

GaN中碳杂质的行为

姓名：黄华洋

日期：2021.12.16



北京大学

报告内容

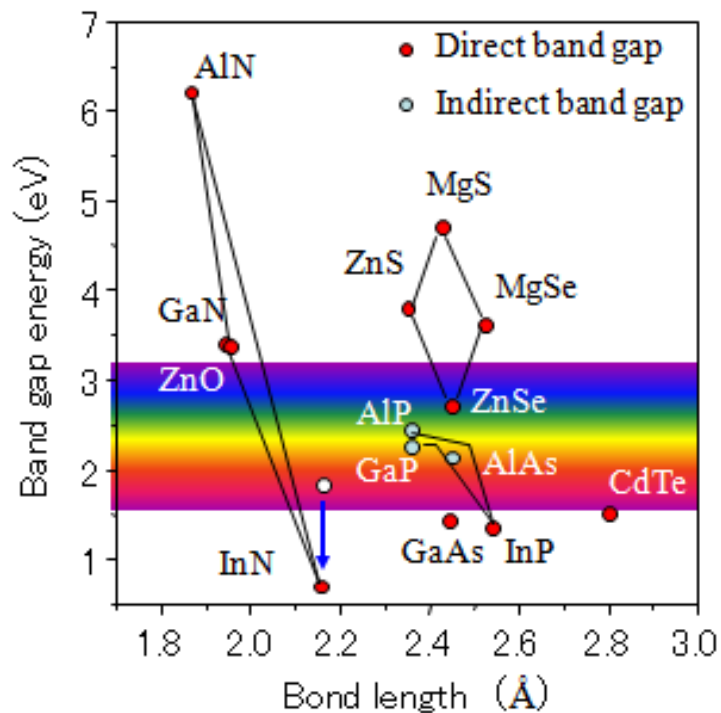
1 GaN基材料及器件的物理基础

2 研究GaN中的C杂质的科学意义

3 GaN中的C杂质相关的研究现状

4 总结

氮化镓基电子器件的应用



AlN (6.2 eV)

GaN (3.4 eV)

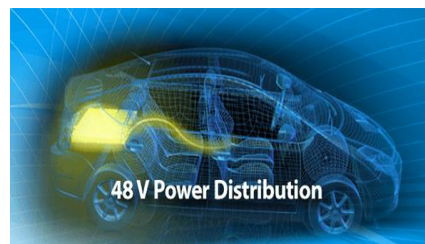
InN (0.7 eV)



手机快充



5G基站



新能源汽车



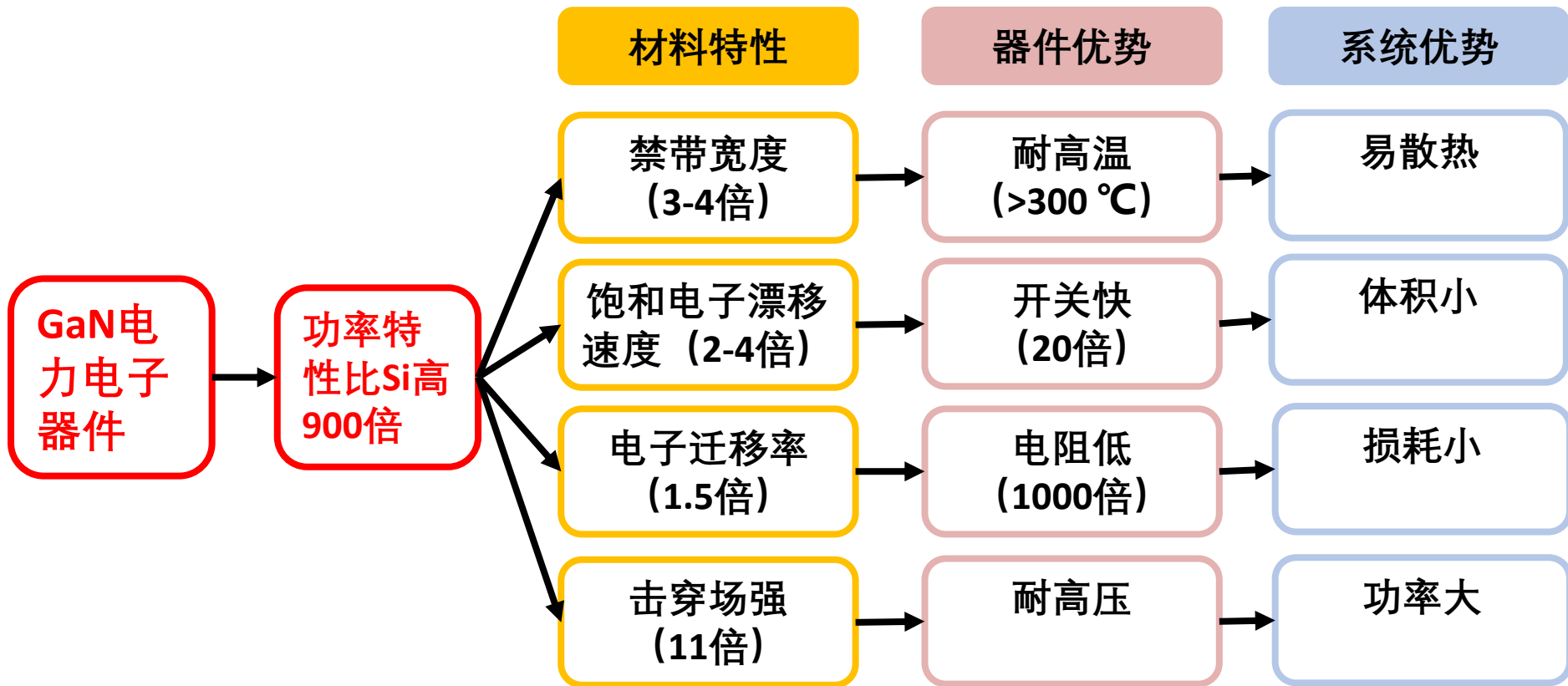
军事雷达

电力电子器件

射频功率器件

以氮化物为代表的第三代半导体材料，具有优异的物理化学性质，在电力电子领域和射频领域有着广泛的应用前景。

GaN基电力电子器件的优势



- 更加高效节能
- 使电力电子装置小型化、轻量化、低成本化
- 器件输出功率密度更大(提高晶圆的利用效率)

报告内容

1 GaN基材料及器件的物理基础

2 研究GaN中的C杂质的科学意义

3 GaN中的C杂质相关的研究现状

4 总结

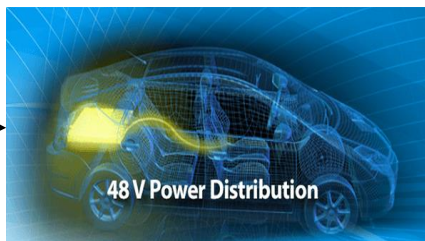
GaN基电力电子器件面临的问题：可靠性问题

快速充电器



低电压
低可靠性需求

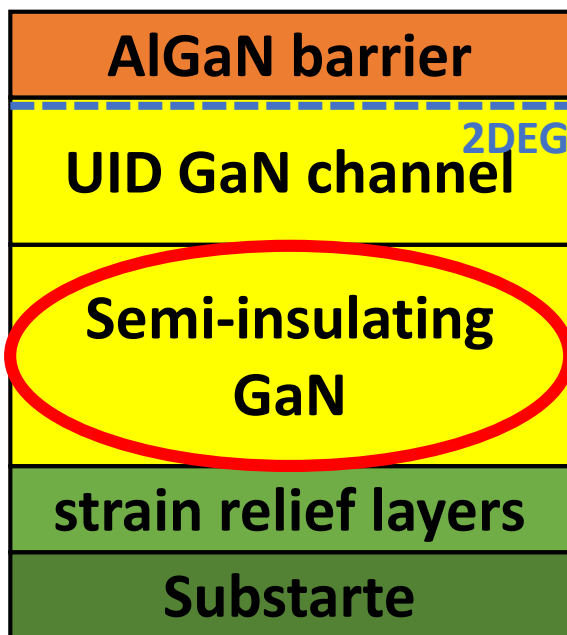
新能源汽车



动车组列车



高电压
高可靠性需求



有效提高器件的耐压特性，
降低漏电电流

如何获得高阻GaN

Unintentional doping (UID)
GaN



Intrinsic donor
(V_N , Si_{Ga} , O_N)



n-type conductivity

Carbon or Fe-doped GaN



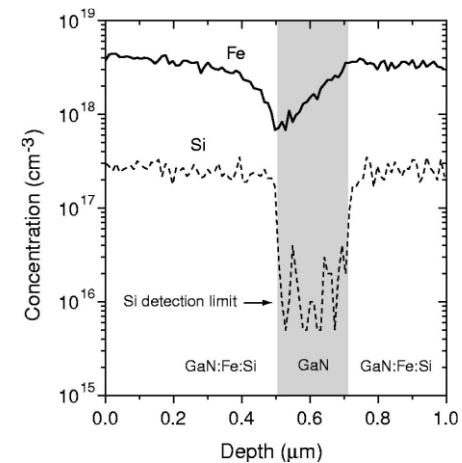
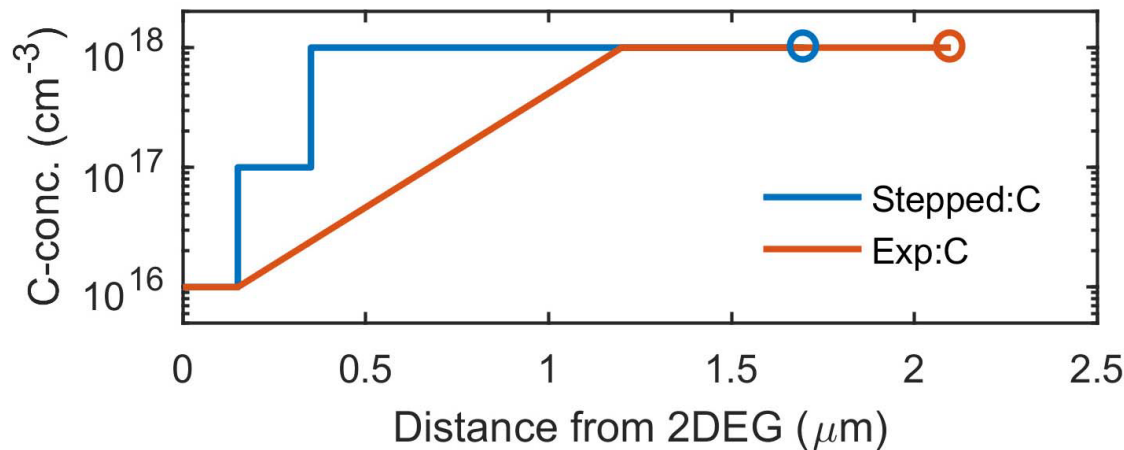
Deep acceptor
(C_N , Fe_{Ga})



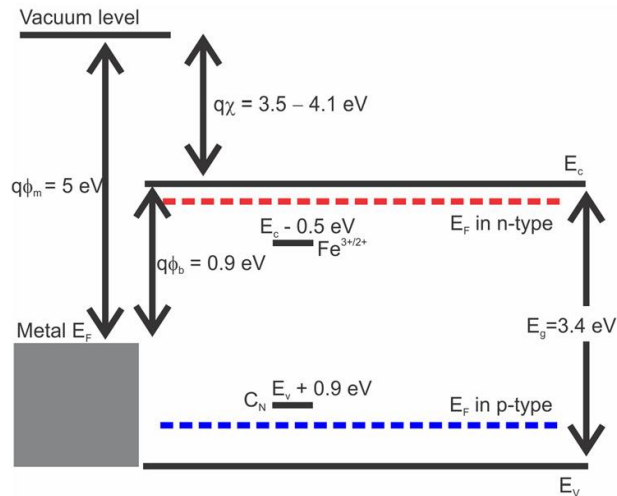
semi-insulating

C v.s. Fe

Memory effect

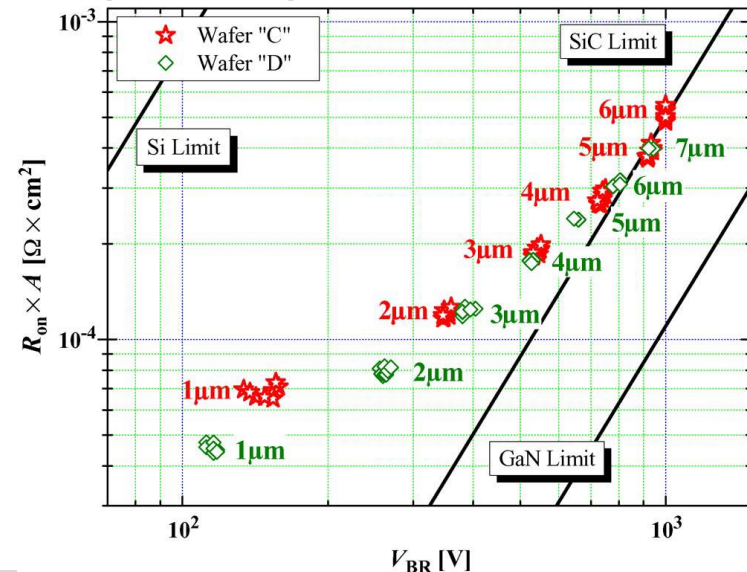


Transition level



(a)

Breakthrough Voltage



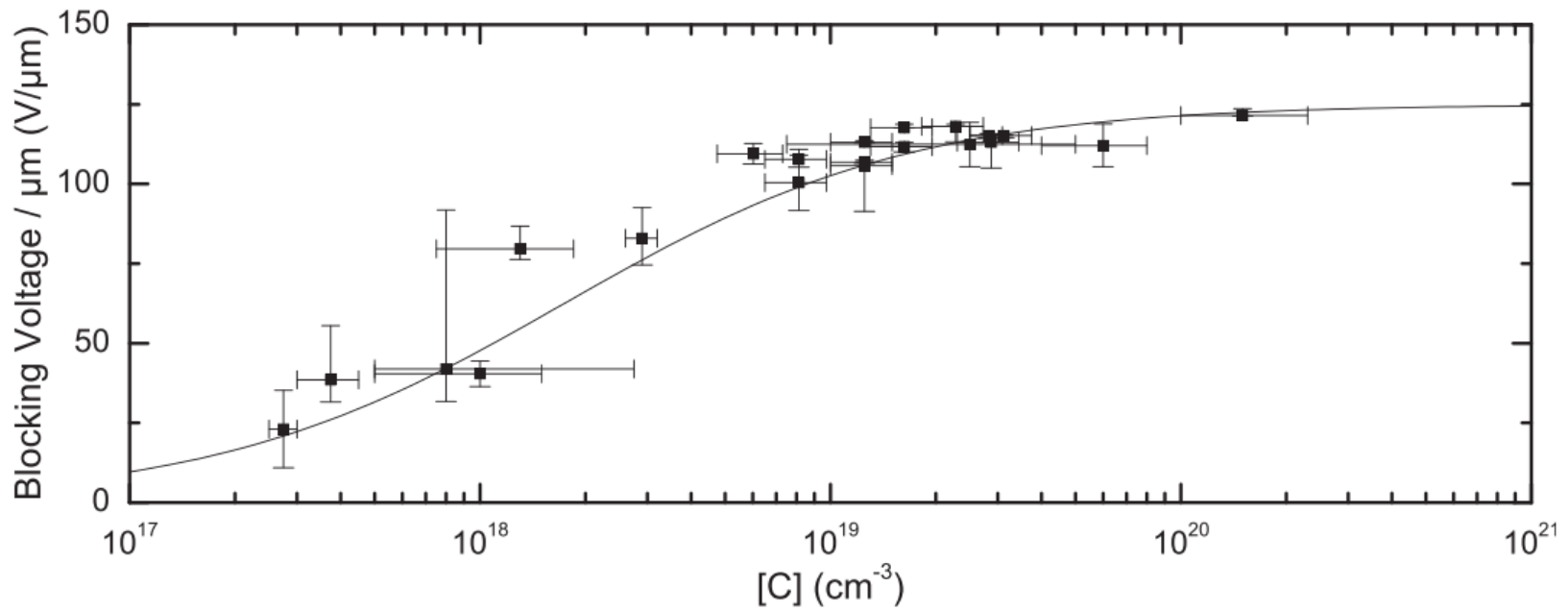
击穿电压与C掺杂浓度的关系

GaN中C杂质的掺杂浓度并不是越高越好。

随着C浓度提高到 $\sim 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ，器件的耐压出现饱和。

同时，由于C在GaN内部引入了局域态，器件的可靠性如动态特性随着C掺杂发生退化。

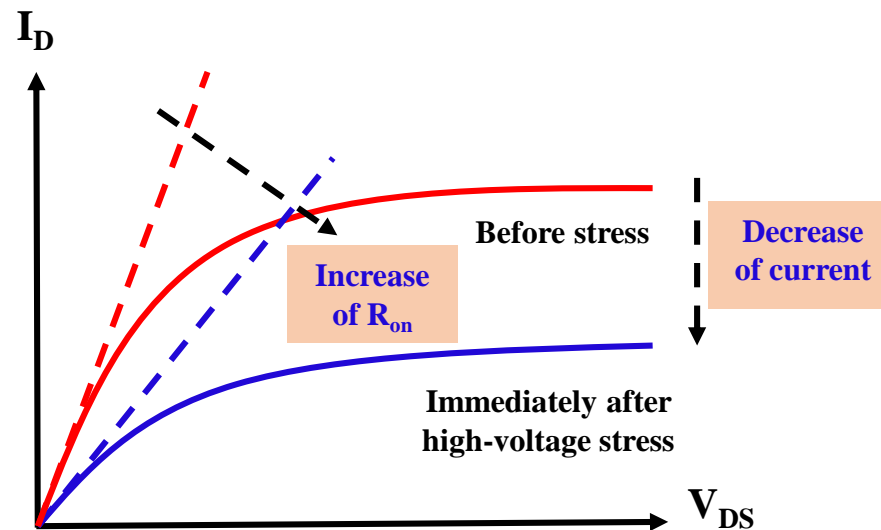
因此，C的掺杂应当有一个最佳范围，以求有效利用C杂质的优势而规避其不利影响。



电流崩塌（动态导通电阻退化）问题

电流崩塌，指器件在开态和关态之间快速切换时（在功率电子器件中）或在高频信号下（在微波射频器件中），输出电流突然出现大幅度下降的现象。

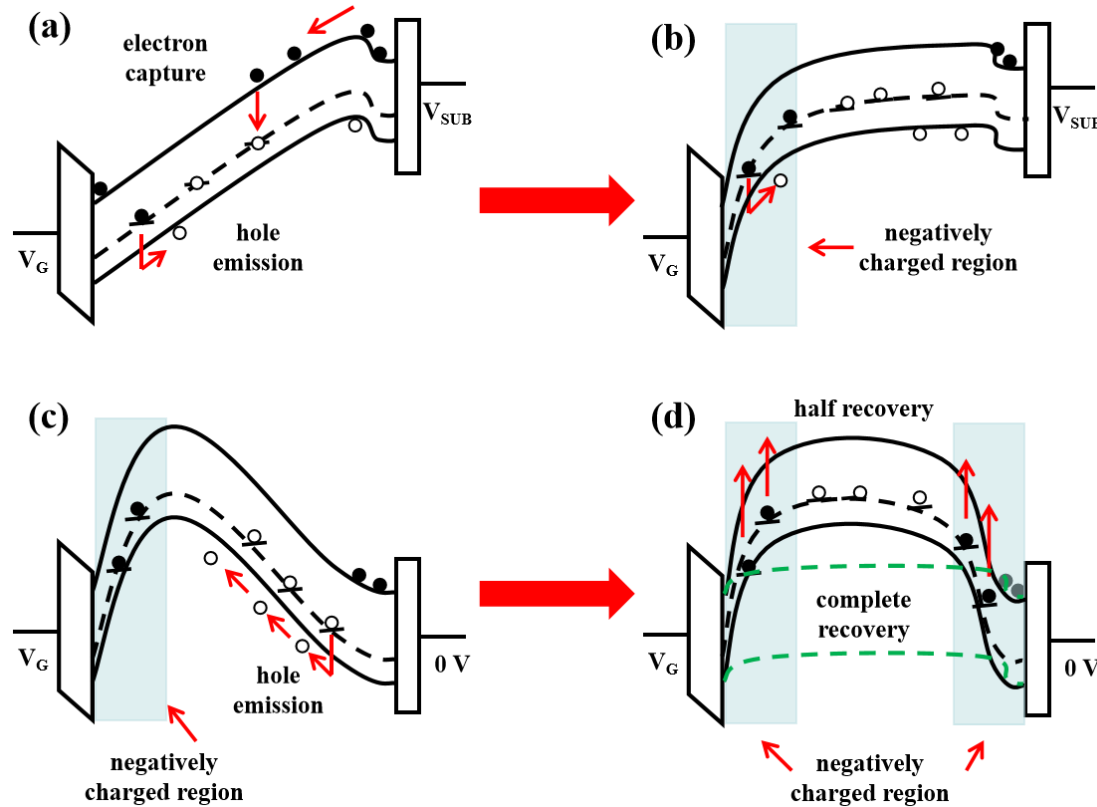
相关表现形式多种多样，例如在功率电子器件中表现为开态电阻增加，并伴随着跨导的下降，因此又称为**动态导通电阻退化**；在微波射频器件中表现为器件的饱和电流下降，并伴随着阈值电压的正漂。这最终导致器件的输出功率密度和功率附加效率减小、器件性能恶化。



电流崩塌产生机理

电流崩塌是器件在高压应力下，沟道区附近产生了束缚负电荷所致。负电荷使沟道区电势能抬高，沟道电子被耗尽，最终使电流密度降低。

在大的电应力作用下，GaN中的体陷阱态俘获电子，形成负的电荷中心，从而影响沟道附近能带结构并耗尽2DEG。目前国际上认为体陷阱主要与高阻GaN缓冲层中的C掺杂相关，特别是C杂质产生的深能级。



报告内容

1 GaN基材料及器件的物理基础

2 研究GaN中的C杂质的科学意义

3 GaN中的C杂质相关的研究现状

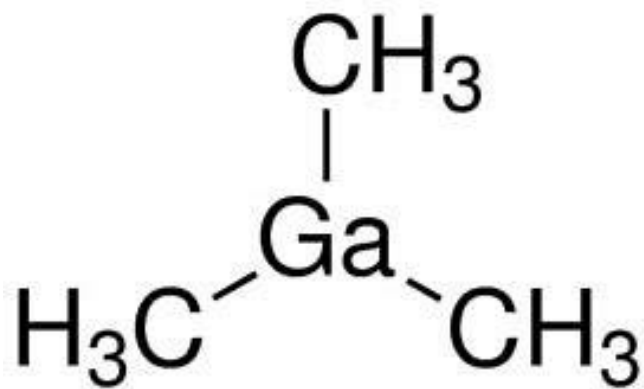
4 总结

MOCVD中C杂质并入机理：自掺杂与外掺杂

自掺杂方法是用三甲基镓TMGa、三乙基镓TEGa等作为C的掺杂源。

C原子随着Ga原子一起并入到外延层表面，逐渐并入到体内。

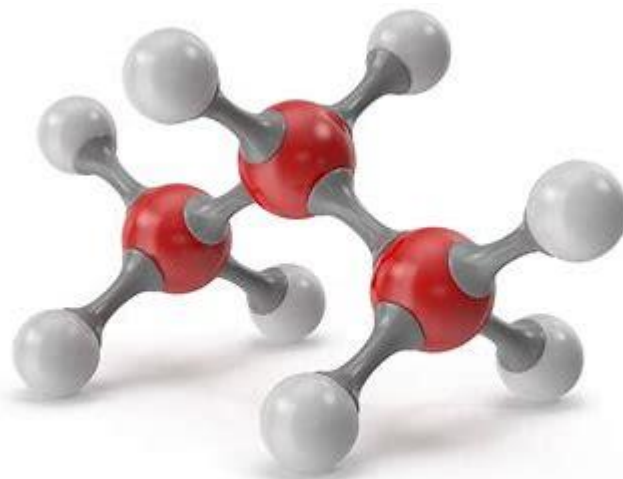
通常可以通过调节生长参数如反应室温度、反应室压强和V/III比来调节C杂质的并入浓度。



外掺方法需要引入外部C源，如丙烷(C₃H₈)等。

C的掺杂浓度通过外部C源流量进行调控。

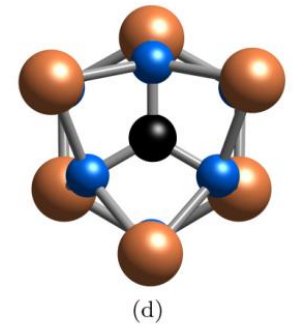
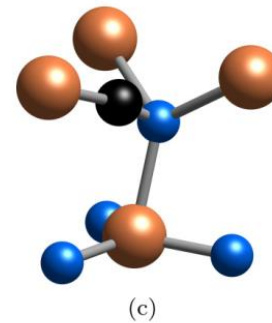
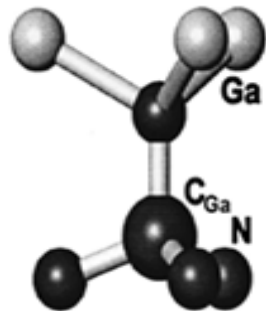
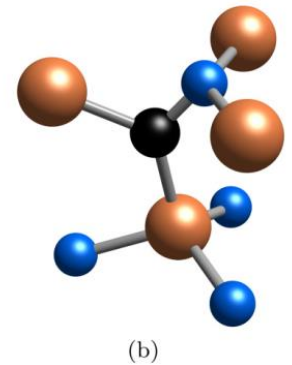
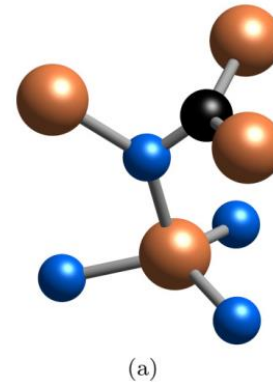
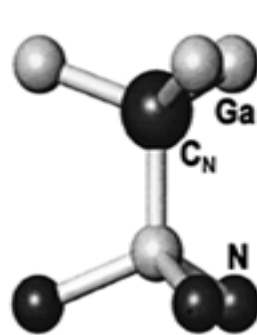
由于在掺C的同时不需要改变影响GaN晶体质量的生长参数，因此外掺方法的优势为提高C掺杂浓度的同时可以保持较优的GaN生长条件。



C在GaN中的可能构型

作为两性杂质元素，C在III-V族化合物中的存在形式可能会非常复杂。

III A	IV A	V A
5 B 硼 2s ² 2p ¹ 10.81	6 C 碳 2s ² 2p ² 12.01	7 N 氮 2s ² 2p ³ 14.01
13 Al 铝 3s ² 3p ¹ 26.98	14 Si 硅 3s ² 3p ² 28.09	15 P 磷 3s ² 3p ³ 30.97
31 Ga 镓 4s ² 4p ¹ 69.72	32 Ge 锗 4s ² 4p ² 72.59	33 As 砷 4s ² 4p ³ 74.92

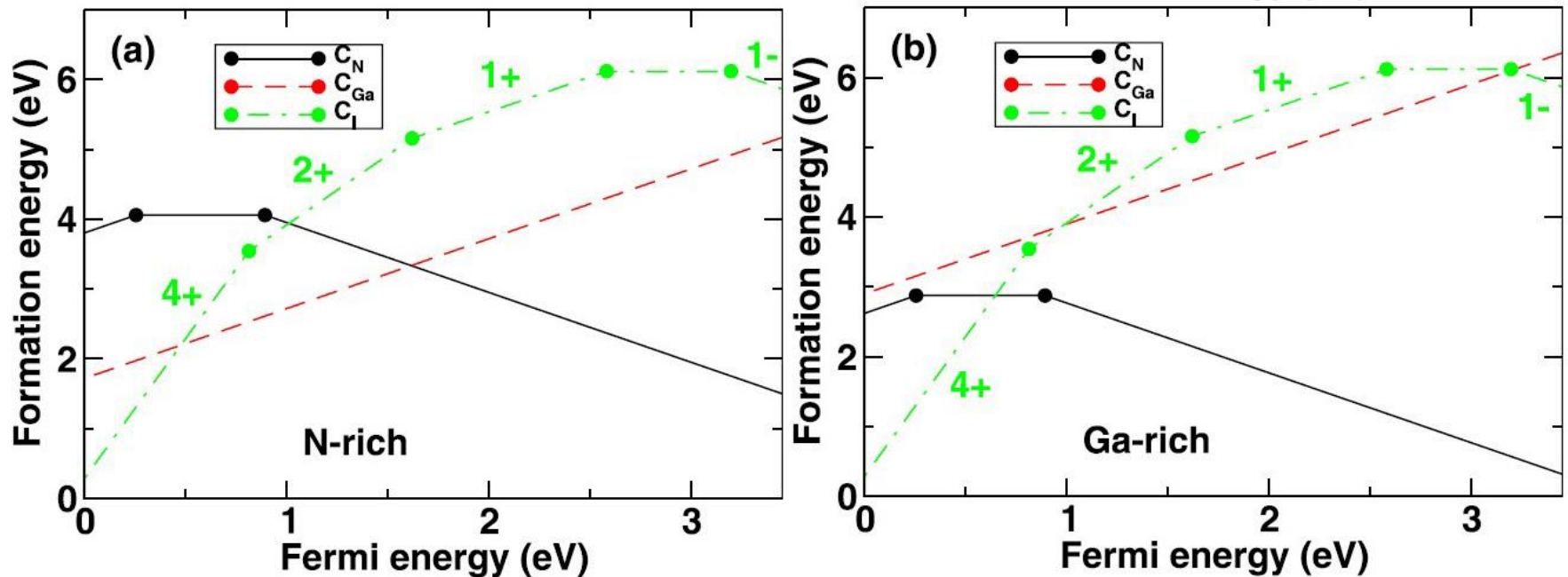


C相关缺陷构型的形成能

转换能级表示缺陷的两种电荷状态形成能相同时的能级。

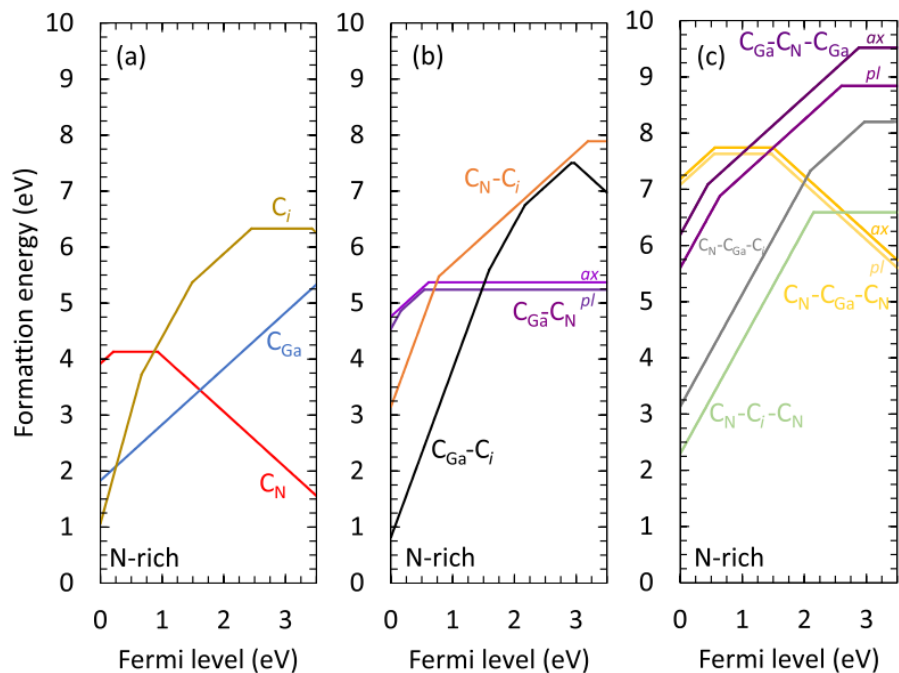
形成能是将杂质原子并入主晶格原子所需要的能量，如对于C杂质在GaN中替代某个晶格位置（N位或Ga位）而言，其形成能表达式为：

$$E^f \left(C_{N(Ga)}^q \right) = E_{\text{tot}} \left(C_{N(Ga)}^q \right) - E_{\text{tot}}(\text{GaN}) - \mu_C + \mu_{N(\text{Ga})} + qE_F + \Delta^q$$



C原子构型与费米能级相关。使得C的替位问题更加复杂！

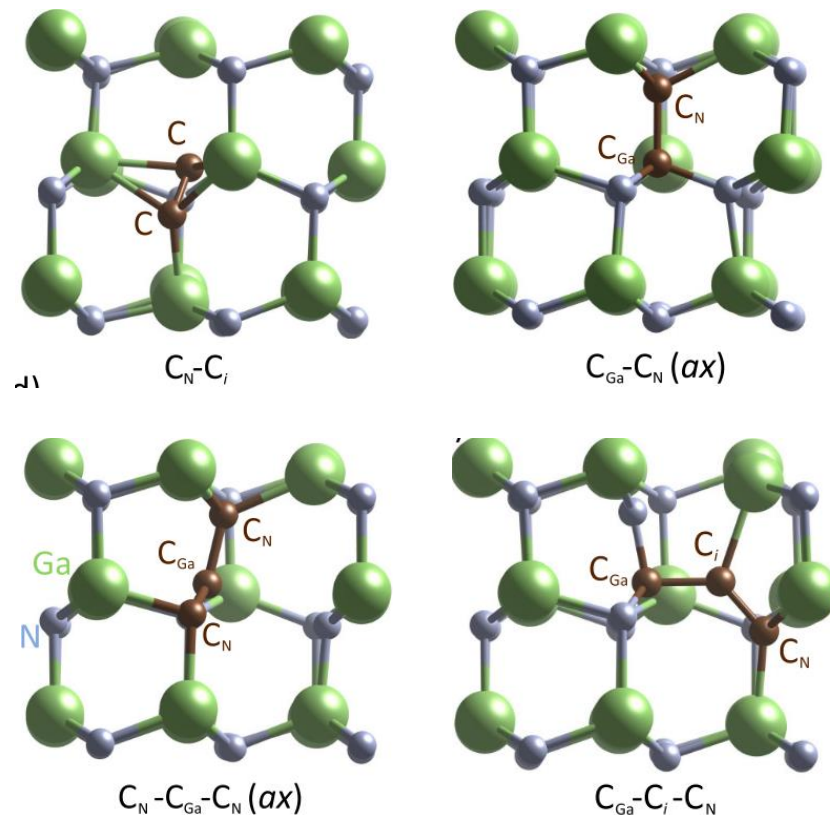
高C掺杂浓度GaN中C的复合构型及其局域态



单C缺陷

双C缺陷

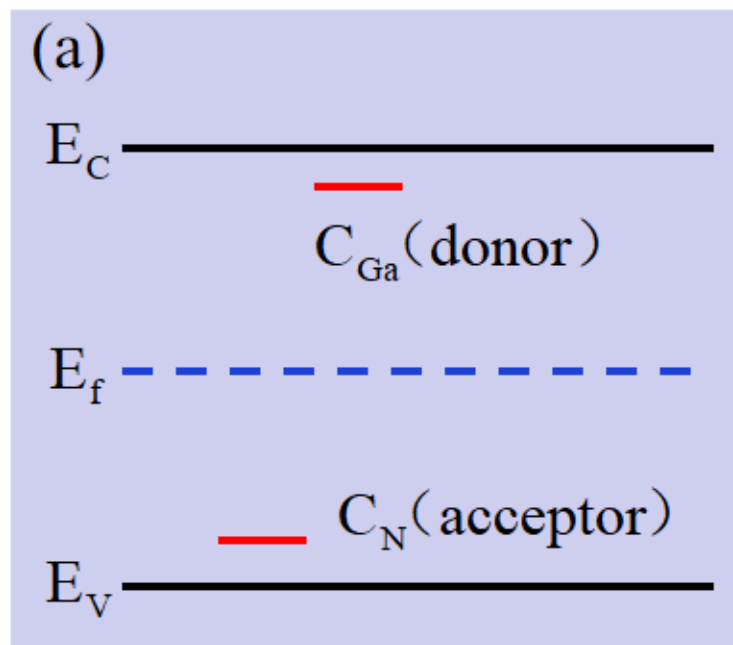
三C缺陷



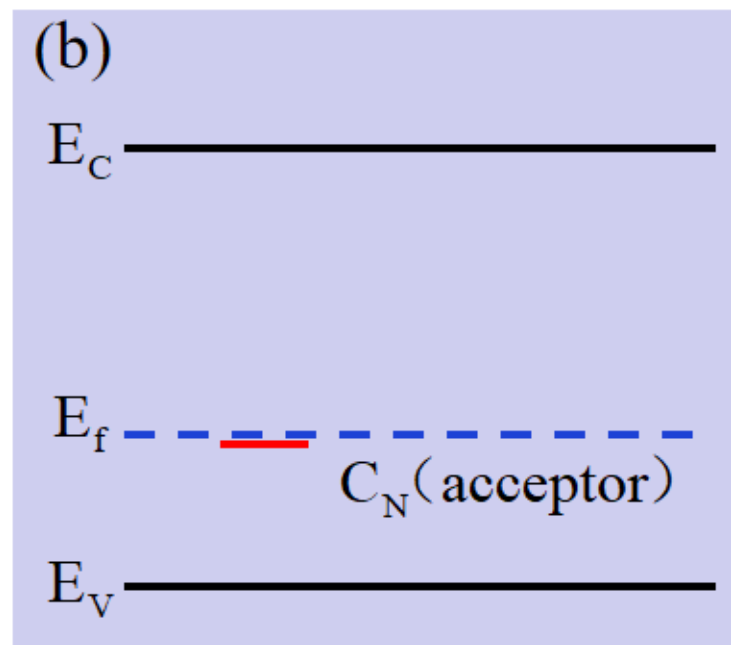
C掺杂GaN高阻形成机理问题

观点1: C_N 是能级位置在价带以上0.2 eV ($E_V + 0.2$ eV) 附近的浅受主, C_{Ga} 为导带以下0.2 eV ($E_C - 0.2$ eV) 附近的浅施主。在通常生长的 n 型GaN中, C首先替代N位形成浅受主, 当费米能级逐渐向价带移动时, C_{Ga} 、 C_I 等不同替位形式对 C_N 形成自补偿。

观点2: C_N 实际上为能级位置在 $E_V + 0.9 \sim 1.0$ eV附近的深受主。他们认为是深受主 C_N 将费米能级 (E_f) 钉扎在其能级附近, 导致了C掺杂GaN的高阻本质, 而不是C的自补偿作用。

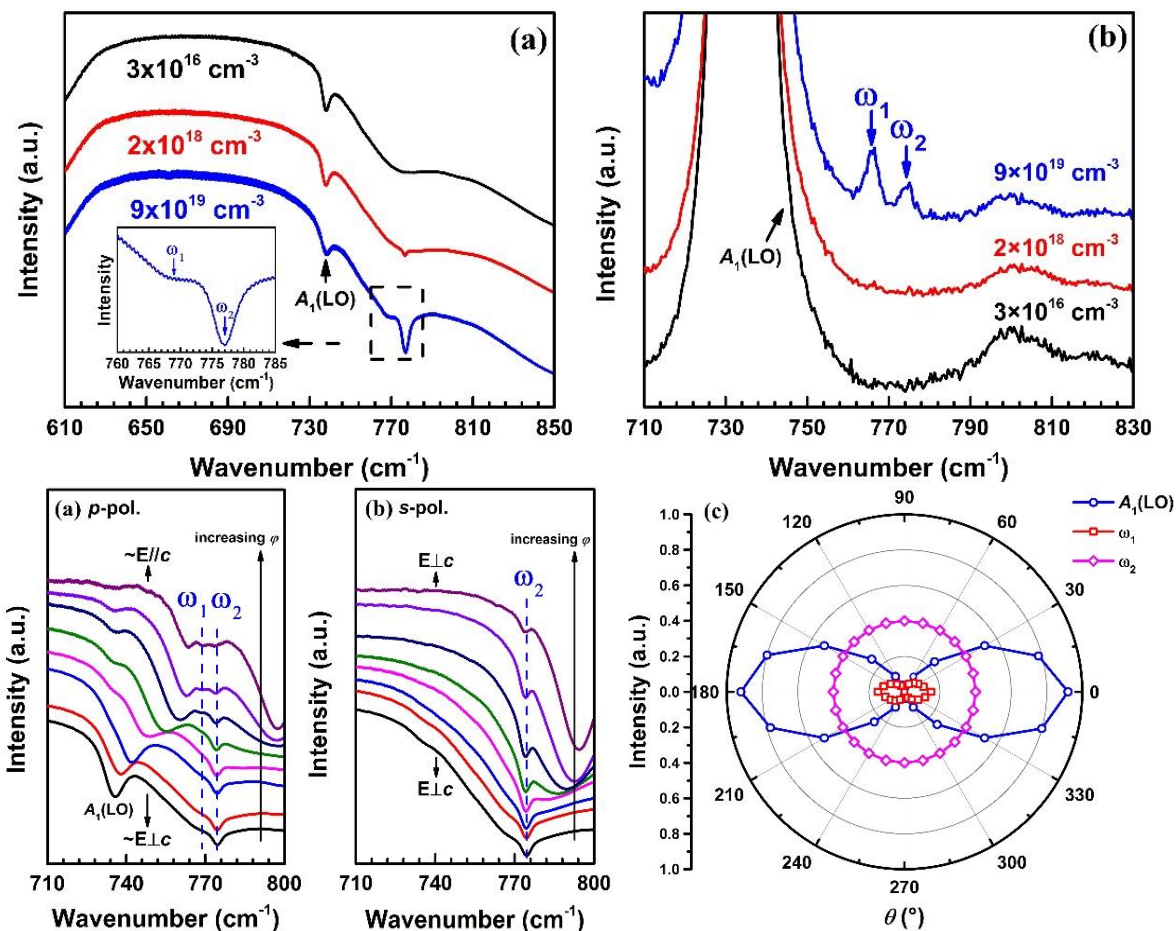


C_N - C_{Ga} 自补偿机制



C_N 钉扎费米能级机制

高阻GaN中C杂质的晶格占位：局域振动模研究

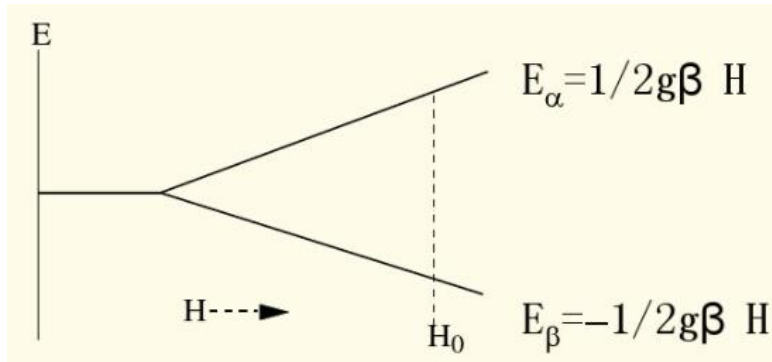


红外和拉曼偏振实验与第一性原理计算在波数和不同偏振模式下的振动强度都十分吻合。

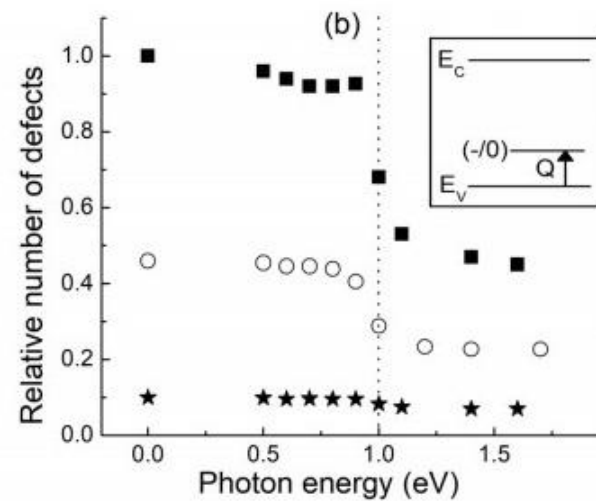
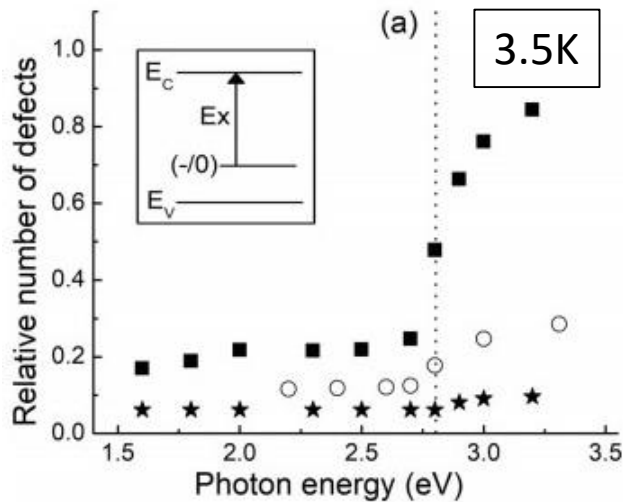
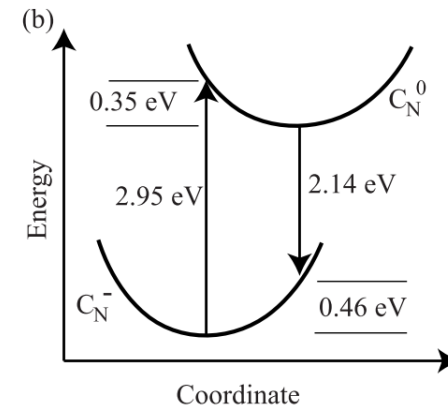
提供了C在GaN中替代N位并以-1价形式存在的直接证据。

$C_N(-/0)$ 能级实验研究：电子顺磁共振 (EPR)

电子自旋磁矩：Zeeman分裂

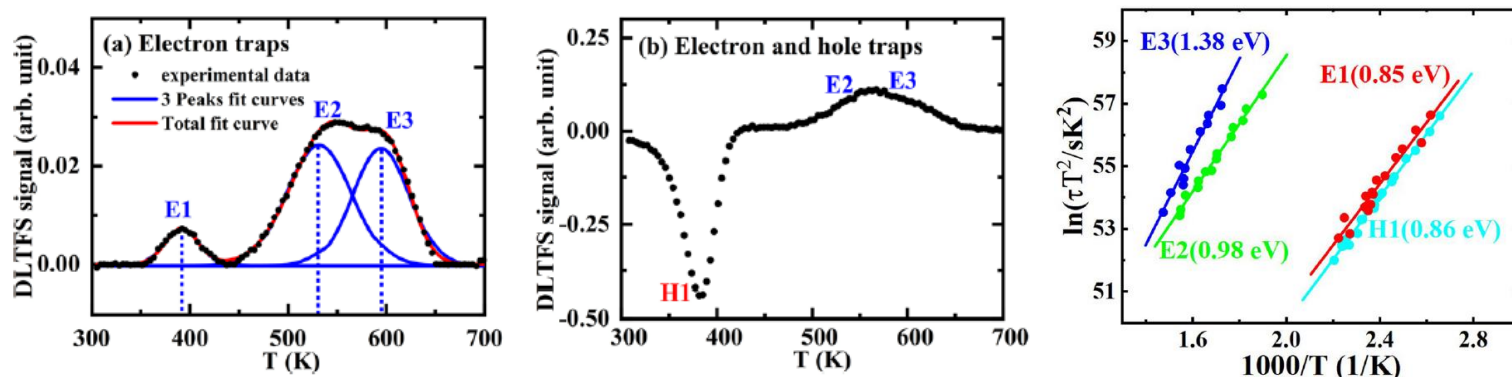


光激发电子跃迁：CC diagram



GaN中C_N缺陷的受主态研究

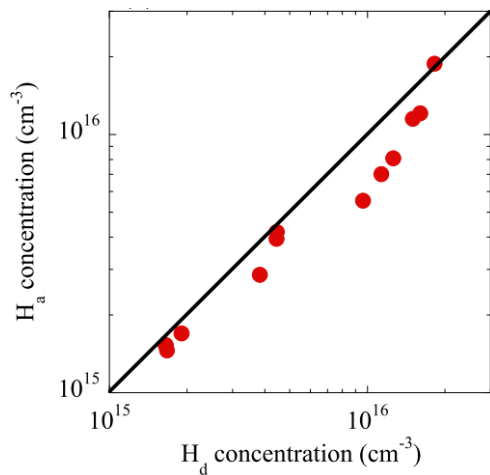
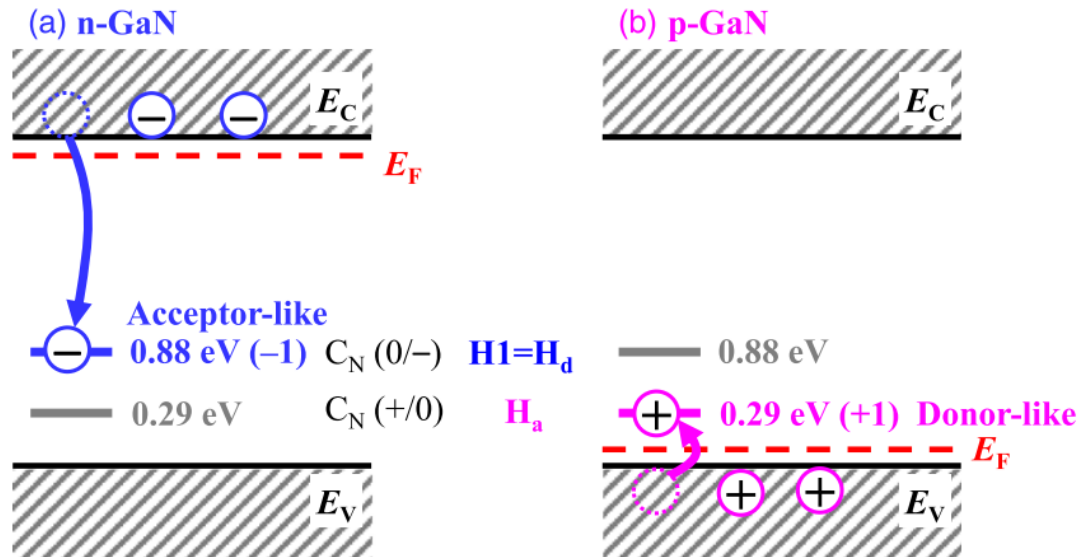
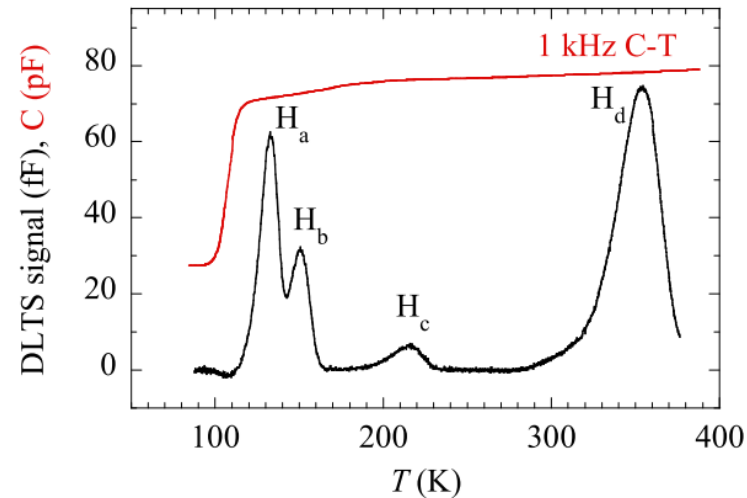
确定了GaN中C_N点缺陷受主态能级位置：E_v + 0.86 eV



Trap label	Energy level /eV	σ /cm ²	N_T /cm ⁻³	Defect (transition level)
E1	$E_C - 0.85$	3.92×10^{-14}	6.24×10^{14}	Dislocation-related
E2	$E_C - 0.98$	5.14×10^{-15}	1.26×10^{15}	$V_{Ga}-O_N$ (-/2-)
E3	$E_C - 1.38$	1.74×10^{-14}	1.25×10^{15}	$V_{Ga}-O_N$ (0/-)
H1	$E_V + 0.86$	9.46×10^{-14}	1.10×10^{16}	C _N (0/-)

通过特殊设计的器件结构，利用高温DLTS确定了GaN中C_N点缺陷受主态能级位置，并且确定了它的微观结构和电荷态。

GaN中 C_N 缺陷的施主态研究



**发现了GaN中 C_N 点缺陷施主态能级位置：
 $E_V + 0.29 \text{ eV}$**

报告内容

1 GaN基材料及器件的物理基础

2 研究GaN中的C杂质的科学意义

3 GaN中的C杂质相关的研究现状

4 总结

总结

- GaN基材料在功率电子器件和射频电子器件领域表现出其独特的优势，具有重要的研究意义；
- C掺杂GaN作为buffer层对于提高器件的耐压，降低漏电具有重要作用，但也会带来一系列的问题，比如电流崩塌效应；
- C杂质的并入有自掺杂和外掺杂两种机理；C在GaN中有多种可能的原子构型，并且与浓度，费米能级，生长参数等因素相关；C在半绝缘GaN被证明是主要替代N位，但是在p型GaN中被预言占据Ga位，目前还存在争议； C_N 在GaN中既是受主又是施主，能级位置分别在 $E_v + 0.86 \text{ eV}$ 和 $E_v + 0.29 \text{ eV}$ 。



谢谢！ 恳请陈老师和各位同学
批评指正！



北京大学