

$(\text{GaAs}/\text{AlAs})_n$ 短周期超晶格类型 及其转变的光伏研究

罗昌平 江德生 李 锋 庄蔚华

(半导体超晶格国家重点实验室 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 首次用光伏方法研究了 $(\text{GaAs}/\text{AlAs})_n$ 短周期超晶格中的超晶格类型及其转变问题. 不同于其它方法, 光伏方法仅涉及到载流子在实空间中的分离及其大小. 这种空间分离在 I 类超晶格中为零, 而在 II 类超晶格中不为零. $(\text{GaAs}/\text{AlAs})_n$ 短周期超晶格在 $n=10$ 和 11 时被指认为 II 类超晶格, 在 $n=15$ 时被指认为 I 类超晶格. 与其它大部分实验结果一致.

PACC: 7240, 7340L

在某些超晶格中的类型及其转变问题已在理论及实验上进行了大量的研究^[1-5]. 对 $(\text{GaAs}/\text{AlAs})_n$ 短周期超晶格, 由于量子限制效应, 导带极小或电子的最低限制态可能位于 GaAs 层 (I 类超晶格) 或 AlAs 层 (II 类超晶格) 中^[1,6]. 这是因为 AlAs 层中导带的 X 能谷能量最低, 而 GaAs 层中是 Γ 能谷最低. 于是对不同的层数 n , 量子限制效应将导致不同的超晶格类型, 并在一个特定的层数时出现超晶格类型的转变. 理论计算得到的转变层数比较发散, 与所用的模型有关^[2]. 实验则给出了一个比较一致的结果, 约为 12 层^[1]. 用到的测试手段包括光致发光和光吸收谱^[3], 光致发光和光激发谱^[4], 光致发光和光反射谱^[2], 流体静压下的光致发光谱^[5], 以及时间分辨光谱^[4], 所有这些方法, 或者测量电子在 AlAs 层中的 X 能级位置与在 GaAs 层中 Γ 能级位置的能量差 (表现为光致发光谱与光吸谱中的斯托克斯位移, 在转变层数附近有一跳变)^[1-5], 或者是能量最低的跃迁几率的不同^[4]. I 类超晶格中, 能量最低的跃迁是由 GaAs 层中的 Γ 能谷到 Γ 能谷, 在空间上是直接的, 因此荧光寿命较短, 而 II 类超晶格中, 能量最低的跃迁是由 AlAs 层中的 X 能谷到 GaAs 层中的 Γ 能谷, 在实空间和动量空间上都是间接的, 荧光寿命相对较长^[4]. 值得提到的是, 流体静压下的光致发光谱方法是从荧光峰位置随流体静压的变化关系外推出斯托克斯位移的^[5]. 在本文中, 我们首次报道用与以上实验原理完全不同的光伏方法对此问题的研究结果. 实验表明, 得到的结果与用以上方法符合很好.

Capasso^[7,8] 和 Brum^[9] 等人早在 1983 年和 1986 年就指出, 超晶格中由于能带结构缺乏反演对称性而出现的载流子空间分离, 将导致光伏效应, 并预言了光伏响应在脉冲光激发下

有类似于量子电容充放电的特征. 此特征由 Blease^[10,11]等人在 InAs/GaSb 超晶格中观察到. 另外, 罗昌平^[12]等人在此理论基础上, 提出了 I 类超晶格中光伏响应的极性在空间上是固定的观点, 并由硅和镓砷 NIPI 在不同光激发下的光伏响应结果所证实.

根据 Capasso^[7,8]和 Brum^[9]等的理论, 载流子的空间分离使得每个超晶格周期类似于一个量子电容, 其正负极分别为空穴和电子的局域中心或相应的限制层. 整个超晶格则可视作多个这样的量子电容的串联. 采用平板电容近似, 超晶格的光伏响应将与载流子空间分离的大小成正比. I 类超晶格中, 因电子空穴被限制在空间上同一位置, 载流子的空间分离为零; 而 II 类超晶格中, 电子空穴限制在空间上不同位置, 载流子的空间分离不为零^[6]. 于是, 仅在 I 类超晶格中, 才有不为零的光伏响应出现. 超晶格的类型可从而由光伏响应的幅度或相应的量子吸收特征区分开来. 值得提到的是, 在有其它因素如大的表面电场或外加电场使得电子空穴在阱间或阱内产生空间分离时, 用光伏方法来判断超晶格的类型将不是特别有效的.

根据此原理, 我们在室温下采用常规的表面光伏测试装置测量了 $n=10, 11$ 和 15 的 $(\text{GaAs}/\text{AlAs})_n$ 短周期超晶格中的光伏响应. 测量时采用了波导激发即侧面激发样品, 因为侧面激发对所有周期都是等同的, 可以避免正面激发下相邻周期间因光吸收造成的影响. 但侧面激发也不可避免地导致在衬底前表面区域中产生表面光伏效应. 为区分此效应, 我们另测量了 $n=11$ 样品在衬底背面激发下的光伏响应. 衬底厚度约为 $500\mu\text{m}$, 激发光不能够透过, 因此测得的光伏响应仅是衬底背表面区域的表面光伏. 在以下的分析中, 我们近似认为衬底前后表面区域的表面光伏响应相同, 或至少谱形特征一致. 对所有样品的光反射调制测量^[13]表明, 样品的表面电场很弱, 可以忽略. 因此超晶格区域中将无表面光伏响应产生, 并可认为是平带结构. 测得的结果如图 1 所示. 从图中可以看出, 不同于 $n=15$ 样品的结果, $n=10$ 和 11 样品的结果中都有明显的量子吸收特征出现, 而 $n=15$ 样品的结果则完全类似于 $n=11$ 样品在背表面激发下的结果. 这说明 $n=10$ 和 11 样品中的量子吸收过程对光伏响应有贡献, 而 $n=5$ 样品中则没有.

侧面激发下由于超晶格和衬底前表面区域都可能对光伏响应产生贡献, 测得的最终结果将是二者的叠加. 如果近似认为衬底前后表面区域的表面光伏响应相同, 或至少谱形特征一致, 则总的响应谱中除表面光伏响应的特征外, 其余的结构将来源于 GaAs/AlAs 短周期超晶格. 超晶格中, GaAs 层中电子吸收一个光子的能量, 由价带 Γ 能谷竖直跃迁到导带的 Γ 能谷. 如果超晶格为 I 类超晶格, 电子的 Γ 能级为导带能量最低态, 因此电子将不再向 AlAs 层中的 X 能谷转移, 没有载流子的空间分离, 对光伏响应无贡献. 尽管有光吸收过程, 在光伏谱中仍不会有量子吸收特征出现. 如图 1 中 $n=15$ 样品的结果所示. 但如果超晶格为 II 类超晶格, GaAs 层中电子的 Γ 能级则并非导带能量最低态, 而是 AlAs 层中的 X 能级. 于是电子将由 GaAs 层中的 Γ 能级弛豫到 AlAs 层中的 X 能级, 使得载流子在空间上产生分离. 空间分离的结果是电子限制在 AlAs 层中, 而空穴限制在 GaAs 层中. 于是有光伏响应产生, 并在光伏谱中出现量子吸收特征. 如图 1 中 $n=10$ 和 11 样品结果所示. 注意 $n=15$ 时的谱形与 $n=11$ 时背表面激发下的谱形一致, 没有量子吸收特征出现, 而在 $n=10$ 和 11 的光伏谱中则都有明显的量子吸收特征, 谱中出现的三个结构分别对应于 GaAs 层中价带的重轻空穴基态到导带 Γ 能谷的电子基态, 以及重空穴第一激发态到电子第一激发态的跃

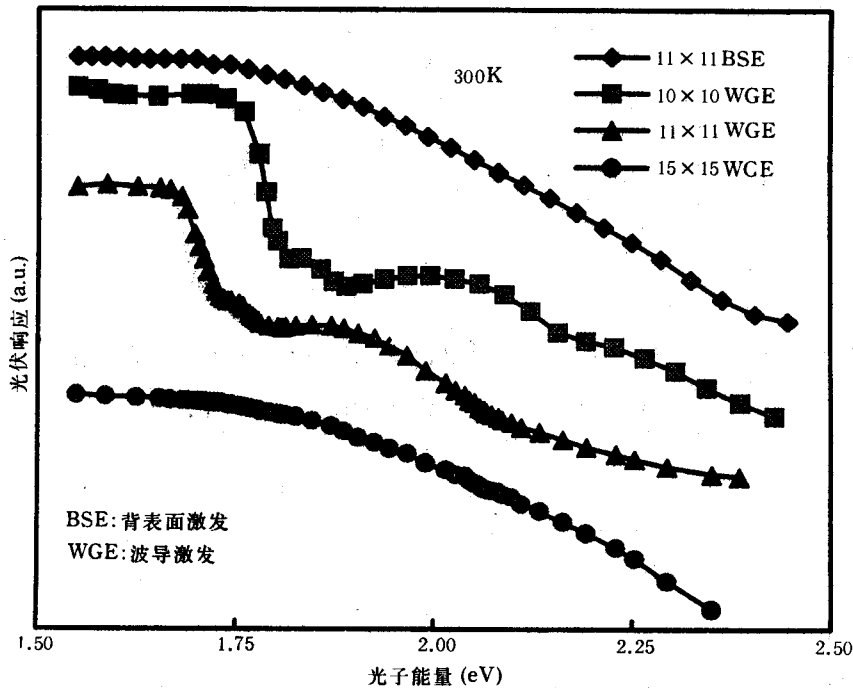


图1 室温下 $n=10, 11$ 和 15 时 $(\text{GaAs}/\text{AlAs})_n$ 短周期超晶格在波导激发 (WGE) 及 $n=11$ 时背表面激发 (BSE) 下的光伏谱
图中谱线零点已被移动

迁. 测得的能量位置与计算值符合很好, 说明我们的分析和指认是正确的. 由此可以得到结论, $n=15$ 的 GaAs/AlAs 短周期超晶格为 I 类超晶格, $n=10$ 和 11 的 GaAs/AlAs 短周期超晶格为 II 类超晶格, 超晶格类型转变发生在 $n=11$ 和 15 之间. 这与大部分的实验结果^[1]符合很好.

综上所述, 我们用光伏方法首次对 GaAs/AlAs 短周期超晶格的类型及其转变进行了研究, 得到了与其它实验结果相符的结论. 这说明光伏方法在研究某些物理问题时是一个很有用的工具.

参 考 文 献

- [1] E. O. Göbel and K. Ploog, *Prog. Quantum. Electr.*, 1991, **14**: 289 and references there.
- [2] H. Fujimoto, C. Hamaguchi, T. Nakaxawa, K. Taniguchi, K. Imanishi, H. Kato and Y. Watanabe, *Phys. Rev. B*, 1990, **41**: 7593 and references there.
- [3] H. Kato, Y. Okada, M. Nakayama and Y. Watanabe, *Solid State Commun.*, 1989, **70**: 535.
- [4] E. O. Göbel, J. Feldmann, R. Fischer, G. Peter, R. Sattmann, J. Hebling, J. Huhl, R. Muralidharan, K. Ploog, P. Dawson and C. T. Foxon, In: *Spectroscopy of Semiconductor Microstructures*, Eds G. Fasol. A. Fasolino and P. Lugli, NATO ASI Series, Series B, Physics, 1989, **206**: 623, Plenum, N. Y.
- [5] Guohua Li, Desheng Jiang, Hexiang Han, Zhaoping Wang and K. Ploog, *Phys. Rev. B*, 1989, **40**: 10430.
- [6] L. L. Chang, K. Ploog, *(Molecular Beam Epitaxy and Heterostructures)*, Martinus Nijhoff Publishers, 1985.

- [7] F. Capasso, J. Luryi, W. T. Tsang, C. G. Bethea and B. F. Levine, Phys. Rev. Lett. , 1983, **51**:2318.
- [8] F. Capasso, K. Mohammed and A. Y. Chao, Surf. Sci. , 1986, **174**:501.
- [9] J. A. Brum, P. Voisin and G. Bastard, Phys. Rev. B, 1986, **33**:1063.
- [10] J. Bleuse, P. Voisin, M. Voos, L. L. Chang and L. Esaki, 3rd International Conference on Modulated Semiconductor Structures, France, 1987.
- [11] P. Voisin, J. A. Brum, M. Voos, L. L. Chang and L. Esaki, Surf. Sci. , 1986, **174**:255.
- [12] C. P. Luo, D. S. Jiang, W. H. Zhuang, F. Li and Y. Z. Li, Appl. Phys. Lett. , 1993, **63**:1777.
- [13] D. S. Jiang, Unpublished.

Photovoltaic Studies of Superlattice Type and Its Transition in (GaAs/AlAs)_n Short-Period Superlattices

Luo Changping, Jiang Desheng, Li Feng and Zhuang Weihua

(National Laboratory for Superlattices and Microstructures

Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Received 15 November 1993, revised manuscript received 3 March 1994

Abstract The superlattice (SL) type and its transition in (GaAs/AlAs)_n short-period SLs are firstly studied by photovoltaic technique. Different from the conventional used methods, photovoltaic technique concerns with the value of carrier spatial separation, which is zero in type- I SLs while nonzero in type- II SLs. (GaAs/AlAs)_n short-period SL is assigned to be type- II for $n=10$ and 11 and type- I for $n=15$. The SL type transition occurs between $n=11$ and 15 . The conclusion is consistent with the results of most experiments.

PACC: 7240, 7340L