

硅相变过程中皮秒性质的研究

马海明 刘一先 李富铭

(复旦大学物理系)

Study of picosecond properties during phase transition in silicon

Ma Haiming, Liu Yixian, Li Fuming

(Department of Physics, Fudan University Shanghai)

提要: 本文报道了裸硅、二氧化硅-硅、SOS 等材料在 $0.53 \mu\text{m}$ 约 30 ps 的脉冲激光作用下产生的相变过程中反射率及透射率的变化和与之相关的实验现象。这些结果直接证实了硅中能量转移、相变以及熔融态的过加热可在 ps 时间内出现。

关键词: 硅, 相变

一、引言

近几年来, 半导体脉冲激光退火机理的研究已成为半导体物理学中引人注目的一个新的研究领域^[1]。脉冲激光退火不仅是半导体生产工艺中潜在的一种新技术, 而且作为可靠再现的非平衡态的相变过程本身, 它也是一个很好的基础物理的研究课题。

用时间分辨的反射及透射方法测量激光辐照前后半导体的动态特征, 可使人们了解激光诱发的熔融态的光学性质和它形成的时间等参量。这一方法已被广泛采用。本文以单晶硅作为研究对象, 用 ps 时间分辨的技术进一步丰富这方面的实验现象, 并用热熔模型加以解释。

二、实验方法

我们用激发与探测的方法测量在 0.53

μm 波长、脉宽约 30 ps 激光激发下硅的反射率及透射率随激发光强度的变化曲线。探测光为非常弱的 $1.06 \mu\text{m}$ 、脉宽 35 ps 的激光。激光光斑的强度分布为高斯型, 我们把 $0.53 \mu\text{m}$ 与 $1.06 \mu\text{m}$ 激光分别聚成直径 $(1/e)$ 为 $300 \pm 20 \mu\text{m}$ 与 $45 \mu\text{m}$ 的光斑共线以约 4° 入

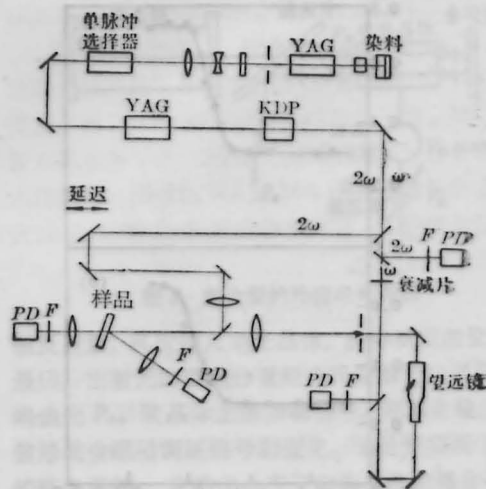


图1 实验装置

收稿日期: 1987年7月6日。

射角投射至样品表面。两束光之间的等光程用一块 KDP 晶体的和频来测定。两束光之间的时间延迟用数字步进马达控制。四个经能量计仔细校正的光电二极管用于检测信号,并输入数字记录系统记录。每个探测器前都有适当的滤色片。实验光路如图 1 所示。所用的样品都是单晶硅的抛光片,每个测量区域均只允许激发一次。

三、实验结果

激发光与探测光之间的时间延迟为 170 ps。这时,激发光脉冲与探测光脉冲在时间上完全分离。并且,由于延迟大于 150 ps,等离子体对反射率(尤其对 SOS 样品的反射率)的影响已消失^[1]。

我们所用的裸硅是(100)面的硅片,二氧化硅-硅是在这种硅片上长一层厚约 40 nm 的二氧化硅薄层。薄层的厚度用比色法测定。SOS 样品是在蓝宝石衬底上生长一层 0.5 μm 厚的单晶硅薄层所构成的。

测量结果示于图 2 和图 3。

从图可见,随着激发光强的增加,硅的反射率会在激发光强度约 $0.24 \pm 0.05 \text{ J/cm}^2$ 处

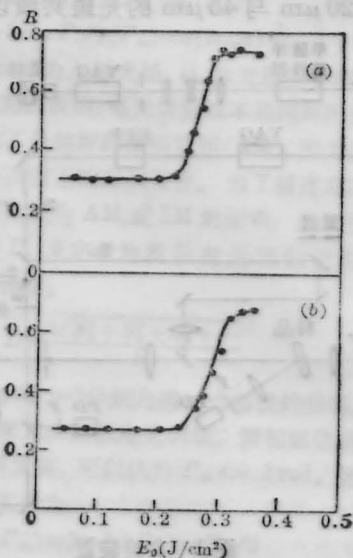


图 2

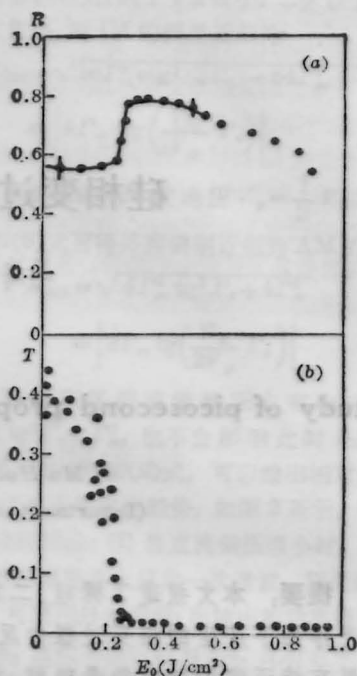


图 3

出现一个跃变。图 2(a)中反射率从 0.32 ± 0.02 上升到 0.74 ± 0.03 。图 2(b)中反射率从 0.30 ± 0.02 上升到 0.68 ± 0.03 。图 3(a)中反射率从 0.56 ± 0.02 上升到 0.78 ± 0.03 , 而图 3(b)中透射率则下降了 40 多倍。从图 3(a)中可见,当激发光强度超过阈值 0.24 J/cm^2 后继续增加时,反射率终会逐渐下降。在足够强的入射光激发下,例如 2.5 J/cm^2 附近,样品表面会出现明显损坏现象,并伴随声响。

实验中,我们发现:当激发光的强度略低于高反射率相阈值时,尽管一次激发后硅的反射率不发生变化,但如在同一受激区域连续激发的话,反射率会明显地逐次提高。在入射光足够强时,第二次或第三次激发就会出现高反射现象。但如果每次激发后把样品移至一新区域,反射率就不会提高。另外,往往已产生过高反射相的硅表面区域容易再产生高反射相。

我们曾对不同的掺杂、晶面的硅进行了类似的测量,结果发现,它们的高反射相性质

除阈值略有差别外其他都一样。这种阈值的差别可能与晶面选择、样品表面处理等因素有关,且这些差别都在 $\pm 0.05 \text{ J/cm}^2$ 的误差范围内。

四、讨 论

由前所述,当 $0.53 \mu\text{m}$ 激发光强度达到 0.24 J/cm^2 后,硅就出现高反射率相。这一高反射率与硅在熔融状态下的反射率^[2]相一致。按照热熔模型,此时硅处于熔融状态。硅的相变是由于激光诱发的稠密的热电子-空穴等离子体把能量经发射声子转移给晶格所产生的^[1]。图 3(a)中当激发光很强时,反射率的下降是由于熔融态继续吸收光能导致气化,大量带电粒子逸出^[3]形成“云雾”状态,使探测光遭弥散引起的。当激发光强度再增加,硅表面就会产生凹陷乃至明显的损坏。

从图 2 可见,表面有 40 nm 厚的二氧化硅薄层的硅与一般的裸硅具有类似的相变特征,反射率的差别是由二氧化硅层的干涉引起的。由于二氧化硅与硅之间存在着热交换,当二氧化硅的厚度达上百 nm 时,这种热交换在几百 ps 的时间内甚至大于硅的熔融层与其体内的热交换^[4],这可能使光对二氧化硅-硅与裸硅的处理有些差别。

由图 3 可见,相变后熔融层对 $1.06 \mu\text{m}$ 探测光有强吸收,以至使 $0.5 \mu\text{m}$ 的硅薄层呈现出一般硅片类似的反射率特征。我们采

用与[5]中相似的方法,把相变后的 SOS 样品看成有三部分组成:中间层为固态硅、两旁是熔融层与蓝宝石衬底。由于中间层的厚度 $\leq 0.5 \mu\text{m}$,作为一个近似,忽略它对探测光的吸收,这样就可根据图 3 求得当激发光强度略大于相变阈值时熔融层的厚度约为 43 nm 。当延迟达 170 ps 时,熔融层已处于逐渐固化的状态。所以,相变初时熔融层的推进速度至少大于 250 m/s 。当激发光强很强时,探测光遭硅表面带电粒子的弥散,所测的反射率与透射率就不够准确了。

至于与激发光强度略低于相变阈值时也会因多次辐照产生高反射率相,是因为单晶硅的表面结构受到光的扰动而逐渐无序化。无序化的硅因为对光的吸收强烈而容易产生相变。相变过的区域往往容易再相变也是由于该区域实际上已处于无序状态的缘故。

衷心感谢中国科学院半导体研究所郁元恒先生为我们提供了 SOS 样品。

参 考 文 献

- 1 H. Kurz, L. A. Lompre and J. M. Liu, "Laser-Solid Interactions and Transient Thermal Processing of Materials" (Strasbourg, France, 1983), 23
- 2 K. M. Sherev et al., *Sov. Phys. Solid State*, **16**(11), 211(1975)
- 3 J. M. Liu et al., *Appl. Phys. Lett.*, **39**(9), 755(1981)
- 4 L. M. Liu et al., *Appl. Phys. A*, **34**, 25(1984)
- 5 P. H. Bucksbaum and J. Bokor, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **13**, 51(1983)