

# 精密加工技术的新进展

---

哈尔滨工业大学

袁哲俊

2008年11月

# 中国制造业面临的形势

1. 中国制造业规模已达世界第三位，仅次于美国、日本，现在已超过德国。
2. 在钢铁、水泥、电视机、摩托车等年产量都是世界第一。
3. 但制造业大而不强，是制造大国而不是制造强国。例如钢铁，我们大量出口低价钢材而进口高附加值的合金钢。机床也是出口廉价的简单机床，进口昂贵的数控和精密机床

表1 我国机床进出口情况 (亿/美元)

年度	产值	出口	进口	消费
2000	21.97	2.99	18.90	37.88
2003	23.80	3.80	41.60	67.00
2006	64.00	11.90	72.40	131.10
2007	111.9	16.5	70.7	166.10

# 中国制造业存在的问题

1. 机械工业产品落后，国外已是新的机电体化产品，并且产品不断更新，而我国生产的往往是老的产品，产品更新很慢。
2. 不掌握产品核心技术，引进的产品不仅要交专利费，并且不能修改改进。
3. 制造技术落后：设备落后，制造技术工艺落后，加工精度低，生产效率低，生产周期长，新产品试制周期长，原材料和能耗高。
4. 管理落后，非生产人员比例大，对质量要求不严格，质量合格的概念。
5. 研究费用及人力投入少，技术创新少。

# 精密和超精密加工技术

- 精密和超精密加工技术的发展，直接影响尖端技术和国防工业的发展。世界各国在这方面都极为重视，投入很大力量进行开发研究，同时技术保密，控制出口。
- 由于一些重要的高精度机床设备和仪器，国外对我们封锁禁运，而这些精密设备仪器正是国防和尖端技术发展所迫切需要的，因此我们必须投入必要的人力物力，自主发展精密和超精密加工技术，

# 精密机床的发展

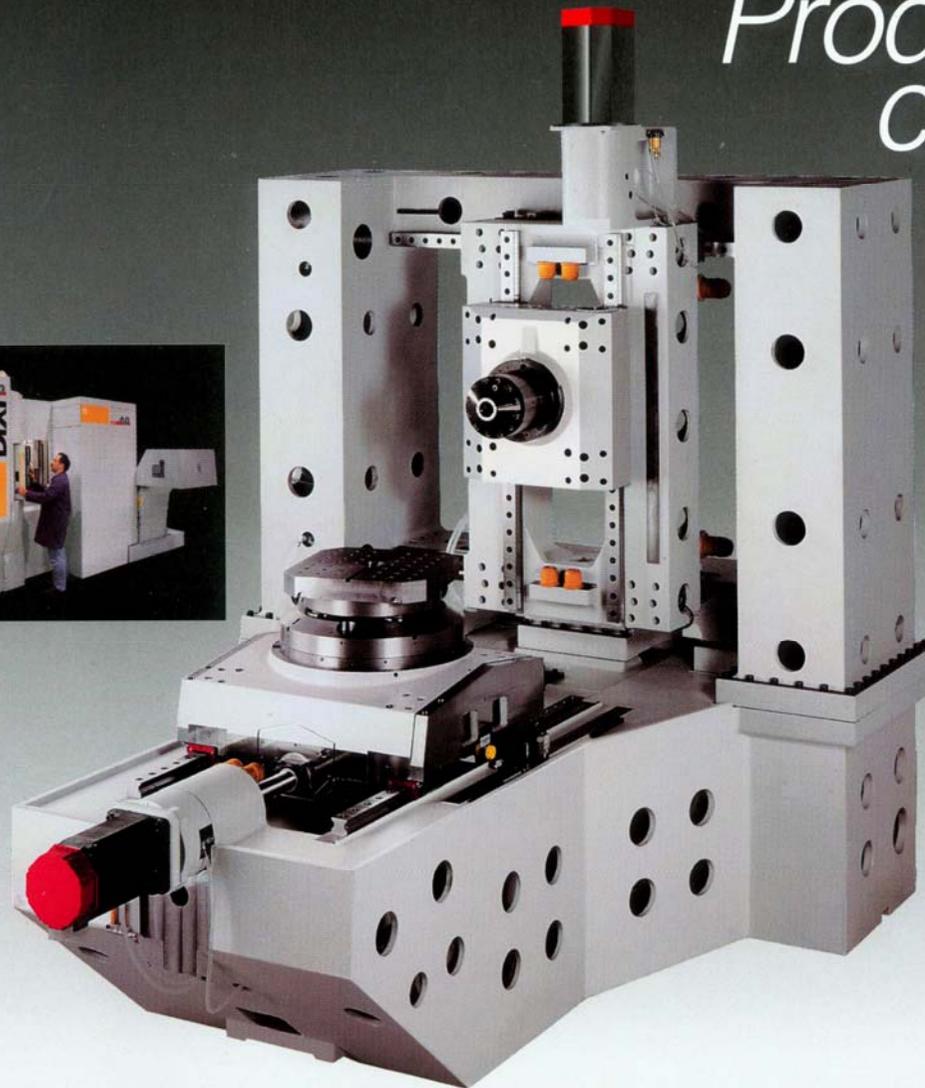
- 精密机床是精密加工的基础。
- 精密机床技术的发展方向是：
  1. 在继续提高精度的基础上采用高速切削以提高效率
  2. 采用数控使其自动化。
- 普通多轴高速加工中心提高精度，达到精密机床水平

# 瑞士DIXI高速精密镗床

$n = 24000\text{r/min}$  定位精度 $0.8\ \mu\text{m}$

*Production  
centers*

**DHP** **40**  
**50**  
**80**



# 瑞士MIKRON高速精密五轴加工中心

## 主轴转速 $n=36000/42000/54000\text{r/min}$



$f = 40 \text{ m/min}$

定位精度达到  $5 \mu\text{m}$

# 德国DMG 75V高速五轴加工中心

主轴转速  $n=18000/28000/42000\text{r/min}$



$a = 2\text{ g}$   
 $f = 90\text{ m/min}$

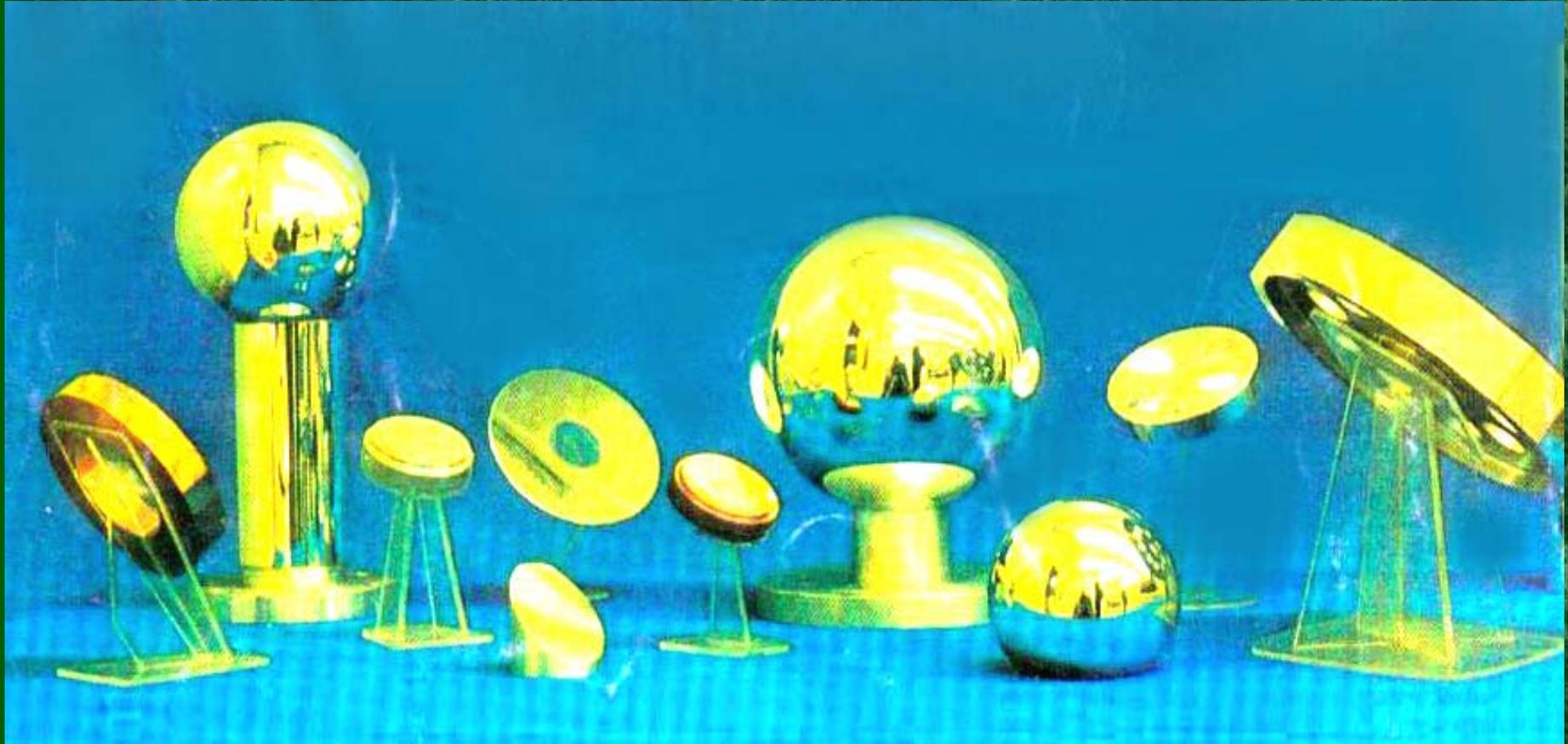
# 精密和超精密加工技术

1. 金刚石刀超精密切削
2. 超精密机床
3. 超精密磨削和研磨
4. 超精密测量技术

# 超精密切削零件



# 超精密切削零件



# 激光核聚变装置

## High power laser for inertial confinement fusion (ICF)

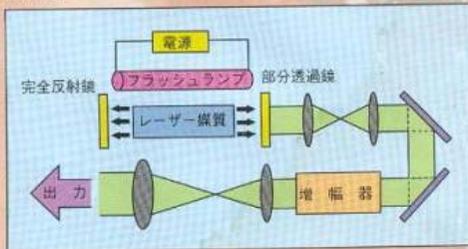
レーザー核融合研究には大出力レーザーが必要です。例えば当研究センターのガラスレーザー「激光XII号」装置は、約10億分の1秒の間に25キロジュールのレーザーエネルギーを出力できる世界最大級のシステムです。レーザー核融合では、レーザー部と核融合炉が分離できるので、炉構造がシンプルになるのが特徴です。また、環境保全や安全性の面から重要なことは、原子炉で問題となる放射線の高い核反応生成物質が核融合炉内で蓄積されないことです。

High power lasers are necessary for laser fusion research. The GEKKO XII system at ILE is one of the largest laser systems worldwide, that can provide 25 kJ in 1 nsec. In ICF reactor system, the laser can be designed separately from the reactor itself, and thus the structure will be simple. Furthermore, it is important for environment and safety that radio-active ashes do not accumulate in the reactor.

### レーザーとは What is laser?

レーザー光を発生させるには、まずレーザー媒質中の原子のエネルギーレベルをフラッシュランプ等の強力な光源によって励起します。媒質中で強い光が自然放出され、伝播の際に他の原子を刺激し、励起された原子が一斉に低いエネルギー準位に移ります。この時発生する光は媒質の両面の反射鏡で反射を繰り返し、増幅された後、片側の部分透過鏡を通過して出てきます。これがレーザー光で、位相がそろって指向性の強い光です。

To generate and amplify laser light, the laser medium is pumped to a higher energy level using an external strong light source. As the spontaneously emitted light propagates through the medium, bulk of the atoms are stimulated to make transition synchronously to a lower energy level, producing stimulated emission of light. Further, the generated light is continuously reflected on the both sides of the medium and thus amplified. Intense laser light comes out from one mirror.



### ガラスレーザー「激光XII号」性能

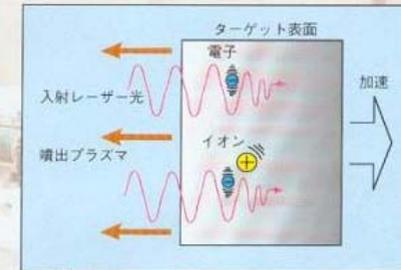
レーザー波長	Laser wavelength	m, 0.53 $\mu$ m, 0.35 $\mu$ m
レーザー出力エネルギー	Laser output energy	(1nsec, 1.05 $\mu$ m) (1nsec, 0.53 $\mu$ m) (1nsec, 0.35 $\mu$ m)
ピークパワー	Peak power	V (0.1nsec, 1.05 $\mu$ m)
ビーム数	Beam number	2 nsec
パルス幅	Pulse width	n
レーザー出力口径	Final output aperture	n
集光位置精度	Accuracy of focusing position	n
最小集光径	Focusable spot size	n

### レーザーによる加熱と加速

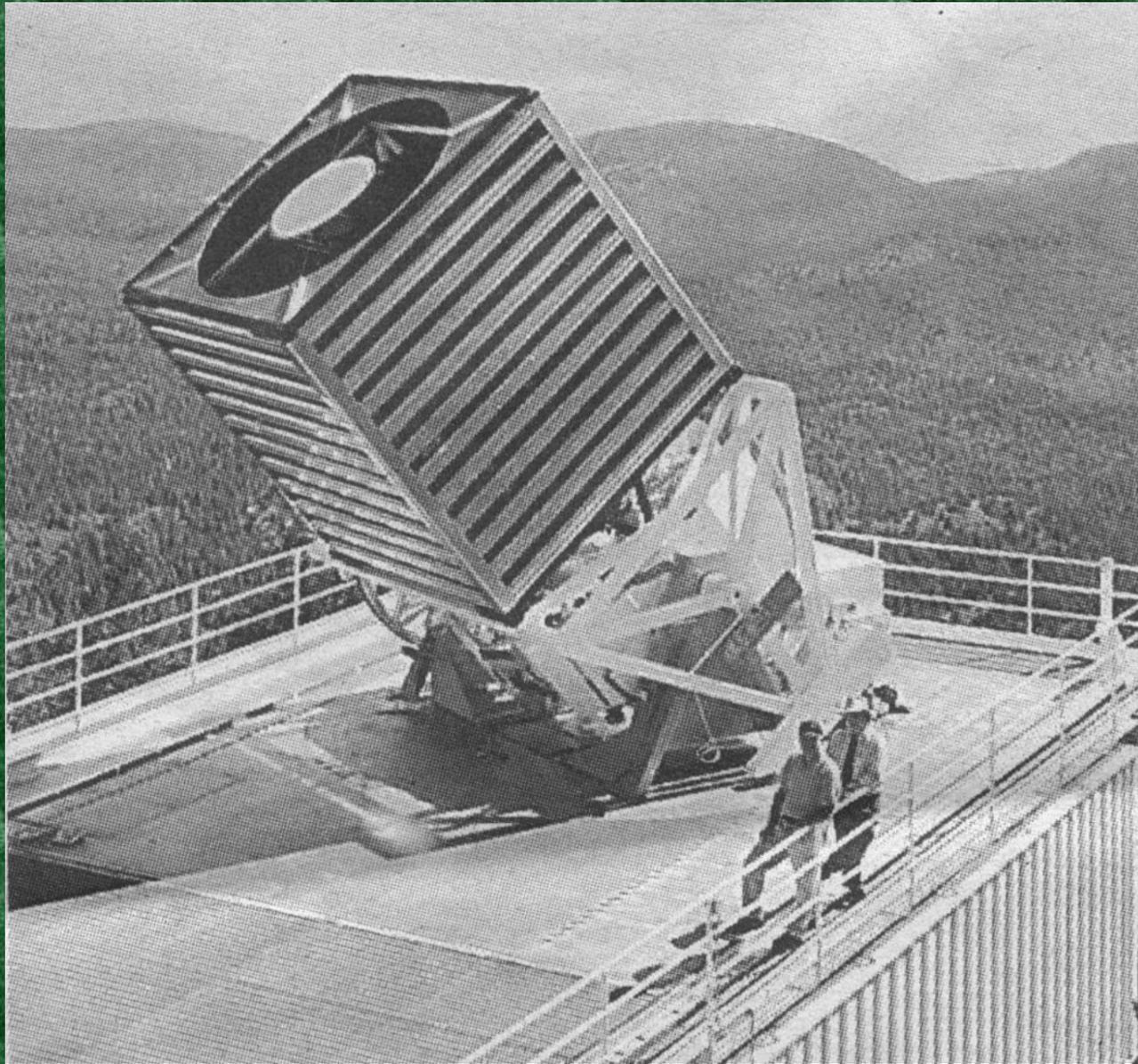
#### Heating and acceleration of matter by laser

物質中に入射したレーザー光により電子は激しく揺り動かされます。激しく運動する電子はイオンと衝突し、運動エネルギーが熱エネルギーに変換されます。この結果、物質の温度は急激に上昇し、イオンと電子が分離して互いに自由に動き回る状態（プラズマ）となります。こうして加熱・電離されたプラズマ状態となった表面物質は、下図のように左方向に噴出します。この噴出プラズマの反動で、ロケットと同様にターゲットに反作用が働き、残りの部分が右方向に加速されます。これがレーザーを使ったターゲット加速の基本原理です。

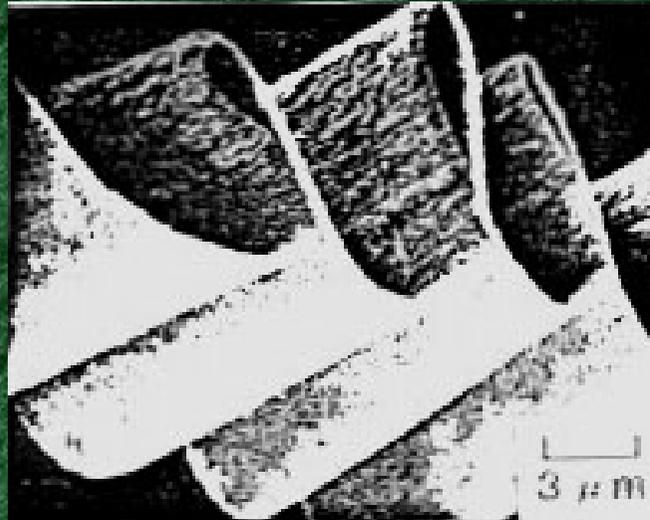
The laser light irradiated on matter shakes electrons, which collide against ions to convert the laser energy into thermal energy. The material is abruptly heated and ionized, where the ions and electrons separately move around (plasma state). As shown below, the heated plasma is ejected leftward. Then, just as a rocket, reaction force accelerates the remaining unheated part rightward. This is the principle of a laser acceleration.



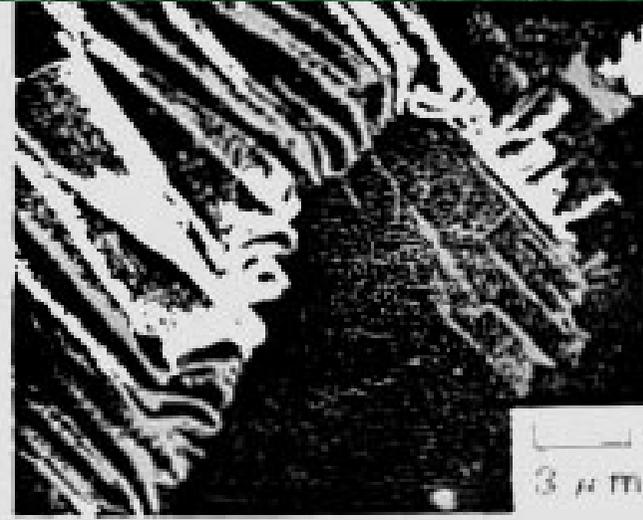
# 美国的高能激光武器



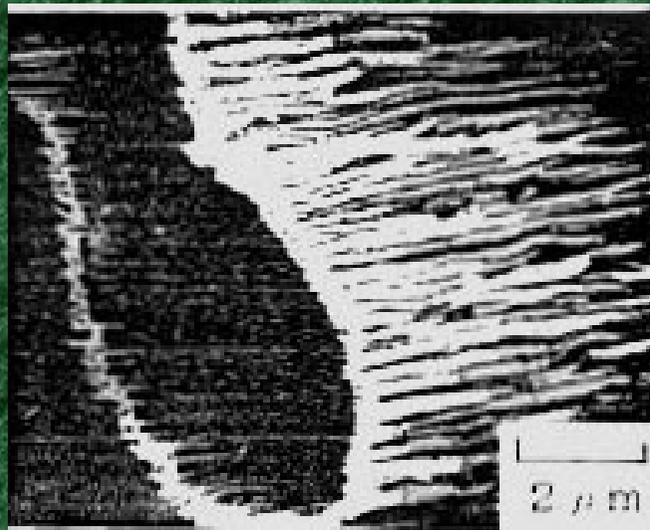
# 超精密切削时允许最小切削厚度



a)  $a = 100 \text{ nm}$



b)  $a = 10 \text{ nm}$

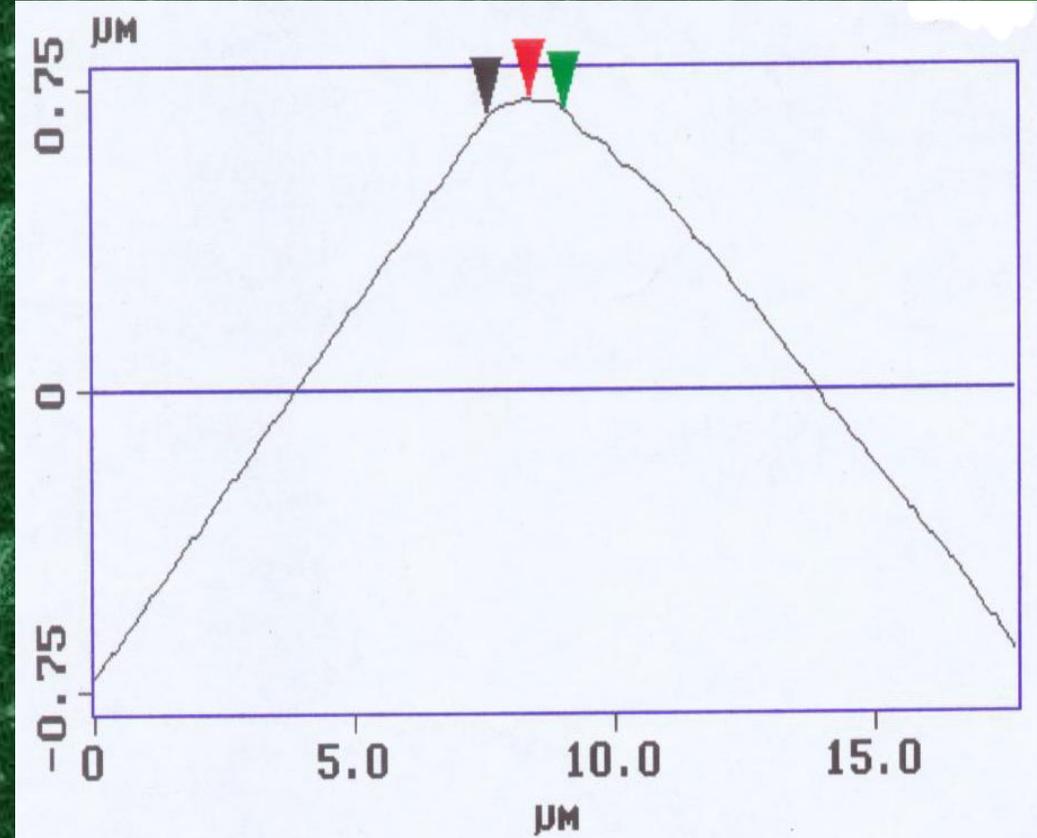


c)  $a = 3 \text{ nm}$

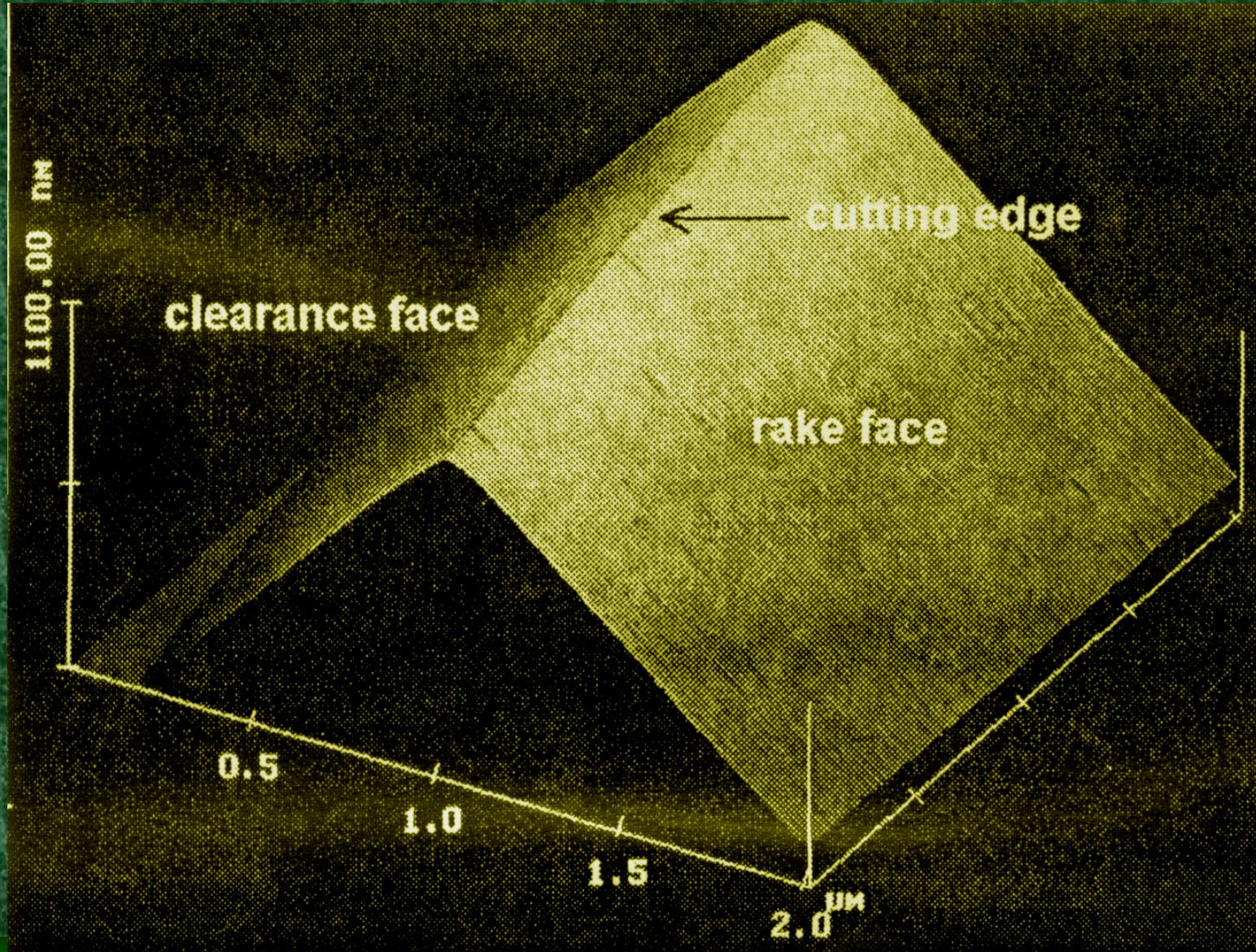


d)  $a = 1 \text{ nm}$

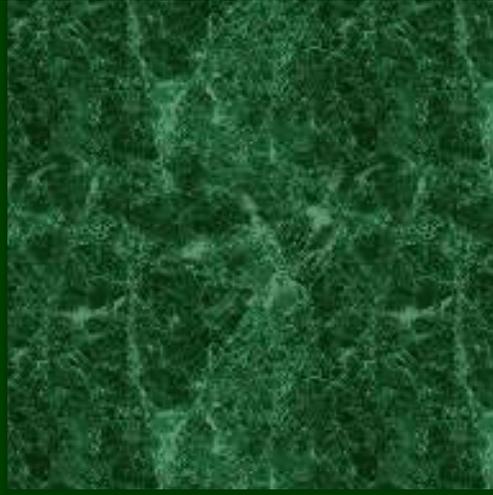
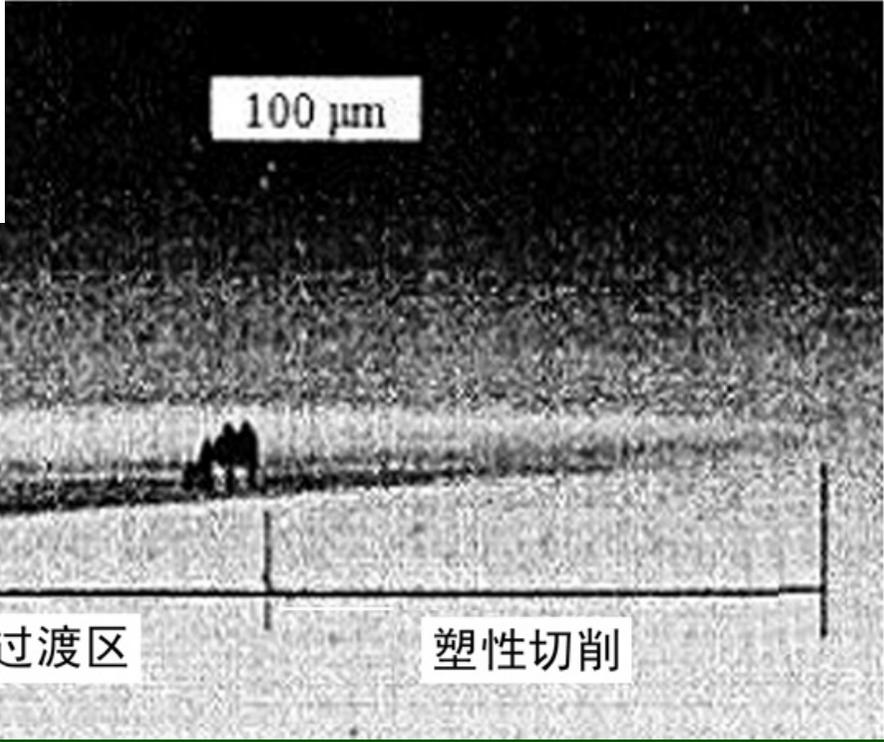
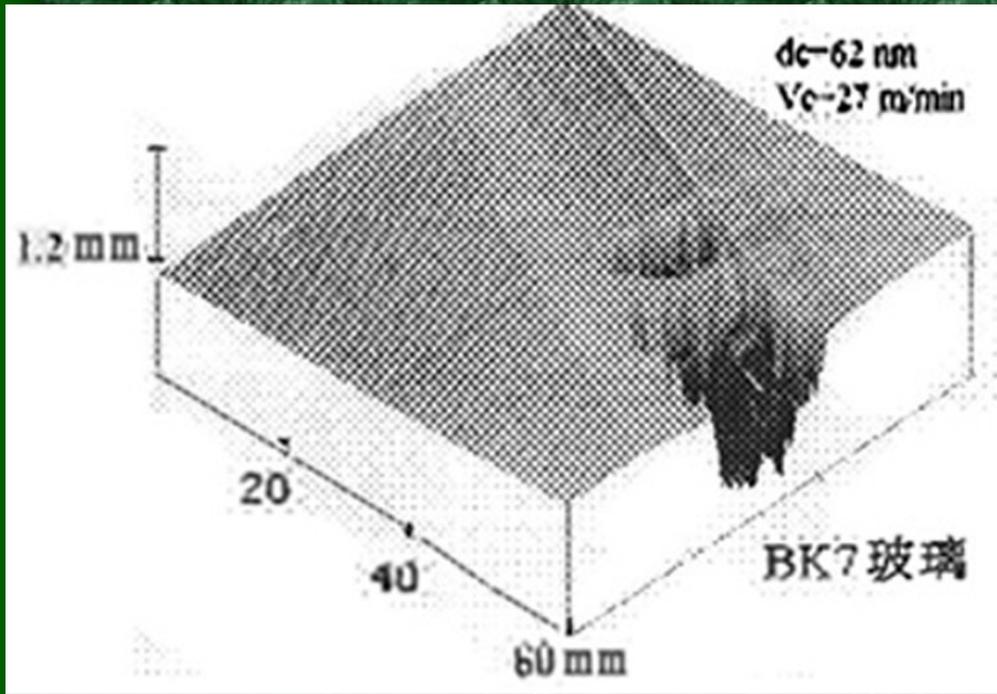
# AFM测量金刚石刀具刃口半径



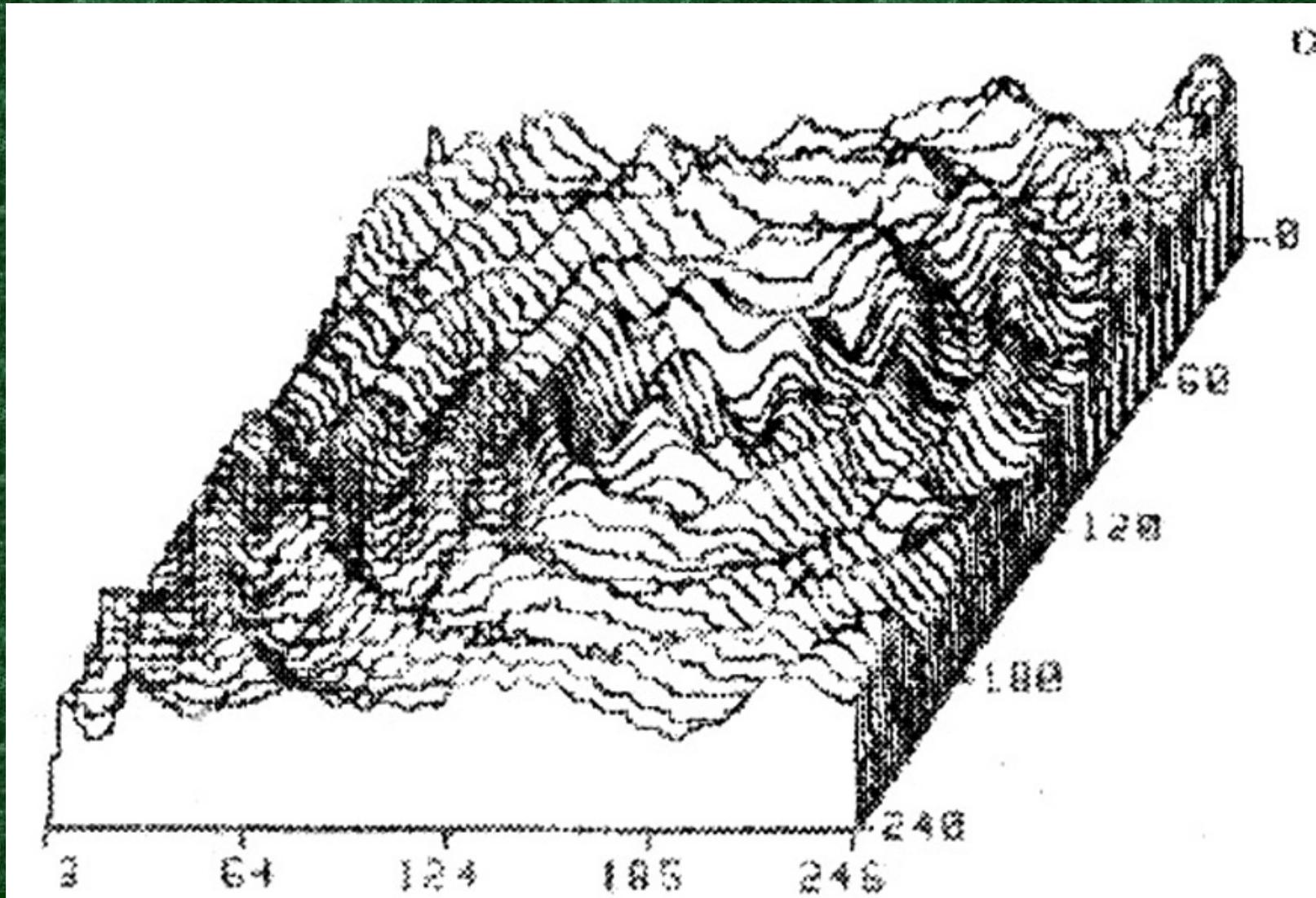
# AFM 检测刃口半径



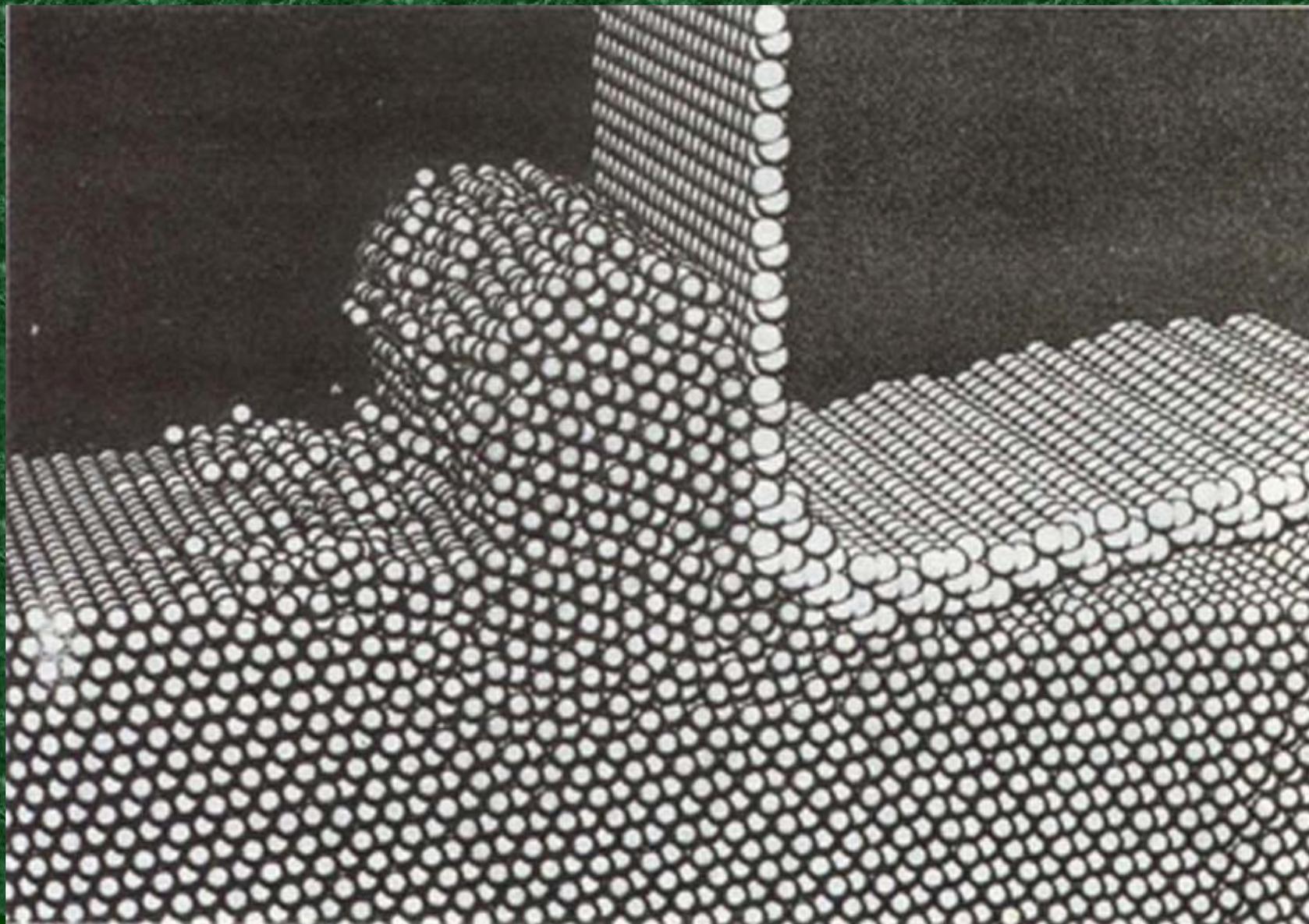
# 超精密切削玻璃时的脆塑转变



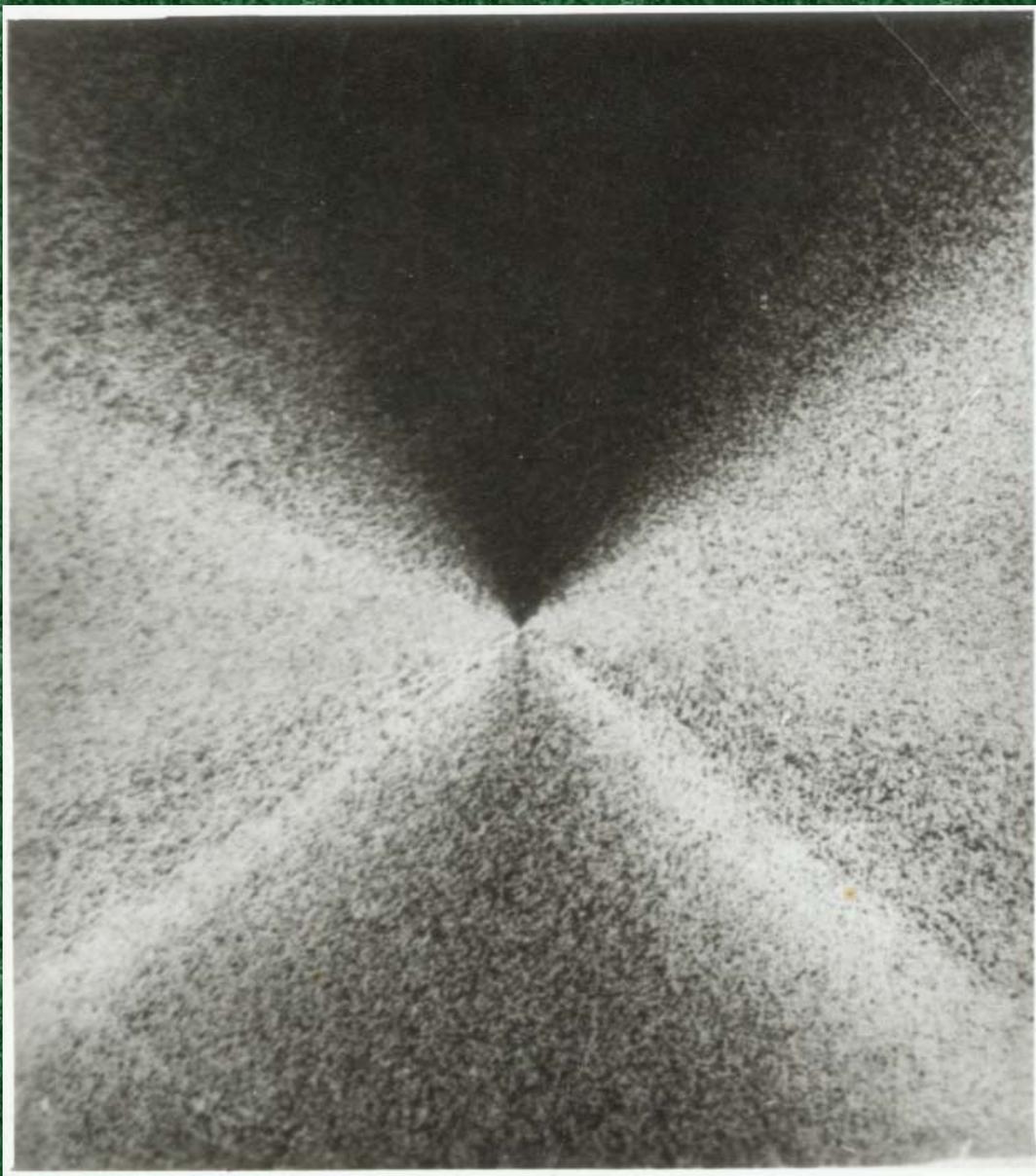
# 超精密切削表面形貌的仿真



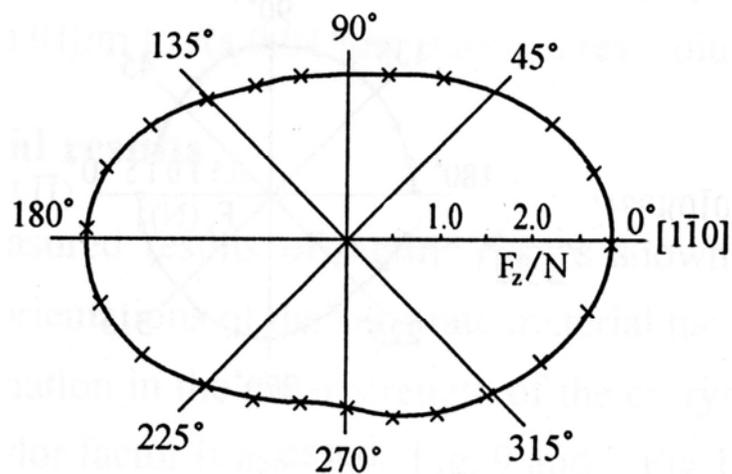
# 超精密切削的分子动力学模拟



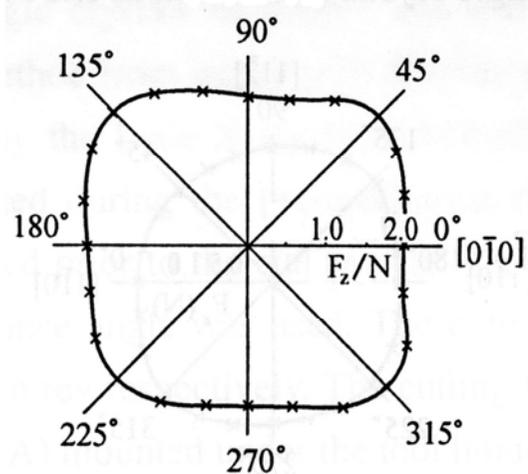
# 超精密切削各向异性晶体



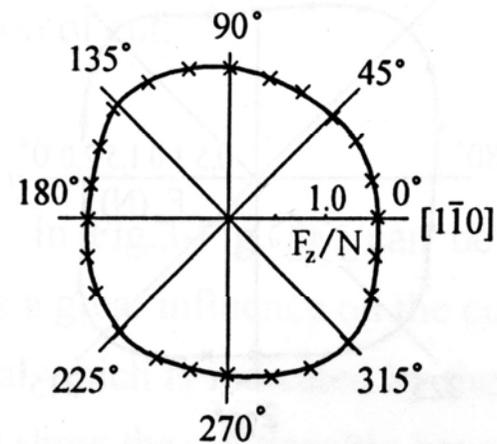
# 超精密切削单晶铝 不同晶面时切削力



a)  $110$ 晶面



b)  $100$ 晶面

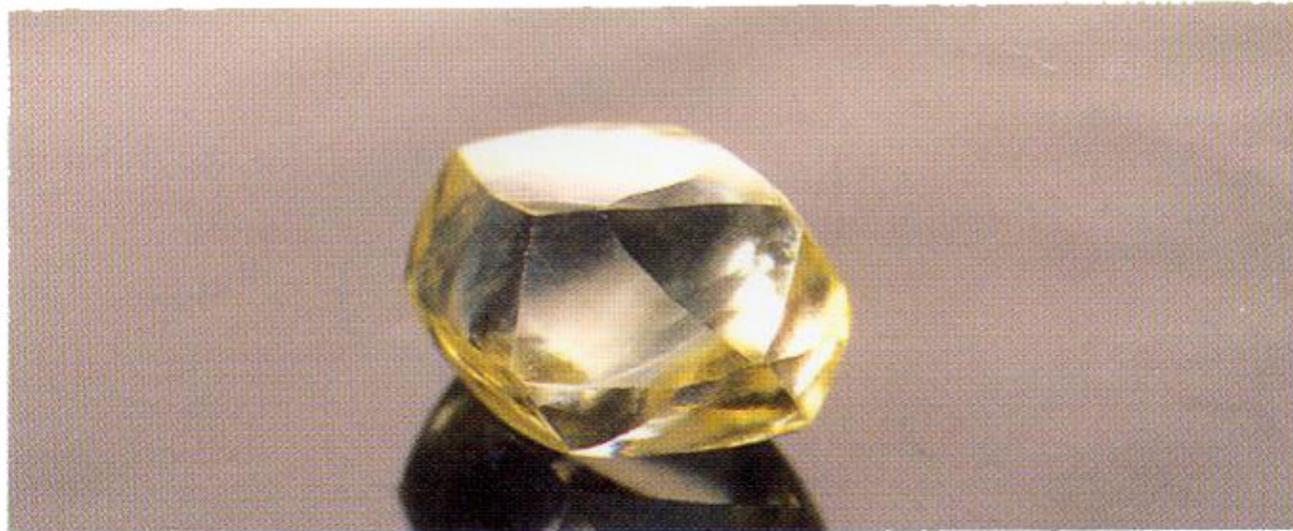


c)  $111$ 晶面

# 金刚石晶体



Sumicrystal



Natural Diamond

# 金刚石晶体激光定向

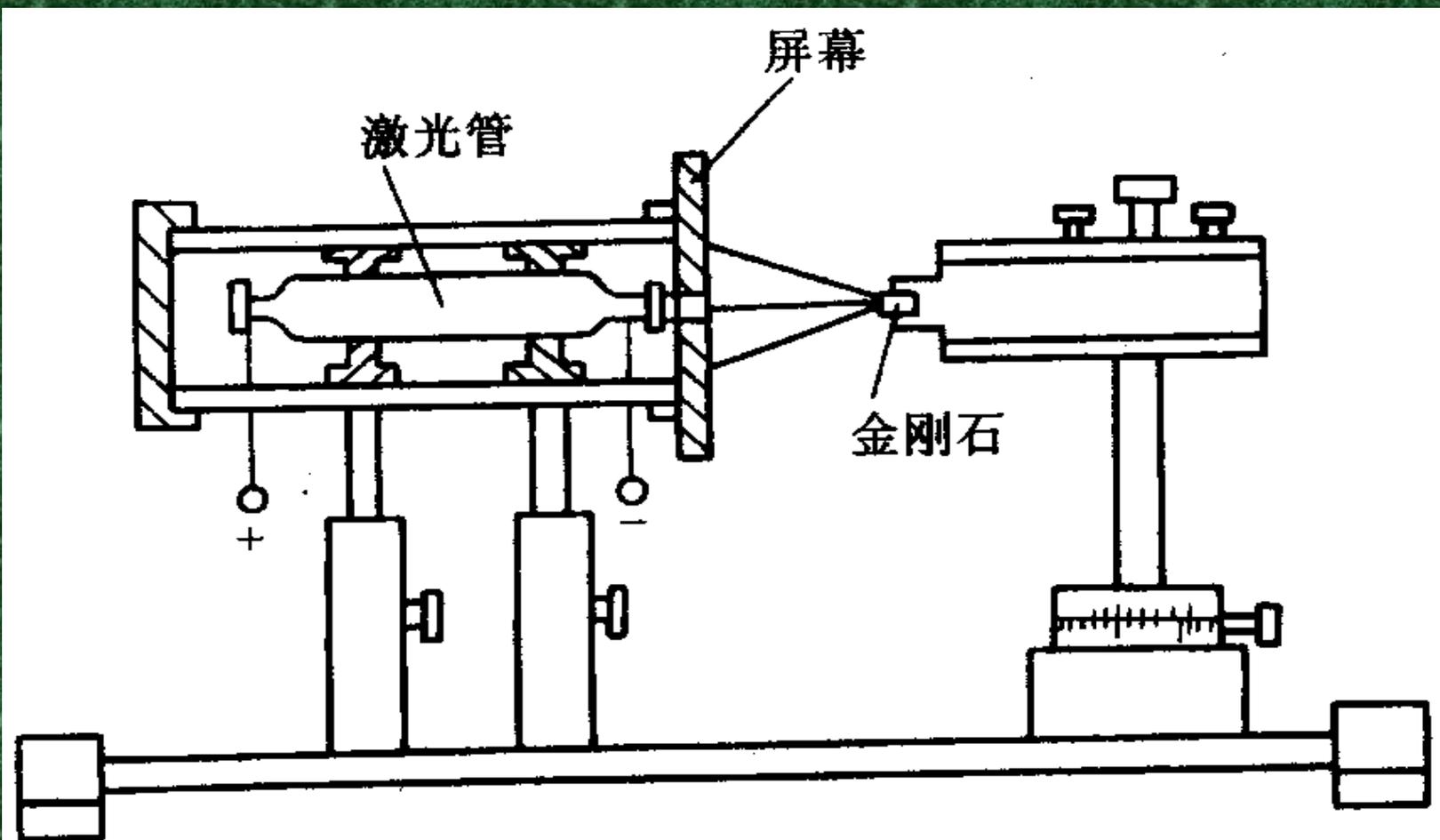
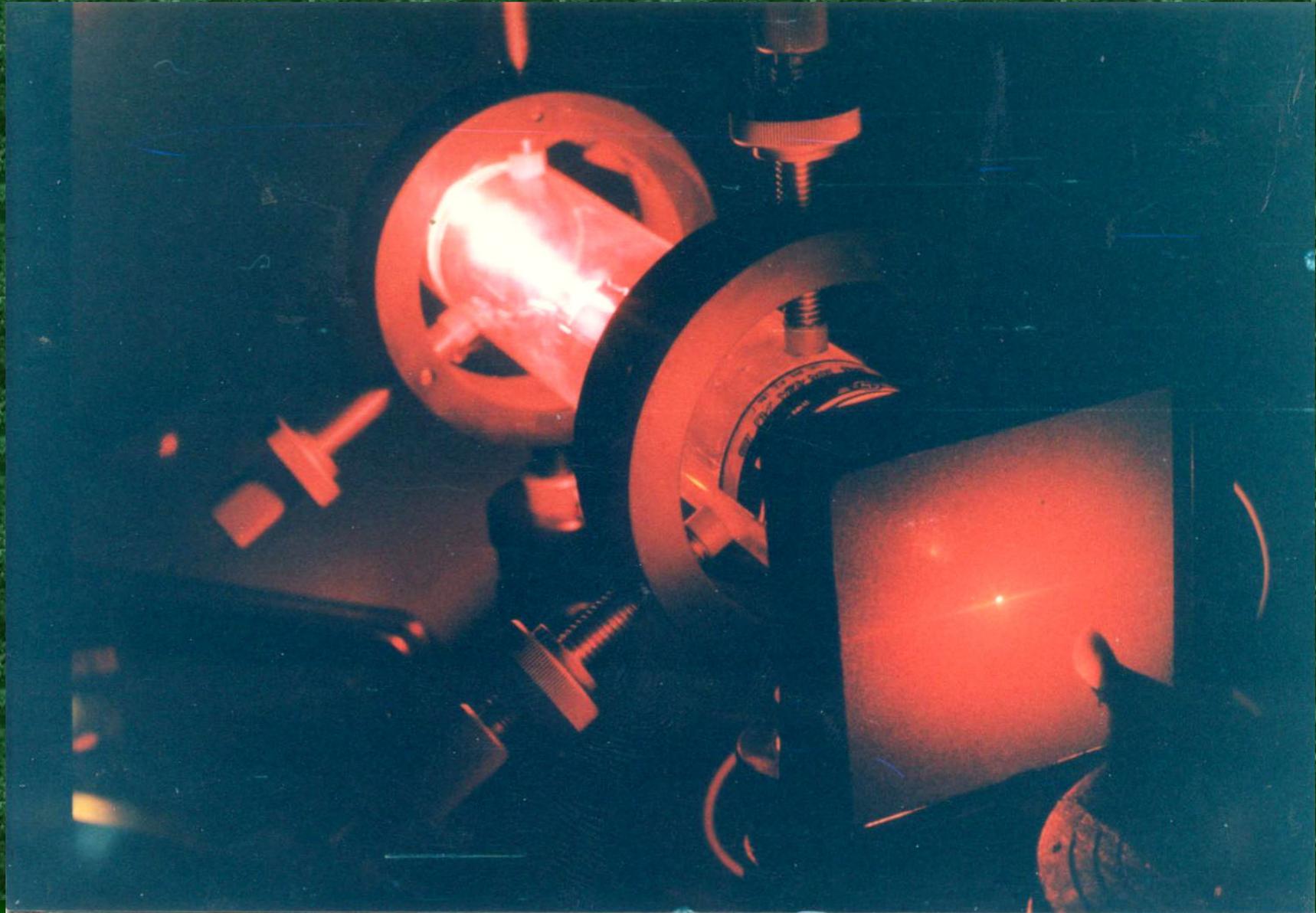
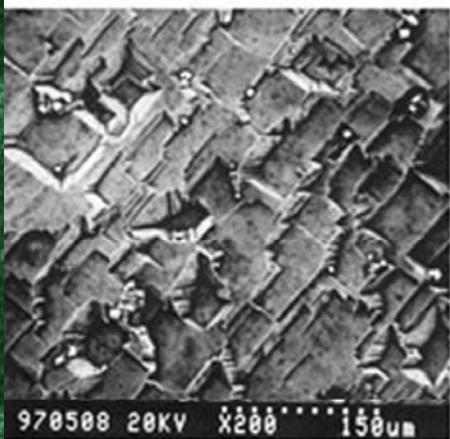
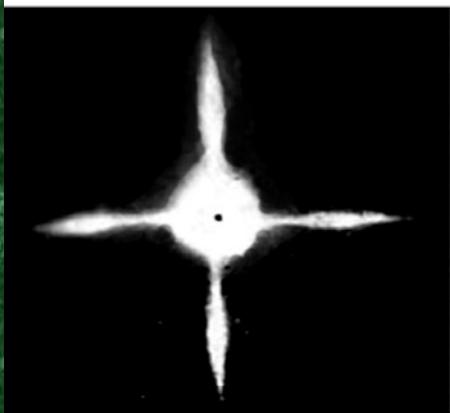
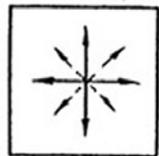


图 2-43 金刚石晶体的激光定向原理

# 金刚石晶体激光定向

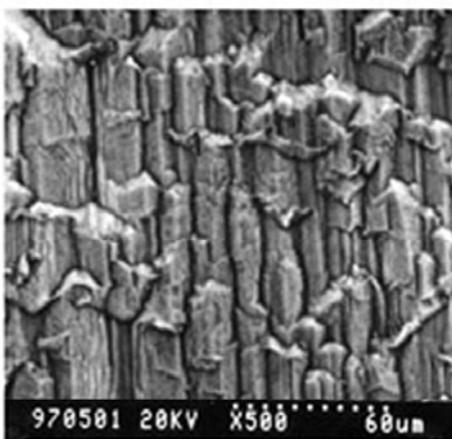
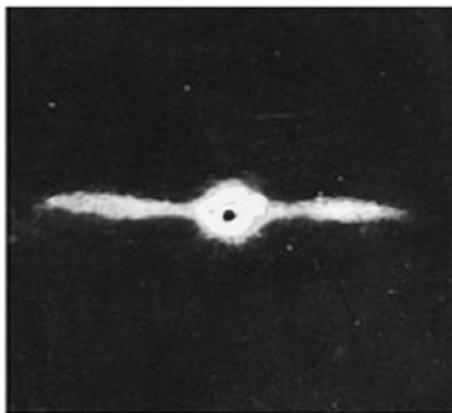
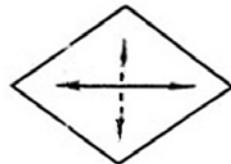


# 单晶金刚石晶面定向



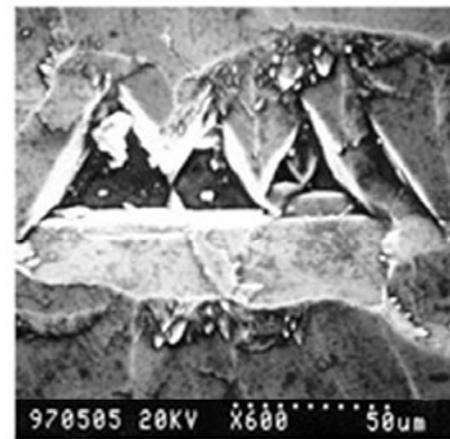
970508 20KV X200 150um

(100)晶面



970501 20KV X500 60um

(110)晶面



970505 20KV X600 50um

(111)晶面

# 金刚石刀具研磨机

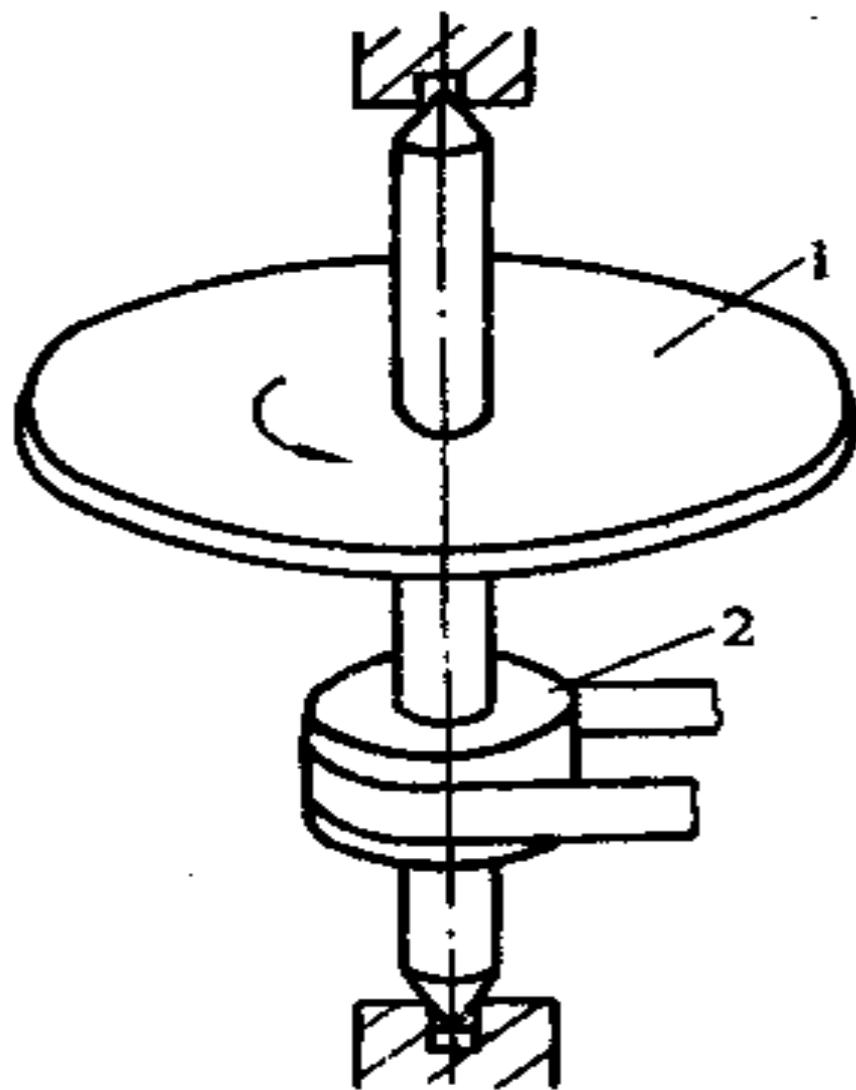


图 2-50 金刚石刀具  
研磨机结构原理图

# MSG-325 超精密机床



# 美国Moore的500FG五轴超精密机床

主轴回转精度  $0.025 \mu\text{m}$  定位精度  $0.3 \mu\text{m}$



# 乌克兰新工作原理超精密机床





# 北京机床所超精密机床



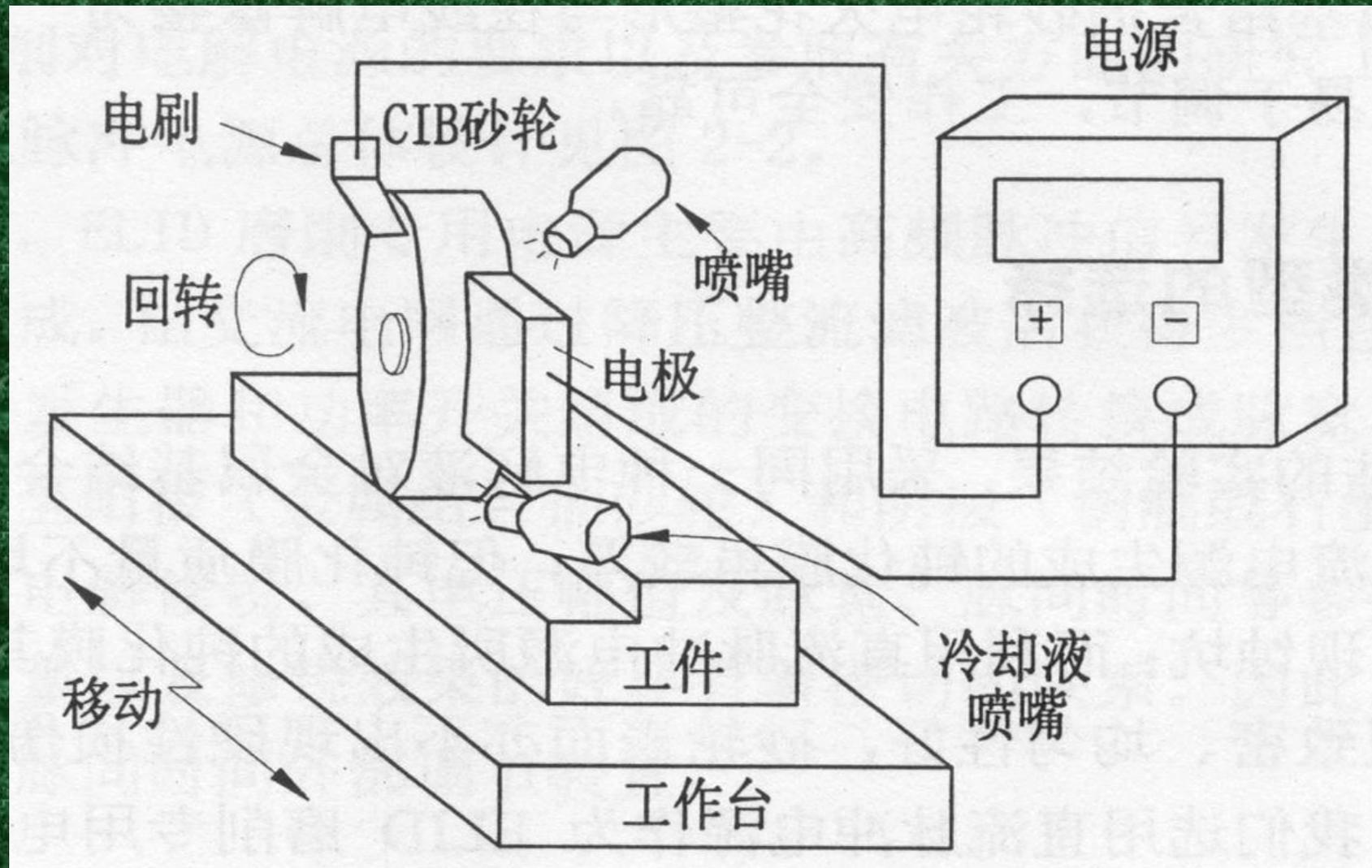
# 哈尔滨工大超精密机床



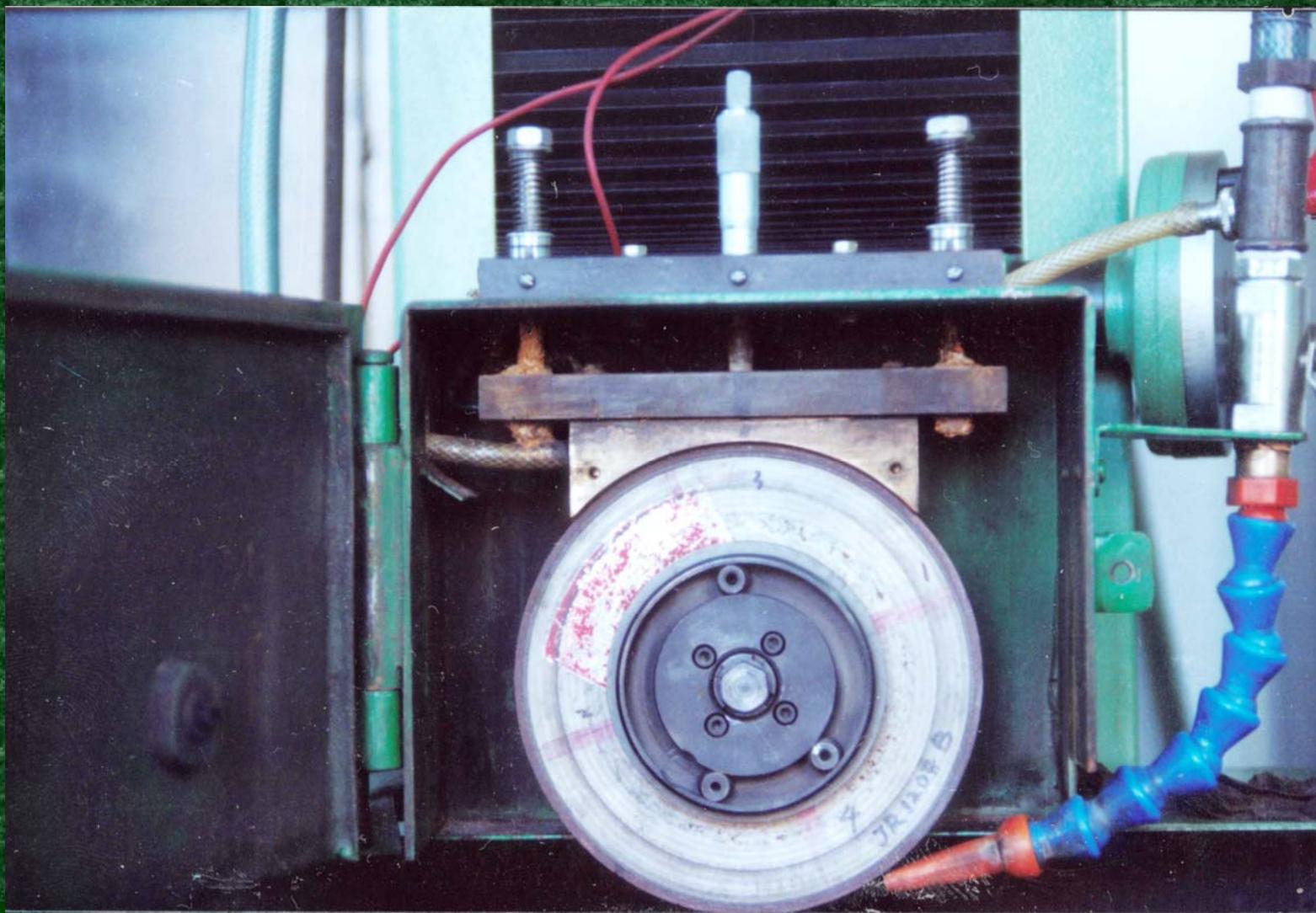
# 加工KDP超精密机床



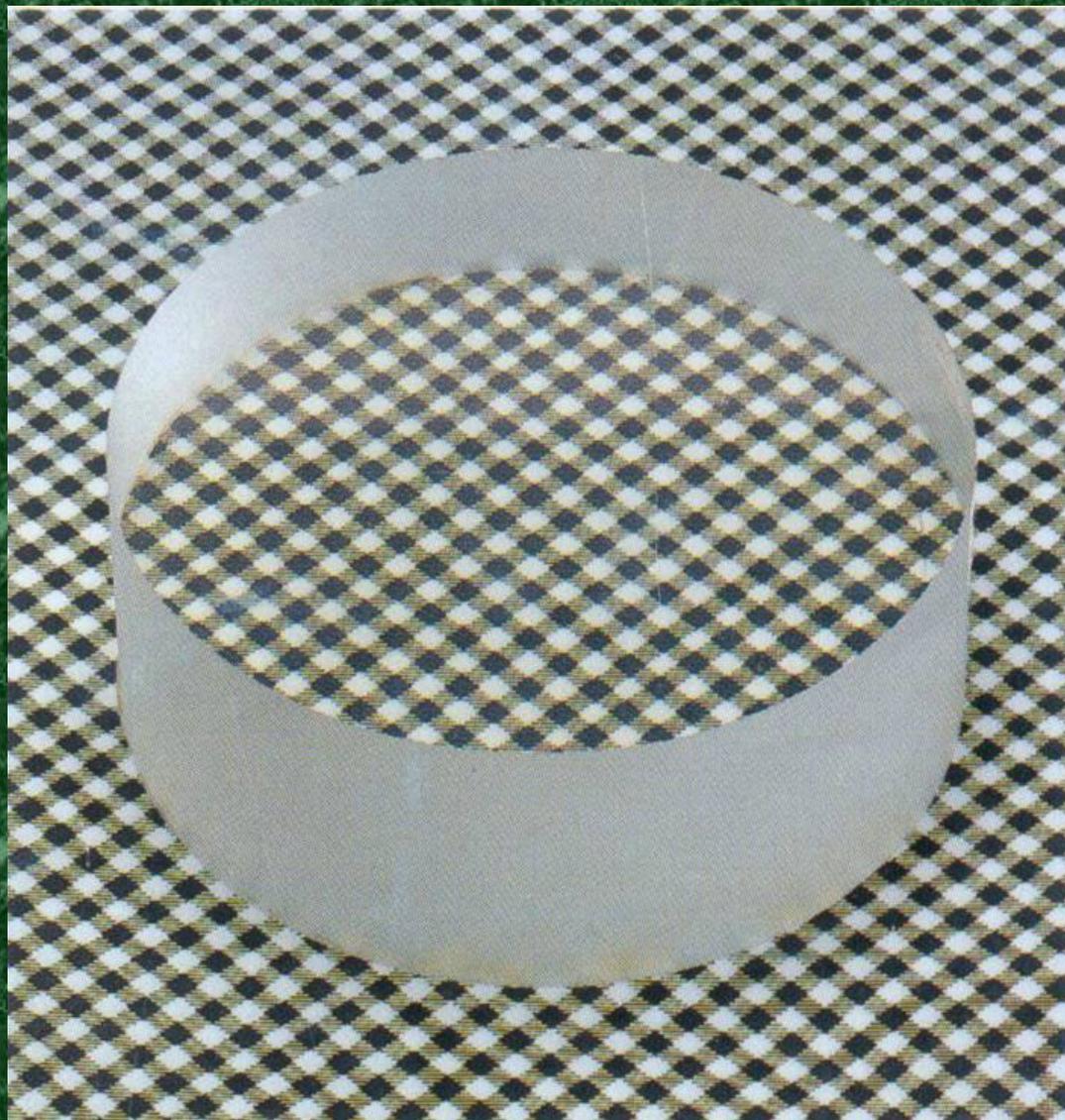
# ELID镜面磨削新工艺的原理



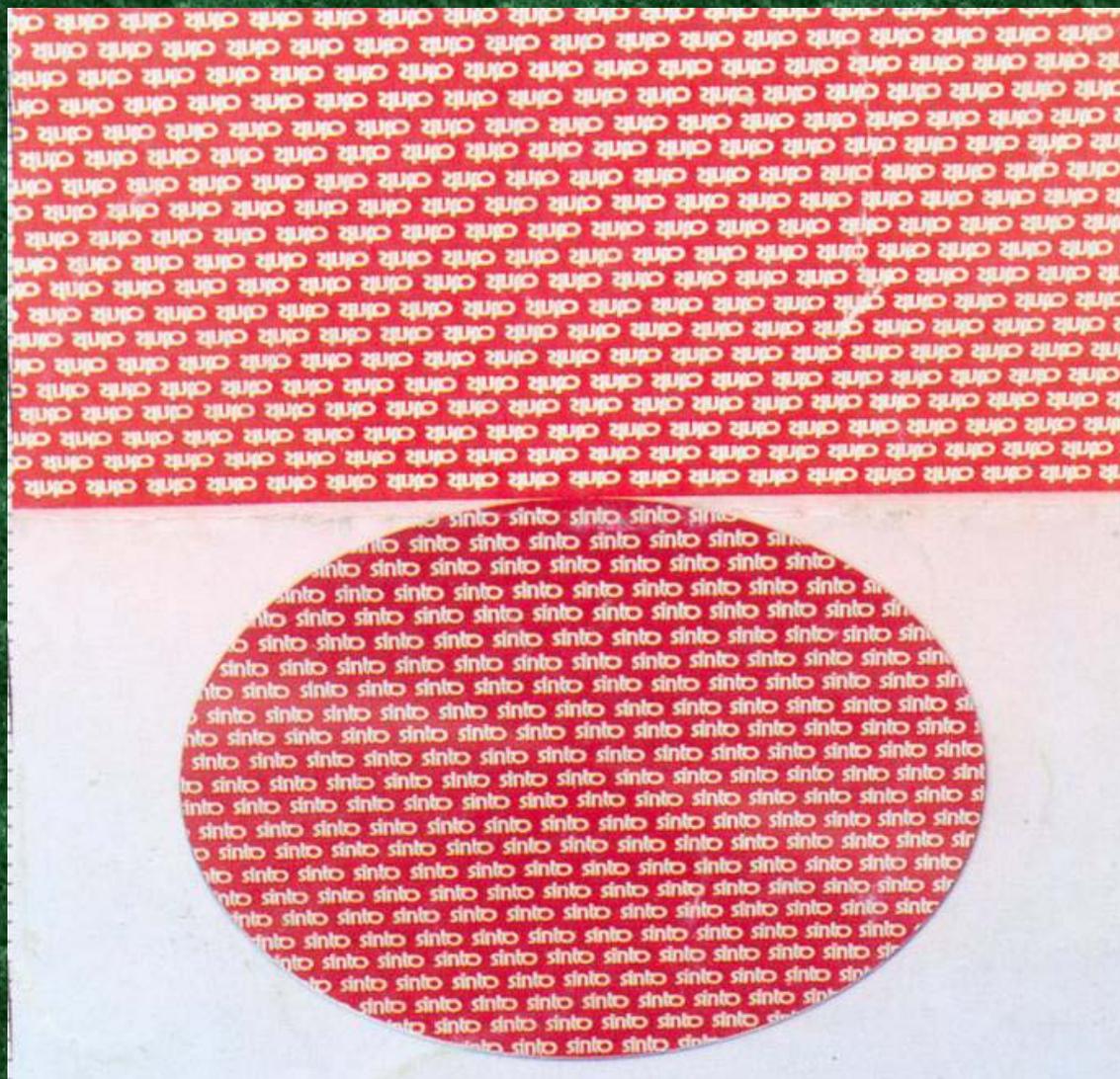
# ELID平面镜面磨削装置



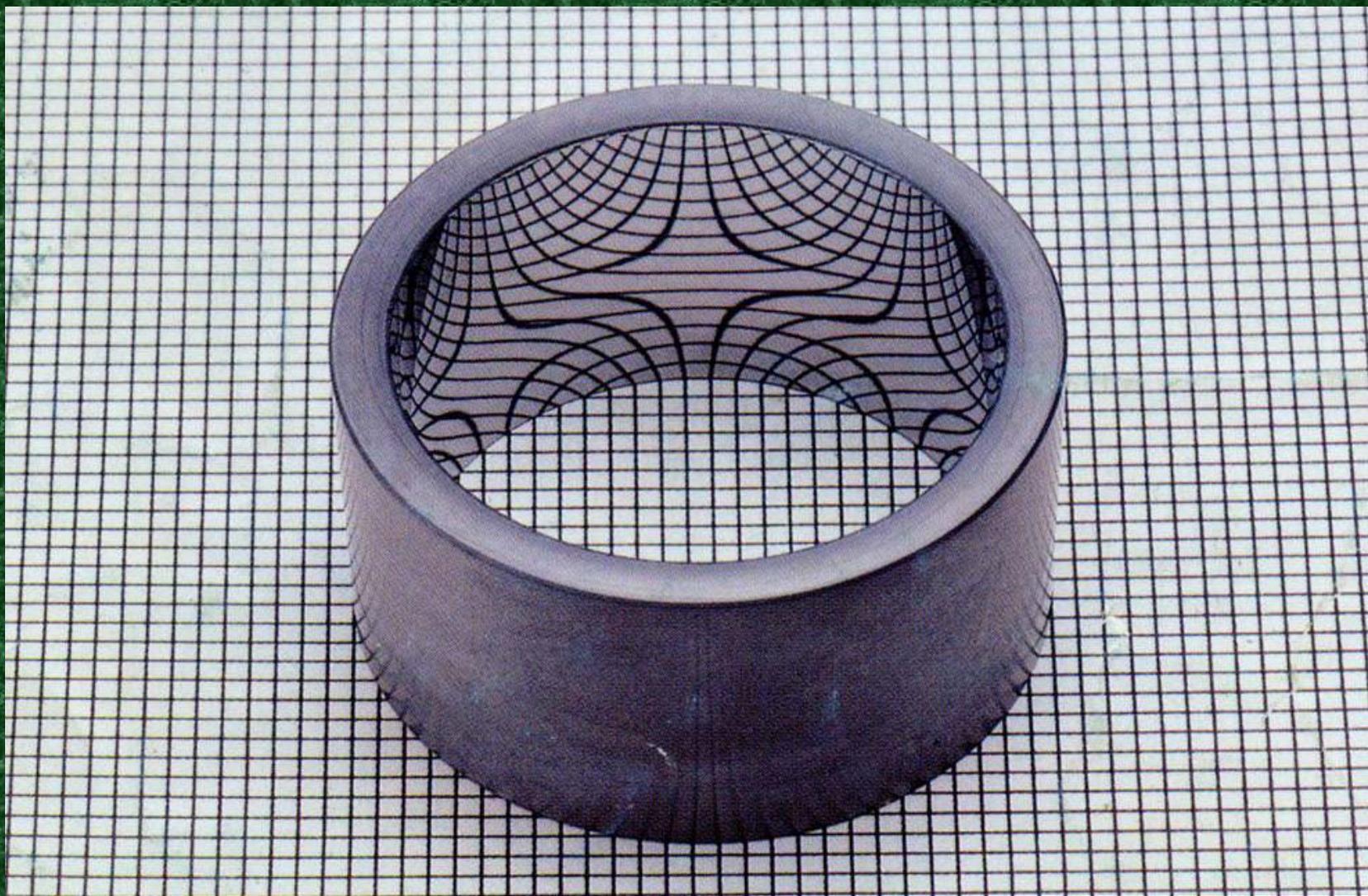
# ELID镜面磨削试件-光学玻璃



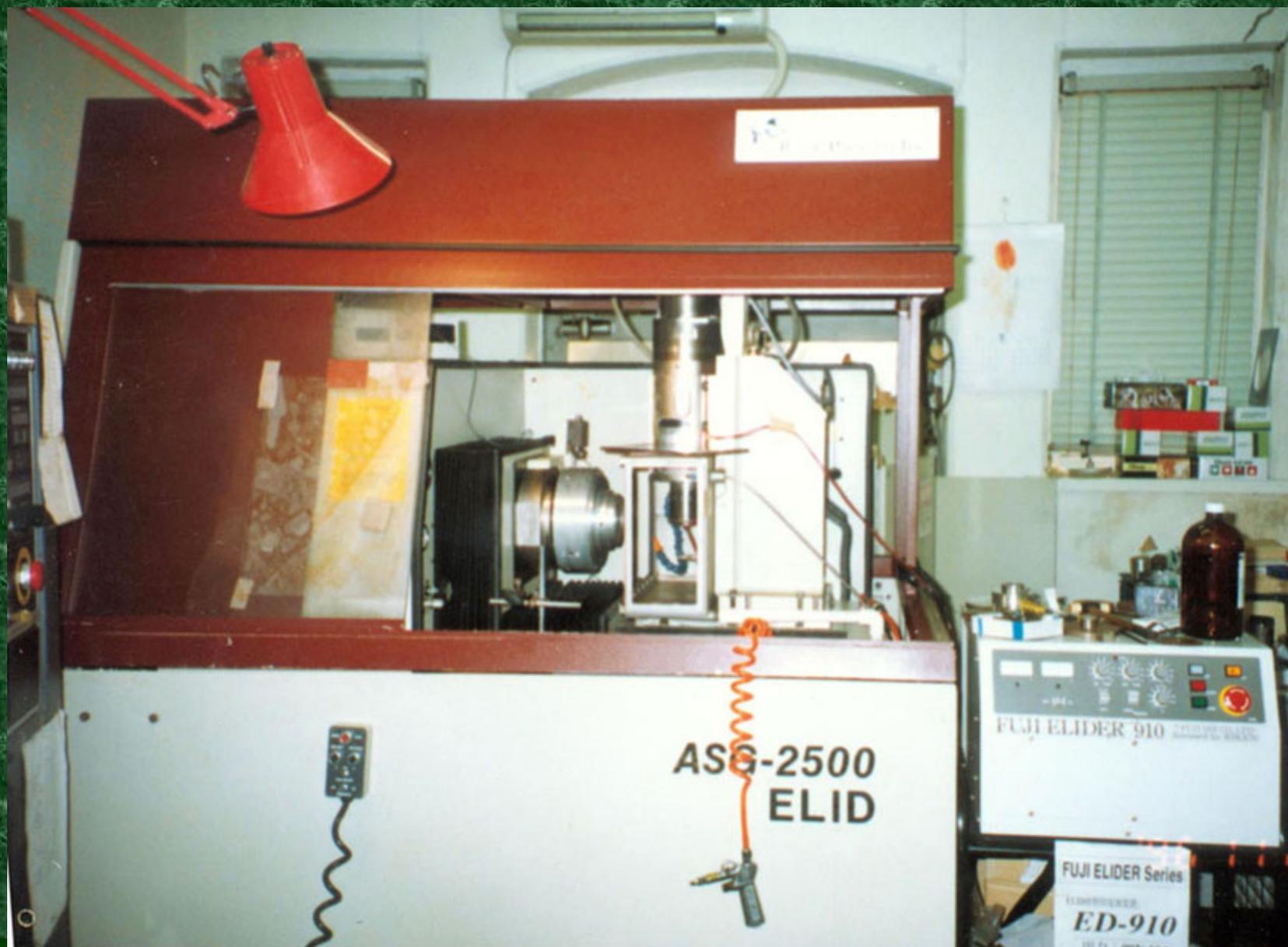
# ELID镜面磨削试件-硅片



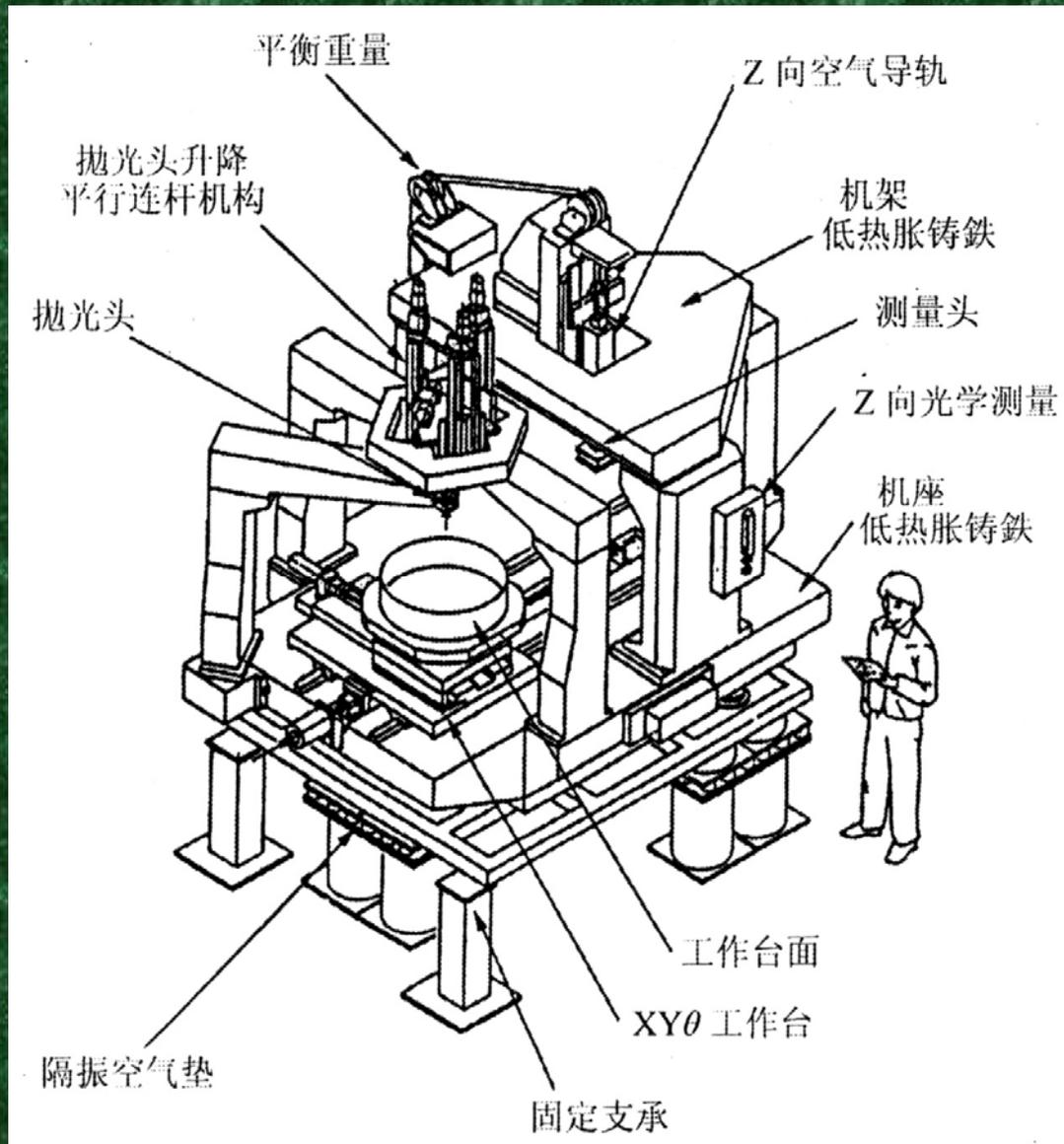
# ELID镜面磨削试件-内孔



# ELID超精密镜面磨床



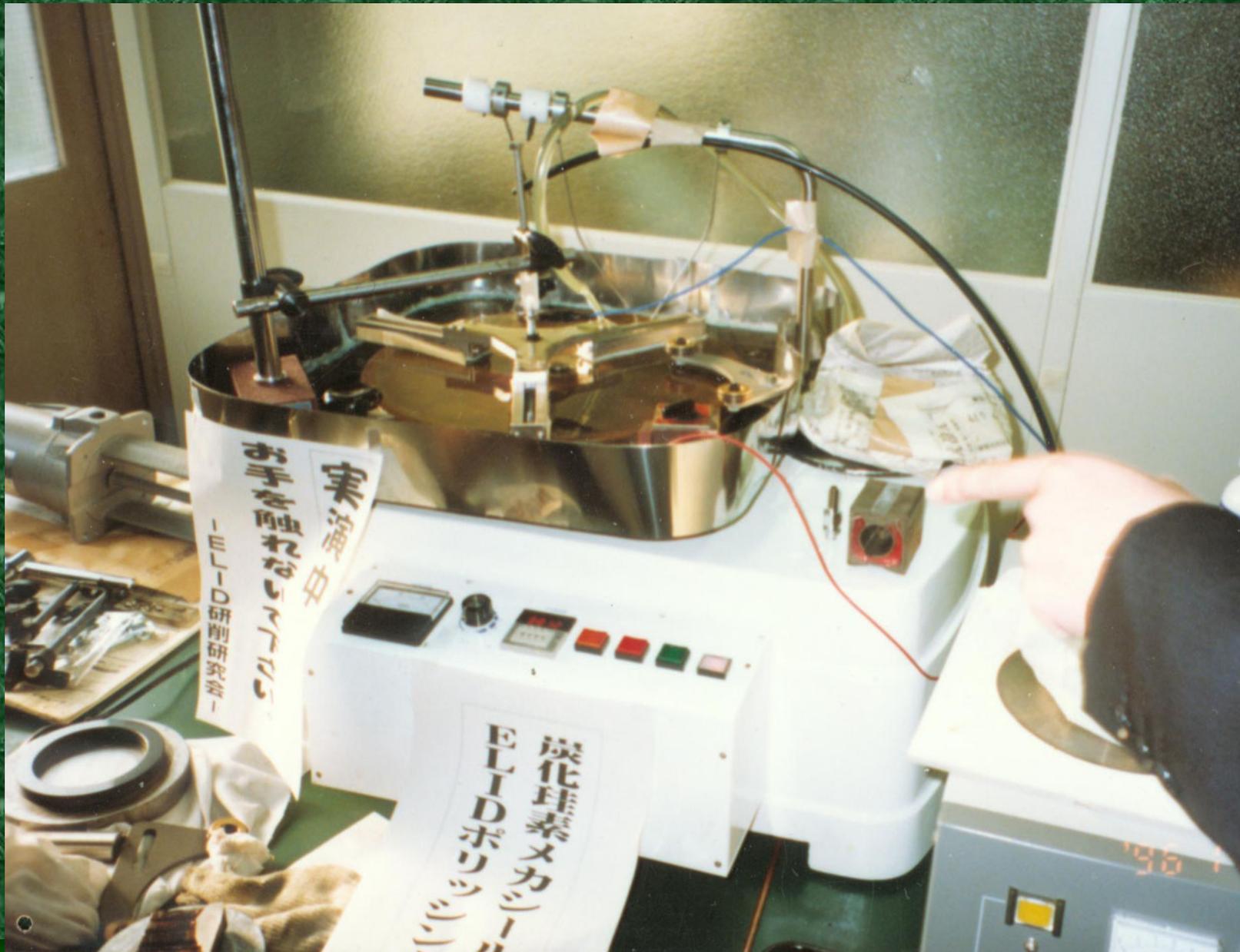
# 精密曲面抛光机 (Canon公司)



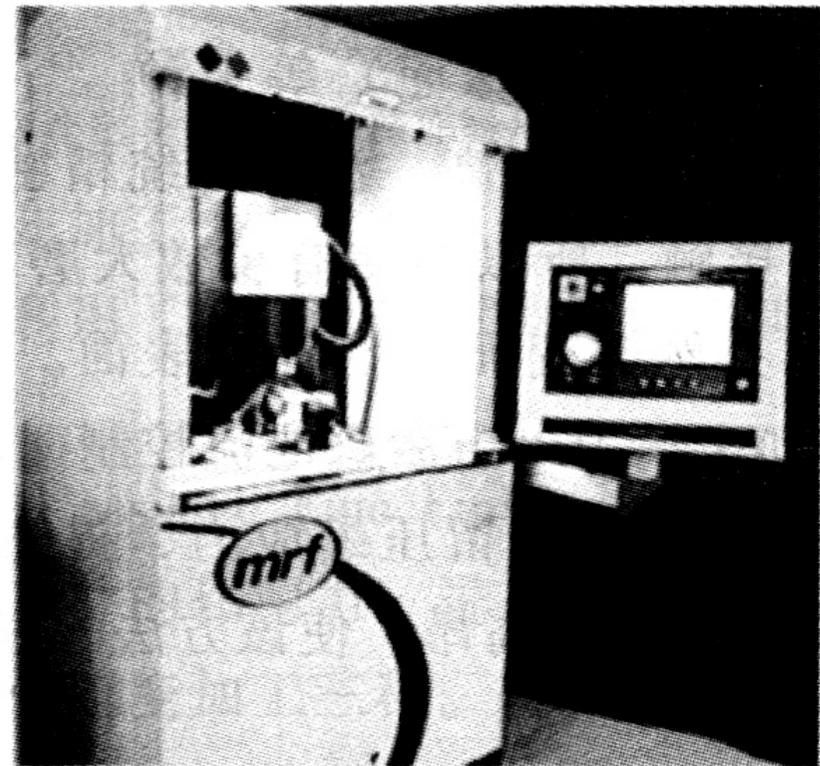
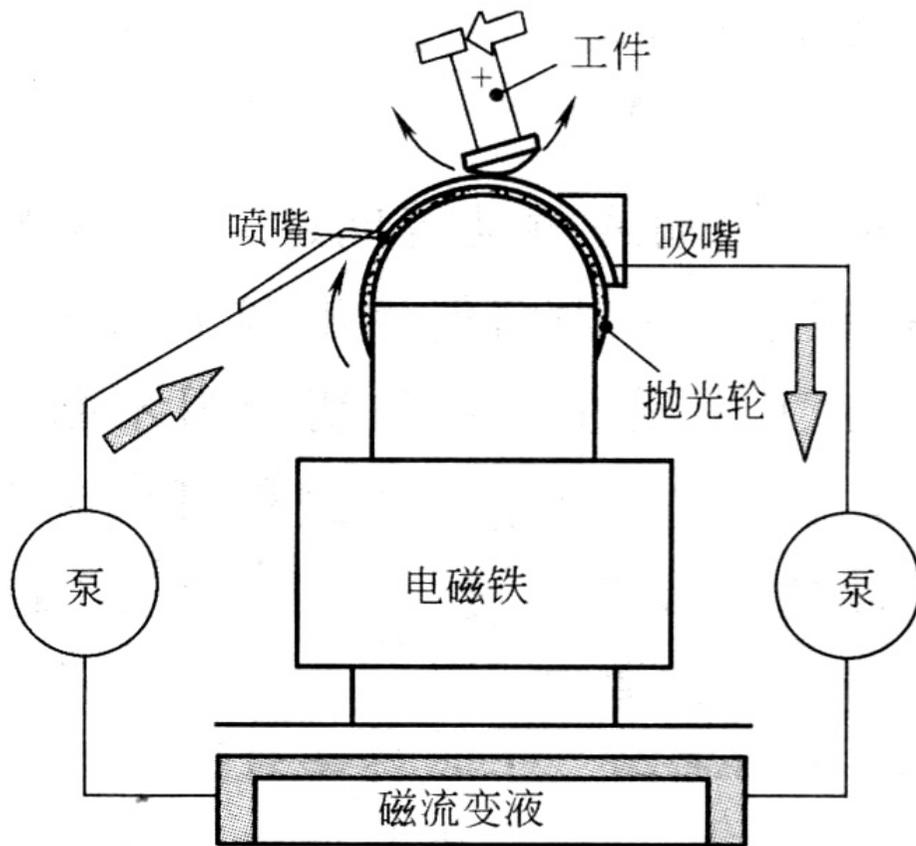
# 美加工 $\phi 8.4\text{m}$ 反射鏡



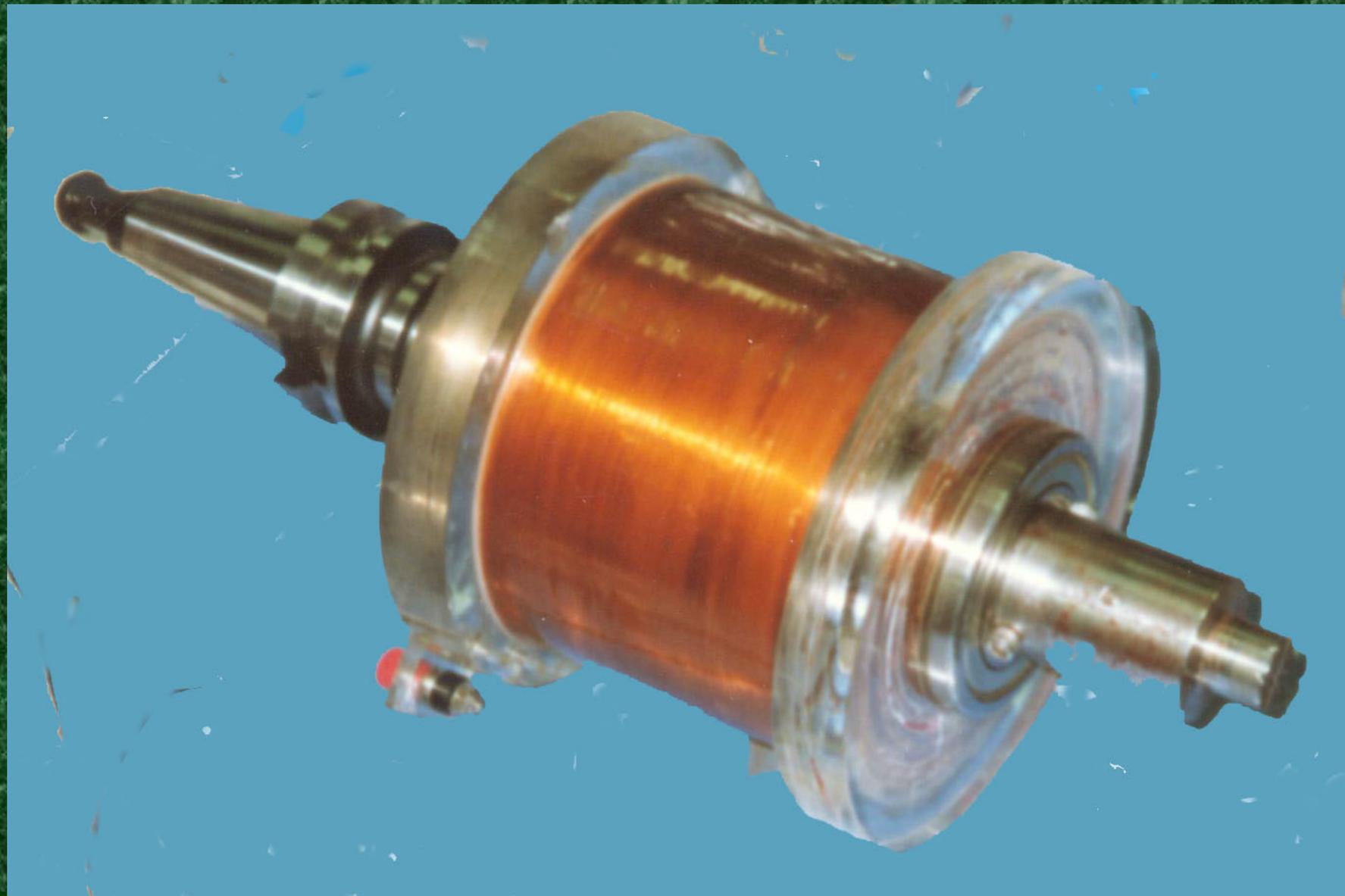
# ELID抛光



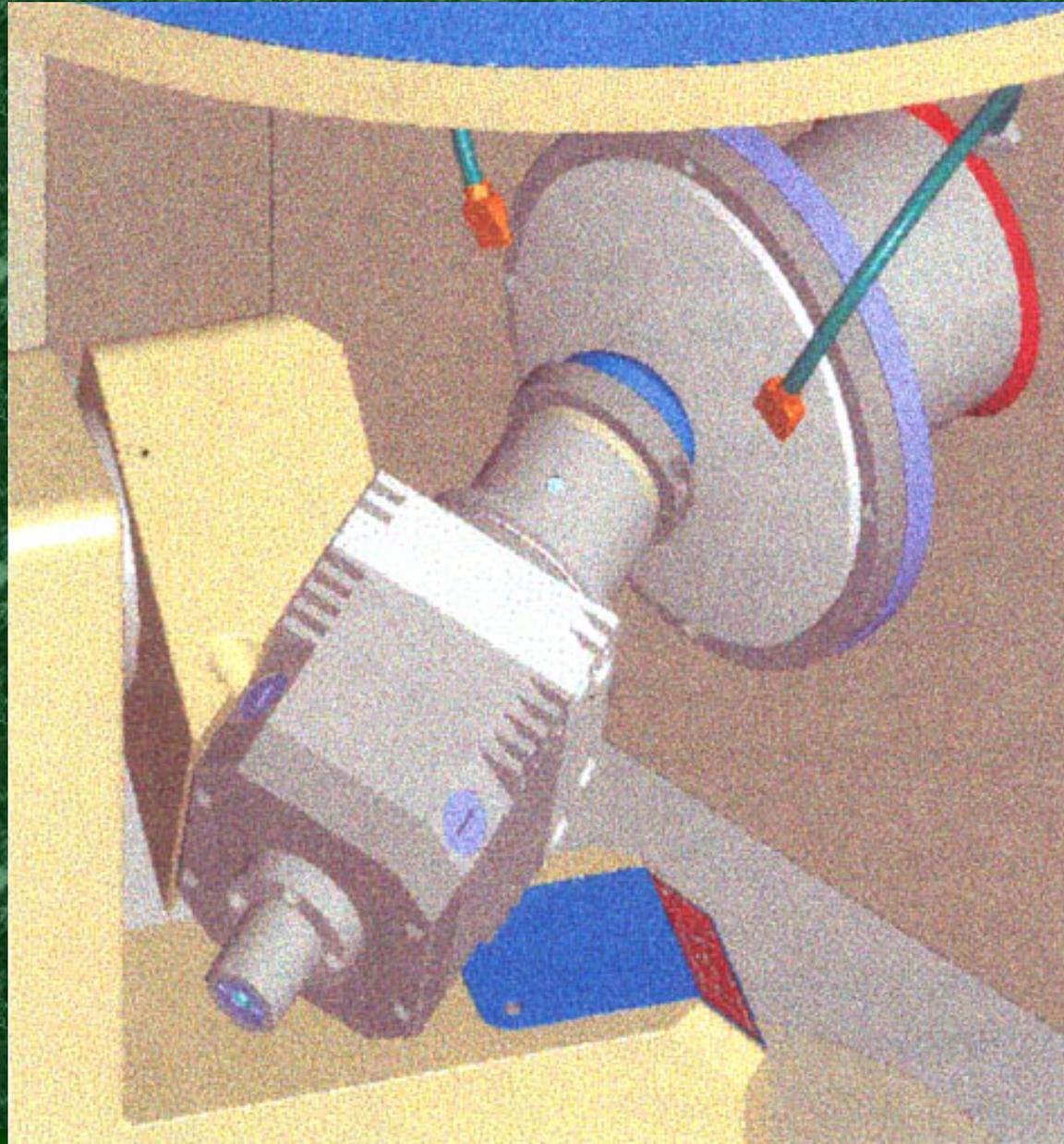
# 磁流体曲面抛光



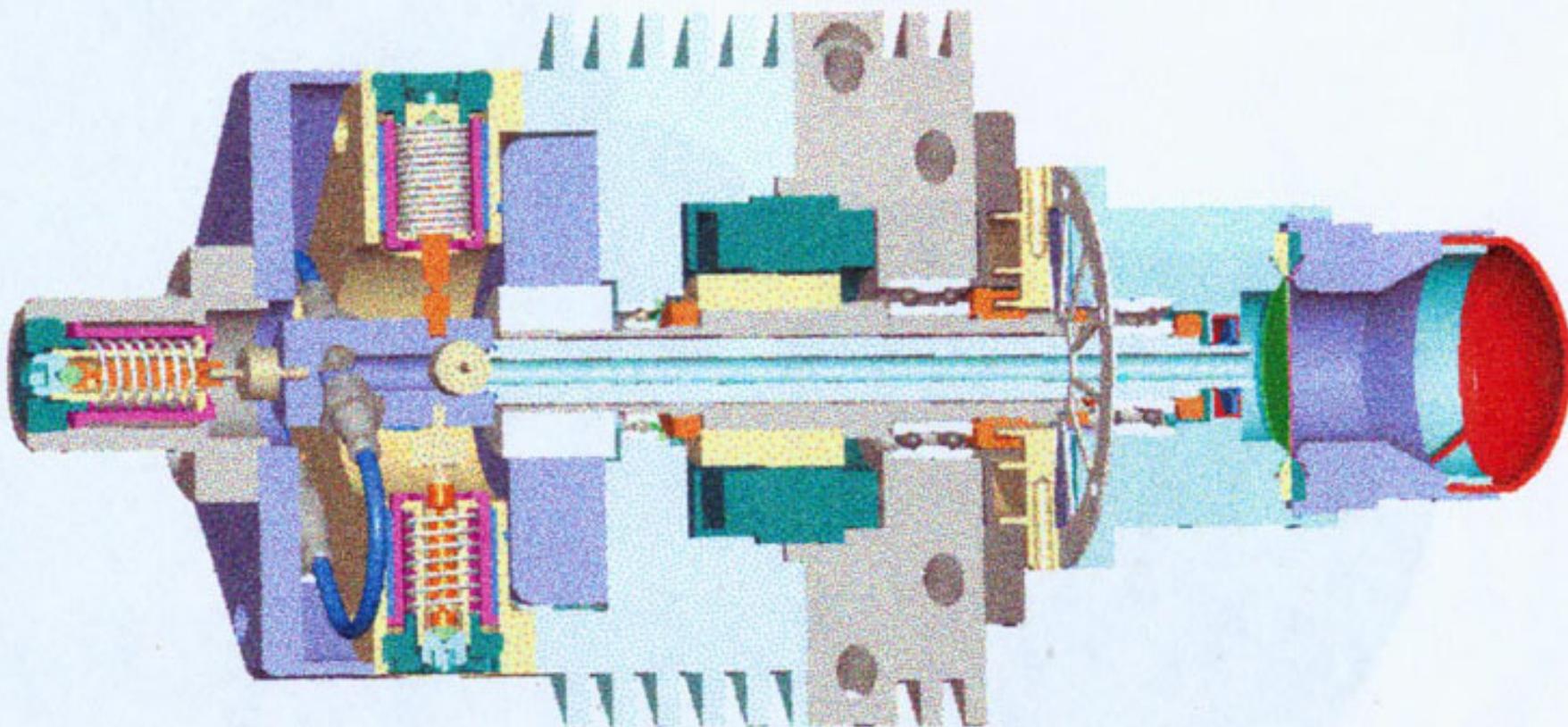
# 国外磁流体曲面抛光电磁铁工具



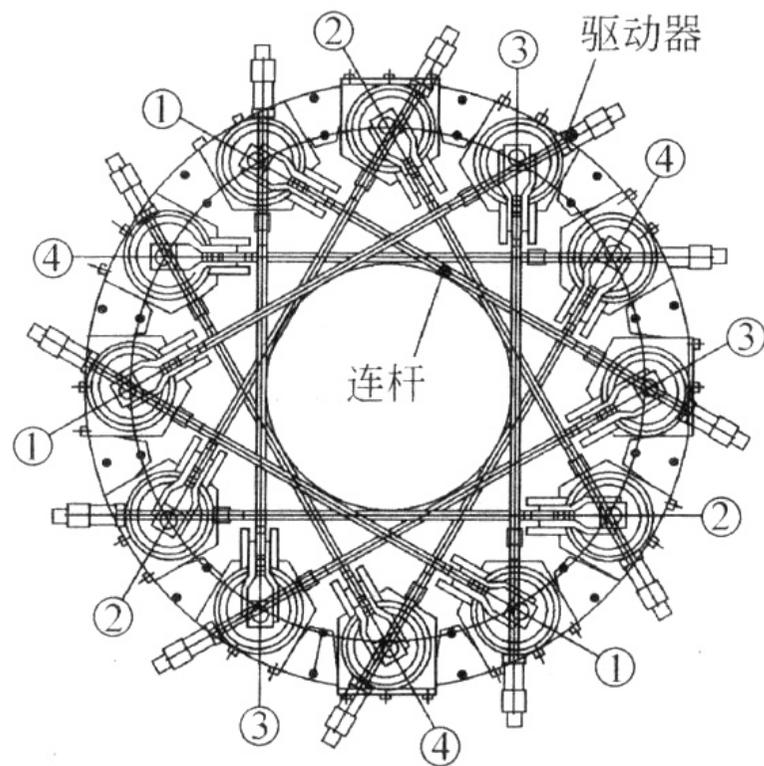
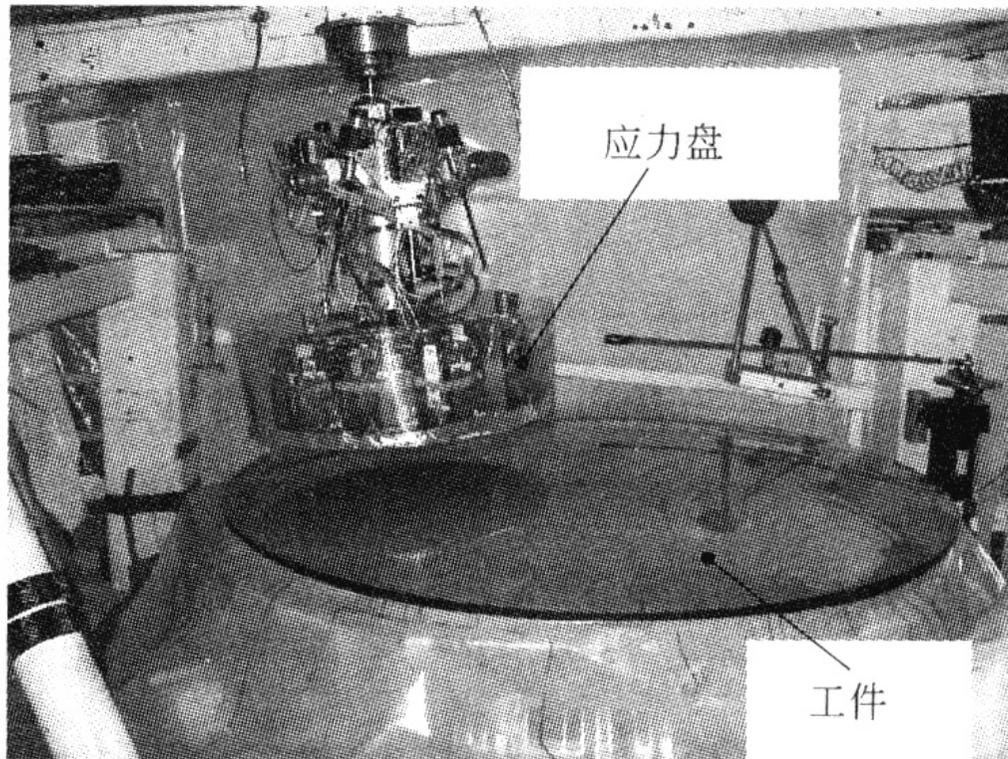
# 加工精密曲面的气囊抛光新方法



# 加工精密曲面的气囊抛光工具

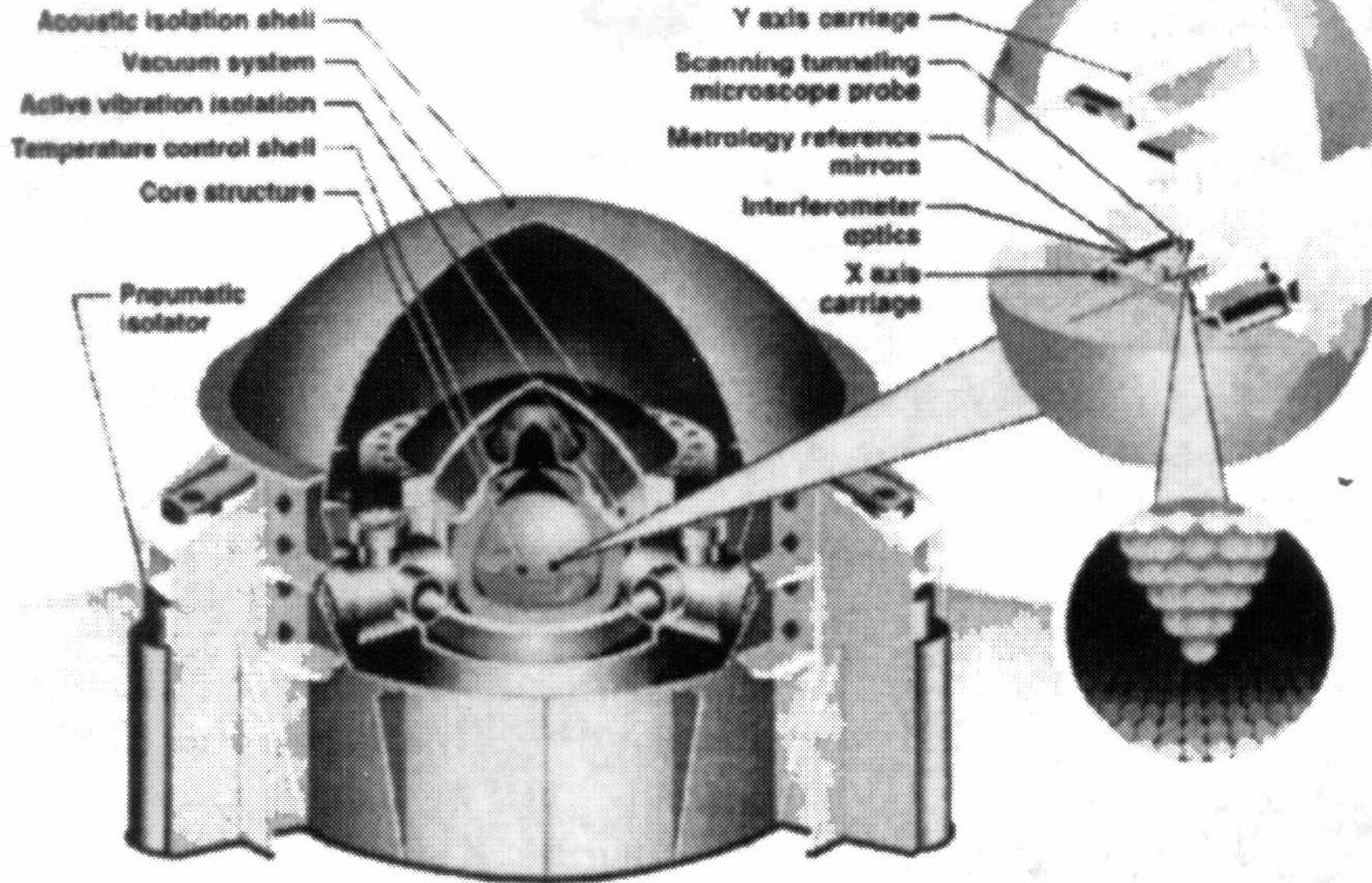


# 应力盘抛光设备及应力盘实现方法

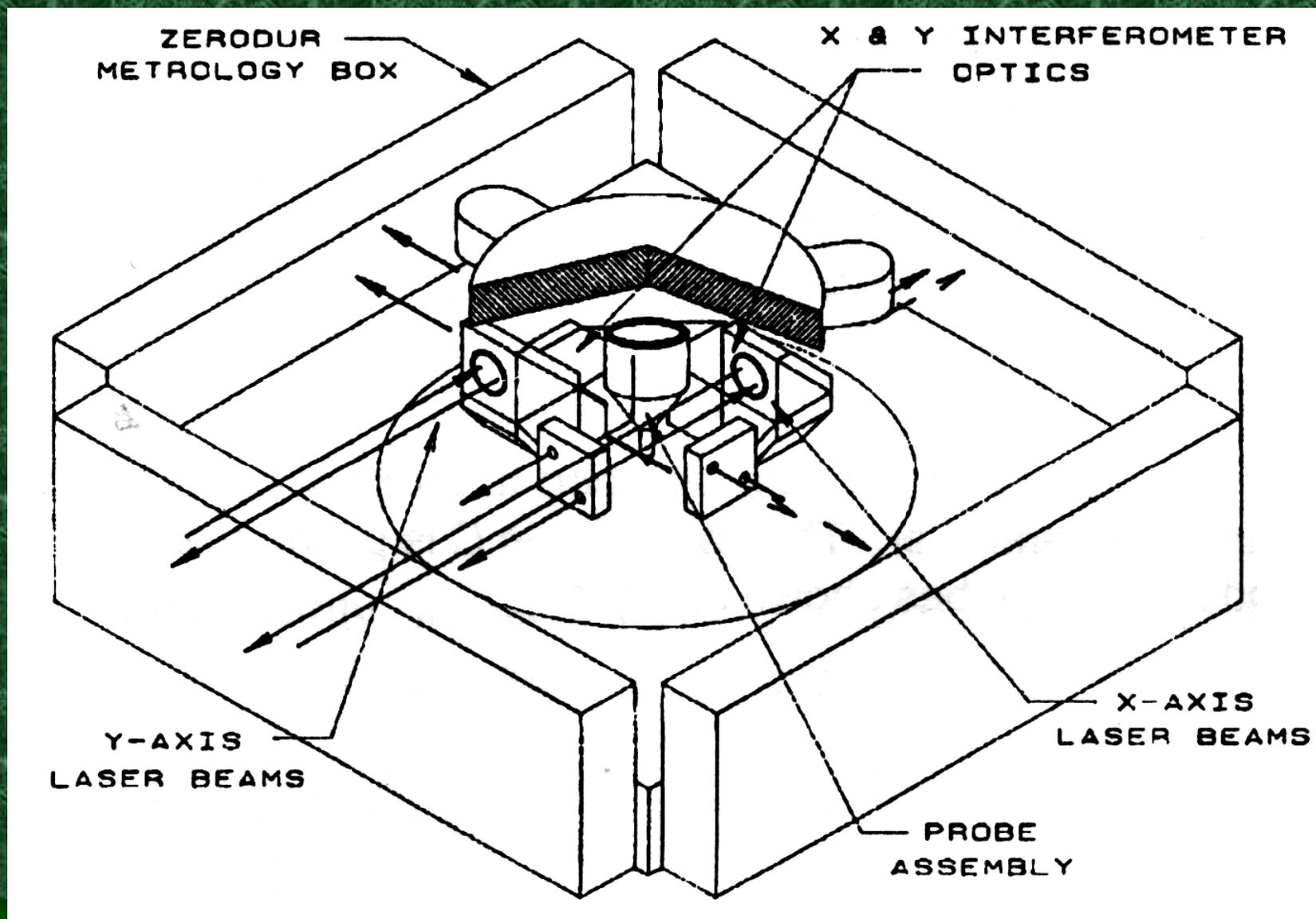


# 分子测量机—美国NIST

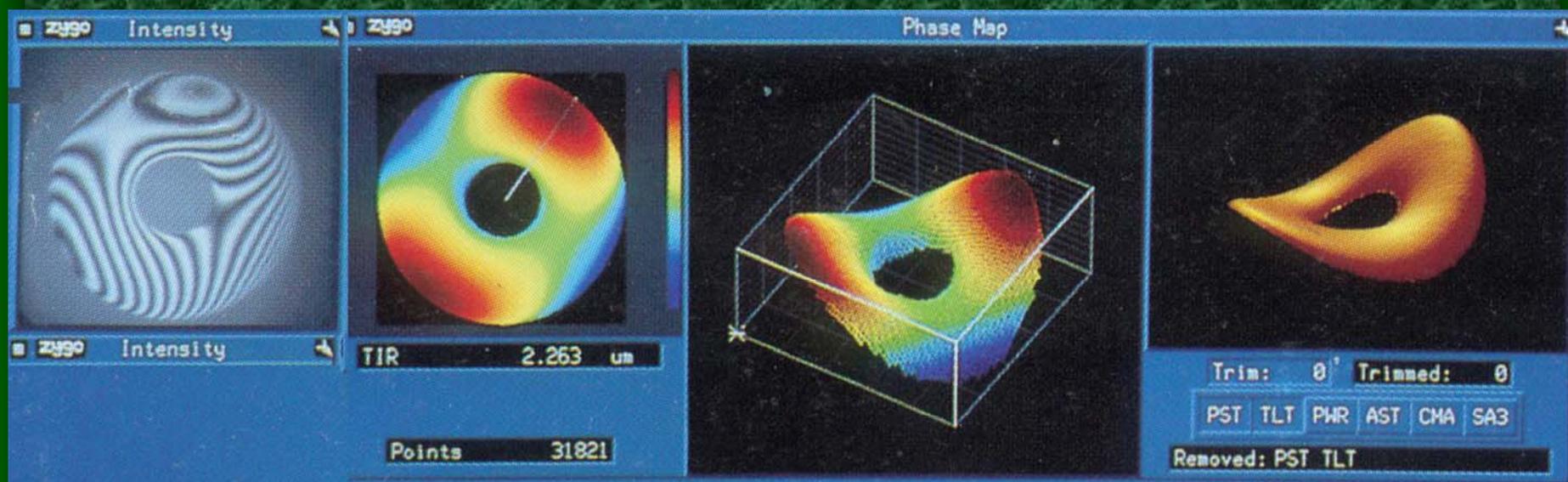
## Molecular Measuring Machine



# 分子测量机—美国NIST



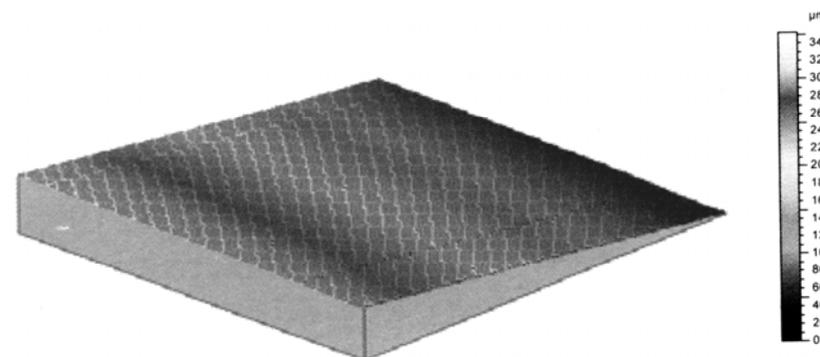
# 自由曲面激光干涉形貌测量 和计算机图形处理



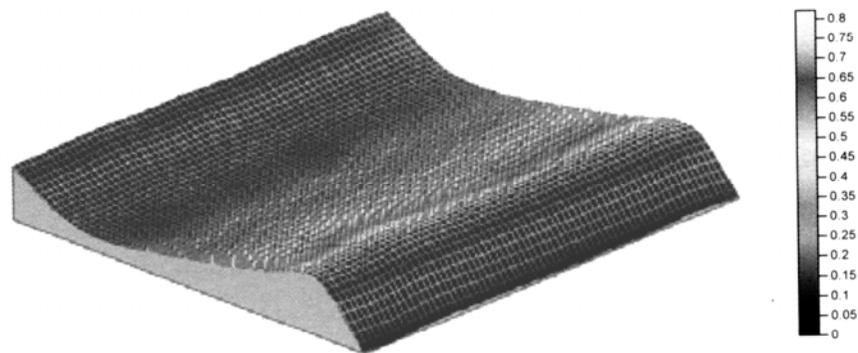
# 自由曲面激光干涉粗糙度测量 和计算机图形处理

表 4-5 超精密自由曲面形状误差参数

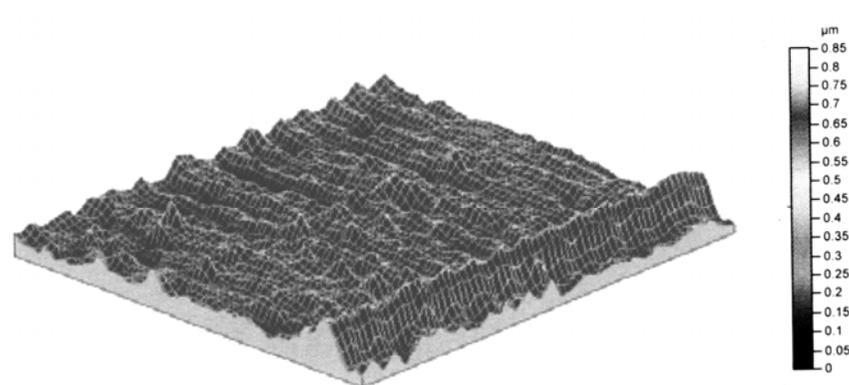
面轮廓度 ( $S_t$ )	均方根偏差 ( $S_q$ )
12.3789 $\mu\text{m}$	4.1737 $\mu\text{m}$



a) 原始测量面



b) 基准形貌曲面



c) 经分离后的粗糙度表面

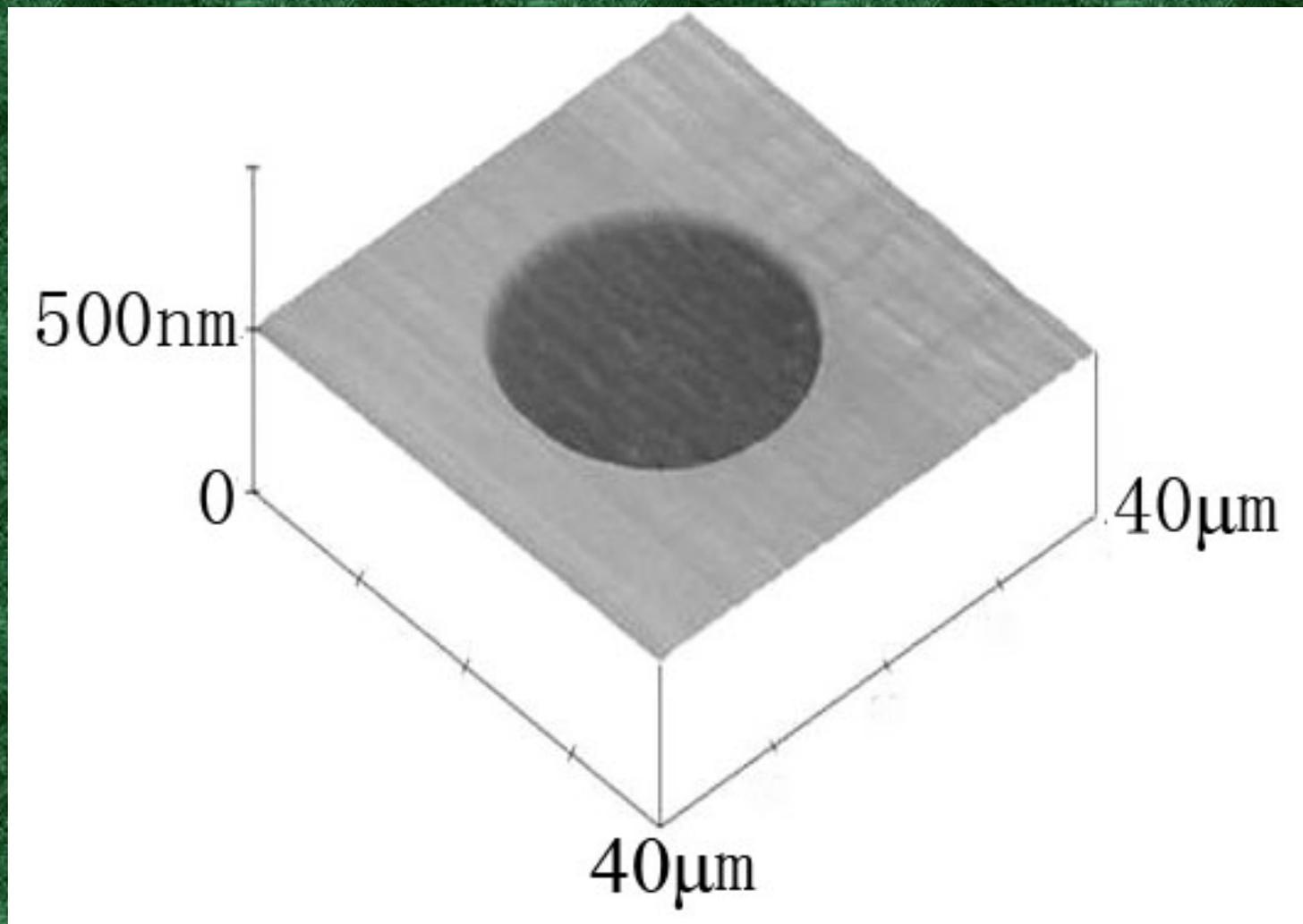
# 微电子器件制造技术的发展

1. 1971年英特尔公司的4004芯片，时钟速度仅为108kHz，内含晶体管2300个，最小线宽为100  $\mu\text{m}$ ；
2. 1999年英特公司的Pentium III 芯片（奔腾III 芯），时钟速度已经高达1GHz，在面积为217mm<sup>2</sup>的芯片内，有晶体管2800万个，最小线宽为0.18  $\mu\text{m}$ 。
3. 2001年3月英特尔公司推出的Pentium 4电脑的时钟速度已高达1.7 GHz，最小线宽0.13  $\mu\text{m}$ ，在面积为116 mm<sup>2</sup>的芯片内，晶体管数超过4200万个。

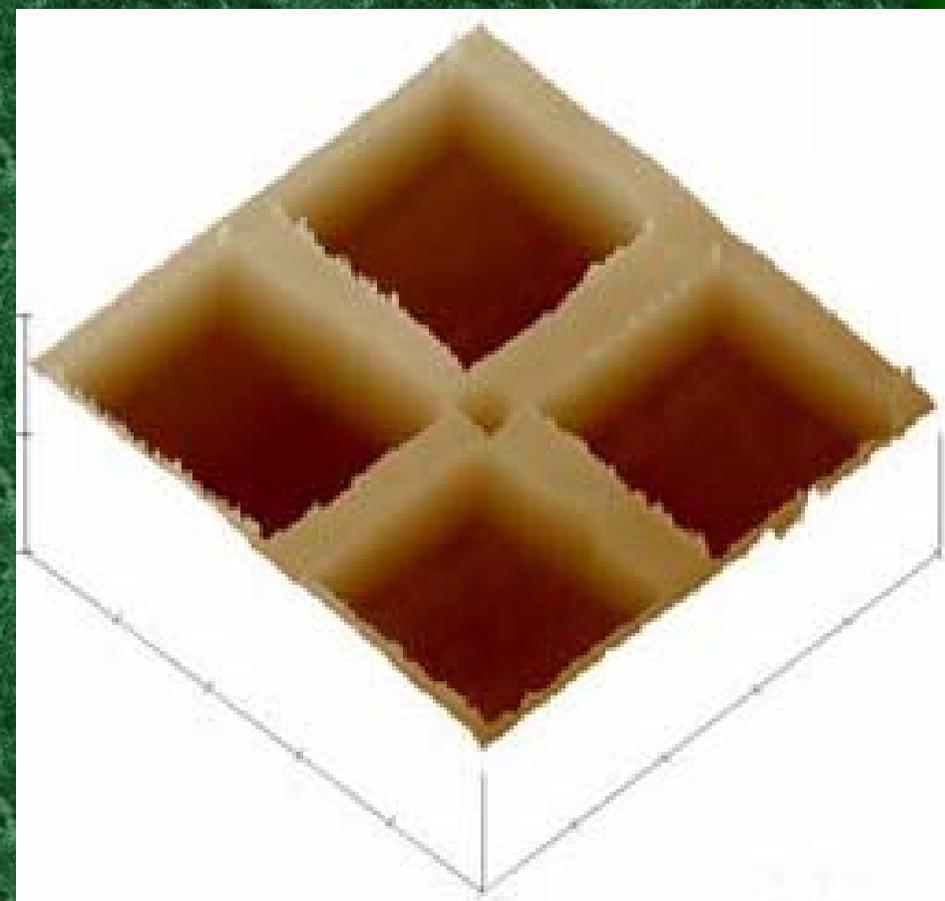
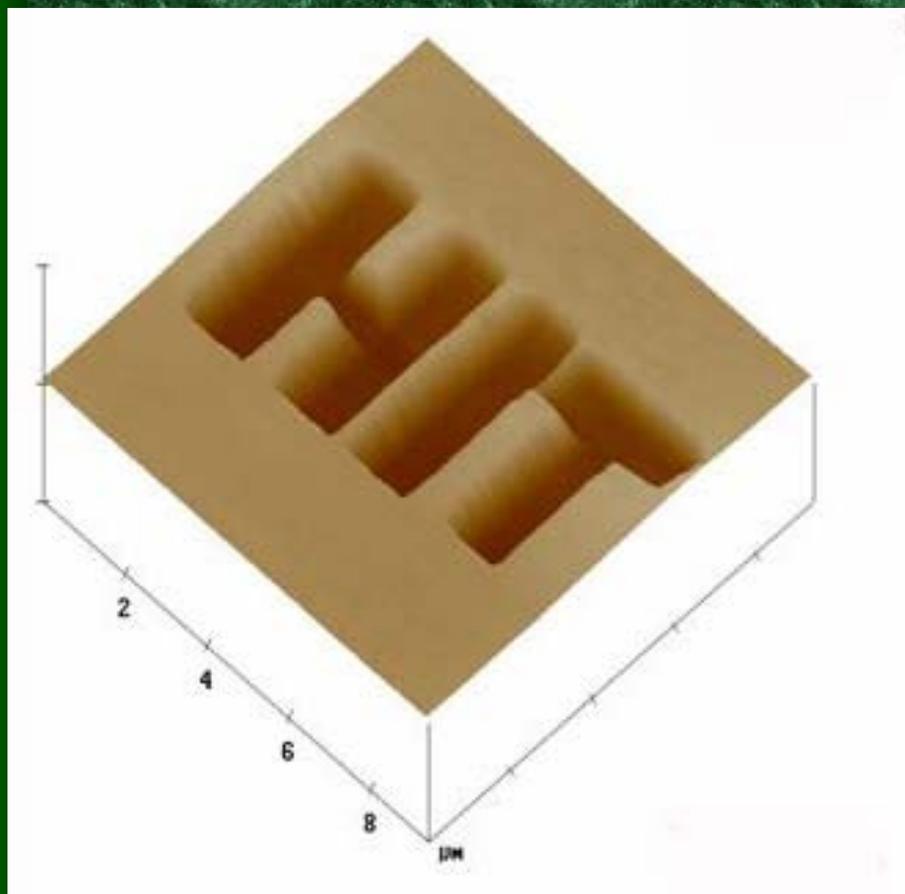
## 微电子器件制造技术的发展

4. 30年来计算机芯片速度和集成度提高了13000倍，线宽从1971年的 $10\ \mu\text{m}$ 缩小到 $0.13\ \mu\text{m}$ ，芯片上的晶体管已达到660万个/ $\text{cm}^2$ 。
5. 计划十年内时钟速度达到10GHz，线宽达到 $0.1\sim 0.08\ \mu\text{m}$ ，采用双核技术使计算速度大大提高。

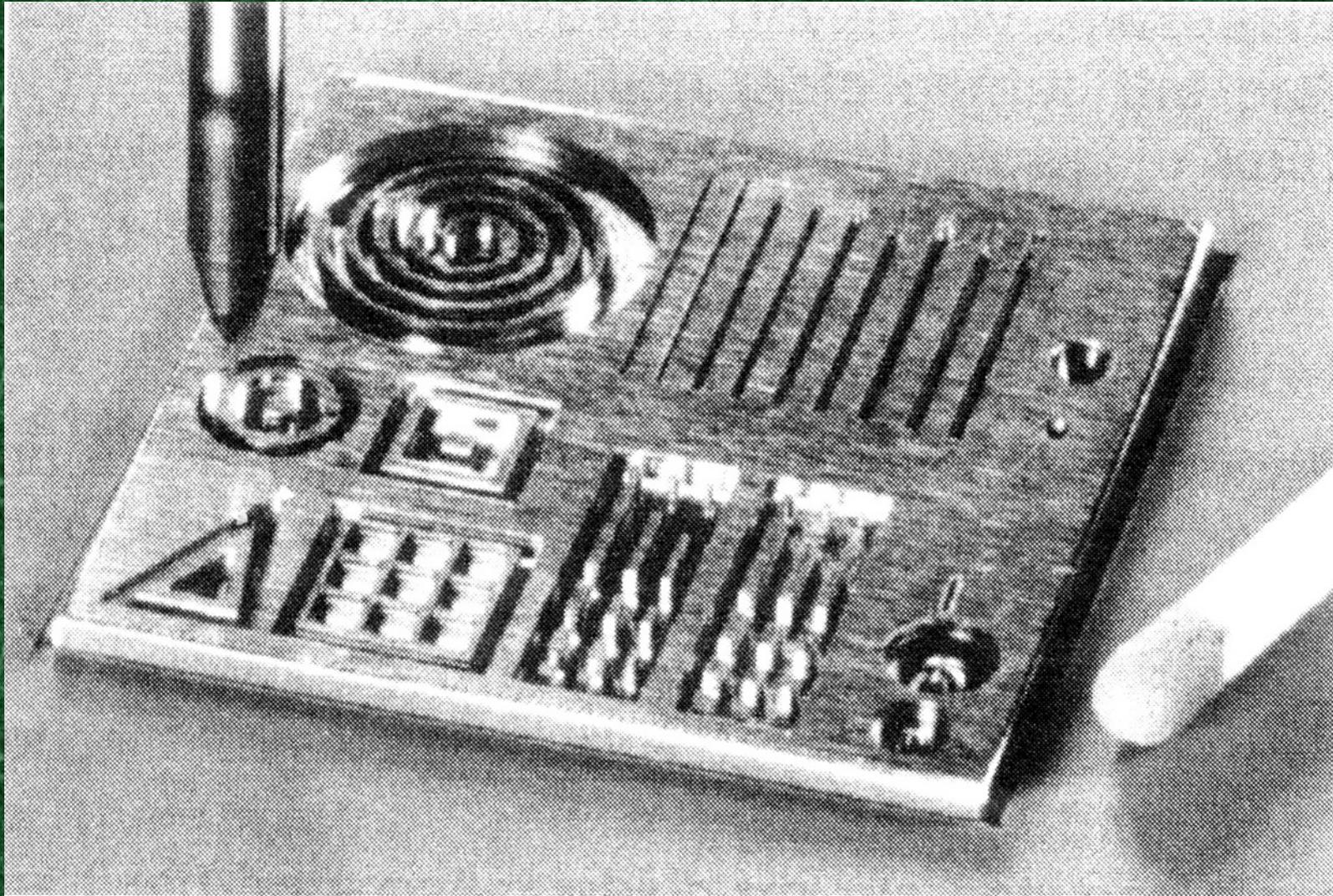
# 用AFM针尖雕刻出的微结构



# 用AFM针尖雕刻出的微结构



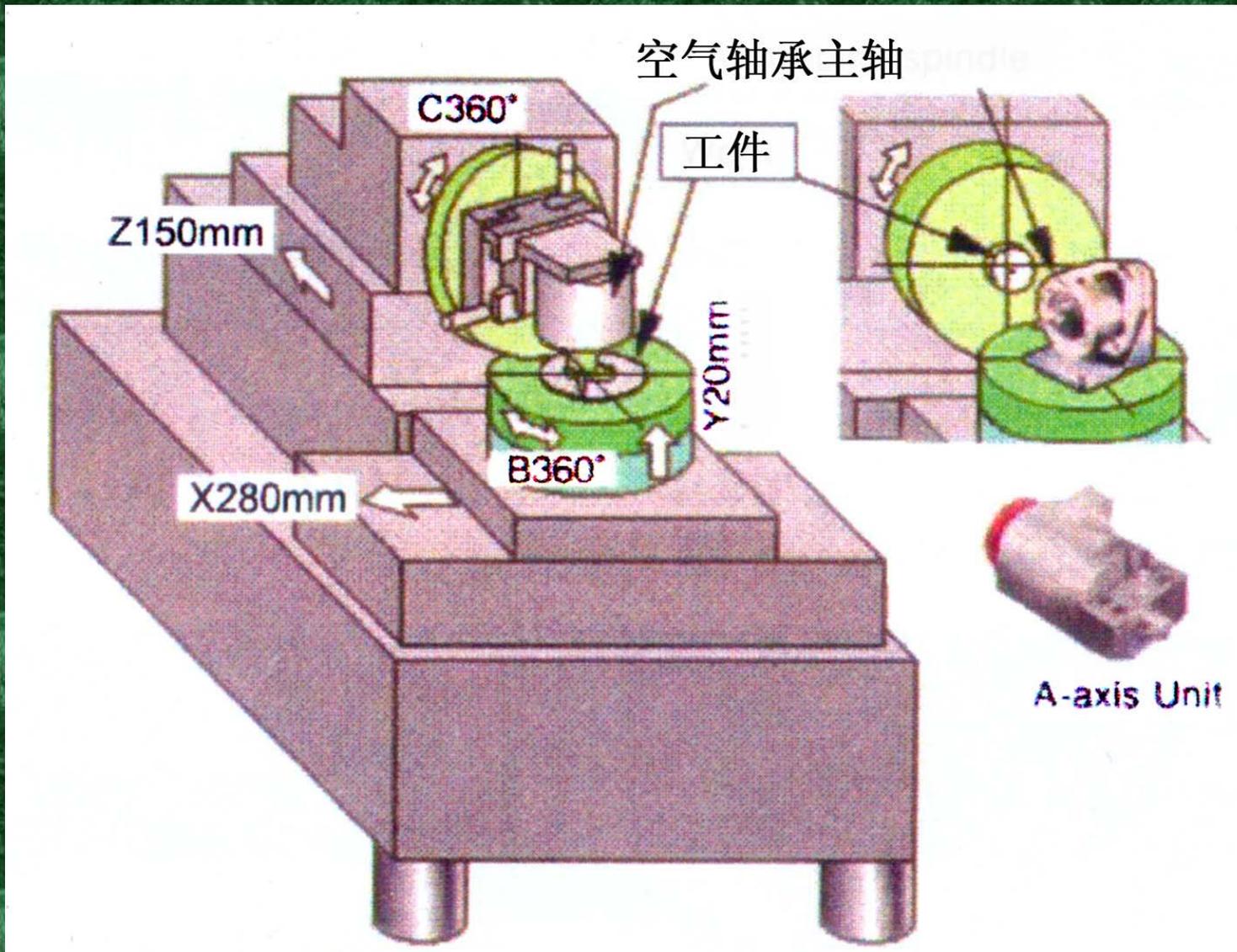
# 用微型立铣刀加工微结构



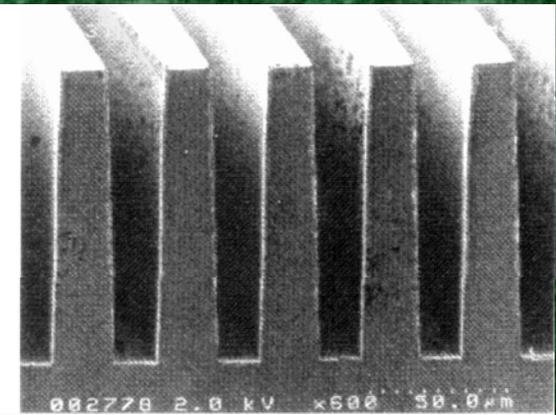
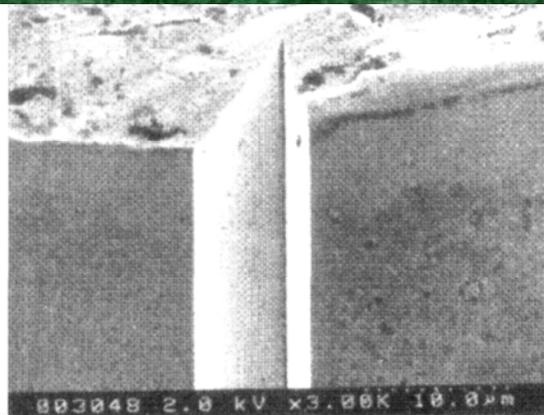
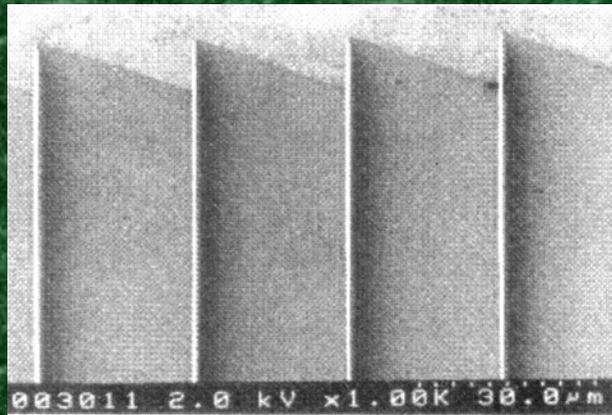
# 加工微型件的加工中心



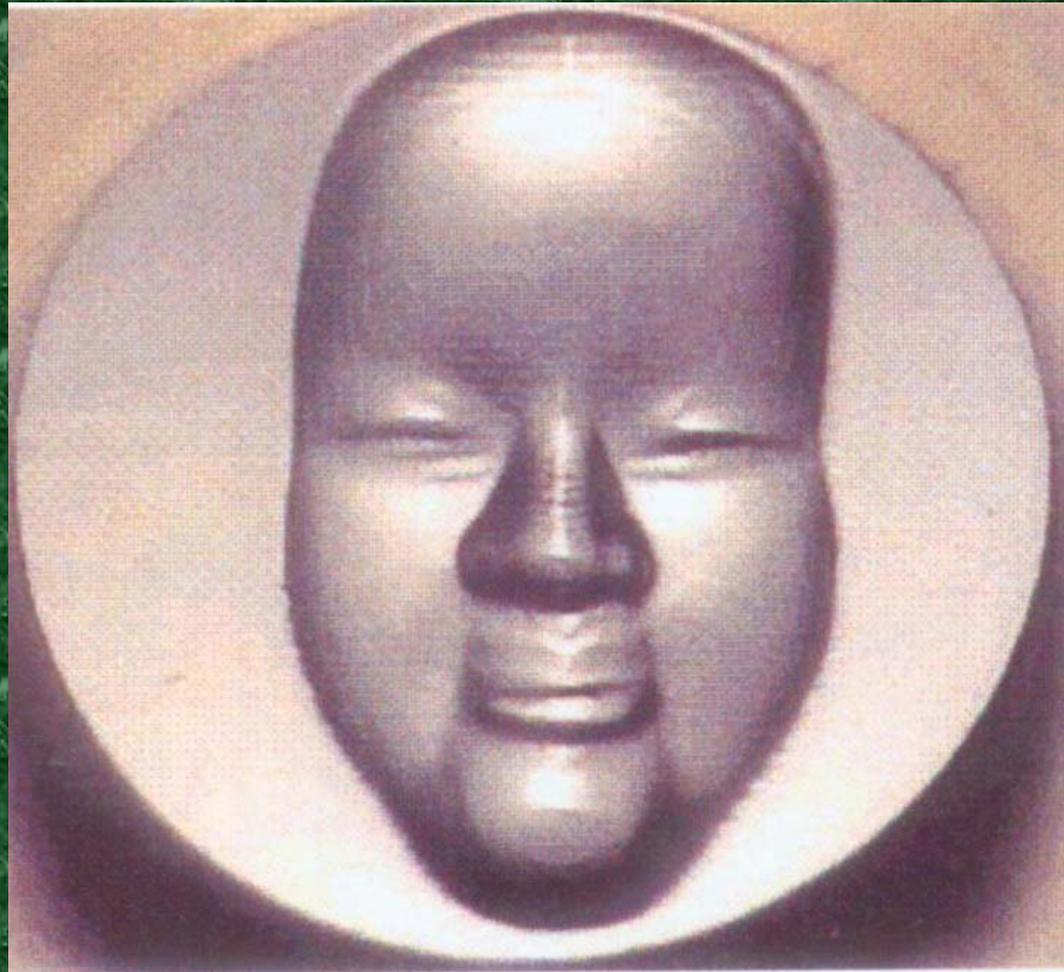
# 加工微型件的加工中心



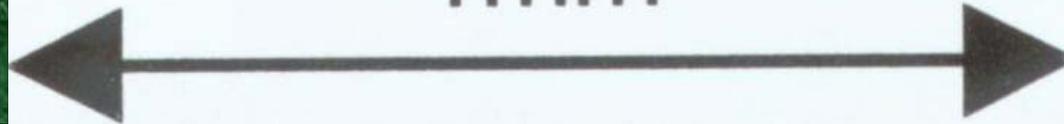
# 在小型加工中心上用微型铣刀 加工出的微型沟槽



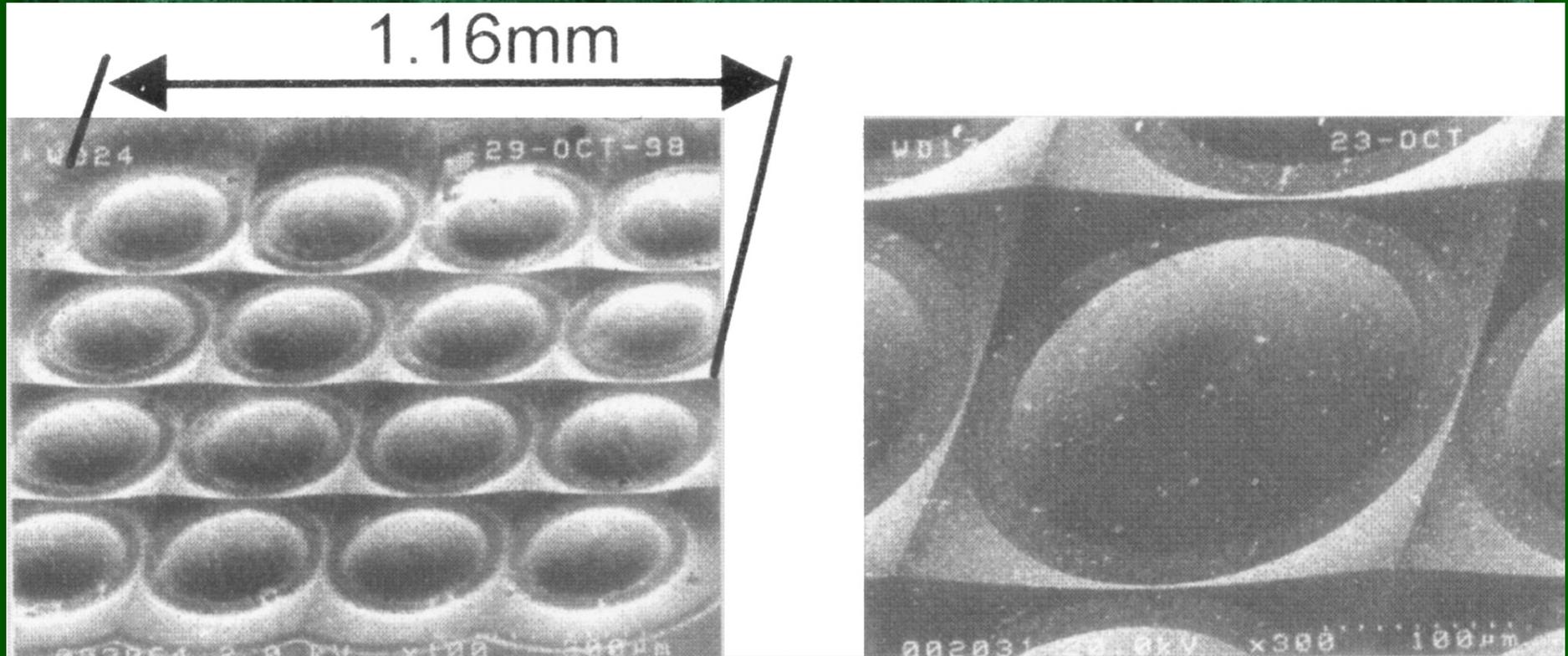
# 微型加工件 - 人像



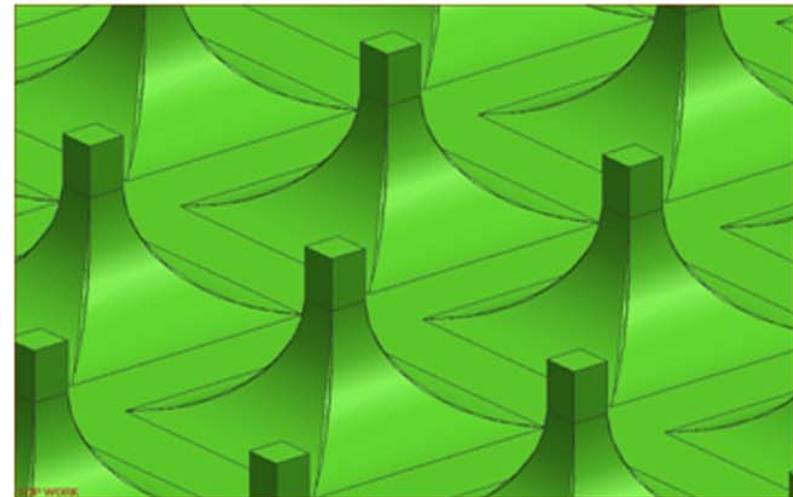
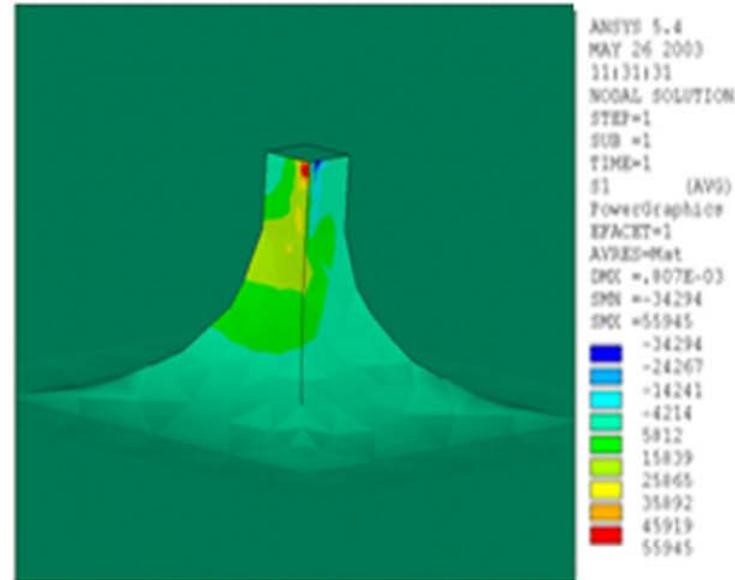
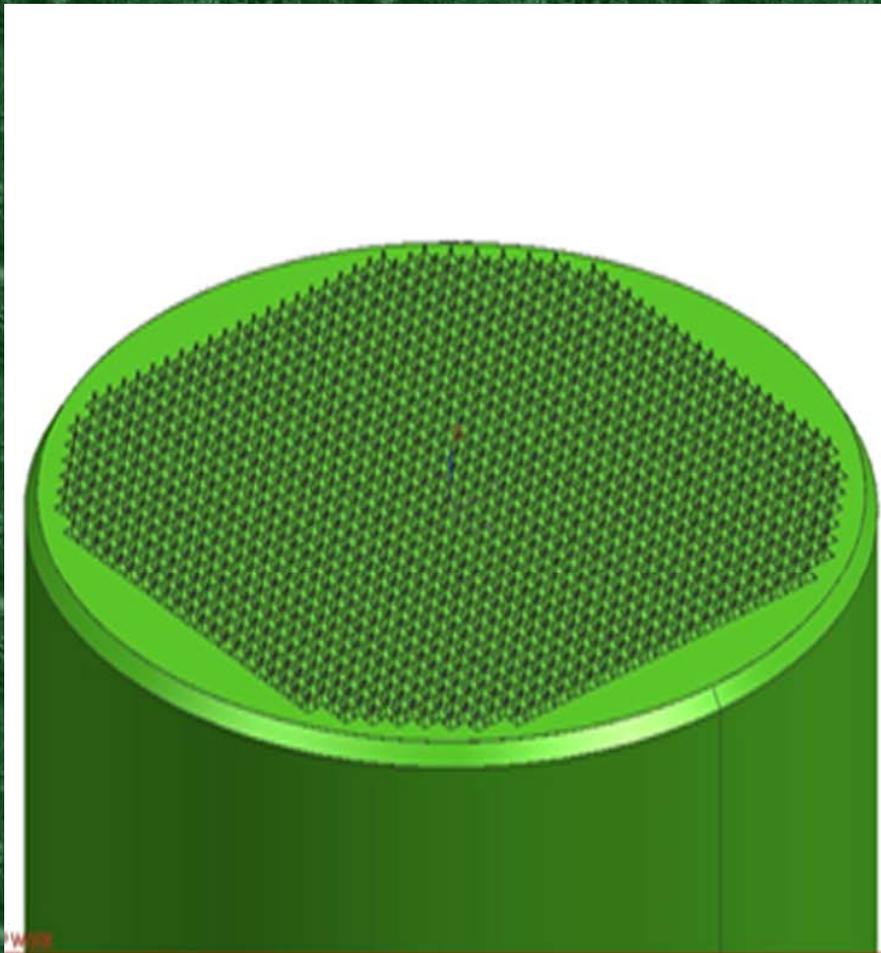
1mm



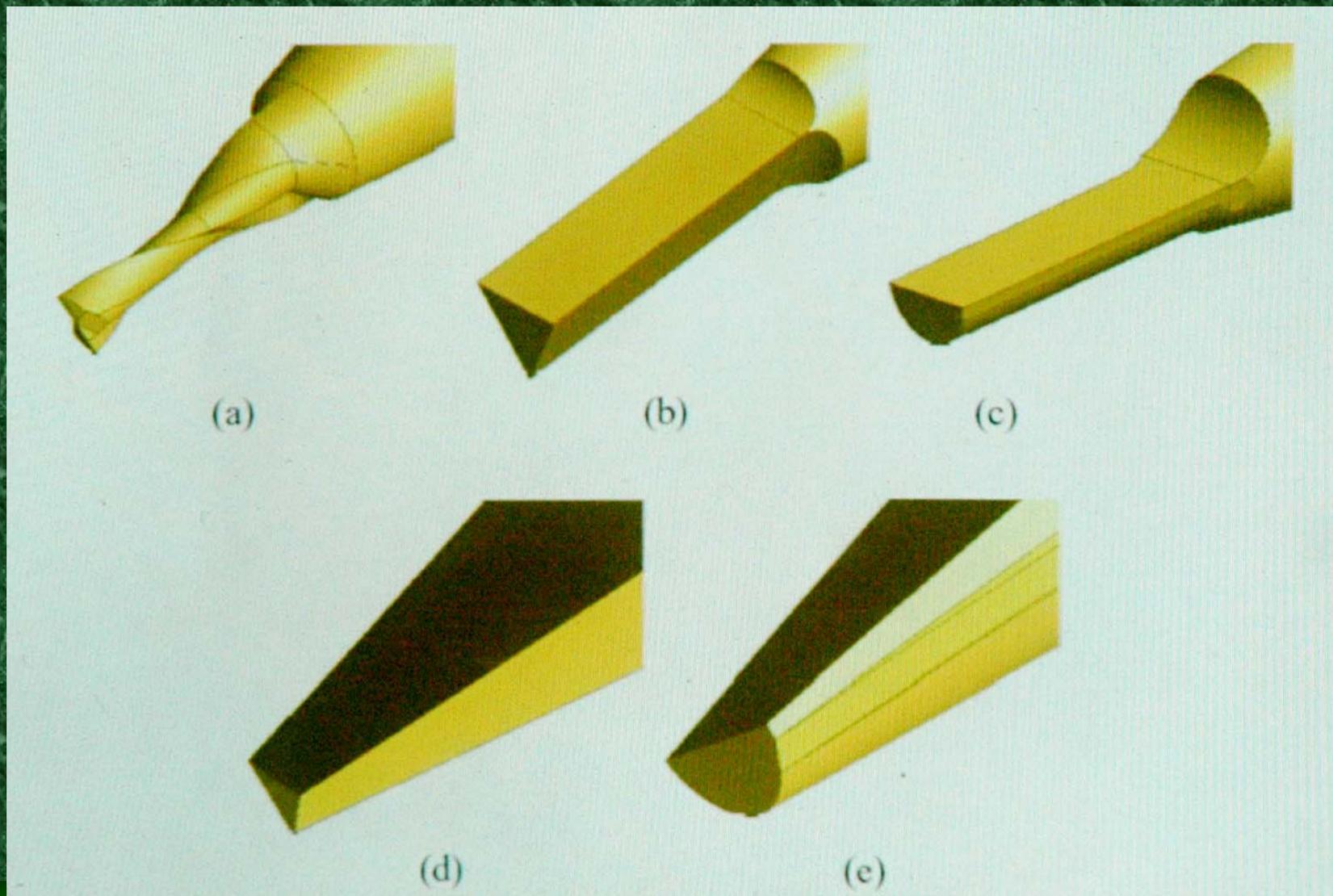
# 小型加工中心加工的微型凸面镜阵列



# 铣制的端部微细密齿件



# 微细铣刀



谢 谢