

GaAs-Al_xGa_{1-x}As n-N 异质结的光伏特性

虞 丽 生 王 存 达

(北京大学物理系)

1981年9月10日收到

提 要

测量了液相外延生长的 GaAs-Al_xGa_{1-x}As n-N 异质结 300K 和 77K 下的光伏响应的光谱分布, 证明异质结界面上存在着较多的界面能级。能带形状在界面上有两个背对背的势垒。在禁带中离 Al_xGa_{1-x}As 导带边 0.7—0.8eV 处有一个类受主界面能级。在某些特定条件下, 这种 n-N 异质结在光照和温度作用下可具有多态变化。它和界面态上电子的捕获和释放有关。

一、引言

早在六十年代初期, 异质结的某些特点已吸引了人们的注意^[1]。但由于异质结界面上存在着大量的缺陷, 载流子将在界面上复合掉, 使注入和放大功能不能实现。虽然对异质结的能带, 电学和光学特性有过不少的研究^[2,3], 却一直未能得到较理想的器件。直到六十年代末期选择了 GaAs-Al_xGa_{1-x}As 两种晶格常数十分相近的材料做异质结, 改进和完善了生长工艺, 做成了异质结激光器, 目前已正式使用于光导纤维通讯系统之中。这一成功使异质结的研究又重新被重视起来。激光器是一种大电流器件, 虽然在大电流下界面缺陷的影响被掩盖住了。但它对激光器的寿命, 瞬态特性等仍然是有作用的。近十年来, 一方面对异质结界面缺陷的形成和性质进行了探讨, 另一方面对异质结界面上能带的形状, 突变及渐变异质结及界面能级等对器件性能的影响也做了不少的研究^[4,5]。这些研究工作为深入了解异质结的物理特性, 进一步研究异质结晶体管, 开关器件等其他种类的异质结器件提供基础。n-N 异质结在结构上单纯, 更便于做物理研究。有人曾对 GaAs-Al_xGa_{1-x}As n-N 异质结的整流特性进行了测量, 得到了完全相反的结论^[6,7]。而对 GaAs-Al_xGa_{1-x}As n-N 异质结界面上的能带弯曲和界面缺陷的情况并没有做过直接的测量和报道。我们测量了液相外延生长的 GaAs-Al_xGa_{1-x}As n-N 异质结在室温和 77K 下的光伏响应的光谱分布(光伏谱)以求得到有关 n-N 异质结界面势垒和界面电子态的信息。为了从不同的实验角度进行验证, 还同时做了扫描电镜电子束感生电流(EBIC)测量, C-V 特性和 I-V 特性的测量。

二、实验方法

1. 样品 我们用了两种类型的液相外延片做成 n-N 异质结样品, 其各层厚度和掺杂情况如图 1 所示。其中 S 类型和激光器外延片的 n-N 异质结相同。样品切成面积约

为 $1 \times 1\text{mm}^2$ 的小片焊在铜管座上。样品两边均用 Au-Ge-Ni 合金做欧姆接触。扫描电镜 EBIC 测量表明接触处没有任何势垒，证明它是欧姆接触。光照方式分为正面入射和侧面入射两种。样品架的设计允许对同一块样品既可做正面入射，又可做侧面入射以便于对照。为了避免光照电极引进的误差，电极上曾涂黑色真空漆。

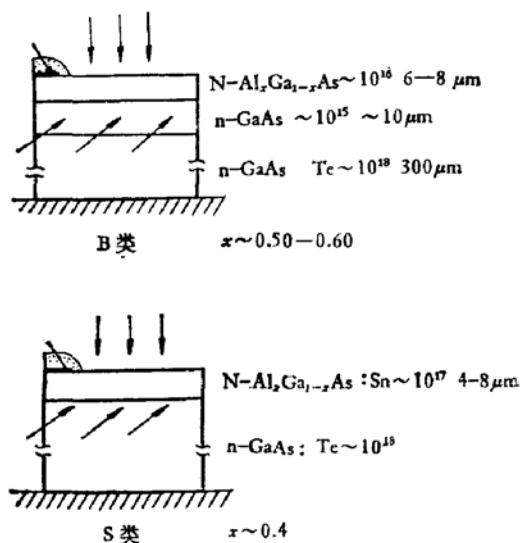


图 1 样品结构和光照方式

B 类样品：三层结构，n-N 两侧均未掺杂 $x \sim 0.50-0.60$

S 类样品：二层结构，n-N 两侧均为高掺杂 $x \sim 0.40$

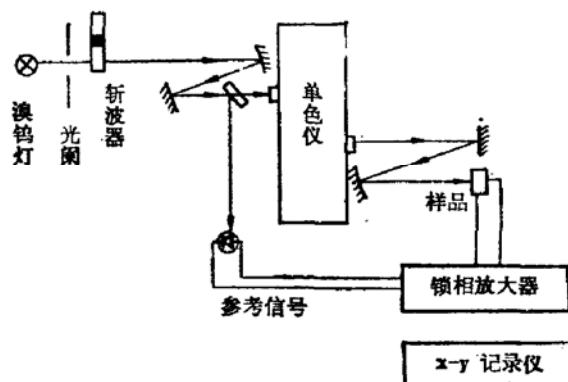


图 2 光伏响应测量装置原理图

2. 测量装置 图 2 为我们所使用的测量系统。用溴钨灯做光源，经过 VL-2 双单色仪(分辨率为 1\AA)分光后照射到样品上。入射光的光谱分布是经过校准的。光伏信号经过锁相放大器送入记录仪。锁相放大器的灵敏度在 $1\mu\text{V}$ 以下。调制频率为 117 周/秒。由锁相系统能读出信号的位相差。

3. 测量原理 突变的 n-N 异质结的能带图理论上分为两种情况^[2]：当界面上没有电荷或者电荷数量很少时，能带如图 3(a) 所示，宽带材料一边为耗尽层，窄带材料一边为积累层。在宽带材料中产生的光生电子-空穴对只要能扩散到势垒区就被自建电场分开而在外电路中产生电流。光电流显然反映光生载流子的产生过程，即电子的跃迁过程。在窄带材料中产生的光生电子聚集在界面附近，可以通过电子热运动和隧道途径进入宽带势垒区，同样对光电流产生贡献。这时的 n-N 异质结等效于一个二极管。当界面上存在着较大量的负电荷时，能带图如 3(b) 所示。在宽带中和窄带中产生的光生载流子将被

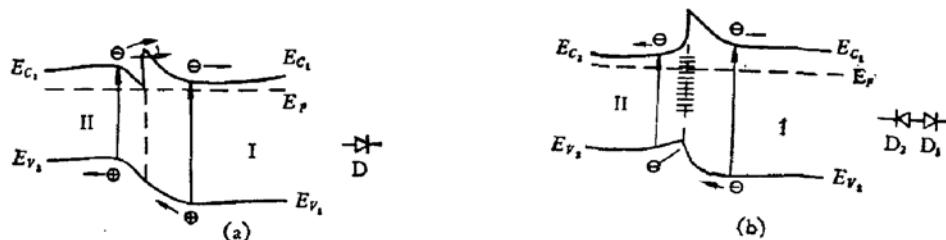


图 3 突变 n-N 异质结能带图

(a) 界面没有电子态 (b) 界面有较多带负电荷的电子态

各自的自建场扫向相反的方向,因而产生方向不同的光电流。这时的n-N异质结类似于两个背靠背的二极管的串联。

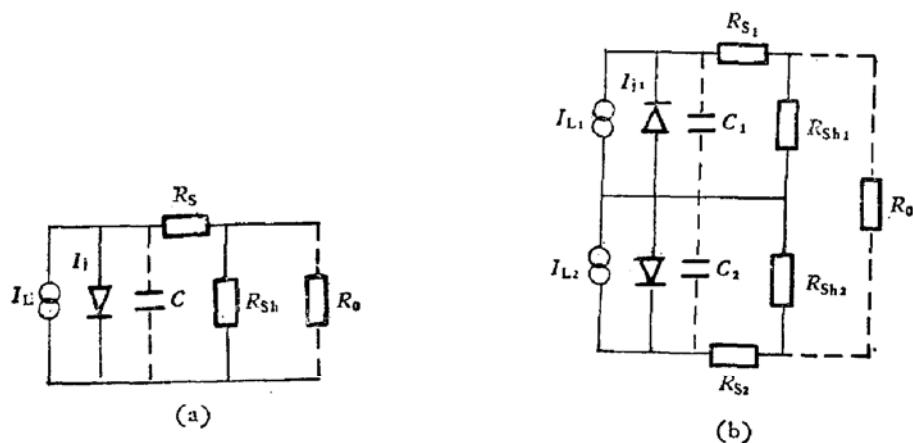


图4 突变n-N异质结的等效线路
(a) 界面没有电子态 (b) 界面有较多的带负电荷的电子态

相当于上述两种情况的等效线路分别画在图4(a)和4(b)上。 I_L 为光生电流, R_s 为二极管的串联电阻,一般较小, R_{sh} 是二极管的漏电阻,一般很大。 R_o 为锁相放大器的输入阻抗 $10M\Omega$ 。先分析图4(a)的情况:

$$I = I_j - I_L = I_0 [\exp(qV_j/nkT) - 1] - I_L, \quad (1)$$

其中 I_j 和 V_j 为理想二极管的结电流和结电压。可以把 R_{sh} 和 R_o 看做一个等效负载电阻 R 。一般情况下 $R_s \ll R_o, R_{sh}$ 。我们所测得的光代信号电压为

$$V = -IR, \quad (2)$$

当 $R = 0$ 时,短路光电流为 $I_{sc} = -I_L$ 。当 $R = \infty$ 时,开路光电压为

$$V_o = \frac{nKT}{q} \ln(1 + I_L/I_0).$$

如果 R 为有限值时,只要 $V \ll \frac{nKT}{q}$ 从(1)和(2)可得

$$V = I_L / \left[\frac{qI_0}{nkT} + \frac{1}{R} \right] = R'I_L. \quad (3)$$

由此可见,在小信号情况下所测得的光电压是正比于光生电流的,因而也反映了电子在光照作用下的跃迁情况。图4(b)的分析和4(a)相似,在小信号下得: $V = R'_1 I_{L1} + R'_2 I_{L2}$ 。

交流情况下只需要再考虑结电容的影响,在小信号下也得到光伏电压和光电流呈线性关系。对上述各种情况我们在实验上都测量了光电压和短路光电流的关系,证明在信号小于20—30mV时均可得到线性关系。我们的实验在此范围内进行。

在测量中为排除Al_xGa_{1-x}As表面势垒可能产生的影响,曾做了表面吸附水汽的实验,没有发现测量结果有任何变化。还对同一个样品做了正面入射和侧面入射的光伏谱的对比,测量曲线的形状也没有原则性的区别。电极涂黑与否也没有影响。这些都说明光响应的信号是来自n-N异质结。

三、测量结果

1. 稳态情况

(a) 光伏响应 图 5(a) 和 5(b) 为 B-1-10[#] 和 B-2-24[#] 样品在 77K 下的光伏谱

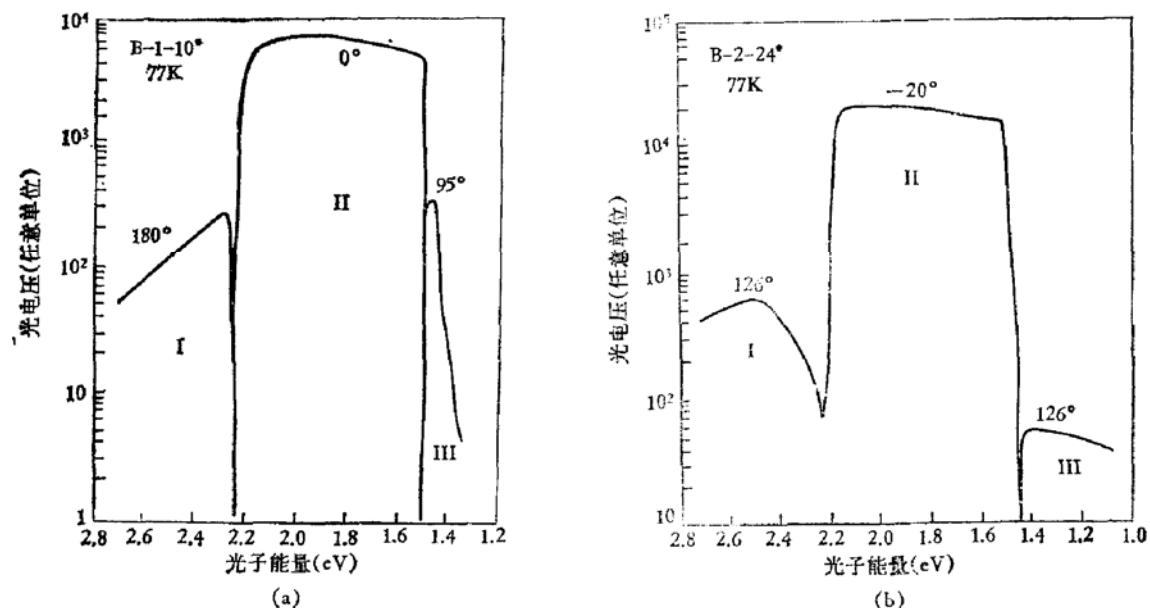


图 5

- (a) 77K 下 B-1-10[#] 样品的光伏谱
 (b) 77K 下 B-2-24[#] 样品的光伏谱

(分辨率为 20meV). 可以看出, 光伏响应分成三个区域: I 区能量大约在 2.25eV 以上,

这相当于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ $x \sim 0.55$ 的带间吸收; II 区能量范围是 1.51—2.25eV, 相当于被 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层透过而被 GaAs 层吸收的光子能量. 而 III 区相当于 GaAs 禁带宽度以下的吸收. I 区和 II 区信号的符号基本上相反的, 即位相差* 为 180°, III 区的位相与 I 区相同或略有不同. B-1-10[#] 在室温下的光伏响应如图 10(a) 中曲线 A 所示, 也可以看到三个区域, 但 77K 下的信号要比室温下大几个量级. 而 B-2-24[#] 室温下的响应如图 6 所示, 三个区域变成了一个区且位相相同. II 区的响应盖过了 I 区和 III 区, 室温和 77K 信号大小差不多. S-1-21[#] 样品在室温下也看到了和 B-2-24[#] 相似的结果, 但由于掺杂较高使锁相放大器检测系统的输入阻抗减小, 所以信号要小得多, 低温

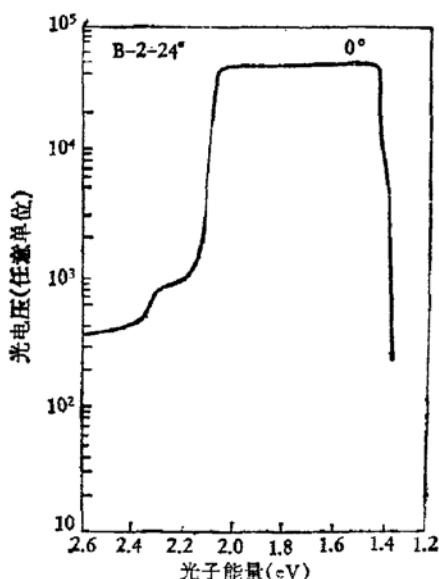


图 6 室温下 B-2-24[#] 的光伏谱

* 我们把 AlGaAs 一侧作为正, 位相与光子流密度相同的光电压信号规定为 0° 位相.

下也看到了 I 区和 II 区的变号。

(b) 高频 C-V 特性 根据图 4(b) 等效线路的分析^[8], 对于双耗尽层结构的二极管在高频 C-V 特性上应能看到一个极大值。我们用 MODEL 410 型 C-V 测绘仪 (1MC) 测量了室温下的 B-1-12# 和 B-2-24# 的高频 C-V 曲线, 分别画于图 7(a) 和 7(b) 上。

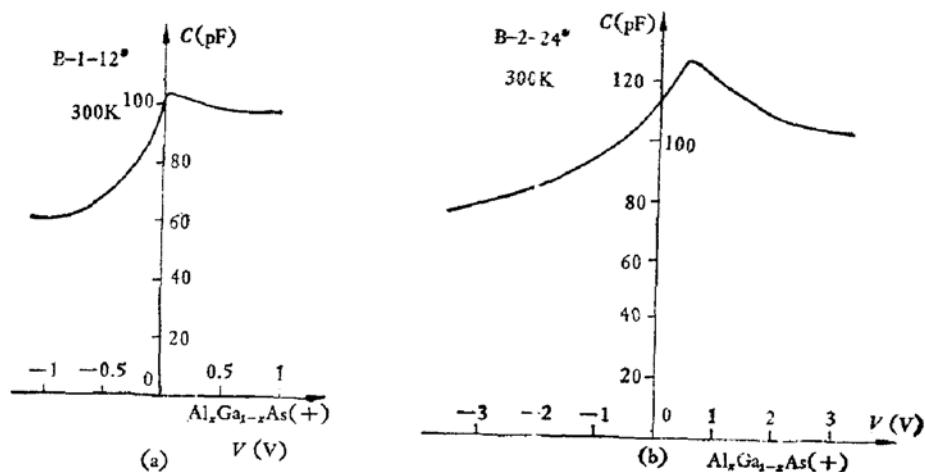


图 7

(a) B-1-12# 室温高频 C-V 特性
(b) B-2-24# 室温高频 C-V 特性

(c) $I-V$ 特性 我们利用[9]所述的装置测量了小电流伏安特性, 大部份样品情况都比较类似, 现将较典型的 B-2-26# 300K 下的 $I-V$ 曲线画于图 8。

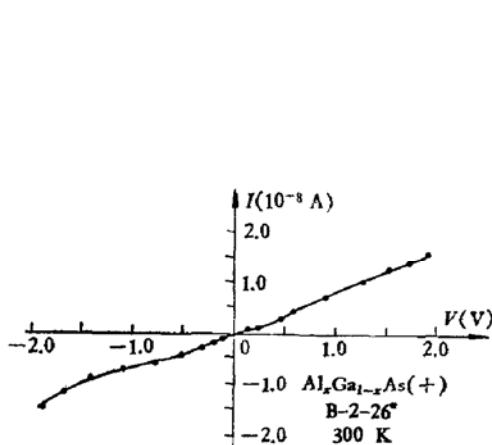
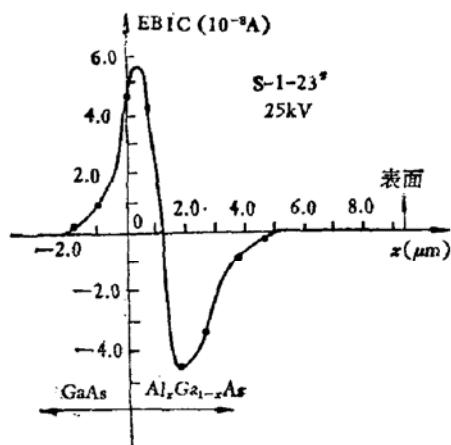
图 8 B-2-26# 室温下的 $I-V$ 特性

图 9 电子束感生电流和镜面位置的关系 (S-1-23#)

(d) EBIC 测量 为了更直观地检验 n-N 异质结是否具有双耗尽层结构, 用扫描电镜测量了一些 B 类和 S 类样品的电子束感生电流。对于大部份的被测样品, 当电子束位置移动经过界面附近时都看到了变号, 现将其中典型的 S-1-23# 的 EBIC 和镜面位置的关系画于图 9 上, 可以看到电流符号的变化, 但变号的位置稍偏离界面。

2. 多态变化 某些由 B 类外延片所做的样品具有多态变化。其光伏响应的变化如图 10(a) 和 (b) 所示。A 是室温时, B 是降至 77K 时的光伏响应曲线。然后, 在相当于 II 区能量的光子照射下 B 突变为 C, 再升到室温后则变为 D。经过一段时间后成为三个区域

的响应, 和 A 形状类似, 但比 A 信号强, 再经过更长时间的恢复可变回到 A。恢复的时间是和温度有关的, 由几十分钟到数小时不等。多态过程的变化往往是在光伏谱的测量过程中突然发生的, 似乎和光照的强度, 时间和温度有一定的关系。B-2-26# 等样品也有类似的多态变化, 但变化的过程比较缓慢。从图 1 可以看到, 曲线的形状实际上分为两种类型: 一种是 II 区信号和 I 区, III 区符号基本相反。另一种是符号基本相同, 在低温变态时 III 区的峰值位置和强度基本不变。

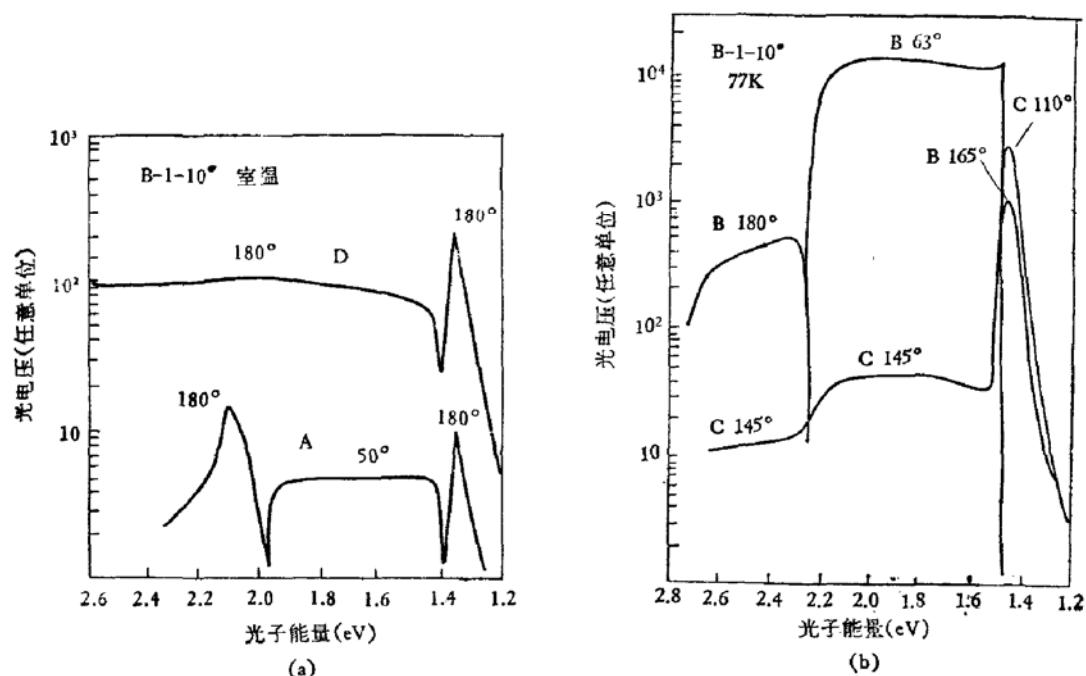


图 10 光伏响应的多态变化 (B-1-10# 样品)

与此相适应, 我们测量了 B-1-12# 样品的高频 C-V 特性的变化, 如图 11 所示。还观察了 B-1-12# 的室温 I-V 特性的开关效应, 如图 12 所示。

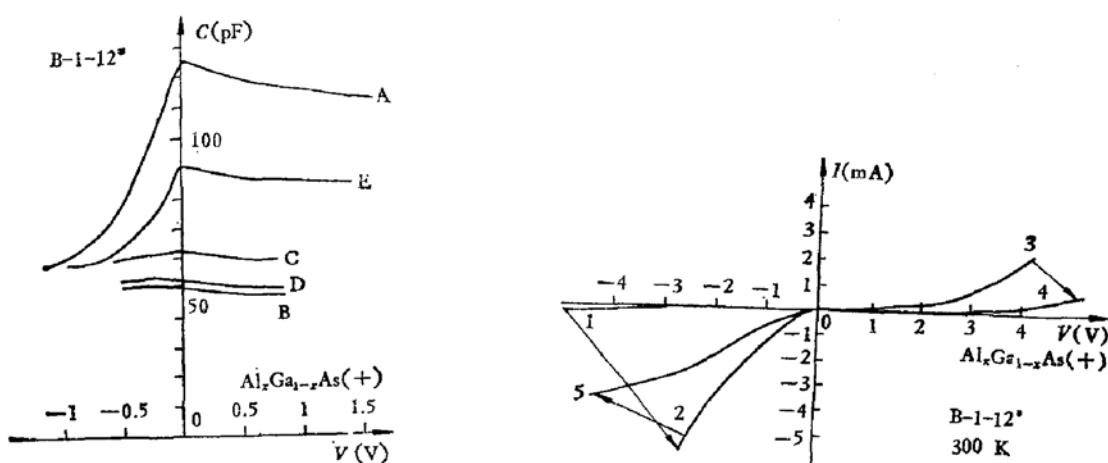


图 11 高频 C-V 特性随温度和光照的变化(B-1-12#)

A: 301K 黑暗 B: 77K 黑暗 C: 77K 光照
D: 77K 光照后恢复黑暗 E: 由 77K 恢复到室温半小时后

图 12 室温 I-V 特性的多态变化(B-1-12#)

1, 2, 3, 4 为变态的顺序, 有时会有中间态 5 出现

四、讨 论

1. 根据图 5 所示光伏谱的形状, 可以认为在我们所测量的 n-N 异质结界面两侧均存在着势垒, 它们的电场方向是相反的。这种能带的形状正说明了在 n-N 异质结界面处存在着较大量的界面能级, 其中相当一部份被负电荷所填充。由 EBIC 的测量也可明确看到界面两侧的电场方向相反。这从另一个实验角度证实了 n-N 异质结确实具有双耗尽层式的能带图。高频 C-V 特性也证明了这一结论。从 I-V 特性上也可以看出正反向基本上是对称的类似于双饱和并带有软击穿的情况。

2. 对于 B-1-10# 和 B-1-12# 等样品, III 区的峰值说明了界面上在禁带中有一个分立的能级。由于它的位相和 I 区基本相同, 所以它对应的是界面能级和 AlGaAs 能带之间的跃迁。由于界面上呈双耗尽层结构, 电子占据这些能级后将使它带负电, 所以认为是类受主能级。由 C-V 特性知道, 由室温降至 77K 时界面上势垒高度增加, 这意味着温度降低时费米能级上升, 使界面态上的电子填充数增加而导致负电荷的增加。说明这一能级应在禁带的上半部, 在界面上的平衡费米能级附近, 离 AlGaAs 导带底约 0.8eV 左右。这一能级起着界面电子陷阱的作用。对于 B-2-24# 和 B-2-26# 样品, 低温 III 区比较平坦, 界面能级分布在一个能量较宽的范围之内。但是室温光伏谱在 1.4eV 附近有一个拐点, 它可能对应着对 II 区信号掩盖着的 III 区的一个峰, 性质与 B-1-10# 等样品相似, 位置在导带下约 0.73eV 左右。它们相应的能带示意图画在图 13 上。

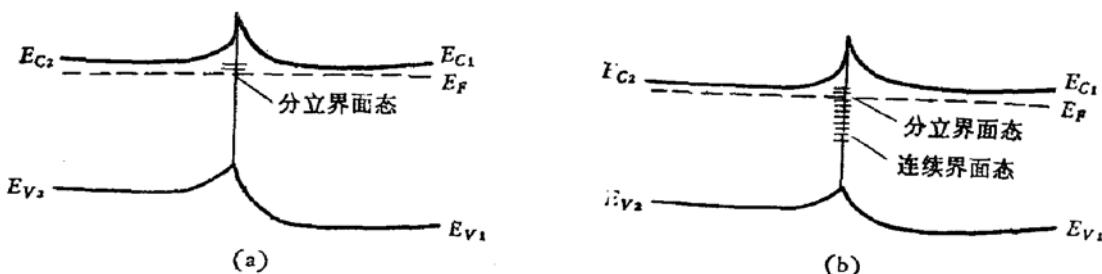


图 13 具有分立的和连续的界面电子态的能带图

3. 通过界面能级的具体跃迁过程可能比较复杂, 根据我们目前的实验尚不能明确解释。光伏谱中的位相差别正说明在这些跃迁过程中有着时间的迟豫, 光生载流子的输运也会产生位相的差别, 对瞬态特性作仔细的研究将有助于弄清这一过程。

4. 对于 B-1-10#, B-1-12# 等样品的多态变化只是初步看到了现象, 只能在上述模型的基础上粗糙地解释如下: 室温时费米能级在界面能级之下, 当温度降至 77K 时费米能级上升, 界面能级上电子数增加, 势垒高度和宽度也增加, 信号加强(但信号加强的原因还有饱和电流下降, 漏电阻增加, 使光伏探测灵敏度增加)。在 II 区光子能量的光照射下, GaAs 中产生的空穴聚集在界面附近, 当聚集到一定数量时会促使界面态上的电子复合而使势垒下降, 从而使 II 区的光伏响应符号变化, 而且信号也变小。回升到室温后界面态上的电子不能马上恢复到室温时的平衡状态, 故光伏谱还保持低温时的形状。界面态上电子的捕获和释放与温度和光照有关, 并且还可能存在着界面态和体内的交换, 所以要经过

较长时间的恢复才能回到原始状态,这一过程是比较复杂的,仅用上述简单模型并不能解释多态过程的细节,可能还需要假设其他陷阱能级的存在,需要做进一步的研究才能对它的机制做出解释。 $C-V$ 特性的变化和上述解释是一致的,温度下降,势垒增高而使电容变小,而光照使势垒高度降低,因而电容有所增加。伏安特性的开关效应也说明了在强电场作用下界面能级上电子的占有情况改变,从而导致了势垒的变化,这和 GaAs-Al_xGa_{1-x}As p-N 异质结的情况相类似^[10,11]。

5. 我们没有特别研究这些界面能级的成因。在已往的报道中都认为 GaAs-AlGaAs 异质结的晶格匹配十分完美,几乎不存在界面能级。但由于我们选择的 Al_xGa_{1-x}As 的 Al 浓度较高, x 约为 0.50—0.60, 异质结的晶格失配较大, 在生长过程中由于工艺上的原因还可能出现界面上的 As 空位缺陷、沾污, 及其他络合物等。这些都会产生一定数量的界面能级。但这些能级密度并不是特别大, 不能像报道的 Ge-Si 等异质结那样看做界面复合速度为 ∞ 的金属半导体接触。我们的界面能级是一些具有有限复合速度和有限密度的界面陷阱。这也许正是 GaAs-AlGaAs 异质结界面能具有 Ge-Si 等晶格失配较大的异质结中所没有看到的多态效应。

五、结 束 语

我们测量了室温和 77K 下的 GaAs-Al_xGa_{1-x}As n-N 异质结的光伏谱, 证明它的能带图具有双耗尽层的形状, 界面上有较多的界面能级, 在禁带中离 AlGaAs 导带边 0.7—0.8 eV 处有一个类受主型的界面陷阱存在, 在某些特定的条件下这种 n-N 异质结在光照和温度的作用下可具有多态变化, 它和界面态上的电子的捕获和释放有关, 要弄清它的机制尚需做进一步的工作。

感谢杜宝勋和陈高庭同志提供部份测试样品。感谢李静然, 孙富荣, 陈淑华, 林福高, 毛晋昌及北大半导体激光组刘弘度等同志的热情帮助。

参 考 文 献

- [1] R. L. Anderson, *Solid-State Electronics*, **5**, 341(1962).
- [2] B. L. Sharma and R. K. Purohit, *Semiconductor Heterojunctions*, Oxford, Pergamon, (1974)
- [3] A. G. Milnes and D. L. Feucht, "Heterojunction and Metal-Semiconductor Junction," (1972).
- [4] D. T. Cheung, S. Y. Chiang and G. L. Pearson, *Solid-State Electronics*, **18**, 263(1975).
- [5] J. F. Womac and R. H. Rediker, *J. Appl. Phys.*, **43**, 4129(1972).
- [6] A. Chandra and L. Eastman, *Solid-State Electronics*, **23**, 599(1980).
- [7] C. M. Garner et al., *J. Vac. Sci. Tech.*, **15**, 1480(1978).
- [8] C. Van Opdorp, Philips Res. Repts. Suppl. No. 10(1969).
- [9] 虞丽生, 激光, **7**, 9 (1980).
- [10] H. J. Hovel and J. J. Orgell, *J. Appl. Phys.*, **42**, 5076(1971).
- [11] 林世鸣、王启明等, 半导体学报, **3**, 175 (1982)。

Photovoltaic Response of GaAs-Al_xGa_{1-x}As n-N Heterojunction

Yu Lisheng and Wang Cunda

(Department of Physics, Peking University)

Abstract

The Photovoltaic response of LPE GaAs-Al_xGa_{1-x}As n-N Heterojunction has been measured at 300 K and 77 K. It is shown that many interface energy states exist at the heterojunction interface. The energy diagram at the interface has two back-to-back potential barriers. There is an acceptor-like interface state in the forbidden energy gap of Al_xGa_{1-x}As at about 0.7—0.8 eV below the edge of the conduction band. In certain circumstances the barrier of the n-N heterojunction can be changed from one type to another under the action of illumination and change of temperature. This effect is related to the capture and release of electrons at the interface states.