

文章编号: 1001-3806(2013)01-0011-05

双复眼透镜间相对位置误差对光束匀化的影响

黄 威 尉昊赞 李 岩*

(清华大学 精密仪器与机械学系 精密测试技术及仪器国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 为了在激光退火工作面上获得高均匀度光斑,研究了双复眼透镜阵列光束匀化法中两透镜阵列间相对位置变化对匀化性能的影响。利用光线追迹方法,模拟了双复眼透镜阵列间 6 个自由度的相对位置误差与光束匀化效果的依赖关系,发现第二复眼透镜阵列的滚转角偏差是影响光束匀化质量的最敏感因素。为实现较好的匀化效果,需要对复眼透镜阵列位置进行精确控制。结果表明,使用专用镜架对透镜位置进行精确控制后,光束均匀度达到 0.039。该系统成功应用于激光退火装置,实现了超浅结激光退火。

关键词: 光学设计与制造; 光束匀化; 仿真与实验; 激光退火

中图分类号: TN202 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.01.003

Effect of relative position error in microlens arrays pair on beam homogenization

HUANG Wei, WEI Hao-zun, LI Yan

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechatronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to obtain a working beam profile with high uniformity by microlens arrays pair in laser annealing equipment, the effect of relative position error of arrays pair was investigated. The dependence of the beam uniformity on the six degrees of freedom between two arrays was simulated with ray tracing method. It is found that the beam homogenization is most sensitive to roll angle error of the second array, and precise control of relative position of two arrays is needed. The experiment results indicate that, with the aid of special lens mounts, the relative position of two arrays can be controlled precisely and a flattop beam profile with beam uniformity of 0.039 is obtained as well. The laser annealing experiment for ultra shallow junction formation is demonstrated by this homogeneous beam successfully.

Key words: optical design and fabrication; beam homogenization; simulation and experiment; laser annealing

引 言

激光退火是极大规模集成电路制造中的一种关键工艺^[1],其使用高功率的紫外光源,要求光源在工作面的光斑能量分布均匀。通常激光器输出的光斑能量分布并不均匀,不能直接用于激光退火,需要使用光学系统进行匀化。常见的匀化方法主要有以下几种:复眼透镜法^[2]、衍射光学元件法^[3]、补偿法^[4]、积分棒法^[5]和液晶阵列法^[6]等。其中,衍射光学元件法^[7-9]和补偿法^[10-11]的匀化效果受输入光强分布影响较大,需要针对特定输入光强分布进行设计;积

分棒法为了得到较好的匀化效果需要在能量利用率上做出牺牲,且经匀化后光线偏折角较大,在激光退火设备中,这将增大后续投影系统的设计难度^[12];液晶阵列法目前还处于实验室研究阶段,离实际应用较远^[13-14]。相比以上几种匀化方法,复眼透镜法原理简单,实现起来相对容易,匀化效果对输入光强分布不敏感,且能量利用率较高,最适合应用于激光退火中。但是复眼透镜匀化法的匀化效果受到两复眼透镜相对位置关系的影响^[15],作者从激光退火这一工程应用出发,分析采用双复眼透镜法实现光束匀化时,两复眼透镜间相对位置在 6 个自由度上的变化对匀化光场的影响,通过软件建模仿真得到了对匀化效果影响最大的敏感因素,并针对激光退火应用提出了一套设计原则,指导实际装调测试。依据仿真结果和设计原则,搭建了适用于激光退火的实验测试系统,实现了用于制作超浅结的激光退火。

基金项目: 国家重大科技专项基金资助项目 (2009ZX02037-002)

作者简介: 黄 威 (1987-),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: liyan@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2012-04-20; 收到修改稿日期: 2012-05-09

1 理论模型

复眼镜透镜光束匀化法是利用复眼镜阵列对光束进行分割,再叠加后使光斑能量均匀分布的一种光学方法。如图 1 所示, L_1 和 L_2 是复眼镜阵列,它们由 $N \times N$ 个矩阵排列的相同规格的球面子透镜组成。入射光束的直径为 Φ_{in} , 它被透镜阵列 L_1 分割为若干个子光束。设透镜阵列 L_1 和 L_2 中各子透镜的焦距为 f_{L1} 和 f_{L2} , L_1 和 L_2 之间的距离为 a_{12} 。FL (focus lens) 为汇聚透镜, 其与 L_2 之间的距离为 s , 匀化光斑所在焦平面 (focus plane, FP) 位于 FL 的焦距 f_{FL} 处。当 $a_{12} = f_{L2}$ 时, L_2 中的各球面小透镜与 FL 组合, 将被 L_1 分割产生的许多子光束成像在 FL 的 FP 上, 并且它们在 FP 上同一个区域叠加, 使得该区域的能量均匀分布, 该平面称之为匀化面。当复眼镜中各子透镜的光阑为方形时, 匀化光斑也为方形, 记该处的匀化光斑尺寸为 D_{FL} 。

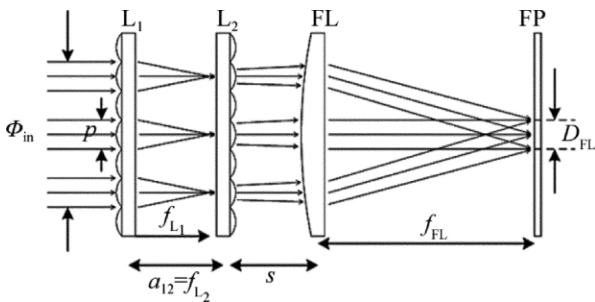


Fig. 1 Principle of homogenizer using microlens arrays

令 L_1 和 L_2 的子透镜尺寸为 p , 根据 1 阶近似得到匀化面的尺寸^[16]为:

$$D_{FL} = p \times f_{FL} \times \left(\frac{1}{f_{L1}} + \frac{1}{f_{L2}} + \frac{a_{12}}{f_{L1}f_{L2}} \right) \quad (1)$$

待评价表面记作 i 面, 通常使用光束均匀度和平顶度评价光斑能量分布的均匀性。光束均匀度的定义为:

$$U_{\eta} = \frac{1}{E_{\eta}} \frac{1}{A_{\eta}} \iint [E(x, y) - E_{\eta}]^2 dx dy \quad (2)$$

式中 E_{η} 为 FP 上的平均能量密度, $E(x, y)$ 为某点处的能量密度, A_{η} 为 FP 的面积。

定义 z 轴方向为图 1 中的光轴方向, $x-y$ 平面即为图 1 中的 FP。平顶度的定义如图 2 所示, 图中纵坐标

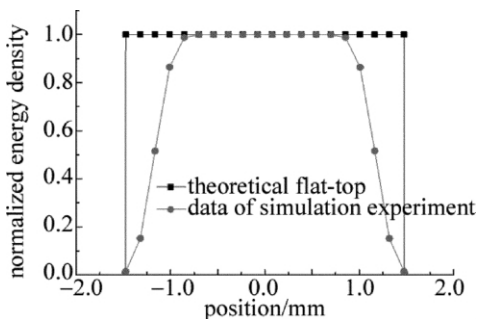


Fig. 2 Energy density distribution on FP(x axis)

表示 $x-y$ 面上 1 维方向能量密度, 并已经进行了归一化处理。图 2 中表示理想平顶分布曲线与横坐标围成的区域面积记为 S_0 , 待评价 $x-y$ 面的能量密度分布曲线与横坐标围成区域的面积记为 S_i , 定义“平顶度”为:

$$F_{\eta} = \frac{S_0 - S_i}{S_0} \quad (3)$$

光束均匀度和平顶度是无量纲量, 数值越小, 表明能量分布越均匀。其中, 光束均匀度反映整个区域内各处能量密度对“均值”的偏离, 平顶度反映整个区域内各处能量密度对“最大值”的偏离。

2 仿真分析

运用 LIGHTTOOLS 光学设计软件对基于复眼镜的光束匀化系统进行设计和仿真, 根据激光退火应用需求, 定义光源为 266nm 的紫外激光, 该光源具有良好的准直性, x 和 y 截面能量分布均为高斯分布。光学元件材料选用熔融石英, 折射率 $n = 1.49968$, 元件表面镀紫外增透膜, 可提高能量传递效率。两个复眼镜阵列 L_1 和 L_2 都由 20×20 个透镜微元组成, 每个微元透镜的尺寸为 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$, 焦距 $f_{L1} = f_{L2} = 4.01\text{mm}$, $f_{FL} = 64.44\text{mm}$ 。

在图 1 中建立右手直角坐标系 $x_0-y_0-z_0$, z_0 为图内的光轴方向, x_0-y_0 面位于 L_2 所在平面, 且 x_0 和 y_0 方向对应于复眼镜阵列中微元透镜的排列方向。图 1 中所示 L_2 相对 L_1 的位置设为基准位置, 在软件中对 L_2 偏离基准位置的各种情形进行仿真, 考察 FP 上光斑能量均匀性的变化规律, 并用光束均匀度和平顶度进行描述, 结果如图 3 所示。

图 3a ~ 图 3d 分别表示复眼镜 L_2 的位置沿 z_0 轴平移、沿 x_0 或 y_0 轴平移、绕 z_0 轴滚转、绕 x_0 或 y_0 俯仰或偏摆时, FP 上光斑能量分布的变化。在激光退火应用中, 要求光束均匀度小于 0.05, 平顶度小于 0.05。从图 3 结果可以看出: (1) 当 L_2 沿 z_0 轴平移时, 在 $0 \leq a_{12} \leq 3f_{L1}/2$ 的较大范围内, FP 光斑都能保持较好的均匀性, 满足应用需求; (2) 当 L_2 沿 x_0 或 y_0 轴平移时, FP 光斑均匀性呈周期性变化, 周期为子透镜的口径 p (0.5mm), 并且当平移量为 $\frac{p}{2}$ 的整数倍时均匀性最差; (3) 当 L_2 绕 z_0 轴滚转时, 光斑均匀性变化极为敏感, 只有当旋转量不超过 0.5° 时才能满足要求的匀化效果; (4) 当 L_2 绕 x_0 或 y_0 轴俯仰或偏摆时, 光斑均匀性变化也较为敏感, 只有当旋转量不超过 1° 时才能保持较好的匀化效果。

分析上述复眼镜之间相互位置和匀化效果的关系, 不难发现, 当复眼镜 L_1 分割产生的各子光束入

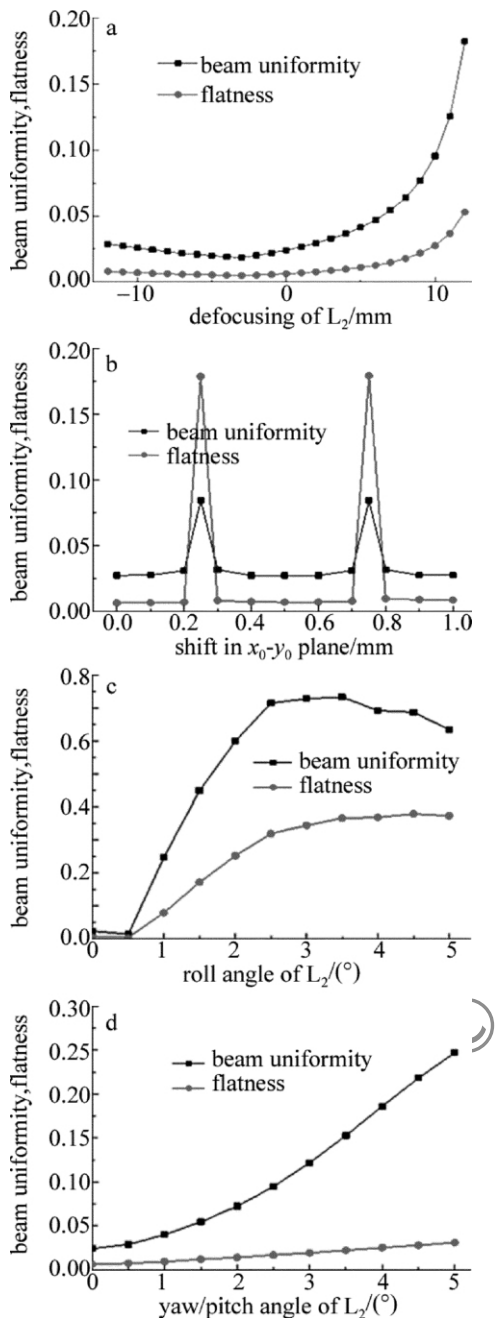


Fig. 3 Effect of position changes in L_2 relative to L_1

射到 L_2 上的多个子透镜时,出现“一对多”耦合干扰^[17]时,就会对匀化效果产生极大的影响;反之若没有这种耦合干扰,一般都能获得较好的匀化效果。因此,当 $a_{12} = f_{L_1} = f_{L_2}$ 时,匀化效果相对复眼透镜相互位置改变(装配误差)的敏感性最低,但是此时由于 L_2 位于 L_1 焦平面上, L_2 处的能量密度极高,计算得到的能量密度数值已经超过了材料的损伤阈值,很容易损坏透镜,详见下面第 3 节中的分析。

综上所述,FP 上光斑的能量均匀性对 L_2 相对 L_1 的位置变化较为敏感,尤其是对 L_2 绕 z_0 轴旋转极为敏感,在设计、安装时需要尽可能降低这种不利影响。在考虑各子光束衍射^[18]、干涉^[19]效应的前提下,用于

激光退火设备的光束匀化系统的设计原则如下:根据光斑尺寸和整体光学系统对口径限制要求,尽可能选取大口径的复眼透镜阵列 L_1 和 L_2 ;在匀化效果满足要求^[8]的前提下, L_1 和 L_2 尽可能包含较少的子透镜数量,以增大每个子透镜的口径 p ; L_1 和 L_2 的镜架使用高精度多维可调节的镜架,或者针对实际应用设计定制专用的一体式镜架,尽可能减小两者间位置误差,尤其是减小 L_2 绕 z_0 轴的滚转角误差。

3 实测结果与讨论

为验证上述仿真结论的有效性,搭建了以下实验平台,如图 4 所示。图中荧光面置于图 1 中的 FP,使用 Ophir-Spiricon 公司的光束质量分析仪 LBA-USB-SP620 的 CCD 相机探测能量分布情况。实验中使用的是 Nd:YAG 固体脉冲激光器,1064nm 经过 4 倍频至 266nm 波长,重复频率 10Hz,单脉冲能量 20mJ,匀化系统使用微元数为 20×20 的复眼透镜阵列,参量与仿真计算的设定一致。

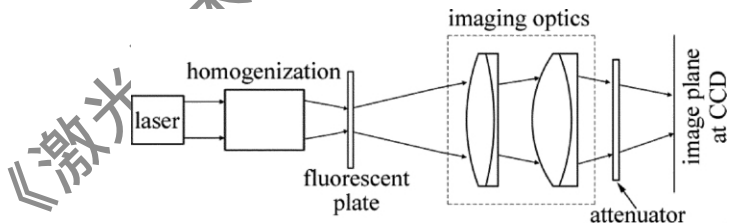


Fig. 4 Experimental system

在实验中 L_1 的焦平面处能量密度极大,当 L_2 位于如图 1 中所示的位置时,透镜被损坏,如图 5 所示。



Fig. 5 Microlens array damaged by laser

因此,激光退火的实际应用中, L_2 应在图 3a 所示约束下,适当调离 L_1 的焦平面,保证 L_2 上能量密度小于损伤阈值。同时实验调节过程显示:当 L_2 相对 L_1 绕 z_0 轴出现轻微的角度偏离(1°)时,FP 上匀化光斑就会向圆形光斑蜕化,光束均匀性下降,如图 6 所示,该现象与仿真结果相符。以上实验现象说明,在使用双复眼透镜法进行光束匀化时,对两复眼透镜的相对位置进行精确控制非常重要,在实用中精密设计制造的专用镜架是必要的。

根据前述设计原则,设计、装配了一套用于激光退火的光束匀化系统,用光束质量分析仪实测其匀化效

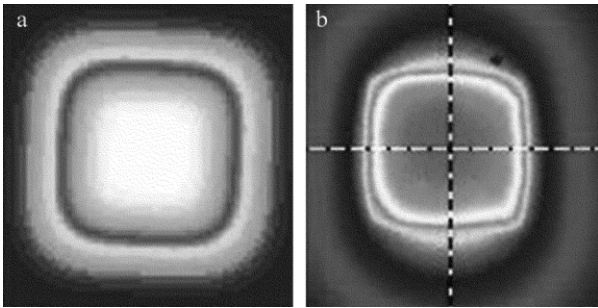


Fig. 6 Comparison of experimental and simulation results when L_2 rolling
a—simulation result b—experimental result

果;同时将实际激光器输出特性导入仿真模型中,得到匀化效果的仿真结果,并与实测结果相对比,归一化结果如图7所示。

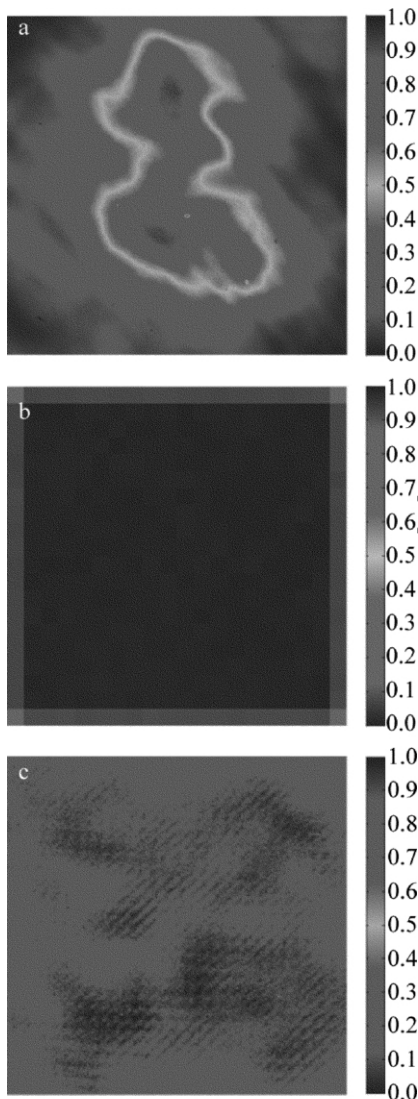


Fig. 7 Comparison of experimental and simulation results after precisely controlling position of L_2
a—source b—simulation result c—experimental result

实际测得的光斑光束均匀度 0.039,平顶度 0.047;仿真计算得到的光束均匀度为 0.033,平顶度为 0.010。实测光斑均匀性要略差于仿真结果,但仍在 FP 得到了极为均匀的光斑。两者之间的差异可

以归结为:透镜加工误差、装配误差、背景光对 CCD 的干扰和 CCD 的探测误差等。将上述光学系统应用于实际的激光退火设备,对掺硼硅片进行退火试验,使用二次离子质谱仪对退火效果进行检测,结果如图8所示。图中是掺硼硅片在退火前后的离子浓度分布曲线,该曲线表明,掺杂杂质分布峰值在退火前后的位置分别为 17.2nm 和 20.9nm,可见已实现了超浅结激光退火的要求。

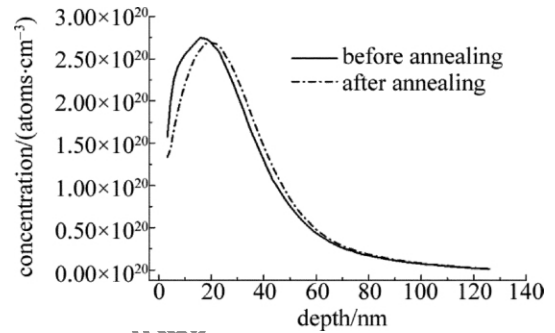


Fig. 8 Laser annealing results

4 结论

通过仿真与实验结果发现,复眼透镜阵列光束匀化法中,两复眼透镜阵列间相对位置关系对光束匀化效果具有较大影响;匀化效果对透镜绕光轴的滚转偏差尤为敏感。在实际使用中,为了取得较好的匀化效果,必须对两复眼透镜的相对位置进行精确控制。根据本文中所述设计原则,通过精确控制透镜间的位置关系,复眼透镜匀化法可以运用到实际的激光退火设备中,并能取得较好的退火效果。

参考文献

- [1] PRIVITERA V, MAGNA A LA, FORTUNATO G, *et al.* The European answer to the integration issues of excimer laser annealing in MOS technology[J]. *Materials Science and Engineering*, 2004, B114(15): 92-99.
- [2] LI Ch D, CHEN T, ZUO T Ch. Design of fly's eye homogenizer for excimer laser micromachining[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, 26(6): 560-564 (in Chinese).
- [3] ZHENG G X, DU Ch L. A fluctuation-insensitive diffractive optical homogenizer for excimer beam-shaping [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5636: 499-504.
- [4] JASPER K, SCHEEDE S, BURGHARDT B, *et al.* Excimer laser beam homogenizer with low divergence [J]. *Applied Physics*, 1999, A69(7): 315-318.
- [5] GUO L P, HUANG H J, WANG X Zh. Study of integrator rod in step-and-scan lithography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(7): 981-985 (in Chinese).
- [6] LIU Y J, SUN X W, SHUM P, *et al.* Tunable fly's-eye lens made of patterned polymer-dispersed liquid crystal [J]. *Optics Express*, 2006, 14(12): 5634-5640.
- [7] TAN Q F, YAN YI B, JIN G F, *et al.* Design of diffractive optical element for beam smoothing in Fresnel diffraction region [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(2): 125-128 (in Chinese).

- nese) .
- [8] LIN J Ch , HE L Q. Simulation for realizing Fresnel diffraction of square aperture based on coherence superposition of wavelets algorithm [J]. *Electro-Optic Technology Application* ,2008 ,23(4) :74-77(in Chinese) .
- [9] TAN Q F ,YAN Y B ,JIN G F. Optimization of diffractive optical element used with smoothing by spectral dispersion technique [J]. *Chinese Journal of Lasers* ,2007 ,34(6) : 781-785(in Chinese) .
- [10] HUEGEL H ,SCHITTENHELM H ,JASPER K , *et al.* Structuring with excimer lasers-experimental and theoretical investigations on quality and efficiency [J]. *Journal of Laser Applications* ,1998 ,10(6) :255-264.
- [11] JASPER K ,BERGER P ,HUEGEL H. Efficiency increase for laser structuring using mask projection [J]. *Proceedings of SPIE* ,1999 ,3618: 403-411.
- [12] LU Y D ,SHI H M ,QI X , *et al.* Integrated sphere application in the field of powerful laser energy measurement [J]. *High Power Laser and Particle Beams* ,2000 ,12(s1) :106-108(in Chinese) .
- [13] TONDIGLIA V P ,NATARAJAN L V ,SUTHERLAND R L , *et al.* Volume holographic image storage and electro-optical readout in a polymer-dispersed liquid-crystal film [J]. *Optics Letters* ,1995 ,20(11) :1325-1327.
- [14] LIU Y J ,ZHANG B ,JIA Y , *et al.* Improvement of the diffraction properties in holographic polymer dispersed liquid crystal Bragg gratings [J]. *Optics Communications* ,2003 ,218(1/3) :27-32.
- [15] YIN Zh Y ,WANG Y F ,JIA W W , *et al.* Fourier analysis of light beam uniformity based on the microlens array [J]. *Laser & Infrared* ,2012 ,42(2) : 119-123(in Chinese) .
- [16] ZIMMERMANN M ,LINDLEIN N ,VOELKEL R , *et al.* Microlens laser beam homogenizer: from theory to application [J]. *Proceedings of SPIE* ,2007 ,6663:201-213.
- [17] 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) .
- [18] MIKLYAEV Y U ,HAUSCHILD D ,MIKHAILOV A , *et al.* Beam shaping on the base of micro lenslet arrays with the help of diffraction and interference effects [J]. *Proceedings of SPIE* ,2007 ,6663:81-88.
- [19] ERDMANN L ,BURKHARDT M ,BRUNNER R. Coherence management for microlens laser beam homogenizers [J]. *Proceedings of SPIE* ,2002 ,4775:145-154.