



# 金刚石线锯切割硅片技术中的 若干科学问题

周 浪

南昌大学 太阳能光伏学院 / 材料学院

School of Photovoltaics, Nanchang University

2013. 11.08 CSPV9 常熟

lzhou@ncu.edu.cn



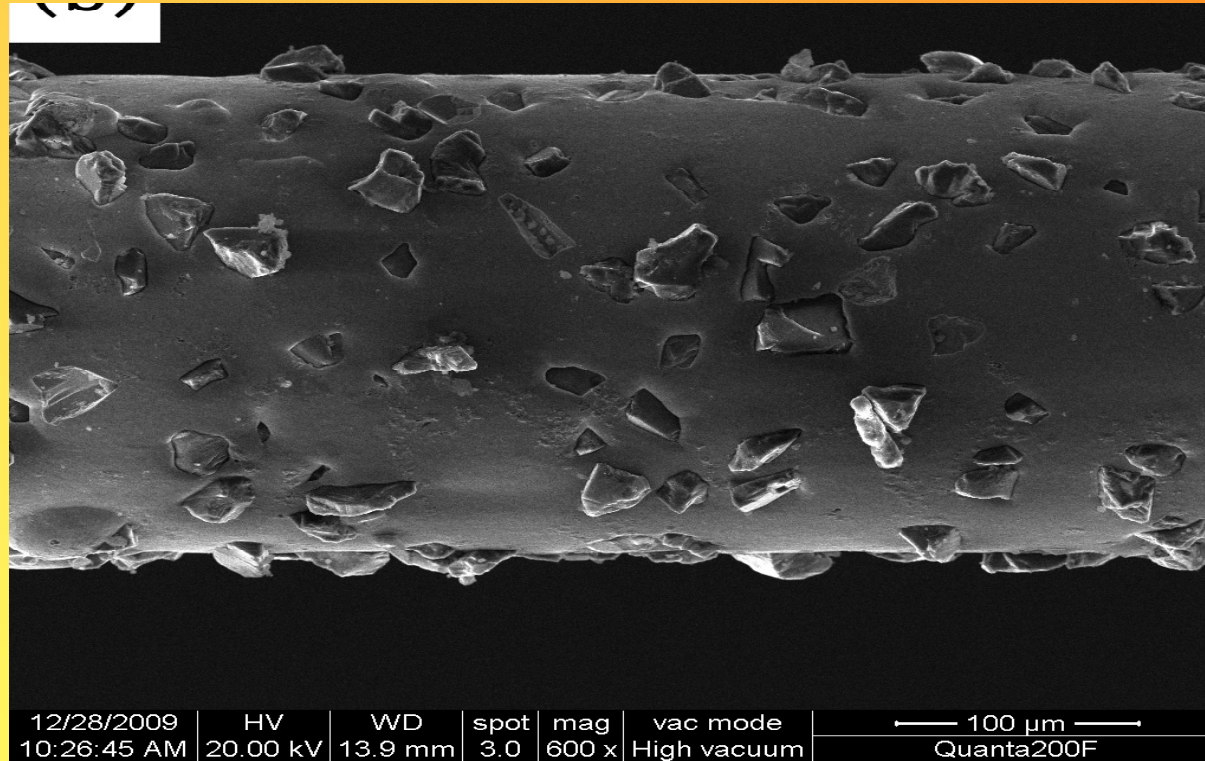


# 报告提纲

- 金刚石切割硅片技术 优势与问题
- 金刚石切割过程与切割面特性
- 多晶硅切割为什么线损比的单晶硅更高
- 金刚石切割多晶硅片的制绒问题与应对研究
- 金刚石切割多晶硅片的断裂问题与应对研究



# 固结金刚石磨料线锯



- 固结方式：电镀 或 树脂
- 现在性能较好的金刚石线锯上金刚石颗粒密度小得多，颗粒埋得也更深

# 固结金刚石磨料线锯切割硅片技术优势 (简称 金刚石切割)

- 更快
- 更好
  - 表面损伤浅 — 2010以来至少有4家独立研究报道此结论（包括我们：EUPVSEC26-2BV.4.28）/ 几何误差小
  - 多家电池商宣称金刚石切割单晶硅片能使电池效率绝对平添 0.1~0.2 % ！
  - 一家HIT电池研发机构称不用“金刚刀”切割硅片不行，电池效率绝对差1% ！
- 更环保
- 更易回收锯缝损失！

# 成本？

- 对单晶硅，现在已近平衡；  
未来：时间会令天平向金刚石线锯倾斜。。。
  - 环保压力（成本）
  - 技术成熟化发展
- 对多晶硅，成本还偏高，而且还不仅成本问题。。。



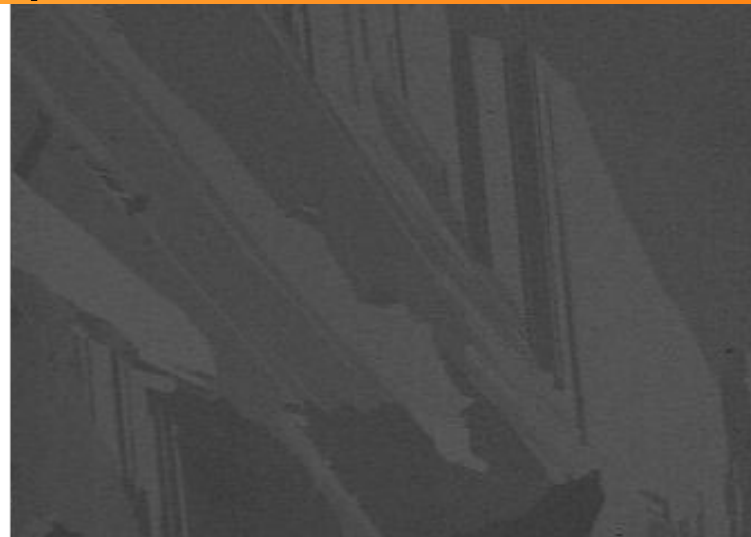
## 多晶硅障碍

面临三大障碍，商业化生产迄今基本未实现

- “难切”，速率低，线耗高  $\rightarrow$  成本高
- 现行硅片酸性制绒工艺失效，而且切割痕显眼，可行的替代工艺还未找到。调不出来
- 碎片率可能会偏高



## 两种硅片样品 (32x26 mm<sup>2</sup>)



富硝酸配方刻蚀

富氢氟酸配方刻蚀

—> 酸刻饰后改观不大



金刚石线切割技术的多晶硅障碍是否可以绕开？

- 未来的光伏市场将是高效单晶硅电池主导？
- 一类单晶硅将取代普通多晶硅？

👉  $\$/W_p$  才是决定因素。目前来看  
多晶硅肯定绕不开（高效多晶硅的发展）





# 需要认真关注的基础科学问题

- 金刚石切割晶体硅微观机理
- 金刚石切割硅片表面性质：几何、化学、光学
- 金刚石切割硅片表面对刻蚀的响应特性



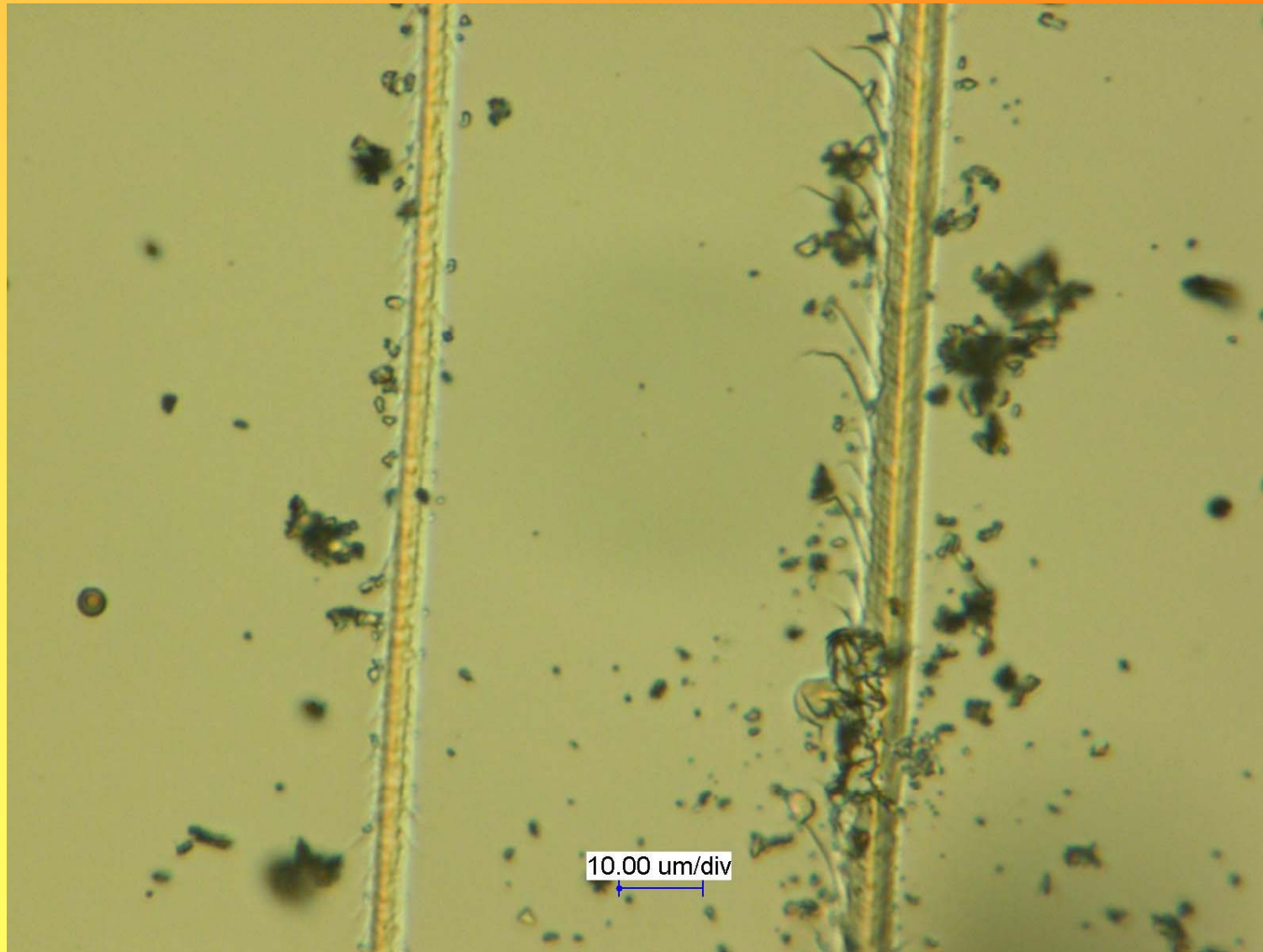


# 报告提纲

- 金刚石切割硅片技术 优势 一新信息
- 金刚石切割过程与切割面特性
- 多晶硅切割为什么线损比的单晶硅更高
- 金刚石切割多晶硅片的制绒问题与应对研究
- 金刚石切割多晶硅片的断裂问题与应对研究



用单颗金刚石尖划过抛光单晶硅...



10g

25g

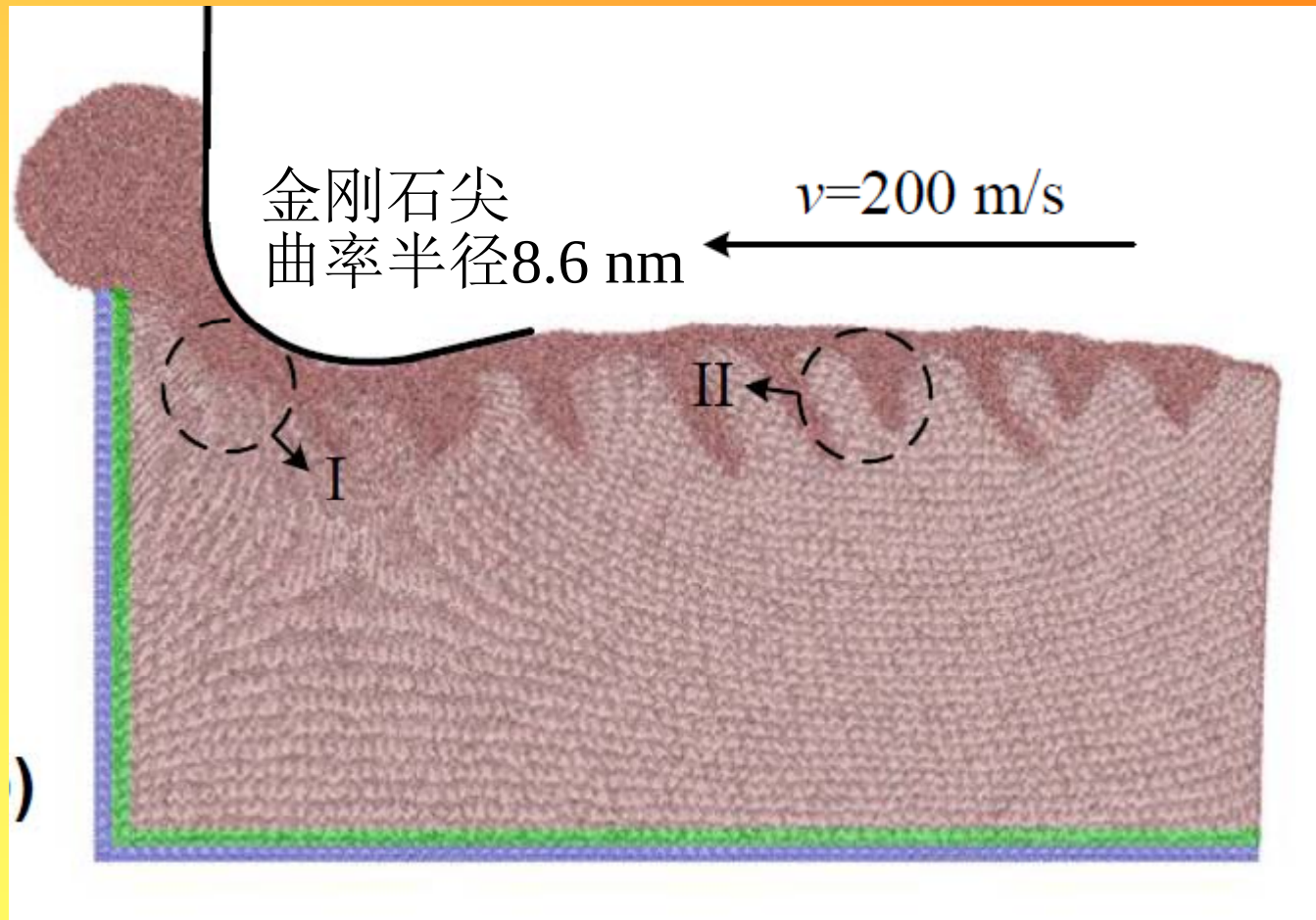
帶脆崩坑和微裂边沿的光滑帶

考虑到晶体硅的室温脆性，“脆崩”容易理解，  
而光滑带部分不好理解 — 它是塑性划痕的特征

事实是：室温下晶体硅在弯折或类似条件下呈宏观脆性，而在压应力条件下在局部却未必不能塑性屈服。 — *脆的原因是微裂纹或局部塑性滑移障碍*

换个角度：塑性屈服是释放应力的方式，塑性屈服依靠晶体原子面滑移进行，而一旦这种滑移受阻，就要“脆崩”

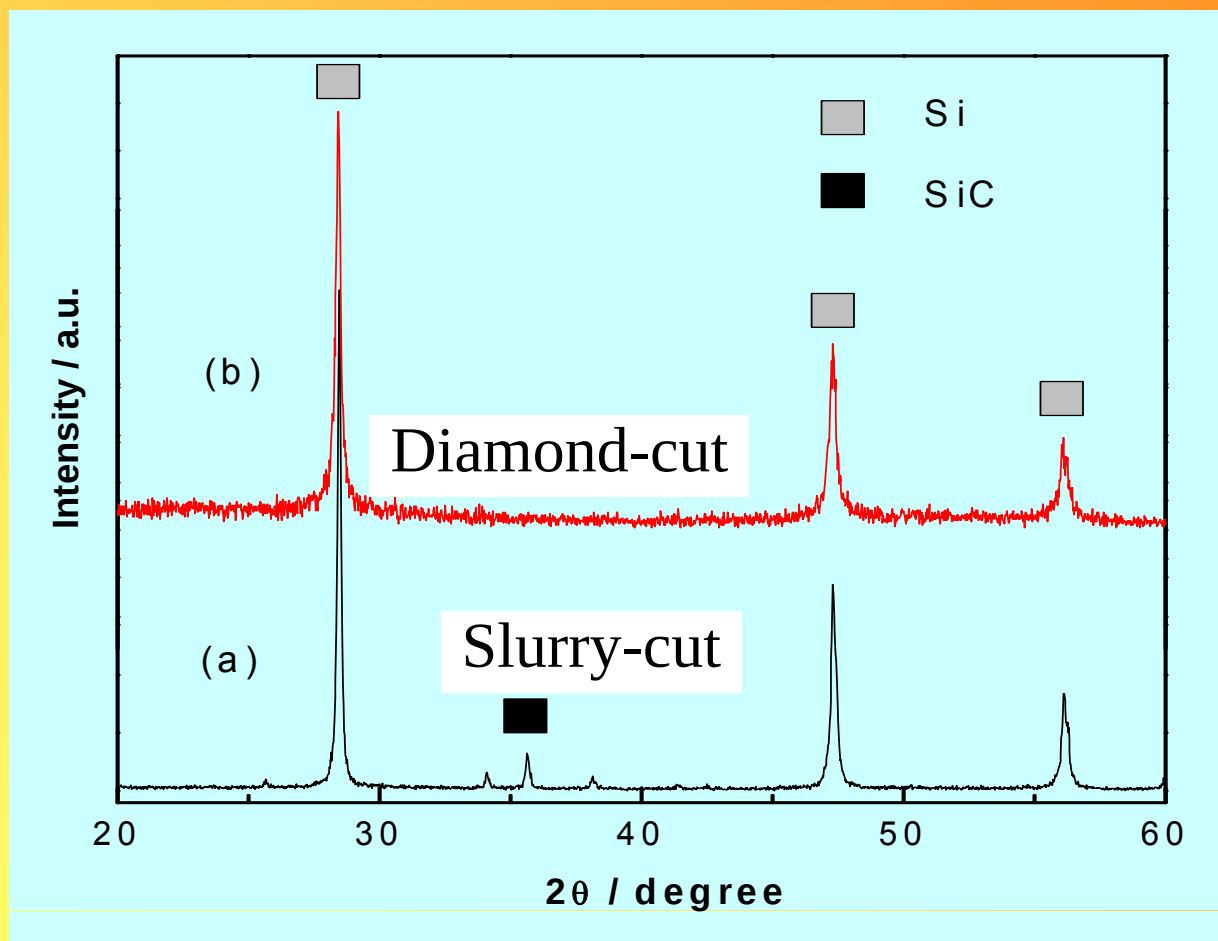
## Lin Zhang et al : 金刚石切割晶体硅过程的原子模拟



- 一在完整晶体上确通过塑性变形“铲起”一点硅
- 一铲下来的硅和被铲过的表面被“伤”得很重，维持不了晶体结构，成了非晶硅层。 相当于暴力拆迁！

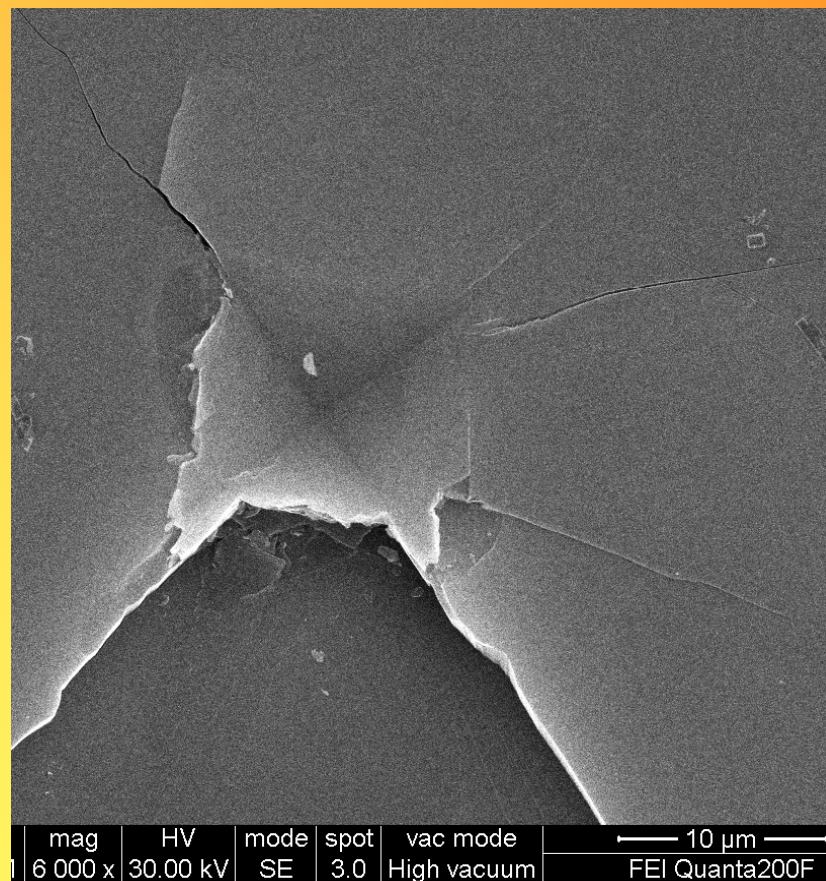
表面非晶硅层已有拉曼散射证据（至少两个国外研究组报道）

我们补充一个锯屑XRD证据





# 晶体硅室温塑性屈服的另一个证据

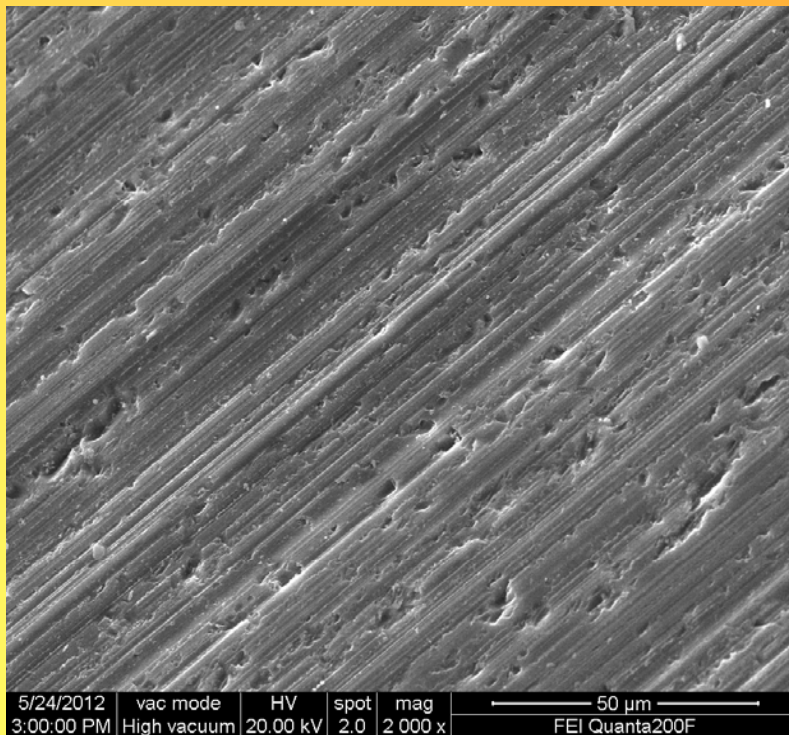


金刚石尖压痕 载荷200g

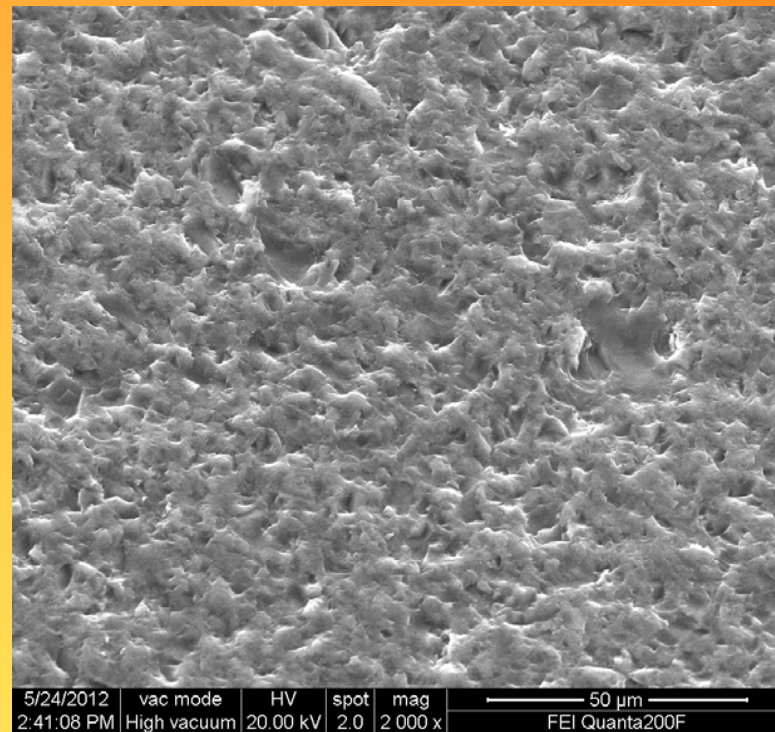




## 硅片表面形貌



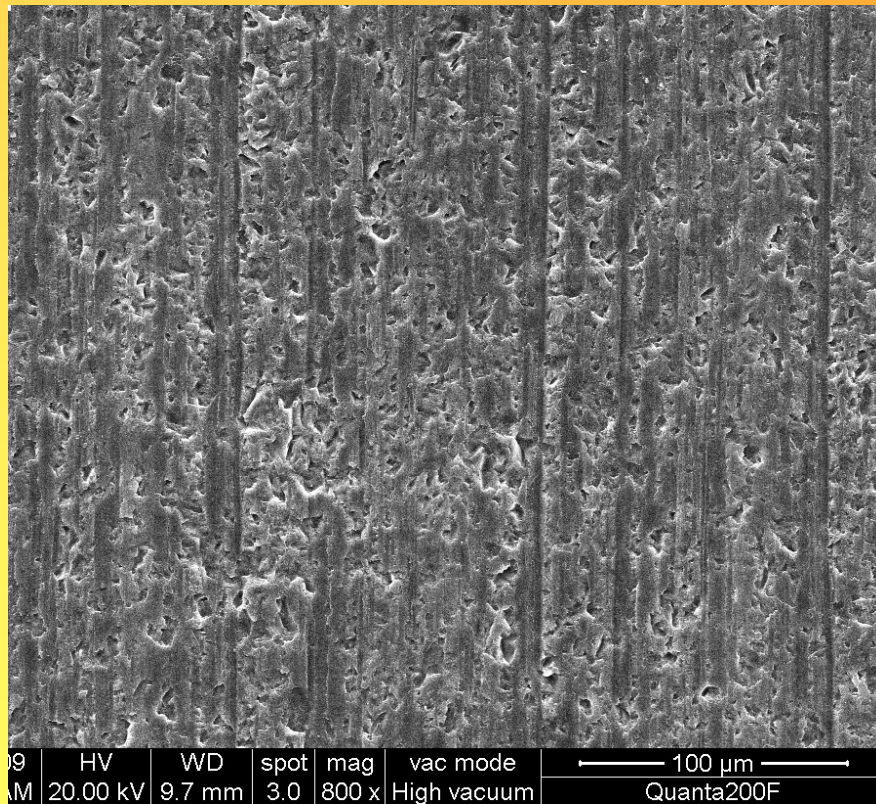
金刚石切割表面



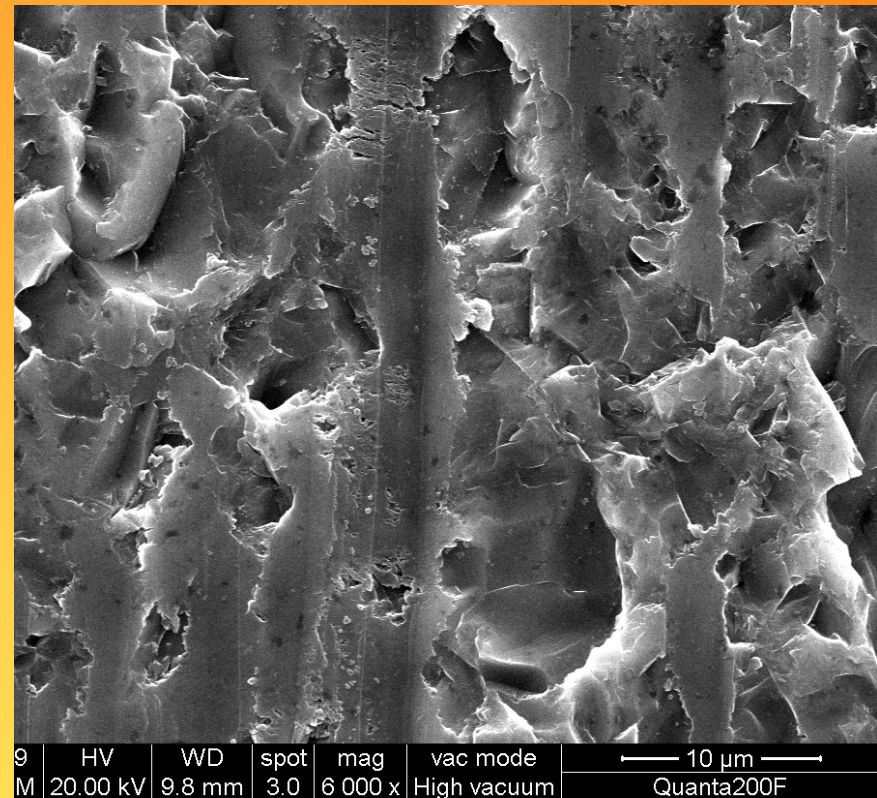
砂浆切割表面



强行增大切割速度（允许较大锯线下压力）...



低倍



高倍

👉 较大载荷切割时脆性崩脱比例增加 可使金刚石切割表面变得更像砂浆切割硅片！

# 切割机理

LZ et al, 26th EUSPV 2BV.4.28, 2011

## 金刚石切割:

金刚石颗粒在钢线驱压、拉动下随钢线运动刻划硅表面，使之主要以塑性方式被“铲起”，局部也发生脆性崩脱。

一形成由较为平滑的塑性犁痕和脆性崩坑组成的混合特征表面。

一切割速率较高（钢线对硅锯缝底部压力较大）时，脆性崩坑相对比例较大。

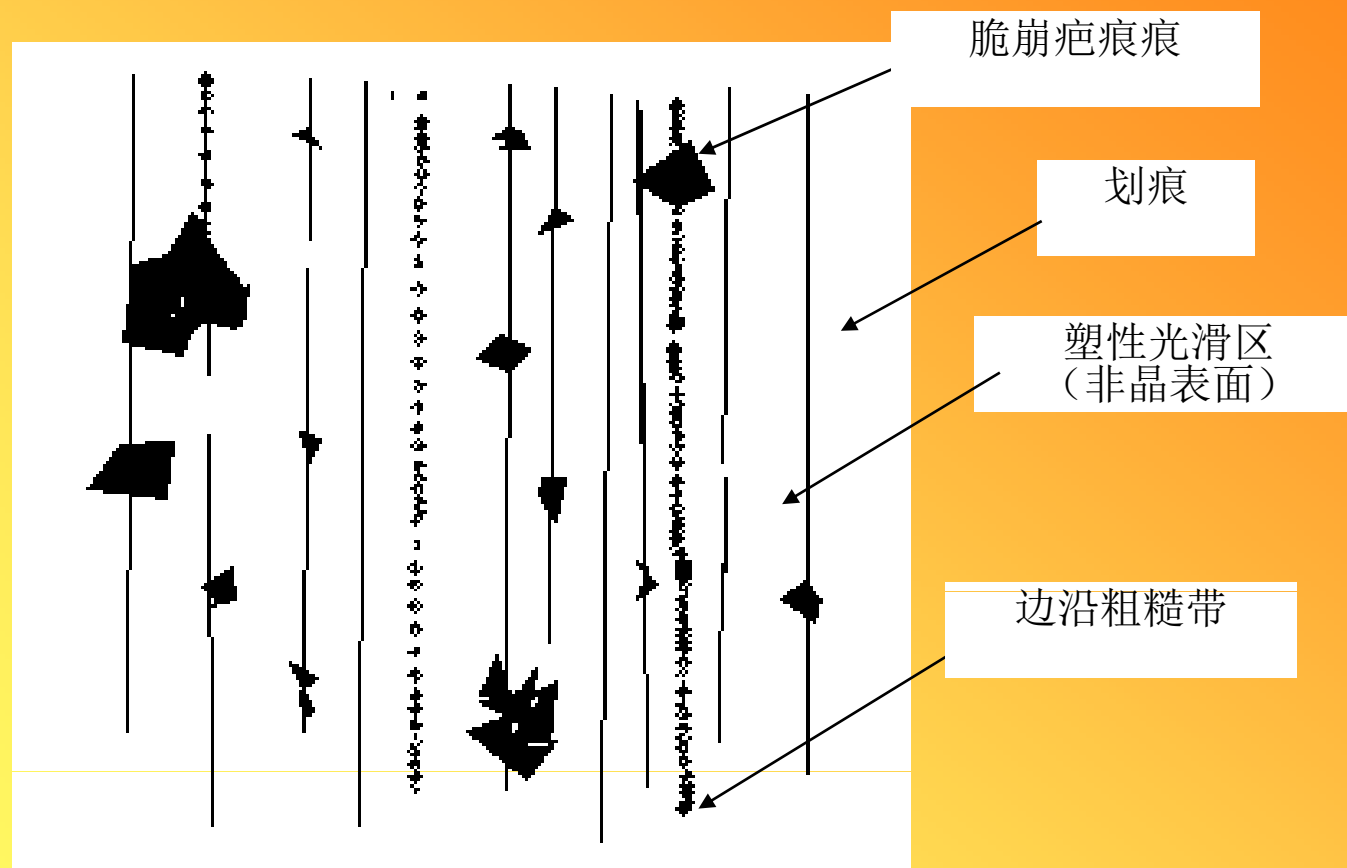
## 悬浮碳化硅砂浆切割:

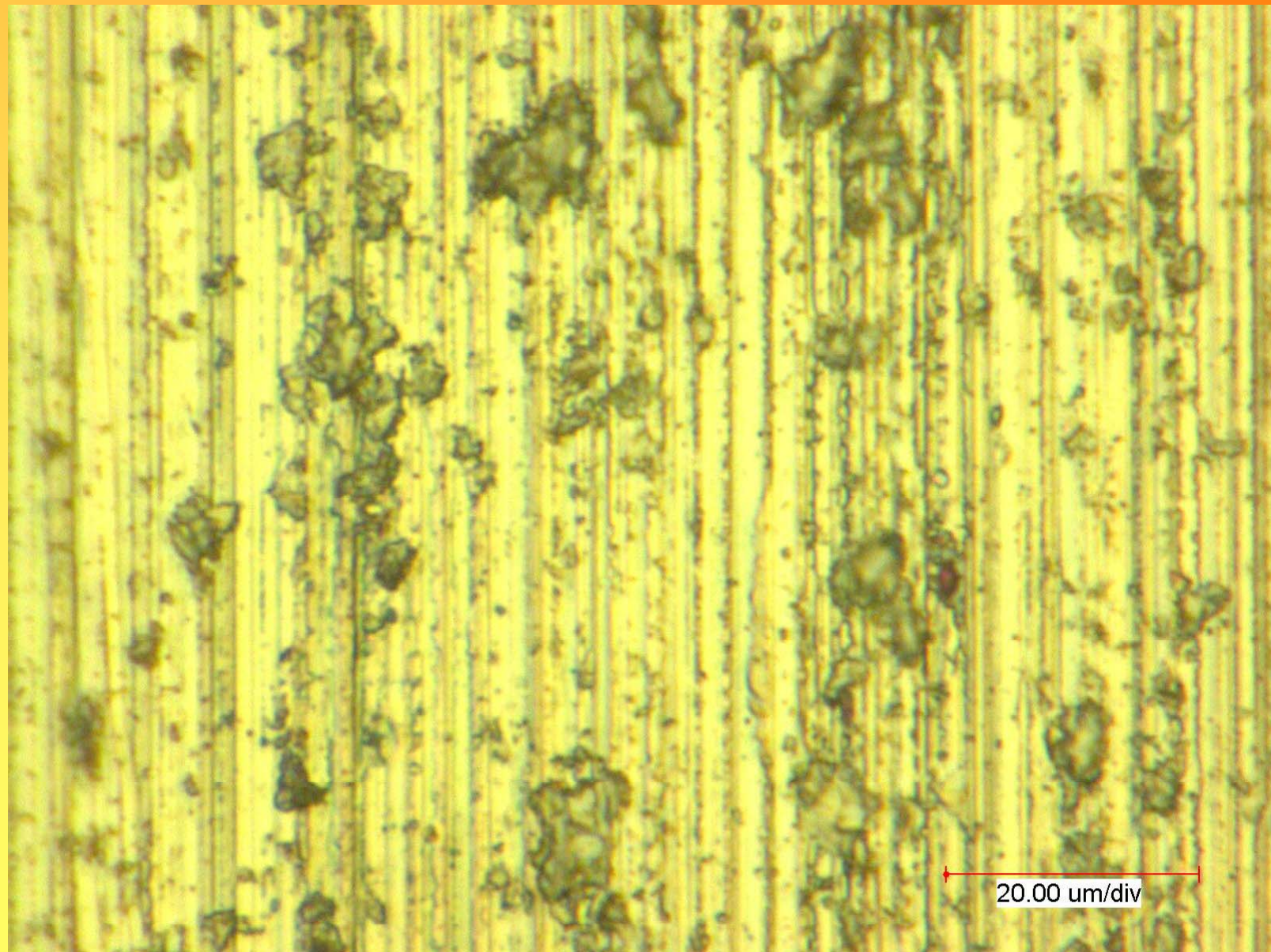
碳化硅颗粒在钢线驱压下不断滚压硅表面，使之不断发生脆性疲劳崩脱。

形成崩坑和微裂纹密布的表面和次表层。



# 金刚石切割硅表面性质示意图







# 报告提纲

- 金刚石切割硅片技术 背景与现状
- 金刚石切割多晶硅片面临的技术挑战
- 多晶硅“难切”问题初探
- 金刚石切割多晶硅片的制绒问题与应对研究
- 金刚石切割多晶硅片的断裂问题与应对研究





多晶硅普遍比单晶硅难切，在砂浆切割中也有反映。在金刚石切割中只是问题更突出。

原因？



## 基于上述机制来理解多晶硅之“难切”

- 晶体各向异性带来原因：

单晶切割时始终为垂直于 $\langle 001 \rangle$ 方向进行，从弹性模量看这个切割方向相对“软”；而多晶硅完全无此天然条件。

- 晶界对屈服滑移的阻碍造成阻力增加 “脆崩”比例增加

- 硬质夹杂（**SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>**）带来原因：

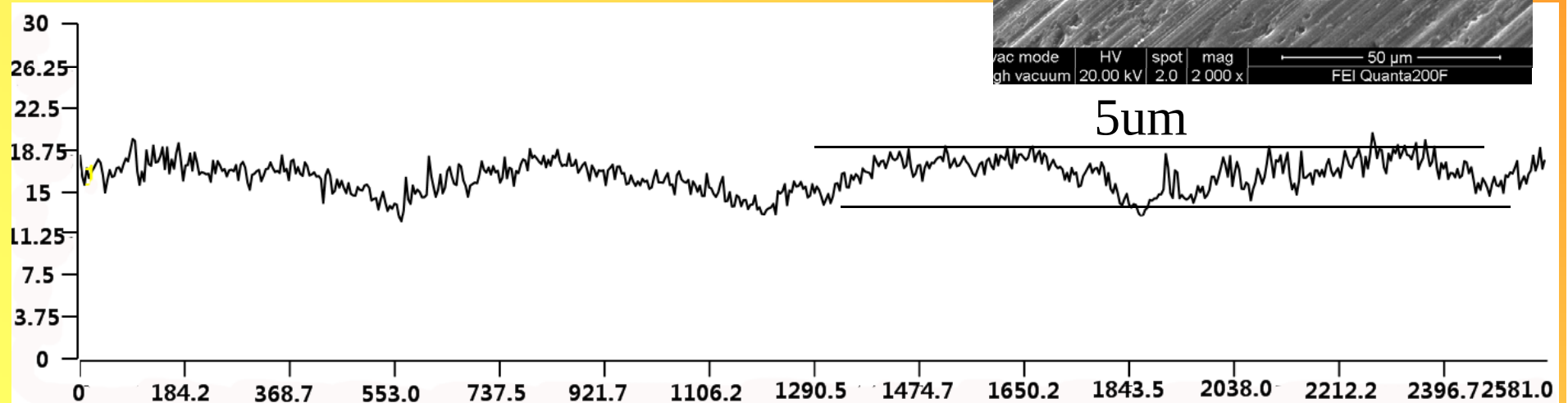
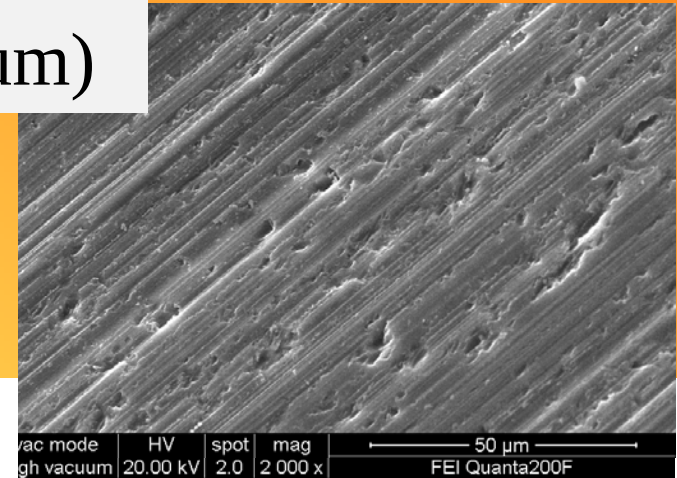
与单晶硅不同，多晶硅中会出现这两种夹杂。砂浆切割时碳化硅颗粒可能会“绕开”夹杂颗粒；而金刚石线锯切割则更可能切入夹杂或夹杂丛，陷入“困境”

- 均匀连续性（稳定性）原因：管子会比棒子难锯！

# 切割纹问题

重要性：销售部门最知道 — 外观端庄稳重很重要

两种尺度层次的纹：  
— 往复纹  
— 划痕（0.5~2  $\mu\text{m}$ ）





## 金刚石切割纹呈现原因

毫米级范围 仅**5  $\mu\text{m}$** 高的坡度为什么会这么“显眼”

— 余学功、杨德仁等曾以原子力显微镜发现砂浆切割硅片表面亦有一种周期为**0.2mm**的坡更高的宏观纹，但肉眼看不到

👉 同方向密排的光亮划痕起到了视觉增强作用！

“水涨船高”，往复纹坡面无理化性质差异，本身其实很难通过刻蚀消除，去掉**20  $\mu\text{m}$** 表面层也消不掉；但如去掉了划痕，往复纹就看不见了！— 而划痕峰谷是有差异的。

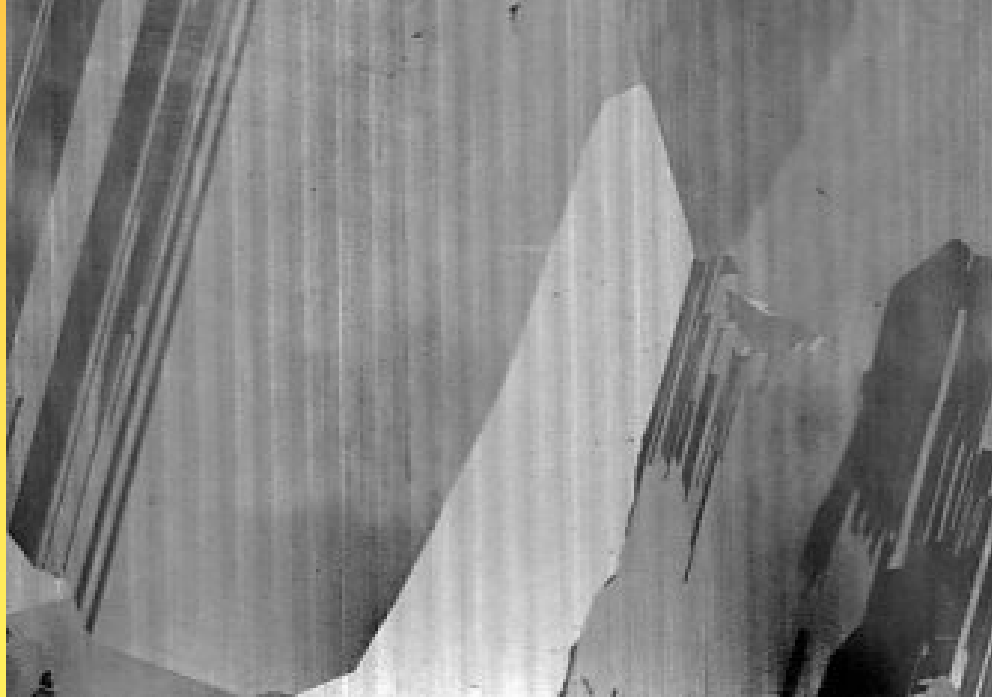




这两个酸性湿法制绒样品表面都去除了10  $\mu\text{m}$ 以上  
它们没有在微观上消掉划痕



# 碱性刻蚀



接近（001）位向的晶粒可以消除，其它不行



# 报告提纲

- 金刚石切割硅片技术 背景与现状
- 金刚石切割多晶硅片面临的技术挑战
- 多晶硅“难切”问题初探
- 金刚石切割多晶硅片的制绒问题与应对研究
- 金刚石切割多晶硅片的断裂问题与应对研究





现行生产上用的富硝酸配方的湿法制绒效果不行：

— 反射率偏高，

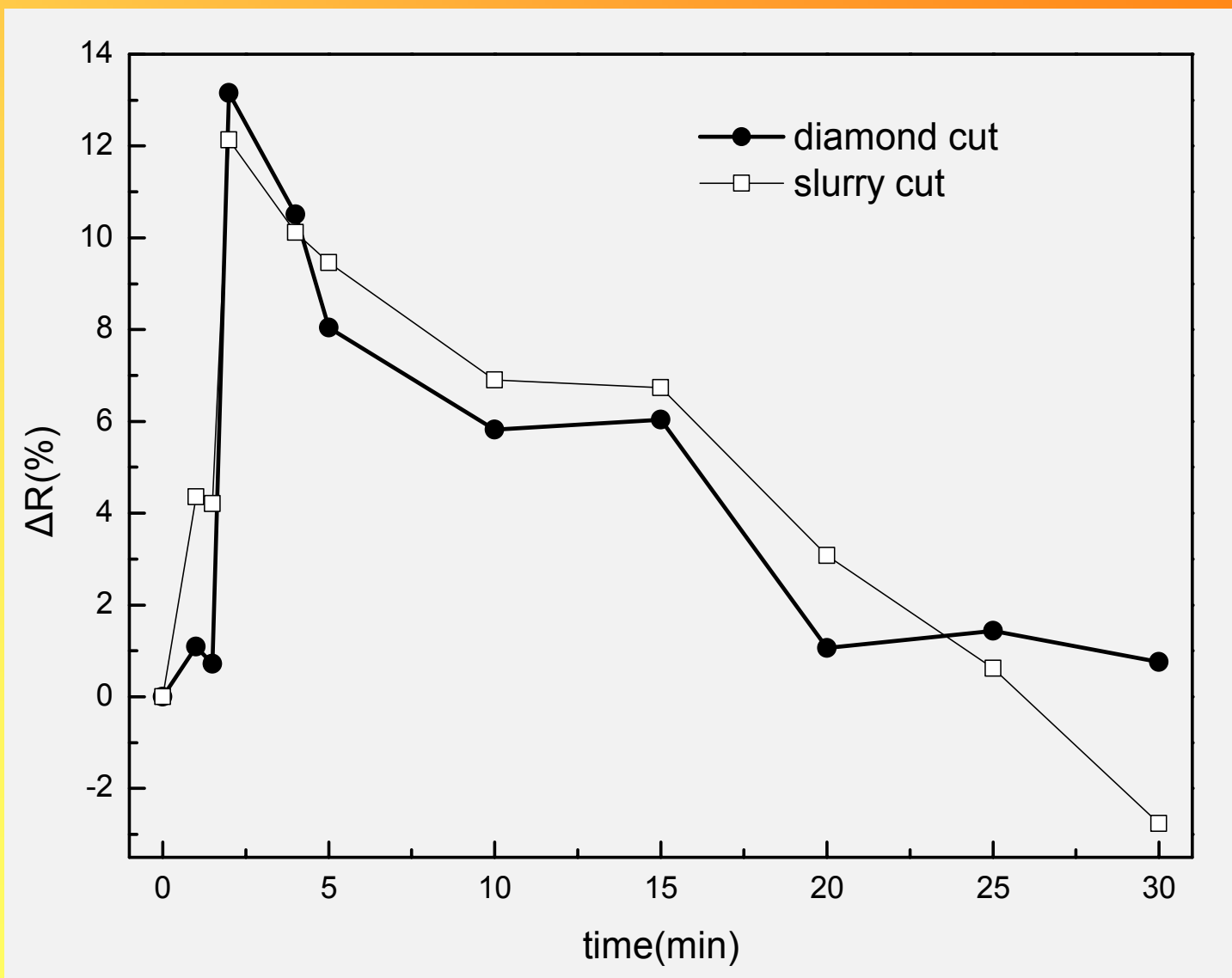
— 切割纹顽固

碱刻蚀预处理也不行

富HF配方效果。。。



## 富HF配方中酸性刻蚀减反射量 ( $\Delta R$ ) 随时间变化



与砂浆切割硅片规律颇似，但减反效果少1~2%



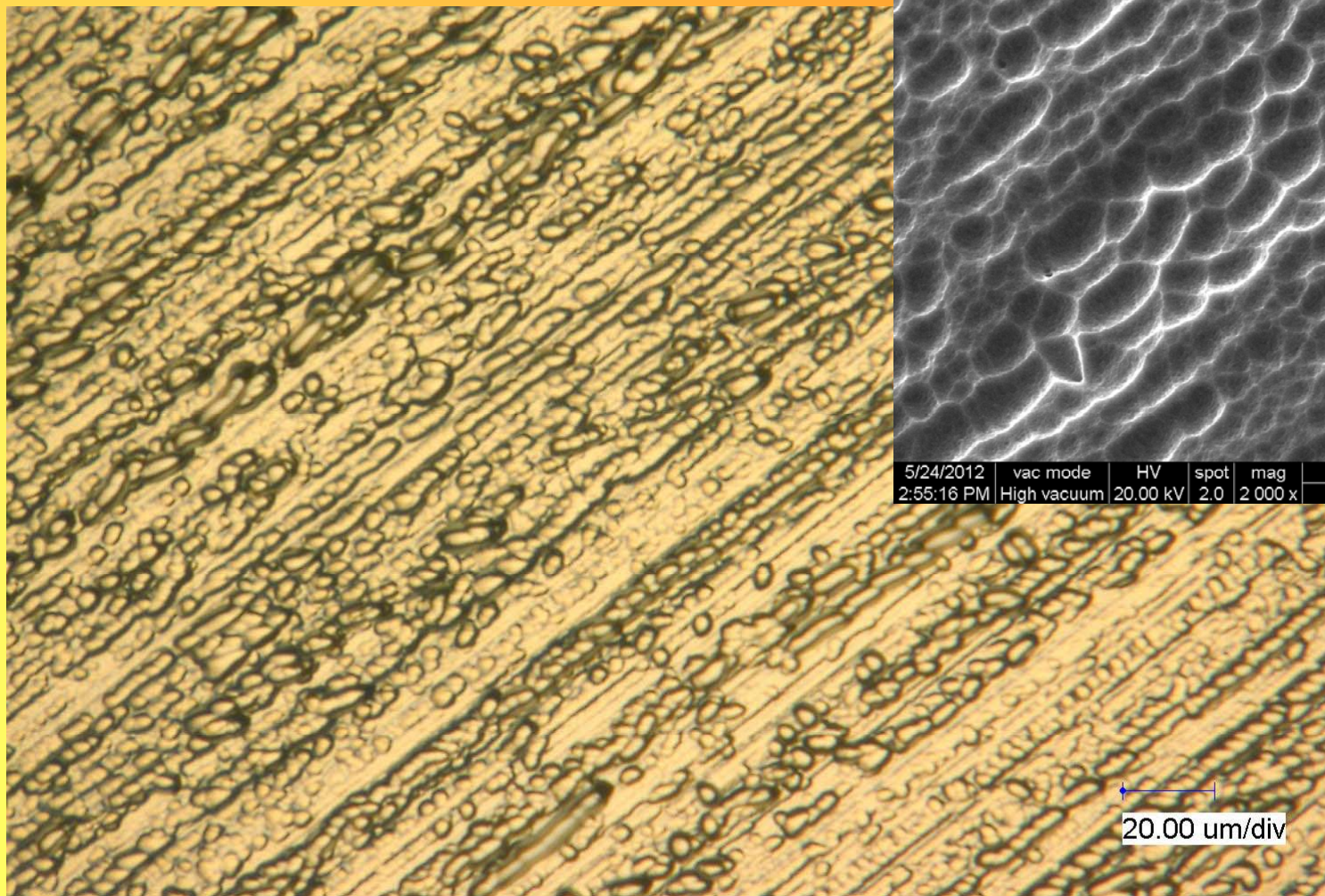
金刚石切割原片反射率本身高3~4%

→ 酸刻饰制绒后的两种硅片的差距就达到4~6%

X



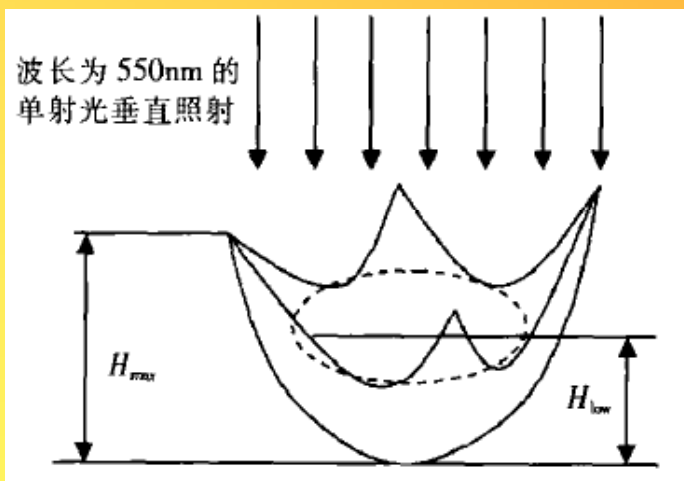
# 酸刻蚀后表面微观



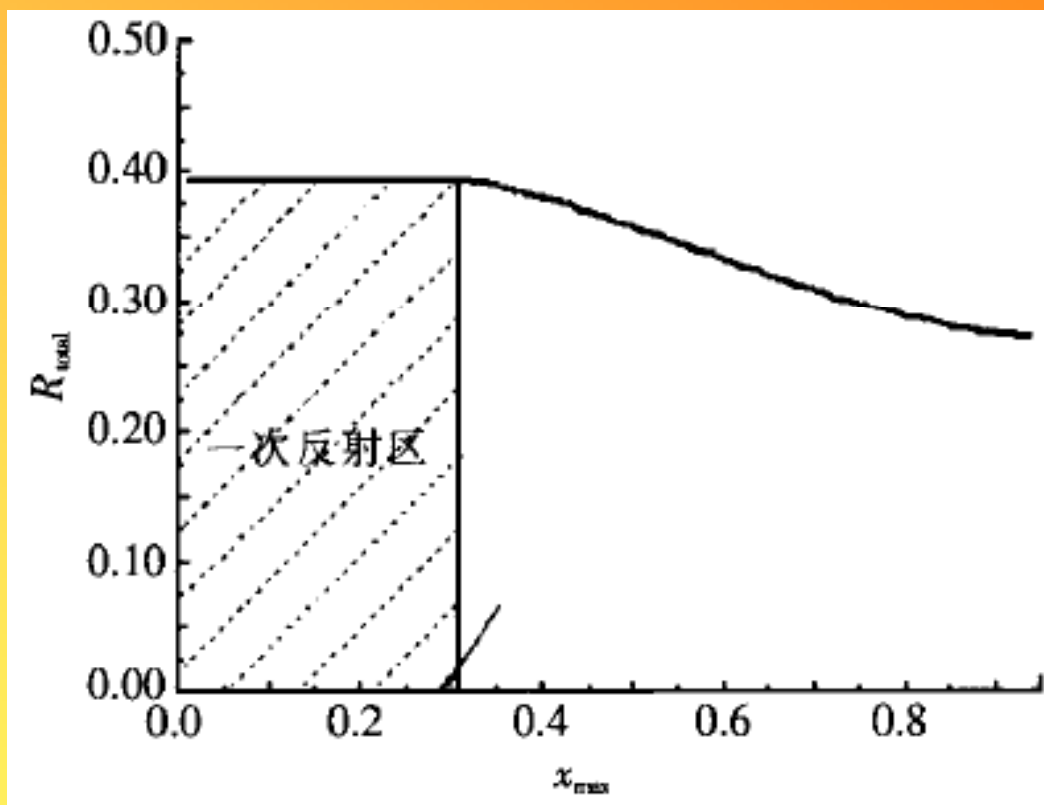
原因还在于这些光滑条带区域。。。。



滕繁，周浪等，太阳能学报，30（2009），1130



反射率vs. 深宽比



太浅的蚀坑没有减反效果



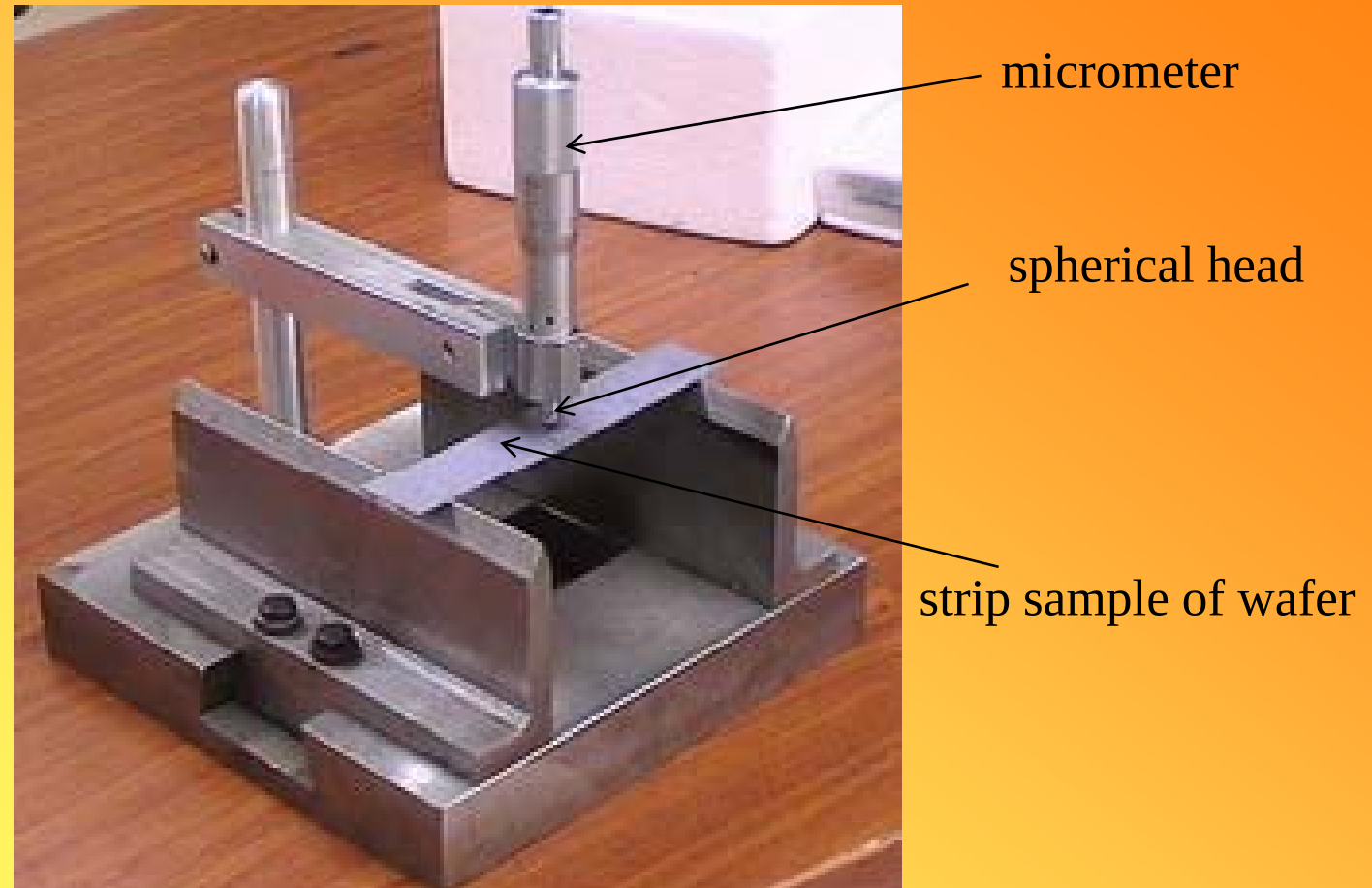


# 报告提纲

- 金刚石切割硅片技术 背景与现状
- 金刚石切割多晶硅片面临的技术挑战
- 多晶硅“难切”问题初探
- 金刚石切割多晶硅片的制绒问题与应对研究
- 金刚石切割多晶硅片的断裂问题与应对研究

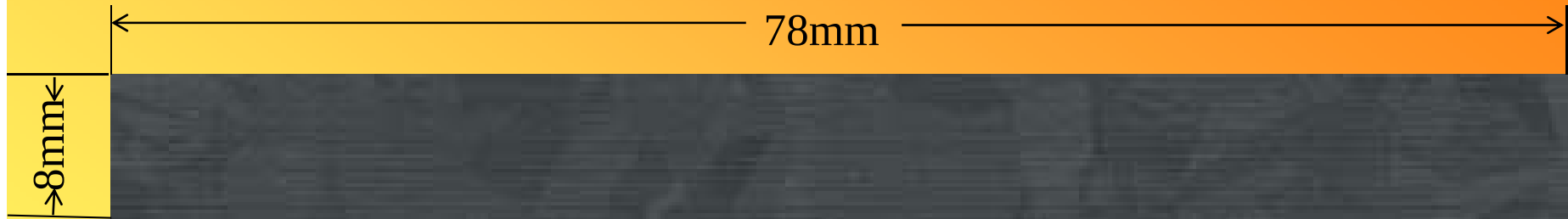


# Characterization of the fracture behavior



The 3-point bending tester

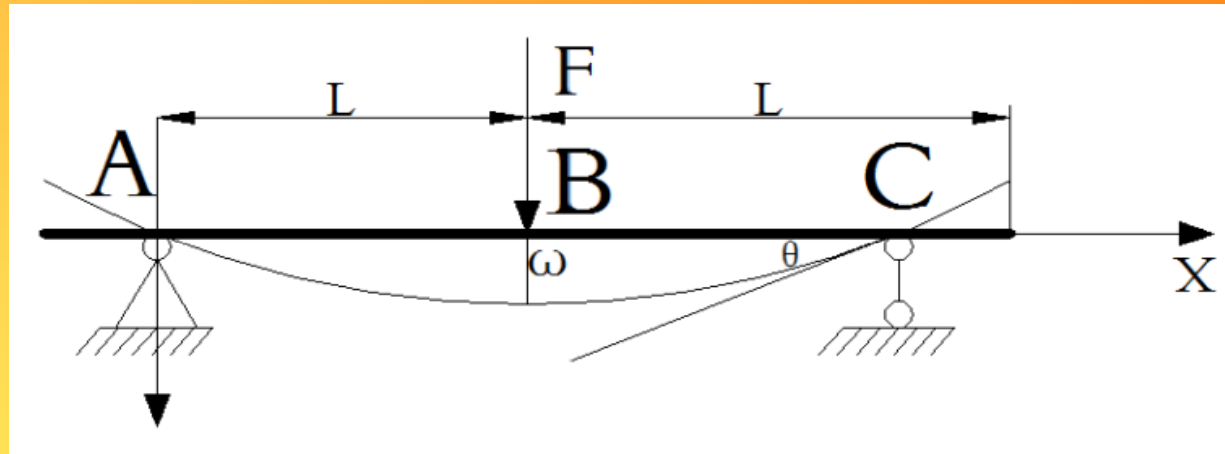
# Sample



Parallel Sample



Vertical Sample



## The simplified model of 3-point bending tester

At the moment the strip is bent to fracture, the maximum deflection can be read from the micrometer, and the critical bending strain can be obtained by:

$$\varepsilon_c = \frac{3t\omega_{\max}}{2L^2} \quad (t \text{ is the thickness of wafer})$$





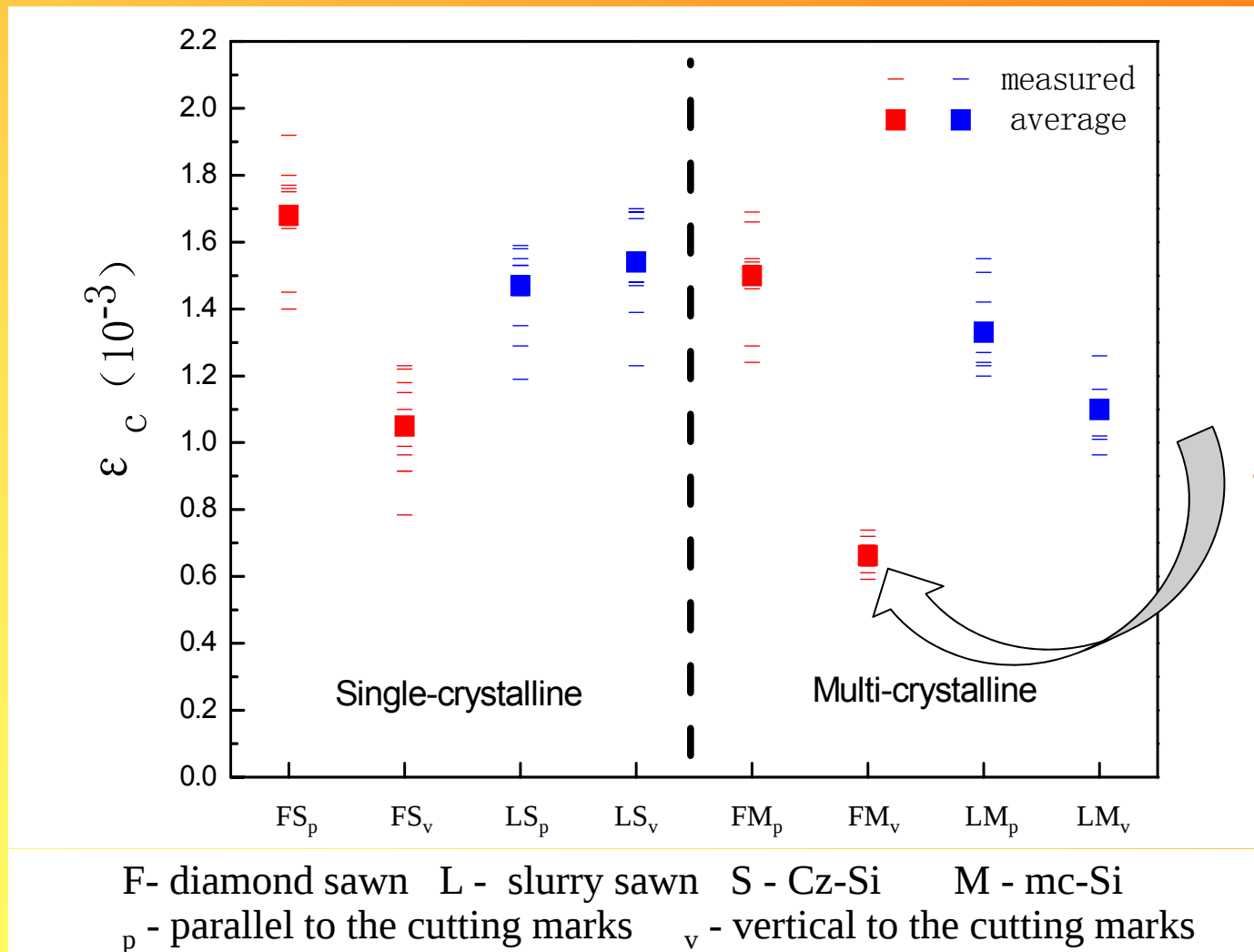
## Correlation between the $\mathcal{E}_c$ and the breakage rate of wafers in industry

|                 | Slurry sawn<br>Cz-Si wafers | Slurry sawn<br>mc-Si wafers |
|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| $\mathcal{E}_c$ | 0.15%                       | 0.11%                       |
| Breakage Rate   | 0.3-1.0%                    | 1.0-3.0%                    |

☞  $\mathcal{E}_c$  is a very effective parameter to characterize the fracture behavior of silicon wafers !



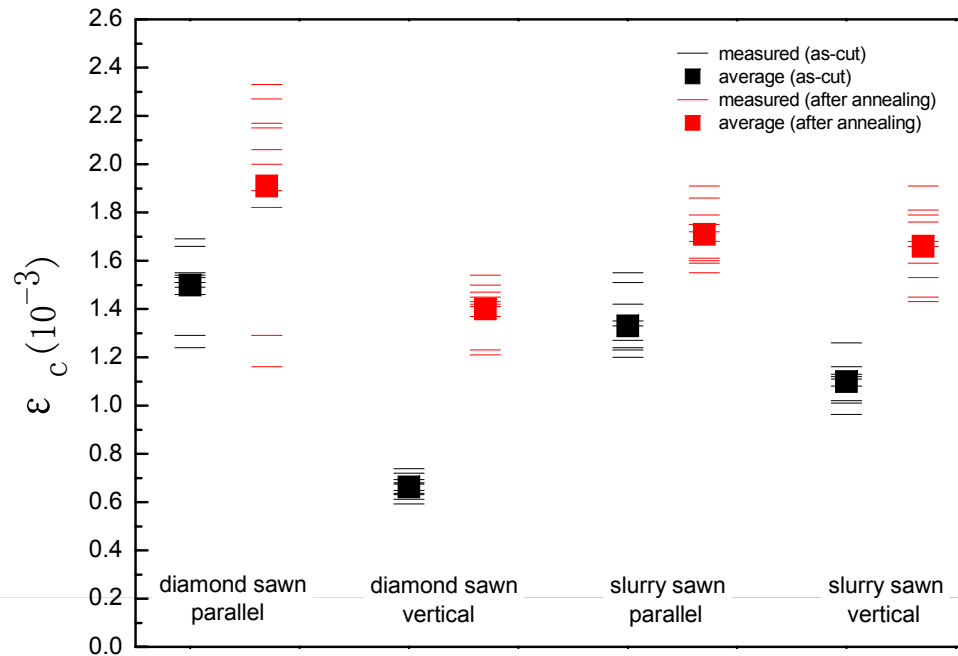
# $\epsilon_c$ of as-cut wafers



👉 In direction vertical to cutting marks, the diamond sawn wafers are remarkably weaker, especially for mc-Si wafers, which has the lowest  $\epsilon_c$ !



# Improvement by annealing

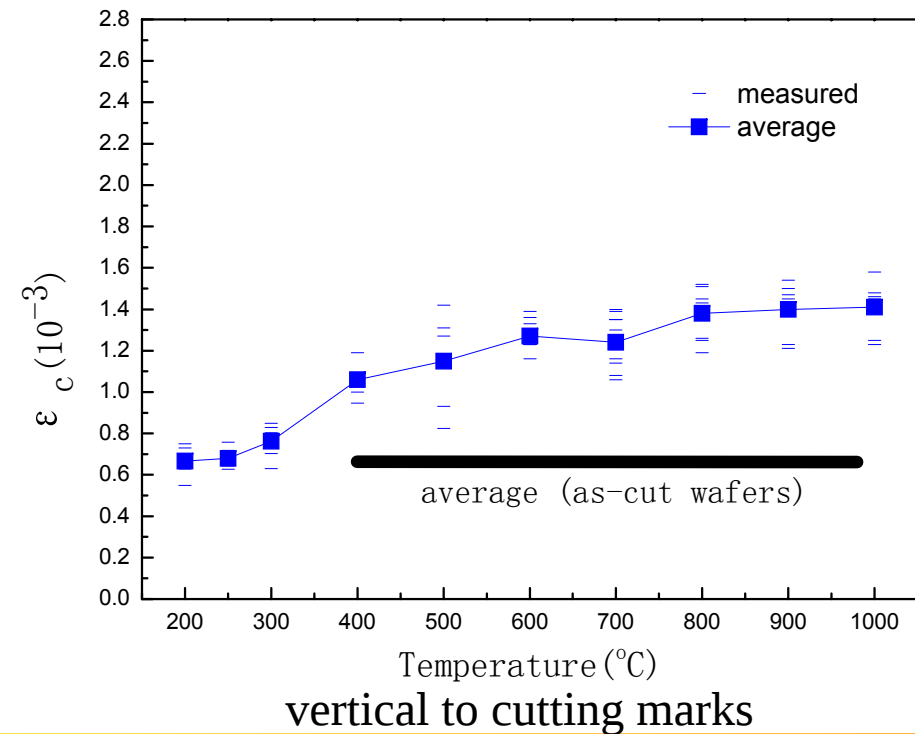
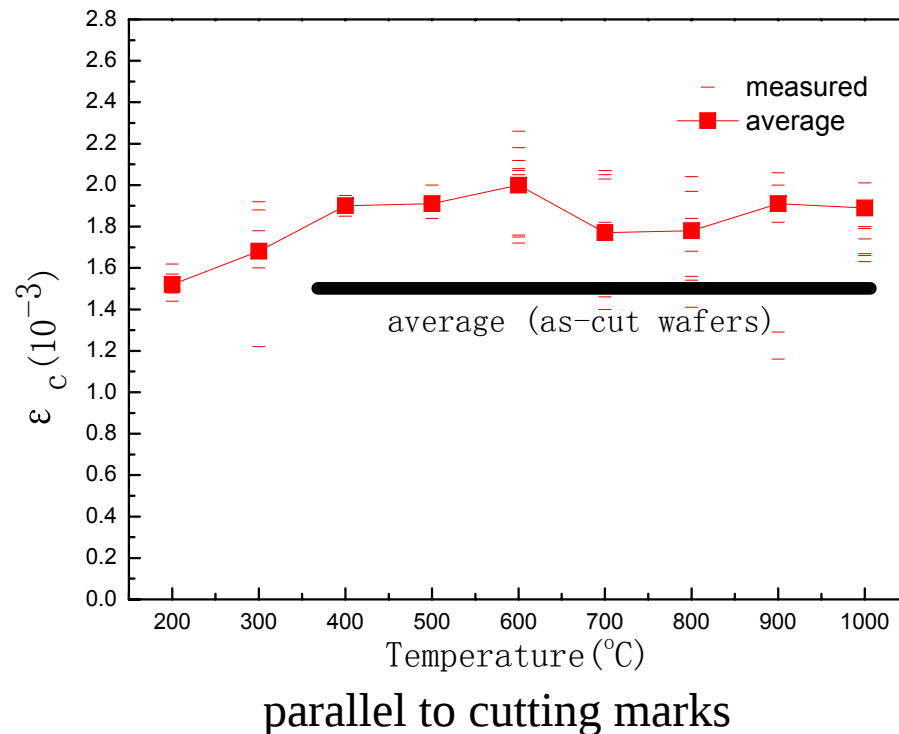


After 900°C/2hrs annealing, the critical strains of tow kinds of wafers raise, and diamond sawn mc-Si wafers are improved more.



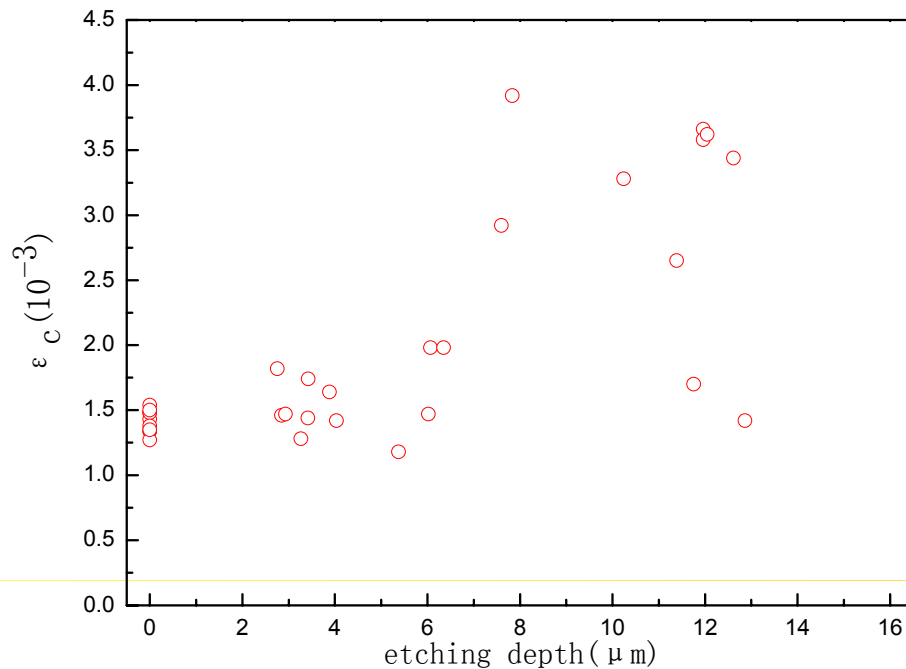
# Anneal of diamond sawn mc-Si wafers

## - Effect of temperature

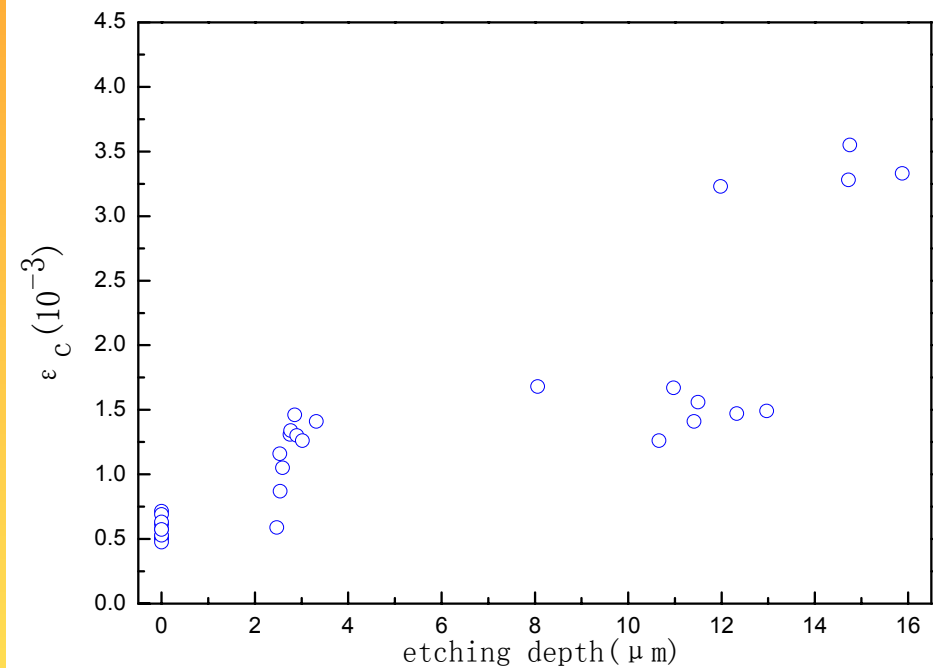


- By 2 hrs anneal at elevated temperatures, significant improvement in the critical strain can be achieved.
- As low as 400°C can be remarkably effective !
- More effective in direction vertical to cutting marks.

# Improvement of diamond sawn mc-Si wafers ——Chemical etching



Parallel to cutting marks



Vertical to cutting marks

Depth of removal  $\nearrow$   $\longrightarrow$   $\epsilon_c$   $\nearrow$

The damaged surface layer is responsible for the lower critical strain level in direction vertical to cutting marks.



# 结语

- 金刚石切割多晶硅片技术障碍能够克服
  - 制绒：增加一道简单浸渍预处理
  - 强度：低温退火
  - “难切”（耗线率高）：下调切割速率  
（反正比砂浆切割速率高！）需澄清原因，盼有类单晶切割情况作比较 — 它也应有较多夹杂！
- 成本？需给机会抵消：电池效率+0.1~0.2%；  
锯屑粉回收利用；更高产率；锯线降价.....





# 致谢

**Bekaert** 无偿赞助本研究，并提供金刚石切割多晶硅片（**156x156x0.18**）。藉此  
诚至谢意！





谢 谢 关 注

[lzhou@ncu.edu.cn](mailto:lzhou@ncu.edu.cn)

13065163492