

δ 掺杂的赝形 HEMTs AlGaAs/InGaAs/GaAs 傅里叶变换光致发光光谱

沈文忠 唐文国 李自元 沈学础

(中国科学院红外物理国家实验室 上海 200083)

A. Dimoulas

(Foundation for Research and Technology-Hellas, P. O. Box 1527,
Heraklion 71110, Crete, Greece)

摘要 本文首次报道了 δ 掺杂的赝形高电子迁移率晶体管结构 (HEMTs) $\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 中的傅里叶变换光致发光光谱. 观察到了 $n=1$ 电子子带和 $n=2$ 电子子带到 $n=1$ 重空穴子带的强发光峰以及 $n=2$ 电子子带到浅受主的弱发光峰, 由于费米能级处在高于 $n=2$ 电子子带的位置上, 没有观察到属于费米边的发光峰, 证实了理论上所预言的 δ 掺杂 HEMTs 系统具有转移效率高的优点.

PACC: 7855, 7340L

1 引言

傅里叶变换光致发光技术 (FTPL) 是近年来发展起来的一种检测半导体电子态和有关特性的强有力手段, 与传统的光致发光技术 (PL) 相比, 主要是用能进行快速傅里叶变换的迈克尔逊干涉仪替代了分光单色仪, 因而具有多频道和高通量的优点^[1]. 近年来已广泛地应用于各种材料的光谱研究^[2,3].

与此同时, 赝形异质结 AlGaAs/InGaAs/GaAs 系统正引起人们浓厚的兴趣, 这主要是由于这种结构中的电子不仅受到 AlGaAs 势垒中杂质离子的静电作用, 而且受到 InGaAs 势阱中光生空穴的相互作用, 这使得光致发光技术非常适用于研究这类系统中的二维电子气 (2DEG) 问题^[4-10], 例如, 光生空穴和二维电子费米海之间的相互作用所导致的多体效应增强, 即费米边奇异性 (FES)^[11,12] 等. 然而迄今为止的研究结果都是在 AlGaAs 势垒中进行调制掺杂 (MD) 的样品情况下获得的. 随着分子束外延技术 (MBE) 的发展, 利用生长-间断技术, 在很窄的区域内甚至在几个原子层中进行掺杂 (即 δ 掺杂) 已经成为可能, 研究这种掺杂的 HEMT 结构的光谱特性无疑是有意义的, 但就我们所知, 对于这种 δ 掺杂的 AlGaAs/InGaAs/GaAs HEMT 系统, 还很少有人涉及.

与调制掺杂的 HEMTs 系统相比, 理论研究表明^[7], δ 掺杂的 HEMTs 系统具有转

移效率高,最大面电荷密度高,有助于解决门泄漏问题等优点.另一方面,单层(如 GaAs) δ 掺杂系统由于价带对光生空穴的排斥作用使得光致发光光谱很复杂^[13,14],而 δ 掺杂的 AlGaAs/InGaAs/GaAs 系统可以通过限制光生空穴来解决光致发光光谱研究困难的问题.

我们在这里利用傅里叶变换光致发光技术 (FTPL) 研究了 δ 掺杂的赝形 HEMTs Al_{0.30}Ga_{0.70}As/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs 系统.观察到了 $n = 1$ 和 $n = 2$ 电子子带到 $n = 1$ 重空穴子带的强发光峰以及 $n = 2$ 电子子带到浅受主 (Si) 的弱发光峰,证实了理论研究中所预言的 δ 掺杂 HEMTs 系统具有转移效率高的优点.

2 实验

实验采用的 δ 掺杂赝形 HEMTs Al_{0.30}Ga_{0.70}As/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs 样品是在 VG80H MBE 系统上生长的.以半绝缘的 GaAs(001) 为衬底,首先生长 0.8 μm 的 GaAs 缓冲层,衬底温度为 510 $^{\circ}\text{C}$,然后依次生长 13 nm 的 In_{0.15}Ga_{0.85}As 层,2—6 nm 的 Al_{0.30}Ga_{0.70}As 隔离层 (spacer),20 秒钟间断后的 δ 掺杂层(掺 Si,浓度为 $2.5 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$),再经 20 秒钟间断后生长 50 nm 的 Al_{0.30}Ga_{0.70}As 和 10 nm 的 GaAs,最后是 50nm 掺 Si (浓度为 $2.5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$) 的 n^+ GaAs.生长这些结构的衬底温度为 600 $^{\circ}\text{C}$,图 1 示出了样品的结构,表 1 给出了实际测量获得的三个不同样品的有关参量,其中面载流子浓度 N_s 和迁移率 μ 通过 Hall 测量获得(样品中的 n^+ GaAs 层没有腐蚀掉).

50nm GaAs n^+ ($2.5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$)
10nm GaAs
50nm Al _{0.30} Ga _{0.70} As
δ -doped (Si: $2.5 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$)
2—6nm Al _{0.30} Ga _{0.70} As (隔离层)
13nm In _{0.15} Ga _{0.85} As
0.8 μm GaAs
S.I. GaAs Sub.

图 1 赝形 δ 掺杂 HEMTs AlGaAs/InGaAs/GaAs 结构

在傅里叶变换光致发光测量中,以 Ar^+ 激光器的 5145 \AA 谱线作为激发源,用 Nicolet 800 型傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 测量样品的发光,分辨率为 2cm^{-1} .探测器为液氮冷却的 Ge 探测器,温度测量范围为 4.0K 到 77.0K (精度为 $\pm 0.1\text{K}$).

表 1 实验样品的有关参数

样品编号	隔离层宽度(nm)	N_s (cm^{-2} ,77K)	μ ($\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$,77K)	峰A位置及半峰宽 (cm^{-1} ,20K)	峰B位置及半峰宽 (cm^{-1} ,20K)	峰C位置 (cm^{-1} ,20K)
1	6	3.1×10^{12}	21550	10864(180)	11329(48)	11250
2	4	4.2×10^{12}	14500	10802(225)	11307(88)	11225
3	2	5.8×10^{12}	6930	10806(281)	11308(99)	—

3 实验结果与讨论

图 2 是 20.0K 下, 隔离层宽度分别为 6, 4, 2nm 的三块不同样品(1, 2, 3)的傅里叶变换光致发光谱, 它们主要是由两个很强的发光峰组成, 这与调制掺杂 HEMTs AlGaAs/InGaAs/GaAs 系统的光致发光谱相类似^[5], 低能峰(标为 A)显然是 $n = 1$ 电子子带到 $n = 1$ 重空穴子带的跃迁, 而高能峰(标为 B), 与调制掺杂类似是 $n = 2$ 电子子带到重空穴子带的跃迁. 这样指认的根据一方面 B 峰随温度变化关系(图 3, 样品 1)与调制掺杂的 $n = 2$ 电子子带到 $n = 1$ 重空穴子带跃迁的温度变化关系一致^[6]. 另一方面, 峰 B 与

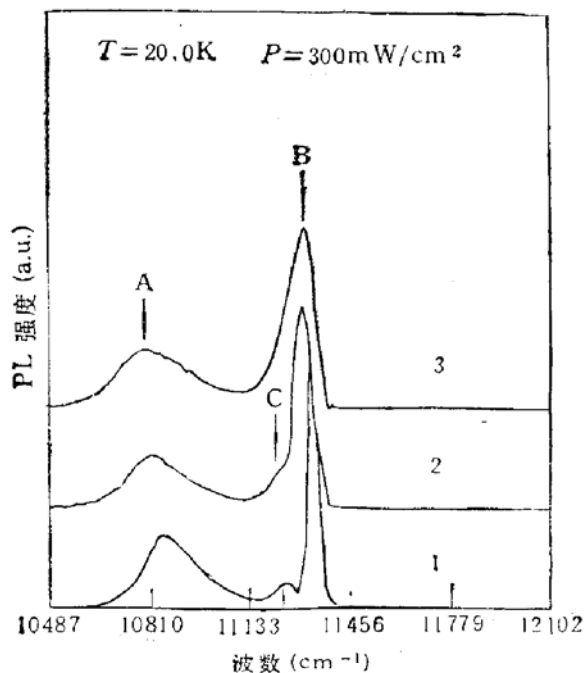


图 2 20.0K 下样品 1, 2, 3 的光致发光谱(功率密度 $P = 300\text{mW}/\text{cm}^2$)

峰 A 的发光强度比 $I(B)/I(A)$ 与激发功率的大小(我们取 $P = 30\text{mW}/\text{cm}^2$ 到 $3000\text{mW}/\text{cm}^2$)无关, 温度变化(4.0K 到 77.0K)也只有较小的影响. 我们知道, 在 AlGaAs/InGaAs/GaAs 这个非对称系统中, 掺杂能使子带能级发生移动和载流子分布情况发生变化, 使阱中电子和空穴分离, 减弱了彼此间波函数的交叠程度, 使跃迁选择定则 $\Delta n = 0$ 松弛. 理论计算还表明^[15], 掺杂能使 $n = 2$ 电子子带和 $n = 1$ 空穴子带的波函数交叠程度增大, 甚至比 $n = 1$ 电子子带和 $n = 1$ 空穴子带间交叠大好几倍, 这在我们的 δ 掺杂系统中确实观察到了.

图 2 的一个重要特征是在峰 B 的低能侧出现了一个弱峰, (标为 C), 此峰比峰 B 能量低约 10 meV. 这一弱发光

峰不少作者也观察到了, 并把它归属于费米边的发光峰. 但是在我们的情况下仔细考察其温度变化行为(图 3, 样品 1), 表明这一弱发光峰并非起源于与费米边有关的发光, 而起因于 $n = 2$ 电子子带与受主能级间复合过程. 此峰在 20.0K 时最明显, 随温度升高逐渐减弱, 直到消失, 在 20K 和 4K 之间强度无明显变化, 只是随着温度降低 B 峰变得更强以致 C 峰不容易被观察出来. 而不象费米边发光那样随温度降低进一步增强, 并以 B 峰的减弱和消失为代价^[6, 10]. 样品 2 也有类似的温度变化行为. 我们认为在这里不出现费米边跃迁的原因是费米能级处在高于 $n = 2$ 导带电子子带位置上的缘故, 因而相应地峰 B 强度比峰 A 大并且不随温度的进一步降低而减弱^[5], 简单理论估算表明: $E_F = N_s \cdot h^2 / (4\pi m^*)$, 取 $m^* = 0.063m_0$ ^[7]. 77.0K 时费米边离 $n = 1$ 导带电子子带约 118meV, 大于 $n = 2, 1$ 导带子带间距离 (58meV).

为了理解弱发光峰 C 的起源, 我们进一步研究了它跟激发功率的依赖关系. 我们发现, 即使激发功率高达 $3000\text{mW}/\text{cm}^2$, 峰 C 的能量位置仍与激发功率大小无关, 而不象费

米边发光那样随激发强度而漂移,其发光强度却正比于激发功率,于是加之如上讨论的温度变化关系和它的能量位置,我们推测发光峰 C 属于 $n = 2$ 导带电子子带与受主间的跃迁,根据它在 35K 时就已经消失的行为,可以推测是浅受主,最有可能是 Si。由此推得受主束缚能约 9.8meV。温度高于 20.0K 时峰 C 逐渐减弱直至消失是由于受主的热电离效应,导带浅受主间跃迁的这种温度变化行为在掺 Ge 的 GaAs 中也已有报道^[17]。没有观察到 $n = 1$ 导带电子子带与受主间的跃迁,这可能是由于峰 A 线形较宽被掩盖掉了,这一点与图 2 中样品 3 由于峰 B 的线形展宽而掩盖掉峰 C 相类似。

考察图 2 中隔离层 (spacer) 宽度对发光峰的影响。我们发现随着隔离层宽度的减弱,发光光谱线型展宽,峰位红移(见表 1),并在最窄隔离层情况下掩盖了发光峰 C。众所周知,发光光谱线型主要由二维电子气与杂质(离化施主和组分涨落)的散射作用决定。散射势能大小与隔离层宽度有关,隔离层宽度越窄,散射作用越强,表现为发光光谱线型展宽。从图中可以清楚地看到,线型展宽使发光峰 C 不易被观察到直至被掩盖掉。其实,从样品 3 发光峰 B 的不对称性仍能看到这种 $n = 2$ 电子子带到浅受主的跃迁。对样品 3 的进一步的研究发现,峰 B 的不对称性也是 20.0K 时最明显,随温度升高逐渐减弱,直至消失。

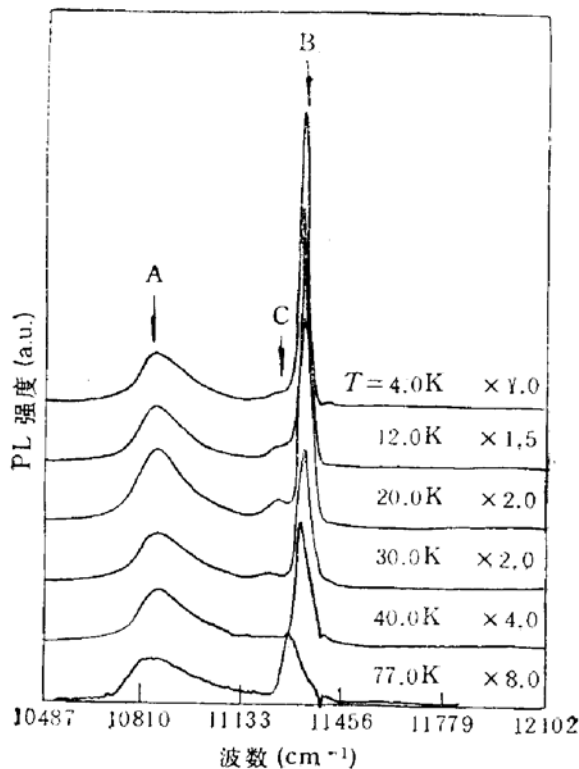


图 3 不同温度下样品 1 的光致发光谱(功率密度 $P = 300\text{mW}/\text{cm}^2$)

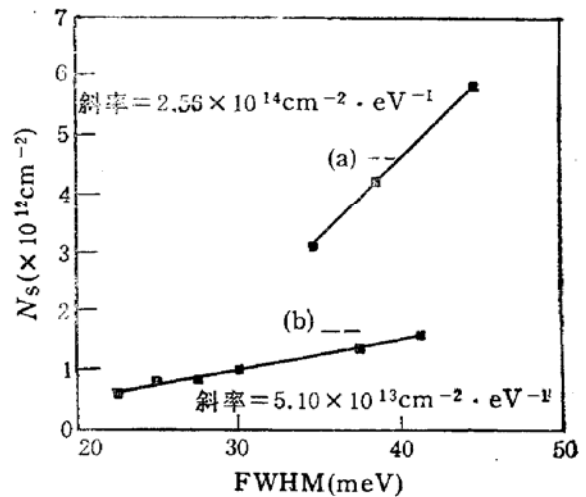


图 4 77.0K 谱线半峰宽 (FWHM) 与面载流子浓度 (N_s) 之间的关系

- (a) δ 掺杂 HEMTs AlGaAs/InGaAs/GaAs (峰 A)
- (b) 调制掺杂 HEMTs AlGaAs/InGaAs/GaAs (取自文献 4)

光致发光峰的半峰宽 (FWHM) 也值得人们的注意,它体现了实空间中光生空穴的局域化^[16]。图 4 给出 77.0K 下光致发光光谱中峰 A 的半峰宽与面载流子浓度 N_s 间的关系。其中调制掺杂情形取自文献[4]。我们发现在我们所研究的 N_s 范围内 ($3.1 \times 10^{12} - 5.8 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$), δ 掺杂样品的发光谱线线宽比同样掺杂浓度的调制掺杂样品要窄,同时 δ 掺杂系统的 N_s -线宽关系曲线的斜率明显大于调制掺杂系统,如所周知,这一斜率与

子带的态密度和子能带的占据情况有关^[4], 它表明 δ 掺杂系统中子带占据数要比调制掺杂情形多, 局域在 δ 掺杂系统 AlGaAs 势垒层中的电子数比较少, 相应地阱中载流子浓度较高, 即与调制掺杂系统相比, δ 掺杂 HEMTs 系统具有转移效率高的优点, 这一点证实了理论研究的结果^[7]. 另一方面这暗示前面我们估计费米能级处在高于 $n = 2$ 电子能级位置上是合理的. 此外还可指出从图 2 也可发现, InGaAs 阱中由于多体效应而引起的带隙重整化效应 (N_s 变化 $2.7 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$, 峰位移动只有约 7meV) 没有调制掺杂情形那么明显 (N_s 变化 $1.0 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$, 峰位移动约 30meV^[4]). 这表明后者情况下的重整化效应要更复杂一些.

4 结论

用傅里叶变换光致发光技术 (FTPL) 研究了 δ 掺杂的腰形高电子迁移率晶体管结构 (HEMTs) $\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$ 的光致发光光谱. 观察到了 $n = 1$ 电子子带到 $n = 1$ 重空穴子带, $n = 2$ 电子子带到 $n = 1$ 重空穴子带间的强发光峰. 通过对弱峰 C 的研究表明它是 $n = 2$ 电子子带到浅受主 (可能是 Si) 间复合跃迁的发光峰, 没有发现文献中曾报道过的属于费米边的发光峰, 与调制掺杂 AlGaAs/InGaAs/GaAs 系统相比, δ 掺杂系统载流子转移效率明显提高, 但 InGaAs 阱的重整化效应并不十分强烈.

参 考 文 献

- [1] 沈学础, 物理学进展, 1982, 2(3): 275
- [2] D.J.S. Beckett, M.K. Nissen and H.L.W. Thewalt, Can. J. Phys., 1991, 69: 427.
- [3] D.R. Storch, R.P. Schneider, Jr. and B.W. Wessels, J. Appl. Phys., 1992, 72(7): 3041.
- [4] A. Dodabalapur, V.P. Kesan, D.R. Hinson, D.P. Neikirk and B.G. Streetman, Appl. Phys. Lett., 1989, 54(17): 1675.
- [5] C.Colvard, N.Nouri, H. Lee and D.Ackley, Phys. Rev., 1989, B39(11): 8033.
- [6] W. Chen, M. Fritze, A.V. Nurmikko, D. Ackley, C.Colvard and H. Lee, Phys. Rev. Lett., 1990, 64(20): 2434.
- [7] M.Jaffe and J. Singh, J.Appl. Phys., 1989, 65(1):329.
- [8] S.K. Lyo, Phys. Rev., 1990, B40: 8418.
- [9] W. Chen, M.Fritze, A.V. Nurmikko, M.H. Hong and L.L. Chang, Phys. Rev., 1991, B43: 14738.
- [10] W. Chen, M.Fritze, W.Walecki, A.V. Nurmikko, D. Ackley, M.H. Hong and L.L. Chang, Phys. Rev., 1992, B45: 8408; 8464.
- [11] G.D. Mahan, Phys. Rev., 1967, 153:882; 1967, 163:612.
- [12] P. Nozieres and C.T. De Dominicis, Phys. Rev., 1969, 178: 1097.
- [13] I.V. Kukushkin, K. von Klitzing, K. Ploog, V.E. Kirpichev and B.N. Shekel, Phys. Rev., 1989, B40: 4179.
- [14] I.V. Kukushkin, K. von Klitzing, K. Ploog and V.E. Timofeev, Phys. Rev., 1989, B40: 7788.
- [15] G.E. W. Bauer and T. Ando, J.Phys., 1986, C19:1553
- [16] M.S. Skolnick, K.J. Nash, M.K. Saker, S.J. Bass, P.A. Claxton and J.S. Roberts, Appl. Phys. Lett., 1987, 50: 1885.
- [17] K.J. Keefer, Y.K. Keo and R.L. Hengehold, J. Appl. Phys., 1991, 70(8): 4634, and references therein.

Fourier Transform Photoluminescence Studies of δ -Doped Pseudomorphic HEMTs AlGaAs/InGaAs/GaAs

Shen Wenzhong, Tang Wenguo, Li Ziyuan and Shen Xuechu

(National laboratory for Infrared Physics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

A. Dimoulas

(Foundation for Research and Technology -Hellas, P.O. Box 1527, Heraklion 71110, Crete, Greece)

Abstract We report the Fourier Transform Photoluminescence studies of δ -doped pseudomorphic high-electron-mobility transistor structures (HEMTs) of $\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$. In addition to two strong PL peaks related to the recombination between electrons in the first ($n = 1$), second ($n = 2$) subband and first heavy holes subband, a weak PL peak related to the recombination between $n = 2$ electrons and shallow acceptors is observed and assigned, in contrast to the Fermi-edge singularity which is widely recognized and investigated in the literature. We also prove that there is greater transferring efficiency in δ -doped HEMTs, which has been theoretically expected.

PACC: 7855, 7340L