



GaN基场效应晶体管及太赫兹 探测应用研究

陈效双

中国科学院上海技术物理研究所
红外物理国家重点实验室

2014年6月5日于北京大学

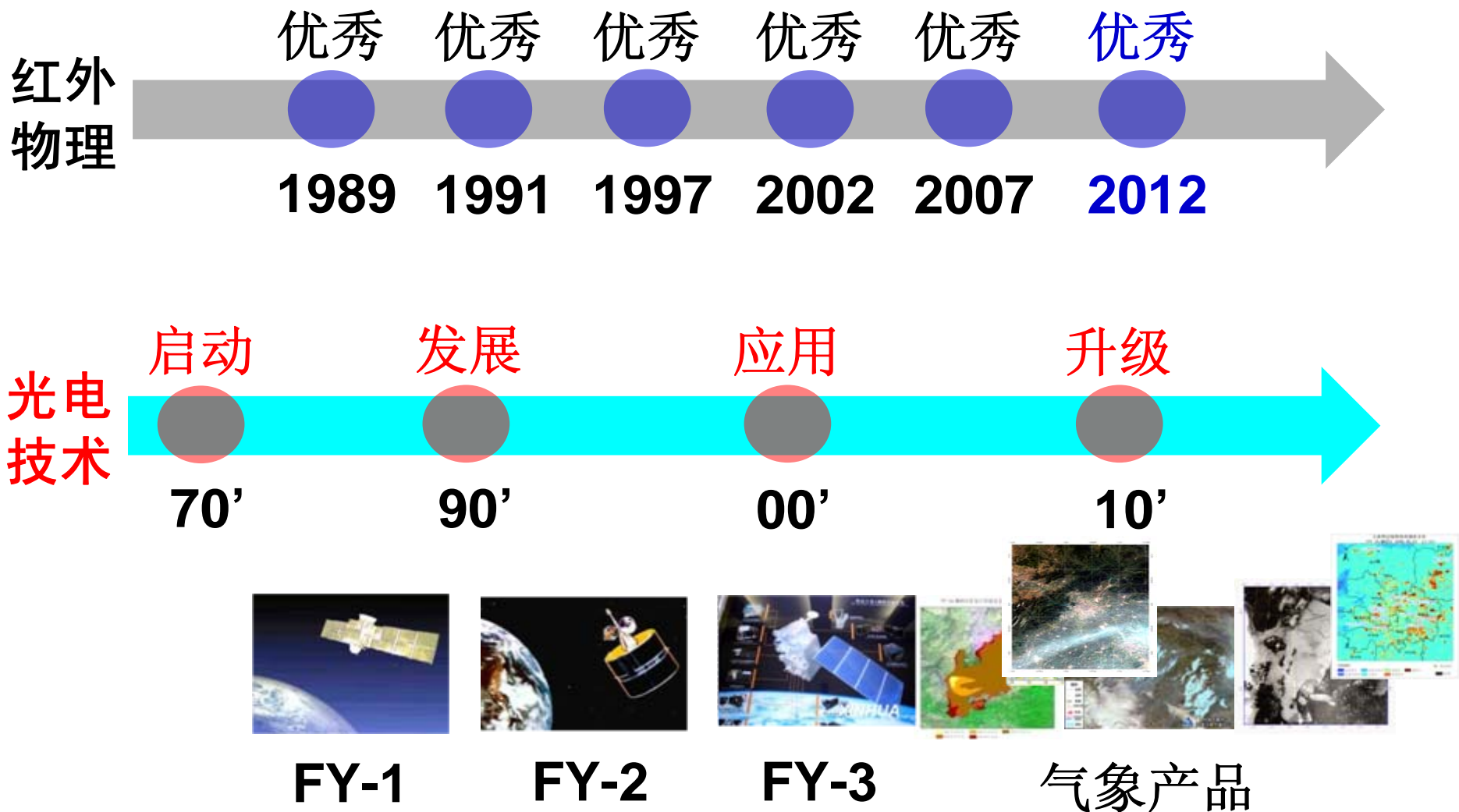
- 一、实验室介绍**
- 二、氮化镓基高速电子器件**
- 三、氮化镓基固态THz探测器件**
- 四、展望**

上海技术物理研究所虹口园区的分布图

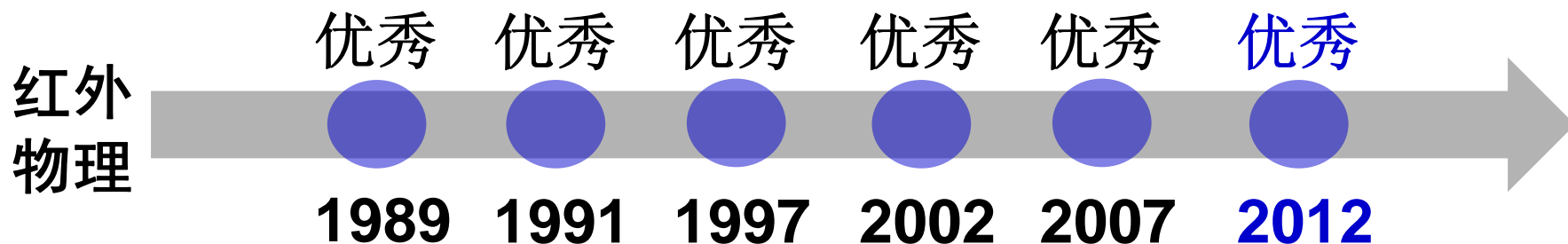


红外物理国家重点实验室

实验室的发展：



实验室的发展：



以光谱学为核心
手段的光电跃迁
过程机理研究

窄禁带半导体物理
为核心的材料与器
件物理和技术

红外光电子学与
空间光电新技术
交叉融合发展

空间光电技术
努力跟踪先进

空间光电技术
努力赶上先进

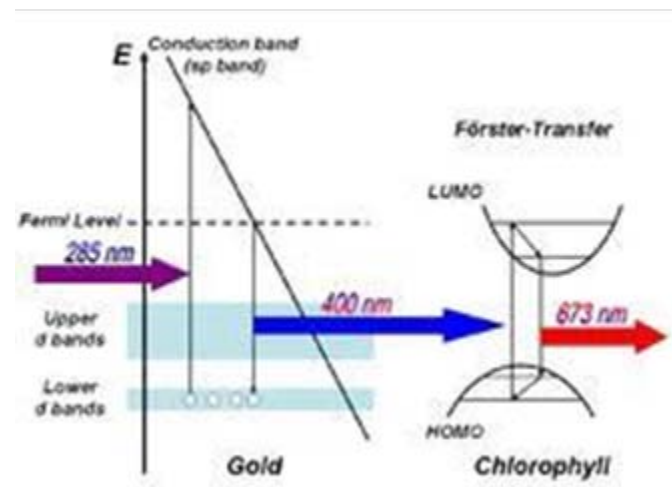
空间光电技术
努力超越先进

总体定位：高水平基础研究目标，有效支撑前瞻性重大技术的发展

学

电子学
学科特征：光子

光电转换过程



技术特征：国家重大需求—空间光电技术

面向国家需求，面向国际前沿，科学问题与国家重大需求结合



战略应用： 导弹预警、红外侦察

核心探测器： 长线列、大规模焦平面

探测波段： 紫外—可见—短、中、长、甚长波段红外

战术应用：

精确制导
火控
导弹地形匹配
红外告警等



1024X1元探测器件



科学研究的内涵：

红外探测新方法

星载红外对地观察系统，航空遥感等红外系统

元器件新功能

红外成像材料与器件，红外可见特种元器件，光子器件新结构、新技术

红外物理基础科学

材料物理，光电子物理，器件物理的新概念、新原理

- 突破了碲镉汞红外探测器与气象卫星系列等红外有效载荷系统高效集成技术。

保持国际领先

- 提升了大规模红外焦平面器件水平，实现了与我国第三代空间红外探测系统的高效集成和卫星重大工程应用。

持续解决国家战略性高技术难题

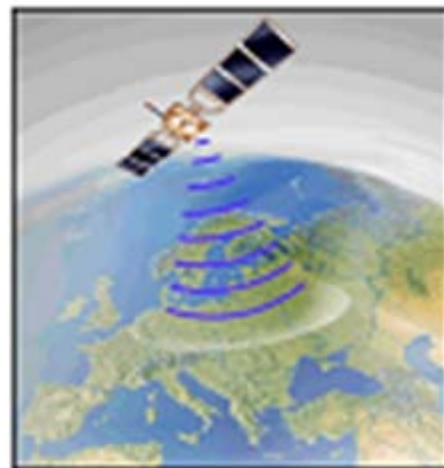
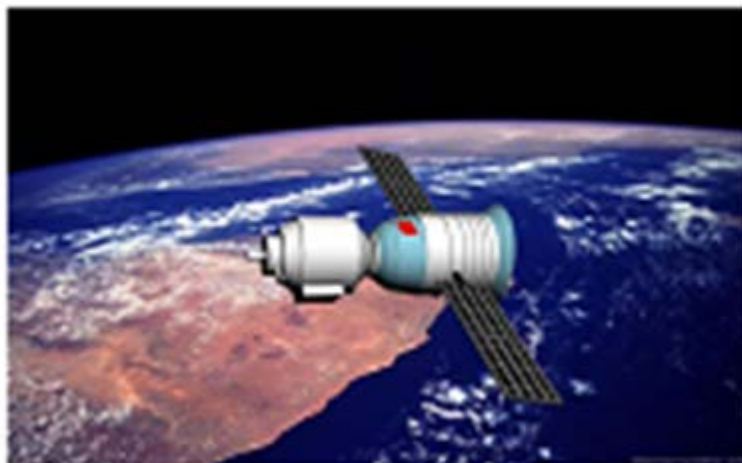
- 发展了基于自身学术思想的新型量子器件及其空间应用新技术。

形成具有原创性的红外新技术

未来的
红外
探测
需求

成像速度: 慢速(分) → 快速(秒) t 10^{-2}
探测距离: 百公里 → 千公里 $1/R^2$ 10^{-3}
空间分辨率: 公里 → 米 L^2 10^{-6}
光谱分辨率 ($\Delta\lambda/\lambda$): $10^{-3} \rightarrow 10^{-4}$ $\Delta\lambda$ 10^{-1}

能量的急剧下降: $10^{-1} - 10^{-11}$



- 窄禁带半导体材料、器件物理与应用
- 人工量子结构的量子态调控与应用
- 光子探测与主动探测技术
- 非制冷辐射探测材料与器件应用
- 红外光谱学新方法发展与应用
- 固体材料的低能激发和输运调控

3、典型代表性数据

科技奖： 国家技术发明二等奖 2项
省部级科技一等奖 9项

科研项目： 国家重大专项 3项
973&重大基金(首席) 4项
863&GF预研 7项

总经费32435万，国家级任务占78%，人均100万/年。

3、典型代表性数据

人才： 中科院院士 3人
国家杰出青年基金 3人
中国科学院百人计划 4+3人
国家基金委创新团队 1项



中国科学院院士



Prof. D.Y. Tang
Narrow gap
semiconductor
material



Prof. S.C. Shen
Low-dimensional
semiconductor
and Spectroscopy



Prof. J.H. Chu
Narrow gap
semiconductor and
Ferroelectric Film

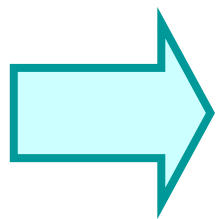
4、代表性研究工作进展 (1)

大规模(高分辨), 多色, 长波, 高度集成的微型化

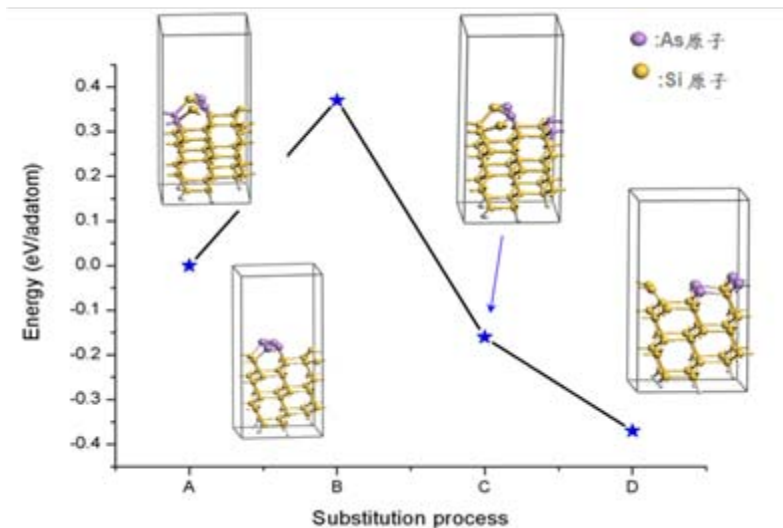


大失配异质外延
分层掺杂

经验/半经典的模型



量子的特征机理

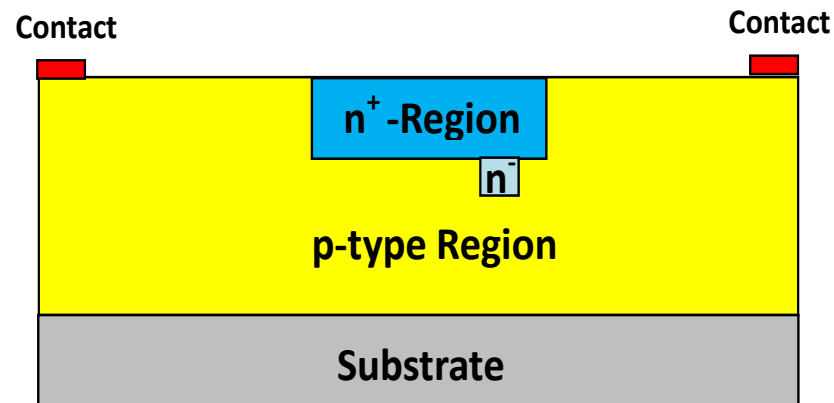
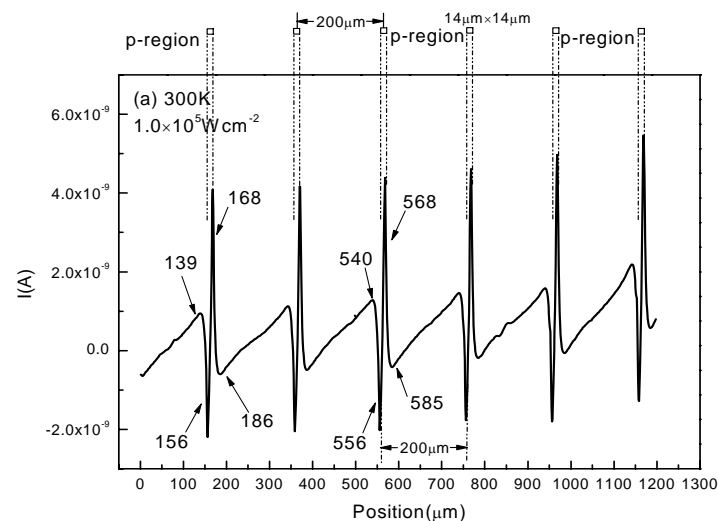


揭示了As在硅表面与Si原子置换过程的物理机理。

HgCdTe单元红外探测器件的 缺陷诱导漏电流

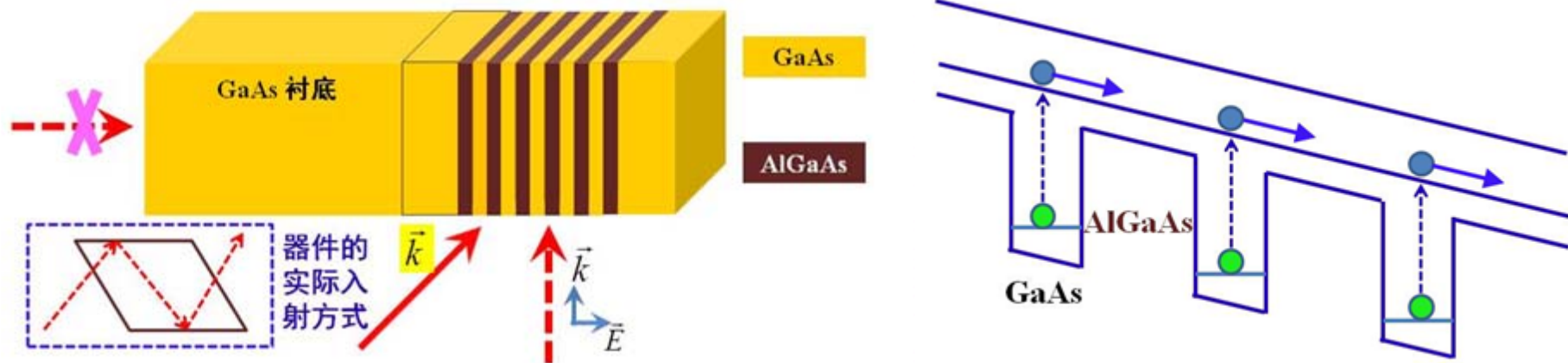
发现： pn结区附近出现附加的光电流信号，表明结区部分区域属性发生改变。

结论： 缓变区域附近缺陷诱导形成小的pn结，产生反向电流。



4、代表性研究工作进展 (2)

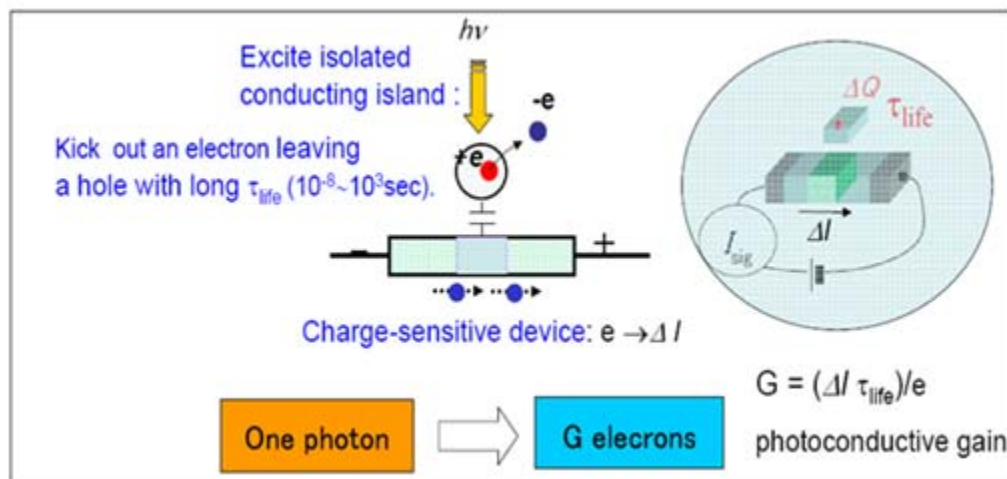
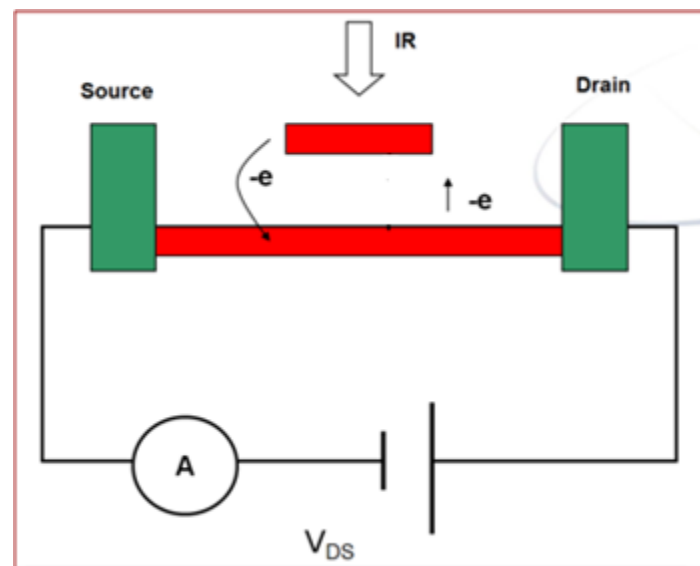
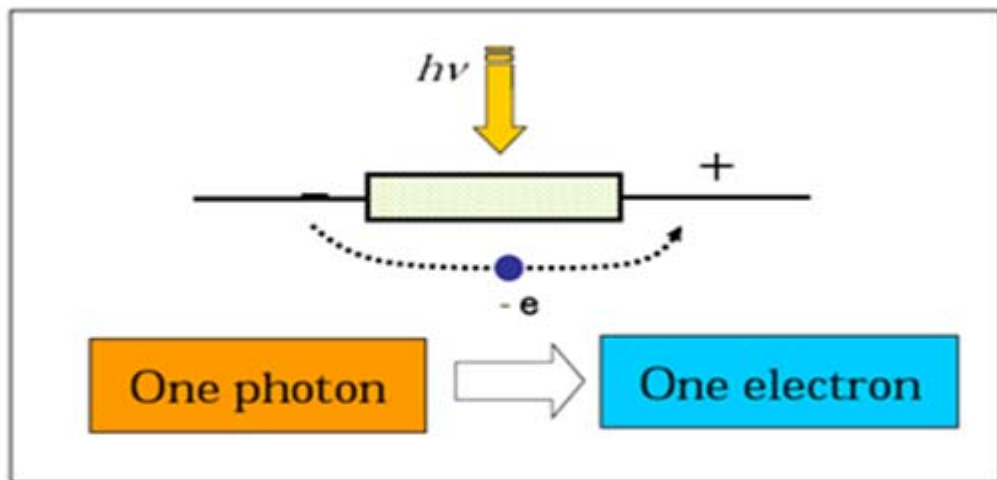
2) 基于等离激元调控新机理，甚长波量子阱红外焦平面器件取得进展



面临的两大困难：

- 受限于量子阱的生长，材料只能吸收不到10%的光；
- 量子阱子带之间的跃迁的选择定则：n型量子阱不响应正入射的红外光。

3) 量子放大光子计数探测器件物理



红外和微波波长范围内 (大于10微米), 光子能量如此小, 实现其单光子探测变得非常困难。

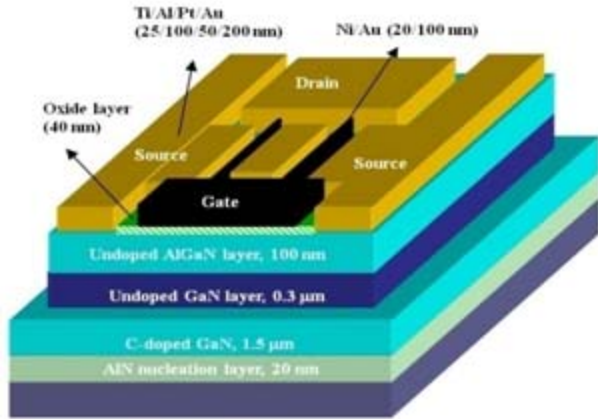
一、实验室介绍

二、氮化镓基高速电子器件

三、氮化镓基固态THz探测器件

四、展望

二、氮化镓基的高速电子器件

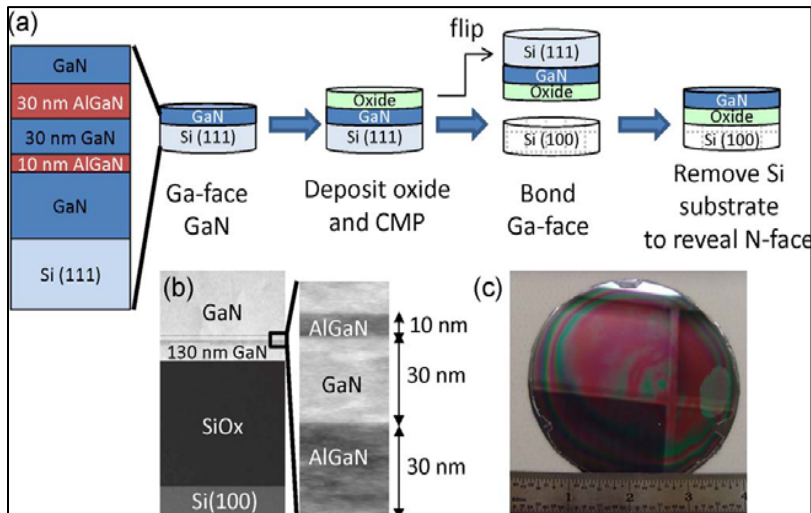


III-V 氮化物材料三重重要的特点：1) 强极化和宽禁带；2) 热导率高；3) 高迁移率和电子饱和速度。

射频微波功率放大器、信号传输等应用。

限制：自加热和热电子效应，高电场和高频响应时性能变差。

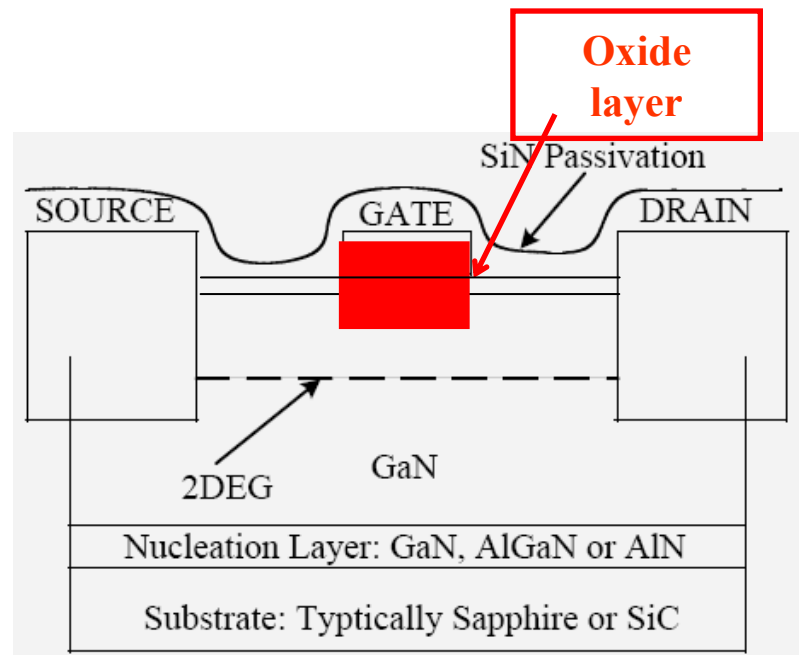
提高器件的功率输出能力和高频响应的线性性，多种器件结构。



提出新型器件，揭示载流子运输和热性质，对器件优化和性能的进一步提高有着指导的意义。

二、氮化镓基的高速电子器件

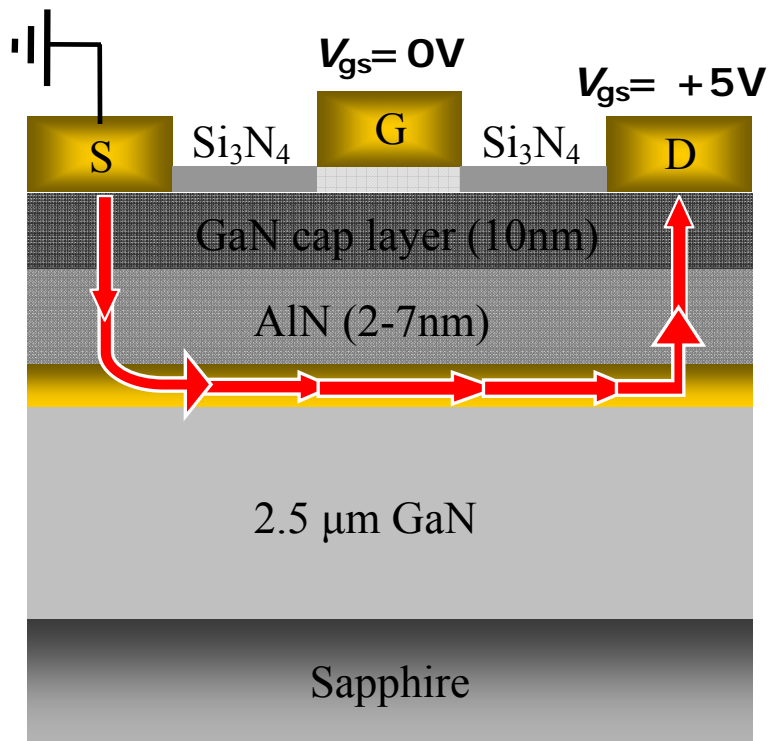
作为**第三代宽禁带**半导体器件，其性能**远超越了**硅器件和镓砷器件，被誉为是“**后硅器时代的主要代表**”，追求“**三高**”是目前全球半导体器件领域研究的前沿和重点。



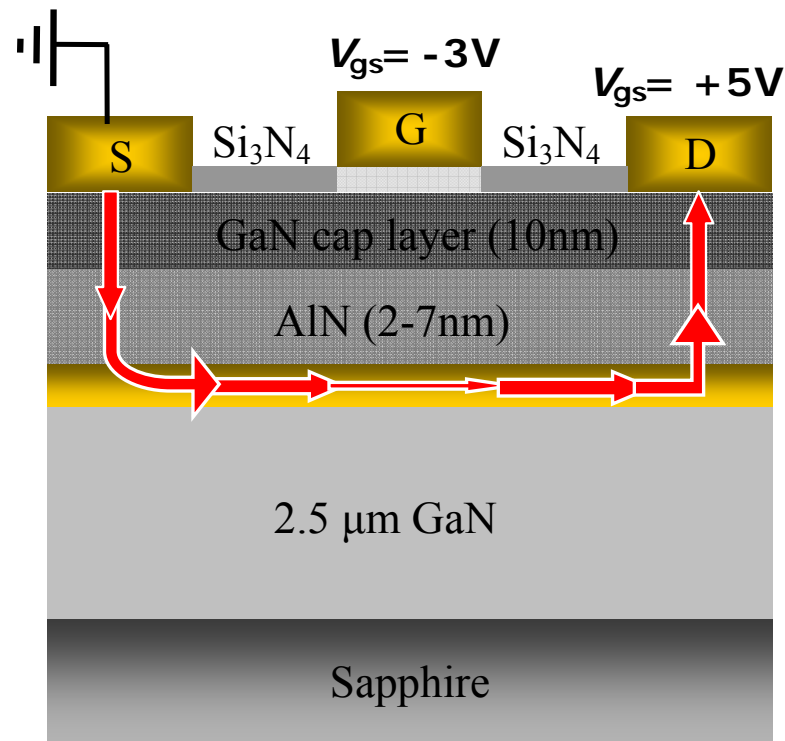
MOS-HEMTs

可覆盖2-40GHz频段内的无线通讯领域，尤其是在基站、远距离空间通讯、宽带无线网络等需要高功率、高效率的领域具有广阔的应用前景。

二、氮化镓基的高速电子器件



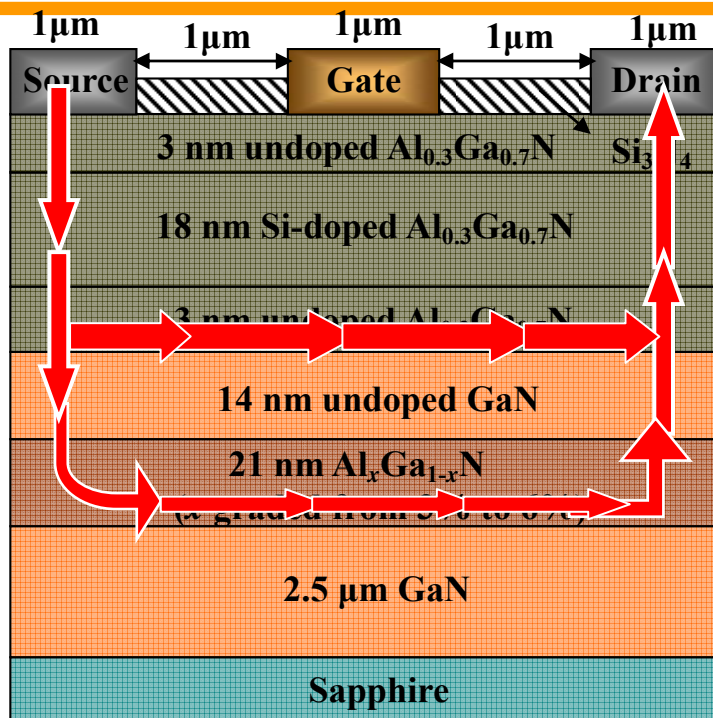
HEMT的开启状态



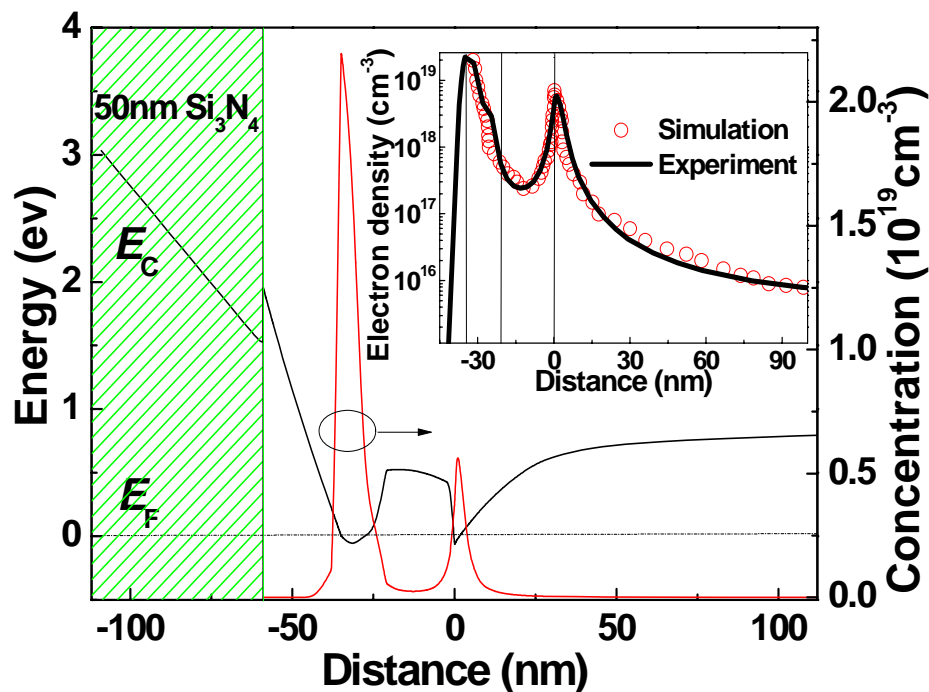
HEMT的关闭状态

1和0之间切换 → 数字电路

1、双沟道GaN基HEMT器件



双沟道HEMT结构图



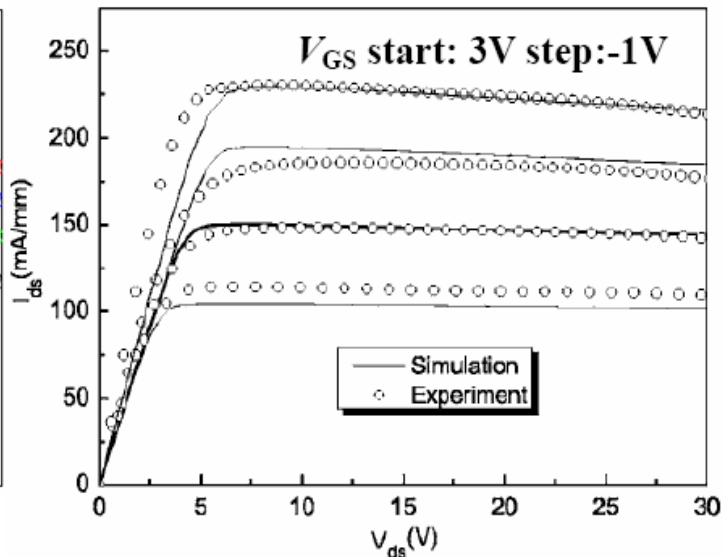
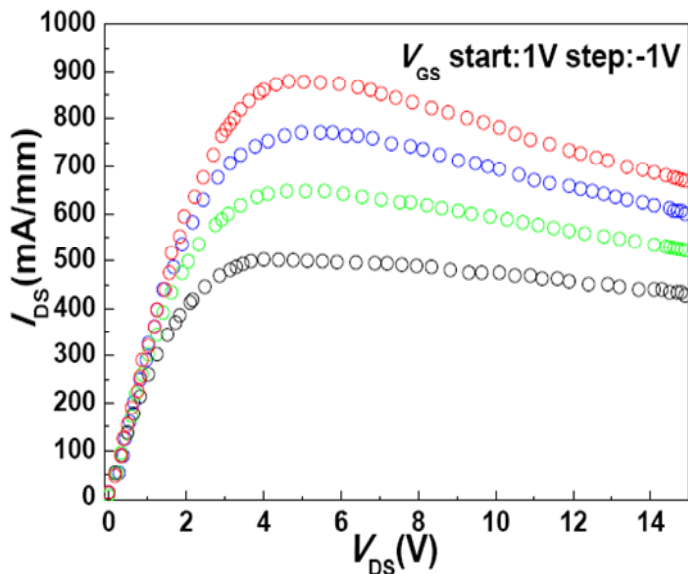
能带图2DEG分布

双沟道HEMT具有提高饱和漏极电流密度和降低沟道方阻的作用

$$R_{\square} = 1/(n_s \cdot \mu_{RT})$$

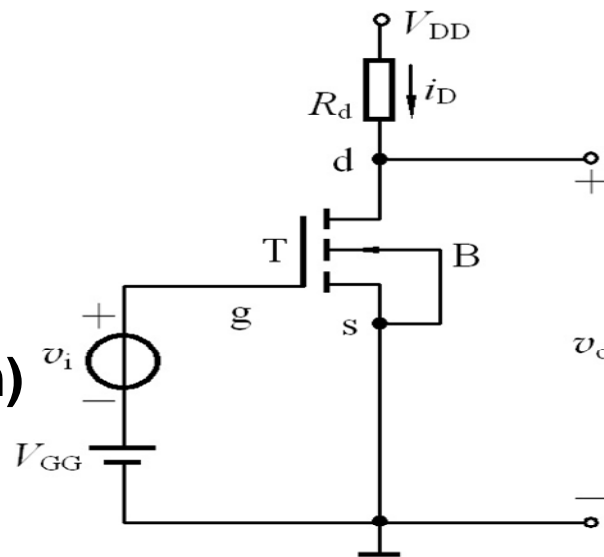
1、双沟道GaN基HEMT器件

双沟道
HEMT

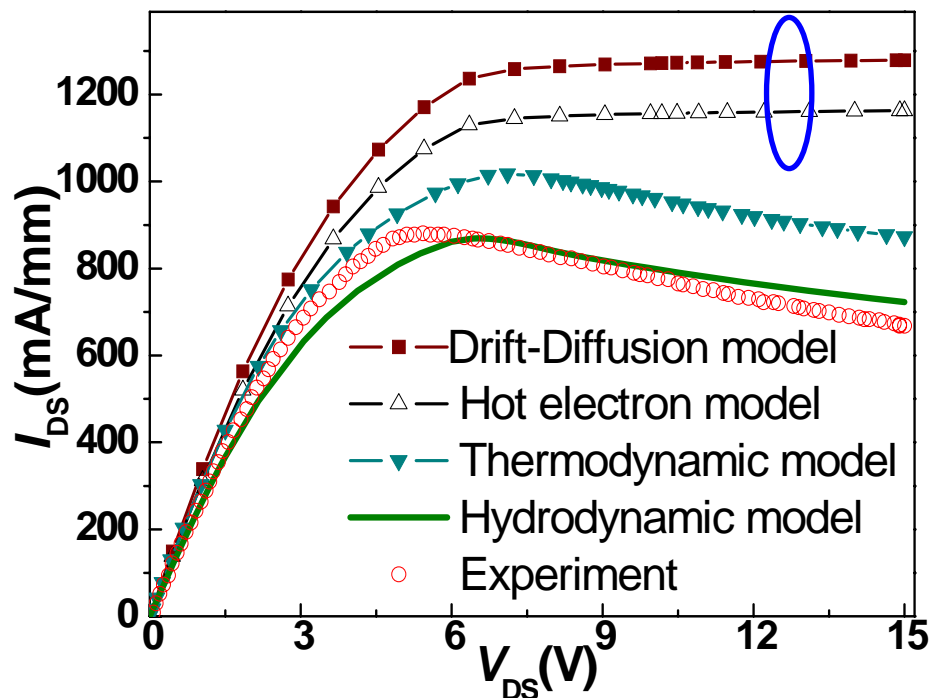


单沟道
HEMT

	双沟道	单沟道	
$V_{GS} = 0V$	750	110	单位(mA/mm)
$V_{GS} = 1V$	900	150	



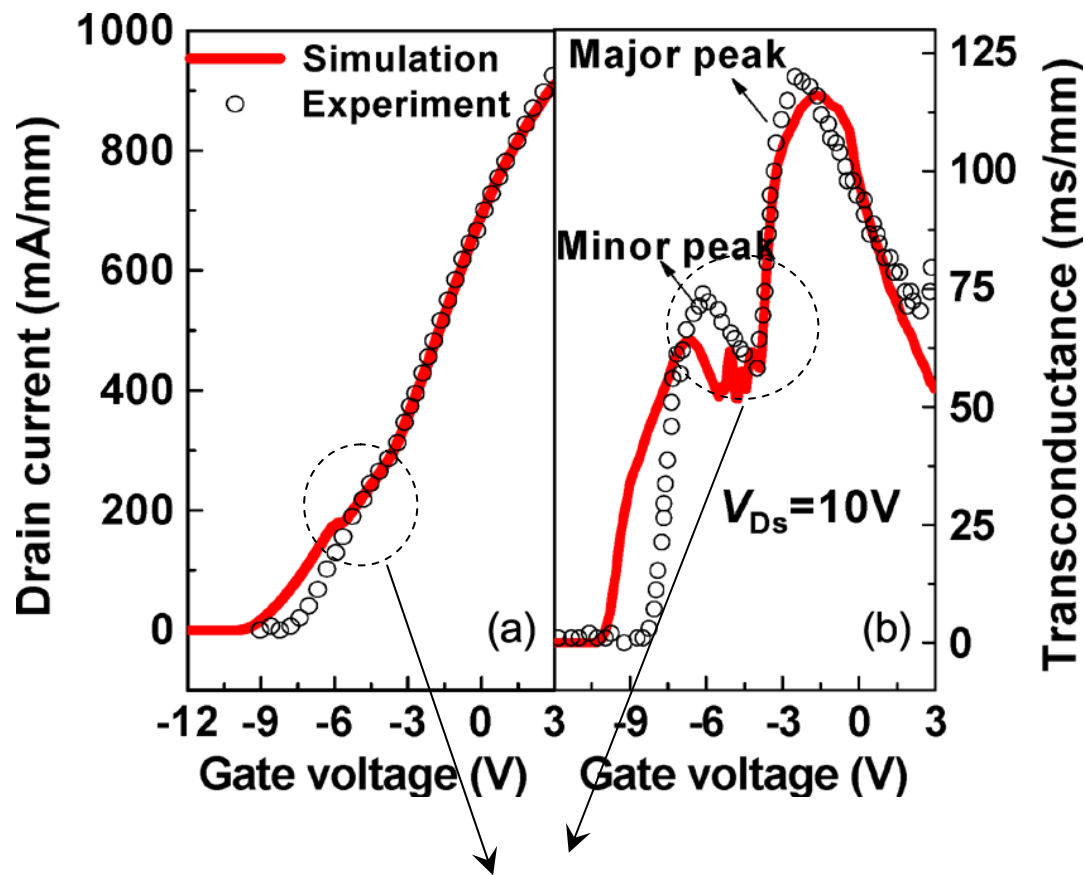
共源级放大电路



设计的四种理论模型

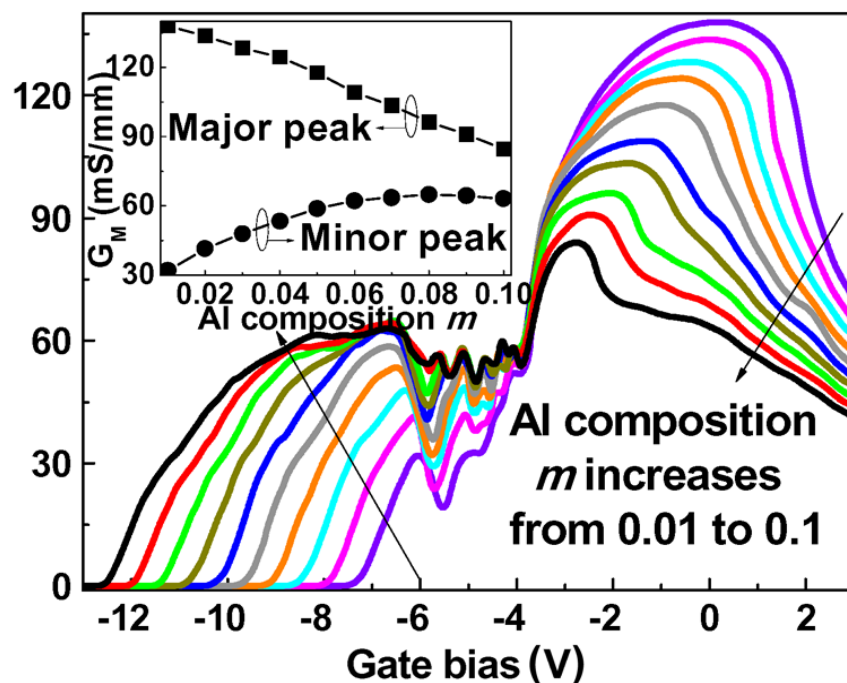
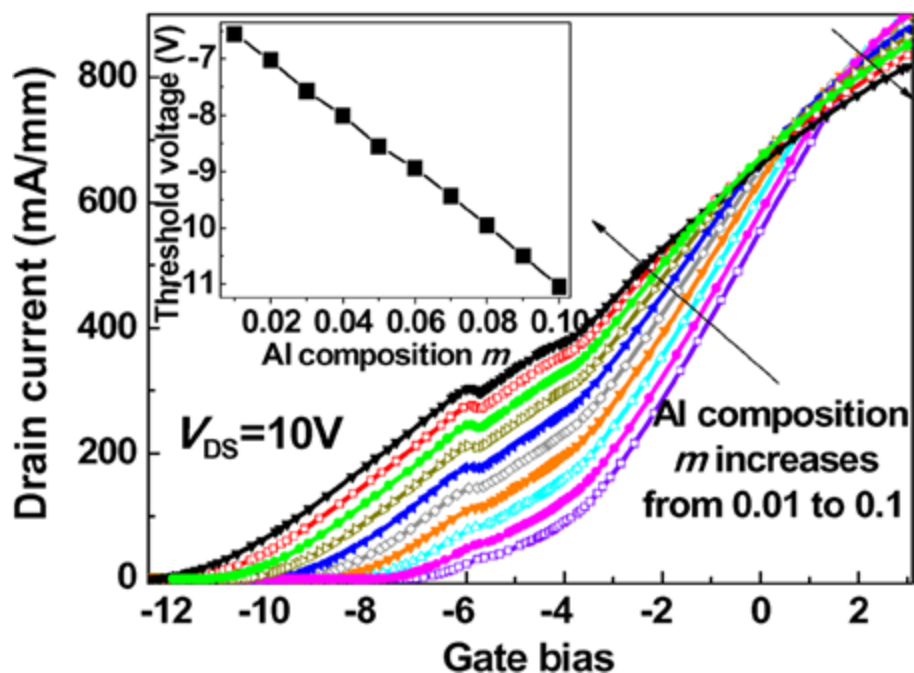
- 漂移扩散模型：均不考虑
- 热电子模型：热电子效应
- 热力学模型：自加热效应
- 流体力学模型：均考虑

- 自加热和热电子效应均会导致饱和漏极电流密度下降，但只有自加热效应才能引起输出特性的非均匀下降，因此是导致负微分电导现象的原因
- 为了降低负微分电导，提高器件增益线性度，应该提高衬底的散热能力



电流电压转移特性：
理论与实验一致，
在-6V栅极电压切换点处，明显观察到上下沟道传输翻转现象，转移跨导出现了双驼峰现象。说明下沟道载流子对器件沟道电阻的重要贡献和优化的可能性。

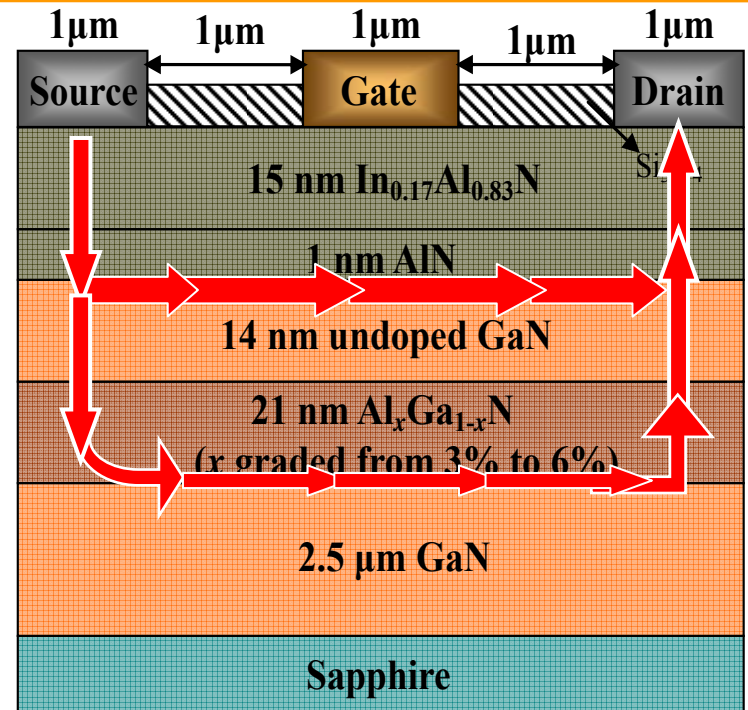
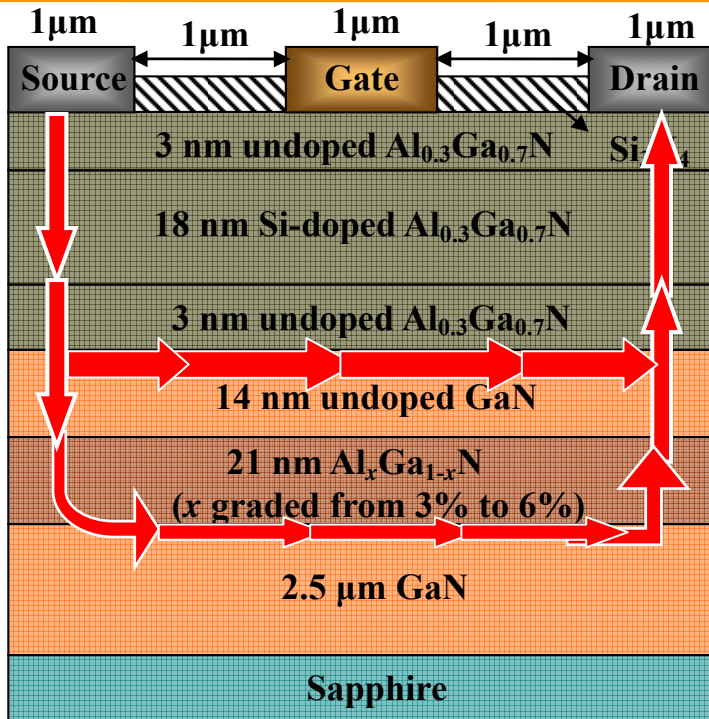
上下沟道栅极电压切换点



不同Al组分背势垒器件的
电流电压转移特性，插图
为器件的阈值电压随组分
变化，出现降低的现象。

不同Al组分背势垒的跨导，
上下沟道跨导的变化，下沟
道跨导呈现主导趋势，最优
的跨导对应组分0.04左右。

1、双沟道GaN基HEMT器件



24nm $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 上势垒层

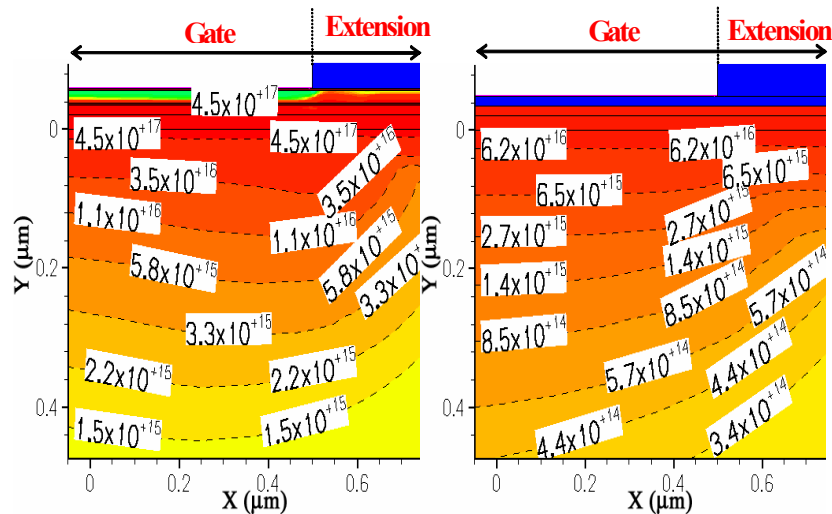
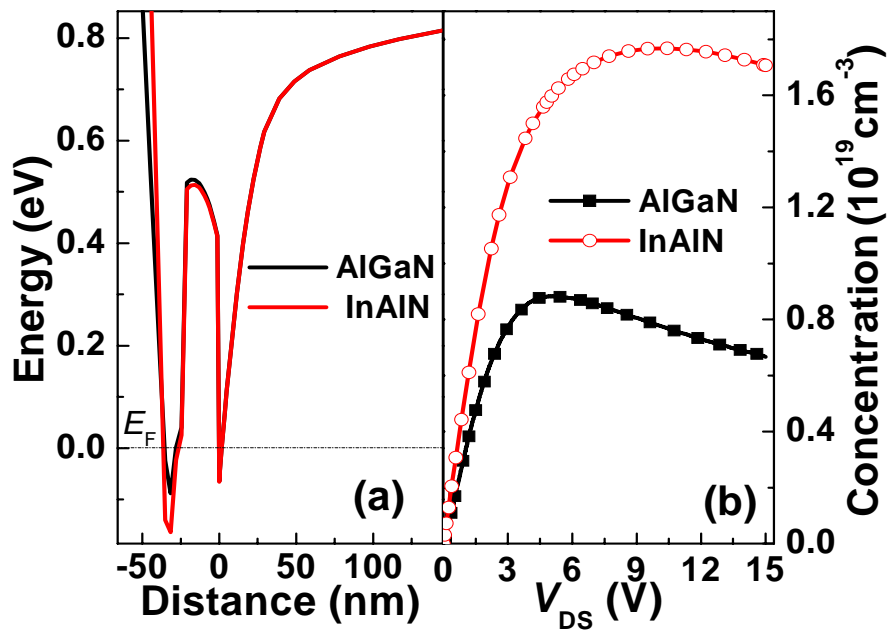
15nm $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$ 势垒层

1nm AlN 过渡层

1nm AlN过渡层使沟道电子波函数与InAlN势垒层分离

界面粗糙散射
合金散射

1、双沟道GaN基HEMT器件



InAlN/GaN { 更强的极化效应
更大的导带不连续量



更高的饱和漏极电流密度

上沟道更深、更窄的势阱

俘获电子密度降低一个数量级

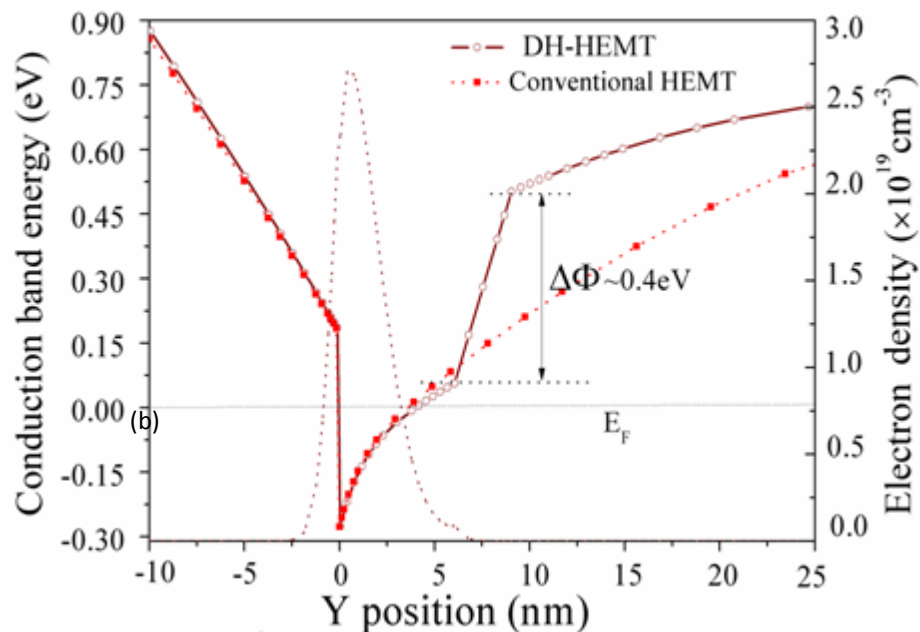
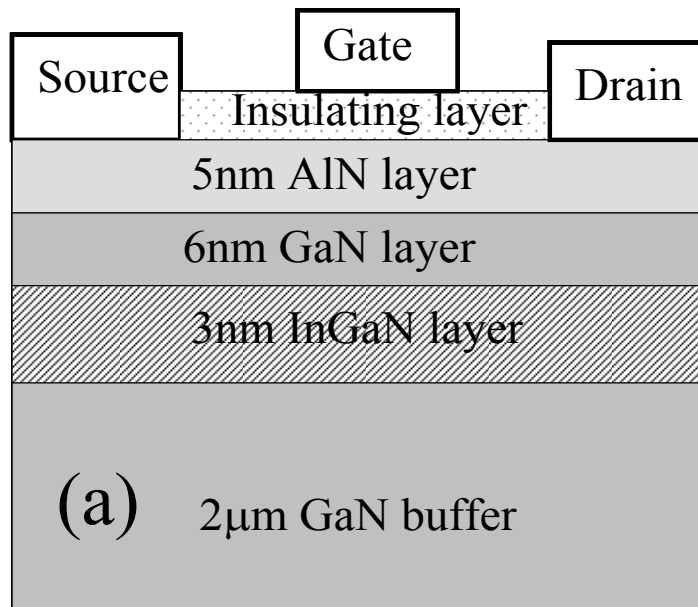


InAlN势垒双
沟道HEMT

热电子效应



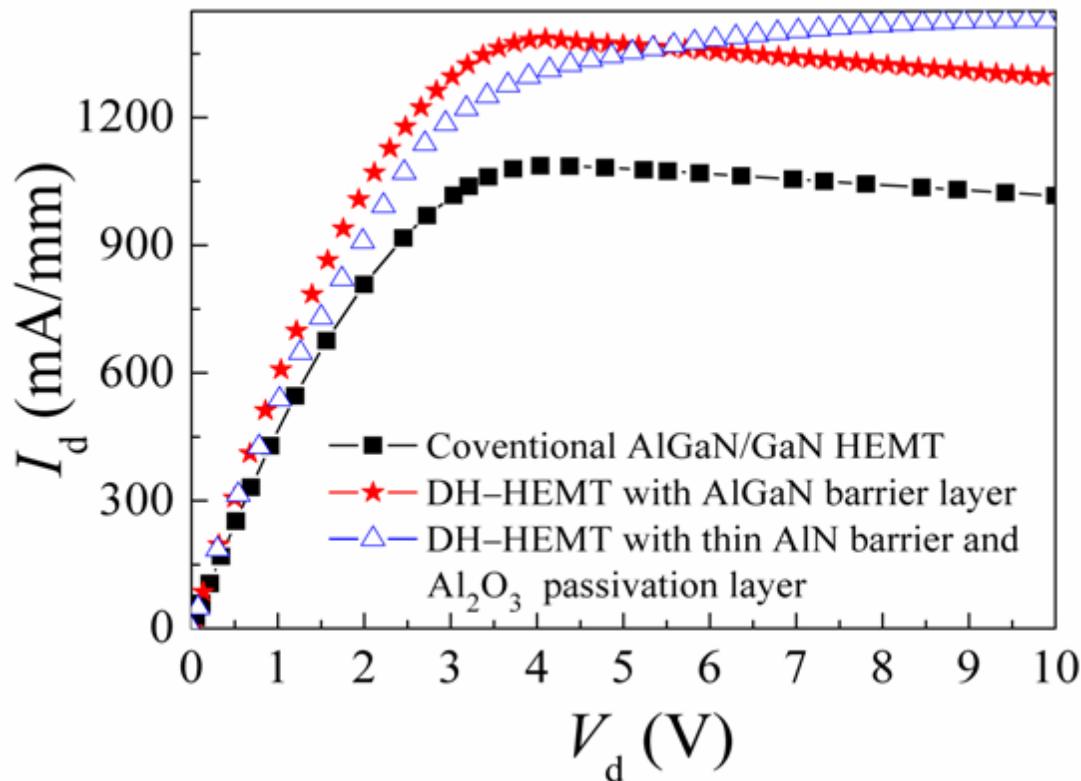
2、提出了超薄势垒模型，缩小器件的尺寸



AlN势垒双异质结HEMT器件的结构原理图。

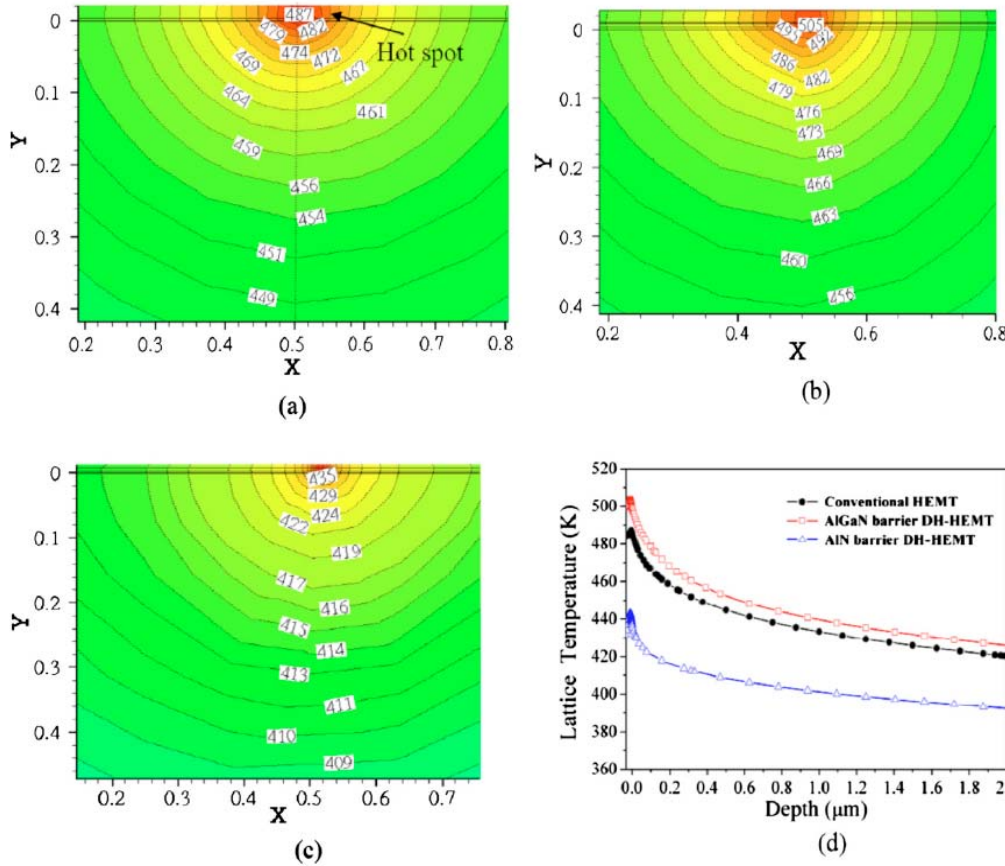
双异质结器件（实线）和AlGaN/GaN异质结器件（点线）的导带能量分布及沟道载流子浓度的分布情况。

2、提出了超薄势垒模型，缩小器件的尺寸



不同器件结构的电流 (I_d)—电压 (V_d) 特性曲线，AlN势垒双异质结器件结构在高电场下具有较小的负微分电阻现象和较大的饱和电流。

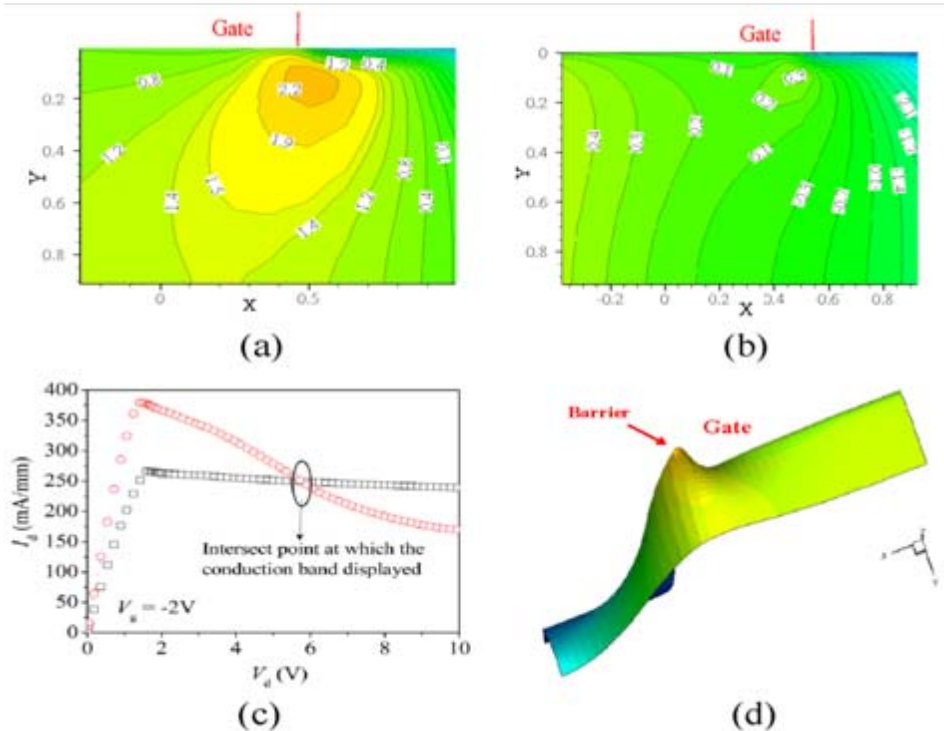
2、提出了超薄势垒模型，缩小器件的尺寸



AlN势垒和AlGaIn势垒器件高电场下栅边处的“热点”温度比较，表明超薄高热导势垒器件结构可以降低器件沟道内的晶格温度。

(a) AlGaIn 势垒双异质结的晶格温度；
(b) AlGaIn/GaN 结构的晶格温度； (c) AlN 势垒双异质结的晶格温度； (d) 沿热点中心 Y 方向晶格温度曲线。

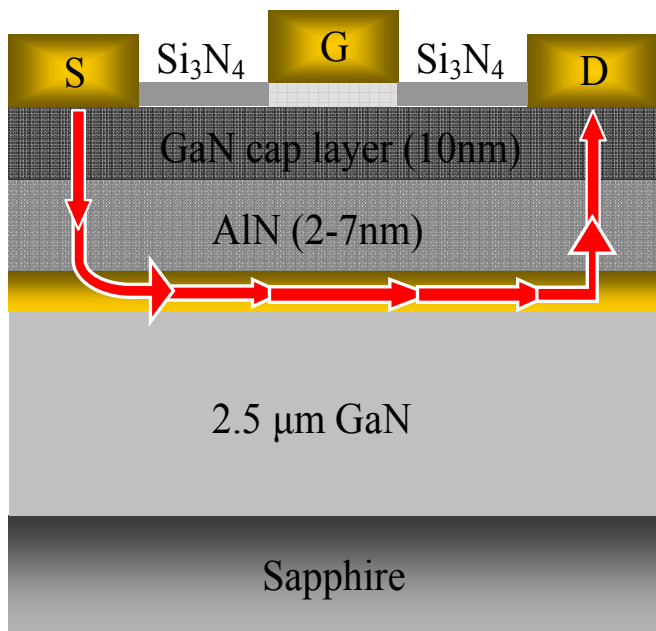
2、提出了超薄势垒模型，缩小器件的尺寸



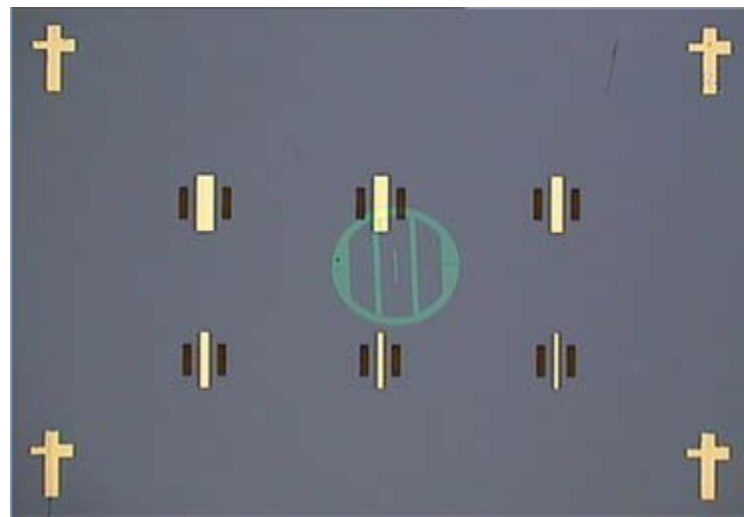
热电子效应，高电压下的电势呈现非均匀分布现象，在栅极附近会形成一个**导带势垒**，导带势垒是形成**电流坍塌**的主要原因。

高电场的导带分布：(a) 为AlGaN势垒器件的导带能量分布；(b) 为AlN势垒器件的导带能量分布；(c) 为 (a)、(b) 所对应的电压值示意；(d) 为 (a) 图的三维视图。

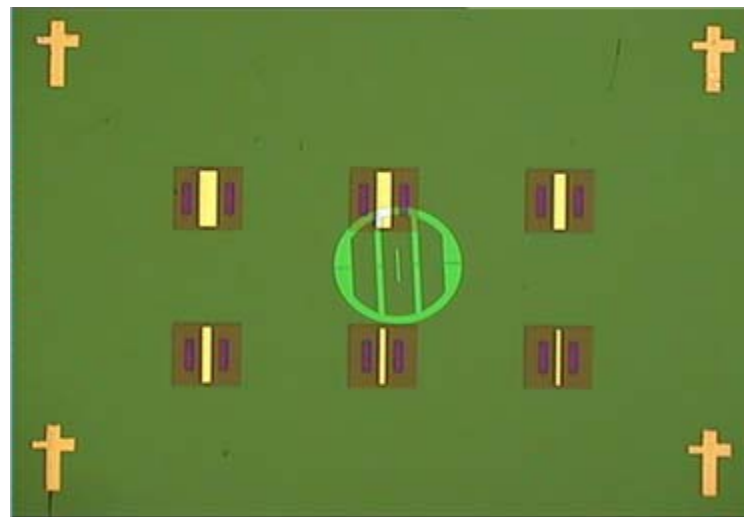
2、提出了超薄势垒模型，缩小器件的尺寸



源漏栅
电极制作

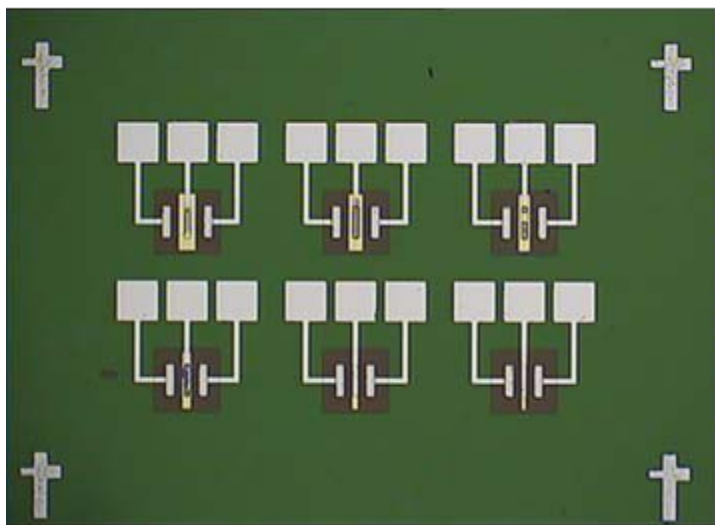


ICP 台面刻蚀

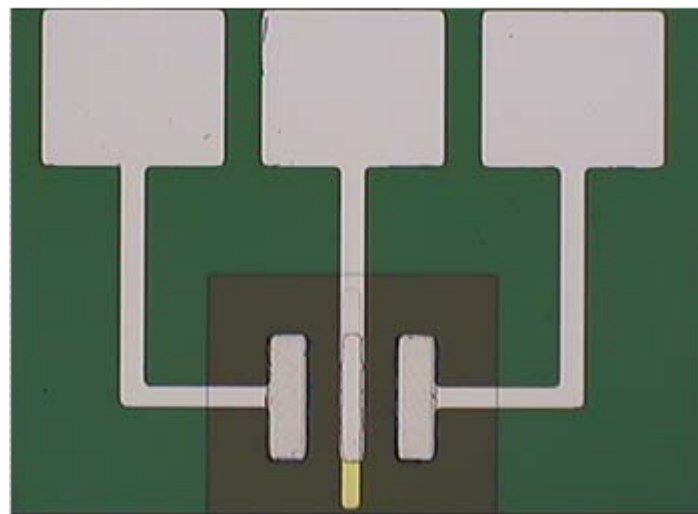


- 制作源漏电极
- 生长钝化层
- 生长栅极氧化层
- 源漏栅电极开孔
- 制作栅电极
- 延伸电极制作
- ICP台面刻蚀

2、提出了超薄势垒模型，缩小器件的尺寸

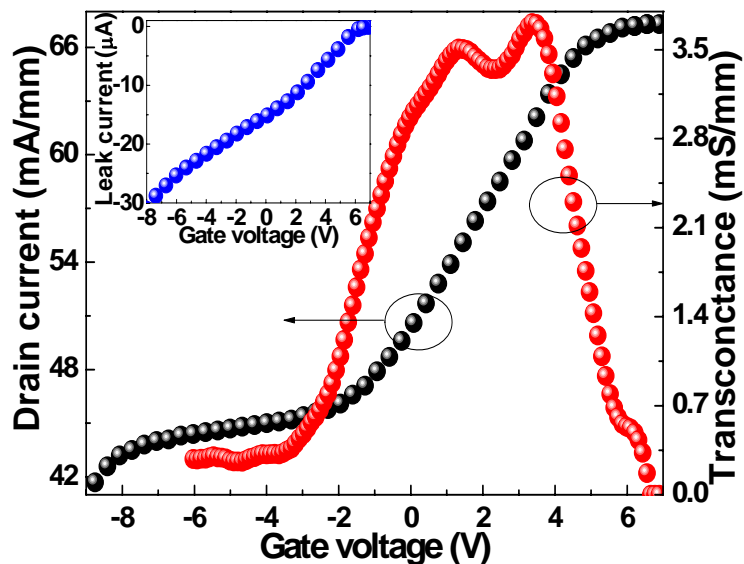


单个
元器件



B2902A 测试系统

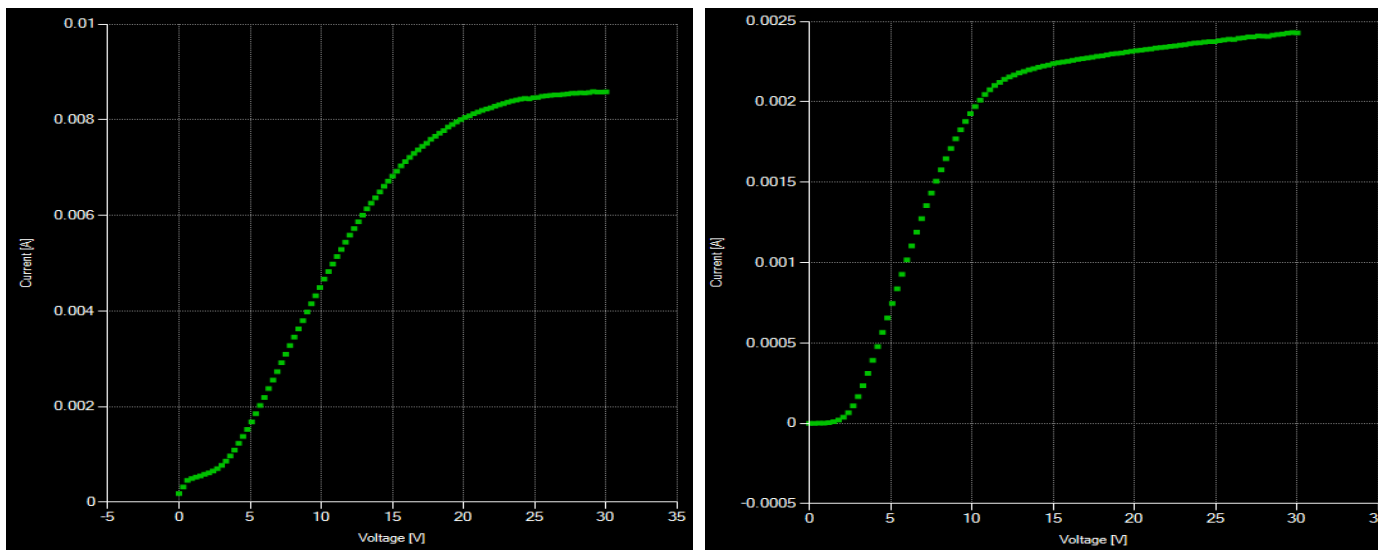
测试器件的转移和跨导特性



测试
结果



2、提出了超薄势垒模型，缩小器件的尺寸



栅压为(a)0V，(b)-2V时测试器件的输出特性

测试单沟道HEMT的性能指标：

- 饱和漏极电流密度80mA/mm (美国普渡大学 Peter. Ye, 110mA/mm (*J. Appl. Phys.*, 100, 074501))
- 等效峰值跨导(G_M / ϵ_r) 2.56mS/mm (Peter. Ye, 5ms/mm)
- 阈值电压-3.6V (Peter. Ye, -3V)

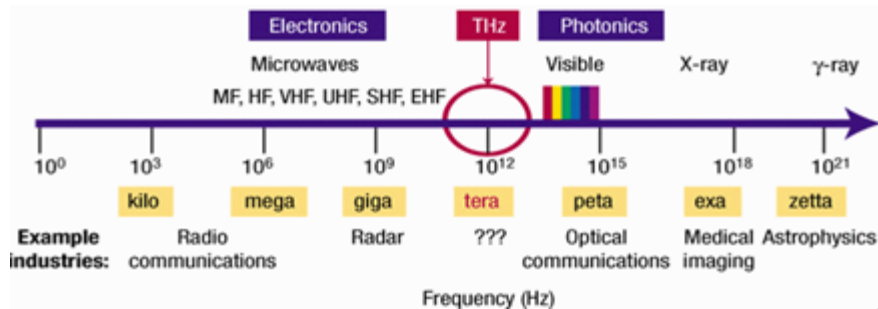
一、实验室介绍

二、氮化镓基高速电子器件

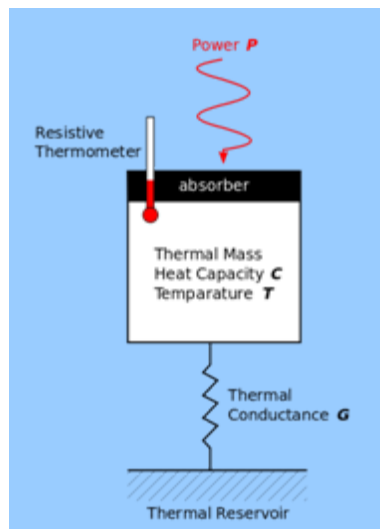
三、氮化镓基固态THz探测器件

四、展望

THz光谱固态集成探测的新概念



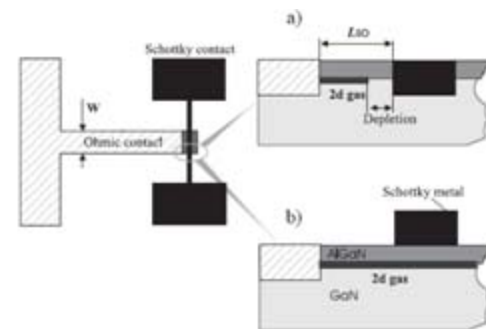
Bolometer



体积大，制冷

传统太赫兹探测方法

肖特基二极管



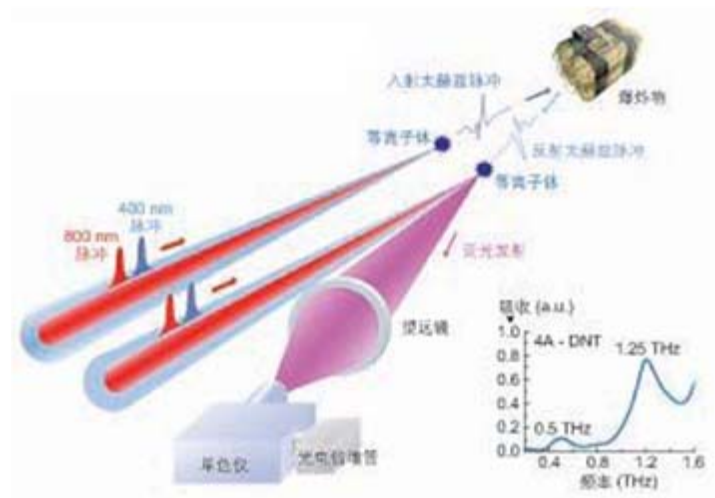
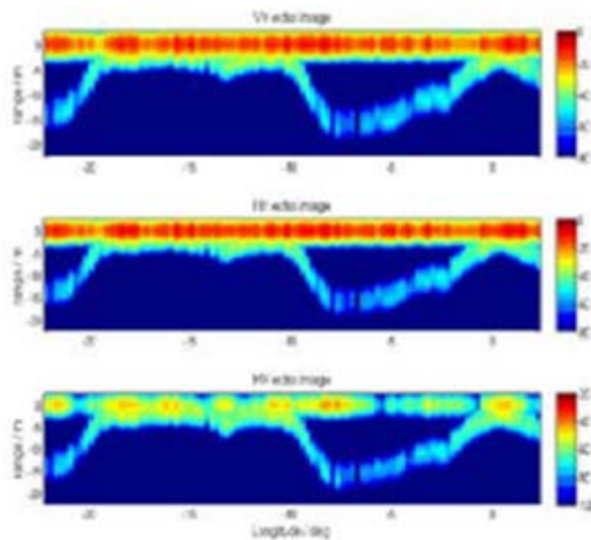
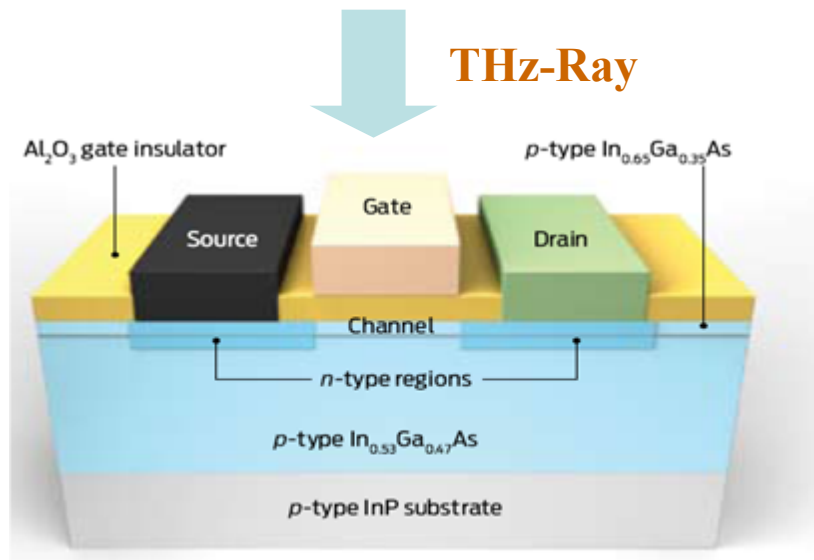
工作频率低，1THz
以上响应率低

应用需求：

高速，非制冷，宽
带宽，低成本，高
度集成，探测波长
可调。

三、氮化镓基固态THz探测器件

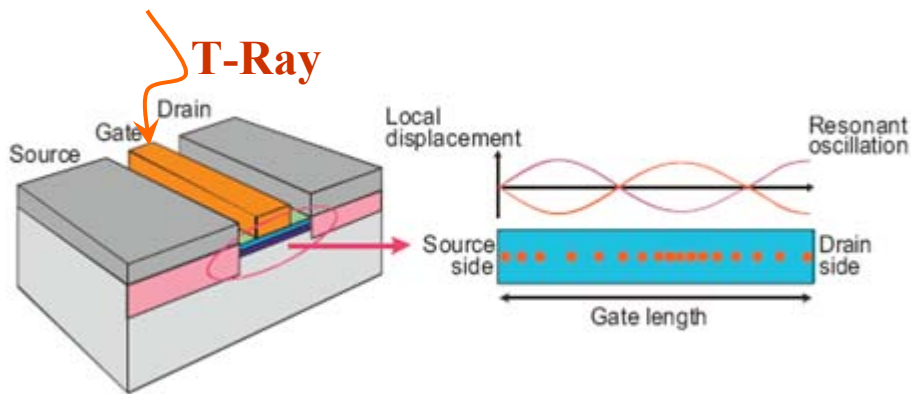
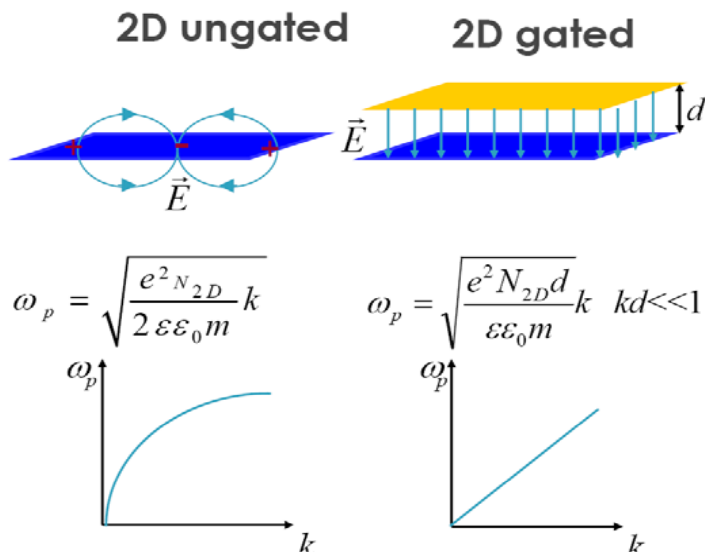
- 探测器响应速度快;
- 沟道电子浓度可调;
- 栅长变化探测范围;
- 室温工作。



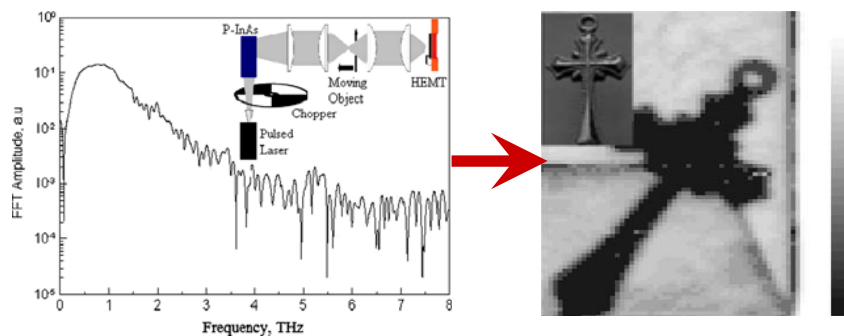
天文、大气遥感领域、深空主动探测等。

太赫兹探测在遥感中应用

等离子激元太赫兹探测器应用

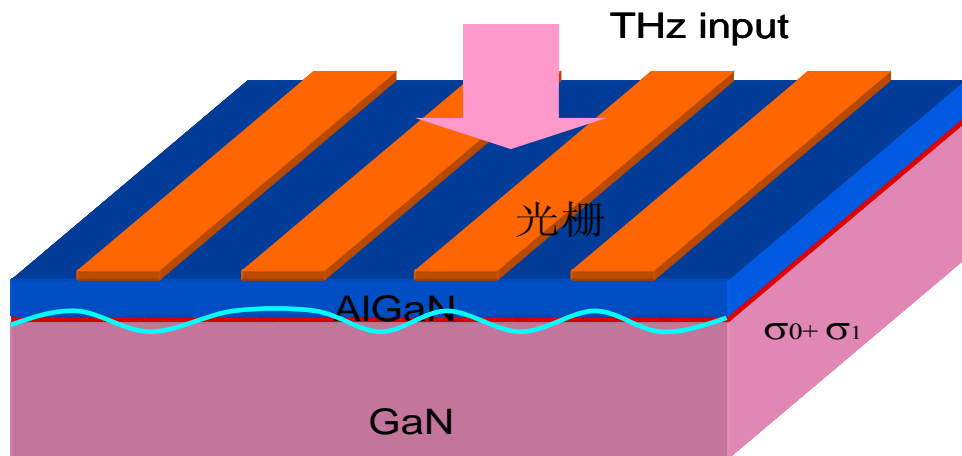


HEMT器件沟道存在的**两种等离子激元**，门和无门的，频率可以受栅极电压控制，**达到太赫兹范围**。

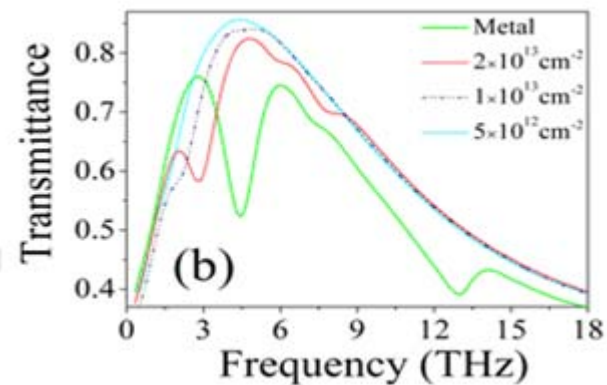
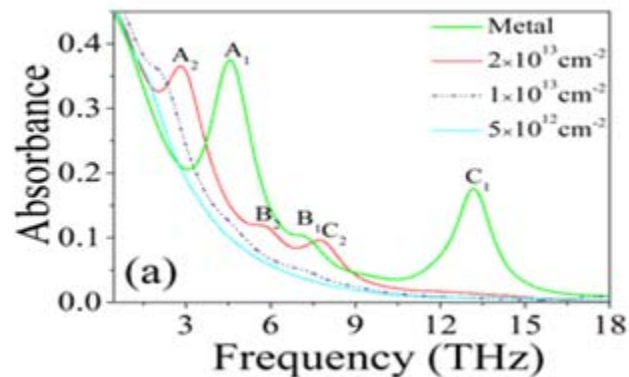


等离子激元的激发伴随电磁波对**沟道电子浓度和速度的非线性调制**，**交变电磁信号转换成直流电压或电流信号**。

1、GaN基等离子体体波器件的太赫兹共振响应



1μm周期



Poisson-Schrodinger

电导率模型

带内电导率模型

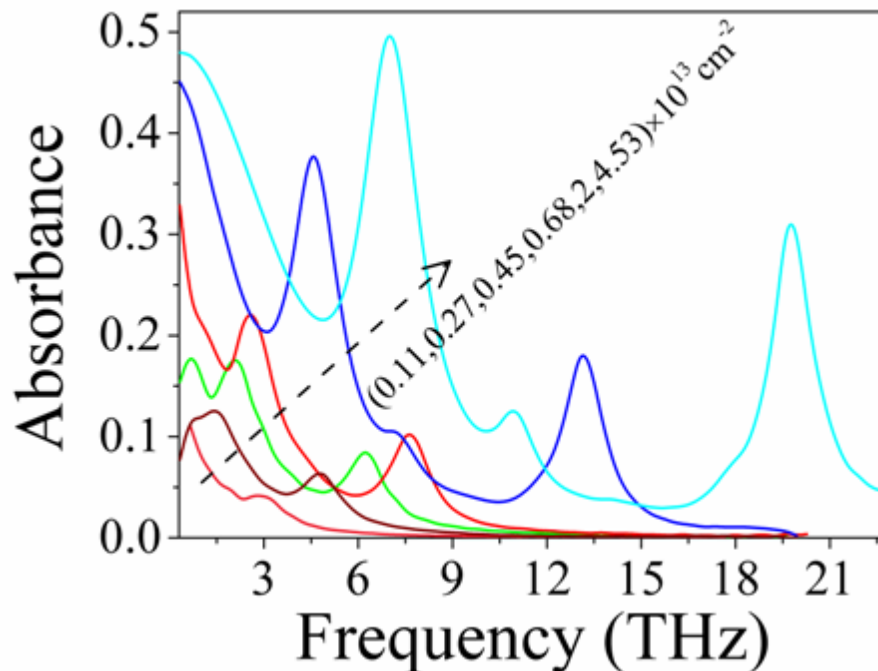
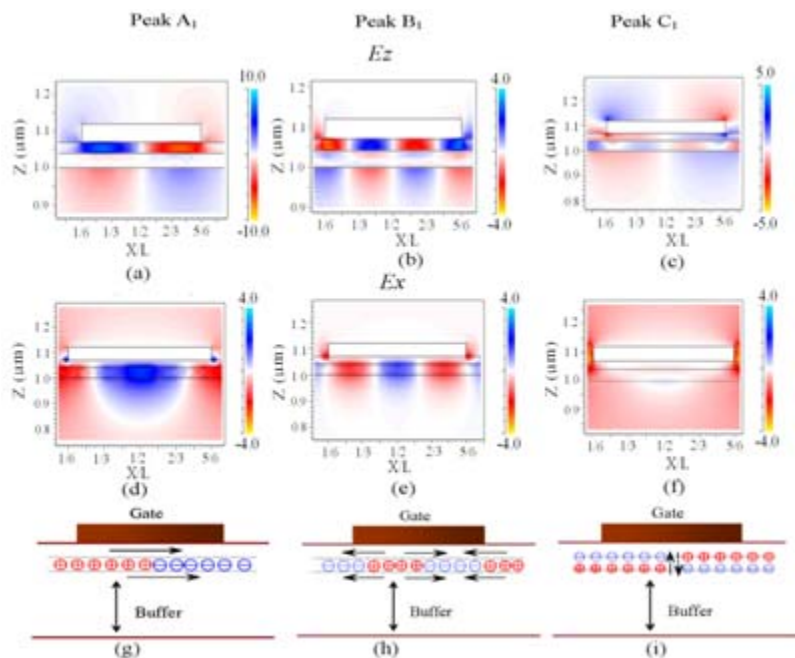
带间电导率模型

电磁计算

求解Maxwell

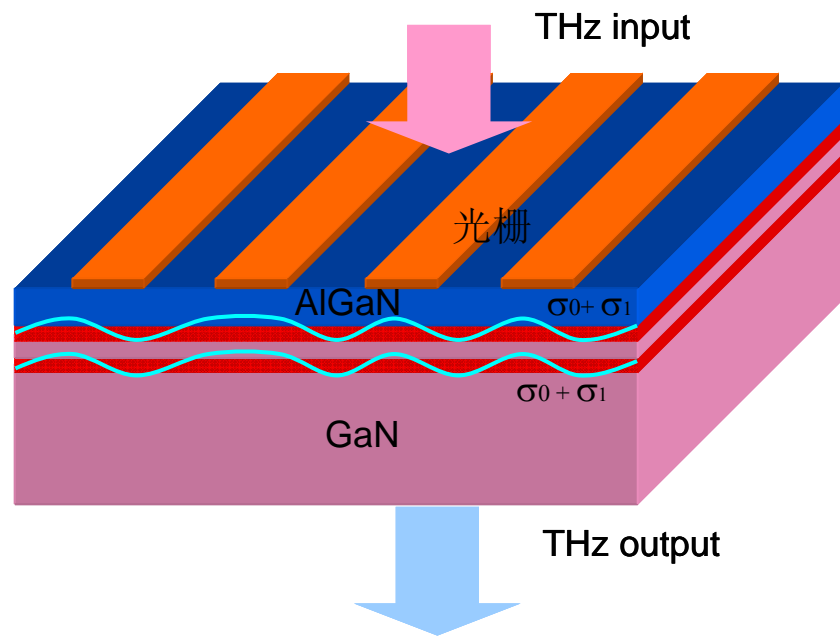
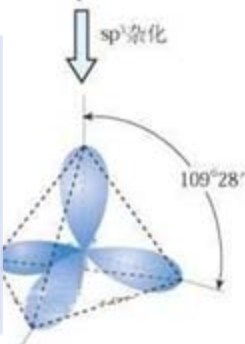
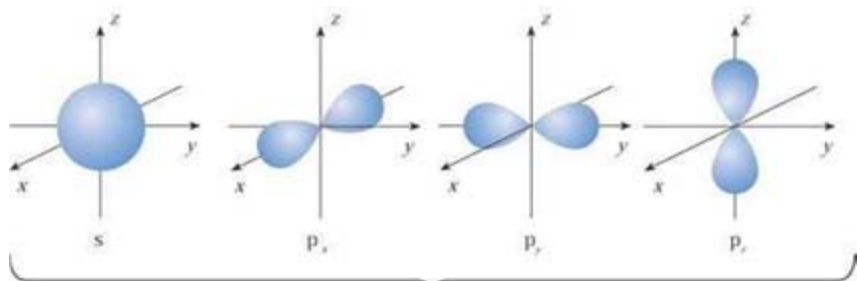
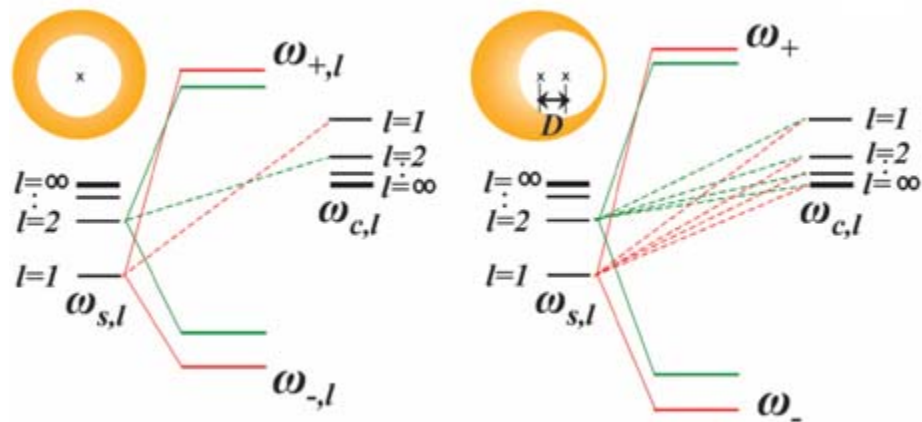
吸收 透射

能量转换,
直流电导率
的变化



- 等离子体波的**模式指数**与栅极电场波腹的数目成正比
- 等离子体波**共振强度的变化**与表面共振层模型相一致

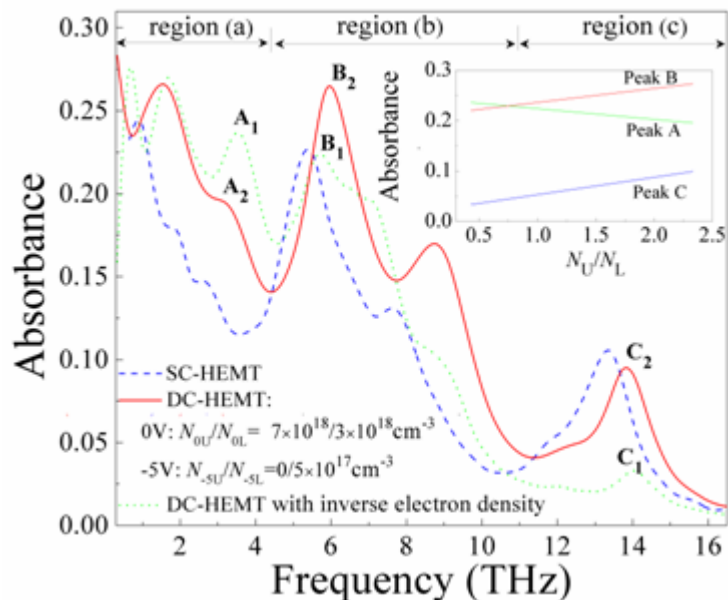
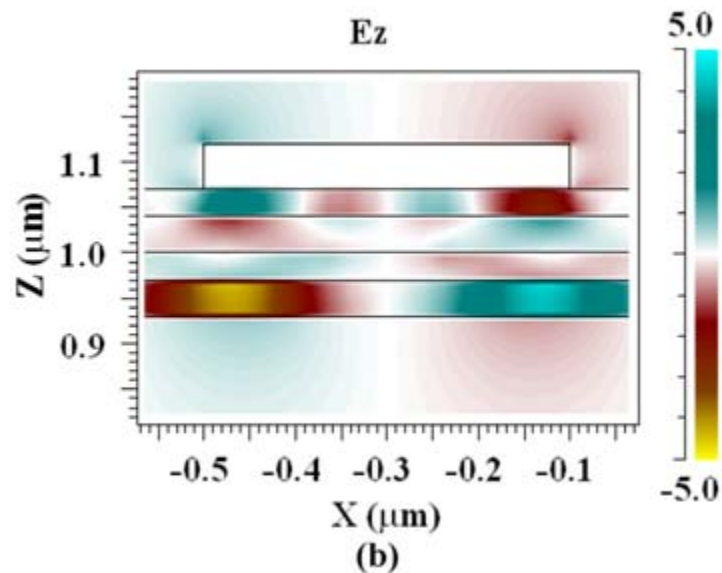
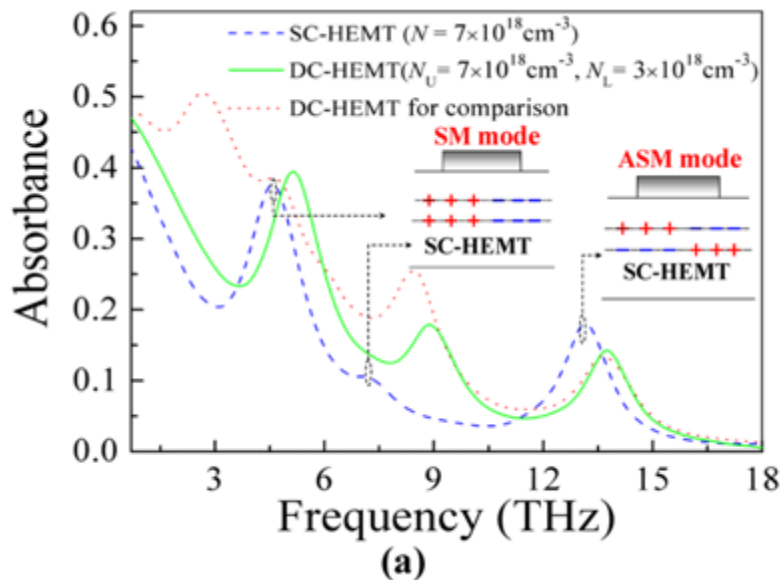
2、双沟道器件等离子体波THz共振吸收



➤ THz波长 $\lambda \gg d$ 沟道之间的距离

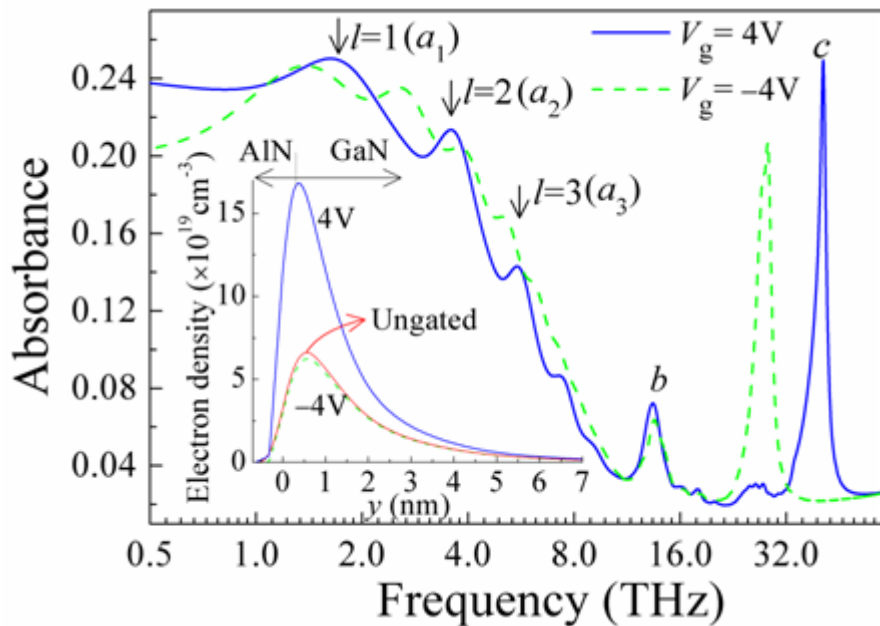
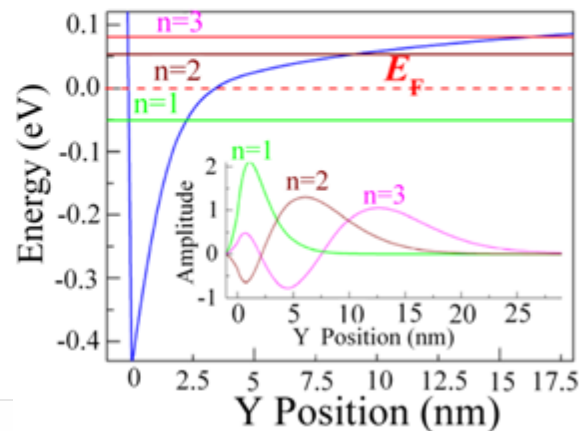
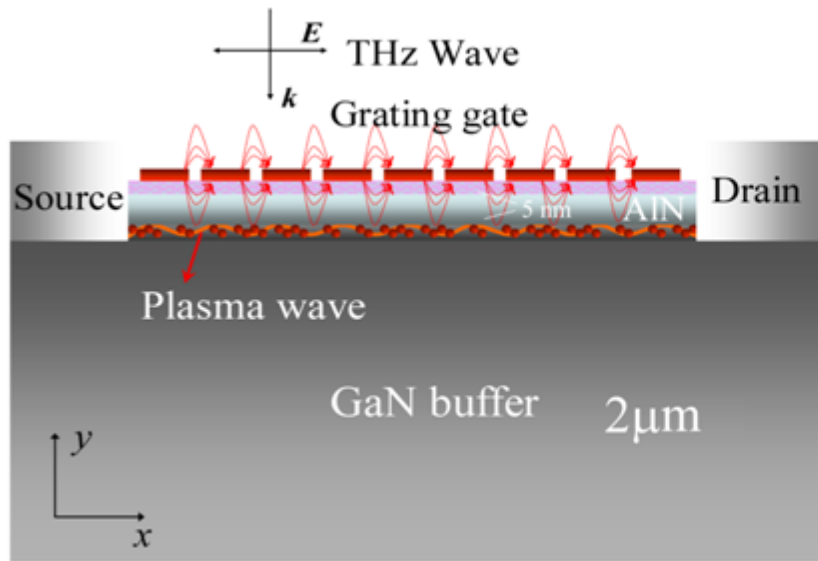
双阱 \longleftrightarrow ? \longleftrightarrow 单阱

2、双沟道器件等离子体波THz共振吸收



- 等离子体波共振模式分裂跟材料的具体参数和器件的结构参数有关，包括载流子浓度分布，阱间间距；
- 等离子体波共振相互作用出现增强现象；

3、高电子密度下等离子体波THz吸收

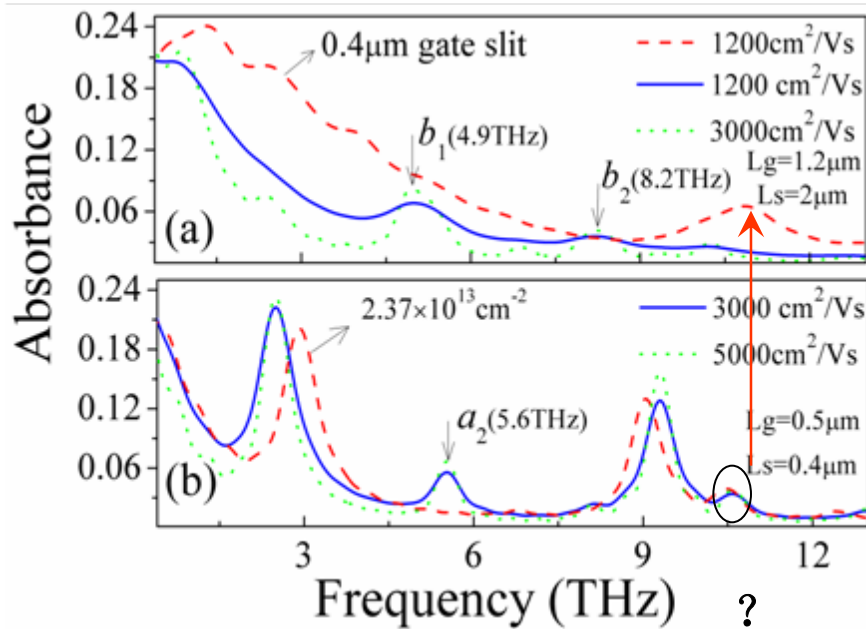
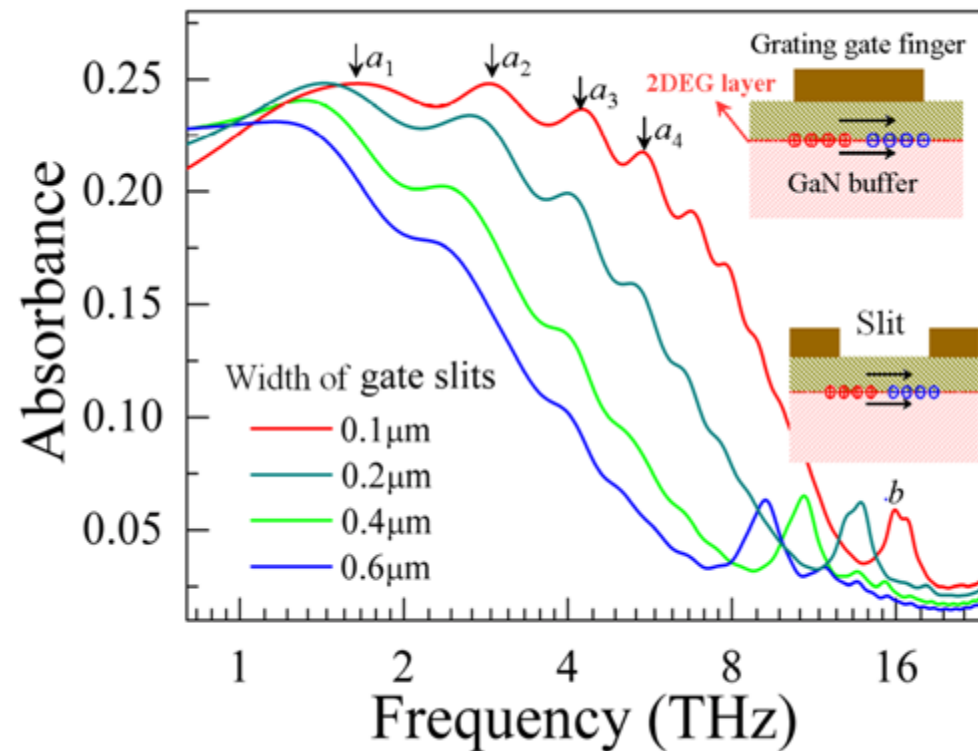


- 高的费米速度 V_F
- 高阶等离子体波共振

Lin Wang et al, IEEE J Quantum Electron.19, 8400507 (2013) ;
OE21, 10821 (2013)

3、高电子密度下等离子体波THz吸收

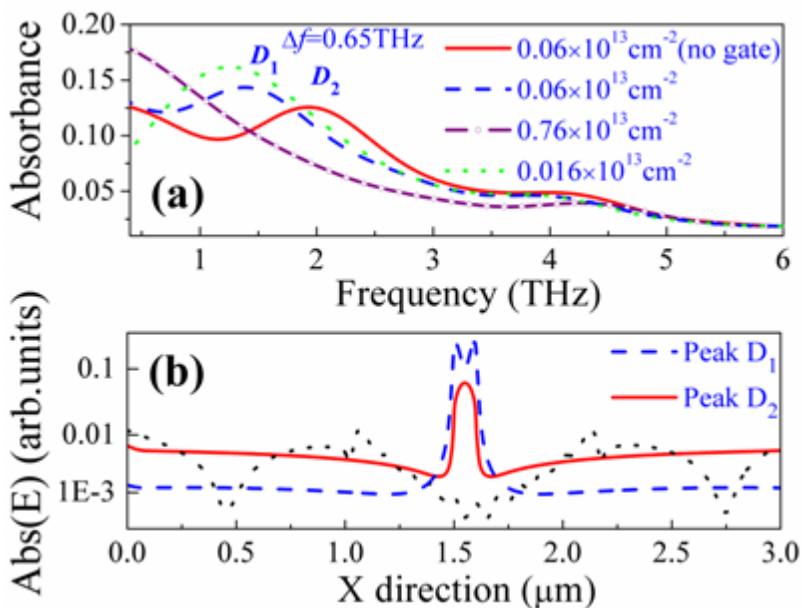
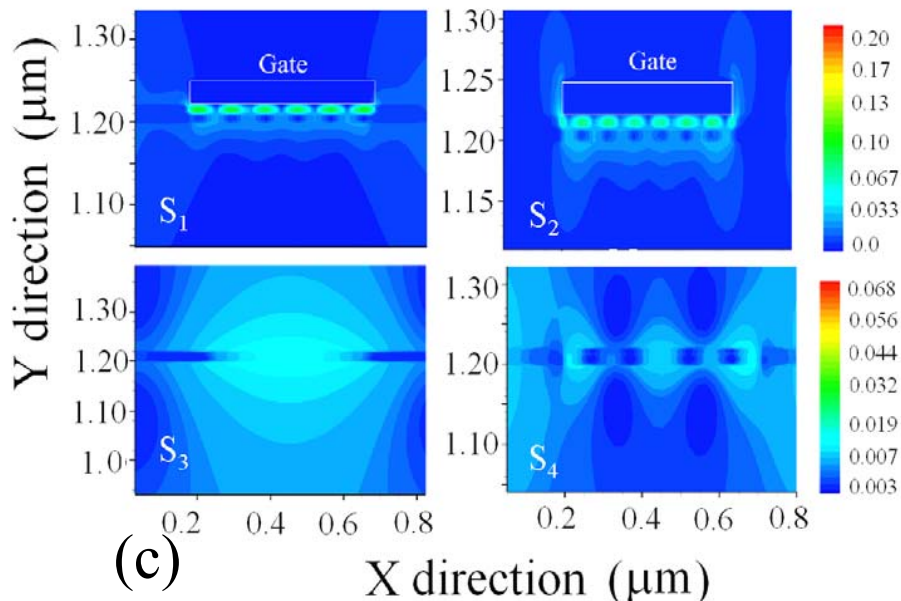
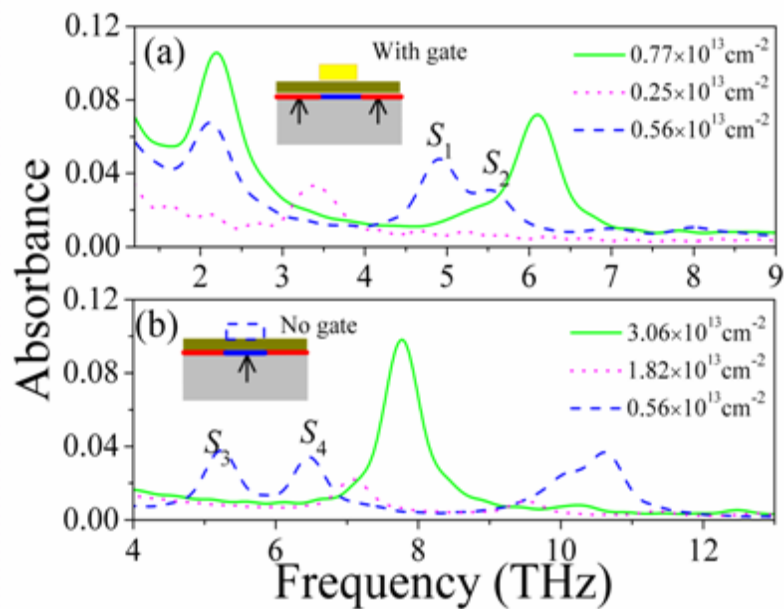
高密度电子器件等离子体波的电压可调性



- 窄缝光栅可以得到高阶模式激发；
- 9THz位置处出现了明显的共振增强现象。

Lin Wang et al, IEEE J Quantum Electron.19, 8400507 (2013) ; OE21, 10821 (2013)

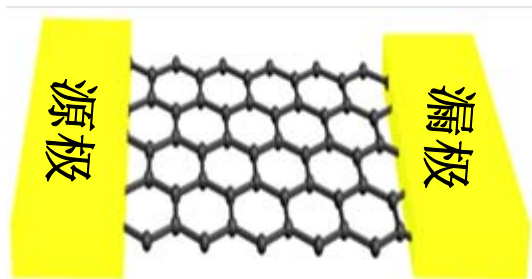
3、高电子密度下等离子体波THz吸收



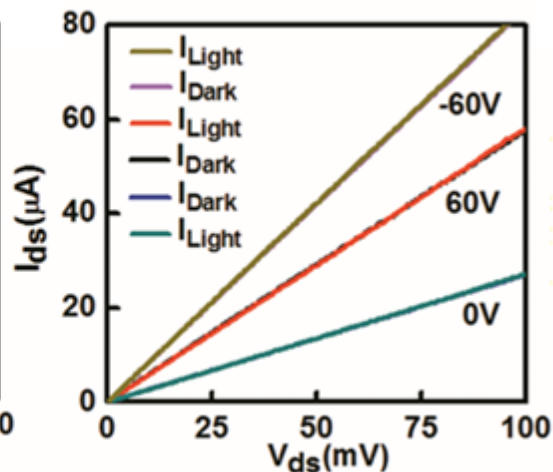
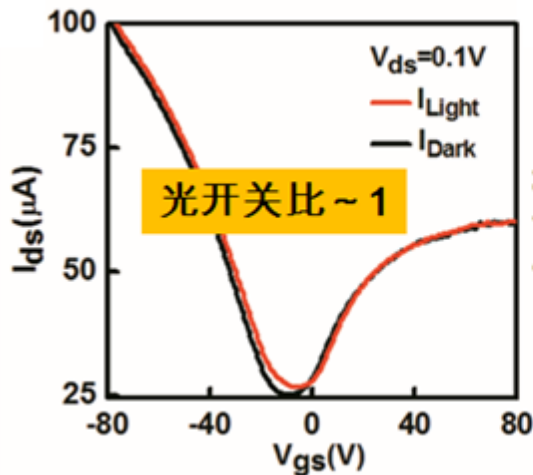
- 由于互激发现象，等离子体波**共振分裂**现象不发生
- 无门区域的等离激元也具有较好的**电压可调性**，并出现了**近场增强**现象。

Lin Wang et al, IEEE J Quantum Electron.19, 8400507 (2013) ; OE21, 10821 (2013)

4、石墨烯/InAs纳米线肖特基太赫兹探测器



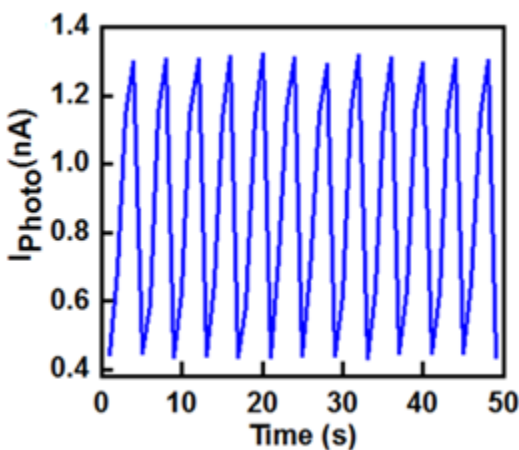
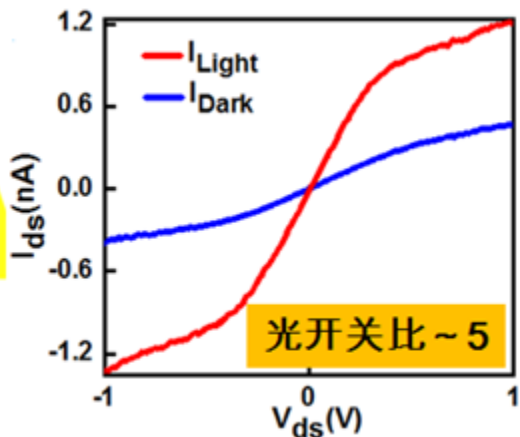
石墨烯光探测器



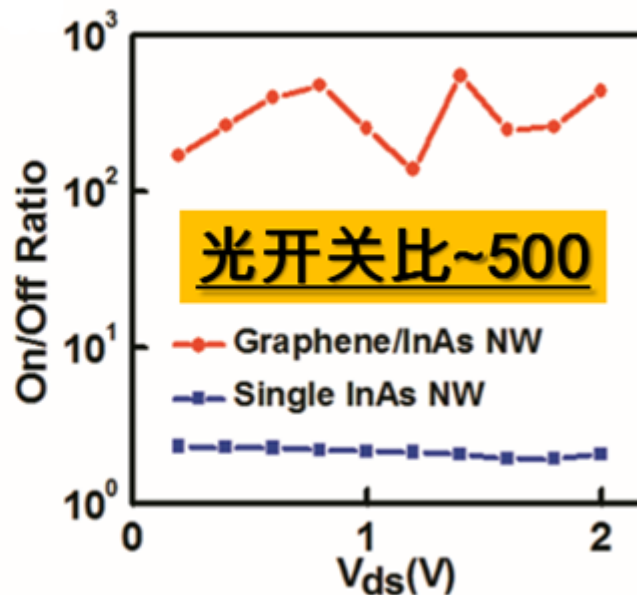
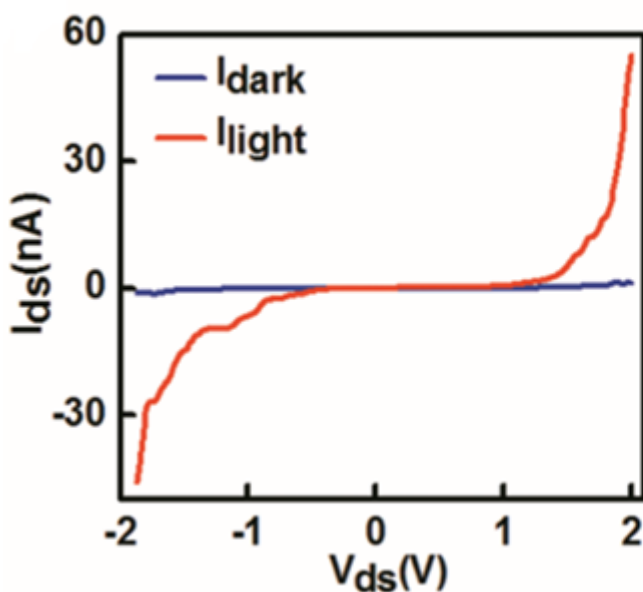
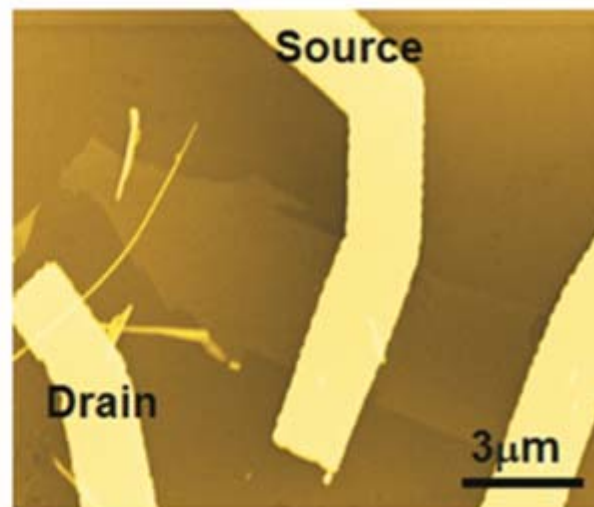
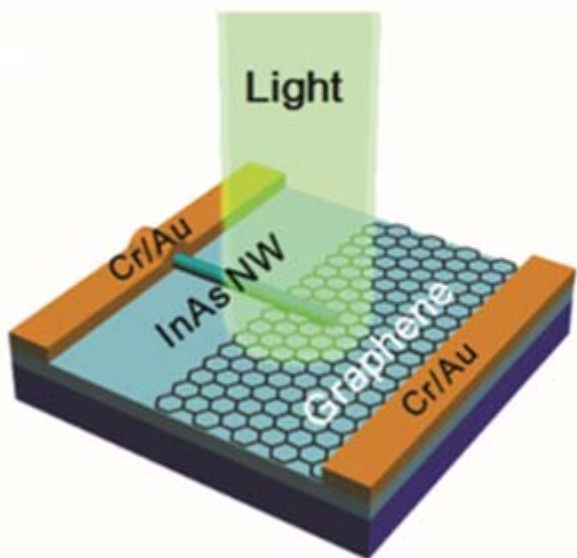
较低的 I_{light}/I_{dark} 比，提高探测器信噪比？



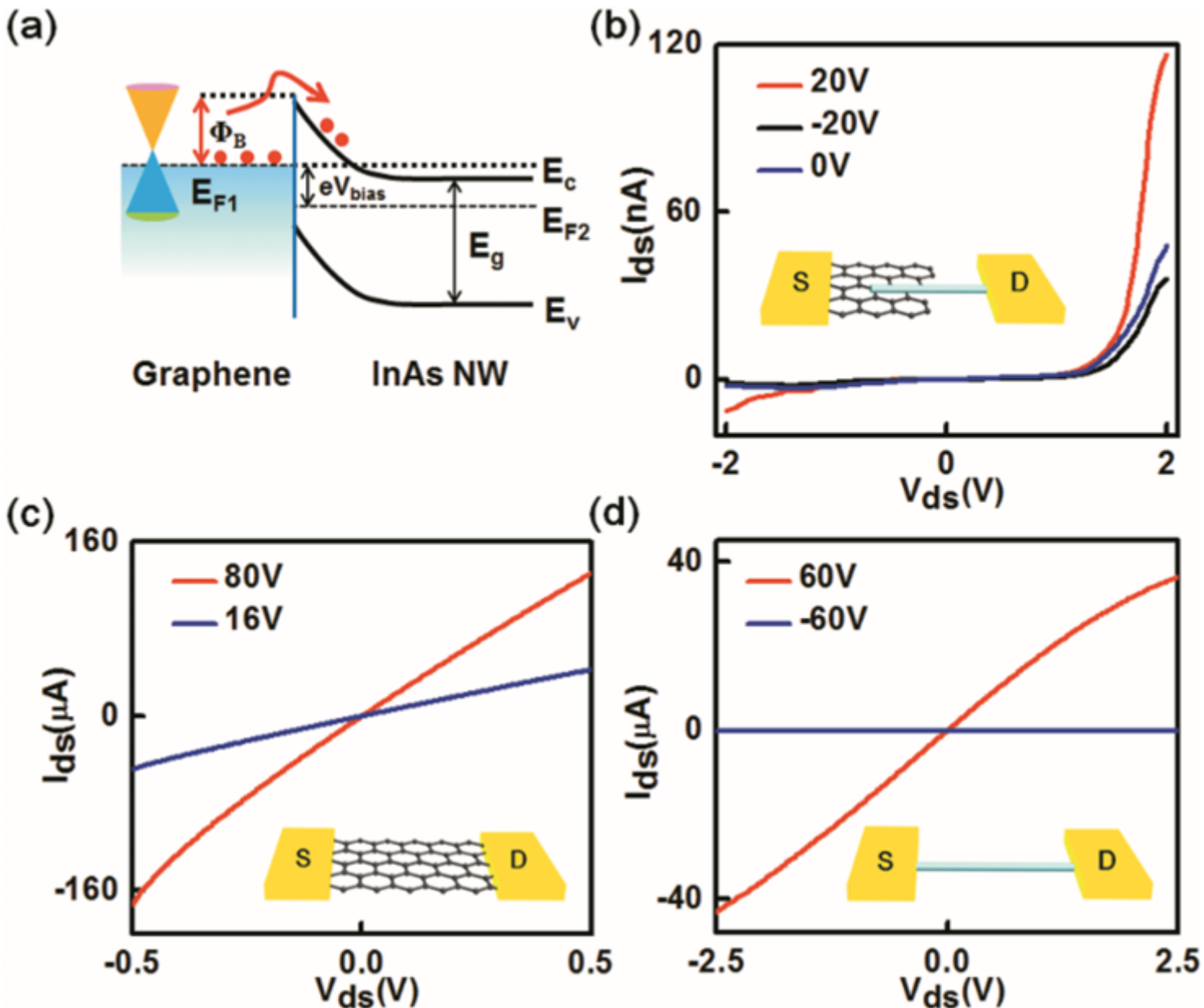
纳米线光探测器



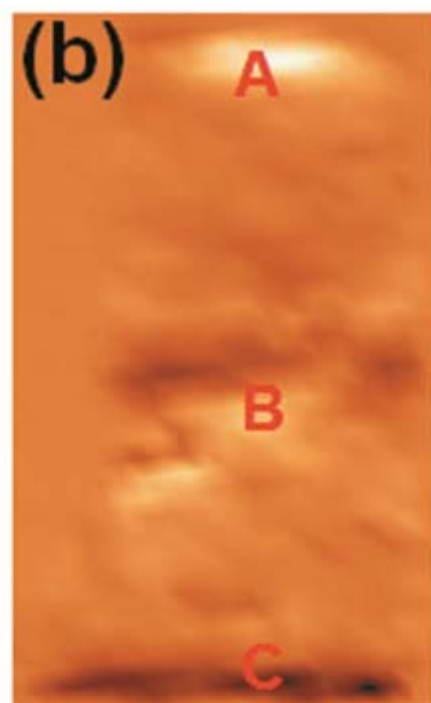
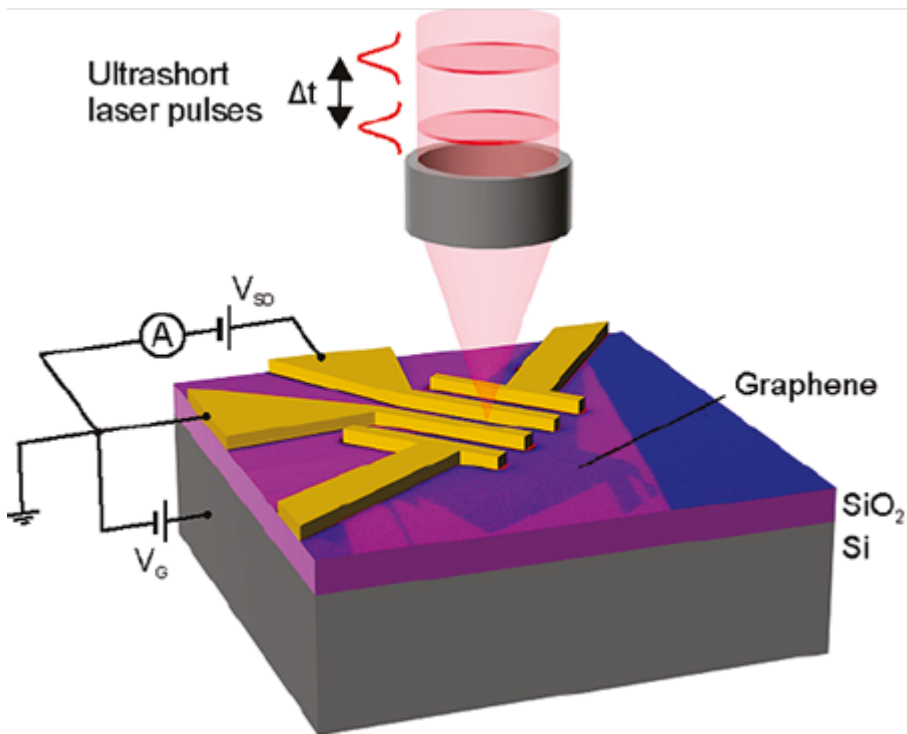
4、石墨烯/InAs纳米线肖特基太赫兹探测器



4、石墨烯/InAs纳米线肖特基太赫兹探测器



4、石墨烯/InAs纳米线肖特基太赫兹探测器



扫描光电流显微镜SPM

石墨烯红外探测器

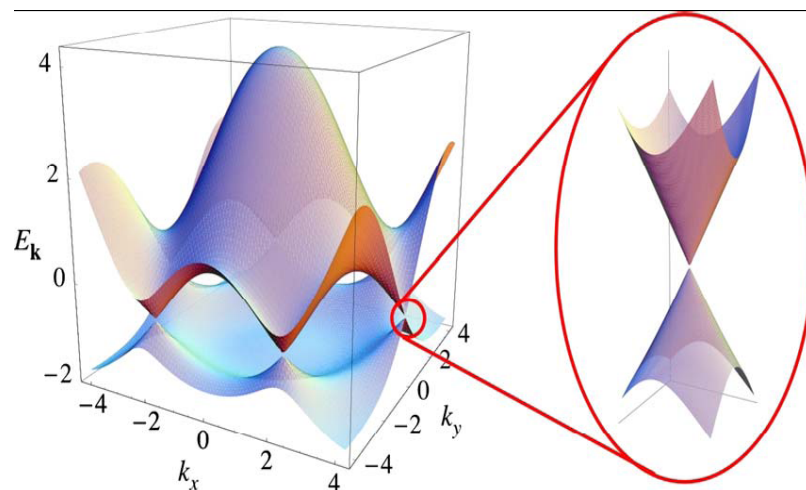
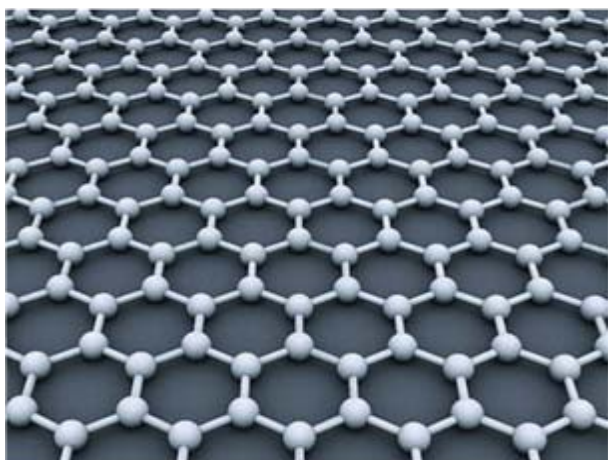
一、实验室介绍

二、氮化镓基高速电子器件

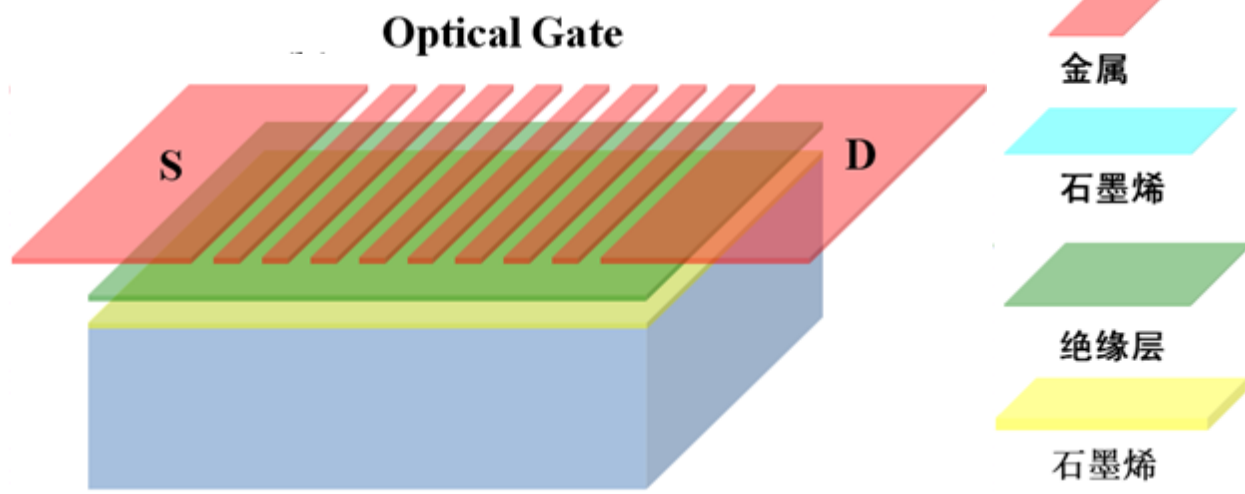
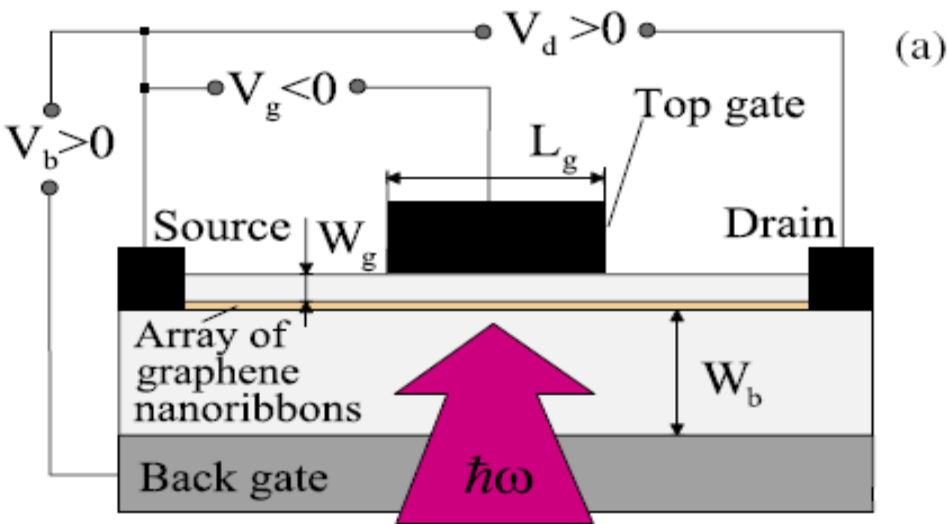
三、氮化镓基固态THz探测器件

四、展望

1、基于拓扑结构材料的新型红外探测机理

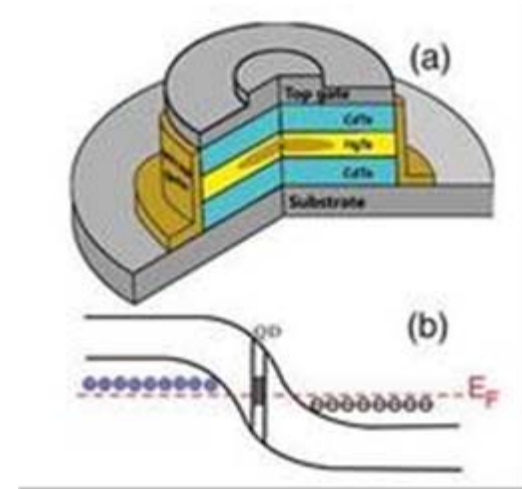
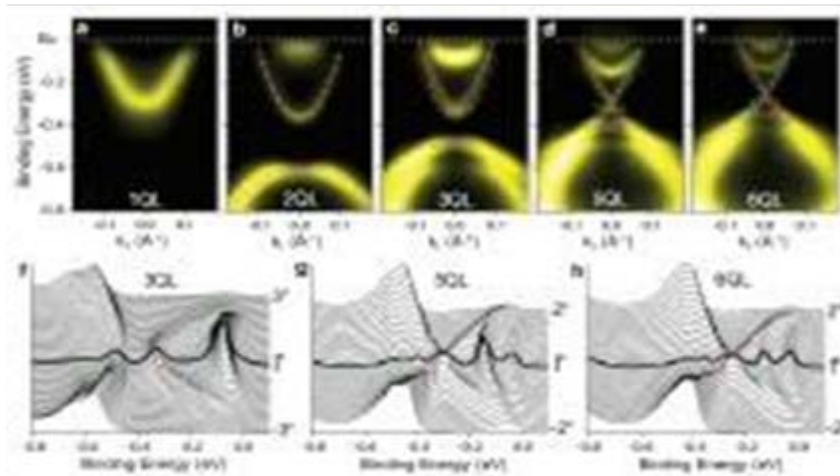


- 石墨烯载流子迁移率快，高速探测响应；
- 石墨烯层电子浓度可调；
- 通过栅长的变化，带隙可变，探测波长可控。

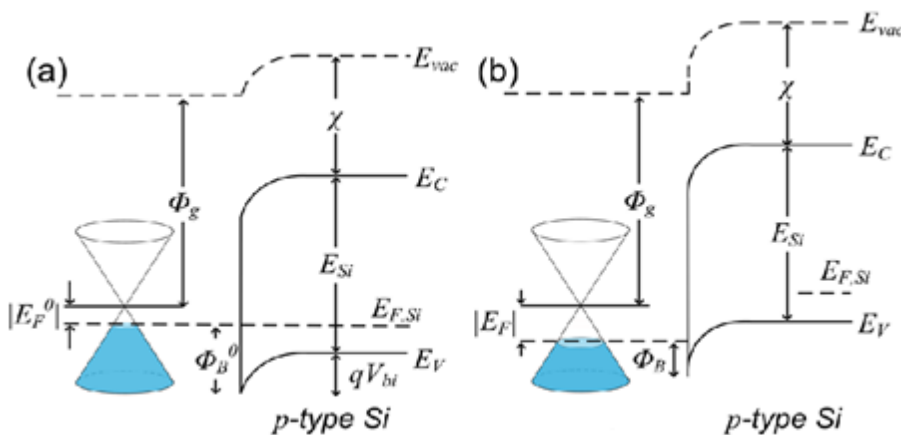


C-based Narrow Gap Semiconductor Physics

2、基于拓扑绝缘体材料的新型红外探测机理



**器件结构易集成；
快速响应；
器件暗电流低；
响应波长可调节。**





敬请批评指正

谢谢!

