文章编号: 1007 - 4252(2020) 03 - 0003 - 209

高压大功率管用硅外延裂片问题研究

马梦杰*,杨帆,王银海,邓雪华
(南京国盛电子有限公司,南京 211111)

摘要: 高压大功率管用硅外延片需求日益增加,但其裂片比例高,增加了生产成本。根据裂片特征现象,分析了厚层外延裂片的主要影响因素是热应力。从生长速率、生长温度、外延温场等方面研究对热应力的影响。一定范围内降低生长速率、提高生长温度可以改善裂片,但改善程度有限。通过离子注入片显示在基座片坑边缘存在温度梯度。通过改善热滑片和传输装置优化,使硅片在片坑中心区域外延,可以避免片坑中心与边缘温度梯度影响,提高外延温场一致性,显著减少了热应力,裂片比例有了大幅降低。

关键词: 硅外延; 裂片; 热滑片; 温场一致性
中图分类号: TN304 **文献标志码:** A

The investigation of crack in siliconepitaxy process for High-Voltage Diodes

Ma Mengjie*, YANG Fan, WANG Yinhai, DENG Xuehua
(Nanjing Guosheng Electronics CO., LTD., Nanjing, 211111, China)

Abstract: As the use of epitaxial silicon in High-Voltage MOS, IGBT and FRD increases, the crack occurring in epitaxial silicon deposition becomes noticeable trouble. The possibility of the crack is in direct proportion to epitaxial layer thickness. Based on the observation of crack and the analysis of related factor,the results show that thermal stress was essential to the crack. The effect of growth rate, growth temperature and epitaxial temperature field on thermal stress were studied. In a certain range, decreasing growth rate and increasing growth temperature can depress the crack. By the ion implanted wafer, the temperature gradient in the edge of pocket was measured. To depress the slide of wafer in high temperature can be capable of putting wafer in the correct position where the temperature gradient of the pocket is flat. By this way, the ratio of the crack will be significant lower up to zero.

Key words: silicon epitaxy; crack; thickness; slide; temperature gradient

收稿日期: 2020-05-21; **修订日期:** 2020-06-23
通信作者: 马梦杰(1987-),男,河南确山人,硕士,工程师,主要研究方向为半导体材料制备技术(E-mail: mamengjie@ gs-epi.com) .

0 引言

随着高压大功率 MOSFET、FRD、IGBT 在轨道交通、车载电源等方面广泛的应用，相关硅外延片需求日益增加[1-3]，随着器件耐压提高，其所用外延层厚度也随之增加，以 1200V FRD 和 IGBT 器件为例，其外延厚度已超过 100μm。但在外延生产过程发现，随着外延厚度增加，裂片比例增高。裂片不仅会导致产品报废，还会引起外延设备故障，并对开工率造成严重影响，大幅增加了生产成本。针对厚层外延裂片问题，目前相关报道较少。而目前外延温场改善一般是从基座温场调整，和基座片坑结构设计两方面改善，不能完全消除基座片坑中心与边缘温度梯度[4]。本文分析厚层外延裂片主要影响因素，从生长温度、生长速率、生长温场等方面研究对热应力的影响。通过离子注入片显示基座片坑与边缘存在温度梯度。提出了一种新的思路：通过将硅片放置在基座温场一致区域来避免片坑边缘温度梯度影响，有效改善外延裂片。

1 实验

1.1 实验材料

实验采用意大利 LPE3061 型平板式外延炉，利用红外高温计来控制温度。由加热线圈以高频感应加热石墨基座的方式提供反应能量。石墨基座上有浅槽片坑，通过传输装置将硅片放置在片坑内进行外延生长。通过线圈底部高度调节杆可以改变线圈与基座距离，来调节基座温场分布。

实验采用三氯氢硅（SiHCl3）为生长硅源，氢气（H2）作为还原气体和载气。硅片为<100>晶向掺 Sb 衬底，衬底电阻率为 0.01～0.02Ω.cm，表面无滑移线和抛光划伤等缺陷。外延厚度采用傅里叶变换红外光谱仪（FTIR）测量，量程 2～200um，分辨率 0.001um。

1.2 实验方法

实验采用常压外延生长，生长前对硅片采用小流量 HCL 刻蚀，去除传输过程中表面沾污，减少因沾污诱生缺陷对实验结果的干扰。通过线圈底部高度调节杆将基座片坑径向温度调至 5℃ 以内，减少径向温度梯度影响。实验通过改变三氯氢硅通入流量来控制反应生长速率；通过控制三氯氢硅通入流量和通入时间来调整外延厚度；通过优化传输装置调试方法和抑制热滑片来控制硅片在基座片坑中的反应位置。

2 结果与讨论

2.1 裂片影响因素

裂片裂纹沿解理面方向，起点处均存在大量滑移线表明应力是外延裂片的主要因素。目前理论将外延应力分为机械应力和热应力。机械应力主要来自外延前硅片加工时产生的机械损伤，及外延结束后外延片从基座上取出过程中，机械手吸盘吸片导致的压力和机械碰撞[5]。热应力主要来自外延时硅片所在温场不均匀、过快的升降温速率、生长温度过高、生长速率过快等[6]。

裂片比例随着外延厚度的增加而上升，达一定外延厚度后，碎片比例呈现急速上升趋势，如图 1 所示。不同外延厚度硅片采用相同衬底、相同的装取动作，即机械应力因素相同，但裂片比例差异较大，表明厚层外延裂片主要因素是热应力。100μm 外延片高温反应时间是 30μm 外延片的 2～3 倍，在热应力的作用下能产生更多的位错缺陷，充分的位错运动在表面边缘形成大量聚集的滑移线或滑移线带，降低了外延片断裂强度，更容易开裂。

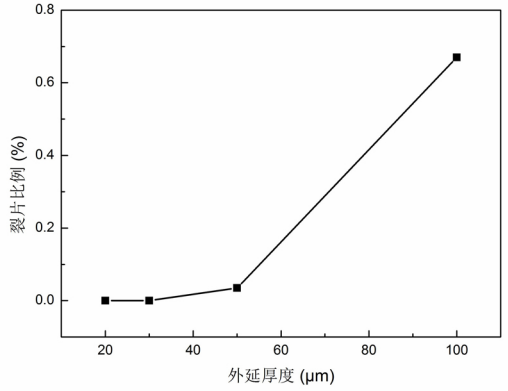

图 1 外延厚度与碎片比例

Fig.1 the ratio of crack at different epitaxial layer thickness

如何改善硅外延过程热应力、降低裂片比例，本文选择改变生长速率、生长温度，减少外延温度梯度三方面进行实验。

2.2　生长速率影响

采用相同的生长温度，通过控制通入反应的 SiHCl3 流量调整外延层生长速率，然后根据生长速率调整反应时间得到相同的厚度的外延层。表 1 显示随着生长速率降低，裂片比例有所降低，在外延厚度 100μm 情况下生长速率由 2.5μm/min 降低至2.0 μm/min 时裂片比例由 0.67%降低至 0.43%。较低的生长速率可以使外延平稳有序进行，有利于保持较高的外延单晶质量，降低了位错等缺陷密度。但较低的生长速率增加了外延生长时间，高温时间延长导致热应力影响增加，二者因素共同影响裂片，使小幅度的生长速率变化对裂片比例影响不显著。而且生长速率降低大幅降低了产生效率，增加了生产成本，不利于规模化生产。

表 1　生长速率对裂片影响

Table1 The ratio of crack at different growth rate

SiHCl3 流量/slm	生长速率/(μm/min)	裂片比例
15	2.0	0.43%
18	2.3	0.61%
20	2.5	0.67%

2.3　生长温度影响

采用相同的反应的 SiHCl3 流量，改变生长温度进行外延。表 2 显示随着生长温度提高，裂片比例有所降低，在外延厚度 100μm 情况下生长温度由 1040℃提高至 1060℃时裂片比例由 0.71%降低至 0.62%。生长温度偏低会导致反应能量不足，外延单晶质量下降，增加了位错等缺陷密度、表面粗糙度高; 生长温度偏高会降低硅片屈服应力值，且较高的生长温度更利于位错等缺陷运动。此外过低和过高的生长温度会导致基座温场梯度变大，增加外延时热应力。多种因素共同影响裂片，使小幅度的生长温度变化对裂片比例影响不显著。而且生长温度过高，自掺杂影响严重，对外延电性参数造成不良影响。

表 2　生长温度对裂片影响

Table2 The ratio of crack at different growth temperature

生长温度/℃	裂片比例
1040	0.71%
1060	0.67%
1080	0.62%

2.4　外延温场影响

硅片外延时的温场由基座片坑温场和硅片在片坑中的位置两个方面决定。基座片坑温场包括横向温场(平行于线圈)和径向温场(垂直于线圈)。片坑纵向温场可以通过加热线圈高度调整[7,8]，一般可以调至 5℃以内。而横向温场是由基座片坑中心区域与边缘区域结构差异导致，依赖于基座片坑结构，目前常用球形石墨基座片坑结构设计无法消除片坑边缘与中心差异。

通过离子注入片的电阻分布可以表征硅片外延温场[9]。硅片靠近片坑边缘时如图 2(a)所示，硅片片内温度一致区域小、温度梯度大见图 2(b)；硅片在片坑中心时如图 2(c)所示，硅片片内温度一致区域大、温度梯度小见图 2(d)。因此使硅片外延时不靠近片坑边缘便可以改善外延温场一致性。

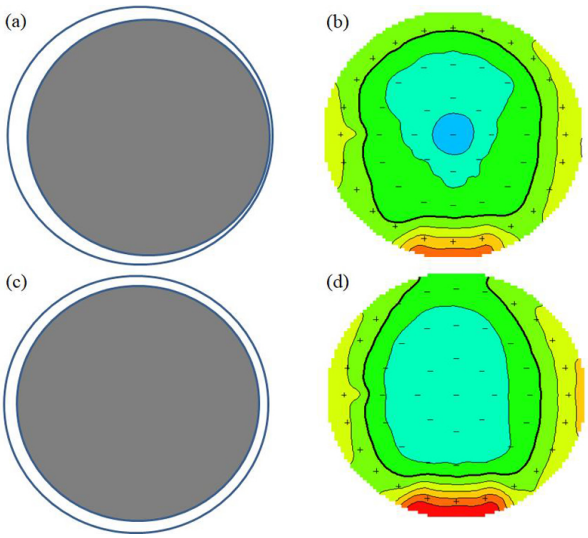

图 2　硅片在片坑位置对外延温场影响

Fig.2 the effect of position of wafer in the pocket on the temperature gradient

通常情况下可以通过调试机械手参数使硅片放置在基座片坑中心区域。但是调试时硅片和基座温度都是室温，而实际生产装片时，基座经过高温刻蚀温度偏高，硅片温度和基座温度间存在的温度梯度不同，硅片与基座接触时硅片会因热膨胀出现位置移动，即热滑片，硅片容易偏移出温度一致性区域。通过降低装片前的基座温度，即延长装片前基座冷却时间来降低基座温度，减少硅片与基座温度梯度，可以改善热滑片。其次可通过优化机械手装取片设置使硅片放置在片坑温场一致性区域。通过抑制热

滑片和优化机械手装取片设置，可减少硅片靠近片坑边缘情况。硅片在片坑中心区域外延，避免了基座片坑边缘温场梯度，减少了热应力，随之裂片比例也显著下降，见图 3 所示。

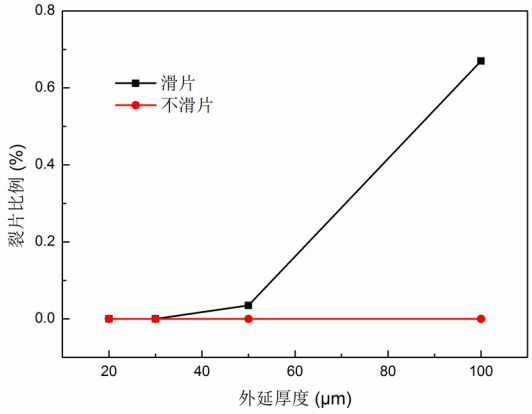

图 3 滑片时和不滑片对裂片影响

Fig.3 The ratio of crack at slide or non-slide

3 结论

根据厚层硅外延片裂片现象，确认热应力是裂片的主要影响因素。一定范围内降低生长速率、提高生长温度可以改善裂片，但改善程度有限。通过离子注入片的电阻分布表征外延温场，在基座片坑边缘存在温度梯度。通过改善热滑片和传输装置优化，使硅片在片坑中心区域外延，可以避免片坑中心与边缘温度梯度影响，提高外延温场一致性，显著减少了热应力，裂片比例有了大幅降低，使 100μm 厚度外延片裂片比例由 0.67%降低至 0%。

参考文献:

[1] 尹启堂，李玉柱，安涛，等.双基区大功率快恢复二极管的研究 [J] .半导体技术，2010，35(2)：129-132.

[2] 李明达，李普生.快速恢复外延二极管用 150mm 高均匀性硅外延材料的制备 [J] .固体电子学研究进展，2017，37(5)：367-373.

[3] Crippa D，Rode D L，Masi M. Silicon epitaxy [M] . California：Academic Press，2001：295-343.

[4] 高淑红，赵丽霞，袁肇耿，等.硅外延工艺与基座的相关性研究 [J] .半导体技术，2012，37(08)：638-641.

[5] 白春磊.LPE 3061 机械手调节方法 [J] .甘肃科技，2015，31(24)：36-38.

[6] 李普生.对影响外延片表面质量的若干问题的研究 [J] .甘肃科技，2016，32(19)：43-45.

[7] 李明达，陈涛，李普生，等.平板式外延炉大尺寸硅外延层的均匀性调控 [J] .电子元件与材料，2017，36(3)：38-41.

[8] 张志勤，吴会旺，袁肇耿，等.用于高压快恢复二极管的 200mm 硅外延材料的生长 [J] .半导体技术，2017，42(02)：129-133.

[9] 肖健，任凯，袁夫通，等.基于离子注入片的单片外延炉温度研究 [J] . 电子与封装，2019，19(5)：41-43.