

文章编号 1004-924X(2006)05-0829-04

厚硅片的高速激光切片研究

崔建丰^{1,2,3}, 赵 晶⁵, 樊仲维^{1,3,4}, 赵存华^{1,2,3}, 张 晶^{1,2,3},
牛 岗^{1,2,3}, 石朝晖^{1,2,3}, 裴 博^{3,4}, 张国新³, 薛 岩³, 毕 勇⁴, 亓 岩⁴

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085; 4. 中国科学院光电研究院, 北京 100085;

5. 有研半导体材料股份有限公司, 北京 100035)

摘要: 基于激光切片原理的分析, 给出了厚硅片的高速激光切片方法, 采用平凸腔补偿工作物质的热透镜效应, 利用 Nd : YAG 棒本身的自孔径选模作用, 获得了光束质量因子 M^2 等于 4.19 的 50 W 1.064 μm 激光输出。选取合适的扩束倍数、重复频率和出气孔直径, 当切割 0.75 mm 厚的硅片时, 切片速度达 400 mm/min; 当切割两层叠放的 0.75 mm 厚的硅片时, 切片速度达到 100 mm/min。切片的切口光滑, 切缝较窄, 重复精度高, 切片质量好, 达到用传统方法难以达到的切片效果。

关 键 词: 激光技术; 全固体激光器; 声光调 Q; 激光切片; 硅片

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

Study on LD-pumped Nd:YAG laser cutter for silicon wafer

CUI Jian-feng^{1,2,3}, ZHAO Jing⁵, FAN Zhong-wei^{1,3,4}, ZHAO Cun-hua^{1,2,3}, ZHANG Jing^{1,2,3},
NIU Gang^{1,2,3}, SHI Zhao-hui^{1,2,3}, PEI Bo^{3,4}, ZHANG Guo-xin³, XUE Yan³, BI Yong⁴, QI Yan⁴

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Beijing GK Laser Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China;

4. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

5. Grinn Semiconductor Materials Co., Ltd, Beijing 100035, China)

Abstract: By analysizing the theory of laser cutter, a rapid laser cutter method is given for cutting thick silicon wafer. Considering laser medium thermal lens effect and thermal focal length changing with the pumping power, using plano-convex high reflectivity mirror as the back cavity mirror to compensate the heat lens influence, utilizing the Nd : YAG self-aperture effect also, more than 50 W average power 1.064 μm laser output is obtained with beam quality factor M^2 of 4.19. Choosing suitable beam expander factor, appropriate aperture diameter of exit beam and repetition rate, when the cutting velocity is 400 mm/min, a silicon wafer of 0.75 mm thickness can be penetrated; when the cutting velocity is 100 mm/min, a silicon wafer of double-layer 0.75 mm thickness can be penetrated.

收稿日期: 2006-02-15; 修订日期: 2006-07-20.

基金项目: 国家 863 计划重大项目 (No. 2004AA31G120), 北京市科委重大项目 (No. H020420070011) 资助。

Experimental results show that the cross section is fine in narrow groove and excellent repeatability precision, it is more better than that of other conventional cutting methods.

Key words: laser technology; all solid-state-laser; acoustooptical Q-modulation; laser cutter; silicon chip

1 引 言

在当今全球超过 2000 亿美元的电子通信半导体市场中,95%以上的半导体器件是用硅材料制作的,集成电路的99%以上是用硅制作的。相对其它半导体材料而言,硅具有物博价廉,易于生长大尺寸高纯度晶体及热性能与机械性能优良等优点。目前世界上硅单晶片的年产量已达 $3.87 \times 10^{10} \text{ cm}^2$,其中全球 $\phi 20 \text{ cm}$ 硅片的年需要量已超过 $1.87 \times 10^{10} \text{ cm}^2$,约合 5 800 t 单晶。各国对硅单晶材料的消耗量反映了各国集成电路制造业的规模和工艺水平,而各国的硅单晶材料和硅抛光片的制造水平也是各国集成电路产业是否独立自主的重要标志。

我国半导体单晶硅生产能力为 300 t/a,产量约 260 t/a;单晶硅多为 $\phi 5 \sim 20 \text{ cm}$,其中以 10 cm 为主,抛光片直径为 $5 \sim 15 \text{ cm}$,产量合计为 $1.29 \times 10^8 \text{ cm}^2$,世界抛光硅片的产量约 $2.58 \times 10^{10} \text{ cm}^2$,以 $\phi 15 \text{ cm}$ 和 $\phi 20 \text{ cm}$ 为主,我国抛光硅片产量仅占世界抛光硅片的 0.5%,且直径偏小。单晶硅抛光片以 $\phi 10 \text{ cm}$ 为主,而国际主流产品即 $\phi 20 \text{ cm}$ 抛光片在我国尚处于试制阶段^[1]。

在硅晶片的生产加工过程中,把单晶硅锭加工成抛光片,通常需要至少六道机械加工、两道化学加工和一至两道抛光^[2]工艺,成品率的高低成为半导体材料厂家降低成本,提高产量和市场竞争力的重要一环。由于目前国内各半导体材料厂在硅晶片加工过程中存在相当比例的加工废品,通过使用本文研制的 LD 抽运 Nd:YAG 激光切片机将大尺寸废硅片切割成稍小尺寸的产品,如将 $\phi 15 \text{ cm}$ 废硅晶片切割成 $\phi 12.5 \text{ cm}$ 硅晶片或将 $\phi 12.5 \text{ cm}$ 废硅晶片切割成 $\phi 10 \text{ cm}$ 硅晶片,解决了传统的金刚石切割、超声波切割、高速旋转圆盘切割造成的切缝宽、表面易碎、速度慢、良品率低等缺点^[3],可以将废晶片变废为宝,节约生产厂家成本,提高资源利用率,达到挽救半导体材料厂家废品率高、成本高、竞争力低的命运。

2 激光切片机理

激光切片的实际应用一般来说有两种^[4]:(1)划痕切割:由于硅片是脆性材料,不需要完全切透,只要激光在硅片上打出一系列互相衔接的盲孔,孔的深度是硅片厚度的 $1/3 \sim 1/4$,并且划线沿着或垂直于硅片的解理面,由于应力集中,稍加力,硅片就可以很容易地沿此线折断,划线速度很高,此法适合于高速直线切割。(2)穿透切割:当切片轨迹不沿着或垂直于硅片的解理面时,一般就要求实行穿透切割。本文主要讨论穿透切割。对于厚硅片的激光切割,国内外尚处于摸索阶段,能查到的资料只有激光划片或者划痕切割,而没有激光切片的报道。而要实现厚硅片的穿透切割,就要求在保证高峰值功率的同时,还要保证小的聚焦光斑尺寸和长的焦深,这就要求有高峰值功率、高平均功率、高光束质量的激光器和精心设计的聚焦光学系统。

硅片或其他类似的脆性材料在脉冲激光的瞬间作用下,可被近似地认为吸收的激光能量值产生基质的汽化及熔化,而没有辐射、对流和传导热损失。则硅片所吸收的激光功率^[5]

$$P/vd = \eta \rho \omega (C_p \Delta T + L_f + mL_v), \quad (1)$$

式中吸收功率 $P = P_i(1 - r_f)$

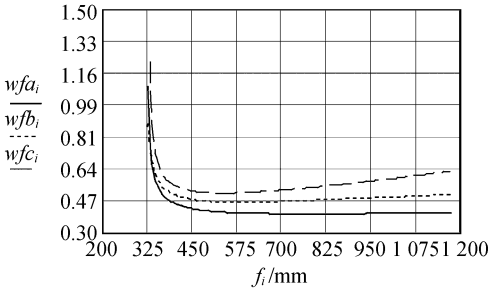
P_i :入射功率; r_f :反射率; η :过程效率; v :切割速度; ω :切缝宽度; d :切缝深度; ρ :硅片基质密度; C_p :硅片比热, ΔT :升至熔点 T_m 的温度差值; L_f :熔化潜热; m :熔化后再汽化的质量百分比; L_v :汽化潜热。

对每一批硅片,式(1)左边可当作常数,即 $P/vd = \text{常数}$ 。

因此,决定切片速度和切片深度的主要因素是激光功率和材料性能。切片速度与有效功率密度成正比(有效功率密度又与光斑模式和光斑尺寸有关),与材料密度成反比,与划缝深度成反比,其中激光器系统是整个切片装置的核心。只有保证高峰值功率、高平均功率、高光束质量的激光器,才有可能实现高切片速度、高切片厚度、相对

理想的切口质量、少的热影响区范围。

为了让激光器能在大电流下保持好的光束质量,使激光器运行于稳区的边缘^[6-9],此时基模体积大,功率高,光束质量好。对比平凹腔、平平腔、平凸腔在激光棒中心处的基模光斑半径随热透镜变化的模拟曲线分析可知,在额定工作电流(25A附近),平凸腔在激光棒中心处的基模光斑半径最大、平平腔其次、平凹腔最小。如图 1。



- a: 平凹腔 $R_1=1000\text{ mm}, L_1=70\text{ mm}, L_2=240\text{ mm}$;
- b: 平平腔 $R_1=\infty, L_1=70\text{ mm}, L_2=320\text{ mm}$;
- c: 平凸腔 $R_1=-2000\text{ mm}, L_1=70\text{ mm}, L_2=390\text{ mm}$

图 1 激光棒中心基模光斑半径随热透镜焦距的变化关系曲线

Fig. 1 Fundamental spot size in the middle of laser rod vs thermal focal length

由于 L_2 大于 L_1 , 所以束腰在 M_2 上, 还要采用倒置的望远镜对激光束进行变换, 降低光束发散角^[10], 以提高聚焦点的功率密度。令束腰半径为 ω_0 , 发散角 $\theta_0 = \frac{M^2 \cdot \lambda}{\pi \cdot \omega_0}$, 瑞利距离 $z_0 = \frac{\pi \cdot \omega_0^2}{\lambda \cdot M^2}$, 若 M^2 距扩束镜输入端距离为 L_1 , 扩束镜输出端距 45° 反射镜距离为 L_2 , 45° 反射镜距聚焦镜头距离为 L_3 , 聚焦镜头焦距为 f , 激光波长为 λ , 激光器的光束质量为 M^2 , 扩束镜的放大倍数为 MT , 望远镜的准直倍率为 MT' , $MT' = |MT| \cdot \frac{\omega_1}{\omega_0}$, 扩束镜输入端光斑半径 $\omega_1 = \omega_0 \cdot \sqrt{1 + (\frac{L_1}{z_0})^2}$, 扩束镜输出端光斑半径 $\omega_2 = \omega_1 \cdot MT'$, 发散角 $\theta_1 = \frac{\theta_0}{MT'}$, 聚焦镜头输入端光斑半径 $\omega_3 = \omega_2 + L_4 \cdot \theta_1$, 经聚焦镜头聚焦后得到的焦点半径 $\omega' = \frac{\lambda \cdot f \cdot M^2}{\pi \cdot \omega_3}$, 焦深 $2z' = 2 \cdot \frac{\pi \cdot \omega'^2}{\lambda \cdot M^2}$ 。

可见, 要想得到更小的聚焦后的焦点半径

ω' , 可以通过: (1) 选用短波长激光器; (2) 选用短焦距的聚焦镜头; (3) 设计出高光束质量的激光器, 即尽可能小的 M^2 值; (4) 通过调整扩束倍数, 以获得尽可能大的 ω_3 。

对于选定工作物质的激光器, 波长是固定的, 而 M^2 值对于设计好的激光器而言也是一定的, 故而要想达到尽可能小的聚焦后的焦点半径 ω' , 还要选用合理的扩束倍数和尽可能短的焦距。但一般来说, 短焦距的聚焦镜头势必带来镜头前表面与工作台的距离的缩短, 这样加工过程中产生的崩溅熔渣很容易污染镜头, 这通常是绝对不允许的。本文采用独特的主面前移光学设计, 在保证合理的工作距的前提下, 可以设计更短焦距的聚焦镜头。

当然, 聚焦后的焦点大小也不是可以任意的小, 因为焦深与 ω'^2 成正比, 故而单纯的追求小的聚焦光斑尺寸而忽略了焦深的减小, 在做厚的硅片切片或切割可能会造成切片厚度的反而减小。此外, 要想达到高速切片, 还要保证一定的聚焦光斑重复率, 如图 2。令激光发射的经聚焦镜头聚焦后得到的焦点中心距为 L , 声光调 Q 的重复频率为 q , $\angle AO_1O_2 = \alpha$, 切片速度 $v = 60 \cdot q \cdot L$, 光斑重复率

$$S = 2 \cdot \frac{\left[\frac{2 \cdot \alpha \cdot \pi \cdot (\omega')^2}{2\pi} - \frac{(\omega')^2 \sin(2\alpha)}{2} \right]}{\pi \cdot (\omega')^2}$$

过小的 ω' 就必须提供更高的激光脉冲重复频率, 而激光脉冲重复频率的增加势必降低单脉冲能量, 所以必须综合考虑。

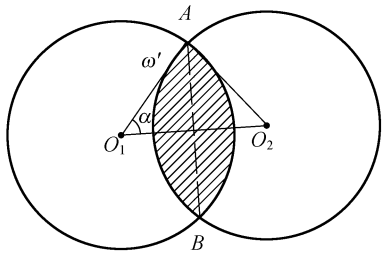


图 2 聚焦光斑重复率示意图
Fig. 2 Repetition rate of focusing spot

3 实验装置

LD 抽运 Nd : YAG 声光调 Q 激光切片的光路如图 3。

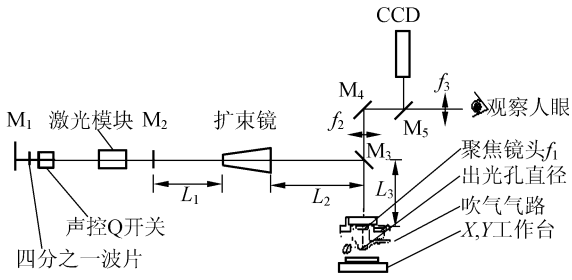


图 3 LD 抽运 Nd : YAG 声光调 Q 激光切片机光路图
Fig. 3 Optics figure of LD-pumped Nd : YAG laser cutter

试验中采用了北京国科世纪激光技术有限公司生产的 GKPM-60 半导体侧泵模块。利用三个方向 120° 旋转对称抽运, 抽运总功率为 180 W, Nd : YAG 棒尺寸为 $\phi 3\text{ mm} \times 63\text{ mm}$, 掺杂浓度为 0.6 %, M_1 为 2 m 平凸镜, 凸面镀 1 064 nm 全反膜, M_2 为 20 % 输出镜, 在注入功率 180 W, 声光调制频率等于 10 kHz 时, 得到了 M^2 等于 4.19 的 50.1 W 1.064 μm 的红外激光输出。

M_3 为 45° 1 064 nm 高反镜, 聚焦镜头 f_1 双面镀 1 064 nm 增透膜, 焦距 75 mm, f_1 、 f_2 将激光切片机的工作台成像到 CCD, 操作者可通过目镜 f_3 和通过 CCD 摄像机输出到工业监视器同时观察切片效果^[11]。又因为 CCD 的损伤阈值非常低, 所以将其中的 M_4 镀可见光的高反膜, 紫外和红外高透膜, 以减少激光切片过程中产生的过多的无用或有害的紫外、红外光对 CCD 的过度辐射, 以免损坏 CCD; M_5 镀可见光的半反膜, f_1 、 f_2 、 f_3 组合将工作台成像到 f_3 后的人眼, 即可以完成工作台的调校和切片状态的实时观察。

4 实验结果与讨论

4.1 切片深度随重复频率变化的影响

在注入电流为 25 A, 8 倍扩束, 出光孔直径 4 mm, 切片速度 400 mm/min 时, 改变重复频率试验切片效果。当重复频率很低时, 如 1 ~ 3 kHz, 切片声音尖锐刺耳, 但切片厚度不理想, 0.75 mm 厚的硅片没能切透; 随着重复频率的增加, 切片声音变小, 切片深度增加; 重复频率在 4 ~ 17 kHz 范围内, 都可以切透 0.75 mm 厚的硅片; 继续增加脉冲重复频率到 18, 19, 20 kHz, 硅

片又开始切不透。这是因为在较低重复频率工作时, 激光器的峰值功率很高, 但平均功率很低, 激光束能迅速将硅片快速汽化, 硅片汽化量由吸收能量的多少决定。随着重复频率的增加, 激光器输出的平均功率增加, 所以切片效果好; 但当重复频率增加到很大时, 峰值功率下降到不足以使硅片汽化时, 就又开始划不透硅片了。

4.2 切片宽度随电流变化的影响

在 8 倍扩束, 出光孔直径为 8 mm, 切片速度为 400 mm/min 时, 测量 1 kHz, 8.7 kHz 时不同注入电流下切缝宽度的变化如图 4。可见, 8.7 kHz 切缝宽度较窄, 并且切缝宽度随注入电流的增加而增加。

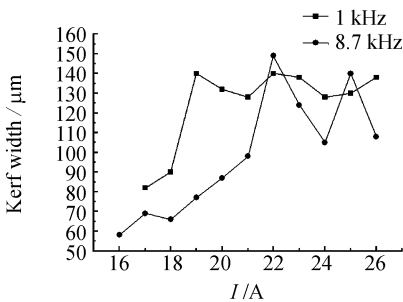


图 4 重复频率为 1 kHz 和 8.7 kHz 时, 切缝宽度随电流的变化
Fig. 4 Kerf width changes with current while frequency is 1 kHz and 8.7 kHz

4.3 重复频率、吹气口尺寸对切片结果的影响

因切片过程中有一定的飞溅的残渣会污染聚焦镜头, 所以如图 3, 在聚焦镜头下方配有挡灰镜片, 并配有吹气气路。又因吹气气路的存在, 会对聚焦光束造成一定的干扰, 而吹气口直径的大小, 直接关系到吹气效果的好坏。所以, 在注入电流为 25 A, 8 倍扩束, 切片速度为 400 mm/min 时, 出光孔直径分别为 4 mm, 8 mm 时对划缝宽度做对比试验, 如图 5。

可见, 在 3 ~ 15 kHz 重复频率范围内, 除个别重复频率 (8, 9 kHz) 以外, 4 mm 出光孔直径的划缝宽度都小于 8 mm 出光孔直径的划缝宽度, 并且 4 mm 出光孔直径的划缝宽度要比 8 mm 出光孔直径的划缝宽度随重复频率的变化剧烈得多。对于 4 mm 出光孔直径的划缝宽度最窄处在 6 kHz (110 μm) 和 10 kHz (118 μm)。试验发