



微纳米加工技术与量子器件

中国科学院半导体研究所
杨富华
82305100
fhyang@red.semi.ac.cn

简要介绍国际半导体光电器件中的纳米技术应用，重点介绍半导体研究所的电子束曝光、干法刻蚀和薄膜淀积等纳米加工技术，以及他们在纳电子器件、光子晶体、光波导、光开关、LD、LED等器件中的应用。量子器件主要介绍高电子迁移率晶体管（HEMT），共振隧穿二极管（RTD），单电子晶体管和单光子发射器件。

20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

1



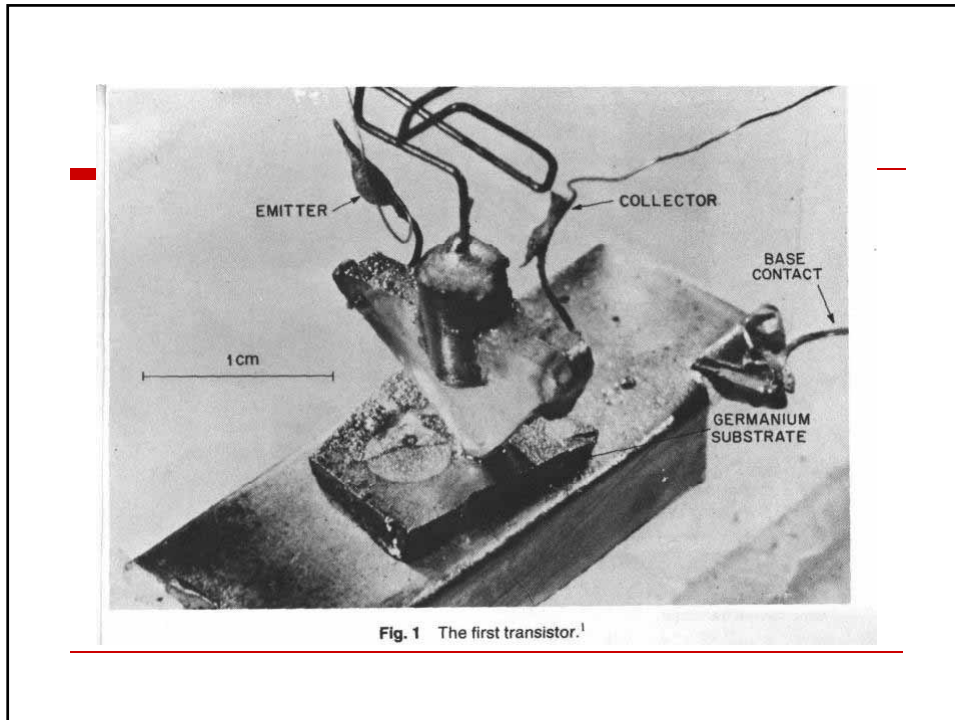
纳米加工技术 在半导体物理研究中的应用

- 1、引言 纳米技术在固态器件中的应用
- 2、半导体研究所的纳米技术及应用
- 3、纳米技术在半导体研究中的应用
- 4、结语

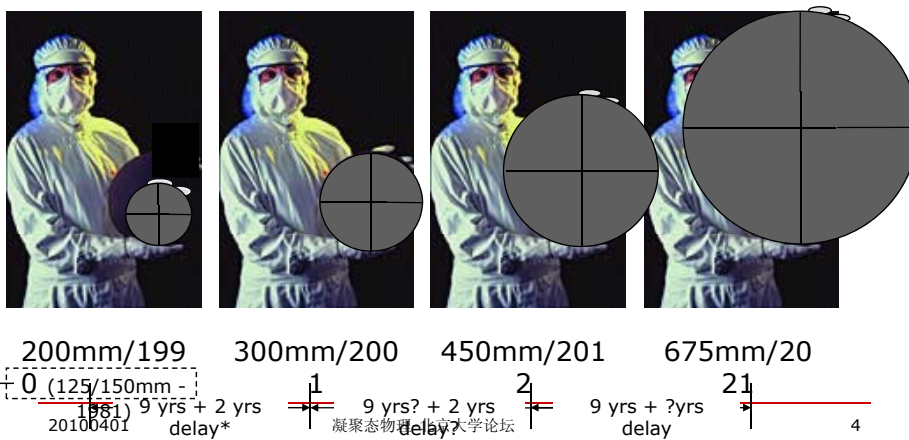
20100401

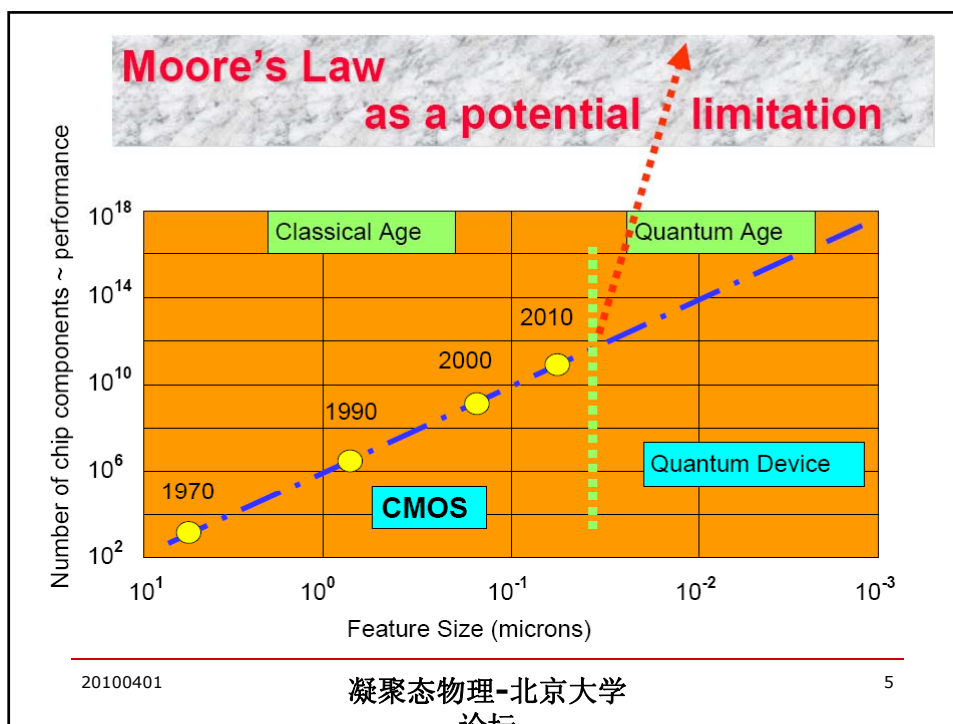
凝聚态物理-北京大学论坛

2

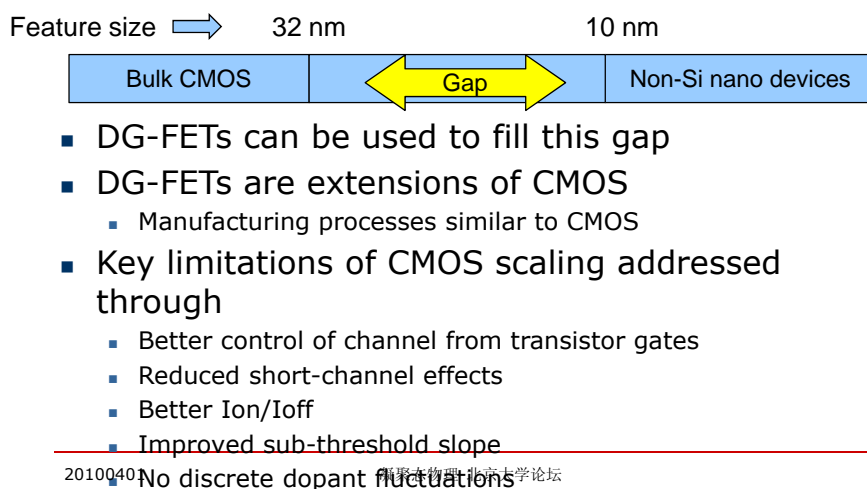


When do we start planning for next wafer size transition?





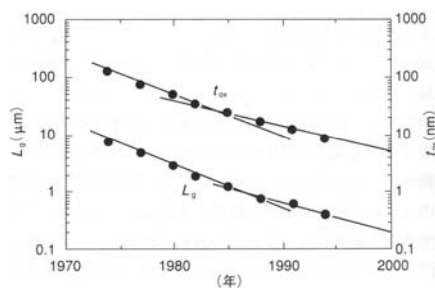
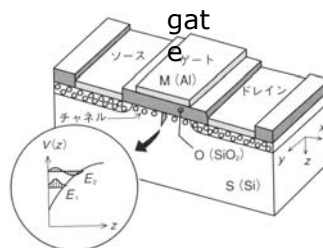
Why Double-gate Transistors?



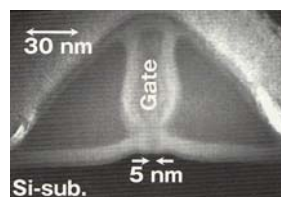
Scaling Down of MOSFETS

Gate length L_g (10 to Sub 100nm)
Oxide thickness t_{ox} (200 to 2nm)

Lowered Voltage, Power & Cost
Raised Speed & Integration Level



Smallest MOS ($L_g=5\text{nm}$)(NEC)



Short Channel Effects
to Be Controlled

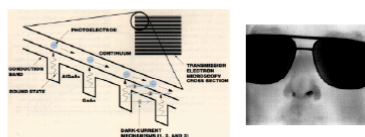
20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

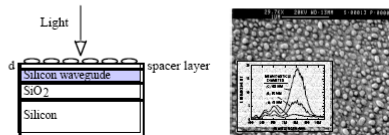
IR Sensors and Sources

- **Advanced Photodetectors**
 - **Quantum Well Infrared Photodetectors**
 - Use electronic band engineering and nanofabrication techniques
 - Multispectral IR imaging
 - **Uncooled Infrared Detectors**
 - Uses nanofabrication and advanced materials
 - **Nanoparticle-Enhanced Detection**
 - Increase light detection by 20X
- **Quantum Cascade Lasers**
 - **IR Lasers for Target Designation and Countermeasures**
 - Objective: Compact, pulsed, high power 300K IR lasers
 - **IR Lasers for Agent Detection**
 - Objective: Tunable or multi-wavelength, single mode IR lasers

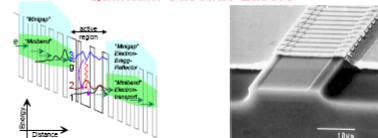
Quantum Well Infrared Photodetectors



Nanoparticle Enhanced Detection



Quantum Cascade Lasers



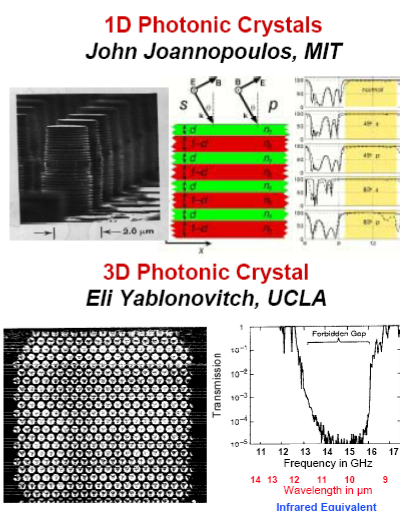
20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

8

Photonic Crystals

- **Photonic Crystals**
 - “Designer Mirrors”
 - Periodic arrangement of dielectrics and/or metals
 - Reflect radiation
 - Over band of frequencies
 - Transparent otherwise
- **Types**
 - **1 D Photonic Crystals**
 - “Quarter wave stacks”
 - New omnidirectional reflectors
 - Omniguide
 - **2 D Photonic Crystals**
 - Used in nanolasers, optical fiber
 - **3 D Photonic Crystals**
 - Reflect radiation
 - From all directions
 - From all polarizations



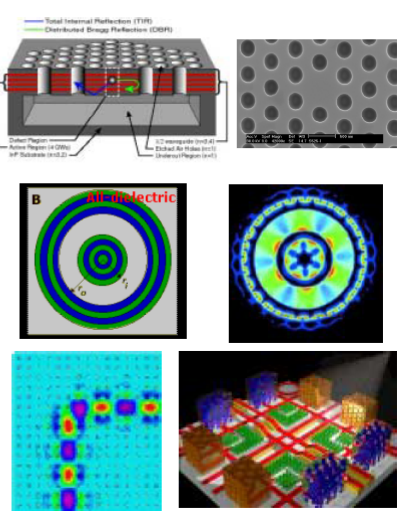
20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

9

Photonics

- **Lasers**
 - Smallest possible laser cavity
 - Thin, 2D photonic crystal
 - Low Threshold
- **Light Emitting Diodes**
 - Improved emission efficiency
 - Improved collimation
- **Waveguide**
 - Omniguide fiber and coax
 - Photonic crystal fiber
- **Integrated Photonics**
 - Optical routing, filtering, and processing on a chip
- **Laser Eye/Sensor Protection**
 - Enhanced nonlinearities for optical limiting

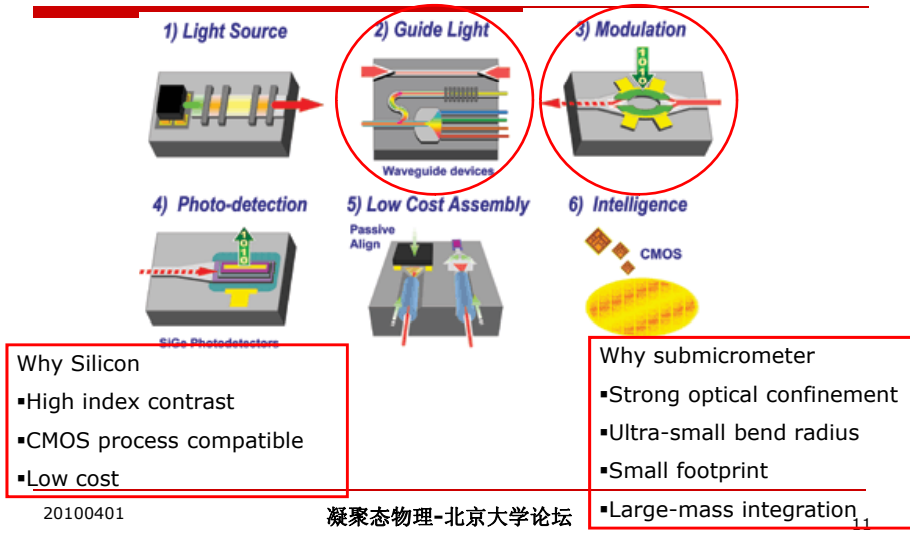


20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

10

Key Devices in Silicon PICs



Optical nano-circuits and nano-devices

“Optical nano-circuits and nano-devices can play a very important role in the future of science and technology,”

one will be able to achieve remarkable miniaturization. By using optics in nano-circuits and nano-devices, instead of conventional electronics, one would be able to **increase the bandwidth of operation**, which in turn would **provide a higher data rate and significantly larger data storage.**”

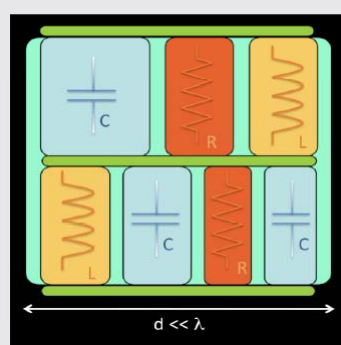
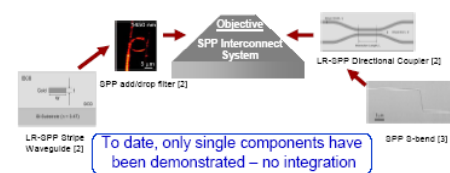
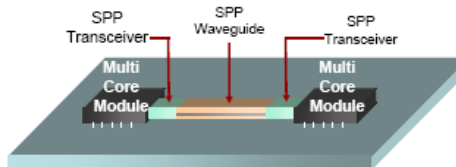


Figure 1: An example of optical nanocircuit. Several nanostructures arranged next to each other at the nanoscale could become the present electronic circuits, allowing to rescale down radio-frequencies concepts such as the one of resistance (R), capacitance (C) and inductance (L).

Surface Plasma Polariton

Interconnect Research Direction and Goals:

- Plasmonic research is in its infancy. A specific application is for use in chip-to-chip interconnects, however it also has promise for companion technologies such as metamaterials (negative indices of refraction for super-resolution in the optical regime).
- Research goals are to demonstrate chip to chip data transfer and develop components necessary to a fully functional SPP interconnect system.



To date, only single components have been demonstrated – no integration

20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

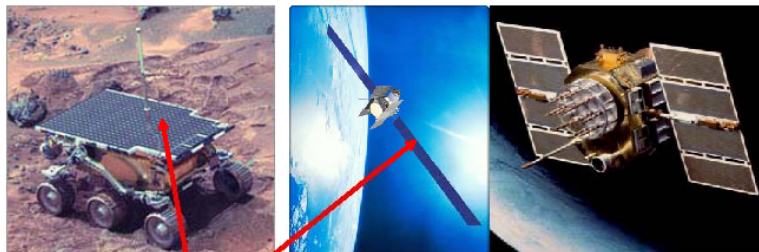
13



A New Solar Cell Technology

Scientists were working very hard to introduce “multi-junction” solar cells into the domain of solar energy, building on the “dual-junction” technology that was developed by the DOE.

应用纳米技术增加光的吸收





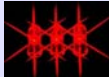

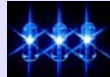








High-efficiency solar cells made of III-V materials used to power spacecrafts


20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

14

半导体照明应用-应用纳米技术增加光效

Chip & Lamp	     	
	Present 2005-2006 2007-2010	
Module & System	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Back light</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>LCD TV BL</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Automotive</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>White LED Lamp</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  <p>Traffic signal</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Display/Sign</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Architectural Illumination</p> </div> </div>	
20100401	凝聚态物理-北京大学论坛	15

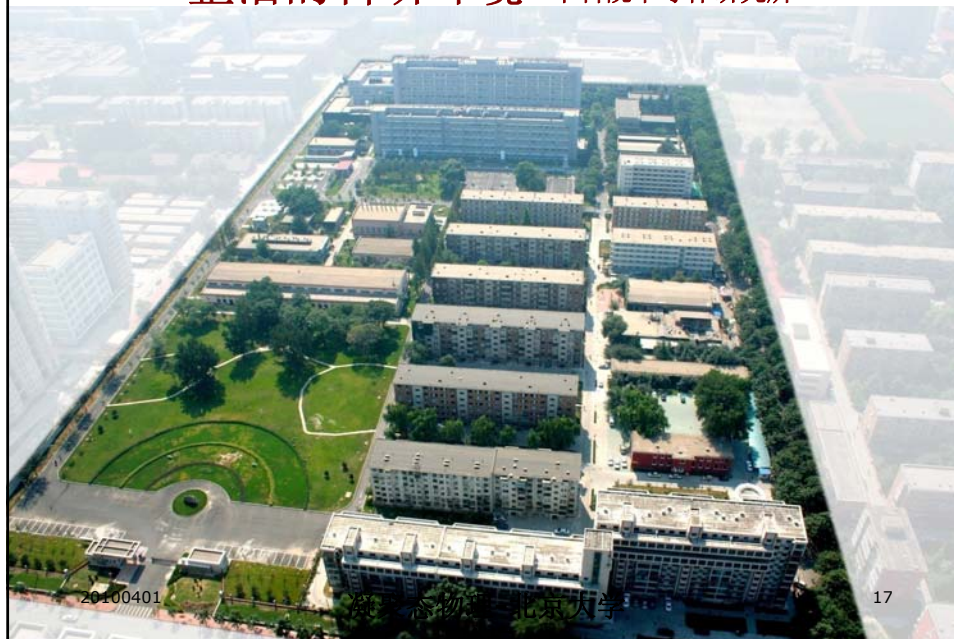


微纳米加工技术与量子器件

- 1、引言 纳米技术在固态器件中的应用
- 2、半导体研究所的纳米技术及应用
- 3、纳米技术在半导体研究中的应用
- 4、结语

20100401
凝聚态物理-北京大学论坛
16

整洁的科研环境—中科院半导体研究所



半导体集成技术工程研究中心

投资**1.2亿元**。**3000多万元**进行基建改造，**1700平方米**的超净工艺环境和**1100平方米**的办公和测试用房。**8000多万元**引进关键工艺设备以及基本配套设施（包括微电子研发工艺、光电子、微纳电子集成技术），**2004年底**投入使用

平台建设



工艺设备

MA6光刻机、甩胶机、自动显影机、等离子去胶机、电子束光刻设备、III-V族感应耦合等离子体干法刻蚀、Si感应耦合等离子体干法刻蚀、SiO₂感应耦合等离子体干法刻蚀、PECVD沉积系统、离子束溅射镀膜系统、电子束蒸发系统、晶片清洗系统、键合系统、磁控溅射系统等



20100401

凝聚态物理-北京大学
论坛

19

测试分析设备

XRD、SEM、台阶仪、显微镜、椭偏仪、分光光度计、棱镜耦合测试、LED特性测试等

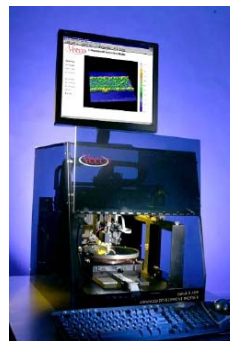
SEM (新购)



HR-XRD (新购)



台阶仪 (新购)



20100401

凝聚态物理-北京大学
论坛

20

光子学微纳加工技术

重要技术支撑

20100401
凝聚态物理-北京大学论坛
23

平台已实现的作用和效果

前沿基础研究

单光子的探测与发射

人才培养

每年举办半导体技术讲座，培养研究生人数已超过200名。

孵化新的研发中心

前沿应用基础研究

20100401

半导体集成技术
研发平台

社会效益

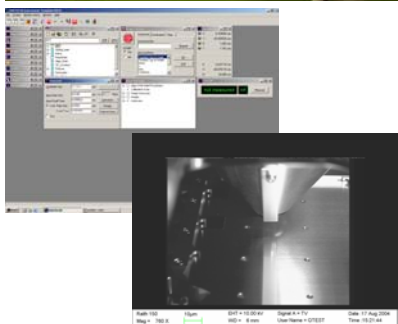
为院内13个研究所和19所高校，超过20家公司提供多项特殊工艺加工。

人才培养和国内外学术交流的基地。

关键技术（如GaN LED和LD，太阳能电池等）

凝聚态物理-北京大学论坛

Raith150电子束光刻设备



主要用途

- 图形直写：亚微米($<0.5\mu\text{m}$)
- 晶片支架：6寸片以下
- 微结构纳米光刻：超高分辨 (10-20nm)
晶体管、单电子器件、微机械、光子晶体等
- 集成光学器件：光栅，弯曲波导
- 小尺寸的光刻板，如 $10\times 10\text{ mm}^2$
- SEM 观察：可对应版图寻找观察位置

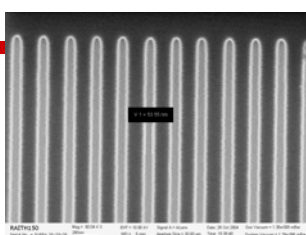
主要特征

- 电子枪：高分辨率的热场发射源 (尺寸：20nm)
- 束能量可调：200eV-30keV
- 水平控制：三点压电接触(自动)
6寸激光干涉平台(手动)
- 写场可调： $0.5\mu\text{m}-1000\mu\text{m}$
- 图形快速生成：10MHz 描写速度
- 双PC机控制系统：光刻控制与SEM测量
- 图形编辑：GDSII格式，剂量可调

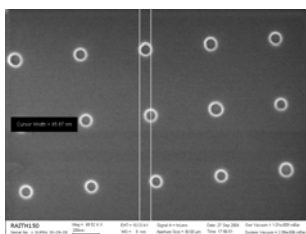
25

电子束光刻的工艺结果

PMMA厚度:100nm

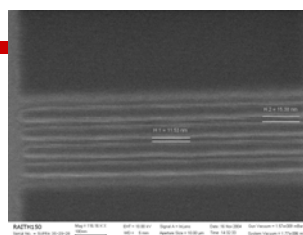


线宽: 53.5nm

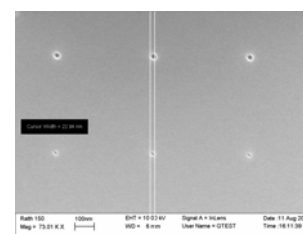


圆直径: 85.6nm

PMMA厚度: 50nm



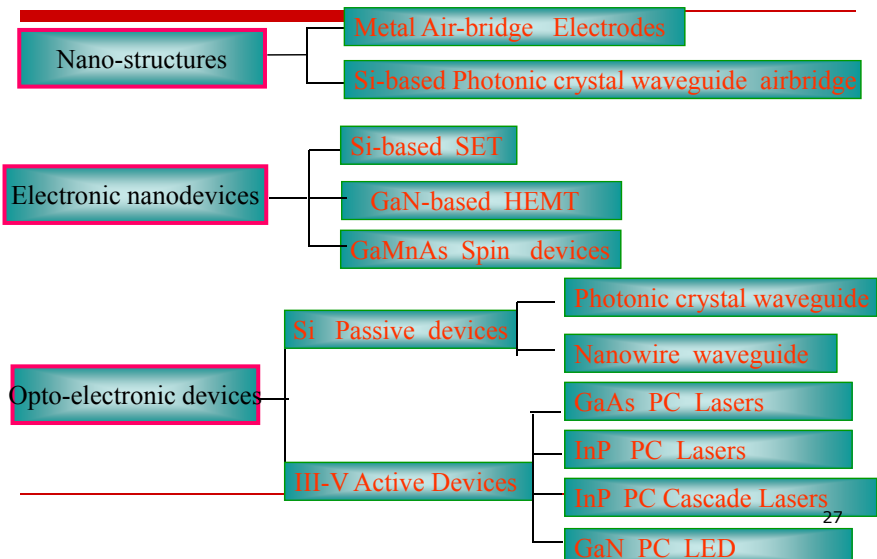
线宽: 11.5nm



圆直径: 22.4nm

26

Nano-technology Applications in IOS



深紫外MA6双面对准光刻机




SUSS MA6

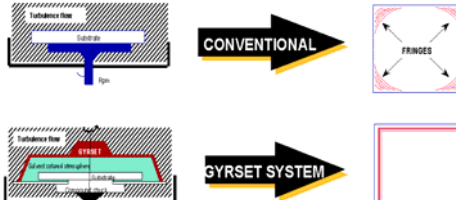
SUSS匀胶机

特点: 1. 盖式载片台 2. 减薄厚胶边装置 3. 均匀性小于3%

匀胶机

对比三家公司，
唯有SUSS公司有
载片旋转台加盖
一体化专利技术——提高匀胶
均匀性

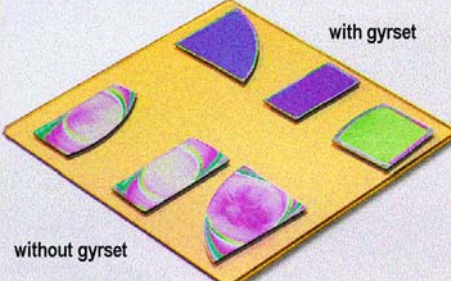




CONVENTIONAL → FRINGES

GYRSET SYSTEM →

GYRSET IMPROVES COATING



with gyrset

without gyrset


Microwave Plasma Batch System 300

Damage-free Resist Ashing and Wafer Cleaning for Semiconductor and Microelectronics Manufacturing

- Easy Resist Removal following High dose Implant or Dry Etching
- Lowest Cost-of-Ownership of all Asher Technologies
- High Productivity, Simple Operation
- 200 mm Wafer Capability
- Minimum footprint, Flushmount Cabinet
- Microprocessor Controller

Applications:

- Removal of photoresist after implant or dry etching
- Wafer and substrate cleaning
- Suitable for various substrate technologies, like silicon, III/V-compounds, quartz, ceramic, lithium niobate etc.



TePla 30

Oxford ICP (III-V族)

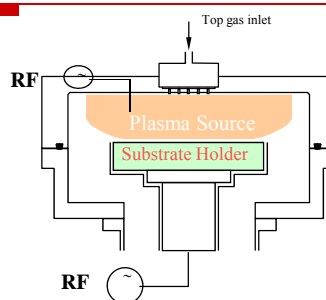
- ICP(Inductively Coupled Plasma)即电感耦合等离子体刻蚀是微细加工技术的重要组成部分。
- ICP在集成光学、光电子学、微机械系统(MEMS)、光子晶体等领域都有广泛应用。是制作许多重要器件的关键步骤，如：白光LED、GaN基激光器、探测器等。



Oxford ICP (III-V族)设备外观

Oxford ICP (III-V族)

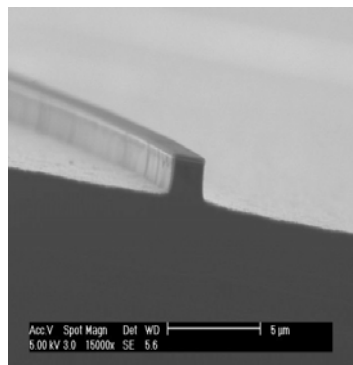
- 工作原理：分为化学和物理作用。
- 具有两套独立的射频电源。
- 第一套射频电源通过电感耦合使刻蚀气体辉光放电，产生高密度的等离子体。利用化学作用进行刻蚀。
- 第二套射频电源使气体离子做定向运动，通过物理轰击样品进行刻蚀。



ICP设备结构示意图

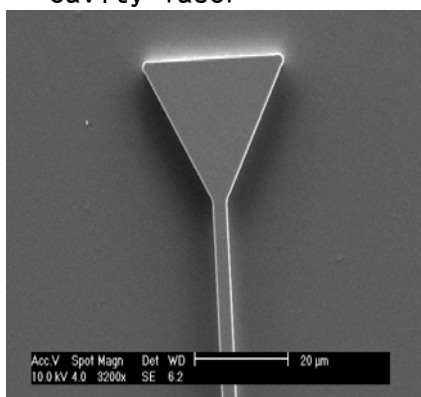
Oxford ICP (III-V族)

- 使用Cl₂、BCl₃、CH₄等工艺气体，可以刻蚀GaN、AlGa_n、GaAs、InP、InGaAs、InGaP/AlGaInP、InGaAs/InGaAsP等材料。
- 陡直度>85 deg, 均匀性<+/-5%。

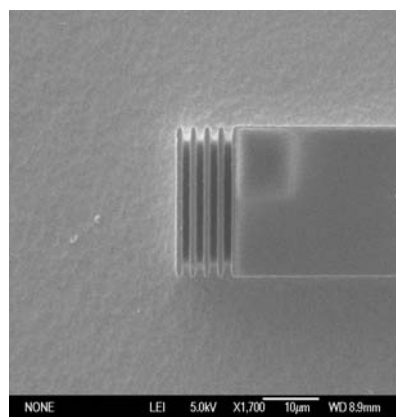


InP刻蚀后SEM扫描电镜照片

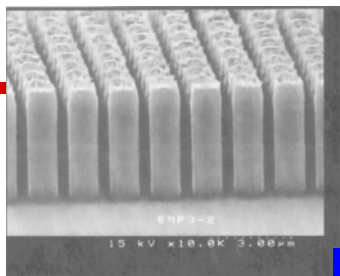
InP based triangle cavity laser



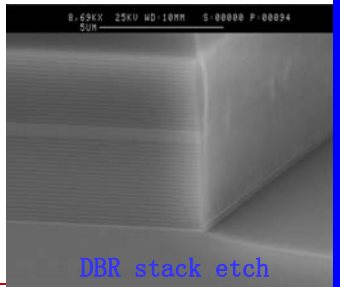
InP/InGaAsP光栅



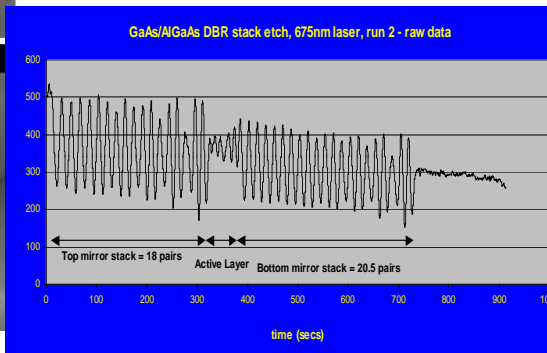
ICP GaAs/AlGaAs etch



GaAs e/r > 0.3 $\mu\text{m}/\text{min}$
Sel to Oxide >10:1, Sel to resist > 5:1
 Sel GaAs:AlGaAs 1:1
 Anisotropic profile, Smooth sidewalls
 Clean etch surface
 Laser interferometry to monitor depth



DBR stack etch



ICP AlGaN/GaN etch



GaN e/r > 0.6 $\mu\text{m}/\text{min}$
 Sel to Oxide >7:1
 Anisotropic profile
 Smooth sidewalls
 Clean etch surface

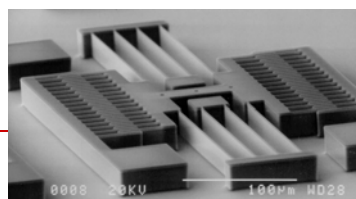
 System100 with ICP180 source

Alcatel 601E刻蚀设备



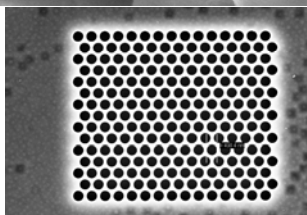
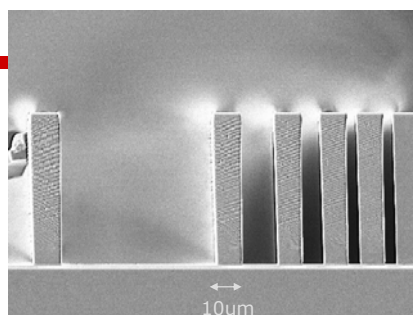
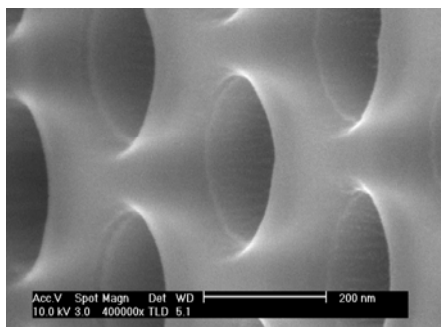
- 主要用于刻蚀硅、锗硅和SOI材料。可以在高刻蚀速率 ($>18 \mu\text{m}/\text{min}$) 下获得陡直的侧壁。
- 多用于MEMS和MOEMS器件的制作,还可以用于硅基光波导、光子晶体器件以及微电子器件的制作。

加速度计



SOI光子晶体

生物、医学、化学、微流体应用

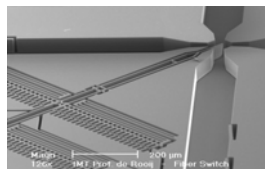


带Ge量子点的SOI光子晶体

SiO₂深刻蚀 AOE - ICP



Actuator, Grooves, Mirror

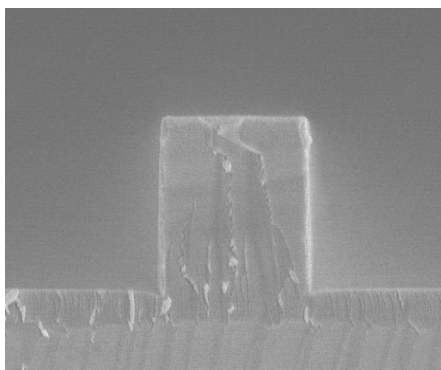


特点:

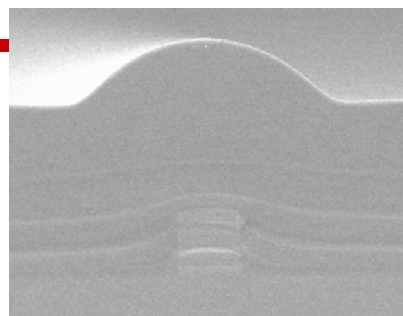
- 1、平面螺旋线圈
- 2、Multipolar Magnetic Confinement, 减小聚合物的再淀积、高均匀性
- 3、大功率、高速、高选择比

应用:

- 1、AWG波分复用-解复用器及其集成
- 2、Si 基光波导开关及其阵列
- 3、MOEMS
- 4、基于Si 基光波导平台器件的光电集成
- 5、可变光衰减器、光梳状滤波器



- AWG的芯层（掺Ge的SiO₂）刻蚀形貌。台高6µm



- 6µm的台阶上淀积16µm的BPSG

离子束溅射系统 OPTOFAB3000



Multi-layer interference filters

特点:

- 致密性好
- 低应力
- 附着性好
- 均匀性高

应用:

- 1) 高质量多层薄膜沉积
- 2) 单元或集成光电子器件
- 3) 前沿性探索研究

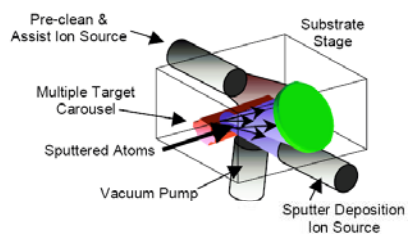
离子束溅射纳米多层膜及其应用

Optofab3000型离子束溅射系统 (IBSD) 技术特点

- > 离子束能量: 约几十至1千电子伏
- > 被溅射出的原子带有10-20eV的能量, 比蒸发高约100倍, 薄膜的粘附性及致密度显著提高
- > 靶材的表面原子逐层被碰撞出来, 薄膜以原子层级生长, 均匀性好

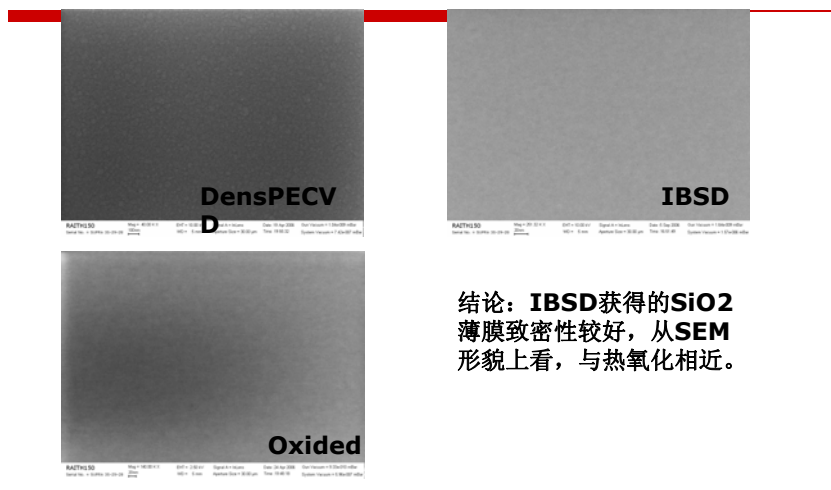
Material	Deposition rate
SiO ₂	2.5 Å/sec
TiO ₂	3.1 Å/sec
Ta ₂ O ₅	5.5 Å/sec
Al ₂ O ₃	2.5 Å/sec
ZrO ₂	3.1 Å/sec

Ion Beam Sputter Deposition System (with ion beam assisted deposition capability)



离子束溅射纳米多层膜及其应用

不同方法SiO₂成膜质量比较:



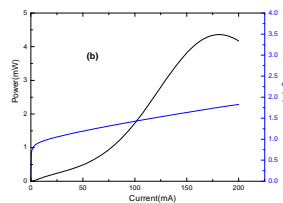
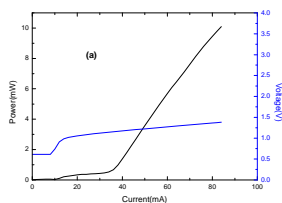
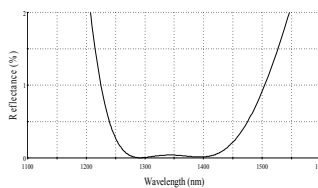
离子束溅射纳米多层膜及其应用

InGaAsP 1.3μm F-P 激光器腔面增透膜

AR膜系设计与理论反射率

Material	Refractive Index	Thickness(nm)
1 SiO ₂	1.44402	207.22
2 Ta ₂ O ₅	2.10000	307.58
3 SiO ₂	1.44402	195.28
4 Ta ₂ O ₅	2.10000	198.25

Substrate InGaAsP SOA 3.2526



典型激光器P-I-V曲线比较 (a)镀膜前 (b)镀膜后

结论: 利用薄膜的光学特性, 能有效控制激光器的激射与超辐射状态

离子束溅射纳米多层膜及其应用

SiO₂/Ta₂O₅系高反射膜对长波长GaInNAs/GaAs RWG 激光器的性能改善

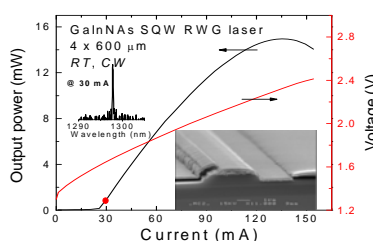


Fig. 1. RWG laser without coating

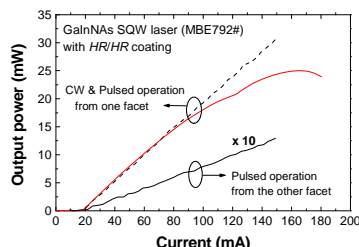


Fig. 2. RWG laser with coating

MBE792#	J_{th} (A/cm ²)	η_d	I @ thermal rollover
Without HR coating	25	0.19	130 mA
With HR coating	18-19	0.23	160 mA

结论: 与不镀膜相比, 阈值电流降低, 量子效率提高

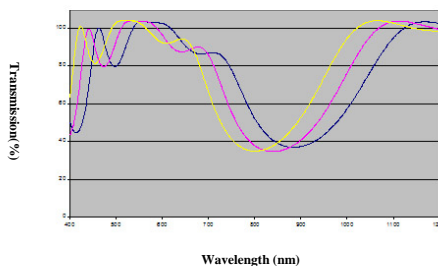
离子束溅射纳米多层膜及其应用

应用于大功率固态激光器的双波长增透膜

膜系

0.48H/0.80L/
1.16H/1.89L/
2.11H/1.70L/
2.21H/0.51L

(HL) = $\lambda/4$
Ta₂O₅/SiO₂
 $\lambda = 532\text{nm}$



从左到右各曲线的透射率:

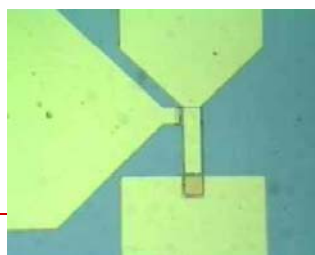
532nm 1064nm

Run 1	93.3%	78.10%
Run 2	99.8%	94.7%
Run 3	99.49%	99.40%

结论: 随工艺的不断优化, 完全能得到满足固态激光器研发需要的结果

电子束蒸发的应用

- 1、蒸镀金属材料
- a.制作电子学和光子学器件的电极；
- b.可以完成三明治结构或更复杂结电极的蒸镀。
- 2、蒸镀非金属材料
- 多用于蒸镀光学薄膜，如太阳镜上反光膜，眼镜上的透光膜等等。

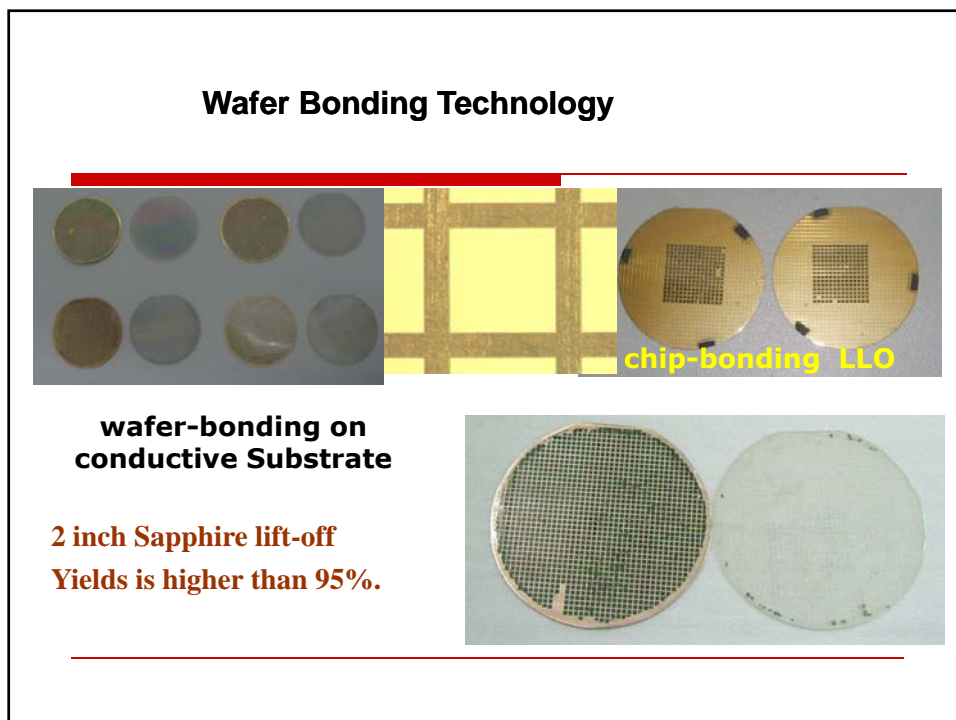
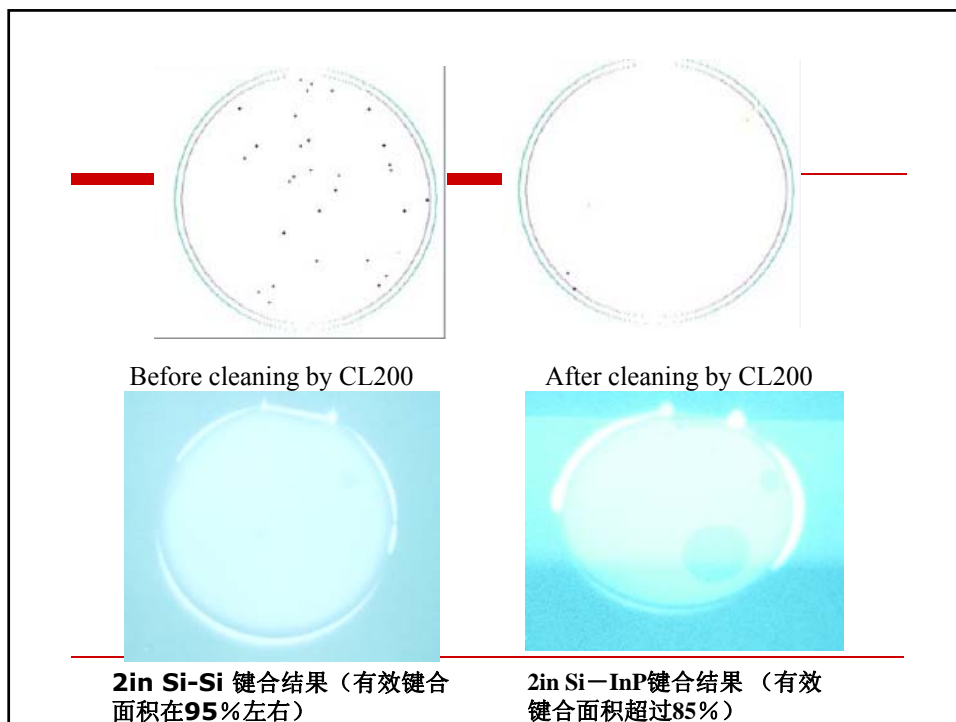


CL200 晶片清洗机



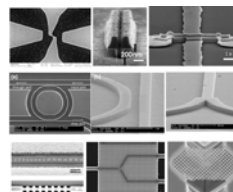
SB6晶片键合机





纳米加工技术在光电器件中的应用

- 纳米加工关键技术
- 纳米电子学器件
- 纳米光波导器件
- 光子晶体器件



20100401

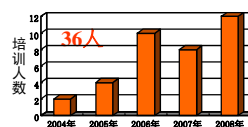
凝聚态物理-北京大学论坛

51

纳米加工与运行模式



1. 培训一批独立使用设备的所内外用户。



2. 用户通过网上预约，实现了设备全天候运转。



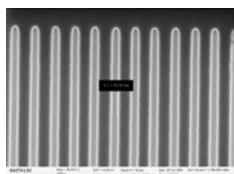
20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

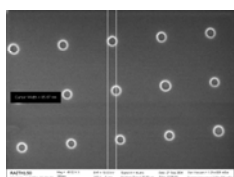
52

关键技术1：高分辨率曝光的纳米图形

验收曝光分辨率



线条宽度: 53.5nm



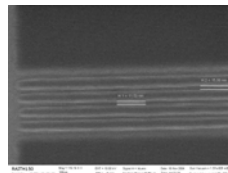
圆孔半径: 42.8nm



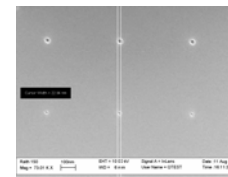
优化曝光参数

- 甩胶厚度 (50nm)
- 束流电压 (20keV)
- 光阑孔径 (7.5um)
- 束斑聚焦
- 曝光剂量
- 显影时间

极限曝光分辨率



线条宽度: 10.5nm



圆孔半径: 11.2nm

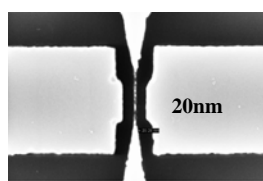
20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

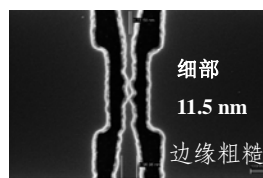
53

关键技术2：硅纳米线和库仑岛图形

ICP刻蚀



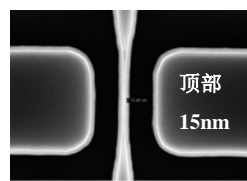
20nm



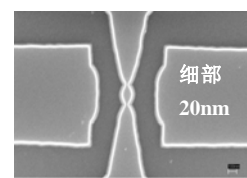
细部
11.5 nm

边缘粗糙

化学腐蚀



顶部
15nm



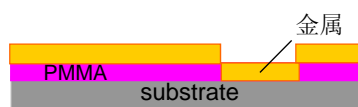
细部
20nm

20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

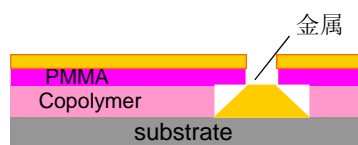
54

关键技术3：纳米光滑金属电极的制作



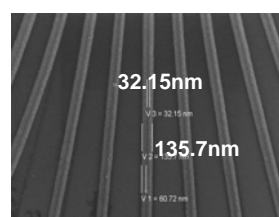
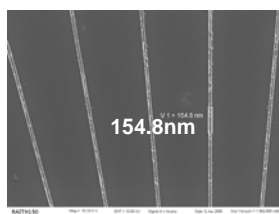
单层胶剥离工艺

金属电极与胶连接：边缘粗糙、易断



不同感光度的双层胶剥离工艺

金属电极表面与胶分离：光滑、均匀

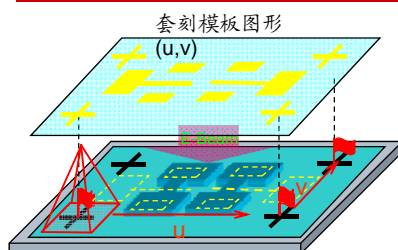


20100401

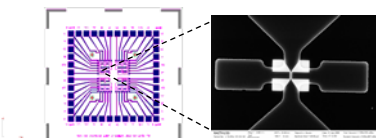
凝聚态物理-北京大学论坛

55

关键技术4：较大面积的纳米结构准确套刻



微纳结构集成工艺中的关键技术



■ 影响对准精度的因素

1. 样品台移动带来的写场拼接误差；
 2. 电子束偏转带来的读取误差。
- 通常的套刻范围局限在一个写场尺寸内，例如 $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ 。

■ 开发了大面积准确套刻技术

1. 解决了套刻过程中写场拼接问题；
 2. 解决了套刻区域的坐标对准问题。
- 新方法使套刻范围提高到 $2 \times 2 \text{mm}^2$ ，增大了100倍，而对准误差小于40nm，仅为套刻面积的十万分之一。

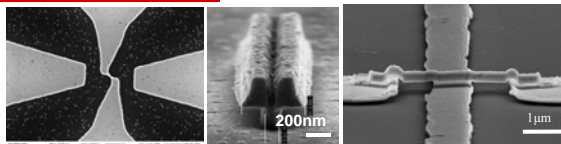
20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

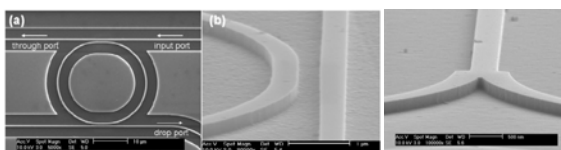
56

半导体纳米加工技术的应用与推广

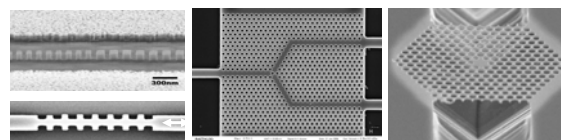
□ 纳米电子学器件



□ 纳米光波导器件



□ 光子晶体器件



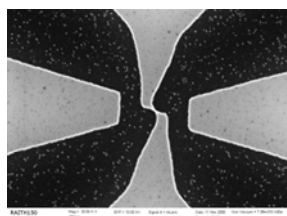
20100401

凝聚态物理-北京大学
论坛

57

纳米电子学器件

SOI纳米点接触结构晶体管



GaN基高电子迁移率晶体管



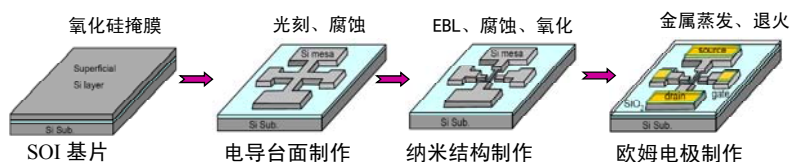
20100401

凝聚态物理-北京大学
论坛

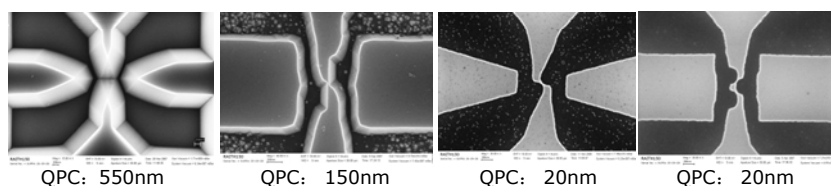
58

硅基纳米点接触结构晶体管工艺

器件的工艺要点



晶面依赖的纳米点接触结构



20100401

凝聚态物理-北京大学
论坛

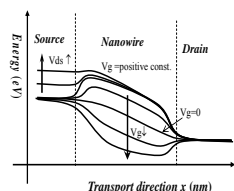
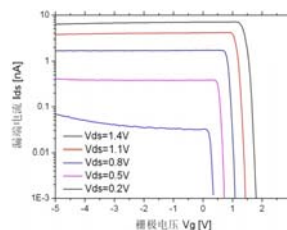
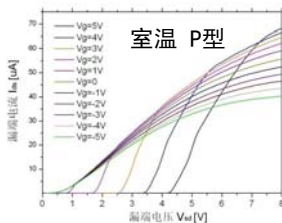
杨香、张严波

59

纳米点接触结构晶体管的电学测试



875°C热氧化自限制效应
芯层硅通道: <10nm



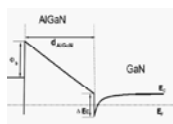
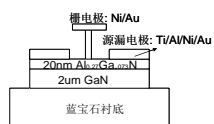
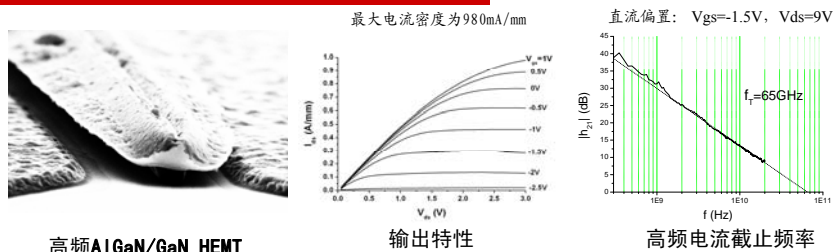
- 输出特性显示: 在耗尽状态下, 热电子电流的开启电压依赖于点接触结构处的势垒变化。
- 转移特性显示: 亚阈值斜率达到了75mV/dec, 接近了CMOS晶体管理想开关状态60mV/dec。

20100401

凝聚态物理-北京大学
论坛

杨香、张严波 60

GaN基高电子迁移率晶体管 (HEMT)



降低栅漏寄生电容，可以有效提高 I_{ds} ，减小栅极渡越时间、寄生延迟时间和沟道充放电时间，提高高频电流截止频率。

$$C_{gd} \propto L_g$$

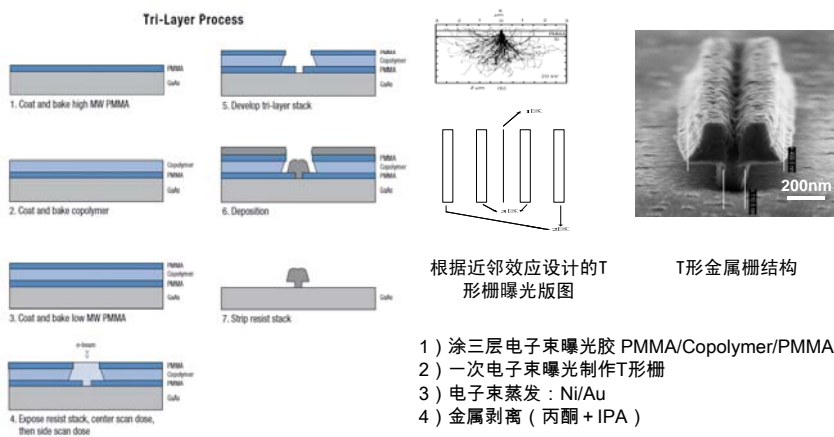
$L_g=0.18\mu m$ 栅长的器件，T形栅的宽窄比为10，其特征频率为65GHz。

20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

张仁平、陈志刚、张杨 61

GaN基HEMT器件的T形栅工艺



20100401

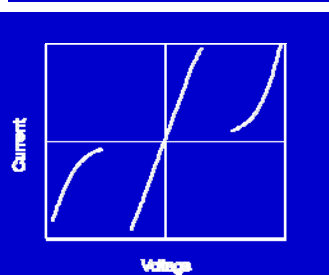
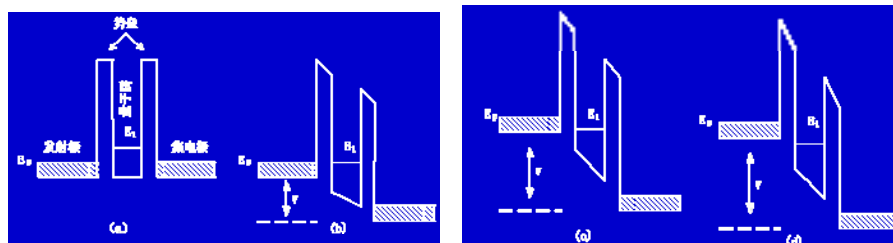
凝聚态物理-北京大学论坛

张仁平、陈志刚、张杨 62

RTD 器件

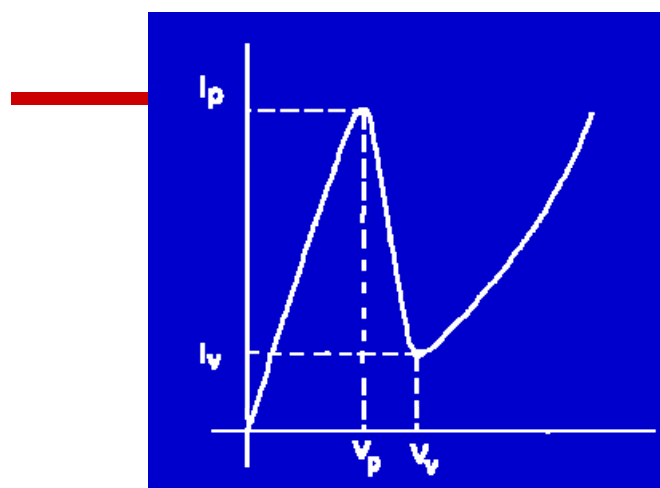
1: RTD的工作原理

主要结构：双势垒夹一势阱，量子力学



RTD 器件在四个不同偏压状态下的导带能带示意图
 (a) 零偏压条件； (b) 阈值偏压条件；
 (c) 共振偏压条件； (d) 非共振偏压条件

RTD的直流参数



V_p : 峰值电压 I_p : 峰值电流

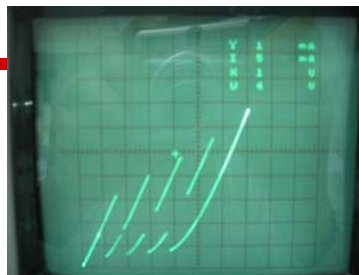
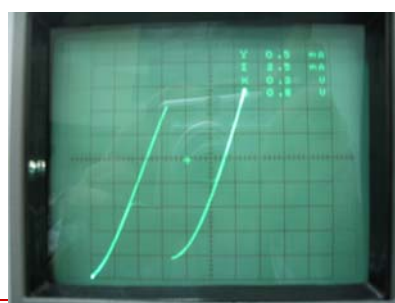
V_v : 谷电压 I_v : 谷电流

峰谷电流比 (PVCR) $= I_p / I_v$

RTD/HEMT Integration

InP based RTD

Output of single, 4 and 5 RTD series



HEMT 器件

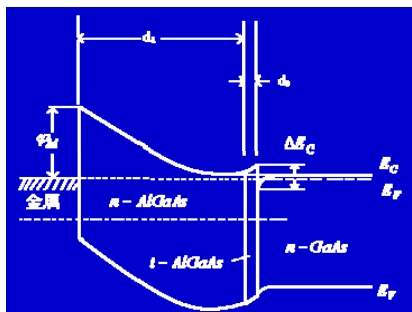
HEMT: high electron mobility transistor



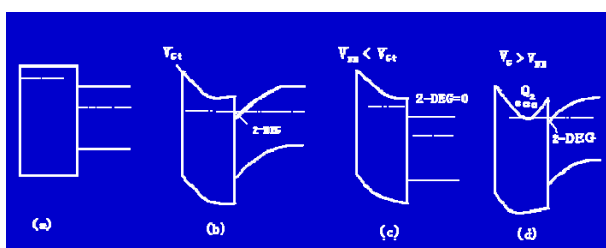
调制掺杂技术

- ① 半绝缘的衬底
- ② 非掺杂的缓冲层
- ③ 沟道层
- ④ 非掺杂隔离层
- ⑤ n型载流子提供层
- ⑥ n型重掺杂欧姆接触

HEMT工作原理和电流电压特性



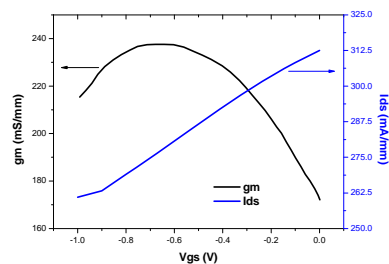
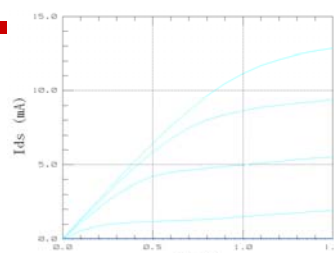
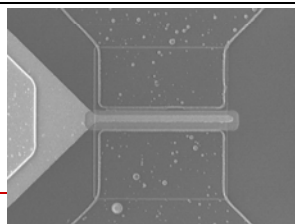
$V_{GS}=0$ 热平衡状态能带图



- (a) 电子转移前
- (b) 电子转移后栅压为 V_{GT}
- (c) 栅压为平带电压 V_{FB}
- (d) 有平行电导的能带图

HEMT g_{mmax} : 237 mS/mm

$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	$1e19\text{ cm}^{-3}$
20 nm	
$In_{0.52}Al_{0.48}As$	20 nm
Si $3e12\text{ cm}^{-2}$	N/A
$In_{0.52}Al_{0.48}As$	3 nm
$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	15 nm
$In_{0.52}Al_{0.48}As$	250nm
InP衬底	200um



GaN Device Technology

Substrate

- Large bandgap
 - High sheet charge density ($>1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)
 - 10 X higher breakdown voltages possible
- Piezoelectric and spontaneous polarization-induced charge
 - No doping required

- Wurtzite crystal structure
- $E_{\text{gap}} = 3.4 \text{ eV}$
- $V_{\text{sat}} = 2 \times 10^7 \text{ cm/s}$
- $F_{\text{br}} = 3 \text{ MV/cm}$
- $\epsilon_r = 8.9$

GaN Value Proposition

GaN-on-SiC

Benefits

Reduced: (1) size/complexity
(2) cooling
(3) weight and
(4) cost

Wide Bandwidth

High Impedance → Multi-band Operation → Configurable Radios

High Efficiency

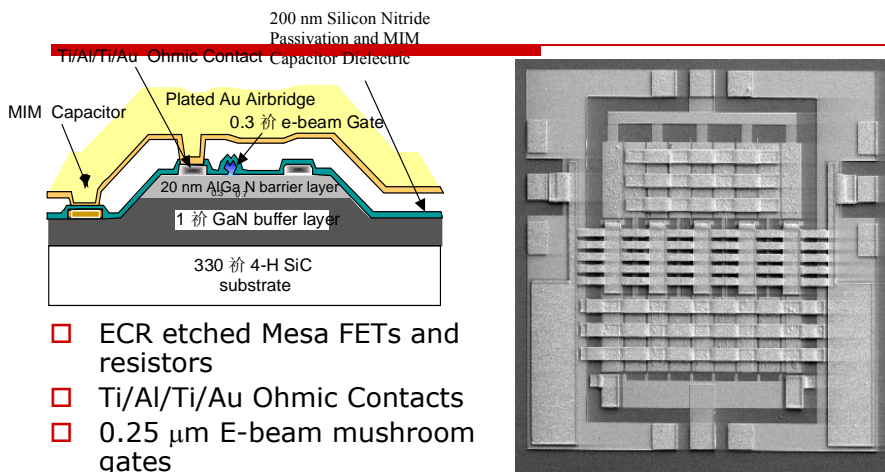
Low Capacitance → Enables High Efficiency Circuit Techniques → Smaller Heat sink

High Power

High Breakdown Voltage → High Power Density → Compact HPAs

High Thermal Conductivity

HEMT and MMIC Process



- ECR etched Mesa FETs and resistors
- Ti/Al/Ti/Au Ohmic Contacts
- 0.25 μm E-beam mushroom gates
- 20 nm PECVD Si₃N₄ Passivation/capacitor dielectric
- Plated airbridges

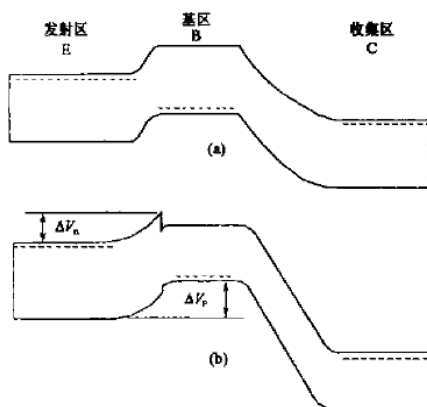


图3
 (a) 共发射极 n-p-n 同质结双极晶体管;
 (b) N-p-n 异质结双极晶体管的能带图

HBT的材料结构为较为成熟的N-p-n型，与同质双极晶体管n-p-n型比较，用大写字母“N”替换小写“n”来区分，大写字母N含义表示发射区为n型宽禁带材料，小写字母代表窄带材料。图3表示n-p-n同质结和的N-p-n单异质结双极晶体管的能带图。图4表示其掺杂分布图。

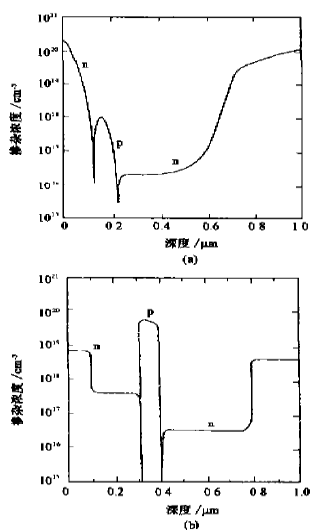
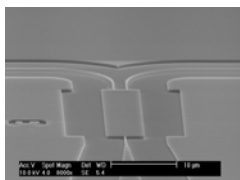


图 4 (a) Si 同质结双极晶体管掺杂分布; (b) AlGaAs/GaAs 异质结双极晶体管的掺杂分布

由上图不难看出，同质结双极晶体管和异质结双极晶体管在能带结构上存在差异，在掺杂分布上也存在差异。同质结双极晶体管的发射区和基区有相同禁带宽度，即 $\Delta E_g = 0$ 。而 HBT 中 ΔE_g 不等于零；在掺杂分布上，同质结双极晶体管的发射区为高掺杂，而 HBT 的发射区掺杂浓度要低；同质结双极晶体管的基区掺杂浓度要低于 HBT 基区的掺杂浓度。它集中反映了由同质结双极晶体管发展到异质结双极晶体管，在材料浓度的设计上发生了根本变化，但这种变化反而提高了器件的增益等，其内在因素归因于异质结的能带结构。

硅基纳米光波导器件

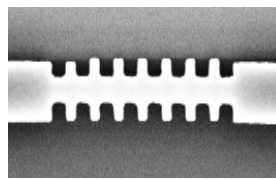
耦合分束器



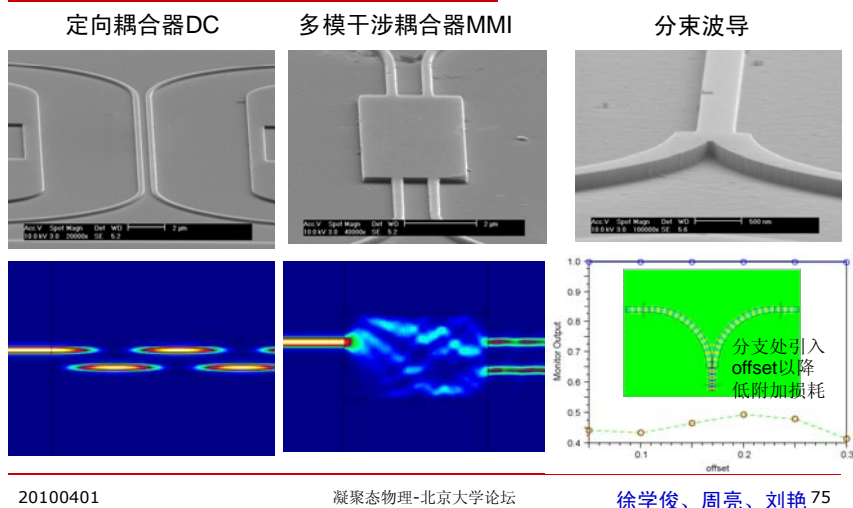
环形滤波器



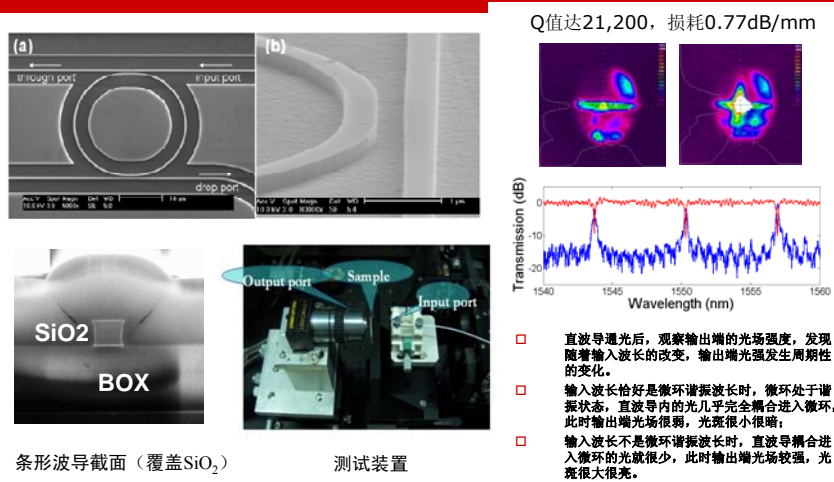
波导光栅



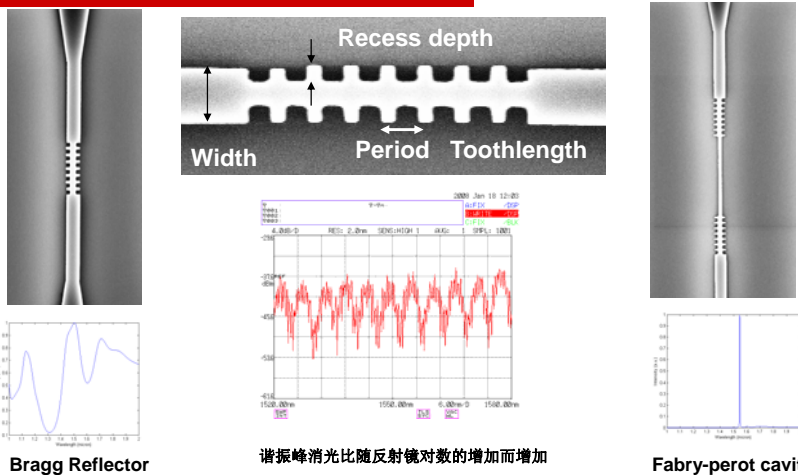
硅基耦合、分束纳米波导器件



SOI纳米微环光波导



SOI纳米波导侧壁光栅反射镜及FP腔



Bragg Reflector

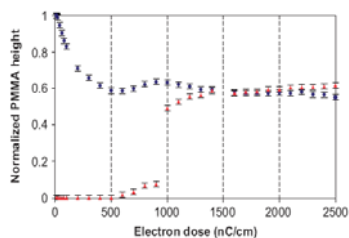
谐振峰消光比随反射镜对数的增加而增加

Fabry-perot cavity

20100401 W=660nm, R_d=190nm, T_l=0.54, Period=250nm, 67
凝聚态物理-北京大学论坛

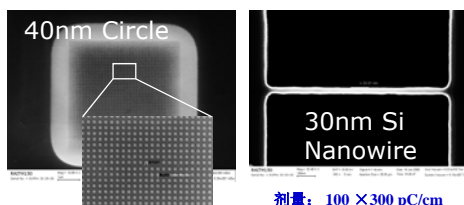
屠晓光、孙阳 77

PMMA作为负胶使用的工艺



高能电子辐照下PMMA中并行发生的两个事件:

- 断链 (Chain Scission) 反应
大分子由于分子链断裂变为小分子
- 交联 (Cross-linking) 反应
分子之间形成较强的共价键, 形成大分子网络



对于PMMA, 在低辐照剂量下, 断链反应占主导, PMMA表现出正胶特性; 在高辐照剂量下, 交联反应占主导, PMMA表现出负胶特性。

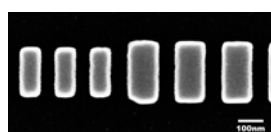
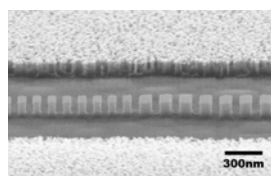
20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

张杨、王颖 78

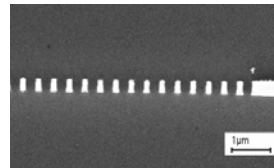
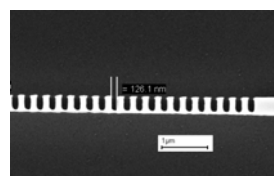
周期不等的Bragg纳米波导光栅

PMMA负胶工艺



小纳米柱: $80 \times 190 \text{ nm}^2$;
大纳米柱: $110 \times 240 \text{ nm}^2$

PMMA正胶工艺



周期为230nm和400nm

20100401

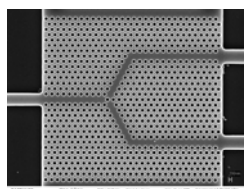
凝聚态物理-北京大学论坛

张杨、孙阳

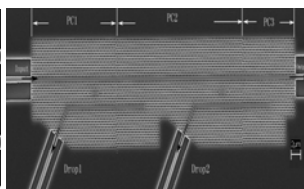
79

二维光子晶体波导器件

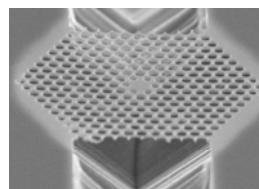
分束器



波分复用器



微腔器件



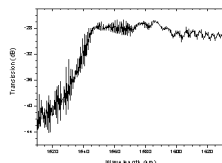
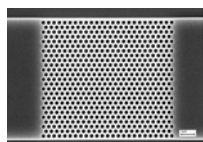
20100401

凝聚态物理-北京大学
论坛

80

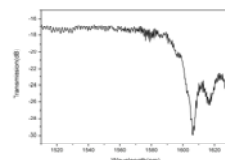
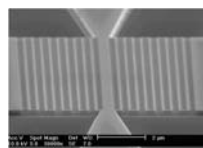
二维光子晶体波导带隙

□ 光子晶体结构使光介质的折射率在空间上以光波长量级周期性地变化，使某一能量范围的光子不能通过，形成光子禁带。如果改变空间上某一区域的折射率变化周期，存在于该区域的光子将被局域。由于该区域的折射率周期被破坏，称该区域为缺陷。



光子晶体绝对固有透射率

设计: $a=480\text{nm}$, $r=182.4\text{nm}$, $t=240\text{nm}$ 。
对应的带隙范围为1087nm—1559nm。
测试: 1545nm波长应为光子带隙的长波长带边。与设计值1559nm基本相符。



光子晶体波导透射率

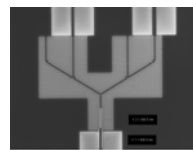
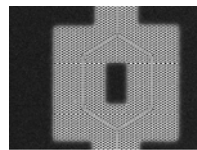
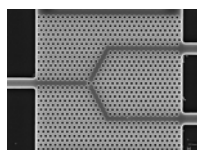
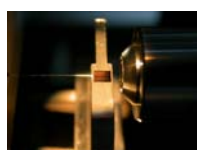
设计: $a=410\text{nm}$, $r=131\text{nm}$, $t=240\text{nm}$ 。波导的透射带范围是1236nm~1597nm。
测试: 1590nm波长是透射带的长波长带边，这与模拟结果(1597nm)相符

20100401

凝聚态物理-北京大学
论坛

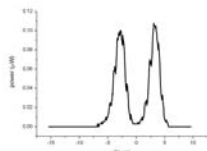
唐海霞 81

光子晶体分束波导器件



□ 原理: 在二维光子晶体中, 引入一个线缺陷, 沿着线缺陷区域的折射率变化周期发生改变, 这一能量范围的光子将被允许在该区域局域传播。利用光子晶体的带隙限制效应, 形成光子晶体波导。

□ 输出的光功率平均分成2路和4路的分束器设计



1×2 的分束器的参数
周期 $a = 400\text{nm}$,
孔半径 $r = 0.25a$,
中心小孔的半径 $r_1 = 0.2a$

1×4 的分束器的参数
周期 $a = 400\text{nm}$,
孔的半径 $r = 140\text{nm}$,
缺陷小孔的半径为 $r_1 = 0.8r$

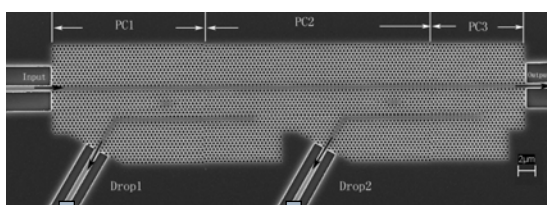
20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

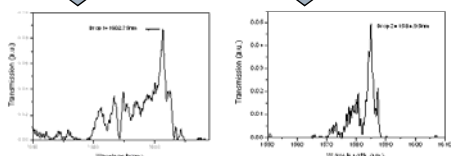
王春霞、余和军⁸²

双通道异质结型光子晶体波分复用器

□ 如果两条线缺陷靠得很近，光波互相耦合，成为光子晶体耦合器；



■ 三种不同晶格常数光子晶体拼接，形成两个异质结界面，实现按波长分波功能



■ 异质结波分复用器Drop1和Drop2端口光谱

20100401

凝聚态物理-北京大学
论坛

王春霞 83

带光子晶体结构的激光器和LED

□ 引入一个点缺陷或环缺陷，便可构成谐振腔，在有源半导体中光波可获得增益，成为光子晶体微腔激光器或LED；



GaAs基光子晶体VCSEL激光器

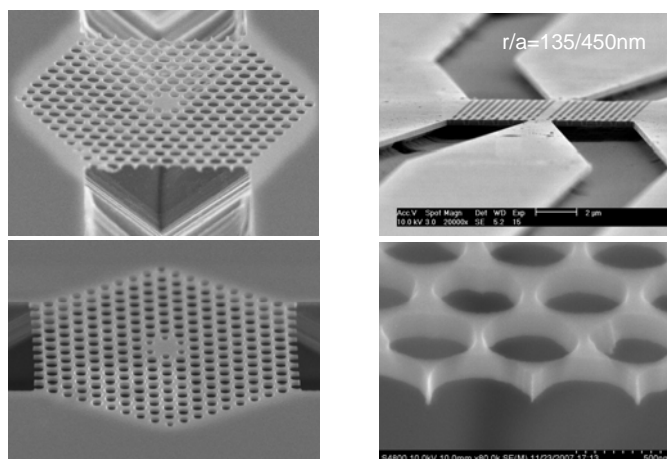
光子晶体提高白光LED的光强

20100401

凝聚态物理-北京大学
论坛

杜伟 84

SOI衬底上光子晶体空气桥结构

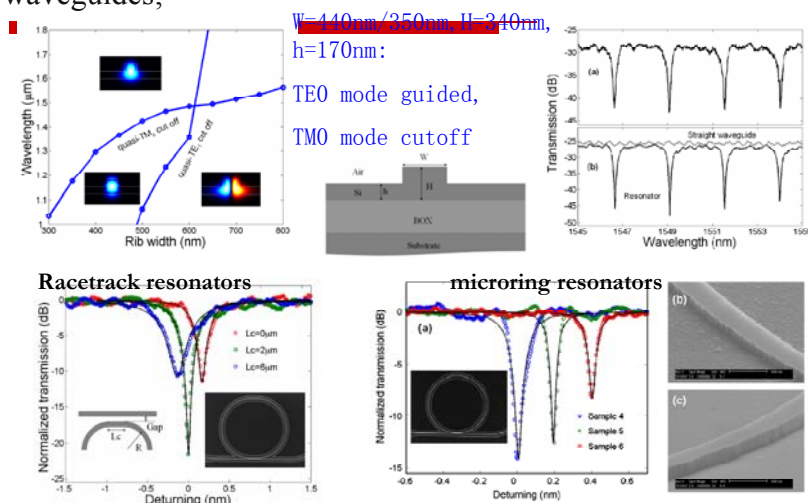


20100401

凝聚态物理-北京大学
论坛

杜伟、余和军 85

□ Microring and racetrack resonators in submicron rib waveguides;



20100401

Q.Z Huang et al. Optics Communications 282 p22-26 (2009).
凝聚态物理-北京大学论坛

86



纳米加工技术 在半导体物理研究中的应用

- 1、引言 纳米技术在固态器件中的应用
- 2、半导体研究所的纳米技术及应用
- 3、纳米技术在半导体物理研究中的应用
- 4、结语

20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

87

Quantum Information Science

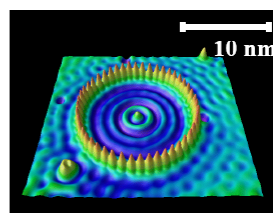
Quantum Mechanics

- ... is weird!
 - Particles act like waves
 - Particles tunnel through "impenetrable" barriers
 - Particles can be in two states at once
 - Entangled particles are correlated at all times

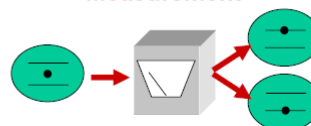
Quantum Info. Science

- Quantum computers
 - Solve problems classical computers can't
- Quantum communication
 - Security guaranteed by quantum mechanics

Electron Waves



Superposition and Measurement

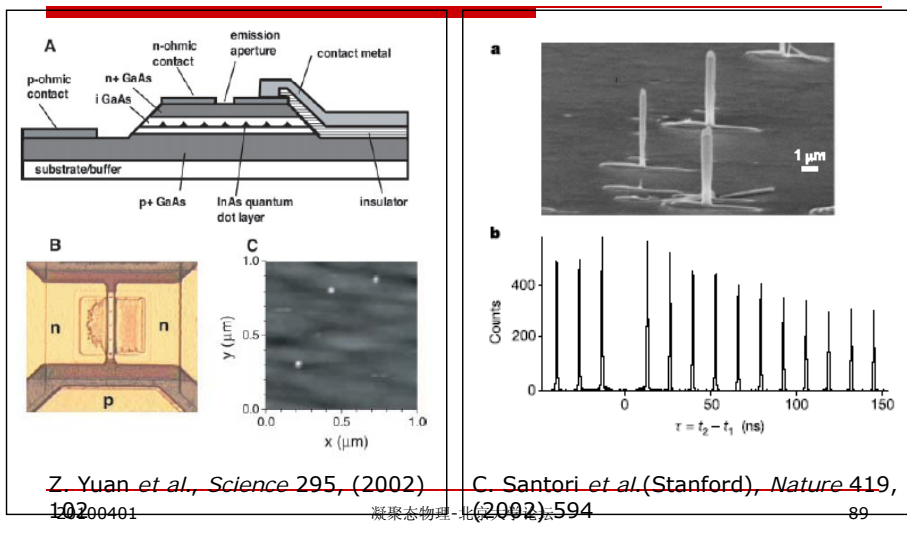


20100401

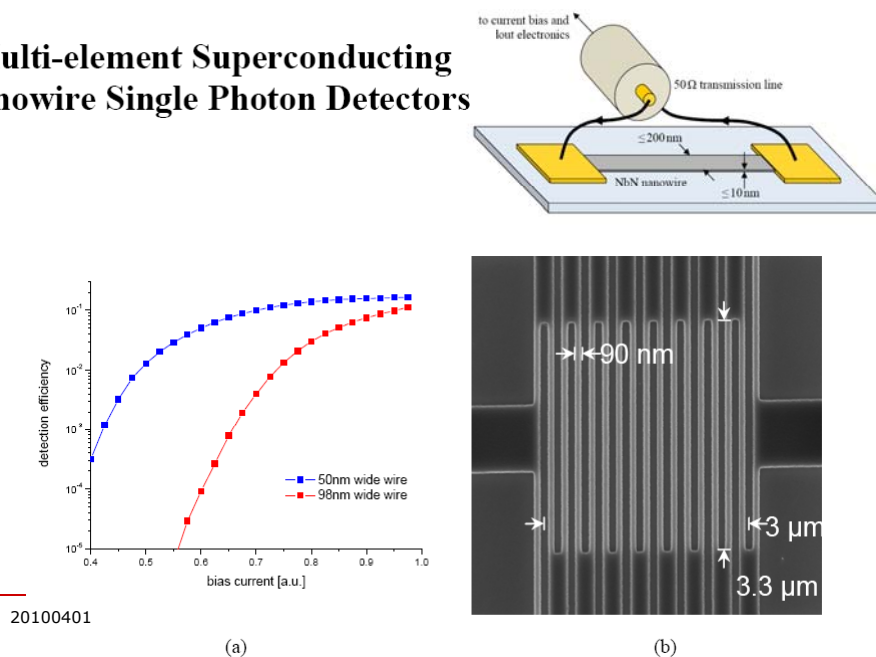
凝聚态物理-北京大学
论坛

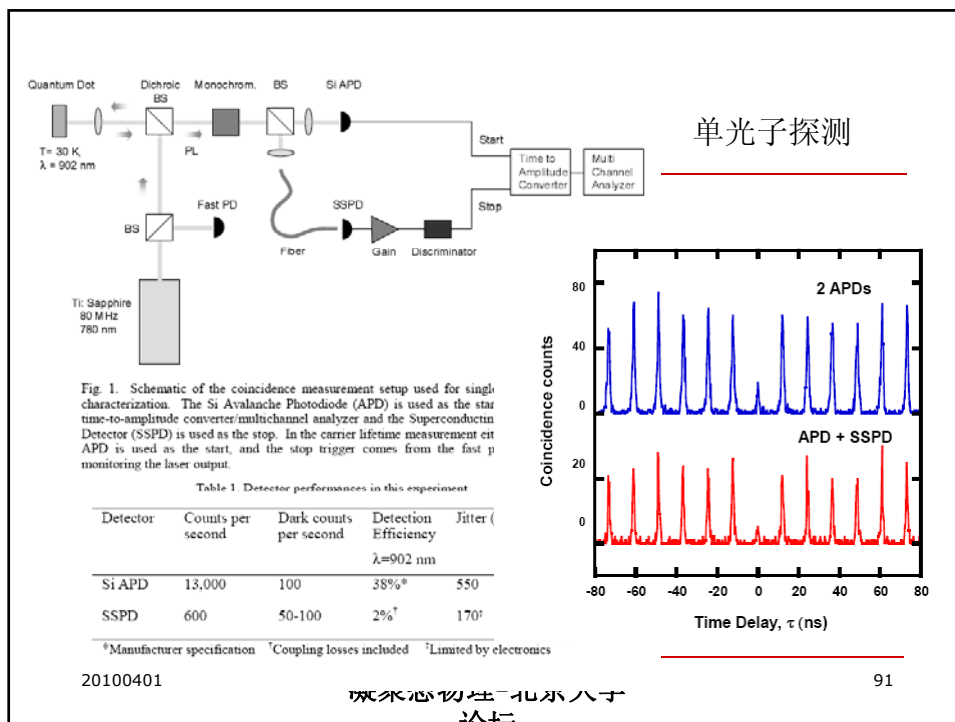
88

Single Photon Emission Using Single InAs Quantum Dot



Multi-element Superconducting Nanowire Single Photon Detectors





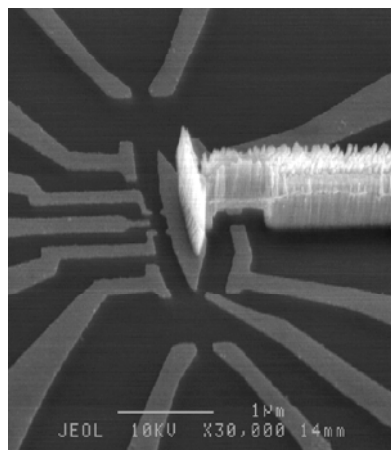
半导体中电子相干运动

介观系统中电子相移的演化研究

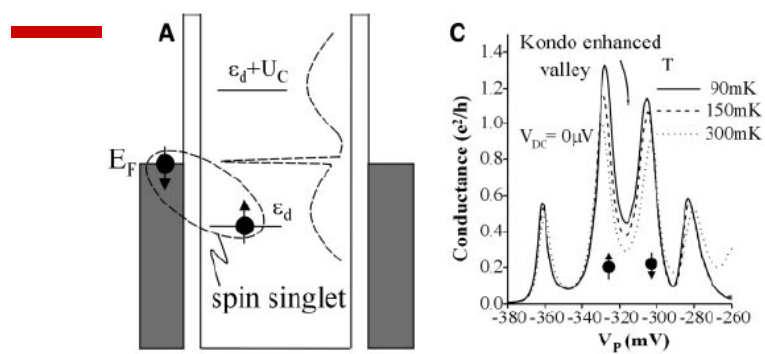
近藤效应导带电子和磁性杂质原子之间的多体相互作用。

用“人造原子”（量子点）来模拟磁性原子，将其置于一个电子双缝干涉仪之中，测量电子被量子点散射的复几率振幅；直接观测到由近藤关联导致的刚性相移，测量了在么

正性极限下的近藤系统的散射相移



-半导体中电子相干运动



Phase Evolution in a Kondo-Correlated System

Yang Ji, M. Heiblum,* D. Sprinzak, D. Mahalu, Hadas Shtrikman

Science, 290, 779(2000)
他引已达100余次

20100401

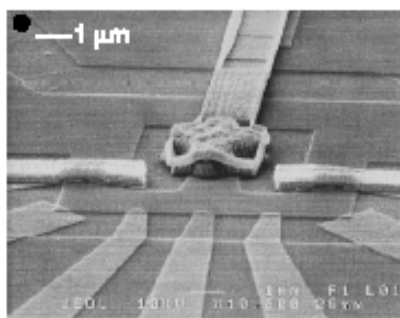
凝聚态物理-北京大学论坛

93

半导体中电子相干运动

电子Mach-Zehnder干涉仪

用于研究强磁场下
电子的相干性质的
新型的电子干涉仪。



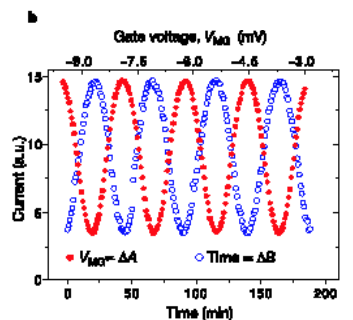
20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

94

电子Mach-Zehnder干涉仪

具有很高的电子干涉对比度 (Visibility大于60%)，使得直接研究边缘态成为可能，并为进一步研究强磁场下固体中电子的波动性质打下了基础。



An electronic Mach-Zehnder interferometer

Yang Ji, Yunchul Chung, D. Sprinzak, M. Heiblum, D. Mahalu & Hadas Shtrikman

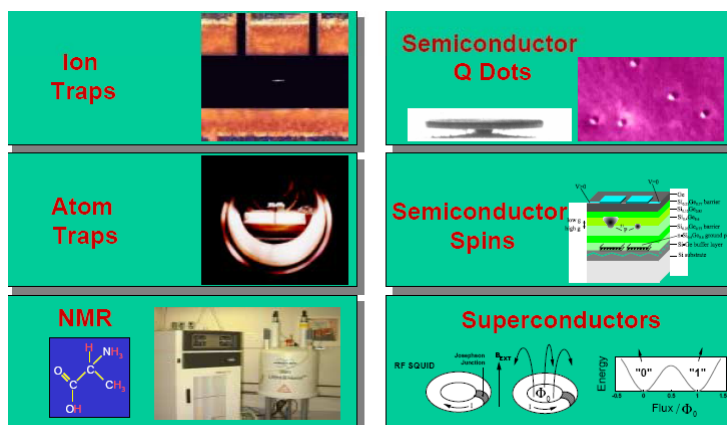
Nature, 422, 415(2003)
SCI他引60余次

20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

95

Physical Implementations for Quantum Computing



20100401

凝聚态物理-北京大学
论坛

96

Metal Rings as Quantum Bits

ESSDERC 2002

For n q-bits , the register state ψ can be described by a linear combination of 2^n q-bit basis vectors

$$|\psi\rangle = \sum_{i=0}^{2^n-1} \alpha_i$$

For the application of Shor's algorithm [1], a quantum computer would be exponentially faster than a classical one.

20100401

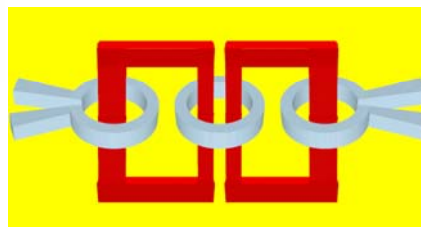
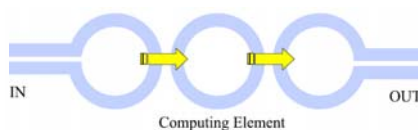
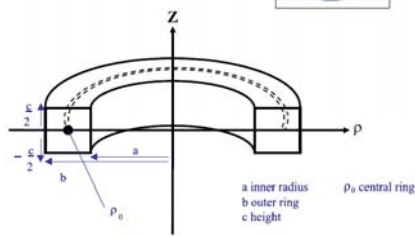
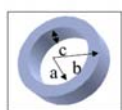
凝聚态物理-北京大学论坛

97

Metal Rings as Quantum Bits

Ring-System

- For small rings, effects measurable at
a-15 nm, b-25 nm, c-5 nm



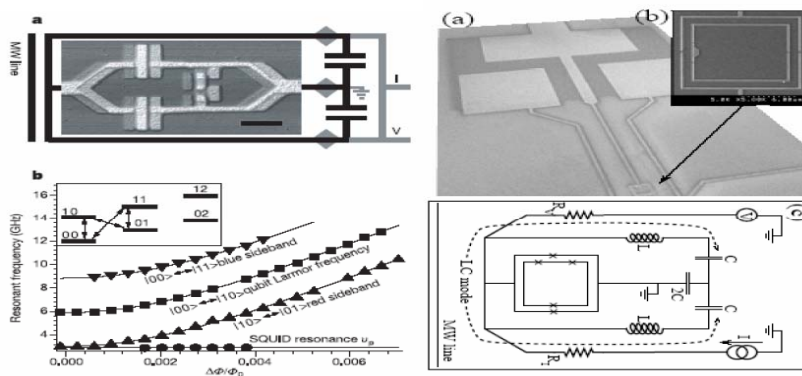
20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

98

Scalable superconducting qubit circuits using dressed states

Coupling between an LC circuit and a flux qubit



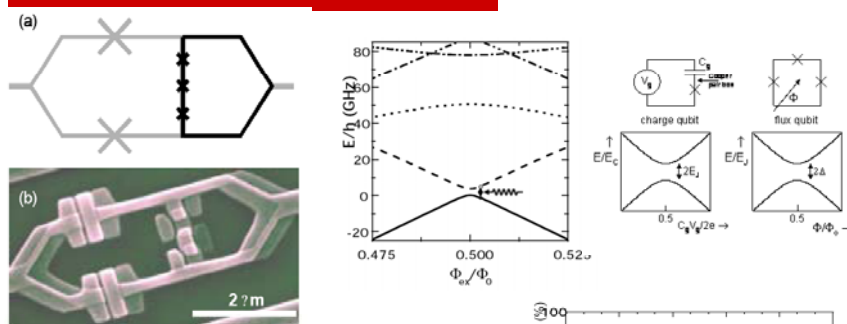
20100401 Delft, Nature, 2004

NTT, PRL 96, 127006 (2006)

论坛

Coherent control of a Josephson-Junction Flux Qubit

Y. Nakamura^{1,2}, I. Chiorescu³, C.J.P.M. Harmans³ and J.E. Mooij³



Three-junction flux qubit. (a) Schematics. The gray part is for the readout. (b) Scanning-electron micrograph. The larger loop with two big junctions is a SQUID for readout.

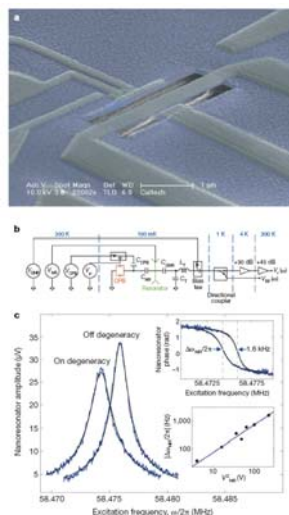
20100401

凝聚态物理-北京

Nanomechanical measurements of a superconducting qubit

Device and measurement circuit description, and driven frequency response of the nanoresonator.

c, Thenanoresonator's amplitude (main panel) and phase (upper inset) versus excitation frequency, ν , for nCPB biased on and off a charge degeneracy and $EJ/h < 10$ GHz. The solid black lines each denote a fit to a harmonic oscillator response. Lower inset: magnitude of the nanoresonator frequency shift, $|D\nu_{NR}/2p|$ (black circles) as a function of V_{2NR} for $EJ/h < 11-12$ GHz and VCPB biased at a charge degeneracy. The solid blue line is a fit to $|D\nu_{NR}/2p| \propto A V_{2NR}^2$, where A is a proportionality constant.



20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

101

纳米加工技术 在半导体物理研究中的应用

- 1、引言 纳米技术在固态器件中的应用
- 2、半导体研究所的纳米技术及应用
- 3、纳米技术在半导体研究中的应用
- 4、结语

20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

102

结语

- 纳米技术已经在物理学、光子学、电子学、微机械及其集成器件得到广泛应用
- 集成技术中心开发了一系列纳米加工关键技术，实现了10nm曝光分辨率，小于20nm的图形转移尺寸和较大面积的纳米图形套刻。
- 电子束曝光的各项关键技术已经应用于硅基纳米点接触结构晶体管、T型栅结构GaN基HEMT器件、硅基纳米结构波导、光子晶体波导及微腔结构器件的研制。
- 我们已完全具备了加工纳米尺度金属和半导体的孔、柱、沟槽、栅等结构的能力，具备了提供交叉科学研究的关键技术支撑。

20100401

凝聚态物理-北京大学论坛

103

Thank you for your attention



20100401 凝聚态物理-北京大学 105
论坛

20100401 凝聚态物理-北京大学 106
论坛

20100401 凝聚态物理-北京大学 107
论坛