

V 形 GaAs/AlGaAs 量子线结构的微区光致发光谱研究 *

李志锋 陆 卫 刘兴权 沈学础

(中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家实验室, 上海 200083)

Y. FU M. WILLANDER

(Microelectronic Center at Chalmers ,Physical Electronics and Photonics ,
Department of Physics ,University of Göteborg and Chalmers University of
Technology ,Fysikgränd 3 ,S-412 96 Göteborg Sweden)

H. H. TAN C. JAGADISH

(Department of Electronic Material Engineering ,Research School of Physical Science
and Engineering ,the Australian National University ,Canberra 0200 ,A. C. T. ,Australia)

(1999 年 12 月 18 日收到 2000 年 2 月 19 日收到修改稿)

在室温下用显微光致发光的方法对单根 V 形 GaAs/AlGaAs 量子线进行了沿垂直于量子线方向的空间分辨扫描测试, 观察到各种量子结构的光致发光谱随空间位置的变化。在量子线区域附近观察到来自量子阱 (QWR)、颈部量子阱 (NQWL) 和垂直量子阱 (VQWL) 等各种结构的发光, 而在距离量子线约 $1 \mu\text{m}$ 以远的发光光谱表现出侧面量子阱 (SQWL) 的发光。对全部发光光谱用高斯线形进行了拟合, 发现 QWR 和 SQWL 的发光包含了两个荧光峰, 将它们分别归诸为电子到轻、重空穴的跃迁。拟合后发光强度的空间变化直接确定了与量子线结构相关的发光起源, 并且反映出由于载流子由 SQWL 迁移进入 QWR 造成 SQWL 发光峰的淬灭。

关键词 : V 形 GaAs/AlGaAs 量子线, 显微光致发光, 空间分辨扫描

PACC : 7320 , 7340L , 7855 , 7865

1 引言

在半导体低维异质结构中, V 形量子线由于制备工艺简单并且具有优良的界面, 因而存在极大的器件应用潜力, 吸引了众多研究者的注意^[1-4]。V 形量子线结构通过在 V 形衬底上外延生长直接得到, 这种准一维量子线结构的重要特征之一是在量子线附近具有非常复杂的结构, 因为量子线区域同时存在 (100)、(111) 和 (311) 等各种晶面, 在生长过程中不同的生长模式之间相互激烈竞争并导致不同种类的低维结构, 即 (111) 侧面量子阱 (Side-wall Quantum Well, 简称 SOWL)、顶部 (100) 量子阱 (Top Quantum Well, TQWL)、(100) 量子线 (Quantum Wire, QWR) 以及 (311) 颈部区域量子阱 (Neck Quantum Well, NQWL)。这些量子结构在光致发光

谱中也同时出现并且相互竞争, 使得光致发光谱成为具有多种峰位的复杂结构, 给峰位的指认带来极大的困难。

近年来发展起来的扫描激光显微谱方法^[5]为揭示功能材料的微区结构提供了有力的手段, 其中显微光致发光谱 (μ -PL) 对半导体低维结构的研究取得了许多重要进展^[6-8]。由于采用了高倍数的显微镜使得探测光斑的直径能够小于 $1 \mu\text{m}$, 这种接近光学衍射极限的光斑直径与许多低维结构中载流子的迁移长度等特征尺寸相匹配, 因而使我们能够更加深入细致地了解半导体低维结构的光学性质。本文利用室温显微光致发光方法对 V 形量子线进行沿垂直于线的方向扫描测试, 观察到光致发光谱线随空间距离的变化。通过分析不同区域的结构特征直接地揭示了单根 V 形量子线的发光特性。

* 上海市青年科技启明星项目(批准号 98QA14004)与国家重点基础研究发展规划项目(批准号 G1998061404)资助的课题。

2 实验

V形GaAs/A₁GaAs量子线样品用金属有机化学气相沉积法(MOCVD)制备,详细的制备过程以及结构尺寸如文献[8]所描述。图1示出了样品的剖面透射电子显微镜照片和V形量子线各部分的量子结构以及室温显微光致发光测量的示意图。由于相邻两根V形量子线之间的间距为4 μm,而探测光斑的直径约为0.8 μm,因此能够实现在空间上区分出量子线附近的结构与侧面量子阱结构的发光特征。

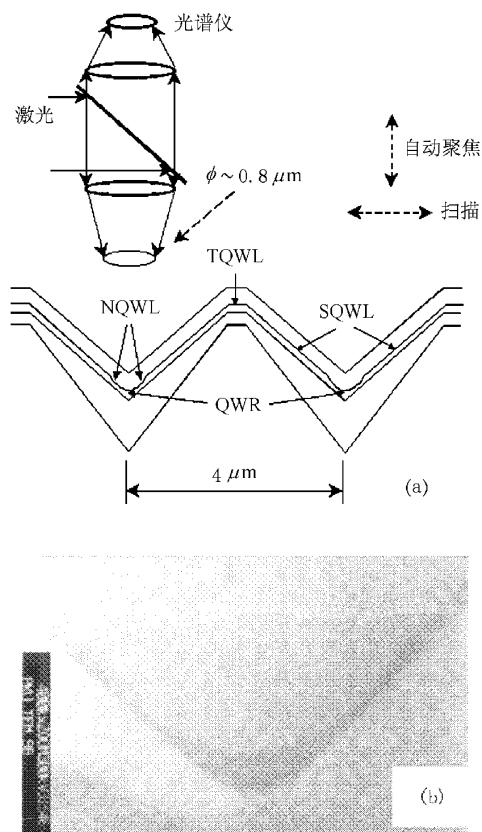


图1 V形量子线中各种量子结构和共焦显微光致发光测量示意图(a)以及量子线的剖面透射电子显微照片(b)

光致发光谱的扫描在Dilor LabRam-INFINITY显微拉曼光谱仪上进行,激发光为Ar⁺激光的514.5 nm线,扫描方向垂直于量子线方向,扫描范围以量子线为中心共6 μm,扫描步进长度0.1 μm。到达样品表面的激发激光功率约为80 kW/cm²。测试过程中对光谱仪采用共焦设置^[9]使得光谱仪的空间检测范围在激发激光的焦点处,共焦直

径约0.8 μm。

3 结果与讨论

如前所述及图1所示,在V形量子线中同时存在着多种量子结构,有SQWL,TQWL,QWR及NQWL。此外在AlGaAs生长过程中由于Ga原子的迁移长度大于Al原子,造成Ga原子往V形槽底部积聚,因而从V形槽的底部开始在AlGaAs层中沿生长方向形成一条低Al组分的垂直结构,称为垂直量子阱(Vertical Quantum Well,VQWL)。在这些结构中QWR,NQWL与VQWL在沿生长方向上,也就是沿PL的探测方向上几乎是位于同一处空间位置,而TQWL位于V形槽的顶部,在V形槽的绝大部分面积上分布着侧面量子阱SQWL。鉴于激发光斑/共焦探测直径约为0.8 μm,在全部扫描过程中SQWL始终被激光所激发,而当扫描至QWR区域时,TQWL的PL峰被排除在外。同样在TQWL区域不可能出现QWR,NQWL和VQWL的PL峰。

取量子线中心的位置为坐标零点,图2示出了-1 μm,0,+1 μm三处的PL谱。图中位于1.422 eV的峰从峰形和峰位上很容易判断是来自于GaAs本体材料的发光,其峰形是典型的具有抛物线能带的直接禁带半导体的带—带跃迁的形状。而位于2.066 eV处的峰经计算^[10]为Al_{0.5}Ga_{0.5}As的导带X能谷到价带Γ点的跃迁。势阱和势垒体材料发光峰之间的峰来自受到限制的量子结构。可以看到,在

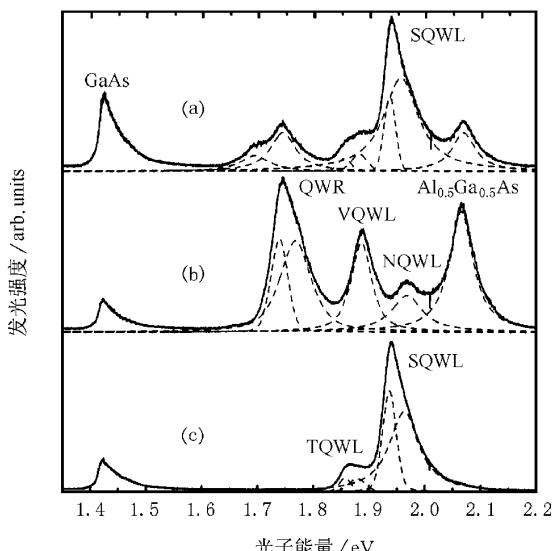


图2 显微光致发光扫描的三处典型PL谱(a)距量子线左侧1 μm处(b)量子线中心处(c)量子线右侧1 μm处

量子线中心区域(图2(b))的主要发光特征与其他两处极不相同,而后两者(图2(a)和(c))的主要峰位相同。尽管在图2(a)中仍然保留了一些图2(b)的特征,但已不是主要特征。在量子线附近的扫描中位于1.743, 1.886和1.967 eV处的峰总是同时出现,可以确认这些光谱结构与量子线附近的微结构有关,结合理论计算^[11]可将它们分别指认为QWR、VQWL和NQWL的发光。在离开量子线约1 μm处这些峰位基本消失,取代的是位于1.939 eV的单峰以及1.865 eV附近的小峰,这些峰在离开量子线更远的距离上基本保持不变,可以认为是与侧面量子阱有关,将1.939 eV的峰指认为SQWL的发光。1.865 eV处的弱峰在扫描过程中始终与1.939 eV的SQWL峰相伴随,这是顶部量子阱TQWL的发光峰。

为了更好地判断各发光峰的起源我们对所有扫描得到的光致发光谱线中除GaAs发光峰外的其他峰位用高斯线形进行了拟合。图2中的虚线示出了拟合时所用峰位的各种分量,同时用点线表示拟合计算的理论曲线。可以看到,理论和实验曲线吻合良好。位于1.743 eV的QWR和1.939 eV的SQWL发光峰具有不对称线形,可将其分解为两个对称的高斯线形峰。QWR的峰分解后成为1.738和1.768 eV的两个峰,而SQWL的峰可分解为1.935和1.956 eV两个峰。QWR和SQWL发光峰的两个成分可认为是由于量子结构中的轻重空穴能级分裂后所形成的电子分别到轻、重空穴能级的跃迁,分别标示为QWR1、QWR2、SQWL1和SQWL2。图3给出了这四种发光成分的积分强度随空间位置的变化。可以看到,图3(a)(b)中的QWR1和QWR2的发光峰主要集中在原点附近-1 μm到+1 μm的范围内,并且强度以中心处为最强,偏离中心处的QWR区域时其发光强度逐渐减弱。这是合理的,因为QWR区域的横向范围仅为约15 nm,当激发激光的光斑外围开始照射到QWR上时其发光才能够开始被探测到。由于激光光斑上的能量分布为高斯线形,当光斑中心与QWR位置重合时对它的激发最强,因此QWR的发光强度也最大。在QWR发光区域内基本上不存在SQWL的发光峰,一旦PL扫描移出该区域则SQWL的发光峰开始出现,其强度随着离开QWR区域的距离的增加而增加,在1.5—2.0 μm附近强度达到最大值(图3(c)(d))。这时PL扫描光点应处于V形槽的顶部。图3中发

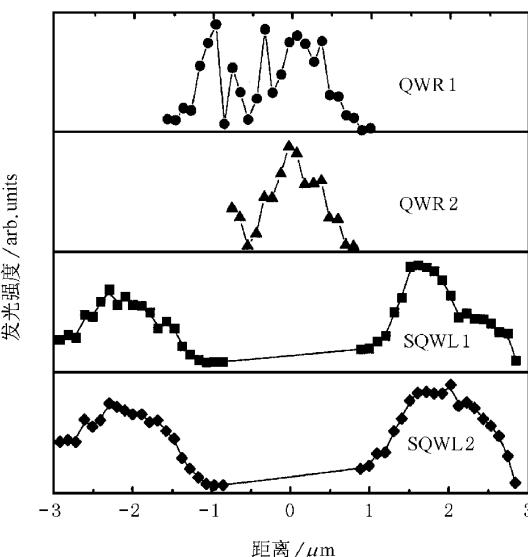


图3 扫描显微光致发光谱拟合后量子线(QWR)和侧面量子阱(SQWL)发光峰各成分的积分强度随空间位置的变化

光强度变化的特征长度可以看到,量子线区域的发光出现在约±1 μm的范围内,略大于激发光斑的标称直径0.8 μm。我们认为这是由于V形量子线的非平面结构使得扫描过程中实际激发的面积偏离聚焦平面所致。这也是为什么在扫描光谱中一旦SQWL的发光峰占据主导地位时TQWL的峰也随即出现,不存在一个只有SQWL发光峰的空间位置的原因。

为什么当QWR的发光峰出现后SQWL的发光峰消失?我们认为这是由于载流子的迁移造成的。在远离QWR的区域,光激发的载流子在激发/探测区域内复合,表现为SQWL的发光峰。而一旦激发/探测区域接近QWR区域时,由于QWR的电子与空穴态的能量低于SQWL的电子与空穴态,从而使SQWL区域的光生载流子迁移到QWR区域复合,因此造成SQWL的发光淬灭。由此PL的空间扫描的强度分析能直接反映载流子在这种量子结构中的迁移长度。具体的方法建立正在进行之中。尽管TQWL的电子与空穴态的能量也低于SQWL,类似的载流子迁移过程并不出现在TQWL区域。具体分析载流子的产生—复合过程可知,由于AlGaAs势垒层的厚度远大于量子结构的势阱层厚度,因此主要的光生载流子产生过程发生在势垒层中,经过向量子阱的迁移然后复合。在V形量子线结构中垂直量子阱VQWL是载流子向量子线迁移的重要通道^[12]。而对于TQWL则不存在这样的通道,因此限

制了 TQWL 对载流子的俘获,也就限制了它的发光.

4 结 论

我们对单根 V 形 GaAs/AlGaAs 量子线在室温下进行了空间分辨的光致发光光谱显微扫描测试, 观察到各种量子结构的光致发光谱随空间位置的变化. 在量子线区域附近 QWR, VQWL 和 NQWL 等各种结构的发光分别位于 1.743, 1.886 和 1.967 eV 而在距离量子线约 $1 \mu\text{m}$ 以远的发光光谱表现出位于 1.939 eV 的 SQWL 发光. 对发光光谱的高斯线形拟合显示 QWR 和 SQWL 的发光包含了两种成分, 将它们分别归诸为电子从导带基态到价带轻、重空穴基态的跃迁. 拟合后发光强度的空间变化明确地揭示了发光起源, 并且反映出由于载流子的迁移造成 SQWL 发光峰的淬灭.

[1] E. Kapon, D. M. Hwang, R. Bhat, *Phys. Rev. Lett.*, **63**(1989), 430.

[2] J. F. Ryan, A. C. Maciel, L. Rota, K. Turner, J. M. Freyland, U.

Marti, D. Martin, F. Morier-Gemoud, F. K. Reinhart, *Rhys. Rev.*, **B53**(1996), R4225.

- [3] Y. Kim, S. Yuan, R. Leon, C. Jagadish, M. Gal, M. B. Johnston, M. R. Phillips, M. A. Stevens, D. Dalceff, J. Zou, D. J. H. Cockayne, *J. Appl. Phys.*, **80**(1996), 5014.
- [4] X. L. Wang, M. Ogura, H. Matsuhata, *Appl. Phys. Lett.*, **66**(1995), 1506.
- [5] J. Bajaj, W. E. Tenant, R. Zucca, S. J. C. Irvine, *Semicond. Sci. Technol.*, **8**(1993), 872.
- [6] J. Y. Marzin, J. M. Gerard, A. Izrael, D. Barrier, *Phys. Rev. Lett.*, **73**(1994), 716.
- [7] J. Bellessa, V. Voliotis, R. Grousson, X. L. Wang, M. Ogura, H. Matsuhata, *Appl. Phys. Lett.*, **71**(1997), 2481.
- [8] X. Q. Liu, W. Lu, Z. F. Li, Y. D. Chen, S. C. Shen, Y. Fu, M. Willander, H. H. Tan, S. Yuan, C. Jagadish, J. Zou, D. J. H. Cockayne, *Appl. Phys. Lett.*, **75**(1999), 3339.
- [9] G. Turrel, J. Corset, *Raman Microscopy: Developments and Applications* (Academic Press, London, 1996).
- [10] L. Pavesi, M. Guzzi, *J. Appl. Phys.*, **75**(1994), 4779.
- [11] Y. Fu, M. Willander, X. Q. Liu, W. Lu, S. C. Shen, H. H. Tan, S. Yuan, C. Jagadish, *Superlattices & Microstructures*, **26**(1999), 307.
- [12] C. Kiener, L. Rota, A. C. Maciel, J. M. Freyland, J. F. Ryan, *Appl. Phys. Lett.*, **68**(1996), 2061.

THE MICRO-PHOTOLUMINESCENCE OF A SINGLE V-GROOVE GaAs/AlGaAs QUANTUM WIRE^{*}

LI ZHI-FENG LU WEI LIU XING-QUAN SHEN XUE-CHU

(National laboratory for infrared physics ,Shanghai institute of technical physics ,
Chinese academy of sciences ,Shanghai 200083 ,China)

Y. FU M. WILLANDER

(Microelectronic Center at Chalmers ,Physical Electronics and Photonics ,
Department of Physics ,University of Göteborg and Chalmers University of
Technology ,Fysikgränd 3 ,S-412 96 Göteborg ,Sweden)

H. H. TAN C. JAGADISH

(Department of Electronic Material Engineering ,Research School of Physical Science
and Engineering ,the Australian National University ,Canberra 0200 ,A. C. T. ,Australia)
(Received 18 December 1999 ; revised manuscript received 19 February 2000)

ABSTRACT

The micro-photoluminescence(μ -PL) scan has been performed on a single V-groove GaAs/AlGaAs quantum wire in the direction perpendicular to the wire. The variation of μ -PL spectra from various quantum structures with different spatial positions has been observed. In the region of quantum wire(QWR) the PL spectra contain the peaks from QWR , necking quantum well(NQWL) and vertical quantum well(VQWL), while in the area about 1 μ m and farther away from the QWR the PL spectra show the peaks from side-wall quantum well(SQWL) and top quantum well(TQWL). All the scanned PL spectra have been fitted by Gauss line shape. The asymmetric PL peaks of QWR and SQWL were decomposed into two components which were ascribed to the optical transitions between the electron ground state in the conduction band and the heavy hole and the light hole ground states in the valence band. The variation of PL intensity from luminescent components with the spatial positions directly demonstrates the origin of the photoluminescence relating to different quantum structures and reflects the carrier transfer from SQWL to QWR resulting in the PL quenching of SQWL.

Keywords :V-groove quantum wire , micro-photoluminescence , spatial resolved scanning

PACC :7320 , 7340L , 7855 , 7865

^{*}Project supported by the Shanghai Qi Ming Xing Fund (98QA14004), and by the State Key Basic Research Foundation of China (G1998061404).