

# 用于低温多晶硅制备的线光束整形系统

尹广玥<sup>1,2</sup>, 游利兵<sup>1\*</sup>, 王庆胜<sup>1</sup>, 褚状状<sup>1,2</sup>, 陈亮<sup>1,2</sup>, 方晓东<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 设计了一套用于准分子激光低温多晶硅制备的线光束整形系统。系统中设置的光斑转换模块可使原始光束截面横纵倒置; 利用扩束模块对原始光束的短轴进行准直, 其扩束倍率可限定短轴光束尺寸, 以配合短轴光束均匀模块的孔径; 采用基于透镜阵列的长轴、短轴光束均匀模块可在提高光斑能量分布均匀性的同时, 约束光斑尺寸; 系统中设置了投影模块, 可将光束投影于工件表面。为了实现系统中光学原件的精密定位, 设计并加工了配套的机械调节结构; 结合仿真实验, 讨论了阵列单元的中心偏差及工作面的偏离对线光斑质量的影响。利用该线光束整形系统对自行研制的大能量准分子激光光源进行整形, 实测的系统能量传递效率为 33%, 工件表面的光斑尺寸约为 100 mm×0.3 mm, 平均能量密度为 470 mJ·cm<sup>-2</sup>, 长轴能量分布均匀度为 93.95%, 满足退火技术的要求。

**关键词** 激光技术; 线光束整形; 光束均匀性; 准分子激光退火; 低温多晶硅制备

**中图分类号** TN205

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0906002

## Line Beam Shaping System for Preparation of Low Temperature Poly-Silicon

Yin Guangyue<sup>1,2</sup>, You Libing<sup>1</sup>, Wang Qingsheng<sup>1</sup>, Chu Zhuangzhuang<sup>1,2</sup>,  
Chen Liang<sup>1,2</sup>, Fang Xiaodong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Anhui Province Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** A line beam shaping system is developed for low temperature poly-silicon preparation with excimer laser. A spot conversion module is installed to make the beam cross sections of horizontal axis and vertical axis exchange their position. A beam expanding module is used for collimating the short axis of the initial beam, and its magnification determines the spot size of the short axis to match the aperture of the short axis beam homogenizer. The beam homogenizers for long and short axes based on lens array are used to improve the homogeneity of the spot energy distribution and restrict the spot size. A projector is installed to project the beam to the work piece. In order to realize precision positioning of the optical elements, a mechanical adjusting structure is designed and manufactured. The effects of the center error of the lens array unit and the deviation of the working plane on the line beam quality are discussed based on the simulation. The line beam shaping system is used for shaping a homemade high-power excimer laser, and the results show that the measured energy transfer efficiency of the system is 33%, the spot size on the work piece is 100 mm×0.3 mm with the average energy density of 470 mJ·cm<sup>-2</sup>, and the energy distribution homogeneity of long axis is 93.95%. These results can meet the requirement of annealing technology.

**Key words** laser technique; line beam shaping; beam homogeneity; excimer laser annealing; preparation of low temperature poly-silicon

**收稿日期:** 2017-03-29; **收到修改稿日期:** 2017-04-23

**基金项目:** 安徽省国际合作项目(1403062009)

**作者简介:** 尹广玥(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事准分子激光技术方面的研究。E-mail: 378575080@qq.com

**导师简介:** 方晓东(1963—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光技术与功能薄膜材料方面的研究。

E-mail: xdfang@aiofm.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: lbyou@aiofm.ac.cn

## 1 引 言

目前,有源矩阵液晶显示技术和有源有机发光二极管显示技术是两种先进的平板显示技术<sup>[1-2]</sup>。薄膜晶体管作为有源驱动的核心部件,其性能决定了显示器的信息传递量与传递效率。与非晶硅薄膜晶体管相比,多晶硅薄膜晶体管的电子迁移率提高了数百倍<sup>[3]</sup>,因此基于多晶硅薄膜晶体管的平板显示器更具有发展潜力。制备多晶硅薄膜的方法主要有准分子激光晶化法、化学气相沉积法、固相晶化法、快速热退火法和金属诱导横向晶化法等<sup>[4-9]</sup>。准分子激光晶化法属于低温多晶硅制备技术,适用于多晶硅薄膜的工业化生产,其原因主要有:1)绝大多数准分子激光为紫外波段,热效应弱,脉宽窄,且非晶硅薄膜熔化再结晶的时间短,可最大程度地降低结晶过程对基板的损伤,使得廉价的玻璃、塑料甚至是一些柔性材料均可能成为基板的选择,从而保证了工业化生产的低成本;2)准分子激光是目前紫外波段输出功率最高的光源<sup>[10]</sup>,可保证高效率的工业化生产。

准分子激光原始光斑能量分布的均匀性较差,简单的扩束或投影无法使激光满足均匀低温多晶硅薄膜的制备要求。采用高横纵比且能量分布均匀的准分子激光光线光斑对工件进行扫描,在保证获得精细、均匀结晶的同时,可进一步提高生产效率。Yamazaki 等<sup>[11-13]</sup>提出的光束整形系统将近似矩形的准分子激光光斑整形为能量分布均匀的线光斑;利用光束整形系统对准分子激光短轴进行扩束,将透镜阵列与会聚透镜组合以实现均匀光束,由镜头将匀化线光斑投影于工件表面;系统长轴采用两片透镜阵列,短轴采用一片透镜阵列,阵列单元倾斜放置,以降低子光束间干涉引起的能量不均匀分布。Kahlert 等<sup>[14]</sup>提出的线光束整形系统采用了类似的主体结构,系统中设置的场镜降低了对镜头相对孔径的要求,从而提高了系统传输效率。镜头采用双胶合或双分离结构来校正系统像差,在保证能量密度满足非晶硅晶化要求且分布均匀的前提下,线光斑尺寸可达到 750 mm×0.4 mm。国内科研工作者也开展了一些基于透镜阵列实现均匀光束的研究<sup>[15-20]</sup>,但应用于工业化生产中低温多晶硅制备的准分子激光光线光束整形系统却未见相关报道。目前,国内各大平板显示厂商均加大低温多晶硅生产线方面的投资<sup>[21]</sup>,但核心的生产设备却依赖于进口,因此开展低温多晶硅生产方面的研究有助于完善相关产业链。

从近轴光学理论出发,讨论了线光束整形的基本原理;对线光束整形系统进行仿真,探究了透镜阵列中心偏差与工作面的偏离对光束均匀性的影响;针对自行研制的 308 nm 大能量准分子激光光源,结合仿真实验结果,提出了一套用于准分子激光低温多晶硅制备的线光束整形系统。该系统采用一个柱面透镜阵列对光束长轴进行整形,采用两个柱面透镜阵列对光束短轴进行整形,系统结构紧凑,成本较低。利用所提系统可成功实现准分子激光的线光束整形与低温多晶硅的制备。

## 2 线光束整形原理

满足工业化生产中激光退火技术要求的光斑应为高横纵比且能量分布均匀的线形,但准分子激光输出光斑近似为矩形,能量分布均匀性较差,因此需要使用光束整形系统对准分子激光输出光斑进行整形。基于一维柱面透镜阵列的光束均匀模块可以提高长轴和短轴的能量分布均匀性并约束光斑尺寸;该光束均匀模块是系统的核心,其基本结构包括一个透镜阵列和一个会聚透镜,基于透镜阵列的光束均匀原理如图 1 所示。

图 1 中激光在子午面内被透镜阵列分割为  $2n+1$  个能量通道,每个通道的能量分别被聚焦,形成  $2n+1$  个点光源。 $H_1$ 、 $H_1'$  分别为会聚透镜的物方主点与像方主点, $H_2$ 、 $H_2'$  分别为透镜阵列单元的物方主点与像方主点, $f'_{\text{condenser}}$ 、 $f'_{\text{array}}$  分别为会聚透镜与双透镜阵列单元的有效焦距, $d$  为透镜阵列单元的孔径。由图 1 可得

$$l_1 = -2f'_{\text{array}}n - a, \quad (1)$$

式中  $l_1$  为能量通道边缘光线与光轴的交点到  $H_1$  的距离, $a$  为透镜阵列像方焦平面到  $H_1$  的距离。由理想光学系统的物像关系可得

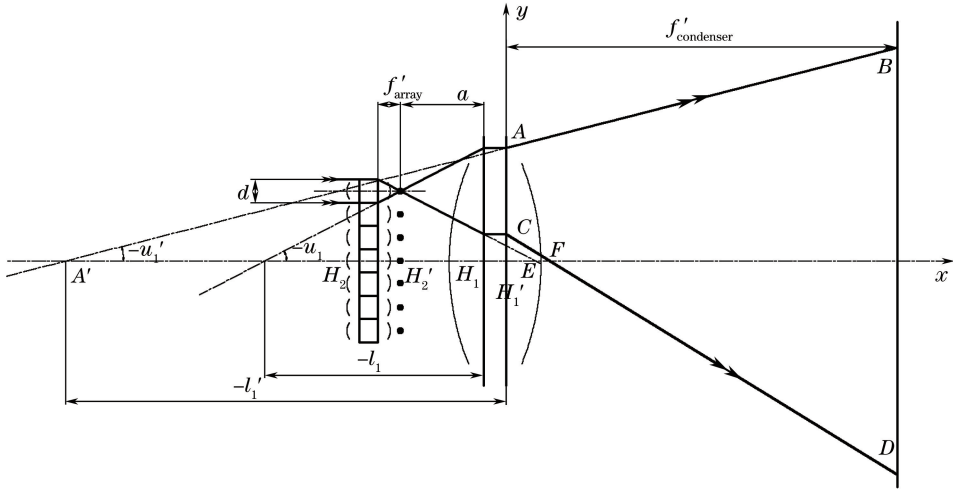


图 1 基于透镜阵列的光束均匀原理

Fig. 1 Schematic of beam homogenizing based on lens array

$$\frac{1}{l'_1} - \frac{1}{l_1} = \frac{1}{f'_{\text{condenser}}}, \quad (2)$$

式中  $l'_1$  为  $l_1$  关于会聚透镜的共轭距离。由(1)~(2)式可得

$$l'_1 = \frac{-f'_{\text{condenser}}(2f'_{\text{array}}n + a)}{f'_{\text{condenser}} - 2f'_{\text{array}}n - a}. \quad (3)$$

由(3)式可得, A 点坐标为  $[0, nd + ad/(2f'_{\text{array}})]$ , A' 点坐标为  $[-f'_{\text{condenser}}(2f'_{\text{array}}n + a)/(f'_{\text{condenser}} - 2f'_{\text{array}}n - a), 0]$ , 则根据两点式直线方程求得直线 A'B 的解析式为

$$y_1 = \left[ \frac{x(f'_{\text{condenser}} - 2f'_{\text{array}}n - a)}{f'_{\text{condenser}}(2f'_{\text{array}}n + a)} + 1 \right] \left( nd + \frac{ad}{2f'_{\text{array}}} \right). \quad (4)$$

同理, 可求得直线 CD 的解析式为

$$y_2 = \left[ \frac{x(-f'_{\text{condenser}} - 2f'_{\text{array}}n + a)}{f'_{\text{condenser}}(2f'_{\text{array}}n - a)} + 1 \right] \left( nd - \frac{ad}{2f'_{\text{array}}} \right). \quad (5)$$

当  $x = f'_{\text{condenser}}$  时, 可得  $y_1 = df'_{\text{condenser}}/(2f'_{\text{array}})$ ,  $y_2 = -df'_{\text{condenser}}/(2f'_{\text{array}})$ , 式中  $n, a$  均被消去, 说明在子午面内,  $2n + 1$  个点光源均将能量辐射至线段 BD 上。能量高的点与能量低的点在线段 BD 上相互叠加, 实现了光束能量的匀化。原则上, 分割的能量通道越多, 匀化效果越好, 但子光束间的干涉和阵列单元孔径引起的衍射不容忽视。基于透镜阵列的光束均匀方法易于装调, 结构紧凑, 且传输效率高。能量辐射区域的尺寸可表示为

$$2y_1 = \frac{df'_{\text{condenser}}}{f'_{\text{array}}}. \quad (6)$$

(6)式表明基于透镜阵列的光束均匀方法起到了均匀光束的作用, 同时也可约束匀化光斑的尺寸, 合理设置透镜阵列单元的孔径尺寸、有效焦距以及会聚透镜的有效焦距是实现光斑的高横纵比和能量均匀分布的关键。

### 3 线光束整形系统及仿真

在典型的工况需求中, 针对厚度为 50 nm 的薄膜, 退火光源通常采用光子能量为 4.03 eV 的 308 nm 准分子激光, 整形后的光斑尺寸视工件尺寸而定, 到达工件表面的光斑能量密度约为  $400 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ , Paetzel 等<sup>[8]</sup>利用其制造的设备得到 2.5% 的光斑能量分布均匀性。设计的线光束整形系统示意图如图 2 所示, 系统主要包括光路准直光源、光斑转换模块、导光臂和投影模块, 导光臂中包括扩束模块、长轴光束均匀模块和短轴光束均匀模块等。308 nm 准分子激光光源的单脉冲能量为 429 mJ, 光斑尺寸为  $13 \text{ mm} \times 33 \text{ mm}$ 。工件

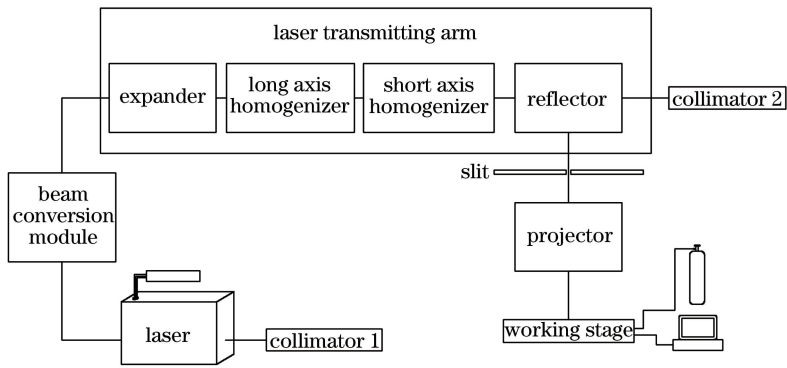


图 2 线光束整形系统示意图

Fig. 2 Schematic of line beam shaping system

台的核心设备为精密电动平移台。

准分子激光束经光斑转换模块的处理后,光束截面横纵倒置。短轴光束经扩束准直后进入光束均匀模块,匀化光斑经过狭缝时,狭缝光阑将边缘光滤除,确保了短轴光斑边缘的锐化,狭缝处的短轴匀化光斑最终被投影于工件表面;长轴光束则直接被匀化,并被投影于工件表面。系统中光学元件的材料均为紫外级熔融石英。1号校准光源用于准分子激光器光路、光斑转换模块和导光臂的校准,2号校准光源用于导光臂内部光学器件的校准。工件台的动作由计算机控制,外接气体保证了非晶硅晶化时的工作气体环境。

准分子激光原始光束截面的短轴平行于水平面,长轴垂直于水平面,长轴发散角约为短轴的4倍,故短轴更易被压缩。设置光斑转换模块,该模块由两片反射镜组成,经两次反射后,光束长轴平行于水平面,光束短轴垂直于水平面。

为获得较好的横纵比,需对光束长轴、短轴分别进行整形,因而导光臂中光学原件均采用一维柱面结构。导光臂的结构如图3所示,扩束模块包括一个平凹柱面镜和一个平凸柱面镜,二者组合形成伽利略望远系统形式后可以压缩短轴发散角,并可令光束孔径与后续模块相匹配。扩束孔径可表示为

$$D_2 = \frac{|f'_2|}{|f'_1|} \cdot D_1, \quad (7)$$

式中  $D_1$ 、 $D_2$  分别为扩束前后的短轴光束孔径,  $f'_1$ 、 $f'_2$  分别为负透镜与正透镜的有效焦距。系统采用2.5倍扩束,扩束后短轴光束孔径为32 mm。若将长轴光束均匀模块置于短轴光束均匀模块之后,相对于短轴器件,长轴器件等效于厚度连续变化的平行平板,其引入的像差会影响短轴光斑的匀化效果,同时会增加镜头的设计难度。短轴光束均匀模块中,过大的出射角度(如图1中  $\angle AA'E$  和  $\angle CFE$ )会对后续的投影提出较高的要求。为了防止高能量密度激光对光学器件造成损坏,光束均匀模块的会聚透镜位置应与阵列的焦平面有一定偏差;另外,整个光束均匀模块的通光孔径应满足激光的传输要求,以提高能量利用率。考虑到系统的期望指标,结合加工周期、加工难度和成本等因素,长轴光束均匀模块采用了一个柱面透镜阵列和一个

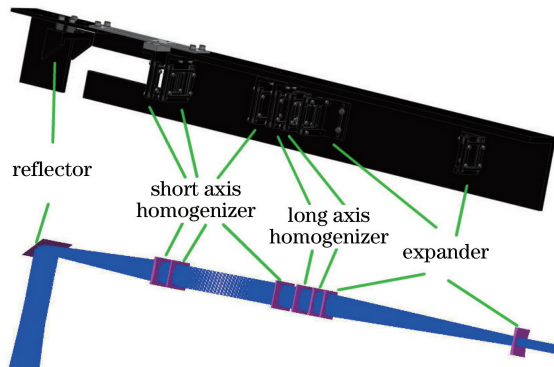


图 3 导光臂的结构

Fig. 3 Structure of laser transmitting arm



柱面会聚透镜,短轴光束均匀模块采用了两个柱面透镜阵列和一个柱面会聚透镜。

双阵列组合后的有效焦距可表示为

$$f'_{array} = -\frac{f'_{array1} f'_{array2}}{\Delta}, \quad (8)$$

式中  $f'_{array1}$ 、 $f'_{array2}$  分别为两个透镜阵列的有效焦距,  $\Delta$  为双阵列的光学间隔。根据(6)、(8)式合理设置阵列与聚光镜的参数。长轴透镜阵列由 14 个小柱面镜单元胶合而成,有效通光孔径为 38 mm×38 mm,单元宽度为 3 mm,长轴透镜阵列实物图如图 4 所示;短轴透镜阵列单元宽度为 1 mm,有效通光孔径为 38 mm×58 mm。经光束均匀模块整形后的激光束被反射镜反射至狭缝光阑,狭缝光阑被置于短轴会聚透镜的后焦平面处。此外,还为光学原件设计了配套的机械结构,采用压片式结构对镜片进行装卡,调节机制基于碟形垫片,整套机械结构简单可靠,易于加工。



图 4 长轴透镜阵列实物图

Fig. 4 Photograph of long axis lens array

经狭缝光阑锐化的短轴匀化光斑被投影镜头成像于工件表面,从而可实现低温多晶硅的制备。系统结构要求镜头的相对孔径  $D/f' = 0.8$ ,有效焦距为 35.5 mm,对狭缝光阑面的垂轴放大率为 0.3,工作距离大于 30 mm,镜头的机械结构和光学结构如图 5 所示。



图 5 镜头的(a)机械结构和(b)光学结构

Fig. 5 (a) Mechanical structure and (b) optical structure of lens

基于 ZEMAX 软件对 308 nm 准分子激光光源<sup>[22]</sup>及整形后的线光斑进行仿真。准分子激光仿真光斑及其能量分布曲线如图 6 所示。由图 6 可见,准分子激光的短轴能量分布为近高斯分布、近平顶分布或介于二者之间的分布,长轴能量分布为近平顶分布<sup>[23]</sup>,原始光斑的模拟结果符合实际情况。

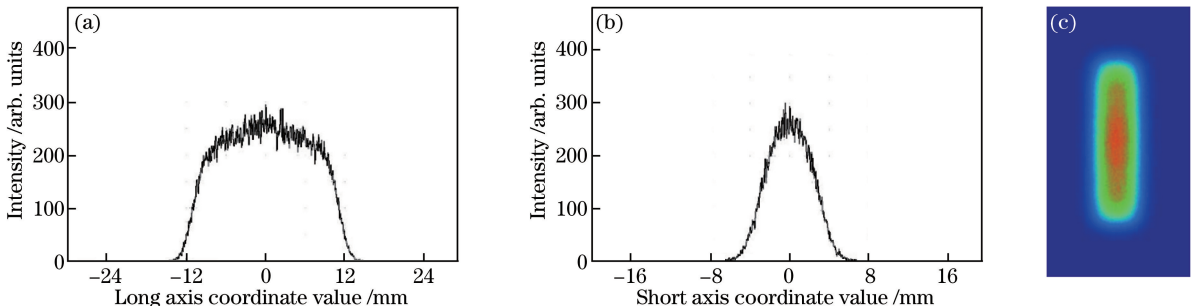


图 6 (a)长轴能量分布曲线;(b)短轴能量分布曲线;(c)仿真得到的光斑

Fig. 6 (a) Energy distribution curve of long axis; (b) energy distribution curve of short axis; (c) simulated spot

当长轴透镜阵列单元存在一定的中心偏差时,长轴各能量通道在会聚透镜后焦平面的辐射区域无法完全重叠,故整形后光斑的尺寸与能量分布均匀性会受到影响。因此,分别对以下4种情况整形后的线光斑进行仿真:1)长轴透镜阵列单元无中心偏差;2)长轴透镜阵列单元中心偏差在 $[-0.1\text{ mm}, 0.1\text{ mm}]$ 区间内随机取值;3)长轴透镜阵列单元中心偏差在 $[-0.3\text{ mm}, 0.3\text{ mm}]$ 区间内随机取值;4)长轴透镜阵列单元中心偏差在 $[-0.5\text{ mm}, 0.5\text{ mm}]$ 区间内随机取值。

仿真线光斑的长轴能量分布如图7所示。由图可见,随着长轴阵列单元中心偏差的增加,整形后线光斑的长度也随之增加,但光斑边缘锐化程度下降,满足退火技术要求的平顶分布的区域随之减小,这不但增大了系统的外形尺寸,也降低了能量利用率,最终导致工业生产的成本增加而产能降低。长轴阵列中心偏差与线光斑尺寸间的关系如图8所示。

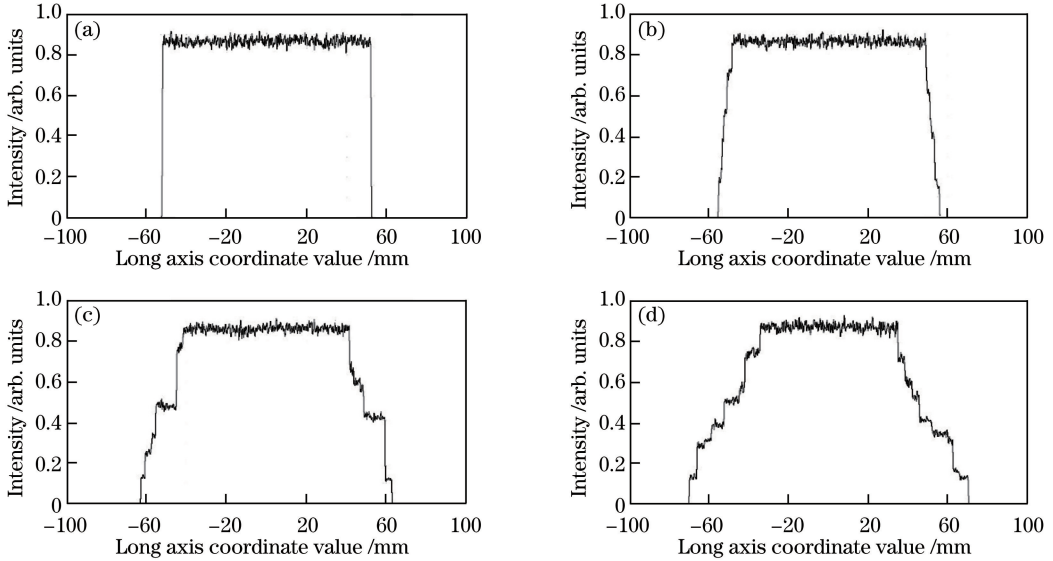


图7 仿真得到的线光斑长轴能量分布。(a)无中心偏差时的能量分布;(b)中心偏差在 $[-0.1\text{ mm}, 0.1\text{ mm}]$ 区间时的能量分布;(c)中心偏差在 $[-0.3\text{ mm}, 0.3\text{ mm}]$ 区间时的能量分布;(d)中心偏差在 $[-0.5\text{ mm}, 0.5\text{ mm}]$ 区间时的能量分布  
Fig. 7 Simulated long axis energy distributions of line spots. (a) Energy distribution without center error; (b) energy distribution with center error in the range of  $[-0.1\text{ mm}, 0.1\text{ mm}]$ ; (c) energy distribution with center error in the range of  $[-0.3\text{ mm}, 0.3\text{ mm}]$ ; (d) energy distribution with center error in the range of  $[-0.5\text{ mm}, 0.5\text{ mm}]$

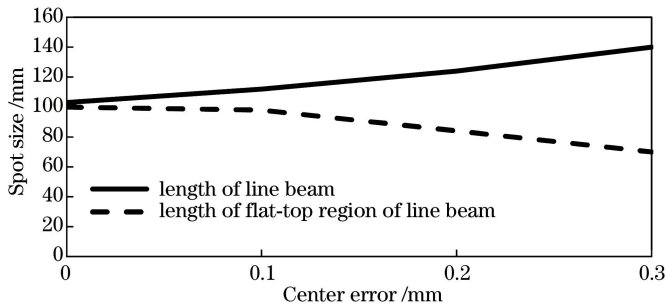


图8 长轴透镜阵列中心偏差与线光斑尺寸间的关系

Fig. 8 Relationship between center error of long axis lens array and size of line spot

光斑短轴对实际工作平面与理想工作平面的偏离尤为敏感,具体表现在光斑尺寸与能量分布上。分别对以下5种情况下的整形后线光斑进行仿真:1)实际工作平面偏离 $-2\text{ mm}$ ;2)实际工作平面偏离 $-1\text{ mm}$ ;3)实际工作平面无偏离;4)实际工作平面偏离 $1\text{ mm}$ ;5)实际工作平面偏离 $2\text{ mm}$ 。

仿真线光斑的短轴能量分布如图9所示。由图可见,当实际工作平面与理想工作平面出现毫米量级的偏差时,光斑尺寸、能量密度和能量分布均出现较大变化,表现为光斑尺寸增加、能量密度减小和能量分布均匀性变差,这会导致工业生产中出现不合格产品。实际工作面的偏离与短轴光斑尺寸、能量密度之间的关系如图10所示。

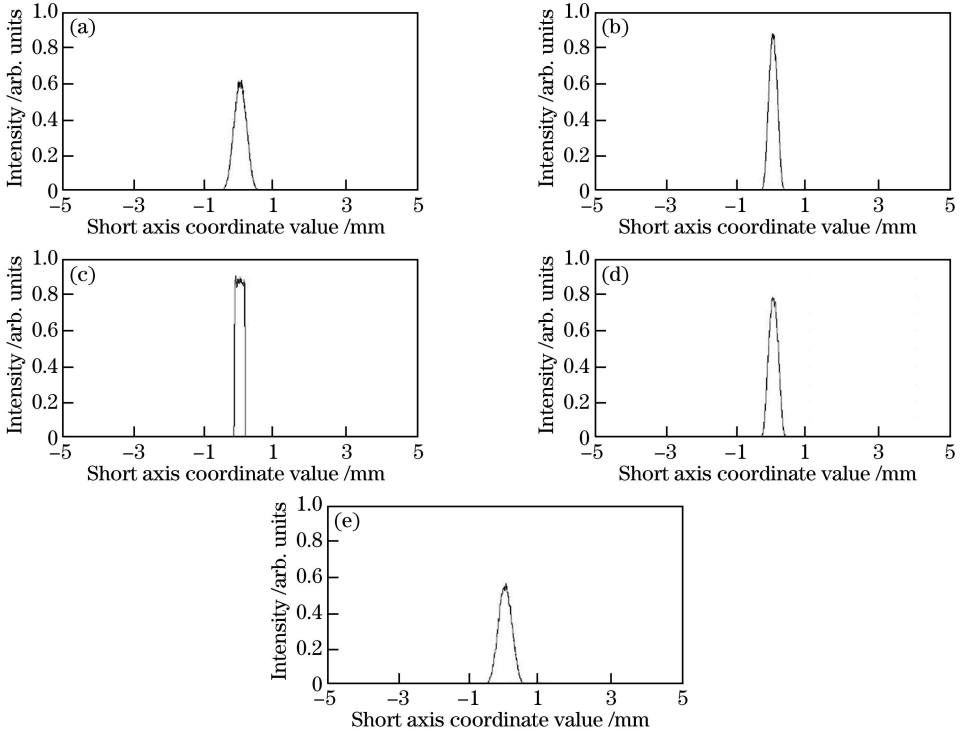


图 9 仿真得到的线光斑短轴能量分布。(a)实际工作面偏离-2 mm时的能量分布;(b)实际工作面偏离-1 mm时的能量分布;(c)实际工作面无偏离时的能量分布;(d)实际工作面偏离 1 mm 时的能量分布;(e)实际工作面偏离 2 mm 时的能量分布

Fig. 9 Simulated short axis energy distributions of line spots. (a) Energy distribution with actual working plane deviation of -2 mm; (b) energy distribution with actual working plane deviation of -1 mm; (c) energy distribution without deviation; (d) energy distribution with actual working plane deviation of 1 mm; (e) energy distribution with actual working plane deviation of 2 mm

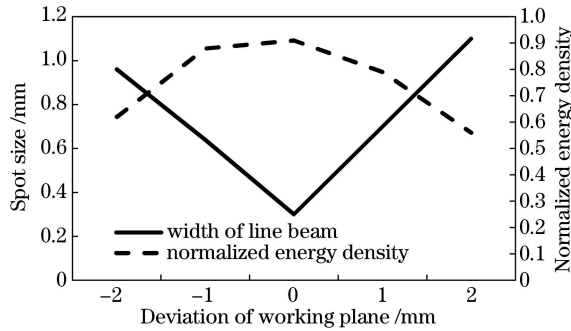


图 10 实际工作面的偏离与短轴光斑尺寸、能量密度之间的关系

Fig. 10 Relationship among deviation of actual working plane, spot size of short axis and energy density

光斑的能量分布均匀性可用辐射能量均匀度误差来描述<sup>[24]</sup>,对  $5 \times 10^6$  条光线进行追迹,在理想情况下(透镜阵列单元无中心偏差,实际工作面无偏离),计算可得仿真的线光斑长轴能量分布均匀度为 94.80%,短轴能量分布均匀度为 96.55%。

#### 4 实验结果及讨论

经系统整形后得到的光斑长轴尺寸约为 100 mm,短轴尺寸约为 0.3 mm,将此光斑分别作用于热敏相纸和表面氧化发黑处理过的铝件上,并用金相显微镜(BX51M, Olympus 公司,日本)进行观测,以分析其基本形貌。不同材料接收到的线光斑照片如图 11 所示。使用显微镜配套的计算机软件测量得到图 11(b)、(c)中部分线光斑的短轴尺寸分别为 0.339 mm 和 0.267 mm,系统的装配误差、光斑均匀性、不同材料的导



图 11 不同材料接收到的线光斑照片。(a)热敏相纸接收到的线光斑;(b)光学显微镜下热敏相纸接收到的局部线光斑;  
(c)光学显微镜下表面氧化发黑处理过的铝件接收到的局部线光斑

Fig. 11 Photographs of line spots on different materials. (a) Line spot on heat-sensitive photo paper; (b) partial line spot on heat-sensitive photo paper under optical microscope; (c) partial line spot on oxidized and blackened aluminum under optical microscope

热性能、粗糙度及表面纹理均可能导致测量值与理论值的偏差。

经整形后的线光斑能量密度高,且波长处于紫外波段,可满足以上要求的高精度探测器种类甚少,且价格昂贵。因此采用光束质量分析仪(ML3743, Metrolux 公司,德国)对衰减后的线光斑进行能量分布测试。该分析仪的主体结构示意图如图 12 所示,紫外激光作用于荧光窗口(64 mm×44 mm),透镜将紫外激光诱导的荧光成像于 CCD,可见光则可以直接通过窗口并被 CCD 探测,实测部分线光斑如图 13(a)所示。设置合适的曝光时间,测得某时刻部分线光斑能量的空间分布。当线光斑(100 mm)布满荧光窗口时,CCD 边缘会出现渐晕现象,略去渐晕部分,获得长度为 50 mm 的光斑长轴能量分布,结果如图 13(b)所示;计算可得光斑均匀度为 93.95%,与仿真结果基本一致。短轴能量分布如图 13(c)所示,呈现较为明显的高斯分布特征,半峰全宽约为 0.4 mm,与光学显微镜的测试结果相异,其原因可能是:1)窗口的荧光物质产生的荧光与激光尺寸略有不同;2)分析仪的透镜对荧光成像时,改变了荧光的尺寸与能量分布;3)荧光窗口的厚度可以改变线光斑的尺寸与能量分布,也可降低分析仪的透镜对荧光的成像质量。

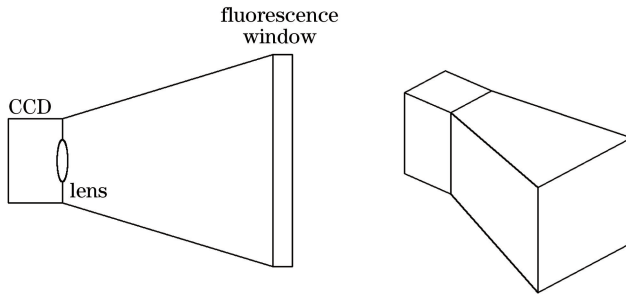


图 12 光束分析仪主体结构示意图

Fig. 12 Schematic of major structure of beam analyzer

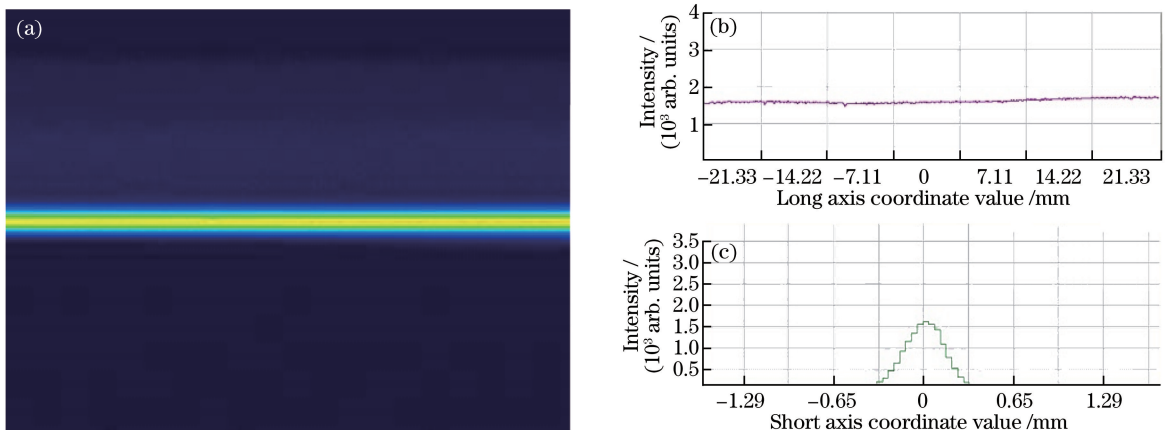


图 13 (a)实测部分线光斑;(b)长轴能量分布;(c)短轴能量分布

Fig. 13 (a) Measured partial line spot; (b) energy distribution of long axis; (c) energy distribution of short axis

对系统中主要光学原件镀 308 nm 激光增透膜,对双面均镀有该膜的样片进行测试。当光垂直入射时,样片透射率约为 95%。使用能量计探头(PE25-A,Ophir Optronics 公司,以色列)对激光器输出镜处、光斑转换模块前、扩束和光束均匀模块前、反射镜前、投影镜头前和工件表面 6 个位置的能量进行了测试,得到的系统能量传递效率如表 1 所示。从表 1 可以看出,投影模块、导光臂中的扩束模块和光束均匀模块的能量损失较大,导致系统的总能量传递效率仅为 33%,计算可得工件表面光斑的最大能量密度约为  $470 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,满足低温多晶硅制备的要求。

表 1 系统能量传递效率  
Table 1 Energy transfer efficiency of system

Position	Energy /mJ	Energy transfer efficiency /%
Output mirror	429	
Before beam conversion module	392	91
Before expander and homogenizer	335	85
Before reflector	229	68
Before projection lens	210	92
Work piece	140	67

使用整形后的线光束对电子束蒸发制备的非晶硅薄膜进行扫描,利用扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)仪对样品进行分析,得到线光束处理前后非晶硅的 SEM 照片和 XRD 谱线,如图 14 所示。谱线中出现了较强的多晶硅特征峰。根据特征峰的半峰全宽计算得到结晶晶粒的尺寸约为 100 nm,这与 SEM 照片中观察到的晶粒尺寸相符,初步验证了系统性能。通过优化线光斑的能量密度和搭接率等参数,可进一步改善非晶硅薄膜的晶化效果。

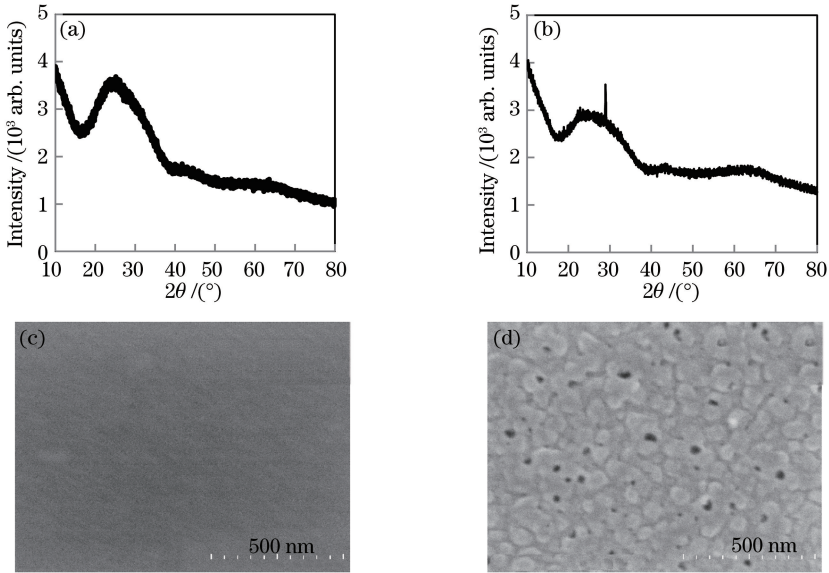


图 14 线光束经退火处理前后非晶硅的 SEM 照片和 XRD 谱线。(a)退火处理前的 XRD 谱线;  
(b)退火处理后的 XRD 谱线;(c)退火处理前的 SEM 照片;(d)退火处理后的 SEM 照片

Fig. 14 SEM images and XRD spectra of amorphous silicon before and after annealing process by line beam.  
(a) XRD spectrum before annealing process; (b) XRD spectrum after annealing process;  
(c) SEM image before annealing process; (d) SEM image after annealing process

## 5 结 论

针对自行研制的 308 nm 大能量准分子激光光源,设计了一套用于低温多晶硅制备的线光束整形系统。该系统主要包括光斑转换模块、导光臂和投影模块等光机结构,导光臂包括扩束模块与光束均匀模块。实测线光斑尺寸为  $100 \text{ mm}\times 0.3 \text{ mm}$ ,验证了系统结构的可行性。长轴能量分布均匀度为 93.95%,目前参与光



束均匀处理的阵列单元为 13 个,适当增加其数量可提高光斑匀化效果。为获得更长的线光斑且保证高能量密度,不仅需增加光源的输出能量,还需提高系统的能量传递效率。目前线光束整形系统的能量传递效率为 33%,其中,导光臂与投影模块均产生约 30%的能量损失,可通过采用更好的材质来加工光学元件、改变模块的工作气体以及减少光学元件数量等方法对系统进行优化,以实现整体能量传递效率的提高。仿真结果表明,透镜阵列的中心偏差及工作面的偏离均会影响整形后的线光斑质量,这对透镜阵列的加工及工件台的精密调节提出了较高的要求。该研究除了可用于低温多晶硅的制备外,也可为其他可能使用到线光束的领域提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] Ma Ruixue, Shi Pengfei, Sun Qi. OLED display technology and application[J]. Mechanical Management and Development, 2016(6): 54-55.  
马瑞雪, 石鹏飞, 孙 琪. 浅谈 OLED 显示技术及其应用[J]. 机械管理开发, 2016(6): 54-55.
- [2] Wei Wenjun, Xu Heng, Liu Xueqing, *et al.* Development of current display technology and its prospect[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2015, 21(5): 99-106.  
魏文军, 徐 亨, 刘学清, 等. 现代显示技术发展展望[J]. 功能材料与器件学报, 2015, 21(5): 99-106.
- [3] Brotherton S D. Poly-Si TFT technology and architecture[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2013: 185-251.
- [4] Xia X X, Wang Z Q, Liu B. Numerical simulation of chemical vapor deposition reaction in polysilicon reduction furnace [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(1): 44-51.
- [5] Özmen Ö T, Karaman M, Turan R. Polysilicon thin films fabricated by solid phase crystallization using reformed crystallization annealing technique[J]. Thin Solid Films, 2014, 551: 181-187.
- [6] Merabet A, Marcon J. The effect of arsenic fluence on the boron diffusion in the polysilicon on monosilicon during rapid thermal annealing [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2006, 253(1/2): 122-125.
- [7] Kim H Y, Lee Y W, Park J H, *et al.* Effect of dopant on metal induced lateral crystallization rate[J]. Thin Solid Films, 2015, 589: 735-740.
- [8] Paetzel R, Herbst L, Simon F. Laser annealing of LTPS[C]. SPIE, 2006, 6106: 61060A.
- [9] Prat C, Zahorski D, Helen Y, *et al.* Excimer laser annealing system for AMLCDs: A long laser pulse for high performance, uniform and stable TFT[C]. SPIE, 2001, 4295: 33-37.
- [10] Yu Yinshan, You Libing, Liang Xu, *et al.* Progress of excimer lasers technology[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2253-2270.  
余吟山, 游利兵, 梁 勳, 等. 准分子激光技术发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2253-2270.
- [11] Yamazaki S, Teramoto S, Kusumoto N, *et al.* Apparatus and method for laser radiation: US5900980[P]. 1999-05-04.
- [12] Yamazaki S, Tanaka K, Teramoto S. Laser irradiation apparatus: US6038075[P]. 2000-03-14.
- [13] Tanaka K. Laser irradiation apparatus and method: US6304385[P]. 2001-10-16.
- [14] 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[C]. SPIE, 2003, 5004: 20-27.
- [15] Deng Ximing, Liang Xiangchun, Chen Zezun, *et al.* Uniform illumination of large focal targets using a lens array[J]. Chinese J Lasers, 1984, 12(5): 257-260.  
邓锡铭, 梁向春, 陈泽尊, 等. 用透镜阵列实现大焦距斑面的均匀照明[J]. 中国激光, 1984, 12(5): 257-260.
- [16] Jin Yuhua, Zhao Yan, Jiang Yijian. Microlens beam shaping and homogenizing optical system for excimer laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0602003.  
靳羽华, 赵 艳, 蒋毅坚. 准分子激光微透镜整形均束装置[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0602003.
- [17] Li Chengde, Chen Tao, Zuo Tiechuan. Design of fly's eye homogenizer for excimer laser micromachining[J]. Chinese J Lasers, 1999, 26(6): 560-564.  
李呈德, 陈 涛, 左铁钊. 两级复眼式准分子激光微加工均束器的设计[J]. 中国激光, 1999, 26(6): 560-564.
- [18] Huang Wei, Wei Haoyun, Li Yan. Effect of relative position error in microlens arrays pair on beam homogenization[J]. Laser Technology, 2013, 37(1): 11-15.  
黄 威, 尉昊贇, 李 岩. 复眼透镜间相对位置误差对光束匀化的影响[J]. 激光技术, 2013, 37(1): 11-15.
- [19] Zhang Baohao, Zhou Sumei, Yang Xiaoming, *et al.* Talbot effect of square-aperture microlens array[J]. Acta Optica

Sinica, 2016, 36(5): 0523001.

张宝昊, 周素梅, 杨晓铭, 等. 方形孔径为透镜阵列的泰伯效应[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0523001.

- [20] Wang Yanhong, Wang Haiwei, Wang Gao. Design of high efficiency fiber coupling system based on microlens array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 041401.  
王艳红, 王海伟, 王 高. 基于微透镜阵列的高效光纤耦合系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 041401.
- [21] 孙鸿凌. LTPS 投资升温量产难关待破[N]. 中国电子报, 2014-06-06(001)[2016-12-17].
- [22] Jin Yuhua, Zhao Yan, Jiang Yijian. Simulation of excimer laser based on Zemax software[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0902010.  
靳羽华, 赵 艳, 蒋毅坚. 基于 Zemax 软件的准分子激光模拟[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0902010.
- [23] Li Hongxia, Lou Qihong, Dong Jingxing, *et al.* A novel homogenizer to improve the excimer laser beam uniformity [J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(7): 785-788.  
李红霞, 楼祺洪, 董景星, 等. 一种改善准分子激光光束均匀性的新型均匀器[J]. 中国激光, 2004, 31(7): 785-788.
- [24] Lou S S, Zhu H S, Han P D. Laser beam homogenizing system design for photoluminescence[J]. Applied Optics, 2014, 53(21): 4637-4644.