

半导体中反演不对称相关的 两个效应

陈涌海

中科院半导体所
半导体材料科学重点实验室



报告内容

一、前言

反演不对称、半导体能带

二、空穴混合

量子阱平面光学各向异性

三、自旋分裂

二维电子气的自旋光电流

四、结论

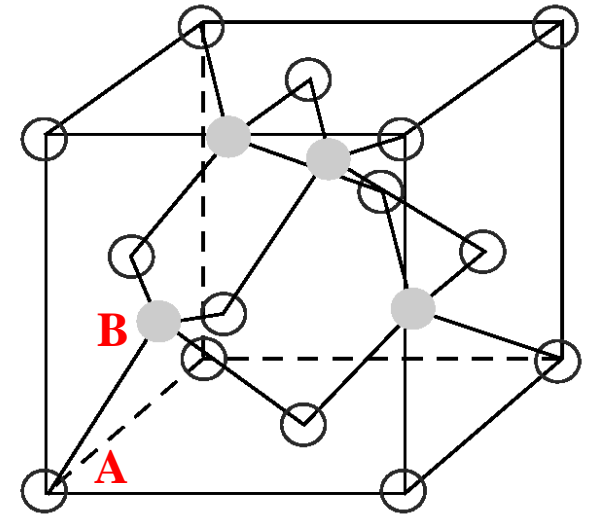
一、前言

晶体结构对称性对材料光电性质具有决定性的影响！

闪锌矿结构的反演不对称

1) 体反演不对称

T_d , GaAs , InP

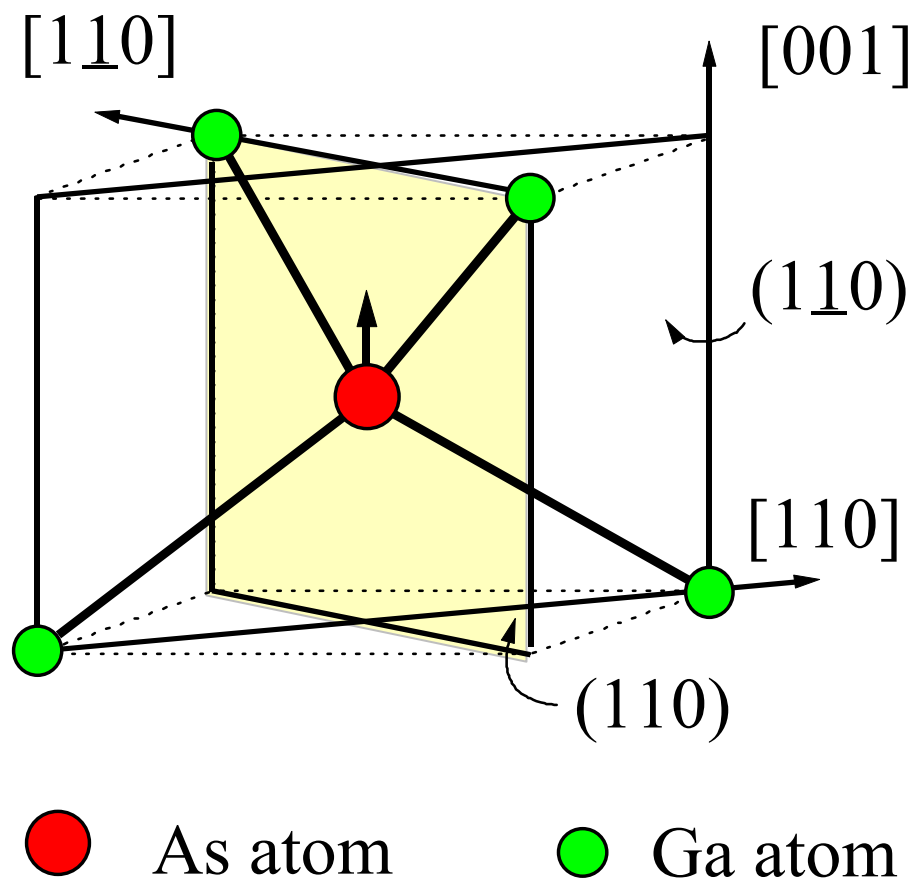


压电效应，非线性光学效应（包括线性电光效应，或Pockels效应）

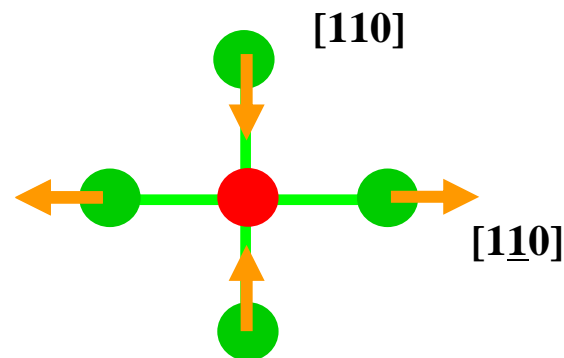
但是闪锌矿结构具有旋转反演对称性！

2) 场致反演不对称

应变 e_{xy} , $[001]$ 电场 E_z



闪锌矿结构, GaAs:
Ga和As原子的相对移动使得(110)和(1 $\bar{1}$ 0)面内的Ga-As键不再对称, C_{2v} 点群。



3) 结构反演不对称

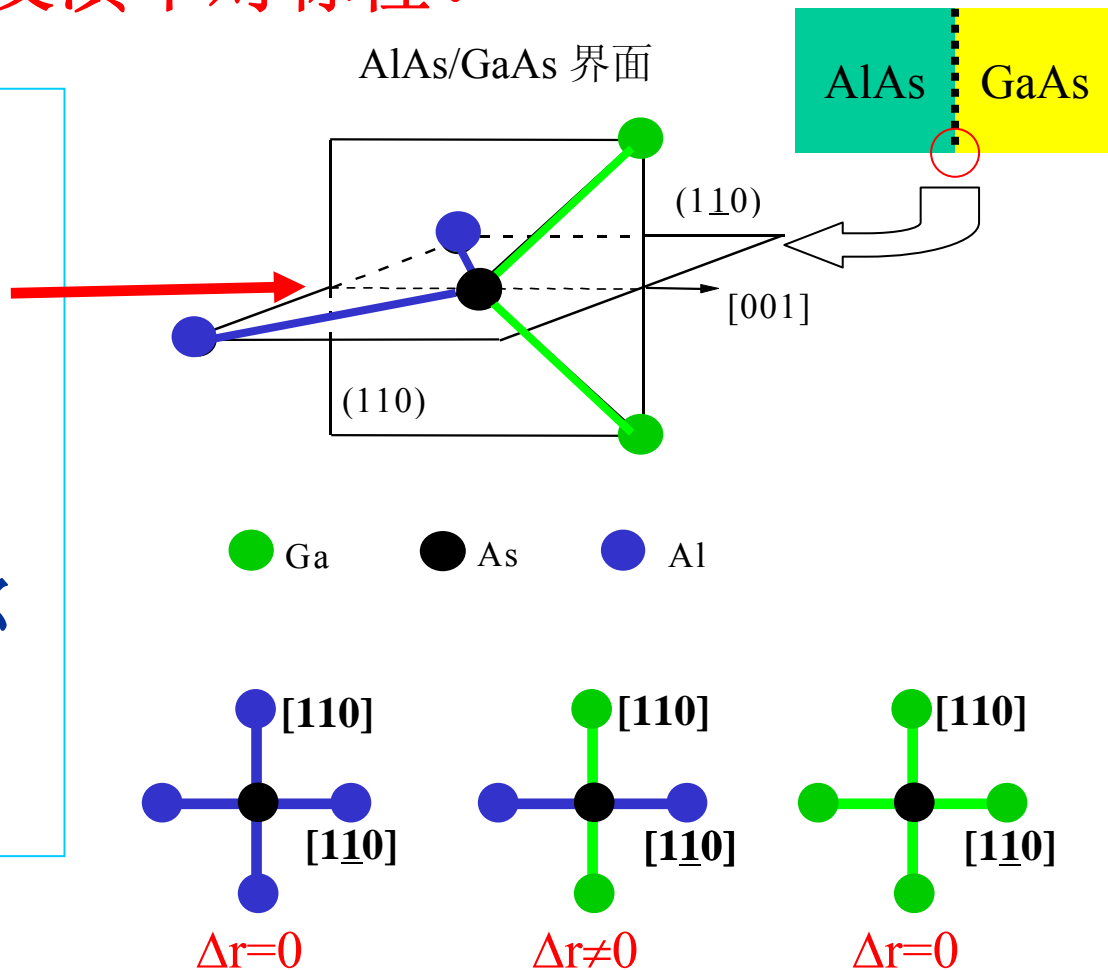
半导体界面内在的反演不对称性!

Ga-As键在 (110)面内
Al-As 键在(110)面内

↓

结构反演不对称

C_{2v} 点群

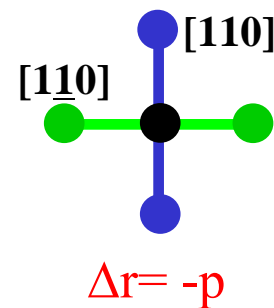
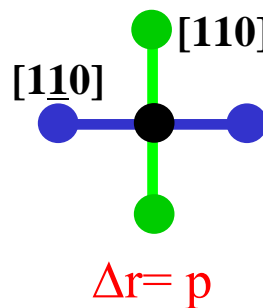
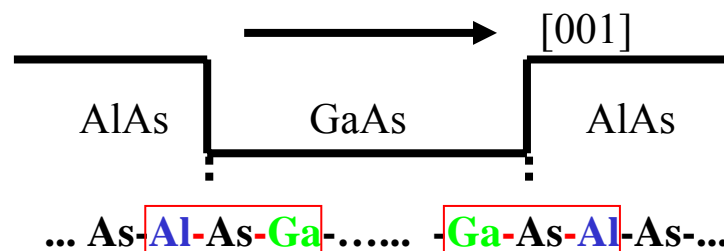


化学键在 (001) 面内的投影

理想对称的量子阱

量子阱中心为对称点，具有旋转反演对称性！

[110] 等价于 $[1\bar{1}0]$



实际量子阱总有一定程度的结构反演不对称： C_{2v}

界面不完美！

⇒ 无旋转反演对称性

☑ 原子偏析

InGaAs/GaAs



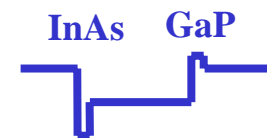
☑ 界面有序结构

GaAs/AlGaAs



☑ 界面化学键组成的差异

InGaAs/InP



☑ 组分渐变、台阶
界面插入层等



闪锌矿半导体材料的反演不对称:

1) **BIA: bulk inversion asymmetry**, T_d

材料固有的，无法调控

2) **FIA: strain and electric field**, C_{2v}

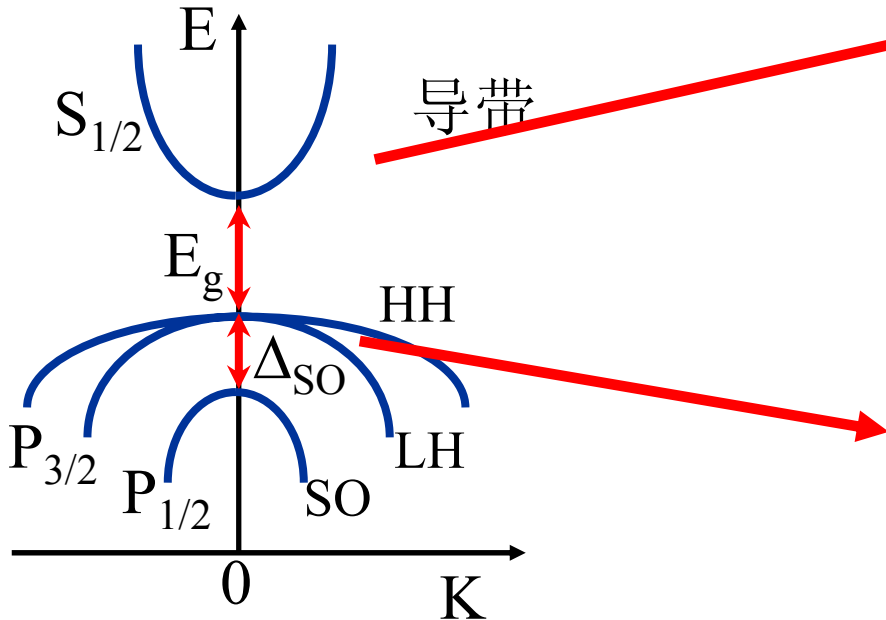
3) **SIA: structural inversion asymmetry**, C_{2v}

通过外场和结构设计，实现调控

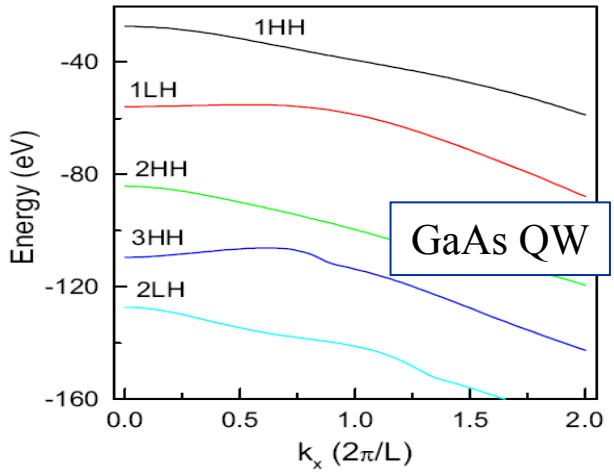
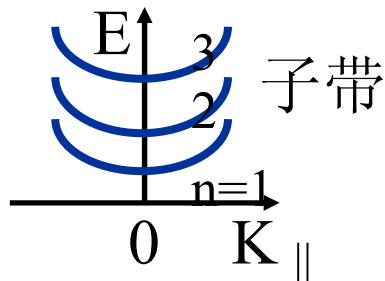
反演不对称会产生怎样的效应？

半导体材料的光电性质决定于它们的能带结构和波函数

闪锌矿体材料 如GaAs



量子阱



- 1) 能带自旋简并
- 2) 价带顶轻重空穴简并

- 1) 子带自旋简并
- 2) 轻重空穴简并消除
- 3) $K_{\parallel} = 0$, 空穴无混合



C_{2v} 反演不对称对能带结构和波函数的影响

目标：寻找 E_z ， e_{xy} 等相关的哈密顿量

T_d 点群的不可约表示

$$\Gamma_1: S [1];$$

$$\Gamma_2: T [xl_x + yl_y + zl_z];$$

$$\Gamma_3: (U, V) [\sqrt{3}(x^2 - y^2), 2z^2 - x^2 - y^2];$$

$$\Gamma_4: (P, Q, R) [l_x, l_y, l_z]; \quad \sigma, \mathbf{J}, \mathbf{H}(\text{磁场}), \mathbf{k} \times \mathbf{E} \quad \text{轴矢量}$$

$$\Gamma_5: (X, Y, Z) [x, y, z]. \quad \mathbf{k}, \mathbf{E}(\text{电场}), [e_{yz}, e_{zx}, e_{xy}] \quad \text{极矢量}$$
$$\{j_x j_y\}, \{j_y j_z\}, \{j_z j_x\}$$

$$\{j_x j_y\} = (j_x j_y + j_y j_x) / 2$$



T_d 点群不可约表示的乘法表

TABLE I. Multiplication table for the components of the irreducible representations of T_d group. The components are defined in Eq. (4.1). This table is equivalent to that of coupling coefficients in G. F. Koster, J. O. Dimmock, R. G. Wheeler, and H. Statz, *Properties of Thirty-two Point Groups* (M.I.T., Cambridge, 1963).

S	SS'	TT'	$UU' + VV'$		$PP' + QQ' + RR'$		$XX' + YY' + ZZ'$
T	ST'		$UV' - VU'$			$PX' + QY' + RZ'$	
U	SU'	$-TV'$	$UV' + VU'$		$\sqrt{3}(PP' - QQ')$	$2RZ' - PX' - QY'$	$\sqrt{3}(XX' - YY')$
V	SV'	TU'	$UU' - VV'$		$2RR' - PP' - QQ'$	$\sqrt{3}(QY' - PX')$	$2ZZ' - XX' - YY'$
P	SP'	TX'	$(\sqrt{3}U - V)P'$	$-(\sqrt{3}V + U)X'$	$QR' - RQ'$	$QZ' + RY'$	$YZ' - ZY'$
Q	SQ'	TY'	$-(\sqrt{3}U + V)Q'$	$(\sqrt{3}V - U)Y'$	$RP' - PR'$	$RX' + PZ'$	$ZX' - XZ'$
R	SR'	TZ'	$2VR'$	$2UZ'$	$PQ' - QP'$	$PY' + QX'$	$XY' - YX'$
X	SX'	TP'	$-(\sqrt{3}V + U)P'$	$(\sqrt{3}U - V)X'$	$QR' + RQ'$	$QZ' - RY'$	$YZ' + ZY'$
Y	SY'	TQ'	$(\sqrt{3}V - U)Q'$	$-(\sqrt{3}U + V)Y'$	$RP' + PR'$	$RX' - PZ'$	$ZX' + XZ'$
Z	SZ'	TR'	$2UR'$	$2VZ'$	$PQ' + QP'$	$PY' - QX'$	$XY' + YX'$

$R \times R'$

$\mathbf{k} =$

$$\begin{pmatrix} (k_y^2 - k_z^2)k_x \\ (k_z^2 - k_x^2)k_y \\ (k_x^2 - k_y^2)k_z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \{j_y j_z\} \\ \{j_z j_x\} \\ \{j_x j_y\} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \{\sigma_y \sigma_z\} \\ \{\sigma_z \sigma_x\} \\ \{\sigma_x \sigma_y\} \end{pmatrix}$$



简单的哈密顿量 $H=H_0+A\cdot B$

导带电子

能带倾斜 $H'=eE_z z$
最基本的电场效应

极矢量点乘
 $e r \cdot E$

$$0 \equiv \begin{pmatrix} \{\sigma_y \sigma_z\} \\ \{\sigma_z \sigma_x\} \\ \{\sigma_x \sigma_y\} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$$

1) $H' = a E_z (\sigma_x k_y - \sigma_y k_x)$
Rashba 自旋轨道耦合;

轴矢量点乘

$$(k \times E) \cdot \sigma$$

2) $H' = b k \cdot \sigma = \beta (\sigma_x k_x - \sigma_y k_y)$ — 量子阱
Dresshauss 自旋轨道耦合

$$k \cdot \sigma$$

以上 E_z 均可以用 e_{xy} , $P\delta(z-z_0)$ 代替

价带空穴

$$\mathbf{H}' = c\mathbf{E}_z \{j_x j_y\}$$

空穴混合

E_z 均可以用 e_{xy} , $P\delta(z-z_0)$ 代替

极矢量点乘

$$\begin{matrix} \{j_y j_z\} \\ \{j_z j_x\} \\ \{j_x j_y\} \end{matrix} \cdot \begin{matrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{matrix}$$

Rashba 和 Dresshaus 自旋轨道耦合
 \mathbf{H}' 很复杂

电子空穴交换作用

$$\mathbf{H}' = d\mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\sigma}$$

+ 空穴混合 \rightarrow 激子精细结构

能带结构和波函数的特殊变化

空穴混合 (hole mixing)

自旋分裂 (spin splitting)



可观察的物理效应

平面光学各向异性

激子精细结构

自旋光电流

光子偏振和电子自旋

- 内在关联、相互转化
- 信息载体的新自由度



效应之一：空穴混合

hole mixing effect



量子阱中 $\mathbf{K}_{\parallel} = 0$ 处空穴波函数：无空穴混合

$|3/2, 3/2\rangle$ $|3/2, -1/2\rangle$ $|3/2, 1/2\rangle$ $|3/2, -3/2\rangle$ 价带布洛赫波函数为基矢

$$\begin{pmatrix} H_{hh}(z) & & & \\ & H_{lh}(z) & & \\ & & H_{lh}(z) & \\ & & & H_{hh}(z) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{hh}(z) \\ \phi_{lh}(z) \\ \phi_{lh}(z) \\ \phi_{hh}(z) \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} \phi_{hh}(z) \\ \phi_{lh}(z) \\ \phi_{lh}(z) \\ \phi_{hh}(z) \end{pmatrix}$$

$$H_{hh}(z)\phi_{hh}(z) = E\phi_{hh}(z) \quad \text{for} \quad |3/2, \pm 3/2\rangle$$

$$H_{lh}(z)\phi_{lh}(z) = E\phi_{lh}(z) \quad \text{for} \quad |3/2, \pm 1/2\rangle$$

$$\Psi_{hh} = \phi_{nhh}(z)|3/2, \pm 3/2\rangle$$

$$\Psi_{lh} = \phi_{mlh}(z)|3/2, \pm 1/2\rangle$$

二重简并 (自旋简并)
轻重空穴无耦合

量子阱中 $\mathbf{K}_{\parallel} = 0$ 处空穴波函数：有空穴混合



$$H = H_0 + F(z) \left\{ \hat{J}_x \hat{J}_y \right\}$$

$$e_{xy}, E_z, P\delta(z-z_0)$$

$$H(z) = \begin{pmatrix} H_{hh} & iF(z) & 0 & 0 \\ -iF(z) & H_{lh} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{lh} & iF(z) \\ 0 & 0 & -iF(z) & H_{hh} \end{pmatrix}$$

耦合的薛定谔方程：

$$H_{hh}(z)\phi_{hh}(z) + iF(z)\phi_{lh}(z) = E\phi_{hh}(z)$$

$$H_{lh}(z)\phi_{lh}(z) - iF(z)\phi_{hh}(z) = E\phi_{lh}(z)$$

空穴波函数发生混合

$$\begin{aligned}\Psi_{nh} &= \phi_{nh}(z)|3/2, \pm 3/2\rangle + i\alpha\phi_{ml}(z)|3/2, \mp 1/2\rangle \\ \Psi_{mh} &= \phi_{ml}(z)|3/2, \mp 1/2\rangle + i\alpha\phi_{nh}(z)|3/2, \pm 3/2\rangle\end{aligned}$$

能级移动 $\alpha^2 |E_{nh} - E_{ml}| / 2$

非常小，可以忽略

$$\alpha = \frac{\int \phi_{nh}(z) F(z) \phi_{ml}(z) dz}{|E_{nh} - E_{ml}|}$$

1%量级

重空穴波函数中具有轻空穴的分量
轻空穴波函数中具有重空穴的分量



空穴混合的效应（闪锌矿结构）

- 1) 平面内光学各向异性
- 2) 激子精细结构：平面光学各向异性的特例
- 3) 空穴自旋弛豫
- 4) 其它

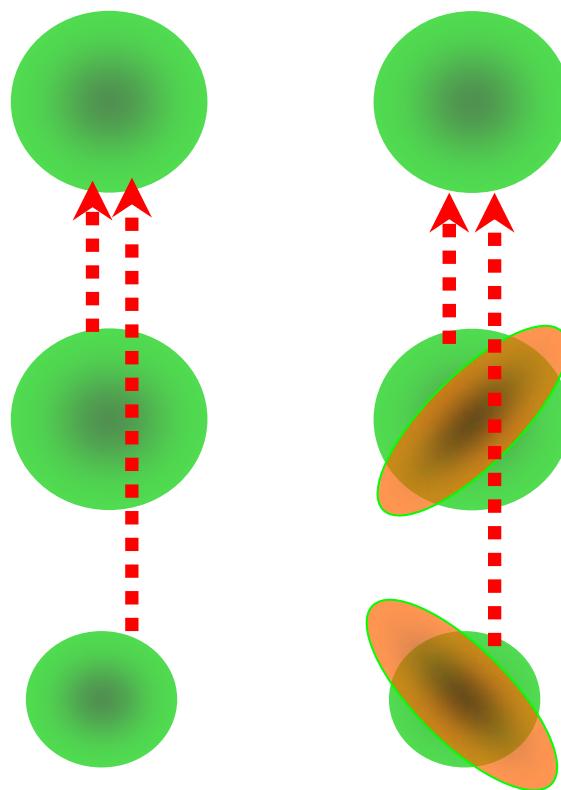
空穴混合如何导致平面光学各向异性？

波函数在XY平面内的投影

导带 $|s\rangle$

$$|3/2, 3/2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(X + iY)\uparrow$$

$$|3/2, -1/2\rangle = \frac{1}{\sqrt{6}}[(X - iY)\uparrow + 2Z\downarrow]$$



$$f(r) + \alpha XY$$

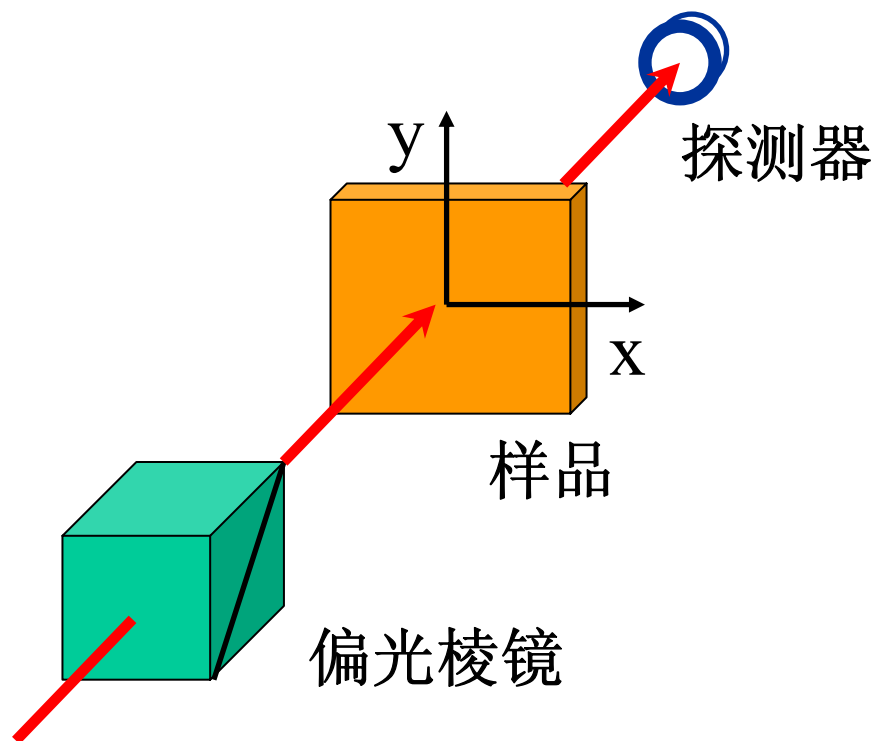
$$g(r) - \alpha XY$$

平面光学各向异性的测量

传统的偏振光谱：
旋转偏振片或者样品
两次测量

$$P = \frac{I_x - I_y}{I_x + I_y}$$

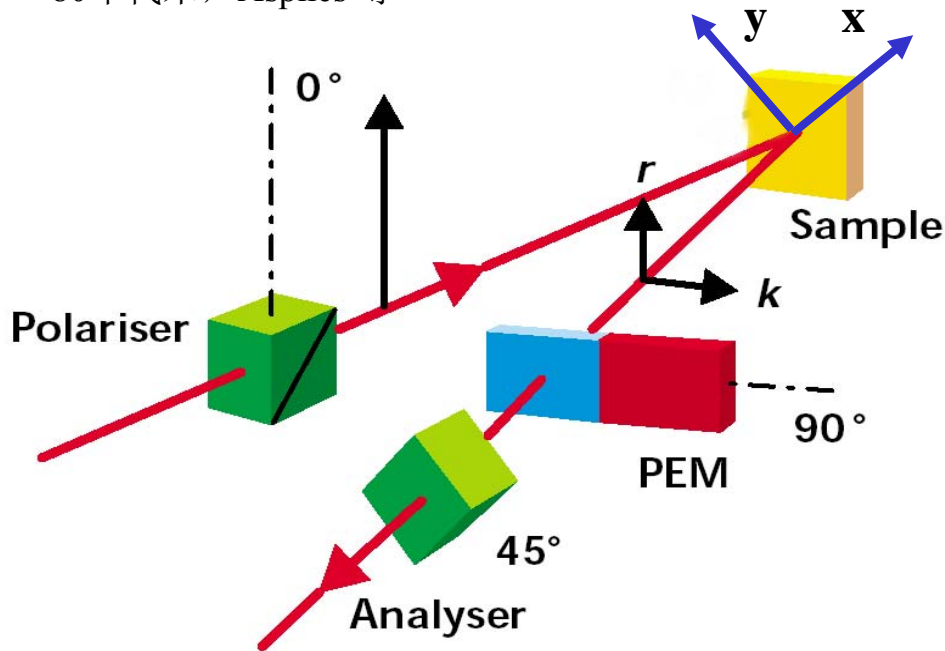
灵敏度有限：**5%**
系统稳定性影响严重！



偏振透射谱

反射差分谱: reflectance difference spectroscopy (RDS)

80年代末, Aspnes 等



$$\Delta r/r = 2(r_x - r_y)/(r_x + r_y)$$

极其灵敏: 10^{-5}

表面重构
表面生长动力学过程
表面原子吸附和脱附
原位测量技术

将RDS应用于半导体界面、量子阱和纳米结构等研究, 量子阱和纳米结构量子跃迁RDS研究的SCI论文几乎全部来自我们。

量子阱平面光学各向异性的RDS研究

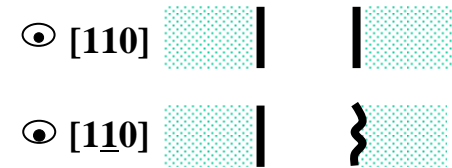
☑原子偏析

InGaAs/GaAs



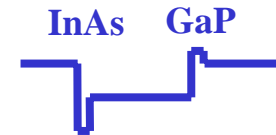
☑界面有序结构

GaAs/AlGaAs



☑界面化学键组成的差异

InGaAs/InP



☑ 组分渐变、台阶
界面插入层等

← 阱形控制

GaAs/AlGaAs —— 阱宽，应变，主动控制，激子精细结构

InGaAs/GaAs —— In原子偏析、应变等

InGaAs/InP —— 界面化学键，原子互混

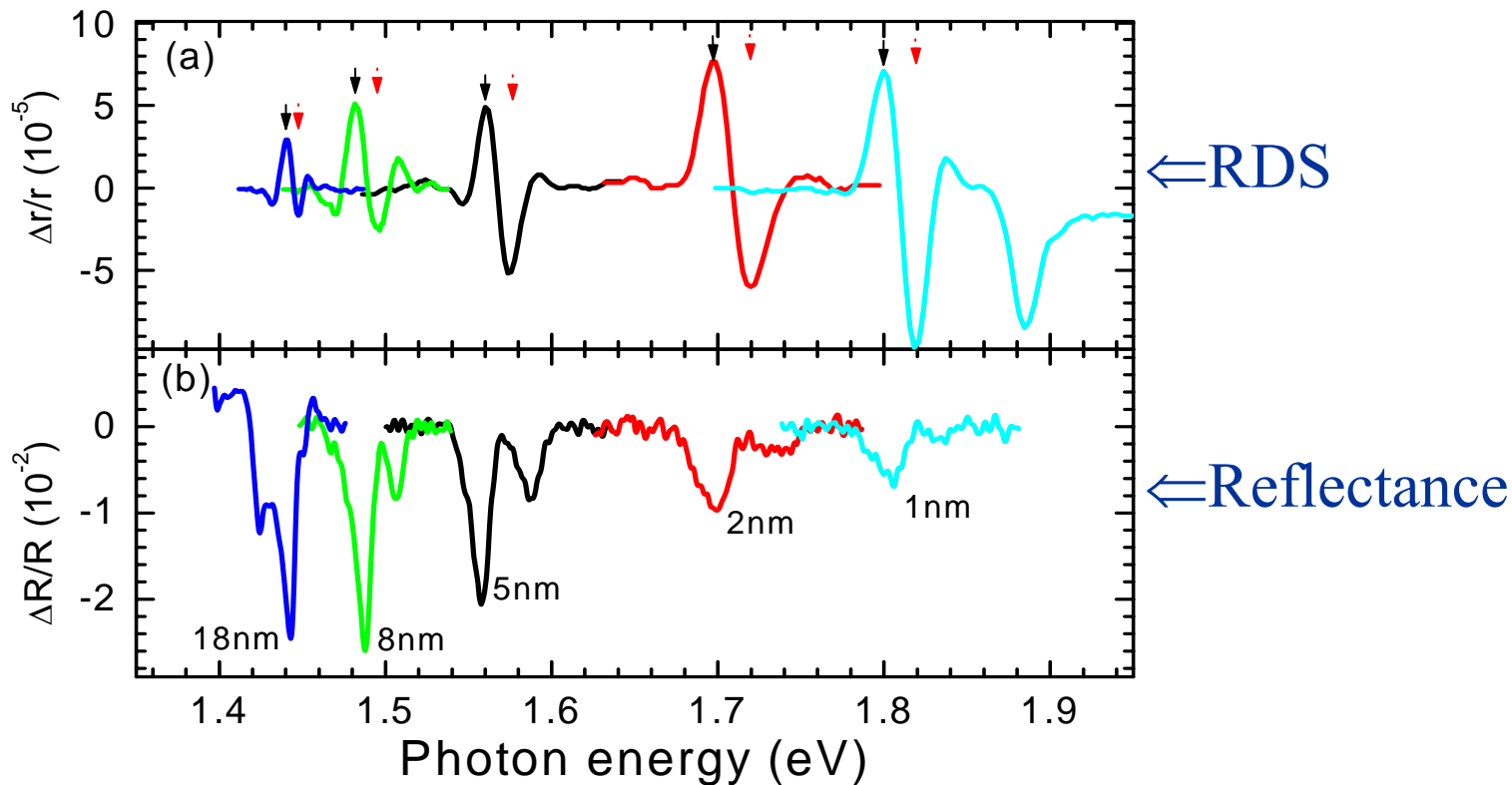
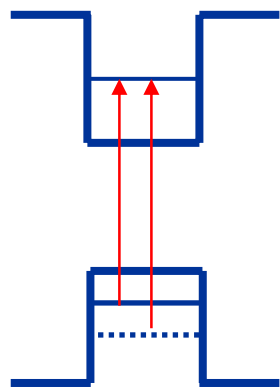
GaNAs/GaAs , GeSi/Si

InAs/GaAs量子点的浸润层演化（**InAs**超薄量子阱）

量子阱界面相关的平面光学各向异性



不同阱宽GaAs/Al_{0.36}Ga_{0.64}As QW



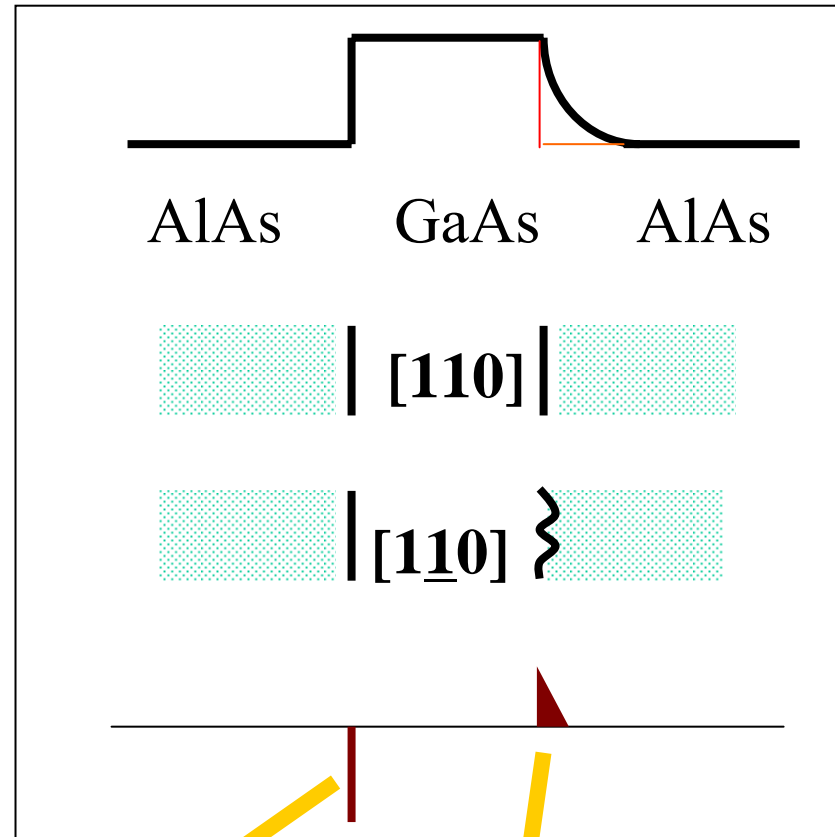
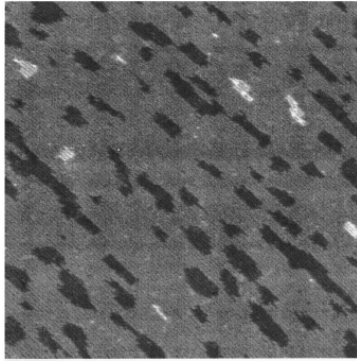
界面相关的**RDS**信号，随阱宽减小而增大！

Phys. Rev. B 66, 19532120 (2002)

GaAs/AlGaAs 量子阱 中界面引起各向异性的两种可能

Ga 原子偏析

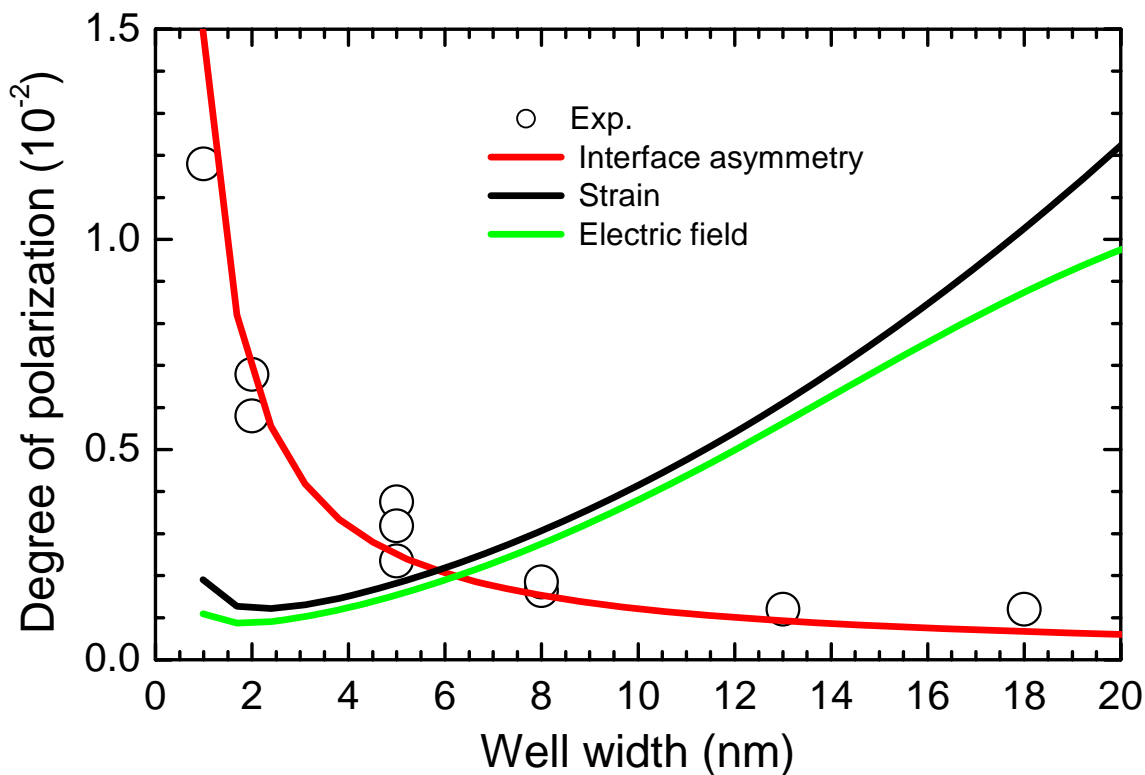
界面各向异性结构



$F(z) = ?$ 对称阱 $P_0\delta(z + w/2) - P_0\delta(z - w/2)$

不对称阱 $P_1\delta(z + w/2) - \frac{P_2}{l}\exp(-\frac{z - w/2}{l})\Theta(z - w/2)$

GaAs/AlGaAs量子阱1H1E的偏振度随阱宽的变化



光学各向异性来自界面不对称——界面各向异性的岛状起伏。
偏振度小于1.5%：用普通普通光学



轻重空穴混合的程度取决于空穴混合能与空穴能级间距之比(微扰论):

$$\frac{\langle 1H | F(z) | 1L \rangle}{\Delta E}$$

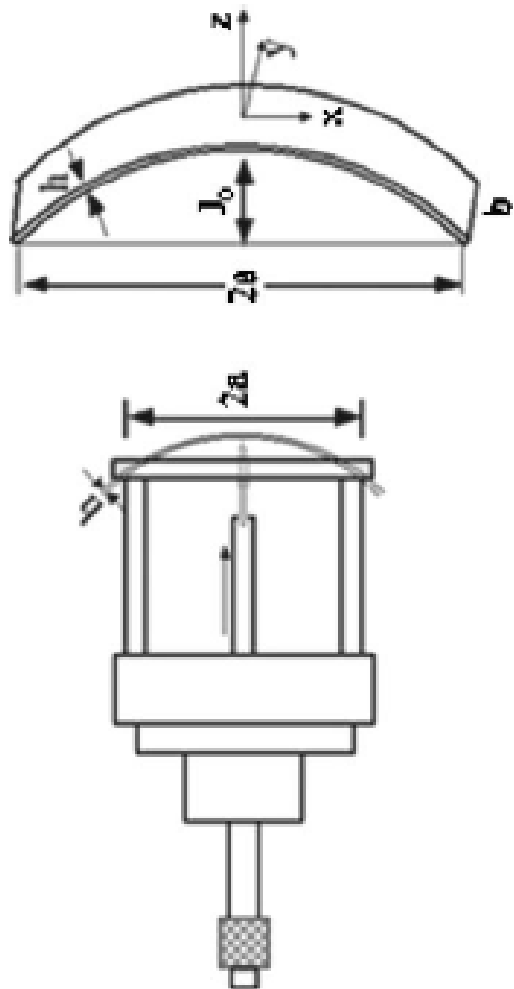
量子阱宽度增大

$$\Delta E \propto 1/w^2$$

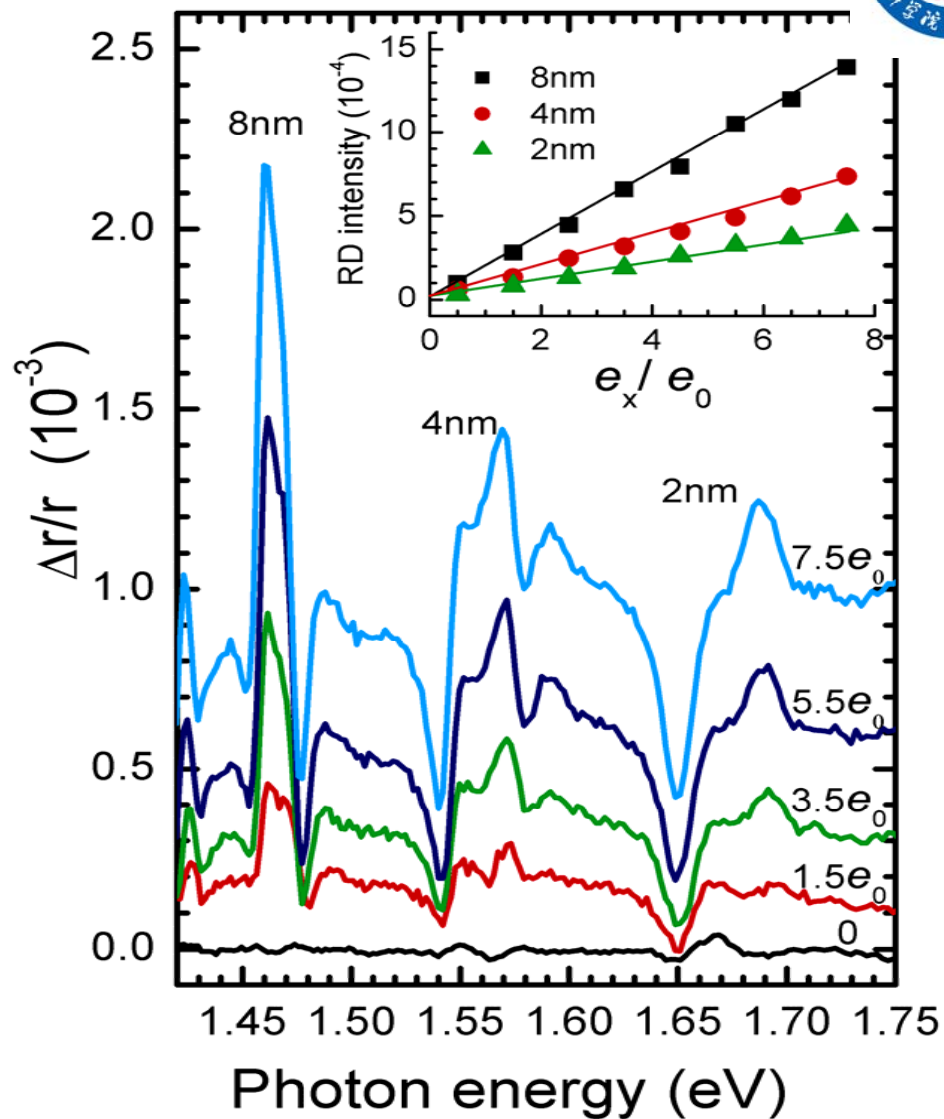
$$\langle 1H | F(z) | 1L \rangle$$

几乎不变: e_{xy}, E_z
近乎指数减小: 界面

应变引起的平面光学各向异性

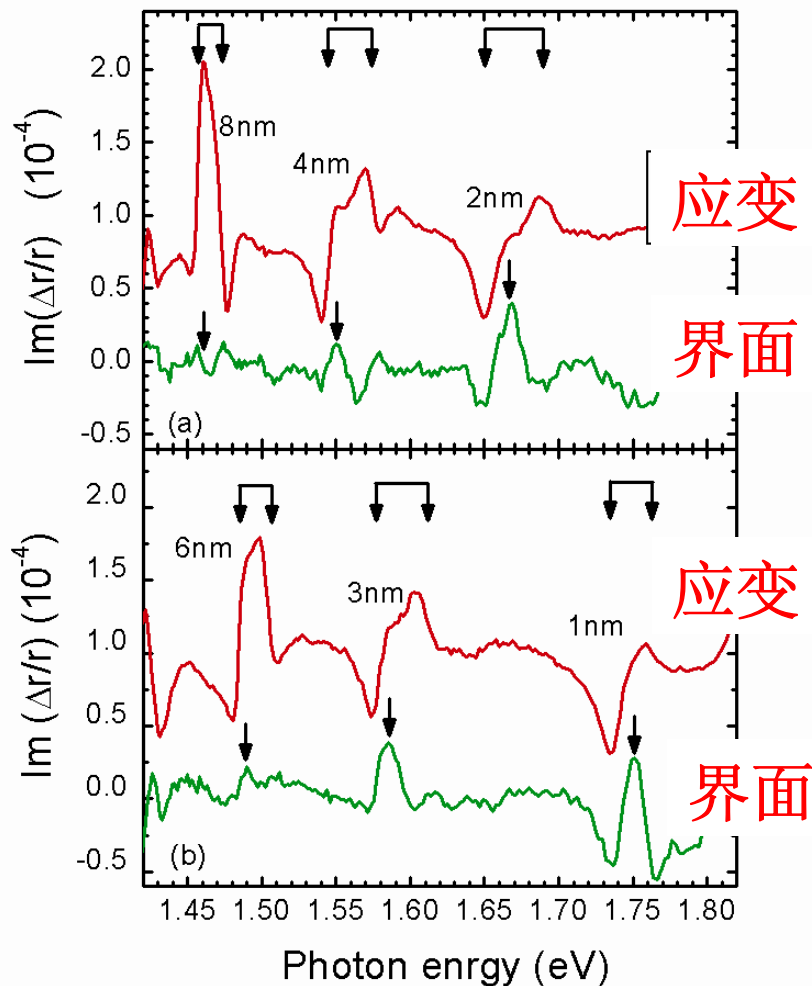


应力装置

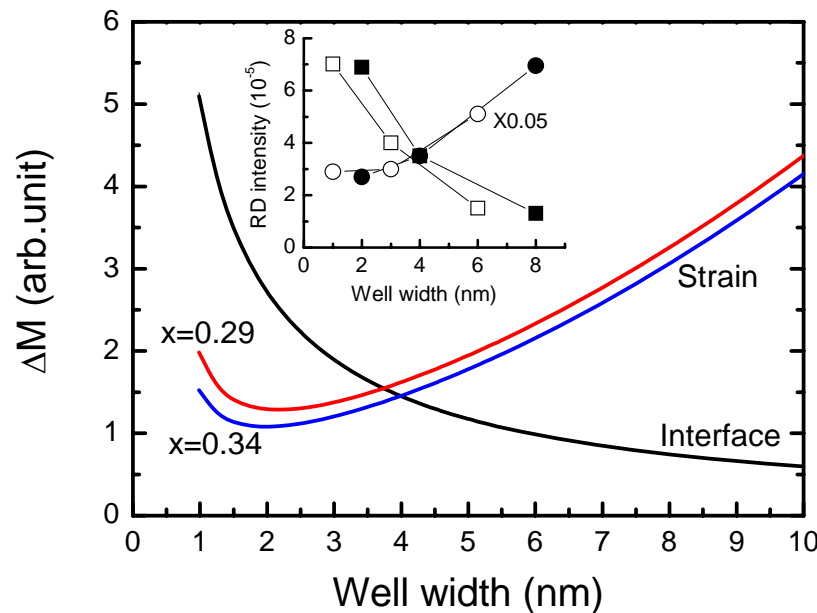


GaAs/AlGaAs量子阱的RDS谱

界面和应变的平面光学各向异性比较



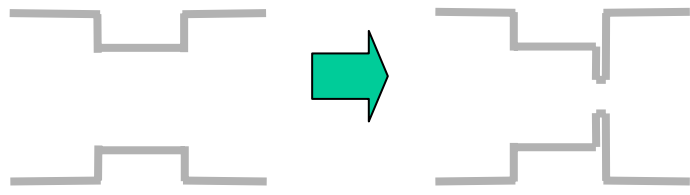
随着阱宽增大，界面导致的光学各向异性信号是减小的，而应力导致的信号则是增加！



不同阱宽GaAs/AlGaAs量子阱的RDS谱

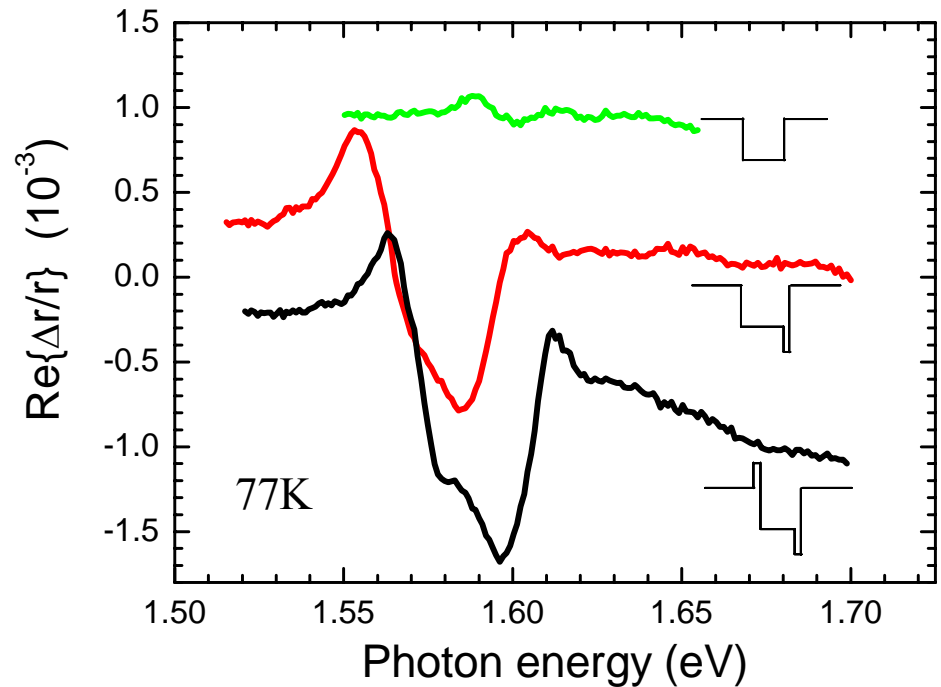
理论计算与实验结果吻合很好,并确定出重要的界面势参数

量子阱光学各向异性的主动控制



量子阱界面插入1ML的InAs后，量子阱各向异性增强了一个量级！

GaAs/AlGaAs量子阱



☑ 指导新型量子器件设计

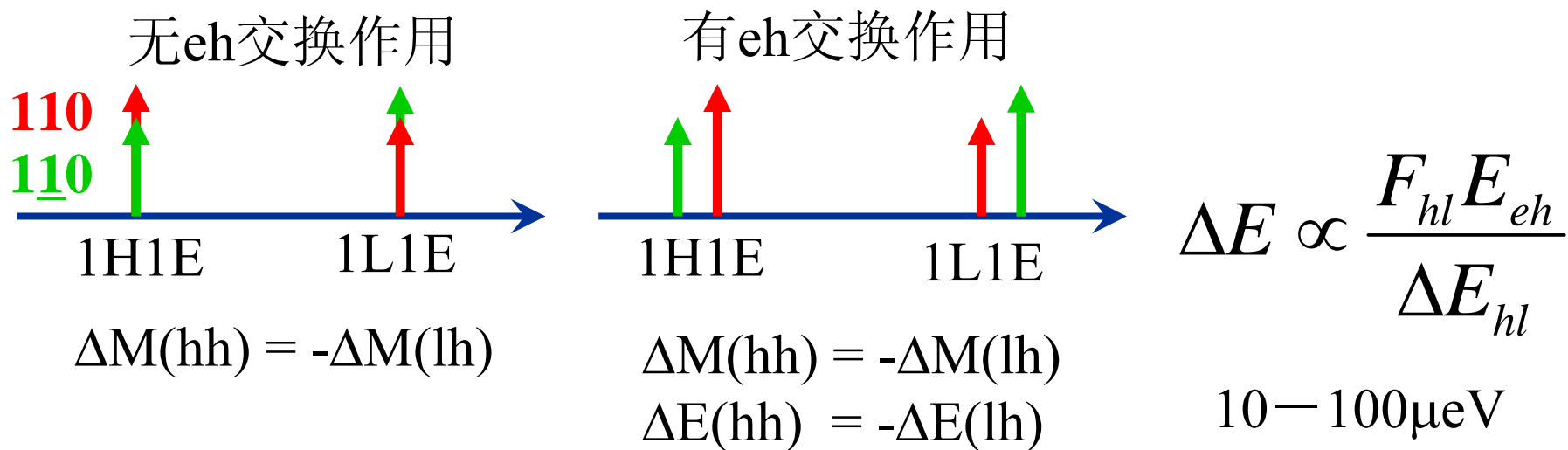


量子阱激子的精细结构

电子空穴交换作用 + C_{2v} 反演不对称 \rightarrow 激子分裂

$$H' = a\vec{J}\vec{\sigma} + F(z)\{J_x J_y\}$$

如果只考虑1H和1L的空穴混合:





☑ 当量子阱的对称性降低到 C_{2v} 时，由于电子空穴交换作用，简并的激子会劈裂成两个能级。

☑ 激子分裂能很小（微电子伏量级），对光子纠缠对形成（量子信息）有重要影响！

☑ 测量困难：激子光谱线宽远大于激子劈裂能量

量子拍和ODMR：II型GaAs/AlAs量子阱
极低温，强磁场

I型量子阱，从未有实验报道！



RDS: 测量激子分裂的新方法

我们证明了, 由于激子分裂, 激子各向异性介电函数 $\Delta\epsilon_s$ 与激子介电函数 ϵ_s 具有以下关系:

$$\Delta\epsilon_s = -\Delta E_s \frac{d\epsilon_s}{dE} + 2P_s \epsilon_s$$

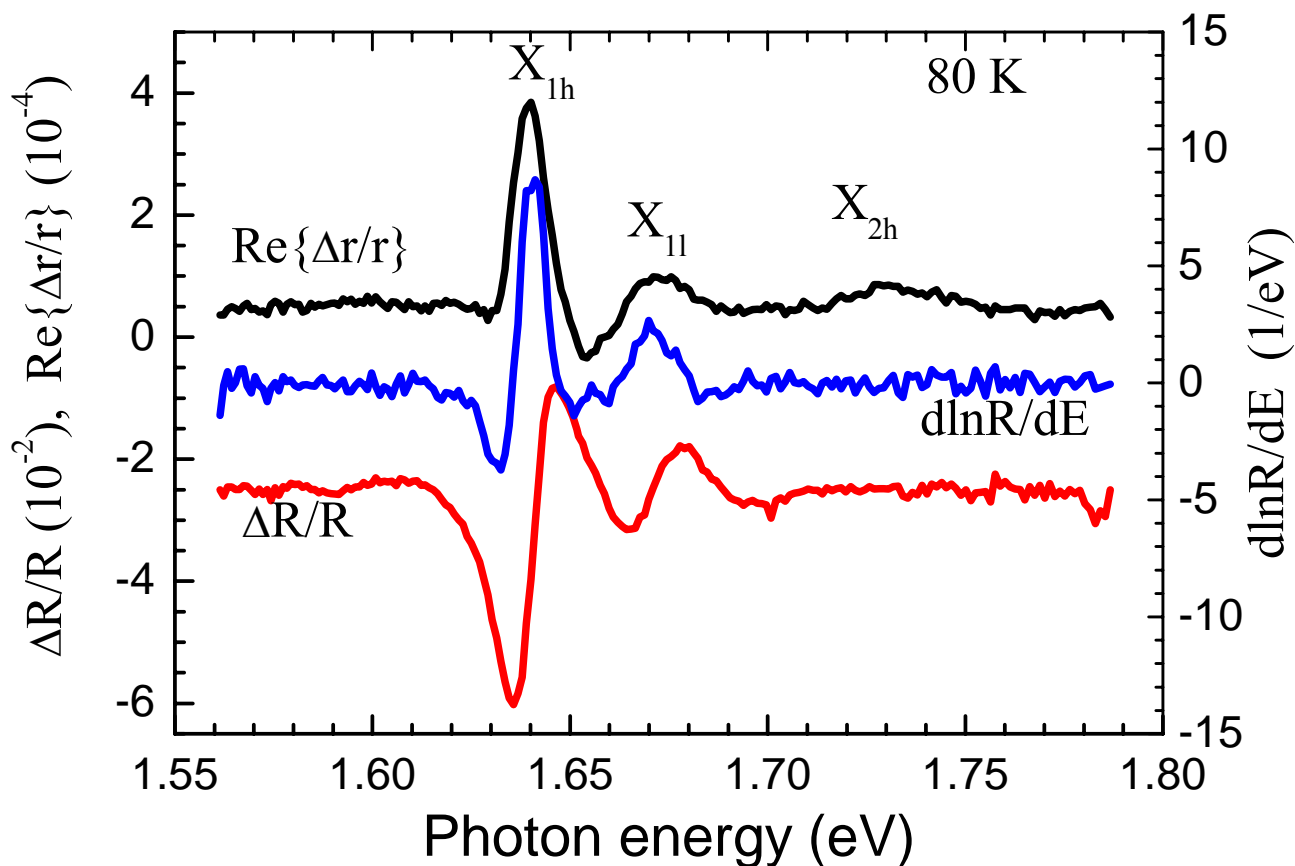
$$2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{\Delta r}{r} \right\} = -\Delta E_s \frac{d \ln R}{dE} + P_s \frac{\Delta R}{R}$$

利用**RDS**, 通过光谱拟合, 直接测量出激子分裂能 ΔE_s 和激子偏振度 P_s

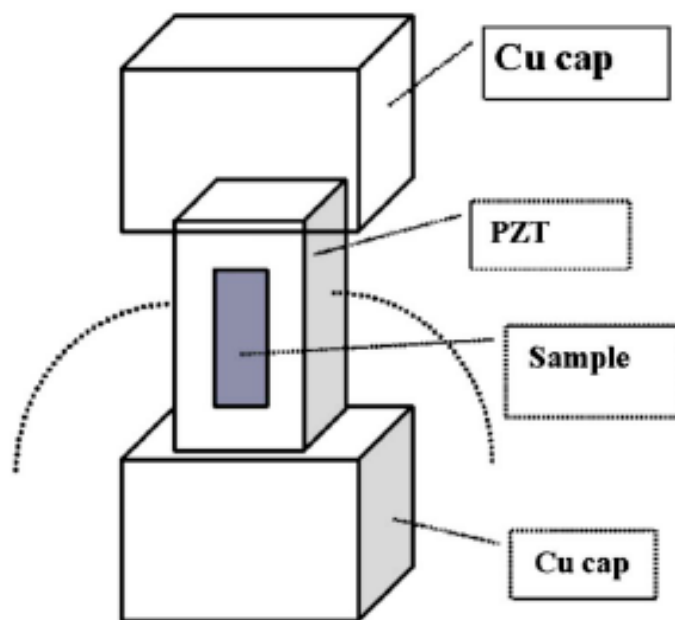
新方法的特点: 液氮温度测量, 无需磁场!
I型量子阱激子分裂

一个例子: 5nm-GaAs/Al_{0.36}Ga_{0.64}As

重空穴激子: $\Delta E=64\mu\text{eV}$; $P=0.008$

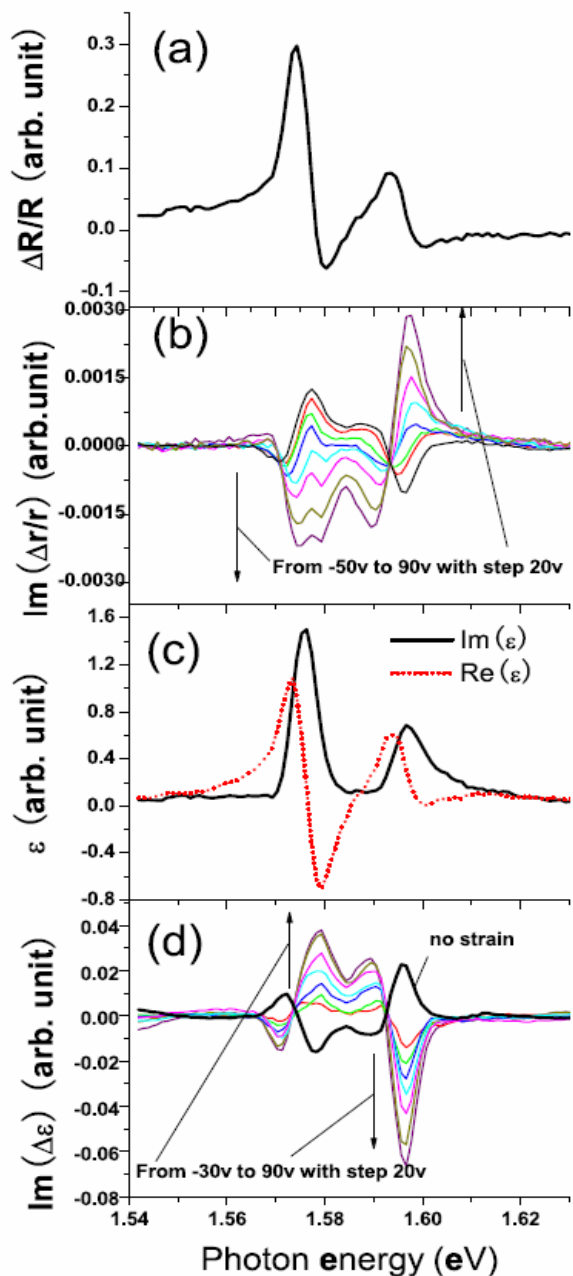


应力能否调节激子分裂？



低温应力装置：压电陶瓷

80K不同应变下的反射谱和RDS谱



常规反射谱

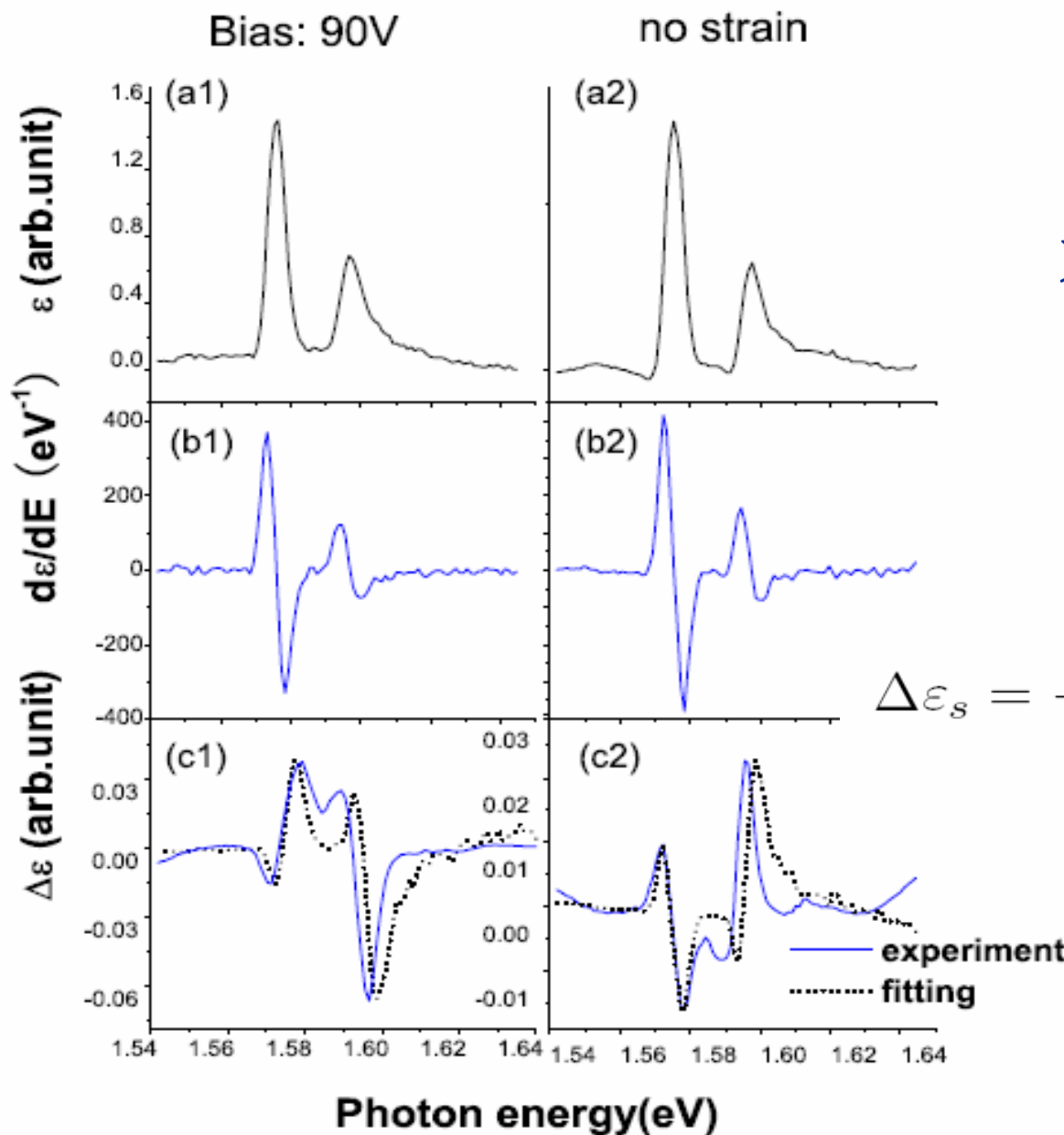
应力作用下的RDS

QW介电函数

各向异性的QW介电函数

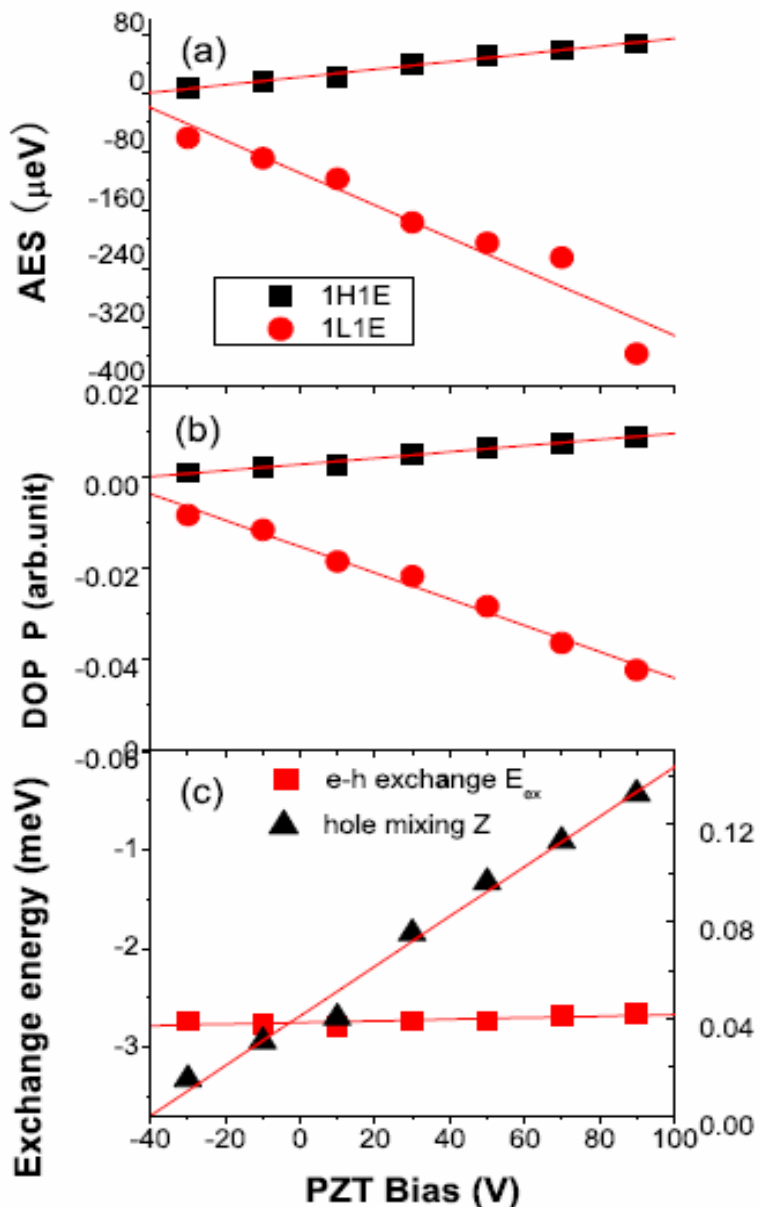
$$\Delta \epsilon_s = -\Delta E_s \frac{d\epsilon_s}{dE} + 2P_s \epsilon_s$$

光谱拟合



$$\Delta\varepsilon_s = -\Delta E_s \frac{d\varepsilon_s}{dE} + 2P_s \varepsilon_s$$

演示了应变对激子分裂的调控作用



激子分裂能随应变线性变化

激子偏振度随应变线性变化

电子空穴交换能基本不变

空穴耦合能反应各向异性
随应变线性变化

InAs/GaAs应变自组织量子点

量子点（人工原子）：

电子三维受限，产生分立能级

基础研究：

精细结构、相干控制、
近藤效应、库仑阻塞、
腔电动力学 等等

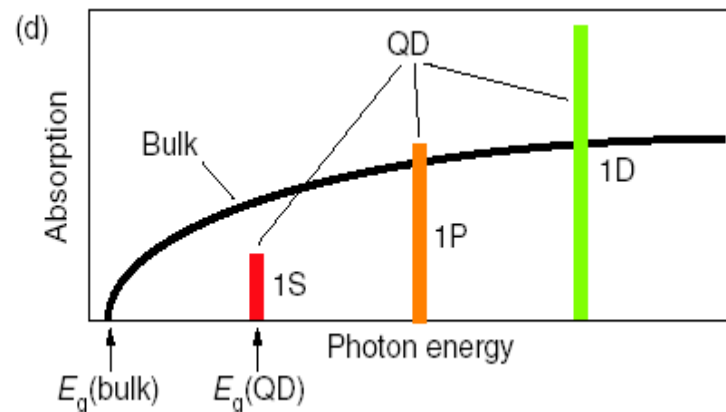
新型器件：

QD 激光器：低阈值电流密度、弱的温度依赖关系

QD 红外探测器：正入射

QD 单光子光源：可控发射

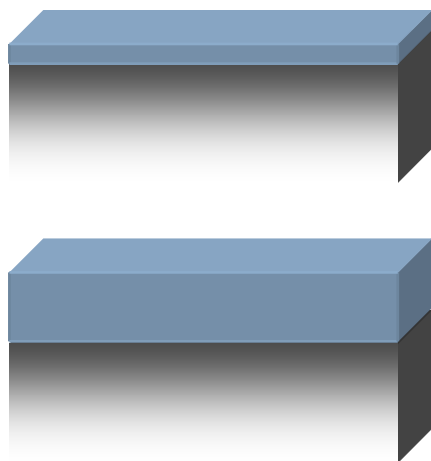
QD 量子比特：容易集成



SK生长模式生长QDs

生长初期,二维层状生长,称为浸润层 (WL)。浸润层厚度超过一个临界厚度时,生长模式转变成三维 (3D) 生长!

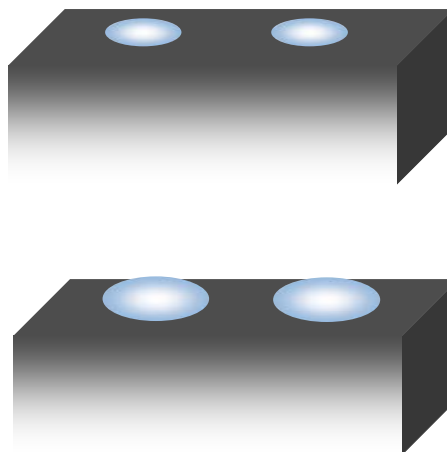
FM



2D growth

晶格匹配

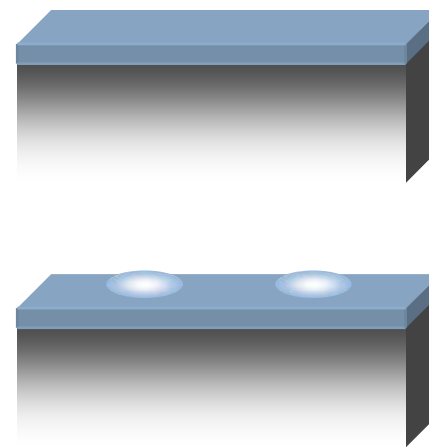
VW



3D growth

大晶格失配

SK

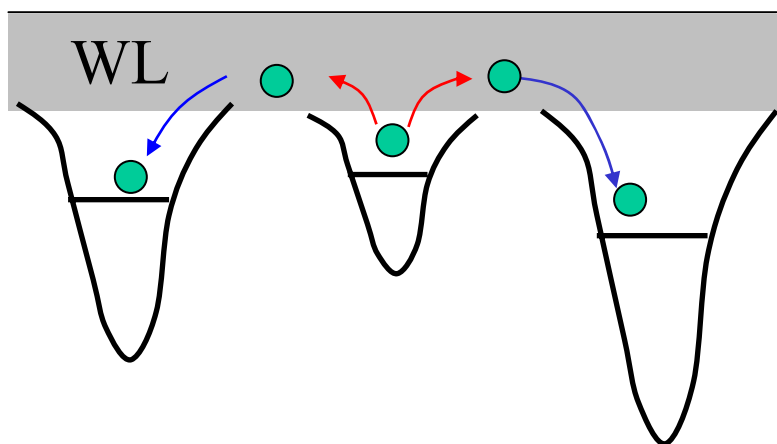


2D-3D growth

小晶格失配

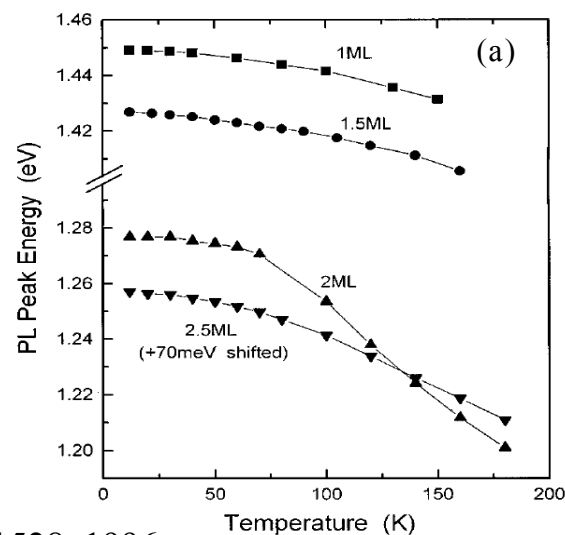
浸润层的重要影响

不同量子点之间载流子再分布的通道



Phys. Rev. B 54, 11528, 1996

发光峰的快速红移



理论预言: WL对QD激光器的调制速度有重要影响

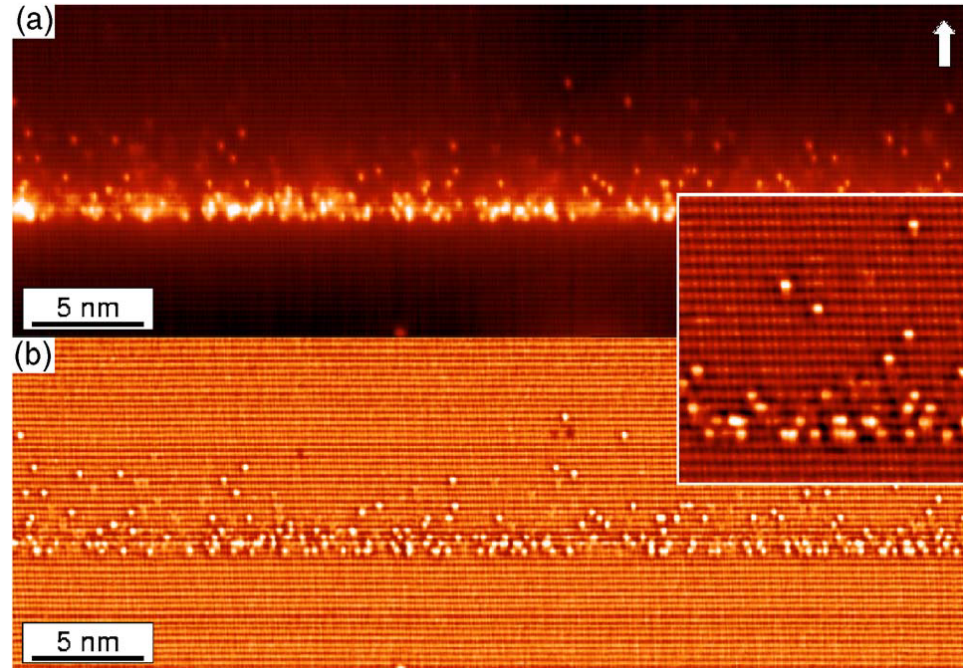
Appl.Phys. Lett. 77, 3325(2000)

如何表征 WL?



- XSTM

InAs WLs can be directly characterized by cross-sectional scanning tunneling microscopy.



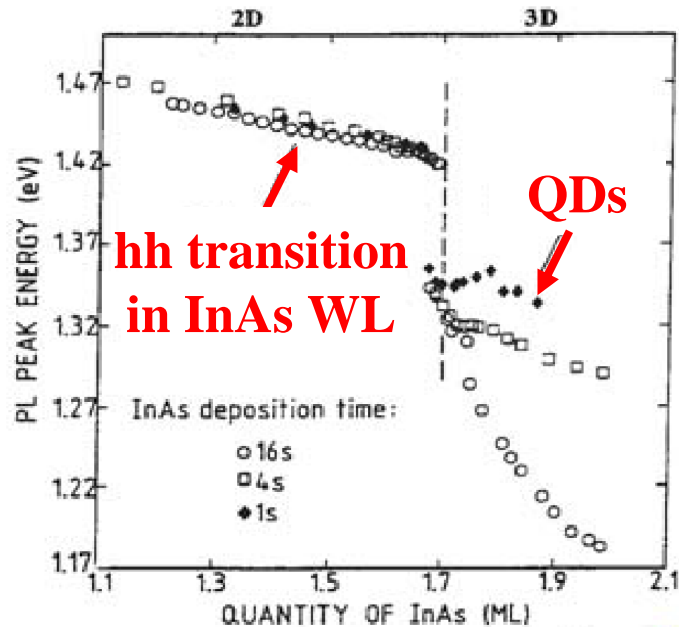
APL. **87**, 111903 2005

问题: 样品必须在真空中解理和测量!

光学方法

Photoluminescence

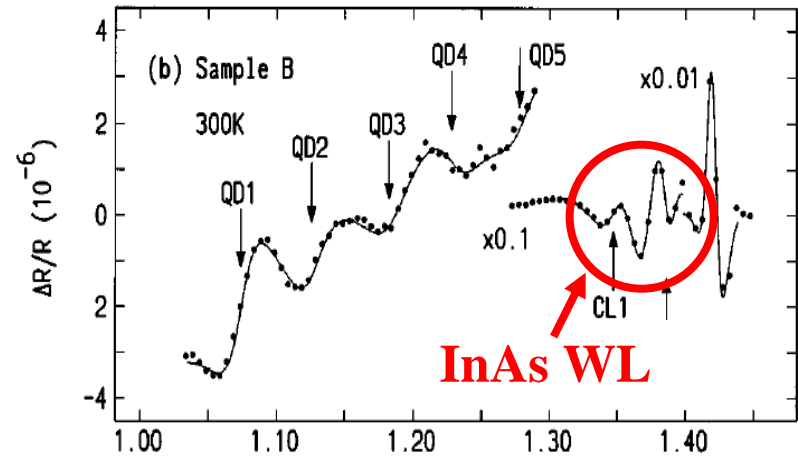
Usually hh is observable before QD formation



J Crystal Growth 150, 351(1995)

Photoreflectance

Both hh and lh are observed, but interfered with E_g signal



Appl. Phys. Lett. 73, 3268(1998)

WL系统研究缺乏!



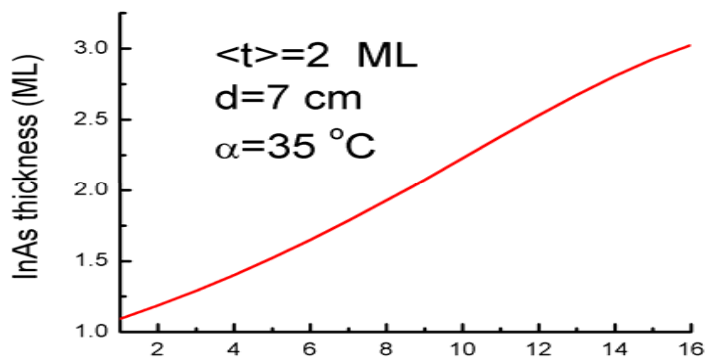
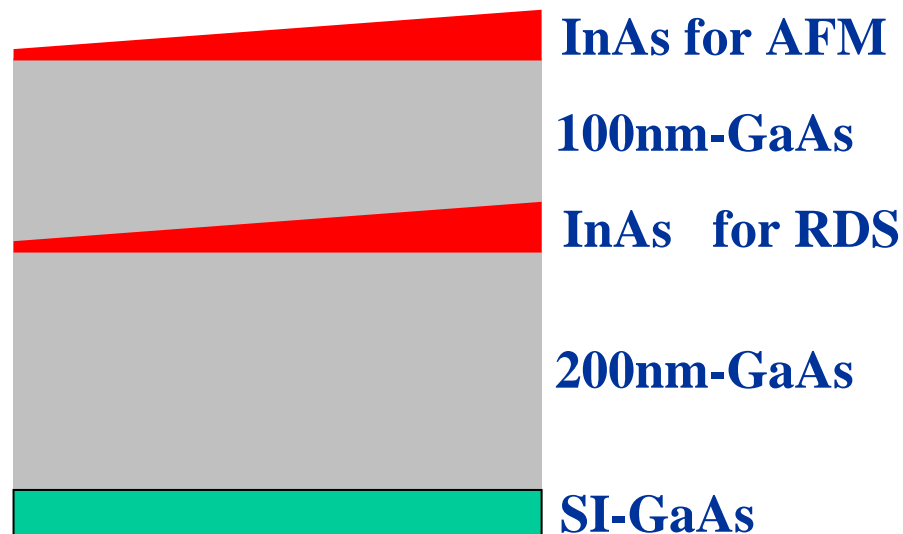
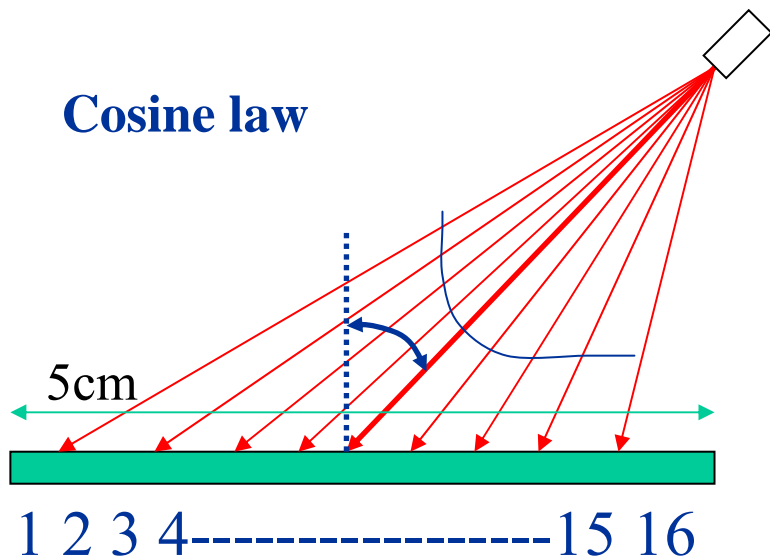
用RDS系统研究了InAs/GaAs QD浸润层的演化

InAs QD浸润层——超薄InAs量子阱

- **In**原子偏析+各向异性应变 → 平面光学各向异性，**RDS**技术可用；
- **GaAs**带边激子通常不具有平面光学各向异性，避免了对**InAs**浸润层信号的干扰；
- **RDS**不但给出跃迁能量，还可给出各向异性强弱信息，后者与浸润层中**In**原子平面分布——**In**原子的运动——密切相关。

样品结构

- 衬底不旋转



2英寸样品上In原子厚度分布

$\langle t \rangle$, 生长温度, 生长速率
2.0ML 530°C 0.008ML/s

QDs和 WL达到某种平衡

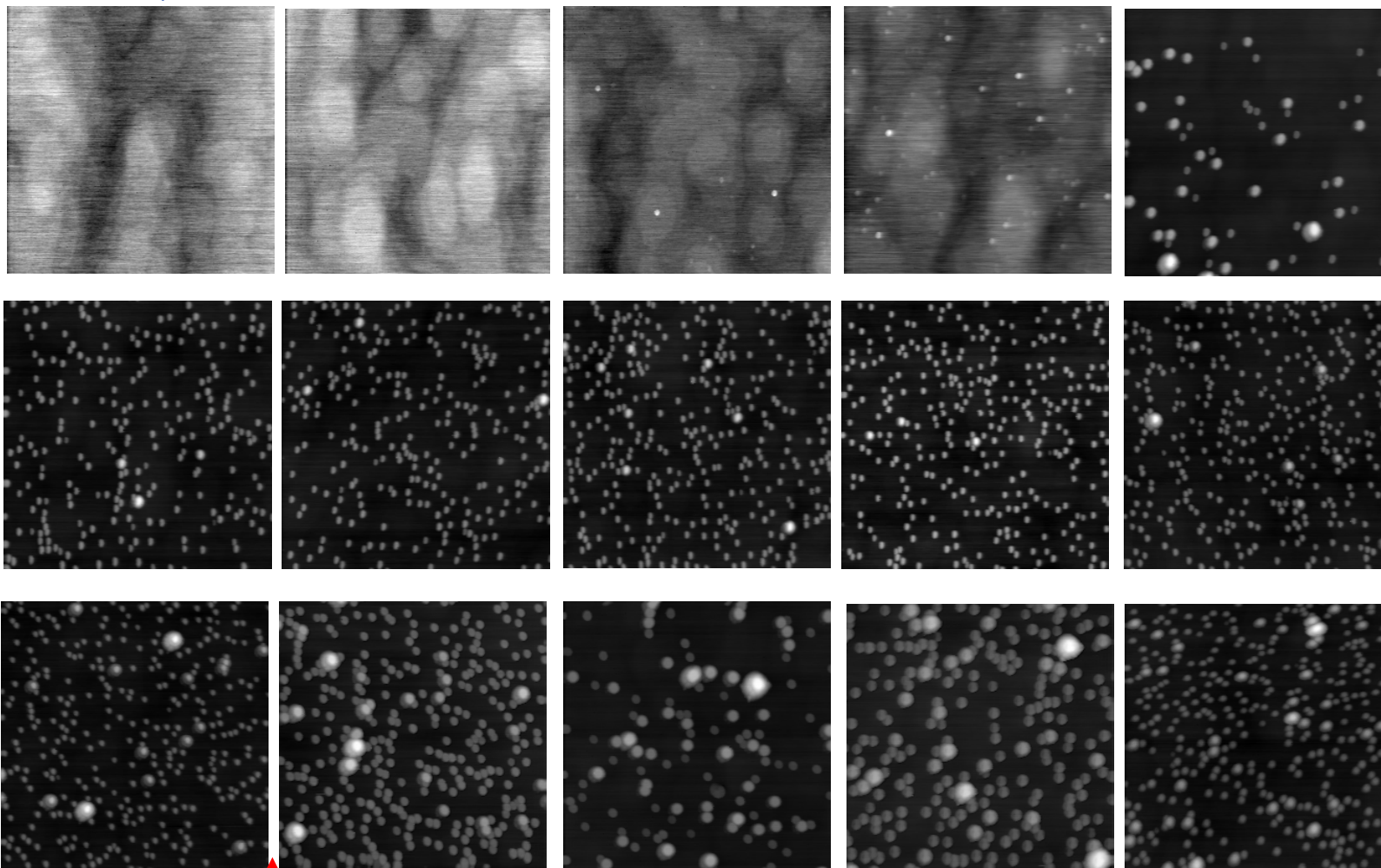
AFM images

$2 \times 2 \mu\text{m}$

FM growth



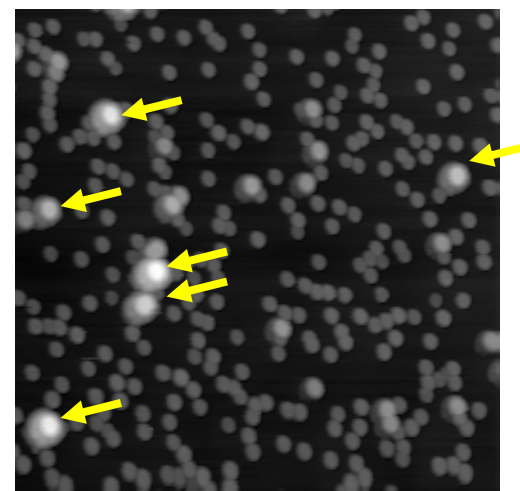
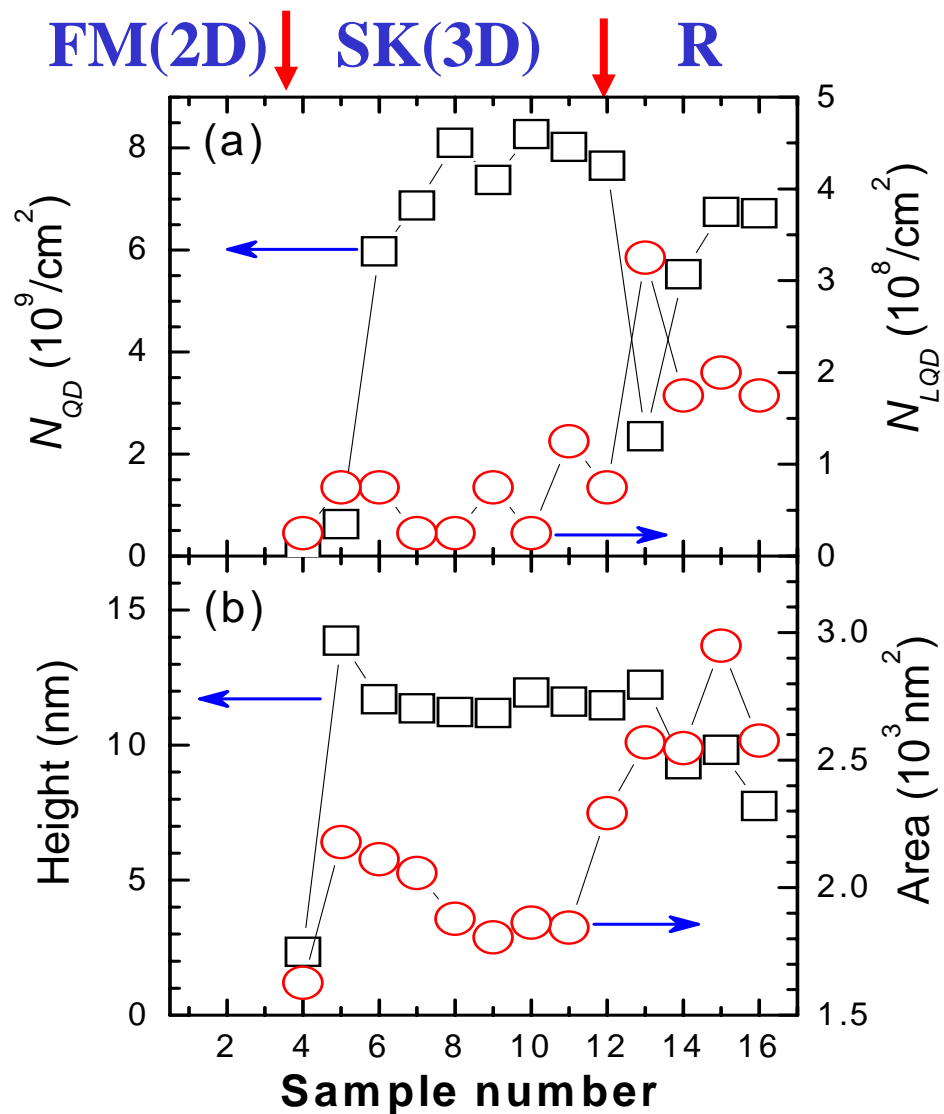
SK growth



Ripening

InAs: 530°C , 0.008ML/s

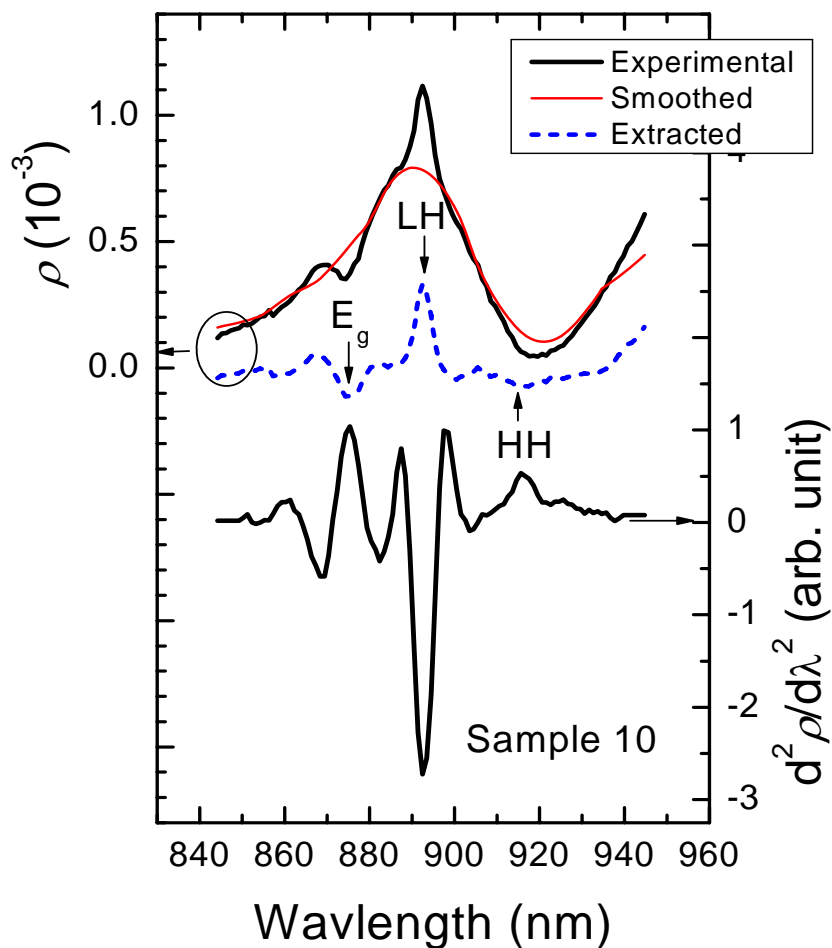
AFM results



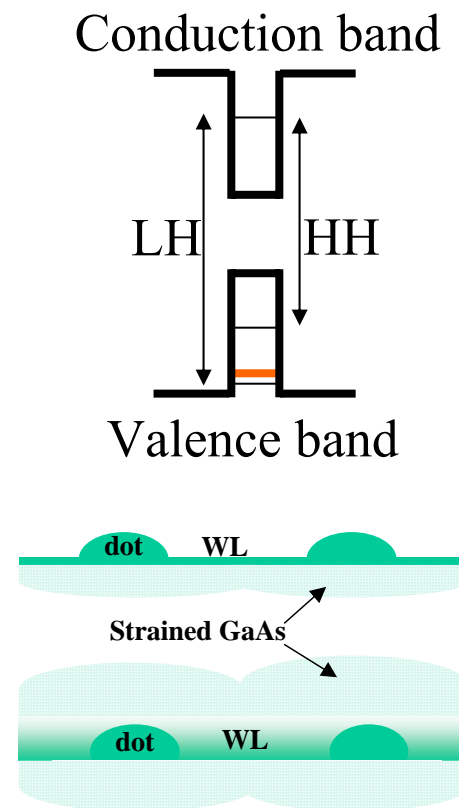
12#

9-16: Huge dots
2 times larger in sizes

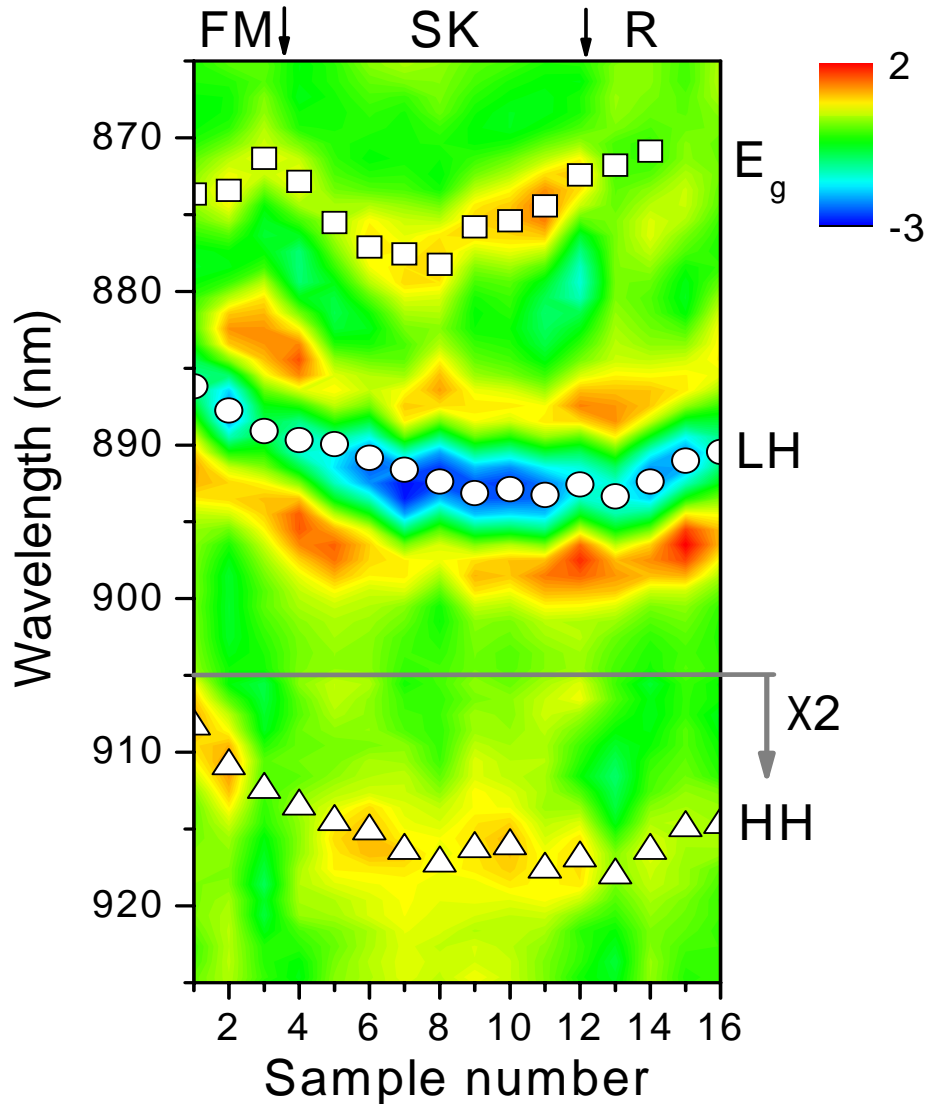
典型的RDS结果 10th



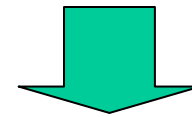
WL as a thin QW



RD spectra varying with sample numbers



Shift of hh and lh transition energies



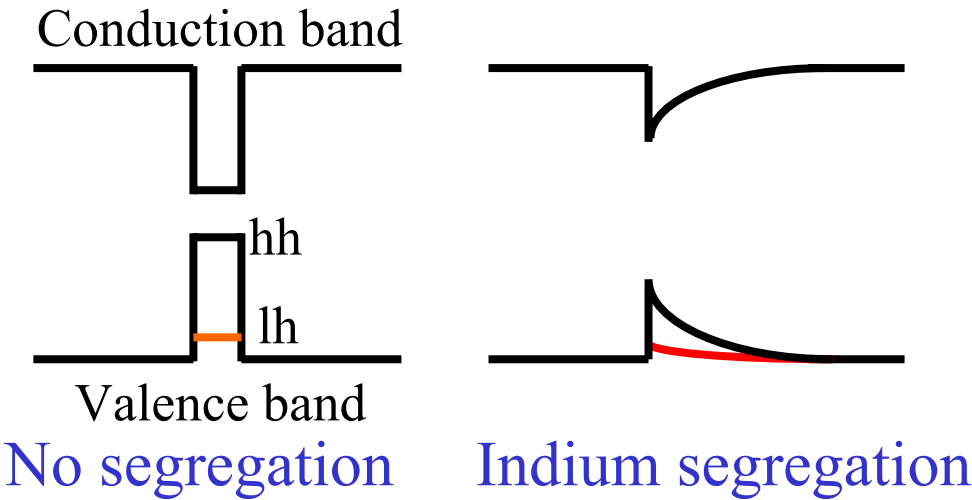
Variation of InAs amount in WL

计算模型

1) In原子偏析

Indium composition distribution

$$X_{In} = \begin{cases} 0 & z < 0 \\ \frac{t_{WL}}{l} \exp(-z/l) & z > 0 \end{cases}$$



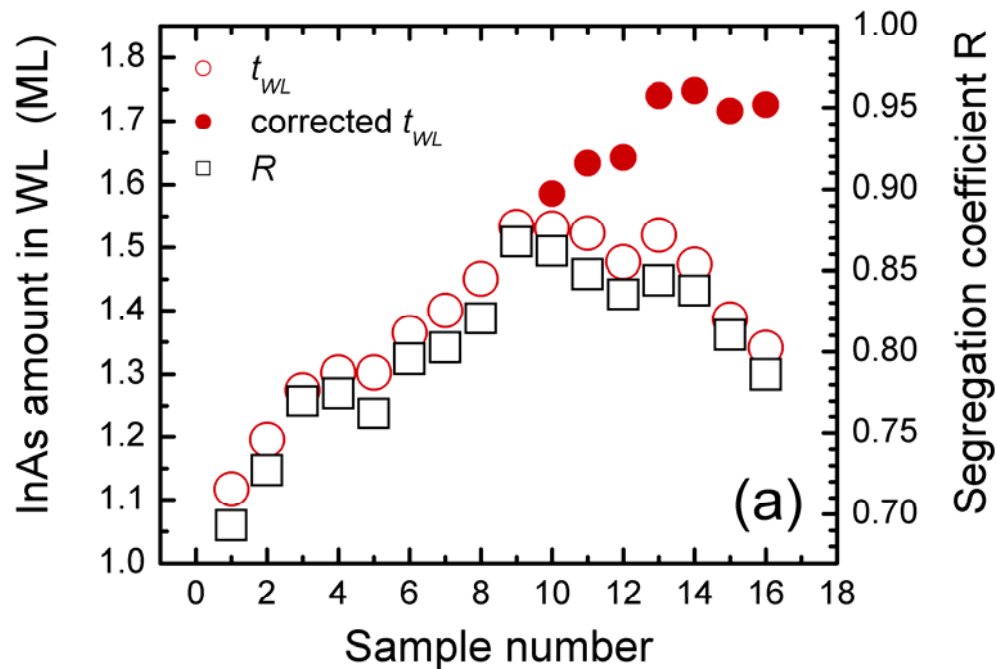
t_{WL} : InAs amount in WL
 l : segregation length

2) 激子效应: binding energies for hh and lh

3) 应变效应

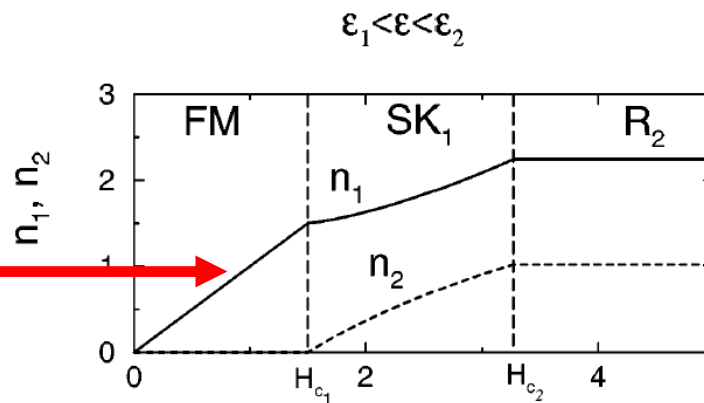
$$E_{hh}, E_{lh} \Rightarrow t_{WL}, l$$

浸润层中InAs含量以及In偏析系数



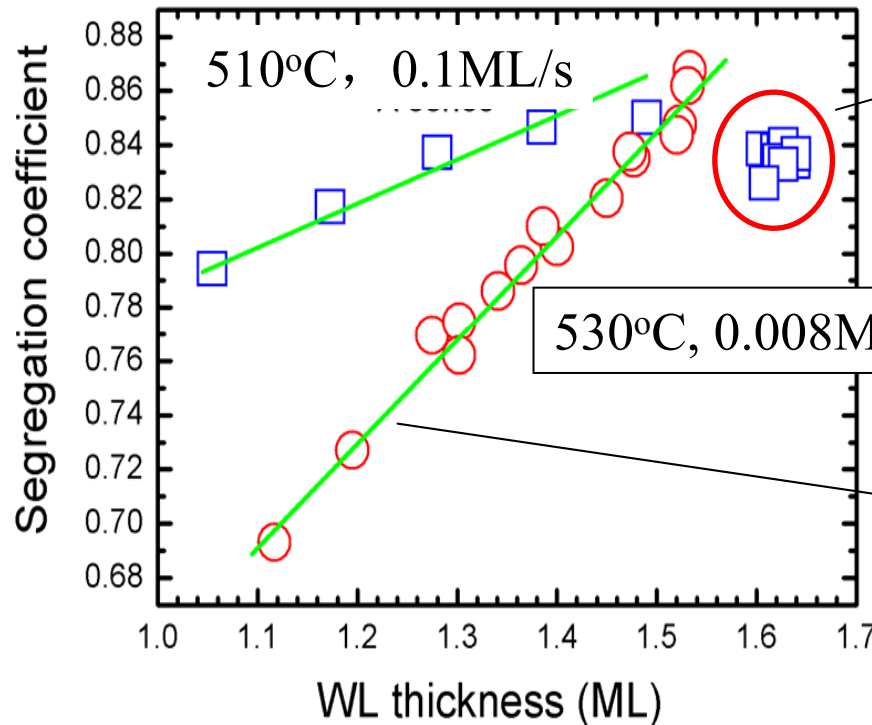
Phys. Rev. Lett. 79, 3708 (1997)

InAs WL含量



In偏析系数与浸润层中InAs含量的关系

没人进行过相关实验研究



高密度QD，释放了浸润层的应变，减弱In原子的偏析。

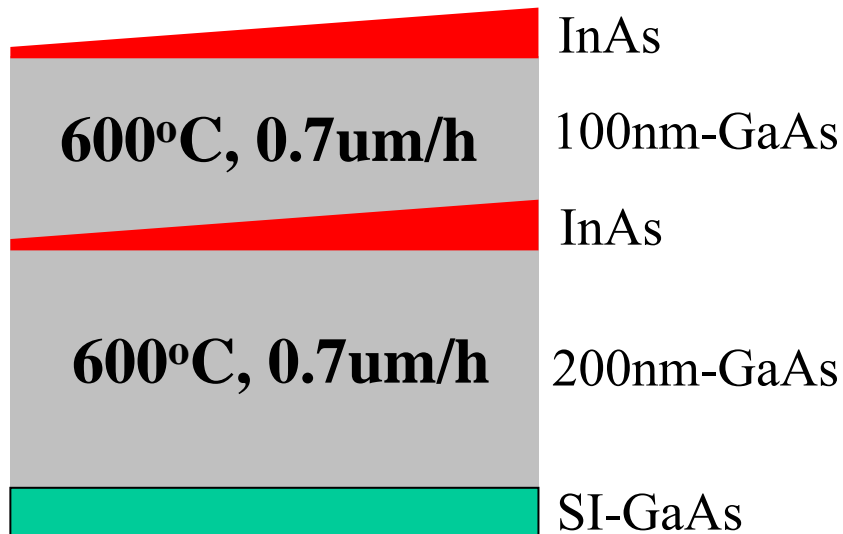
高的温度导致浸润层In和衬底中Ga原子的互混，释放浸润层的应变，导致In原子偏析减小。

Segregation coefficient varies linearly with the InAs amount in WL before SK growth: **strain as driven force!**



生长温度和2D-3D转变厚度的关系?

衬底不旋转

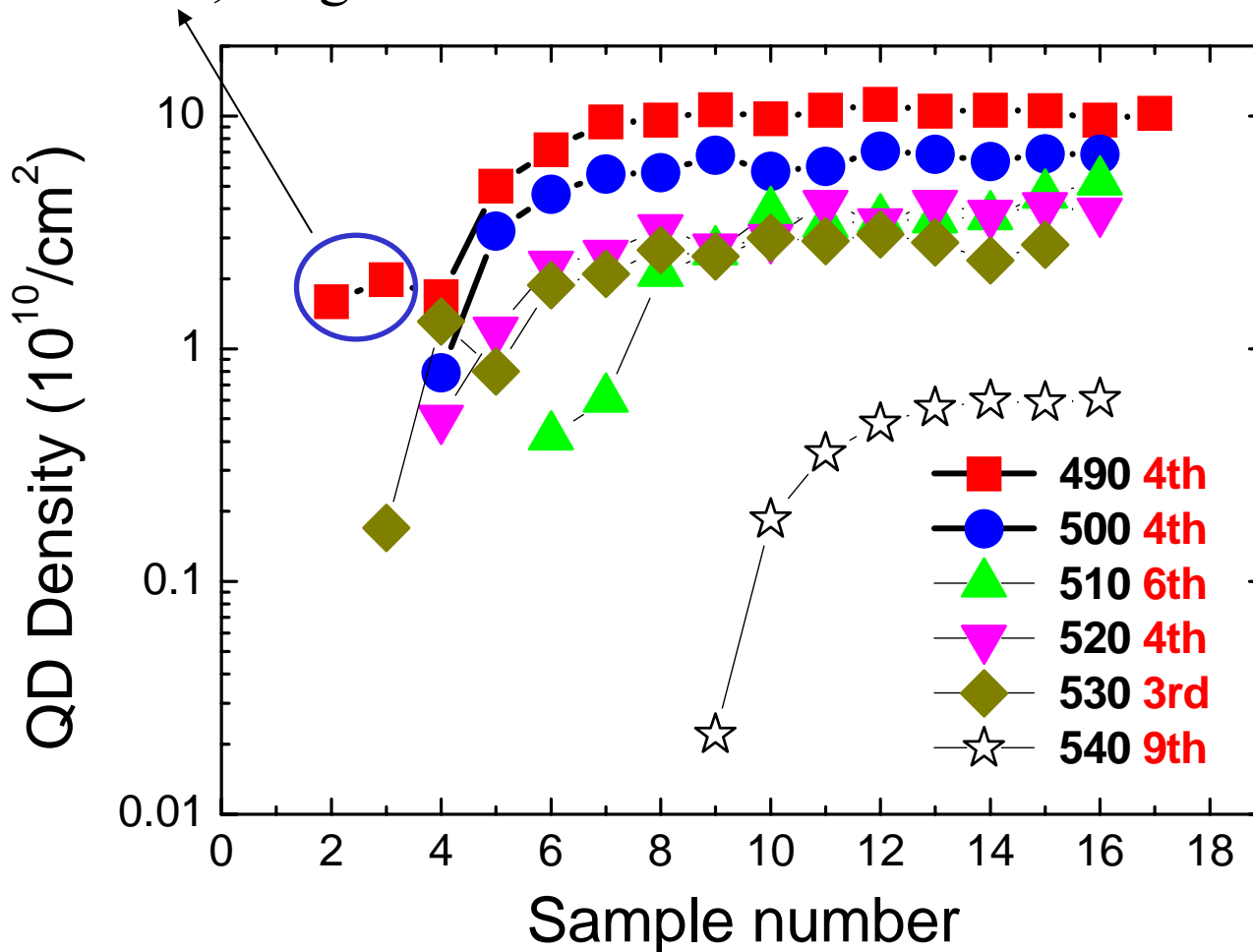


1 2 3 ----- 15 16

$\langle t \rangle$	Growth Temp,	Vg
2.0ML	490°C	0.1ML/s
2.0ML	500°C	0.1ML/s
1.9ML	510°C	0.1ML/s
2.0ML	520°C	0.1ML/s
2.0ML	530°C	0.1ML/s
2.0ML	540°C	0.1ML/s

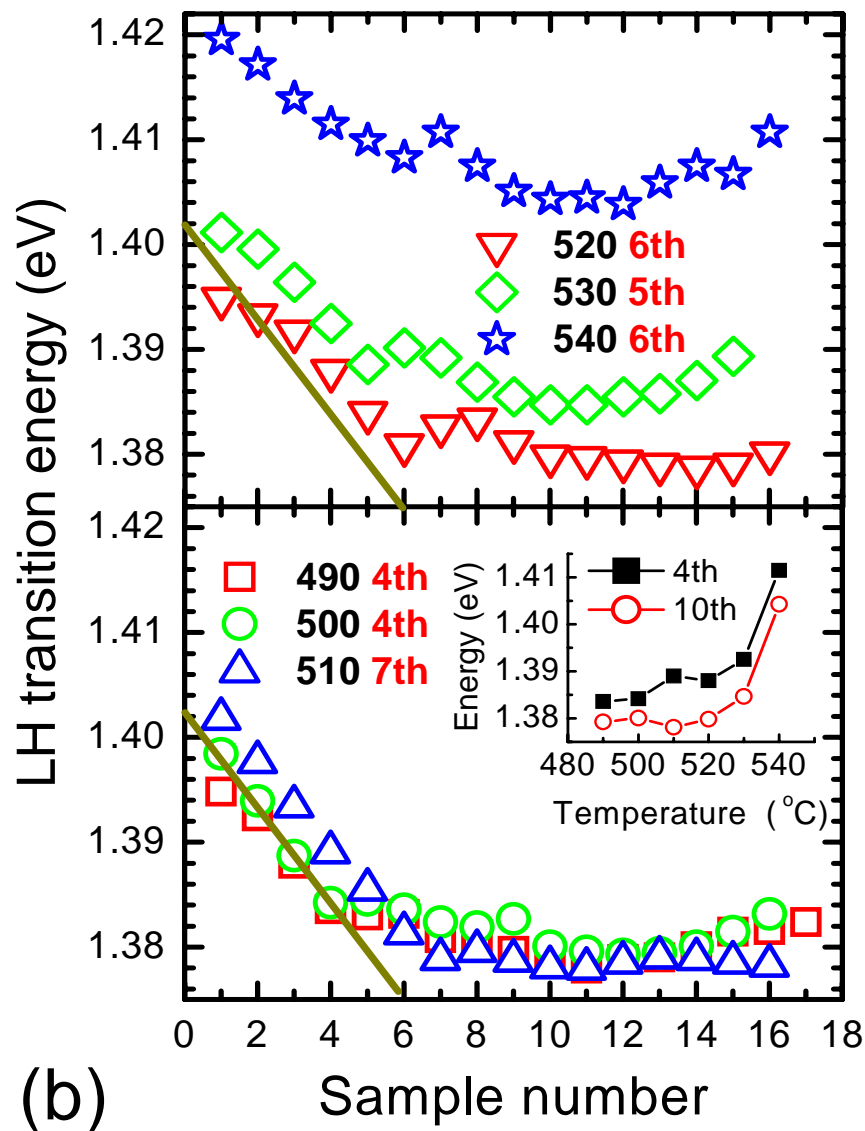
不同生长温度时的QD密度 (AFM测量结果)

2D islands, height < 1nm



2D-3D 转变标志: 3D-InAs岛密度快速增加

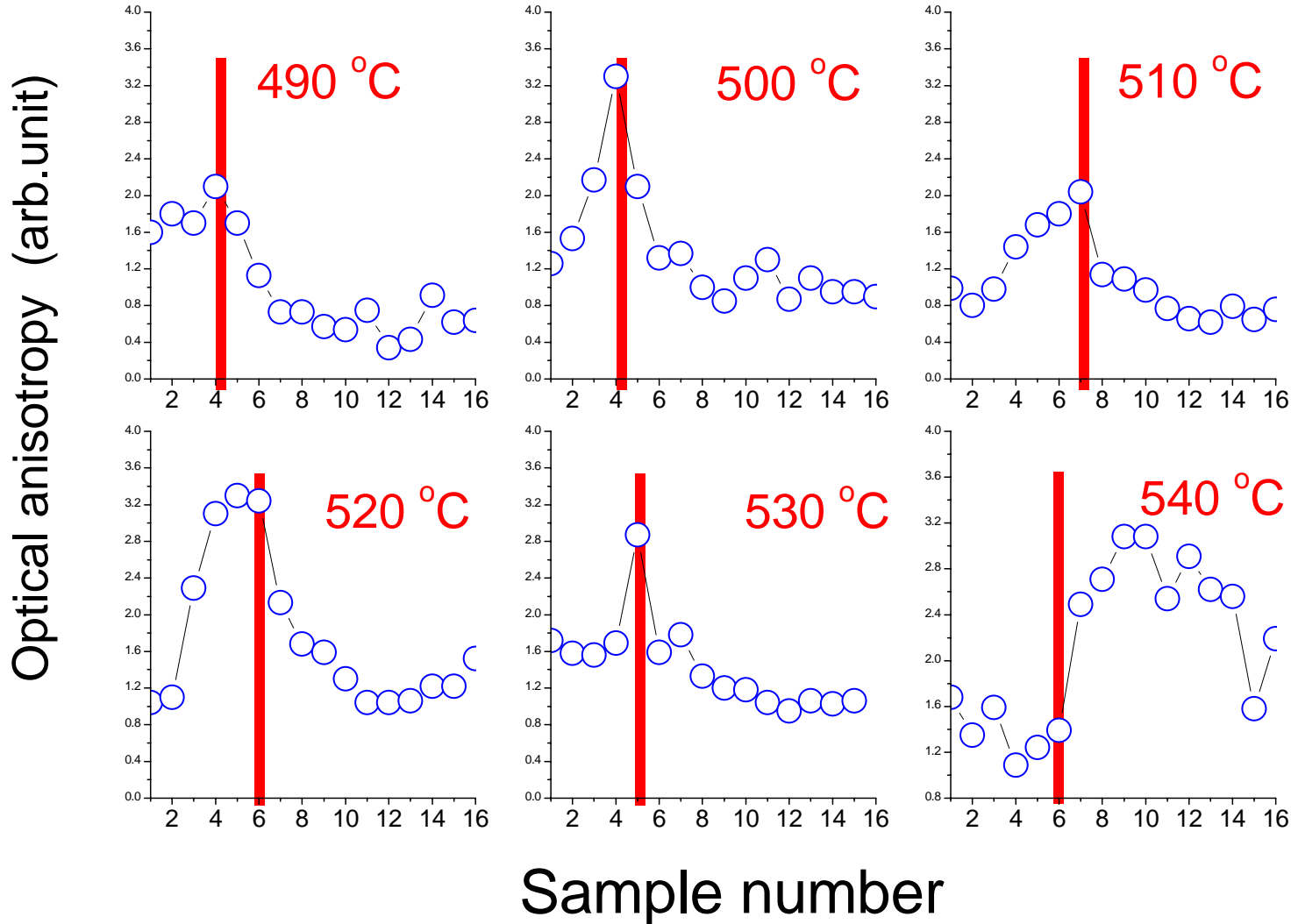
浸润层轻空穴相关跃迁能量的变化



先线性减小：
InAs增加
后偏离线性减小，
趋近平衡值：
InAs停止增加并趋
近饱和值

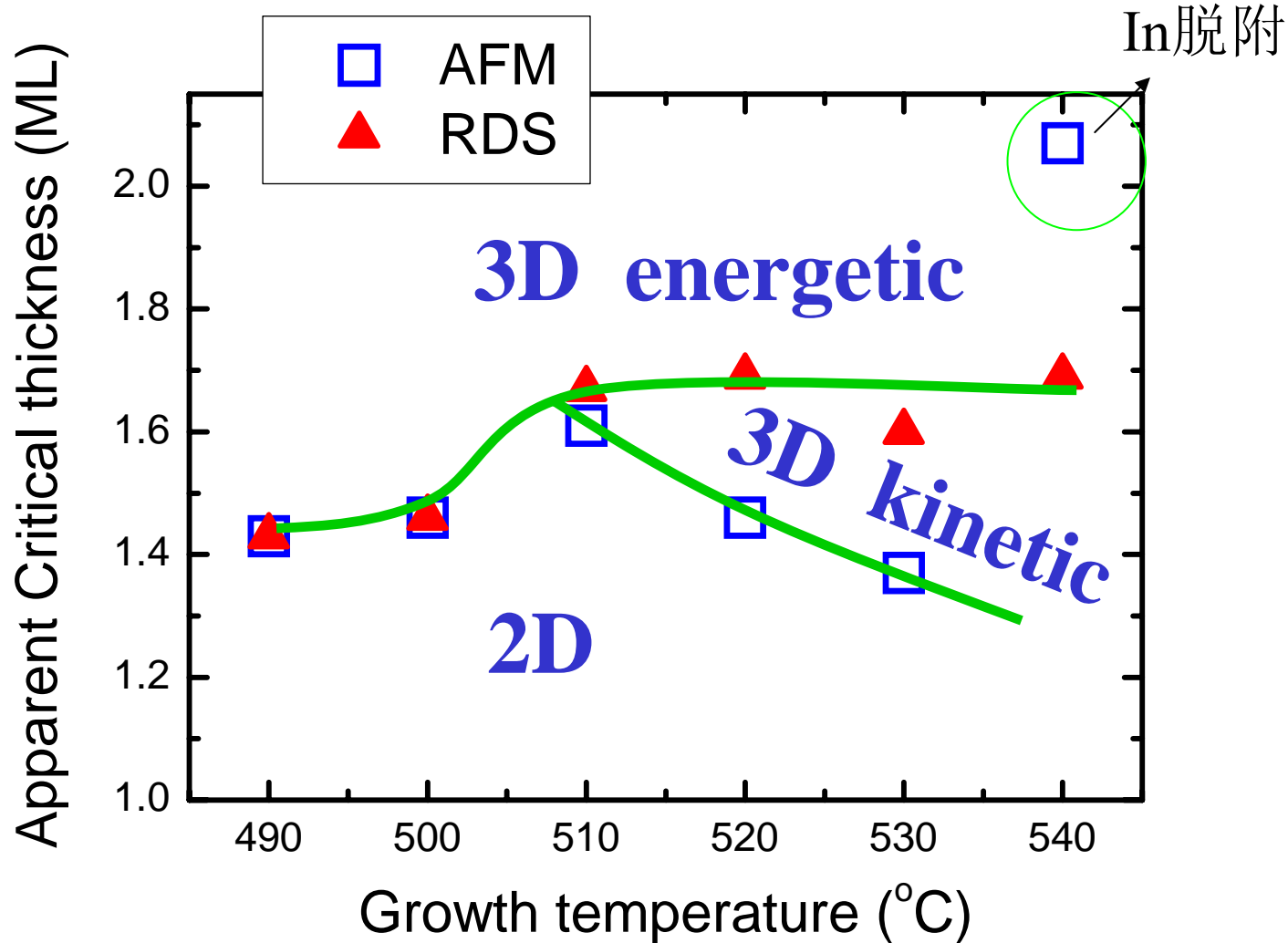
2D-3D 生长转变：
偏离线性减小之处

浸润层平面光学各向异性的演化



Red bars: InAs becomes saturated in WL by RDS
 \Leftrightarrow rapid change of OA, anisotropic strain in WL

2D-3D生长临界厚度随生长温度的变化



APL88P161903(2006): small islands @1.45ML, 450°C
 large islands @1.6ML, 450-600°C



效应之二：自旋劈裂



自旋简并和自旋分裂

空间反演对称

$$\mathbf{E}_{\pm}(\mathbf{k}) = \mathbf{E}_{\pm}(-\mathbf{k})$$

时间反演对称

$$\mathbf{E}_{\pm}(\mathbf{k}) = \mathbf{E}_{\mp}(-\mathbf{k})$$

自旋简并

$$\mathbf{E}_{\pm}(\mathbf{k}) = \mathbf{E}_{\mp}(\mathbf{k})$$

☑ 空间反演不对称
电场 应变 结构

☑ 时间反演不对称
磁场

零场分裂

Zeeman分裂



空间反演不对称的自旋分裂

自旋轨道 (SO) 相互作用

$$H_{\text{SO}} = -\frac{\hbar}{4m_0^2c^2} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p} \times (\nabla V_0)$$

V_0 : 原子势

自旋
 $\boldsymbol{\sigma}$

轨道运动
 $\mathbf{p}, \mathbf{k}, \mathbf{v}$

反演不对称
 ∇V_0

电场
应变
结构

Lorentz变换: 在电子静止坐标系中, 以 $-\mathbf{v}$ 运动的电场 \mathbf{E} 产生了一个有效磁场 \mathbf{B}

$$\mathbf{B} = -\frac{\gamma}{c^2} \mathbf{v} \times \mathbf{E}$$

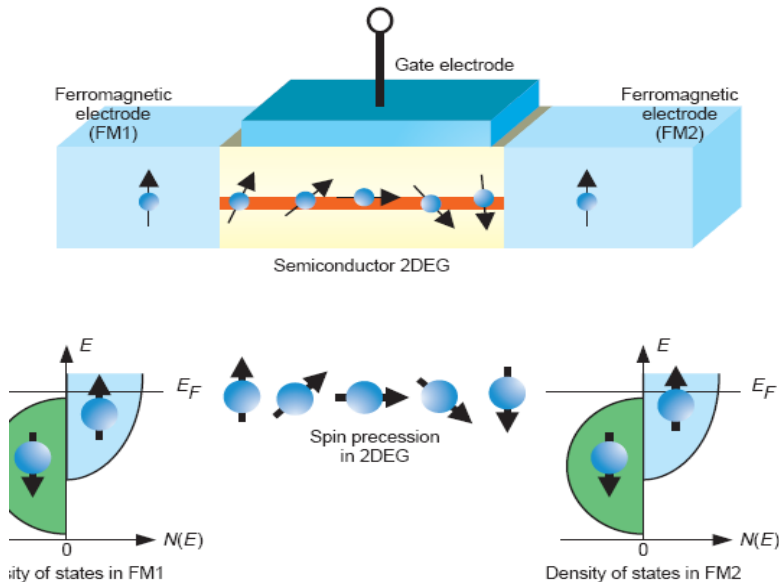
自旋轨道耦合

自旋分裂

操纵电子自旋

C_{2V} 对称：电场、应变、结构设计

$$H_{SO} = -\frac{\hbar}{4m_0^2c^2} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p} \times (\nabla V_0)$$



自旋晶体管：
SO耦合导致自旋进动

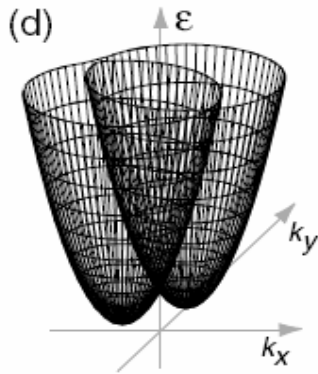
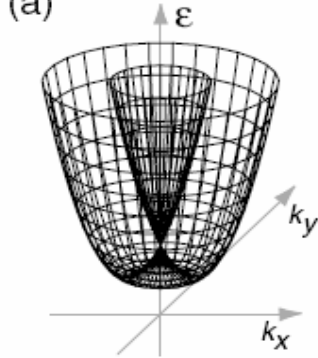
S. Datta and B. Das,
Appl. Phys. Lett.
56, 665(1990)

Y方向上的电场： σ_z, ρ_x

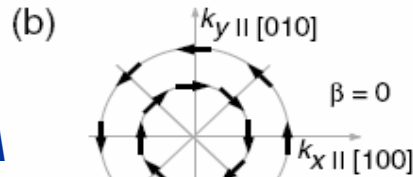
量子阱结构的自旋分裂

Z方向具有结构反演不对称：电场，应变，不对称的限制势

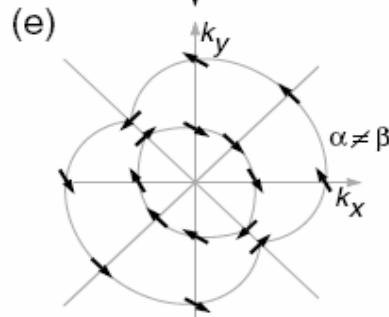
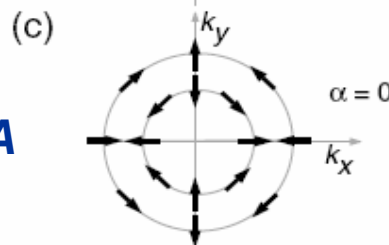
(a) 闪锌矿结构



SIA



BIA



纤锌矿结构

BIA哈密顿量与SIA的相同！
各向同性的自旋分裂

自旋分裂的观察：

- 1) 零场分裂，SdH振荡
- 2) 本征自旋霍尔效应
(逆自旋霍尔效应)
- 3) 自旋光电流

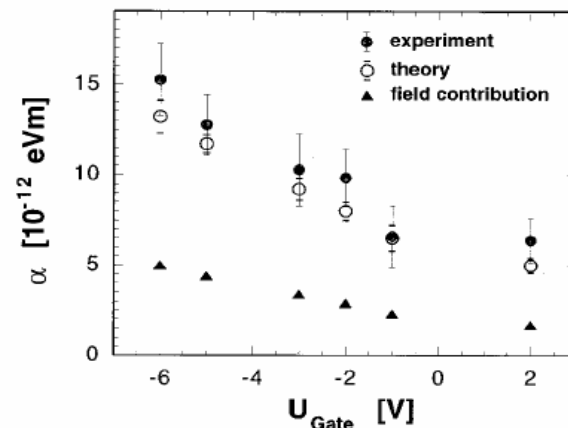
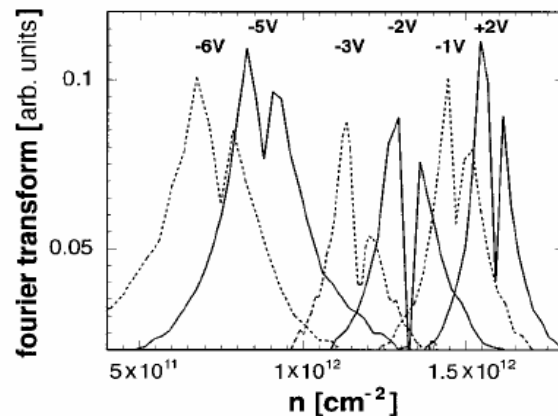
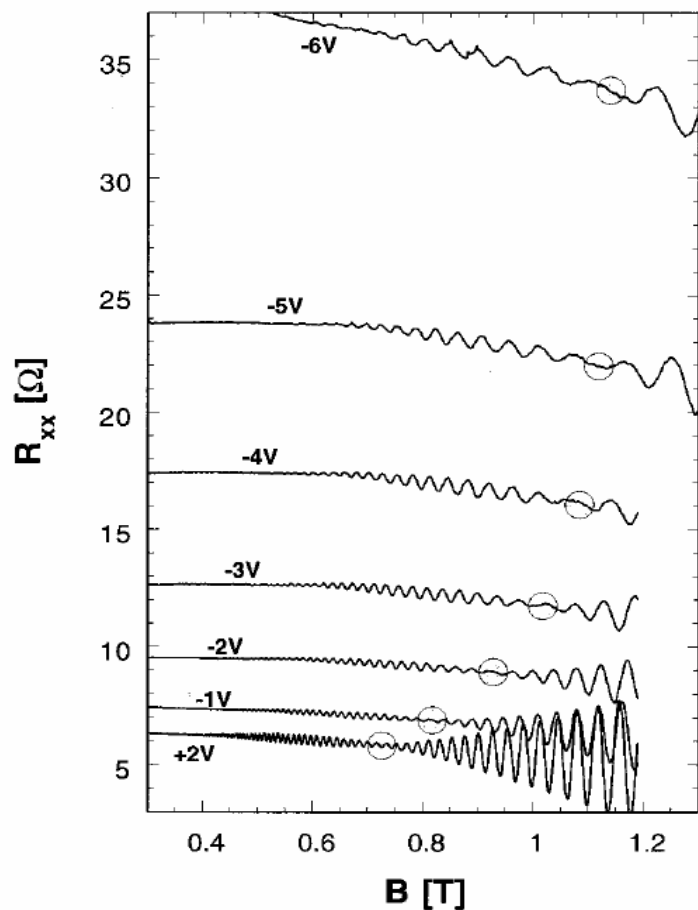
$$\hat{H}_{SO} = \alpha(\sigma_x k_y - \sigma_y k_x) + \beta(\sigma_x k_x - \sigma_y k_y)$$

SIA

BIA

1) 零场自旋分裂(SdH振荡的拍频现象)

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ 调制掺杂2DEG的低温输运

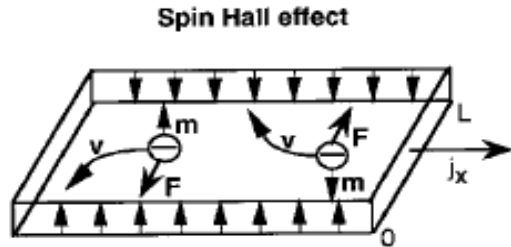


PRB55R1958(1997)

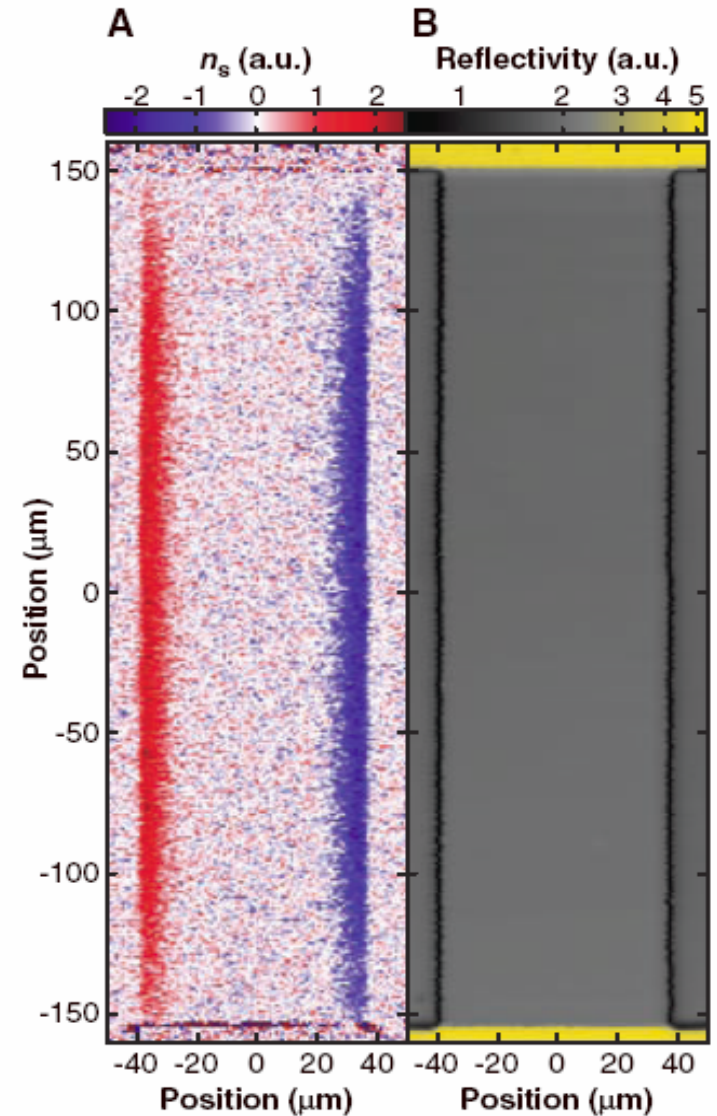
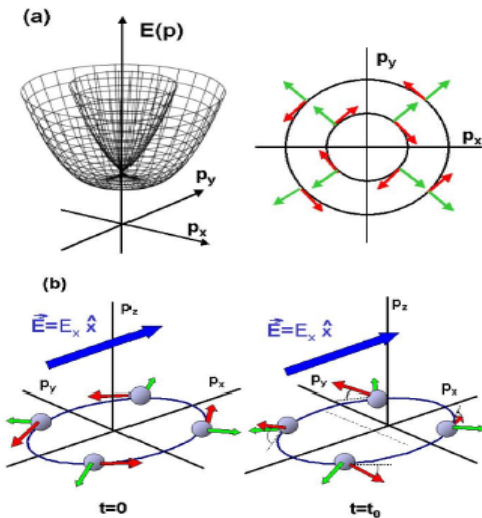
可通过栅压来控制自旋分裂的大小

2) 内禀自旋Hall效应

2 μm n-GaAs on AlGaAs



有人认为是本征的: Rashba 效应

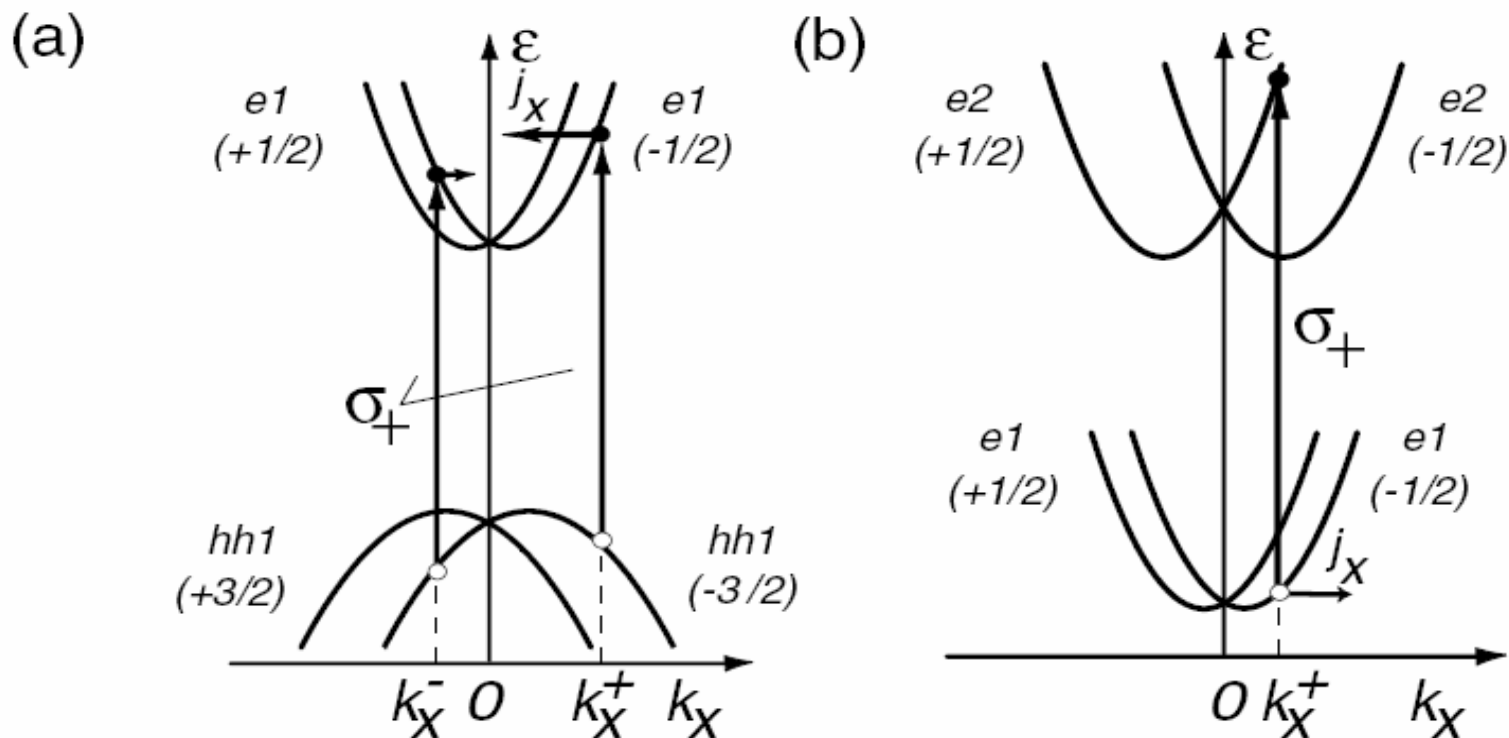


PRL92P126603(2004)

Science306-1910-2004

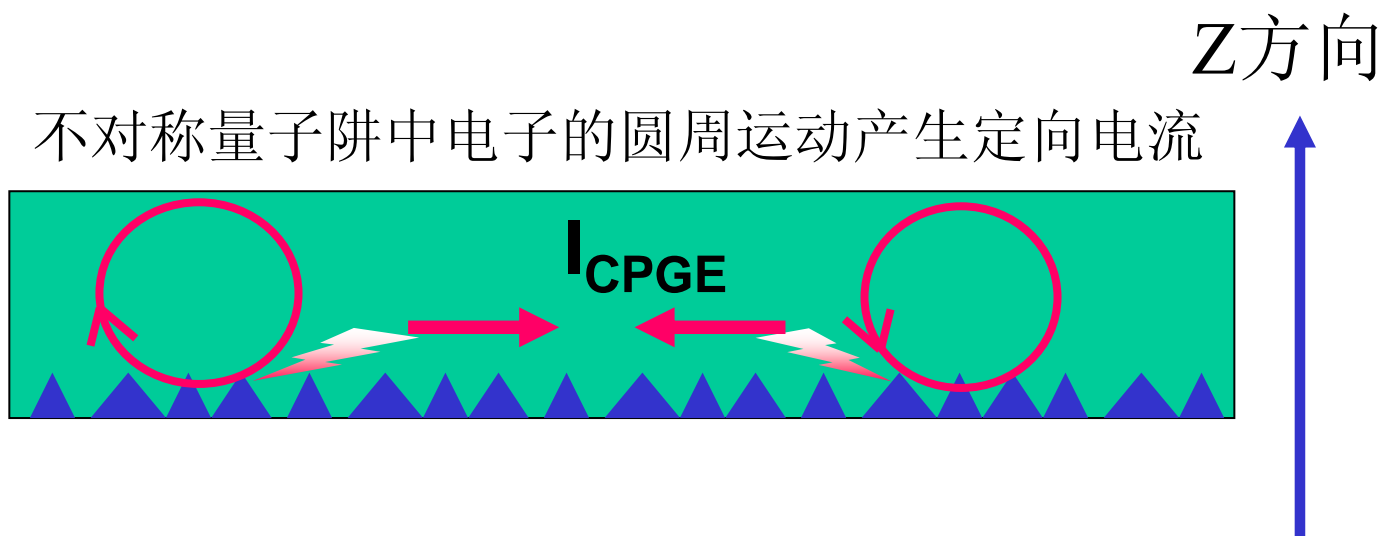
自旋光电流效应

Circular photogalvanic effect



自旋分裂和光学选择定则导致 k_x^+ 和 k_x^- 态不平衡占据，产生零偏压下的自旋极化光电流。

CPGE的经典图像



- 电流方向取决于圆偏振光方向
- 正入射时电流为零

GaN/AlGaN 二维电子气 (2DEG) 的CPGE研究

与北大物理学院沈波教授合作

汤一乔：2006年底，APL

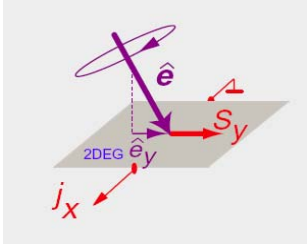
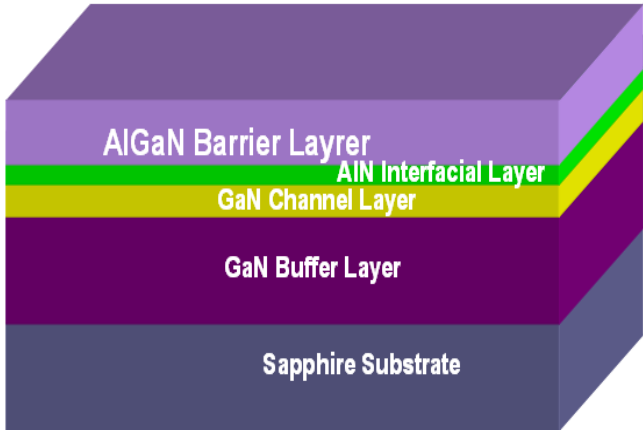
贺小伟：2007年，APL, PRL

尹春明，张琦：正在进行中，有趣的结果

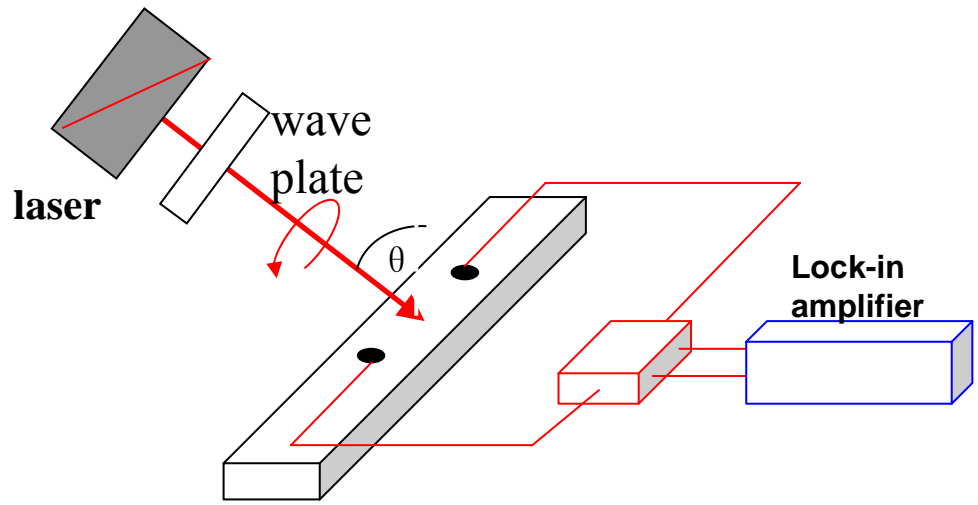
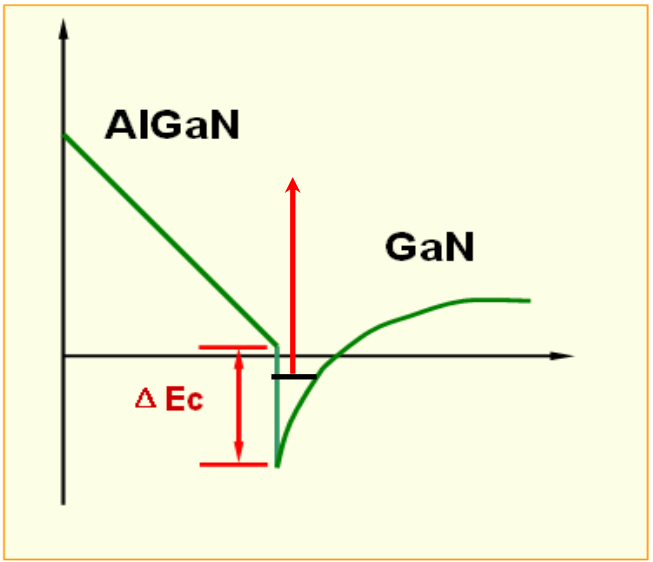
**GaAs/AlGaAs 二维电子气 (2DEG)、InN、InAs
量子线、InAs量子点结构等的CPGE研究**

中科院半导体所

GaN 2DEG样品和CPGE实验装置

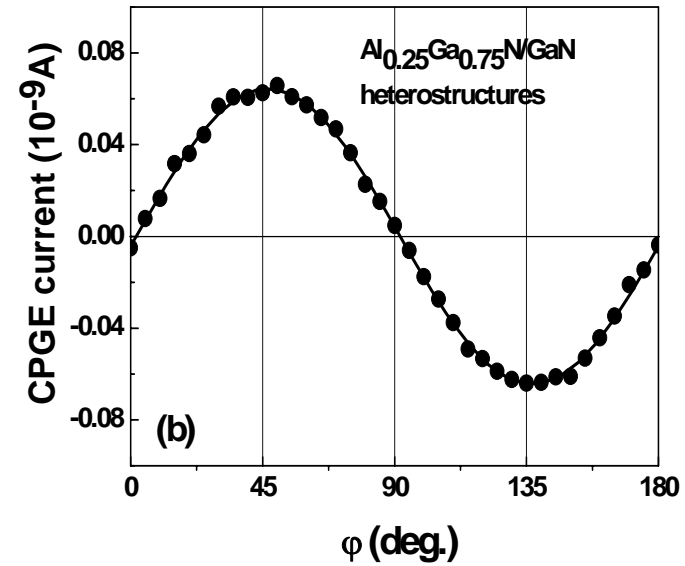
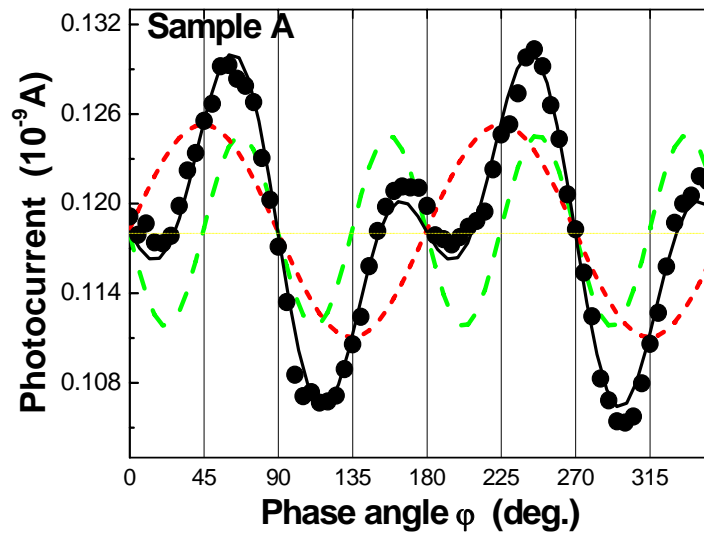


圆偏振光:
1060 nm (1.1 eV)



CPGE setup

GaN 2DEG 室温下的CPGE光电流

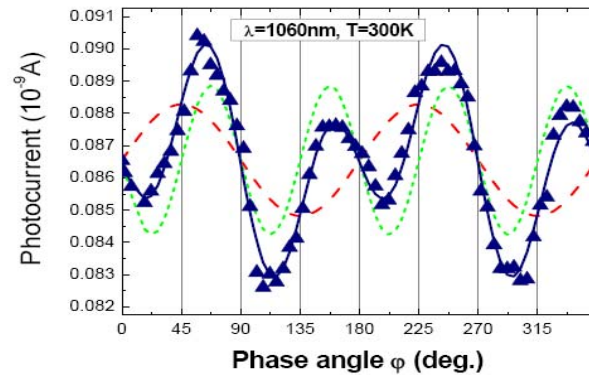
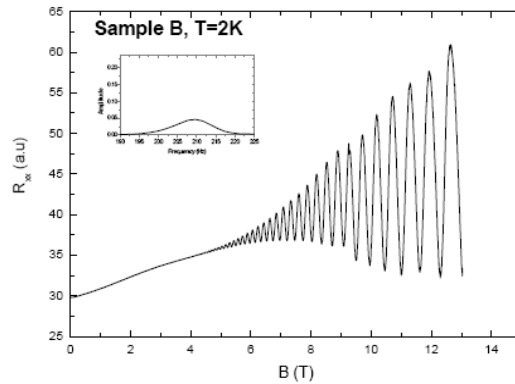
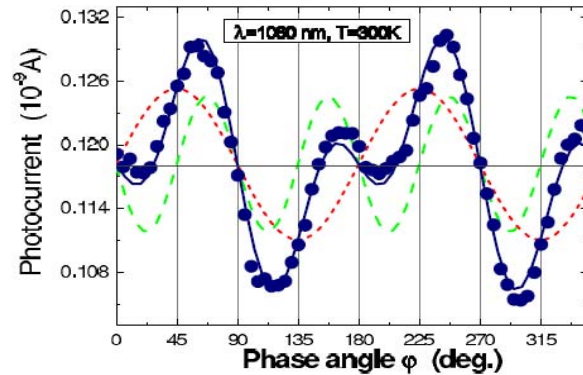
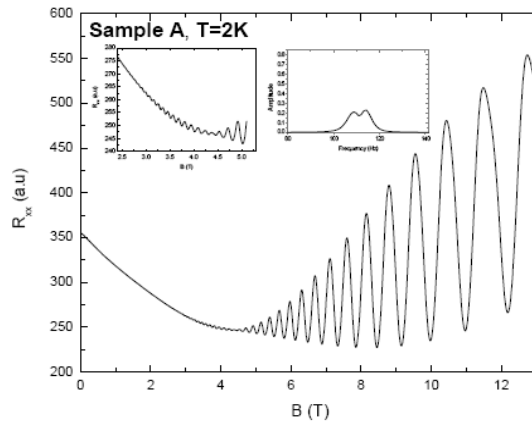


旋转1/4波片（相位角 φ ），改变入射光的偏振状态

$$j_{\lambda} = j_c \sin 2\varphi + j_L \sin 2\varphi \cos 2\varphi + j_0$$

Y.Q.Tang（汤一乔），et al, APL, **91**, 071920 (2007)

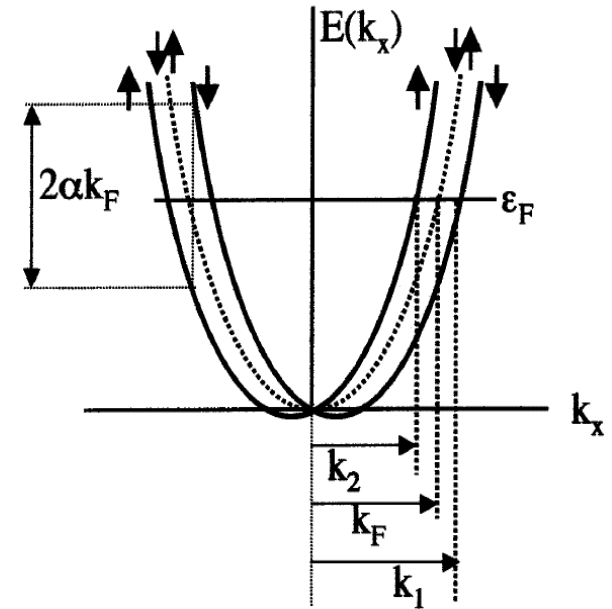
SdH 振荡和CPGE光电流的比较



Y.Q.Tang (汤一乔), et al, APL, **91**, 071920 (2007)

SOC constant of BIA and SIA terms in wurtzite structure (GaN-based)

- **BIA:** $H_B = \alpha_b (k_x \sigma^y - k_y \sigma^x)$
 - **SIA:** $H_S = \alpha_s (k_x \sigma^y - k_y \sigma^x)$
- $H_B, H_S \sim k$, Rashba terms



二者很难区分

$$E(k) = \frac{\hbar^2}{2m^*} k^2 \pm \alpha k$$



SOC constant of BIA and SIA terms in wurtzite structure (GaN-based)

如何确定BIA和SIA自旋轨道耦合系数的相对大小?

$$\alpha = \frac{\hbar^2 e E}{4m^* E_g}$$

$$\alpha_S \propto E_{built-in}$$

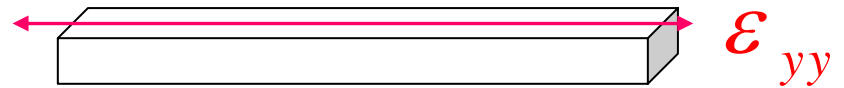
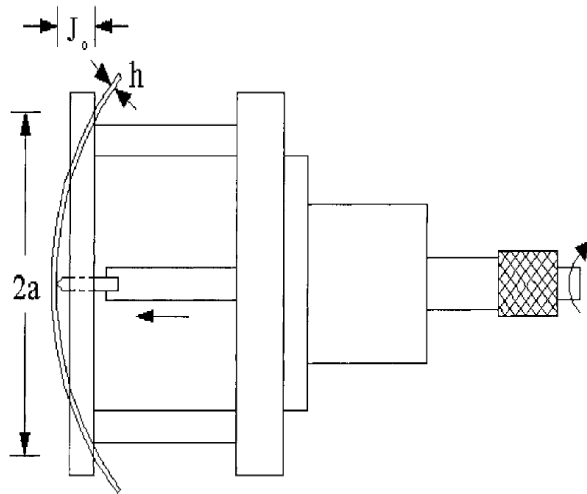
AlGaN/GaN异质结: 极强的极化效应

极化电场: ~ MV/cm

应变调制CPGE → 自旋轨道耦合系数的信息

Experimental setup for uniaxial strain

单轴应变装置:



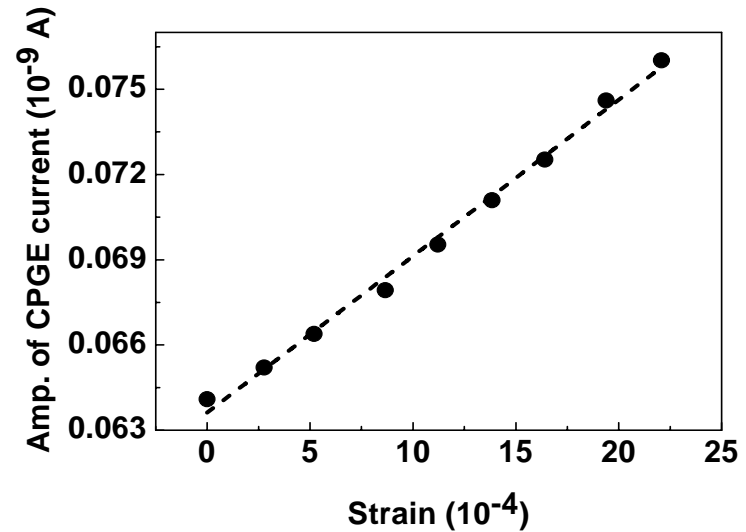
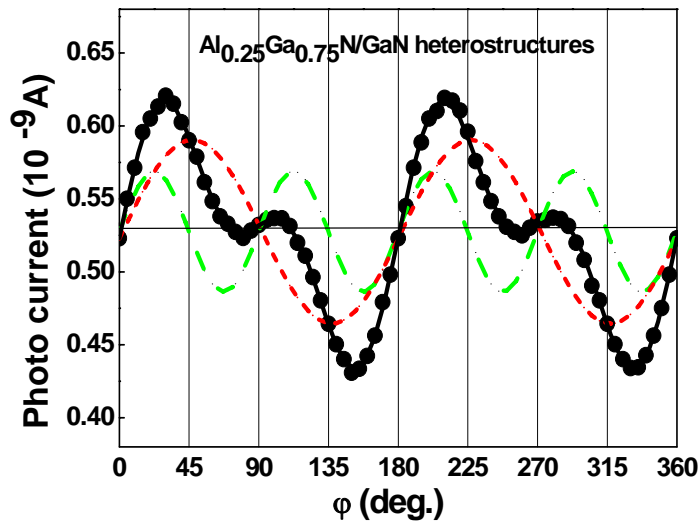
Y方向受张应变:

$$\epsilon_{yy} = \frac{3hJ_0}{2a^2}$$

Z方向受压应变:

$$\epsilon_{zz} = -\frac{C_{12}}{C_{13}} \epsilon_{yy}$$

CPGE current as a function of the additional uniaxial strain



CPGE信号随外加应变线性增加， 2.2×10^{-3} 的张应变可使信号增加 18.6%。

X.W.He (贺小伟), et al, APL, **91**, 071912 (2007)

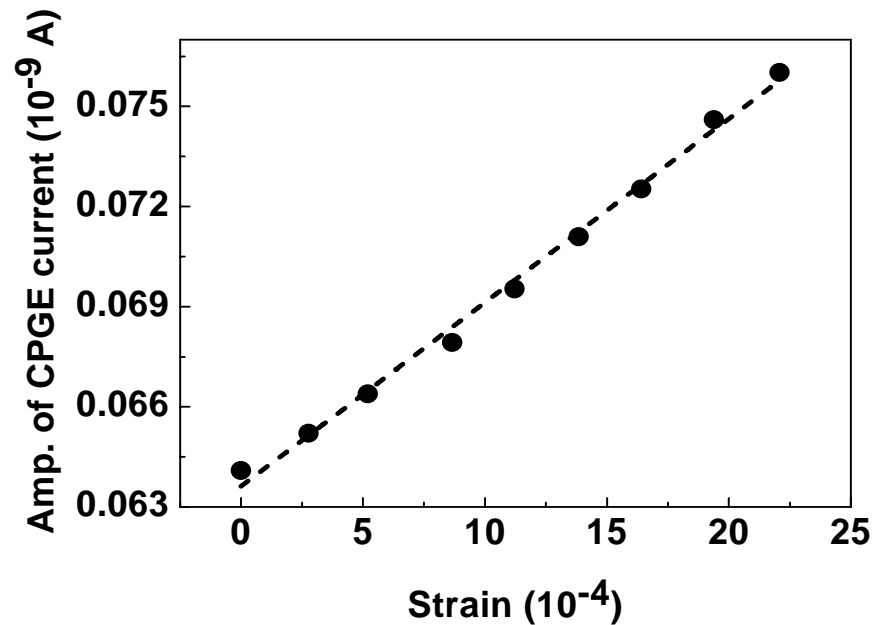
Ratio of SIA and BIA SOC constants

$$\alpha_s \propto E_{built-in}$$

$$j_y(\varepsilon_{yy}) = j_b^0 + j_s^0 + k_s \varepsilon_{yy}$$

$$j_y = j_b^0 + bE_0 + bE_{un}(\varepsilon_{yy})$$

$$a_s / a_b = j_b^0 / j_s^0 \approx 13.2$$



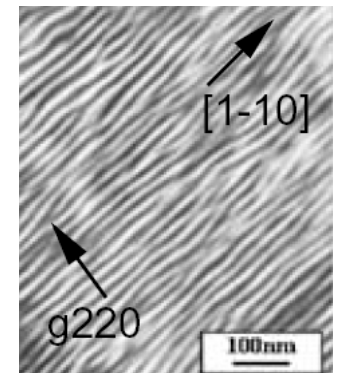
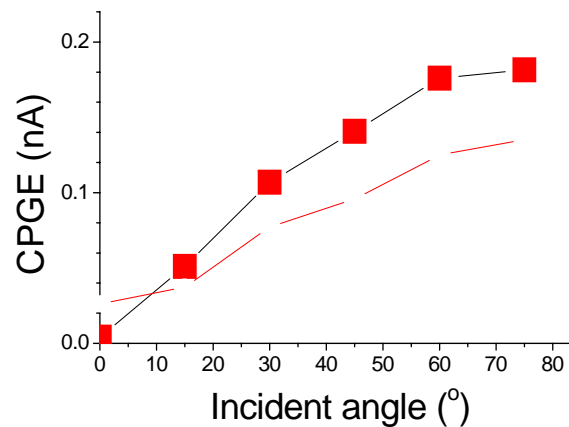
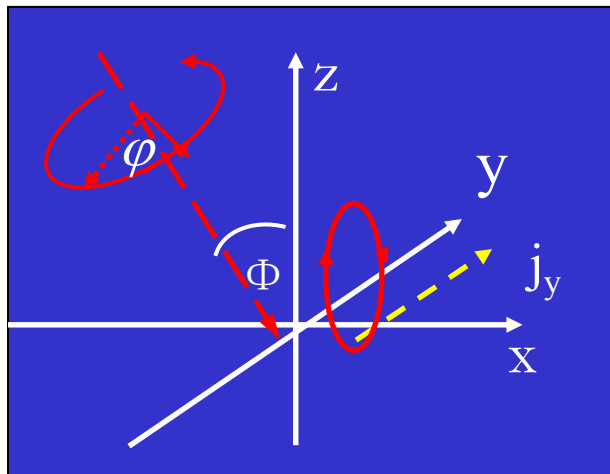
X.W.He (贺小伟), et al, APL, **91**, 071912 (2007)

Observation of the anomalous CPGE

CPGE信号:

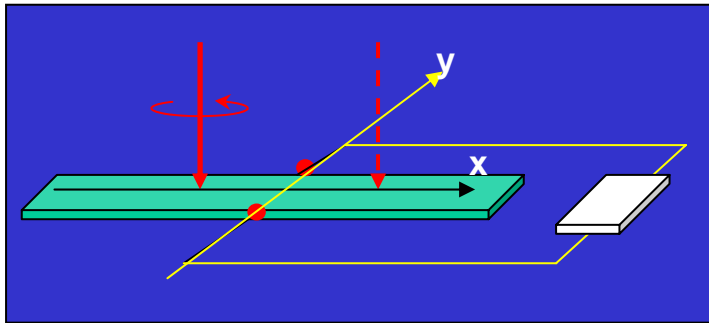
$$J_x = \gamma_{xy} i (E \times E^*)_y \longrightarrow \sin \phi$$

正入射时CPGE 等于零

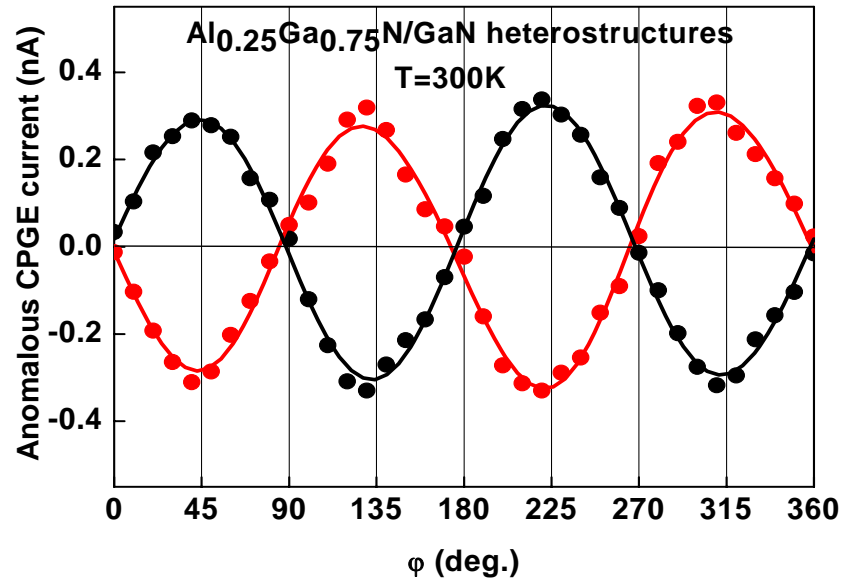


InAs量子线CPGE信号随入射角的变化

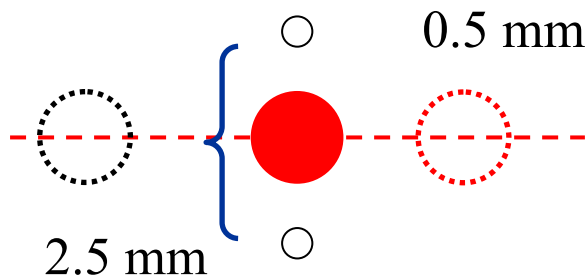
Observation of the anomalous CPGE



光斑大小: 1.1 mm

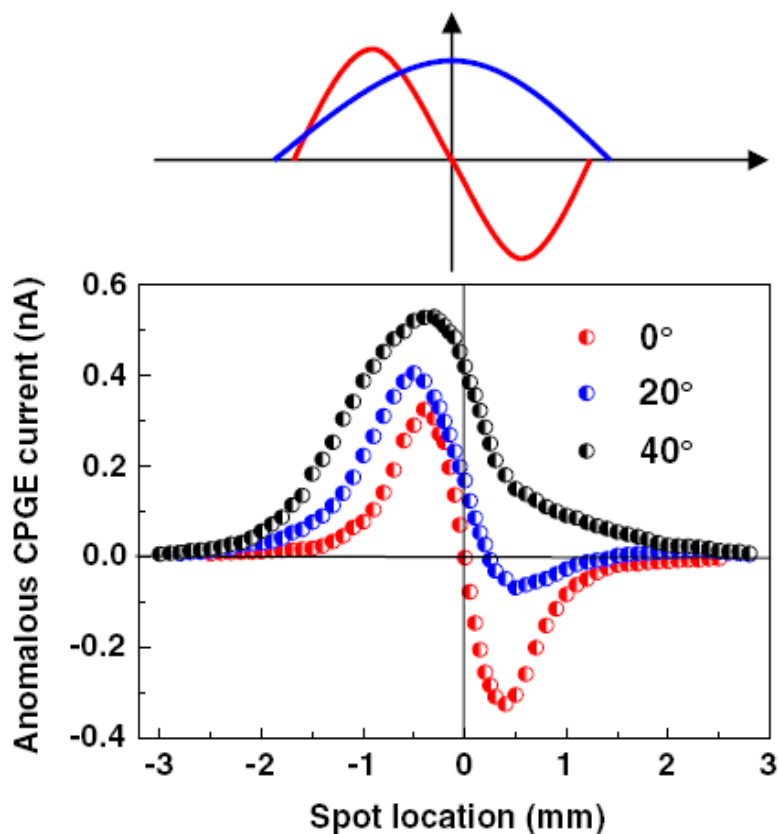


CPGE信号随1/4波片相位角的变化



X.W.He (贺小伟), et al, PRL, 101, 147402 (2008)

Observation of the anomalous CPGE



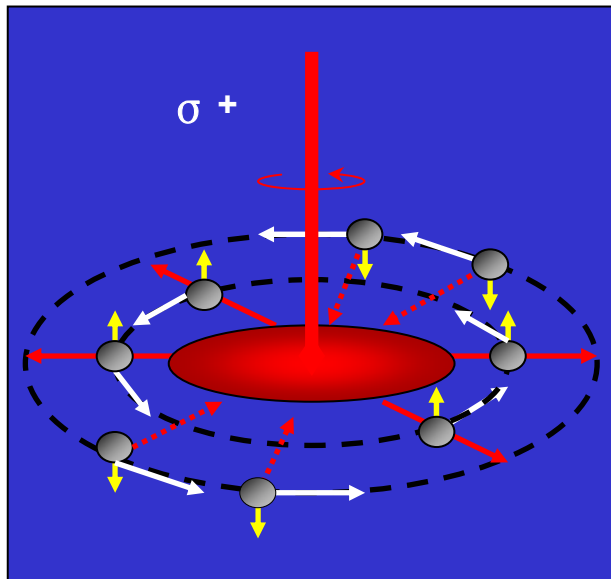
不同入射角时电流随光斑位置的变化

插图：CPGE电流由一个对称分量和反对称分量构成

X.W.He (贺小伟), et al, PRL, 101, 147402 (2008)

Mechanism of the anomalous CPGE

圆偏振光



自旋极
化电子

径向自旋
极化电流

RSHE

环状电流

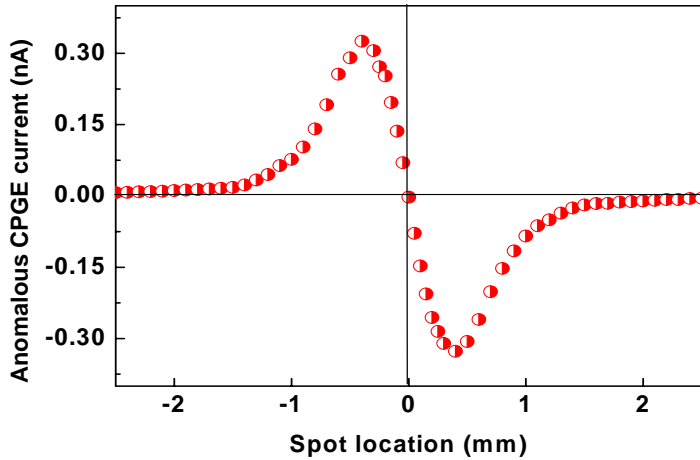
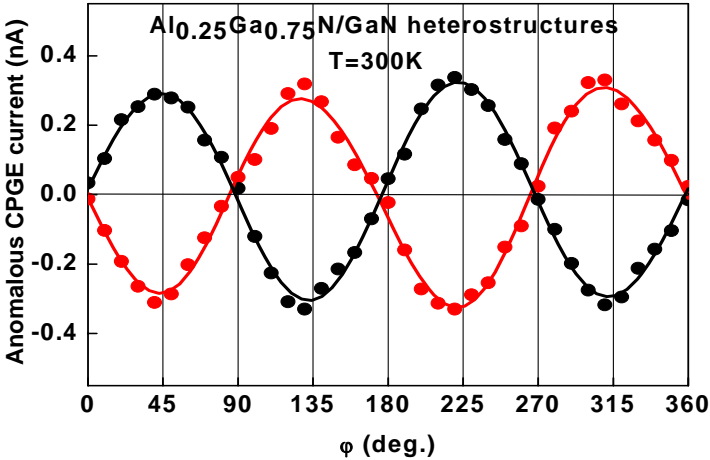
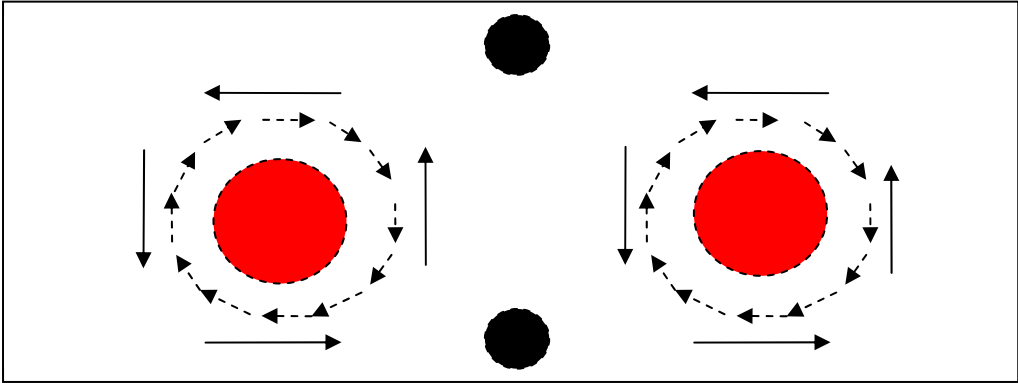
$$u(r) = u_0 \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$J(r) = -J_0 \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$$

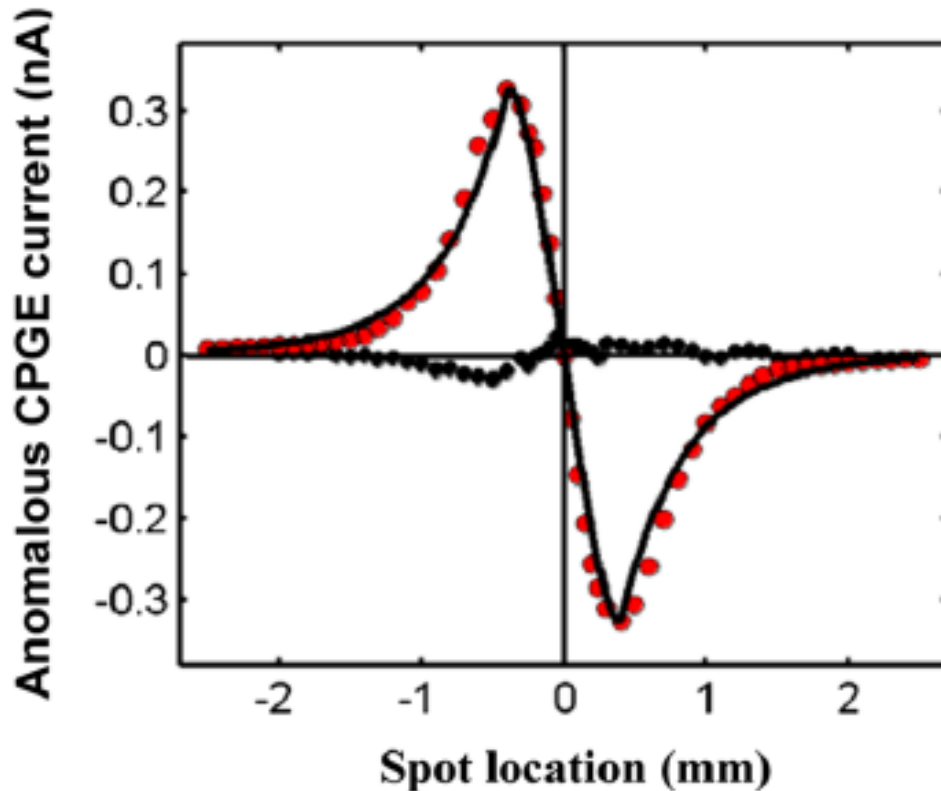
$$f(r) = -f_0 \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$J_{Hall} = J_0 \sin 2\varphi$$

Anomalous CPGE & RSHE



Observation of the anomalous CPGE

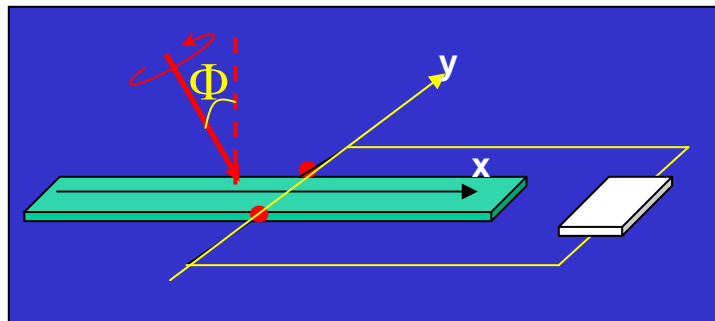


The current as a function of the light spot location with the light spot of 1.1mm and 0.1mm in diameter, respectively.

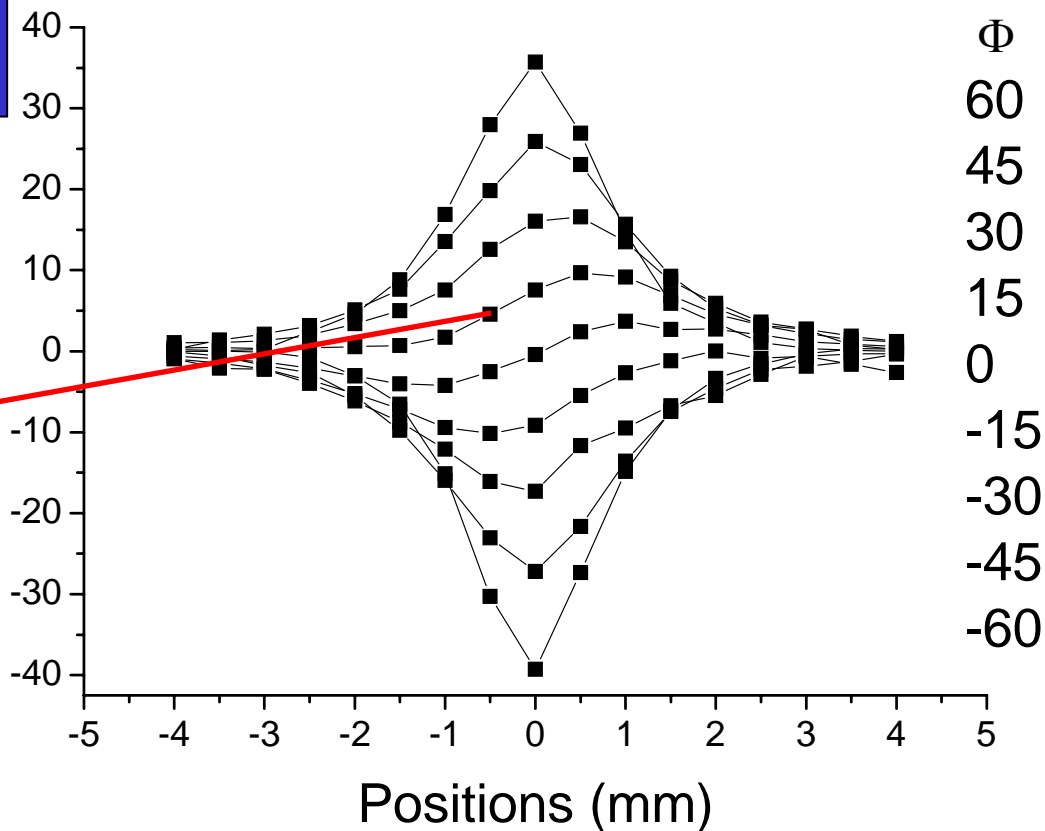
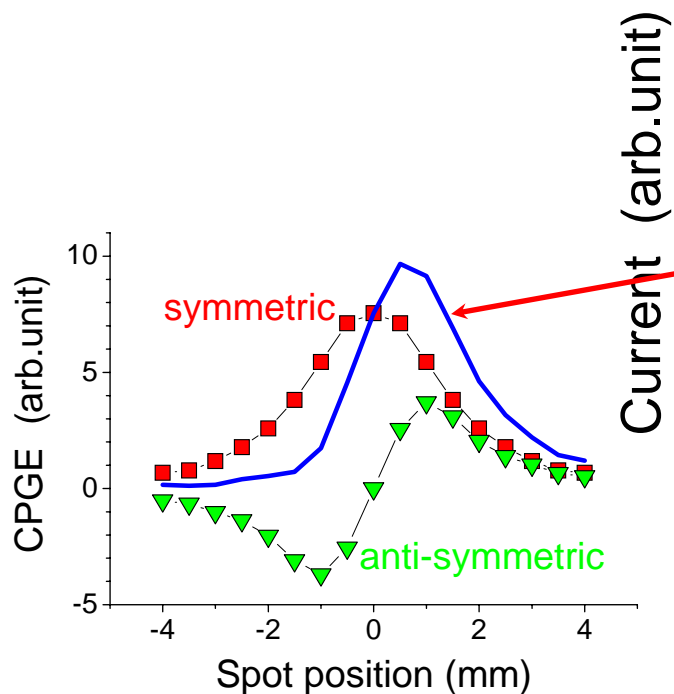
$$F = \frac{f_0}{q} e \approx 2.4 \times 10^{-19} N$$

X.W.He, et al, PRL, 101, 147402 (2008)

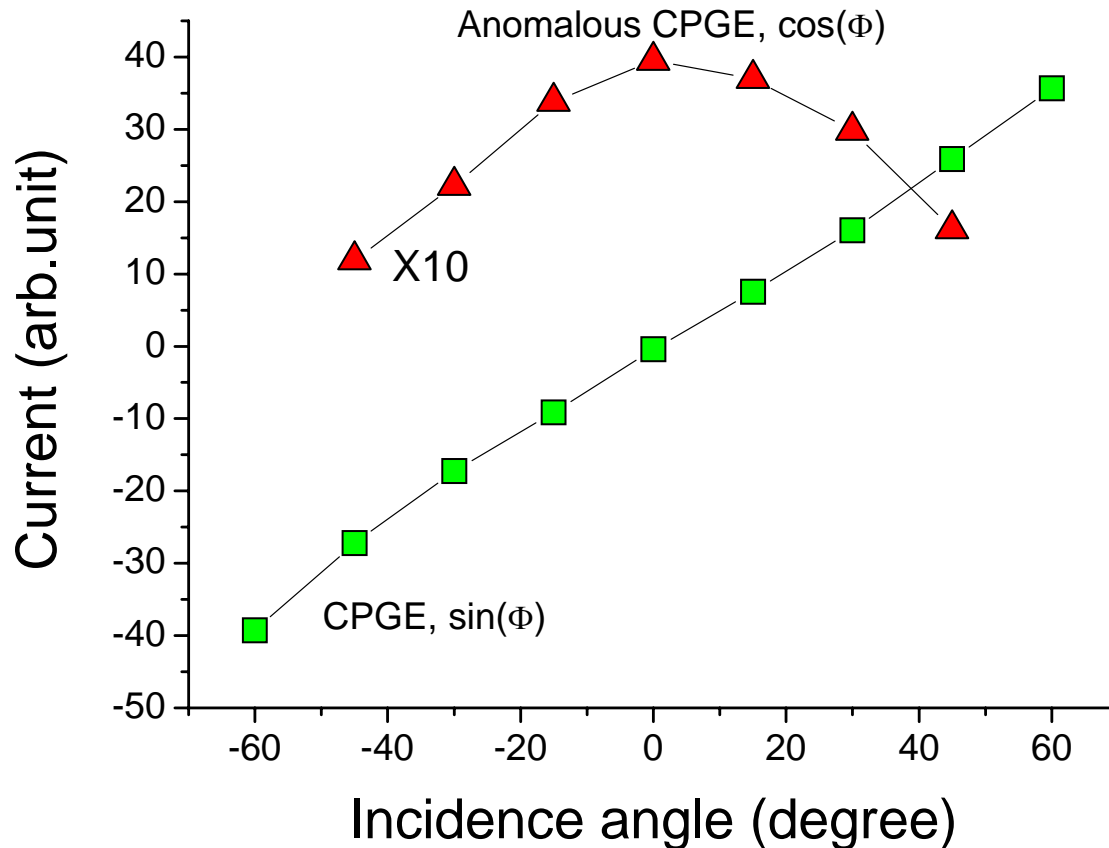
Anomalous CPGE in GaAs/AlGaAs 2DEG



不同入射角时光电流信号随光斑位置的变化



Anomalous CPGE in GaAs/AlGaAs 2DEG



对称分量（正常CPGE）幅度和反对称分量（反常CPGE）幅度随入射角的变化规律完全不一样！



结 论

- 1) 半导体材料中反演不对称会导致空穴混合和能带自旋分裂；
- 2) 空穴混合导致QW产生平面光学各向异性，可以用RDS观测得到；不同的反演不对称（电场、应变、界面）会产生不同的RDS信号；
- 3) 导带的自旋分裂可以通过自旋光电流测量；同时，自旋光电流还可以检测逆自旋霍尔效应；
- 4) RDS和自旋光电流是非常灵敏的技术！



谢谢