



中国科学院微电子研究所

INSTITUTE OF MICROELECTRONICS OF CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

纳米加工技术的发展现状与挑战

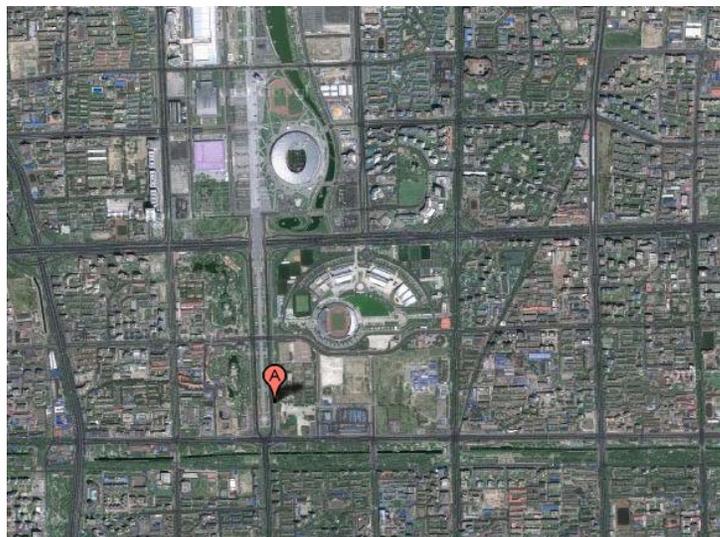
中国科学院微电子研究所

刘 明



中国科学院微电子研究所
INSTITUTE OF MICROELECTRONICS OF CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

中国科学院微电子研究所



惟精惟一
求是求新

洛育祥
二〇〇九年八月廿二日



“有了109(厂), 中国就
有半导体事业了”

——郭沫若

研究所概况

微电子研究所是国内微电子技术学科方向布局最完整的综合研究与开发机构,是国家专项集成电路装备及工艺前瞻性研发牵头组织单位,中国科学院微电子技术总体工作组、中国科学院EDA中心的依托单位。目前,研究所已成功组建了一支以吴德馨、王守武院士为代表,包括几十名千人、百人计划学者,百余名高级研究人员,1000余名在职职工的科技队伍,设有博士和硕士学位授予点和博士后流动站,累计培养研究生500余名,在所研究生已达到3000余



中国科学院
微电子技术
总体工作组

中国科学院
EDA中心的
依托单位

集成电路装备及
工艺前瞻性研发
牵头组织单位



辉煌历史

1960年，为我国第一台锗晶体管计算机“109乙机”提供锗二极管、三极管共12个品种、14.5万多只。

1966年，为我国第一台自行设计的集成电路计算机156计算机研制成功10个品种混合电路。

1967年，为我国第一台硅晶体管计算机“109丙机”生产各类型硅平面型晶体管7万余支。

1976年，研制成功我国第一台集成电路百万次计算机“013机”（与计算所合作）。

1977年，完成远洋跟踪测量船中心控制计算机“151机”所需的STTL-E系列高速中校规模集成电路75万块。获国防科委颁发的一等奖。

109厂 (1958-1986)



1958年8月，为研制国防专用109计算机，我国第一个半导体器件生产厂成立，命名为“109厂”。1967-1975年，归属中国人民解放军第14研究院编制。

1986年，研制出我国第一块自主设计的64K DRAM。

1989年，康发系列CAE工作站荣获中科院科技进步一等奖和国家科委三等奖。

1990年，CMOS门阵列设计工具的开发和FD-2型RIE通用刻蚀机分别荣获中国科学院科技进步二等奖；在北京正负电子对撞机国家实验室成功地进行了我国第一次同步辐射光刻实验。

1993年，“熊猫集成电路CAD系统”获国家科学技术进步一等奖。

1997年，“0.8微米CMOS集成电路芯片制造技术”荣获中国科学院科学技术进步一等奖和国家科技进步二等奖。

1999年，作为第一批试点单位进入中科院知识创新工程。

1978年，因完成抗饱和TTL-E系列高速逻辑电路、ECL-D系列高速逻辑电路、低功耗TTL-F系列逻辑电路、半导体集成电路生产线专用局部空气净化设备和合作完成“013机”和“109乙机”，109厂荣获全国科学大会表彰。

1978-80年，为我国第一台千万次计算机“757机”研制生产了30多个品种、共30余万块ECL和TTL集成电路。

1978年，开发成功的N沟硅栅MOS工艺及256位MOSDRAM获全国科学大会重大科技成果奖。

微电子中心 (1986-2003)

1985年12月，109厂与半导体所、计算所有关研制大规模集成电路部分单位合并，成立中国科学院微电子中心

微电子所 (2003至今)

为了集中和重组优势资源，进一步凝练和明确创新发展方向，拓宽应用研究领域，巩固创新成果，“微电子中心”于2003年10月16日更名为“微电子研究所”。

2003年，“20万门CMOS门阵列技术”获北京市科学技术三等奖。

2006年，“亚30纳米CMOS器件相关的若干关键工艺技术研究”获北京市科学技术一等奖和国家技术发明奖二等奖。

2007年，“中高频声表面波关键材料及技术研究”获国家技术发明二等奖（第二完成单位）。

2008年，“90纳米—65纳米极大规模集成电路大生产关键技术研究”获国家科学技术进步二等奖。

2009年，“100nm高密度等离子体刻蚀机”获国家科技进步二等奖（第二完成单位）。



领导关怀



聂荣臻元帅参观109丙机



粟裕大将参观109丙机



1985年5月25日，张劲夫国务院委员于人民大会堂宁夏厅会见王守武先生。



1986年，张劲夫、袁宝华视察109厂扩建工程。



1993年3月11日，邹家华副总理，周光召院长视察微电子中心工艺线。



中长期目标与定位



产业
中国集成电路技术创新的引领
者和产业发展的推动者



前沿
纳米领域的
研究
电子器件
的先进
基础者

- 对产业技术发展具有重大影响
的创新与服务平台：先进技术
推广、应用和产品孵化。
- 专注核心知识产权积累，联合
企业进行高端产品开发。
- 前瞻性和先导性研究的核心基
地

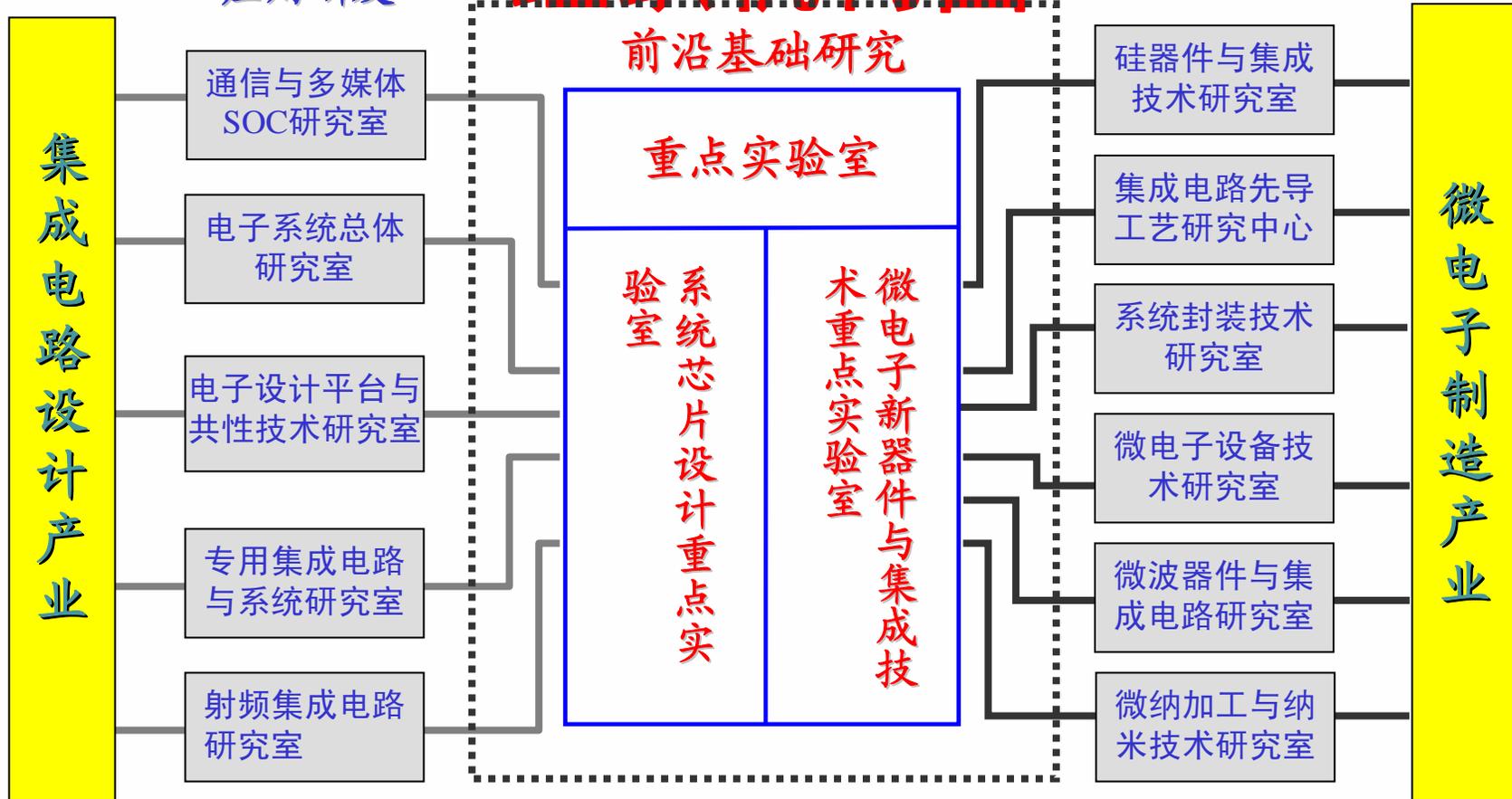
人才
高素质人才，
尤其是优秀工
程师培养基地



产业化

组织机构图

产业化



物联网技术研发中心

宇航芯片技术研发中心

卫星导航技术研发中心



目录

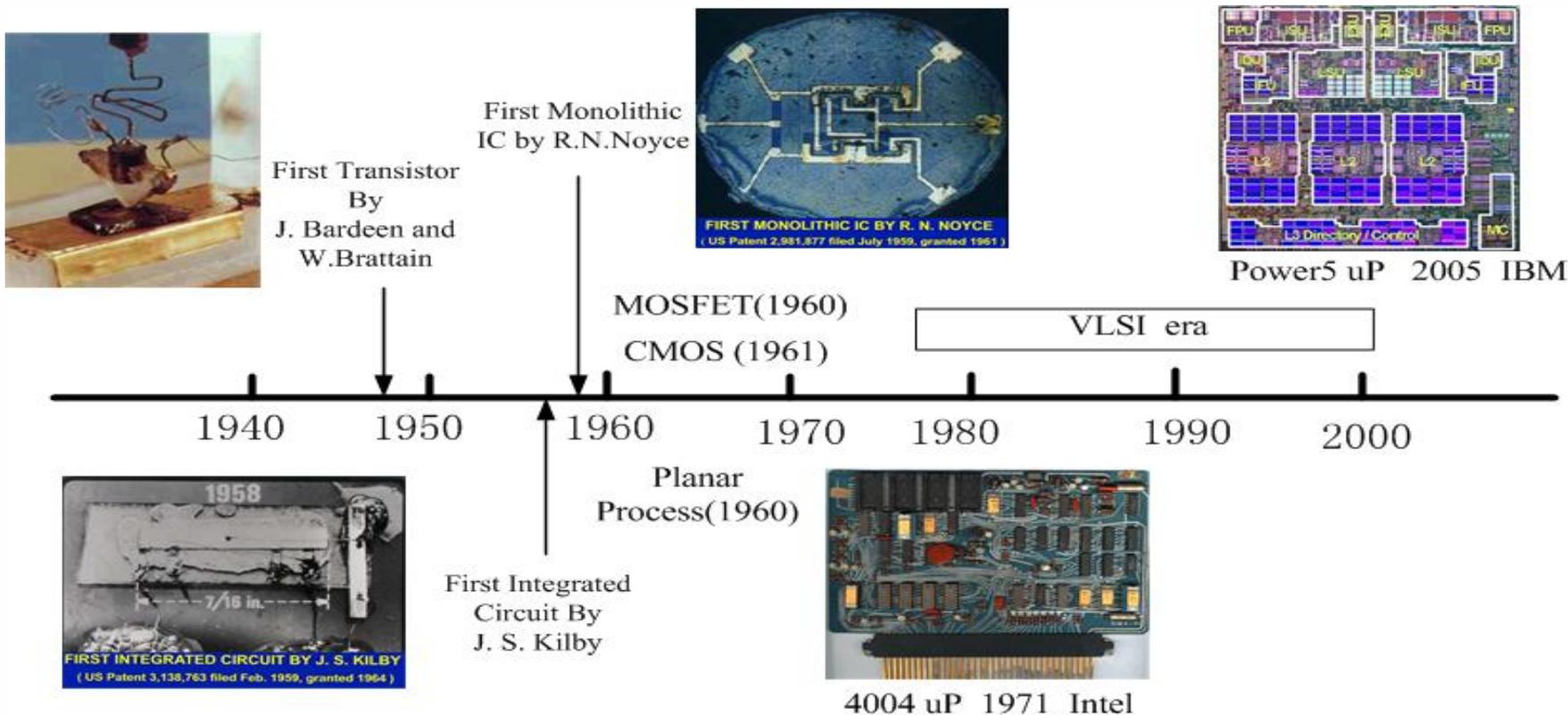
前言

Top-down的纳米加工技术

纳米加工技术的应用

结束语

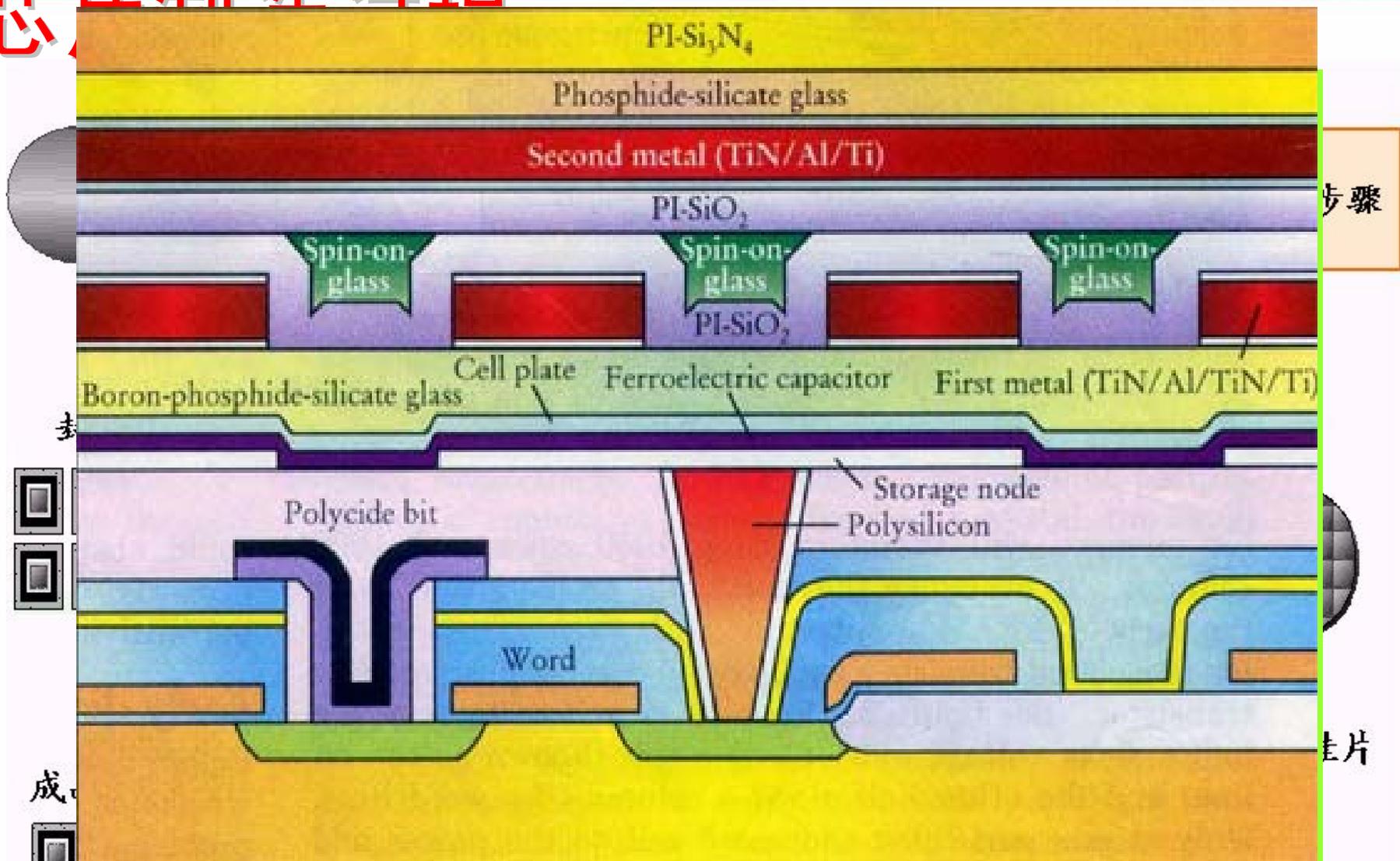
微电子技术发展历程



1948 晶体管发明, 1958 单片集成电路发明;
工艺成熟与光刻精度提高, 单芯片集成器件每隔18个月提高一倍



芯片制造流程

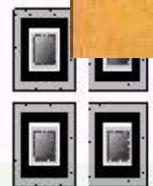


步骤

硅片

测试和封装

成



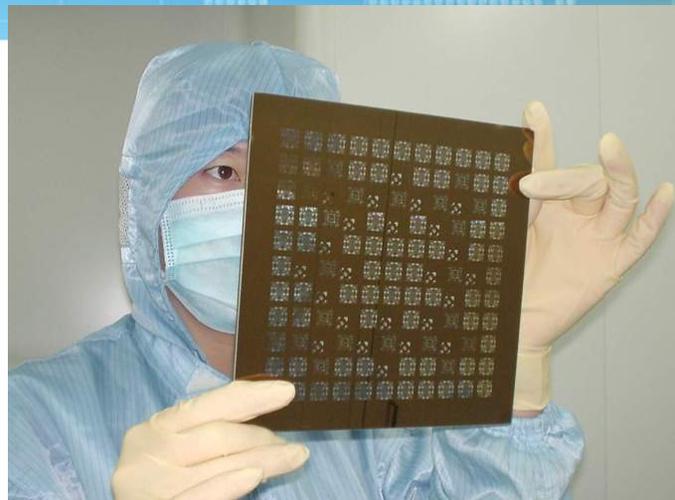


集成电路制造工艺

- **图形转换：** 将设计在掩膜版(类似于照相底片)上的图形转移到半导体单晶片上
- **掺杂：** 根据设计的需要，将各种杂质掺杂在需要的位置上，形成晶体管、接触等
- **薄面沉积：** 制作各种材料的薄膜

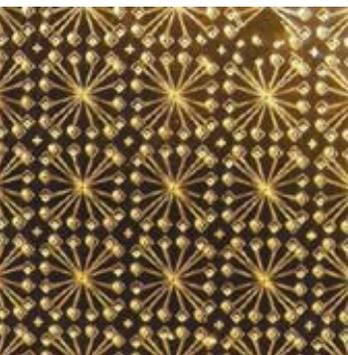


图形转换：光刻

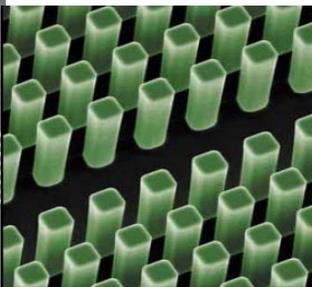
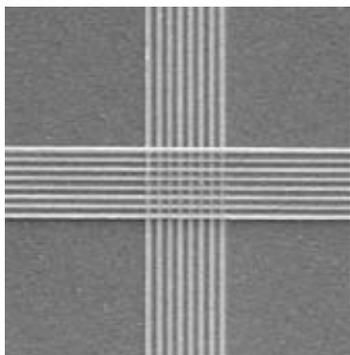


- **光刻三要素：光刻胶、掩膜版和光刻机**
 - 光刻胶又叫光致抗蚀剂，它是由光敏化合物、基体树脂和有机溶剂等混合而成的胶状液体
 - 光刻胶受到特定波长光线的作用后，导致其化学结构发生变化，使光刻胶在某种特定溶液中的溶解特性改变
- **正胶：**分辨率高，在超大规模集成电路工艺中，一般只采用正胶
- **负胶：**分辨率差，适于加工线宽 $\geq 3\mu\text{m}$ 的线条

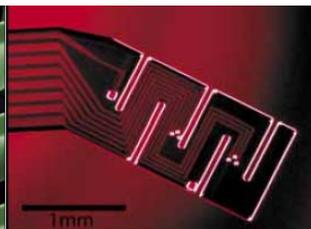
纳米加工技术的应用



分子电子器件

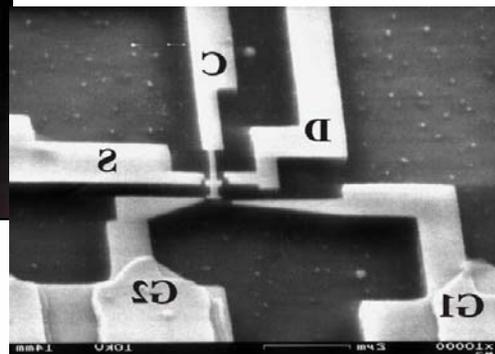


10 μm square silicon pillars coated with PECVD silicon dioxide are used to purify DNA from bacterial cells and to perform PCR amplification via a miniaturized thermo cycler.



A multi-unit cuff microelectrode array was fabricated on polyimide. It was then used to investigate correlations between electrical activity of neurons at points proximal and distal to a site of lesion in red swamp crayfish *Procambarus Clarkii*.

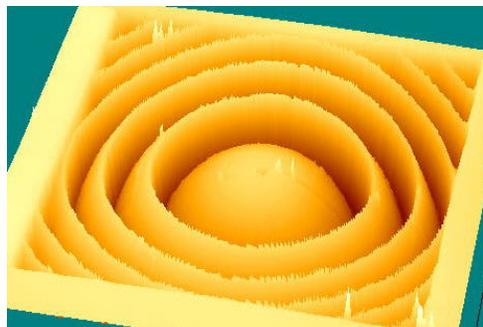
生物应用



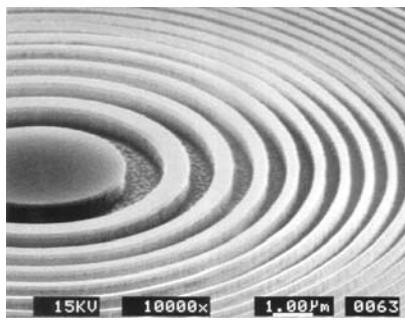
SET



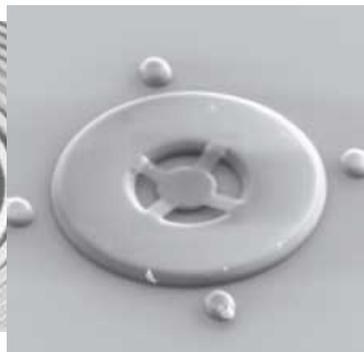
3D光刻



光学元件



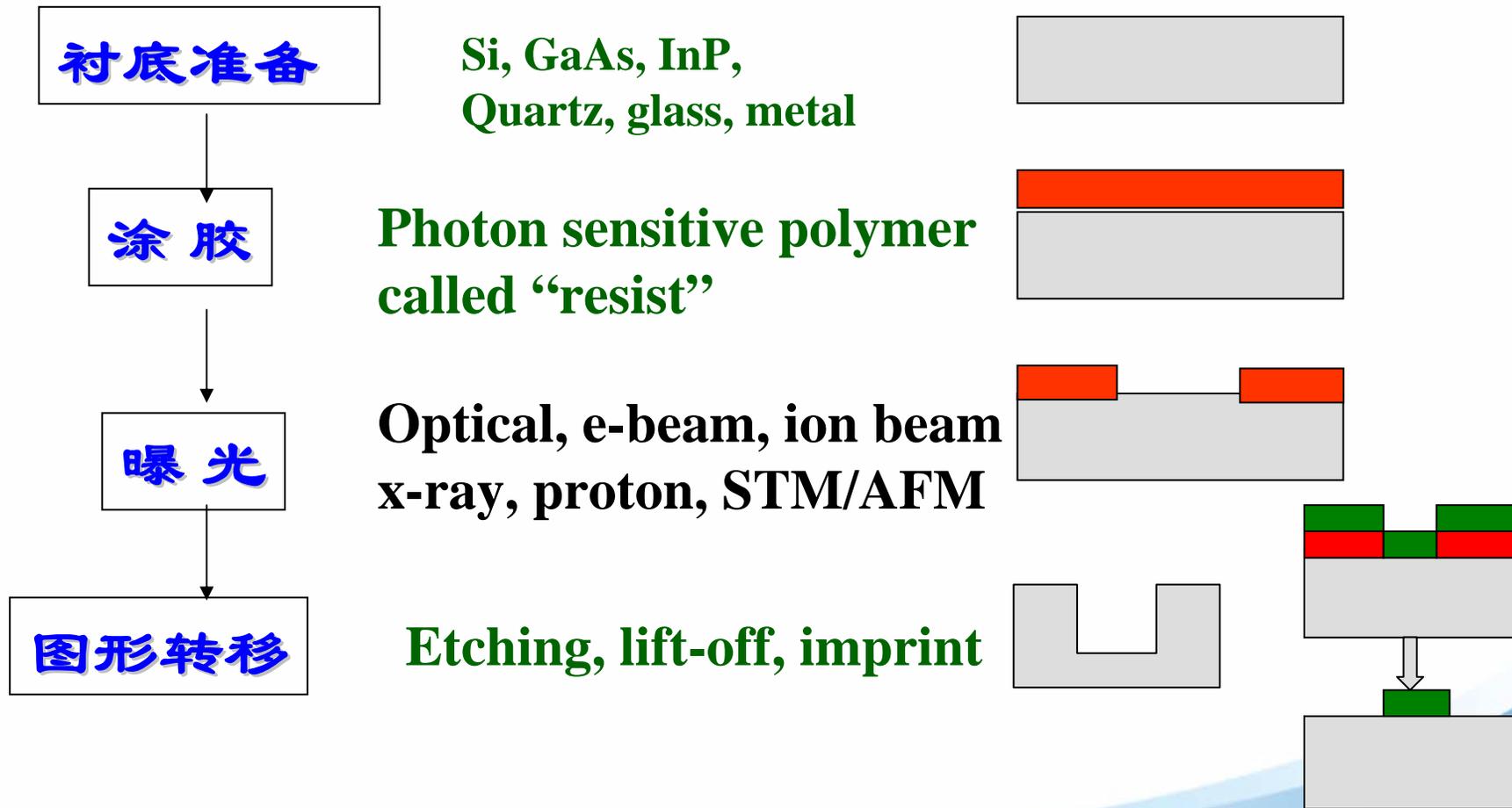
bragg-Fresnel lens for x-rays



Nano fluidic accelerometer



Top-down的微纳加工过程





目录

前言

Top-down的纳米加工技术

纳米加工技术的应用

结束语



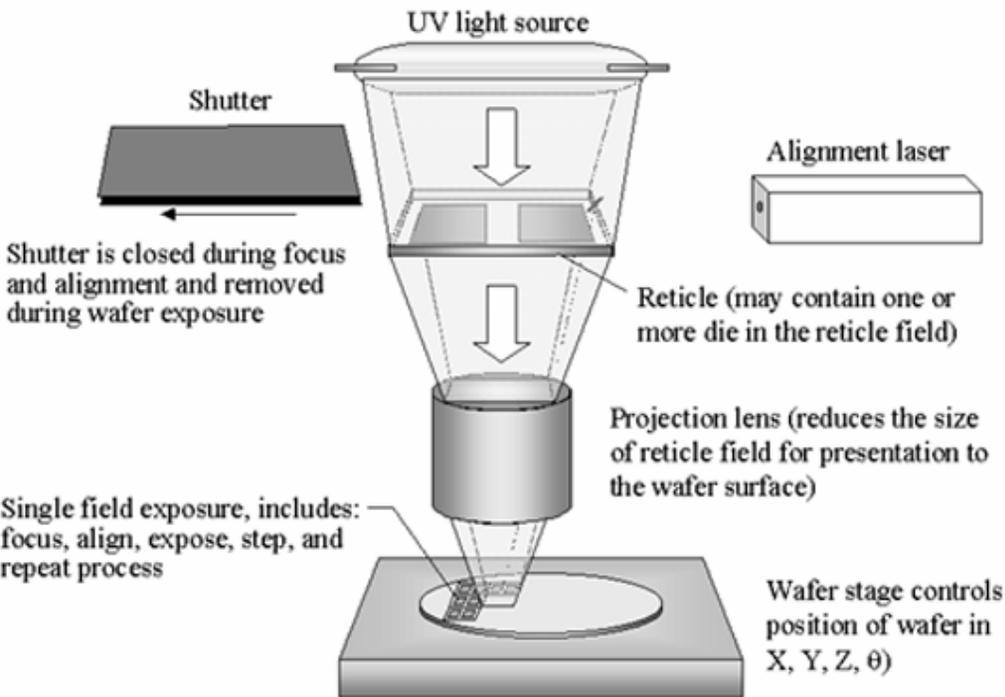
Top-down的纳米加工技术

- **Optical lithography**
- **E-beam lithography**
- **EUV (extra-ultra violet) lithography**
- **Nano-imprint**



ITRS 2009 光刻技术发展路线图：如此便宜的DRAM 需要如此昂贵的光刻技术吗？

光学曝光技术



重要部分：光源、stage、调平和调焦系统、投影物镜

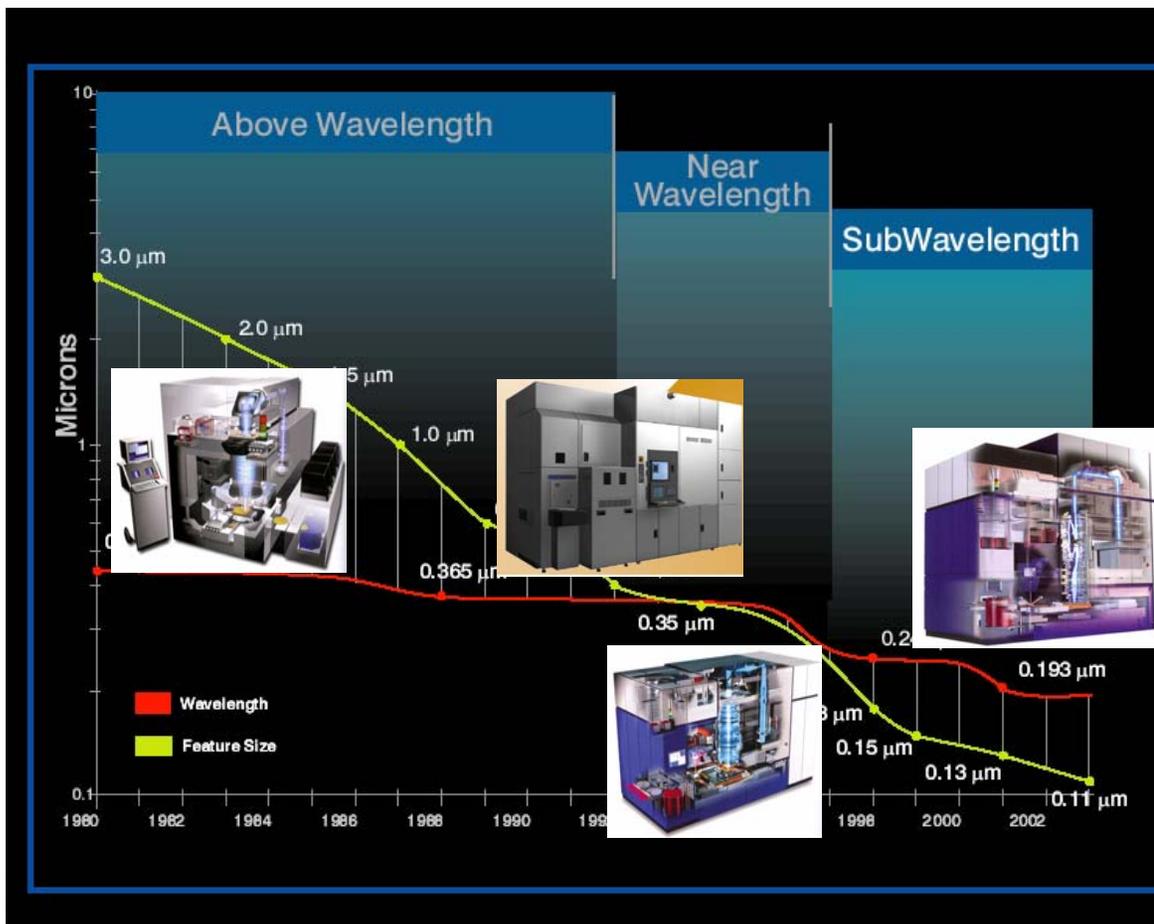
将设计好的图形转移到 wafer 上，IC 制造中最重要的工艺，

40-50% total wafer process time, Determine the minimum feature size

光学曝光技术历史回顾



全球第一台g线光刻机：
1978年由美国GCA公司（现已被ASML收购）制造，分辨率高达1.5微米。



30多年来，光刻机的发展已经经历10代，45nm节点光学光刻机已经问世。ASML、Nikon、Canon三分天下。



光学曝光技术

短波长的曝光光源

546 (e-line), 436 (g-line), 365 (i-line),
248 (KrF), 193 (ArF), 157 (F₂), EUV
电子束 (0.1-0.05Å), 离子束, X射线

研制大数值孔径光学透镜

0.2 — 0.85 — 1.44 (浸没光刻)

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

移相掩模、邻近效应校正
离轴照明、两次曝光等

高分辨率、高灵敏度
高抗刻蚀、抗蚀剂开发



提高分辨率的方法

光源

1、Using light source with shorter λ

光源	波长 λ (nm)	术语	技术节点
汞灯	436	g线	$>0.5\mu\text{m}$
汞灯	365	i线	$0.5/0.35\mu\text{m}$
KrF(激光)	248	DUV	$0.25/0.13\mu\text{m}$
ArF (激光)	193	193DUV	$90/65\cdots 32\text{nm}$
激光激发Xe 等离子体	13.5	EUV	Reflective mirrors



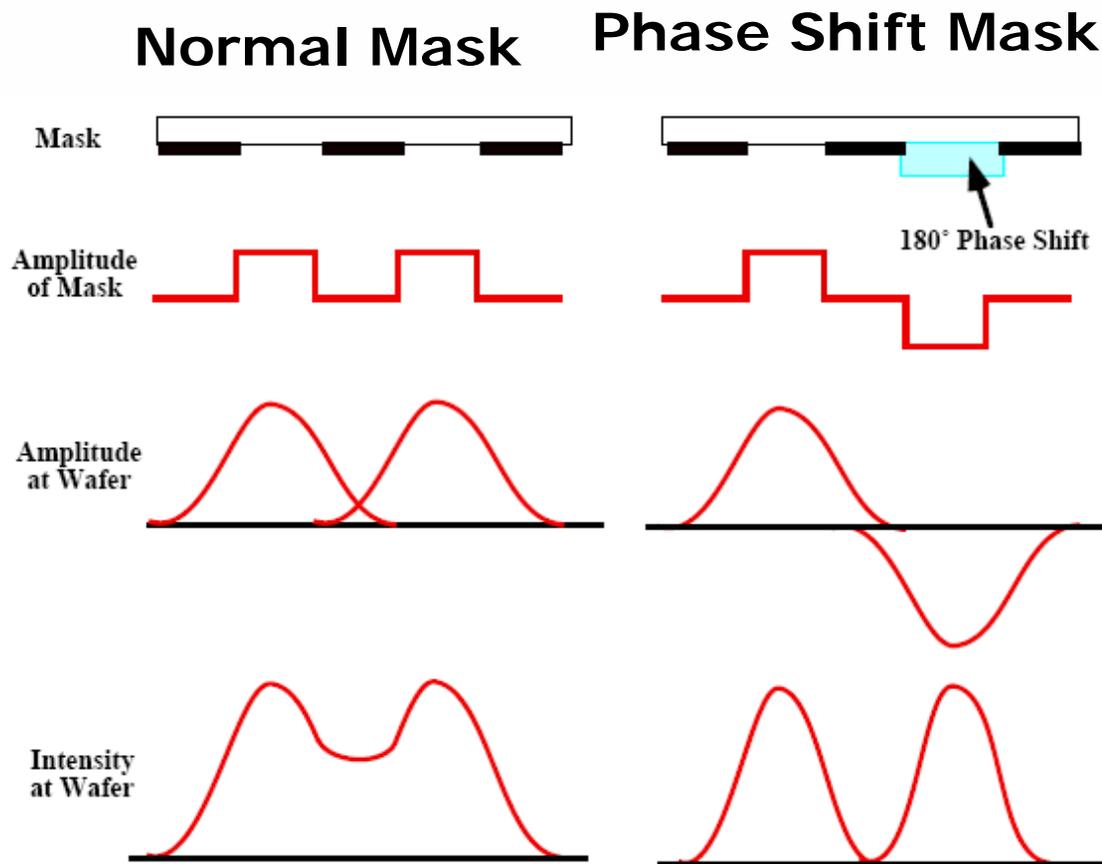
提高分辨率的方法

2、reduce k1

$$I = E \times E^*$$

附加材料造成光学
路径差异，达到反相

Pattern dependent
 k_1 can be reduced by up
to 40 %



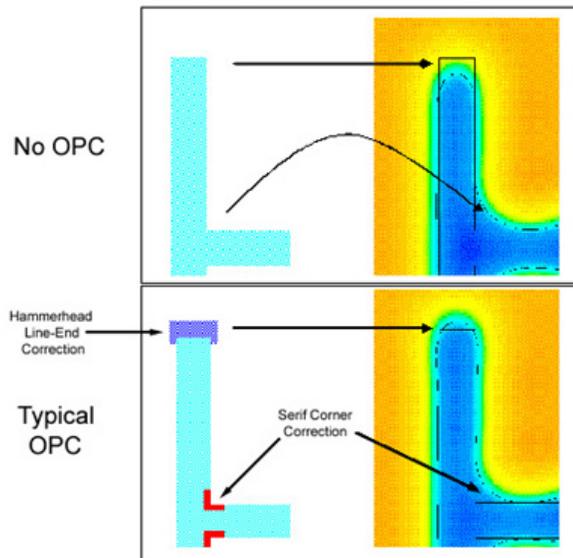
Optical Proximity Effect Correction

OPC的作用:

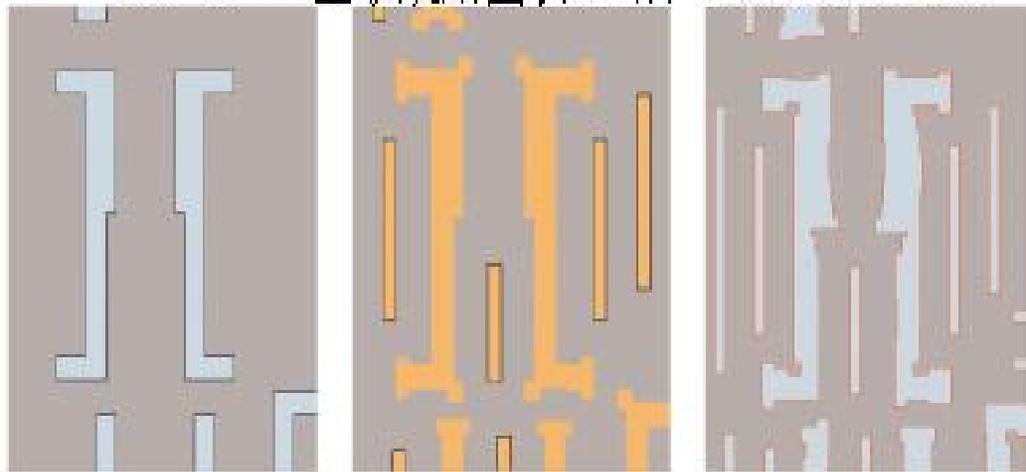
减小光学邻近效应的负作用。

改善由于图形密度引起的线宽变化，掩膜版版图的保真度，以及由光刻胶及刻蚀过程引起的扩散 (diffusion) 和负载 (loading) 效应 (effect)。

OPC就是通过对掩膜总体几何图形的改变来补偿以上的图形非线性畸变，以达到无畸变图形传递的目的。



OPC 前 基于规则图表OPC后 基于模型OPC后



基于模型的OPC精度高、复杂;

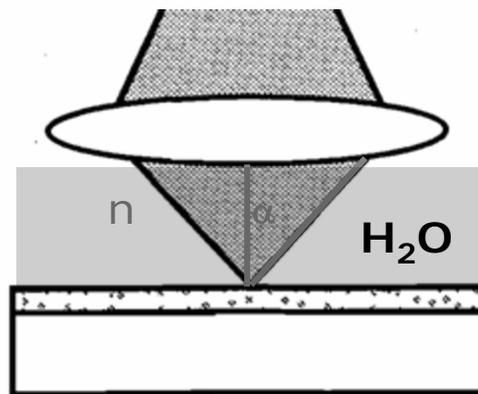
基于规则图表的OPC精度低、简单。

提高分辨率的方法

3、增大数值孔径

Lens fabrication	
λ [nm]	NA
436	0.15-0.45
365	0.35-0.60
248	0.35-0.82
193	0.60-0.93

Immersion Lithography



Numerical Aperture:
 $NA = n \sin \alpha$

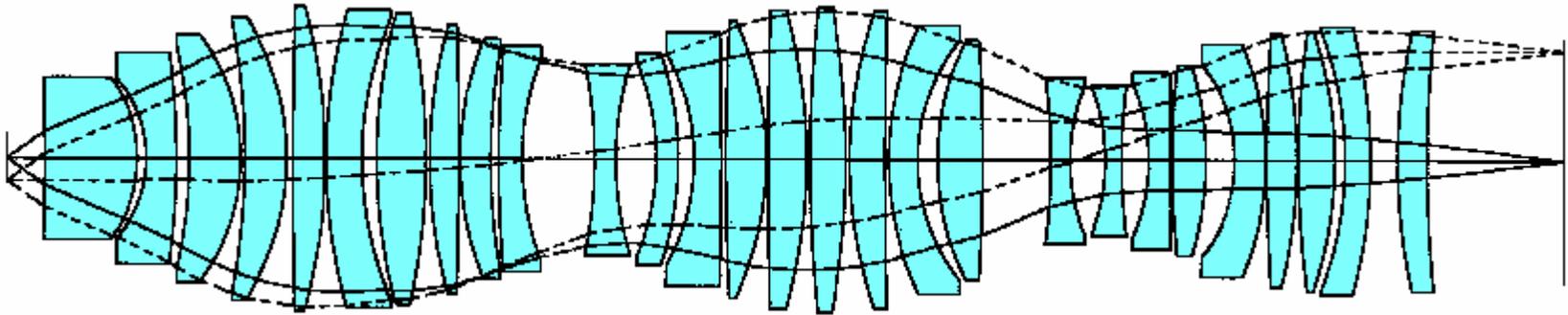
$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

$$n_{H_2O} = 1.44 \Rightarrow NA \approx 1.36$$

State of the Art: $\lambda = 193 \text{ nm}$, $k_1 = 0.3$, $NA = 0.93 \Rightarrow R \approx 60 \text{ nm}$
 $= 1.36 \Rightarrow R \approx 40 \text{ nm}$



KrF--Stepper Projection Lens



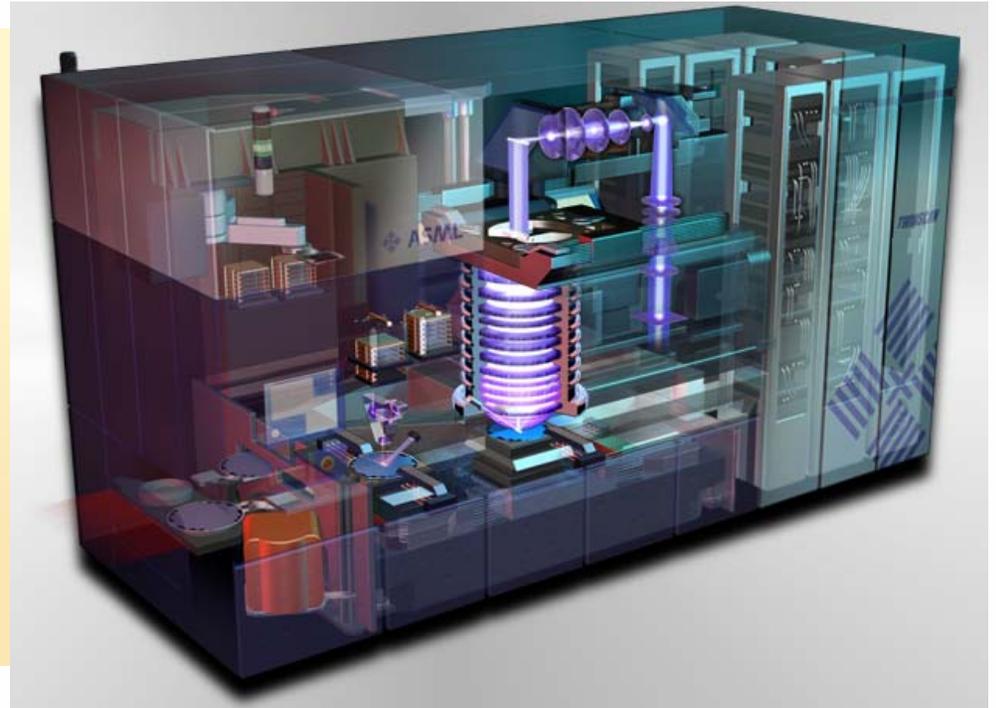
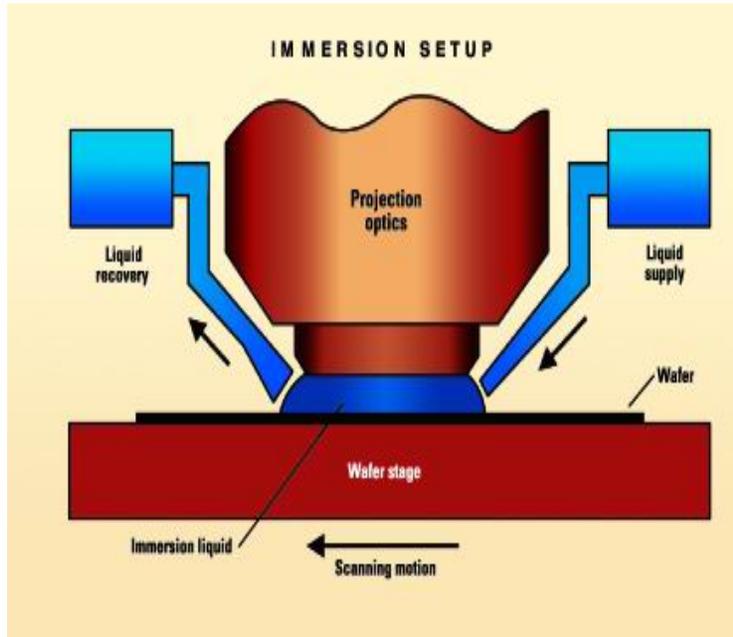
$\lambda = 248\text{nm}$ NA=0.55 Filed: 22mm, 28-lens optics

Japan Patent: Laid Open 8-166540

$\lambda = 193\text{nm}$ NA=0.75 Filed: 22mmx26m, 38-lens ,
a spherical optics



浸润式193nm光刻



浸润式光刻增大了 n ，相当于缩短了光刻波长或者增大了数值孔径，浸润液体通常为折射率为1.44的水；
193nm的光学技术推进到32nm的工艺节点。



光刻技术面临的挑战

- 掩模：** 掩模性能控制、缺陷控制
- 光刻胶：** 光刻胶组分设计和工艺应用
- 光刻机：** 光源、投影系统、对准和套刻
- 度量学：** 测量精度和精确控制
- 数据工程：** OPC和RET 技术

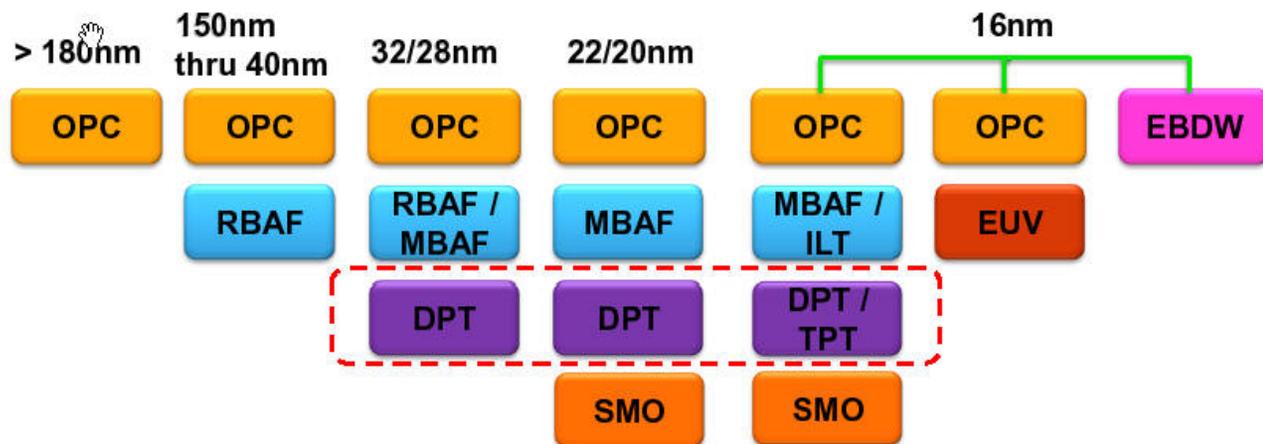
光学曝光技术

Technology RET Solutions

生产效率高;

工业界一直采用,
工艺成熟;

各种技术使分辨率
一直在提高;



- RET solutions are becoming more complex and are changing at a faster pace with each technology node
- Multi Options:
 - Low-volume mask use = EBDW
 - High-volume restricted design rules = DPT/TPT
 - High-volume unrestricted design rules = EUV
 - Various use models = Complimentary Lithography

受衍射效应的限制, 分辨率不如电子束;
随着IC尺寸缩小, 设备成本大增;
掩模版由于采用RET技术, 导致成本大增。

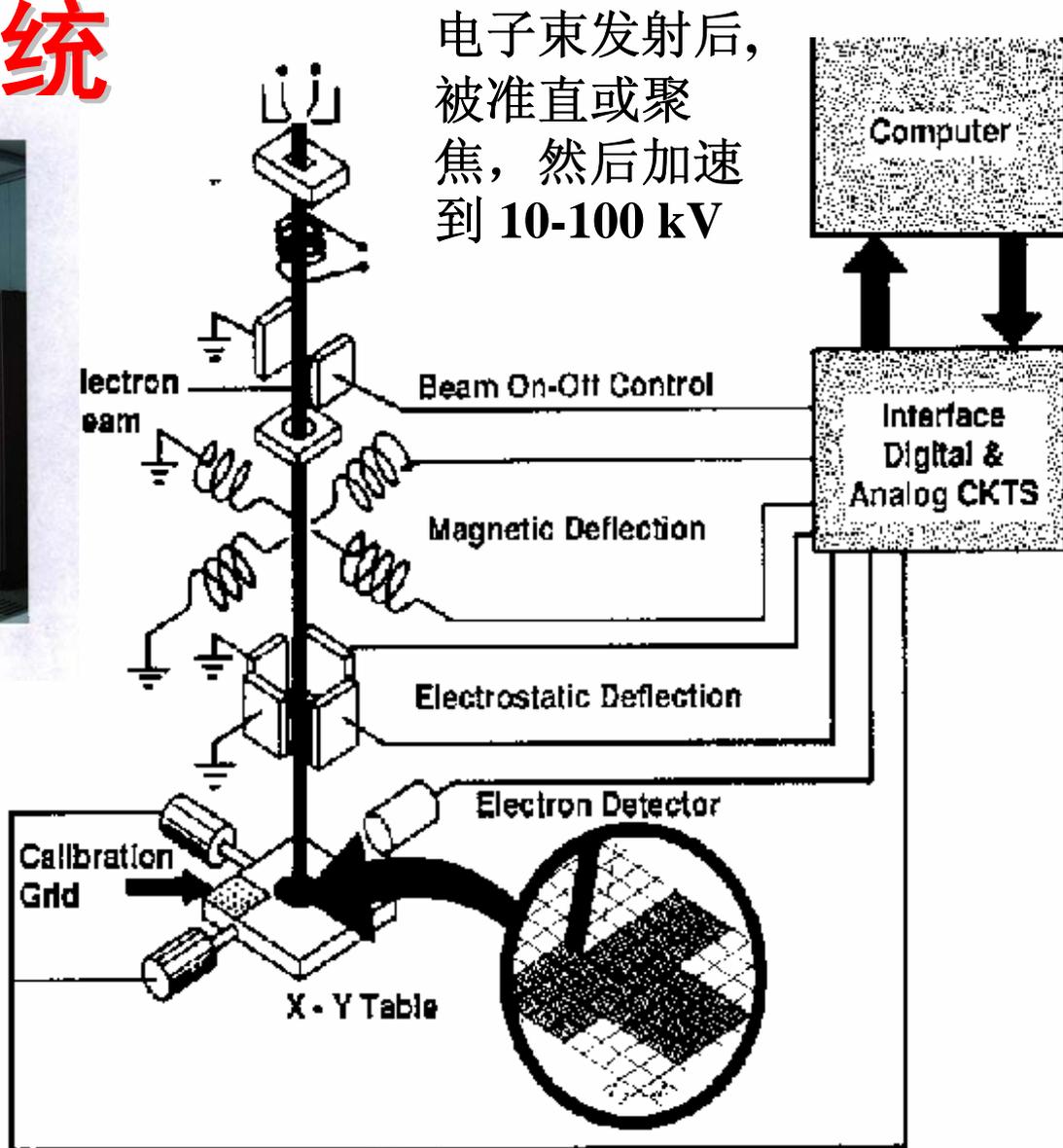


Top-down的纳米加工技术

- **Optical lithography**
- **E-beam lithography**
- **EUV(extra-ultra violet) lithography**
- **Nanoimprint**

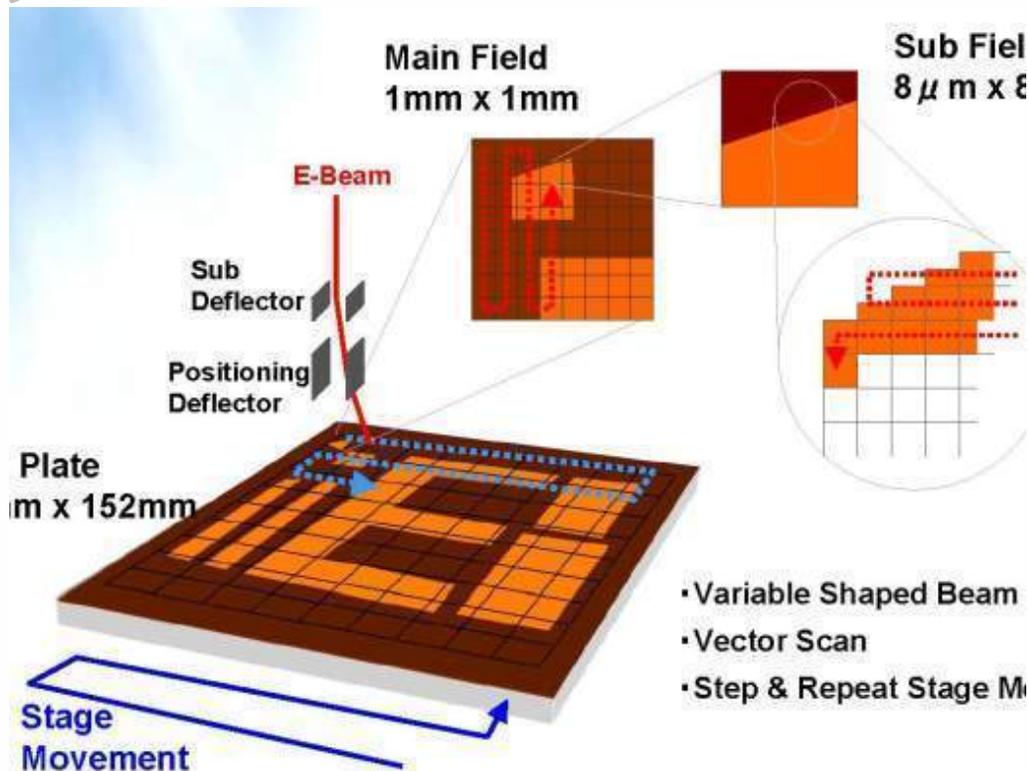


电子束曝光系统



- 电子束源：热电子发射和场发射；
- 电磁透镜系统；
- Stage系统；
- 真空系统；
- 控制系统

电子束曝光



原理： Similar principle as a scanning electron microscope

Electron-beam process, Mix and Match Technology, Resist technology
Simulation, Proximity effect correction



电子束曝光技术

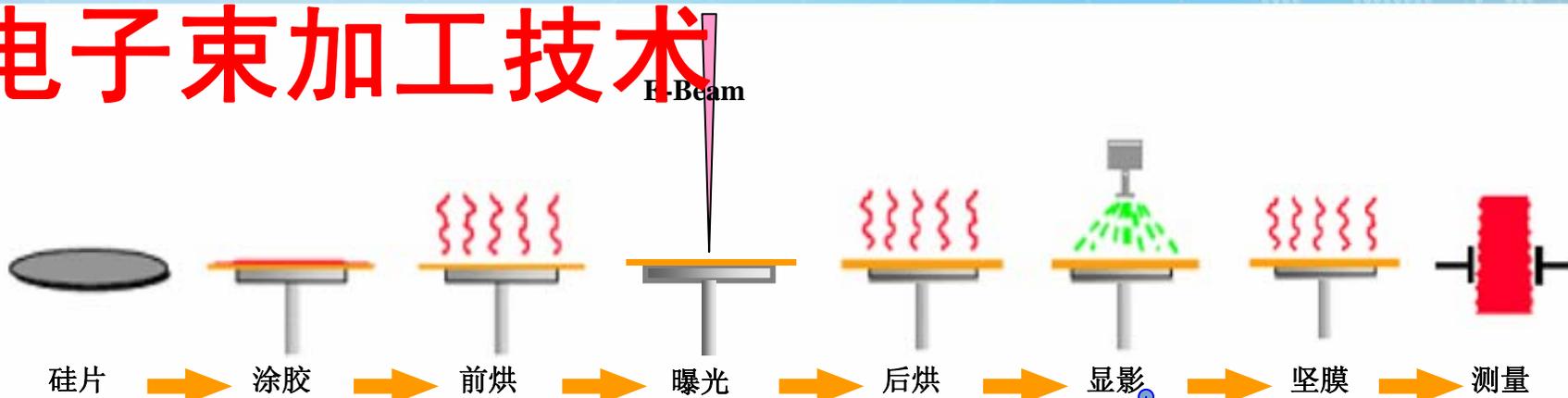
特点:

- 高分辨率 ($< 5\text{nm}$)
- Large substrate size (12" wafer)
- Multi-level patterning (alignment error $< 20\text{nm}$)
- High flexibility
- Fast prototyping

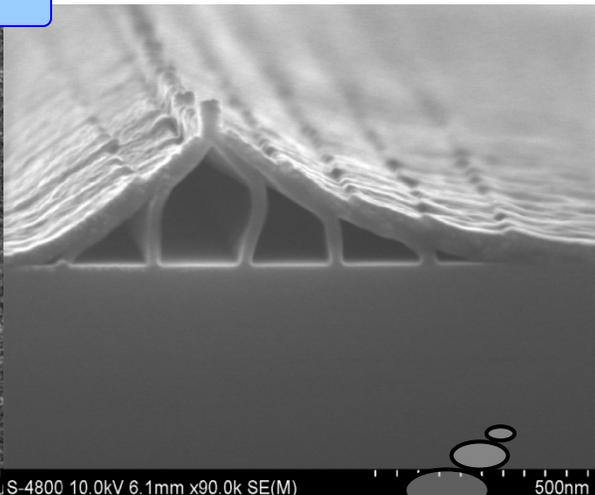
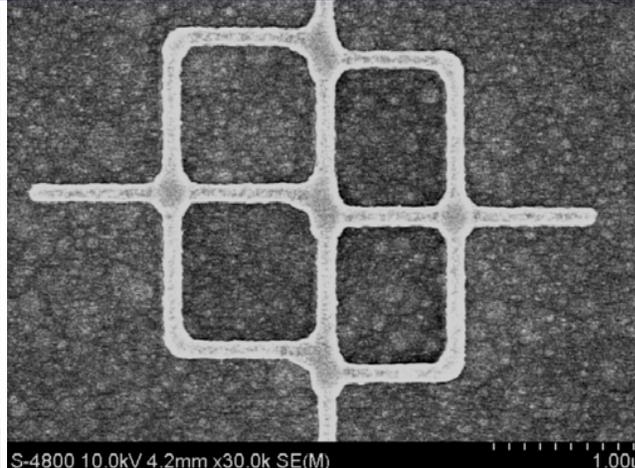
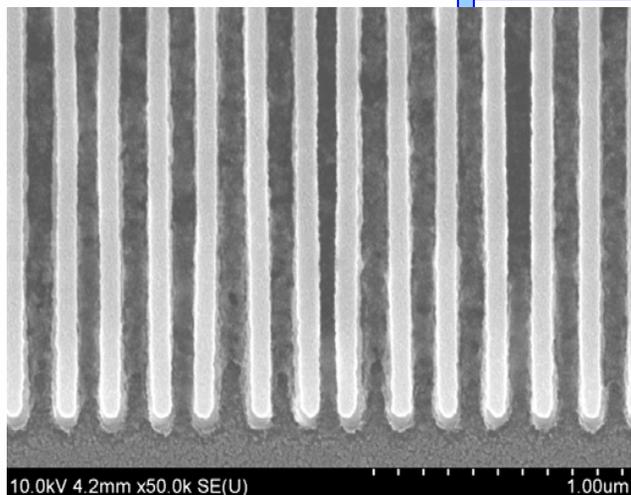
局限:

- spot size-electron lens aberration, space charge, mechanical stability
- proximity effect-electron forward and backscattering
- resist contrast

电子束加工技术



电子束光刻常规工艺



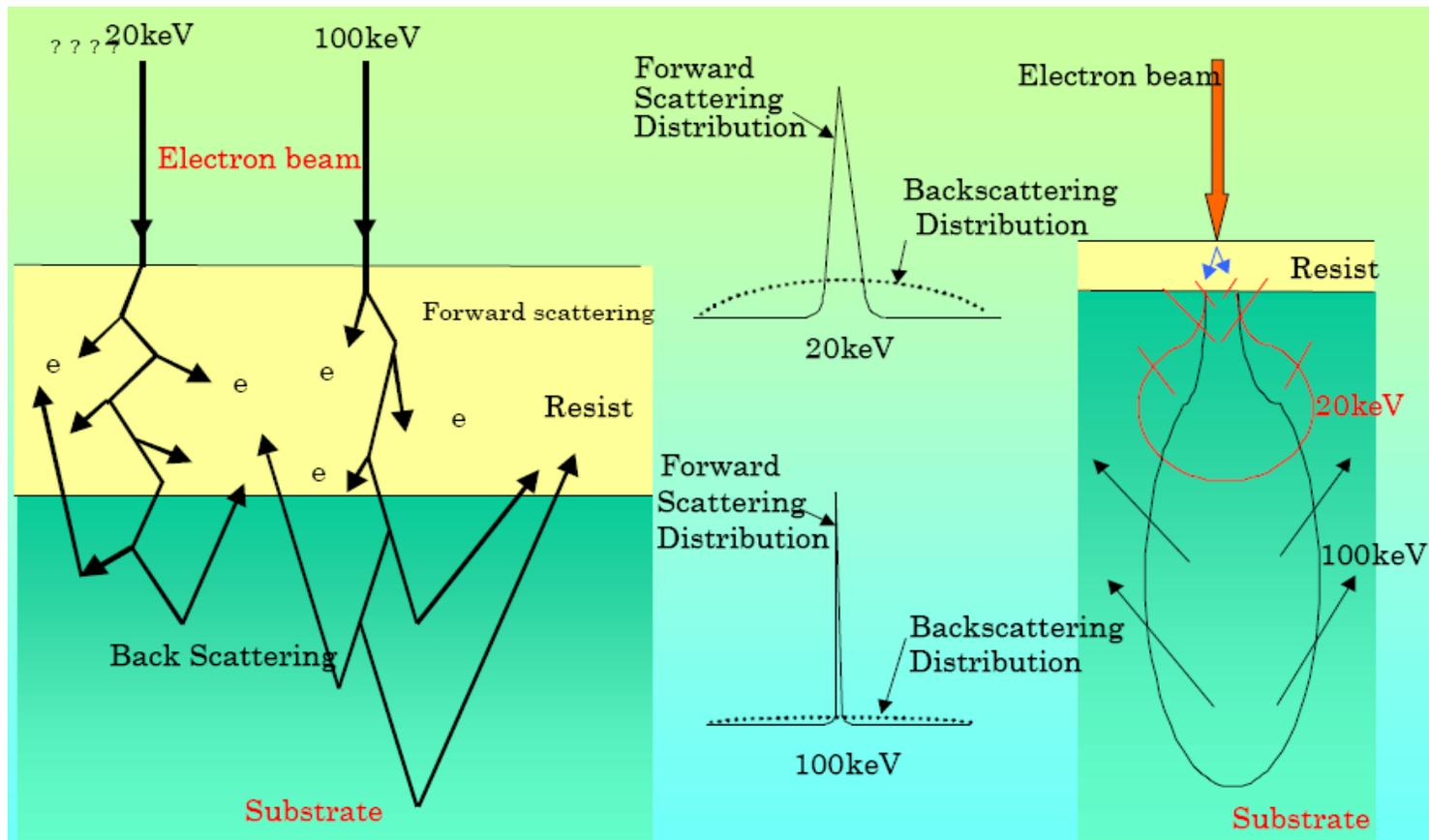
邻近效应

图形拼接

抗蚀剂粘
连和倒塌



20-100KeV电子散射比较



20KeV的电子能量前散射电子可扩展到数百纳米远
100KeV的电子束散射电子扩展到30-50纳米

电子束光刻亚50纳米结构图形

电子束:

- 电子束斑本身是高斯分布;
- 电子束曝光最小步距尺度0.125-12.5nm;
- 电子束斑尺度2-50nm;

抗蚀剂

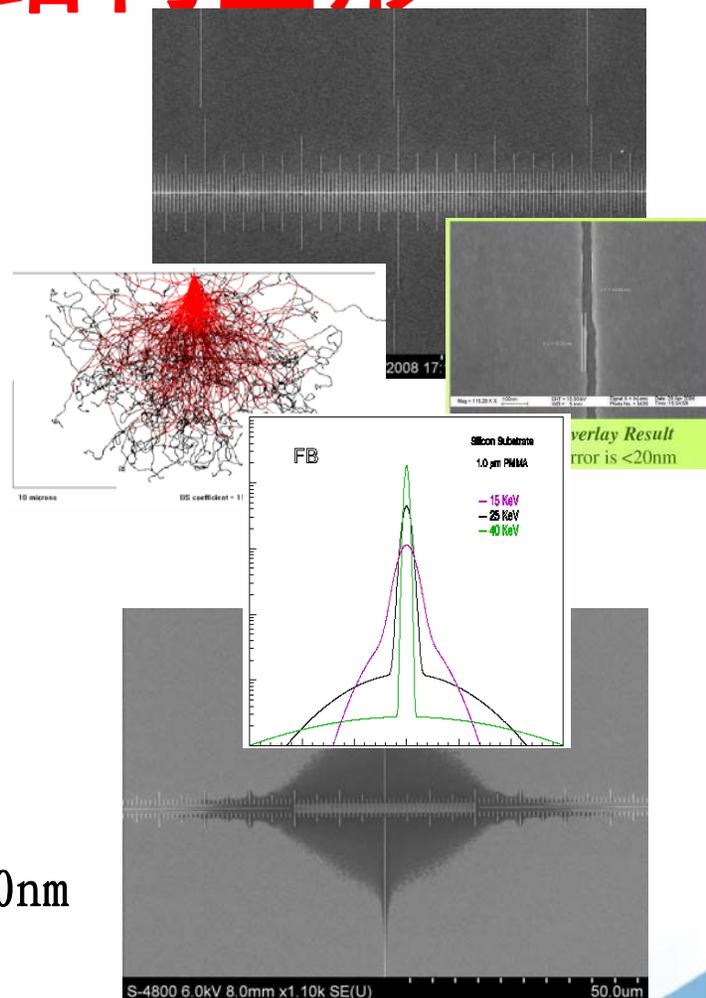
- 抗蚀剂分辨力尺度5-100nm;
- 抗蚀剂膨胀收缩尺度1-50nm;
- 抗蚀剂显影烘烤影响尺度变化1-50nm;

设备稳定性

- 长时间曝光电磁场波动漂移尺度20-1000nm;
- 长时间曝光温度波动漂移尺度20-500nm;
- 电子束曝光拼接精度与套刻精度的尺度15-60nm

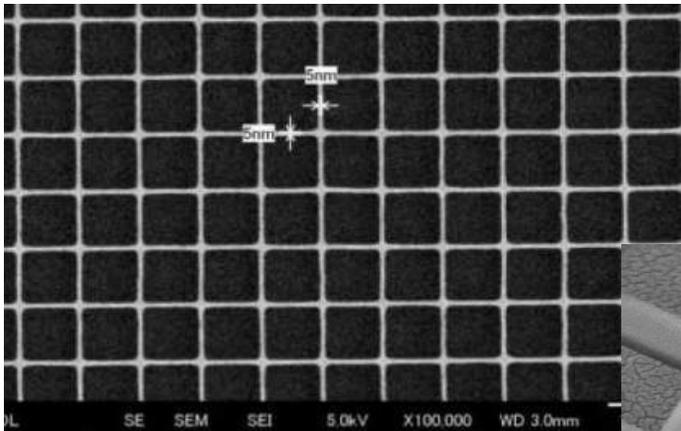
电子束曝光邻近效应

- 电子束背散射波及尺度2-50微米
- 电子束前散射波及尺度10-100nm

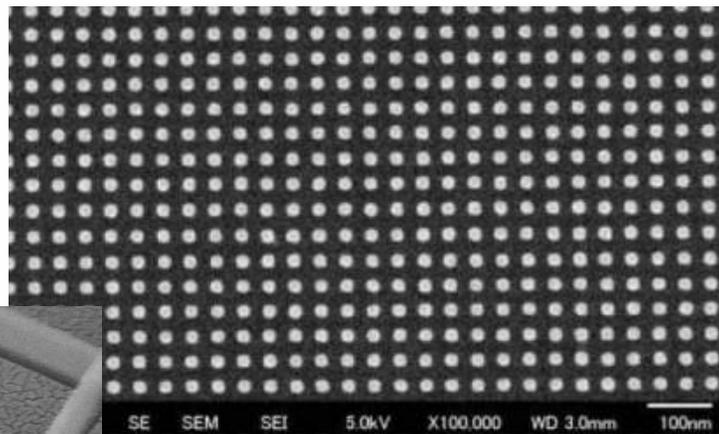




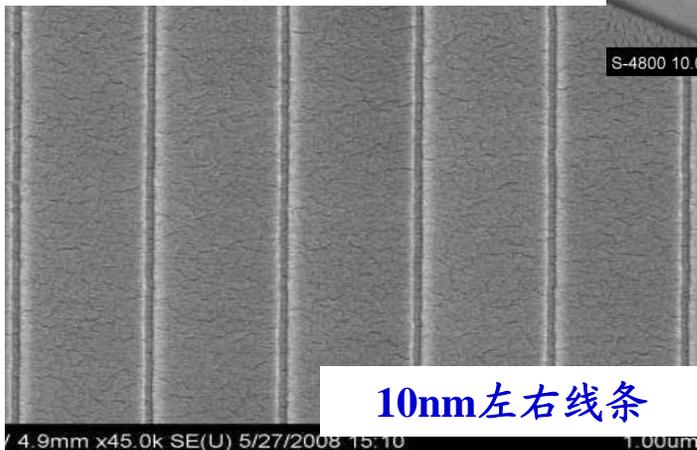
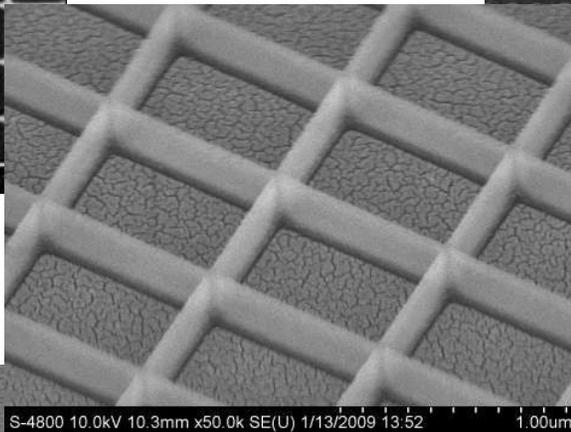
电子束曝光技术



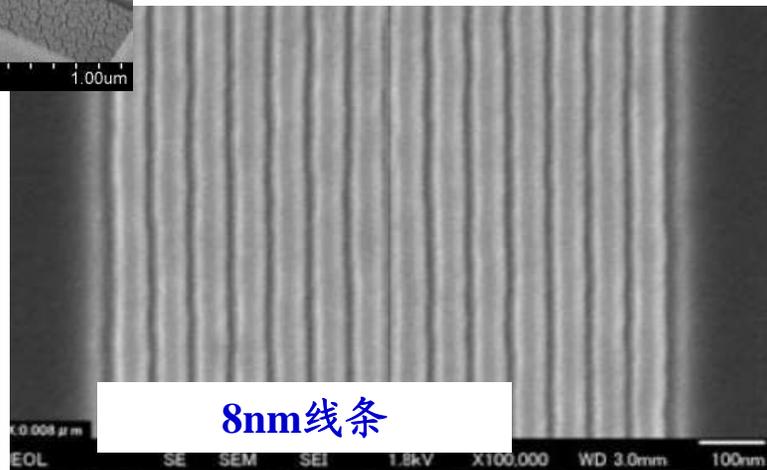
5nm左右宽格栅



20nm密集点阵



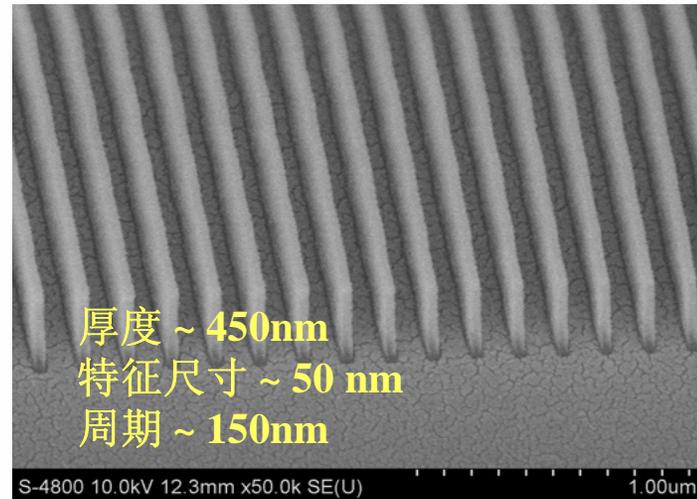
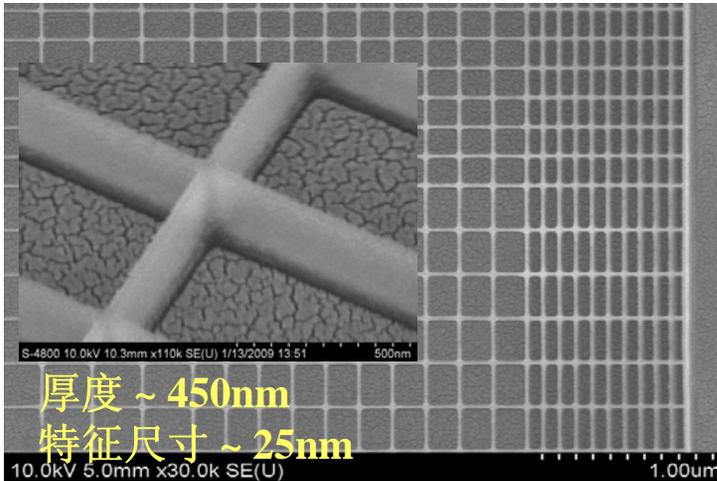
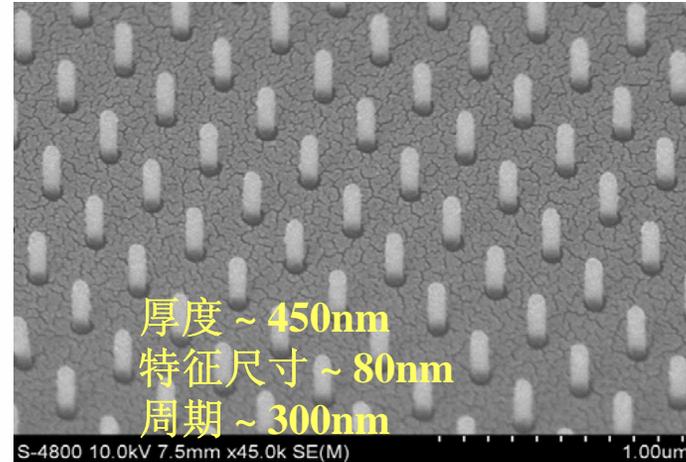
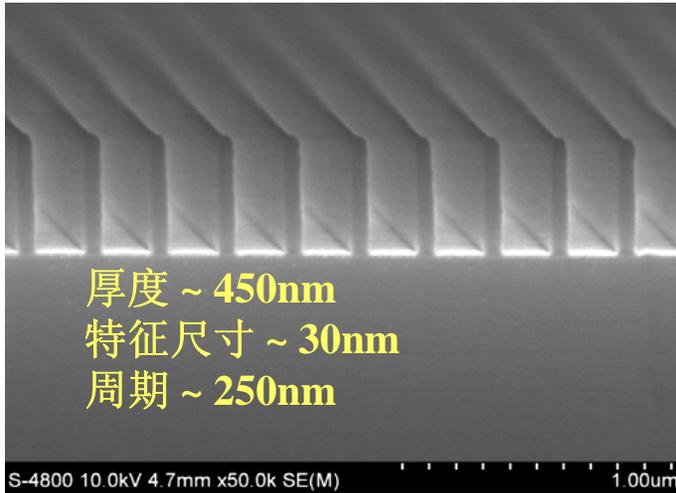
10nm左右线条



8nm线条



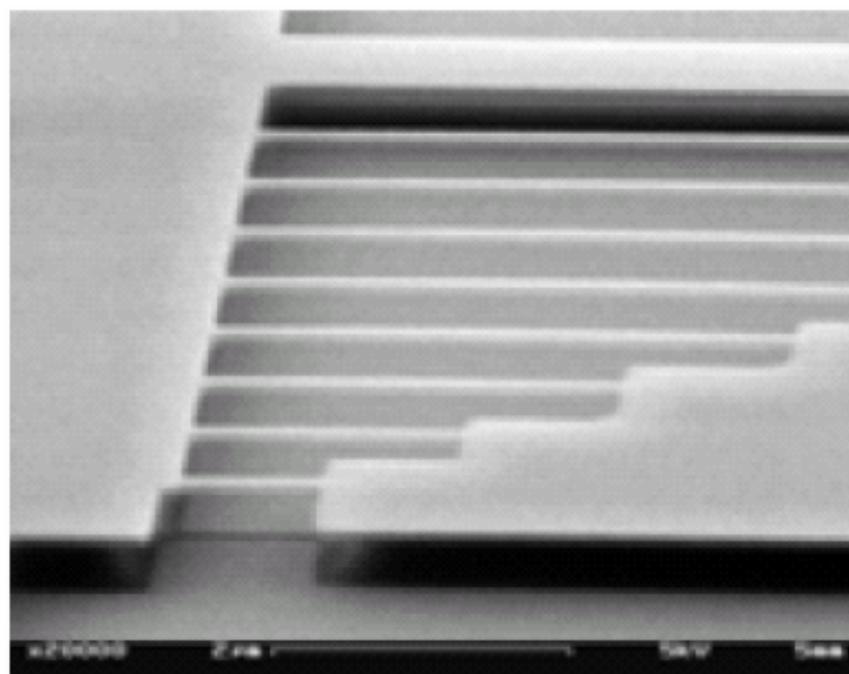
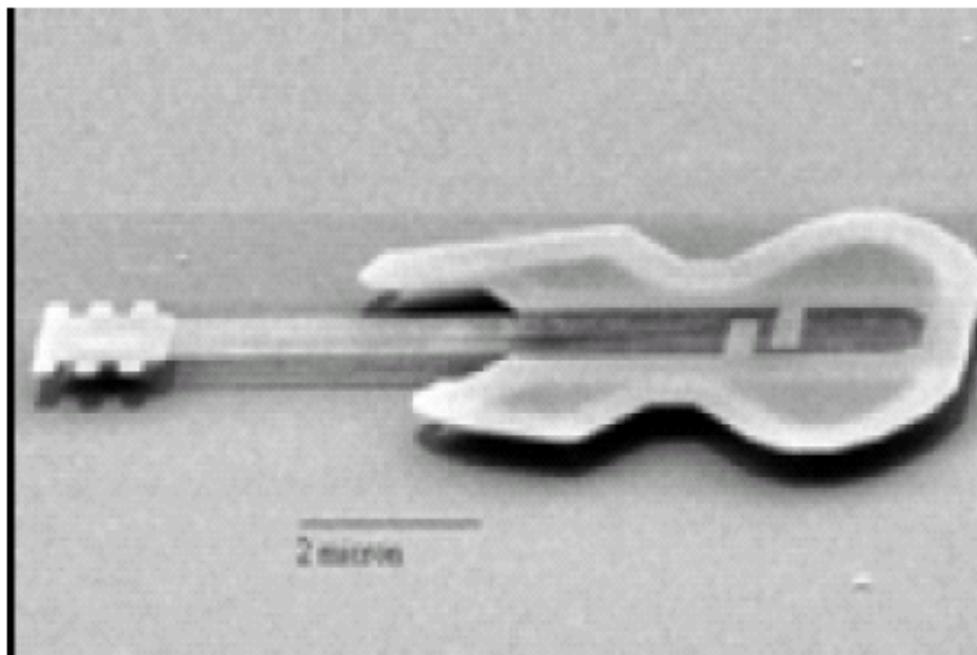
小尺寸负性胶图形形成





电子束曝光技术

Nano-Scale Fabrication



✓ 50 nm string on “nano-guitar”

✓ Harold. G. Craighead, Dustin Carr (Cornell Univeristy)

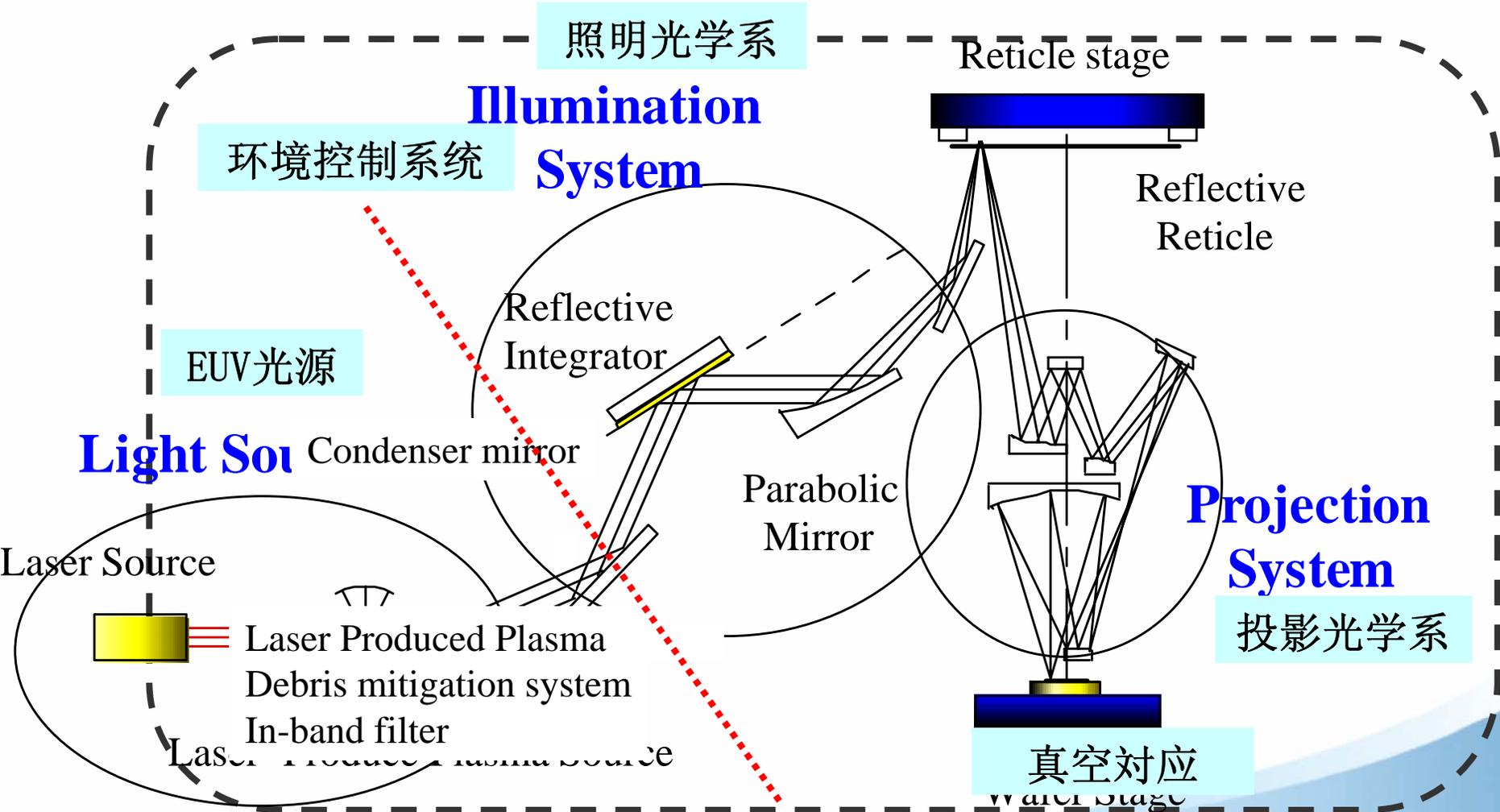


Top-down的纳米加工技术

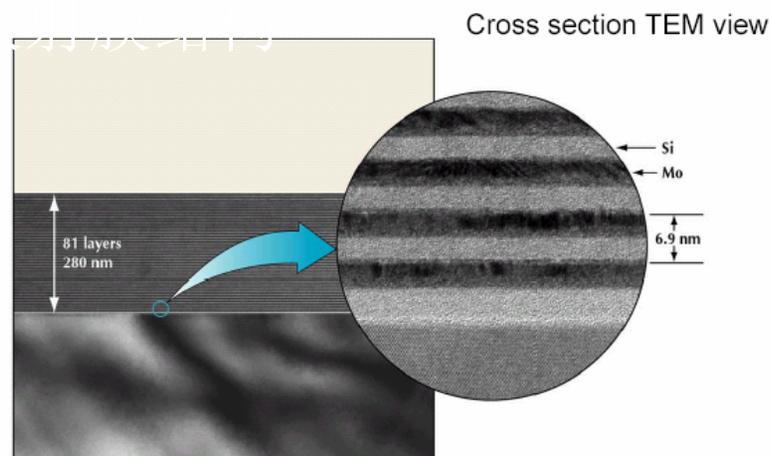
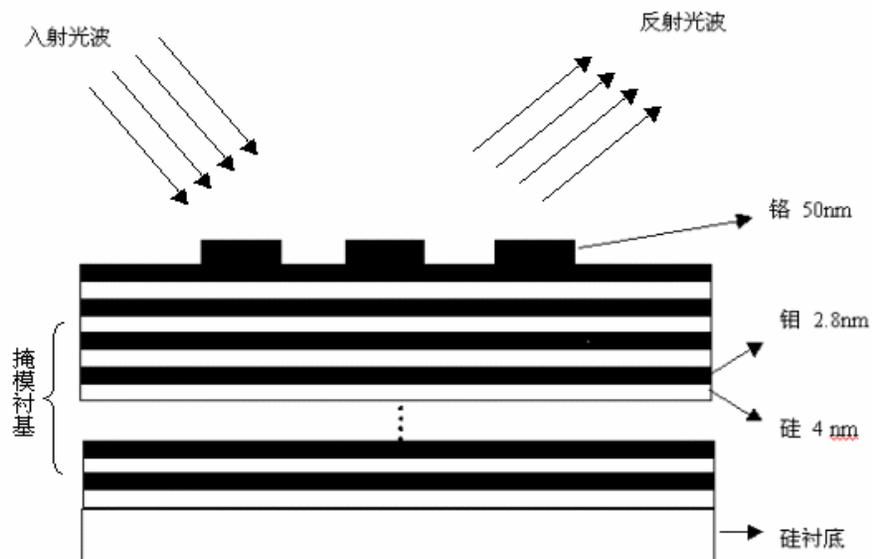
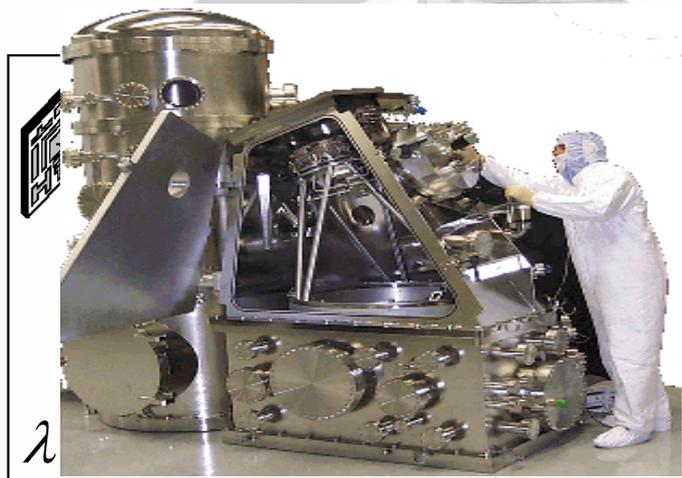
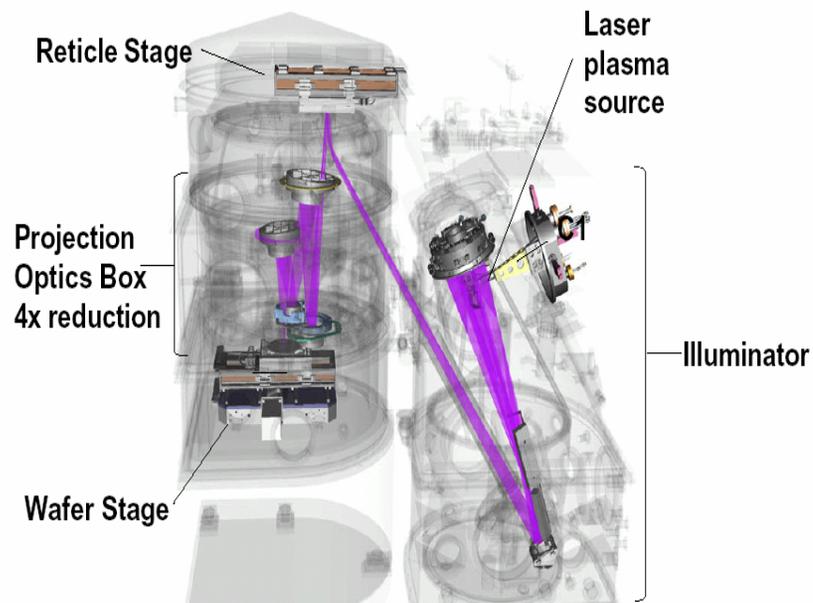
- **Optical lithography**
- **E-beam lithography**
- **EUV(extra-ultra violet) lithography**
- **Nano-imprint**



极紫外投影光刻系统 EUVL



极紫外光刻技术



Courtesy of Saša Bajt (LLNL).



EUVL 的发展



2006年8月, ASML正式向IMEC和CNSE (University at Albany) 移交两台 α 型EUVL SCANNER, 欧洲More Moore EUV项目宣布发展了一种新的无损检测EUV 掩模基版的技术方法: 面向22nm节点, 预计售价超过5000万美元。



EUVL的面临的挑战

(A): KrF resist **可以利用**, high resolution,
reasonable TP

(B): **极紫外光刻 (EUVL) 面临的问题**

- 35% 光被反射镜吸收,
 镜面热变形导致的像差控制
- 无缺陷掩模的制备和成本控制
- 真空和镜片的污染
- 大功率EUV光源
- Flare

高精度非球面加工检测

高精度波面检测技术

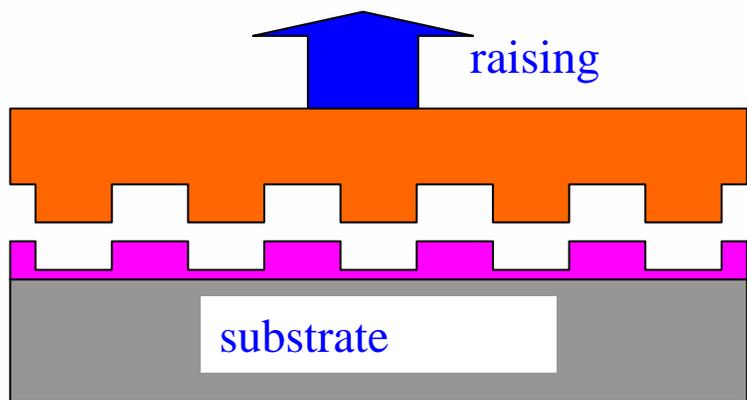
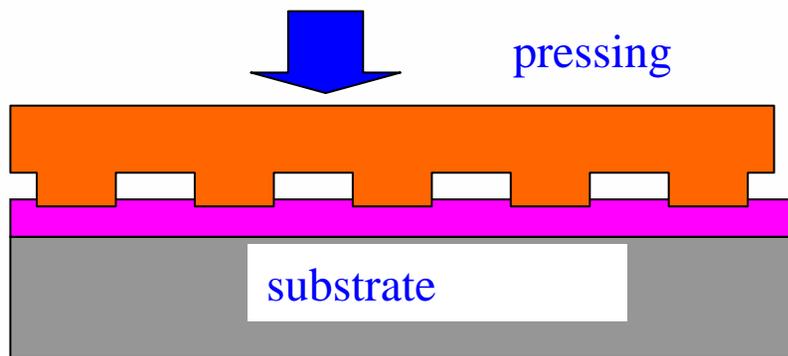
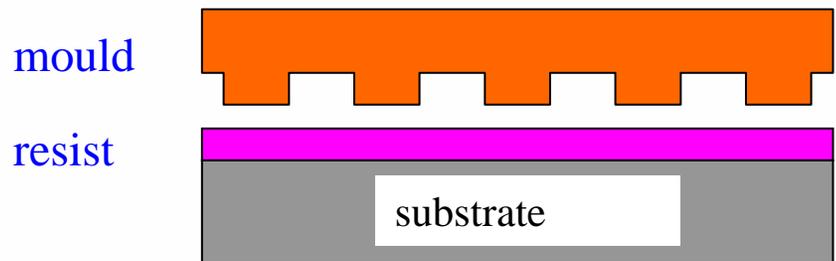
80wph © 300mm: 32nm以下



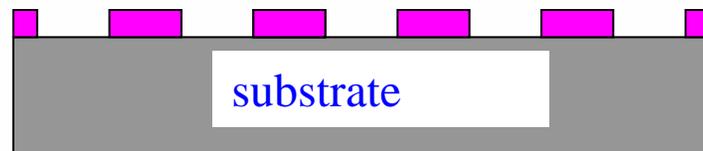
Top-down的纳米加工技术

- **Optical lithography**
- **E-beam lithography**
- **EUV(extra-ultra violet) lithography**
- **Nano-imprint**

纳米压印



RIE to remove residual



热压印的模板:

大压缩强度、抗拉强度以减小压模的形变和磨损;

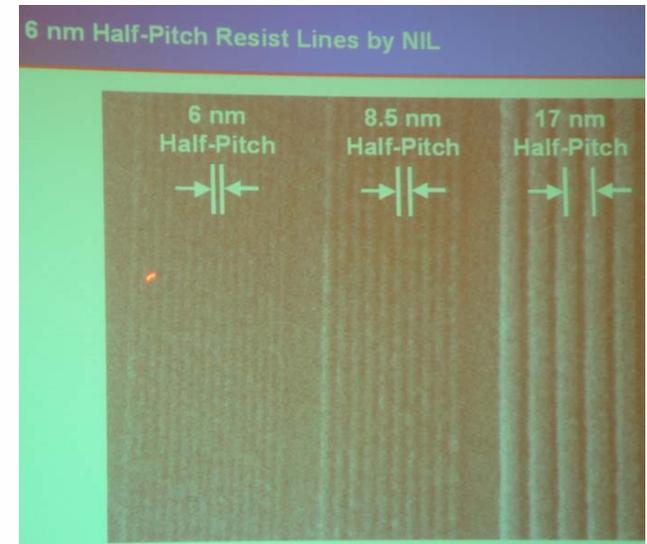
高热导率和低热膨胀系数, 以减小在加热过程中的热形变,

Si、SiO₂、SiN_x、Ni等

纳米压印

(1) Comparison of EBL & NIL:

	EBL	NIL
1. Resolution:	+	+
2. Throughput:	-	+
3. Cost	-	+
4. Alignment	+	?
5. Damage	-	+



(2) Applications

Nano CD,
opto-devices (e.g. gratings),
infrared detectors,
Semiconductor devices

6nm NIL 结果

资料来源: IEEE NAN007

目录

前言

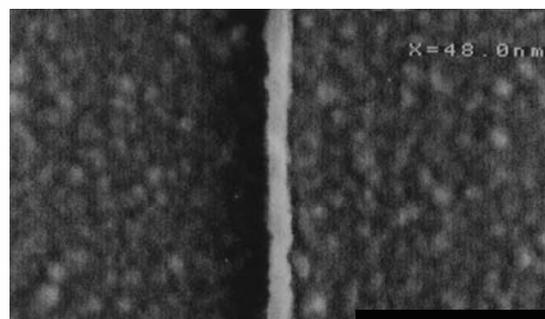
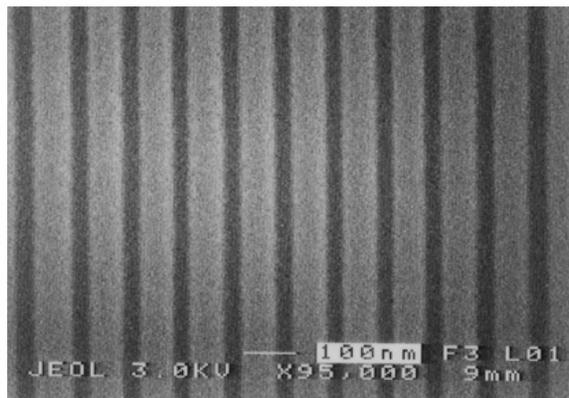
Top-down的纳米加工技术

纳米加工技术的应用

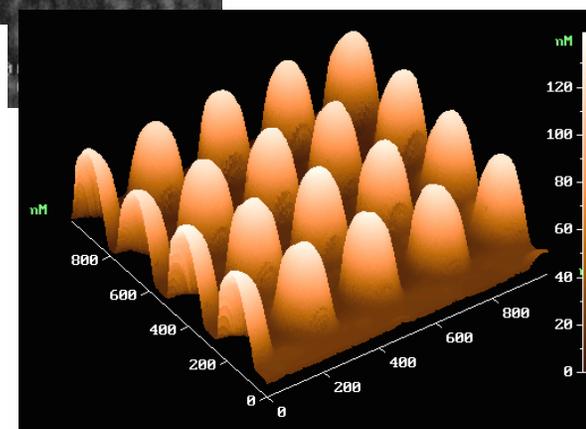
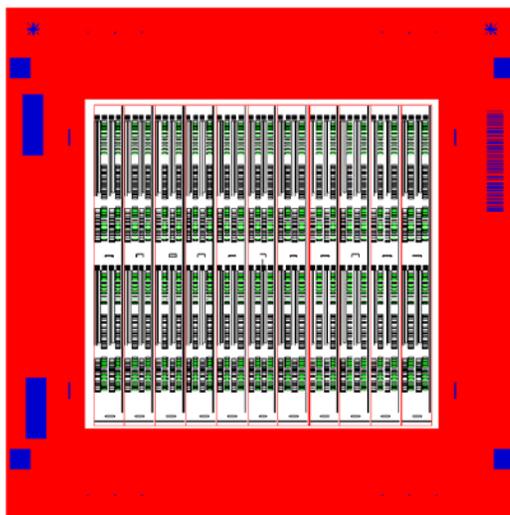
结束语

纳米加工技术

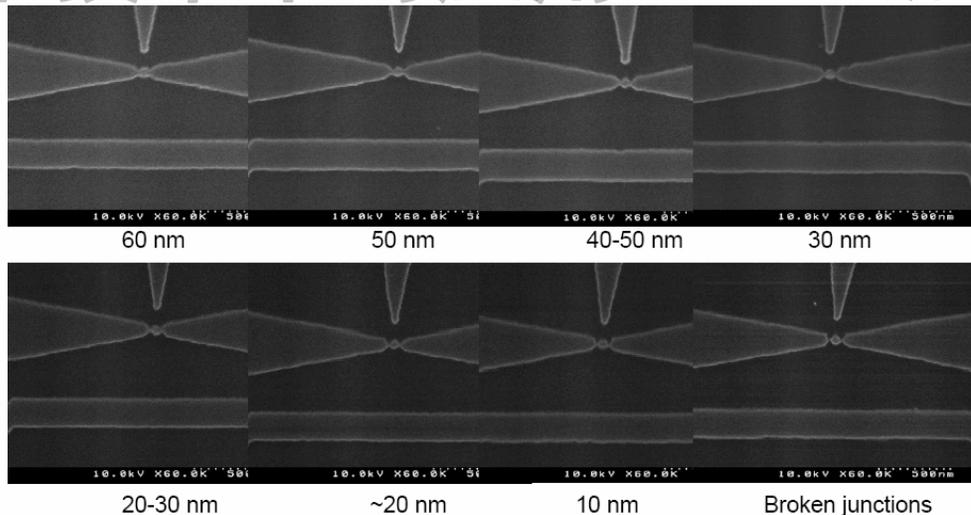
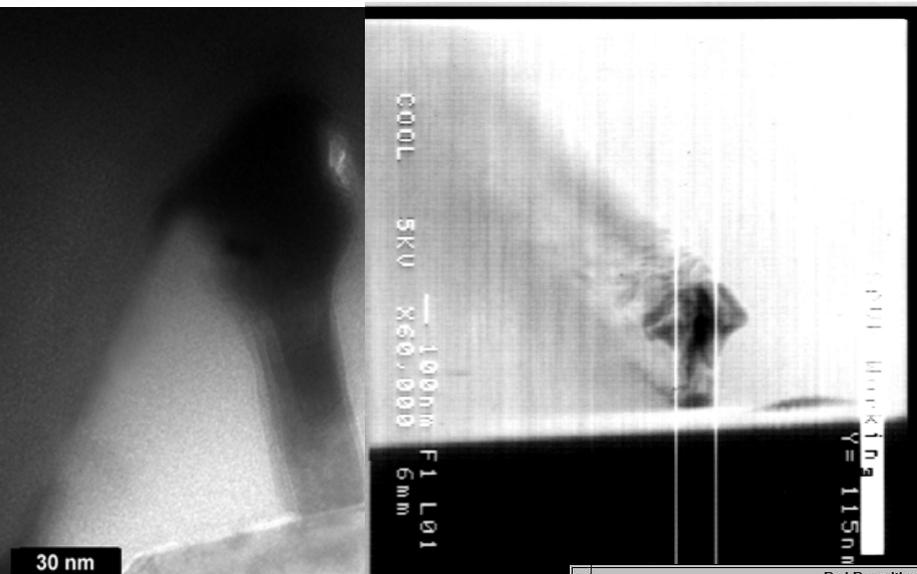
- ◆ Support more than 400 customers
- ◆ 12 national criterions on micro-lithography were issued from IMECAS



- ◆ Advanced optical mask and next generation mask-making;
- ◆ Nano-lithography: e-beam, x-ray, Nano-imprint;
- ◆ Resolution Enhance Technology : OPC, PSM, etc
- ◆ Join in national key project

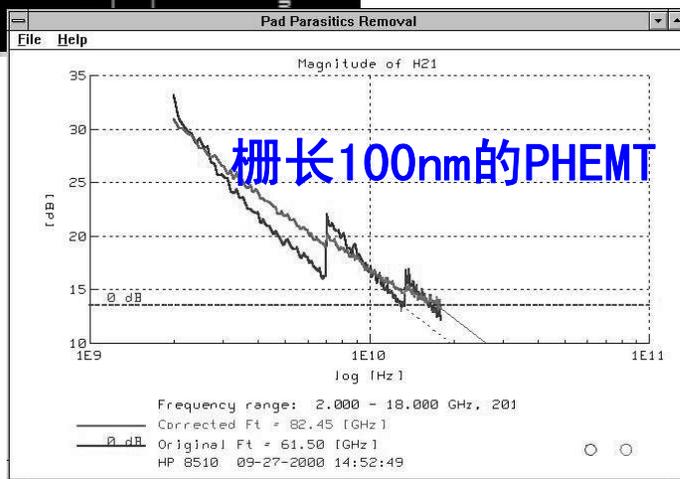
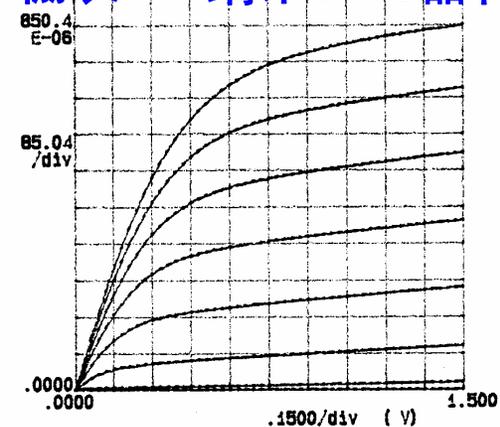


电子束曝光技术在纳米技术中的应用 (微电子所)

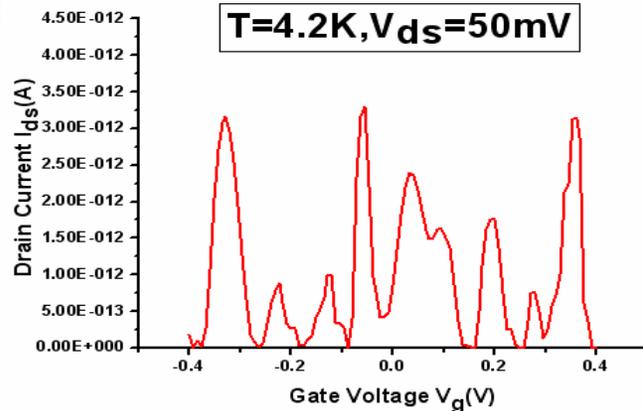


单电子器件

栅长27 纳米CMOS器件



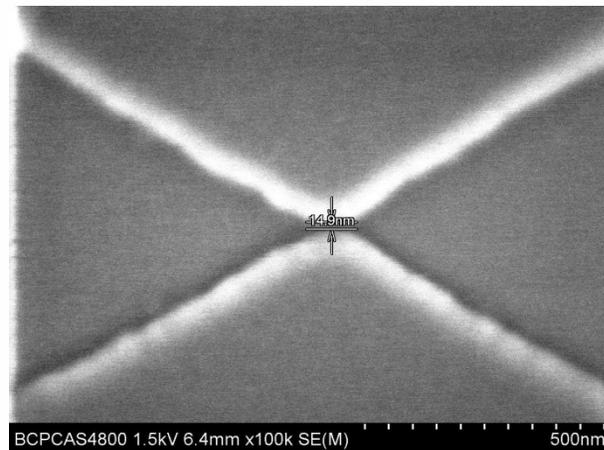
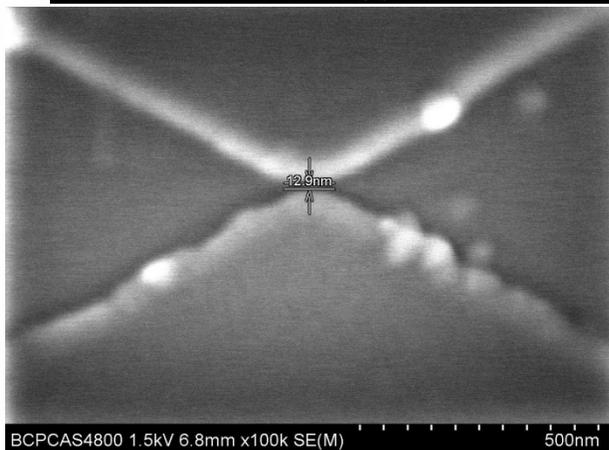
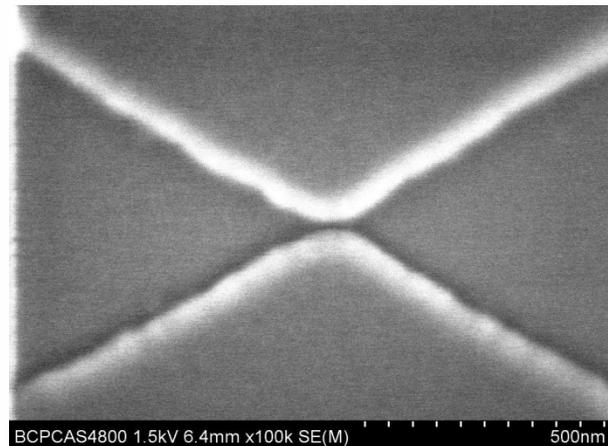
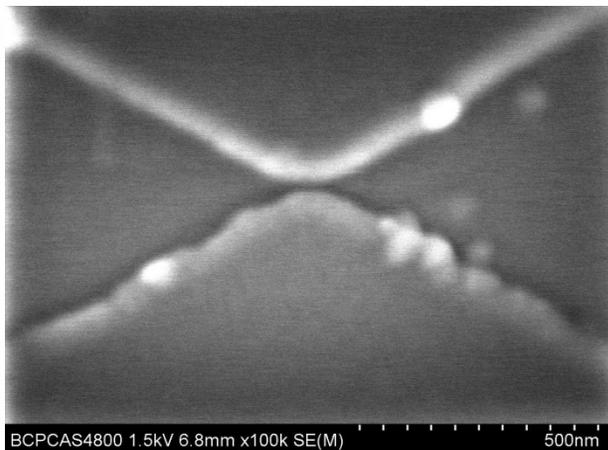
栅长100nm的PHEMT



$$C_g = 1.1 aF$$



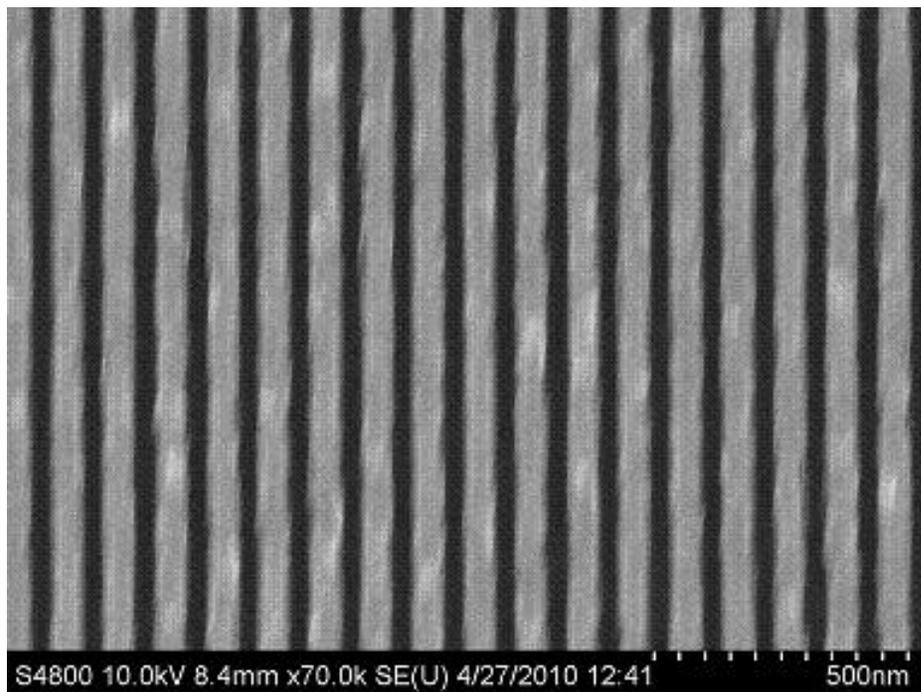
金电极对



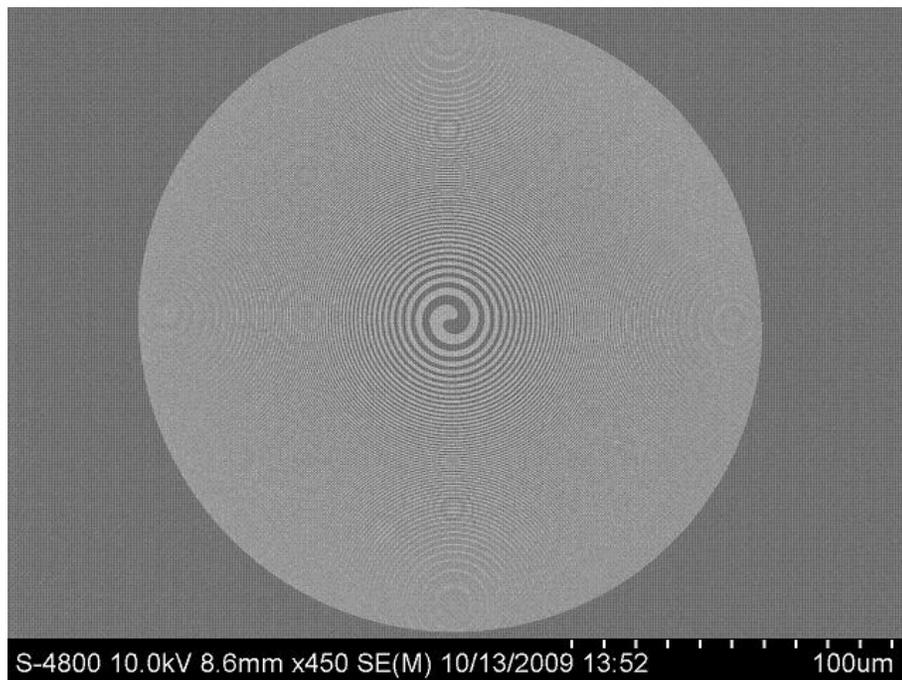
金电极对间距13nm、厚100nm
该结构应用于近场光学、纳米磁学等国际热点研究!



衍射光学元件



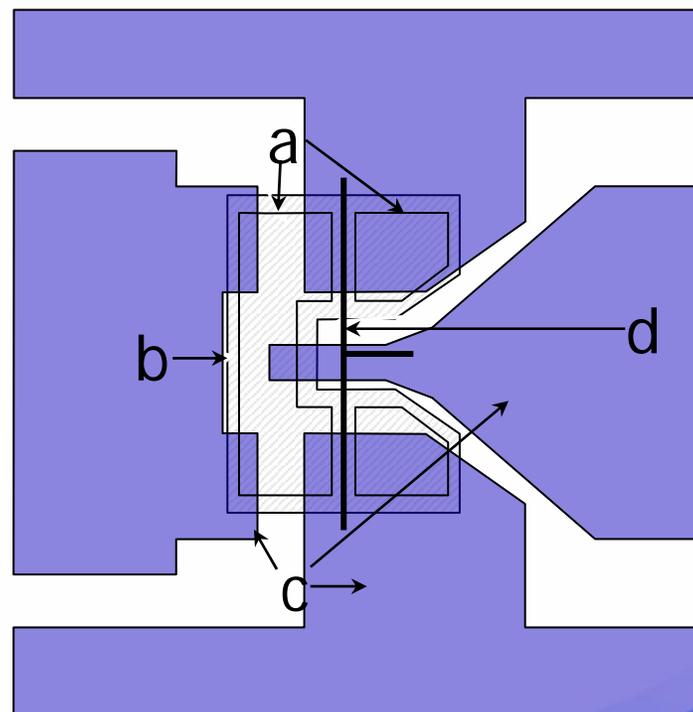
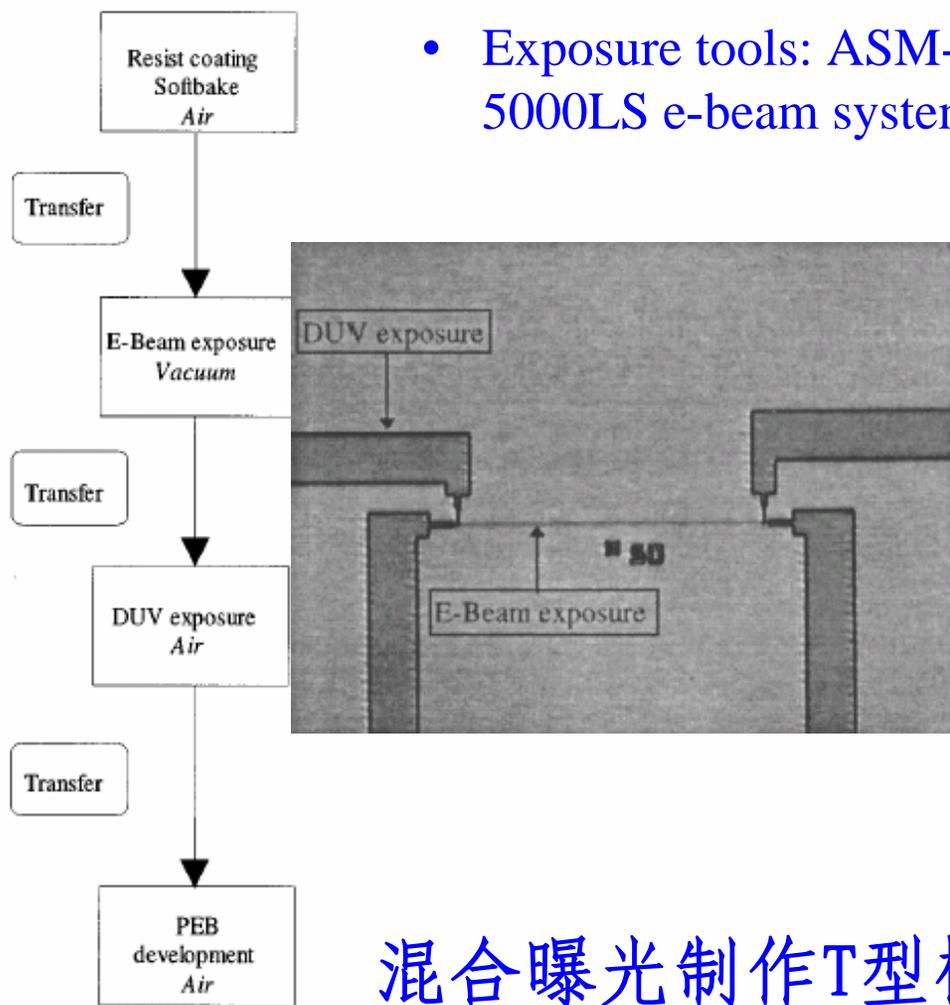
10000线/毫米，
2mmx2mm 大面积透射
光栅



200纳米螺旋波
带片

电子束和光学系统的混合曝光

- Exposure tools: ASM-L 5000/55 stepper and JBX-5000LS e-beam system at 50keV

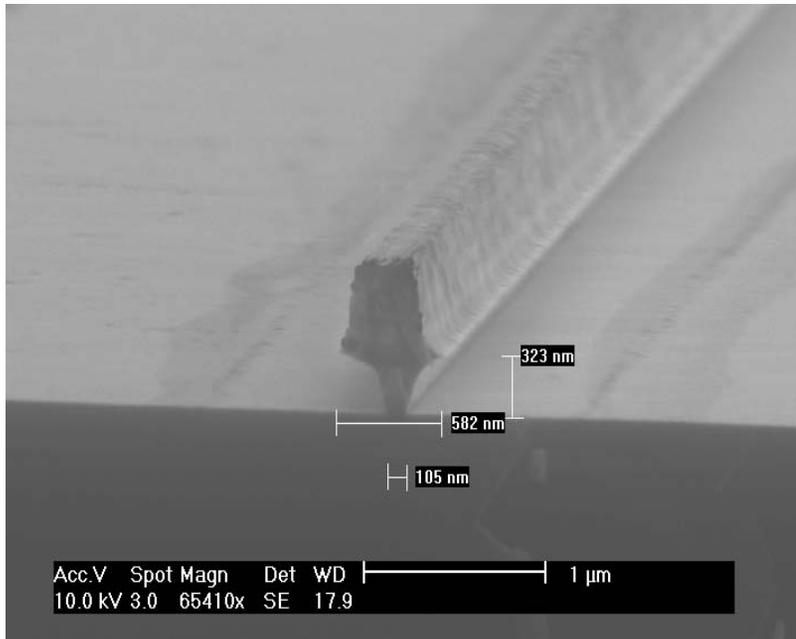


混合曝光制作T型栅步骤

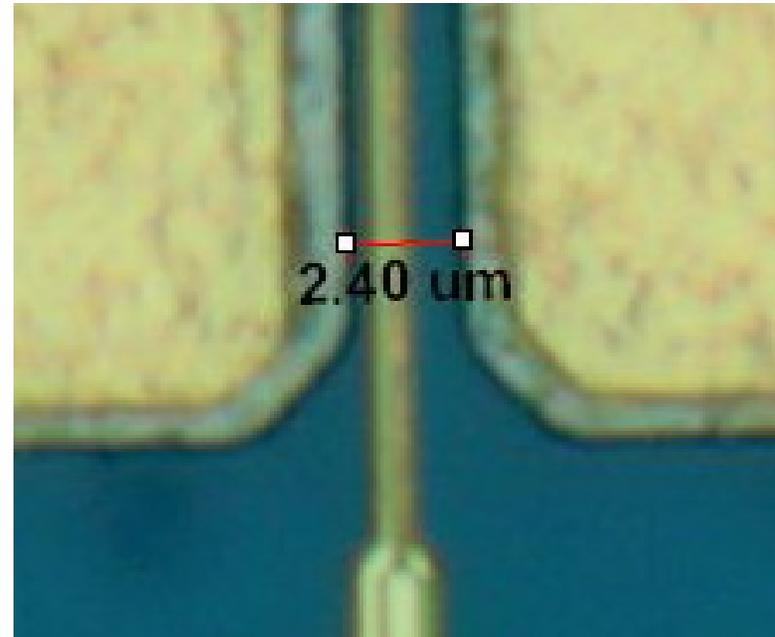
器件局部图



混合曝光制作T型栅



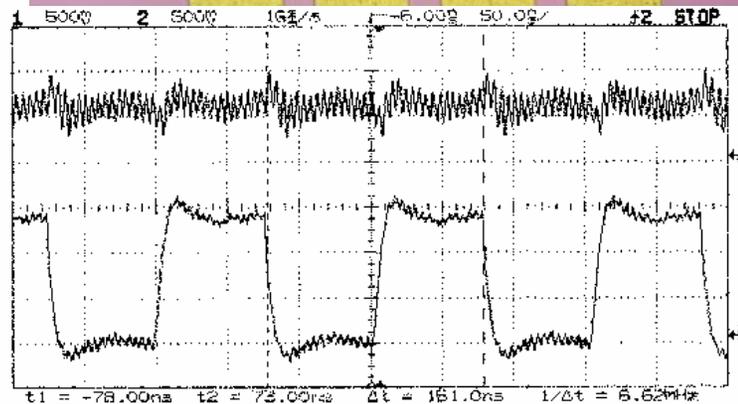
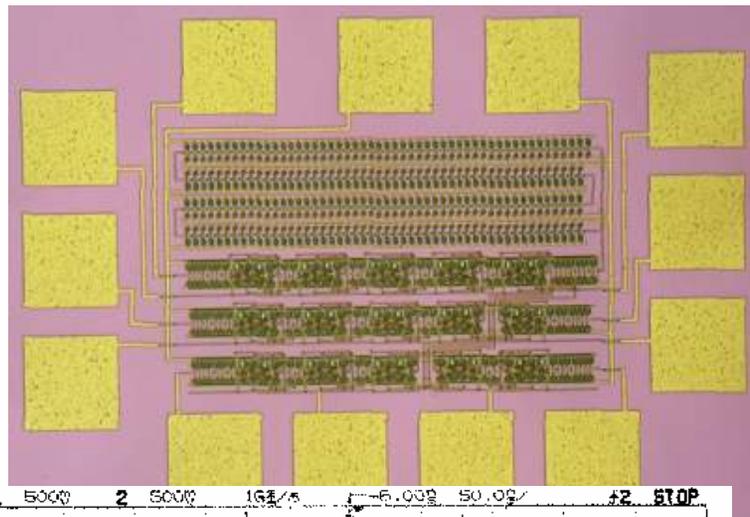
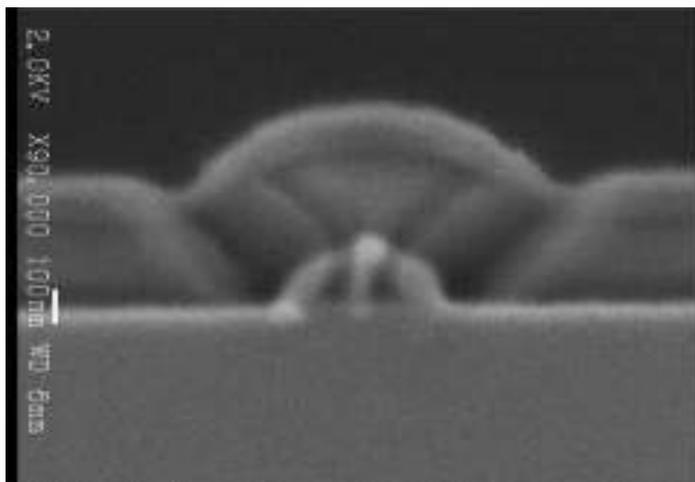
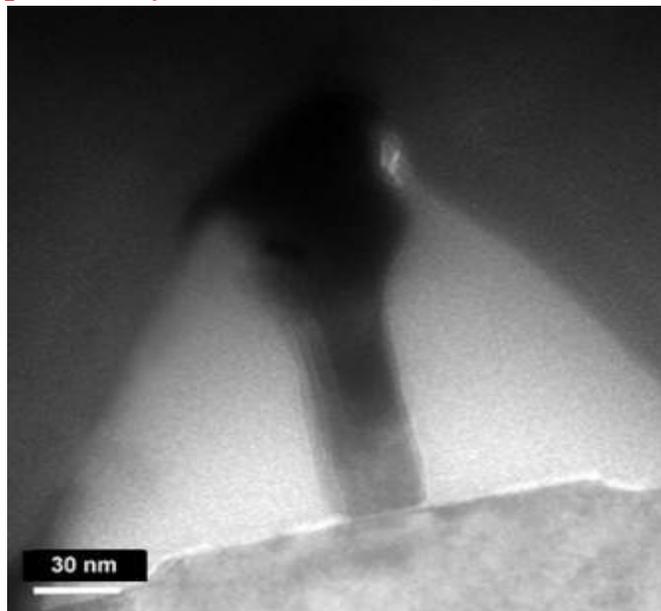
100nm T型栅



精确套刻应用于器件

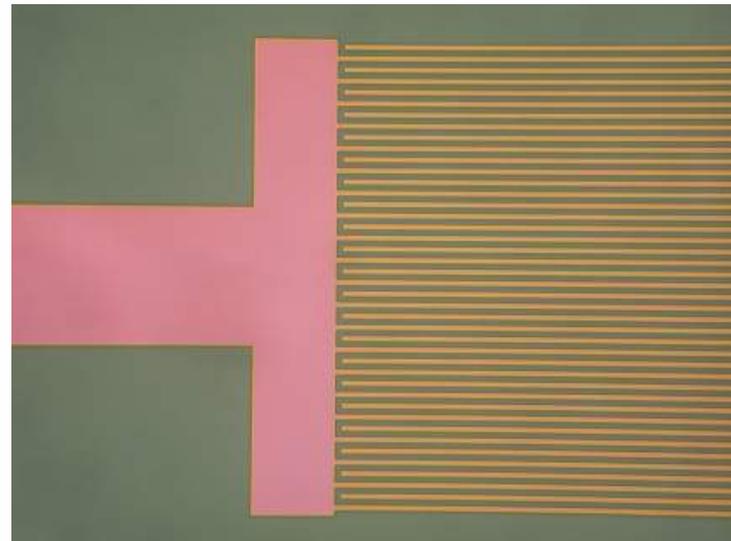
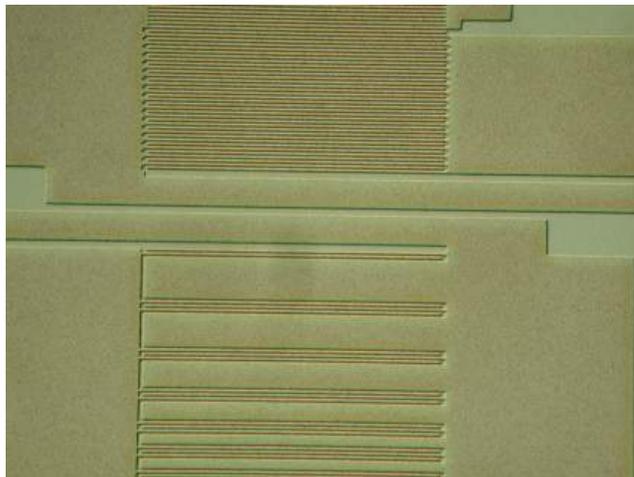
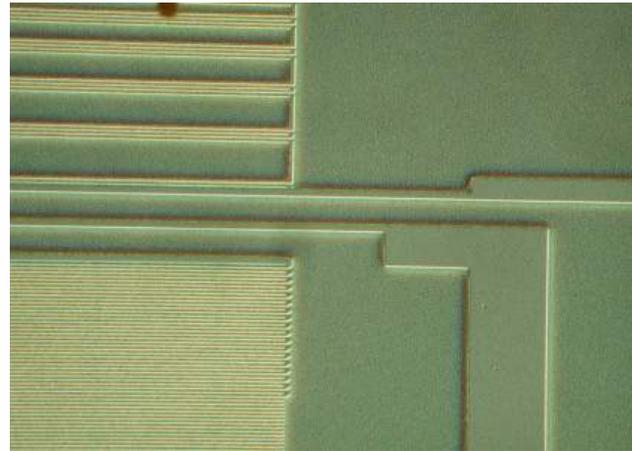
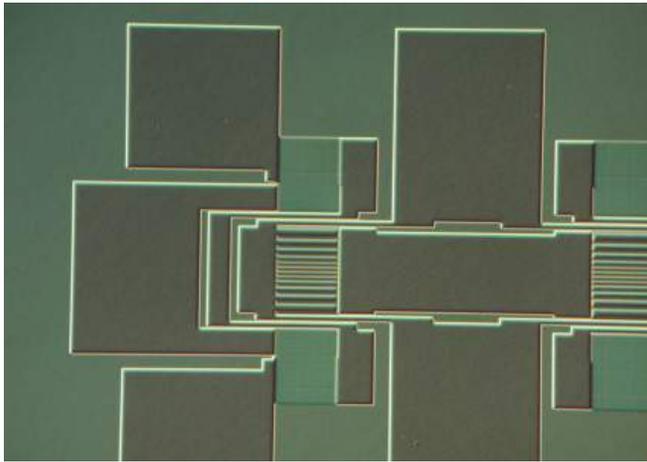


混合曝光制作的CMOS电路





混合曝光制作的声表面波器件





目录

前言

Top-down的纳米加工技术

纳米加工技术的应用

结束语

小结：

- ▶ 纳米加工技术的进步是集成电路遵循“摩尔定律”发展的支撑和保证, 纳米加工技术的进步极大程度上促进了纳米器件的发展;
- ▶ 电子束光刻技术是一种重要的实验室纳米加工技术手段, 其发展趋势是更高的加速电压, 更细的束斑、更快的直写速度;
- ▶ 微纳加工水平应用领域日趋广泛。



Q & A !