



廈門大學
XIAMEN UNIVERSITY



电化学微纳加工

詹东平

dpzhan@xmu.edu.cn

厦门大学化学系



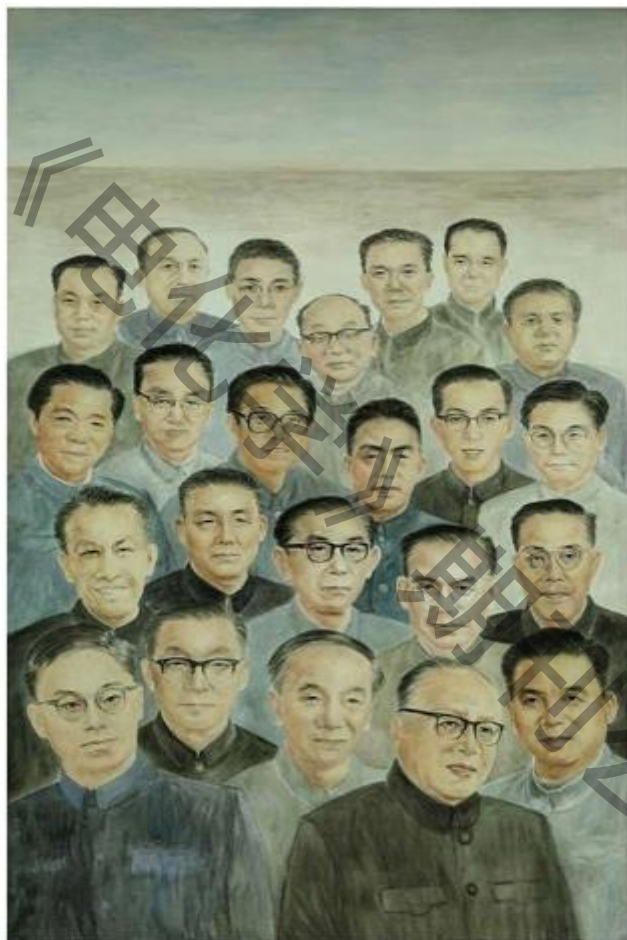
廈門大學化學化工學院
College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University



固体表面物理化学国家重点实验室
State Key Laboratory of Physical Chemistry of Solid Surfaces (Xiamen University)

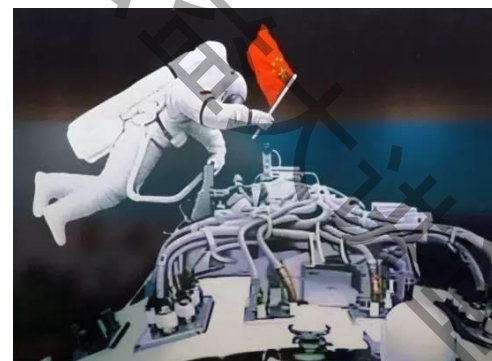
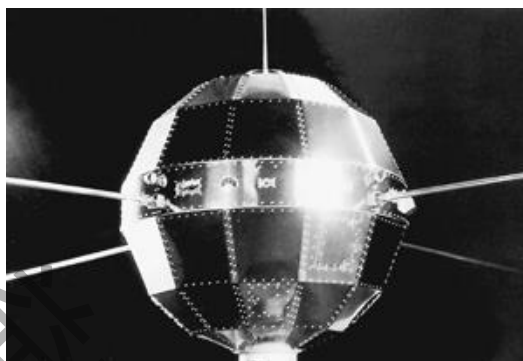
制造业是国家安全和国计民生的基石！

劳动创造了人本身！
——恩格斯



“两弹一星”元勋合影 315X215cm 水墨纸本 杨华

共和国“两弹一星”元勋



两弹一星、载人航天，不仅是国家安全和尊严，而且是国家科学技术和基础制造业综合实力的体现！

➤ 电化学加工技术简介

- ◆ 历史沿革和产业需求
- ◆ 减材制造：电解加工
- ◆ 增材制造：电铸加工
- ◆ 技术特点和不可替代性

➤ 电化学微纳加工技术

- ◆ 新兴重大产业需求和关键科学问题
- ◆ 三维微纳米结构功能结构的制造
- ◆ 超光滑表面的制造
- ◆ 约束刻蚀剂层技术

➤ 感言

电化学加工简介：历史沿革和产业需求

- 1833年，Faraday发表电解定律，催生了电解、电镀、冶金等电化学产业。
- 1838年，Jacoli在石膏母型上涂敷石蜡/石墨，实现了电铸铜。
- 1929年，Gusseff注册了第一个电化学加工的专利。
- 1941年，Burgess发表了第一篇电化学加工的研究论文。
- 1959年，Anocut Engineering Co. (USA)实现了电化学加工的商业化。



在**武器装备、航空航天、汽车、船舶、电子**等产业迅猛发展。

微纳加工或者超精密加工：**IC芯片、微纳机电系统、微纳器件、半导体产业**……

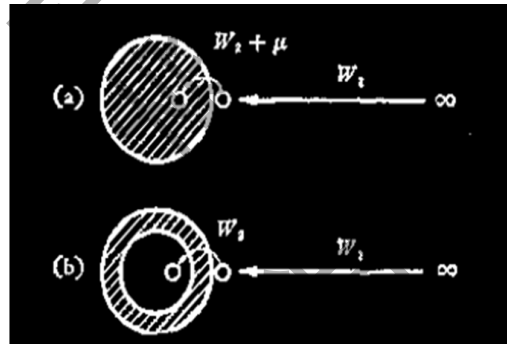
- 1970年代，大规模集成电路产业兴起，芯片制造的大马士革**电铸**工艺兴起。
- 1982年，德国科学家团队提出了**LIGA**工艺。
- 1992年，中国科学家田昭武院士提出了约束刻蚀剂层技术（**CELT**）。
- 1995年，美籍华人科学家Chou提出了纳米压印技术（**NIL**）。
- 1999年，美国科学家Cohen提出了**EFAB**技术。
- 2000年，德国科学家Schuster提出了超短电压脉冲技术（**USVP**）。
- 2006年，美籍华人科学家Yu提出了扫描微电解池技术。

电化学反应的基本原理

电化学： 研究电能和化学能之间相互转换的科学。

电化学势： 电化学反应的驱动力。

金属电极过程： 金属的阴极电沉积、阳极溶解和腐蚀等反应。



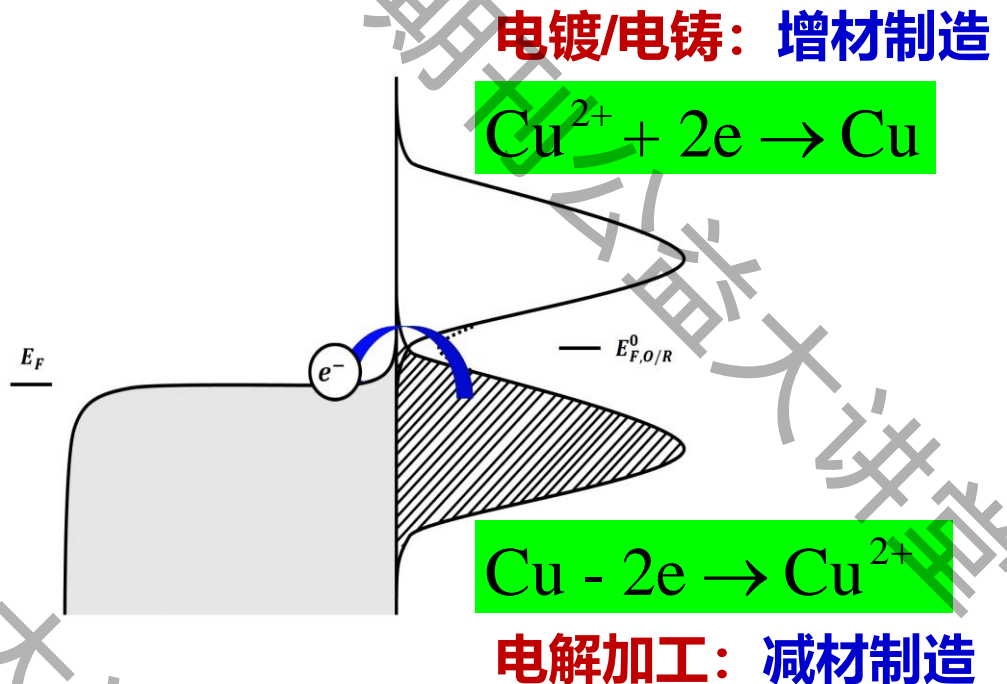
$$\bar{\mu} = \mu + ze_0\phi = \mu + ze_0(\psi + \lambda)$$

Chemical

Electric

化学

物理



控制电极电势，即可控制反应进行的方向和速率

电化学加工技术

减材制造，自上而下

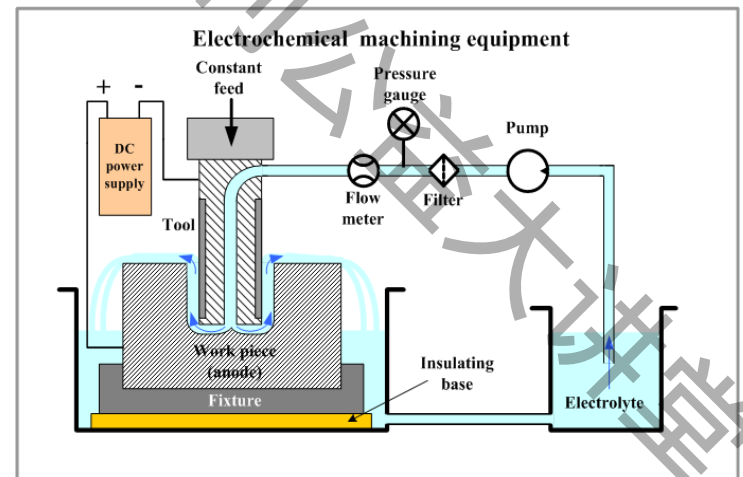
- 电解（金属）
- 腐蚀（金属、半导体）
- 电化学诱导化学刻蚀（不限）

增材制造，自下而上

- 电铸（金属）
- 电聚合（聚合物）

传统
电化学加工

微纳
电化学加工



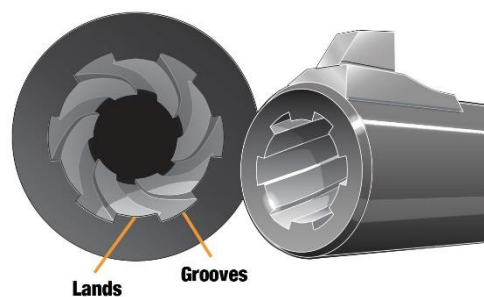
电解加工设备的主体：
电化学反应体系

减材制造：基于阳极溶解原理的电解加工

电解加工在异形加工制造领域具有不可替代性！

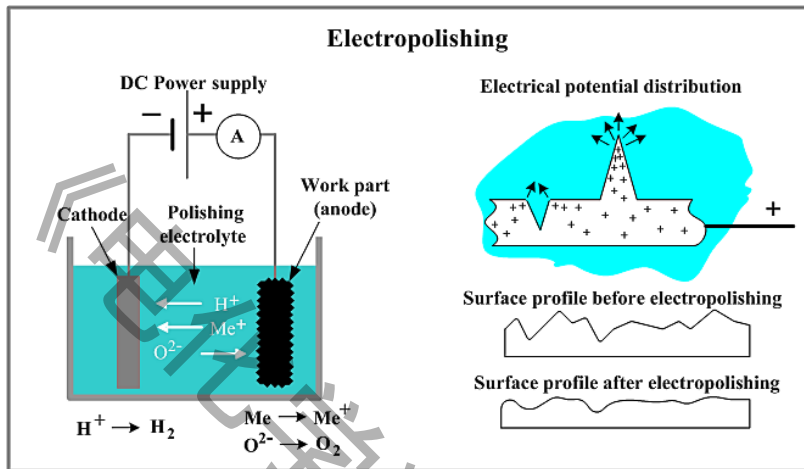


电解加工现场图

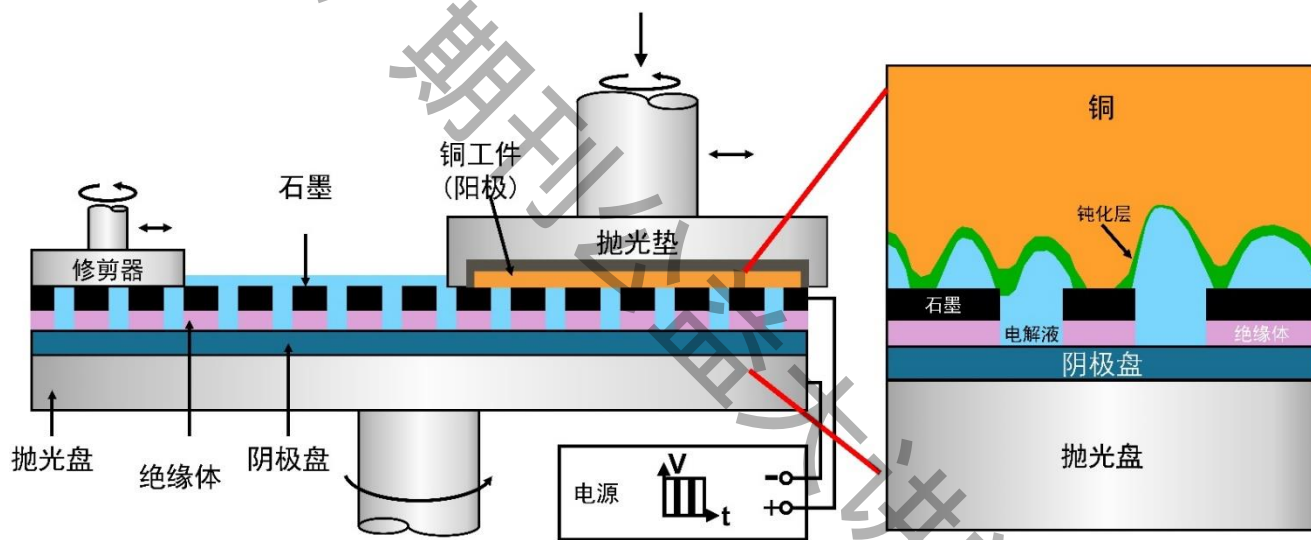


发动机叶片、冷却孔、腔体膛线

减材制造：基于阳极溶解原理的电解抛光



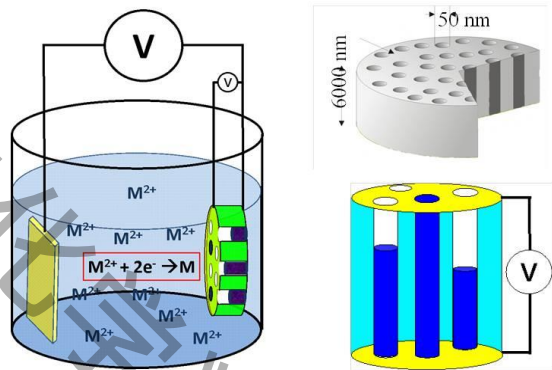
电解抛光 (~50 nm的表面粗糙度)



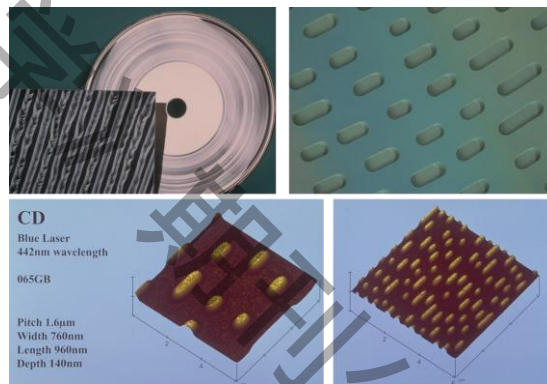
电化学机械抛光 (亚纳米级的表面粗糙度)

增材制造：基于金属电沉积原理的电铸/电镀

电铸是金属构件模具成形的重要技术！



电铸的模具成形原理



光盘碟片上的微结构

电镀是表面工程和原位修复的重要技术！



涡轮发动机的原位电刷镀修复



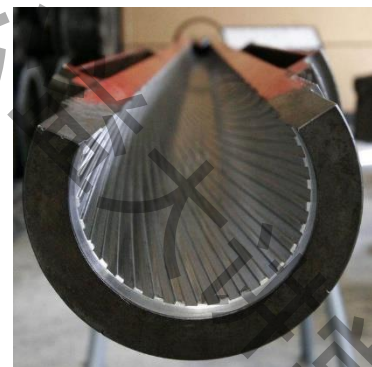
坦克履带的原位电刷镀修复

技术特点及其不可替代性

| | 机械加工 | 电化学加工 |
|------------|-------|----------|
| 去除原理 | 机械剪切力 | 电化学及偶联反应 |
| 工具/工件接触 | YES | NO |
| 工具磨损 | YES | NO |
| 残余应力 | YES | NO |
| 热效应 | YES | NO |
| 表面/亚表层损伤 | YES | NO |
| 逐点加工 | YES | YES |
| 整体成形 | NO | YES |
| 硬质、柔性或脆性材料 | NO | YES |
| 异形结构、腔体结构 | NO | YES |



航空发动机整体叶片



枪炮的膛线

电化学加工的技术优势，奠定了其在**国防军工**、**航空航天**、**船舶**和**汽车**制造业不可替代的地位！

➤ 电化学加工技术简介

- ◆ 历史沿革和产业需求
- ◆ 减材制造：电解加工
- ◆ 增材制造：电铸加工
- ◆ 技术特点和不可替代性

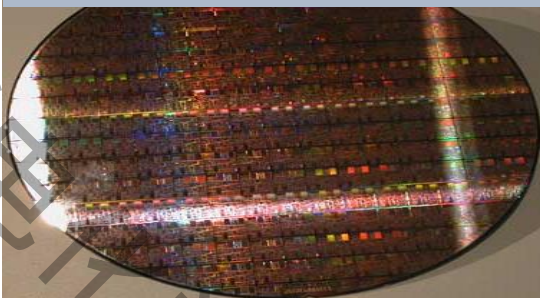
➤ 电化学微纳加工技术

- ◆ 重大产业需求和关键科学问题
- ◆ 三维微纳米结构功能结构的制造
- ◆ 超光滑表面的制造
- ◆ 约束刻蚀剂层技术

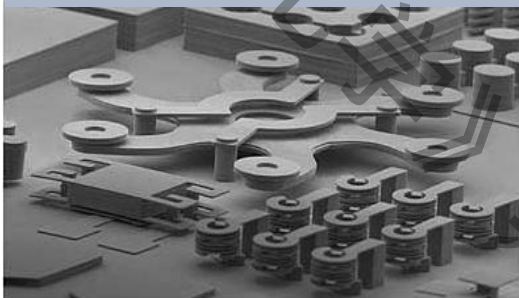
➤ 感言

新兴高科技产业的重要需求： 三维微纳米功能结构

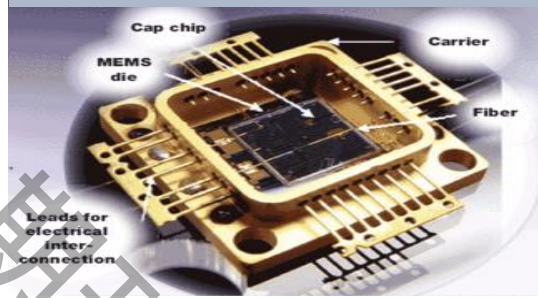
集成电路芯片



微机电系统



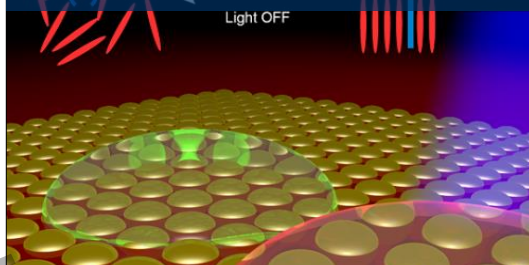
微光机电系统



光伏发电



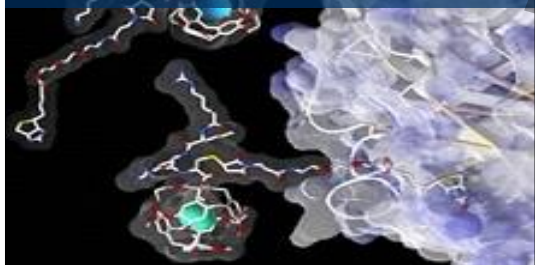
表面等离子体光子学



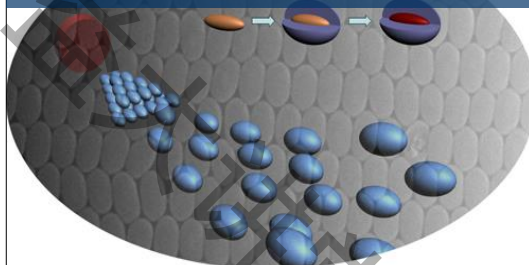
RFID芯片



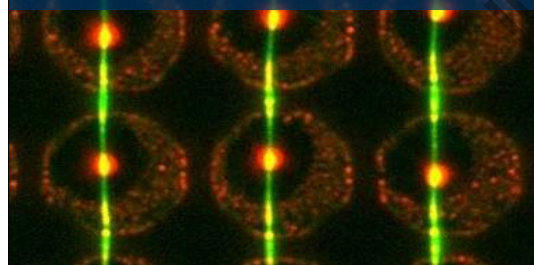
生物传感器



光子晶体

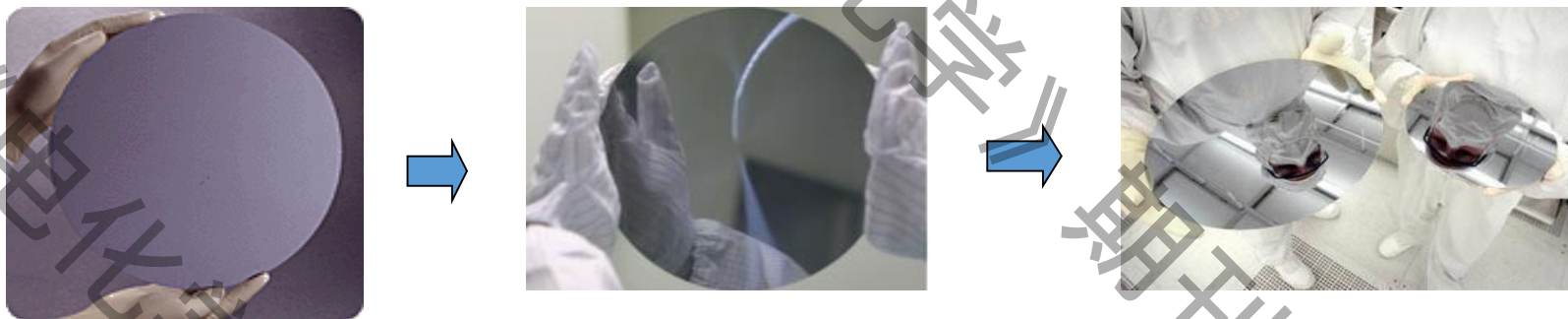


微诊断器件

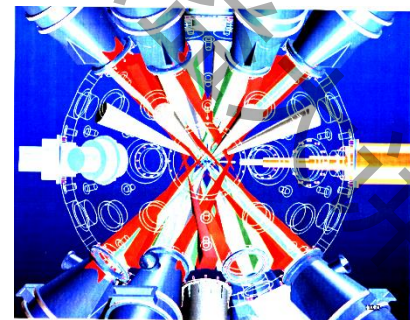
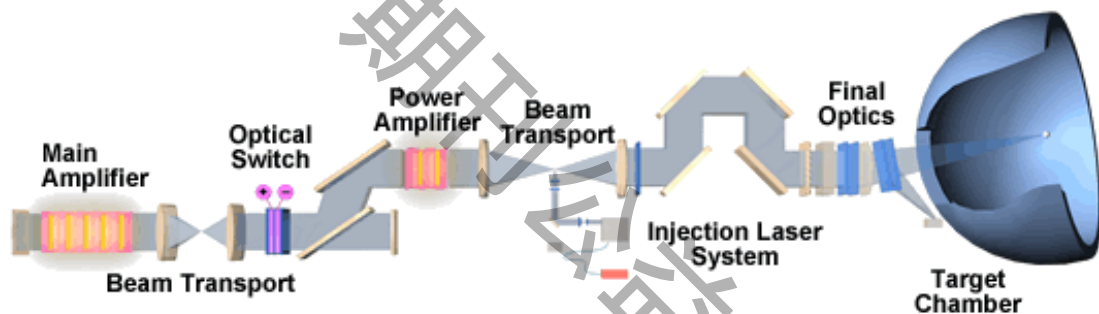


微纳加工的重大战略需求：超光滑表面

例1：半导体晶圆的减薄和抛光



例2：光学元器件的表面抛光



核聚变装置（国家点火工程）

**发展具有独立知识产权的微/纳米制造技术
对于维护国家战略安全和提升国家整体制造技术水平至关重要！**

电化学微纳加工的关键科学问题

限域电化学反应

电化学加工进军微纳制造领域，需要解决的关键科学问题就是将电化学反应“限域”在微纳米尺度。

| | 策略 | 技术 |
|------|---------|----------|
| 物理限域 | 电化学微纳体系 | 超短电势脉冲 |
| | | 扫描微纳电解池 |
| 几何限域 | 微纳空间限域 | LIGA |
| | | EFAB |
| 化学限域 | 偶联电极过程 | 约束刻蚀剂层技术 |

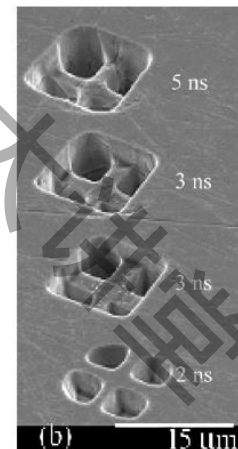
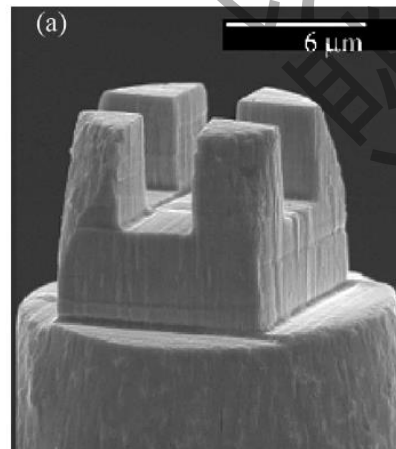
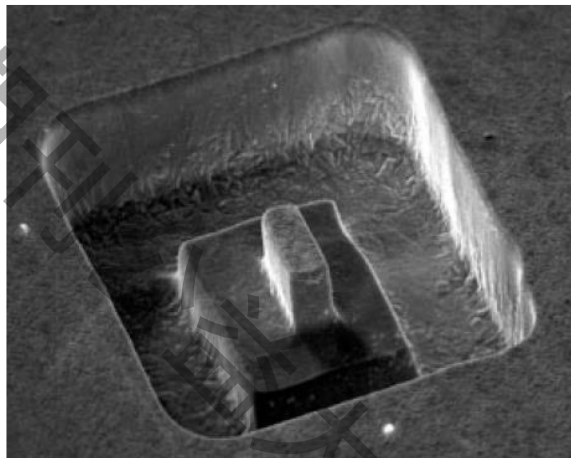
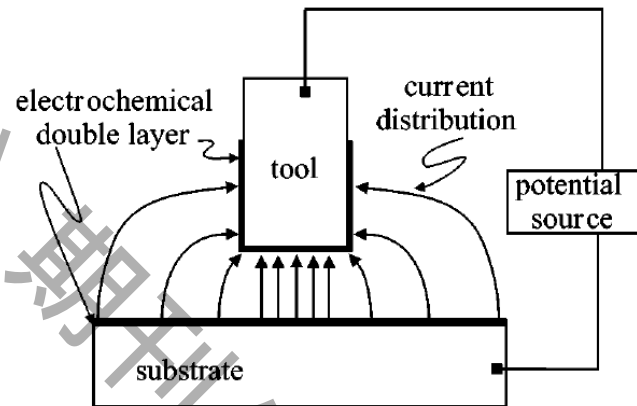
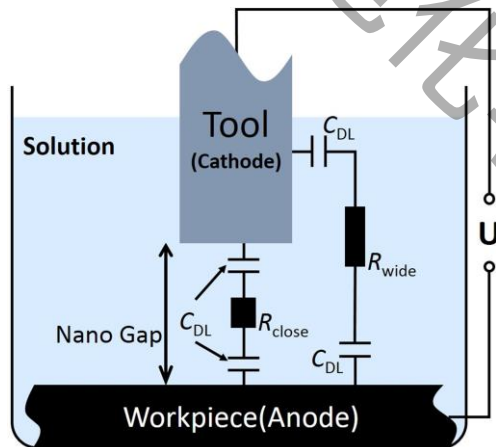
电化学微纳体系：超快电势脉冲技术（微纳电极）

电化学反应的
时间的分辨率

$$\tau = RC$$

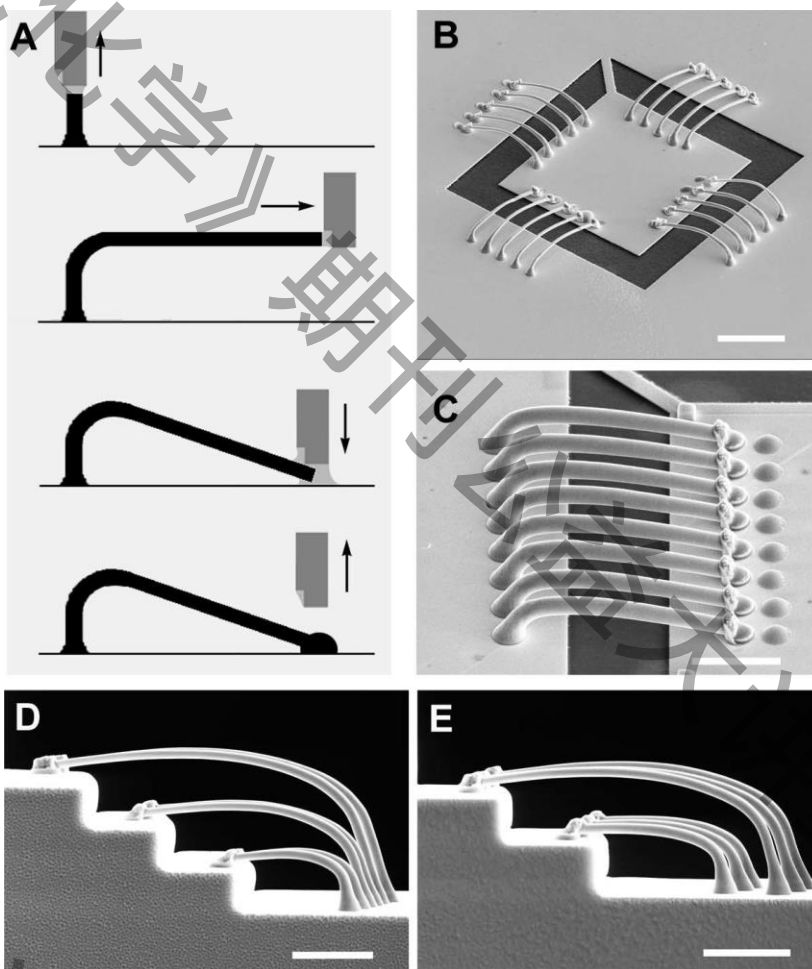
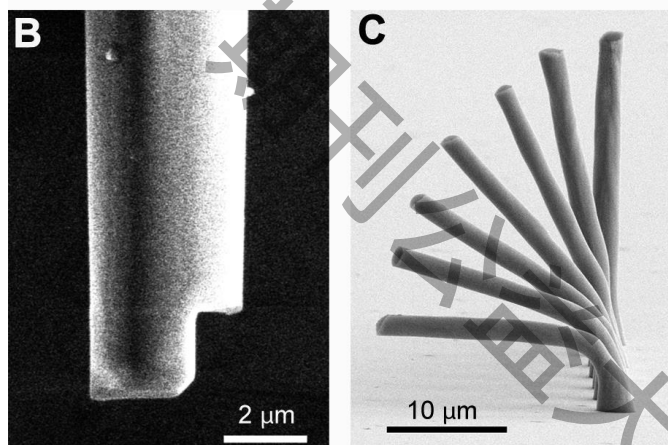
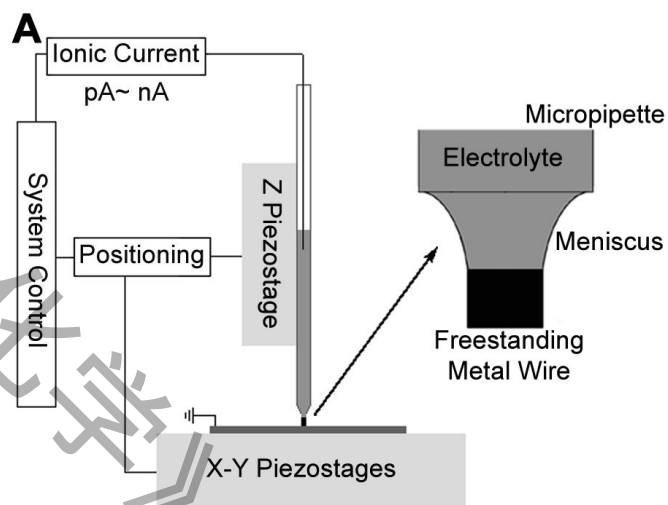
- 纳秒级的脉冲
- 电化学滤波
- 有效控制反应发生的区域

Schuster, et al,
Science 289 (2000) 98



南京航空航天大学在这一领域开展了卓有成效的工作，所发展的阵列式工具电极，大幅度提高了加工效率。

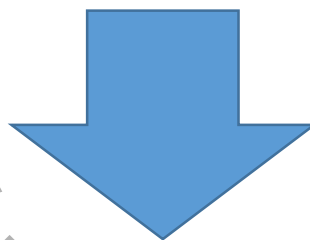
电化学微纳体系：扫描微纳电解池



Yu, et al, *Science* 2010, 329, 313

电化学微纳体系 “限域” 的技术特点

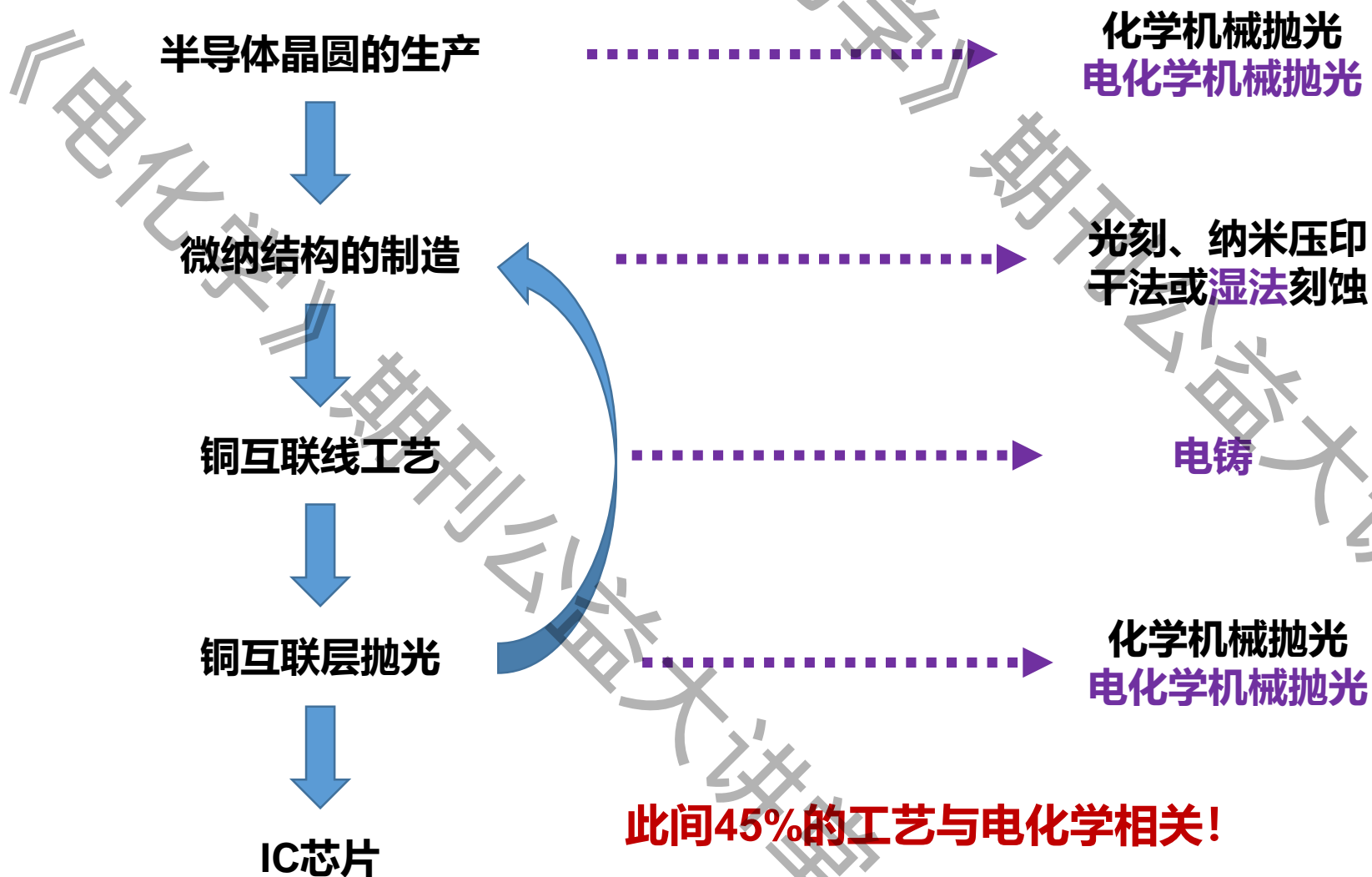
- 1 本质上是基于扫描探针电化学技术的直写方法
EC-AFM、EC-STM、SECM、SECCM
- 2 加工精度取决于程序化轨迹运动和电化学反应速率的匹配性
程序化轨迹运动、运动精度、反馈机制、反应速率
- 3 加工效率低，适合个性化制作，不适合批量制造
微纳器件的基本特征：微结构、大面积



采用微纳结构空间限域，发展模板成形方法！

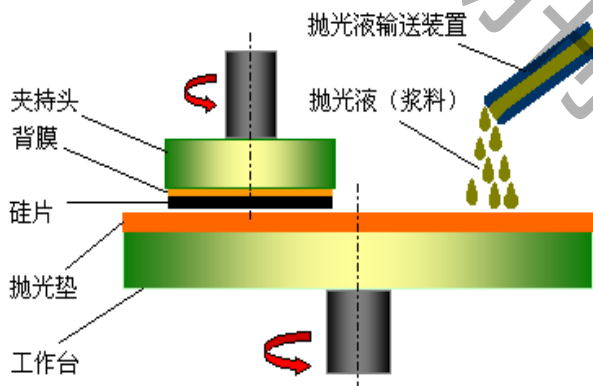
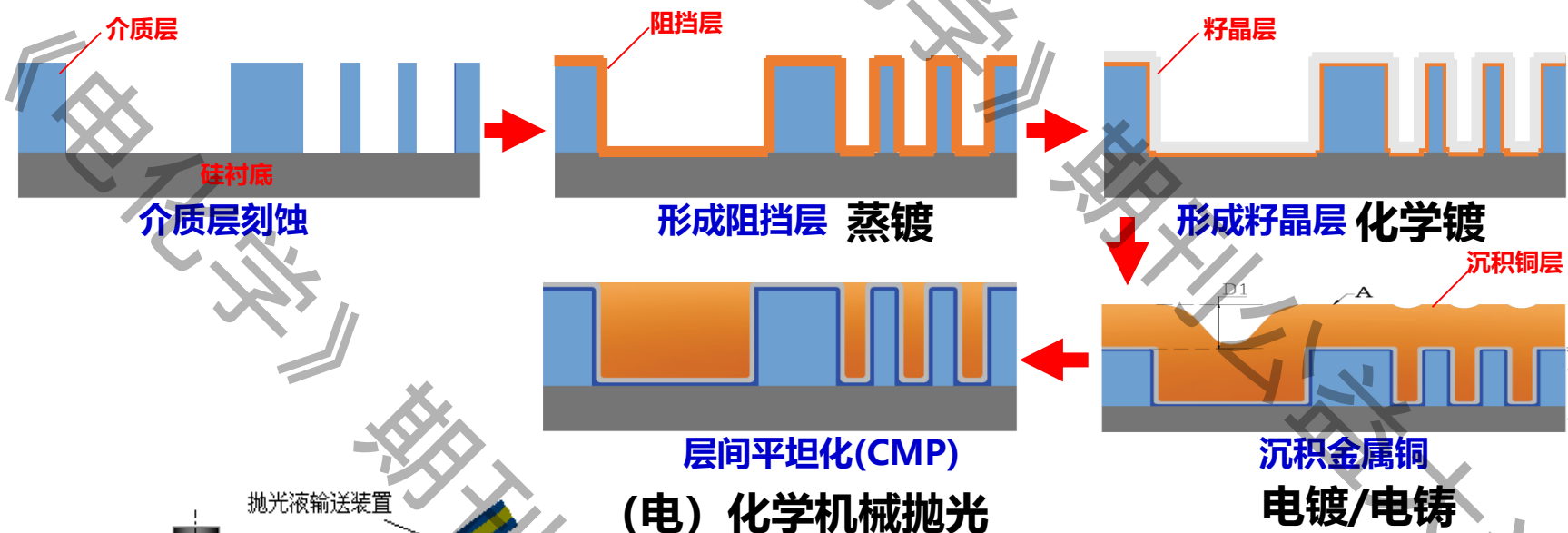
微纳空间限域的模板成型技术

半导体产业及超大集成规模电路产业的重要性不言而喻，中兴、华为事件已经给我们敲响了警钟！



微纳空间限域：IC芯片中Cu互联线的电镀/电铸

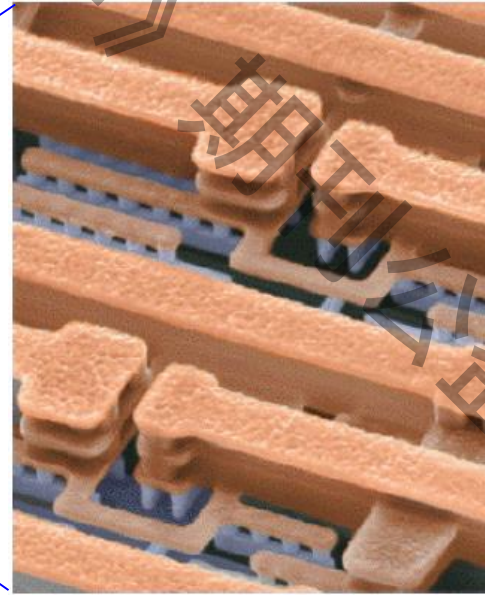
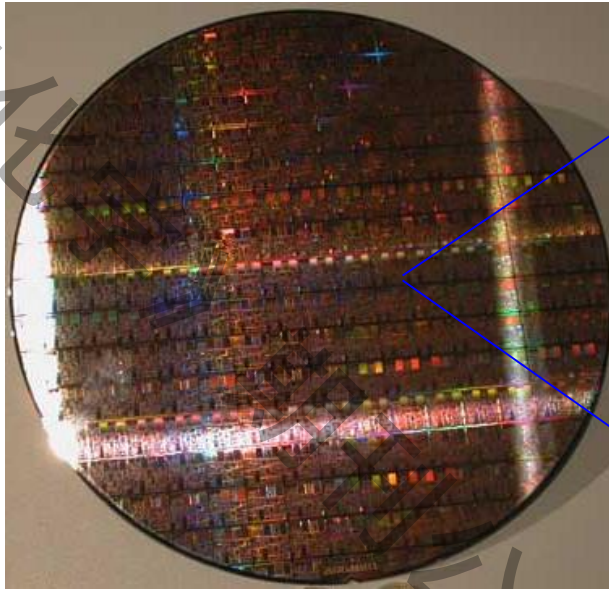
互连结构制造的主流工艺——大马士革(Damascene)工艺



(电) 化学机械抛光(CMP)原理

- 随着互连层数的增大，CMP使用次数不断增大
- CMP效率已成为影响IC芯片成本的重要因素

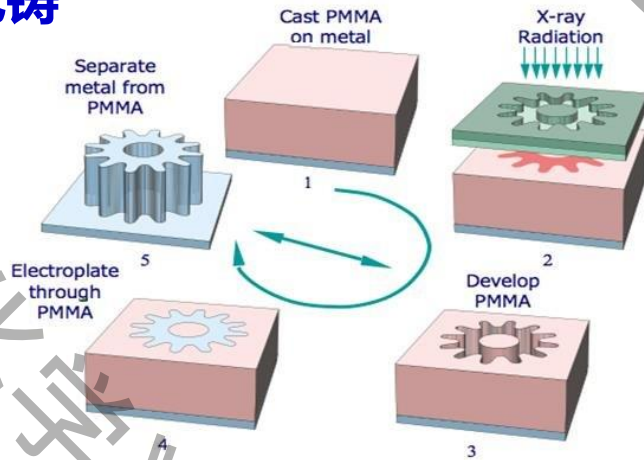
微纳空间限域：IC芯片中的Cu互联线电铸工艺



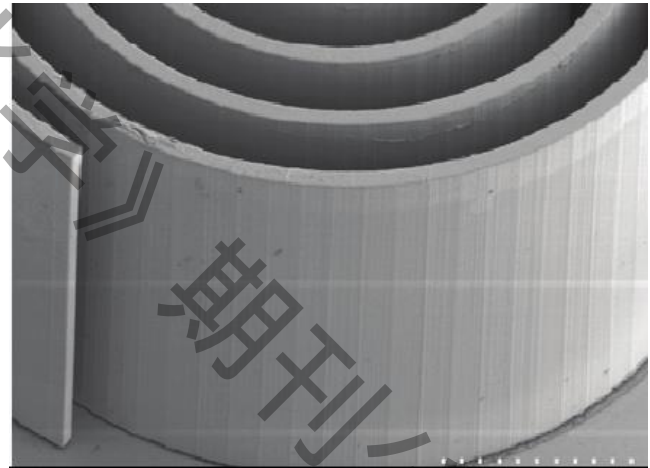
IC芯片中Cu互联线

微纳空间限域：LIGA

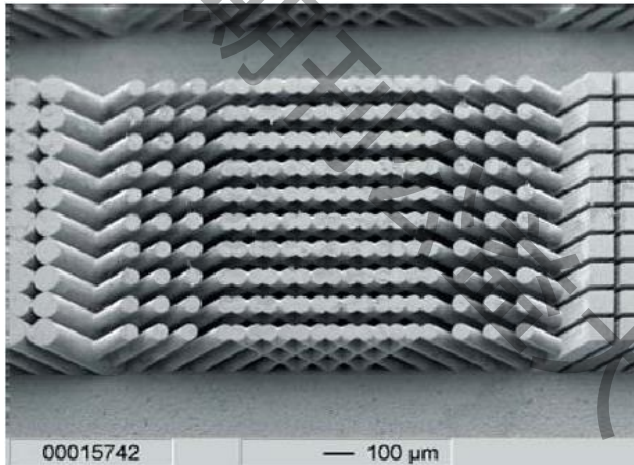
光刻 + 电铸



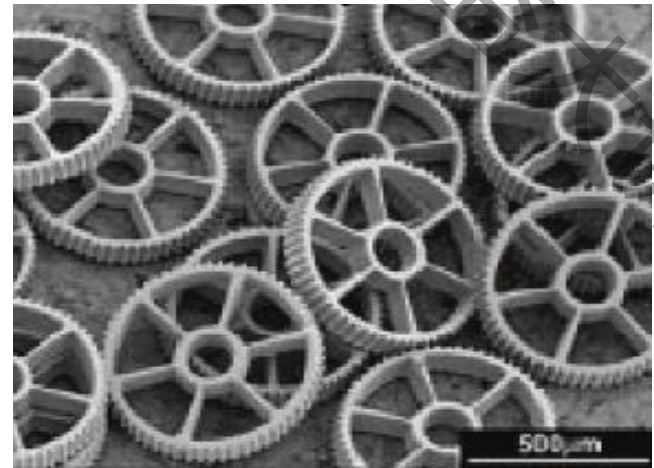
LIGA技术原理



高深宽比的微线圈50-1500



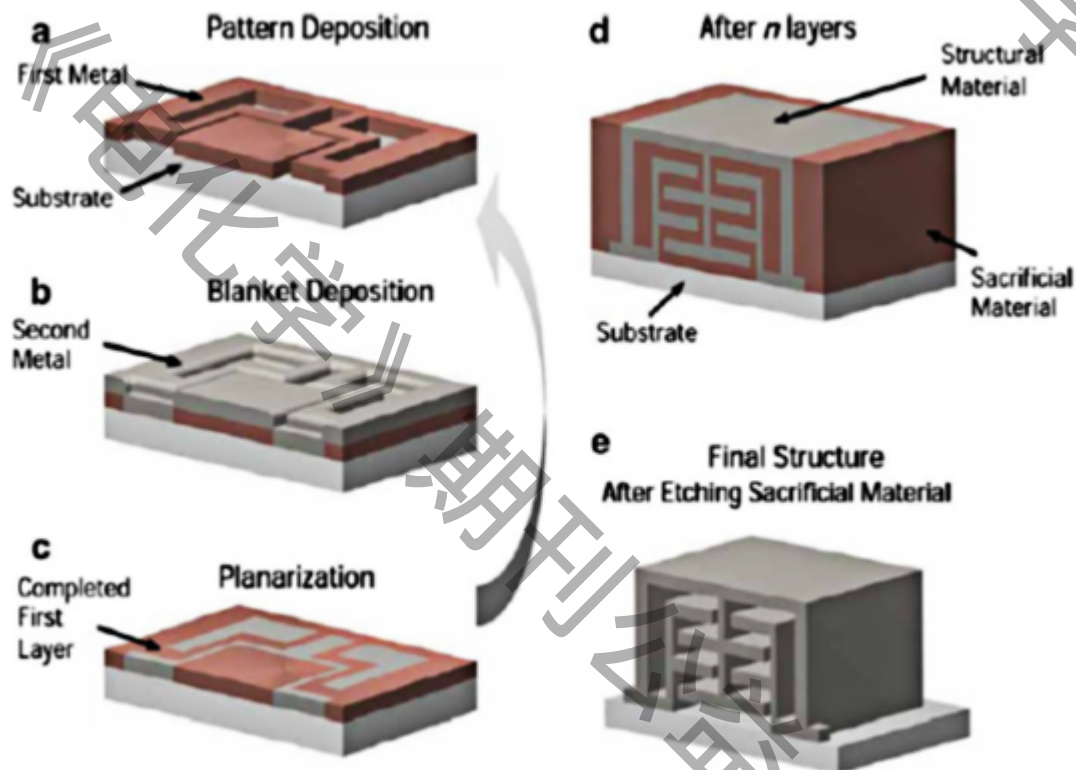
倾斜曝光LIGA得到的Ni



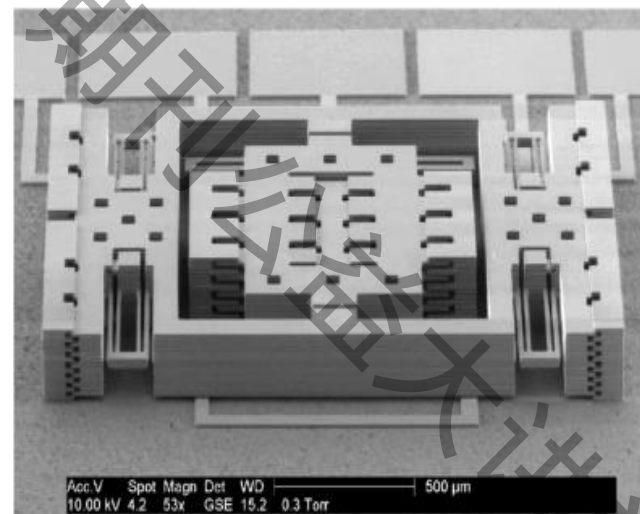
LIGA技术得到的微齿轮

微纳空间限域：EFAB

CAD + 光刻 + 电铸



EFAB加工原理图



加工实物图

微纳空间限域制造方法的技术特点

1 微纳结构的制备

- 必须借助光刻、纳米压印或者其他特种加工技术
- 光刻胶、热塑性和光固化介质

2 微纳结构的转移

- 干法刻蚀，成本高
- 湿法刻蚀，精度低

3 微纳结构中的电镀/电铸

- 结构特征：特征尺度小，深宽比高
- 镀层要求：均匀、致密、无缺陷、

4 后续抛光和整平

- 低k介质，无缺陷
- 亚纳米级的表面粗糙度
- 纳米级的面型精度

呼唤

表面抛光方法!

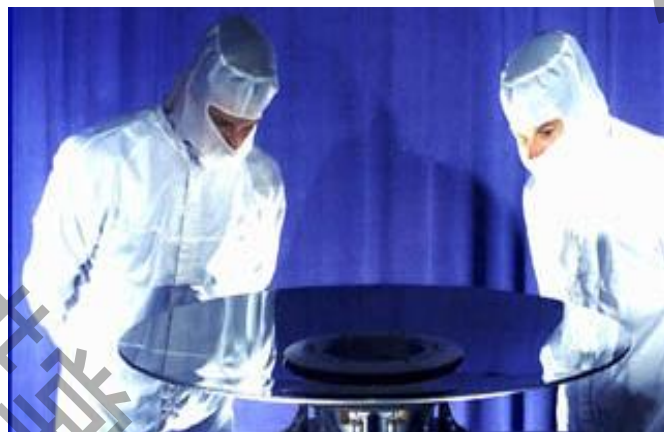
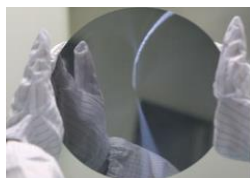
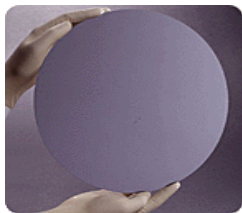
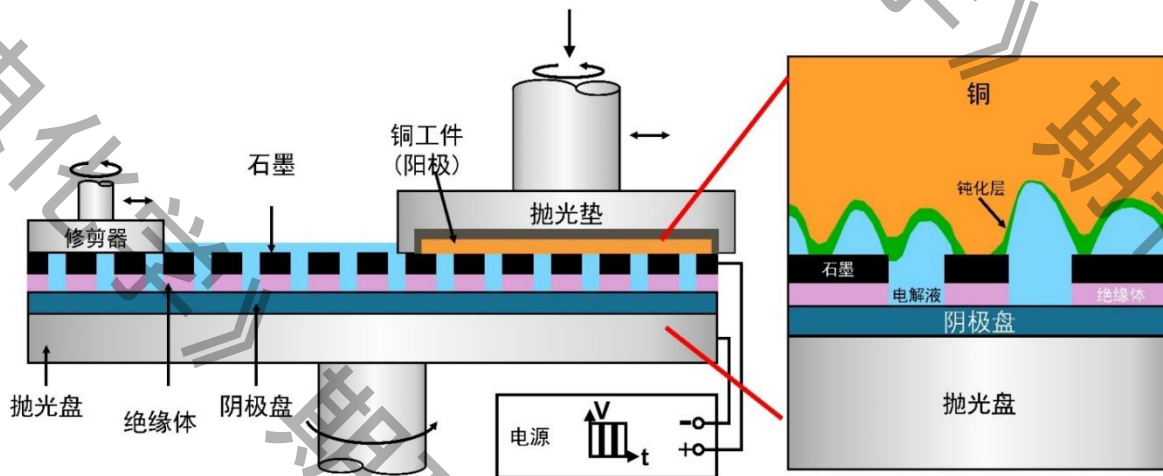
超光滑表面的制造：电化学机械抛光（产业化技术）

电化学磨削
化学机械抛光

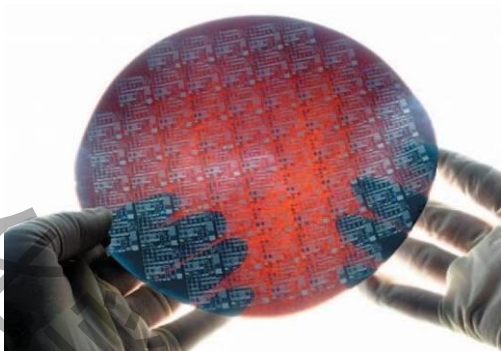


电化学机械抛光

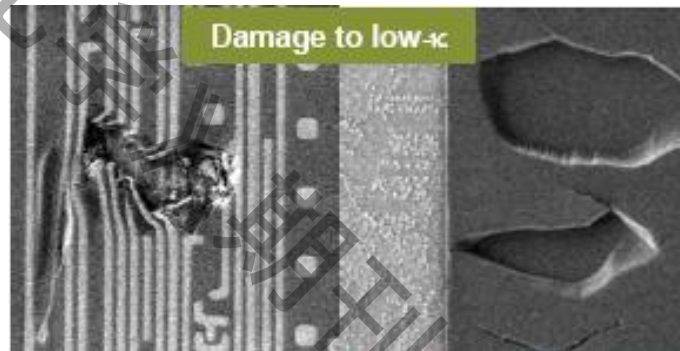
电化学方法生成疏松的异质层，
然后机械抛光去除之。



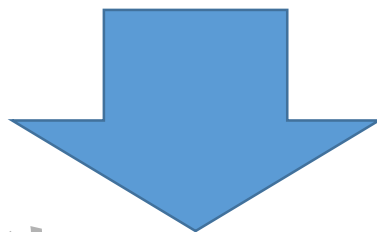
超光滑表面制造的技术挑战



减薄到 $5\mu\text{m}$ 的超薄硅片

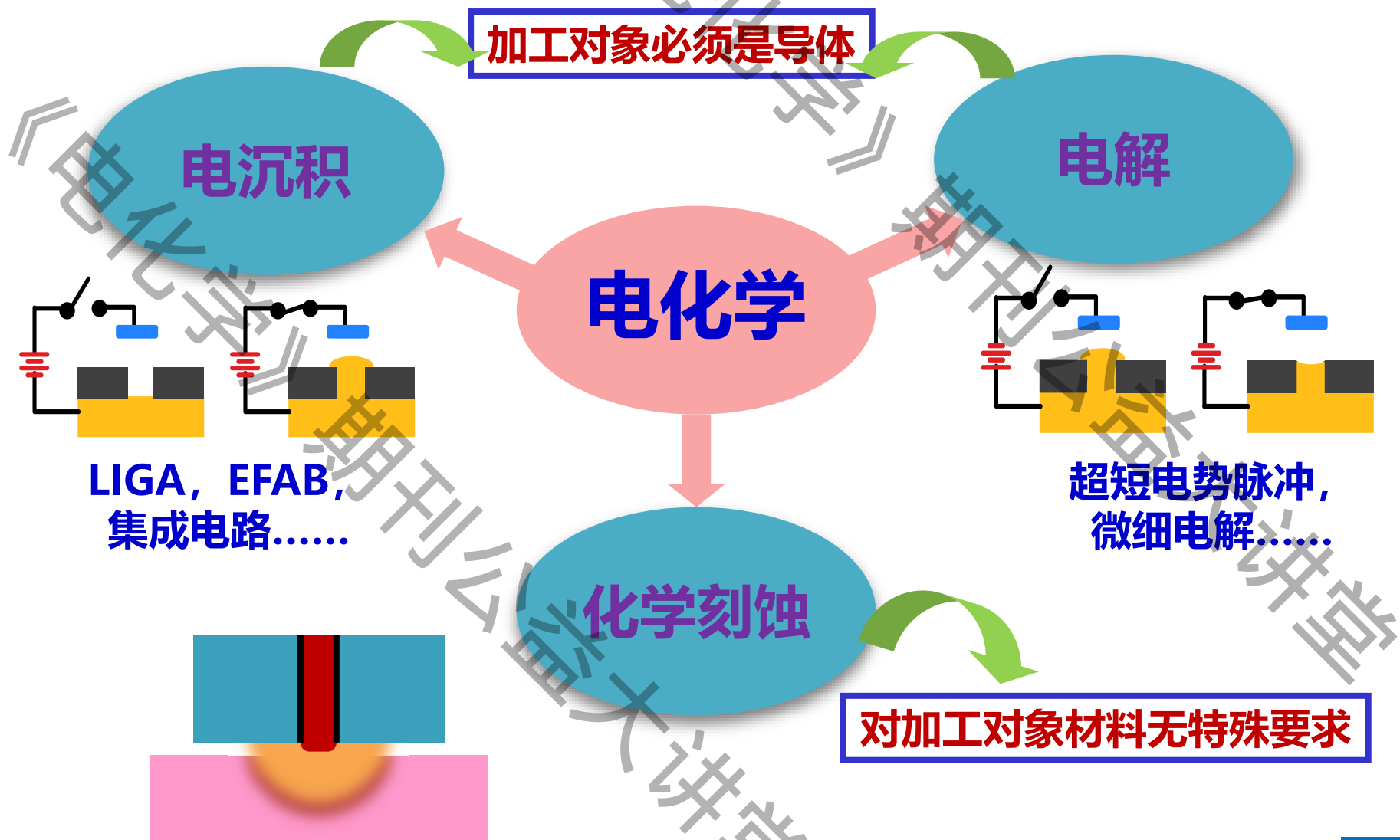


低k介质抛光成品率



无磨粒、无压力、无应力

电化学加工是否适用于半导体和绝缘体？



➤ 电化学加工技术简介

- ◆ 历史沿革和产业需求
- ◆ 减材制造：电解加工
- ◆ 增材制造：电铸加工
- ◆ 技术特点和不可替代性

➤ 电化学微纳加工技术

- ◆ 重大产业需求和关键科学问题
- ◆ 三维微纳米结构功能结构的制造
- ◆ 超光滑表面的制造
- ◆ **约束刻蚀剂层技术**

➤ 感言

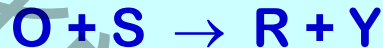
约束刻蚀剂层技术：原始创新、自主知识产权（田昭武先生）

约束刻蚀剂层技术的电化学反应体系（EC反应！）

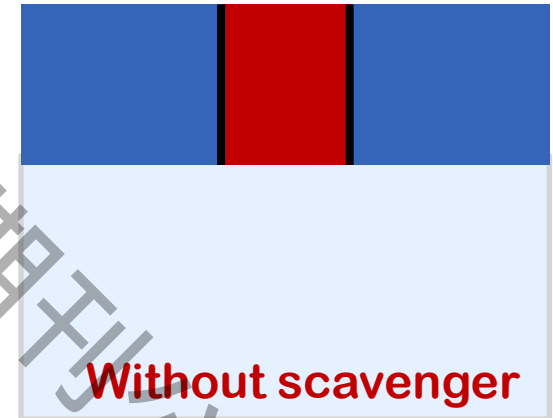
1. Etchant (O) Generation



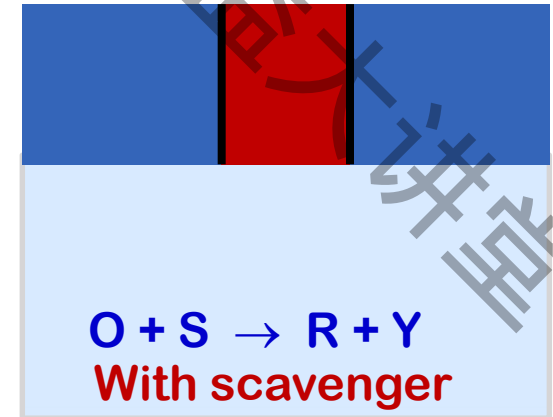
2. Scavenging Reaction



3. Etching Reaction



Conventional



Confined

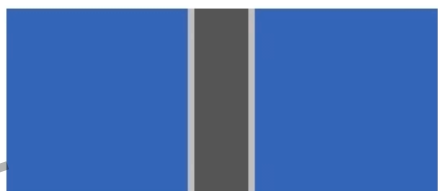
约束刻蚀剂层技术的限域原理（加工精度）

$$\mu = \sqrt{D/K_s}$$

| | | | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Kinetic rate (s ⁻¹) | 10 ⁶ | 10 ⁷ | 10 ⁹ |
| Thickness of CEL (nm) | 30 | 10 | 1 |

Zhao-Wu Tian, et al, Faraday Discuss., 1992, 94, 37.

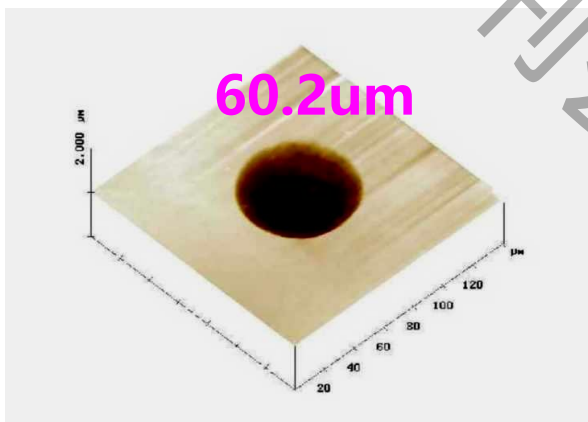
约束刻蚀剂层技术的可行性验证



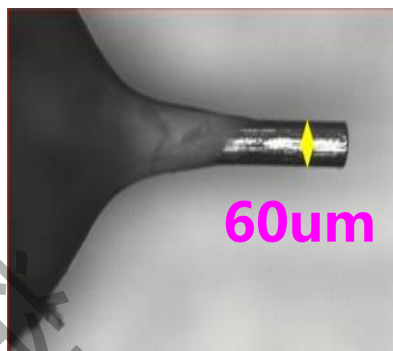
不约束



约束



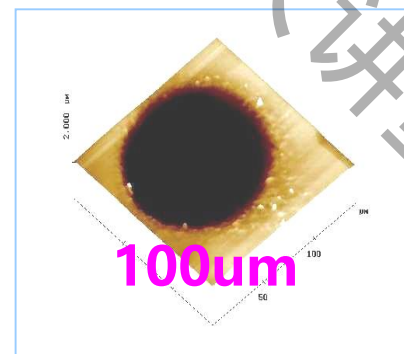
约束刻蚀



Pt柱电极

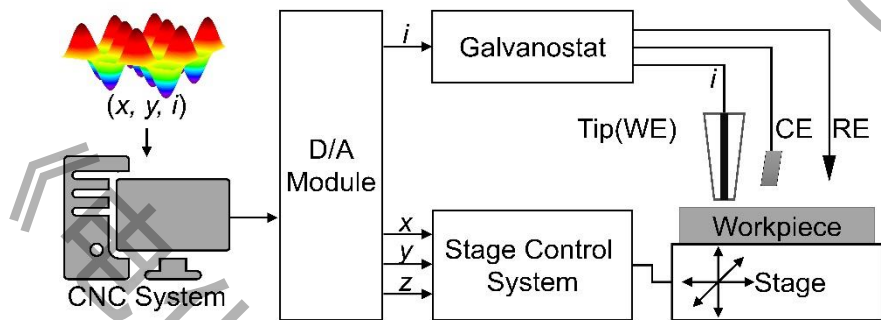
Si 基底

60um



非约束刻蚀

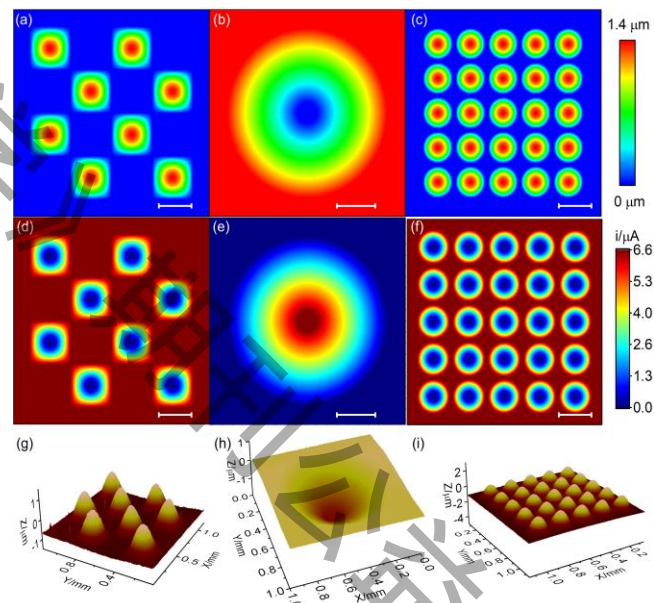
约束刻蚀剂层技术的直写工艺



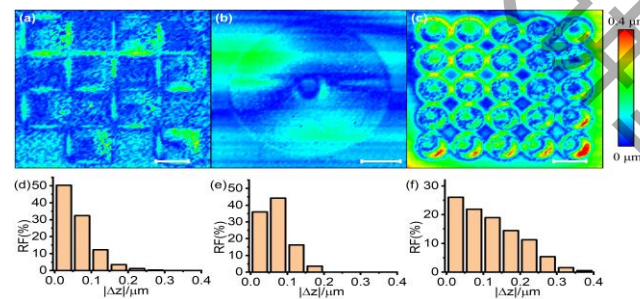
将微纳结构转换成空间分布的**电流或电势**



采用CELT技术制作的Bard教授的浅浮雕肖像

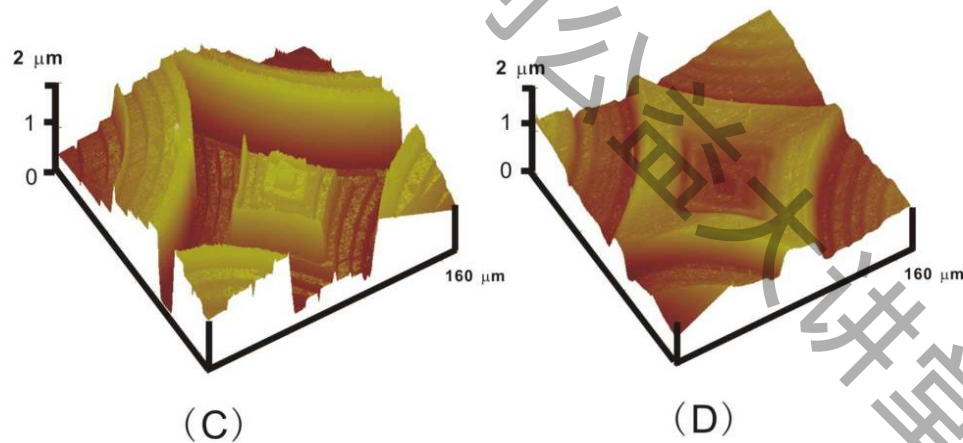
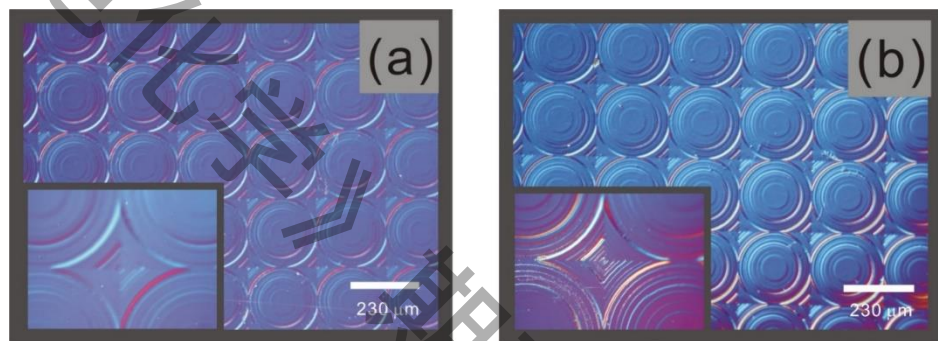
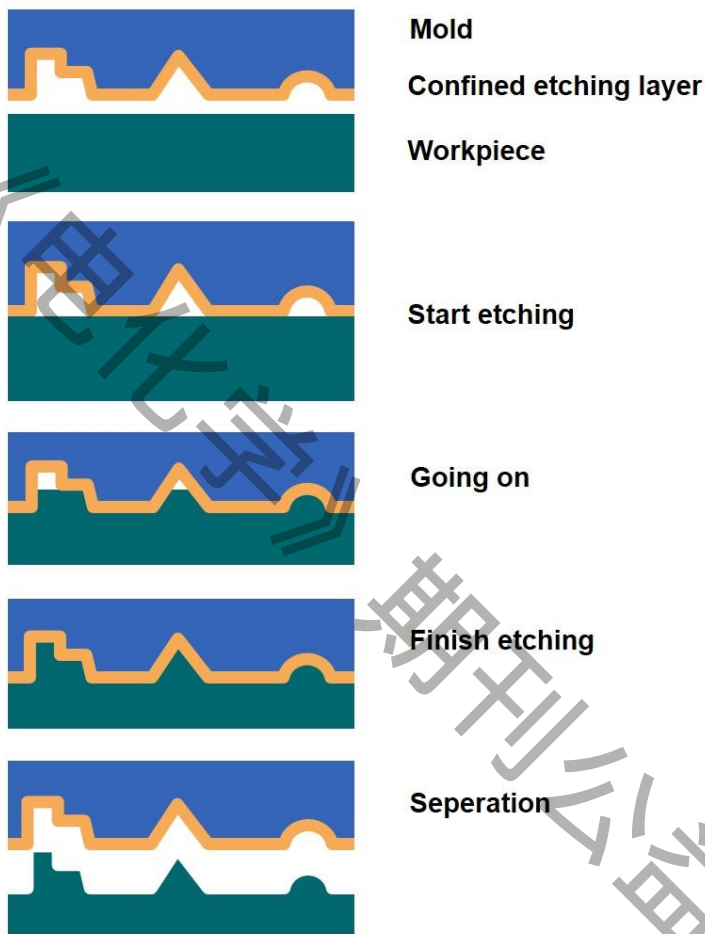


微纳结构的**SECM**直写



加工误差分析

约束刻蚀剂层技术的模板成形工艺流程和加工实例



8相位GaAS微棱镜阵列, 单元直径 $230\ \mu\text{m}$

7个台阶总高度 $1.5\ \mu\text{m}$, 平均高度 $214\ \text{nm}$

J. Tang, et al, *Adv. Mater.*, 2007, 19, 3912.

力学调制的约束刻蚀剂层技术：电化学屈曲加工

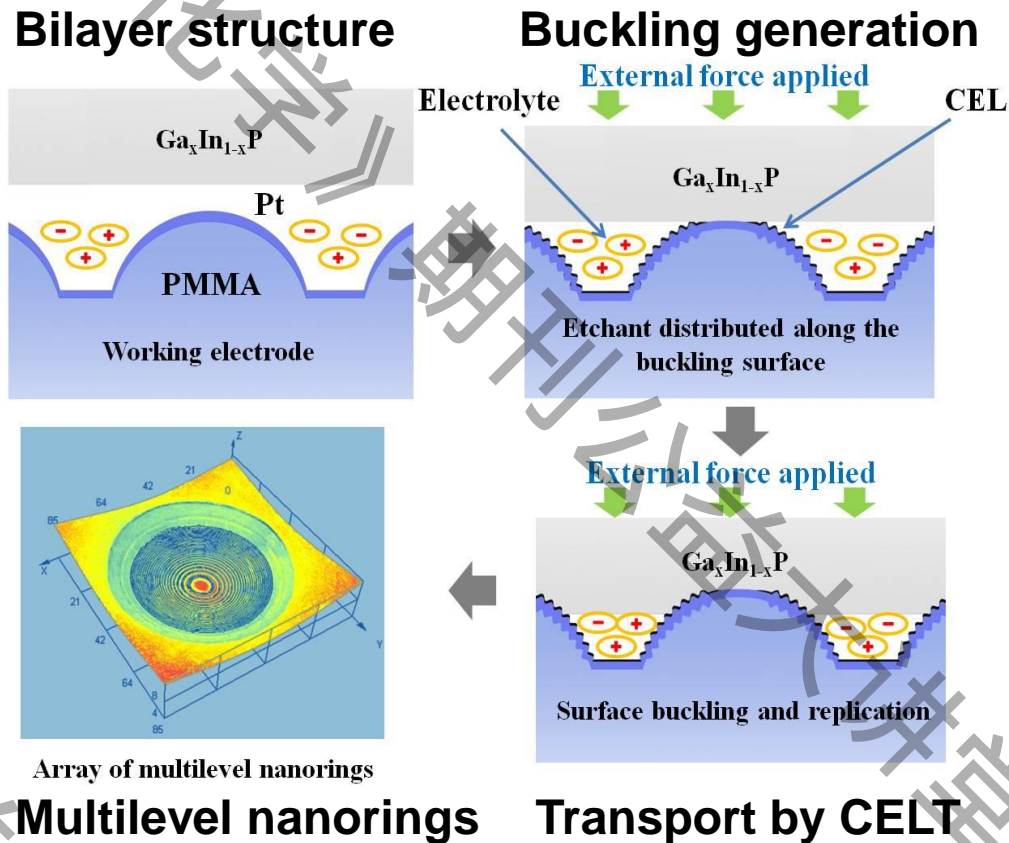
屈曲效应

通过可控的弹性屈曲效应
生成微纳多级结构

约束刻蚀剂层技术
通过约束刻蚀剂层技术
将微纳多级结构转移至
半导体晶圆表面



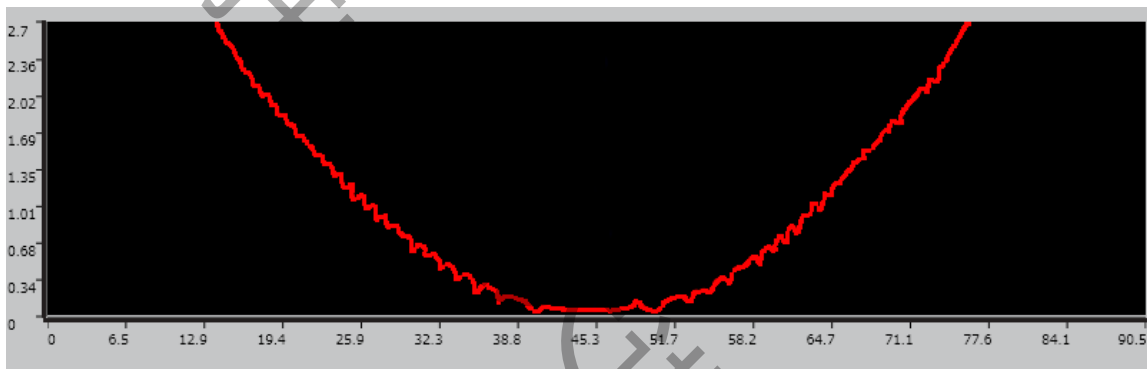
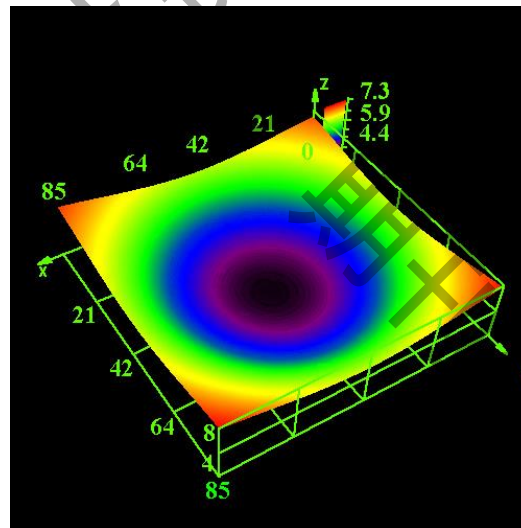
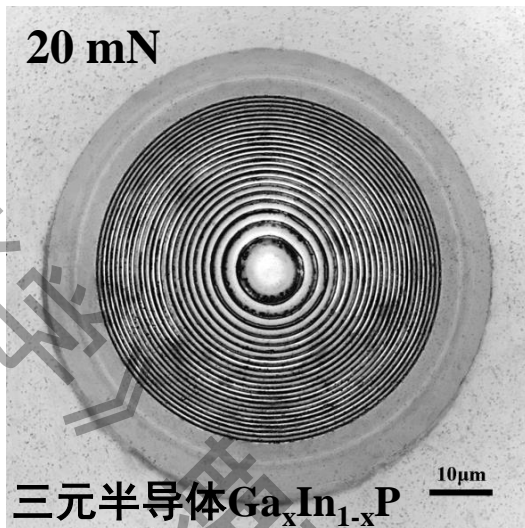
通过力学调制手段，首次
实现了微纳多级结构的一
次性整体成形!



D. Zhan, et al, **Chem. Sci.**, 2016, 7, 697.

电化学屈曲加工 (ECBM)

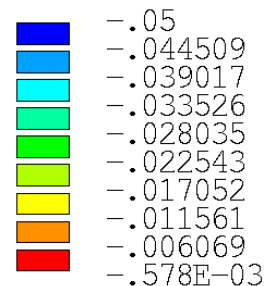
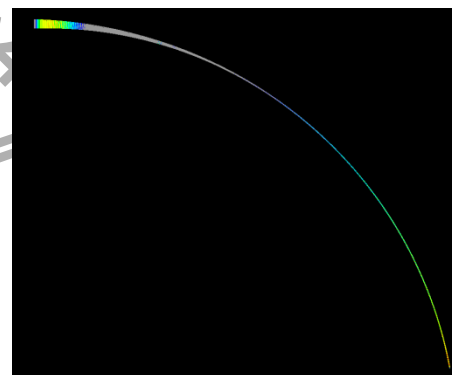
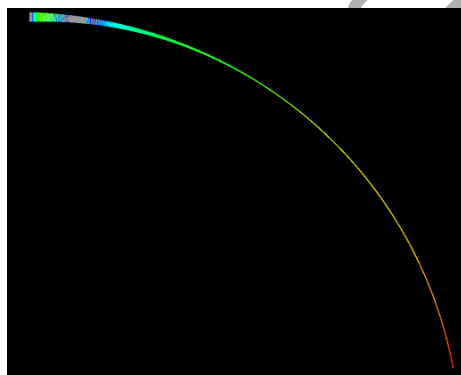
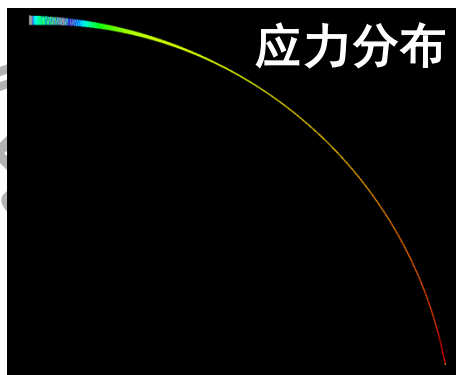
- 含有微纳次级结构的3D连续曲面——多级同心纳米圆环



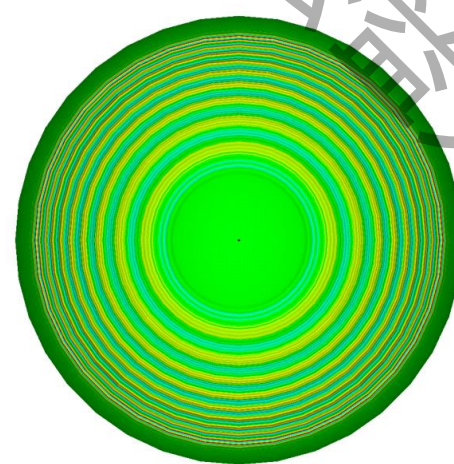
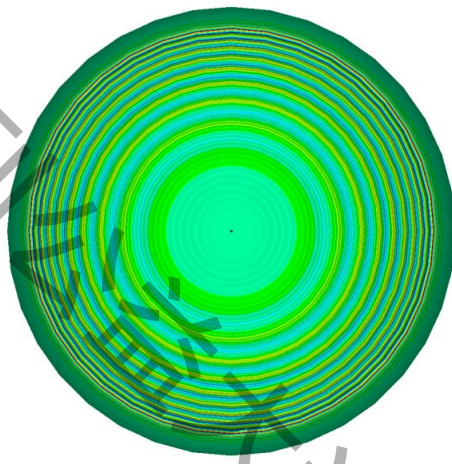
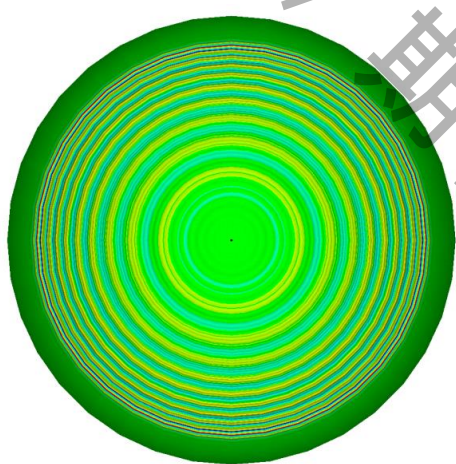
恒力接触模式，保持20 mN接触力值

电化学屈曲加工 (ECBM)

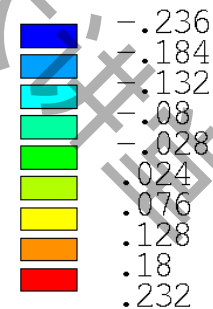
力值调控的数值模拟



力值增加



圆环分布



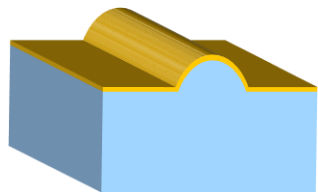
平面屈曲

应变的增加使圆环更加密集

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{(1 + \varepsilon_{pre})(1 + \xi)^{1/3}}$$

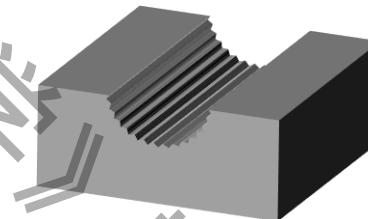
电化学屈曲加工 (ECBM)

Simple structure



Hemi-cylinder mold

Bulcking



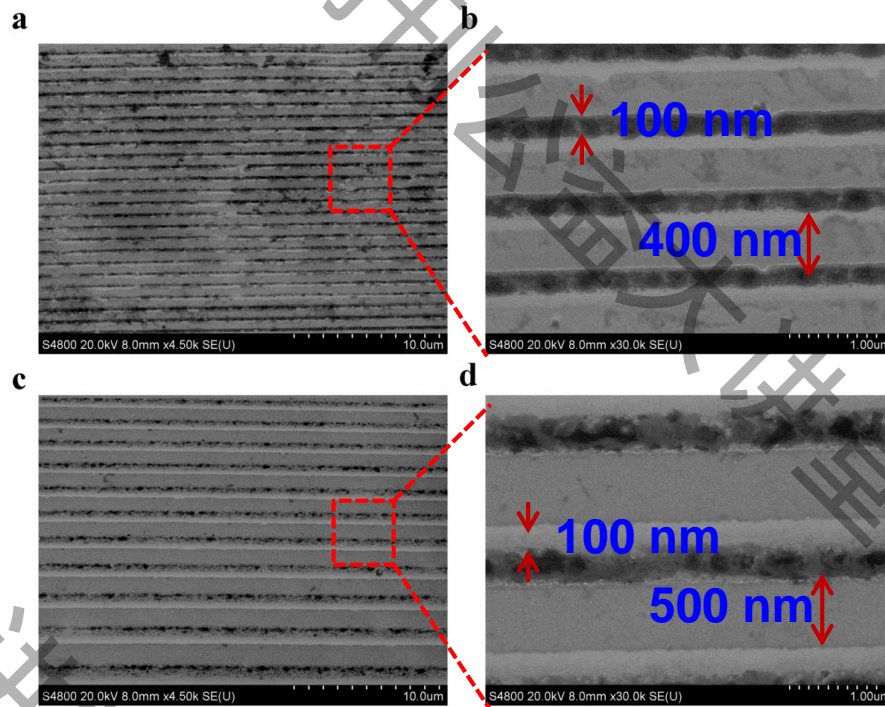
Multilevel structure

Multilevel nanogrooves

微纳多级结构与工具电极材料的弹性模量、微结构类型和接触力相关。

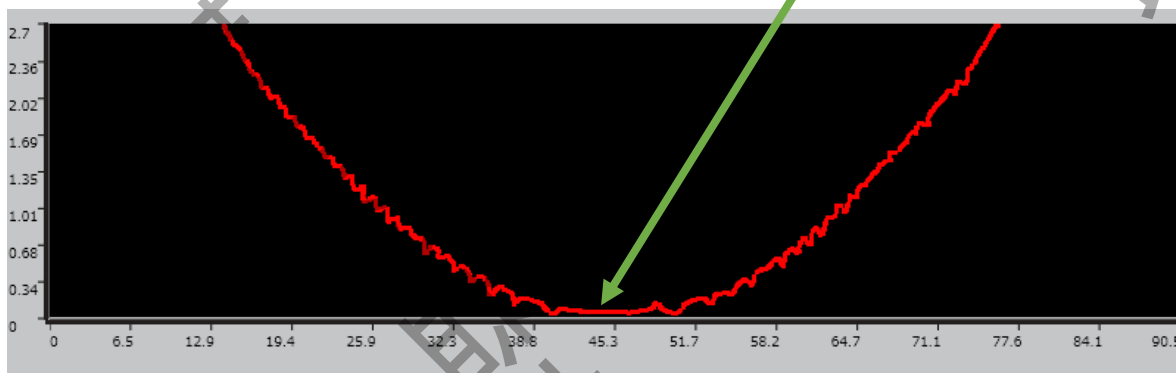
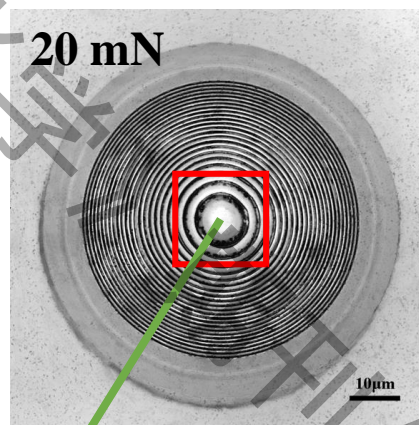
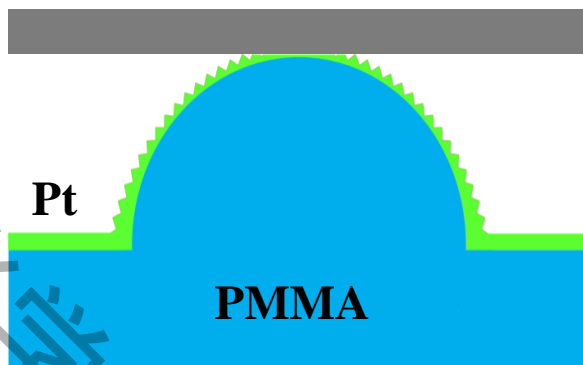
微纳次级结构的间距、线宽和深度可以通过接触力调控。

D.Zhan, et al, **J. Electroanal. Chem.**, in press, dedicated to Prof. Compton's 65th birthday.



电化学屈曲加工 (ECBM)

如何在科研中发现新的科学问题?



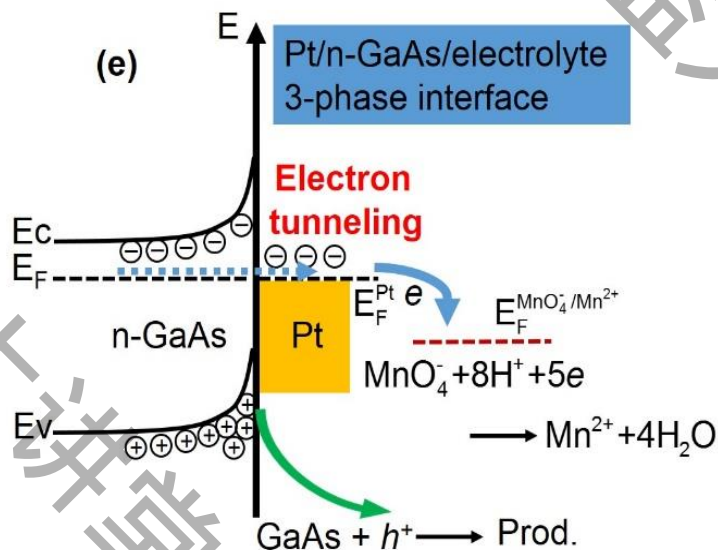
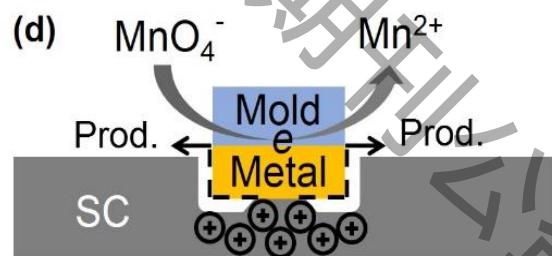
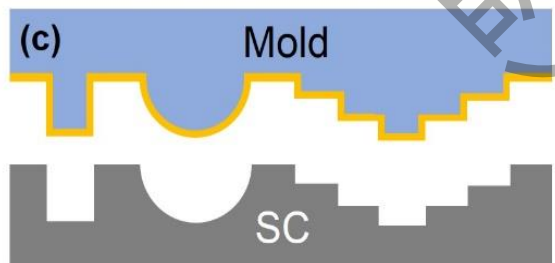
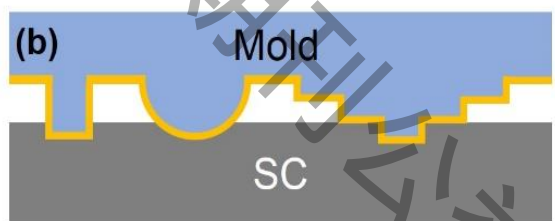
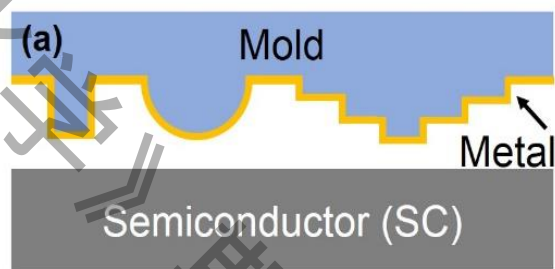
中心区域基底与模板接触，无刻蚀液，其高度下降，
证明有刻蚀作用。



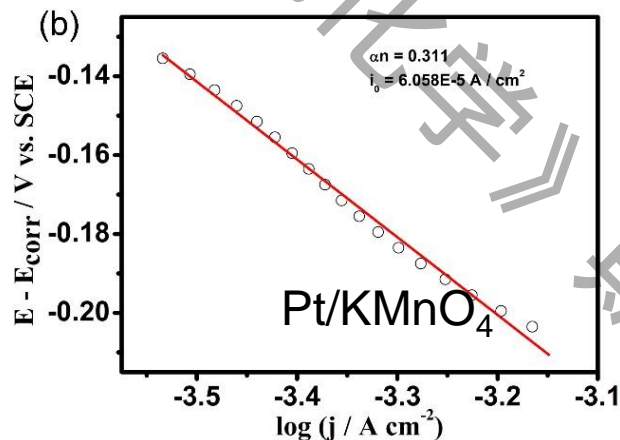
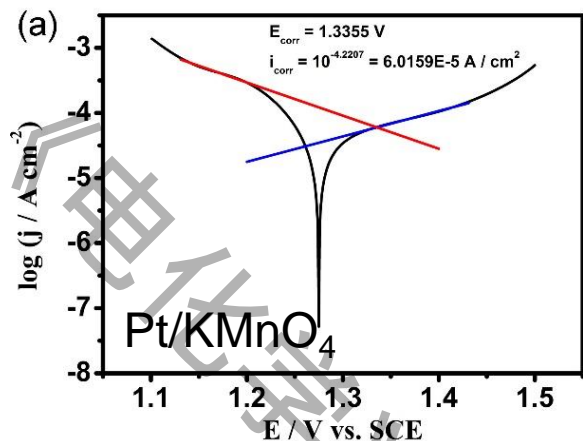
约束刻蚀思想的新发展：电化学纳米压印 (ECNL)

接触电势诱导的电化学腐蚀反应

- 接触的两相具有相同的Fermi能级
- 电子逸出功的差异形成接触电势
- 在电解质溶液中发生局域腐蚀原电池反应

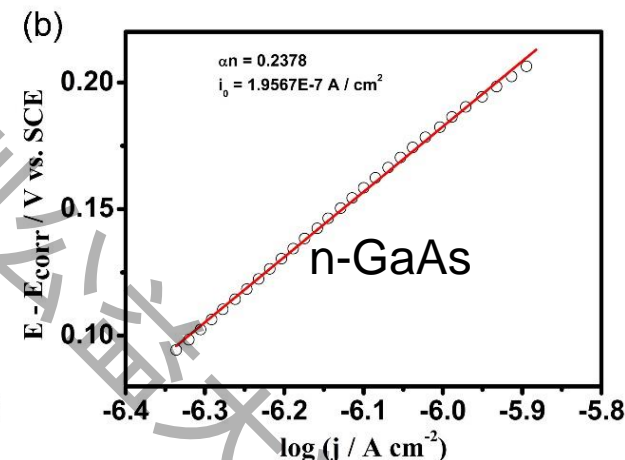
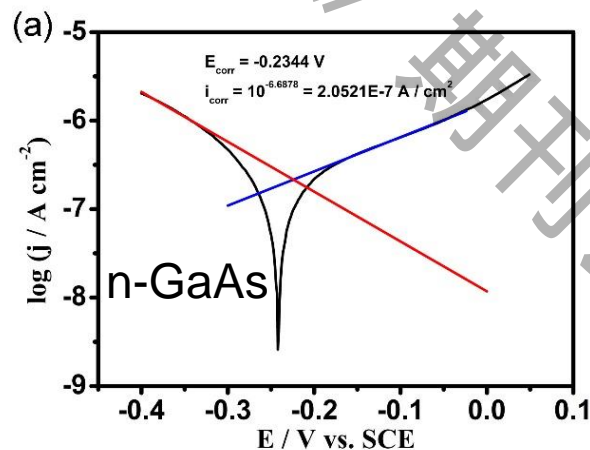


电化学纳米压印：反应动力学



$$E_{\text{corr}} = 1.3355 \text{ V},$$
$$i_{\text{corr}} = 6.02 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$$

$$b = -197 \text{ mV}, \alpha n = 0.311$$
$$i_0 = 6.06 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$$



$$b = 258 \text{ mV}, \alpha n = 0.2378$$
$$i_0 = 1.96 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$$

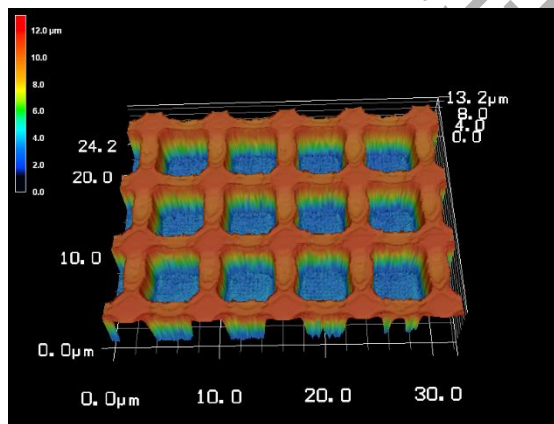
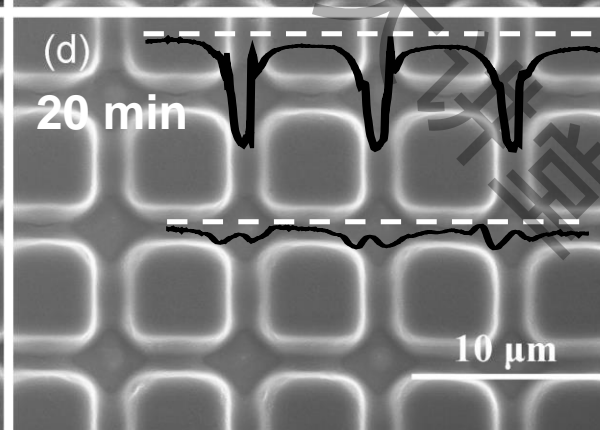
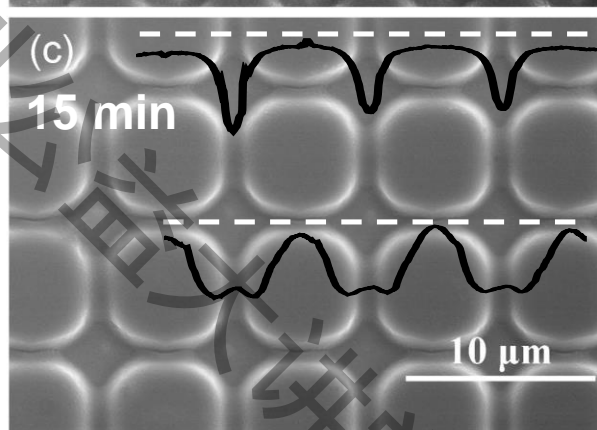
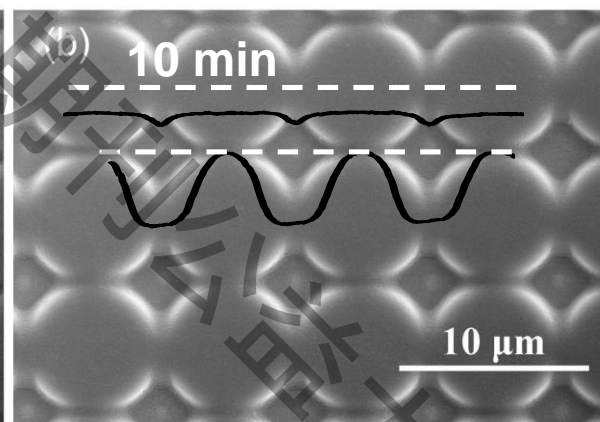
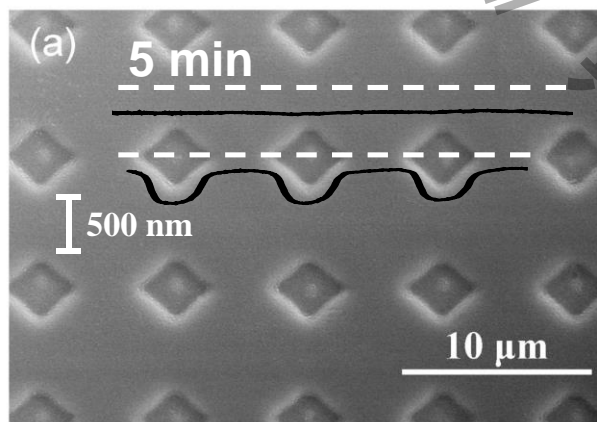
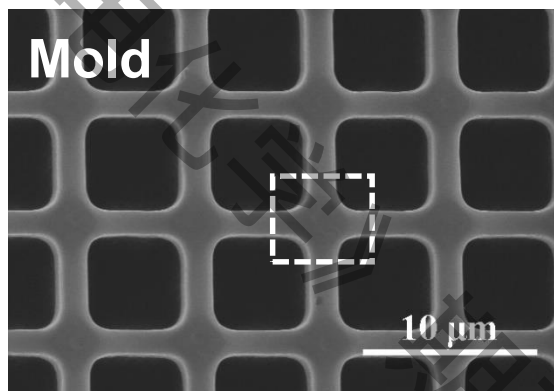
砷化镓的阳极腐蚀是速控步骤

电化学纳米压印：限域原理

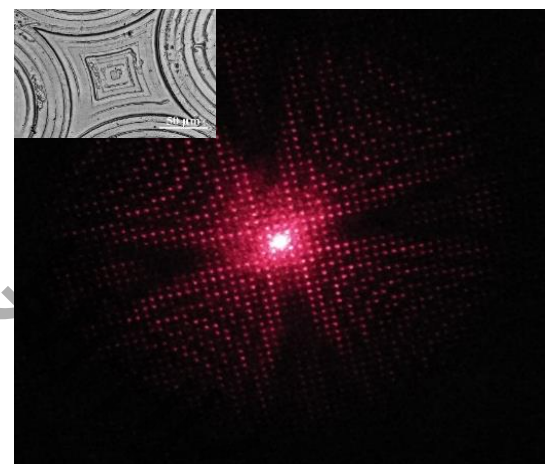
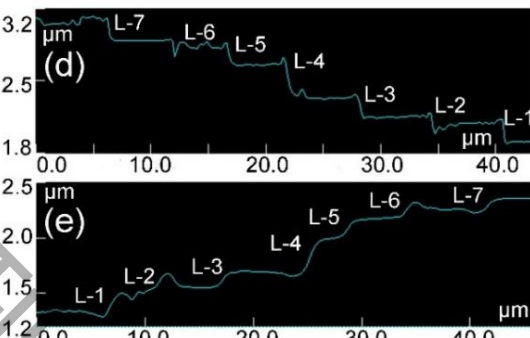
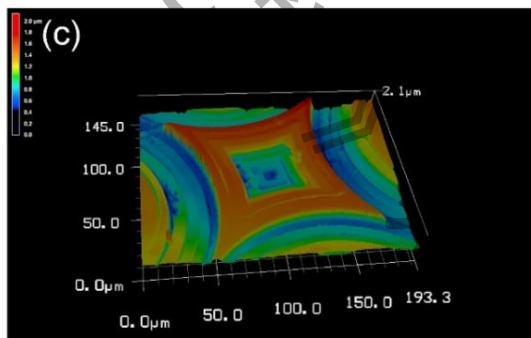
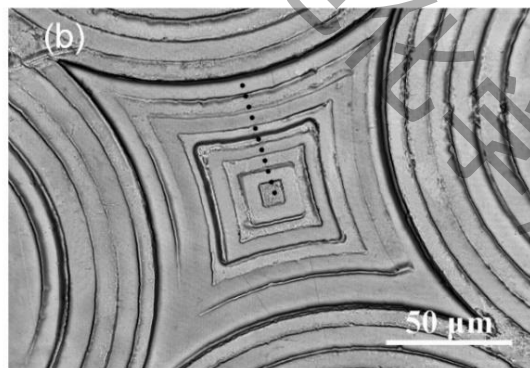
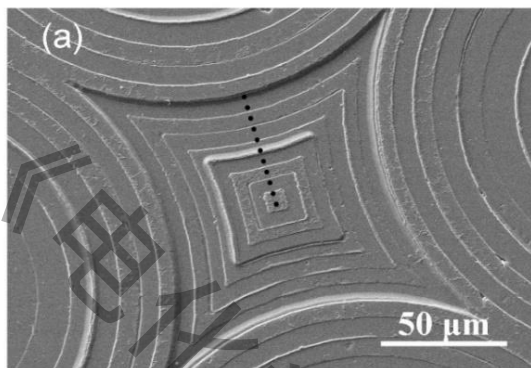
刻蚀反应严格发生在金属/半导体/溶液三相界面处

加工精度：

$$\mu = (D_{\text{Hole}} / k_s)^{1/2}$$



电化学纳米压印：半导体微纳器件



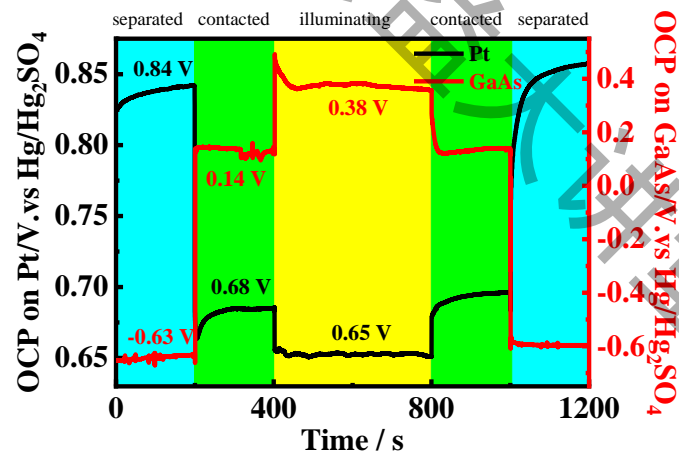
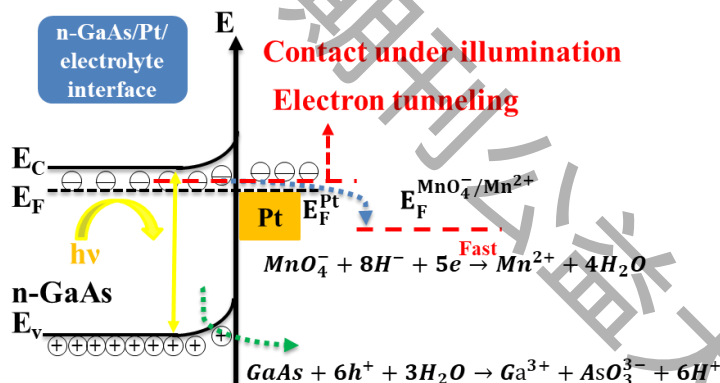
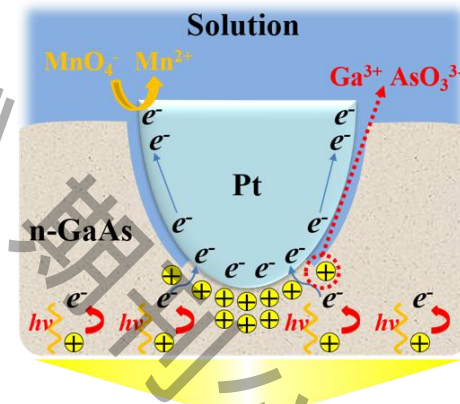
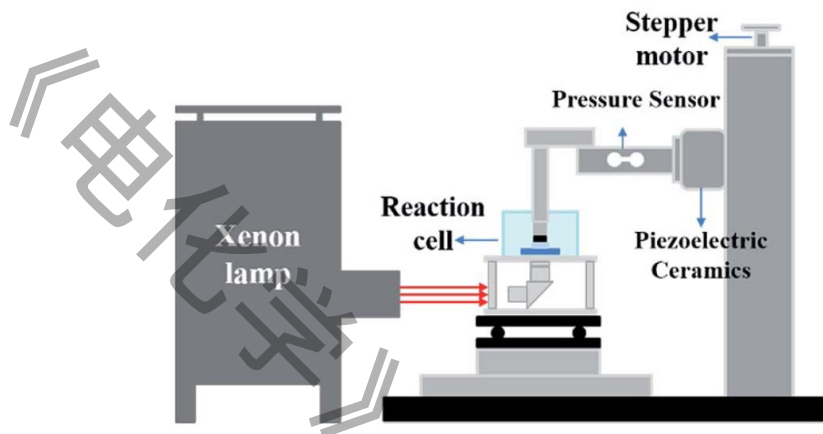
| Level | L-1 [nm] | L-2 [nm] | L-3 [nm] | L-4 [nm] | L-5 [nm] | L-6 [nm] | L-7 [nm] |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Mold | 187 | 57 | 178 | 324 | 172 | 68 | 163 |
| GaAs | 169 | 55 | 149 | 295 | 174 | 80 | 103 |
| RE ^{a)} | -9.6 % | -3.5 % | -16.3 % | -9.0 % | 1.2 % | 17.6 % | -36.8 % |

GaAs光学器件

Zhan*, et al, *Nanoscale*, 2017, 9, 7476.

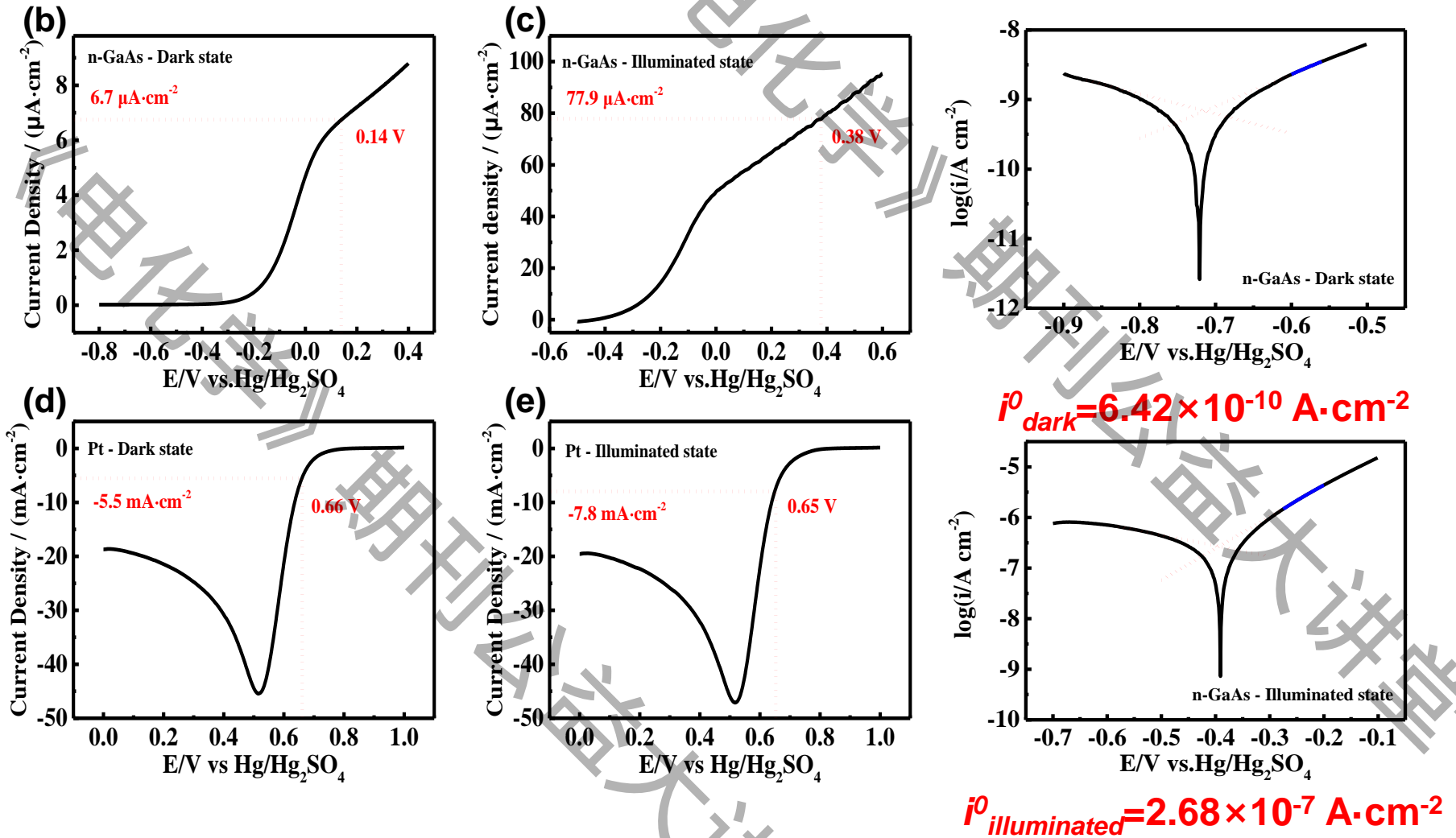
电化学纳米压印：光电效应加速

如何加速纳米压印进程，提高加工效率？



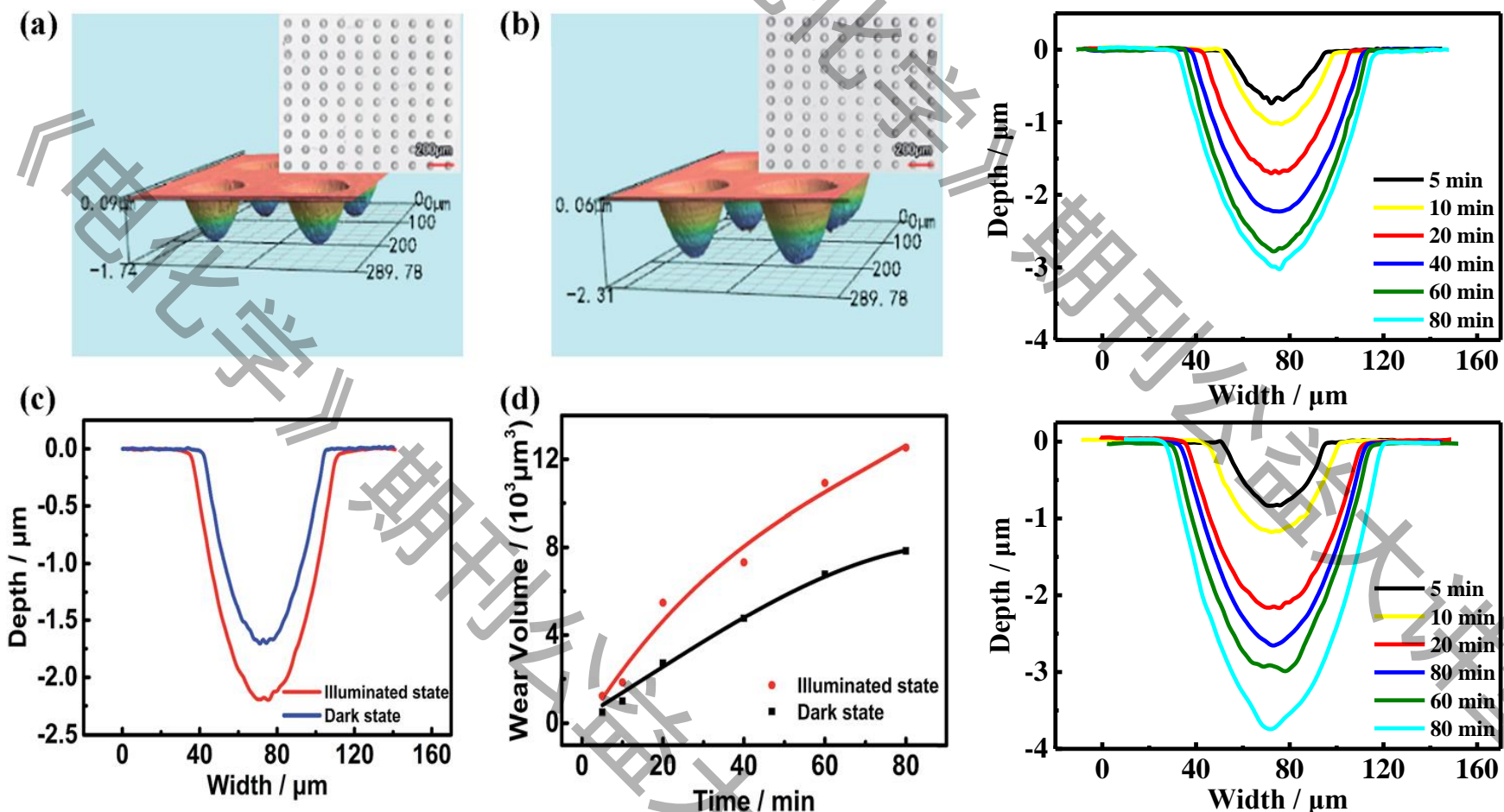
光电效应增强局域电势，加速半导体腐蚀反应进程。

电化学纳米压印：光电效应加速的腐蚀反应动力学



光照将电子从价带激发到导带，接触电场增强。
腐蚀原电池电势提高，Pt/溶液界面和GaAs/溶液界面的极化增强。

电化学纳米压印：光电效应加速的腐蚀进程

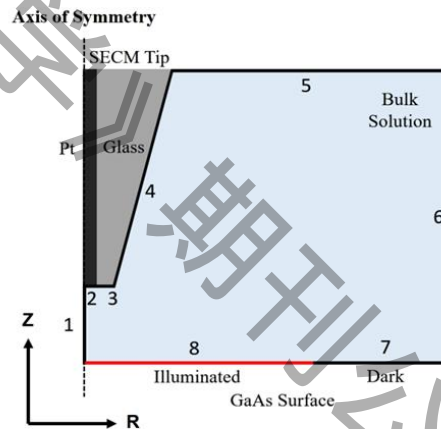
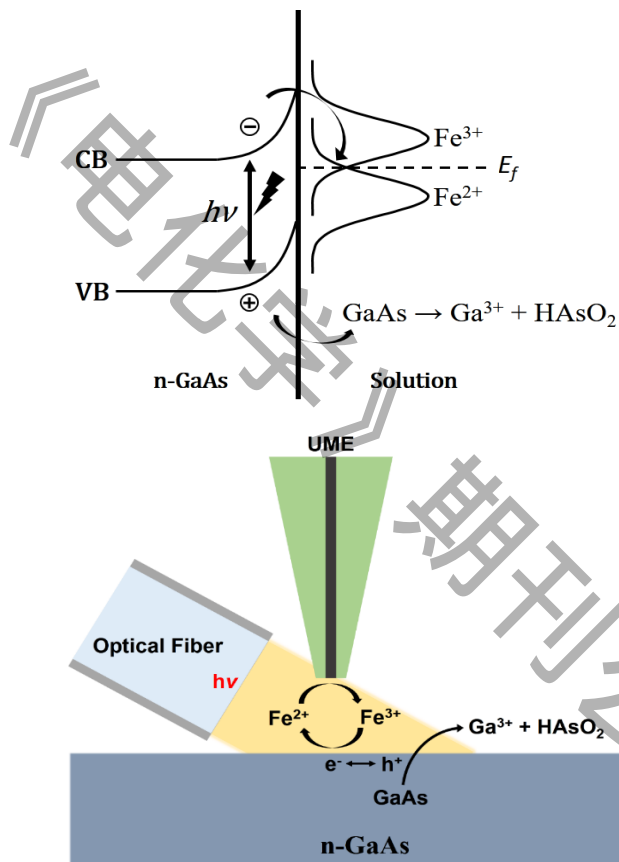


光照加速腐蚀去除速率

约束刻蚀思想的新发展：电化学光刻

新的科学问题：限域的半导体光化学腐蚀！

$$\mu = (D_{\text{Hole}} / k_s)^{1/2}$$



At Boundary 1, 3, 4:

$$\nabla C_i \cdot \vec{n} = 0$$

At Boundary 2:

$$C_{\text{Fe}^{3+}} = 0, C_{\text{Fe}^{2+}} = C_{\text{Fe}^{2+}}^b$$

Mass transfer equations:

$$-D_{\text{Fe}^{2+}} \nabla C_{\text{Fe}^{2+}} \cdot \vec{n} = k[\text{Fe}^{3+}]^{\frac{1}{2}}, D_{\text{Fe}^{3+}} \nabla C_{\text{Fe}^{3+}} \cdot \vec{n} = k[\text{Fe}^{3+}]^{\frac{1}{2}}$$

At Boundary 5, 6:

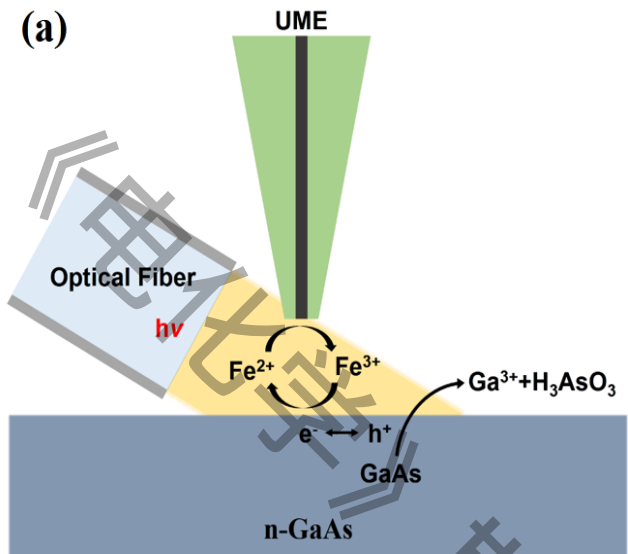
$$C_{\text{Fe}^{3+}} = C_{\text{Fe}^{3+}}^b, C_{\text{Fe}^{2+}} = 0$$

At Boundary 7, 8:

$$r = k[\text{Fe}^{3+}]^{\frac{1}{2}}$$

D. Zhan, et al, **J. Phys. Chem. C**, 2016, 120, 16446

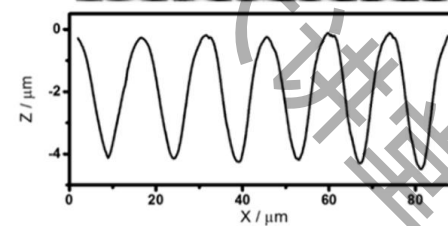
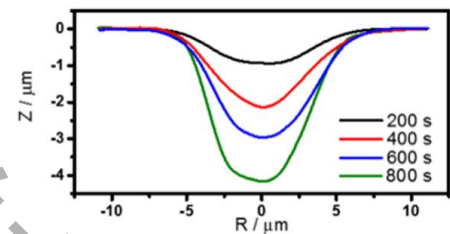
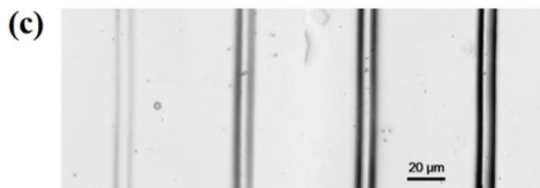
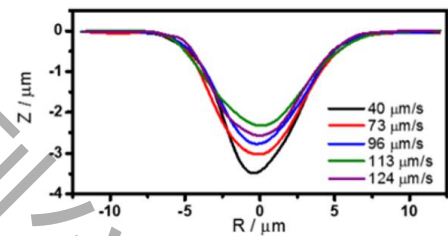
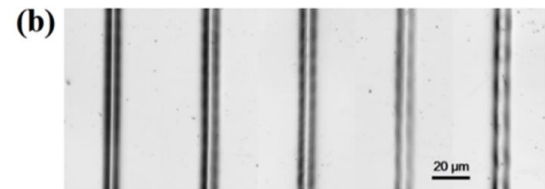
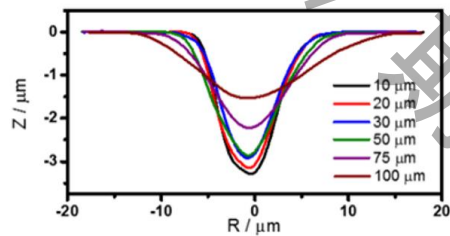
光纤扫描直写加工



直写效率低?

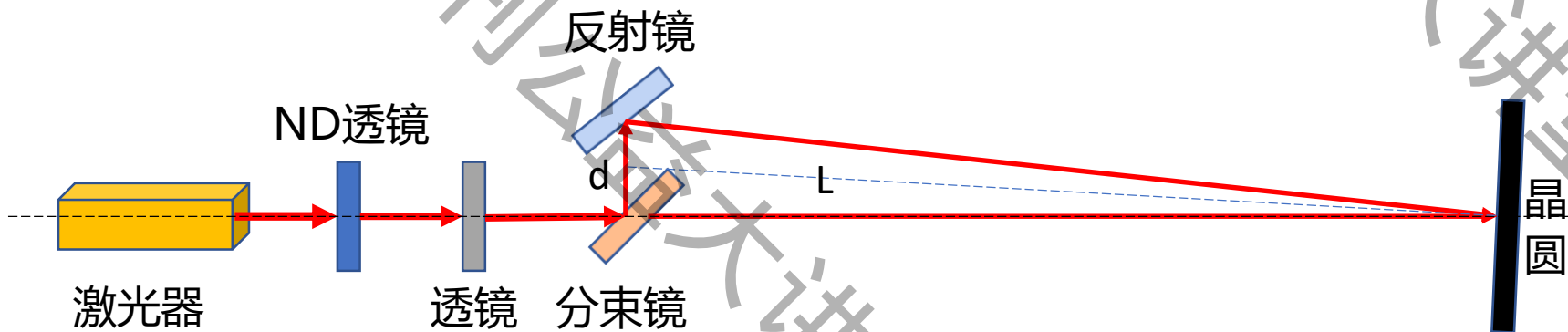
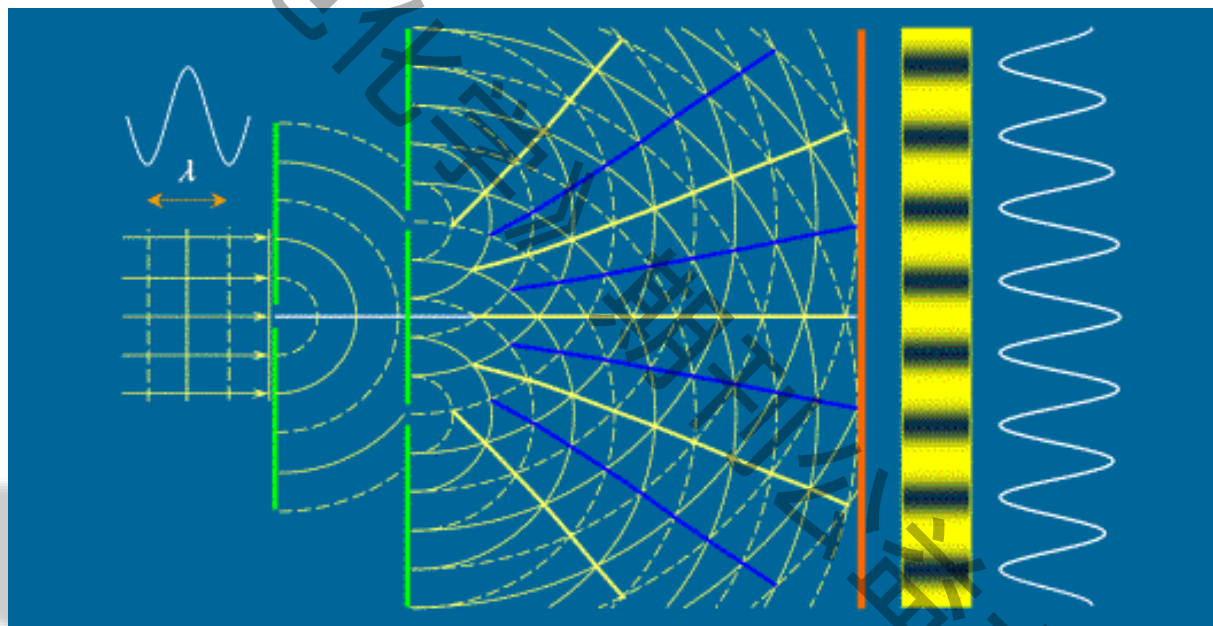


模板成形好!



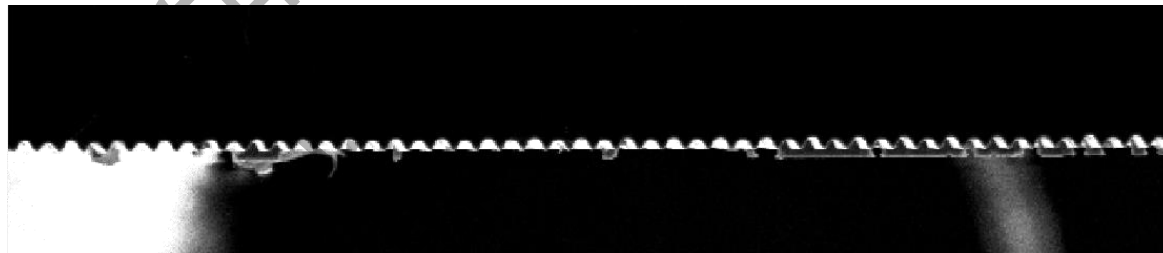
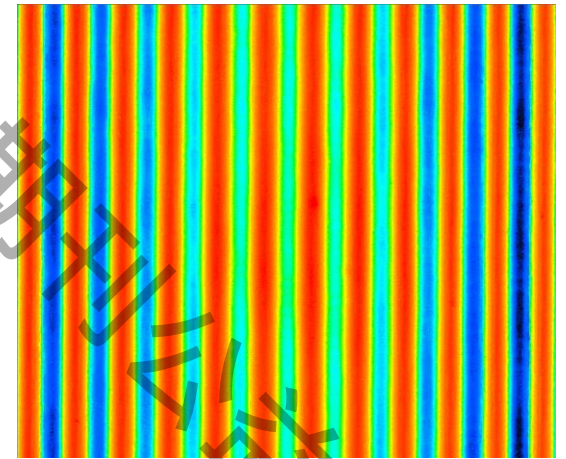
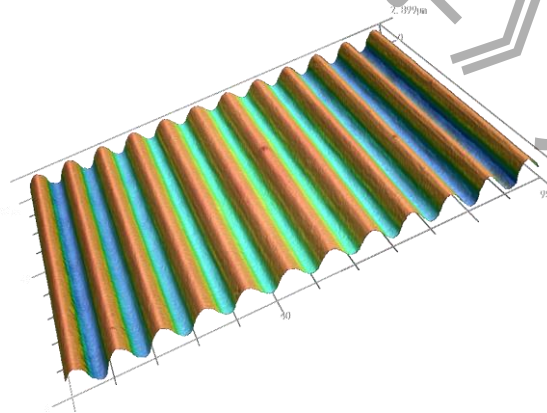
电化学全息光刻

将全息光学和光诱导腐蚀有机结合，提出电化学全息光刻，在半导体晶圆表面批量制备三维微纳结构。

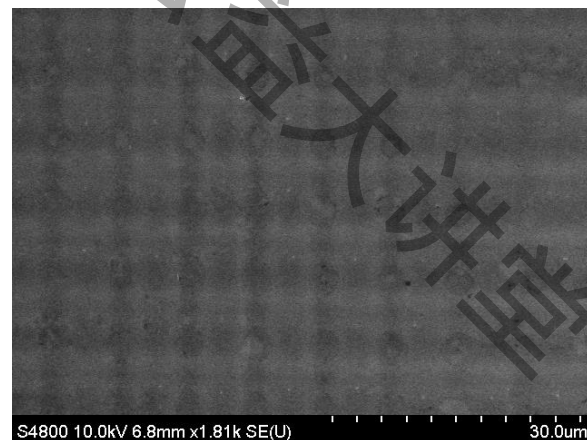
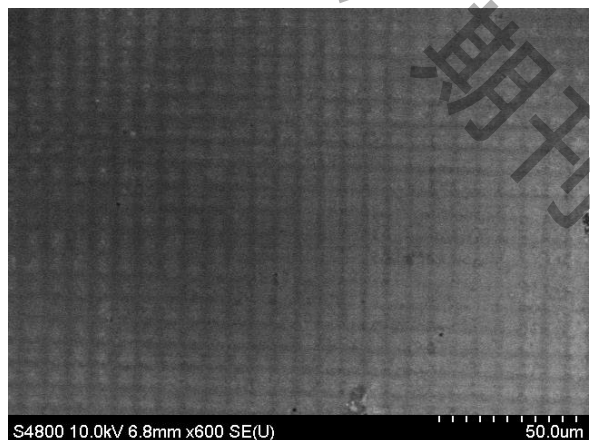
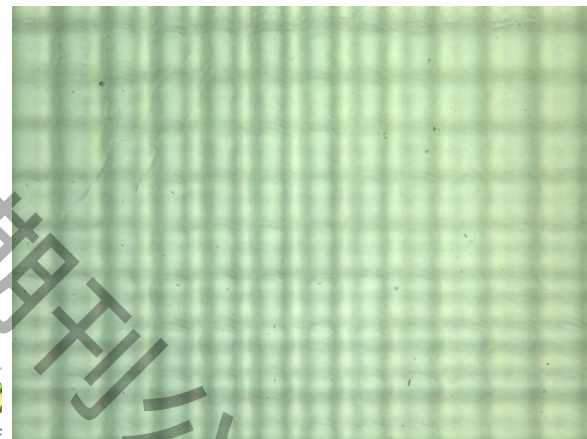
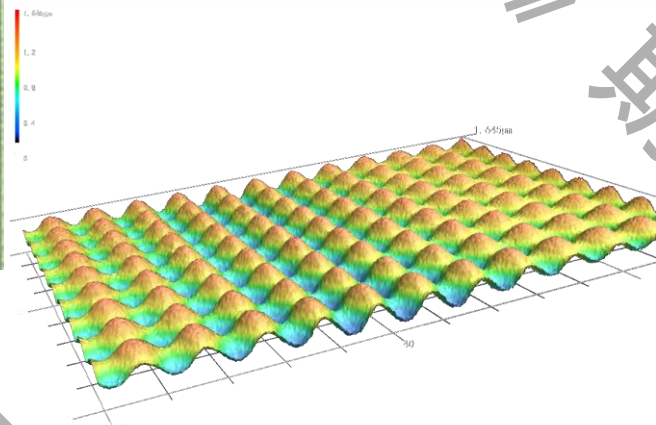
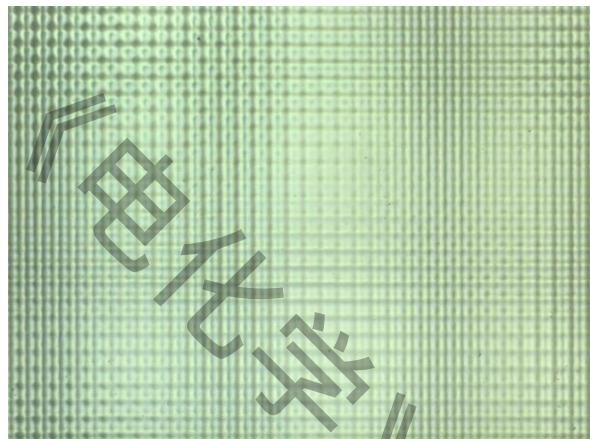


实验光路图

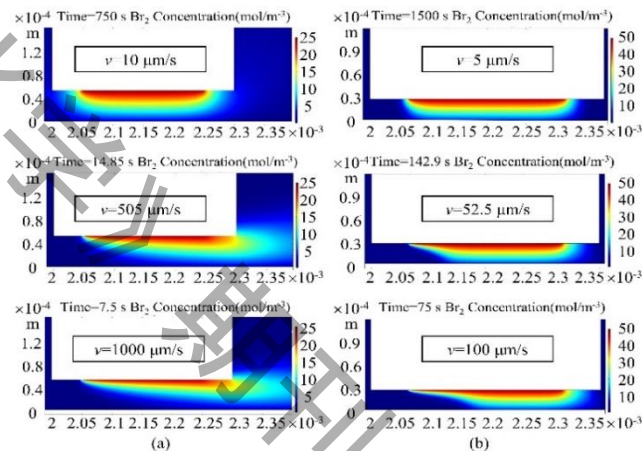
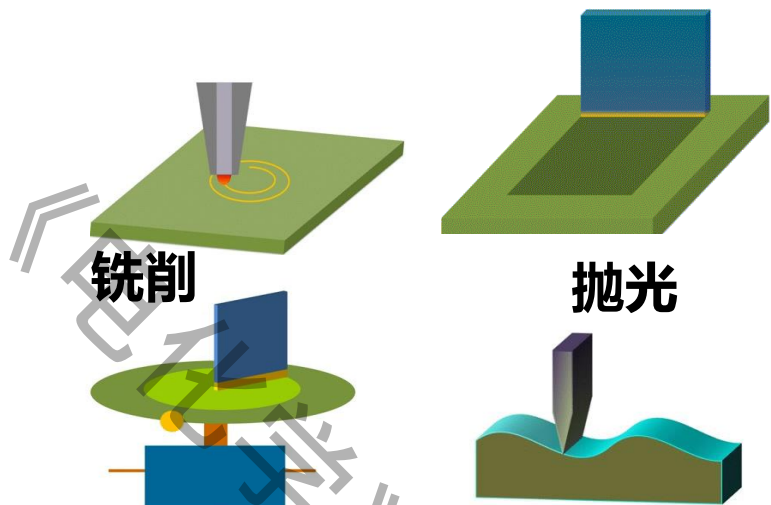
电化学全息光刻



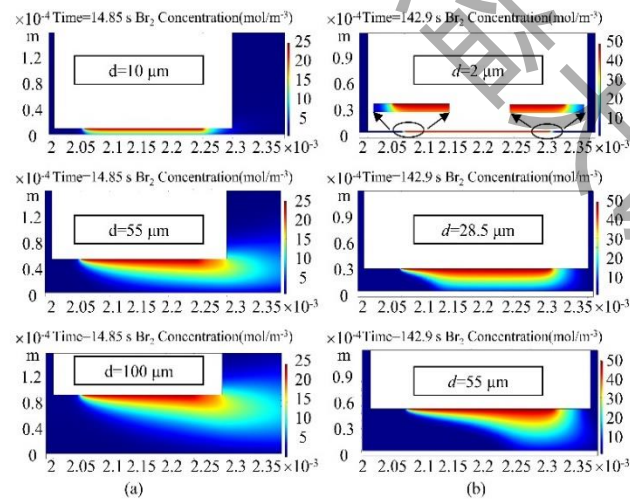
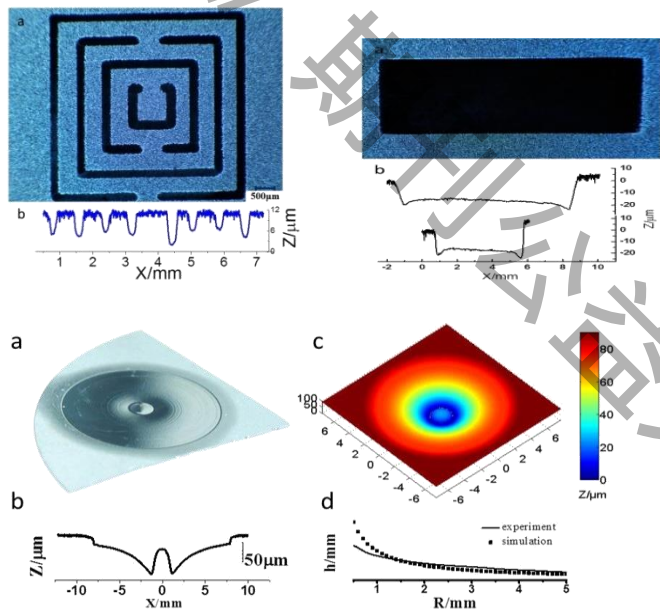
电化学全息光刻



约束刻蚀剂层技术发展：超光滑表面加工



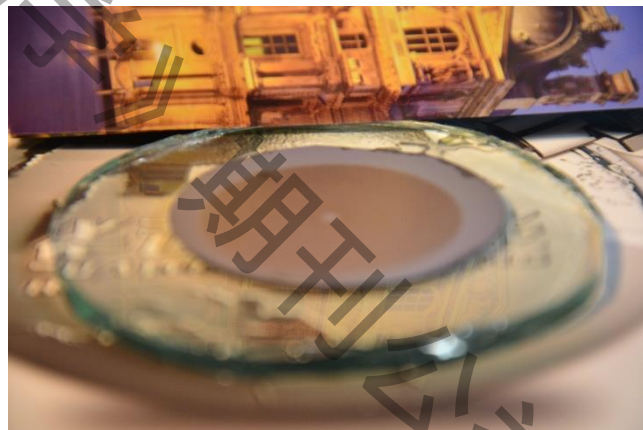
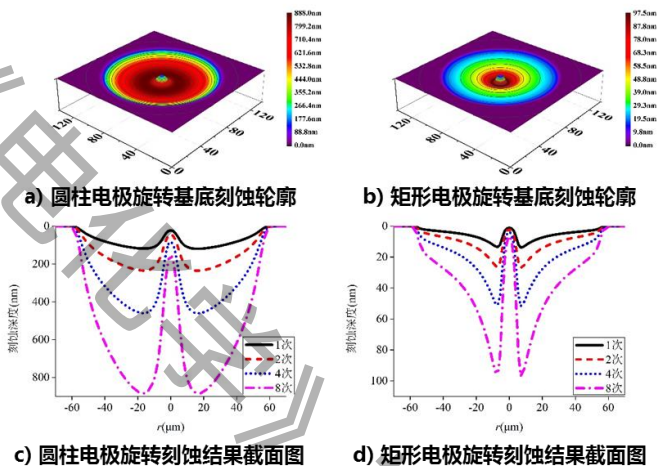
运动速度对刻蚀剂浓度分布的影响



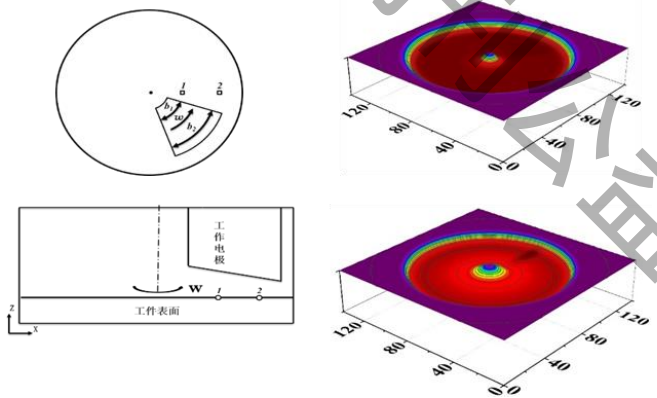
加工间距对刻蚀剂浓度分布的影响

运动流场和约束刻蚀的偶联效应

通过刀具仿形和运动补偿，确保加工精度。



回转运动对刻蚀进程的影响

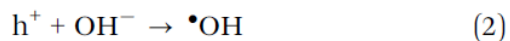
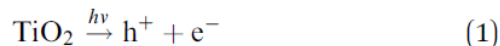


刀具仿形对刻蚀进程的影响

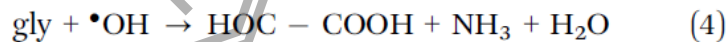
晶圆量级的半导体表面去除和抛光

超光滑表面加工：光生自由基约束刻蚀

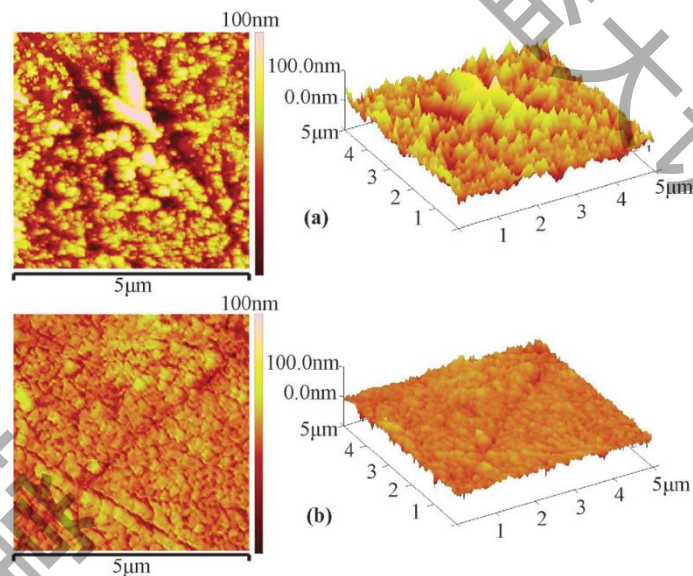
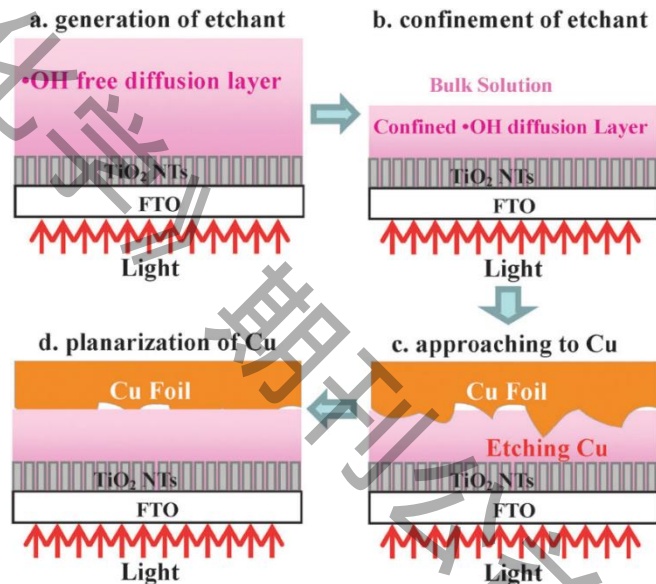
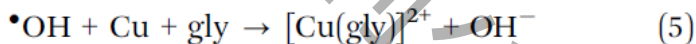
(1) Generation reaction of the etchant $\bullet\text{OH}$ on the surface of the TiO_2 nanotube array based photoelectrode:



(2) Scavenging reaction to form the CEL:

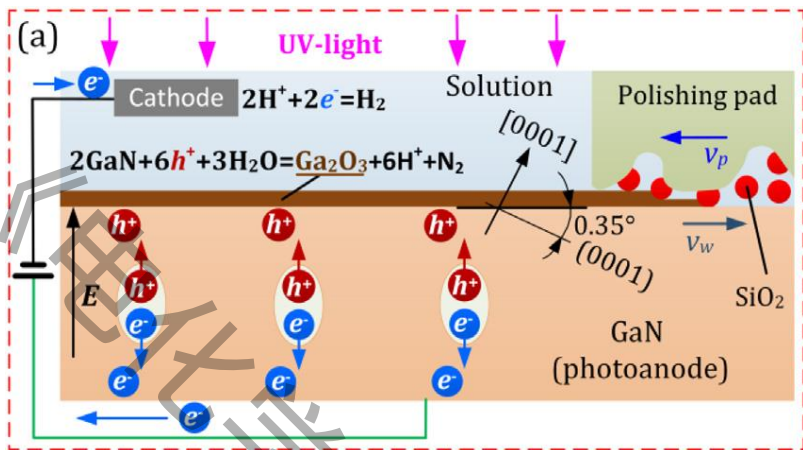


(3) Etching and planarization of the Cu foil:

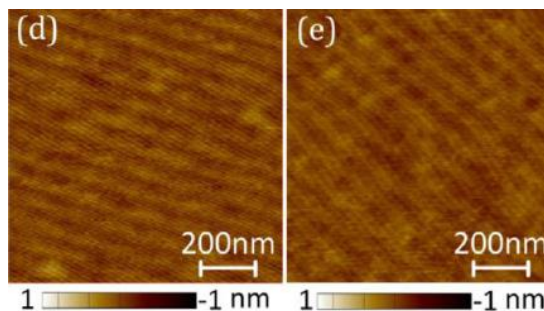
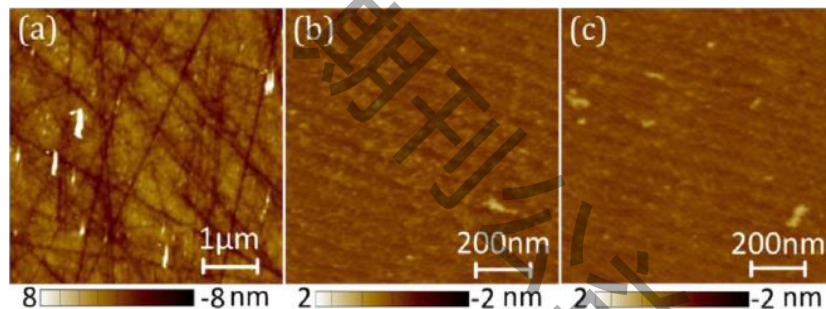
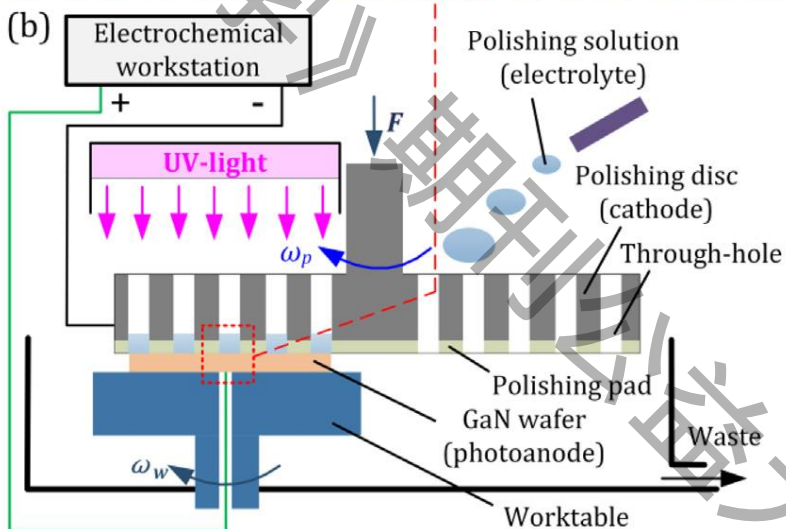


J. Zhou, et al, **Chem. Commun.**,
 2013, 49, 6451.

超光滑表面加工：光电化学机械抛光



- 首次提出光电化学机械抛光的原理和方法
- 去除效率较化学机械抛光提高一个数量级
- 实现了原子级的表面粗糙度



去除速率

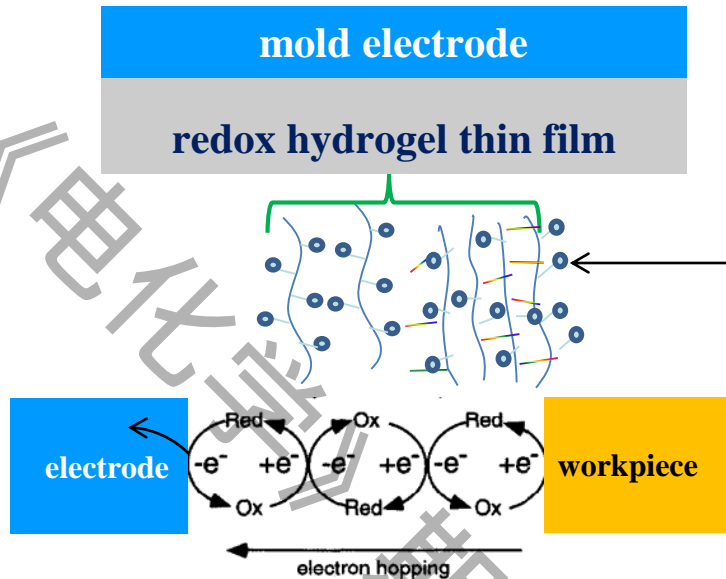
1.2 $\mu\text{m}/\text{h}$

光电化学机械抛光

氮化镓晶圆的光电化学机械抛光效果

K. Shi et al., **CIRP 20 Annals - Manufacturing Technology** 2019, 68, 205.

超光滑表面加工：氧化还原功能性纳米膜



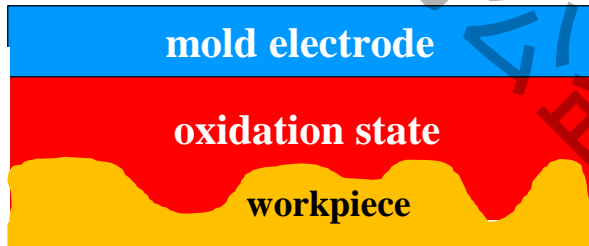
物理约束

Electrochemical groups are anchored at polymer chain

Slow electron hopping transfer is the rate-determining step of etching process

Distance sensitivity

Electrochemical reversibility



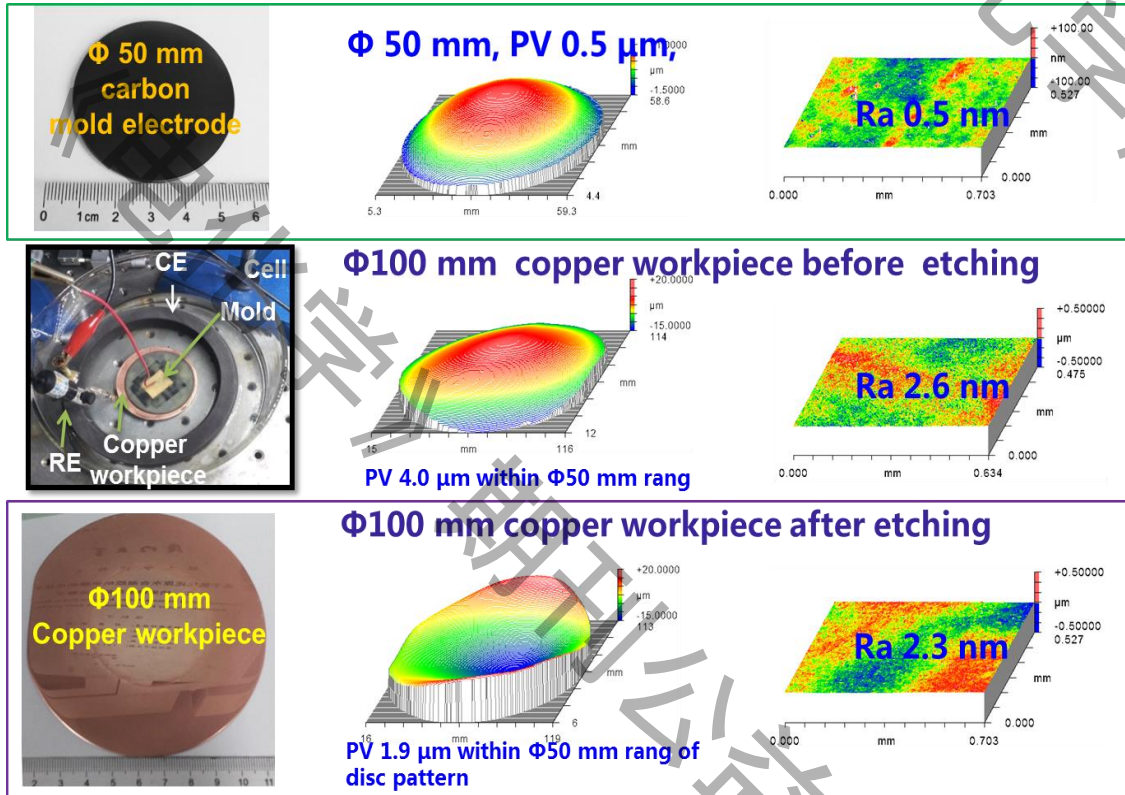
self weight soft feature



high-precision interval and parallelization

No more need for distance adjustment equipment

超光滑表面加工：氧化还原功能性纳米膜



基于氧化还原功能性纳米膜的约束刻蚀体系研究

固-固表面间纳尺度和精度的平行度控制机理及方法

大面积固-固表面间隔内氧化还原功能性纳米膜物理化学行为及对纳米加工的影响

基于氧化还原功能性纳米膜的电化学纳米加工表面质量和工艺过程研究

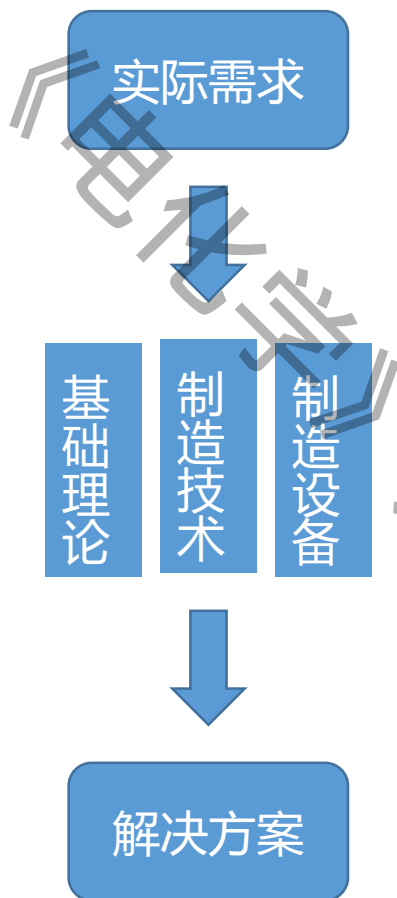
K. Shi, et al, Unpublished results.

约束刻蚀剂层技术的**技术特点**

- CELT 不仅能批量复制加工复杂的三维微/纳米结构，而且能够用于平面、柱面、曲面、球面和非曲面工件表面的超光滑抛光。
- CELT 对距离敏感，因此加工结果不受加工工件表面初始粗糙度的影响。
- CELT 本质上是一种化学刻蚀技术，因此能对柔性材料、易碎材料、硬质材料（甚至比工具更硬的材料）进行刻蚀。
- 相比精密机械加工技术和纳米压印技术，CELT 的模板与加工工件之间没有直接的机械接触，因此加工过程中没有热效应，而且模板和工件没有机械损伤。
- 相比能量束刻蚀技术，CELT 可以避免对工件材料表层及亚表层的破坏和损伤。
- 相比LIGA 和EFAB 技术，CELT 为一次成型，不需要光刻、整平、层间对准等前处理或后续处理。
- 相比化学机械抛光，CELT 可以选择性地去除铜而不影响电介质，因此可以通过原位反馈电流很好地控制抛光终点。
- 相比于光刻和纳米压印，无需光刻胶、热塑性和光固化介质，无需任何辅助工艺，直接在半导体晶圆上制备3D微纳米结构。

- 电化学加工技术简介
 - ◆ 历史沿革和产业需求
 - ◆ 减材制造：电解加工
 - ◆ 增材制造：电铸加工
 - ◆ 技术特点和不可替代性
- 电化学微纳加工技术
 - ◆ 重大产业需求和关键科学问题
 - ◆ 三维微纳米结构功能结构的制造
 - ◆ 超光滑表面的制造
 - ◆ 约束刻蚀剂层技术
- 感言

个人的体会和思考，请各位同仁不吝赐教。我的电子邮箱是：dpzhan@xmu.edu.cn



微纳尺度空间内的电极过程动力学

传质、传荷、偶联反应、物料平衡.....

物理外场调控的电化学反应

大面积、纳米薄层电解质溶液体系内部的电化学反应
能否摆脱2-电极或3-电极体系的限制?

特征尺寸10 nm以下的电铸技术

微纳尺度限域空间内部可控的成核和生长

20吋晶圆的亚纳米粗糙度和纳米级面型精度

无磨粒、无压力、无应力，但高效率?
能否实现流场（如磁流变）与电化学反应结合，使之不仅适用于平面抛光，而且适用于曲面抛光?

原子级别的增减材制造、抛光和整平

如何有效控制原子级别的反应进程?
如何提高加工效率?

感谢国家自然科学基金委的持续支持！

感谢田昭武院士、田中群院士的鼓励、支持和指导！

感谢我的同事时康教授、周建章副教授、杨防祖副教授、韩联欢助理教授、苏建加高级工程师！

感谢上海交通大学朱利民教授团队、大连理工大学康仁科教授团队、哈尔滨工业大学闫永达教授团队、西安交通大学邵金友教授团队、南昌航空大学蒋利民教授团队和厦门大学彭云峰教授团队等长期的富有成效的合作！

感谢十年来在实验室辛勤工作的研究生们！

感谢您的关注!

欢迎您来厦门大学指导工作、开展合作!



Department of Chemistry, College of Chemistry & Chemical Engineering

State Key Laboratory of Physical Chemistry of Solid Surface

