

硅晶圆多焦点激光隐切算法与实验

张怀智, 徐家明, 张兰天, 秦应雄*

华中科技大学光学与电子信息学院, 激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074

摘要 硅晶圆激光隐形切割是指激光聚焦在晶圆内部使其产生热裂纹, 通过控制热裂纹的扩展方向实现硅晶圆的高质量切割, 具有广阔的应用前景。在硅晶圆内部沿着光轴方向一次生成多个焦点, 可以实现硅晶圆的多焦点隐切。本文提出了一种大数值孔径下的轴向多焦点算法。将不同焦距的相位差值作为变量, 通过迭代求解出傅里叶级数满足要求的原函数, 然后对变量进行非线性映射就可以得到目标相位图。通过改变傅里叶展开后的各项系数, 实现了轴上焦点数目、各焦点能量和间距的调节。利用 MATLAB 仿真得到了不同能量比、不同焦点间距的轴向三焦点和五焦点的光场, 各焦点能量比例和间距与设计预期基本一致, 能量利用率均达到了 90% 以上。选用 $1.342\ \mu\text{m}$ 纳秒激光器对 $250\ \mu\text{m}$ 厚硅晶圆进行激光隐切实验, 使用空间光调制器加载目标相位图, 将等能量的三个焦点分别聚焦在硅晶圆表面下方 $35.0, 105.2, 176.0\ \mu\text{m}$ 处, 在激光功率为 $1.2\ \text{W}$ 、切割速度为 $200\ \text{mm/s}$ 的条件下成功实现了硅晶圆的三焦点激光隐切。

关键词 激光技术; 硅晶圆; 激光隐切; 差值映射; 轴向多焦点; 相位调制

中图分类号 TN24

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0202018

1 引言

芯片在集成电路和微机电系统中有着广泛应用。在实际应用中, 通常需要将单颗芯片从批量生产的大尺寸硅晶圆上切割分离出来。采用传统的金刚石刀片切割时存在切缝宽、效率低、易崩边、有碎屑飞溅等不足。随后发展的激光消融切割技术通过聚焦激光于晶圆上使材料熔化、气化而形成切缝, 但激光消融切割存在切口表面会形成熔渣、切缝宽、热影响区过大等问题^[1-3]。激光隐形切割最早由日本 Hamamatsu 公司提出^[4-5], 其原理是: 将激光聚焦在材料内部, 使内部材料形成改性层, 进而产生热应力裂纹, 通过控制裂纹扩展实现无表面划痕、无材料损耗、热影响区小的高效切割。激光隐形切割已成为最具潜力的硅晶圆切割方法。近些年来, 国内外高校和科研单位进行了多种硬脆材料的激光隐形切割研究^[6-10]。

对于厚度较大的硅晶圆, 激光隐形切割需要通

过逐次提升焦点位置的多道扫描来完成。如果能够在硅晶圆内部同时聚焦生成多个焦点进行切割, 就有可能成倍提高切割效率^[11-12]。在物理光学领域, 人们已经提出了多种轴向多焦点算法。最简单的方法是把衍射光学元件分割成一定比例的径向或角向区域, 使不同区域的人射光聚焦在不同的焦点位置。这种方法的缺点是产生的焦斑大且存在较多旁瓣。1992 年, 俄罗斯科学家 Golub 等^[13]提出了衍射光学元件和聚焦透镜叠加的轴向多焦点算法, 实现了等能量的轴向双焦点和七焦点。2019 年, 清华大学的 Xu 等^[14]通过一种改进的 GS 迭代算法对轴上多个目标平面和入射平面的光场进行循环迭代优化, 实现了任意光强分配的轴上三焦点和五焦点。

为了获得更好的聚焦性能, 硅晶圆的激光隐切一般都采用大数值孔径的聚焦物镜。针对这一应用需求, 本课题组提出了一种基于差值映射的大数值孔径多焦点算法, 并将其应用于硅晶圆的多焦点激光隐切实验中。

收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-07-22; 录用日期: 2021-08-09

基金项目: 湖北省科技重大专项(2020AAA03)

通信作者: *qyx@hust.edu.cn

2 大数值孔径多焦点模型与映射函数优化方法

当物镜的数值孔径较大时,传统的菲涅耳衍射公式有较大误差,故应使用瑞利-索末菲衍射公式对近距离的光路传输进行仿真。基于此,本课题组首先使用瑞利-索末菲衍射公式建立大数值孔径下的多焦点模型,之后通过迭代获得满足要求的目标函数,最后在二维平面坐标内对目标函数进行变量映射,获得相位分布图。

2.1 大数值孔径多焦点模型

在大数值孔径聚焦条件下,实现轴上多焦点分布的原理如图 1 所示。物镜的径向坐标为 r , 焦距为 z , 其对应的焦点为 F_0 。经衍射光学元件进行相位调制之后,沿着光轴方向生成一系列焦点。假设入射光场 U_{in} 满足等相位面,则任一目标点的复振幅 U_{out} 可使用瑞利-索末菲衍射公式进行求解,即

$$U_{out}(P_1) = -\frac{1}{j\lambda} \iint U_{in}(P_0) \exp[j\varphi_z(r)] \times \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \cos \alpha ds, \quad (1)$$

式中: P_1 为目标光场的坐标; P_0 为入射光场的坐标; j 为虚数单位; λ 为波长; $\varphi_z(r)$ 是一焦距为 z 的大数值孔径物镜的等效聚焦相位; k 为入射光的波矢大小; r_{01} 为像平面上任一点到物平面上任一点的距离; α 为聚焦光线与光轴的夹角; s 为积分微元的大小。对于焦距为 z 的物镜,有 $r_{01} = \sqrt{r^2 + z^2}$ 。由(1)式可知,当物镜的相位满足

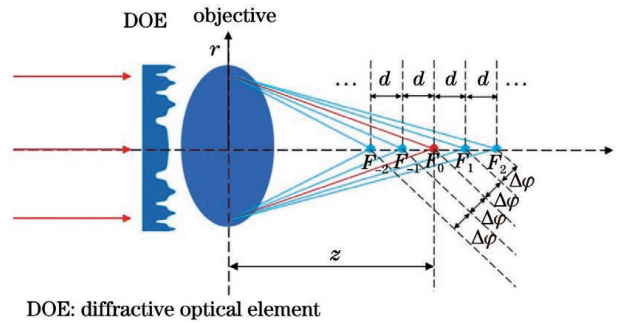
$$\varphi_z(r) = -k\sqrt{r^2 + z^2} + C \quad (2)$$

时,焦点处的光强最大。(2)式中, C 为一常数相位。为使后文计算方便,取 $C = kz$,使 $\varphi_z(0) = 0$ 成立。

在硅晶圆的实际切割过程中,焦点的间距远小于聚焦物镜的焦距。对于两个不同焦距的物镜,其相位 $\varphi_{z+d}(r)$ 与 $\varphi_z(r)$ 的差值近似满足

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_d(r) &= \varphi_{z+d}(r) - \varphi_z(r) = \\ &= -k[\sqrt{r^2 + (z+d)^2} - \sqrt{r^2 + z^2}] + \\ &= k[(z+d) - z] \approx \lim_{d \rightarrow 0} \left(-k \frac{zd}{\sqrt{r^2 + z^2}} + kd \right) = \\ &= k \left(-\frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} + 1 \right) d. \end{aligned} \quad (3)$$

式中: d 为偏移距离。对于确定的物镜,(3)式中的 k, z, r 均为常数。因此该相位差可以近似为偏移距



DOE: diffractive optical element

图 1 大数值孔径多焦点分布示意图

Fig. 1 Schematic of multi-focus distribution under large numerical aperture

离 d 的线性分量。由(3)式可得

$$\varphi_{z+d}(r) \approx \varphi_z(r) + k \left(-\frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} + 1 \right) d. \quad (4)$$

由(4)式可知,在聚焦透镜前面增加一个线性相位 $\Delta\varphi_d(r)$,可使焦点对应偏移 d 。在近似条件下,图 1 中满足等间距 d 的多个焦点对应的偏移相位 $\Delta\varphi$ 相等。已知任意函数的两个相邻傅里叶级数满足等相位差,因此接下来从傅里叶级数展开角度对多焦点问题进行讨论。

2.2 基于傅里叶级数展开的映射函数优化方法

假设入射光场的总能量为 1,对于生成的间距为 d 、能量为 $|a_n|^2$ 的 n 个焦点的光场,其相位表达式 $\varphi'(P_1, d)$ 满足

$$\begin{aligned} \exp[j\varphi'_d(r)] &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \exp[j\varphi_{z+nd}(r)] \approx \\ &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \exp[j\varphi_z(r) + jn\Delta\varphi_d(r)] = \\ &= \exp[j\varphi_z(r)] \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \exp[jn\Delta\varphi_d(r)]. \end{aligned} \quad (5)$$

$\varphi_z(r)$ 为某一确定的大数值孔径物镜的等效相位,当偏移距离 d 确定后, $\Delta\varphi_d(r)$ 即为常数,所以只需要求解一个函数 $\Phi = \phi(x)$,使其满足

$$\exp[j\phi(\Delta\varphi)] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \exp(jn\Delta\varphi), \quad (6)$$

其对应的系数 a_n 为

$$a_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[j\phi(x)] \exp(-jn x) dx. \quad (7)$$

根据能量守恒定理,有

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |a_n|^2 = 1. \quad (8)$$

为了方便理解,使用线性变量 x 替换 $\Delta\varphi$ 。对于满足特定要求的原始函数 $\phi(x)$,通过图 2 所示的点对点非线性映射即可获得目标相位图 $\phi(\Delta\varphi)$ 。

针对不同的目标光场,首先通过迭代优化的方

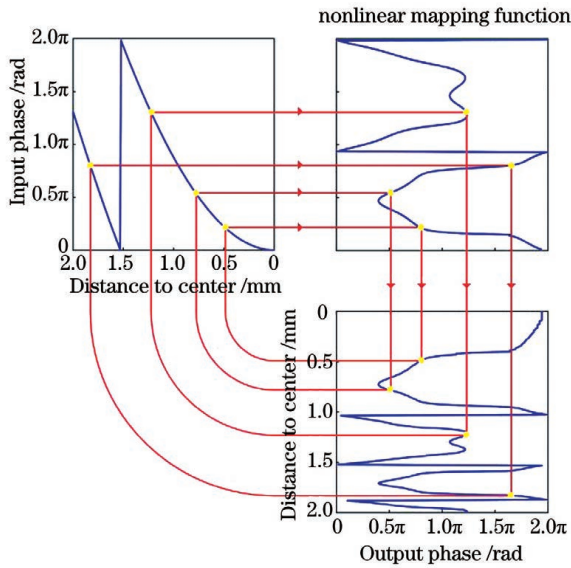


图 2 非线性映射示意图

Fig. 2 Nonlinear mapping diagram

法求解出函数 $\phi(x)$, 对应的流程图如图 3 所示。在对应的傅里叶级数范围内, 设目标振幅分布为 b_n , 相位分布为 $\phi_k(x)$ (初始相位分布为 $\phi_0(x)$), 将它们代入(7)式求解傅里叶系数 a_n 的模值。选取 a_n 的模值中与目标振幅分布 b_n 差值最大的一级, 记为第 m 级, 然后将其对应的分量进行补偿。设 p_{num} 为补偿系数, 补偿后的相位满足

$$\phi_{k+1}(x) = \text{angle} \left\{ \exp [i\phi_k(x)] + p_{num} \times \exp(jmx) \times (|b_m| - |a_m|) \times \text{angle}(a_m) \right\}, \quad (9)$$

式中: p_{num} 为补偿系数。为方便表示, 流程图中将

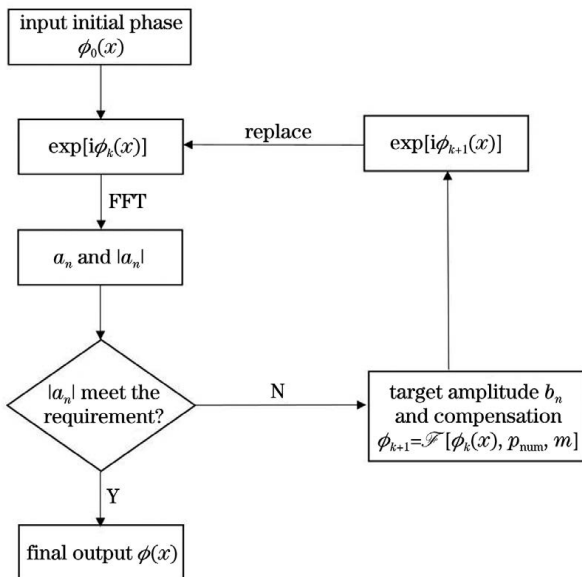


图 3 求解目标函数的迭代循环流程图

Fig. 3 Flow chart of iterative loop for solving objective function

(9)式记为 $\phi_{k+1}(x) = \mathcal{F} [\phi_k(x), p_{num}, m]$ 。经过迭代得到 $\Phi = \phi(x)$ 。

将迭代获得的函数 $\phi(x)$ 在二维坐标平面内进行如图 2 所示的点对点非线性映射, 获得分布为 $\phi(\Delta\varphi)$ 的相位图, 然后对入射光场进行相位调制, 理论上可实现轴上焦点数目、各焦点能量比例和间距均满足要求的光场分布。

3 任意多焦点光场分布及其仿真

为了验证上述模型, 本课题组针对不同焦点间隔和能量的多焦点光场进行了仿真。首先定义多焦点的能量利用率和光强均匀性, 之后使用第 2 节中的模型求得目标相位图, 最后使用瑞利-索末菲衍射积分求得轴上的光强分布, 并计算出能量利用率和焦点处的光强均匀性。

对入射总能量进行归一化, 然后定义各个焦点的能量 E_n 为对应的傅里叶系数 $|a_n|$ 的平方, 则多焦点的能量利用率为

$$R = \sum_n E_n = \sum_n |a_n|^2. \quad (10)$$

需要强调的是, 这里 n 仅表示目标焦点位置处对应的傅里叶级数。

使用(1)式求出各焦点对应的轴上光场的振幅 U_n , 则各焦点的光强 $I_n = |U_n|^2$ 。定义轴上焦点的光强均匀性为

$$U = 1 - \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \quad (11)$$

式中: I_{max} 、 I_{min} 分别为 I_n 中的最大值和最小值。

选用波长为 $1.342 \mu\text{m}$ 的激光进行仿真。 $1.342 \mu\text{m}$ 激光准直后的束腰半径为 2.6 mm , 物镜焦距为 6 mm 。通过大量仿真总结可知, 当补偿系数 p_{num} 依次取 $3, 1, 0.2, 0.05, 0.005, 0.001$, 并各循环 500 次时, 可以获得理想的多焦点光场分布。

首先对轴上焦点间距为 $80 \mu\text{m}$ 的等能量三焦点的目标光场进行仿真, 仿真结果如图 4 所示, 图 4(a)为等能量三焦点的相位图, 图 4(b)为轴上的光强分布。经计算可知: 各焦点的能量 E_n 均为 0.31 , 能量利用率 $R = 93\%$; 焦点处对应的光强比为 $0.9:0.91:1$, 光强均匀性 $U = 95\%$ 。

实验条件保持不变, 沿 z 轴方向生成焦点间距为 $160 \mu\text{m}$ 的 5 个等能量焦点, 进行仿真, 仿真结果如图 5 所示, 图 5(a)为对应的相位图, 图 5(b)为轴上的光强分布。经计算可知: 各焦点的能量 E_n 均为 0.182 , 能量利用率 $R = 91\%$; 焦点处的光强比为

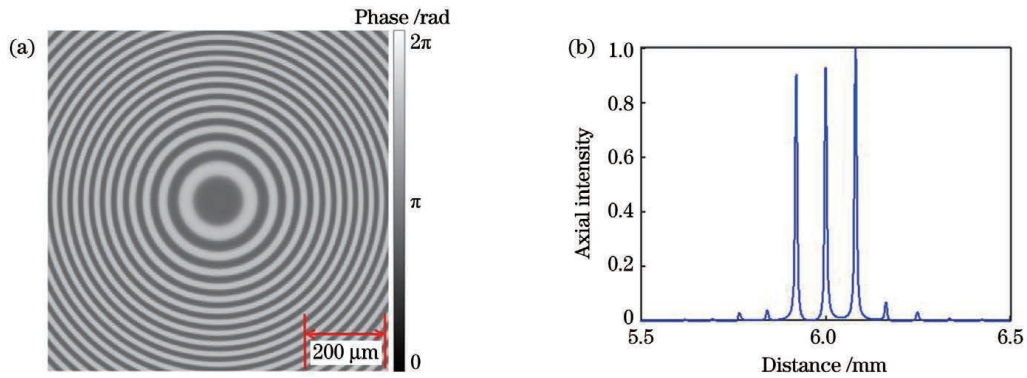


图 4 轴上焦点间距为 $80 \mu\text{m}$ 的等能量三焦点的仿真结果。(a)相位图;(b)轴上的光强分布
Fig. 4 Simulation results of equivalent energy three-focus with axial focus interval of $80 \mu\text{m}$. (a) Phase hologram;
(b) axial intensity distribution

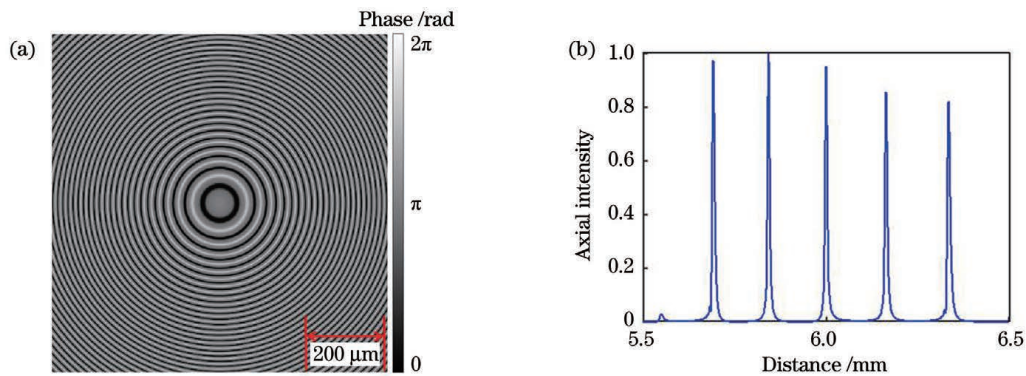


图 5 轴上焦点间距为 $160 \mu\text{m}$ 的等能量五焦点的仿真结果。(a)相位图;(b)轴上强度分布图
Fig. 5 Simulation results of equivalent energy five-focus with axial focus interval of $160 \mu\text{m}$. (a) Phase hologram;
(b) axial intensity distribution

0.98:1:0.95:0.85:0.82, 光强均匀性 $U=90\%$ 。

最后,对焦点能量比为 1:2:3:2:1、对应的焦点间隔为 $160 \mu\text{m}$ 的五焦点进行仿真,仿真结果如图 6 所示,图6(a)为对应的相位图,图6(b)为仿真得到

的轴上的光强分布。经计算可知,各焦点的能量为 $E_{-2} = 0.10, E_{-1} = 0.20, E_0 = 0.31, E_1 = 0.20, E_2 = 0.10$, 能量利用率 $R = 91\%$, 焦点处对应的光强比为 0.31:0.68:1:0.62:0.26。

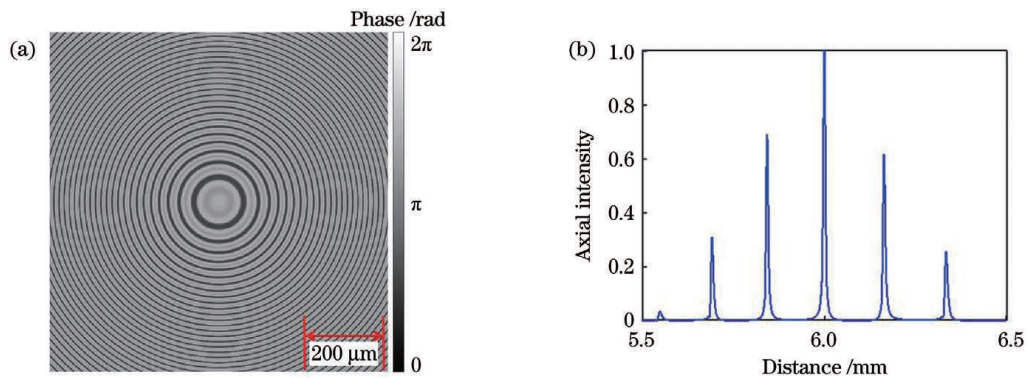


图 6 轴上焦点间隔为 $160 \mu\text{m}$ 、能量比为 1:2:3:2:1 的五焦点的仿真结果。(a)相位图;(b)轴上强度分布图
Fig. 6 Simulation results of five-focus with axial focus interval of $160 \mu\text{m}$ and energy ratio of 1:2:3:2:1. (a) Phase hologram;
(b) axial intensity distribution

除此之外,将对应的傅里叶系数设置为零,可以实现各焦点间隔不等的轴上光场分布。本文提出的

模型可以在大数值孔径物镜下获得轴上焦点数目、各焦点能量和间距均任意可调的相位图。

4 多焦点激光隐切实验

图 7 给出了硅晶圆激光隐切实验装置示意图。由于硅材料在 $1.2 \sim 6.5 \mu\text{m}$ 波长范围内具有较低的吸收,因此实验中选用中心波长为 $1.342 \mu\text{m}$ 的纳秒激光器作为隐切光源。选用工作波长范围为 $1 \sim 1.55 \mu\text{m}$ 的反射式液晶空间光调制器进行多焦点的相位调制,在实验过程中须保持激光入射角小于 10° 。入射激光经过偏振分束镜后的偏振方向与

空间光调制器的响应方向保持一致。通过改变半波片和偏振分束镜的夹角,可以调整入射激光的功率。第一个 $4f$ 系统将入射激光扩束充满空间光调制器,经过调制后的激光进入另一个 $4f$ 系统进行调节,使光束与聚焦物镜的数值孔径相匹配。将硅晶圆紧紧吸附在三维精密位移台上,当激光刚好聚焦于硅晶圆上表面时,会产生微弱的火花。调节位移台,确保激光精准地聚焦于晶圆内部的对应位置,同时保持晶圆上表面始终与光路传输方向垂直。

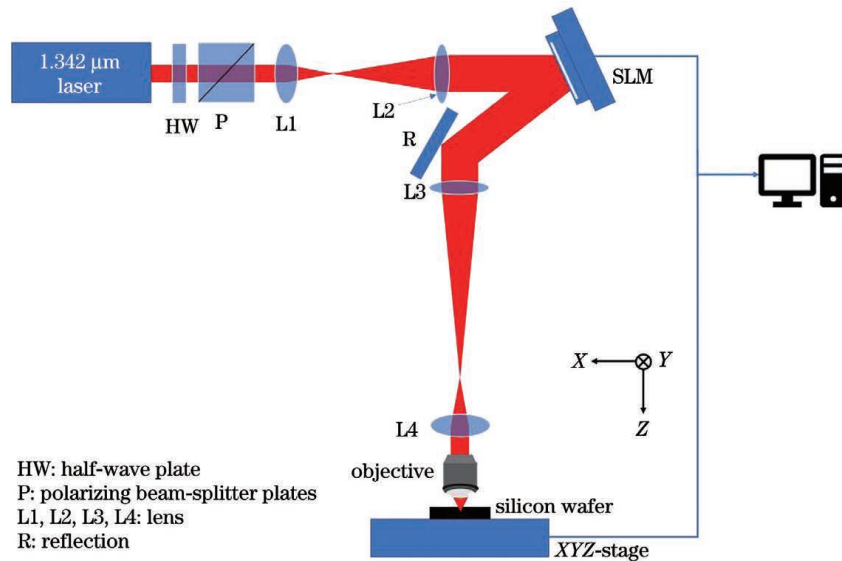


图 7 多焦点隐切实验装置原理图

Fig. 7 Schematic of experimental multi-focus stealth dicing setup

为了方便硅晶圆隐切后裂片,对 $250 \mu\text{m}$ 厚硅晶圆进行三焦点激光隐切实验时,硅晶圆内部焦点间距在 $70 \mu\text{m}$ 左右。室温下硅晶圆的折射率为 3.515,考虑到硅材料折射率的影响,将空气中间距为 $20 \mu\text{m}$ 的等能量三焦点全息图加载到空间光调制器上。通过优化多组激光参数和平台移动速度(调节激光功率为 1.2 W ,脉冲重复频率为 40 kHz ,单脉冲能量为 $30 \mu\text{J}$,位移台移动速度为 200 mm/s),实现了 $250 \mu\text{m}$ 厚硅晶圆的一次性三焦点激光隐切。图 8 所示为光学显微镜下硅晶圆的横截面,可以清楚地看到,三条划痕中心分别位于距硅晶圆上表面 $35.0, 105.2, 176.0 \mu\text{m}$ 左右的位置,与初始设计焦点位置基本一致。

受 $1.342 \mu\text{m}$ 纳秒激光器单脉冲能量的限制,实验中没有实现更多焦点的一次性隐切,可以采用每次两个焦点或三个焦点来实现更厚硅晶圆的切割。从图 8 中可以看出每个焦点处的热影响区较宽,这是由于激光经过空气后聚焦在硅晶圆内部,界面两端的折射率不同,在晶圆内部产生了焦斑弥散

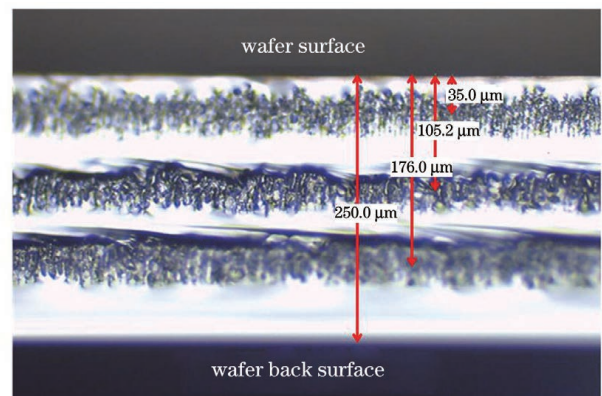


图 8 晶圆切割后的横截面

Fig. 8 Cross-section of wafers after cutting

现象,通常称之为“球差”。球差会随着加工深度的增加而增大,因此,多焦点同时校正像差的激光隐切方法是未来研究的重要内容。

5 结 论

为了实现硅晶圆的多焦点隐切,本文提出了一种大数值孔径下的轴向多焦点算法。将不同焦距的

相位差值作为变量,通过迭代求解傅里叶级数满足要求的原函数,之后对二维平面坐标进行变量映射,就可以获得轴上焦点数目、各焦点能量和间距同时可调的相位图。之后,对不同能量比、焦点间距的三焦点和五焦点光场进行了仿真,结果表明,其能量利用率均达到 90% 以上。对于等能量的多焦点光场,其光强均匀性达到 90% 以上。在此基础上,本课题组搭建了一套硅晶圆多焦点隐切实验系统,选用波长为 $1.342\ \mu\text{m}$ 的纳秒激光器切割 $250\ \mu\text{m}$ 厚硅晶圆,将生成等能量、等间隔的三焦点相位全息图加载到空间光调制器上,使三个焦点分别聚焦在硅晶圆表面下方 $35.0, 105.2, 176.0\ \mu\text{m}$ 处。在入射光功率为 $1.2\ \text{W}$, 位移台速度为 $200\ \text{mm/s}$ 的条件下,成功实现了硅晶圆的三焦点隐切。

参 考 文 献

- [1] Crawford T H R, Borowiec A, Haugen H K. Femtosecond laser micromachining of grooves in silicon with 800 nm pulses[J]. Applied Physics A, 2005, 80(8): 1717-1724.
- [2] Pantsar H, Herfurth H, Heinemann S, et al. Laser microvia drilling and ablation of silicon using 355 nm pico and nanosecond pulses[J]. ICALEO, 2008, M507: 278-287.
- [3] Nie S L, Guan Y C. Review of UV laser and its applications in micromachining [J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(12): 1169-1179, 1251.
聂世琳, 管迎春. 紫外激光器及其在微加工中的应用 [J]. 光电工程, 2017, 44(12): 1169-1179, 1251.
- [4] Kumagai M, Uchiyama N, Ohmura E, et al. Advanced dicing technology for semiconductor wafer: stealth dicing[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2007, 20(3): 259-265.
- [5] Nara Y, Kiyota H. Stealth dicing technology with SWIR laser realizing high throughput Si wafer dicing [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10520: 1052004.
- [6] Li Z Q, Wang X F, Wang J L, et al. Stealth dicing of sapphire sheets with low surface roughness, zero kerf width, debris/crack-free and zero taper using a femtosecond Bessel beam[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 135: 106713.
- [7] Han W. Research on silicon wafer dicing technology [D]. Suzhou: Soochow University, 2018.
韩伟. 硅晶圆的切割工艺研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.
- [8] Ji M K. Research on picosecond laser stealth dicing of LED[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
纪明阔. LED 皮秒激光隐形切割工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [9] Xie X, Zhou C, Wei X, et al. Laser machining of transparent brittle materials: from machining strategies to applications[J]. Opto-Electronic Advances, 2019, 2(1): 11-23.
- [10] Zhou S F, Zeng X Y. Laser separation of brittle material[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(3): 321-327.
周圣丰, 曾晓雁. 激光分离脆性材料的研究[J]. 应用光学, 2007, 28(3): 321-327.
- [11] Zhuang H W. Research on multifocal picosecond laser stealth dicing brittle materials[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
庄鸿武. 皮秒激光多焦点隐形切割脆性材料研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [12] Shangguan Y, Liu P, Zhang J J, et al. Multi-focus laser separation of thick transparent materials [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1102008.
上官赢, 刘朋, 张军军, 等. 多焦点激光分离厚透明材料[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1102008.
- [13] Golub M A, Doskolovich L L, Kazanskiy N L, et al. Computer generated diffractive multi-focal lens [J]. Journal of Modern Optics, 1992, 39(6): 1245-1251.
- [14] Xu N, Xiao H, Kong Z, et al. Axial multifocus beams formed by binary optical elements[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(2): 1-10.

Algorithm and Experiment of Silicon Wafer Multifocus Laser Stealth Dicing

Zhang Huaizhi, Xu Jiaming, Zhang Lantian, Qin Yingxiang*

School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, National Engineering Research for Laser Processing, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract

Objective Chips are commonly used in scientific research as well as everyday life. In practice, separating a single

chip from a large silicon wafer is often necessary. Laser ablation and blade dicing are two older means for dicing wafers, both of which have major limitations such as heat and debris contamination. Laser stealth dicing is to focus the laser inside the silicon and realize high-quality separation, which is a completely dry process with low kerf loss. A large numerical aperture focusing lens is used to generate a peak power density, and a nonlinear absorption effect results in extremely high absorption at localized points, resulting in cracks. Only the focus within the wafer can be machined without damaging the front and back surfaces. When the wafers are thin, a single scan is sufficient for dicing. However, for thick wafers, creating stacked stealth dicing layers by repeat scanning of laser beam at different depths in the wafer is necessary. The efficiency can be increased by simultaneously generating multifocus along the axis inside the wafer. This paper proposes and applies a simple multifocus algorithm with a large numerical aperture to the silicon wafer laser stealth dicing experiment.

Methods In this paper, the multifocus silicon wafer laser stealth dicing is studied. First, the multifocus phase diagram under a large numerical aperture is optimized. The phase difference between different focal lengths is used as a variable, and the original function satisfying the Fourier series requirements is solved iteratively. Each variable is nonlinearly mapped to produce the target phase diagram. Then, the phase diagram is loaded onto a spatial light modulator (SLM) made of liquid crystals on silicon. The SLM modulate the phase of the incident light and reflect it. The displacement table is adjusted to focus the laser inside the silicon wafer. The nonlinear absorption effect is then generated just in the focal point inside the wafer by optimizing the optical system parameters and adjusting the moving speed of the displacement stage, resulting in laser stealth dicing. Then, the wafer is examined under a microscope to determine the cut quality and foci position. Notably, silicon materials exhibit low absorption in the wavelength range of 1.2–6.5 μm . The wavelength of the laser should be selected within this range because stealth dicing needs to focus the laser at different depths inside the material.

Results and Discussions The proposed algorithm realizes the distribution of different types of axial multifocus light fields. The axial distributions of three-focus with equal energy (Fig. 4), five-focus with equal energy (Fig. 5), and five-focus with varying energies (Fig. 6) are simulated. The multifocus stealth dicing experimental setup is schematically depicted in Fig. 7. In the stealth dicing experiment, a nanosecond laser with a center wavelength of 1.342 μm is selected. By adjusting the laser power to 1.2 W, the pulse repetition rate to 40 kHz, the single pulse energy to 30 μJ , and the moving speed of the displacement table to 200 mm/s, the one-time three-focus laser stealth dicing is realized. An optical microscope is used to examine the side views of diced chips (Fig. 8). The processing depth centers are located approximately 35.0, 105.2, and 176.0 μm from the upper surface of the silicon wafer, which is consistent with the initial design. The number of foci does not continue to increase because of the limitation of the energy of a single pulse. The thermal effect is broad, which is due to spherical aberration caused by the difference in refractive index between the air and the silicon. And with the increase in the machining depth, the spherical aberration also increases.

Conclusions To realize the multifocus stealth dicing of silicon wafers, an axial multifocus algorithm with a large numerical aperture is proposed. The number of on-axis foci, energy, and the interval between the foci can all be adjusted by changing the Fourier series coefficients. For the multifocus light field with equal energy, the simulation results show that the energy utilization rate is over 90% and the light intensity uniformity is over 90%. The phase diagram is loaded onto the spatial light modulator to simultaneously generate three focuses inside the silicon wafer. The 250 μm thick silicon wafer is successfully diced at a time by selecting the corresponding laser parameters and the movement speed of the displacement table. Because spherical aberration increases with machining depth, developing a multifocus laser dicing method for simultaneous aberration correction is essential in future work.

Key words laser technique; silicon wafer; laser stealth dicing; differential mapping; axial multi-focus; phase modulation