BROADENING MEASUREMENTS WITH A LINAC-BASED SLOW POSITRON BEAM](#)
[外文期刊] 1995(1/4)
74. [Itoh Y;Murakami H;Kinoshita A 查看详情](#) 1995
75. [Kumar P A;Gossmann H J;Unterwald F C 查看详情](#)[外文期刊] 1993
76. [Eldrup M;Lightbody D;Sherwood J N 查看详情](#) 1981
77. [Naslud R A;Jones Ph L;Crowson A 查看详情](#)[外文期刊] 1995
78. [Jean Y C;Cao H;Dai G H 查看详情](#)[外文期刊] 1997
79. [Suzuki R;Mikado T;Ohgaki H 查看详情](#)[外文期刊] 1995
80. [Becvar F;Lestak L;Novotny T 查看详情](#)[外文期刊] 1995
81. [MacDonald J R;Lynn K G;Boie R A 查看详情](#)[外文期刊] 1978
82. [Asoka-Kumar P;Alatalo M;Ghosh V J 查看详情](#) 1996
83. [Krusemen A C;Schut H;Veen A V 查看详情](#)[外文期刊] 1997
84. [Saarinen K;Kauppinen H;Laine T 查看详情](#) 1997
85. [Dupasquier A;Mills A P Positron Spectroscopy of Solids](#) 1994
86. [Uedono A;Kawano T;Li X H 查看详情](#) 1995
87. [Chen D M;Berko S;Canter K F 查看详情](#)[外文期刊] 1987
88. [Kurihara T;Shirakawa A;Enomoto A 查看详情](#)[外文期刊] 1997
89. [Siegle A;Stoll H;Castellaz P 查看详情](#) 1997
90. [Schneider H;Aseeger;Siegle A Photovoltaic quantum well infrared photodetectors: The four-zone scheme](#)[外文期刊]
1997(1/4)
91. [Alatalo M;Kauppinen H;Saarinen K 查看详情](#) 1995
92. [Frieze W E;Gidley D W;Lynn K G 查看详情](#)[外文期刊] 1985
93. [Palathingal J C;Peng J P;Lynn K G 查看详情](#)[外文期刊] 1995
94. [Weiss A;Mayer R;Koymen A R 查看详情](#) 1988
95. [Ohdaira T;Suzuki R;Mikado T 查看详情](#)[外文期刊] 1997
96. [Overton N;Knights A P;Goodyear A 查看详情](#)[外文期刊] 1995
97. [Zhou H Q;Yang S;Jung E S;Weiss A 查看详情](#)[外文期刊] 1995
98. [Jung E;Zhou H Q;Kim J H 查看详情](#)[外文期刊] 1997
99. [Hulett L P;Dale J M;Pendyala S 查看详情](#)[外文期刊] 1984
100. [Brandes G;Canter K F;Mills A P 查看详情](#)[外文期刊] 1988
101. [House J;Rich A 查看详情](#)[外文期刊] 1988
102. [Uhlmann K;Triftshauser W;Kogel G 查看详情](#)[外文期刊] 1995
103. [Zitzewitz P W;House J V;Rich A 查看详情](#)[外文期刊] 1979
104. [House Van;Rich A 查看详情](#)[外文期刊] 1984

105. Kumita T;Chiba M;Hamatsu R [查看详情](#)[外文期刊] 1997
106. Gessmann Th;Harmat P;Major J [查看详情](#)[外文期刊] 1997
107. Canter K F [in Positron Studies of Solids, Surface and Atoms](#)
108. van House J;Rich A [查看详情](#)[外文期刊] 1988
109. Zecca A;Brusa R S;Duarte M P [查看详情](#)[外文期刊] 1995
110. Howell R H;Cowan T E;Hartley J [查看详情](#)[外文期刊] 1997

本文读者也读过(6条)

1. 魏存峰. 王宝义. 王平. 曹兴忠. 章志明. 马雁云. 薛德胜. 魏龙. WEI Cun-Feng. WANG Bao-Yi. WANG Ping. CAO Xing-Zhong. ZHANG Zhi-Ming. MA Yan-Yun. XUE De-Sheng. WEI Long [脉冲慢正电子束流的直流化装置](#)[期刊论文]-[高能物理与核物理](#)2006, 30(10)
2. 翟纪元. 唐传祥. 郑曙昕. 李泉凤. ZHAI Ji-Yuan. TANG Chuan-Xiang. ZHENG Shu-Xin. LI Quan-Feng [微脉冲电子枪的初步实验研究](#)[期刊论文]-[高能物理与核物理](#)2006, 30(2)
3. 王宝义. 曹兴忠. 魏存峰. 章志明. 马创新. 张天保. 魏龙. WANG Baoyi. CAO Xingzhong. WEI Cunfeng. ZHANG Zhiming. MA Chuangxin. ZHANG Tianbao. WEI Long [脉冲慢正电子束流的检测](#)[期刊论文]-[核技术](#)2007, 30(4)
4. 裴国玺. 孙耀霖. 刘晋通. 池云龙. 刘玉成. 刘念宗. PEI Guo-Xi. SUN Yao-Lin. LIU Jin-Tong. CHI Yun-Long. LIU Yu-Cheng. LIU Nian-Zong [BEPc II 正电子源](#)[期刊论文]-[高能物理与核物理](#)2006, 30(1)
5. 许红霞. 陈祥磊. 成斌. 熊涛. 高传波. 郝颖萍. 翁惠民. 叶邦角. XU Hong-xia. CHENG Xiang-lei. CHENG Bin. XIONG Tao. GAO Chuan-bo. HAO Ying-ping. WENG Hui-min. YE Bang-jiao [脉冲慢束空间聚焦的SIMION 模拟](#)[期刊论文]-[核电子学与探测技术](#)2010, 30(5)
6. 张子良 [基于慢正电子束流技术制备SiO₂薄膜的应用](#)[学位论文]2010

引证文献(8条)

1. 许红霞. 陈祥磊. 成斌. 熊涛. 高传波. 郝颖萍. 翁惠民. 叶邦角 [脉冲慢束空间聚焦的SIMION 模拟](#)[期刊论文]-[核电子学与探测技术](#) 2010(5)
2. 周雷. 梁昊. 熊涛. 虞孝麒. 周永钊 [慢正电子寿命谱仪电子学系统原型机研制](#)[期刊论文]-[核技术](#) 2009(9)
3. 周雷. 梁昊. 熊涛. 虞孝麒. 周永钊 [高精度正电子谱仪脉冲调制系统设计](#)[期刊论文]-[核电子学与探测技术](#) 2008(2)
4. 郁伟中. 袁佳平 [正电子慢化体的研究和进展](#)[期刊论文]-[物理](#) 2001(2)
5. 徐燕. 吴艳. 翁惠民. 程宇航 [用慢正电子束测定类金刚石薄膜中的缺陷浓度](#)[期刊论文]-[江南大学学报\(自然科学版\)](#) 2008(5)
6. 吴奕初 [基于捕获的新型正电子束及应用](#)[期刊论文]-[物理学进展](#) 2005(3)
7. 郝传英 [符合多普勒测量系统研制及应用研究](#)[学位论文]博士 2005
8. 徐燕 [金刚石膜及类金刚石膜的慢正电子束研究](#)[学位论文]硕士 2005

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wlxjz199903004.aspx