

文章编号: 1001-3806(2016)03-0383-05

用于平板显示 LTPS 制备的 ELA 光束整形系统

尹广玥, 游利兵, 方晓东*

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 介绍了多晶硅薄膜较非晶硅薄膜在平板显示领域的优势以及准分子激光晶化制备多晶硅膜的结晶过程。介绍了透镜阵列实现匀光的原理。阐述了典型的准分子激光退火线型光束整形系统的扩束、匀光、投影等结构。并介绍了连续横向固化技术在准分子激光制备低温多晶硅领域的应用。讨论了准分子激光退火光学系统的发展现状, 指出了其在平板显示行业的重要意义。

关键词: 激光技术; 平板显示; 准分子激光退火; 低温多晶硅; 光束整形; 匀光

中图分类号: TN205 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.017

ELA-beam shaping systems for flat panel display prepared by LTPS

YIN Guangyue, YOU Libing, FANG Xiaodong

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: The advantages to poly silicon film instead of amorphous silicon film in the field of flat panel display were introduced. Crystallization process of poly silicon film by using excimer laser crystallization system was studied. The principle of how lens array achieve the uniformity of output laser energy density was described. The structure of typical excimer laser annealing(ELA) line beam shaping system, which included beam expanding unit, beam energy homogenizing unit, projection unit and so on was focused on. Finally the application of sequential lateral solidification technology in the area of low temperature poly silicon(LTPS) using excimer laser nnealing was introduced. The status of ELA optical system was discussed and its significance in flat panel display industry was pointed out.

Key words: laser technique; flat panel display; excimer laser annealing; low temperature poly silicon; beam shaping; beam homogenization

引 言

薄膜晶体管(thin film transistor, TFT)作为平板显示器有源驱动的核心部件,其电学性能决定了平板显示器的响应速度、尺寸、所传递的信息量等。非晶硅 TFT 的制备成本低,但由于电子迁移率低,电学性能较差;多晶硅 TFT 与非晶硅 TFT 比较,电子迁移率大幅度提高,因而使用多晶硅 TFT 的平板显示器具有响应速度快、集成度高、可集成驱动电路于面板上等优点。所以多晶硅在有源矩阵液晶显示器(active matrix liquid crystal display, AMLCD)和有源有机电致发光显示器(active matrix organic light emitting diode, AMOLED)等应用中有巨大的潜力。

制备多晶硅的主要方法分为直接法和间接法。直接法主要有低压化学气相沉积和催化化学气相沉积;

间接法主要有固相晶化、快速热退火、金属诱导横向晶化、微波晶化和准分子激光退火等^[1]。其中准分子激光退火(excimer laser annealing, ELA)方法属于低温多晶硅(low temperature poly silicon, LTPS)制备技术。由于准分子激光的脉宽窄,非晶硅薄膜的熔化再结晶过程非常短,对基板造成的热伤害小,从而降低了结晶过程对基板材质的要求,这使得价格低廉的玻璃和塑料均可作为基板,降低了大规模工业生产的成本。虽然存在着硅晶粒尺寸不均匀、晶界不规则等问题,但经过准分子激光退火处理后得到的多晶硅电子迁移率可达 $100\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s}) \sim 400\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 较非晶硅的低于 $1\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 有数百倍的提高,因而其电学特性更加优良。

1 ELA 结晶过程

辐射到非晶硅膜表面的准分子激光能量密度大体可分为 3 种情况^[2-3]: (1) 耦合到样品的能量密度达到样品熔化阈值,使非晶硅膜完全熔化,进而冷却时会出现自发成核现象,晶粒分布较均匀,尺寸在 $10\text{nm} \sim$

作者简介: 尹广玥(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为准分子激光技术。

* 通讯联系人。E-mail: xdfang@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2015-03-25; 收到修改稿日期: 2015-04-07

20nm; (2) 耦合到样品的能量密度达到样品熔化阈值, 但非晶硅膜未完全熔化, 此时的结晶模式为分层结构, 晶粒随着激光能量的增加而增大, 晶粒尺寸在几十到几百纳米; (3) 耦合到样品的能量密度达到样品熔化阈值, 非晶硅膜恰好完全熔化, 在衬底与非晶硅交界面上还留有少量固体硅颗粒, 此时这些颗粒将作为籽晶发生横向生长, 称为超级横向生长 (super lateral growth, SLG), 晶粒尺寸可达微米量级。

由于发生 SLG 的能量密度窗口过窄, 激光器的能量稳定性达不到此要求, 若激光能量密度发生微小的波动, 则会出现非晶硅膜的部分熔化和完全熔化, 降低了结晶的均匀性, 因而出现了人工控制超级横向生长技术 (artificial controlled super lateral growth, ACSLG)。ACSLG 人为地制造了完全熔化区域和部分熔化区域, 部分熔化区域的少量固体硅颗粒将作为籽晶向完全熔化区域发生横向生长。ACSLG 除了可以获得大尺寸较均匀的晶粒外, 还可以对晶粒的位置进行精确控制, 这种技术拓宽了 SLG 的能量窗口^[4]。

1996 年, 哥伦比亚大学 SPOSILI 等人提出了连续横向固化 (sequential lateral solidification, SLS)^[5]。SLS 技术属于 ACSLG 技术中的一种, 是一种可结晶高性能多晶硅的 ELA 方法。SLS 技术使用掩模 (狭缝阵列) 严格控制光束形状, 使激光辐射区域完全熔化结晶, 在微米量级上移动样品, 使相邻的非晶硅区域被激光束辐射完全熔化, 则第 1 个脉冲的多晶硅将向此完全熔化区域发生横向生长, 重复此步骤, 即可得到大尺寸晶粒。由于相邻晶粒之间的竞争, 只有一部分晶粒可以持续生长下去, 所以随着样品的移动, 晶粒平均宽度增加。

SLS 过程包括两个关键的步骤: (1) 通过掩模选定区域使之在激光辐射下完全熔化结晶; (2) 精确控制两个相邻激光脉冲之间样品移动的距离, 此距离需小于单脉冲的横向生长长度。

2 匀光原理简介

准分子激光具有高重频、窄脉宽、高能量、低相干等特点, 准分子激光光斑常为矩形, 长边方向具有平顶分布, 短边方向为近高斯、近平顶分布或介于二者之间^[6]。在准分子激光 LTPS 制备过程中, 若想得到均匀的结晶颗粒, 就需要有能量密度分布均匀的激光光斑, 因此, 匀光单元是整个光束整形系统的核心。对于激光强度的均匀性处理, 主要有: 棱镜法、反射镜法、非球面透镜法、全息光栅滤波器法、万花筒法、透镜阵列法等^[7]。每种方法各具特色, 根据应用场合不同, 采用不同的方法。针对于 ELA 方法制备多晶硅薄膜的

应用, 主流的办法为透镜阵列法, 透镜阵列匀光法对原始光束的能量分布要求低, 能量利用率高, 光斑均匀面位置可调节, 装调简单, 加工技术较成熟, 但其昂贵的价格却提升了成本。透镜阵列的匀光原理大致如下^[7]: 光束被透镜阵列分为若干子光束, 绕聚光镜主光轴作对称分布的子光束, 在焦面上互补叠加。即使光强分布为严重的不对称分布, 经二切分叠加后, 大范围的光强差别就己能填平。原则上阵列单元的数量越多, 均匀效果越好。图 1 为透镜阵列匀光原理的示意图。

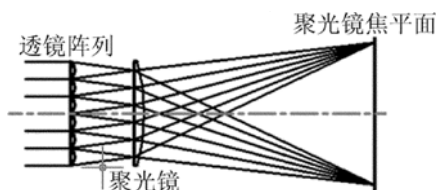


图 1 透镜阵列匀光原理

这种匀光方法广泛采用两级透镜阵列。由于聚光镜的焦面上光斑尺寸取决于聚光镜的焦距、阵列中透镜单元的照明孔径, 所以, 两级透镜阵列可以在不改变聚光镜焦面位置的情况下, 通过调节二者间距从而达到改变照明孔径的目的, 进而改变光斑尺寸。

若要获得均匀性良好的光斑, 应增加阵列单元的数量。在两级透镜阵列中, 一定要满足透镜单元的一对一原则, 否则会产生旁瓣效应, 严重影响光斑均匀性^[8]。同时, 两级透镜阵列的相对位置对光斑的均匀度也有影响, 其中, 匀化效果对阵列绕光轴滚转偏差最为敏感^[9]。最后, 为防止昂贵的透镜阵列损坏, 二级阵列应与一级阵列的焦平面保持一定的距离, 聚光镜也不应置于两级阵列组合后的焦平面处。

3 典型 ELA 系统介绍

ELA 制备多晶硅薄膜的方法在平板显示领域中扮演着重要的角色, 但准分子激光器的原始光束往往不能达到此应用的要求, 这就需要光束整形系统对原始光束进行处理。典型的 ELA 光束整形系统需要达到 3 个目标: (1) 将原始的矩形光斑整形为高横纵比的线形光斑, 整形后的线型光斑尺寸根据基板的尺寸和光源的脉冲能量而设定; (2) 样品表面的光斑能量密度达到 $300\text{mJ}/\text{cm}^2 \sim 450\text{mJ}/\text{cm}^2$, 且连续可调^[10]; (3) 光斑能量密度分布均匀, 这有助于提高硅晶粒的均匀性。

图 2 为线型光束扫描基板进行准分子激光退火的示意图。

图 3 为 MicroLas 公司的光束整形系统示意图。整套 ELA 系统由 Coherent 公司 (原 Lambda Physik 公

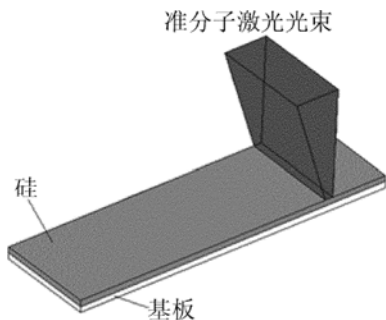


图2 线形光束扫描非晶硅薄膜

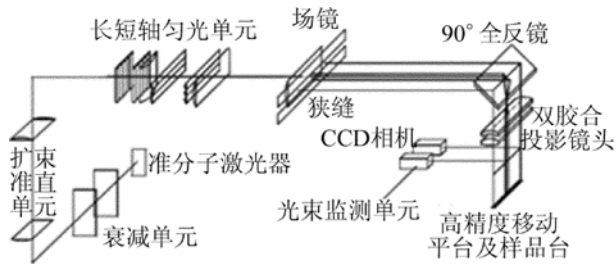


图3 典型 ELA 光束整形系统

公司)、MicroLas 公司与日本制钢所合作完成。其中光源部分是波长为 308nm 的 XeCl 准分子激光器,由 Coherent 公司提供;MicroLas 公司的光束整形系统可将光源的原始光斑整形为能量密度均匀的线形结构;工件台等处理系统由日本制钢所提供。

ELA 光束整形系统大体可分为衰减单元、扩束准直单元、长轴匀光单元、短轴匀光单元、投影单元、光束质量监测单元。整个系统均采用柱面结构对光束进行一维处理,分别对扩展轴和压缩轴进行整形,从而在最终辐射面上获得良好的线形光束。

如图 3 所示,衰减单元需要对能量稳定的原始光束进行连续可调节衰减处理,使光束能量密度处于准分子激光 LTPS 加工窗口之内。

扩束系统为开普勒望远镜结构,对光源短轴进行扩束,这样可以降低作用于匀光单元的能量密度、压缩短轴的发散角,最主要的是提高了对匀光单元的照明面积,从而在短轴方向上提高了光束的均匀程度。

长轴匀光单元由两级单行柱面镜阵列与一片柱面聚光镜组成,将长轴扩展为合适的尺寸,光束均匀面位于聚光镜的焦平面处。长轴的光斑尺寸与阵列单元柱面镜的宽度、阵列对聚光镜的照明孔径、聚光镜的焦距变化趋势相同。短轴匀光单元类似于长轴,将短轴压缩,光束均匀面位于狭缝处,狭缝将短轴光束边缘锐化。其中,短轴方向设置一场镜,它可以在短轴方向上压缩均匀面后的发散光束,使光束完全进入投影镜头,提高能量利用率。

投影单元为双胶合镜头,将狭缝处的短轴均匀光斑成像于样品表面。

光束监测单元的核心部件为 CCD 相机,308nm 的显微物镜将光束成像于 CCD 芯片上,这种方法对压缩轴的测量分辨率优于 $5\mu\text{m}$,扩展轴的测量则通过 CCD 相机对其扫描来完成。

最初的系统,光源为 Lambda Physik 公司的 Lambda 4308A XeCl 准分子激光器,其单脉冲能量达 670mJ,稳定输出功率 200W,光源经整形系统处理后,光束尺寸为 $(140\text{mm} \sim 200\text{mm}) \times (0.1\text{mm} \sim 0.5\text{mm})$,匀光后能量均匀度 $2\sigma \leq 5\%$ 。随着所处理的面板尺寸的扩大,对光源与整形系统提出了更高的要求,继而系统采用 Lambda Physik 公司的 Lambda Steel 1000 XeCl 准分子激光器,使得单脉冲能量达到 1J,稳定输出功率 300W,光束经整形后,光斑尺寸为 $(275\text{mm} \sim 365\text{mm}) \times 0.4\text{mm}$ 。后续的产品要求光斑扩展轴线度达到 630mm 甚至更长,为了提高光源输出能量, Lambda Physik 公司采用两台 Lambda Steel 1000 XeCl 准分子激光器同步出光的技术。图 4 为两台光源组合的短轴光束整形系统示意图,其整形过程如图所示。如今,Coherent 公司的 VYPER 系列准分子激光器的单脉冲能量可达 2J,平均功率达到了 1200W,经光束整形系统处理后,线型光斑尺寸达到了 $750\text{mm} \times 0.4\text{mm}$ 。图 5 为两台光源组合的光束整形系统整体图。图 6 为典型 ELA 系统结晶多晶硅薄膜 SEM 图,电子迁移率可达 $100\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s}) \sim 150\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ [10-12]。

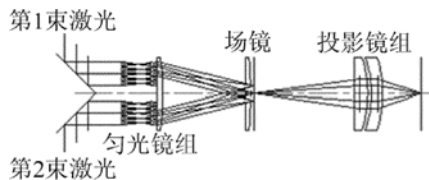


图4 两台光源同步的短轴组合

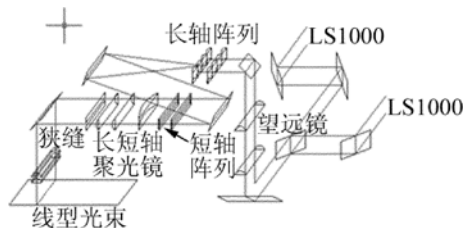


图5 两台光源同步的整形系统整体示意图

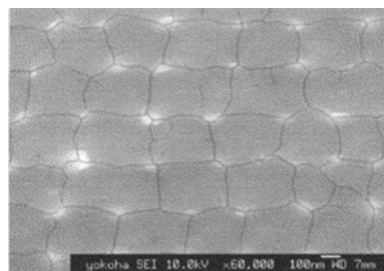


图6 典型 ELA 系统结晶多晶硅薄膜 SEM 图

图 7 为日本半导体能源研究所的光束整形系统示

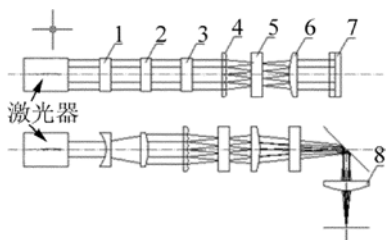


图7 ELA 光束整形系统

意图,与 Microlas 公司相类似,此系统亦由柱面结构组成,原始光束经扩束、匀光、投影,最终将均匀的能量耦合进样品中。

图中上半部分展示了对光束扩展轴的处理,柱面镜阵列4与聚光镜6组合,可达到匀光和扩展光束线度的目的。图中下半部分展示了对光束压缩轴的处理,1与2组合形成伽利略望远镜,对原始光束进行一维的扩束和准直,柱面镜阵列3与聚光镜5组合对压缩轴进行匀光,后由正柱面镜8将光束投影于样品表面。

针对于此系统结构,日本半导体能源实验室对其细节部分进行了研究,得到了以下结论^[13-15]:(1)每个柱面镜单元的宽度范围为0.1mm~5mm;(2)扩展轴方向,每个柱面镜对应的最终辐射面线度为5mm~15mm;(3)扩展轴使用两个阵列,压缩轴使用一个阵列,这样可以以最低成本达到理想匀光效果;(4)当单元柱面镜与水平或垂直方向有一夹角 α ,且 $\alpha \neq 90^\circ$,这样可避免子光束的干涉,从而增强匀光效果。

4 使用 SLS 技术的 ELA 系统

图8为使用SLS技术的ELA系统示意图,与典型的ELA系统结构相比较,其最大特点在于增加了掩模单元。SLS技术属于ACSLG技术,它有很多优势,比如从理论上讲可以获得无限长的晶粒^[5],甚至是单晶^[16],可以通过掩模来控制结晶的位置。但SLS过程却对整个系统提出了苛刻的要求。首先,它要求系统精确控制相邻两个脉冲之间样品的移动距离,使之小于横向生长长度,这对工件台的精度提出了极高的要求。其次,它要求光束整形系统投影单元有高分辨率。VOITSAS^[17]指出,只有当掩模投影到样品表面的线型光束宽度接近横向生长长度的2倍的时候,才会有好的结晶效果。有效的办法是减小光束宽度,减小光束宽度要求投影透镜有高的分辨率。最后,它要求光束整形系投影单元有精确的焦点位置与较大的焦深,若样品面离开焦深范围,则光斑会弥散,降低了投影单元的分辨率。图9为使用SLS技术的ELA系统制备的多晶硅薄膜示意图^[18]。

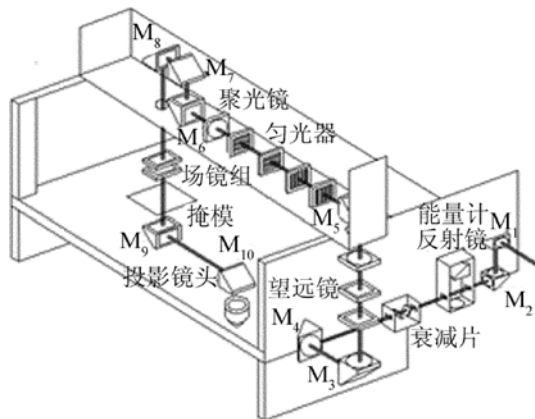


图8 使用SLS技术的ELA 光束整形系统

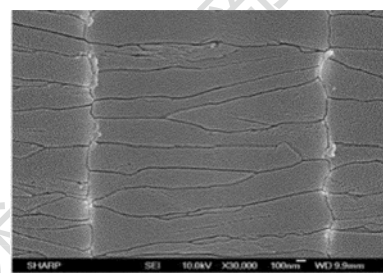


图9 使用SLS技术的ELA系统制备多晶硅薄膜SEM图

5 结束语

AMLCD是当今平板显示的主流先进技术,AMOLED是下一代平板显示的先进技术,其中,LTPS制备是降低生产成本、提高产品性能的关键。国外的准分子激光LTPS工艺已经比较成熟,在平板显示器制造领域起着举足轻重的作用。国内对准分子激光退火设备及其光束整形系统的研究较少,开展这方面的工作可以推进我国平板显示行业的发展。

参 考 文 献

- [1] YIN S, LIU C, ZHONG Z Y, *et al.* The development of low temperature poly-Si TFT technology[J]. *Advanced Display*, 2003, 35(1): 33-37(in Chinese).
- [2] IM J S, KIM H J, THOMPSON M O. Phase transformation mechanisms involved in excimer laser crystallization of amorphous silicon films[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 63(14): 1969-1971.
- [3] MARIUCCI L, CARLUCCIO R, PECORA A, *et al.* Lateral growth control in excimer laser crystallized polysilicon[J]. *Thin Solid Films*, 1999, 337(1): 137-142.
- [4] YAN Y J, DAI Y B, WANG J, *et al.* Progress in the research of poly Si film for TFT prepared by excimer laser crystallization[J]. *Microelectronics*, 2006, 36(1): 70-74(in Chinese).
- [5] SPOSILI R S, IM J S. Sequential lateral solidification of thin silicon films on SiO₂[J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 69(19): 2864-2866.
- [6] LI H X, LOU Q H, DONG J X, *et al.* A novel homogenizer to improve the excimer laser beam uniformity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(7): 785-788(in Chinese).
- [7] LI C D, CHEN T, ZUO T C. Design of fly's eye homogenizer for excimer laser micromachining[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, 26

- (6): 560-564(in Chinese).
- [8] KUANG L J, ZHAI J H, RUAN Y, *et al.* Characteristics of fly-eye lens in uniform illumination system [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2005, 3(6): 29-31(in Chinese).
- [9] HUANG W, YU H Y, LI Y. Effect of relative position error in microlens arrays pair on beam homogenization [J]. Laser Technology, 2013, 37(1): 11-15(in Chinese).
- [10] KAHLERT H J, BURGHARDT B, SIMON F, *et al.* High resolution optics for thin Si-film crystallization using excimer lasers: present status and future development [J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 5004: 20-27.
- [11] FIEBIG M, OSMANOV R, STAMM U, *et al.* High-power excimer lasers for high-throughput poly-Si annealing [J]. Proceedings of the SPIE, 2000, 3888: 464-469.
- [12] FECHNER B, SCHIWEK M, KAHLERT H J, *et al.* 300W XeCl-excimer laser annealing and sequential lateral solidification in low temperature poly silicon technology [J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 4830: 283-286.
- [13] YAMAZAKI S, TERAMOTO S, KUSUMOTO N, *et al.* Apparatus and method for laser radiation; US Patent 6215595 [P]. 2001-04-10.
- [14] YAMAZAKI S, TANAKA K, TERAMOTO S. Laser irradiation apparatus; US Patent 6441965 [P]. 2002-08-27.
- [15] TANAKA K. Laser irradiation apparatus and method; US Patent 6104535 [P]. 2000-08-15.
- [16] IM J S, SPOSILI R S, CROWDER M A. Single-crystal Si films for thin-film transistor devices [J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(25): 3434-3436.
- [17] VOUSAS A T, LIMANOV A, IM J S. Effect of process parameters on the structural characteristics of laterally grown, laser-annealed polycrystalline silicon films [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 94(12): 7445-7452.
- [18] CROWDER M A, VOUSAS A T, DROES S R, *et al.* Sequential lateral solidification processing for polycrystalline Si TFTs [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2004, 51(4): 560-568.

《激光技术》编辑部