

GaAs-AlGaAs 异质结界面及开关现象的研究

林世鸣 王启明 杜宝勋 石忠诚 高季林

(中国科学院半导体研究所)

1981年5月14日收到

提 要

在 GaAs-AlGaAs DH 异质结上观察到了开关记忆现象, 其高阻态表现为正常的 p-n 二极管的伏安特性, 其低阻态表现为线性的欧姆特性, 在两个状态具有记忆功能。我们提出了由于在界面处存在有界面态因而引起上述效应的模型: 在反偏下由于界面的碰撞电离造成向低阻态的翻转, 在正偏下由于电子重新填充界面态而达到高阻态的恢复。在单层生长的 p-n 异质结进行了 DLTS 测量, 小电流正向 $I-V$ 特性测量以及反向击穿电压等测量, 实验结果支持了上述模型。由于上述开关记忆效应是在 GaAs 衬底上作成的, 它又具有光电子学的特点(低阻态不发光, 高阻态可伴随有光信息输出), 因而可望有可能利用来设计具有新的功能的光电子器件。

一、引言

Calow^[1]、Hovel^[2] 等首先在 1968 年观察并研究了 ZnSe-Ge 异质结的开关现象, 此后在 ZnSe-GaAs、GaP-Ge、GaP-Si、AlN-Si 等异质结上观察到了这种开关作用, 并对硫系化合物提出了相变的机理, 对晶体提出了电场、碰撞电离的机理。

为了提高发光效率, 在光电子学领域中一向倾向于匹配型的异质结, GaAs-AlGaAs 异质结正是为此目的而引入该领域中的, 对它的广泛研究和应用也都是建立在使之匹配的基础上的。但是若能在此材料上有效地生长具有预想界面态的异质结, 从而可以应用界面态的效应, 使器件具有复合的功能, 则无疑将使光电器件具有更广阔的应用前景。

我们曾在 GaAs-AlGaAs DH 激光器上观察到了开关现象, 其伏安特性如图 1 所示。图中的(I)和(IV)是高阻态, 它表现为正常的 p-n 二极管的伏安特性, (II)与(III)是低阻态, 它表现为线性的欧姆特性。其转换过程如下: 设偏置电压由“零”点开始, 向反向加大, 异质结表现为高阻态(I)、偏压加至转折电压 V_c , 它跃变为低

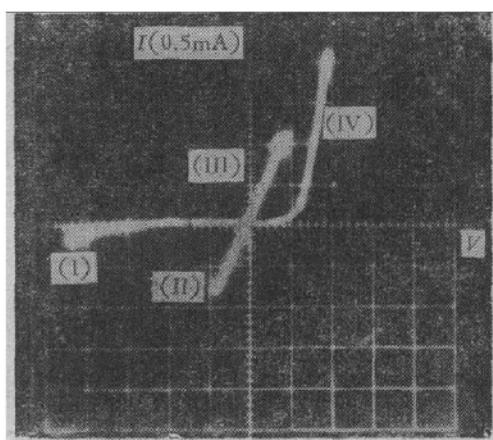


图 1 GaAs-AlGaAs DH 激光器的开关现象

阻态(II);这时若减少反偏压,电流沿(II)减小直到零点;当接着加正向偏压时,电流将沿(III)增加,直到了转折电流 I_c ,它又跃变恢复为高阻态(IV). 值得指出的是:在正向高阻态(IV) p-n 结有光发射,而在低阻态(III)则没有光发射.

众所周知,双异质结激光器是由四层结构,三个异质结(分别为 n-N, N-p, p-P 异质结)串联组成的,因而为了排除多结存在而带来的复杂性,进一步研究开关现象的成因,我们生长了单个的 p-n 异质结,对其开关现象进行了观测和研究,并提出了它的开关机理.

二、n-p 结开关、记忆现象的测量

对于不同 x 值、不同掺杂的各种 n-p 异质结宽接触样片作室温直流测试,观察到对于 n 型 (Te) GaAs 衬片 ($n = 2 \sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 上生长的 p 型 (Ge) Al_xGa_{1-x}As 层 ($n \approx 2 \sim 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $x \approx 0.5$) 所得的单个异质结同样有前述的开关记忆现象,测得其高阻态约为 $10^5 \Omega$ 量级,其低阻态约为 $10^3 \Omega$ 量级. 该测试结果证实了 DH 异质结中观察到的开关现象确系产生在 n-p 异质结上.

由室温降到 -100°C 的低温,对上述样管的开关现象作同样的观测,发现该开关效应不受降温的影响,因而证实上述的开关效应不是热效应,而应是电的效应,即可能是碰撞电离或隧道的机构引起的击穿.

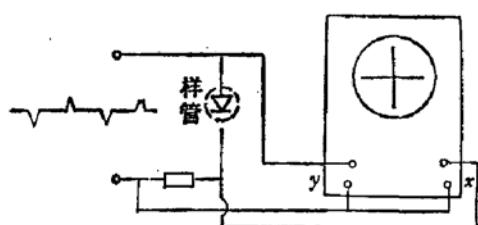


图 2 脉冲测试原理图

为了观测该开关效应的快速连续工作状态,我们依照前述高阻态、低阻态的翻转过程,制作一个专门的脉冲测试电路,以脉冲宽度为 1ms ,占空比为 $1:8$ 的相间的正负脉冲加于样管上(如图 2 所示),我们观测到了开关的连续工作状态. 由于脉冲工作状态下发热远小于直流工作状态,因此这个实验进一步证实了该开关现象不是热的效应,而是电的效应的结论.

三、小电流正向 $I-V$ 特性和反向击穿特性的测量

伏安特性是 p-n 结的基本性质之一,它反映了载流子通过结的输运过程. 通过在不同的电流范围,对伏安特性与温度的不同关系的分析,可以得到有关 p-n 异质结能带结构,界面匹配等情况的一些有意义的认识^[3].

对上述样管进行的小电流变温正向 $I-V$ 特性的测量结果以 $(\ln I)-V$ 为座标作图,如图 3 所示. 其 $I-V$ 特性明显地分为三个部分. 用公式表示为:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = I_{s1} \exp(AV) + I_{s2} \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) + \frac{(V - V_0)}{R_s} \mathcal{U}(V - V_0).$$

式中 I_1 、 I_2 、 I_3 分别为隧道电流、复合电流和体电流. R_s 为体串联电阻, $\mathcal{U}(V - V_0)$ 为单位阶梯函数. 由实验结果计算得: $n=1.92$, $A=10.0$, $V_0=1.45\text{V}$.

由上述结果得知该样管在小电流时以隧道电流和复合电流这两种输运机理为主导,反映了界面处存在有大量的界面态. 只是由于影响异质结输运过程的因素较多,因而还

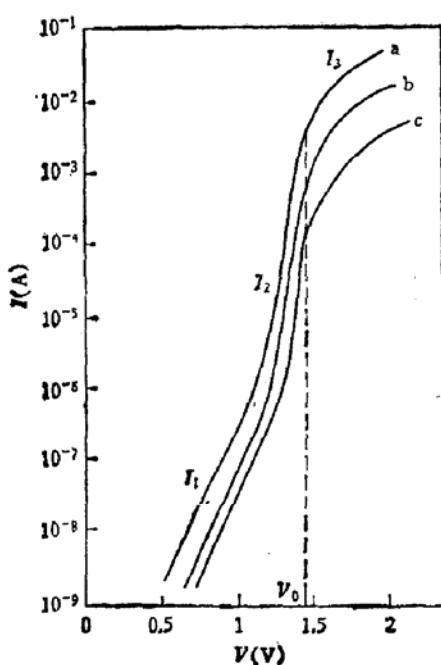


图3 p-n异质结变温正向 $I-V$ 特性测试
a-295K b-261K c-233K

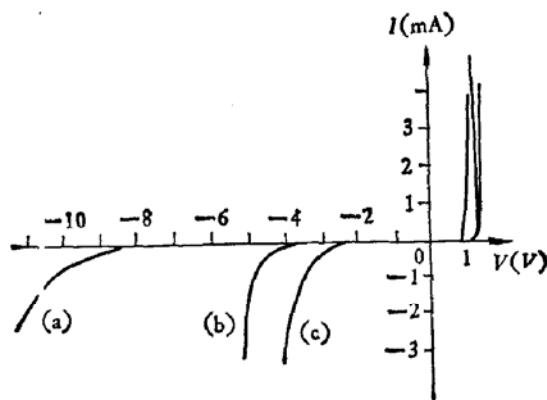


图4 p-n异质结反向击穿电压测试
(a) $x = 0.22$ $V_B = 10V$
(b) $x = 0.54$ $V_B = 5V$
(c) $x = 0.76$ $V_B = 3V$

不能仅由上述的测量结果定量地估计界面态的数量和分布^[4]。

对 p-n 异质结的反向击穿电压的观测结果如图 4 所示, 由图可见反向击穿电压随着 x 值的增加是减少的, 这与突变结体击穿理论是相矛盾的, 而与面击穿的理论是一致的。因为根据突变结体击穿电压经验表达式 $V_B = 60(E_g/1.1)^{3/2}(N_B/10^{16})^{-1/4}$ ^[5] 可知, 在掺杂值不变情况下, 随着 x 值增加, 即 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的禁带宽度 E_g 增加, 应得 V_B 增大的结论。

而根据面击穿理论^[6], 界面碰撞电离几率为:

$$P_r = \left(\frac{m_{e_1}^*}{m_{e_2}^*} \right)^3 K_{e_0}^{\perp} \left(\frac{\hbar^2 K_{e_0}^{\perp}}{2m_{e_1}^*} + E_{e_1} - E_{e_2} - E_{g_2} \right)^{5/2} \left[\frac{\text{A}}{(\text{eV})^{5/2}} \right]$$

因而随着界面处导带跃变 ($E_{e_1} - E_{e_2}$) 增大其界面碰撞电离的几率也越大, 这可以解释上述的实验结果。这证明在一定的条件下, 异质结的界面具有较大的碰撞电离几率, 这时界面处的深中心也将有足够的碰撞电离的几率。当界面深中心密度足够大时, 它的带电状态的改变将引起能带弯曲的加剧, 从而对载流子的输运过程产生很大的影响。

四、DLTS (深能级电容谱) 测量

对上述样管进行的 DLTS 测试的结果如图 5 所示, 这是 n^+p 样片, 少子谱中有两个电子阱能级 E_1 和 E_2 , 其中特别是 E_2 能级位于导带下约 0.34 eV 处, 电子俘获截面约 $1.3 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$, 其密度达到了 $2.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 与外延层掺杂浓度 $2 \sim 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 相近, 因而它的带电状态改变时会对 p-n 结的特性产生很大的影响。

利用改变偏置来测量深中心密度随空间分布, 如图 6 所示。十分明显 E_2 实际上是由 E_{2a} 和 E_{2b} 叠加组成的, 在高偏置下(见图中①) E_{2b} 信号强于 E_{2a} , 后者被掩盖了, 随着偏

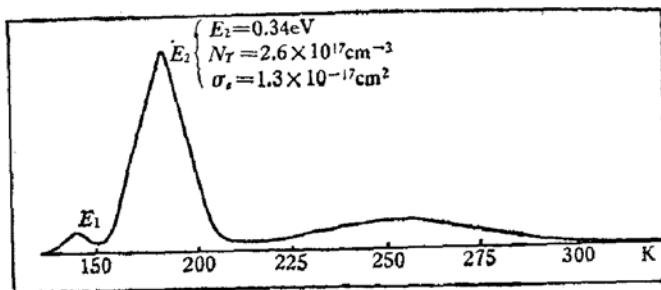


图 5 n^+p 结、少子谱
 $V_{\text{偏}} = -2 \text{ V}$, $V_{\text{反}} = 8 \text{ V}$, $W_p = 200 \mu\text{s}$, $T_p = 10 \text{ ms}$, $C_0 = 15 \text{ pF}$

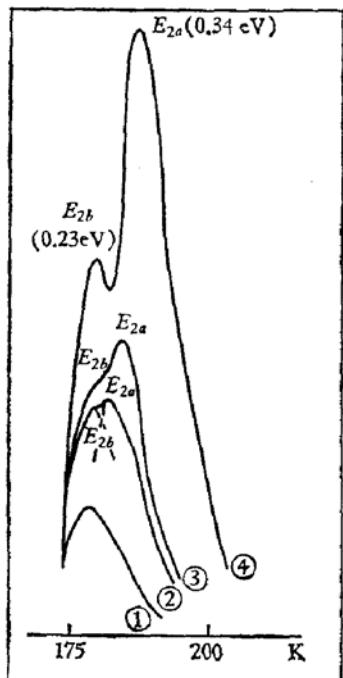


图 6(a) n^+p 结、少子谱
 $W_p = 200 \mu\text{s}$, $T_p = 50 \text{ ms}$, $C_0 = 20 - 30 \text{ pF}$
① $\begin{cases} V_{\text{偏}} = -3 \text{ V} \\ V_{\text{反}} = 11 \text{ V} \end{cases}$ ③ $\begin{cases} V_{\text{偏}} = -0.8 \text{ V} \\ V_{\text{反}} = 9.8 \text{ V} \end{cases}$
② $\begin{cases} V_{\text{偏}} = -1 \text{ V} \\ V_{\text{反}} = 9 \text{ V} \end{cases}$ ④ $\begin{cases} V_{\text{偏}} = 0 \text{ V} \\ V_{\text{反}} = 8 \text{ V} \end{cases}$

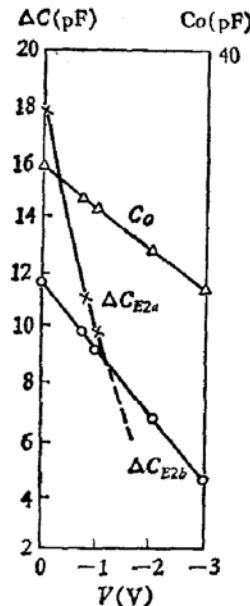


图 6(b)

置减小, E_{2b} 变化很小, E_{2a} 信号却迅速增长以至远远超过了 E_{2b} 信号, 这说明能级 E_{2a} 和 E_{2b} 具有极不相同的空间分布。

为了进一步判明它们各自的空间分布特点, 在图 6(b)中示出 $\Delta C-V$ 与 C_0-V 的关系。由图可见能级 E_{2b} 的 $\Delta C_{E_{2b}}$ 随偏置的变化与 C_0 的变化基本一致, 由 $\Delta C = \frac{C_0}{2} \cdot \frac{n_T}{N_D - N_A}$ 的公式可见, 它说明 n_T 基本是一常数, 即该深中心在空间中是均匀分布的。而能级 E_{2a} 的 $\Delta C_{E_{2a}}$ 随偏置减少而迅速增加, 这实际上反映了能级 E_{2a} 在界面处的密度远大于体内的密度, 可以认为它是位于界面附近的深中心。

五、异质结开关机理

根据上述的各种实验结果, 我们提出一个 GaAs-AlGaAs 异质结开关现象的界面模型。

初始情况下, 界面态大部分为电子所填充, 平衡时界面费米能级是比较接近禁带中部的, 其能带图如图 7(a) 所示。

正向高阻态相应通常的激发载流子通过界面后扩散运输过程如图 7(b) 所示, 这是一个伴随有复合发光的过程。

加反偏压时, 一般由于反向漏电流小呈现为反向的高阻态。在界面态较多的情况下, 当反偏电压达到转折电压 V_c (低于带-带体击穿电压), 载流子与界面深中心碰撞引起深中心的电离, 因而界面处的费米能级下降到接近价带处, 或者说由于界面深中心带电状态的改变加剧了能带的弯曲, 如图 7(c) 和 (d) 所示, 载流子很容易隧穿过结, 因而表现为低阻态的 (II) 和 (III)。在“零”偏和正向偏置下, 当通过界面注入的电子仍未能足以填满这些界面态时, 异质结保持在低阻态, 这就是它的记忆功能。只有随着正向电流增加到某一数值时, 界面深中心将获得电荷而恢复到原来的带电状态, 这时结才恢复为正常的正向特性。

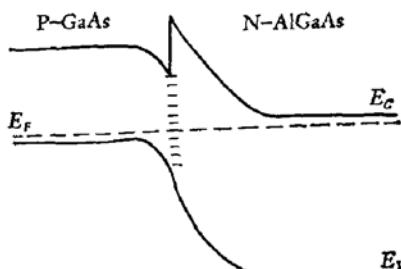


图 7(a)

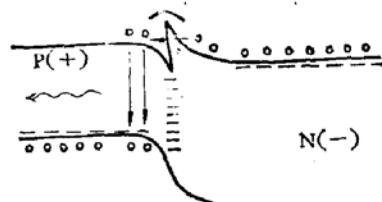


图 7(b)

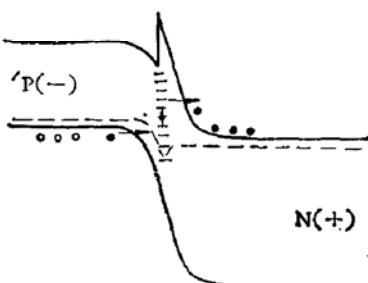


图 7(c)

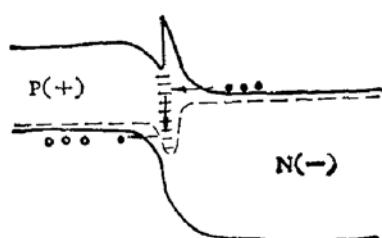


图 7(d)

六、界面深中心起源的估计

由 DLTS 法测得界面深中心密度达到 $2.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 而根据 nGaAs-pGa_{0.5}Al_{0.5}As 异质结能带图的计算, 取耗尽层的厚度 $d \approx 0.09 \mu\text{m}$, 折算可得它相当于面密度约为 $2.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 。

而由两种具有不同晶格常数的半导体材料接触构成的异质结,若不考虑应力,其界面由于未配对的悬键产生的界面态的密度,可由这两种材料晶格常数的差值进行计算。对于 GaAs-Al_{0.5}Ga_{0.5}As [100] 向的界面,其 $a_1 = 5.6531 \text{ \AA}$, $a_2 = 5.6576 \text{ \AA}$, 所以

$$N_t = 4 \left(\frac{a_2^2 - a_1^2}{a_1^2 a_2^2} \right) \doteq 2.01 \times 10^{12} (\text{cm}^{-2}).$$

由此可见测得的深中心上限数值与理论估计的失配界面态密度上限数值基本相符,反映了该界面深中心与晶格失配有关联,我们可通过选择适当的晶格匹配程度来控制界面态的密度。

前述的用 DLTS 法对异质结的测量表明,界面态主要的不是表现为连续的能级分布,而是分离的能级。近来 Kamieniacki 在用 DLTS 法测量 GaAs-氧化物界面时发现了类似的实验结果^[7]。

另外半导体所七室用 DLTS 法测量 DH 激光器深能级的有关实验中发现 E_2 的峰高和外延时气氛中的氧含量有明显的联系。当氧含量从 0.2 ppm 变到 8 ppm 时, E_2 的能级密度增加了 10 倍。由此看来该界面深中心很可能是由界面失配缺陷与外来杂质(氧)结合形成的深能级。当然,对于该界面深中心的起源尚需作更深入的研究工作。

七、结 论

我们在 GaAs-AlGaAs 异质结上观察到了开关记忆现象,其高阻态阻值为 $10^5 \Omega$ 量级,表现为正常 p-n 二极管的伏安特性,正向工作时伴随有光信息输出。其低阻态阻值为 $10^3 \Omega$ 量级,表现为线性的欧姆特性,低阻态下不发光。测得 GaAs-AlGaAs p-n 异质结界面处有密度达 $2.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $E = 0.34 \text{ eV}$, $\sigma = 1.3 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 的分离能级的界面深中心,它既与晶格失配有关,又与外来杂质(氧)有关,可能是它们结合形成的深能级。异质结的开关效应是与界面处存在大量界面深中心密切相关的,反偏下由于界面深中心的碰撞电离造成向低阻态的翻转,正偏下由于电子重新填充深中心达到高阻态的恢复。

鉴于界面态的存在对异质结器件的电性能有重要的影响,因而恰当地控制界面态则可能造成新的器件功能。

感谢半导体所七室器件工艺物理组在样品制备上的大力协助,感谢余金中、阮圣央、田慧良、王丽明同志在外延、DLTS 测试、样品制备上的帮助。

参 考 文 献

- [1] J. T. Calow, S. J. T. Owen and P. W. Webb, *Phys. Stat. Sol.*, **28**, 295 (1968).
- [2] H. J. Hovel, *J. Appl. Phys.*, **42**, 5076 (1971).
- [3] A. G. Milnes and D. L. Feucht, "Heterojunction and Metal-Semiconductor Junction," Academic press, New York, 1972.
- [4] 虞丽生,《激光》, **7**, 9 (1980).
- [5] S. M. Sze and G. Gibbons, *Appl. Phys. Letters*, **8**, 111 (1966).
- [6] G. C. Osbourn and D. L. Smith, *Phys. Stat. Sol.*, (a) **58**, 49 (1980).
- [7] E. Kamieniacki, T. E. Kazior, J. Lagowski and H. C. Gatos, *J. Vac. Sci. Technol.*, **17**, 1041 (1980).

Interface State and Switching Characteristics of the GaAs-AlGaAs Heterojunction

Lin Shiming, Wang Chiming, Du Baoxun,

Shi Zhongcheng and Gao Jilin

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract

The GaAs-AlGaAs DH diode exhibits switching and memory characteristics. A model consisting of interface state emptied by impact ionization and refilled with injected electrons has been proposed. The measurements on the DLTS, $I-V$ characteristics in forward bias and avalanche breakdown in reverse bias support the model. Therefore it is possible to design an optoelectronic device with new functions on the basis of the above mentioned characteristics.