

GaAs 中 N 等电子陷阱的研究

赵学恕 李国华 韩和相 汪兆平

(中国科学院半导体研究所)

唐汝明 车荣钰

(中国科学院物理研究所)

1983年10月27日收到

提 要

对离子注 N 的 GaAs 样品作了 77K 的静压光致荧光研究。观察到了 N 陷阱中心元胞势束缚激子 N_x 的发光光谱及畸变势束缚激子 N_T 的发光峰。测量 N_x 能级的压力系数为 2.8 meV/kbar, 常压下 N 的共振态高于导带边 179 meV。讨论了 N 等电子陷阱的电声子耦合强度及有效束缚激子半径随压力的变化关系。

一、引 言

Wolford 等人^[1-3]系统的研究了 $GaAs_{1-x}P_x$ 中 N 等电子陷阱的束缚能随组份的变化关系, 发现在直接带的范围内相应一个 N 陷阱存在两个束缚激子态: 一个是由中心元胞势束缚的深态 N_x ; 另一个则是由中程畸变势束缚的伴随 Γ 谷的浅态 N_T 。这两种束缚激子态在 $x < 0.22$ 以后变成导带里的共振态, 并估计 N 在 GaAs 中可能形成高于导带边(Γ 谷)100meV 的共振态。

从 N 的电负性和离子半径(3.0, 0.719 Å) 和 P(1.64, 1.128 Å), As(1.57, 1.225 Å) 相比, 可以预计 N 在 GaAs 中的势场和晶格弛豫要比在 GaP 和 $GaAs_{1-x}P_x$ 中来大, 更具有深中心的特征。对它的研究必然能增进对等电子陷阱特征的了解。根据 Ren(任尚元)等人的理论计算^[4], GaAs 中 As 位的 A_1 对称的深能级的压力系数远小于导带 Γ 谷的压力系数。因此有可能用静压把处于导带内的 N 陷阱的共振态变成禁带中的束缚态。

我们的 77K 静压发光证实, 在压力大于 25 kbar 开始观察到 N 陷阱的束缚激子 N_x 的发光谱。其压力系数为 2.8meV/kbar, 由 N_x 能级的压力关系外推常压下 N 陷阱能级位于导带边上 179meV 之内。从 30kbar 到转变点(38kbar)的范围内观察到距施主能级 9.9meV 的 N_T 束缚激子态。研究了 N 等电子陷阱的电声子耦合强度及有效束缚激子半径随压力的变化关系。

二、实验方法

静压发光的测量方法同本刊本期作者另一文。

用 He-Ne 激光器作为激发光源. 激发强度 $\sim 100\text{W}/\text{cm}^2$, 样品用液相外延生长的纯 n 型 GaAs 材料, 其残余杂质浓度 $\sim 5.6 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$. 77K 霍尔迁移率 $\mu = 9.9 \times 10^4\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{V}$, 外延层厚 $20\mu\text{m}$. 离子注入 N 的剂量 $D = 1.38 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$, 注入能量为 200keV . 为了防止退火时 N 和 As 的挥发, 在样品表面低温沉积厚 5000\AA 的 SiO_2 膜, 随后在 850°C 退火 30min, 再用 HF 酸去掉 SiO_2 层. 为了避免退火时氧的沾污, 对样品表面作轻微的化学腐蚀, 削掉近 2000\AA , 足以保证激光渗透到 N 注入层.

三、实验结果

图 1 为离子注 N 的 GaAs 样品(N 的浓度 $\sim 10^{18}\text{cm}^{-3}$) 77K 静压发光谱的线形随压力的变化. 小于 25kbar 的发光峰和同一块没注入的 GaAs 的发光峰相同. 发光峰的半宽随压力没有明显变化, 这个发光峰是来自残余施主的发光过程, 记作 D^{Γ} . 其峰值能量与压力的关系为

$$E_{D^{\Gamma}}(P) = 1509 + 10.4P(\text{meV}). \quad (1)$$

10.4meV/kbar 代表 77K 导带边(Γ)谷的压力系数, X 谷以 $-2.7\text{meV}/\text{kbar}$ 的速率向低能移动^[5].

在 25.8kbar 的压力时, 观察到在 D^{Γ} 峰的低能尾出现了新的光谱结构. 随压力增加这个新的发光结构逐渐远离 D^{Γ} 峰, 同时发光强度也不断变强. 由于这个新的发光结构和带边有完全不同的压力行为, 显然是由中心元胞势所导致的发光机构.

我们沿用 $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ 中 N 的等电子陷阱名称, 把这个新的发光结构归结为 N_x 及其声子伴线, 即 N 的中心元胞势束缚的激子发光过程. 在压力为 30 kbar 时观察到距 D^{Γ} 峰 9.9meV 的低能端出现了另一个新的发光峰, 随压力增加这个峰和 D^{Γ} 一起向高能移动, 相对能量没有明显变化. 从压力行为上看, 这是一个浅能级的发光过程, 用 N 陷阱在混晶中的名称我们把它叫作 N_{Γ} . 到间接带的压力范围(大于 38 kbar), D^{Γ} 和 N_{Γ} 峰都消失, 只有 N_x 发光峰, 并且强度有些变弱.

我们上面所说的 N_x 实际上包含两个发光峰, 一个是主峰, 另一个是主峰高能边的肩膀. 这两个峰的能差随 N 的浓度、压力及激发强度都有变化. 这两个峰可能是 N 陷阱中心元胞势束缚激子的 A 态($J = 1$, 三重态)和 B 态($J = 2$, 五重态)的交换劈裂所致. 但就我们目前的条件还不能鉴别这两个峰的归属, 暂用 N_x^{\prime} 表示(见图 1). 低能端的声子伴线分别为 $N_x\text{-TA}^X$, $N_x\text{-2TA}^X$, $N_x\text{-LO}^l$, $N_x\text{-LO}^l\text{-TA}^X$ 等.

把图 2 中 N_x 的能级随压力变化的线性关系外推到 $P = 0$ 的能量值, 得到常压下 N 陷阱能级高于导带边 179meV. 这个值可能要比实际值大, 原因是 N 陷阱态位于 Γ 谷内时, 陷阱态和 Γ 谷的连续态之间的共振作用, 会使陷阱态的 Γ 谷成份相应增加. 所以当 N 陷阱位于 Γ 谷内时它的压力系数要比测量的 $2.8\text{meV}/\text{kbar}$ 大些. 因此, 外推得到的值只能是 N 陷阱能级的上限.

由于我们的压力装置不能连续可调, 无法系统跟踪光谱结构的变化, 难以确定 N_{Γ} 的起始压力, 通过 29.8kbar 的 D^{Γ} 峰半宽明显增加, 表明 N_{Γ} 的束缚态已经存在, 可能是激发过程未能分开.

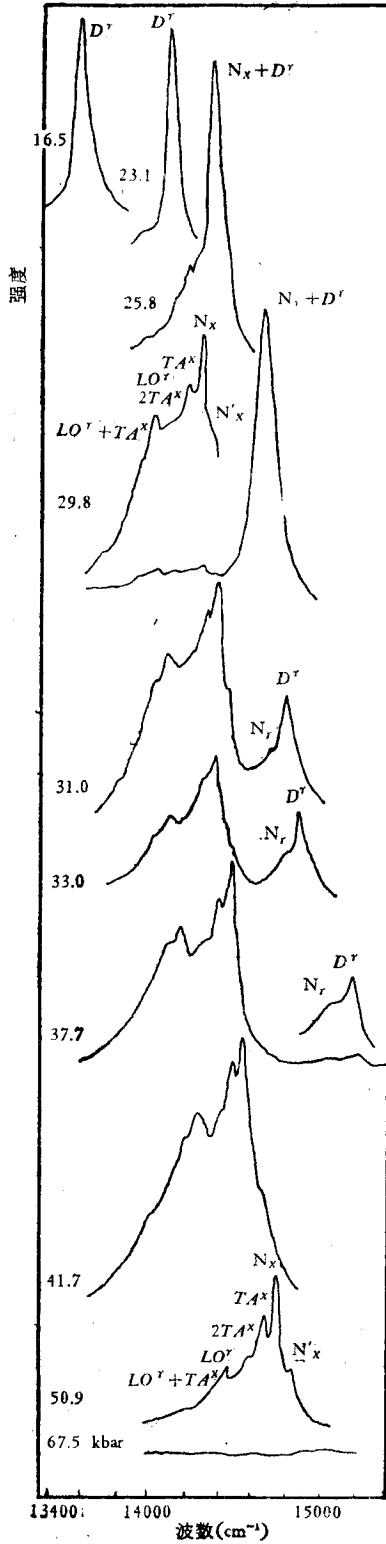


图1 谱线右边的数字是压力, 单位 kbar
发光峰的名称如文字中所述

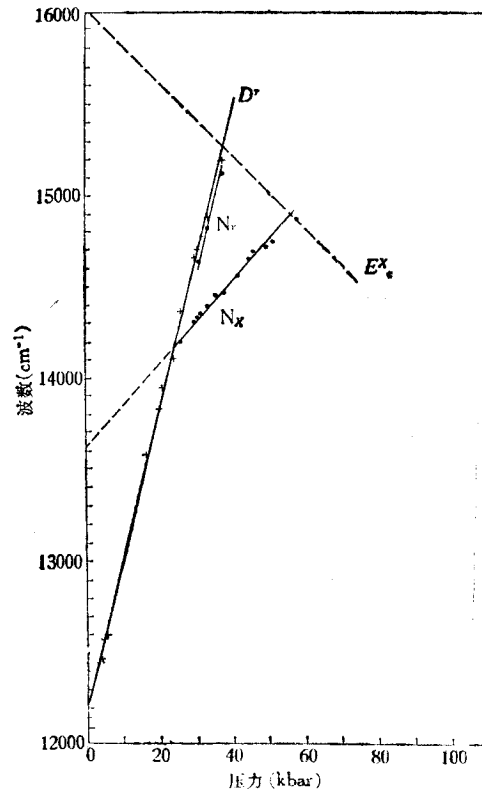


图2 施主 D^r , N 的束缚激子 N_x 及 N_r 的发光峰随压力的变化关系 E_x^r 代表 X 谷的压力关系 (引自 Olego^[3], 120K 的实验值)

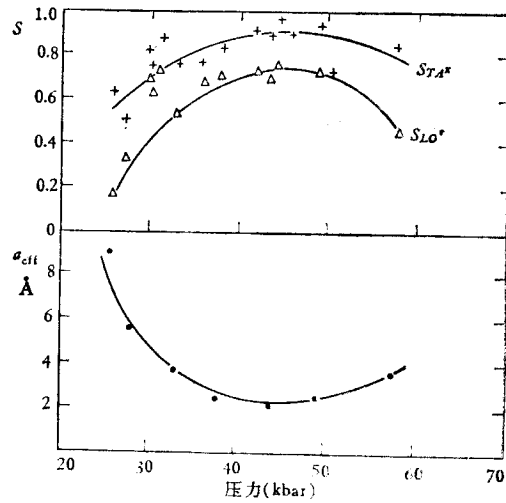


图3 GaAs:N 中 N 等电子陷阱的电声子耦合强度 $S_{TA'} \cdot S_{LO'}$ 以及有效束缚激子半径 a_{eff} 随压力的变化关系

四、讨 论

深态的一个重要特征是具有较大的电声子耦合强度,按照 Huang-Rhys^[6] 电声子耦合强度关系

$$I_n^i = I_0 \frac{S_i^n}{n!} \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

其中 I_0 为零声子发光强度, I_n^i 为 i 声子的第 n 级伴线强度, S_i 为声子 i 的耦合强度. 我们用发光峰的高度比近似为强度比. 按上述关系得到两个主要声子 TA^X 和 LO^Γ 的耦合强度 S_{TA^X} 和 S_{LO^Γ} 随压力变化关系(见图 3). 图 3 中也示出 N_x 束缚激子有效半径 a_{eff} 与压力的关系,有效半径是按 Wolford 给出的 S_{LO^Γ} 与 a_{eff} 的关系求得的^[7],图 3 清楚地反映了带结构的变化对陷阱态特征的影响. 按 Green 函数方法,陷阱态(N_x)波函数 $|\phi\rangle$ 的 $|K\rangle$ 分量

$$\langle K|\phi\rangle = \frac{\langle K|V|\phi\rangle}{E_K - E} \quad (3)$$

反比于能量分母 $E_K - E$. V 为陷阱势, $|K\rangle$ 为导带的 Bloch 波函数, E_K 为导带的色散能, E 为 N_x 束缚激子能. 图 3 中电声子耦合强度 S_{TA^X} 和 S_{LO^Γ} 在低压和高压两端下降正是由于陷阱态在两端分别靠近 Γ 谷和 X 谷,使(3)式的能量分母变小,陷阱分别增加了 Γ 谷和 X 谷轨道成份,使陷阱态波函数变得较为扩展,有效束缚激子半径相应增加,降低了陷阱态的电声子耦合强度. 同高压端相比, 低压端束缚激子有效半径变化较大是由于陷阱态中长波长的 Γ 谷成份比重大,降低了中心元胞势上的电荷密度,扩大了陷阱波函数的尾巴所致. 随压力增加 S_{LO} 变大意味着陷阱中心电荷密度增加,有效半径小. 从而使电子和短波声子耦合强度 S_{TA^X} 和 S_{LO^Γ} 的最大值出现在 43kbar 处,其值分别为 0.9 和 0.72,束缚激子有效半径的最小值 $\sim 2.3 \text{ \AA}$.

随压力增加导带宽度迅速变窄,相应 N_x 束缚激子能随之增加(见图 2). 到直接带和间接带的转变点($\sim 38\text{kbar}$),达到极大值 $\sim 100 \text{ meV}$. 但束缚能的最大值并不对应电声子耦合强度的最大值和有效半径的最小值,近 5 kbar 的相位差是 Γ 谷在转变点处仍然有较大的比重造成的.

本工作是在黄昆教授和何寿安教授的热情支持下完成的,为此我们表示诚挚的感谢. 对方兆强、林耀望二位同志提供的高纯 GaAs 样品表示感谢.

参 考 文 献

- [1] P. J. Dean and R. A. Faulkner, *Appl. Phys. Lett.*, **14**(1966), 210.
- [2] D. J. Wolford *et al.*, *J. Lumin.*, **18/19**(1979), 863.
- [3] D. J. Wolford *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **39**(1979), 1400.
- [4] S. Y. Ren *et al.*, *Phys. Rev. B*, **25**(1982), 7661.
- [5] D. Olego *et al.*, *Phys. Rev. B*, **22**(1980), 894.
- [6] K. Huang and A. Rhys, *Proc. Roy. Soc., A*, **204**(1950), 406.
黄 昆,物理学进展, **1**(1981), 31.
- [7] D. J. Wolford *et al.*, *J. Phys. Soc. Japan.*, **49**(1980), 223.

A STUDY OF NITROGEN ISOELECTRONIC TRAPS IN GaAs

ZHAO XUE-SHU LI GUO-HUA HAN HE-XIANG WANG ZHAO-PING

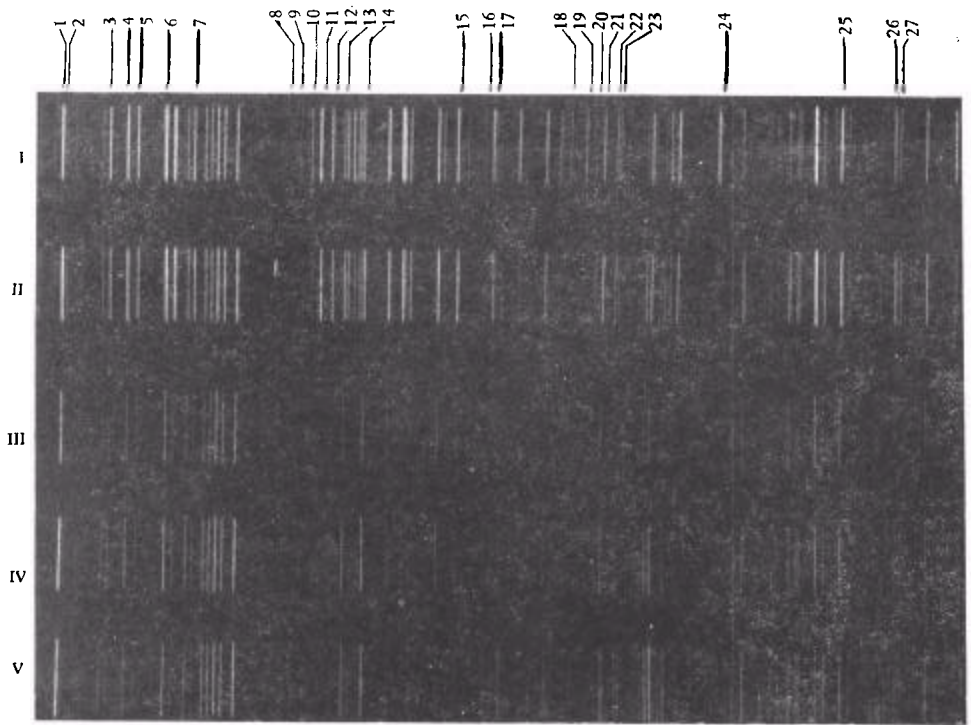
(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

TANG RU-MING CHE RONG-ZHEN

(Institute of Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The photoluminescences of nitrogen implanted GaAs samples at 77 K have been studied under high pressures. The luminescence peaks of excitons N_x bound to N trap central cell potential and excitons N_T bound to deformation potential were observed. The experimental value of pressure coefficient of N_x level is 2.8 meV/kbar. Under the atmospheric pressure, the N resonant state is at 179 meV above the conduction band edge. The pressure behaviors of electron-phonon coupling strength of N isoelectronic trap and effective radius of bound exciton are discussed.



I. $L_{\text{外回路}} = 0$; II. $L_{\text{外回路}} = 6\mu\text{H}$; III. $L_{\text{外回路}} = 18\mu\text{H}$; IV. $L_{\text{外回路}} = 24\mu\text{H}$; V. $L_{\text{外回路}} = 32\mu\text{H}$

1 } ArIV	443.42 Å	3 } ArV	445.997 Å	8 } ArVI	455.81 Å	12. ArV458.12 Å;
2 } ArIV	443.65 Å	4 } ArV	449.065 Å	9 } ArVI	457.48 Å	
		5 } ArV	7.450.58 Å	10 } ArVI		
		6 } ArV		11 } ArVI		

13. 458.80 Å; 14. 459.87 Å; 15. 465.00 Å; 16. 466.53 Å; 17. 446.93 Å; 18. 471.07 Å;
 19. 471.79 Å; 20. 472.64 Å; 21. 473.04 Å; 22. 473.74 Å; 23. 474.14 Å; 24. ArVII
 479.379 Å; 25. 487.99 Å; 26. 491.00 Å; 27. 491.31 Å

图 1 Ar 谱线强度随电感值 ($L_{\text{外回路}}$) 的变化情况

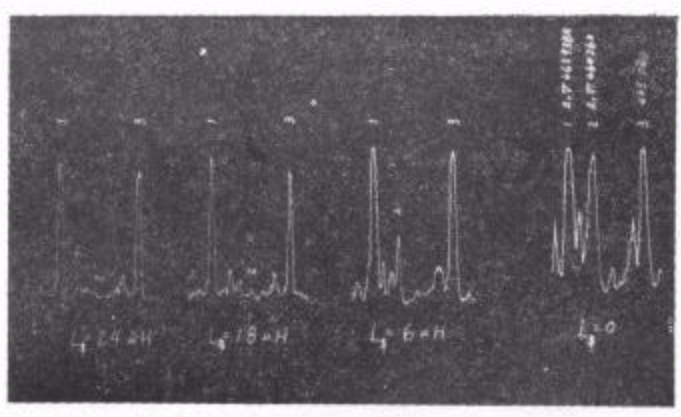


图3 465.00 Å 谱线强度随电感值 ($L_{\#}$) 变化的情况

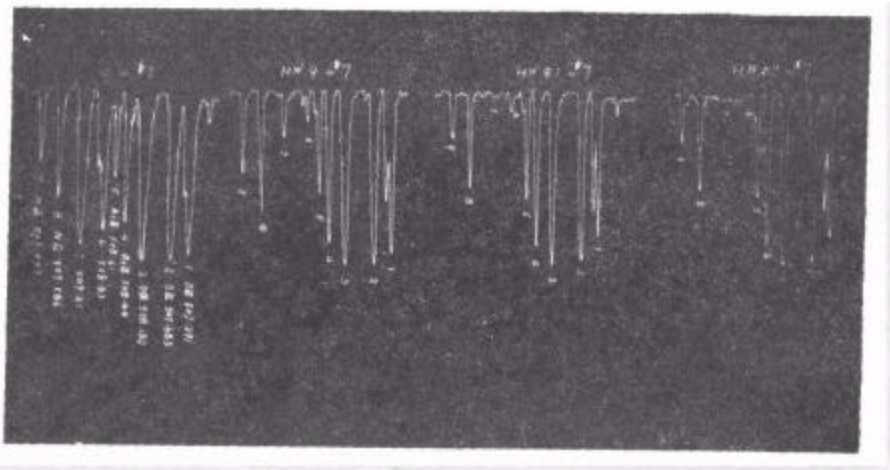


图4 508.83 Å, 509.21 Å 谱线强度随电感值 ($L_{\#}$) 变化的情况