

激光波长对 SOI 激光结晶机理的影响

蒋锡平 鲍希茂 华雪梅

(南京大学物理系, 210008)

提要: 本文用两种波长不同的激光——Ar⁺激光和CO₂激光, 对以石英为衬底的a-Si SOI进行了激光结晶。两者的结晶机理不同, 得到了不同的结晶形貌。

关键词: 激光结晶, SOI 结构, 非晶硅, 外延生长

Effect of laser wavelength on laser crystallization mechanism of a-Si SOI

Jiang Xiping, Bao Ximao, Hua Xuemei

(Department of Physics, Nanjing University, Nanjing)

Abstract: Two lasers with different wavelengths—the argon laser and CO₂ laser have been used for laser crystallization of a-Si SOI. Using the argon laser we have a direct heating laser crystallization, while for CO₂ laser we have an indirect heating laser crystallization. The crystallization mechanisms for both cases are different and different topographies are obtained.

Key words: laser crystallization, SOI structure, amorphous silicon, epitaxial growth

一、引 言

SOI(Silicon on Insulator)作为一种新型结构材料,^[1]对发展新型器件有重要意义。由于不同的应用目的,使用的衬底材料也不同。最常用的是高温氧化硅和石英等衬底。在衬底上淀积了多晶(或非晶)硅后,可用不同的方法进行结晶。其中,激光结晶时衬底温度低,可用于多层集成电路,能做选区结晶,所以倍受重视^[1,2]。

不同波长的激光与各种样品的相互作用不同,决定了激光结晶机理的差异。例如,对于淀积于石英衬底上硅的激光结晶,若采用氩离子激光,硅将直接吸收而被加热,为直接加热式激光结晶。而CO₂激光将大部分透过硅膜,被石英衬底吸收,衬底吸收了激光而升温,进而对半导体膜加热,当半导体进入本征激发,载流子浓度增大时,载流子吸收才增强,这种靠衬底吸收加热的结晶是间接加热式激光结晶。^[3]研究不同波长的激光和样品的互作用,一方面可深入地了解薄膜结晶的机理,为激光结晶技术提供理论依据,另一方面可以加深对结晶层结构和性质的认识,为其应用提供资料。

本文用氩离子和CO₂两种激光,研究石英为衬底的a-Si SOI结构激光结晶的机理。

二、实 验

实验用的样品,是以熔融石英抛光片作为衬底,用辉光放电法淀积一层厚度为 400 nm 的非晶硅,形成 a-Si SOI 结构。

氩离子激光的连续功率为 2~10W 可调,光斑直径为 100 μm 。 CO_2 激光的连续功率为 30 W,用 Ge 透镜聚焦,因为输出功率的调节范围很小,所以一般都用离焦的办法改变功率密度。本实验实际使用的离焦束斑直径为 2 mm,相应的束斑平均功率密度为 950 W/cm^2 。每种激光配有一架扫描台,可使样品对激光光束作相对运动,以实现扫描。扫描台沿 x 方向作连续扫描,采用的扫描速度对氩离子激光和 CO_2 激光分别为 5 cm/s 和 1 mm/s 。每扫描一次,在 y 方向上一步进位,步距可调。激光结晶时样品置于惰性气体保护之下,样品可加温,本文采用的衬底温度为 250 $^\circ\text{C}$ 。

结晶后用透射光显微镜(TOM)和电子显微镜(TEM)对样品的结构进行分析。

三、结 果

非晶硅经氩离子激光一次扫描可同时得到四个结晶区^[3,4]。图 1(a) 是一条激光扫迹的 TOM 照片。扫迹中央是液相激光结晶区(LP-LCR),接着是光损伤区(OD),靠近边缘是两个

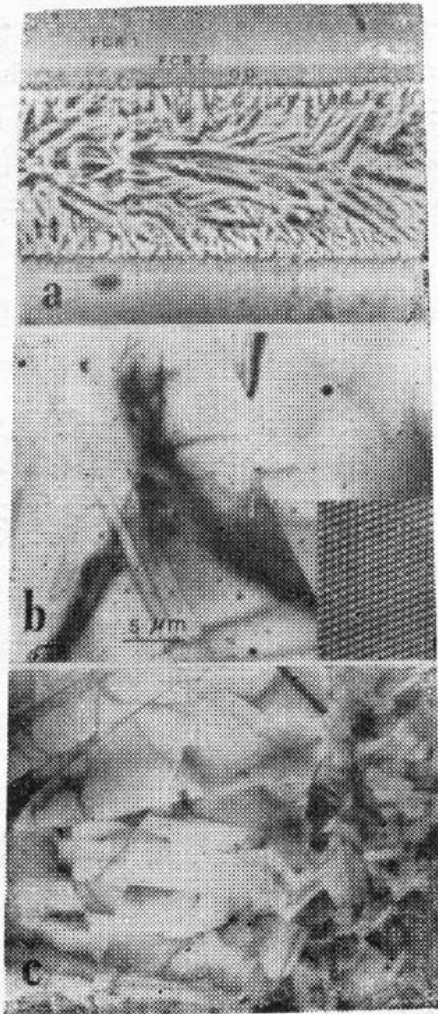


图 1 a-Si SOI 氩离子激光结晶

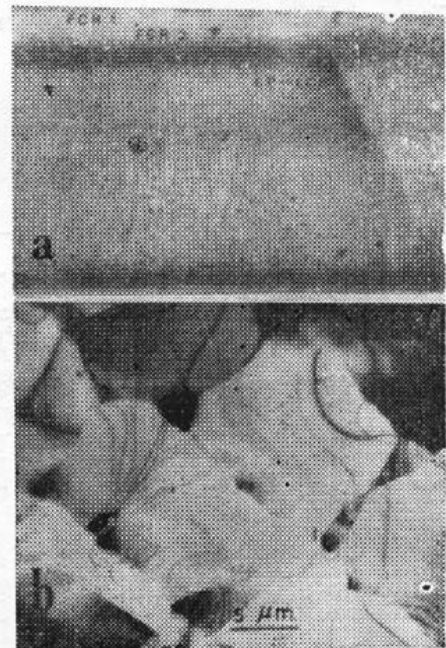


图 2 a-Si SOI CO_2 激光结晶

类似炉中结晶的固相结晶区(FCR-1 和 FCR-2). LP-LCR 是一些宽十余 μm , 长达数十 μm 的大晶粒, 图1(b)是该区的 TEM 照片, 图中角上的插图是相应的高分辨率TEM 照片, 说明晶粒的晶体结构是完整的。电子衍射分析还表明, LP-LCR 区内晶粒有较明显的择优取向, 沿垂直于样品表面的方向多为[100]方向。该区内晶粒的排列呈羽毛状, 它们是从与 OD 区的交界处出发, 沿着激光扫描方向斜向扫迹的中央, 直到与其它晶粒相遇。图 1(c)的 TEM 照片表明了 LP-LCR 区与 OD 区交界处的结晶状况。

图 2(a)给出的是 CO_2 激光扫描后获得的结晶区 TOM 照片。扫迹中同样有 LP-LOR、OD、FCR-1 和 FCR-2 四个区, 其中 OD、FCR-1 和 FCR-2 与氩离子激光结晶获得的相应区域有类似的形貌。但是 CO_2 激光结晶的 LP-LOR 区并非呈羽毛状, 而是出现了与扫描方向垂直的等距的平行线条。TEM 分析表明, 这些低倍显微镜下的线条是一排排的晶粒(图 2(b)), 它们排列有序, 尺寸约为 $10\mu\text{m}$ 左右。但是, 在与 OD 区交界处, 晶粒大小不一, 排列也不很整齐(图 2(b))。

四、讨 论

两种不同激光辐照获得的 LP-LOR 区形貌差别是明显的, 这反映了两种不同波长的激光引起的 a-Si SOI 结晶过程的不同。

a-Si SOI 层吸收了激光能量而熔化, 激光离去后, 熔区开始散热并结晶。结晶过程首先是成核, 然后沿着晶核外延生长。一般 a-Si 在激光辐照过程中 OD 区已形成, 它将为 LP-LOR 区的生长提供籽晶。此外, 在散热过程中, 熔区某些位置也可以生成晶核。在随后的外延生长过程中, OD 区提供的籽晶和其它晶核的产生将发生竞争, 这一过程主要决定于温场分布, 而后者与 SOI 结构层对激光的吸收, 也就是与激光的波长密切相关。

硅对波长为 488.0nm 和 514.5nm 的氩离子激光的吸收是本征吸收, 激光的穿透深度很浅。吸收的能量以热传导方式向 a-Si 层内传递, 使辐照区熔化。辐照离去开始结晶, 这是直接加热式激光结晶。这种情况下, 纵深向的温度梯度是很大的。氩离子激光结晶使用的激光总功率一般并不很大, 扫描速度快, 即对每一点的辐照时间短, 热积累少。但激光束斑小, 所以辐照造成的横向温度梯度也很大, 熔区的热量主要是从熔区边缘沿横向和纵深向散发。综合上述分析, 图 3(a)给出了 a-Si SOI 层上氩离子激光的一个扫迹示意图。激光沿 y 方向扫描, 在 xy 平面上等温线是一些同心圆。箭头表示的是固-液界面, 它对应硅熔点的等温线。

在结晶过程开始时, 扫迹两侧的 OD 区为结晶提供籽晶, OD 区与熔区交界处的温度是硅

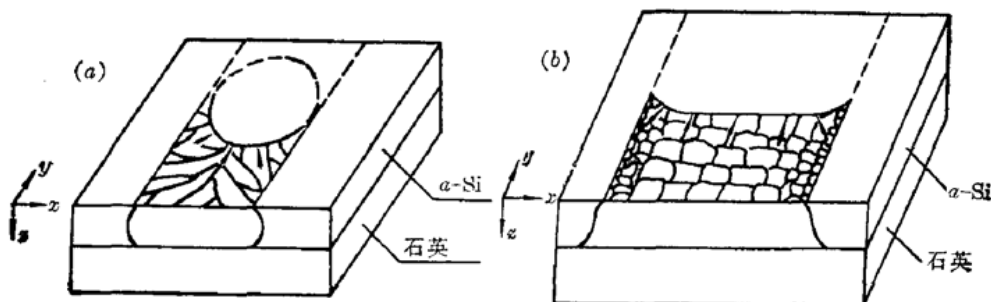


图 3 a-Si SOI Ar^+ 激光结晶(a)和 CO_2 激光结晶(b)机理示意图

的熔点,越向熔区中心温度越高,温度梯度较大,晶粒生长很快,不容许新的晶核产生与成长。所以晶粒是从 OD 区的边缘沿着温度梯度生长,直到与其它晶粒相遇为止,于是形成羽毛状晶粒分布。

OD 区在与 LP-LOR 区交界处的晶粒很多,哪些晶粒可能被选为籽晶,主要决定于晶粒的取向。对面心立方晶体,沿 $[100]$ 方向生长速度最快^[5],所以只有那些其 $[100]$ 方向与熔区的温度梯度基本一致的晶粒,才占有很大的生长优势。各 $[100]$ 晶向是相互垂直的,所以垂直于样品表面的择优方向也是 $[100]$ 方向。

CO₂ 激光结晶过程与氩离子激光结晶过程有很大的差别。由于硅对波长 $10.6\ \mu\text{m}$ 的 CO₂ 激光的吸收是自由载流子吸收,而 a-Si 中载流子的浓度和寿命都很低,大部分光将透过 400 nm 的 a-Si 膜被石英衬底所吸收,而且主要是被靠近 a-Si 膜的表层所吸收。这一层温度升高,反过来对上面的 a-Si 层加热,这是间接加热式激光结晶。

CO₂ 激光功率大,辐照时间长,积累热量大。激光束斑大,散焦和较长的辐照持续时间内热扩散的作用,都减小了束斑辐照区的温度梯度。由于 a-Si 层厚与光斑直径相比小得多,熔区横向散热作用相对而言很小,而石英衬底表层温度很高,石英的热导率又低,所以熔区向下散热也很困难,熔区的熔融状态将保持一段时间。这一过程造成两个后果,一是固-液面落后于光斑,二是光斑离去后,熔区内 x 方向温度分布趋向于平衡,在 y 方向,随光斑离去的先后形成温度梯度,于是得到如图 3(b)所示的温场分布图。 x 、 y 平面上的等温线变为一些垂直于扫描方向的直线,只在边缘形成一段弧线。

光辐照离去后,首先从边缘以 OD 的晶粒为籽晶开始结晶,可是由于散热缓慢和凝固潜热的作用,都将减缓外延生长的速度。但是,随着普遍降温,熔区内在凝固潜热作用范围以外的某一条等温线的温度下降至硅熔点之下,达到了最佳成核温度。于是,沿着等温线产生一排晶核,其中那些 $[100]$ 晶向与温度梯度一致的晶核,将择优外延生长。在其生长过程中,固液面的前方,凝固潜热作用范围之外某等温线上又将成核生长。就这样在潜热减缓外延生长的情况下,一次次超前成核生长,形成了图 2 中所示的一排排晶粒,它们是一些大约 $10\ \mu\text{m}$ 左右的方形单晶体。同样,因为这些晶粒是沿 $[100]$ 方向择优生长,所以垂直于表面的方向也是以 $[100]$ 为择优取向。

激光结晶是沿着温场梯度外延生长,只有 $[100]$ 晶向与温场梯度一致的晶粒被选为籽晶。氩离子激光结晶,等温线是一些直径较小的圆弧,所以沿着 x 、 y 平面各晶粒的取向不可能一致。而 CO₂ 激光结晶,等温线是一些平行线,所以垂直于等温线择优生长的各晶粒,其取向在 x 、 y 平面基本上是一致的。

本工作表明,淀积于石英衬底上的 a-Si,用氩离子激光结晶,是直接加热式结晶,晶粒大,但 x 、 y 方向的晶粒取向不一致。这种结晶适用于一些对横向各向异性不敏感的器件,如一些纵向工作的光电器件和晶体管。用 CO₂ 激光则是间接加热式结晶,晶粒较小,但大部分晶粒的晶向是一致的,适用于一些对横向晶向敏感的器件,例如对于 MOS 器件,只要设计沟道方向一致,可以提高沟道迁移率的一致性,减小器件离散性。另外,对于不同的半导体膜,正确地选择结晶方式是结晶成败的关键。例如在石英衬底上,对于 Si 和 GaAs 等材料,两种结晶方式均可选用,而对于一些 II~VI 族化合物半导体,如 ZnS、CdS 等对可见光透明的半导体膜,选

(下转第629页)

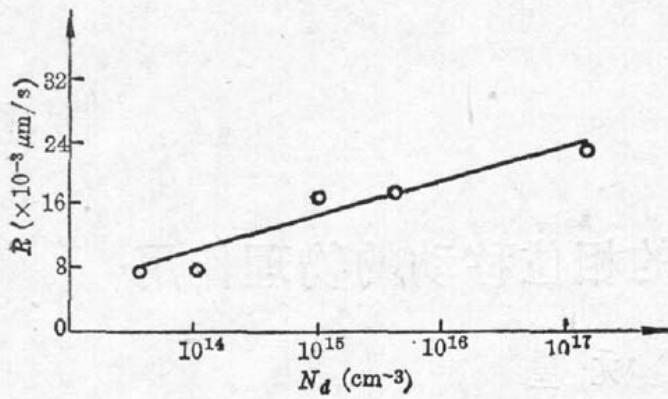


图3 沉积速率与硅片掺杂浓度的关系

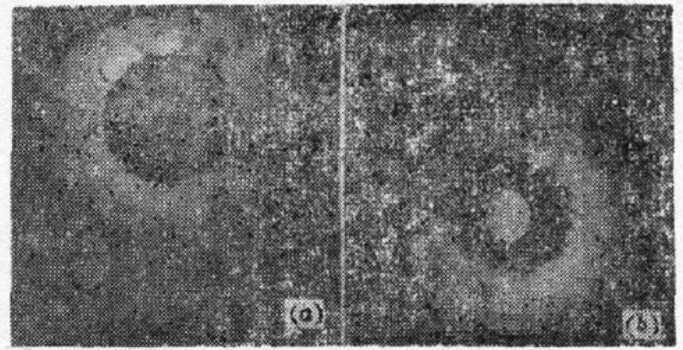
(Si: n 型 $\langle 111 \rangle$, $P=11 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$, $\text{pH}=8.2$)

图4 沉积斑形状

(a) $P=11 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$; (b) $P=20 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ (Si: n 型, $\langle 111 \rangle$, $N_d=2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $\text{pH}=8.2$, $t=2.5\text{s}$)

这是由于硅片对入射 CO_2 激光也存在吸收,其吸收系数 α 随掺杂浓度的增大而递增^[3],所以在其它条件相同的情况下,掺杂浓度高,界面温度也高,相应地沉积速率变大。

图4给出在其它条件相同的情况下,激光强度对沉积斑形的影响。当光强较低时,沉积斑形呈实心圆形,中心厚边缘薄(图4(a)),而当光强较大时,沉积斑形为中空的圆环形(图4(b))。这是因为高斯激光束在硅/镀液界面产生的温度场为中心高、边缘低的钟型函数分布,当激光强度较低时,光照中心的温度低于或接近最佳温度,所以沉积斑点是一个中心厚、边缘薄的实心圆斑,而当光强较大时,中心温度已大大超过最佳温度,该微区内的镀液开始自分解,沉积速率接近于零,因而沉积斑点是一个中心空的圆环。

参 考 文 献

- 1 袁加勇 *et al.*, 中国激光, **14**(10), 635(1987)
- 2 伍学高 *et al.*, 化学镀技术, 四川科学技术出版社, 1985
- 3 A. Φ. 约飞主编, 周廉等译, 科学和技术中的半导体, 第1卷, 科学出版社, 北京, 1963, p. 66

(上接第618页)

择间接加热式结晶更为方便。

本工作得到上海冶金所离子束实验室资助,作者在此致谢。

参 考 文 献

- 1 J. F. Gibbans, K. F. Lee, *IEEE Trans. Electron. Devices Lett.*, **EDL-1**(6), 117(1980)
- 2 D. A. Antoniadis, *Energy Beam-Solid Interactions and Transient Thermal Processing*, J. C. C. Fan and N. M. Johnson eds, North-Holland, New York 1984, 587.
- 3 鲍希茂, 杨敏, 半导体学报, **6**(6), 655(1985)
- 4 鲍希茂, 黄信凡, 邢昆山, 物理学报, **36**(1), 74(1987); Bao Xi-Mao, Huang Xin-Fan, and Xing Kun-Shan, *Chinese Physics*, **7**(3), 676(1987)
- 5 闵乃本, 晶体生长的物理基础, 上海科学技术出版社, 上海, 1982, 229