



南京大學

III族氮化物半导体异质结构材料 面临的若干科学技术问题

郑有焯

南京大学

2010.10.14



报告内容:

- 一、 III族氮化物异质结构是III族氮化物技术的核心
- 二、 III族氮化物异质结构材料面临的几个科学技术问题
- 三、 结束语



报告内容:

- 一、 III族氮化物异质结构是III族氮化物技术的核心
- 二、 III族氮化物异质结构材料面临的几个科学技术问题
- 三、 结束语

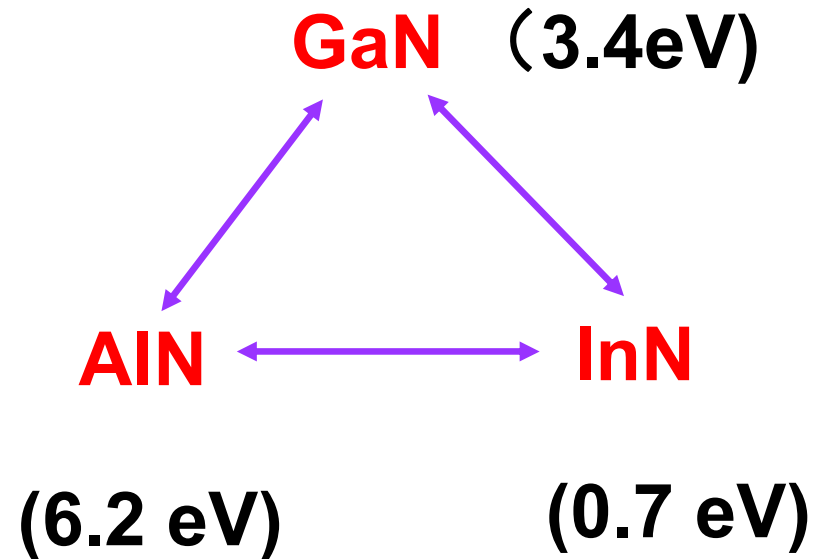


III族氮化物半导体材料体系

III族氮化物半导体包括 氮化铟(InN), 氮化镓(GaN), 氮化铝(AlN)及其合金半导体材料。



($0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$)



III族氮化物半导体材料特点?

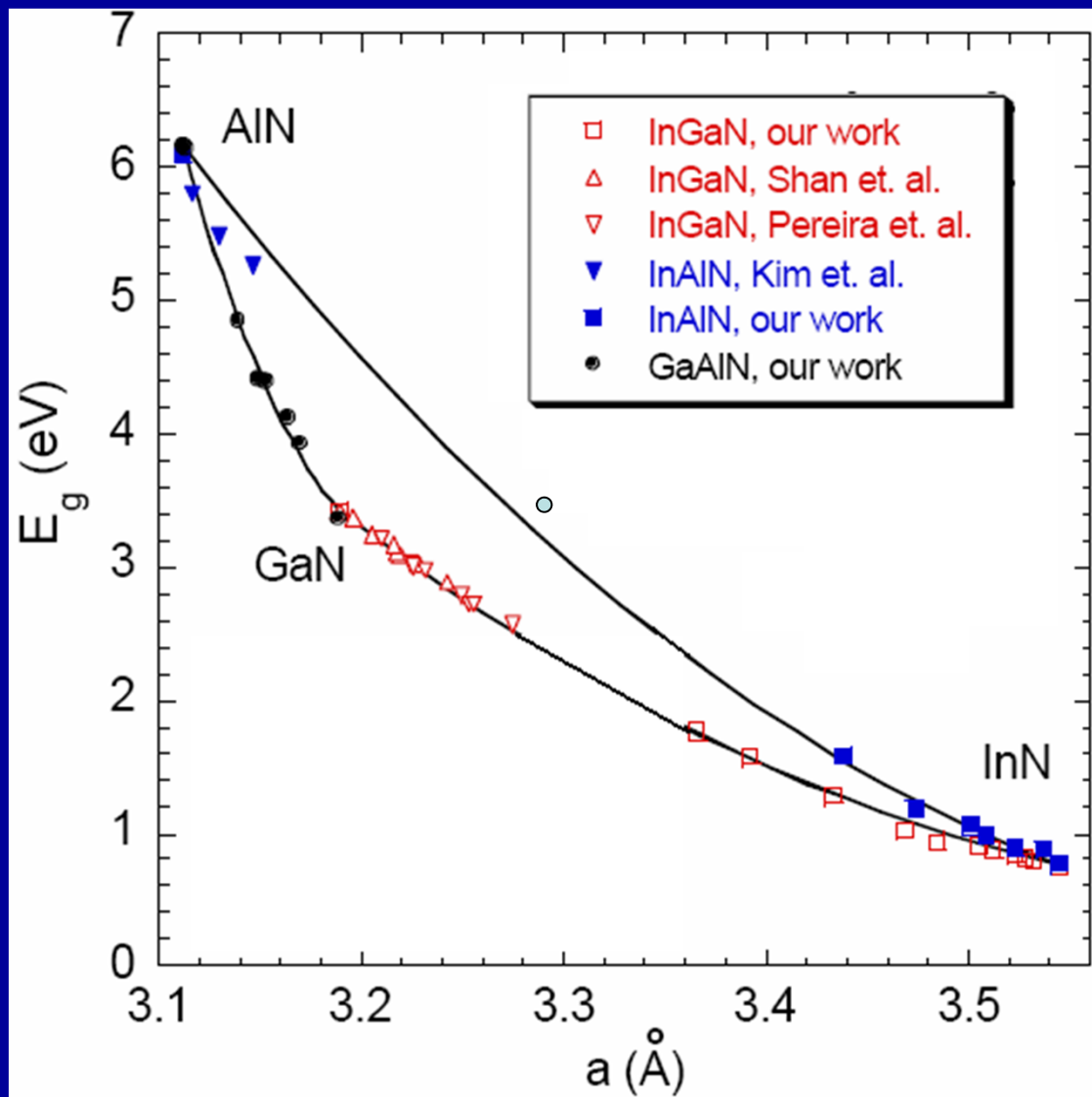


1, 宽广能隙

- 能隙: 0.7- 6.2 eV

复盖Ge、Si、GaAs、InP 等传统材料能隙范围

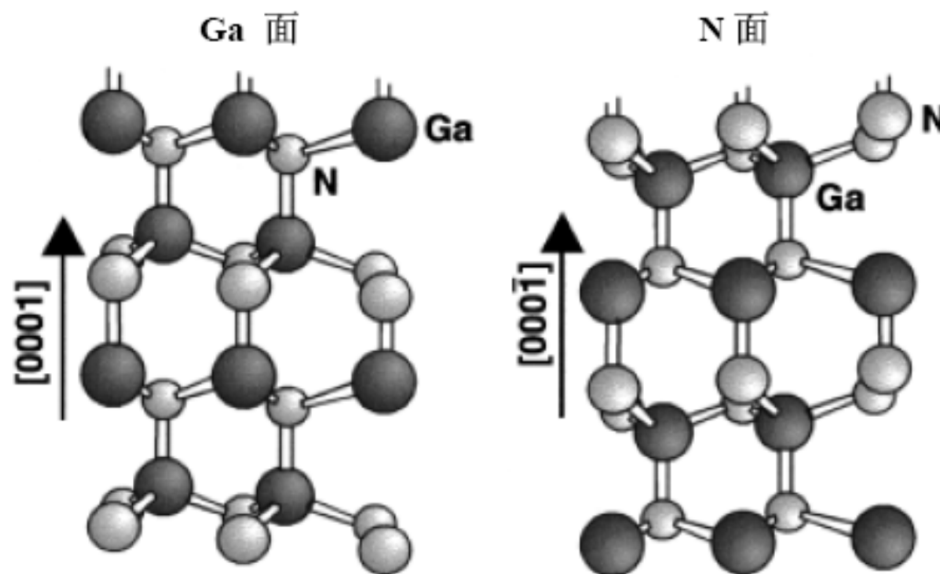
- 光学窗口: $1.77\mu\text{m} - 0.36\mu\text{m} - 0.20\mu\text{m}$

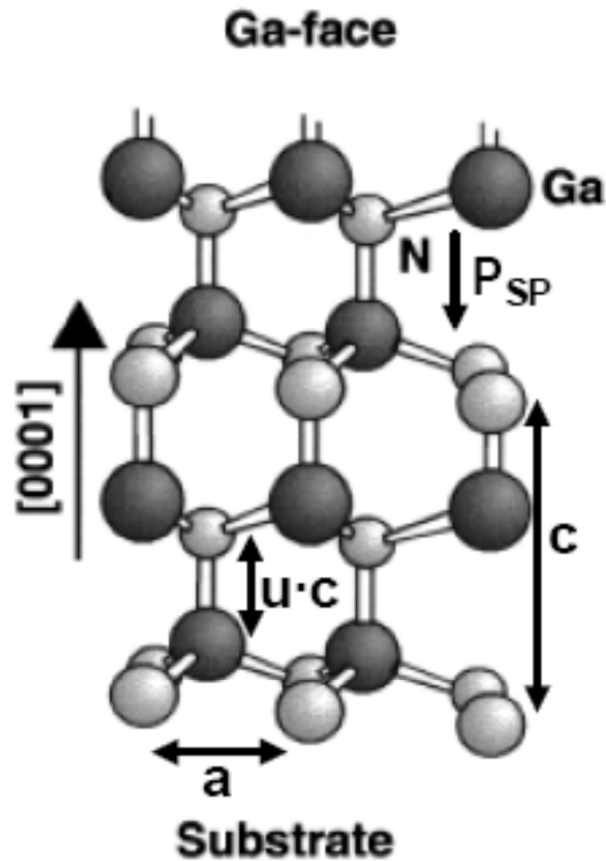




3, 强离子型晶体

III族氮化物是由电负性较强的N原子与电负性较弱的In、Ga、Al原子构成的一种具有很强电荷转移的离子型纤锌矿结构晶体。





- ◆ 理想纤锌矿晶格常数比值
 $c_0/a_0=1.633$
- ◆ III族氮化物晶格常数比较小
GaN(1.627), InN(1.623)
AlN(1.601)
- ◆ 自发极化系数(C/cm²)
GaN (- 0.029), InN (- 0.032),
AlN (- 0.081)

图

自发极化系数很大，AlN只比典型的钙钛矿结构铁电体小3-5倍。



4, 大失配应变结构

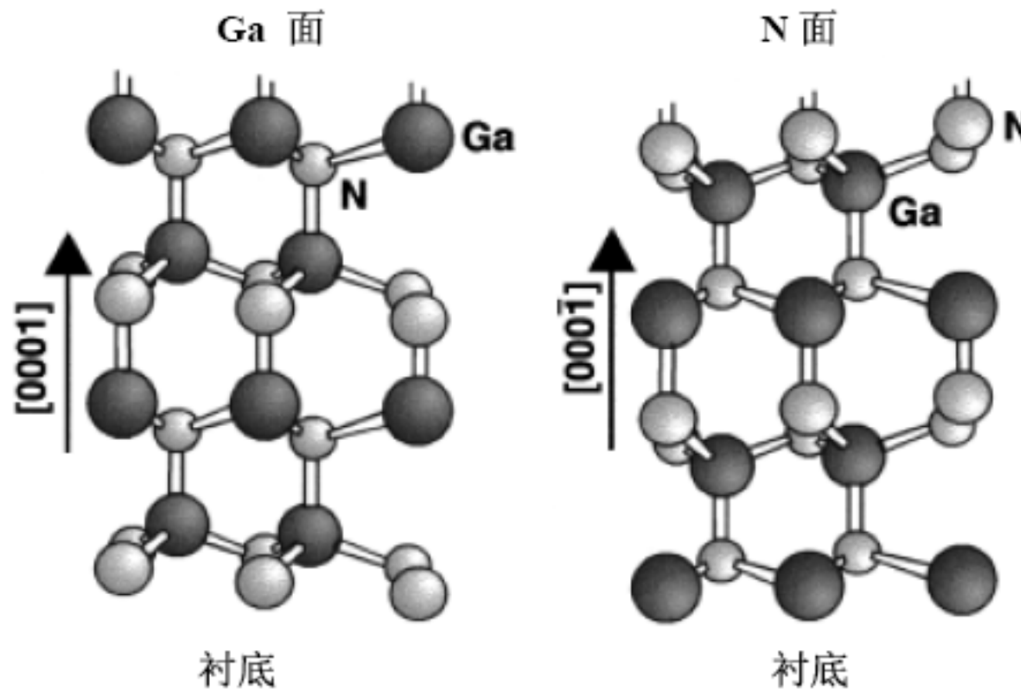
- ◆ 尚无可实用的氮化镓单晶
熔点高（2500 °C），蒸气压高（4.5 GPa）。
- ◆ 大失配异质外延
蓝宝石作为衬底
GaN与蓝宝石的晶格失配16%，

极强的压电极化



5, 极强压电极化

- ◆ 纤锌矿晶体结构在 $[0001]$ 方向不具有反演对称性, (0001) 面上的应力展现压电极化效应.





压电矢量 P_{PE} 由压电系数 e 和应变张量 ϵ 乘积决定。

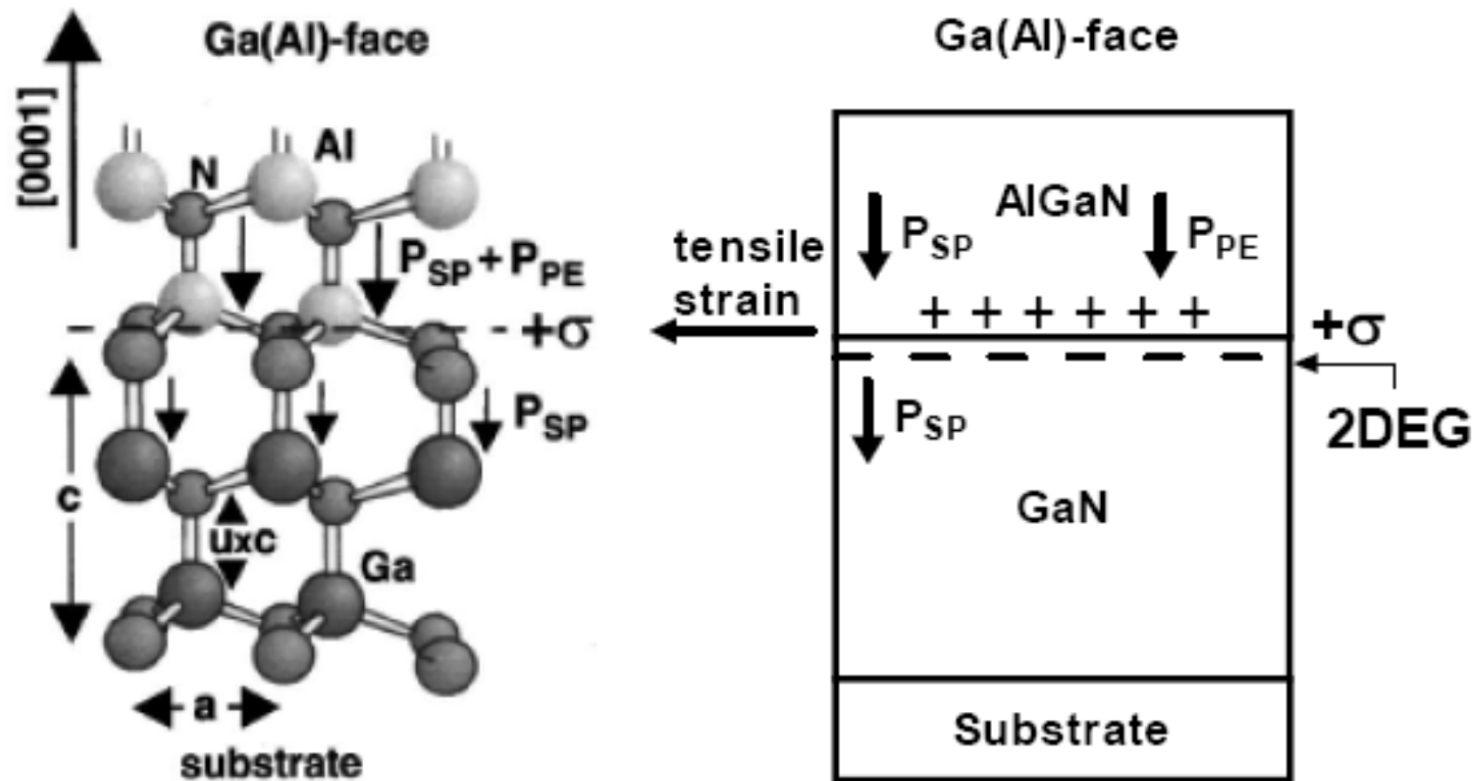
$$P_{PE} = 2(1 - R) \frac{a - a_0}{a_0} \left(e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}} \right)$$

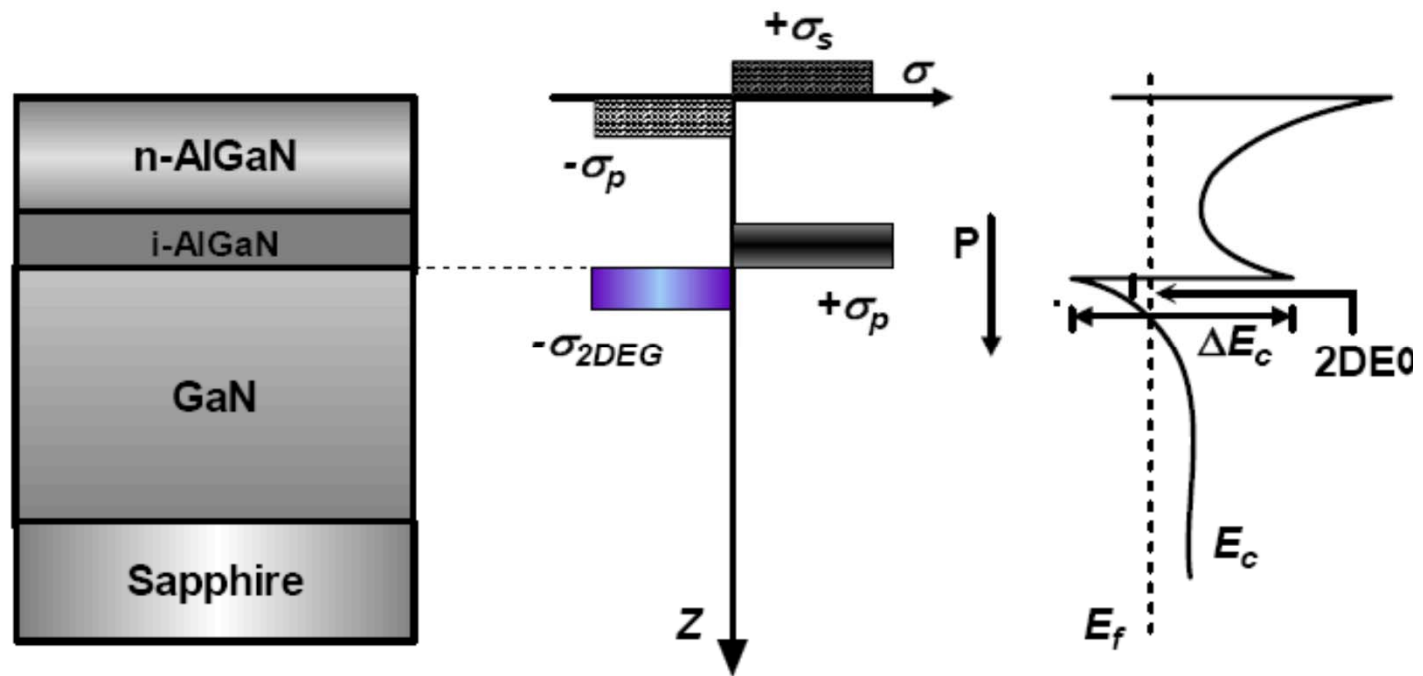
张应变($a > a_0$)时压电极化为负，平行于自发极化

压应变($a < a_0$)时压电极化反平行于自发极化



6, 极化感生两维电子气 (2DEG)





2DEG 密度高达 10^{13}cm^{-2} , 比AlGaAs/GaAs高出4到5倍



7, 非对称导电性

◆ 化学比偏离，p型杂质激活能高，就必须掺入大量杂质，方能得到足够的载流子浓度，但又降低了载流子迁移率。

制约了同质结器件的发展，必需采用异质结构。

◆ III族氮化物异质结构是当前光、电技术的基本结构。



小结

- 1, III族氮化物与传统的半导体不同, 是一种具有很强压电、铁电性的宽广带隙、直接能隙半导体, 具有丰富的科学技术内涵;
- 2, III族氮化物异质结构是III族氮化物技术应用的基本途径 和科学技术基础;
- 3, III族氮化物异质结构材料对III族氮化物技术发展起着决定性作用。



报告内容:

- 一、 III族氮化物异质结构是III族氮化物技术的核心
- 二、 III族氮化物异质结构材料面临的几个科学技术问题
- 三、 结束语



报告内容:

- 一、 III族氮化物异质结构是III族氮化物技术的核心
- 二、 III族氮化物异质结构材料面临的几个科学技术问题
- 三、 结束语



III族氮化物异质结构独特的光、电性质
展现极其广阔的技术应用前景。

当前两大技术领域：

- I 基于宽广直接带隙的高效光电转换行为
光发射器件（LED,LD）

LED 照明技术

光探测器（日光盲紫光探测）

“太阳辐射盲区”，230-280nm

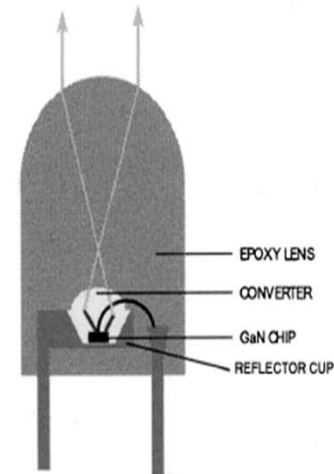
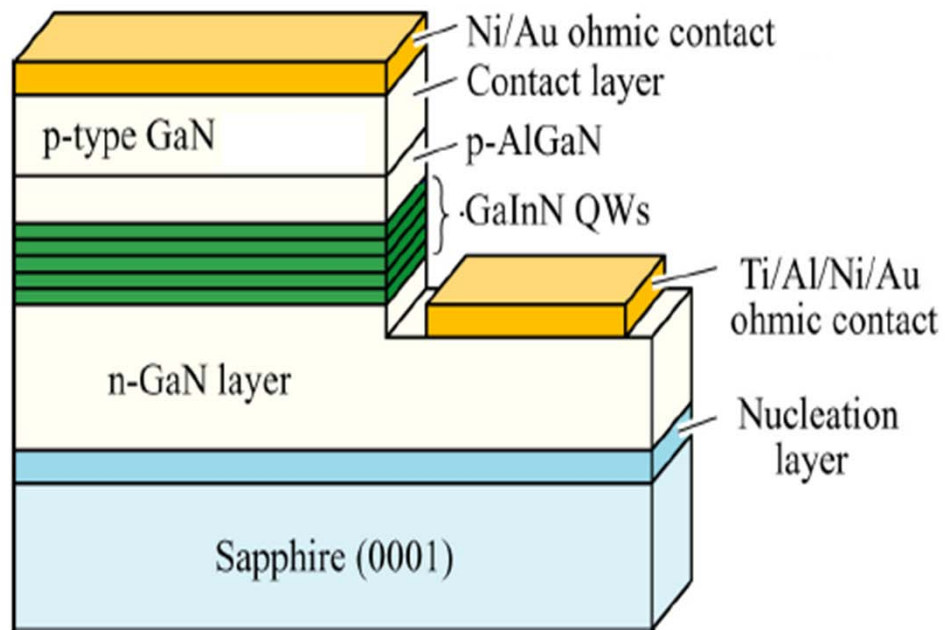
- II 基于极化感生二维电子气行为

高电子迁移率微波功率器件（HEMT）

HEMT 传感器件



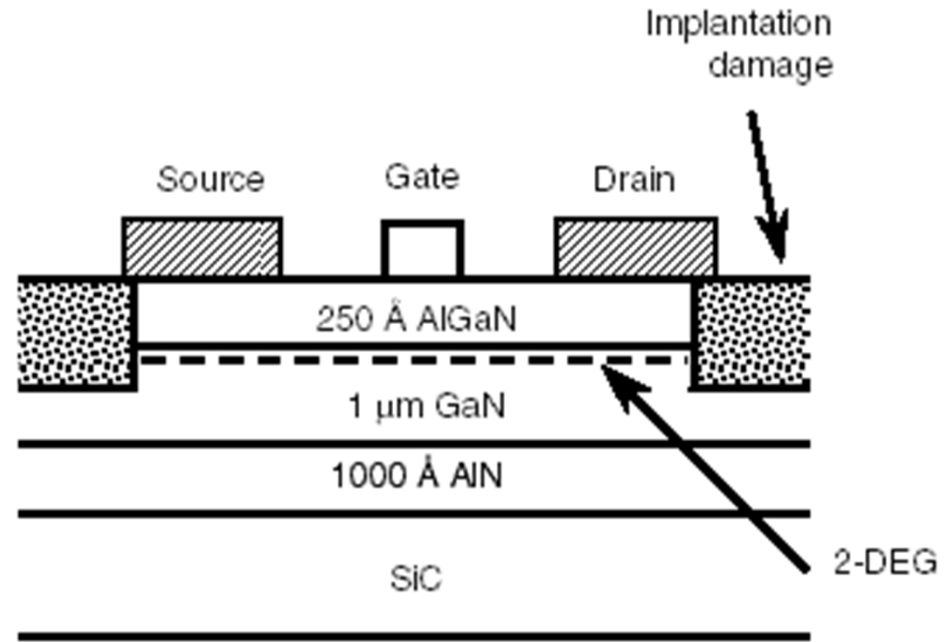
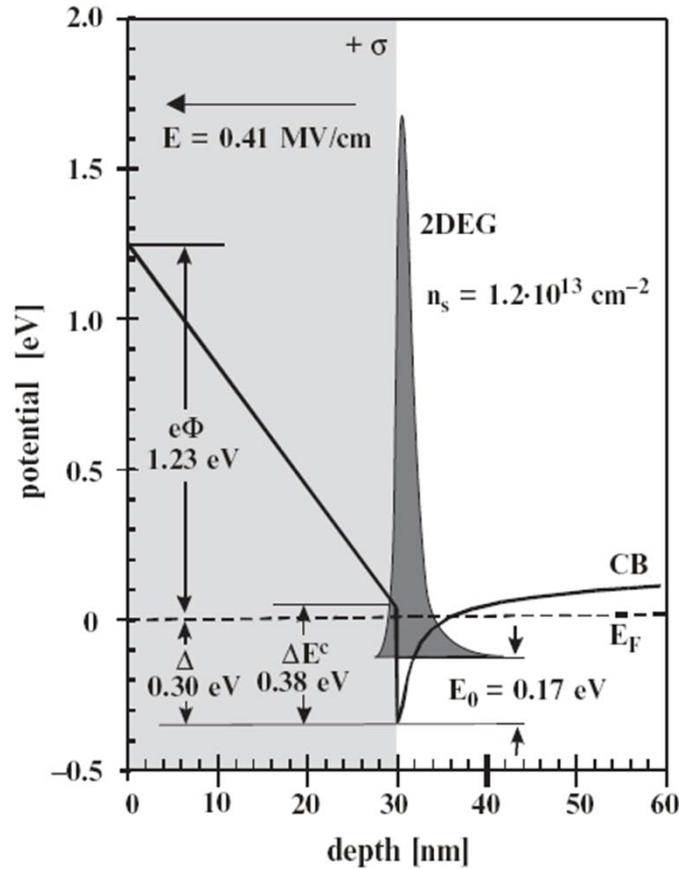
LED照明技术



InGaN/GaN多量子阱LED



微波功率HEMT技术



AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT)



◆ 短短的10多年来，以LED和HEMT为代表的III族氮化物异质结构技术高速发展，不仅在现代高技术领域中确立了重要地位，而且已经形成战略型新兴产业，展现巨大的发展空间，对社会经济、技术的发展起着重要的推动作用。



LED 照明作为一种节能、绿色、智能照明技术，已经在各个领域广泛应用，作为当代节能减碳战略性新兴产业在全球迅猛崛起，LED照明产业蓬勃发展，展现巨大的发展空间。

2009年我国半导体照明产值达600亿元

◆ LED 照明产业正步入 “快速成长期”



LEDS
WILL
CHANGE
THE
WORLD.



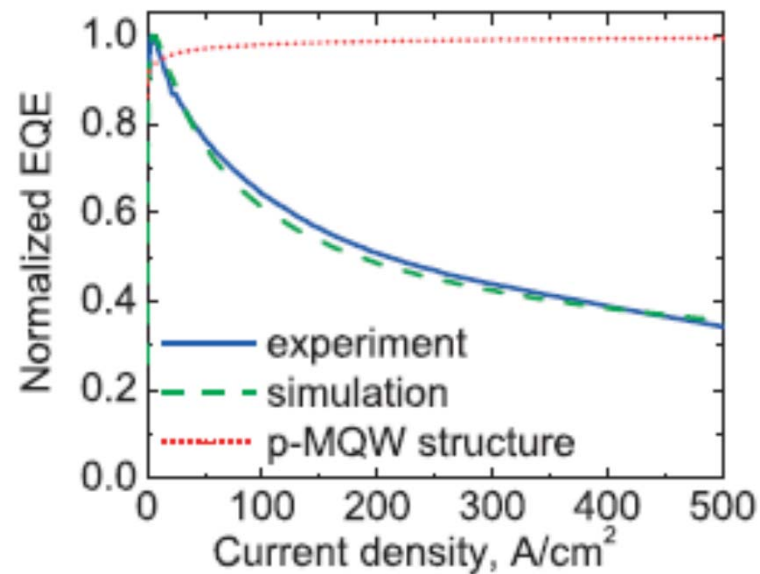
机遇与挑战并存

基于C面蓝宝石衬底上生长的GaN基异质结构在LED照明和HEMT功率微波器件应用上业已经取辉煌成就，但也遇到一些关键科学技术问题，对技术发展起了制约作用。



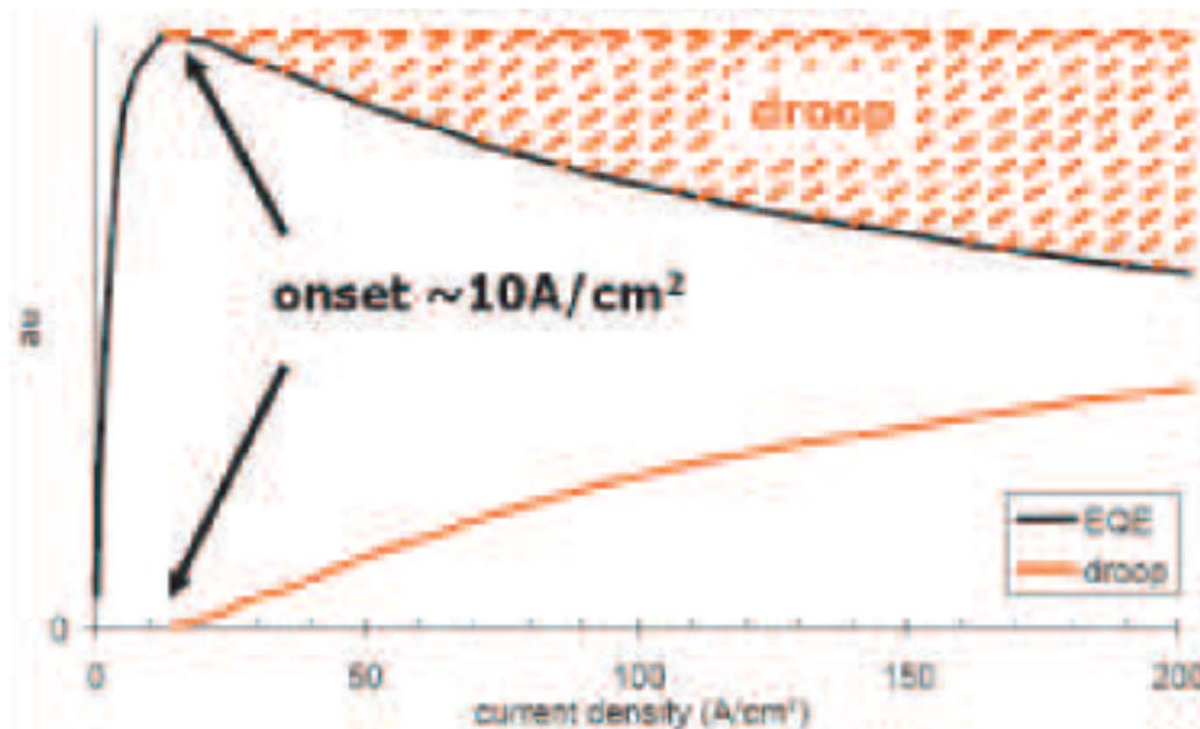
高驱动电流下LED光效下降 (Efficiency Droop)

InGaN LED在工作电流密度超过 $10\text{-}70\text{A/cm}^2$ ，器件的外量子效率开始急剧下降，这种现象被称为“Efficiency Droop”。





- ◆ “Efficiency Droop”成为制约功率LED固态照明发展的技术“瓶颈”。
- ◆ 降低、抑制LED Efficiency Droop成为当前进一步发展功率LED 照明的关键问题。





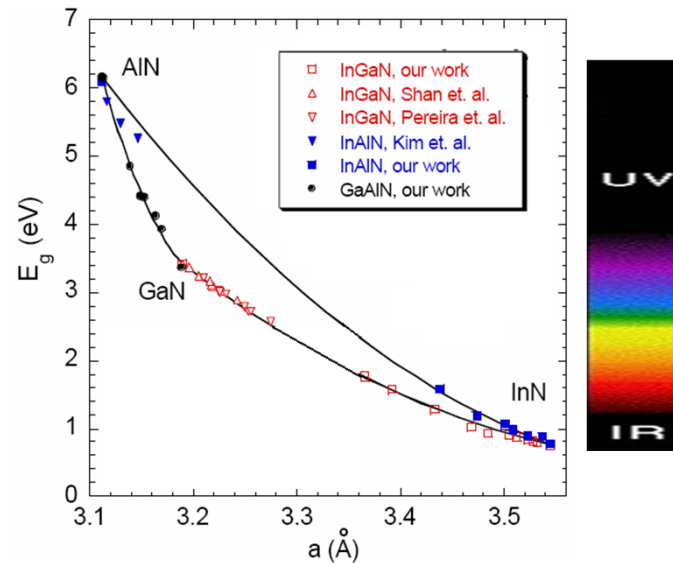
👉 目前量产的小功率LED芯片光效140-150lm/W,离理想值还有很大的提升空间。

■ 理想值，超过300 lm/W

■ 依据黑体辐射的理论，光通量（流明）与辐射通量关系， $K_m = 683 \text{ lm/W}$ ，因此，对理想情况，1W的辐射通量可能产生683 lm/W 的光通量。



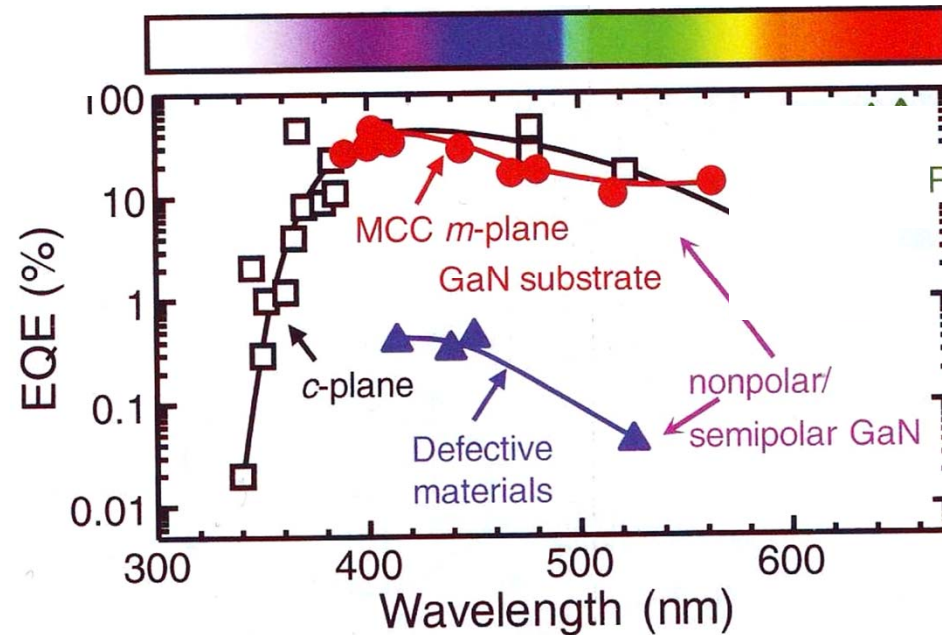
长波段、短波段LED光效低



- ◆ III族氮化物全组份直接带隙半导体材料
- ◆ 带隙能量 (0.7eV-6.2eV) 复盖红外到紫外宽广波段
- ◆ 可用于制备 红、绿、蓝LED 发光器件



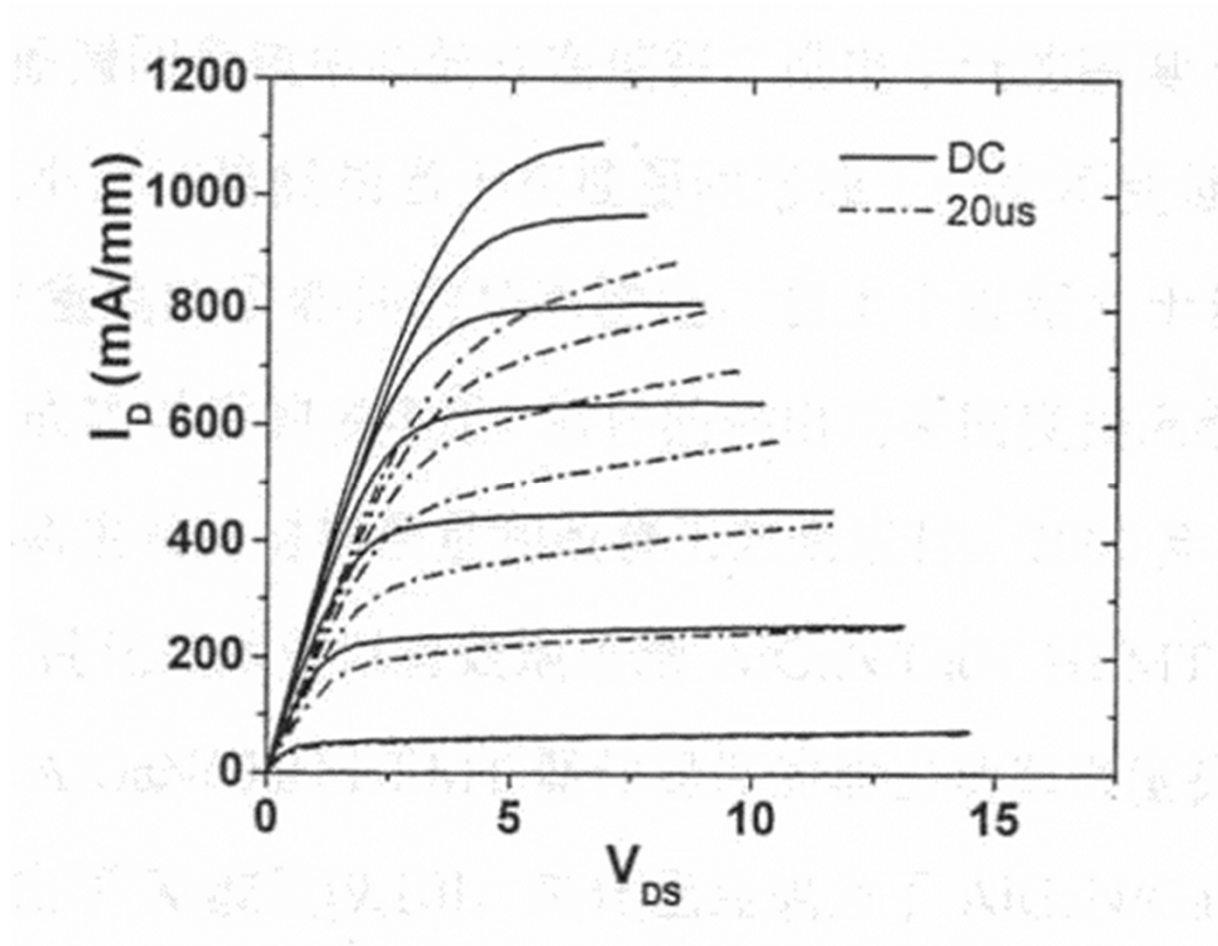
III族氮化物LED发光效率波长响应谱



- ◆ LED发光效率波长响应谱呈“马鞍形”。发光效率峰值在蓝光波段，短波段急剧下降，长波段也呈下降趋势。
- ◆ 紫光、绿光、黄光、红光效率低。



HEMT电流崩塌 (Current collapse)



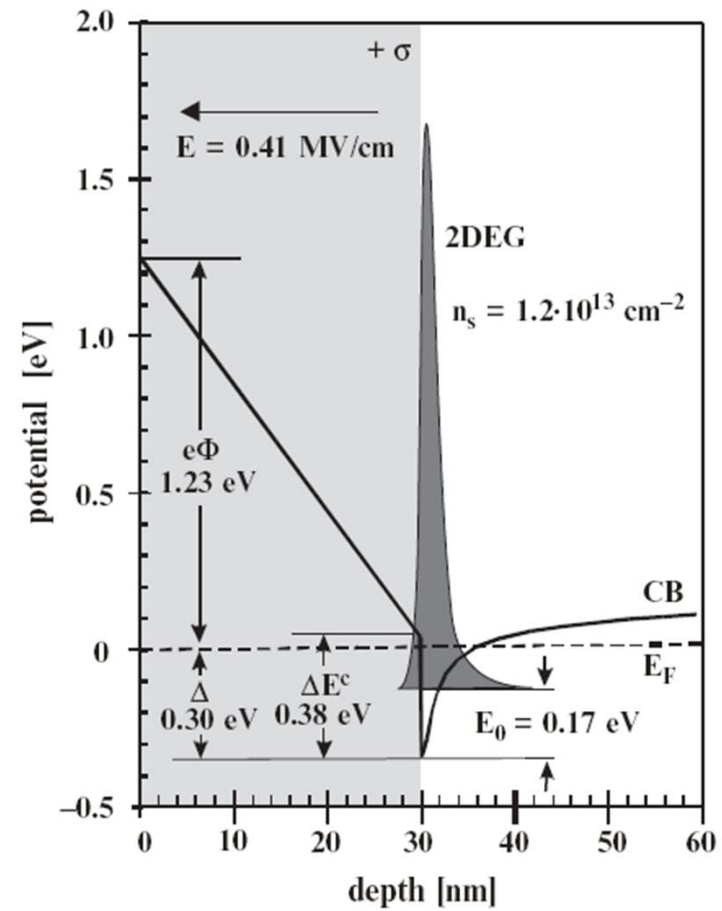
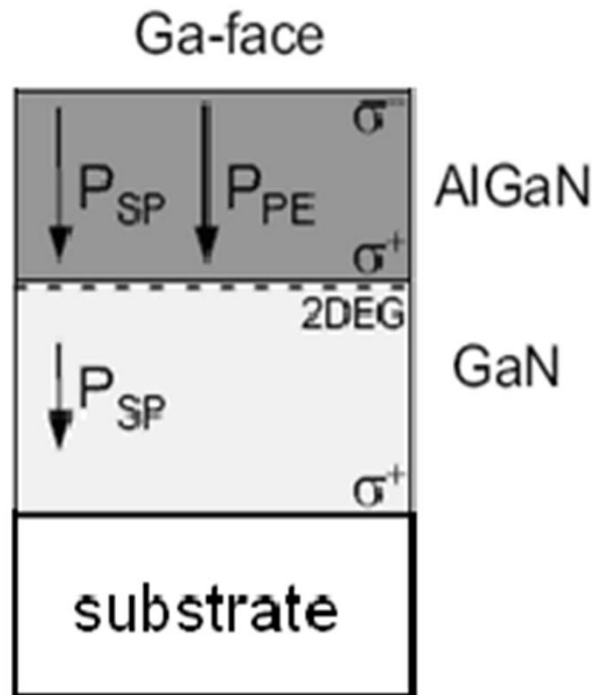
电流崩塌制约了器件的RF功率输出

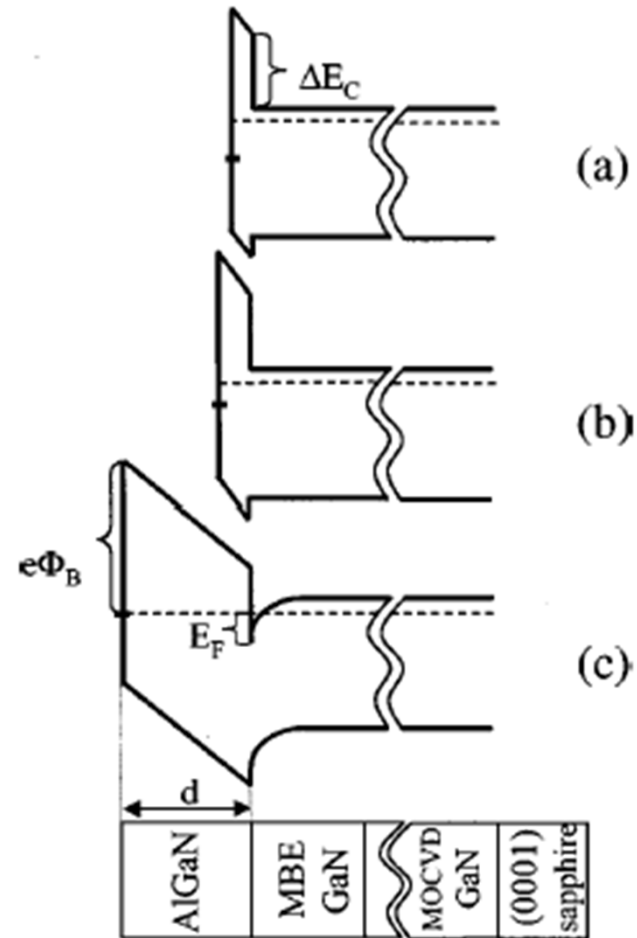


以上所述目前III族氮化物光电技术发展面临的问题，都与III族氮化物异质结构特性密切相关。



1, III族氮化物异质结构表面态

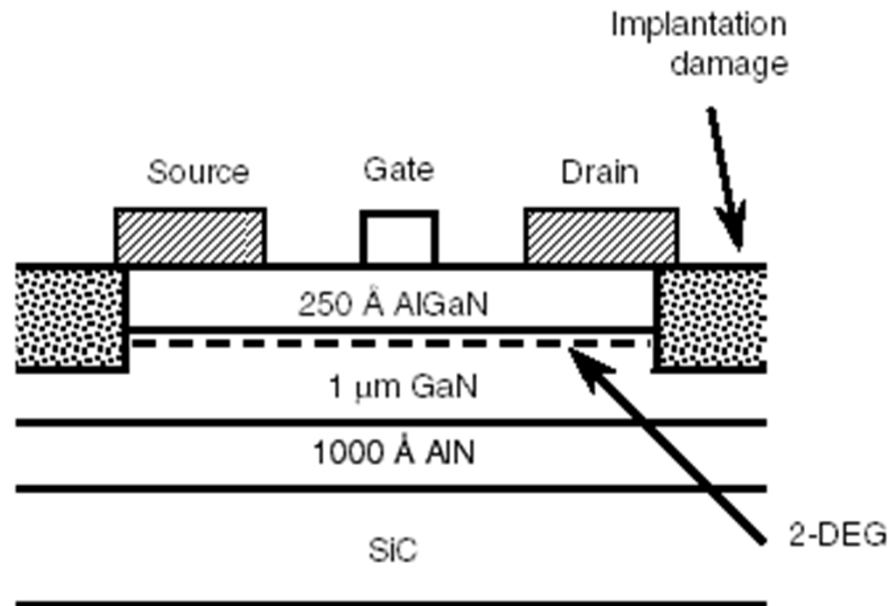




电子从表面态迁移至量子阱中形成二维电子气

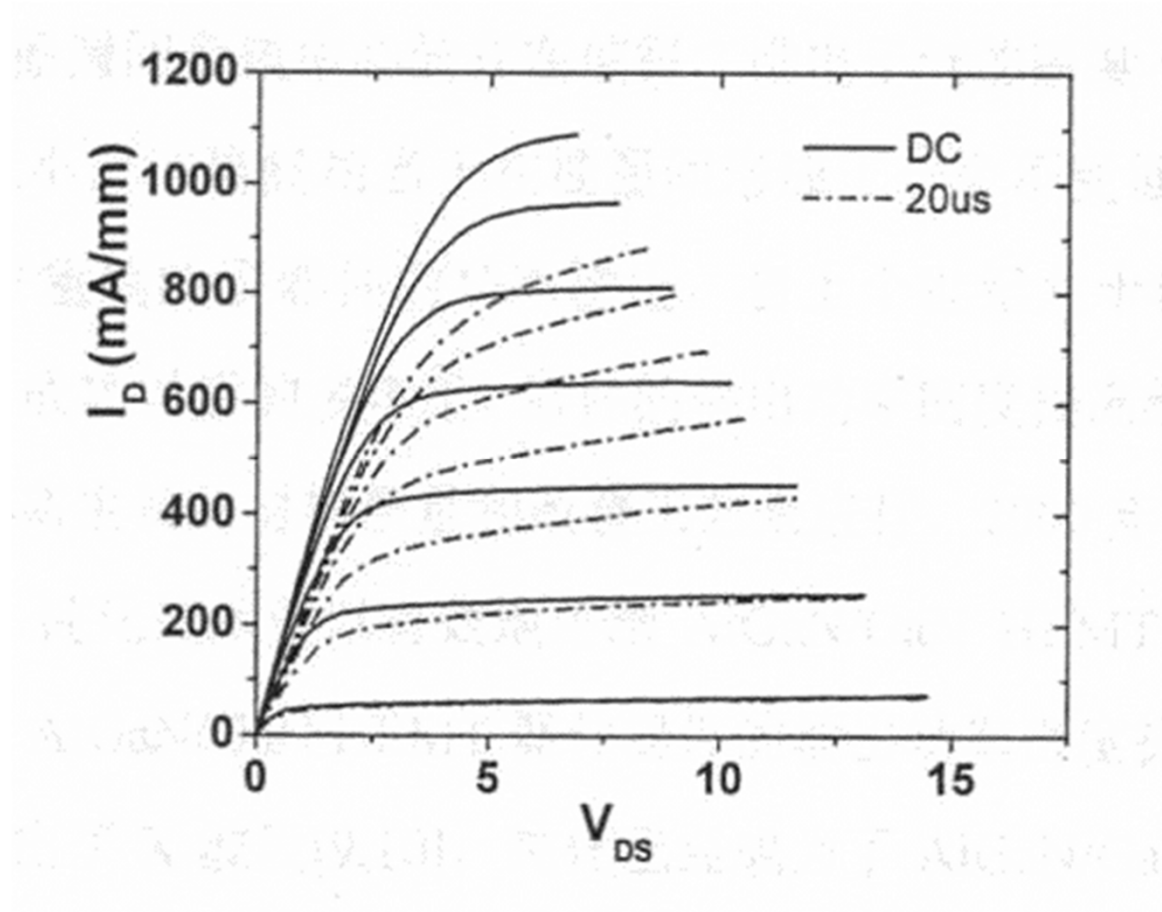


不同于GaAs材料，GaN基异质结构不存在费米能级钉扎现象，HEMT结构的2DEG很容易受表面环境引起的电势调制。





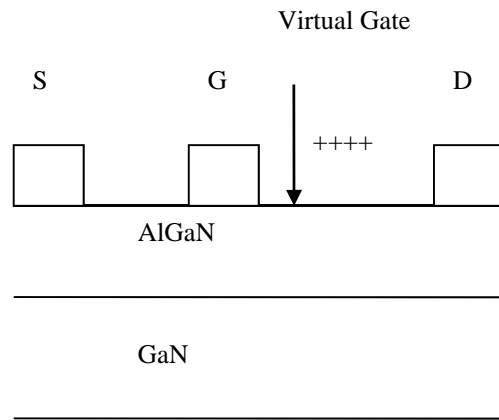
电流崩塌 (Current collapse)



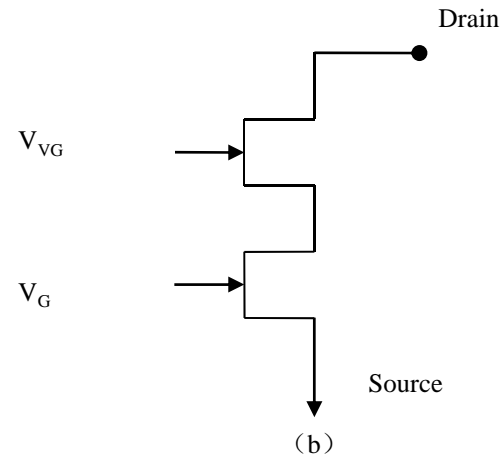


电流崩塌物理机制—虚栅模型

表面电子陷阱态充放电迟豫过程



(a)



(b)

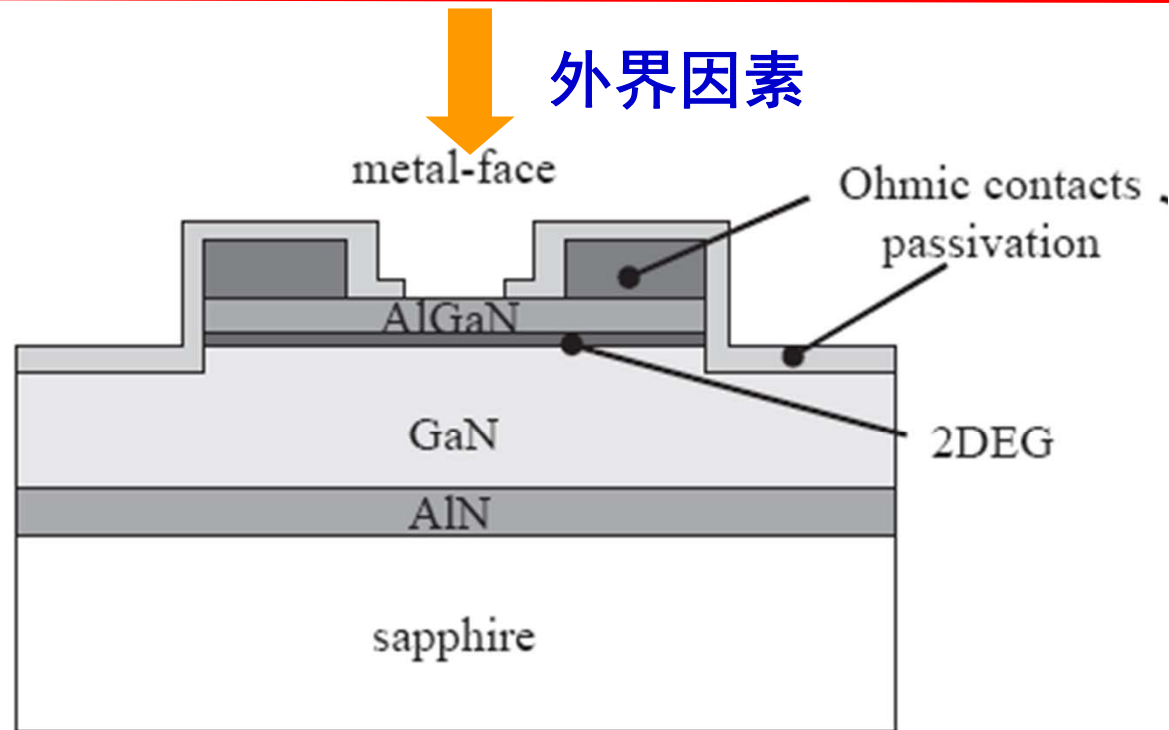


南京大學

反之，基于HEM结构2DEG对外界的敏感性，可用于发展各种2DEG传感器。



HEMT-2DEG传感结构



未掺杂的功能结构

极化效应感生高浓度**2DEG**（极化掺杂）

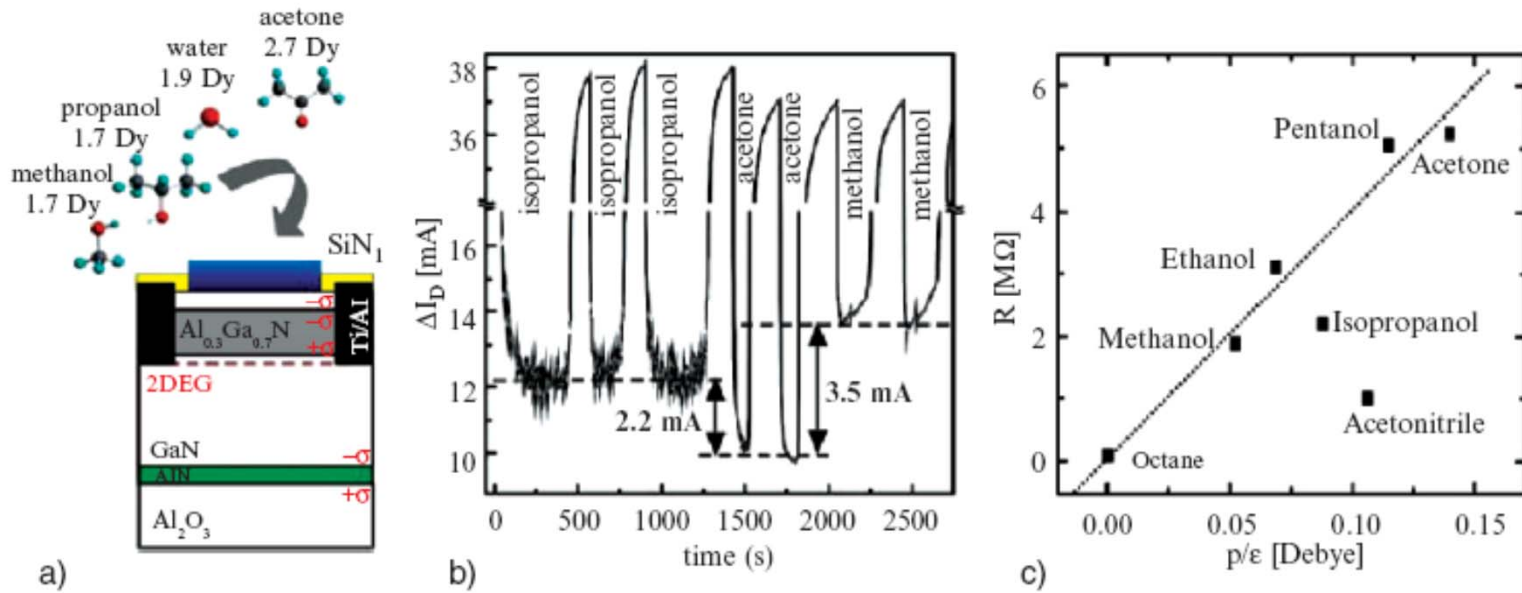
Open-gate M 面作为传感窗口

耐高温、抗腐蚀、抗高能粒子轰击提供稳定、可靠反应室 39



极化HEMT 2DEG表面电荷传感器

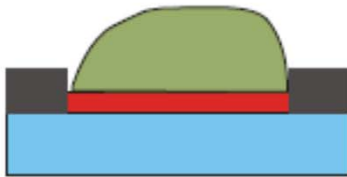
根据极化HEMT结构2DEG的物理机制，M面电荷的任何改变增加或减少，通过补偿或AlGa_N势垒层中电场放大，将使界面2DEG浓度相应增加或减少。因此，可用来探测气体，离子，生物分子和溶液PH值。



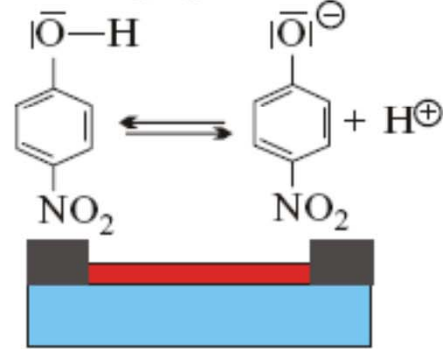
极性液体探测



direct monitoring of cell activity (action potential)

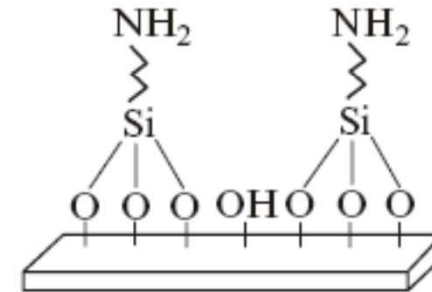


indirect monitoring of bioreactions through pH value

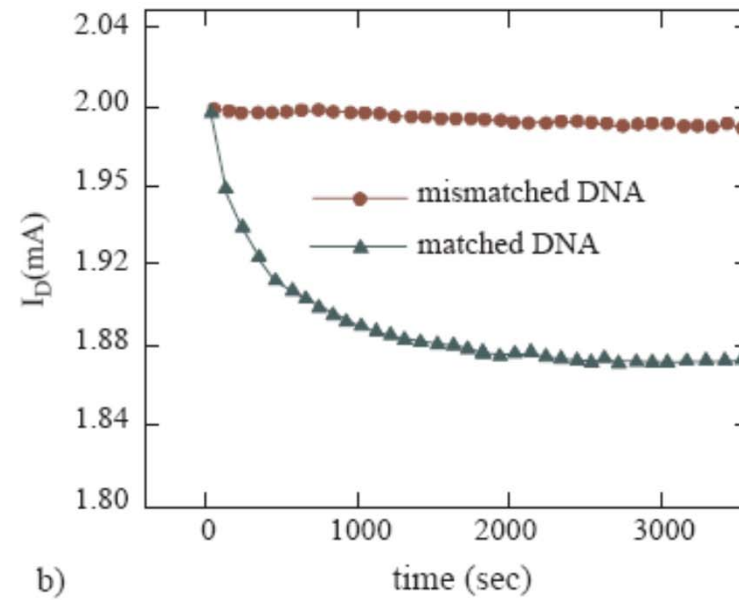
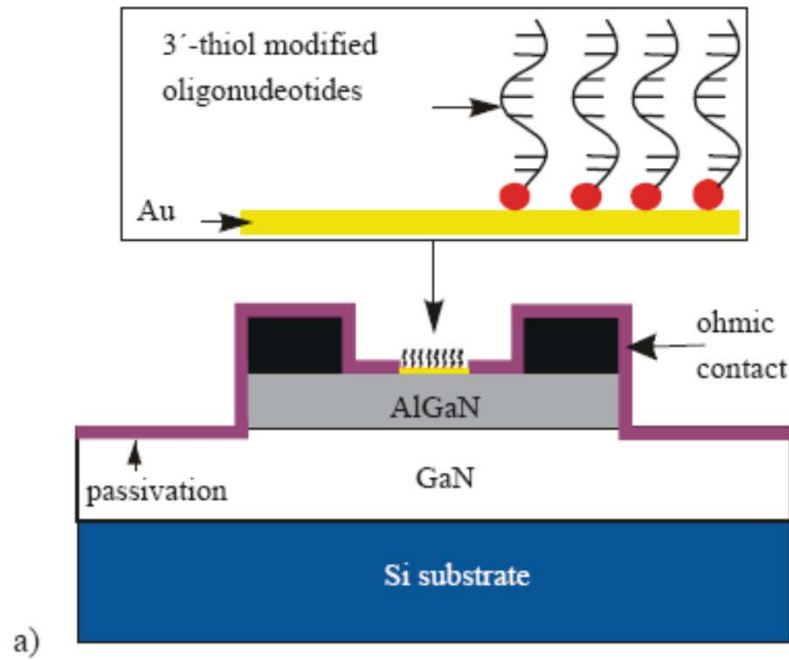


covalent bonding of biomolecules

- through Au-thiol chemistry
- directly on (modified) AlGaN surface



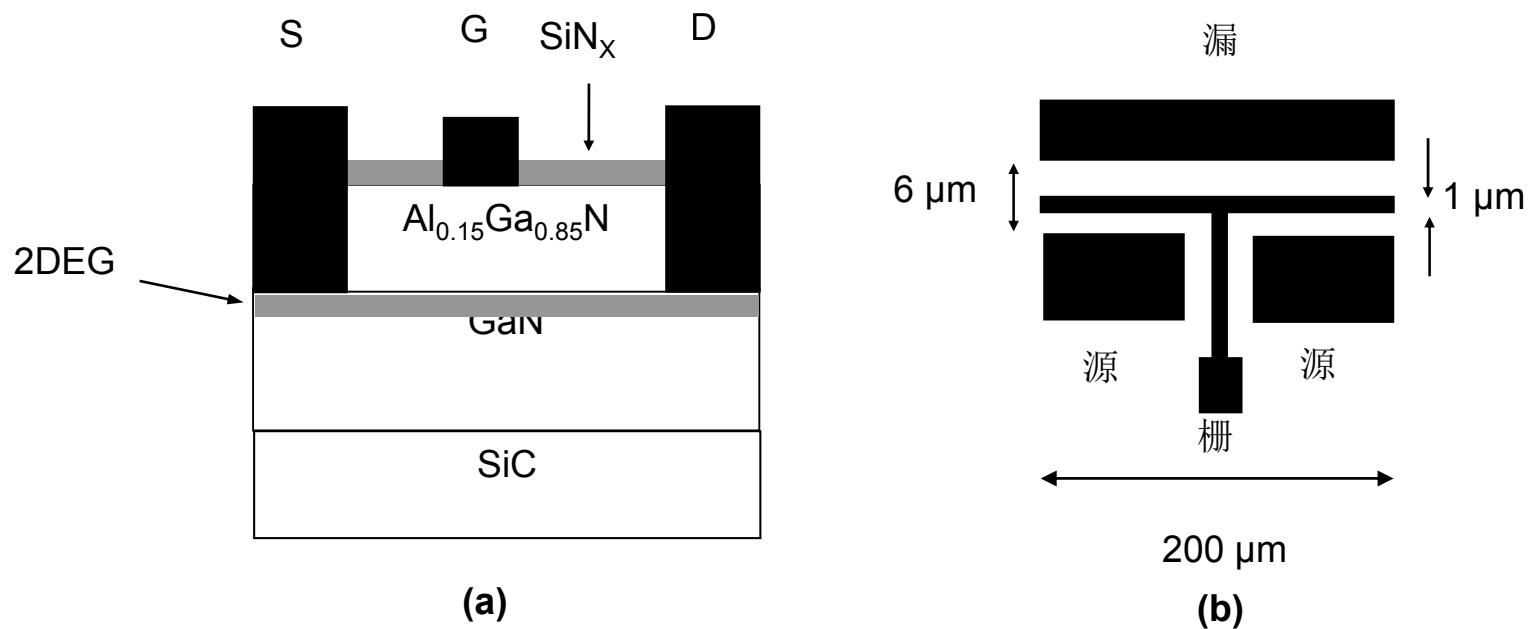
生物传感器



蛋白质探测器



AlGaN/GaN HEMT 紫外探测器

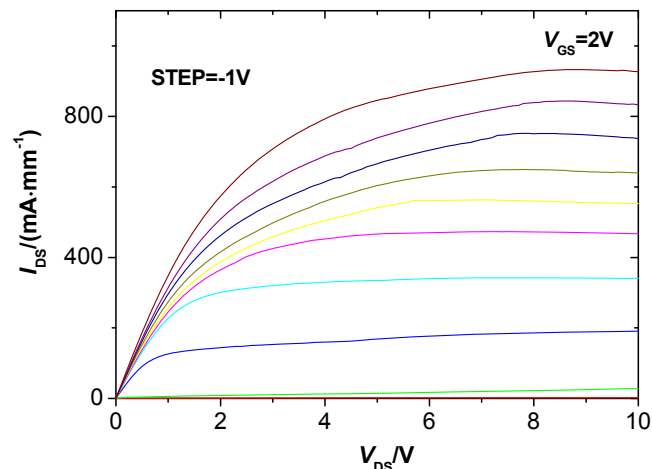


晶体管器件结构剖面图(a)与顶视图(b)

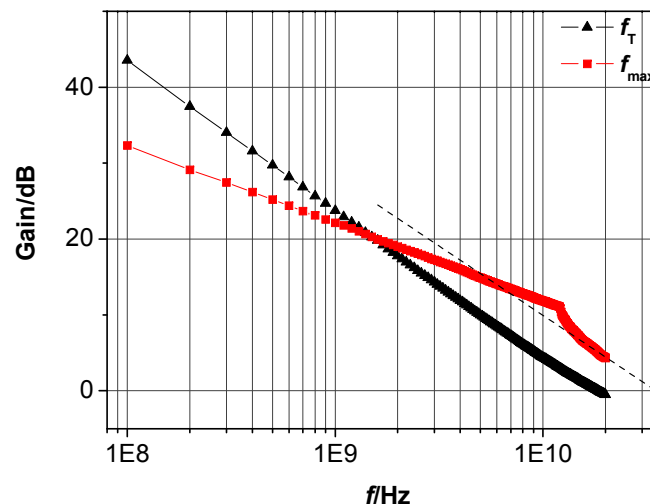
陈辰等人, CPL,24(9)2007



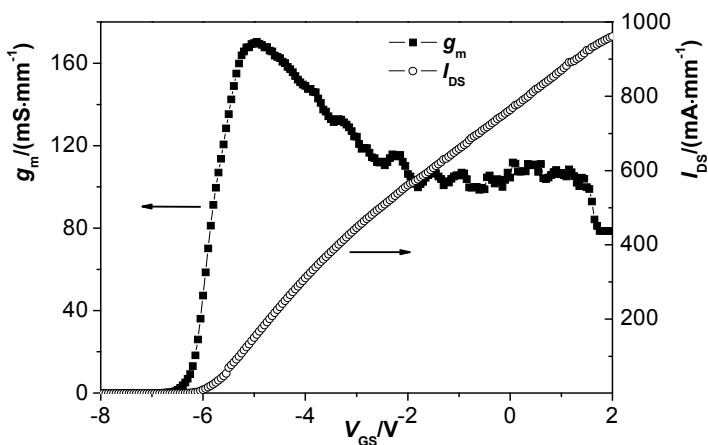
HEMT直流特性



输出特性曲线



增益与频率关系曲线

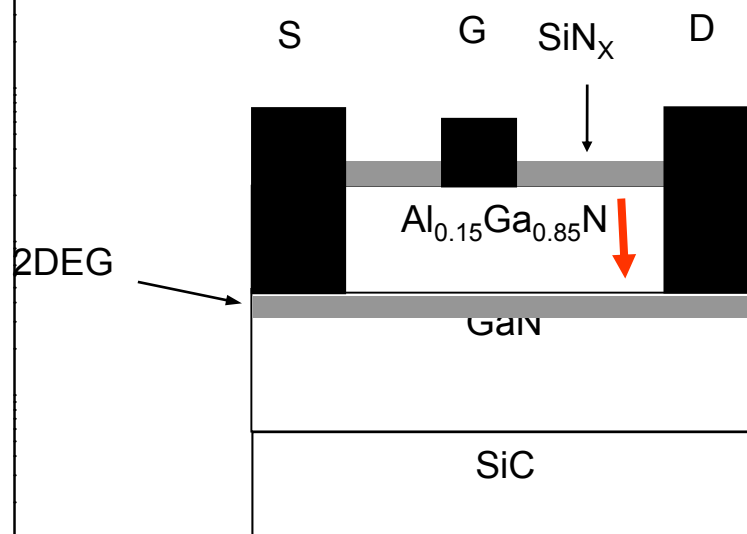
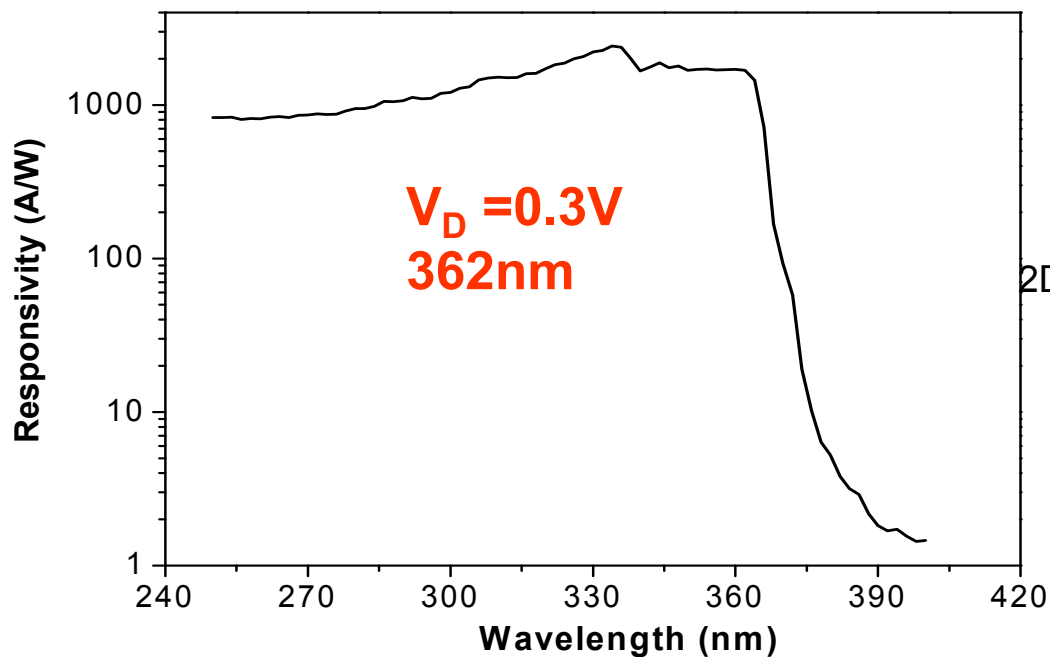


转移特性曲线

截止频率**19GHz**,
最大振荡频率**35GHz**。



主要光电特性



AlGaN/GaN 光电晶体管
紫外响应光谱

- 在362nm处，响应度为**1700A/W**，抑制比**3**个数量级， $\eta \approx 0.8$ 时，光增益 **$g \approx 7279$** 。
- 在333nm处出现一峰值，与Al_{0.15}Ga_{0.85}N的带隙对应。

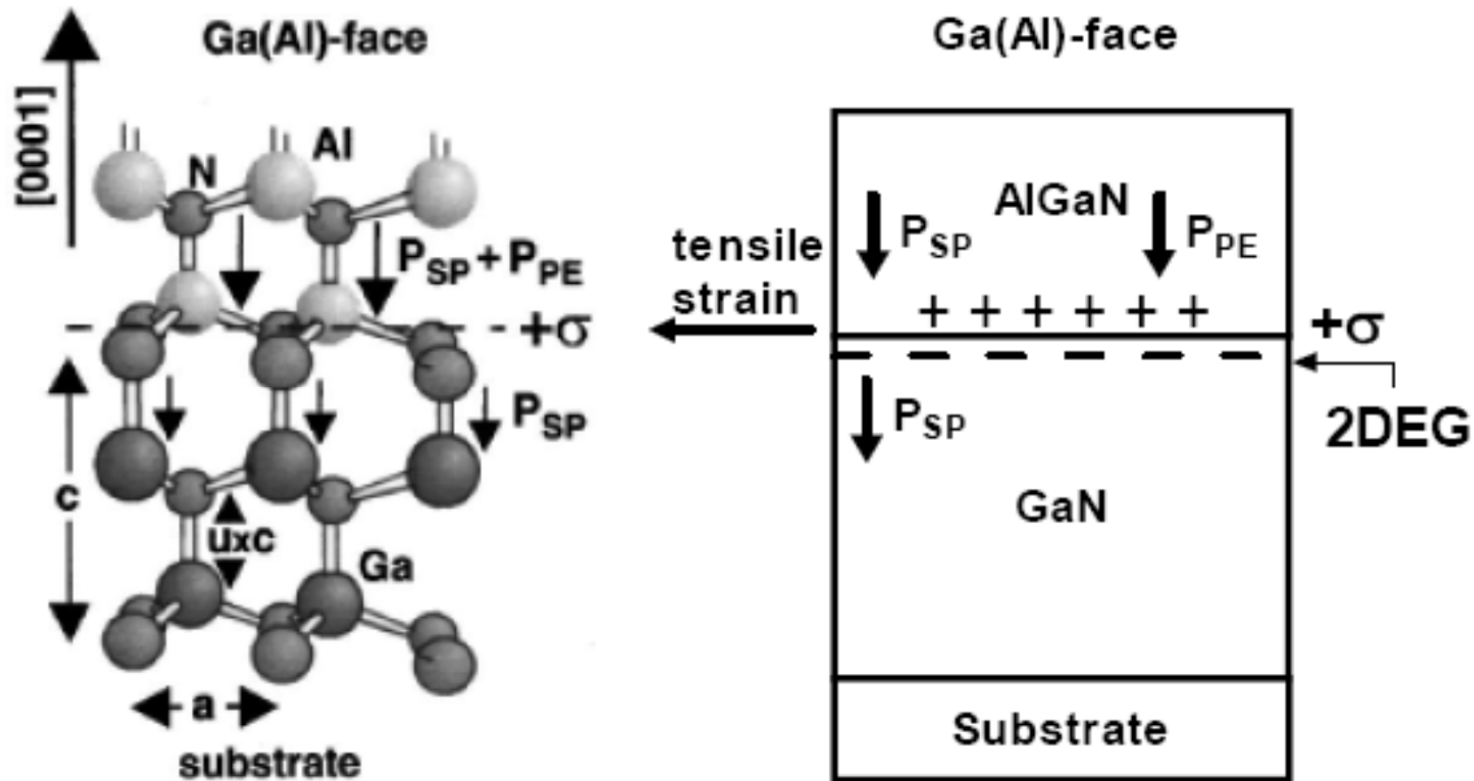


如何调控III族氮化物异质结构表面态？

- 表面钝化
- 应变调控
- 极化场调控

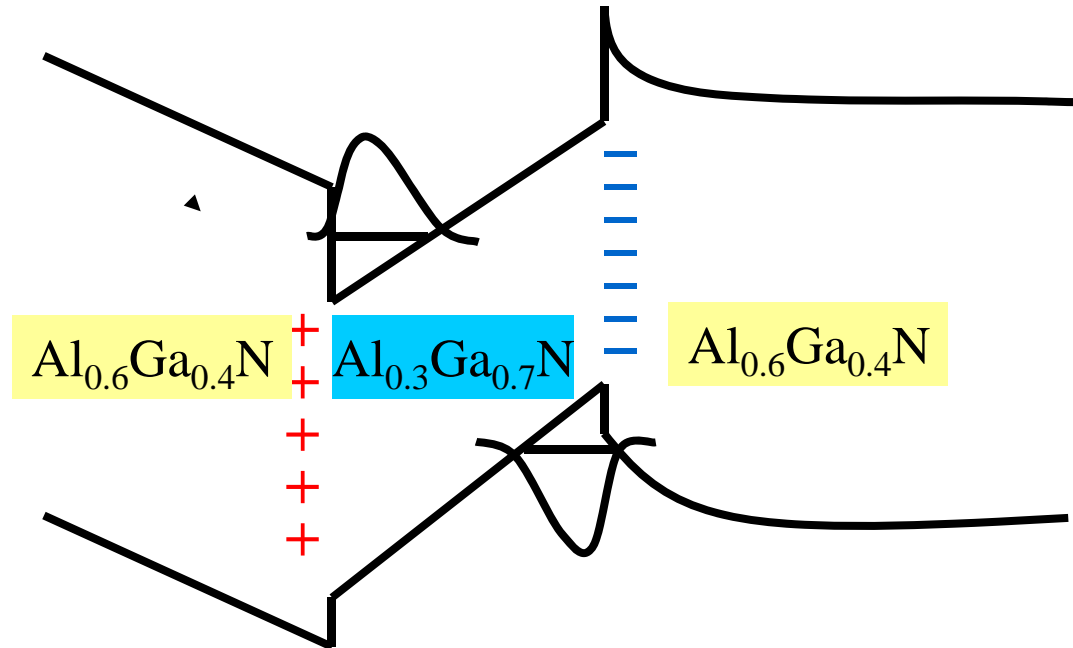


2, III族氮化物异质结构极化调控





极化场的”量子限制斯塔克效应 (QCSE)



- 使电子、空穴沿阱的不同界面分离
- 从而降低电子、空穴波函数的交叠



极化场量子限制斯塔克效应对发光器件 (LED, LD) 的影响:

1, 有源区电子空穴波函数交叠减小

LED、LD发光效率降低

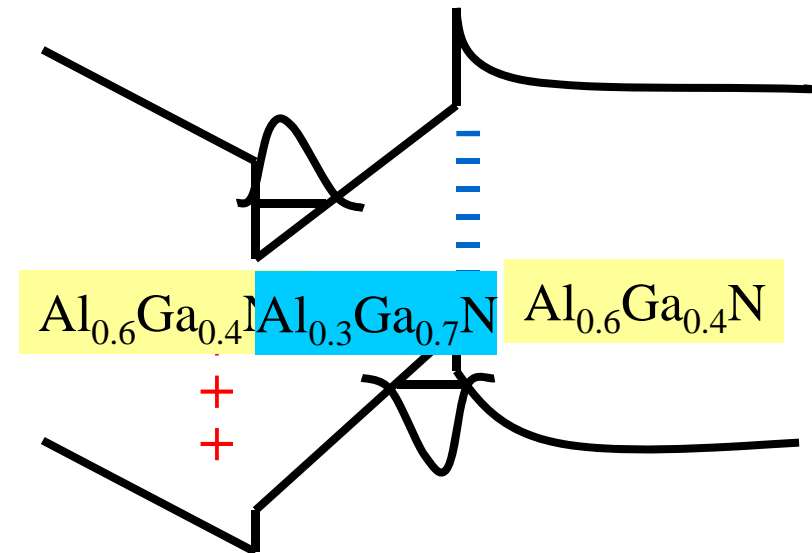
LD阈值电流增加

2, 有源区带隙收缩

发光波长红移

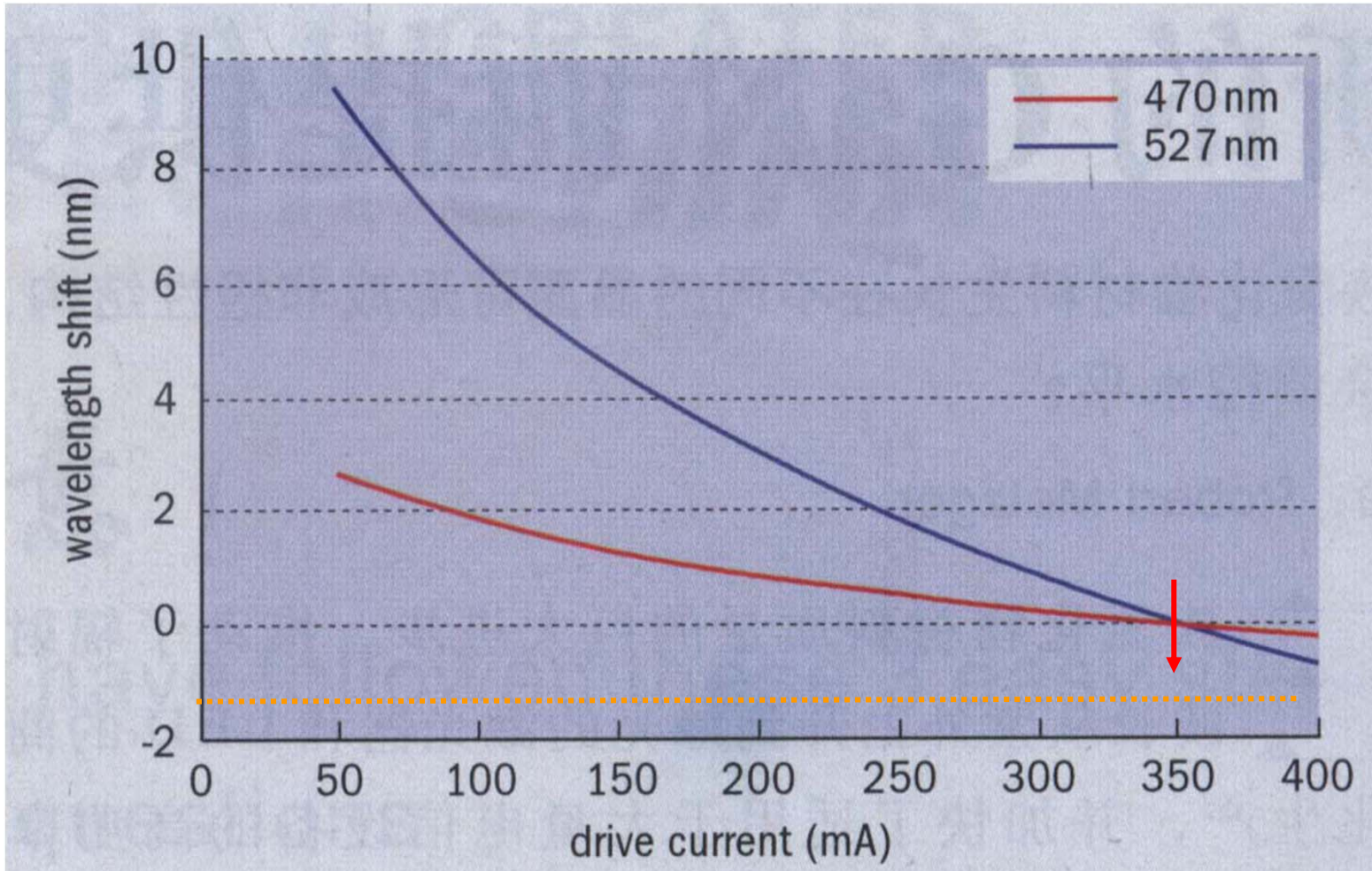
3, 注入电荷对极化场QCSE的屏蔽作用

发光波长蓝移





驱动电流对LED发光波长的调制



如何调控极化效应？



蓝光LED

- ◆ 低铟组份InGaN/GaN体系
两者自发极化系数相近, $\Delta P_{sp} \approx 0$
晶格失配不大, 存在压电极化, P_{PE}
但QCSE作用弱
- ◆ QCSE对器件性能影响不大
蓝光LED发光效率高
发光波长没有明显红移
发光波长随注入电流增大没有明显蓝移



绿光LED

- ◆ 低铟组份InGaN/GaN体系
两者自发极化系数相近, $\Delta P_{sp} \approx 0$
晶格失配大, 较强的压电极化, P_{PE}
QCSE作用强
- ◆ QCSE对器件性能影响较大
绿光LED发光效率低
发光波长有明显红移
发光波长随注入电流增大有明显蓝移

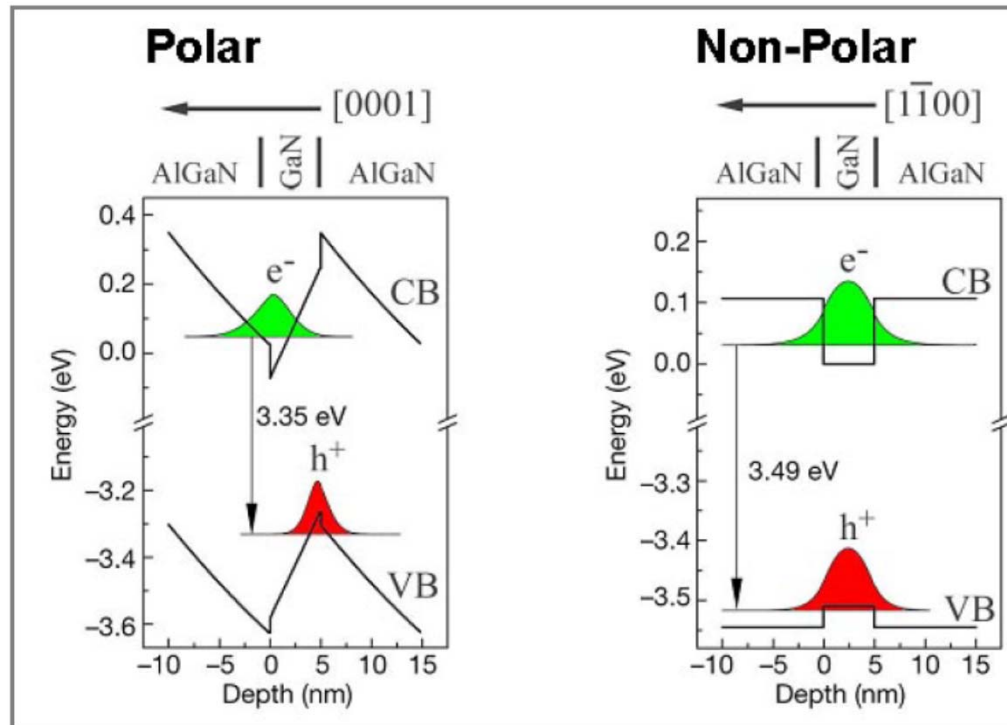


紫光LED

- ◆ 高Al组份AlGaIn/GaN体系
两者自发极化系数相差3倍, ΔP_{sp} 很大
晶格失配**很大**, 很强压电极化, P_{PE}
QCSE作用很强
- ◆ QCSE对器件性能影响较大
紫光LED发光效率**很低**
发光波长**有明显红移**
发光波长随注入电流增大**有明显蓝移**

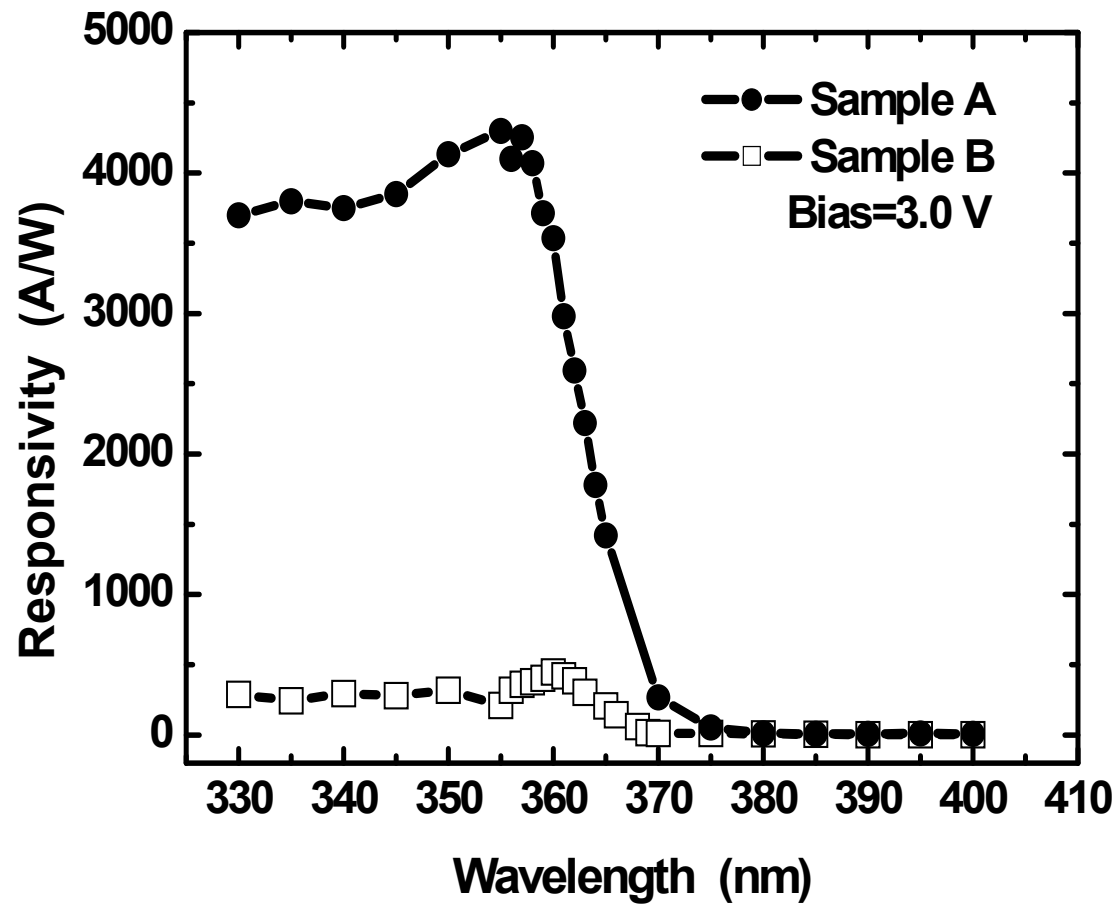


利用极化场的”量子限制斯塔克效应对源区电子态的调制，提高少子寿命，优化器件性能。





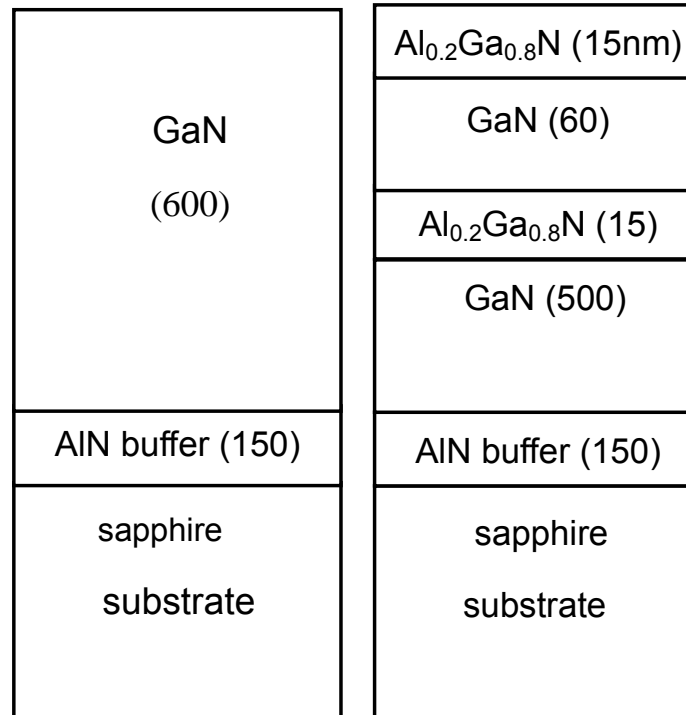
(8) AlGa_{0.22}N/GaN DH 紫外探测器



A: Al_{0.22}Ga_{0.78}N/GaN/Al_{0.22}Ga_{0.78}N/Sapphire
B: GaN /Sapphire



GaN基紫外光电探测器

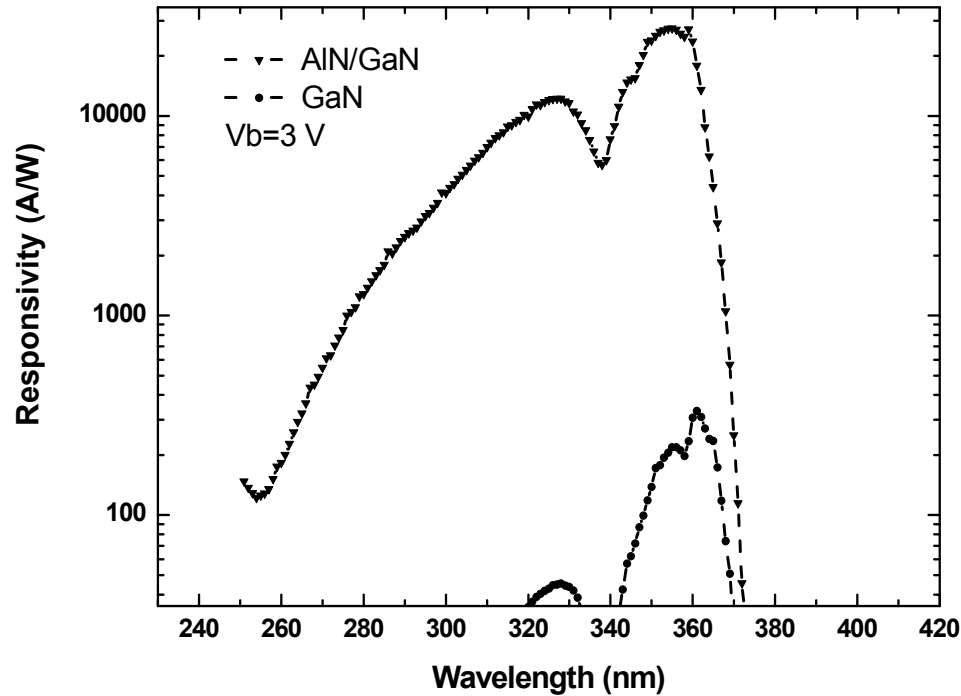


(a) monolayer

(b) multilayer

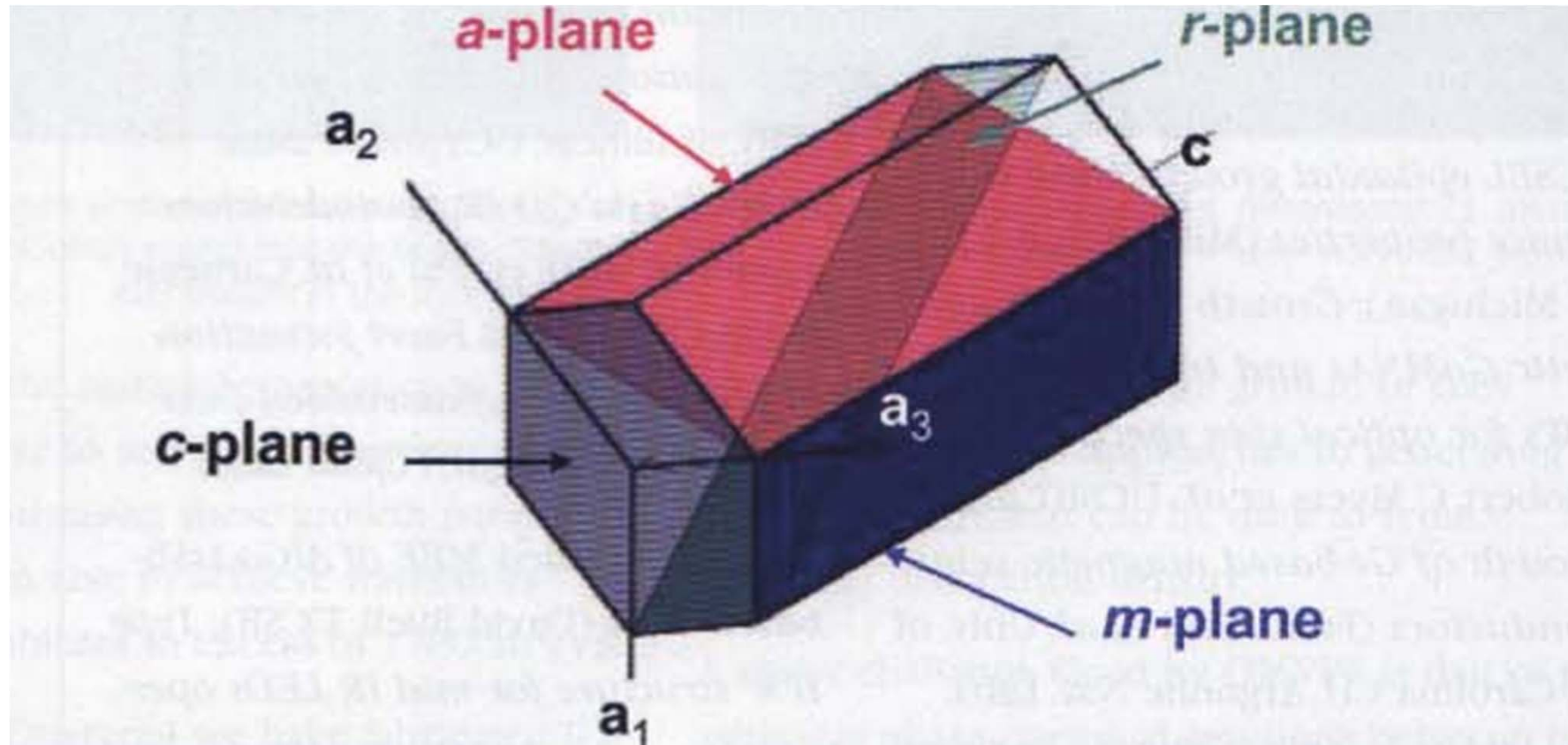


AlN/GaN紫外光电探测器



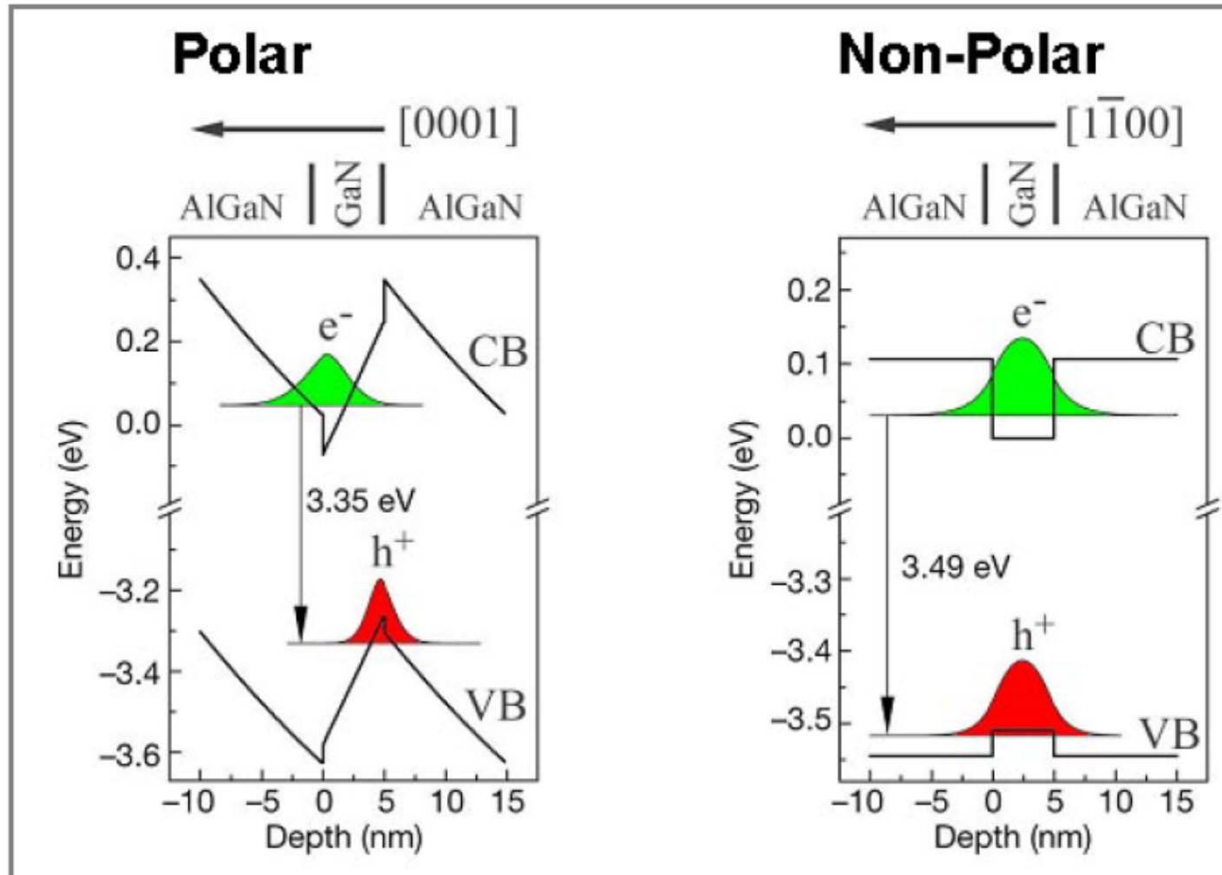
AlN/GaN探测器 峰值响应度高达27500A/W (3V, 358nm)
GaN探测器 峰值响应度330A/W (3V, 360nm), 前者相比高83倍。

六方结构III族氮化物晶面



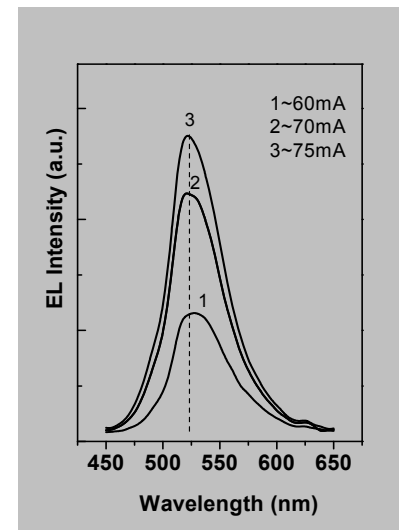
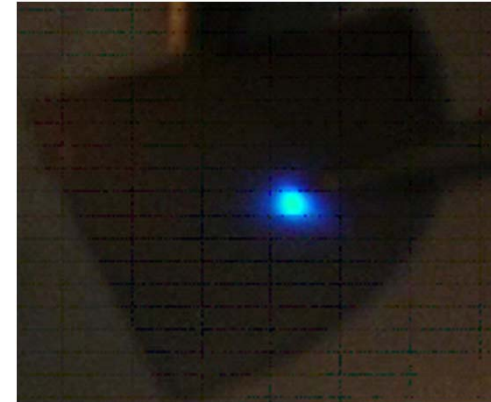
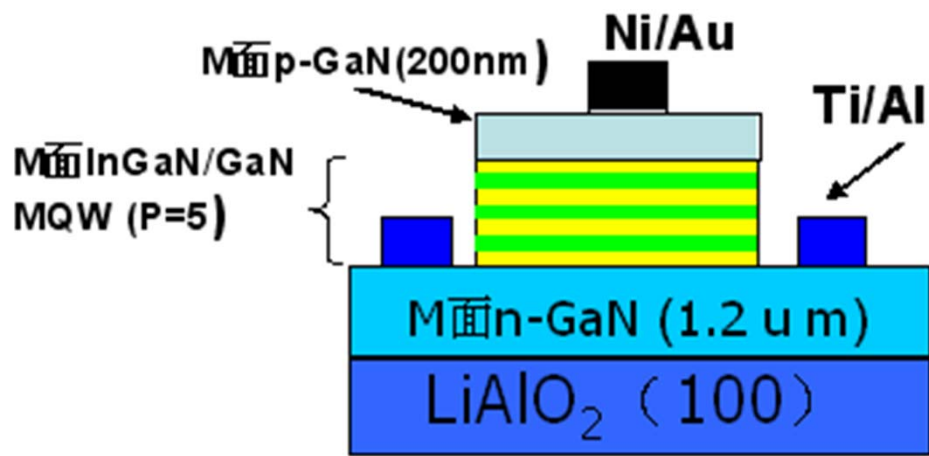
- ◆ c面为极性面
- ◆ a面、m面为非极性面
- ◆ r面为半极性面

六方结构III族氮化物晶面





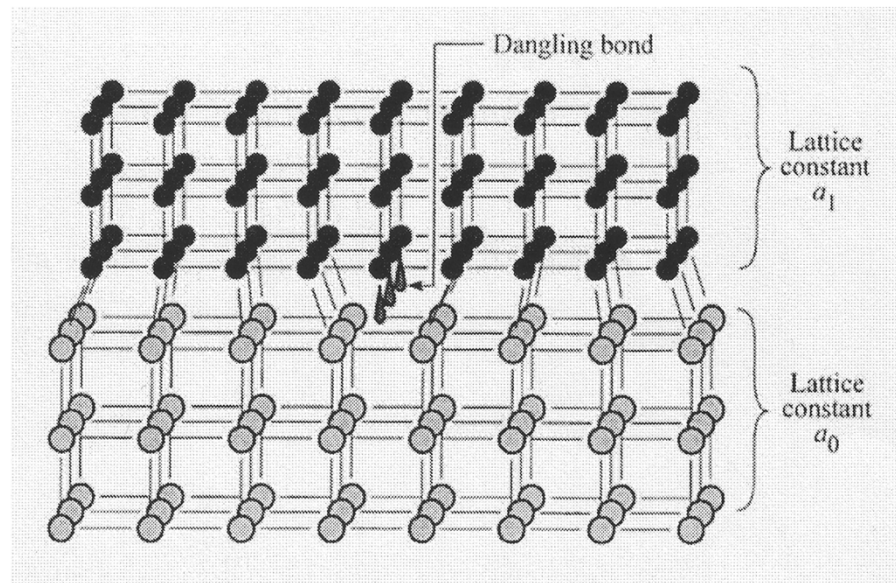
LiAlO₂上生长的M面InGaN/GaN异质结LED





3, III族氮化物异质结构材料缺陷与杂质

- ◆ 大失配异质外延
GaN与蓝宝石的晶格失配达16%
- ◆ 缺陷密度高达 10^8 - $10^{11}/\text{cm}^2$

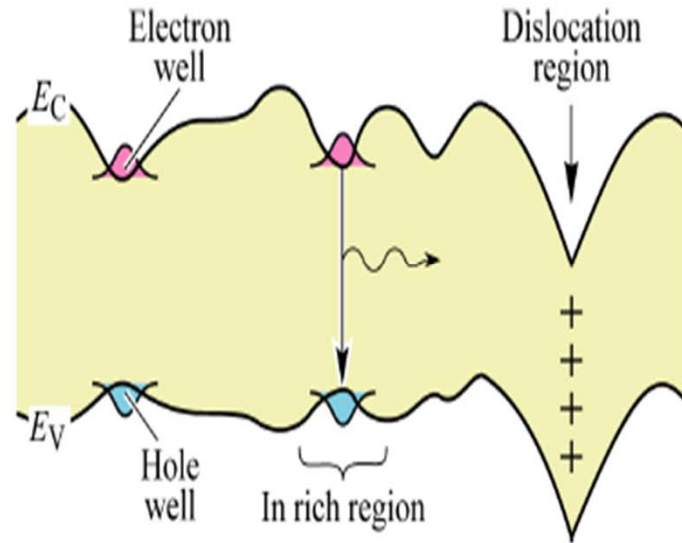




-
- ◆ **III族氮化物InGaN/GaN LED 器件失配位错高达 $10^8-10^9/\text{cm}^2$, 为什么还能高效发光?**
 - ◆ **为什么III族氮化物缺陷对光学性质的影响不像III族砷化物、 III族磷化物那样明显?**



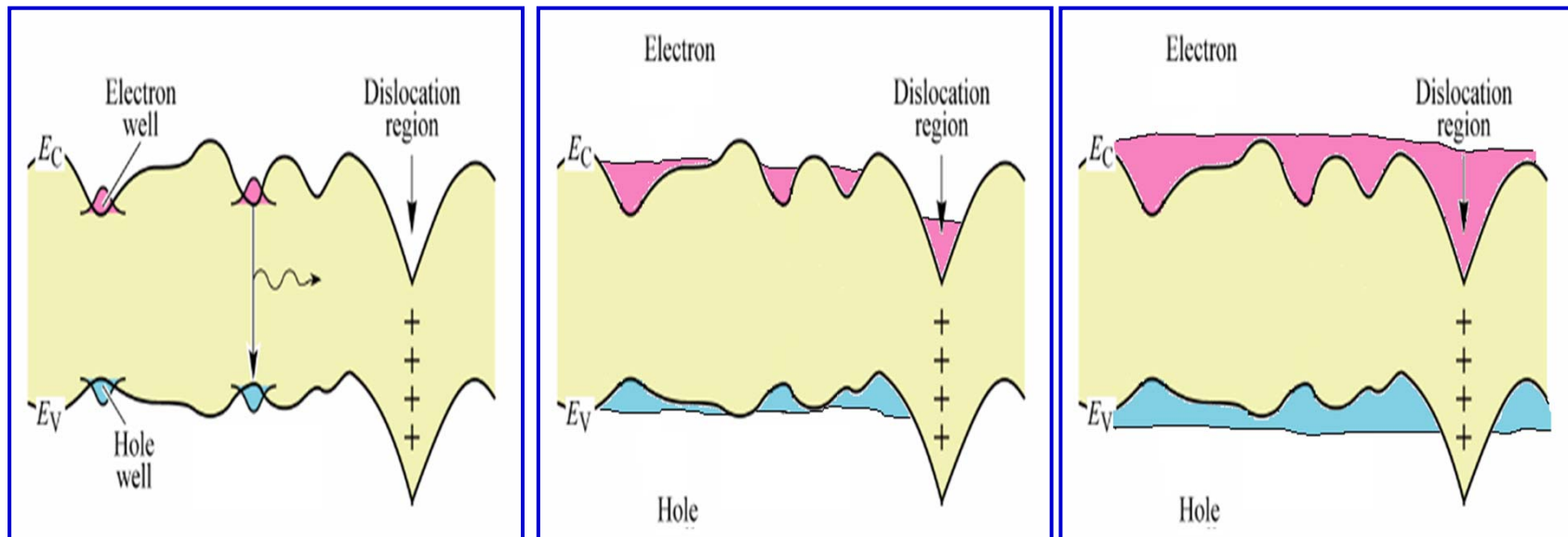
◆ In 组分起伏引入载流子带边局域化效应



- 位错电激活性非常小，空穴扩散长度很小
- 载流子带边局域化效应扼制了缺陷对载流子非辐射复合行为，导致**LED**高效发光。
- 大注入下载流子积累退边局域化效应，使效率下降

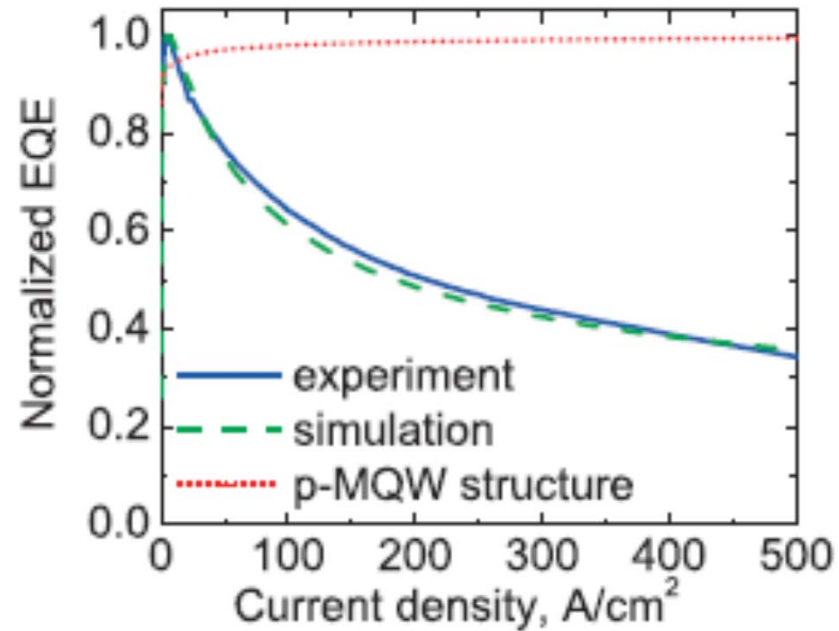


大注入条件下， $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 量子阱电子、空穴通过缺陷的非辐射复合过程





高驱动电流工作时LED“量子效率下降” (Efficiency Droop) 的问题



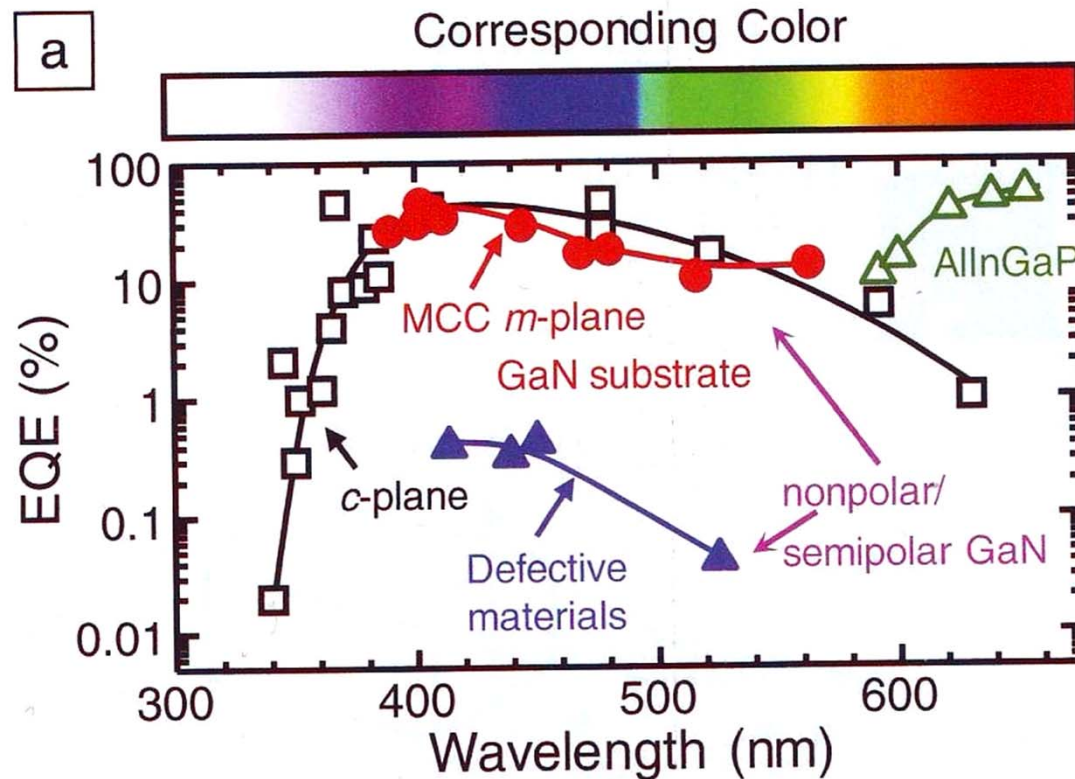


Al_xGa_{1-x}N体系材料

◆ Al_xGa_{1-x}N体系材料，一般认为不存在局域化效应，而且高Al组分 Al_xGa_{1-x}N与GaN之间的晶格失配和热失配都比 In_xGa_{1-x}N/GaN体系材料大得多，因而高缺陷密度是高Al组分 Al_xGa_{1-x}N外延材料最突出的问题。



◆ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 材料中的穿通位错和点缺陷起着非辐射复合中心作用，强烈影响其发光性能，将明显降低绿光、UV光发射效率。





◆ 弄清缺陷对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 材料的发光性能的影响以及如何降低高Al组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 材料的缺陷密度是发展绿光和深紫外LED器件的至关重要的问题。



高Al组分AlGaN材料导电性

- ◆ Al空位 (V_{Al}) 是AlGaN 材料中最典型的缺陷，它是在材料外延生长中产生的。
- ◆ 对于高Al组分AlGaN材料， Al空位的形成能随Al组分增加而减小，因而，外延生长期间Al空位很容易形成，并且与O杂质的结合形成了O- V_{Al} 络合体。



◆ 高Al组分AlGa_N材料中高浓度O和V_{AL}的存在，使材料成为高电阻率。

因此，由于杂质、缺陷相互作用使高Al组分Al_xGa_{1-x}N材料常呈现低电导特性，甚至成为半绝缘性质。

eg. 非故意掺杂AlN 成为半绝缘性质。



在 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 材料中施主、受主杂质 激活能随Al组分增加而增大:

- ◆ Al的含量每增加1%,受主杂质(Mg)的激活能增大3meV。施主(Si)激活能增大5.23meV
eg. $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ 为23meV; AlN 为180meV
- ◆ Al组分每增加8%,电阻率将增大1个量级,
高Al组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 材料很难得到高电
导率的N型和P型材料。



降低缺陷密度—异质外延---准异质外延----同质外延

应变能带工程

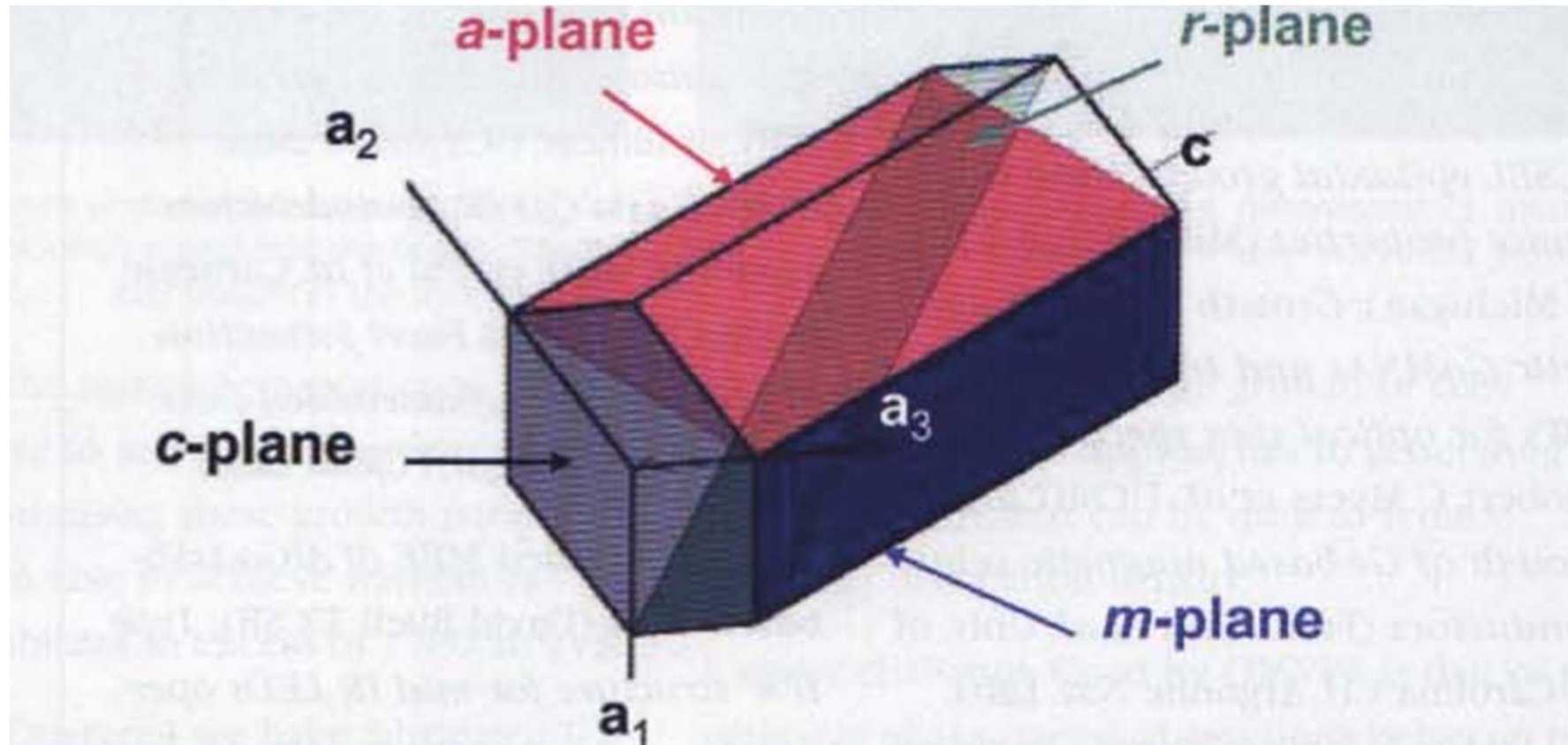
同质模板

单晶衬底

极化调控

大芯片技术

六方结构III族氮化物晶面



- ◆ c面为极性面
- ◆ a面、m面为非极性面
- ◆ r面为半极性面

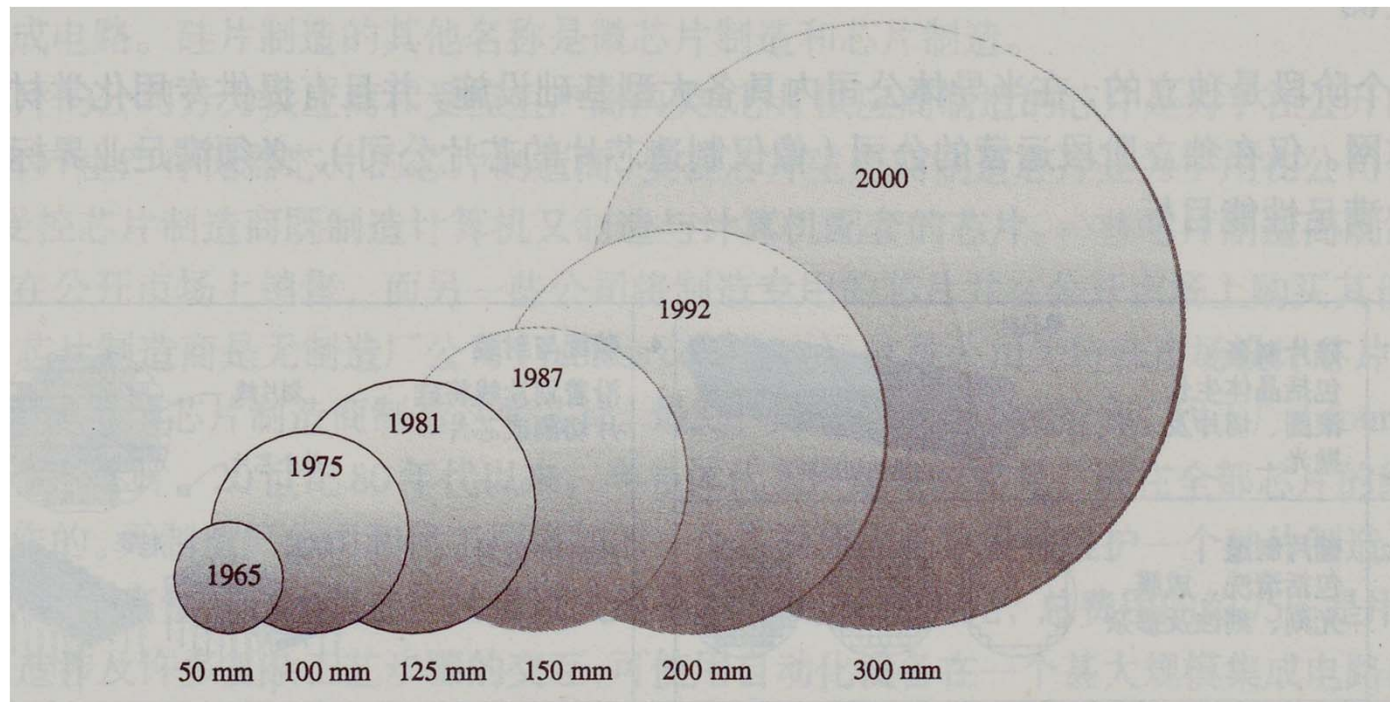


发展LED 芯片规模量产技术

- ◆ 面对产业正步入快速成长期，一方面对芯片需求量越来越大，另一方面降低芯片制造成本日益重要。因此，提高产能，降低成本成为技术发展的当务之急。
- ◆ 如何提高产能，降低成本？基于芯片工艺技术与硅微电子芯片的相似性，可以借鉴、吸取硅微电子芯片的发展经验。



◆ 增大硅片直径是提高产能，降低成本的有效手段。



硅片大直径化历程



◆ 因此，为提高LED照明芯片产能，降低成本必须实行“从多片小尺寸外延生长朝向大尺寸外延”的生产技术路线。这样，可有效提高每次外延生长周期的可用芯片面积。

◆ 据AIXTRON 公司分析（AIX G5型MOCVD）

（1）42x2”/次，总面积为851cm²，可用面积为662cm²；

（2）6x6”/次，总面积为1094cm²，可用面积为1009cm²；比（1）提高52.63%



发展LED 芯片规模量产技术涉及：

- 大尺寸芯片 MOCVD外延设备
- 大尺寸外延衬底材料选择与制备
- 大尺寸芯片MOCVD外延技术
- 大尺寸LED芯片器件工艺生产线



报告内容:

- 一、 III族氮化物异质结构是III族氮化物技术的核心
- 二、 III族氮化物异质结构材料面临的几个科学技术问题
- 三、 结束语



机遇不断，

挑战不停，

满怀信心，

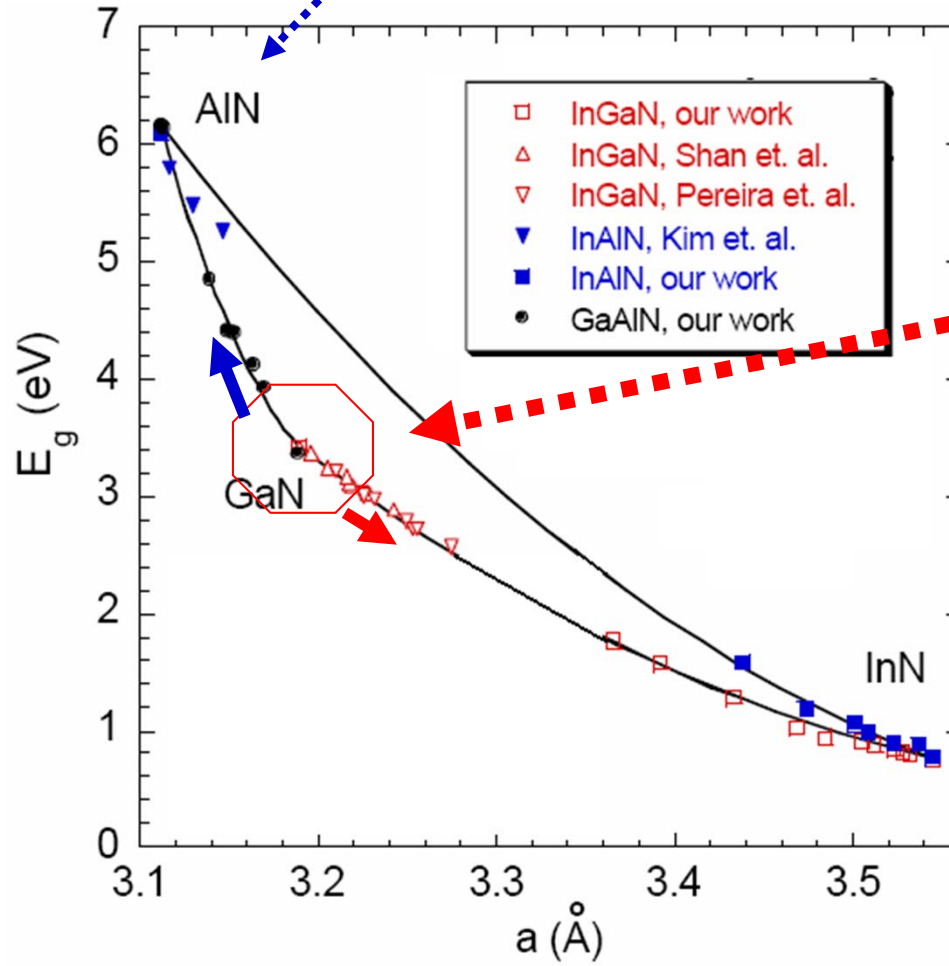
空间巨大，

任重道远，

前途无限！



AlN-based ?



GaN-based

InN-based ?



谢谢!



2010.10.14