

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线(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($\mu\text{-PL}$)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/AlGaAs 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 $4\text{ }\mu\text{m}$,而探测光斑的直径约为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$,因此能够实现在空间上区分量子线附近的结构与侧面量子阱结构的发光特征.

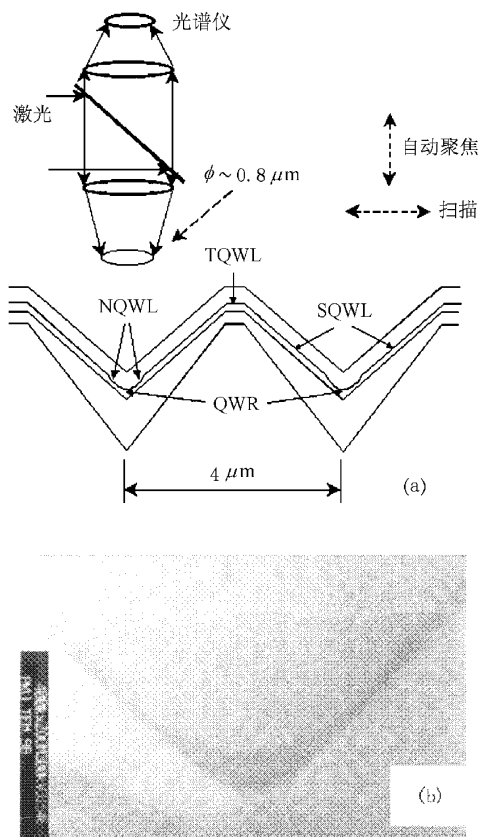


图 1 V 形量子线中各种量子结构和共焦显微光致发光测量示意图 (a) 以及量子线的剖面透射电子显微照片 (b)

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 ,扫描范围为以量子线为中心共 $6\text{ }\mu\text{m}$,扫描步进长度 $0.1\text{ }\mu\text{m}$.到达样品表面的激发激光功率约为 80 kW/cm^2 .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 $0.8\text{ }\mu\text{m}$.

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 $0.8\text{ }\mu\text{m}$,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 $-1\text{ }\mu\text{m}$, 0 , $+1\text{ }\mu\text{m}$ 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 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 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 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

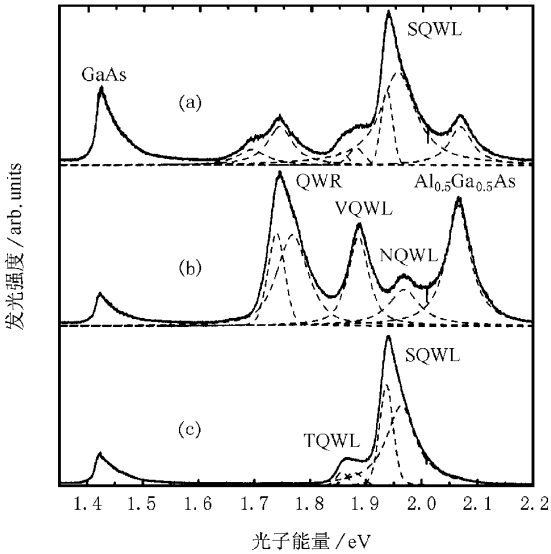


图 2 显微光致发光扫描的三处典型 PL 谱 (a) 距量子线左侧 $1\text{ }\mu\text{m}$ 处 (b) 量子线中心处 (c) 量子线右侧 $1\text{ }\mu\text{m}$ 处

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 $1\text{ }\mu\text{m}$ 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、重空穴子能级的跃迁,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 $-1\text{ }\mu\text{m}$ 到 $+1\text{ }\mu\text{m}$ 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 位置重合时对其的激发最强,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 $1.5\text{--}2.0\text{ }\mu\text{m}$ 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

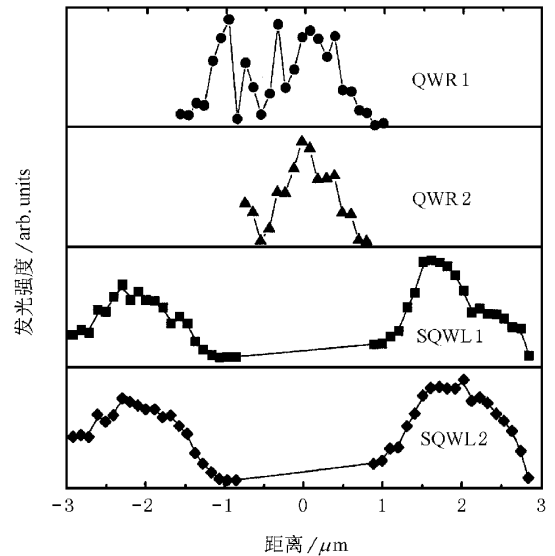


图 3 扫描显微光致发光谱拟合后量子线(QWR)和侧面量子阱(SQWL)发光峰各成分的积分强度随空间位置的变化

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 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ 的范围内,略大于激发光斑的标称直径 $0.8\text{ }\mu\text{m}$.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 μm 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. Let.* , **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 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. Tennant ,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) ,A779.
[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 96Göteborg ,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 $1\text{ }\mu\text{m}$ 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).