

YAG 激光切割单晶硅的工艺研究

朱为为

(株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 通过实验研究了 YAG 激光切割单晶硅的工艺, 分析了激光功率、切割速度、辅助气体以及焦点位置对最终切割质量的影响, 并对存在的问题提出了改进的建议及方法, 为实际应用中参数设置和工艺改进提供了参考, 使激光切割工序取得良好的效果。

关键词: 激光切割; YAG 激光; 单晶硅

中图分类号: TN304.05; TN205

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2010)03-0001-04

Research of the Cutting Technology on Silicon Wafer by YAG Laser

ZHU Wei-wei

(Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Cutting technology on silicon wafer by YAG laser is experimentally investigated. Influences of laser power, cutting velocity, assistant gas and focal point on the final cutting quality are analyzed. Suggestions and methods of improvement for the subsistent problems are further proposed, which provides a reference for the parameter set and technology amelioration in applications, and making the laser-cutting procedure achieve good effect.

Key words: laser cutting; YAG laser; silicon wafer

0 引言

随着电力电子技术应用的日益广泛, 电力电子技术取得了较快的发展。特别是高压晶闸管的出现, 电力电子技术更加受到人们的广泛关注。激光切割作为电力电子技术中的一道重要工序, 其成品率直接影响整条生产线的成品率, 同时该工序也成为电力电子厂商降低成本、提高产量和扩大市场占有率较重要的环节。

激光切割作为当前世界的先进工艺, 其发展历史源远流长。1964 年, 美国科学家相继开发了二氧化碳(CO₂)激光器和掺钕钇铝石榴石(YAG)激光器。由于工业界的重视, 美国于1965年开始设计用于焊接的红宝石脉

冲波激光加工机, 并且很快应用于切割工艺。20 世纪 70 年代中期, 激光加工技术开始大规模被工业界接受。80 年代以后, 激光切割工艺已进入美国、欧洲及日本等工业发达国家和地区的生产流水线。我国也于 20 世纪 60 年代初研制出首台激光器, 但产业化步伐较慢, 直到 20 世纪 90 年代, 激光加工工艺才真正进入我国的工业生产流程。

与传统的切割方法相比, 激光切割具有独特的优势, 主要表现在: (1) 切割精度高、切缝窄、质量好、热影响区较小, 且切割端面平整光滑; (2) 切割速度快, 加工效率高; (3) 是一种非接触式加工, 没有机械加工力, 不会产生形变, 也不存在加工屑、油污、噪声等污染问题, 是一种绿色环保加工; (4) 切割能力强, 几乎可以切割任何材料。

收稿日期: 2010-02-02

作者简介: 朱为为(1987-), 男, 助理工程师, 现从事功率器件基础工艺研究工作。

1 激光切割原理及理论分析

激光切割加工同机床的机械加工有着本质的区别。它利用从激光发射器发射出的激光束,经外电路系统,聚焦成高功率密度的激光束。光束作用到工件表面,激光热量被工件材料吸收,工件温度急剧上升,当达到沸点后,材料开始汽化并形成孔洞。随着光束与工件相对位置的移动,使材料形成切缝,最终达到切割的目的。切割时的工艺参数(激光模式和功率,切割速度,辅助气体压力等)及运动轨迹均由数控系统控制,割缝处的熔渣由与光束同轴的高压辅助气体吹除。

在单晶硅切割中,聚焦后的光斑直径越小越好,这样切缝宽度就会很小,切缝垂直度较高。由激光原理^[1]可得,激光经过扩束镜和聚焦镜后有:

$$\text{束腰半径 } w = \frac{\lambda f M^2}{\pi A w_0} \quad (1)$$

$$\text{焦深 } z = 2 \times \frac{\pi w^2}{\lambda M^2} \quad (2)$$

式中: λ ——激光波长; f ——聚焦镜焦距; w_0 ——激光的束腰半径; M_2 ——光束质量因子; A ——扩束镜准直倍率。

激光波长 λ 和光束质量因子 M_2 由激光器决定,可以选择波长短和 M_2 较小的激光器来减小光斑尺寸;另一方面通过减小聚焦镜焦距 f 和调整扩束镜准直倍率 A 来得到较小的光斑尺寸。但在减小聚焦镜焦距的同时焦深会缩短,这样在切割较厚单晶硅时,很容易出现切不透的现象,因此要根据实际要求合理选择聚焦镜的焦距和扩束镜倍数。

2 实验装置

YAG 激光切割单晶硅的实验光路和实验装置如图1和图2所示。

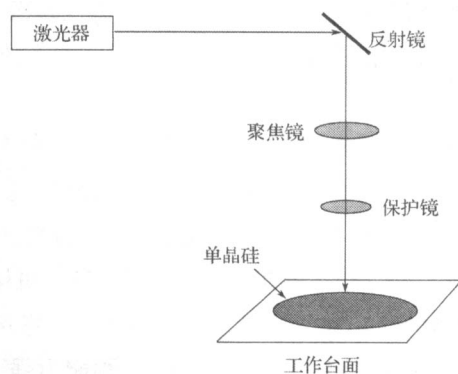


图1 光路示意图

Fig.1 Schematic diagram of optical paths

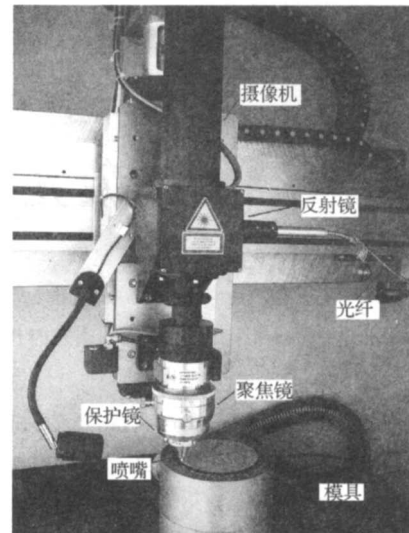


图2 实验装置

Fig.2 Experimental device

实验中采用了德商罗芬激光技术有限公司生产的Rofin Starfiber 200激光器和德国Siemens公司的802D Solution Line 数字控制系统。Starfiber 200激光器采用了最先进的光纤激光器、集成RCU控制系统及全触摸屏操作方式,具有结构紧凑、光束质量好和维护简单等优点。其主要性能参数如下:

质量	约180 kg
工作温度	+15~+35℃
工作湿度	5%~85%
电源电压及频率	400±40 V, 50/60 Hz
激光等级	4
波长	1 050~1 090 nm
输出功率	0~200 W

激光源产生的激光通过光纤传输至反射镜,通过45°反射镜后,再穿过聚焦镜作用于工件表面。为防止加工过程中的灰尘进入导光系统,其喷嘴和聚焦镜之间通过保护镜片和密封圈进行隔离,反射镜上方的摄像机可透过整个光路检测工件表面的状况。理论上,整个光路应处于密封状态,一旦灰尘等杂质进入导光系统并污染镜片,将会影响激光的传输,降低到达工件表面的激光功率,甚至损坏保护镜片。对此,应及时清洁或更换保护镜片。

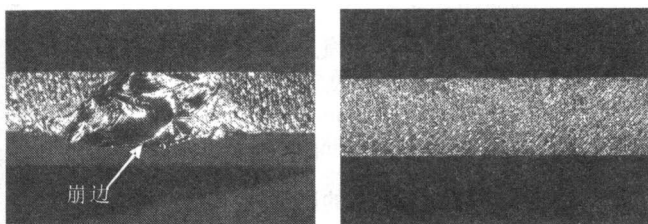
3 影响激光切割质量的因素及分析

激光切割质量的优劣是指切割尺寸精度高低和切割表面质量的好坏。切割表面质量一般有4个衡量指标:(1)切口宽度及切口表面粗糙度;(2)热影响区的宽度;(3)切口断面的波纹;(4)切口断面或硅片下表

面有无挂渣。下面对影响激光切割表面质量的4个主要因素进行重点分析。

3.1 激光模式和功率对切割质量的影响

Starfiber200激光器有两种输出模式：连续模式和脉冲模式。选择连续模式时，只需要改变激光功率，即可实现激光的连续输出，可供选择的功率范围为0~200 W。选择脉冲模式时，通过改变单脉冲能量、脉宽、峰值功率以及频率来调整平均功率的大小。考虑目前所切割的片厚都在1.5 mm以下，如果使用连续模式切割，就会导致热输入过大，易使切割端面硅的特性发生变化，最终影响芯片的性能参数。因此连续模式一般用于切割片厚1.5 mm以上的芯片。在以下的实验中都是采用脉冲模式来切割单晶硅。对于脉冲模式，首要考虑的参数是平均输出功率，对于Starfiber200激光器来说，平均功率可在0~200 W之间选择。影响平均功率有两个因素：单脉冲能量和频率，并且这两种因素与平均功率成正相关的关系。影响单脉冲能量的因素也有两个：脉宽和峰值功率，它们与单脉冲能量也是成正相关的关系。由于切割周期要大于脉宽，因此频率和脉宽的大小受条件的限制，即 $1/f > \text{脉宽}$ 。针对平均功率对切割质量的影响，我们做了如下实验：同一批片厚为1.2 mm芯片，在保证其他条件不变的情况下，分别用平均功率77 W和68 W切割12片。结果发现，以平均功率为77 W切割出来的芯片，硅渣较多，亮点较多（图3(a)），经过磨角工序后，这些芯片中有两片出现较大的崩边；而以平均功率为68 W切割出来的芯片，整体质量较好，端面平滑光亮，经磨角后没有出现大的崩边（图3(b)）。



(a) 有较大的崩边，切割质量较差 (b) 端面平整光滑，切割质量较好

(a) Since there is larger broken edge, the cutting quality is worse (b) Since the cutting surface is flat and smooth, the cutting quality is better

图3 不同平均功率条件下，切割质量对比

Fig.3 Comparison of cutting quality in different average powers

根据本次实验结果分析得知：平均功率值越小，单晶硅单位时间内热输入越小，但此时可能会出现单晶硅切不穿的现象；相反，平均功率值越大，单晶硅单位时间内热输入越大，单晶硅在过大的热输入时会发生一些物理和化学变化，从而改变了其物理和化学性质，

虽然这种改变在激光切割后不能直接看出来，但割出的芯片经磨角工序后极易发生大的崩边。因此，在保证芯片能割穿的情况下，应尽量降低平均功率，以降低总的热输入。

对于如何降低平均功率，一般选择的方法是，适当降低单脉冲能量，提高切割频率。如果选择较高的单脉冲能量，较低的频率，则会因单脉冲能量太高而导致第一个脉冲切下去，单晶硅表面特性发生不可恢复的变化。对于单脉冲能量大小的调节，一般选择相对适中的峰值功率和脉宽。过高的脉宽相当于连续模式，对于切割较薄的芯片来说，热输入过大。因此，片厚小于1.50 mm的芯片不宜选取较宽的脉宽。在切割0.5~1.27 mm厚的芯片时，一般峰值功率取 150 ± 20 W，脉宽取 100 ± 20 μ s，此时平均功率的范围为50~70 W。值得注意的是，需取适中的参数，而不能取较极端的参数，否则切割出的质量较差，端面较粗糙，且亮点较多（图4）。

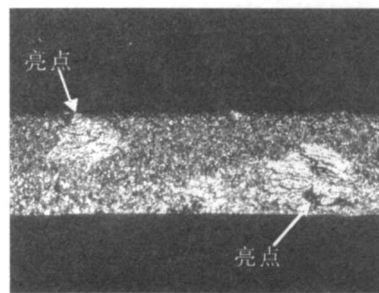


图4 当峰值功率、脉宽或频率取较极端的参数时，切割端面较粗糙，有较明显的亮点

Fig.4 The cutting surface is rough and there are distinct brighter spots when the peak power, pulse width, or frequency taking extreme parameters

3.2 切割速度对切割质量的影响

切割速度决定了生产效率，在保证切割质量的前提下，尽量提高切割速度，从而提高生产率，降低加工成本。

切割速度与所选的平均功率有关，平均功率 P 与切割速度 v 一般呈线性关系。选取较高的平均功率，势必要提高切割速度；当平均功率降低时，切割速度也要降低。切割速度的变化意味着激光与工件材料的相互作用时间的改变，即激光能量密度的改变。当切割速度较低时，由于光束在同一位置作用时间过长，激光能量密度过大，热影响区过大，使切缝周围的材料也被熔化或汽化，导致熔渣多，切缝粗糙，切缝宽度过大，切割质量较差。随着切割速度增加，能量密度减小，热影响区也相对减小。当速度在一定范围内，激光能量密度适中，刚好使材料汽化，形成光滑均匀的切缝，切割质量最好。当切割速度继续加快，超过一定值时，激光能量

密度过小,材料获得的能量不足以使其完全熔化或汽化,出现切不穿的情况(图5)。在激光束参数一定的条件下切割单晶硅,存在相应最佳切割速度的上限和下限临界值,切割速度高于或低于临界值都会产生较多挂渣。但若想得到均匀一致的切缝,切割速度应在上限和下限之间选择较低值^[2]。

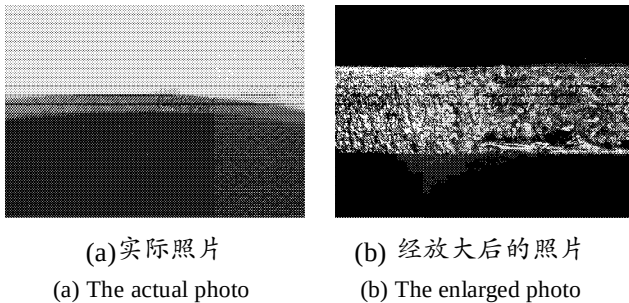


图5 切割速度较快时出现的切不透情况

Fig.5 When the cutting speed is too fast, the silicon wafer will not be cut through

根据实验结果,并且考虑综合因素,选取较低的平均功率,这样所选的切割速度也应较低。通常,对于0.75~1.0 mm厚的芯片,选取1 500 mm/min的切割速度;对于1.0~1.2 mm厚的芯片,选取1 000 mm/min的切割速度;对于1.2~1.3 mm厚的芯片,选取500 mm/min的切割速度。

3.3 辅助气体对切割质量的影响

辅助气体对切割质量的影响至关重要。首先,它是唯一与被切割材料相接触的物质,直接影响激光切割的质量;其次,辅助气体在切割过程中是易耗品,决定着激光切割的成本。因此研究辅助气体对激光切割单晶硅的影响具有很实际的意义。辅助气体是在切割时与激光同轴喷射的高压气体,被其吹掉的部分熔融体冷却后会成为硅渣附着在切缝两侧,这些硅渣用刀片轻刮即可去掉。使用辅助气体可以在一定程度上减少热输入的影响,以防止切割处的硅在高温下发生物理和化学性质变化,同时辅助气体还起保护镜片组的作用。下面将从辅助气体的种类和辅助气体的压力两方面来研究其对切割质量的影响。

3.3.1 辅助气体种类对切割质量的影响

首先应选用不与硅发生化学反应的气体,考虑成本因素,一般选择氮气作为辅助气体。氮气的纯度对切割质量也有很大影响,氮气中的水分杂质对切割质量的影响尤为明显。因为水蒸气会影响激光的保护镜,损坏保护镜出光面的镀膜,并最终影响光束质量。因此我们一般都用高纯氮(99.999%)作为激光切割单晶硅的辅助气体,而不选普氮和压缩空气,主要原因是这两种气体中都含水蒸气。

3.3.2 辅助气体气压对切割质量的影响

辅助气体的作用主要是,从切割区吹掉熔渣以形成切缝。激光切割对辅助气体的基本要求是,进入切口的气流量大,速度快,以便有足够的动量将熔融材料喷射带出^[3]。通过实验不难发现,同一条件下,辅助气体压力越低,切口底部越易出现挂渣;随着气压的增大,气体流动量增大,排渣能力提高,挂渣量减少。但如果气压过大会使气体射流出现紊乱现象,形成不整齐的切缝,导致切缝质量变差。因此,只有选择合适的气体压力才能得到较为理想的切割质量。对于Starfiber激光切割系统来说,辅助气体的压力不能低于0.5 MPa,压力在0.7~1 MPa效果最好。

当然,在激光切割同时加入吸尘系统,将切屑直接抽走,会使整个系统的稳定性更好。在一次实验中,由于吸尘系统未打开,结果切割出来的质量很差。打开导光系统发现保护镜片已经严重受损(图6)。分析得知,由于没有吸尘系统,切割出来的灰尘很容易通过喷嘴玷污保护镜的下表面。当激光通过保护镜受损的下表面时,会影响激光的传输质量,降低到达工件表面的激光功率,并最终影响切割质量。

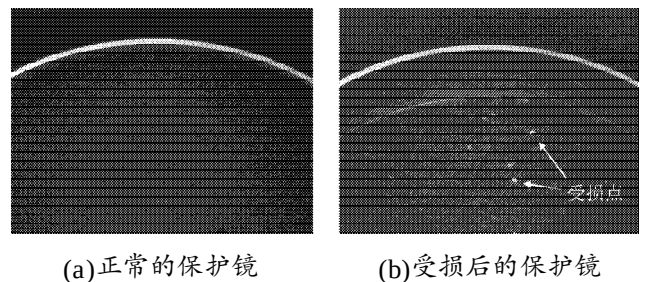


图6 辅助气体中的水蒸气等杂质会损坏保护镜出光面的镀膜

Fig.6 Impurities such as vapors in assistant gas can destroy the out-light surface coating of protecting mirror

3.4 焦点位置对切割质量的影响

切割时焦点位置也至关重要,因为焦点位置不同会影响切缝的大小和激光有效能量密度大小。焦点一般有3个位置:芯片垂直方向的中心处、正离焦(即焦点在芯片上面)和负离焦(即焦点在芯片下面)。负离焦由于喷嘴与芯片的距离很近,为避免喷嘴划伤芯片,一般不采用。对于较厚的芯片,一般采用焦点在芯片垂直方向的中心位置,此时激光有效能量密度最大,切缝最小。但由于切缝较小,辅助气体的有效压力也较小。这时要适当提高辅助气体的压力,否则就会出现挂渣较多的现象,这样切割出来的芯片在磨角工序时很容易出现崩边。对于片厚低于0.7 mm的芯片,可以考虑正离焦。(下转第8页)

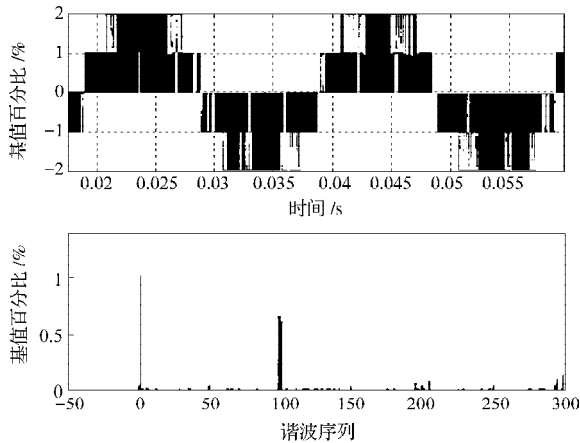
(d) $M=0.1$ 线电压波形和频谱图(d) Waveforms and spectrogram of line voltage when $M=0.1$

图3 变频器输出电压仿真波形和频谱图

Fig.3 Waveform and spectrogram of output voltage for converter

从变频器输出电压仿真波形和频谱图中可以看出,在调制度较高时,输出波形正弦度好, du/dt 小,可减少电缆和电动机的绝缘损坏,无须输出滤波器就可以使输出电缆长度很长,电动机不需要降额使用,电动机的谐波损耗大大减少;同时,由于电动机的谐波损耗大大减少,基本消除了谐波引起的机械振动,减小了轴承和叶轮的机械应力,可直接用于旧设备的改造。

4 结语

单元串联高压变频器输入移相变压器实行多重化设计,并且和整流电路一起构成了多重化整流电路,从

而有效地降低了输入谐波电流;功率单元采用二极管整流的电压型结构,电机所需的无功功率可由滤波电容提供,所以输入功率因数较高,基本可以保持在0.95以上,无需采用功率因数补偿装置。

高压变频器调速范围宽,可以在零转速到工频下的转速范围内进行平滑调节。在大电动机上能实现小电流的软启动,启动时间和启动的方式可根据现场工况进行调整,利用生产工艺过程对电动机调速控制,大幅度减少耗电量,达到节能降耗的目的。串联多重化叠加技术的应用还为实现纯正弦波、消除电网谐波污染开辟了新的途径。

参考文献

- [1] 刘 昂. H桥级联多电平高压变频器的实验研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(9): 1-3.
- [2] 刘雨棣. 电力电子技术及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [3] 侯李祥, 吕跃刚. 新型级联多电平逆变器[J]. 大功率变流技术, 2009(3): 20-23.
- [4] 周 凌. 基于MATLAB的多电平高压变频器的仿真研究[J]. 湖南工业大学学报, 2008, 22(4): 64-66.
- [5] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [6] 罗德荣. 级联型高压变频器控制算法的研究及实现[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 104-108.
- [7] 敬华兵. 级联变频器电路拓扑及其数学模型[J]. 大功率变流技术, 2009(3): 10-15.
- [8] 李宗臣, 张奕黄. 级联型多电平高压变频器的建模与仿真[J]. 电机与控制应用, 2009, 36(3): 31-33.

(上接第4页)此时切缝较宽,辅助气体的有效压力可明显增大,切割出来的芯片端面较好。

当然,影响切割质量的因素还有很多,以上只是选择了最重要的4个因素进行了分析,其他因素影响,在实际加工中也不能忽略。例如磨具也会影响最终切割质量,磨具不平整,易在不平整处出现崩边。实验初期,在出刀口处经常出现崩边,这是因为磨具的内模偏高,外模偏低。在切割最后,单晶硅边缘不是被切割掉,而是被高压辅助气体吹掉,从而引起出刀口处大崩边。将磨具修正后,再没有出现此类情况。切割路径也会影响端面的切割质量。通常芯片被切割成圆形,所以这里所说的切割路径一般指进出刀路径。实验表明,选择垂直进刀,切线出刀,切割后进入刀口的端面质量较好,基本与其他处端面一致。当然对于不同厂家生产同样规格的单晶,在切割时也会略有差异。切割时,一旦出现切不透情况,可小幅提高激光切割频率。

4 结语

有关影响YAG激光切割单晶硅的几个重要因素总结如下:首先,对于当前的芯片,激光模式应选取脉冲模式,在一次能切穿的情况下,选择较低的平均功率;其次,适当降低单脉冲能量,提高切割频率,降低单脉冲能量的方法是选择适中的峰值功率和脉宽,不取较极端的参数;从成本考虑,辅助气体采用管道高纯氮,高纯氮的压力最好超过0.6 MPa,在0.7~1 MPa之间效果最好;切割时,焦点一般在芯片垂直方向的中心处。

参考文献:

- [1] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [2] 谢小柱, 魏 昕, 胡 伟. 线偏振CO₂激光对非金属材料切缝的影响[J]. 激光技术, 2008, 32(4): 399-401.
- [3] 左铁钊. 21世纪的先进制造——激光技术与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007.