

综述

离子束诱导电荷显微术的现状与发展趋势

陆荣荣 裘惠源 朱德彰

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 离子束诱导电荷显微术 (IBIC) 是核子微探针显微成像技术的又一新发展,它具有低束流 (fA 量级)、高效率的特点,已被广泛应用于半导体材料和微电子材料研究中。本文简述了离子束诱导电荷显微术 (IBIC) 的原理和实验方法,综述了 IBIC 研究的现状和进展。

关键词 核子微探针 离子束诱导电荷显微术

中图分类号 O571.33

核探针技术从诞生到现在已经有 30 多年的历史,其应用领域从最初的生命科学和地球科学不断发展到 90 年代的材料和微电子学科。核探针技术得到蓬勃发展的主要原因在于一些新的显微成像技术被应用,这些显微成像技术使得核探针除了能够进行微区微量元素分析以外,还能给出物质微区内晶体结构和电子学特性等信息^[1]。离子束诱导电荷显微术 (IBIC) 是一项被较早用于研究半导体和微电子器件特性的核探针技术。IBIC 技术主要是用来揭露半导体或微电子器件覆盖层下面的 pn 结活性区的位置和分布^[2]。90 年代,这项技术出现在英国,此后在美国和日本获得迅速发展,至今,世界上多数核探针实验室使用该技术研究材料的电子学性质。

IBIC 显微术的发展得益于许多研究领域。近 30 多年来,半导体带电粒子探测器的研制和应用为 IBIC 技术的发展积累了丰富的经验。半导体探测器的研究直接涉及到电子学噪声的减小、电荷脉冲高度的测量和刻度以及离子诱导损伤的研究。测量小的离子诱导电荷脉冲的能力主要依赖于高灵敏、低噪声的电子学系统的研制。与 IBIC 技术相类似且较为成熟的技术有 EBIC (利用 keV 电子束作为诱导电荷激发源)、OBIC (利用同步辐射光、激光束作为诱导电荷激发源),它们在 IBIC 相关技术、理论及应用研究等方面发挥了重要的指导作用。D. B. Holt 对不同 IBIC 成像模式和图像产生的理论技术问题进行了较为详细的阐述^[3]。EBIC 和 OBIC 曾被用来研究晶体位错^[4],也被用来作为半导体材料和设备的反向层或耗尽区的成像研究^[5]。IBIC 技术的主要优点在于离子束具有较大的分析深度和穿过表面层时具有较低的散射,从而,在深埋层仍具有较高的空间分辨率,通过离子能量的选择,能有效地提供样品的拓扑信息。D. Angell 首次利用 IBIC 技术研究了离子注入 pn 结引起的损伤问题^[6]。推动 IBIC 技术发展的另一重要应用研究是高能重离子引起微电子设备寄存器状态的单事件翻转 (SEU)^[7,8]。因为 SEU 研究可以对灵敏翻转区进行精确定位,所以它有助于 IBIC 成像技术的发展。另外,由于 MeV 离子能损率和深度分辨率与 IBIC 显微术密切相关,因而背散射谱技术

对 IBIC 来说也是十分重要的。

1 IBIC 技术

1.1 基本原理

MeV 带电粒子传递足够的能量给组成材料的原子,使价带电子向导带移动,留下一具有正电荷性质的空穴,这样就在半导体材料中产生了可移动的载流子。对某一材料来说,产生一对电子空穴对所需的平均能量 ε_{eh} 为一常数,它不依赖于电离辐射的种类。通常 ε_{eh} 为能带间隙的 3 倍,文献[9]—[11]列出了通常遇到的半导体材料的 ε_{eh} 。电离辐射产生的载流子在半导体栅格中自由扩散,如果不存在电场,它们将被俘获和重组,直到所有载流子都被消除。如果材料中存在电场,载流子就会在电场区分开,而电流被外部电路所测得。

IBIC 中载流子的运动分为电场区域内的漂移和电场区域外的扩散。在运动过程中,载流子会受到重组和俘获的影响。对于间接带隙半导体,如 Si,带与带之间的重组依赖于多数载流子浓度的平方值;对于直接带隙半导体,如 GaAs,带与带之间的重组伴随有光子发射,这就是阴极射线致发光(CL)^[12]和离子束诱导发光(IBIL)^[13]的基础。另外,载流子还可能在表面、界面和缺陷处被俘获。对于重离子垂直入射情况,离子辐射产生的等离子柱会导致耗尽区的扩展并由此而形成电荷漏斗现象。由于在电荷漏斗处载流子俘获的几率大大增加,特别是在集成电路存储器中易造成单粒子翻转事件(SEU)的发生,因此该效应已被用于卫星微电子设备 SEU 的实验模拟。

1.2 实验关键点

IBIC 显微术属于低束流核子微探针显微成像和分析技术,通常采用的束流强度为 fA (10^{-15} A) 量级。与 EBIC 实验中的 keV 电子相比,MeV 离子在材料中的电子能损率较高,导致大量的电子、空穴对的产生。和扫描透射离子显微术一样,每个入射离子都能产生较大的瞬时测量信号,这里是电子、空穴对引起的电荷脉冲,它远大于噪声水平。理论和实验表明,采用低束流还可以避免离子束诱导损伤的出现^[14]。另外,低束流可大大减小离子光学象差,提高束流的空间分辨率^[15]。IBIC 技术的另一个关键点在于如何提高检测信号的信噪比,由于样品本身和电子学测量系统带来的噪音信号较大,有可能淹没待测信号,所以实验过程中如何提高电子学探测系统的信噪比是 IBIC 实验能否成功的又一个重要因素。现在常用的一种方法是将电荷灵敏放大器的前级 FET 单元和样品一起装在靶室内的样品架上。为进一步降低样品和 FET 晶体管的热噪声,还要从靶室外引入冷指。

1.3 IBIC 实验方法学

通常 IBIC 实验采用前向离子诱导电荷的几何装置(见图 1),该装置中离子束的入射方向平行于电场方向。对于该几何结构,电场通常由 pn 结(图 1a)或样品表面制作的肖特基势垒(图 1b)提供。微电子设备(图 1a)通常是在衬底上由半导体表面的 pn 结阵列组成,半导体表面上方还有绝缘和金属布线以及较厚的钝化层。对于半导体薄片的位错分析,通常在其表面沉积一层金属层,形成肖特基势垒,以提供样品的耗尽区。为了避免电荷漏斗效应引起的电荷俘获,现在已开始用侧向离子束诱导电荷的方法来研究薄膜材料的电学特性。侧向离子束诱导电荷的实验中,离子束的入射方向垂直于电场方向。以上两种装置除入射束流的方向不同外,样品电极上产生的电荷脉冲都同样经电荷灵敏前置放大器放大,送到成型放大器,最后到达数据获取系统。

实验前应该检查样品的电子学连接是否正确。将样品放置靶室中,和靶室的同轴电缆引

出线相连,用示波器检查主放大器的信号,观察噪音信号的大小。如果噪音信号比较大,可能因为靶室屏蔽或电子学连接错误等原因。进一步可以使用 α 粒子放射源(如 ^{241}Am)来检查信噪比。很多半导体样品如硅锗探测器和 CVD 金刚石等对信噪比的要求较高,这时应该考虑将电荷灵敏前置放大器的 FET 级放入靶室中以减少由于信号电缆过长而引起的分布电容噪音。

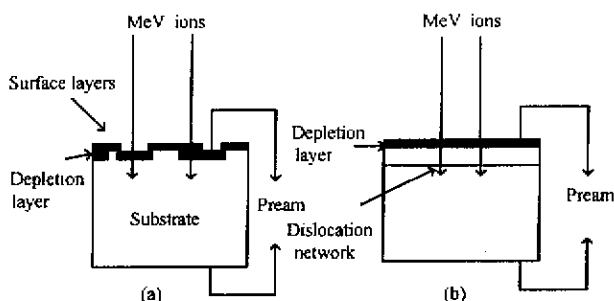


图1 前向 IBIC 的实验几何装置图

Fig. 1 The experimental setup of frontal IBIC techniques

为了减少束流对样品的损伤,IBIC 需要 10^{-15} 量级的低束流。实验前需要做 1000 目铜网的扫描透射离子图谱(STIM),因为 STIM 实验需要同样的低束流。先将 1000 目的铜网移到束流方向,启动束流扫描程序,使得束流在某一范围内进行扫描。然后将 Au(Si)面垒探测器移到和束流方向成 30° 角处,调节加速器面板上的速度选择器以及核探针管道物孔和光阑孔的大小,观察与 Au(Si)相连的计数率表,使得 STIM 实验的透射离子计数率为每秒 500—1000 个(流强为 fA 级)。实验中如果计数率很大,应立即挡住束流,以免损伤探测器。随后朝束流入射方向慢慢移动探测器,同时保持计数率表的计数在 500—1000 范围内,直至探测器和束流方向成 0° 。最后可以将被分析样品的感兴趣区域移到束流方向。

2 IBIC 的理论分析

2.1 载流子的产生区

入射离子在样品中具有长的射程,因此 IBIC 可以对样品覆盖层下的区域进行成像。对样品深层成像的能力主要依赖于入射离子低的散射。图 2 给出了 10 keV 电子(a)和 3 MeV 质子(b)在 Si 材料中产生载流子区域的示意图^[16]。其中 r 表示离子的横向离散距离, z 为离子穿透深度,图中显示了它们相对于电子射程 R_e 和质子射程 R_i 的二维分布情况,数字 10、5、1 分别表示产生载流子浓度等高线的强度。10keV 电子在 Si 中的射程为 $2\mu\text{m}$,大多数载流子产生在由表面至 $1\mu\text{m}$ 深的范围内(图中数字 5 等高线与坐标轴围成的区域, $z/R_e = 0.5$),此时产生的载流子浓度区域的形状近似呈球形。EBIC 的空间分辨率与载流子产生区的形状密切相关,而与扩散长度无关。由于电子束在样品内部产生载流子区域的横向距离离散较大,进入样品后,其空间分辨率很难保持和表面处的一样。虽然可以通过降低电子束能量来减小载流子产生区域的横向离散距离,但这将减小分析深度。因此 EBIC 对深埋层区样品无法产生高空间分辨率的图象。3 MeV 质子在 Si 中的射程为 $85\mu\text{m}$,它产生载流子的深度远比 10keV 电子产生载流子的深度大,另外样品顶层几个微米中的横向离散距离很小,它主要集中在射程的末

端,因此产生的载流子区域的形状类似于泪珠形。通常在 $1\mu\text{m}$ 深处, 3MeV 质子的 IBIC 空间分辨率好于 10keV 电子的 EBIC 空间分辨率的 10 倍。

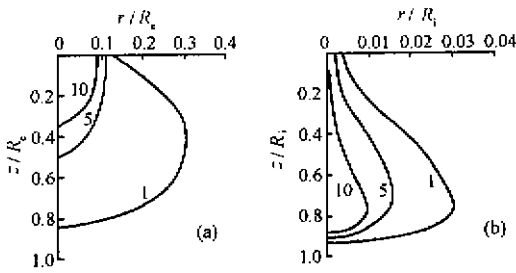


图 2 10keV 电子(a)和 3MeV 质子(b)在 Si 中产生载流子区域的形状
Fig.2 Carrier generation contours for 10keV and 3MeV ^1H ions in silicon

2.2 电荷脉冲高度

IBIC 实验类似于 RBS 能谱的测量过程,只不过样品本身就是探测器,因此通常用 keV 来表示离子激发的脉冲高度单位。前放输出的电压幅度可表示为:

$$V_0 = 1000Pe/E_{eh}C \tag{1}$$

式中, E_{eh} 为产生一对正负电子所需要的能量, C 为前置放大器的反馈电容。 P 为高能离子在样品中用于产生 e - h 的能量,单位为 keV,其物理意义为入射离子的能量损失有多少贡献于产生 e - h 对,也即 IBIC 实验中产生信号的脉冲高度。 P 的大小为:

$$P = \int_0^{z_d} \frac{dE}{dz} dz + \int_{z_d}^{R_i} \frac{dE}{dz} \exp \left[- \left(\frac{z - z_d}{L} \right) \right] dz \tag{2}$$

式中, L 为载流子在样品中的扩散长度, z_d 为耗尽层宽度, dE/dz 为入射离子阻止本领, R_i 为入射离子射程。式(2)中第一项为耗尽层中入射离子能量损失对载流子的贡献大小,第二项来自从基体扩散至耗尽层的载流子的贡献。式(2)可以使用数值计算方法并结合实验测出的电荷脉冲高度来推算出载流子在样品中的扩散长度。

另外,实验结果还常以电荷收集效率这一物理参数来表示。所谓电荷收集效率就是样品电极上收集到的电荷数除以样品中产生的电子、空穴对数。通常认为硅面垒探测器的电荷收集效率为 100%。在相同的实验条件下,被研究的样品测得的 IBIC 实验结果与硅面垒探测器的实验结果相比较,就可以得到所研究样品的收集效率情况。

由于核探针数据系统记录下实验过程中所有的事件信息,因此实验结束后,可以对所获取的数据重新排序^[17]。通常情况下是获得某一电荷脉冲高度的分布图,即电荷收集效率(CCE)图,也可以得到扫描区域内不同像素点的脉冲高度,从而作出某一方向 CCE 线扫描分布图。所获取的数据结合半导体理论可以得出样品微区的电子学特性。

3 IBIC 的现状与发展趋势

3.1 着重于两个应用领域

3.1.1 半导体领域 IBIC 显微术是核探针在半导体科学中应用的主要手段,它能观测半导体中电荷的收集效率、载流子迁移率和自由程长度等参数在微米区域内的变化。对于一些新

型半导体材料,电荷传输和收集的物理机制尚不清楚,IBIC 显微术为研究这些机制提供了直接观察的方法,为新材料研究和新器件设计提供有效的测试手段。

多晶硅半导体是制造太阳能电池的理想材料,它的一个重要指标是电荷收集效率^[18]。为了研究电荷收集效率与硅晶粒的大小、取向、边界复合效应、杂质和缺陷分布等性质的关系,实验中沿着电场方向和垂直于电场方向引入微米离子束,分别研究这两种情况下 IBIC 在材料中的分布,并将测量结果与计算机模拟的分布进行比较,从而推算出该材料的静态和动态的电学参数。

GaAs 是 III - V 族化合物半导体材料,其禁带宽度大,可用作高温和大功率器件,由于它具有高的电子迁移率,可作高频、高速器件。因此 GaAs 是当前运用较广泛的半导体化合物材料,主要应用于半导体激光器和发光二极管等。GaAs 材料的电荷收集效率影响着器件的性能。利用 IBIC 技术可以研究不同偏压和放大器成形时间条件下电荷收集效率的变化情况,同时得出扫描 IBIC 二维分布图^[19]。

使用类似的方法,很多科研人员还研究了 CVD 人造金刚石,碲锌镉(CZT)室温探测器,和 SiC 等新型半导体材料的电子学特性^[20,21]和材料改性的情况。

3.1.2 微电子领域 IBIC 技术最初应用于微电子领域主要是成像一些集成电路(如 DRAM)的电荷收集效率图谱。IBIC 技术能揭露微电子器件覆盖层下面 pn 结活性区的位置、状态和分布,它能够给出 DRAM 和 SRAM 等多层电路 pn 结构的三维分布图。在国外,应用这项技术来研究的微电子器件有 SOI 器件、CMOS - FET 器件和肖特基器件等^[22,23]。

近年来,人们重视单粒子对器件性能的影响,用单粒子来模拟宇宙辐射对器件性能的影响。将 IBIC 显微术和单离子轰击装置结合起来,可以检验和比较这些新材料和新电路的抗辐射性能,将同时获得集成电路 pn 结状态分布和 IBIC 电荷分布的三维结构图。感生电荷成像技术揭露超大规模集成电路(ULSI)器件 pn 活性区的微观结构,测定指定区域 IBIC 电流的瞬态特性。从而引起人们研究单粒子行为的热潮^[7,8]。在核探针基础上建立起来的单粒子轰击装置是研究超大规模集成电路抗自然辐射的单事件免疫能力(SEU)的重要工具。

3.2 结合多种核分析手段,开展综合应用研究

IBIC 技术与其它核分析手段相结合,可以研究前沿热点材料的综合特性。如太阳能薄膜电池,除用 IBIC 技术研究其电学分布特性外,还可以结合 PIXE 技术,研究晶界附近杂质的分布,以搞清杂质对电学特性的影响^[18]。IBIC 技术和离子诱导发光 IL 技术相结合,可以研究样品中辐射跃迁的物理机制^[24]。

3.3 发展时间分辨的 IBIC 技术

利用二次电子成像技术或扫描透射离子显微术与 IBIC 技术相符合,可以实时研究大规模集成电路的抗辐射能力^[25]。此技术是 IBIC 技术的又一新动向。

4 结束语

离子束诱导电荷显微术(IBIC)是一项崭新的高能离子显微术,它代表着核子微探针发展的一个非常重要的台阶。我们高兴地看到我国也已具备开展 IBIC 研究的基础。中国科学院上海原子核研究所于 1990 年建立了国际一流水平的核子微探针研究基地^[17],并在诸多领域中开展了卓有成效的微束 PIXE 和 RBS 的分析研究。目前正在国家自然科学基金资助下,开展国际前沿学科 IBIC 的研究。

参 考 文 献

- 1 朱节清. 核技术, 1997, **20**(10) 536—640
ZHU Jieqing. Nucl Tech, 1997, **20**(10) 536—640
- 2 Breese M B H. J Appl Phys, 1993, **74**(6) 3789—3799
- 3 Holt D B, Muir M D, Grant P R, *et al.* Quantitative Scanning Electron Microscopy. London :Academic Press, 1974. 22—24
- 4 Donolato C. Appl Phys Lett, 1987, **34** 80—86
- 5 Galloway K F, Leedy K O, Keery W J. IEEE Trans Parts Hybrids Packag, 1976, **12** 231—238
- 6 Angell D, Marsh B B, Cue N, *et al.* Nucl Instr Meth, 1989, **B44** 172—178
- 7 Kamiya T, Sakai T, Naitoh Y, *et al.* Nucl Instr Meth, 1999, **B158** 255—259
- 8 McDaniel F D, Guo B N, Renfrow S N, *et al.* Nucl Instr Meth, 1999, **B158** 264—269
- 9 Bertolini G, Coche A, eds. Semiconductor Detectors, North - Holland. Amsterdam :Elsevier Science B. V. , 1968. 474—477
- 10 England J B A. Techniques in Nuclear Structure Physics. London :Macmillan Press, 1974. 76—82
- 11 Sze S M. Physics of Semiconductor Devices. New York :Oxford University Press, 1978. 212—230
- 12 Lumb M D. Luminescence Spectroscopy. London :Academic Press, 1978. 1—40
- 13 Yang C, Larsson N P O, Swietlicki E, *et al.* Nucl Instr Meth, 1993, **B77** 188—194
- 14 Breese M B H, Jamieson D N, King P J C. Materials Analysis Using Nuclear Microprobe. New York :John Wiley & Sons, INC, 1996. 81—138
- 15 Lint V A J, Flanagan T M, Leadon R E, *et al.* Mechanisms of Radiation effects in electronic materials, New York :Wiley, 1980. 336—340
- 16 Breese M B H, Jamieson D N, King P J C. Materials Analysis Using Nuclear Microprobe, New York :John Wiley & Sons, INC, 1996. 247—285
- 17 朱节清, 李民乾, 盛康龙, 等. 核技术, 1991, **14**(9) 525—531
ZHU Jieqing, LI Mianqian, SHENG Kanglong, *et al.* Nucl Tech, 1991, **14**(9) 525—531
- 18 Witham L C G, Jamieson D N, Bardos R A, *et al.* Nucl Instr Meth, 1998, **B136—138** 1361—1365
- 19 Vittone E, Fizzotti F, Mirri K, *et al.* Nucl Instr Meth, 1999, **B158** 470—475
- 20 Beckman D R, Saint A, Gonon P, *et al.* Nucl Instr Meth, 1997, **B130** 518—523
- 21 LU Rongrong, Manfredotti C, Fizzotti F, *et al.* Mat Res Bull, 2001, **36** 47—55
- 22 Breese M B H, Saint A, Sexton F W, *et al.* J Appl Phys, 1995, **77**(8) 3734—3741
- 23 Breese M B H, Grime G W, Watt F, *et al.* J Appl Phys, 1992, **72**(6) 2097—2103
- 24 Vittone E, Ricciardina C, Logiudice A, *et al.* Nucl Instr Meth, 2001, **B181** 349—353
- 25 Guo B N, Bouanani M, Renfrow S N, *et al.* Nucl Instr Meth, 2001, **B181** 315—319

The status and new trends of ion beam induced charge technique

LU Rongrong QIU Huiyuan ZHU Dezhang

(Shanghai Institute of Nuclear Research, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract

Ion beam induced charge technique (IBIC) with low beam current (fA level) and high efficiency is a new development of nuclear microscopy. It has been widely applied to the fields of semiconductor and microelectronic materials. The principle and the experimental method of the IBIC technique were described and reviewed its status and new trends were reviewed.

Key words Nuclear microscopy, Ion beam induced charge

CLC O571.33