

单台面二极管晶圆红外激光划片工艺研究

王 中^{1,2} 何 里^{2*} 谢云辉¹ 谭 波¹ 卢飞星²

(¹ 华中科技大学激光加工国家工程研究中心, 湖北 武汉 430074)
(² 武汉华工激光工程有限责任公司, 湖北 武汉 430223)

摘要 在单台面二极管晶圆的制备中, 刀具划片存在速度慢、芯片崩边率高等问题。激光划片为非接触加工, 成品率高。根据晶体硅的性质, 对激光划片方向进行了讨论, 分析了红外激光对硅片的作用机理。根据一维热传导方程导出的近似解析解, 计算了功率和扫描速度影响下的去除深度。使用 1064 nm 脉冲光纤激光器完成了 7.62 cm 晶圆的激光划片, 获得了崩边率小于 1%, 电性能合格率达到 100% 的样品。研究表明, 去除深度影响芯片的崩边率, 离焦量影响芯片的电性能。控制去除深度和离焦量进行划片会获得很高的良品率。

关键词 光学制造; 激光技术; 单台面二极管晶圆; 红外激光划片; 脉冲光纤激光器; 去除深度

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0203002

Research on Infrared Laser Scribing Technology of Single Mesa Diode Wafer

Wang Zhong^{1,2} He Li² Xie Yunhui¹ Tan Bo¹ Lu Feixing²

(¹ National Engineering Research Center for Laser Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

² Wuhan Huagong Laser Engineering Co. Ltd, Wuhan, Hubei 430223, China

Abstract Compared with the traditionally manufacture of single mesa diode wafer which has some disadvantages such as low speed and high chipping rate of blade-sawing, laser scribing is of high yield rate because of non-contact processing. According to the properties of crystal silicon (Si), the direction of the scribing and its mechanism of Si processed by infrared (IR) laser are discussed. On the base of approximate analytical solution derived from one-dimensional heat conduction equation, the ablation depth influenced by laser power and scanning speed is calculated. 7.62 cm wafer scribed under the condition of 1064 nm pulsed fiber laser shows that chipping rate is less than 1% and eligible electrical properties attain 100%. Research shows that ablation depth can influence the chipping rate and defocusing amount can influence the electrical properties of the chip. High yield rate can be achieved by controlling the ablation depth and defocusing amount during the scribing.

Key words optical fabrication; laser technique; single mesa diode wafer; infrared laser scribing; pulsed fiber laser; ablation depth

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 350.3390; 350.3850

1 引 言

晶圆多指单晶硅圆片, 由普通硅提炼加以提纯(99.999%以上), 经单晶拉制、切片、研磨和抛光等工序生产而成, 是最常用的半导体材料。晶圆片经过清洗、扩散、氧化、光刻、离子注入、刻蚀和气相沉积等若干道工序后, 可制成半导体分立器件、功率器

件、微处理器和存储器等芯片。

划片处理是二极管晶圆制备的重要后段工序之一, 目的是将整片晶圆按二极管芯片大小分割成单一芯片, 为后续封装做好准备。传统划片方法主要是金刚石刀划片^[1], 刀具以撞击形式将工作物敲碎, 再以辅助水流将粉末冲除。这种方式的优点是工艺

收稿日期: 2010-08-04; 收到修改稿日期: 2010-09-23

作者简介: 王 中(1965—), 男, 高级工程师, 主要从事激光加工成套技术等方面的研究。

E-mail: wzhong@public.wh.hb.cn

* 通信联系人。E-mail: heli@hglaser.com

成熟,但切缝不均匀,切割速度较慢,后续裂片工序中芯片崩边率较高。激光划片为非接触性加工,对晶圆损伤较小,裂片后芯片崩边率低。近年来国内外对大功率光纤激光器、紫外和飞秒激光器加工硅片进行了研究,已经获得了一些进展^[2~4],但这些激光器大多价格昂贵,维护成本高。而加工辅助条件如要求水浴^[5,6],在工业应用中又存在设备和工艺复杂的问题。对于某些结构的晶圆,使用小功率1064 nm激光加工,通过优化工艺参数,也可获得理想的效果。

本文以单晶硅为例,讨论了激光划片的方向并分析了其作用机理。首先从一维热传导方程得到近似解析解,计算出去除深度随功率和扫描速度的变化。实验上利用1064 nm脉冲光纤激光器对

7.62 cm晶圆进行激光划片,结果表明实验值和计算值符合得很好,并获得了崩边率小于1%,电性能合格率100%的样品。通过实验发现,芯片的崩边率受去除深度影响,电性能受离焦量影响,控制去除深度和离焦量可以极大地提高样品的良品率。

2 激光划片原理

2.1 划片方向的选取

单晶硅属于立方晶系,硅原子间通过共价键结合,如图1(a)所示。两个面心立方晶胞沿其空间体对角线平移1/4长度套构^[7],晶胞边长为 a 。对于(111)方向外延生长的单晶硅,其(100),(110),(111)晶面上的硅原子排列如图1(b),(c),(d)所示。

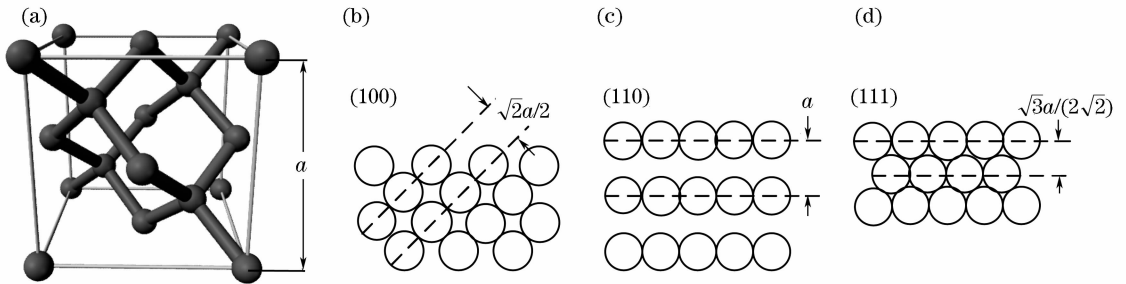


图1 单晶硅晶胞结构(金刚石型)及晶面。(a)晶胞结构,(b)(100)面,(c)(110)面,(d)(111)面

Fig.1 Structure and crystal planes of silicon crystallizes crystal (diamond cubic)

(a) crystal structure, (b) (100) plane, (c) (110) plane, (d) (111) plane

晶体的解理,即当晶体受到定向机械应力的作用时,平行于一个或几个平整的面分裂开的性质。这些分裂开的平整面称为解理面,通常是晶体构造的低指数面^[5]。解理面的原子间距大,键合较弱,键密度小。对于单晶硅,(111)面的原子间距最大,键密度最小;(110)面次之。

单晶硅是各向异性晶体,在晶体的不同方向上特性不同,如机械强度、热膨胀系数等。对于(111)方向外延生长的单晶硅,通常将基准切割面定为(110)面,(110)和(111)面成 30° 夹角^[8],刻划应朝较小夹角所指的方向进行,这样可以使加工时晶圆的开裂降至最低限度,显著减小崩边几率。

2.2 单台面二极管晶圆的结构

单台面二极管晶圆主要用于绝缘栅双极晶体管(IGBT)和场效应晶体管(MOSFET)等晶体管器件的制造。实验使用的样品为7.62 cm晶圆片,每个芯片(die)的尺寸为 $3.3\text{ mm} \times 3.3\text{ mm}$,如图2(a)所示。该晶圆样品的基准切割面(110)为 y 方向(即

与底边垂直),与(111)面所成的 30° 夹角指向下方。所以 y 方向的激光刻划应由上向下进行。(110)与(111)面夹角在 x 方向具有对称性,因此横向刻划无走向要求。

扩散与离子注入工序导致边角处的扩散结浓度很高,电场首先在这些区域集中,使此处最容易发生击穿^[9],所以需要在边角覆盖保护层,常见材料有 SiO_2 , Al_2O_3 ,钝化玻璃等。本样品纵切面如图2(b)所示,保护层为钝化玻璃,芯片间预留 $d=0.08\text{ mm}$ 的划片沟道,其表面到衬底底面的距离 $D=0.24\text{ mm}$, x 为去除深度,激光垂直聚焦于沟道表面,移动工作台完成刻划。

由于单晶硅的各向异性,若将其直接切断,过大的热应力容易造成芯片崩裂。大量研究和实践表明,沿解理方向刻划出一定深度的沟槽,再进行机械裂片,可以显著降低崩边率,电性能也可控制在合格范围以内。

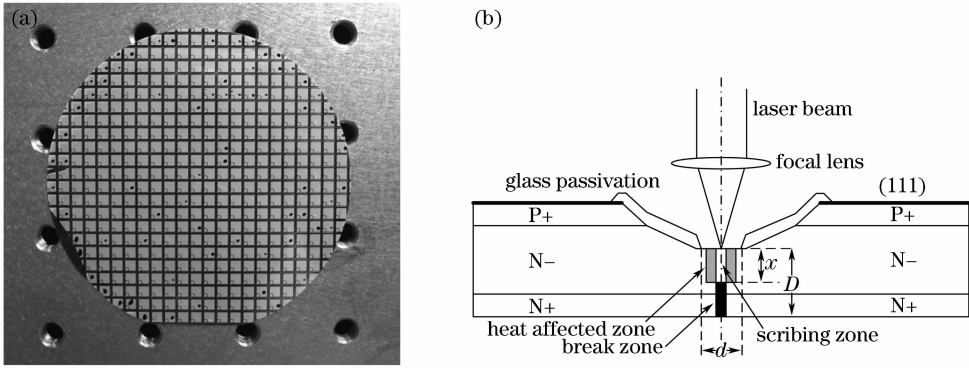


图2 7.62 cm 晶圆(a)及其纵切面(b)

Fig. 2 7.62 cm wafer (a) and its vertical section (b)

2.3 红外激光对单晶硅片的作用机理

红外激光作用于硅片的主要机理是气化和熔化。当高功率密度(大于 10^8 W/cm^2)，窄脉宽(小于100 ns)的激光照射在硅片上时，作用区的部分材料发生爆炸性气化喷发，作用区内壁发生熔化，去除深度主要由气化材料的体积决定。若认为激光能量全部转换为材料气化所需的能量，推算出的去除深度与实际结果差别较大。要更准确地计算去除深度，应综合考虑材料的热传导和热扩散以及材料对激光的吸收。使用一维热传导方程描述作用过程

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2}, \quad (1)$$

式中 T 为温度, t 为时间, Z 为位置, κ 为热扩散率。

根据初值和边界条件求解(1)式微分方程, 得到包含去除深度和激光功率的近似解析解为^[10]

$$\xi = \frac{1}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda \tau)], \quad (2)$$

$$\text{式中 } \xi = x/l, \quad (3)$$

$$\tau = vt/l, \quad (4)$$

$$\lambda = \alpha \kappa \rho L_V / I, \quad (5)$$

$$l = \kappa / v, \quad (6)$$

$$v = I / [\rho(cT_V + L_V)], \quad (7)$$

ξ, λ 为无量纲参数, x 为去除深度, l 为特征长度, α 为吸收系数, ρ 为材料密度, L_V 为气化潜热, I 为功率密度, v 为扫描速度, t 为单光斑作用时间, c 为比热, T_V 为气化温度。

将(3)~(7)式代入(2)式, 得

$$\frac{x}{l} = \frac{I}{\alpha \kappa \rho L_V} \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha \kappa \rho L_V vt}{Il}\right) \right], \quad (8)$$

化简得到去除深度的近似解析式

$$x = \frac{cT_V + L_V}{\alpha L_V} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{I\alpha L_V t}{\rho(cT_V + L_V)^2}\right] \right\}. \quad (9)$$

对于单晶硅, 各常数为: 1064 nm 激光入射条件下 $\alpha = 10 \text{ cm}^{-1}$ ^[11], $\rho = 2.329 \text{ g/cm}^3$, $L_V = 13.72 \text{ J/g}$, $c = 0.695 \text{ J/(g} \cdot \text{°C)}$, $T_V = 2355 \text{ °C}$ 。实测聚焦光斑直径 $w = 34 \text{ }\mu\text{m}$, 激光功率为 0~20 W, 工作台移动速度 v 为 0~200 mm/s, 根据加工要求, 实际移动速度应大于 80 mm/s。将各参数代入(9)式, 得到功率和速度影响下的去除深度计算结果, 如图 3 所示。

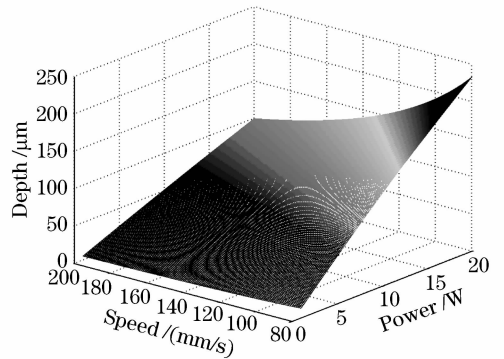


图3 功率和速度影响下的去除深度计算值

Fig. 3 Calculated value of ablation depth influenced by power and speed

3 激光划片实验研究

3.1 实验装置

划片机包括自产 20 W 脉冲光纤激光器, 高精度二维工作台和旋转工作台, 消像差聚焦头, CCD 同轴监视定位设备, 辅助吹气(压缩空气)等, 结构及照片如图 4 所示。晶圆通过真空负压装置吸附固定, 加工前先运动工作台, 通过 CCD 监视系统确认运动方向无误后再进行加工。设备主要参数如表 1 所示。

3.2 实验研究

在速度为 100 mm/s, 重复频率为 65 kHz, 焦斑

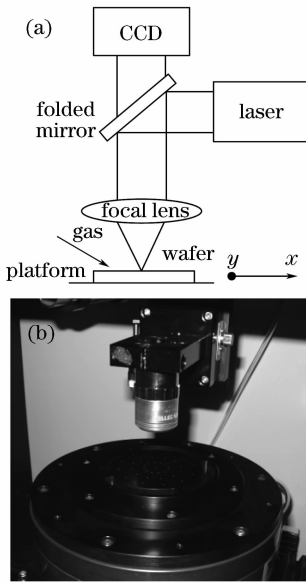


图 4 实验装置(a)与照片(b)

Fig. 4 Experimental device (a) and photo (b)

表 1 设备参数

Table 1 Device parameters

Parameter	Value
Wavelength /nm	1064±1
Max output power /W	20
Frequency /kHz	20~80
Pulse width /ns	<100
Beam quality	$M^2 < 1.2$
Gas pressure /MPa	0.3
Cutting speed /(mm/s)	<200
Focal length /mm	45

直径为 34 μm 的参数下,以不同功率的激光对样品进行了加工,使用 200 倍显微镜测量去除深度,结果如图 5 所示。当功率高于 8 W 时,实验结果与计算

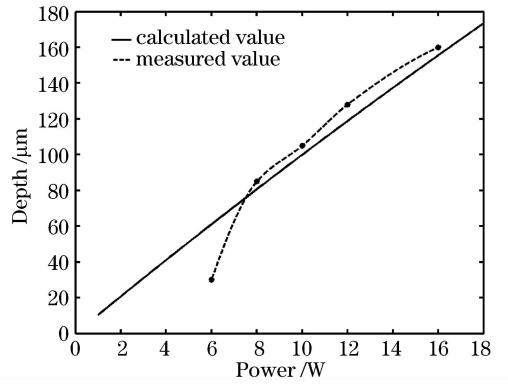


图 5 去除深度与激光功率的关系

Fig. 5 Ablation depth versus laser power

结果符合得相当好;低于 8 W 时,实验值明显小于计算值。这是由于存在去除阈值,当激光功率小于阈值时,材料无法去除。该值只能通过实验确定,不同工艺制备的晶圆,阈值也是不一样的。

根据经验数据,去除深度为 D 的 $1/2 \sim 2/3$ 时较合适,深度过小会增加崩边几率,深度过大会扩大热影响区,影响沟道两侧电极保护层的绝缘性能。在功率 16 W 时去除深度约 160 μm ,为 D 的 $2/3$ 。

根据以上讨论,使用不同的参数制得 3 片样品:样品 A:速度 100 mm/s,焦点位于沟道表面;样品 B:速度 140 mm/s,焦点位于沟道表面;样品 C:速度 100 mm/s,焦点位于晶圆内部,负离焦刻划,沟道表面光斑直径 50 μm 。激光功率均为 16 W,重复频率为 65 kHz。对其裂片后观察断面,如图 6 所示,断面上半部分为刻槽的内壁,下半部分为单晶硅的解理面。样品 A 去除深度约 160 μm ,样品 B 约 110 μm ,样品 C 约 120 μm ,样品 A, B 的深度分别为 D 的 $2/3$ 和 $1/2$ 。

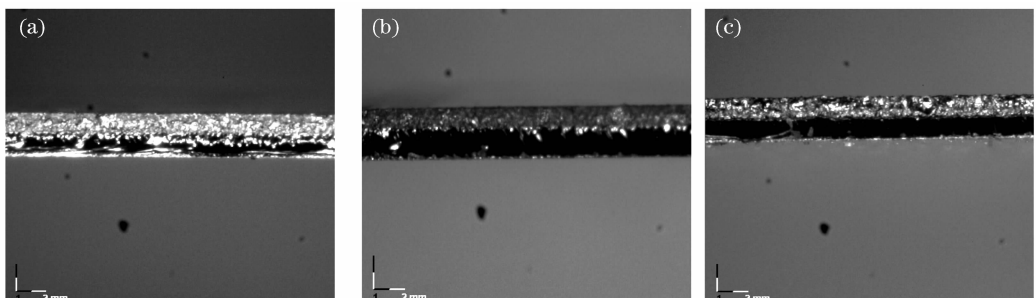


图 6 样品纵切面照片(200 \times)。(a) 样品 A,(b) 样品 B,(c) 样品 C

Fig. 6 Photos of vertical section of samples (200 \times). (a) sample A, (b) sample B, (c) sample C

3.3 实验结果

经过裂片处理后, A, B, C 3 片样品的崩边率均小于 1%, 达到要求。抽取部分芯片进行常规电性能测试(每组随机抽取 100 片), 结果如表 2 所示。

A, B 组样品的击穿电压(V_B)大于 1200 V, 耐压差平均值(DVR1)小于 20 V, 最大值(DVR2)小于 80 V, 常温漏电流(IR)小于 0.5 μA , 高温漏电流(HTIR)小于 50 μA , 良品率达到 100%。C 组存在

击穿电压小于1200 V,耐压差接近400 V,常温漏电流最高值达2.4 μA 的芯片,并且常温漏电流平均值大于0.5 μA ,不符合要求。耐压差和常温漏电流指标的不合格严重影响了C组的良品率,电性能合格率仅为51%。

从实验结果可知,去除深度在1/2~2/3时可将

崩边率控制在很低的范围内。当表面光斑直径超过沟道宽度的50%后,良品率有较严重的下降。离焦不仅不利于去除深度的加深,较大的表面焦斑会导致更严重的热扩散,对部分钝化玻璃保护层造成了损伤,降低了绝缘性能。限于实验条件,这种损伤无法直接观察,只能通过电性能测试做间接判断。

表2 电性能测试

Table 2 Electrical testing

Test	Conditions	Sample A			Sample B			Sample C		
		Min	Max	Avg	Min	Max	Avg	Min	Max	Avg
VB	0~2000 V, $I_1=0.01\text{ mA}$	1309	1535	1416	1258	1637	1534	1043	1528	1412
DVR1	$\leq 50\text{ V}$, $I_1=0.01\text{ mA}$; $I_2=0.01\text{ mA}$	0	8	0.24	0	32	2.46	0	393	17.6
DVR2	$\leq 100\text{ V}$, $I_1=0.01\text{ mA}$; $I_2=0.1\text{ mA}$	0	29	9.4	3	70	19.85	0	329	33.97
IR	$\leq 0.5\ \mu\text{A}$, VR=1150 V	0.120	0.237	0.163	0.090	0.403	0.147	0.121	2.409	0.813
HTIR	$\leq 120\ \mu\text{A}$, VR=1000 V, T=150 $^\circ\text{C}$	20	35	27.6	20	50	28.6	20	35	26.4
Yield rate		100%			100%			51%		

4 结 论

对红外激光刻划晶圆进行了理论探讨和实验研究,分析计算了激光功率和刻划速度对去除深度的影响,实验结果与计算值符合良好。使用1064 nm脉冲光纤激光器完成激光划片,制得了崩边率和电性能合格的样品。研究表明,刻划深度和离焦量对芯片电性能有明显影响。离焦导致的热扩散对电性能影响的深入研究有待后续开展。

参 考 文 献

- Gong Ping. Analysing backside chipping issues of the die at sawing [J]. *Electron. Packing*, 2008, **8**(7):1~5
龚平. 晶圆切割中背面崩裂问题的分析[J]. *电子与封装*, 2008, **8**(7):1~5
- Wang Weizhi. New type of SPI laser used in wafer cutting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(10):114
王伟之. SPI新型激光器用于硅片切割[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(10):114
- Liu Chunyang, Sun Lidong, Fu Xing *et al.*. Si microstructure fabricated by 355 nm nanosecond pulsed laser and its fluorescence microscopy study [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **37**(8):2139~2142
刘春阳,孙立东,傅星等. 355 nm纳秒脉冲激光在硅表面照射形成微结构及其荧光检测[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8):2139~2142
- J. S. Yahng, J. R. Nam, S. C. Jeoung. The influence of substrate temperature on femtosecond laser micro-processing of

silicon, stainless steel and glass [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2009, **47**(7-8):815~820

- Yang Wei, Peng Xinhan, Zhang Jun. Study of laser cutting technology for silicon wafer under water [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11):3064~3067
杨伟,彭信翰,张骏. 水下激光切割硅片的工艺研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11):3064~3067
- Ling Lei, Lou Qihong, Li Shuzhi *et al.*. Microcutting Si wafer in water bath by the second and third hamonic output of YAG laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3):340~342
凌磊,楼祺洪,李抒智等. 水浴条件下YAG倍频、三倍频激光切割Si片比较[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3):340~342
- Que Duanlin, Chen Xiuzhi. Science and Technology of Silicon Mmaterial [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2001. 9~10
阙端麟,陈修治. 硅材料科学与技术[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2001. 9~10
- Zhao Zhengxu. Directional Cutting of Semiconduct Crystal [M]. Beijing: Science Press, 1979. 15, 45
赵正旭. 半导体晶体的定向切割[M]. 北京:科学出版社, 1979. 15, 45
- Liu Yong, Zhang Fuhai. Principle of Transistor [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 55~56
刘永,张福海. 晶体管原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 55~56
- P. Solana, P. Kapadia, J. M. Dowden *et al.*. An analytical model for the laser drilling of metals with absorption within the vapour [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1998, **32**(8):942~952
- M. J. Keevers, M. A. Green. Absorption edge of silicon from solar cell spectral response measurements [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(2):174~176