第14卷第6期
1993年6月

半 导 体 学 报
CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS

Vol. 14, No. 6
June, 1993

非对称耦合双阱中载流子共振隧穿和LO声子辅助隧穿的光学证据

徐士杰*+ 江德生* 李国华* 张耀辉* 罗晋生+

*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

+西安交通大学电子工程系，西安 710049

(1992年10月8日收到)

用稳态光致发光研究了偏压下的 $GaAs/Ga_{0.65}Al_{0.35}As/GaAs$ 非对称耦合双阱(ADQW)结构中电子的隧穿现象. 清楚地观察到电子从窄阱到宽阱的共振隧穿和 LO 声子辅助隧穿效应，而且证明来自于 GaAlAs 势垒层中的类 AlAs 模式声子在 LO 声子辅助隧穿过程中占据主导地位.

PACC: 7865, 7340L

载流子隧穿是半导体异质结构中最重要的量子力学现象之一. 自从 Tsu 和 Esaki[1] 的开创性研究之后，已有许多人[2]致力于这项研究. 非对称耦合双阱结构被认为是研究隧穿物理的理想结构[3]. 最近，Oberli[4]等人利用亚皮秒时间分辨荧光技术直接测量了在一个 ADQW 结构中电子共振和非共振隧穿时间. 他们发现，当外加电场使得两阱的光子能级发生共振耦合时，隧穿时间急剧减小；当电场进一步增加使得电子能级脱离共振后，隧穿时间又增加. 隧穿时间的这种非单调行为是共振隧穿的一个确定标志. 后来，LO 声子辅助隧穿也被观察到[5-7]. 这些结果证实了 LO 声子辅助隧穿的重要性，并且引发了一些重要问题，如 LO 声子辅助隧穿过程中起主要作用的声子模式问题，以及它们是来自于 GaAs 阱区还是来自于 GaAlAs 势垒区等，因此，需要进行更进一步的研究[7].

在本篇快报中，我们用稳态荧光谱来考察外加一个垂直电场导致的电子在非对称耦合双阱间的共振隧穿和非共振隧穿现象. 结果表明，当电场使得窄阱基态能级和宽阱第一激发态能级发生共振耦合时，由于窄阱内电子快速隧穿到宽阱所引起的窄阱荧光峰强度的迅速下降，而且在较低电场时还有一个由于类 AlAs 模 LO 声子辅助隧穿所引起窄阱荧光峰强度的一个低值.

实验样品是用 MBE(分子束外延)生长的. 衬底是 n-(100)GaAs. 非对称耦合双阱结构为 $GaAs/Ga_{0.65}Al_{0.35}As/GaAs$ (50Å/40Å/100Å)，每个单元之间用200Å厚的 $Ga_{0.65}Al_{0.35}As$ 层分隔. 最上层生长一层200Å厚的 p^+-GaAs 层. i 区总厚度为8400Å. 经欧姆接触工艺制备成面积 $200\times200\mu m^2$ (窗口面积 $50\times50\mu m^2$)的 p-i-n 二极管. *I-V* 性能测试表明，这种 ADQWp-i-n 二极管的反向电流不大于1μA，击穿电压超过20V. 在 PL 测量过程中，样管被置于冷指式小型制冷机的样品架上，冷却温度可达10K. 激发光为 Kr^+

离子激光的6764Å波长线，光子能量为1.833eV，这样仅在量子阱区产生电子-空穴对. 激发功率(激光器输出功率)为0.07mW.

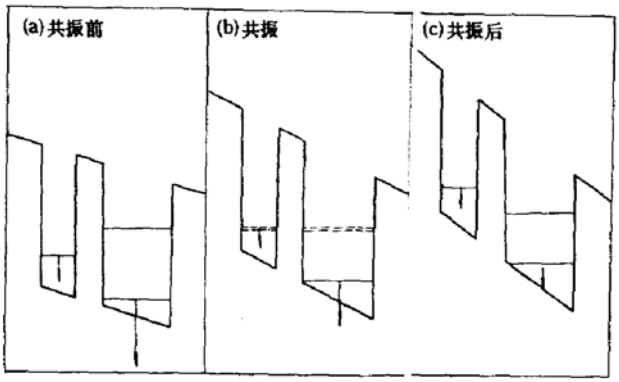

图1　三个不同电场作用下的ADQW样品能带结构图

用传递矩阵方法[8]计算了非对称耦合双阱的能带结构. 在平带条件下，窄阱和宽阱基态能级间的能量差为43meV；窄阱基态能级和宽阱第一激发态能级间的能量差为48meV. 理论估算窄阱电子基态和宽阱第一激发态发生共振耦合时的电场为4.4×10^4V/cm，共振耦合时能级分裂宽度约6.6meV. 图1给出了非对称耦合双阱结构在三个不同电场时的导带边结构，图1(a)、(b)和(c)分别对应于共振前、共振和共振后三个状态. 图内还分别显示了两阱的荧光过程，箭头的长度代表荧光峰强度.

图2给出的是零偏压、−2.5V和−4.0V偏压下测得的ADQW样品的荧光谱. 从PL谱中可以看到两个峰，其中低能峰是来自于宽阱基态电子和重空穴间的复合发光，高能峰是来自于窄阱基态电子和重空穴间的复合发光. 随着偏压的增加，来自于宽阱的荧光峰强度单调下降，而来自于窄阱的荧光峰却没有这种单调行为，在−2.5V时达到一个最小值，然后又增加. 宽阱荧光峰随偏压增加单调红移，这就是所谓“量子受限Stark效应”，而窄阱荧光峰不是随偏压增加单调红移，与零偏压时相比，−2.5V偏压下峰位发生一个小的蓝移，然后再逐渐红移. 窄阱荧光随偏压变化的这种非单调特性表明，在−2.5V时窄阱的电子基态能级和宽阱能级发生了共振耦合，电子从窄阱到宽阱的共振隧穿导致了窄阱荧光强度的一个最小值.

下面我们简单讨论一下为什么窄阱荧光强度能反映电子隧穿出窄阱的速率变化. 我们知道在高质量的量子阱结构中激子的辐射和非辐射复合时间是几个纳秒，而在10K温度下窄阱电子的热发射是可以忽略的. 实验已经证明，载流子隧穿通过一个薄势垒的时间一般是几百皮秒，共振隧穿时可低至7.5皮秒[3]. 因此窄阱荧光强度的变化可以反映电子隧穿出窄阱速率的变化，特别是共振条件下，电子隧穿速率的突然增加可导致窄阱荧光强度的急剧下降. 至于轻、重空穴的影响，在我们这种条件下是可以忽略的. 这是因为重空穴由于其较大的有效质量和内建电场的抑制隧穿出窄阱的速率极其小[9]，即使是重空穴共振隧穿也比电子的非共振隧穿速率小[3]. 在低温(10K左右)条件下，光生轻空穴极其快地弛豫到重空穴低能级，在低温荧光谱看不到与轻空穴相关的荧光峰就是其结果. 因此，窄阱荧光峰强度的急剧下降可以判定是电子共振隧穿出窄阱的一个直接结果.

现在我们考察垂直于量子阱平面的外加电场对窄阱荧光峰强度的影响. 图3给出的是窄阱荧光峰强度随外加偏压的变化曲线. 从中我们可以看出，当偏压从0.8V变到

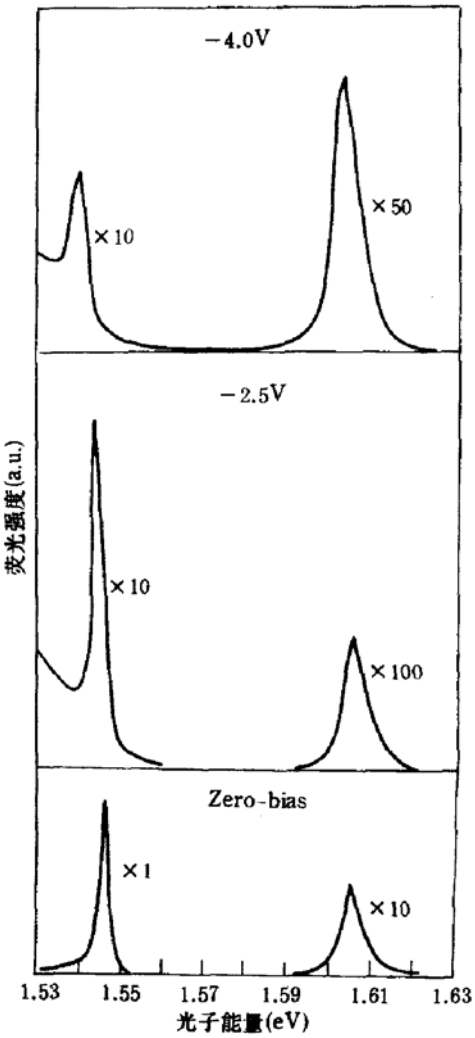

图2 ADQW 样品的 PL 谱

−0.6V 时，窄阱荧光强度单调增加，然而，随着反向偏压的进一步加大，荧光强度迅速下降，在−2.5V 时达到最小值. 之后，随着反向偏压的继续加大，荧光强度又迅速地增加. 从下面的讨论中我们可以判定在偏压为−2.5V 时窄阱的电子基态能级和宽阱的第一激发态能级发生了共振耦合，正是由于电子从窄阱的共振隧穿导致了窄阱荧光强度下降到一个最小值.

在前面的叙述中我们已经给出窄阱电子基态和宽阱第一激发态发生共振耦合时的理论估算电场为 4.4×10^4V/cm. 为了与实验结果进行比较，我们需要计算出偏压为−2.5V 时非对称耦合双阱 p-i-n 二极管中 i 区的电场强度. p-i-n 二极管的内建势 V_b 取为 1.4V. 由于光生载流子的浓度足够低，所以认为外加偏压 V_e 全部加在不掺杂的 i 区. 这样，i 区的电场就近似等于 $(V_b-V_e)/d_{in}$，这里 d_{in} 是 i 区的厚度. 根据这个公式我们计算出−2.5V 偏压时 i 区电场为 4.6×10^4V/cm. 这个电场与我们用传递矩阵方法计算出的共振电场 4.4×10^4V/cm 吻合得相当好. 根据上面的讨论，我们可以判定在偏压为−2.5V 时发生了窄阱基态电子通过宽阱第一激发态的共振隧穿.

在下面我们讨论窄阱荧光峰强度在0.8至−0.6V 偏压范围的单调变化行为. 从−0.6到0.8V 偏压，窄阱荧光峰强度单调下降，到0.8V 正偏压时峰值强度已下降到一个相当小的值，尽管这个值仍然比−2.5V 共振时的荧光峰强度大一些. 这显然意味着在此时窄阱电子的隧穿速率发生了显著的增加. 我们用传递矩阵方法的计算表明，在0.8——0.6V 偏压范围，耦合双阱的能级处于非共振状态，而且窄阱的电子基态能级与宽阱电子基态能级的能量间距大于或等于51meV，这显然高于 GaAs/AlGaAs 量子阱系统中的 LO 声子能量. 在这种情况下，通过 LO 声子发射的光学声子辅助隧穿的重要性已被证实[5-7,10]. 特别是当阱间能级的能量差接近或者等于一个 LO 声子时，隧穿速率会显著增加.

体材料 GaAs 的 LO 声子能量为36meV，体材料 AlAs 的 LO 声子能量为50meV. 在 GaAs/GaAlAs 量子阱材料内存在类 GaAs、类 AlAs 以及界面声子等一系列新模式 LO 声子，它们的能量落在30−50meV 范围[10]. 因此，当相邻量子阱间能级的能量差落在这个能量范围或者大于这个范围的 LO 声子能量时，LO 声子发射辅助隧穿可明显增加载流子的阱间非共振隧穿. 由于我们的非对称耦合双阱样品在0.8V 到−0.6V 偏压范围，窄阱和宽阱电子基态能级之间的能量差明显大于50meV，也就是说大于任何一种可能存在于 GaAs/GaAlAs 量子阱系统内的 LO 声子特征能量，因此，此时 LO 声子辅助隧穿将起重要作用. 我们有理由认为在−0.6到0.8V 偏压范围，窄阱荧光强度的下降是由于 LO 声子

辅助隧穿引起的. 而且，可能有数种模式的 LO 声子参与了这一非共振阱间隧穿过程. 但是显然不同模式的 LO 声子的贡献大小不同，那么哪一种模式的 LO 声子在隧穿过程占据主导地位呢?这是一个有着明显物理意义的问题. 从图3我们可知，在0. 8V 偏压时，窄阱荧光峰强度下降到一个较小的值. 在这个偏压时，窄阱基态能级和宽阱基态能级之间的能量差为51meV，这个值十分接近于类 AlAs 模式 LO 声子50meV 的能量. 事实上，我们理论估算出的51meV 的能量差应该减去一个修正项，这个修正项来自于电子和空穴的阱内分离所引起的对内电场的屏蔽效应，这个修正项的大小与激发光强度有关[9]. 在中低激发功率情况下，这个修正值可能为几个 meV[10]. 因此，在0. 8V 偏压时，窄阱和宽阱电子基态能级之间的能量差十分接近于一个类 AlAs LO 声子的能量. 所以，我们认为来自于 GaAlAs 势垒层的类 AlAs LO 声子在光学声子辅助隧穿过程中占据主导地位. 在我们的一项关于非对称耦合双阱中电子非共振隧穿速率的激发光功率依赖研究中，已经得到了一个相同的结论[9]. Goodnick[11]等的一项关于耦合阱子能级间电子弛豫的 Moute Carlo 计算表明，在能量允许的情况下，阱间弛豫主要通过势垒中的 AlGaAs-like 模式 LO 声子进行，而不是通过 GaAs-like 模式 LO 声子. 我们的结果与他们的理论计算是相符的.

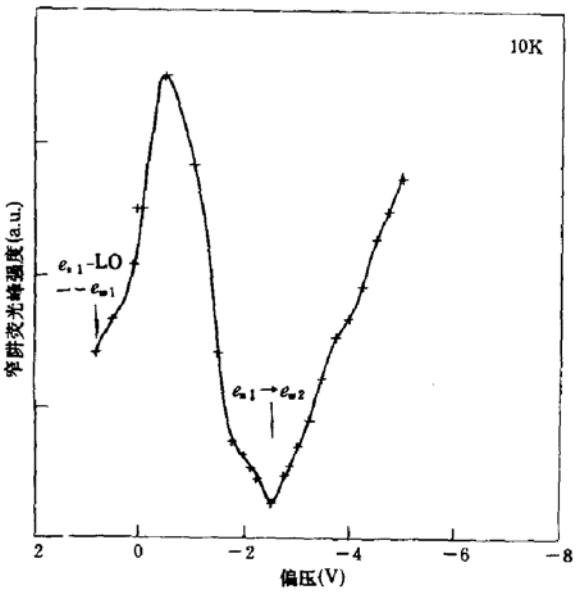

图3　窄阱荧光峰强度随偏压的变化关系，在偏压为−2. 5V 时荧光峰强度达到一个最小值，此时发生电子从窄阱的共振隧穿. 在偏压为+0. 8V 时荧光峰强度达到一个较小的值，是由于类 AlAs LO 声子辅助隧穿引起的

综上所述，我们用稳态光荧光方法清楚地证明了偏压作用下的非对称耦合双阱结构中电子隧穿速率的共振增强. 此外，还观察到了 LO 声子辅助隧穿现象，并认为来自于 GaAlAs 势垒层的类 AlAs LO 声子在声子辅助隧穿过程居于主导地位.

致谢：感谢吴荣汉研究员在制备二极管和封松林博士在 *I-V* 测量上所给予的大力帮助. 特别感谢郑厚植研究员富有启发性的讨论.

参 考 文 献

[1] R. Tsu and L. Esaki, *Appl. Phys. Lett.*, **22**, 562(1973).
[2] F. Capasso, K. Mohammed, and A. Y. Cho, *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-22**, 1853(1986).
[3] M. Nido, *et al.*, Proc. SPIE Vol. 1268, 177(1990).
[4] D. Y. Oberli, *et al.*, *Phys. Rev.*, **B40**, 3028(1989).
[5] D. Y. Oberli, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 1239(1990).
[6] S. Muto, *et al.*, *Appl. Phys. Letct.*, **58**, 2393(1991).
[7] K. Kuroyanagi, *et al.*, *Semicond. Sci. Technol.*, **7**, B424(1992).
[8] Perng-fei Yuh and K. L. Wang, *Phys. Rev.*, **B38**, 8377(1988).
[9] Shijie Xu, *et al.*, 即将在 *Superlatt. Microstruct.* 上发表.
[10] T. Matsusue, *et al.*, *Phys. Rev.*, **B42**, 5719(1990).
[11] S. M. Goodnick and J. E. Lary, *Semicond. Sci. Technol.*, **7**, B109(1992).

Optical Evidence of Carrier Resonant and LO-Phonon-Assisted Tunneling in an Asymmetric Coupled Quantum Wells

Xu Shijie*+ Jiang Desheng* Li Guohua* Zhang Yaohui*
Luo Jinsheng+
*National Laboratory for Superlattices and Microstructures,
Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing 100083
+Department of Electronic Engineering. Xi'an Jiaotong University,
Xi'an 710049
(Received 8 October 1992)

Abstract

Tunneling phenomena of electrons in a biased GaAs/$Ga_{0.35}Al_{0.65}As$/GaAs asymmetric coupled quantum well(ADQW) structure have been investigated by using steady-state Photoluminescence. The effects of resonant tunneling and LO-phonon-assisted tunneling for electrons from the narrow well to the wide well have obviously been observed. It has also been demonstrated that AlAs-like LO phonons from the GaAlAs tunnel barriers play a deminant role in the LO-phonon-assisted process.

PACC: 7865, 7340L