

YAG 激光晶化多晶硅 *

刘建平¹ 王海文¹ 李 娟¹ 张德坤¹ 赵淑云¹
吴春亚¹ 熊绍珍¹ 张丽珠²

(1 南开大学光电子所, 天津市薄膜光电子器件与技术重点实验室, 天津 300071)

(2 天津机电职业技术学院, 天津 300131)

摘要: 报道了采用 YAG 脉冲激光器对硅基薄膜进行晶化制备多晶硅的实验结果, 其中主要针对以 PECVD 法制备的不同硅基薄膜(如非晶硅和微晶硅)为晶化前驱物, 以及对激光能量的利用等问题进行了分析研究. 实验发现, 晶化需要基本的阈值能量流密度, 而晶化硅基前驱物材料的结构, 是决定此阈值的关键. 延迟降温速率对激光晶化是一种较为有效的手段, 并对所得的初步结果进行了讨论.

关键词: YAG 脉冲激光; 激光晶化; 微晶硅

PACC: 6150C; 7360F; 8120

中图分类号: TN304.1+2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)08-1572-05

1 引言

目前, 低温多晶硅薄膜晶体管(LTPS-TFT)有源层的制备方法主要有两种:其一是一步成膜法^[1], 其二是两步晶化法. 在两步晶化法中, 较为广泛应用的是对以非晶硅为前驱物的激光退火晶化(LAC)和金属诱导晶化(MIC). 金属诱导晶化具有价格低廉、易实现大面积均匀制备多晶硅的优点, 但是由残余金属和其他原因造成膜的内部缺陷较多, 所以晶粒和材料迁移率均小于 LAC 法制作的, TFT 电性能亦稍逊色^[2,3]. 因为激光晶化的熔融与重结晶机制能够使多晶硅中的晶粒内部缺陷和膜内缺陷态密度得以降低^[4].

激光晶化主要指两个方面, 一方面是以非晶硅为前驱物的晶化; 还有就是用激光对多晶硅膜的再退火作用, 以增大晶粒尺寸、减小晶粒缺陷来改善其结构特性^[5], 比如结合金属诱导晶化的再激光活化效应即是很好的例证^[6]. 经过近 20 年的研究与发展, 目前对激光波长、激光能量、扫描点数、脉冲数目前驱薄膜的厚度以及衬底温度等对晶粒尺寸、多晶硅表面形貌以及 TFT 性能等的影响及其机理已经

有所了解, 并得出了一些有指导性的结论:

(1) 薄膜厚度越薄, 晶化后晶粒的尺寸越大; 提高衬底温度可以得到更大的晶粒, TFT 的场效应迁移率也会明显提高, 并且均匀性也会有所改善^[7].

(2) 激光晶化经历以下三个过程

部分熔化(partial-melting regime): 激光能量较低, 在非晶硅膜还没有完全熔化前, 晶粒尺寸会随着激光能量密度的增加而缓慢增加;

近完全熔化(near-complete melting regime): 当能量密度达到某一阈值时, 晶粒会突然急剧增大(几倍于膜厚), 这一现象被称为超级横向生长(SLG);

完全熔化(complete melting regime): 当薄膜完全熔化后, 晶粒反而会减小, 这是由于熔膜中过冷区域过多而导致晶核增加的缘故^[8].

(3) 利用如(2)所述过程, 可以通过透镜、掩膜版等手段去控制全熔区的形状和物理尺寸, 以实现所谓“可控”的超级横向生长(C-SLG), 从而在大面积内产生均匀且晶粒尺寸大的多晶硅^[7].

激光晶化较之金属诱导晶化提出得比较早, 发展最为迅速, 并且工艺也最为成熟, 现在已经应用于工业生产. 在激光晶化研究的初期, 一般采用准分子

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2004AA303570), 国家自然科学基金(批准号: 60437030)及天津自然科学基金(批准号: 05 YFJ MJ C01400)资助项目

脉冲激光晶化(ELC). 用传统重叠扫描激光束 ELC 制备的 TFT,其场效应迁移率可达 $300\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ^[9],能满足一般集成度显示驱动电路一体化的需求,缺点是价格较为昂贵,保养成本也高. 随着激光技术的不断进步,有人提出用固体激光器 YAG 连续激光制备多晶硅,并且已取得显著的成果,制备的多晶硅 TFT 迁移率很容易就能达到 $600\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ^[9],可以制备出更高集成度的驱动电路.

目前报道的激光晶化都是采用非晶硅(a-Si)作为晶化前驱物. 由于 PECVD 法制备的非晶硅含氢量比较多,为了防止晶化过程中的“爆氢”现象,需要一个高温的预退火过程,温度一般在 450 左右,这给实现衬底的柔性化带来了困难. 因此我们尝试采用含氢量低的微晶硅($\mu\text{c-Si}$)作为前驱物. 由于微晶硅比非晶硅处于稍微有序的状态,它的熔点比非晶硅的高,即熔化微晶硅所需的激光能量密度要大. 但是由于微晶硅内部有许多细微晶粒,这些细微结构是否对晶化效果产生影响,是我们所关心的. 以含氢量比较低的微晶硅做晶化前驱物,或许能免去晶化前的高温退氢处理,这对实现柔性衬底制备多晶硅是十分重要的,也是本研究的主要目的. 鉴于用半导体激光泵浦固体激光器价格低廉、稳定性好、操作简单、性价比高,故本文以 YAG 固体激光器作激光光源对以不同硅基薄膜作前驱物的激光晶化进行了探索.

2 实验与结果

实验采用的前驱物为 RF 或 VHF-PECVD 法制备的非晶硅和不同晶化率的微晶硅. 采用倍频

YAG 脉冲激光在大气环境下进行晶化. 激光波长 532nm,激光频率 0 ~ 50kHz 可调,光斑未整形. 实验前先用低能量密度的激光预扫描以去氢. 对晶化后的样品进行了喇曼谱和 XRD 的测量分析.

2.1 不同硅基薄膜作前驱物晶化效果比较

用非晶硅与微晶硅作前驱物,经激光晶化后薄膜的 Raman 谱如图 1(a)所示. 空心正三角表示以非晶硅为晶化前驱物,实心倒三角表示的是以微晶硅为前驱物. 从喇曼峰的位置可以看出,虽然非晶硅的晶化采用了更大的激光能量,效果还要劣于微晶硅的(非晶硅晶化后的喇曼峰更偏向于靠近 510cm^{-1} ,说明膜中晶格畸变较多). 这点在上面论述中已提到,这可能是与硅基薄膜内部的结构有关. 图 1(b)示出晶化前 a-Si 与 $\mu\text{c-Si}$ 的喇曼谱比较(数据点的符号与图 1(a)的相同). a-Si 的谱峰在 480cm^{-1} ,而 $\mu\text{c-Si}$ 的谱峰在 480cm^{-1} 处亦有一个肩膀,说明微晶硅是由非晶相和其包围着的细小晶粒组成,由于晶粒处于更稳定的状态,其熔化所需的温度要比周围的非晶相高. 所以在一定的激光能量下,非晶相先熔,这样就在膜内部造成了由晶粒到非晶相的温度梯度,以晶粒作为晶核,小晶粒继续生长直至相邻晶粒相遇,从而使整个膜完全晶化.

对于非晶硅,由于全部是由非晶相组成,其晶化过程比较复杂. 膜熔化后,以其中形成的过冷区域(under-cooling)^[7]作为晶核,向周围温度较高的熔融区生长,从而使整个膜晶化. 但由于过冷区域的形成与分布的随机性很大,所以其晶化过程中形成的晶核多,晶粒难于长大,内部畸变更多.

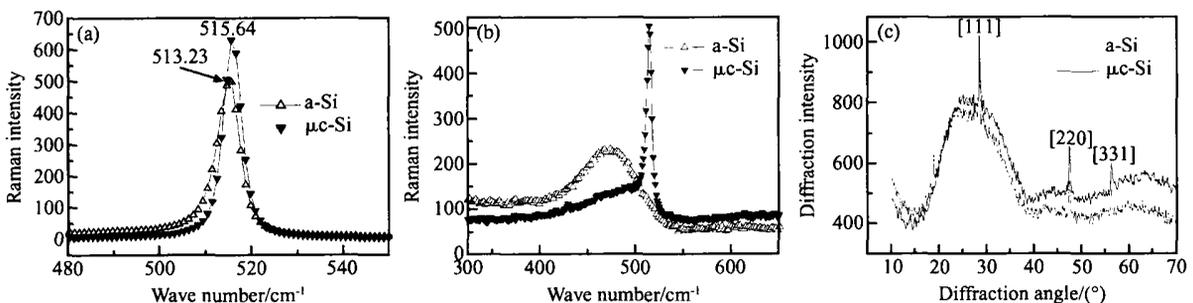


图 1 (a) 非晶硅与微晶硅晶化后的喇曼谱; (b) 非晶硅和微晶硅晶化前的喇曼谱; (c) 非晶硅和微晶硅晶化后的 XRD

Fig. 1 (a) Raman spectra of a-Si and $\mu\text{c-Si}$ after crystallization; (b) Raman spectra of a-Si and $\mu\text{c-Si}$ before crystallization; (c) XRD of a-Si and $\mu\text{c-Si}$ after crystallization

从样品的 XRD 中同样可以得出以上结果,如图 1(c) 为非晶硅(虚线)和微晶硅(实线)晶化后的 XRD. 可以看出,通过激光照射后,非晶硅和微晶硅都明显晶化了,并且两者的晶化效果也有一定的差距.

2.2 不同晶化率微晶硅激光晶化效果比较

图 2(a) 为同一晶化条件下,不同晶化率微晶硅经激光晶化后的 Raman 谱图,正三角的原始晶化率为 50%,倒三角的为 30%,菱形的为 60%. 由喇曼峰的位置可以看出,三种晶化率微晶硅的晶化效果很接近. 上面说过,微晶硅是由非晶相和其包围着的细小晶粒所组成. 晶化率不同,表明膜中晶粒所占的比例不同,同时晶粒的尺寸也有可能不一样. 从微

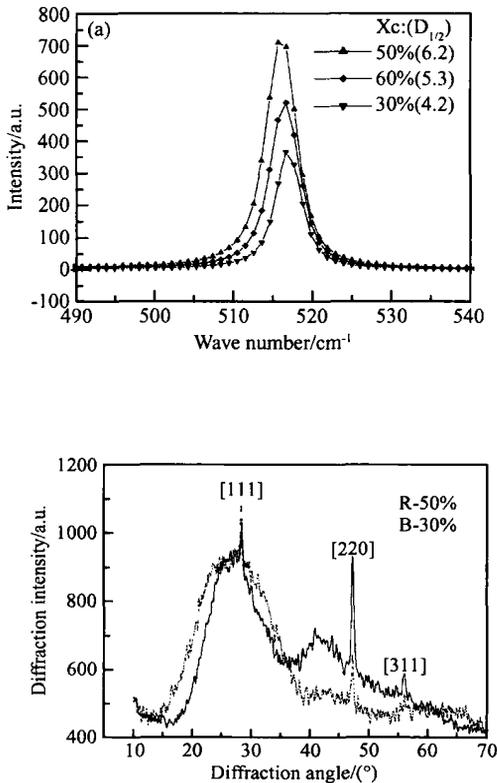


图 2 (a) 不同晶化率下微晶硅晶化后的喇曼谱; (b) 不同晶化率微晶硅晶化后的 XRD 谱

Fig. 2 (a) Raman spectra of different crystallization rate $\mu\text{c-Si}$ after crystallization; (b) XRD spectra of different crystallization rate $\mu\text{c-Si}$ after crystallization

晶硅的晶化过程来看,无论微晶硅中分立的晶粒的多寡,在横向生长时,这些晶粒总会相遇,甚至会出现大晶粒吞噬小晶粒的现象,所以晶化率对微晶硅的晶化效果影响不会很明显. 从图 2(a) 所标出的喇

曼峰半宽度 ($D_{1/2}$) 大小看到,晶化率小的微晶硅似乎有可能制备出较大晶粒尺寸的多晶硅. 但是以上半宽数据差别不大,此结论不够完备,尚待深入实验予以验证.

同样的结果也能从图 2(b) 看出. 图 2(b) 示出不同晶化率(虚线 R: 50%, 实线 B: 30%) 微晶硅晶化后的 XRD. 可以看出,虽然激光能量相同,晶化率小的微晶硅晶化效果似乎显得更好,这也是对上述提法的支持.

2.3 衬底背面铝膜的作用

考虑到非晶硅或微晶硅,对 532nm 波长的光均有较大的吸收系数,为了提高激光能量的利用率,本文还设计了能否充分利用激光能量的实验. 在同一微晶硅膜玻璃衬底的背面的一半,镀上一层反射率很高又易于去除的铝膜,另一半无 Al, 然后进行激光晶化. 目的在于观察铝膜的反射作用是否对晶化有影响. 这样考虑的原因是因为 TFT 的有源层很薄(仅 100nm 数量级),这样薄的硅基薄膜不可能完全吸收一次入射的激光能量,故拟考察剩余的那一部分,能否经背面铝膜反射回来后再次被薄膜二次吸收,达到二次利用光能的目的. 图 3(a) 给出在衬底的背面,镀铝和未镀铝反射膜激光晶化后的喇曼谱比较,其中正三角(B) 曲线为衬底背面镀铝的微晶硅的晶化结果,倒三角(D) 曲线为没有镀铝的晶化结果,菱形(F) 曲线为微晶硅前驱物初始的喇曼谱. 鉴于激光晶化后的喇曼谱,其峰强度明显增高,与之相比晶化前的谱峰几乎不显现. 为了看清晶化前前趋物的喇曼谱,我们由图 3(b) 给予对照. 由图 3 可以看出,背面蒸有铝膜的晶化效果比未蒸铝膜的较佳(峰的位置更靠近 520cm^{-1}),而且由喇曼谱峰的半宽度(反映晶粒尺寸,晶粒尺寸反比于喇曼峰的半宽度)的数据,也稍大(B 半宽为 3.99cm^{-1} , D 半宽 4.55cm^{-1}). 这可能与含有一种“变相”的衬底保温的效果有关. 吸收了被铝反射回来的激光能量,延长了激光对膜的作用时间,相当于给衬底保温,减小了冷却固化速度,因而晶化效果得以改善.

3 结束语

本文以 PECVD 制备的非晶硅和微晶硅为前驱物,采用 YAG 脉冲激光进行晶化. 通过对膜晶化前后的 Raman 谱和 XRD 的分析比较,可以看出,在同

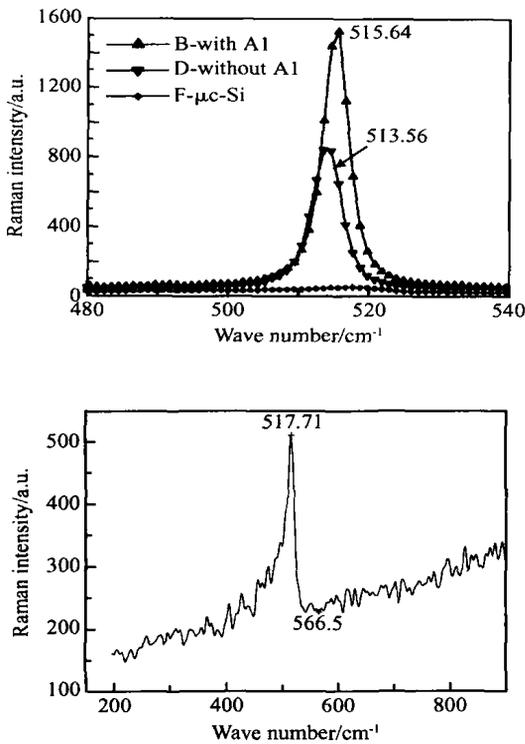


图 3 (a) 背面镀铝和无铝微晶硅晶化后的喇曼谱; (b) 晶化前微晶硅的喇曼谱

Fig. 3 (a) Raman spectra of $\mu\text{c-Si}$ with and without Al after crystallization; (b) Raman spectrum of $\mu\text{c-Si}$ before crystallization

一晶化条件下,微晶硅的晶化效果要比非晶硅的稍好,这可能与硅基薄膜的内部结构有关.微晶硅的晶化率对晶化效果的影响不是很大,对晶化后多晶硅晶粒尺寸的影响尚有一定对应关系,初始晶化率低的,有利获得较大的晶粒尺寸.但是该结论尚待更多的实验验证.同时也研究了激光能量利用的问题.背面镀铝微晶硅的晶化效果要比没有镀铝的好,晶粒尺寸也更大些.

用 YAG 激光晶化制备多晶硅,目前国内还处于研究阶段,远未达到实用程度.本实验从不同晶化前驱物的角度来探明基质结构对激光晶化过程以及材料含氢量可能引入的影响,以便加深认识晶化机制和优化结果.相信随着实验的深入,会得出更有意义的结论.

参考文献

- [1] Zhang J J, Shimizu K, Hanna J. Low temperature poly- $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ deposited by reactive thermal CVD for thin film transistor application. *J Non-Cryst Solids*, 2002, 299:163
- [2] Oh C H, Matsumura M. A proposed single grain-boundary thin-film transistor. *IEEE Electron Device Lett*, 2001, 22(1): 20
- [3] Crowder M A, Carey P G, Smith P M, et al. Low-temperature single-crystal Si TFT's fabricated on Si films processed via sequential lateral solidification. *IEEE Electron Device Lett*, 1998, 19(8): 306
- [4] Im J S, Kim H J, Thompson M O. Phase transformation mechanisms involved in excimer laser crystallization of amorphous silicon films. *Appl Phys Lett*, 1993, 63(14): 1969
- [5] Angelis C T, Dimitriadis C A. Effect of excimer laser annealing on the structural and electrical properties of polycrystalline silicon thin-film transistors. *J Appl Phys*, 1999, 86(8): 4600
- [6] Park K C, Lee J H, Song I H. Poly-Si thin film transistors fabricated by combining excimer laser annealing and metal induced lateral crystallization. *J Non-Cryst Solids*, 2002, 299 ~ 302: 1330
- [7] http://www.lambdaphysik.com/script/content.asp?area=resources&sitepages_id=411
- [8] Hara A, Sasaki N. Limit of the mobility enhancement of the excimer-laser-crystallized low-temperature poly-Si TFTs. *Technical Digest of IEDM*, 1999: 301
- [9] Hara A, Mishima Y, Kakehi T. High performance poly-Si TFTs on a glass by a stable scanning CW laser lateral crystallization. *IEDM*, 2001: 747

Using a YAG Laser to Make Poly-Silicon *

Liu Jianping¹, Wang Haiwen¹, Li Juan¹, Zhang Dekun¹, Zhao Shuyun¹,
Wu Chunya¹, Xiong Shaozhen¹, and Zhang Lizhu²

(1 *Institute of Photo Electronics, Nankai University, Tianjin Key Laboratory of
Thin Film Photo Electronic Devices and Technology, Tianjin 300071, China*)
(2 *Tianjin Machine Vocational Education College, Tianjin 300131, China*)

Abstract: The primary results of crystallization of a silicon-based thin film for poly-Si using a YAG pulse laser source are described. The aim of this experiment is to explore the different crystallization mechanisms between the different precursors and the usage of laser energy. It is found that crystallization needs a basic threshold laser influence, and this influence depends on the structure of the precursor material. It is also found that lowering the reduction rate of the material's temperature is an effective method for laser crystallization.

Key words: YAG pulse laser; laser crystallization; $\mu\text{-Si}$

PACC: 6150C; 7360F; 8120

Article ID: 0253-4177(2005)08-1572-05

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2004AA303570), the National Natural Science Foundation of China (No. 60437030), and the Natural Science Foundation of Tianjin (No. 05 YFJ MJ C01400)

Received 27 December 2004, revised manuscript received 28 February 2005

©2005 Chinese Institute of Electronics