

文章编号: 1001-3806(2004)02-0131-02

## 水浴条件下 YAG 倍频激光切割 Si 片的实验研究

凌 磊, 楼祺洪, 李抒智, 叶震寰, 董景星, 魏运荣  
(中国科学院 上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 用 Nd:YAG 固体倍频激光器在水中 Si 片进行微刻蚀比在空气中产生的飞溅物少。对两种条件下的刻蚀速率、刻槽表面形貌进行了比较。实验结果得到最窄的刻缝宽度小于 50 $\mu\text{m}$ , 表面不平整度小于 5 $\mu\text{m}$ , 为工业用激光切割 Si 片提供了更好的工艺。

**关键词:** YAG 固体倍频激光; 切割; Si 片; 水浴

中图分类号: TG485; TN248.1 文献标识码: A

### Microcutting Si wafer in water bath by second harmonic output of YAG laser

LING Lei, LOU Qi-hong, LI Shu-zhi, YE Zheng-huan, DONG Jing-xing, WEI Yun-rong  
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** The results are reported that the splashes of microcutting Si wafer by second harmonic output of YAG laser in water bath may be fewer than in air environment. The surface morphology and etching rate for water bath and air environment are compared in detail. The cutting gap as small as 50 $\mu\text{m}$  with edge fluctuation less than 5 $\mu\text{m}$  is obtained in water bath. This technology may be helpful for industrial applications.

**Key words:** second harmonic output of YAG laser; cutting; Si wafer; water bath

### 引 言

激光由于本身所具有的高能量密度、高光束质量等优点, 从其诞生以来, 就受到了各学科的广泛关注。在材料加工领域, 特别是在材料的微细加工、微细焊接和高硬度、脆性材料的加工处理等方面, 应用激光进行加工, 有着传统机械方法无可企及的优势<sup>[1~3]</sup>。激光切割是近年来人们开始逐渐重视的一种新的激光应用。由于它具有切割速度快、切缝窄、切割边缘光滑、切边无机械应力等优点, 使其较适用于脆性材料的切割。目前, 已广泛应用于各种金属、非金属的切割中。

目前所使用的激光系统中, CO<sub>2</sub> 气体激光器和 YAG 晶体激光器最为常用。CO<sub>2</sub> 气体激光器特点是输出功率能量大, 输出波长在 10 $\mu\text{m}$  附近, 热效应明显、激光输出模式差、工频电源体积大、效率低、适应性差、操作不便。而相比较而言, 对于输出功率相同的 YAG 晶体激光器, 则可以做到体积小、结构紧凑、

操作方便, 后期维护成本相对较低, 且输出波长较 CO<sub>2</sub> 气体激光短, 在 1 $\mu\text{m}$  附近, 倍频后为 532nm, 可实现单模输出。鉴于 YAG 晶体激光器多方面的优势, 以它为代表的固体激光器在材料加工领域的销售额逐年呈大幅上升趋势<sup>[4~6]</sup>。

半导体行业中常用的单晶硅片为 20.32cm, 30.48cm 的大尺寸硅片工业应用也在普及之中。为了提高工作效率, 降低成本, 一般是先在每个硅片上制作多个相同的集成电路单元阵列, 然后采用切割工艺将其分开。传统的切割工艺是采用全机械方式, 切割精度较低, 且容易产生微裂痕甚至碎片。随着工业要求的逐步提高, 以及激光切割工艺的进一步完善, 采用性能优异的合适的激光器作为切割光源, 已引起了越来越多的人的关注。

实验中选择了 Nd:YAG 固体倍频激光器输出的 532nm 波长激光作为刻蚀源, 分别在空气和水浴环境下对 Si 片进行刻槽实验。比较了在这两种环境下的刻蚀速率、样品表面形貌, 得到了不大于 50 $\mu\text{m}$  的刻缝宽度和表面不平整度小于 5 $\mu\text{m}$  的实验结果。工业应用中可用来参考。

### 1 实验装置

实验装置如图 1 所示。其中, 激光器使用了英

作者简介: 凌 磊(1979), 男, 研究实习员, 主要从事激光应用技术研究工作。

E-mail: linglei@siom.ac.cn

收稿日期: 2003-06-18; 收到修改稿日期: 2003-07-22

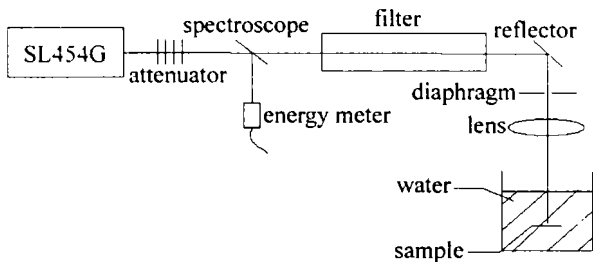


Fig. 1 Experiment equipment

国 Spectron Laser Systems 公司的型号为 SL454G 的固体倍频激光器, 输出 532nm 激光, 圆形光斑直径 6.5mm, 脉宽 9ns, 脉冲重复频率为 30Hz。能量计起辅助监视作用。由于激光器本身是多模输出, 光束质量较差, 采用腔外加空间滤波器和光阑方法, 希望能对光束质量加以改善。聚焦透镜用焦距为 100mm 的柱透镜, 样品板放在透镜焦点略靠后处, 以便刻蚀出槽壁较直的狭缝。在空气中实验时, 容器中不充水。实验样品统一为 0.6mm 厚、表面光滑的硅片。

## 2 实验现象、结果及其讨论

在空气中实验时, 当 532nm 激光入射到 Si 片表面上时, 刻蚀处发出耀眼强光, 声音清脆, 并伴随有明显的等离子体喷射而出, 随着刻蚀深度的加剧, 声音渐渐暗淡, 出射等离子体减少, 完全刻穿后则声音消失。在刻槽两边会有明显白色的溅射沉积物残留下来。而当把样品置放于水中后, 在刻蚀处也产生强光的同时, 由于焦点处能量大, 会不断伴随有水泡冒出, 完成后, 样品表面的溅射沉积物明显减少。

图 2 是 Si 片样品在空气和水中不同能量密度下的刻蚀速率比较。由图中可以看到, 无论在空气

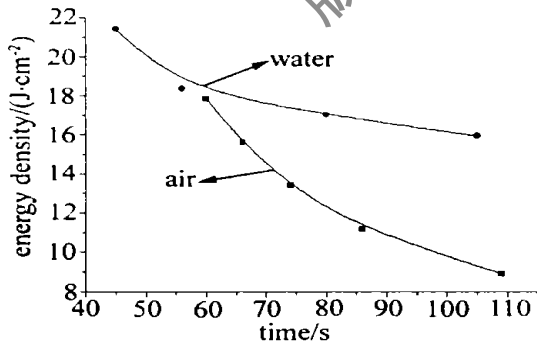


Fig. 2 Comparison of etching rate in different circumstance

还是水环境下, 随着刻蚀能量密度的增大, 刻蚀速率都是增加的。但在空气中的曲线斜率比在水中要大, 即要想保持较均匀的刻蚀速率, 在空气对能量密度的控制精度要求较高。当刻蚀能量密度较小时, 空气中耗费较长的时间仍然可以刻穿, 而水中则不能成功。可以理解为在水浴环境下, 由于焦点附

近的水在高能量密度下要气化, 表现为气泡放出, 吸收了一部分能量, 且吸收的能量相对恒定, 在激光能量密度大时, 这一部分能量所占的比例小, 在图中表现不明显, 但当激光能量密度减小时, 这种影响就相对凸现出来, 表现为图中的水浴环境下的刻蚀阈值要比空气环境中的高。当刻蚀时间小于 1min, 即刻蚀速率大于  $10\mu\text{m/s}$  时, 这时的速度适当并易于控制, 这时水浴环境和空气中的刻蚀能量密度和刻蚀速率已经差不多了。

图 3 是在实验条件下得到的型号为 JSM-6360LA 显微镜下拍摄的样品表面形貌, 放大到 100 倍, 图 3a 是在空气中, 图 3b 是在水浴环境下。在图 3a 中,

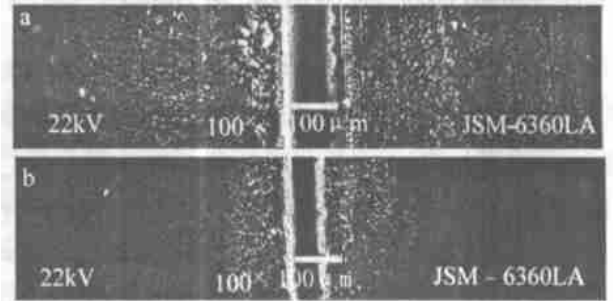


Fig. 3 a—slot in the air ( $100\times$ ) b—slot in the water ( $100\times$ )

刻槽内壁较光滑, 基本无毛刺或不规则突起, 但在刻槽两边  $500\mu\text{m}$  范围内, 可以看到明显的溅射物颗粒附着, 在左右各  $150\mu\text{m}$  范围内, 颗粒直径约  $10\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$ , 而更远处的附着颗粒直径变小。宏观表现为在刻槽两边有白色附着物。在图 3b 中, 刻槽内壁也较光滑, 表面附着溅射物范围明显减少, 且影响范围缩小到  $150\mu\text{m}$  以内, 颗粒较空气中小, 宏观表现不明显。

## 3 结论

在此次实验中, 用 Nd:YAG 固体倍频激光器输出的 532nm 的激光成功实现了空气和水浴环境下对 Si 片的刻蚀。选择了在工业应用中发展前景更好的波长较短的 YAG 激光器, 刻蚀出了表面平整度小于  $5\mu\text{m}$ , 槽宽不大于  $50\mu\text{m}$  的缝。比较样品表面显微形貌得出, 在槽宽基本一致的情况下, 水浴环境下刻蚀 Si 片的溅射物污染面积小于空气环境下直接刻蚀时污染面积的  $1/3$ 。并通过对两种环境下刻蚀速率的比较, 得出在此实验条件下, 当刻蚀能量密度大于  $18\text{J/cm}^2$  时, 刻蚀速率大于  $10\mu\text{m/s}$ , 二者的刻蚀效率相当的实验结论。能为 YAG 固体倍频激光器在工业切割中的应用提供一定的参考价值。

(下转第 143 页)

光从另一端输出。为了测量转换效率,用一滤光片将出射光中的  $1.064\mu\text{m}$  红外基频光和  $0.532\mu\text{m}$  倍频光分开。倍频转换实验是在室温下完成的。

在准相位匹配倍频转换实验中,测量了周期极化铌酸锂晶体横向不同位置的倍频效率,发现倍频绿光光强随光束在样品上入射点位置的不同有一定变化,说明样品的周期畴结构不完全均匀,占空比不完全一致,制作过程还有待于进一步提高。图 4 中给出了倍频绿光的平均输出功率随输入基频光功率的变化曲线。

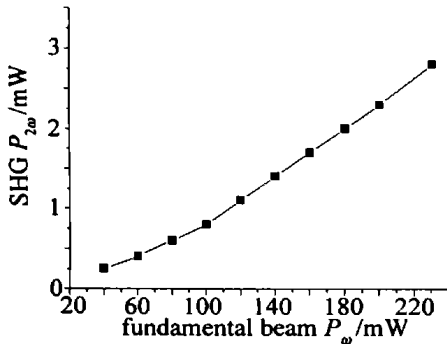


Fig. 4 SHG power  $P_{2\omega}$  dependence of the fundamental beam power  $P_{\omega}$ .

从图中可以看到,当平均输入功率为  $230\text{mW}$  时,获得的二次谐波输出功率达到  $2.8\text{mW}$ ,倍频转换效率为  $1.22\%$ 。当基频光功率低于  $30\text{mW}$  时,输出倍频绿光功率太低,无法和噪音信号分开,因此在这一区域没有数据。对于倍频转换效率较低的原因,作者认为主要有以下几点:(1)周期极化铌酸锂样品的光束入射和出射端面只是进行了简单抛光处理,并没有镀增透膜,因此存在着较强的光反射等损耗;(2)样品的周期极化畴结构不完全均匀,占空比有一定偏离;(3)在整个倍频实验中,各种透镜、分光镜等光学镜组的损耗都没有计算在内。如果考虑上述因素对测量结果的影响,实际倍频转换效率还应更高。

实验中使用的是声光调  $Q$  激光器,入射光的基频峰值功率可以达到  $10\text{MW}/\text{cm}^2$  左右,在室温条件下,连续工作  $5\text{h}$  以上,输出倍频功率基本稳定,没有发生明显变化。同时也没有观察到由于光折变效应

引起的光斑扭曲现象,这进一步表明使用的近化学计量掺镁铌酸锂晶体具有很强的抗光折变性能,这对于实现室温下大功率激光频率转化非常重要,同时也有利于提高倍频转换光的光斑质量。无疑,使用高质量近化学计量掺镁铌酸锂晶体是解决光折变损伤效应的根本途径。

### 3 结 论

利用气相输运平衡技术,对不同掺镁浓度的同成分铌酸锂进行了近化学计量处理,并检验了其抗光折变性能。实验结果表明,掺摩尔分数为  $2\%$  的镁的近化学计量铌酸锂晶体光折变阈值比同成分晶体提高了 4 个量级。通过施加  $4.5\text{kV}/\text{mm}$  的外加脉冲电场,在  $1.0\text{mm}$  厚  $z$  切铌酸锂晶体上实现了周期极化畴反转,制备出了周期为  $6.8\mu\text{m}$ 、相互作用长度为  $10\text{mm}$  的均匀周期畴结构,使用输出波长为  $1.064\mu\text{m}$  声光调  $Q$  Nd:YAG 激光器作抽运光源,在室温下实现了绿光倍频输出。当基频光波功率为  $230\text{mW}$  时,得到了波长为  $0.532\mu\text{m}$ 、功率为  $2.8\text{mW}$  的倍频绿光输出,倍频转换效率为  $1.22\%$ ,整个实验过程中没有观察到光折变效应造成的光损伤。无疑,近化学计量掺镁铌酸锂晶体是制备高质量周期极化准相位匹配频率转换器件的最佳材料之一。

### 参 考 文 献

- [1] GRANEME W R, MARKKUS P, PETER G R S *et al.* Opt Lett, 1998, 23(3): 171~ 173.
- [2] MYER L E, ECKARDT R C, FEJER M M *et al.* Opt Lett, 1996, 21(8): 591~ 593.
- [3] 于建,倪文俊,薛挺 *et al.* 光电子·激光, 2002, 13(4): 339~ 342.
- [4] FEJER M M, MAGEL G A, JUNDT D H *et al.* IEEE of Quan Electr, 1992, 28(11): 2631~ 2655.
- [5] 陈玉萍,陈险峰,曾祥龙 *et al.* 光学学报, 2002, 22(4): 399~ 401.
- [6] 姚江宏,许京军,张光寅. 中国物理快报, 2000, 17: 513~ 515.
- [7] FURUKAWA Y, KITAMURA K, TAKEKAWA S. A P L, 2000, 77: 2494~ 2996.
- [8] 姚江宏,陈亚辉,邓浩亮. 红外与毫米波学报, 2003, 22(1): 35~ 39.

(上接第 132 页)

### 参 考 文 献

- [1] GOWER M C. SPIE, 1998, 3343: 171.
- [2] ZHANG J, SUGIOKA K, MIDORIKAWA K. Appl Phys, 1998,

A67: 499~ 501.

- [3] PEYRE P, FABBRO R, BERTHEL *et al.* Journal of Laser Applications, 1996(8): 135~ 141.
- [4] 黄杰译. 激光与光电子学进展, 2002(6): 18~ 20.
- [5] 杨遇春. 激光与红外, 1997, 27(6): 326~ 329.
- [6] 杨逸民. 激光与红外, 1997, 27(6): 333~ 336.