材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023070202

磨料层动态平衡对蓝宝石衬底粗磨过程影响研究

丁　鹏*，李　冰
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 在对蓝宝石衬底进行粗磨时，需采用大颗粒高硬度磨料以缩短用时。考虑到大颗粒磨料流动性和悬浮性弱的特征，通过监测去除量的指针的摆动情况研究粗磨过程中磨料颗粒的分布和运动规律，表明磨料层的动态平衡性对衬底的厚度均匀性和表面质量具有决定性影响，而该平衡的建立依赖于致密、均匀的初始磨料层，粗磨过程中补充的磨料仅能维持已有的平衡，不能在已失衡的情况下进行补救。该工作有助于提高粗磨工艺控制水平，并对深入研究研磨过程中磨料颗粒的运动情况具有一定的指导意义。

关键词： 磨料层；动态平衡；蓝宝石衬底；粗磨
中图分类号： TN305.2　**文章编号：** 1001－5868(2023)05－0699－04

Research on the Influence of Dynamic Balance of Abrasive Layer on the Rough Grinding Process of Sapphire Substrate

DING Peng，LI Bing
（Chongqing Optoelectronics Research Institute，Chongqing 400060，CHN）

Abstract： When rough grinding the sapphire substrate，it is necessary to use abrasives with large particle and high hardness to shorten the time. Considering the weak flowability and suspension characteristics of large-particle abrasives，the distribution and motion patterns of abrasive particles during rough grinding were studied by monitoring the swing of the removal amount pointer. Research shows that the dynamic balance of the abrasive layer has a decisive impact on thickness uniformity and surface quality of the substrate，and the establishment of this balance depends on a dense and uniform initial abrasive layer. The supplementary abrasive during rough grinding could only maintain the existing balance and could not be remedied in an imbalanced situation. The work helps to improve the control level of rough grinding process and has certain enlightening significance for in-depth research on the movement of abrasive particles during the grinding process.

Key words： abrasive layer；dynamic balance；sapphire substrate；rough grinding

0　引言

粗磨在芯片制作流程中的作用是将晶圆减薄至目标厚度附近，以便在后续细磨中微调厚度并降低表面粗糙度，再经抛光达到目标粗糙度[1]，其操作重点是在保证晶圆厚度均匀受控、表面质量良好的前提下，提高去除速率以缩短粗磨用时[2]。在GaN等材料系的芯片制备中广泛使用蓝宝石作为外延衬底[3-5]，因其莫氏硬度约为9，需采用大颗粒高硬度磨料（如240目碳化硼，莫氏硬度约为9.5）进行粗磨以获得可接受的去除速率[6]，此类磨料具有颗粒尺寸大、流动性和悬浮性弱的特征，有必要研究其对晶圆厚度和表面质量的影响。

收稿日期：2023－07－02.
* **通信作者：**丁　鹏　**E-mail：**dingp@cetccq.com.cn

1 实验

采用 Logitech PM5 型磨抛机进行粗磨实验，研磨盘为铸铁材质，研磨液采用 240 目碳化硼磨料颗粒、乙二醇和水按 1∶2∶8 的体积比配制。考虑到芯片制作中均对衬底面进行研磨，采用 2 inch 蓝宝石衬底片代替蓝宝石基外延片进行实验。将衬底片固定于磨抛夹具底部，在研磨盘上抛洒研磨液后将夹具放在研磨盘上，使衬底待磨面与研磨盘接触，研磨盘转动时通过摩擦力带动磨抛夹具转动，对衬底进行单偏心圆盘式研磨，研磨期间以 2 drip/s 的流速向盘上补充研磨液，以弥补磨料的流失。

对 3 个衬底样品进行粗磨，编号为 1＃至 3＃，粗磨后对每个样品进行五点法（取衬底中心点和衬底边缘处呈十字分布的四个点，分别用 A，B，C，D，E 表示，见图 1）测厚，并观察表面质量。

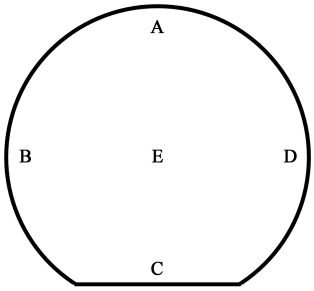

图 1 五点法测厚示意图

各样品粗磨后的厚度值见表 1。样品表面均有数量、位置、长度与方向随机的划痕，继续进行细磨及抛光后，一些划痕扩成为裂纹，导致各样品均有不同程度的开裂现象，另外部分样品存在边缘偏薄及崩边现象（如 3＃样品的 B 位置附近），上述表面异常不满足粗磨工艺要求。

表 1 1＃至 3＃样品粗磨后的厚度值

样品编号	厚度/μm				
	A	B	C	D	E
1＃	116	110	111	110	115
2＃	116	111	114	114	117
3＃	116	107	111	113	115

2 实验结果分析

240 目碳化硼颗粒度达 45 μm，所配制的研磨液经 2 min 即完成沉降，表明其流动性和悬浮性弱。考虑到磨料颗粒和衬底碎片均能产生划痕，而后者为表面异常（崩边）的产物，从寻找产生异常原因的角度，应优先分析磨料颗粒分布和运动情况及其对粗磨的影响。根据研磨过程中监测去除量的原理，可以通过监测去除量的千分表指针在粗磨过程中的摆动情况进行上述分析，原理如图 2 所示。

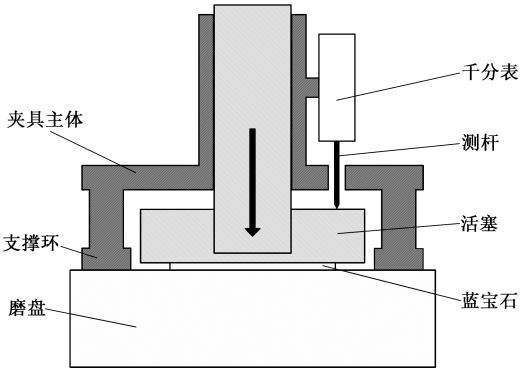

图 2 研磨过程中监测去除量的原理示意图

磨抛夹具放在研磨盘上后，夹具主体通过支撑环与研磨盘接触，蓝宝石衬底固定于夹具中心的活塞底部，活塞在重力作用下相对夹具主体向下滑动并挤压衬底与研磨盘接触，千分表相对于夹具主体固定，其测杆向下顶住活塞，当衬底厚度变化后，活塞随之运动并引起千分表的指针转动，通过观察其转动量即可监测衬底的去除量。

在实际研磨过程中，指针在一定范围内摆动，而摆动的中心点逐渐向衬底厚度减小对应的刻度方向移动。按照图 2 所示原理，指针的转动量 Δ 取决于衬底去除量 Δ_s、磨料层厚度减少量 Δ_a 和支撑环减薄量 Δ_r：

$$\Delta = \Delta_s + \Delta_a - \Delta_r \tag{1}$$

其中，Δ_s 只能渐变，Δ_r 可忽略，则指针的摆动即 Δ 的反复由 Δ_a 的反复造成，反映了粗磨过程中磨料层厚度不稳定的现象，不稳定程度由指针的摆幅体现，而摆动中心点的缓慢移动与 Δ_s 的渐变相对应。

研磨过程中的磨料层存在动态平衡：当磨料的流失和补充相抵消、磨料在研磨盘上的存量稳定且分布均衡时，动态平衡性好，此时磨料层厚度相对稳定，指针摆幅较小，而平衡性差时，磨料的存量和分布不稳定，体现为指针摆幅相对较大。

磨料分布不均衡、不稳定将扩大对衬底不同部位的去除量差异，而 240 目磨料颗粒受流动性弱的影响，更易在衬底边缘处聚集，体现为粗磨后的衬底中心 E 点相对偏厚，而近边缘的 A，B，C，D 厚度差异较明显，同时上述聚集将加剧磨料对衬底边缘的冲击，更易于出现崩边，聚集导致衬底中心附近的磨

料层偏薄，从而磨料颗粒或衬底碎片从边缘挤入中心时，更易形成划痕，以上分析均与 1＃至 3＃样品粗磨后的现象相一致。

为进一步验证上述分析，人为增强磨料层的致密性与均匀性，并验证其对粗磨的影响：在研磨盘上的研磨夹具初始放置区域抛洒足量的研磨液并充分沉降，以形成致密的磨料层，之后放上研磨夹具并人工拨动其旋转一周，以便借助其自重挤压下方的磨料层形成初始平衡、防止研磨过程中因磨料层坍塌或局部空洞等导致平衡被破坏，启动研磨盘进行粗磨时，将补充研磨液的流速增至 3 drip/s 以充分弥补磨料的流失、维持动态平衡。

共实验 3 个衬底样品，编号为 4＃至 6＃，表 2 给出了各样品粗磨后的厚度值：

表 2　4＃至 6＃样品粗磨后的厚度值

样品编号	厚度/μm				
	A	B	C	D	E
4＃	105	106	106	105	111
5＃	104	103	101	102	107
6＃	102	101	102	103	108

此处定义厚度极差 R 和边缘极差 R_e 两个参数，前者为同一样品上 A，B，C，D，E 五点厚度的最大差异，体现衬底整体的厚度不均匀性，后者为样品上前四点厚度的最大差异，体现衬底边缘附近的厚度不均匀性。

图 3 给出了 1＃至 6＃样品的指针摆幅 A_m 和 R，R_e 的对比。

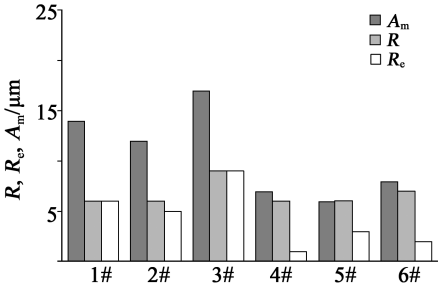

图 3　1＃至 6＃样品 A_m，R，R_e 的对比

可见 4＃至 6＃样品与 1＃至 3＃样品相比，厚度极差分布相当，但粗磨过程中的指针摆幅与边缘极差均有明显下降，表明磨料层的动态平衡性和稳定性得到改善，同时衬底厚度的均匀性得到提高，目检表明 4＃至 6＃样品未出现划痕、崩边等表面异常现象，验证了磨料层动态平衡和粗磨效果关系的前述分析。另外，还表明增强磨料层致密性与均匀性的措施有效，致密、均匀的初始磨料层有助于动态平衡的建立。

由此可以考虑，在初始磨料层不够致密、均匀的情况下，能否通过在粗磨过程中增加磨料供给的方式加以弥补、提高磨料层的动态平衡性，为此进行如下实验：粗磨开始前的操作同 1＃至 3＃样品，但开始后补充研磨液的流速增至 6～10 drip/s，远超磨料的流失程度（根据 1＃至 6＃样品的实验情况，等效于 2～3 drip/s）。

共实验 3 个衬底样品，编号为 7＃至 9＃，表 3 给出了各样品粗磨后的厚度值。

表 3　7＃至 9＃样品粗磨后的厚度值

样品编号	厚度/μm				
	A	B	C	D	E
7＃	105	110	115	98	128
8＃	107	104	110	111	127
9＃	111	109	107	113	121

粗磨过程中指针的摆动较 1＃至 3＃样品更为剧烈，且多次出现指针摆动中心点跳变的现象，因 Δ_s 只能渐变，该现象由 Δ_a 的跳变引起，表明磨料层的动态平衡性反而出现了恶化。粗磨后的目检表明，与 1＃至 3＃样品相比，7＃至 9＃样品的划痕和崩边现象更严重。

图 4 给出了 1＃至 3＃及 7＃至 9＃样品的指针摆幅 A_m 和 R，R_e 的对比。

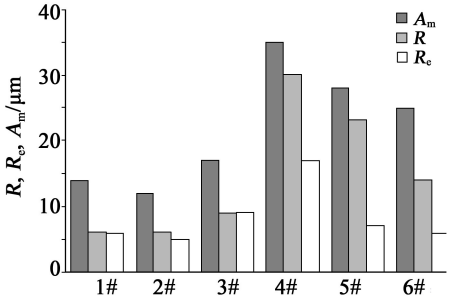

图 4　1＃至 3＃及 7＃至 9＃样品 A_m，R，R_e 的对比

与 1＃至 3＃样品相比，7＃至 9＃样品的指针摆幅和 R 均显著增加，同时 R_e 的增幅低于 R，即衬底厚度不均匀性的加剧主要由中心和边缘厚度差异的扩大引起，表明 240 目碳化硼受颗粒度和流动性的限制，没有充分进入衬底下方形成均匀稳定的磨料层，反而在衬底边缘处堆积并导致了更严重的磨料层不平衡性，并引发了更为严重的表面异常。因此动态平衡的建立依赖于良好的初始磨料层，而补充的磨料只能维持而不能提高平衡性。

3 结论

本文研究了采用240目碳化硼磨料对蓝宝石衬底进行粗磨时的衬底厚度和表面情况，表明磨料层的动态平衡性对衬底的厚度均匀性和表面质量具有决定性影响，而该平衡的建立取决于初始磨料层是否致密、均匀，中途补充的磨料仅能弥补磨料的流失、保持已有的动态平衡，不能在已失衡的情况下重新建立平衡。所做工作有助于提高粗磨工艺控制水平，并对深入研究研磨过程中磨料颗粒的运动情况具有一定的启发意义。

参考文献：

[1] 冯小成，李 峰，李洪剑，等. 晶圆减薄表面损伤层对断裂强度影响的研究[J]. 电子与封装，2018，18(10)：4-8.
Feng Xiaocheng，Li Feng，Li Hongjian，et al. Study on the effect of surface damage layer on fracture strength after wafer thinning[J]. Electronics & Packaging，2018，18(10)：4-8.

[2] 董云娜. 蓝宝石晶片粗磨工艺的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程，2017，37(3)：88-90.
Dong Yunna. Coarse grinding parameters on sapphire wafer [J]. Diamond & Abrasives Engineering，2017，37(3)：88-90.

[3] 陈伟超，唐慧丽，罗 平，等. GaN基发光二极管衬底材料的研究进展[J]. 物理学报，2014，63(6)：1-13.
Chen Weichao，Tang Huili，Luo Ping，et al. Research progress of substrate materials used for GaN-based light emitting diodes [J]. Acta Physica Sinica，2014，63(6)：1-13.

[4] 考政晓，叶大千，于 璇，等. 蓝宝石衬底材料的研究及应用进展[J]. 人工晶体学报，2018，47(1)：102-107.
Kao Zhengxiao，Ye daqian，Yu Xuan，et al. Research and application progress of sapphire substrates[J]. J. of Synthetic Crystals，2018，47(1)：102-107.

[5] 张法碧，杨倩倩，梁智文，等. 蓝宝石衬底上AlGaN/GaN异质结的制备及性能研究[J]. 桂林电子科技大学学报，2022，42(1)：8-13.
Zhang Fabi，Yang Qianqian，Liang Zhiwen，et al. Study on the preparation and properties of AlGaN/GaN heterostructure on sapphire substrate[J]. J. of Guilin University of Electronic Technol.，2022，42(1)：8-13.

[6] 李 欣，都兴红，李 盼，等. 蓝宝石精磨专用碳化硼微粉的制备及其分级研究[J]. 铁合金，2017，48(6)：16-21.
Li Xin，Du Xinghong，Li Pan，et al. The preparation and classification of boron carbide micro-powder as abrasive material for sapphire wafer[J]. Ferro-Alloys，2017，48(6)：16-21.

作者简介：

丁 鹏(1979－)，男，2002年毕业于长春理工大学光电子技术专业，获学士学位，高级工程师，主要从事半导体光电子器件设计、工艺技术研究。