

文章编号: 1672-8785(2019)11-0029-06

半导体晶体线锯切割工艺研究

李 振 兴

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 线锯切割技术在半导体晶体切割领域已经得到了广泛应用。对传统内圆切割技术进行了介绍, 并针对新兴线锯切割技术的现有分类和研究水平做了总结, 阐述了自由磨料线锯切割和固结磨料线锯切割两大类别的工作原理和研究进展。自由磨料线锯切割是取代内圆切割的一种广泛技术, 而固结磨料线锯切割则是针对高切割效率要求的重要改进。针对晶体线锯切割技术所做的综述, 有助于研究者了解前沿研究进展, 把握晶体线锯切割的发展方向。

关键词: 晶体切割; 线锯切割; 金刚石线锯; 自由磨料; 固结磨料

中图分类号: TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.11.006

Study on Wire Sawing Technology of Semiconductor Crystal

LI Zhen-xing

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Wire sawing technology has been widely used in the field of semiconductor crystal cutting. The traditional internal cutting technology is introduced, and the current classification and research level of the emerging wire saw cutting technology are summarized. The working principles and research progress of the two major categories of free abrasive wire saw cutting and consolidated abrasive wire saw cutting are explained. Free-abrasive wire saw cutting is a widely used technology to replace inner circular cutting, while solid-abrasive wire saw cutting is an important improvement for high cutting efficiency requirements. A review of cutting technology for crystal wire saws will help researchers understand cutting-edge research progress and grasp the development direction of crystal wire saw cutting.

Key words: crystal cutting; wire saw cutting; diamond wire saw; free abrasive; consolidated abrasive

0 引言

随着半导体产业的飞速发展, 对大尺寸、高精度半导体晶片的需求逐渐增大。大尺寸、低损伤、细切缝及高效率的要求, 令传统的晶

片内圆切割方式愈加难以应对。而线锯切割方法作为近年来快速发展的一种现代化切割技术, 以高效率、低损耗和大尺寸切割能力等优点得到更多研究者的关注, 已经取代传统的内

收稿日期: 2019-09-10

作者简介: 李振兴(1996-), 男, 北京人, 本科, 主要从事碲锌镉晶体生长及加工研究。

E-mail: lizhenxing96@163.com

圆切割技术,逐渐成为大尺寸、大批量晶体切割领域的主流。

1 传统内圆切割技术

传统内圆切割技术指在圆环状刀片基体的中心放置晶体,令刀片作高速旋转运动,不断加入磨料的同时,使晶体径向进给,被刀片内圆环切成晶片。由于刀片外圆处于张紧状态,因而刀片的稳定性佳、刚性好,同时在切割加工时具有一定的可调性,切割速度快,切割效率高。众多的优点令这项技术在近几十年得到了充分的发展。

而内圆切割技术的缺点主要有以下几点:(1)晶片损伤层比较厚。内圆刀片在张紧后会出现一定的形变,高速旋转下会产生一定的震动,从而增大晶体损伤,甚至在截面出现清晰的弧形刀纹。(2)切缝宽。内圆刀片本身为了保证足够的强度,具有一定的厚度,同时其本身切割时也存在微震动,这都会使得切片缝隙变宽,损失更多的材料,而且宽切缝也会增大晶片断裂、飞片的概率,减小成品率。(3)效率低。虽然内圆切割的速度较快,但一次切割只能产生一片成品晶片,极大地拉低了切割效率。

这些缺点在切割小尺寸晶体时尚不明显,但随着大尺寸晶体切割的逐渐开始,每一片的切割时间变得更长,晶片更加易碎,而且刀片的内圆半径制约了更大晶体的切割;最关键的是,内圆切割技术单次仅能切割切下一枚晶片,使内圆切割技术的缺点愈加凸显出来,探索新的切割技术迫在眉睫。

2 线锯切割技术

经过长时间的发展,线锯切割方法不断得到完善,目前已经成为晶体切割的主流方法。所谓线锯切割,指的是将金属丝通过一定的方法缠绕在线桶上,通过线桶的特定旋转,使金属丝在一定区域内移动,从而在某种研磨料的帮助下实现对晶体切片。根据设计的不同,可以让金属丝在切割面排列成网状结构,从而在一次进给过程中实现多晶片切割,大大地提高

切割效率。由于线锯在切割过程中会出现损耗,成本较高,因此切割过程中线锯常采用往复式移动的方法来减小消耗。

根据浙江大学樊瑞新^[1]的研究,线锯切割技术与内圆切割技术相比,表面粗糙度更大,但微裂纹和损伤层的厚度远远小于内圆切割晶片表面,这主要是因为线切割方法切割时的残余应力会被柔性金属丝减少。线切割技术同样存在其他优点:(1)切缝窄,相比于内圆刀片的厚度,线锯的直径更小,晶体损耗少。(2)可切割大尺寸晶体,不受限于刀片的直径。(3)成品率更高,锯切过程平稳,很少出现崩边现象。

林健^[2]的研究表明,线锯切割晶片的翘曲度同时受浆料使用次数、切割速度、线锯张力的影响。其中,浆料使用的次数越少,线锯张力越大,晶片的翘曲度越小。此外,切割速度和翘曲度呈平滑曲线关系,切割速度在一定值时,翘曲度较好,但随着速度增加,翘曲度进一步变差。

目前,按磨料和线锯的关系,线锯切割主要分为自由磨料线锯切割和固结磨料线锯切割两大类,采用不同类别线锯加工方法得到的晶片的表面质量不同。

2.1 自由磨料线切割

自由磨料线锯切割指的是通过某种方式将研磨浆液施加在线锯接触晶体的切割区域,通过线锯的往复运转,实现对晶体的切割加工。若将线锯排布成网状,便可以实现多晶片同时切割,大大提高工作效率,如图1所示。研磨浆液中,磨料成分往往以碳化硅或金刚石为主。

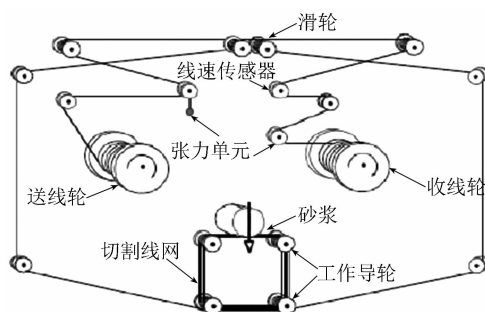


图1 多线切割机的原理简图

到目前为止, 自由磨料线锯切割已较成熟, 但其工作原理却极难摸清。Li J 等人^[3]提出的接触应力模型中, 研磨浆液中的磨料被视为线锯和晶锭之间的松散第三体颗粒, 磨料滚动缩进, 从而去除材料, 被称为材料去除的滚动缩进模型。除此之外, Bhagavat M 等人^[4]则提出划痕缩进模型为切割机制。

Biewisch C 等人^[5]利用耗散粒子动力学和离散元素模拟开发了一个模型, 以模拟研磨浆液, 从而根据锯槽中的颗粒形状和应力平衡预测各种接触情况。Zhao H 等人^[6]则建立模型评估材料去除率随时间的变化。Liedke T 等人^[7]提出了宏观机械条件的分析模型, 从线速、进给速度、线锯张力等重要工艺参数和晶体尺寸、线长等工艺参数分析对研磨压力和线弓的影响。

在应用中, 研磨浆料的处理是一个比较复杂的问题, 会涉及到环保领域。在以碳化硅为磨料时, 破碎的晶体碎片和碳化硅颗粒混合在一起, 若不经处理而简单地排放废液, 会对环境产生负面影响。有些研究者将关注点放在研磨浆料的回收问题上。Wang H Y 等人^[8]开发了一种 Al-Si 合金化技术, 在 1773 K 的高温环境中, 令 Al 和废弃产物中的 SiC 发生反应, 从而生成 Si 和 Al_4C_3 , 在混合废料制取出纯净的硅。通过电解或酸浸的方式, 甚至可以获得太阳能级硅。而 Wu Y F 等人^[9]则提出一种方法以在不同酸碱度的缓冲液环境中应用电场, 来分离碳化硅颗粒和晶体碎屑。Lee Y L 等人则提出一种通过下沉速度来区分颗粒的沉淀方法^[10]。

经过长期的研究和实际应用, 自由磨料线锯切割技术颇为成熟, 其优势主要体现在成品率高、切割效率高、切片表面质量好, 允

许切割晶体尺寸较大等。

而其缺点一方面集中在研磨浆液的成本问题和废弃处理问题, 一方面则出现在晶片的质量问题。由于研磨颗粒会直接滚动压入晶体表面, 因此会在切割表面形成大量的微裂纹, 同时, 线锯本身的磨损也会使得晶片厚度不均匀, 甚至在切割大尺寸晶体时被磨断, 影响切割效率。

不过, Schwide S 等人^[11]在对线锯磨损的研究中发现, 线锯的磨损主要出现在锯槽底部, 即材料去除的主要区域。因此, 他们提出了一种非圆横截面线型设计, 例如以进给方向为长轴的椭圆形横截面, 以提高线锯的耐磨性。

2.2 固结磨料线切割

固结磨料线切割指的是将粒度极小的金刚石磨料均匀地分布固定于金属丝基体表面, 令其具有一定的牢固度, 可以承受一定时间的切割作用。金刚石线锯在过去几年间, 得到了非常快速的发展。

自由磨料线锯切割过程中, 研磨颗粒、线锯和晶体间形成三体磨损机制, 而在固结磨料线锯切割过程中, 将金刚石研磨颗粒和线锯合二为一, 形成一种完全不同的二体磨损机制, 如图 2 所示。两种不同的磨损机制会使得晶片特性有极大不同。

Christian J 等人^[13]对金刚石线锯磨损和晶片厚度及表面粗糙度的影响进行了实验研究, 结果表明晶片平均厚度相同, 但是随着切割晶体数量增加, 晶片厚度偏差也随之增大。Yu X 等人研究表明, 在使用硅晶体作为切割对象时, 用金刚石线锯和自由磨料线锯进行切割实

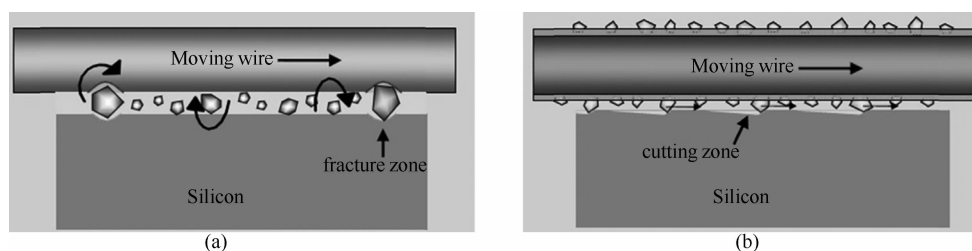


图 2 自由磨料线锯和固结磨料线锯的切割示意图^[12]

验,可以在前者晶片上观察到更多的硅相变^[14]。渡边等人进行多晶硅切割实验时,则发现线锯切片的损伤层厚度减少了一半。Wu H等人提出,线锯切割晶片的强度和自由磨料线锯切割晶片相当。这些研究结果均证明,金刚石线锯的性能完全可以作为自由磨料线锯的替代品^[15]。

金刚石线锯切割和自由磨料线锯切割的材料去除机制不同,导致二者切割面的形态有很大差异。自由磨料切割晶片的表面充满微裂纹,而金刚石线切割表面则有清晰的平滑切割纹理,如图 3 所示。

采用水代替磨料浆液,对碲锌镉晶体进行自由磨料线锯切割实验,并观察切割面形态。可以发现,依然存在清晰的平滑切割条纹,如图 4 所示。这说明切割条纹存在的主要原因是由于线锯切割所采用的往复进线模式,与磨料关系不大。线锯沿单一方向运转一定时间后,切割速度减慢并沿反方向运转,以形成连续不断的切割作用。当线锯开始转变运转方向时,切割速度减慢并趋近于零,而晶体仍然保持进给,使得线锯与切割表面的锯切力变大,粘附晶体微屑,形成沟槽状的切割条纹。而在使用磨料浆液时,研磨颗粒分布于切割表面,会嵌入到晶体之中,加剧微裂纹的产生,增加损伤层的厚度。

目前,根据金刚石的固结方法不同,主要分为树脂粘接金刚石线锯切割和电镀金刚石线锯切割,其中树脂粘接的成本较低,电镀的粘接强度更高。

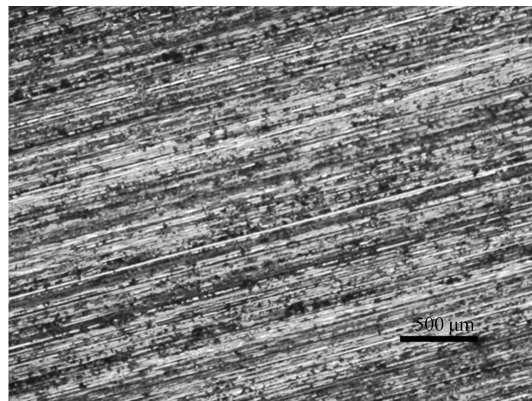


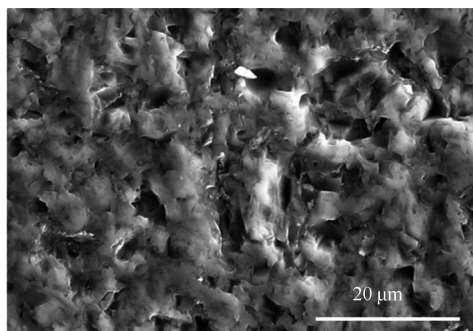
图 4 100 倍显微镜下线锯切割(水)表面

2.2.1 树脂粘接金刚石线锯切割

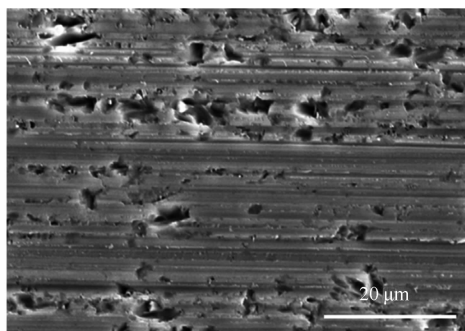
金刚石颗粒在热固性树脂的作用下,可以粘接在芯线表面,形成一种树脂粘结金刚石线锯。通过实验发现,树脂作为结合剂存在磨料固结强度不高的缺点,同时耐热性差,耐磨性低,在往复摩擦的切割过程中损耗严重。但是,也有很多研究者将目光集中在如何改进树脂结合剂,令其固结强度更高、更耐热、耐磨。Enomoto T 等人在粘接过程中加入了金属粉末,实验表明,其粘接强度和耐磨性显著增强^[16]。

2.2.2 电镀金刚石线锯切割

相比于树脂粘合,电镀金刚石线在切割性能和表面质量方面更占优势,被广泛应用于脆性材料切割。电镀金刚石线由钢芯线和金刚石颗粒组成,其中芯线表面以电镀方法沉积了一层填充金属(往往是镍或镍合金),而金刚石颗粒则分布于填充金属上,如图 5 和图 6 所示。为满足切割需要,电镀金刚石线锯的芯线应具有优良弯曲疲劳、扭曲性能和高抗拉强度,在



(a) 自由磨料线锯切割



(b) 金刚石线锯切割

图 3 晶片切割表面的扫描电镜显微照片^[12]

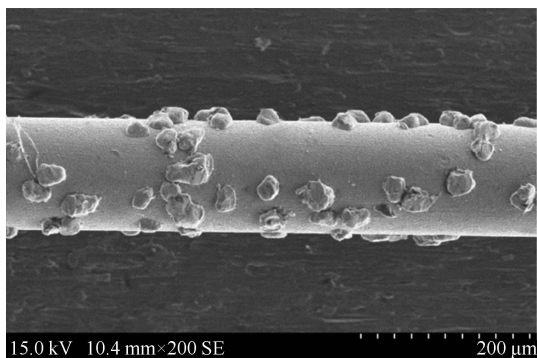


图 5 电镀金刚石线锯的扫描电子显微镜照片(金刚石覆盖在镍基体表面)^[12]

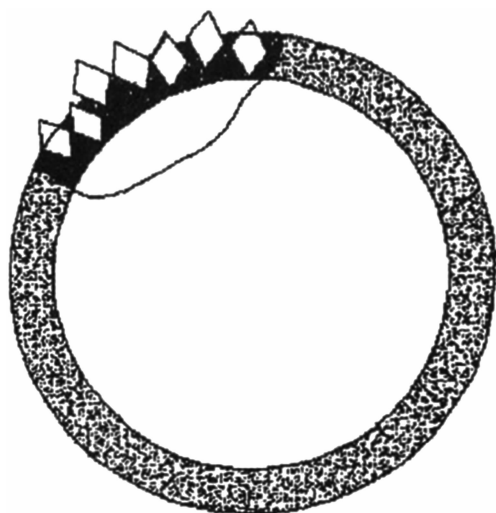


图 6 电镀金刚石线锯剖面图^[12]

用于晶体材料切割时, 线锯基体线径应在 0.1~0.2 mm 左右, 比较典型的芯线直径为 60~140 μm, 金刚石颗粒的尺寸为 8~25 μm^[17]。

综合来说, 金刚石线锯的设计对整体切割性能如金刚石颗粒的形状、尺寸以及分布形式有很大的影响。一方面, 金刚石颗粒的稀疏分布会限制材料的去除率, 另一方面, 金刚石颗粒之间的分布空隙对于排走晶体碎屑也是有必要的。Chung C 等人^[19]的研究模型表明, 将材料去除率作为金刚石颗粒分布密度的函数, 根据延性域去除和断裂去除这两种不同的切削模式, 为分析单个金刚石颗粒的切削行为和对材料去除率的影响提供一种实用方法。

目前, 电镀金刚石线锯的主要问题在于金刚石颗粒固结钢芯丝表面后, 线锯直径增大, 晶体切割余量增大等。此外, 其生产成本比其

他线锯偏高。这些问题都限制了电镀金刚石线锯的广泛应用。但其切割的速度远远快于自由磨料线锯, 使得其具有极佳的开发研究价值。

在减小电镀金刚石线锯直径领域, 日本的研究走在了前沿, 其线锯直径已经达到了 0.175 mm, 并且进行了金刚石绞合线锯的开发, 大大提高了线锯切割效率, 延长使用寿命, 如图 7 所示。国内的电镀金刚石线锯直径偏大, 基本都在 0.5 mm 以上^[21-22]。

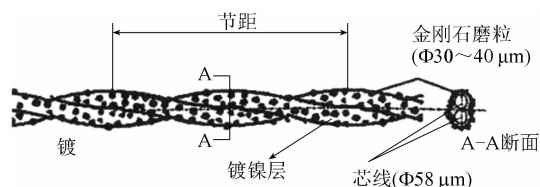


图 7 金刚石绞合线锯

3 结论

本文列举了线锯切割技术与内圆切割技术相比所具有的诸多优势, 着重介绍了目前国际上对线锯切割技术的研究成果。从自由磨料线锯切割及电镀金刚石线锯切割两大重要分支进行阐述和比较。发现线锯切割技术凭其优势在近十几年来不断得到开发和研究, 如今已经在晶体加工领域得到了广泛应用。电镀金刚石线锯作为新型技术, 有着极大的研究价值。

但与国外相比, 目前国内对电镀金刚石线锯的生产研究并不先进, 在很多方面都占据不了领先地位。可以预见, 金刚石线锯作为自由磨料线锯的潜在替代技术, 取消了研磨浆液的应用, 不仅有更高的效率, 而且减少了磨料成本, 有益于环境保护。长远来看, 电镀金刚石线锯技术拥有极大的科研潜力和市场竞争能力, 能产生极大的经济效益; 不论是降低金刚石线锯成本, 还是进一步提高晶片质量和切割效率, 对广大研究者都是一种有益的挑战。

参考文献

- [1] 樊瑞新, 卢焕明. 线切割单晶硅表面损伤的研究 [J]. 材料科学与工程, 1999, 17(2): 58-60.
- [2] 林健. 多线切割工艺中晶片翘曲度的控制 [J]. 半导体技术, 2009, 34(4): 318-319.

- [3] Li J, Kao I, Prasad V. Modeling Stresses of Contacts in Wire Saw Slicing of Polycrystalline and Crystalline Ingots: Application to Silicon Wafer Production [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 1998, **120**(2): 123.
- [4] Bhagavat M, Prasad V, Kao I. Elasto-hydrodynamic Interaction in the Free Abrasive Wafer Slicing Using a Wiresaw: Modeling and Finite Element Analysis [J]. *Journal of Tribology*, 1999, **1122**(2): 394-404.
- [5] Bierwisch C, Kubler R, Kleer G, et al. Modelling of Contact Regimes in Wire Sawing with Dissipative Particle Dynamics [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011, **369** (1945): 2422-2430.
- [6] Zhao H, Jin R, Wu S, et al. PDE-Constrained Gaussian Process Model on Material Removal Rate of Wire Saw Slicing Process [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011, **133** (2): 021012.
- [7] Liedke T, Kuna M. A Macroscopic Mechanical Model of the Wire Sawing Process [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, **51**(9): 711-720.
- [8] Wang H Y, Tan Y, Li J Y, et al. Removal of Silicon Carbide from Kerf Loss Slurry by Al-Si Alloying Process [J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, **89**: 91-93.
- [9] Wu Y F, Chen Y M. Separation of Silicon and Silicon Carbide Using an Electrical Field [J]. *Separation and Purification Technology*, 2009, **68** (1): 70-74.
- [10] Lee Y L, Jeong S T, Park S J. Study on Manufacturing of Recycled SiC Powder from Solar Wafering Sludge and its Application [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2014, **1**(4): 299-304.
- [11] Schwinde S, Berg M, Kunert M. New Potential for Reduction of Kerf Loss and Wire Consumption in Multi-wire Sawing [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, **136**: 44-47.
- [12] Wu H. Wire Sawing Technology: A State-of-the-art Review [J]. *Precision Engineering*, 2015, **43**: 1-49.
- [13] Christian J, Demeyer C, Wiedmer F, et al. Effects of Wire Lifetime in Diamond Wire Wafering on the Wafer Roughness and Mechanical Strength [C]. Frankfurt: European Photovoltaic Solar Energy & Exhibition, 2012.
- [14] Yu X, Wang P, Li X, et al. Thin Czochralski Silicon Solar Cells Based on Diamond Wire Sawing Technology [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, **98**: 337-4342.
- [15] Wu H, Melkote S N, Danyluk S. Mechanical Strength of Silicon Wafers Cut by Loose Abrasive Slurry and Fixed Abrasive Diamond Wire Sawing [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2012, **14**(5): 342-348.
- [16] Enomoto T, Shimazaki Y, Tani Y, et al. Development of a Resinoid Diamond Wire Containing Metal Powder for Slicing a Slicing Ingot [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1999, **48**(1): 273-276.
- [17] 王蕊, 刘新宽, 徐斌, 等. 电镀金刚石线锯制备及应用的研究现状 [J]. *电镀与涂饰*, 2017, **36**(12): 660-664.
- [18] 伟彭, 炜毛. 一种金属结合剂金刚石线锯的制备方法 [J]. *磨料磨具通讯*, 2009, **18**(3): 36.
- [19] Chung C, Tsay G D, Tsai M H. Distribution of Diamond Grains in Fixed Abrasive Wire Sawing Process [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, **73**(9-12): 1485-1494.
- [20] 石川宪一. 金刚石电沉积绞合线锯的开发 [J]. *珠宝科技*, 2004, **54**(2): 34-38.
- [21] 諏访部仁. 金刚石细线锯的开发与加工性能 [J]. *超硬材料工程*, 2008, **20**(4): 52-57.