

文章编号: 1001-3806(2003)05-0460-03

单晶硅的激光铣削试验研究

袁根福^{1,2} 曾晓雁¹⁽¹⁾华中科技大学激光技术国家重点实验室,武汉,430074) ⁽²⁾安徽建筑工业学院数理系,合肥,230022)

摘要:采用 Nd YAG 脉冲激光器对单晶硅片进行铣削加工试验。系统研究了工艺参数对铣削量和铣削面质量的影响规律,并利用优化的铣削工艺对单晶硅进行了多种形状铣削加工。

关键词:激光加工;激光铣削;铣削量;单晶硅

中图分类号: TG665;TG54 **文献标识码:** A

Experimental study of laser milling of silicon wafer

Yuan Genfu^{1,2}, Zeng Xiaoyan¹⁽¹⁾ National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)⁽²⁾ Department of Mathematics and Physics, Anhui Institute of Architecture & Industry, Hefei, 230022)

Abstract: Experimental study of laser milling were carried out on the surface of silicon wafer with different YAG lasers and laser processing parameters. The effect of laser processing parameters on the milling surface quality were studied systematically. Different shapes and structures were fabricated on the surface with the optimized procedures.

Key words: laser processing; laser milling; milling process; single crystal silicon

引言

单晶硅因为具有独特的性能,在电子行业中应用非常广泛。但是,它硬度高、脆性很大,很难加工。当前,一般利用金刚砂轮和离子束等特种加工方法对硅片进行切割和各种微细加工,在一定程度上因为上述工艺特点的局限性而使应用范围受到限制。由于激光加工可以把方便地将激光束和数控技术结合起来,而且通过选择激光波长、控制激光参数来控制加工质量,因此,利用激光对单晶硅片进行刻蚀加工具有重要意义。事实上,国外早在 80 年代就达到 0.5 μm 的骄人的成就^[1]。另外,利用 YAG 固体脉冲激光对单晶硅片进行切割与划片加工已经在工业中得到应用^[2]。然而,在许多场合下,需要在单晶硅表面刻蚀许多小槽、盲孔。这对常规方法而言是非常困难的。以往的研究虽然有过的报道,但基本上没有披露所采用激光器及其相应的工艺参数。作者在我国现有工业化应用成熟的 YAG 激光器基础上,系统研究硅片表面的激光铣削工艺,为在硅片上进行多种复杂形状的加工提供一种新的途

径。

1 激光铣削原理与试验方法与设备

激光铣削就是利用激光束按规定的图案,一层一层扫描剥离(或称烧蚀)材料,可以像机械铣削一样进行成型加工,类似于机械铣削过程。利用激光铣削,理论上可以铣削任何材料至所要求的尺寸。利用 YAG 脉冲激光来进行激光铣削,其实质是通过激光光斑重叠扫描,一层一层剥离材料来达到成形的目的。激光铣削原理如图 1 所示,图中右部分为光斑(孔)重叠示意图。

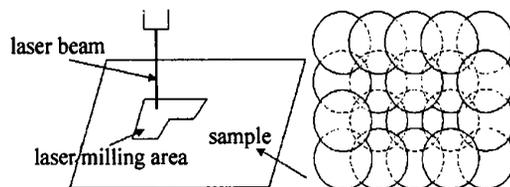


Fig. 1 Principle schematic of laser milling

加工试样选用 3mm 的单晶硅片。激光器采用武汉华工激光工程公司生产的 Nd YAG 固体脉冲激光器,波长为 1.06 μm ,脉宽和频率可调。激光输出能量的大小,可以通过调节泵浦灯电源电压来控制。激光经过透镜聚焦后垂直入射到工件表面。工作台由一台 586 微机自动控制。加工采用氧气作为辅助气体,气压约为 0.4MPa,喷嘴直径约为

作者简介:袁根福,男,1964 年 1 月出生。副教授,博士研究生。研究方向为激光与物质相互作用。

收稿日期:2003-01-17;收到修改稿日期:2003-03-25

Ø1.5mm。试验通过改变不同的激光铣削工艺参数来探讨影响激光铣削量和质量的规律。利用不同激光铣削工艺,分别在单晶硅片上一次性铣出边长为 3mm 的方形槽。利用游标卡尺测量出槽的深度,作为不同工艺激光铣削的铣削量大小的比较值。比较观察不同工艺激光铣削面的质量。利用优化的激光铣削工艺进行多种槽的试铣削,用体视显微镜观察其形貌并照相。

2 试验结果与分析

2.1 重复频率和脉宽对激光铣削硅片的影响

图 2 给出了在不同激光重复频率和脉宽条件下(脉冲能量 1.68J,激光扫描速度 2mm/s),激光铣削量的变化规律。可以看出,随着重复频率的提高,铣削量有所降低。这是由于当激光重复频率较高时,单脉冲激光能量降低,所能够去除材料的能力降低,反而使铣削量降低。当重复频率过低时,铣削量也降低,这是由于相邻光斑重叠度低降低了孔深度^[3],从而降低铣削量。由图 2 中不同脉宽的两条曲线可以看出:在重复频率相同的前提条件下,0.5ms 脉宽的激光铣削量明显高于脉宽为 0.2ms 的激光铣削量。这是由于在能量相同的情况下,长的脉宽,可以保持激光形成孔洞内的熔液处于沸腾状态较长时间,在蒸气的反冲压力作用下,孔洞内的溶液易于被挤压喷射出去^[4],从而使孔洞加深而使激光铣削量增大。高频率和窄脉宽硅片铣削面粗糙度低。

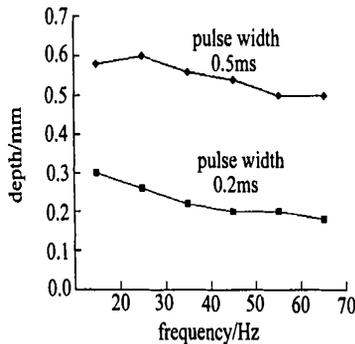


Fig. 2 The influence on milling with the laser frequency and width of pulse

2.2 激光输出能量及辅助气体的压力对硅片铣削的影响

保持激光束扫描速度(2mm/s)、重复频率(45Hz)和脉宽(0.5ms)不变,只是改变灯泵两端电压,即改变激光的输出单脉冲能量。由图 3 可以看出,单晶硅的激光铣削量是随着激光输出能量的增加而增加,这是由于激光单脉冲形成的孔的深度

是随着激光束能量增大而增大,因此激光铣削面的深度也就增加。肉眼观察可见,大能量铣削单晶硅表面较粗糙。

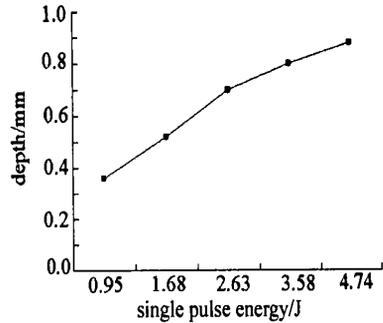


Fig. 3 The relation between power of laser and accounts of laser milling

图 4 为脉冲能量为 1.68J、脉宽 0.5ms、扫描速度 2mm/s、重复频率 30Hz 条件下,辅助气体压力的变化对铣削量的影响。由图可见:激光铣削量是随着气体压力增加而增加,当压力增加到一定值后,铣削量增加速度变缓。辅助气体增加铣削量的原因,是由于辅助气体使激光在试样表面产生的飞溅物以较高的飞溅速度离开表面,减少了熔体在铣削面的凝结。气体压力越大,飞溅速度越大,熔体在铣削面凝结的几率越低,从而铣削深度越大。

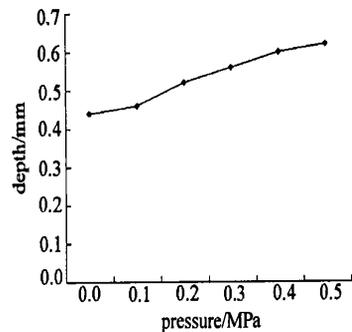


Fig. 4 The relation between the laser milling depth and the pressure of gas

2.3 激光扫描速度和重复频率对硅片铣削的影响

图 5 反映了激光扫描速度和重复频率对铣削量

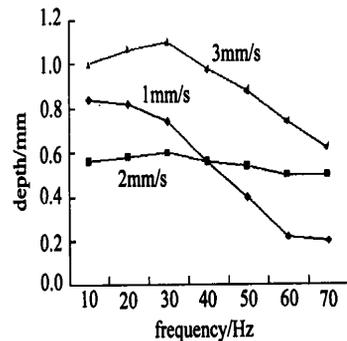


Fig. 5 The relation between laser milling depth with the scanning rates and repetition frequency

的影响。适当提高激光扫描速度可以增加单晶硅的激光铣削量。在较高的重复频率下,激光慢速扫描(1mm/s)的铣削量较低,这是由于当扫描速度太小,同一时间内,铣削面接受的激光能量太大,容易产生过多不易清除的熔渣,降低了铣削量,而且铣削面粗糙。随着重复频率的提高,扫描速度较低(1mm/s)的铣削量明显提高,甚至超过扫描速度较高(3mm/s)的铣削量。

3 单晶硅激光铣削的表面分析及工艺参数优化与多样铣削

由图6可见单晶硅的激光铣削面较粗糙。硅激光粗铣 Ra 为 10 以上,即使精铣 Ra 也为 6~7。利用扫描电镜观察硅激光铣削面,可见铣削面布满丝状熔渣(见图7),这可能是由于硅在加工过程产生氧化,生成 SiO_2 所致。进一步提高放大率可在所加工的表面看见明显的孔洞(见图8)。显然,在本实验条件下,单晶硅激光铣削后需要进一步研磨提高表面质量。



Fig. 6 The blind hole on the silicon wafer surface by laser milling $10\times$

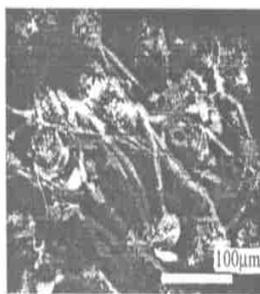


Fig. 7 The SEM image of laser milling silicon wafer surface

根据上述试验结果与分析,激光铣削工艺参数对单晶硅的铣削量和铣削面质量的影响很大,为了提高单晶硅激光铣削效率和降低铣削面粗糙度,有必要对激光铣削工艺进行优化。当需要较大的铣削速率时,激光脉宽应选用 0.5ms,重复频率宜选(20~40)Hz,激光扫描速度应选较大值,激光单脉冲能量为 1.68J 左右为宜。为了降低激光铣削面粗糙度,可以采用降低激光输出能量同时提高重复频率

来达到,但其铣削速度较低。



Fig. 8 The SEM's picture of milling surface

为了使单晶硅的激光铣削既有高效率,铣削面又能满足较低粗糙度要求,可以先选用如上所述的合适工艺进行较高速粗铣,然后再利用高频率和低能量工艺进行精铣。利用优化的工艺可以在单晶片上铣出各种图形(见图6、图9、图10)。尺寸精度

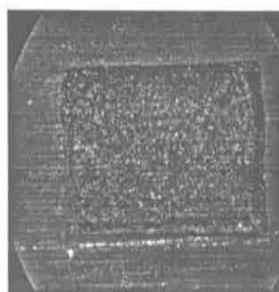


Fig. 9 3mm x5mm rectangle groove $10\times$



Fig. 10 L groove $10\times$

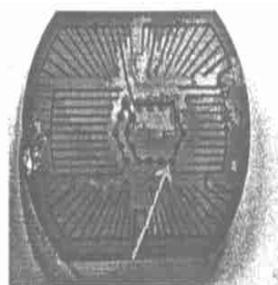


Fig. 11 The Si sample milled with laser

为 IT7~8,粗糙度 Ra 为 6~8,圆度 0.06,矩形对边平行度为 0.04,槽深度在 1mm 左右。图 11 为采用优化的激光参数铣削加工的硅反射镜液体流动槽(箭头所指)。

(下转第 465 页)

主轴,它们不能通过空间域和空间频率域的坐标旋转同时对角化。

2 利用空间相干性对光束分类

还可以按光束的空间相干性来对光束进行分类^[3,4]。根据光束的交叉谱密度函数是否具有可分离的形式,或者等价地说,描述光束的特征参数中空间坐标的交叉项是否为 0 来进行划分。

2.1 部分相干光束

部分相干光束的交叉谱密度函数 (r_1, r_2) 不可分离,即:

$$(r_1, r_2) = E(r_1) \cdot E^*(r_2) \quad (14)$$

(r_1, r_2) 中有交叉项。 (r_1, r_2) 可表示为:

$$(r_1, r_2) = A_0 \exp\{- [r_1(a + ib)r_1^T + r_2(a - ib)r_2^T + r_1 c r_2^T]\} \quad (15)$$

a, b 是 2×2 实对称矩阵,各含最多 3 个独立参数。矩阵 c 不一定是实矩阵也不一定具有对称性,含最多 4 个独立参数。因此共有最多 10 个独立参数。

特别地,当 $a = aI, b = bI, c = cI$ $\left[I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right]$ 时,

部分相干光束独立参数个数为最少,即 3 个。

2.2 完全空间相干光束

当 $c = 0$ 时,为完全空间相干光束,其交叉谱密度函数为:

$$(r_1, r_2) = E(r_1) \cdot E^*(r_2) = A_0 \exp[-r_1(a + ib)r_1^T - r_2(a - ib)r_2^T] \quad (16)$$

即具有可分离的形式。 a, b 同样是 2×2 实对称矩阵,各含最多 3 个独立参数。因此共有最多 6 个,最少 2 个独立参数。当 $a = aI, b = bI$ 时,空间相干光束独立参数个数为最少,即 2 个。

参 考 文 献

- [1] ISO/DIS 11146 Document. Test methods for laser beam parameters: beam widths, divergence angle, and beam propagation factor. 1999.
- [2] Nemes G, Serna J. TOPS, 1998, 17: 200 ~ 207.
- [3] Simon R, Mukunda N. J O S A, 1993, A10(1): 95 ~ 109.
- [4] Simon R, Sudarshan E C G, Mukunda N. Phys Rev, 1985, A31(4): 2419 ~ 2434.
- [5] Arnaud J A, Kogelnik H. Appl Opt, 1969, 8(8): 1687 ~ 1693.
- [6] Eppich B. Die charakterisierung von strahlungsfeldern mit der wigner-vertelung und deren messung. Berlin: Chromapress, 1998: 27.

(上接第 462 页)

4 结束语

利用激光铣削技术可以对单晶硅进行较高速率的铣削加工。铣削工艺参数直接影响到铣削量和铣削面质量,当铣削工艺选择过高的激光输入能量、较慢的激光束扫描速度和较高的重复频率,不仅显著降低了铣削量,而且铣削面质量较差。采用复合激光铣削可以在不降低速率情况下提高表面质量。选

择合适的激光铣削工艺,可以在单晶硅片表面上较高效率地铣削出多样图形。

参 考 文 献

- [1] 黑泽宏. レーザ—研究, 1998, 26(1): 33 ~ 39.
- [2] 黑部利次. 精密工学会, 1996, 62(1): 95 ~ 99.
- [3] 李祥友, 曾晓雁, 刘 勇 *et al.* 中国激光, 2001, 28(12): 1125 ~ 1128.
- [4] von 奥尔曼 M. 激光束与材料相互作用的物理原理及应用. 北京: 科学出版社, 1994: 7.