

例如,在等离子体中可以存在各种各样的静电波和电磁波,其数目及形态之多远超过普通介质中的波。这些波不仅可由外界激发,而且在一定条件下可自发增长起来,即存在各种不稳定性,而各种不稳定性可导致等离子体约束的破坏,或者使电阻、扩散、热导等输运率异常增加,即出现所谓“反常”输运等。又如,等离子体中粒子间碰撞的性质以及(由碰撞决定的)经典输运的定标规律(随温度等的变化规律)也与普通气体很不相同;而即使在很稀薄的“无碰撞”等离子体中,波与粒子间的共振相互作用仍可使波与粒子交换能量,导致波的阻尼(或增长),此即朗道阻尼(增长)机制,是等离子体的一个很重要的性质。总之,等离子体的性质是复杂而又丰富多采的,但由于篇幅关系,在这个简短的介绍中不能一一涉及了。

等离子体物理的研究已有一百多年的历史。

近二、三十年来,由于受控热核反应及空间物理等研究的需要和促进,等离子体物理有了很大的发展。因为还有很多问题、很多“反常”现象有待解决,所以又可以说它是一门有前途的新兴学科。在等离子体物理研究中,几乎所有经典物理的知识都将用到,在某些问题中也将用到原子物理、量子力学、相对论等知识;至于数学知识,高等数学、数理方程及计算机技术等也是必须的。因此,这也是一门综合性的学科。

参 考 文 献

- [1] F. F. 陈著, 等离子体物理学导论, 人民教育出版社, (1980).
- [2] 徐家骛、金尚亮, 等离子体物理学, 原子能出版社, (1981).
- [3] L. A. Artsimovich, Controlled Thermonuclear Reactions, Oliver & Boyd Ltd, (1964).

新实验技术在材料研究中的应用讲座

第十三讲 扫描超声显微镜在材料科学上的应用

殷 庆 瑞

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

G. A. D. Briggs

(英国牛津大学冶金、材料系)

一、引 言

大约四十年以前,苏联科学家 S. T. Sokolov 首先提出了超声显微镜的概念,那时由于技术条件的限制,不能制造出分辨率能与光学显微镜(光镜)相比较的超声显微镜(声镜)。随着微波声学、电子学、薄膜技术的发展,到了七十年代,又引起了人们对发展声镜的兴趣。其中美国的 Quate 教授和他的学生 Lemons 做了非常

出色的、开创性的工作。研制了世界上第一台能工作的机械扫描声镜。此后,在英国、法国、日本也相继开展了这方面的工作。中国科学院声学研究所也在 1980 年建立了国内第一台声镜实验装置,并取得了相当清晰的生物组织的图像^[1,2],受到了国际同行的称赞。

近年来,声镜之所以受到各国科学家的重视以及得到迅速的发展,主要是因为它的成象机理与通常的光镜不同。光镜成象主要取决于物质的光折射、光密度和相漂移,是物质的光学

象。而声镜成象是根据物质本身的质量、密度、弹性、粘滞性和热弹性,它是物质的声学象(又称弹性象)。往往同一种物质的不同状态引起光学性能变化并不大,而声学性能变化却很大^[4],因而可以得到物质因状态变化而产生微观结构变化的信息。另外,声波具有穿透不透明物体的能力,除了能定量地研究物质表面微小区域的弹性性质以外,还能探测表面以下的弹性差异。因此,它在材料科学(包括体材料和薄膜材料)、生物医药以及半导体器件和集成电路质量控制等方面的应用,引起人们越来越广泛的兴趣。本文就扫描声镜在材料科学上的应用提供一些实验证据。

二、实验和结果

实验所使用的是一台反射式声镜,其工作原理和实验装置类似于 Quate-Lemons 的形式^[4]。简单说来,整个系统包括三部分:(1)产生高频声波;(2)聚焦高频声波,并人射到待观察的样品上,然后收集来自样品的反射声波;(3)把带有信息的反射声波转换成电脉冲并进行显示。用 ZnO 薄膜作高频换能器,把它溅结在蓝宝石声透镜的一端,透镜的另一端是一个曲率半径很小的凹面。它把平面声波聚焦起来,入射到样品上,并把反射声波传送到换能器。耦合介质用 60°C 左右水,用机械式扫描和 TV 监视器作显示,扫描一幅完整的图象约需 10 秒钟。系统的工作频率约 730MHz,表面分辨率为 2 μm 。下面将按材料类型说明它们的实验结果。

1. 陶瓷

(1) 陶瓷晶粒结构

一般说来,用光镜观察多晶材料的晶粒时,必须先进行腐蚀,而用声镜作晶粒成象时,不需这样的手续。一块不大的陶瓷样品由若干个晶粒组成,每个晶粒的取向是不同的,这种取向的不一致性引起了弹性的各向异性,因此不同晶粒反射声信号的强度就不一样。如图 1 所示,晶粒分布、形状、晶粒取向的差别可以被看出来,

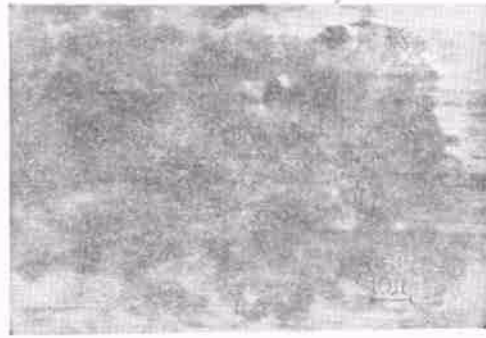


图 1 陶瓷晶粒结构的声学象

晶粒尺寸约为 8—10 μm ,与用光镜测得的数值吻合。与用通常的光镜所得到的无反差的光学象相比,声镜成象能提供更多的信息,显示了弹性成象的特点。

除了可以看出晶粒之外,从声象上还可以看出晶粒之间有个过渡区,过渡区的声强度与相邻晶粒的不同,说明它们之间的弹性性能有差别。因为材料密度是个标量因子,它不随晶粒的取向而变化,所以实际上是陶瓷各个晶粒的声速与过渡区域的声速有差别,这种过渡区域反映了晶界的存在。用声镜有可能定量地测定每个独立晶粒的弹性性能和结晶取向,在这方面已经有人开展了一些工作^[5]。

众所周知,光仅能通过透明物质,而不能透过即使是很薄的不透明膜。为了检验声镜的检测能力,用蒸有 Cr-Au 电极的陶瓷作样品,相当于在样品表面涂上了一层不透明金属膜,电极厚度为 5000 Å,分别用光镜和声镜对样品相同区域进行成象。图 2(a)是光学象,(b)是声学象。由于电极表面相当平滑,对光线有强烈的反射,且电极不透明,所以光学象上几乎一片光亮,看不出什么信息。而声波对不透明物质有一定的穿透能力,可以在声学象上给人们展示了在电极下面有陶瓷晶粒的信息。但在光学象的底部有一条不规则的略呈深色的带形图案,这是样品的另一面电极。由于样品本身是透明的,所以在光学象上能显示出来,说明样品两面电极不重合,而在声学象上则不可见。由此可见,光镜和声镜可以相互补充,相互验证,这样就能使人们得到更加完整的信息。

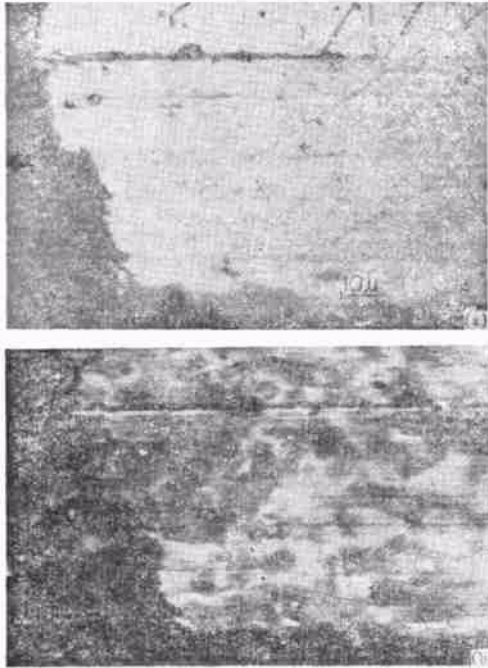


图 2

(a) 陶瓷表面涂有 Cr-Au 电极的光学象；(b) 陶瓷表面涂有 Cr-Au 电极的声学象

(2) 缺陷检测

我们选择了具有某些特征缺陷的陶瓷作为试样,用光镜和声镜对样品成象,并且都是聚焦在样品表面上,图 3(a)是光学象,(b)是声学象。样品表面的缺陷在两张象上都能显示出来,这说明声镜同样具有揭示缺陷的能力。但声学象的对比度比光学象的对比度要高得多。声学象左上角有某些略呈椭圆形的亮点,这是一些在样品亚表面上的缺陷,从缺陷上反射的声波与表面反射声波的叠加形成了这些亮点,它们在声学象上富有立体感。在光学象上虽也能显示出来,但它不象声学象那样显而易见。某些缺陷,如箭头所示,在声学象上被揭示得很清楚,而在光学象上则隐约可见或比较模糊,由此看出声学象确实有它的特点。

在另一块陶瓷试样上,我们进行了同样的工作,这块样品的缺陷密度比较高,是拍摄声学象的理想试样。声学象如图 4 所示。由图 4 看出,表面的缺陷、气孔显示得十分清楚,立体感之强,在光学象上少见。表面的某些微划痕也

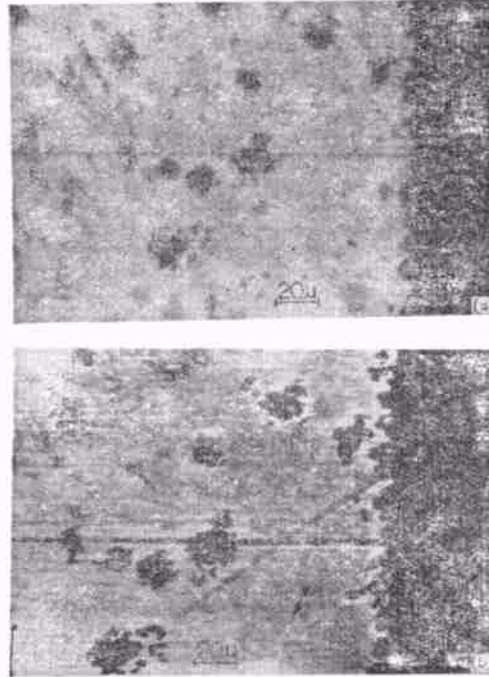


图 3

(a) 陶瓷缺陷的光学象；(b) 陶瓷缺陷的声学象(样品 I)

清晰可见,这可能是在冷加工样品过程中引起的。

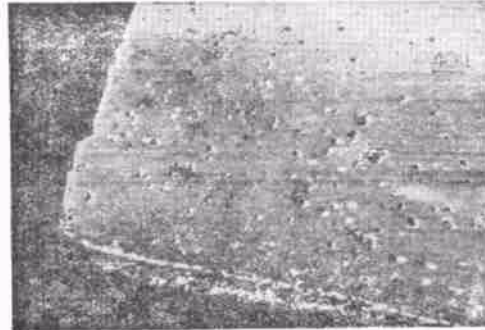


图 4 陶瓷缺陷、气孔的声学象(样品 II)

2. 半导体器件和集成电路试样

图 5(a),(b)分别是 GaP 二极管的声学象和光学象。图中圆圈以内除 GaP 以外,其余部分为 Si_3N_4 材料覆盖。十字交叉部分是金属铝,金属铝上的缺陷在图 5(b)上显而易见,而在图 5(a)上则根本看不见,虽然光学象的放大倍数比声学象的低,但不影响缺陷出现在光学象上。

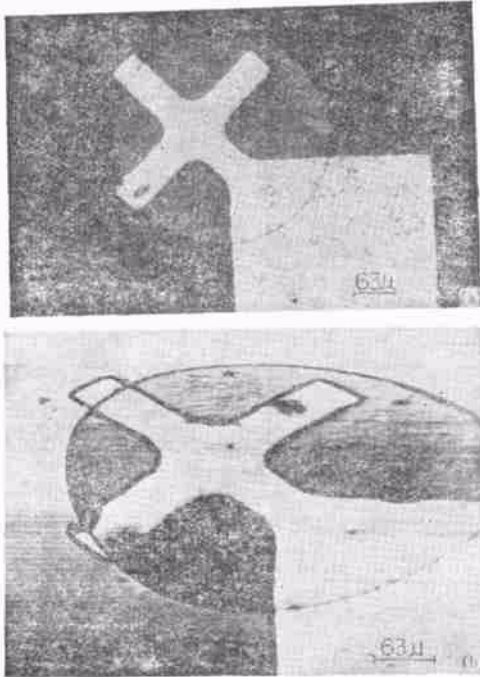


图 5

(a) GaP 二极管的光学象；(b) GaP 二极管的声学象

图 6 是一部分集成电路的声学象，图上衬底与金属线分得很清楚，不同金属连线之间的层次也很分明，从声学象上并没有发现表层金属线以及次层金属线有任何断裂现象，如有的话，按理是不难发现的。这对于半导体器件和集成电路生产过程中的质量控制将有重要的意义。

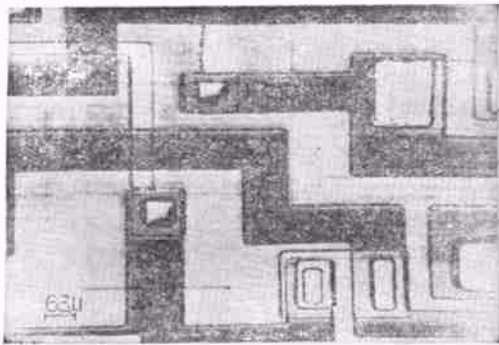


图 6 部分集成电路声学象

3. 合金材料

一般来说，合金材料的添加物与基体的弹性性能往往是不同的，这种差别为声成像提供了有利条件。图 7 是以银为基体与氧化过的

物理

CdO 粒子组合形成合金的声学象。由图可以看出，CdO 粒子在母体里的分布情况以及粒子尺寸的大小，右上角一块较大的黑斑很可能是 CdO 粒子的集聚。

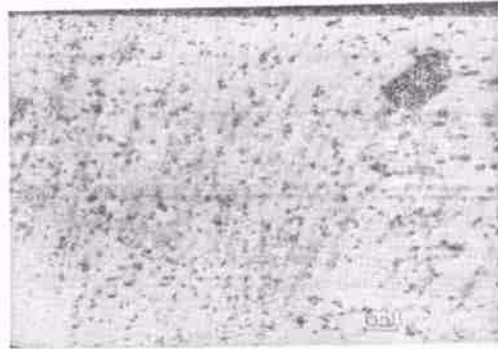


图 7 以银为基体与 CdO 粒子组合形成合金的声学象

图 8 所示的是含有大量杂质的一种钢材的声学象，与图 7 中 CdO 粒子在母体中的分布相比较，这种杂质在钢材内的分布是不均匀的，但这种杂质的分布情况在未经腐蚀的样品上用光学方法则不易观察到(这里未显示光学象)。

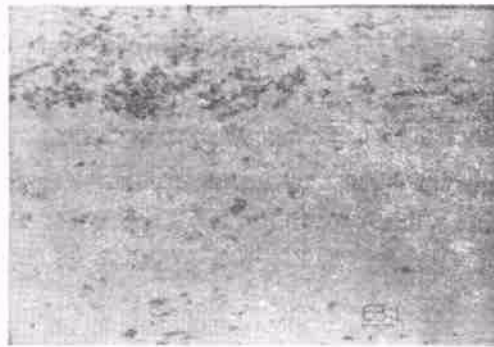


图 8 钢材内含有杂质的声学象

钢在氮化过程中，样品表面会形成压缩应力，当样品再承受张应力时会产生微裂纹，在声学象上可以看得很清楚，目前不少声镜工作者，对于用声镜能否观察到固体材料的应力集中区很感兴趣，因为这在断裂力学的研究当中将是很 有意义的。

虽然声镜问世还不久，但声镜的潜力以及声象的特点已经显示出来。随着它的不断发展，在不远的将来，它会与光学显微镜和扫描电

(下转第 211 页)