

关于半导体材料的微探针分析

J. C. McCallum, C. D. McKenzie

摘要: 本文描述了墨尔本大学的核微探针。由于新的改进已得到了 $1\ \mu\text{m}$ 大的束斑, 讨论了这个探针在半导体材料中的应用, 特别是讨论了微区沟道的使用和图形显示。

前言

近十多年来, 有很多文章都评述了核粒子微探针的发展及应用。1975—1976年间, 在墨尔本大学物理学院的低能核物理实验室安装成功一条好的束流线。利用实验室现有的四极透镜, 微探针于1976年开始运转, 其束斑小于 $10\ \mu\text{m}$ 。后来Legger等人继续研制, 并在1981年报导了这个系统的最新进展。今年获得 $1\ \mu\text{m}$ 的束斑。

在不断改进这个装置的同时, 还开展了若干研究项目。其中主要有医学, 植物学, 地质学及半导体材料等。

墨尔本的微探针

本文只作简单的描述(详细的描述可查阅有关文献)。离子由一个直立式的 5MeV 珠链式静电加速器提供, 并通过 90° 分析磁铁偏转。利用旋转磁体可将水平束流引向五条束流线。

图1示意性地给出了微探针束流线的主要部份。使用的入射单能粒子通常是质子或氦离子, 能量 $2\text{—}3\text{MeV}$, 还给出了离子光学系统的圆形光阑。目前使用的孔径 $10\text{—}300\ \mu\text{m}$ 。将束流进一步用孔径为 $0.25\text{—}4\text{mm}$ 的光阑准直, 使得只有旁轴离子才可以通过。最小的孔径将使束斑减至最小, 但会损失大量的束流。因此有必要选一折衷方案。

最后, 束流用一组四极透镜聚焦。这些

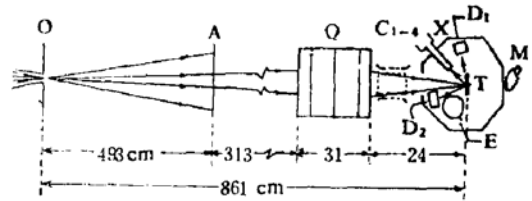


图1 微探针示意图(没按比例)

- O: 物光阑 ($10\text{—}300\ \mu\text{m}$)
- D₁和D₂: Si面垒探测器
- A: 孔径光阑 ($0.25\text{—}4\text{mm}$)
- X: Si(Li)x射线探测器
- C₁₋₄: 偏转线圈
- Z: 二次电子探测器
- T: 靶(位置和方向可以精确调节)
- M: 显微镜

透镜通常都按苏联方式安装。正如哈威尔的Cookson等人最初的聚焦微探针装置那样。这个透镜可以在一个严格准直的轨道上移动, 从而可对各种透镜系统进行研究。

接着, 还用两对偏转线圈提供互相垂直的正交磁场。这些线圈用互相独立的三角波形发生器激励, 其频率可达 20kHz 能使束流在矩形靶上均匀地扫描, 其最大面积约为 $1\times 1\text{mm}$ 。扫描的目的是要得到元素的分布并使束流的能量分散, 以减少靶的损伤。

靶子可以在x—y方向移动, 其精度可达微米。它还可以绕两个互相垂直的轴旋转, 其精度决定于轴的垂直程度。利用安装在后面的显微镜可以对薄靶或放在透明衬底上的那些靶进行观察。同样, 还可以方便地把束流聚焦到放在样品平面内的玻璃板上。

图1给出一个适于厚靶的典型的探测器

系统。用它测定x射线，二次电子和卢瑟福背散射粒子以及核反应产物等。对于薄靶(比如生物组织)，常将面垒探测器放在正面，只须利用正向弹性散射就可以测定低Z元素，如氢和碳等。

对痕量元素的探测需要一台清洁的超高真空系统。而且制靶也须在一个清洁的房间中进行。利用一台在线PDP11/4计算机，墨尔本微探针可对元素分布进行分析。每当有一个探测事件出现，立即就能被鉴别出来。而且它的能量和在x、y方向的偏转都可以立即得到。这些信息以及从电荷数字器来的脉冲信号均可逐个地记录在磁带上。于是它可以在很短的时间内检查出靶元素的损伤。

磁带上的信息也可以用不同的方法显示。例如：只要我们把x射线能量相同的所有事件调出来，就可以得到这种元素的分布图。另外，也可将一部份信息用存贮器CRO进行显示，而且还可以对贮存的数据进行鉴别。显示某一元素或所有事件都可对靶材料进行精确分析。如果利用二次电子则更为有效。

最新进展

今年探针的性能又有了进一步的改善。在如何鉴别和清除机械振动以及杂散交流场方面作了很大努力。目前可将直径为 $10\mu\text{m}$ 的光阑放在任一位置。其结果可使束斑的直径从 $3\mu\text{m}$ 减小到 $1\mu\text{m}$ 。当然这时的束流只有 100pA 。束斑大小的测量是存在的另一个问题。因为光学方法不能测量这样小的束斑。这儿采用的办法是使束流穿过一陡峭的边缘进行扫描。再通过所到的计数率来导出束斑的大小。

一个有价值的进展是在靶室中放了一个二次电子探测器。利用束流扫描再利用从靶发射出来的x射线或散射粒子即可得到物体的像。而这个像又可存在存贮器CRO内部。但是，由于二次电子很强，样品的像可以很

快得到。利用高的扫描频率，就可以用CRO把像显示出来。在定位靶中常常是很方便的。用二次电子和x射线获得图象不同，二次电子图象对物理特性，如边缘及表面很灵敏。

在半导体中的应用

利用He离子进行背散射和沟道分析是一种很有用的方法，而且这种方法已十分完善。用它们可以测量半导体中表面附近的杂质和晶格损伤的分布，并且可以给出杂质在晶格中的位置(填隙式或替代式)。测量小出射角的散射粒子可以得到好的深度分辨率。图1中的探测器 D_1 就是作这个用的。近十年来，利用一般加速器所提供的束流(直径为 1mm)已得到了很多结果。微束分析很容易给出微型半导体器件的微观尺寸，尽管这些器件看来很小，但对于微束来说已经是足够大的了。

这种工作具有某些特性，比如靶子常常是厚的，且不透明，因此不适于用显微背面观察作定位分析。有时，我们使用了具有长工作距离的正面显微观察。如果利用二次电子则很容易获得靶子的像。

结果表明，在我们的聚焦和扫描条件下，可以得到好的沟道粒子(用能量为 2MeV 的He)要求束流发散必须小于临界角，对于Si来说沿主轴的临界角约为 0.5° 。由于微束的能量密度大，如果不扫描，晶格损伤会很严重。使用下面的方法可使损伤减小：①束斑不要太小，能满足实验要求就行了。②束流扫描，尽可能使能量分散。③如果容许的话，可在某个方向上让束流散焦。④选择最佳的探测效率。

一般说来，同PIXE谱相比，要使RBS的收集效率比较大，则要求束流比PIXE所需要的束流强($>1\text{mA}$)。考虑到损伤，在半导体的微束分析中至今也没有使用过最小束斑。

多晶硅微电阻

对于各种集成电路，常用的方法是利用离子掺杂来得到具有微观结构的多晶硅。这儿我们介绍一下在一定注入和退火条件下用锑注入多晶硅来制成功微电阻的初步结果。图2插图给出了我们研究的典型结构。这个结构是使用微电路制备方法得到的。只须注入浓度 $3 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 的Sb，就可以得到我们需要的电阻器。为保证有良好的电接触，触点固定在电阻器两端，并用小角度(30°)，注入浓度为 $3 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 的Sb。离子在触点和电阻区的深度分布对电特性有重要影响。对于这种尺寸的器件，使用一般的离子束分析是不行的。而使用 He^+ 微束探针则是一个很好的方法。

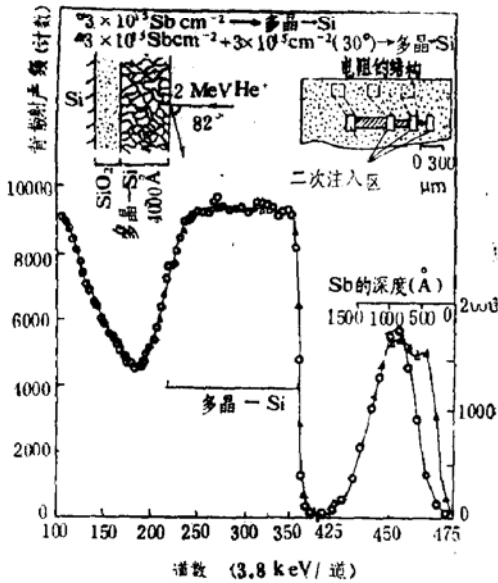


图2 接触区(两次注入)和电阻区(一次注入)中锑的RBS谱。

图2中的RBS谱是使用 $6 \mu\text{m}$ 的 He^+ 束束斑，分别对电接触区和电阻区扫描得到的。由这个谱可以求出多晶Si的总厚度而且可以看出在接触区表面附近有较高的浓度。Sb离子越集中在表面，电接触性能越好。

沟道对比显微术

图3和图4给出了一种有趣的方法。沿Si

[100]注入浓度为 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 的锑，使表面附近的单晶Si产生损伤。再用CW激光束对宽度为 $40 \mu\text{m}$ 的长条形区域退火。然后，将 He^+ 束对准样品的沟道(束斑 $12 \times 15 \mu\text{m}^2$)。并在 $180 \times 380 \text{mm}^2$ 的面积上扫描。再对背散射离子进行分析。图3中计数高的能谱是由区域2得到的。下面的能谱是由激光退过火的区域1得到的。计数低是由于激光退火使晶体再结晶，从而增强了沟道效应的缘故。图4(a)和4(b)给出了不同的区域及不同区域的计数率，见图注。该方法可以测出激光退火后材料的再结晶过程。这个过程可用高温生长动力学给予解释。

多晶硅的沟道对比显微图形

目前我们已开始用沟道对比显微术研究锑掺杂的大晶粒($>1 \mu\text{m}$)多晶Si的退火性能。用这个方法可以确定晶粒边界。图5给出了锑注入浓度为 $3 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ ， 650°C 退火半小时的多晶Si的照片。有趣的是，在晶粒下面出现了亚表面结构。

在低温退火下我们似乎没有发现注入离子向晶粒边界移动。但是，在今后的工作中我们打算对高温退火进行研究，也许可能会出现上述迁移现象。

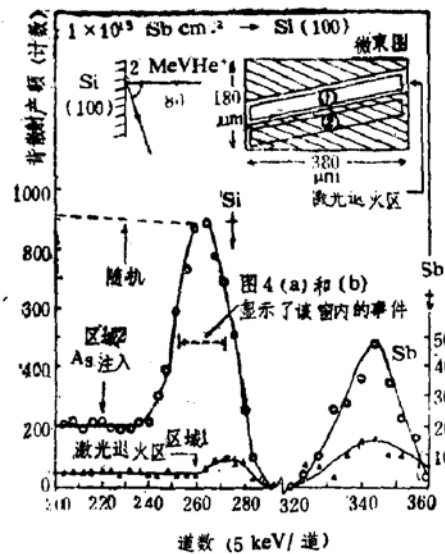


图3 锑掺杂，再用激光退火后的硅沟道谱。

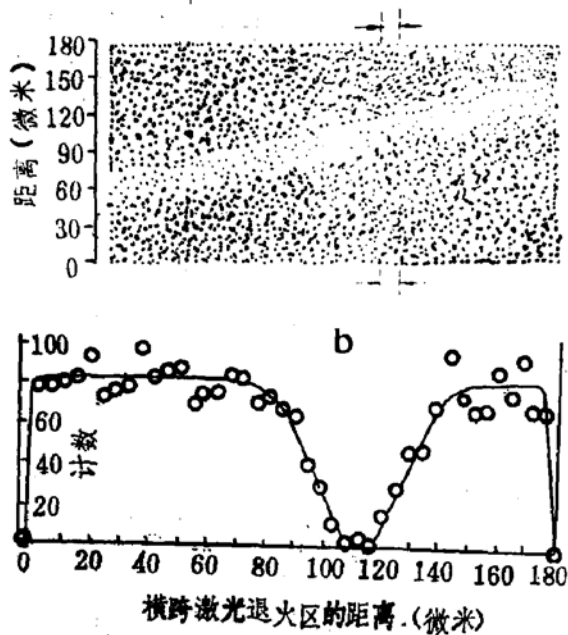


图4: (a) 损伤层和激光退火后的显微照片。损伤区与图3的上面一条曲线对应。低密度区域是用激光退火后得到的。(b) 与图4(a)箭头所指示的窄条相对应, 将微束沿此窄条进行扫描所得到的RBS谱。

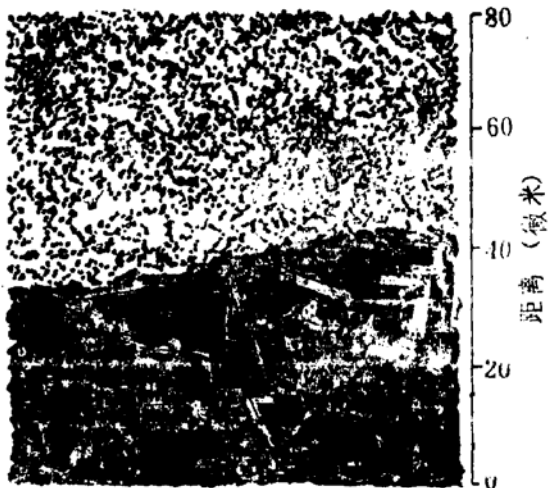


图5 多晶Si晶粒边界的沟道对比显微图。

参考文献(略)

(邵明珠译自IEEE NS-30, No2,
1983, 罗诗裕校)