

# GaAs/AlAs 脊形量子线的光学研究

程文超 张子平 李国华 牛智川 徐仲英

(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** 利用分子束外延技术,在 GaAs 两个(113)晶面的脊形交接处制备了量子线。在低温 PL 谱上,观测到量子线的发光峰。通过微区、变温和偏振的发光测量,证实了量子限制效应和一维量子线在上述结构中的存在。

PACC: 7320, 7855

由于半导体纳米结构在介观物理研究和光电器件应用中的重要性,日益受到人们的重视,并利用一切可能的现代科学技术去制备低维结构。目前已利用全息光刻<sup>[1]</sup>、电子束刻蚀<sup>[2]</sup>、反应离子刻蚀<sup>[3]</sup>和湿法化学刻蚀<sup>[4]</sup>等技术制备出几十纳米的量子线和量子点。与此同时,利用生长技术制备低维结构也取得了很大进展<sup>[5,6]</sup>。

光学技术是研究微结构物理机制的有效手段。本文报告的是利用分子束外延技术(MBE),在相邻面为(113)方向的 GaAs/AlAs 脊形结构上生长沿(110)方向的 GaAs 量子线。通过变温和微区的光荧光测量,以及偏振光谱特性的研究,观察到脊形结构产生的量子限制效应和一维量子线的发光峰,证明了使用上述技术可以制造出高质量的一维量子线。

实验中使用的样品是由 MBE 技术生长的,首先在不掺杂的 GaAs(001)衬底上,使用常规的光刻技术在(001)面上刻出其台面宽度小于  $2\mu\text{m}$ ,周期为  $3.5\mu\text{m}$ ,侧面为(111)面,沿(110)方向的条状台型结构。然后放入 MBE 生长室内进行外延生长,先生长 300nm 厚的 GaAs 缓冲层,在外延生长过程中,在台面上形成一个相邻面为(113)方向的脊形结构。然后,在其上交替生长作为垒的 AlAs 层和作为阱的 GaAs 层,最后在 AlAs 垒层生长约为 200nm 的  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  盖层。为了增强发光强度生长了三层 GaAs 量子阱。详细的生长机理和制备工艺请看参考文献[7]。

光致发光测量在配有显微光路的 JY-HRD1 双光栅单色仪上进行,样品被安装在 APD 闭循环制冷器的冷头上,测量温度 10~300K,Ar<sup>+</sup> 离子激光器的 488nm 谱线作为激发源,激发功率密度约  $100\text{W}/\text{cm}^2$ 。为防止样品的振动,测量微区光谱时,直接将样品放在液氮中的冷头上,此时的激发光斑直径约 2 微米左右。发光谱经单色仪分光后,由 GaAs 光电倍增

程文超 男,1940 年出生,副研,现从事半导体低维输运和光学研究  
张子平 男,副研究员,博士,现从事半导体低维物理研究  
李国华 男,1945 年出生,研究员,现从事半导体光谱研究  
1998-01-12 收到,1998-04-07 定稿

管收集,光电计数器计数 样品结构由日立 H-9000NA 电镜分析.

为了检查样品的质量和标定样品的尺寸,使用透射电子显微镜(TEM)对该样品进行形貌分析,图 1 给出了量子阱剖面的 TEM 照片,从中可以看到两个夹角为  $129.6^\circ$ 、宽为  $10\text{nm}$

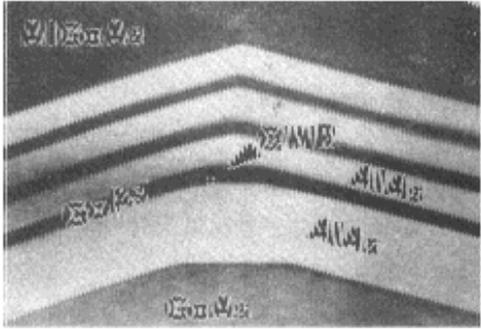


图 1 在非平面结构脊形部位的剖面 TEM 照片

的(113)面量子阱相交,在脊的尖端形成量子线.由于不同晶面的生长速度不同,在(001)面上的生长速度快于(111)面和(113)面上的生长速度,在脊的尖端大约  $50\text{nm}$  的范围内,形成一个新月形结构,其中心部分的厚度与侧面的厚度相比,大约是  $6/5$ .采用通常的 K. P. 模型,可以得到各量子阱束缚态的跃迁能量,(001)谷底量子阱、(113)侧面量子阱和(001)脊形量子线位置的跃迁能量分别为  $1.547$ 、 $1.598$  和  $1.552\text{eV}$ .

图 2 表示了不同温度下,对上述样品测得的 PL 谱,在  $10\text{K}$  的发光谱中观察到四个峰,标为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ ,他们的能量位置分别为  $1.515$ 、 $1.550$ 、 $1.569$  和  $1.595\text{eV}$ ,这个结果和其他文章观察到的结果是相类似的<sup>[5]</sup>.实验结果与计算结果相比,可以确定能量为  $1.515\text{eV}$  的  $a$  峰是体 GaAs 材料的自由激子的发光峰, $b$  峰是沟底量子阱的荧光峰和  $d$  峰是由侧面量子阱形成的荧光峰,这些能量位置的分析是和理论计算结果相一致  $c$  峰应该对应于脊形量子线的荧光峰,但能量位置比计算结果蓝移了  $17\text{meV}$ ,这个蓝移是横向限制效应引起的结果.对于一个  $50\text{nm}$  的横向限制,是不可能引起这样大的蓝移.只有在这个限制区内的很小有效范围,才有可能实现一维横向限制<sup>[8]</sup>.R. L. Schilt 等人的理论研究指出:在两个窄沟道相交的界面处,在很小的区域内,可以形成一个其能量低于沟道能量的束缚态,构成量子线<sup>[9]</sup>.上述理论在 T 型和新月形结构中已得到了证实<sup>[6,10]</sup>.

图 2 表示了不同温度下,对上述样品测得的 PL 谱,在  $10\text{K}$  的发光谱中观察到四个峰,标为  $a$ 、

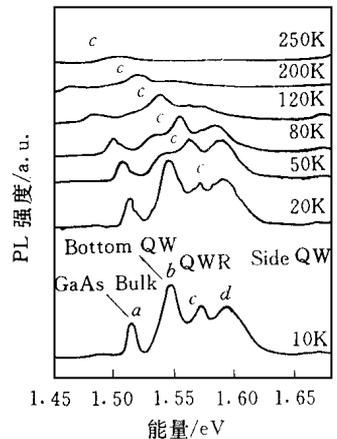


图 2 脊形量子线的变温 PL 谱

为了进一步证实  $c$  峰是量子线的发光峰,测量了  $10\sim 250\text{K}$  的变温光谱.随着温度的增加,峰值位置和形状均发生了改变,当温度增加到  $80\text{K}$  以上时,量子阱的发光强度明显减弱.当温度增加到  $200\text{K}$  时, $a$ 、 $b$ 、 $d$  峰基本消失,而  $c$  峰被保留下来,这是在量子线中量子约束效应增强的结果,由此可以进一步认定  $c$  峰是量子线的发光峰.在图中还可以看到在  $10\text{K}$  到  $80\text{K}$  范围内, $c$  峰强度变化不大,表明低温下量子线中非辐射衰减的贡献是小的.

为了更加准确的证实各峰的来源,我们把激发光的光斑直径由  $200\mu\text{m}$  减到  $2\mu\text{m}$  左右,进行了  $77\text{K}$  微区测量,这样我们可以把不同区域的发光峰区别开来.当激发光照射在脊上时(图 3 中插图所标位置 A),我们观察到两个强峰( $c$  峰和  $d$  峰)和一个弱峰( $b$  峰),如图 3 中实线所示.当激发光照在谷中时(图 3 中插图 B 所示位置), $b$  峰和  $d$  峰成为强峰,而  $c$  峰变得很弱(见图 3 中虚线),这表明了  $b$  峰是来自谷底量子阱的发光, $c$  峰是来自脊上量子线的发光,由于  $d$  峰来自侧面量子阱的发光,所以在两种情况下都可以观察到.由于样品表面不是平面,显微镜聚焦光斑在焦平面外会发生散焦,因此当激光聚焦在脊上时,仍有部分光

照到谷底, 所以此时的光谱中仍能观察到弱的  $b$  峰 反之, 当激光照在谷底时, 仍能观察到弱的  $c$  峰 由于量子限制效应的增强, 量子线的发光强度应强于量子阱的发光强度 但在实验中, 即使在微区注入情况下, 量子线在光斑中只占很小部分, 大部分区域被侧面量子阱占有, 因此在 PL 谱上仍能看到一个很强的  $d$  峰

夏建白等人的理论研究指出<sup>[1]</sup>: 一维量子线的发光强度与入射光的偏振方向有关, 当一维量子线的两个方向的限制相同时, 入射激发光的偏振方向平行于量子线方向( $Y$  方向)时的发光强度应是偏振方向垂直于量子线方向的发光强度的 2 倍 图 4 表示了低温下测得的偏振光谱 图中实线是激发光偏振方向平行于量子线方向时的结果, 虚线是激发光偏振方向垂直量子线方向时的结果 从图可以看出,  $b$  峰和  $d$  峰在两个偏振条件下的发光强度是相同的, 而在  $c$  峰的位置偏振方向平行于量子线的发光强度明显地强于垂直于量子线方向的发光强度 这个结果与理论预言是一致的, 但是由于  $X$ 、 $Z$  方向的限制不同, 发光强度并不满足 2 倍关系

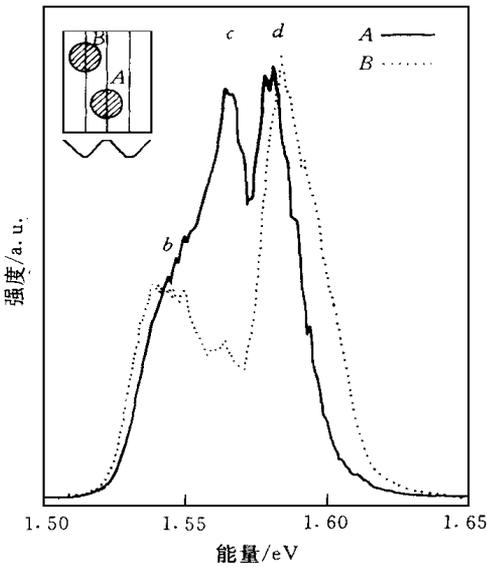


图 3 脊形量子线微区测量 PL 谱  
实线 A 表示光照在脊上的测量结果, 点线 B 表示光照在谷中的测量结果; 插图中 A、B 表示光斑位置

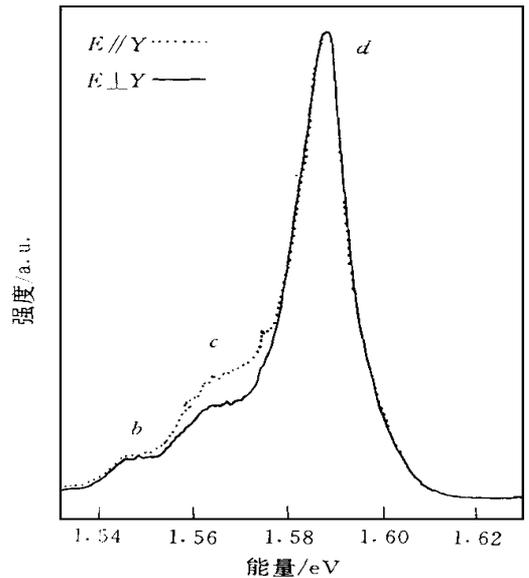


图 4 入射光为偏振光时测得的 PL 谱  
实线表示入射光的偏振方向垂直于量子线的方向, 点线表示入射光的偏振方向平行于量子线的方向

综上所述, 结果归纳如下: 我们利用分子束外延技术, 在 GaAs 两个(113)晶面的交接处得到了脊形量子线 在低温 PL 谱上, 观测到量子线的发光峰, 其能量比量子阱的理论计算结果高 17meV, 表明横向约束引起了蓝移 通过微区、变温和偏振等测量手段, 证实了一维量子线在上述结构中的存在

### 参 考 文 献

[ 1 ] A. S. Plaut, H. Lage, P. Grambow *et al* , Phys. Rev. Lett , 1991, 67: 1642  
[ 2 ] J. M. Calleja, A. R. Goni, B. S. Dennis *et al* , Solid State Commun , 1991, 79: 911

- [ 3 ] J. S Weiner, J. M. Calleja, A. Pinczuk *et al* , Appl Phys Lett , 1993, **63**: 237.
- [ 4 ] F. Hiler, R. Strenz, R. Kuchler *et al* , Semicond Sci Technol , 1993, **8**: 617.
- [ 5 ] H. Akiyama, S. Koshiba, T. Someya *et al* , Phys Rev. Lett , 1994, **72**: 924
- [ 6 ] A. Gustafsson, F. Reinhardt, G. Biasil *et al* , Appl Phys Lett , 1995, **67**: 3673
- [ 7 ] 牛智川, 周增圻, 林耀望, 等, 半导体学报, 1996, **17**: 227.
- [ 8 ] E. Kapon, D. M. Hwang and R. Bhat, Phys Rev. Lett , 1989, **63**: 430
- [ 9 ] R. L. Schilt, D. G. Ravenhall and H. W. Wyld, Phys Rev. B, 1989, **39**: 5476
- [ 10 ] W. Wegscheider, L. N. Pfeiffer, M. M. Dignam *et al* , Phys Rev. Lett , 1993, **71**: 4071.
- [ 11 ] 夏建白, 黄昆, 半导体学报, 1987, **8**: 563

## Optical Studies of GaAs/AlAs Ridge Quantum Wires

Cheng Wenchao, Zhang Ziping, Li Guohua, Niu Zhichuan, Xu Zhongying

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

Received 12 January 1998, revised manuscript received 7 April 1998

**Abstract** We report the fabrication of one-dimensional quantum wires formed at the ridge of the interface between two adjacent (113) GaAs facets grown by MBE. The PL peaks of quantum wires have been observed at low temperature. The quantum confined effect and the existence of one dimensional quantum wires in the above mentioned structures are verified by means of varied temperature, micro and polarized PL measurements.

**PACC:** 7320, 7855