

δ 掺杂硅 n-i-p-i 结构多量子阱吸收边的漂移

程文超 夏建白

(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)

郑文硕 黄醒良 金载元 林三镐 瑞恩庆 李亨宰

(半导体物理研究中心 全北国立大学 全州 561-756 韩国)

摘要 本文报告了在 δ 掺杂硅 n-i-p-i 结构多量子阱中使用光电流技术观测到吸收边的场驱动蓝移, 它不同于在 GaAs 和 GeSi 超晶格中观察到的结果。这个新现象能够被载流子注入引起有效带隙的展宽所解释。基于有效质量近似, 计算了自洽势和有效带隙随额外载流子浓度的变化, 理论结果证实了实验结果的正确性。

PACC: 7125T, 7340L, 7820

众所周知, 当一个垂直于表面电场加到 GaAs/AlGaAs 和 GeSi/Si 不掺杂超晶格时, 由于能带倾斜产生了 Stark 局域化和跃迁能量的漂移, 平带时的单一能量的跃迁变成一系列不同能量的跃迁, 而由于电子和空穴波函数重叠的多少不同, 主要表现为两个不同能量的跃迁^[1]。一个是近带边附近跃迁能量的降低, 形成场驱动红移。另一个是在高能边跃迁能量的上升, 形成场驱动蓝移。通常, 使用光致发光 (PL) 技术观测场驱动蓝移^[2,3], 使用光吸收 (OA) 谱^[4]和光电流 (PC) 谱^[1]观测近吸收边的场驱动红移。对掺杂超晶格, 由于形成能带的物理机制不同于 GaAs 和 GeSi 超晶格, 电场对光电特性的影响也将不同。

当一层杂质原子嵌在一个半导体中, 将形成一个 V 型二维自洽势, 电子和空穴位于实空间的不同区域, 形成一个二类超晶格。有外电场存在时, 势阱中载流子浓度能够被电场调制, 引起量子阱有效带隙的改变, 这在 n-i-p-i 结构中尤为明显, 因此人们期望在这个结构中得到一些不同于组分超晶格的光电特性。

本文报告了在 δ 掺杂 n-i-p-i 结构硅样品中使用光电流技术观测到的近带边场驱动蓝移, 这是一个与以前在方势阱中观测到结果不同的新现象。基于有效质量近似理论, 对有效带隙随二维自由载流子浓度的变化进行了自洽计算, 理论计算结果证实了实验结果的正确性。

程文超 男, 1940 年出生, 副研究员, 现从事半导体低维物理特性研究
夏建白 男, 1940 年出生, 研究员, 现从事半导体低维物理理论研究
1998-11-13 收到, 1999-02-26 定稿

实验中使用的 n-i-p-i 结构硅样品是由分子束外延设备生长的,生长压力和温度分别为 1×10^{-6} Pa 和 500 . 首先,在 n^+ Si(100) 衬底上,生长厚度为 200nm 的缓冲层,然后,制备光激活层,它是由 10 个周期的 δ 掺杂 n-i-p-i 结构组成,硼(B)和锑(Sb)分别作为 p 型和 n 型掺杂剂, n 型和 p 型层有相同的厚度和浓度,分别是 5nm 和 $1.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,不掺杂 i 层的厚度为 20nm. 最后,制备掺杂浓度 $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 厚为 200nm 的 n^+ 盖层 为了光电流测量,晶片被切割成 $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ 的方形小片,并在上、下两面蒸发直径为 0.5mm 的铝点,退火后制成欧姆接触电极

实验中照在样品上的单色光 ($0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$) 是由单色仪和碘钨灯获得,使用锁相放大器在取样电阻上测量电流信号. 实验中还使用了一个滤光片去掉了来自光栅高阶效应的影响 在 4.2K 和 77K, 测量了各种偏置下的光电流谱

图 1 表示不同偏置下上述 δ 掺杂 n-i-p-i 结构硅样品在 4.2K 的归一化光电流响应和光子能量关系的测量结果 实验数据表明: 吸收边的变化是强烈地与偏置有关 准确估价光电流谱吸收边的位置需按照参考文献[5]给出的曲线拟合程序进行,图 2 中的点给出了几个偏置下被估算的结果,其中实线是 $eFL/2$ 的值 点线描绘了吸收边变化的趋势 从图可以清楚地看到吸收边随外加电压变化的结果,随着电压的增加,开始时红移,而后变成了蓝移 这与以前在方势阱中观察到的吸收边单调的红移不同 类似的现象在 77K 也被发现 漂移方向的改变归因于势阱中电注入了额外载流子,导致了有效带隙展宽所致

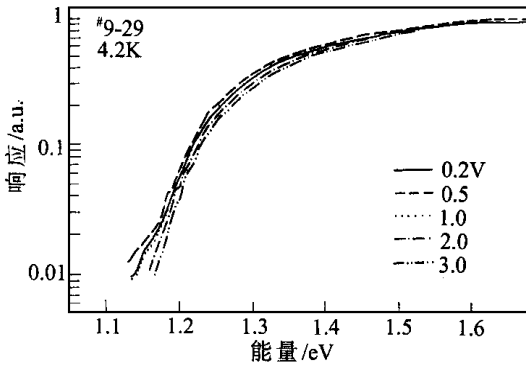


图 1 4.2K 下 δ 掺杂硅 n-i-p-i 结构多量子阱在不同偏置下,归一化光电流响应随光子能量的变化

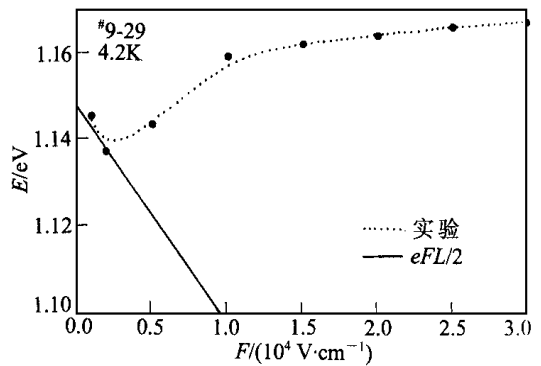


图 2 吸收边随电场的漂移 图中点表示使用参考文献[5]中的曲线拟合程序计算得到的实验结果,实线表示 $eFL/2$ 的计算值

对于一个 δ 掺杂 n-i-p-i 样品,有一个锯齿形能带结构,自由载流子有一个准二维系统 有效带隙的幅度,即:在导带中最低二维电子态和价带中最高二维空穴态之间的能量差,将被势阱中的自由载流子所调制 对于我们的样品而言, $N_A = N_D$,是一个补偿型结构,当外加电压 $V = 0$ 时,势阱中没有自由载流子,有效带隙最窄 当外加电压 $V \neq 0$ 时,低电场下,外加电压低于样品的阈值电压时,势阱中没有额外载流子注入,有效带隙没有改变 因此,它的漂移只是由电场引起的吸收边红移 当电压大于阈值电压后,势阱变得倾斜并注入载流子,引起有效带隙展宽,影响了吸收边的漂移的大小,甚至可以改变漂移方向,如果有效带隙变化的幅度 ΔE_g^{eff} 随电场的变化大于场驱动漂移量 $eFL/2$ 时^[6],吸收边的 Stark 红移将改变方向,红移变成蓝移

为了验证上述论述的正确性, 我们使用自洽计算方法计算了上述硅 n-*ip*-i 结构的能带图和有效带隙变化与额外载流子浓度的变化, 计算中使用的 Schrodinger 方程为:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{\hbar^2}{2m^*} \left(\frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} \right) + V_H(z) \right] \Psi(\vec{y}) = E \Psi(\vec{y})$$

式中 $V_H(z)$ 是空间电荷和电子、空穴电荷产生的 Hartree 势, 它满足 Poisson 方程

$$\frac{d^2 V_H(z)}{dz^2} = + \frac{4\pi e^2}{\epsilon_0} n(z)$$

式中 $n(z) = N_D(z) - N_A(z) + N_{x,+}(z) - N_{x,-}(z)$, 其中 $N_D(z)$ 和 $N_A(z)$ 分别表示正和负的空间电荷, $N_{x,+}(z)$ 和 $N_{x,-}(z)$ 分别表示空穴和电子浓度, 他们与注入载流子相一致. 计算中使用的材料参数是: $m_e^* = 0.916m_0$, $m_h^* = 0.190m_0$, $m_{e,h}^* = 0.277m_0$, $m_{e,h}^* = 0.216m_0$, $\epsilon = 11.9$, $N_D = N_A = 8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $L = 50 \text{ nm}$, $N_{x,+} = N_{x,-} = 0 \sim 7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 其中, m_e^* 、 m_h^* 、 $m_{e,h}^*$ 、 ϵ 和 L 分别表示电子和空穴的有效质量、介电常数和掺杂层的周期. 对于我们的样品, 有和没有载流子注入的情况下计算的自洽势和子带能级表示在图 3. 结果表明: 在有载流子注入情况下, 有效带隙发生了明显变化. 带隙、电子和空穴的一阶子带差和准费米能级等随额外载流子变化的详细情况表示在图 4. 图中有效能隙随额外载流子浓度的变化用 E_1 表示, 可以看出, 实现 $\Delta E_1 > eFL/2$ 是可能的, 因为, 实验中注入的电子和空穴浓度可以超过 10^{12} cm^{-2} , 注入的二维载流子随电场的增加呈指数变化, ΔE_g^{eff} 正比于二维载流子浓度, 这些在参考文献[7]中均有论述. 因此, 有效带隙的变化 ΔE_g^{eff} 大于场驱动漂移量能够实现.

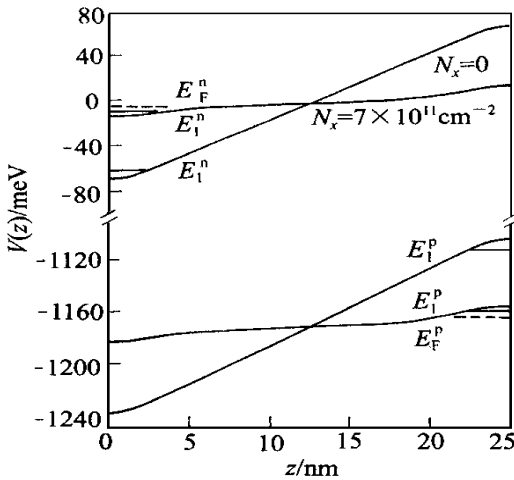


图 3 对于 $N_x = 0$ 和 $N_x = 0.7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时, 计算得到的 δ 掺杂 n-*ip*-i 多量子阱的能带图. E_1^n 、 E_1^p 、 E_F^n 和 E_F^p 分别表示子带能级和准费米能级.

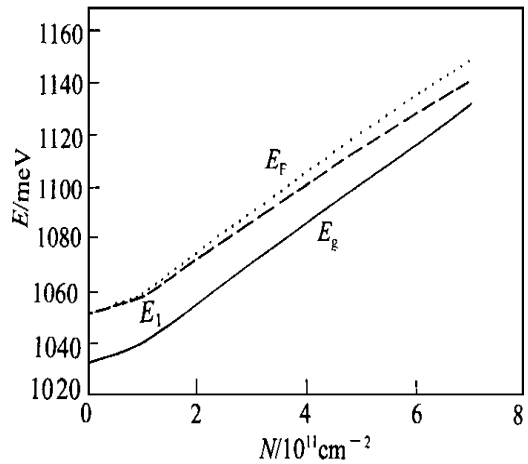


图 4 禁带宽度、电子、空穴一阶子带能量差和准费米能级随载流子浓度的变化.

需要说明的是: 载流子注入的增加, 必然引起电流的增大, 这在 I - V 特性中已被观察. 电流增加使得样品的温度升高, 会导致能隙变窄. 但从我们的实验结果来看, 在影响 n-*ip*-i 结构样品有效带隙变化的几个因素中, 载流子注入引起有效带隙的改变在我们的实验范围内仍然占主导地位.

从理论分析可以知道, 对于 $n-i-p-i$ 结构, 电注入引起有效带隙的变化也影响高能边的 Stark 蓝移, 使得蓝移速度加快. 实验中使用的是硅样品, 它是一种间接带隙半导体, δ 掺杂形成了二类超晶格. 电子和空穴的波函数很小的重叠, 使得光致发光峰的发光强度非常弱, 加之声子伴峰的影响, 使用 PL 谱观察它的变化非常困难.

综上所述, 我们报告了在 δ 掺杂硅多量子阱 $n-i-p-i$ 结构中在电注入情况下吸收边的变化, 观测到近吸收边附近的场驱动蓝移, 它不同以前在 GaAs 和 GeSi 超晶格中观测到的量子限制 Stark 效应的结果. 这是电场在势阱中注入了额外载流子导致了有效带隙展宽产生的结果. 理论计算很好的解释了测量结果的主要特性.

参 考 文 献

- [1] J. S. Park, R. P. G. Karunasiri and K. L. Wang, *J. Vac. Sci. Technol.*, 1990, **B8**: 217.
- [2] Y. Miyake, J. Y. Kim, Y. Shiraki, S. Fukatsu, *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**: 2097.
- [3] J. Y. Kim, S. Fukatsu, N. Usami, Y. Shiraki, *J. Crystal Growth*, 1995, **157**: 40.
- [4] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen *et al.*, *Phys. Rev.*, 1985, **B32**: 1034.
- [5] D. V. Lang, R. People, J. C. Bean and A. M. Sergent, *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**: 1333.
- [6] G. Danan, F. R. Ladan, F. Mollet and R. Planel, *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**: 1605.
- [7] K. Ploog, *Molecular Beam Epitaxy and Heterostructures*, eds, L. L. Chang and K. Ploog, (NATO ASI Series, Dordrecht, 1985), pp533~ 571.

Absorption Edge Shift in δ -Doped Si $n-i-p-i$ Multiple Quantum Wells

Cheng Wenchao, Xia Jianbai

*National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*

M. S. Jeong, X. L. Huang, K. Y. Kim, S. H. Ihm, E-K. Suh, H. J. Lee

Semiconductor Physics Research Center, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

Received 13 November 1998, revised manuscript received 26 February 1999

Abstract We report the observation of field-driven blue shift at near absorption edge in the δ -doped Si $n-i-p-i$ multiple quantum wells, which is differs from the observed results in GaAs and GeSi superlattices. This phenomenon can be explained by the widening of the effective energy gap under an external electric field. Based on the effective mass approximation, the variation of the self-consistent potential and the effective energy gap with excess carrier density for our samples were calculated by means of a self-consistent calculation. The experimental results are found to be in good agreement with theoretical calculation.

PACC: 7125T, 7340L, 7820