

**GaAs纳米线晶体结构及光学特性**

王鹏华 唐吉龙 亢玉彬 方铤 房丹 王登魁 林逢源 王晓华 魏志鹏

**Crystal structure and optical properties of GaAs nanowires**

Wang Peng-Hua Tang Ji-Long Kang Yu-Bin Fang Xuan Fang Dan Wang Deng-Kui Lin Feng-Yuan  
Wang Xiao-Hua Wei Zhi-Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 087803 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182116

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182116>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

金辅助催化方法制备GaAs和GaAs/InGaAs纳米线结构的形貌表征及生长机理研究

Morphology characterization and growth mechanism of Au-catalyzed GaAs and GaAs/InGaAs nanowires

物理学报. 2018, 67(18): 188101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180220>

Eu掺杂Si纳米线的光致发光特性

Photoluminescence properties of Eu doped Si nanowires

物理学报. 2015, 64(14): 148103 <https://doi.org/10.7498/aps.64.148103>

表面钝化效应对GaAs纳米线电子结构性质影响的第一性原理研究

Effect of surface passivation on the electronic properties of GaAs nanowire:A first-principle study

物理学报. 2017, 66(19): 197302 <https://doi.org/10.7498/aps.66.197302>

量子局域效应和应力对GaSb纳米线电子结构影响的第一性原理研究

First-principles study of effects of quantum confinement and strain on the electronic properties of GaSb nanowires

物理学报. 2015, 64(22): 227303 <https://doi.org/10.7498/aps.64.227303>

空位缺陷及Mg替位对纤锌矿(Ga,Mn)N电子结构和磁光性能的影响

Effects of vacancy defect and Mg substitution on electronic structure, magnetic and optical properties of wurtzite structure (Ga, Mn)N

物理学报. 2016, 65(19): 197501 <https://doi.org/10.7498/aps.65.197501>

十字结构银纳米线的表面等离子极化激元分束特性

Surface plasmon polaritons splitting properties of silver cross nanowires

物理学报. 2015, 64(9): 097303 <https://doi.org/10.7498/aps.64.097303>

## GaAs 纳米线晶体结构及光学特性\*

王鹏华 唐吉龙<sup>†</sup> 亢玉彬 方铨 房丹  
王登魁 林逢源 王晓华 魏志鹏

(长春理工大学, 高功率半导体激光国家重点实验室, 长春 130022)

(2018 年 11 月 30 日收到; 2019 年 2 月 25 日收到修改稿)

采用分子束外延技术在 N 型 Si (111) 衬底上利用自催化生长机制外延砷化镓 (GaAs) 纳米线, 对生长的纳米线进行扫描电子显微镜测试, 纳米线垂直度高, 长度直径均匀度好. 对纳米线进行光致发光 (photoluminescence, PL) 光谱测试, 发现低温 10 K 下两个发光峰 P1 和 P2 分别位于 1.493 eV 和 1.516 eV, 推断可能是纤锌矿/闪锌矿 (WZ/ZB) 混相结构引起的发光以及激子复合引起的发光; 随着温度升高, 发现两峰出现红移, 并通过 Varshni 公式拟合得到变温变化曲线. 对纳米线进行变功率 PL 光谱测试, 发现 P1 位置的峰位随功率增加而蓝移, 而 P2 位置的峰位不变. 通过拟合发现 P1 峰位与功率 1/3 次方成线性相关, 判断可能是 WZ/ZB 混相结构引起的 II 型发光; 同时, 对 P2 位置的峰位进行拟合, P2 为激子复合发光. 对纳米线进行拉曼光谱测试, 从光谱图中发现 GaAs WZ 结构特有的  $E_2$  声子峰, 因此证明生长出的纳米线为 WZ/ZB 混相结构, 并通过高分辨透射电子显微镜更直观地观察到纳米线的混相结构.

**关键词:** GaAs 纳米线, 纤锌矿/闪锌矿混相结构, 光致发光光谱, 拉曼光谱

**PACS:** 78.67.Uh, 61.46.Km, 78.55.-m, 78.30.-j

**DOI:** 10.7498/aps.68.20182116

## 1 引言

III-V 族半导体纳米线材料经过十几年的发展已经在光电器件上展现出很高的应用前景, 在光电探测器 (photodetector)<sup>[1-3]</sup>、发光二极管 (light emitting diode, LED)<sup>[4, 5]</sup>、场效应晶体管 (field effect transistor, FET)<sup>[6-8]</sup> 等器件上得到重要应用. 而 GaAs 作为一种直接带隙半导体材料, 具有高的载流子迁移率<sup>[9-11]</sup> 因此得到更广泛的研究. GaAs 在体材料中形成的晶体结构通常为闪锌矿 (ZB) 结构, 而在纳米线中由于成核机制, 它们可以结晶成纤锌矿 (WZ) 结构, 因此在纳米线中多伴随有 WZ/ZB 混相结构存在<sup>[12]</sup>. 由于 WZ 结构具有与

ZB 结构完全不同的带隙能, 因此也为能带工程创造了新的可能性<sup>[13]</sup>. 虽然对于 WZ/ZB 能带结构的研究有很多<sup>[14-16]</sup>, 但是仍然没有给出确定的带隙能, 对低温下 GaAs ZB 结构与 GaAs WZ 结构带隙差从 -20 meV 到 100 meV 均有报道<sup>[17]</sup>. 因此对于 GaAs 纳米线的晶体结构及发光特性的研究仍然具有重要意义.

现阶段已经采用多种生长方法得到 GaAs 纳米线, 比如金属有机化合物化学气相沉淀 (metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD)<sup>[18-20]</sup>、分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE)<sup>[21-23]</sup> 等. 从生长方式来看大多数采用金 (Au) 催化生长 GaAs 纳米线<sup>[19-22]</sup>, 但 Au 作为一种外来元素, 不仅会对设备造成污染, 还会影响纳米线质量.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11674038, 61704011, 61674021, 61574022)、吉林省科技发展计划 (批准号: 20160204074GX, 20160519007JH, 20160101255JC) 和长春理工大学科技创新基金 (批准号: XJLJG-2016-11, XJLJG-2016-14) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [jl\\_tangcust@163.com](mailto:jl_tangcust@163.com)

2008年, Morral等<sup>[24]</sup>实现了自催化生长 GaAs 纳米线, 这种方法有效地避免了外来金属对纳米线的污染, 并且也有研究发现未使用金催化的纳米线由于避免了中间带隙缺陷, 因此与硅工艺兼容, 在电子、光电以及能源领域展现出良好的前景<sup>[25]</sup>. 因此, 自催化是一种良好的制备 GaAs 纳米线生长方式.

本文采用 MBE 自催化的生长方式外延生长 GaAs 纳米线. 通过扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 对 GaAs 纳米线的形貌进行表征, 表现为高密度、高垂直度且直径、长度均匀的纳米线. 对纳米线进行变温光致发光 (photoluminescence, PL) 光谱测试, 发现 10 K 下两个发光峰分别位于 1.493 eV 和 1.516 eV, 同时, 发光峰随温度的增加均出现了红移. 对纳米线进行变功率 PL 光谱测试, 研究了发光峰出现原因、发光峰强度及峰位随功率的变化规律, 通过对其峰位进行拟合发现两个发光峰分别来自于与 WZ/ZB 混相引起的 II 型及激子复合发光. 最后通过对 GaAs 纳米线 Raman 光谱测试发现 GaAs WZ 结构特有的  $E_2$  声子峰<sup>[26, 27]</sup>, 证明了存在 WZ/ZB 混相结构, 并通过高分辨透射电子显微镜 (high-resolution transmission electron microscopy, HRTEM) 直观地观察到了纳米线的混相结构.

## 2 实验

实验是在超高真空 ( $2 \times 10^{-8}$  Pa) MBE 系统中实现, 所使用的衬底为 N 型 Si (111) 衬底. 实验开始之前需要对衬底进行处理, 先使用浓度为 1 : 10 的氢氟酸 (HF) 溶液对衬底进行刻蚀, 之后再用乙醇溶液超声处理 5 min. 在生长之前首先要对衬底进行除气处理: 第一步, 将衬底放入进样室 (loadlock) 中, 在 200 °C 下加热处理 2 h 以确保除去衬底上的水汽; 第二步, 将衬底转移到预处理室 (buffer) 中, 在 400 °C 下加热处理 2 h 进行预除气; 第三步, 将衬底转移到生长室, 在高温环境下除气 30 min, 完成生长前预处理过程. 在进行生长实验之前, 首先用束流器 (beam flux monitor, BFM) 对生长所需要的 Ga 源、As 源束流进行校准, 得到生长所需的束流, 之后用热偶标称温度对衬底温度进行校准. 实验采用自催化方式进行 GaAs 纳米线的生长, 生长前先进行 Ga 液滴的沉积, 沉积温度为 600 °C, 沉积时间为 35 s. GaAs 纳米线生长温

度为 600 °C, As 束流压 (beam equivalent pressure, BEP) 为  $2.1 \times 10^{-4}$  Pa, V/III 束流比为 22.5, 生长时间为 30 min.

对生长出的 GaAs 纳米线, 采用日立 S-4800 场发射聚焦离子束扫描电子显微镜进行测试, 获得纳米线 SEM 图, 从中获得形貌信息. 采用 HORIBA iHR550 光谱仪进行变温、变功率 PL 光谱测试, 使用 655 nm 半导体二极管激光器作为激发源. 采用 LabRAM HR Evolution, HORIBA 光谱仪获得 GaAs 纳米线的 Raman 光谱, 来确定纳米线结构, 其中激光器波长为 532 nm. 最后采用日本日立 HT7800 透射式电子显微镜测试观察纳米线结构.

## 3 结果与讨论

图 1 为生长的 GaAs 纳米线 SEM 图像以及纳米线长度直径分布情况. 图 1(a) 为 GaAs 纳米线 SEM 侧视图, 可以看出绝大多数纳米线长度及直径分布均匀, 且直立性良好. 图 1(c) 为 GaAs 纳米线平面 SEM 图像, 通过对图上纳米线数量进行测量, 计算出纳米线的密度超过  $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ , 纳米线的垂直度超过 90%, 并且可以看出纳米线分布均匀. 图 1(c) 插图 1(c) 为纳米线形状, 可以看出生长出的 GaAs 纳米线为正六边形, 说明生长出的纳米线结晶质量较好. 图 1(b) 和图 1(d) 为 GaAs 纳米线的长度及直径分布图, 通过测量, 大多数纳米线直径在 60 nm 左右, 长度为 2  $\mu\text{m}$  左右, 并且纳米线直径、长度分布呈现高斯曲线分布.

为了更好地了解样品的发光特性, 对均匀的 GaAs 纳米线进行了 PL 光谱测试, 其测试结果如图 2 所示, 10 K 下出现两个发光峰, 对应的峰位为 1.493 eV 和 1.516 eV, 分别被标记为 P1, P2. 根据相关文献报道, P2 相对应的发光峰来源于与 GaAs 相关的自由激子峰<sup>[28]</sup>, 但是 P1 对应的峰较为复杂, 可能来源于多个方面的因素. 根据相关文献报道在 1.493 eV 左右发光峰有可能是由 C 受主所引起的<sup>[27]</sup>, 也有文献报道由于 Mg 受主所引起的<sup>[28]</sup>, 还有可能是由于 WZ/ZB 混相所引起<sup>[15, 16–29]</sup>. 我们使用高真空度的 MBE 系统进行 GaAs 纳米线外延生长, 在生长前后对真空室的气体成分进行干扰排除, 并没有在真空室中发现存在 C 和 Mg 这两种元素, 同时, 生长腔并没有附带这两种源炉, 因此可以排除生长过程中非故意引进的受主杂质. 而生长过后我们通过真空包装, 几乎不与空

气接触, 因此不会受到空气中其他物质的污染, 并且在相同衬底不同条件下生长出的纳米线, 并没有

出现 P1 峰, 排除了衬底缺陷而导致 P1 峰出现的可能性. 由此我们可以初步判断 P1 位置的发光峰

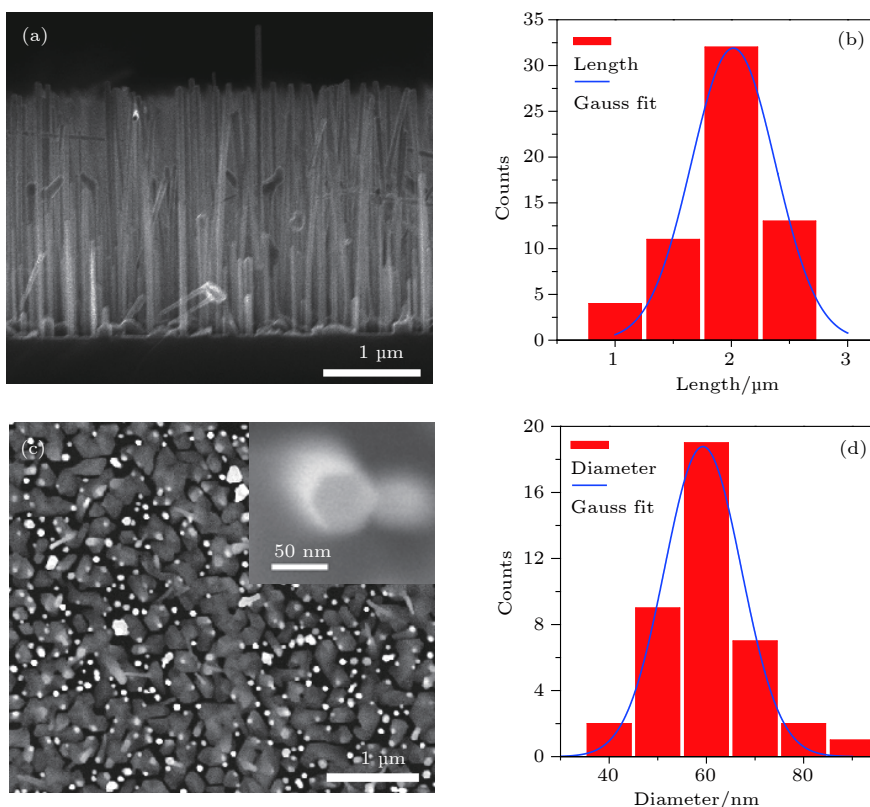


图 1 GaAs 纳米线形貌及纳米线长度直径分布 (a) GaAs 纳米线侧面 SEM 图像; (b) GaAs 纳米线长度分布统计图; (c) GaAs 纳米线平面 SEM 图像, 插图为纳米线形状; (d) GaAs 纳米线直径分布统计图

Fig. 1. The morphology, length, and diameter distribution of GaAs nanowires: (a) Side SEM image of GaAs nanowires; (b) GaAs nanowires length distribution; (c) plane SEM image of GaAs nanowires, inset is the shape of the nanowire; (d) GaAs nanowires diameter distribution.

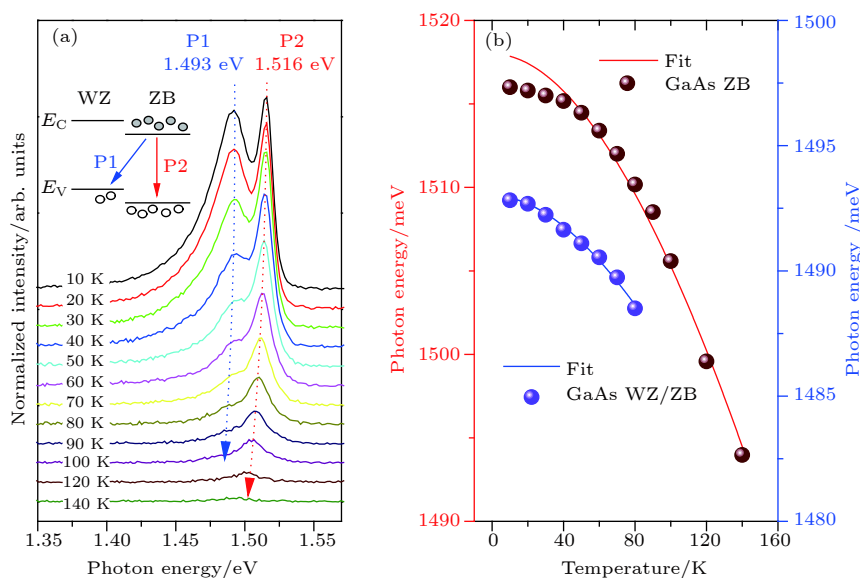


图 2 GaAs 纳米线变温 PL 光谱测试图 (a) 发光峰位随温度 10—140 K 的变化; (b) P1, P2 发光峰峰位随温度变化的拟合曲线  
Fig. 2. Variable power PL spectrum: (a) The change of luminescence peak position with temperature 10–140 K; (b) fitting curve of the peak position of P1 and P2 luminescence with the change of temperature.

可能是由 GaAs 纳米线 WZ/ZB 混相结构引起的.

GaAs 纳米线的变温 PL 光谱图如图 2(a) 所示, 激发功率为 100 mW. 从图中可以看出, 随着温度从 10 K 到 140 K 的变化, P1, P2 对应的峰位均出现红移的现象. 同时对 P1, P2 的发光峰进行分峰拟合处理, 并分别对 P1, P2 峰位采用 Varshni 公式进行拟合, 拟合公式如下 [30]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \alpha T^2 / (T + \beta), \quad (1)$$

其中  $E_g(0)$  为温度为 0 K 时 GaAs 纳米线的带隙,  $E_g(T)$  为温度为  $T$  时 GaAs 纳米线的带隙;  $\alpha, \beta$  为常数. 拟合后的曲线如图 2(b) 所示, 其中紫色小球对应横坐标为不同温度下的 P1 峰峰位, 蓝线为拟合后曲线, 褐色小球对应横坐标为不同温度下的 P2 峰峰位, 红线为拟合后曲线, 可以看出 P1, P2 随温度升高带隙变化趋势相同且呈减小趋势. 我们对 GaAs 纳米线的能带结构进行分析, 如图 2(a) 中插图所示, 其中 GaAs WZ 与 GaAs ZB 价带能量差为 23 meV, 两峰分别由于 GaAs WZ/ZB 以及 GaAs ZB 所产生的发光峰.

为了更进一步确定 P1 峰来源于 GaAs 纳米线 WZ/ZB 混相的发光, 我们对 GaAs 纳米线进行

变功率 PL 光谱的测试, 测试在 10 K 下进行, 其测试的结果如图 3(a) 所示. 从图中可以得到随着功率的变化, 从 1 mW 增加到 100 mW, P2 的峰位几乎没有变化, 而 P1 的峰位有小幅度的蓝移, 这可能是由于功率变化导致 GaAs 纳米线 ZB 结构能带弯曲所引起 [31], 而对应的峰强随着功率的变化出现明显的变化. 为了进一步说明峰强随功率的变化规律, 对 P1, P2 峰强的比值随功率的变化关系在坐标系中表示出来, 如图 3(a) 中插图所示. 我们发现随着功率的增加, P2/P1 峰的峰值强度比值呈现递增的关系, 这可能由于 GaAs 纳米线 WZ 和 ZB 结构对功率变化响应度不同所引起.

对 P1 位置的峰进行分峰处理, 并对峰位和功率之间建立起函数关系, 关系图如图 3(b) 所示, 其中横坐标为功率的 1/3 次方, 纵坐标为峰位所对应的能量, 发现峰位与功率的 1/3 次方呈线性相关关系:

$$E \propto P^{1/3}. \quad (2)$$

根据文献报道当峰位与功率的 1/3 次方成线性相关, 可以判断这个峰符合 WZ/ZB II 型结构的特征 [28], 因此可以确定 P1 发光峰是由 WZ/ZB 混相

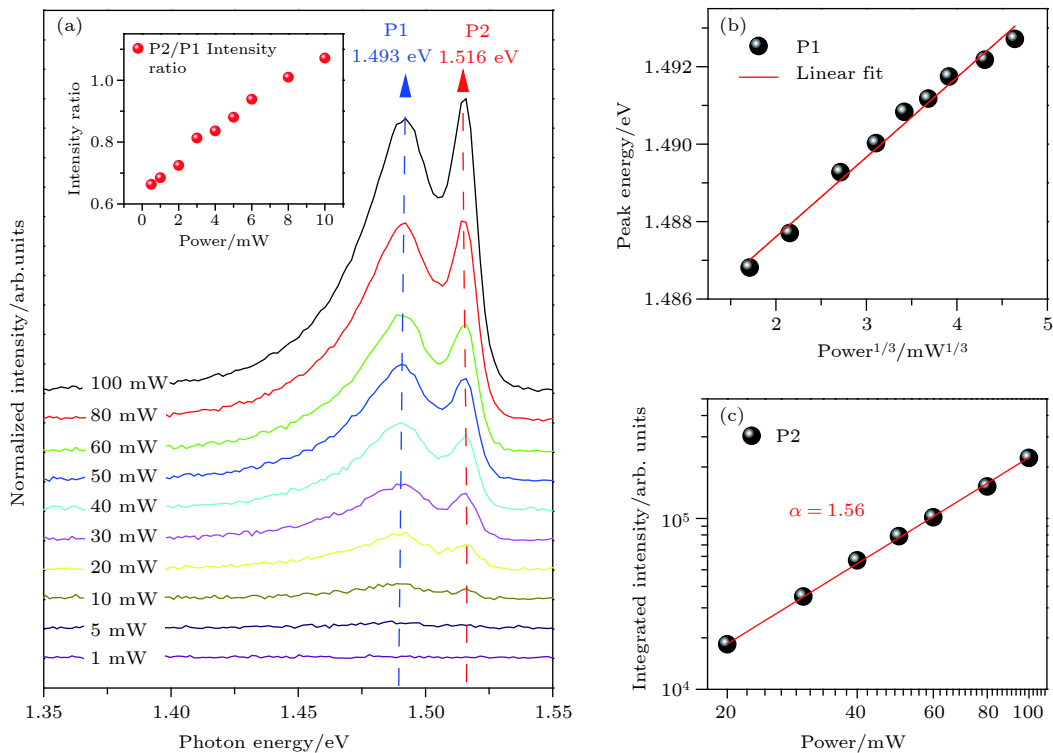


图 3 变功率 PL 光谱测试图 (a) 不同功率下 PL 光谱曲线, 插图为 P2, P1 峰强比随功率变化曲线; (b) P1 峰位与  $P^{1/3}$  的关系; (c) P2 峰强与功率的关系

Fig. 3. Variable power PL spectrum: (a) The PL spectral curve with different power is illustrated as the peak ratio of P2, P1 changing with power; (b) the relationship between P1 peak and  $P^{1/3}$ ; (c) the relationship between P2 peak intensity and power.

所引起. 同时, 也对 P2 峰的峰强与功率建立对应关系, 积分强度 (峰强) 与功率关系如 (3) 式所示 [32]:

$$I = \eta I_0^\alpha, \quad (3)$$

其中  $I$  为光谱积分强度,  $\eta$  为辐射效率,  $I_0$  为激光辐射功率,  $\alpha$  为特征值. 对  $\alpha$  进行计算, 结果如图 3(c) 所示, 经计算  $\alpha = 1.56$ , 在  $1 < \alpha < 2$  之间, 因此 P2 是与 GaAs 相关的激子复合引起的峰 [33].

尽管从 PL 光谱中可以确定 P1 的发光峰来源于 WZ/ZB 混相结构的发光, 但由于是通过一种拟合的方式进行判断, 证据仍不够充足, 因此对 GaAs 纳米线进行 Raman 光谱测试, 并以 ZB 结构的 GaAs 衬底作为对比, Raman 光谱测试结果如图 4 所示. 从图 4 中可以得到 GaAs 衬底的 Raman 光谱三个模式的峰, 对应的峰位分别为 268, 284, 291  $\text{cm}^{-1}$ , 以文献结果作为参照, 这些峰分别为 GaAs TO, GaAs SO, GaAs LO 模式的峰. GaAs 纳米线同样出现了这三个模式的峰分别为 267, 285, 289.5  $\text{cm}^{-1}$ , 但与 GaAs 衬底相比, GaAs TO, GaAs LO 有轻微的红移, 这是因为纳米线属于一维材料, 由于量子尺寸效应 [34], 导致这两个模式的峰向波束小的方向移动. 与体材料 GaAs 衬底不同的是 GaAs 纳米线出现了除了 GaAs 衬底三个峰以外的模式峰, 又在 256  $\text{cm}^{-1}$  附近出现了一个新的峰, 根据文献报道这个峰来源于 GaAs WZ 结构所特有的  $E_2$  模式的峰 [26, 27]. 因此, 可以

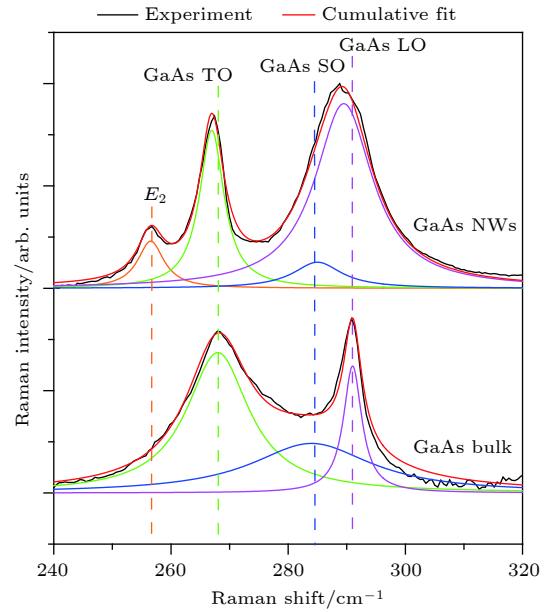


图 4 GaAs 纳米线及 GaAs 衬底的 Raman 光谱图  
Fig. 4. Raman spectra of GaAs nanowires and GaAs substrate.

得到生长的 GaAs 纳米线, 其内部结构为 WZ/ZB 混相结构.

为了更加直观地观察 GaAs 纳米线的结构, 我们对纳米线进行了 HRTEM 测试, 测试结果如图 5 所示. 图 5(a) 为单根纳米线低分辨 TEM 图, 可以看出纳米线长度与直径与我们根据 SEM 测量的数值相当, 其中我们对红色区域进行了 HRTEM

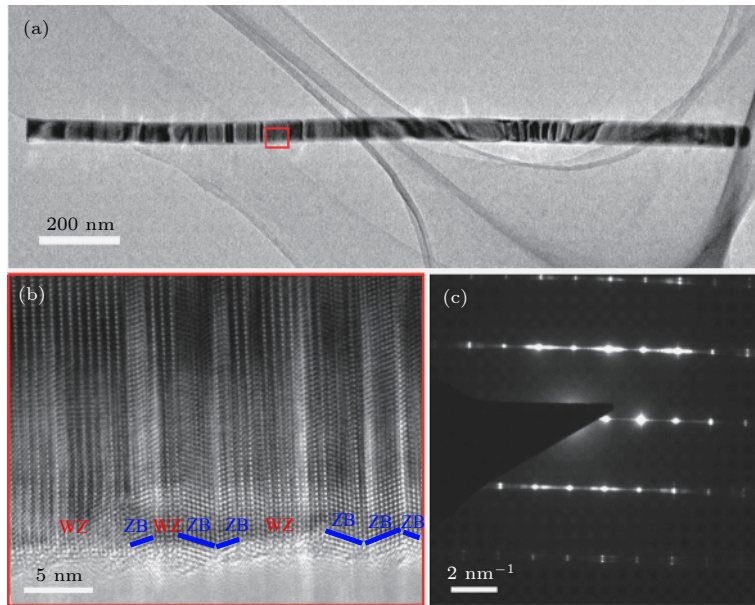


图 5 GaAs 纳米线透射电子显微镜 (TEM) 图像 (a) 低分辨 TEM 图像; (b) HRTEM 图像; (c) 为选区电子衍射图像

Fig. 5. Transmission electron microscopy (TEM) image of GaAs nanowires: (a) The low resolution TEM; (b) the high resolution TEM; (c) the selected area electron diffraction image.

测试, 测试结果如图 5(b) 所示, 可以看见明显的 GaAs WZ 结构和 GaAs ZB 结构, 图 5(c) 为选区电子衍射图, 可以看到图中有两套衍射斑, 证明存在 GaAs WZ, GaAs ZB 两种结构, 因此证实了纳米线是混相的. 在文献中已有报道 GaAs II 型结构, 量子阱越薄, 纳米线量子阱能量越高, 纳米线 PL 光谱在 1.515—1.43 eV 之间变化<sup>[35]</sup>. 根据实验结果纳米线 II 型结构发光峰在 1.493 eV, 在变化范围内, 而从 PL 光谱中发现 P1 峰比 P2 峰有展宽, 这可能是由于纳米线阱厚不均匀导致.

## 4 结 论

通过高真空 MBE 系统采用自催化的生长方式获得了高密度、高垂直度且直径和长度均匀的 GaAs 纳米线, 通过对其进行 PL 光谱测试, 发现有 P1 和 P2 两个峰, 通过功率与峰位能量以及功率与峰强关系对其进行峰位指认, 发现这两个峰分别来源于 WZ/ZB 混相结构的发光及 GaAs 纳米线自由激子的发光. 通过 Raman 光谱对 GaAs 纳米线进行测试, 同时以 GaAs 衬底作为参照, 发现在 GaAs 纳米线中出现了与 GaAs 衬底不同的峰, 通过文献可以证实此峰来源于 GaAs 纳米线 WZ 结构独有的模式峰, 因此生长的 GaAs 纳米线为 WZ/ZB 混相结构, 并通过 HRTEM 图像直观地证实了混相结构的存在.

## 参 考 文 献

- [1] Dai X, Zhang S, Wang Z L, Adamo G, Liu H, Huang Y Z, Couteau C, Soci C 2014 *Nano Lett.* **14** 2688
- [2] Farrell A C, Senanayake P, Meng X, Hsieh N Y, Huffaker D L 2017 *Nano Lett.* **17** 2420
- [3] Cammi D, Rodiek B, Zimmermann K, Ktiek S, Voss T 2017 *J. Mater. Res.* **32** 2464
- [4] Tchernycheva M, Lavenus P, Zhang H, Babichev A V, Jacopin G, Shalmohammadi M, Julien F H, Ciechonski R, Vescovi G, Kryliouk O 2014 *Nano Lett.* **14** 2456
- [5] Hussain L, Karimi M, Berg A, Jain V, Borgström M T, Gustafsson A, Samuelson L, Pettersson H 2017 *Nanotechnology* **28** 485205
- [6] Ullah A R, Meyer F, Gluschke J G, Naureen S, Caroff P, Krogstrup P, Nygård J, Micolich A P 2018 *Nano Lett.* **18** 5673
- [7] Price A, Martinez A 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 164501
- [8] Yang W, Pan D, Shen R, Wang X, Zhao J, Chen Q 2018 *Nanotechnology* **29** 415230
- [9] Mao H W, Liu Y X, Li F M 1990 *Chin. J. Las.* **17** 538 (in Chinese) [毛宏伟, 刘一先, 李富铭 1990 中国激光 **17** 538]
- [10] Han N, Wang F, Hou J J, Yip S, Lin H, Fang M, Xiu F, Shi X L, Hung T F, Ho J C 2012 *Cryst. Growth Des.* **12** 6243
- [11] Xia N, Fang X, Rong T Y, Wang D K, Fang D, Tang J L, Wang X W, Wang X H, Li Y F, Yao B, Wei Z P 2018 *Chin. J. Las.* **45** 0603002 (in Chinese) [夏宁, 方铄, 容天宇, 王登魁, 房丹, 唐吉龙, 王新伟, 王晓华, 李永峰, 姚斌, 魏志鹏 2018 中国激光 **45** 0603002]
- [12] Glas F, Harmand J C, Patriarche G 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 146101
- [13] Hoang T B, Zhou H, Moses A F, Dheeraj D L, Helvoor A, Finland B O, Weman H 2009 *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **1144**
- [14] Vainorius N, Jacobsson D, Lehmann S, Gustafsson A, Dick K A, Samuelson L, Pistol M E 2014 *Phys. Rev. B* **89** 165423
- [15] Kinzel J B, Schüle F J, Weiß M, Janker L, Bühler D D, Heigl M, Rudolph D, Morkötter S, Döblinger M, Bichler M, Abstreiter G, Finley J J, Wixforth A, Koblmüller G, Abstreiter G 2016 *ACS Nano* **10** 4942
- [16] Senichev A, Corfdir P, Brandt O, Ramsteiner M, Breuer S, Schilling J, Geelhaar L, Werner P 2018 *Nano Res.* **1** 14
- [17] Mukherjee A, Ghosh S, Breuer S, Jahn U, Geelhaar L, Grahn H T 2017 *J. Appl. Phys.* **117** 054308
- [18] Kim H, Ren D, Farrell A C, Huffaker D L 2018 *Nanotechnology* **29** 085601
- [19] Cui J G, Zhang X, Yan X, Li J S, Huang Y Q, Ren X M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 136103 (in Chinese) [崔建功, 张霞, 颜鑫, 李军帅, 黄永清, 任晓敏 2014 物理学报 **63** 136103]
- [20] Liu Y, Peng Y, Guo J, La D, Xu Z 2018 *AIP Adv.* **8** 055108
- [21] Zhou C, Zheng K, Liao Z M, Chen P P, Lu W, Zou J 2017 *J. Mater. Chem. C* **5** 5257
- [22] Timofeeva M, Bouravleuv A, Cirlin G, Shtrom I, Soshnikov I, Reig Escalé M, Sergeev A Grange R 2016 *Nano Lett.* **16** 6290
- [23] Bussone G, Schäfer-Eberwein H, Dimakis E, Biermanns A, Carbone D, Tahraoui A, Geelhaar L, Bolívar P H, Schüllli T U, Pietsch U 2015 *Nano Lett.* **15** 981
- [24] Fontcuberta i Morral A, Colombo C, Abstreiter G, Arbiol J, Morante J R 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 063112
- [25] Bauer B, Rudolph A, Soda M, Fontcuberta i Morral A, Zweck J, Schuh D, Reiger E 2010 *Nanotechnology* **21** 435601
- [26] Ramsteiner M, Brandt O, Kusch P, Breuer S, Reich S, Geelhaar L 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 043121
- [27] Jahn U, Lähnemann J, Pfüller C, Brandt O, Breuer S, Jenichen B, Ramsteiner M, Geelhaar L, Riechert H 2012 *Phys. Rev. B* **85** 045323
- [28] Falcão B P, Leitão J P, Correia M R, Soares M R, Morales F M, Manuel J M, Garcia R, Gustafsson A, Moreira M V B, de Oliveira A G, González J C 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 183508
- [29] Rudolph D, Schweickert L, Morkötter S, Loitsch B, Hertenberger S, Becker J, Bichler M, Abstreiter G, Finley J J, Koblmüller G 2013 *Appl. Phys. Lett.* **105** 033111
- [30] Varshni Y P 1967 *Physica* **34** 149
- [31] Chiu Y S, Ya M H, Su W S, Chen Y F 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 5810
- [32] Jin S, Zheng Y, Li A 1997 *J. Appl. Phys.* **82** 3870
- [33] Fang X, Wei Z P, Chen R, Tang J L, Zhao H F, Zhang L G, Zhao D X, Fang D, Li J H, Fang F, Chu X Y, Wang X H 2015 *ACS Appl. Mater. Inter.* **7** 10331
- [34] Begum N, Piccin M, Jabeen F, Bais G, Rubini S, Martelli F, Bhatti A S 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 104311
- [35] Spirkoska D, Arbiol J, Gustafsson A, Conesa-Boj S, Glas F, Zardo I, Heigoldt M, Gass M H, Bleloch A L, Estrade S, Kaniber M, Rossler J, Peiro F, Morante J R, Abstreiter G, Samuelson L, Fontcuberta i Morral A 2009 *Phys. Rev. B* **80** 245325

# Crystal structure and optical properties of GaAs nanowires\*

Wang Peng-Hua   Tang Ji-Long<sup>†</sup>   Kang Yu-Bin   Fang Xuan   Fang Dan  
Wang Deng-Kui   Lin Feng-Yuan   Wang Xiao-Hua   Wei Zhi-Peng

(State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and  
Technology, Changchun 130022, China)

( Received 30 November 2018; revised manuscript received 25 February 2019 )

## Abstract

Gallium arsenide (GaAs) nanowires are epitaxially grown on an N-type Si (111) substrate by molecular beam epitaxy according to self-catalysis growth mechanism. Testing the grown nanowires by scanning electron microscope, it is found that the nanowires have high verticality and good uniformity in length and diameter. Variable temperature photoluminescence (PL) spectroscopy is used on nanowires. The test results show that the two luminescence peaks P1 and P2 at 10 K are located at 1.493 eV and 1.516 eV, respectively, and it is inferred that it may be the luminescence caused by WZ/ZB miscible structure and the free exciton luminescence peak. These two peaks present red-shift with temperature increasing. The temperature change curve is obtained by fitting the Varshni formula. The variable power PL spectroscopy test finds that the peak position of P1 position is blue shifted with power increasing, but the peak position of the P2 remains unchanged. By fitting, it is found that the P1 peak position is linearly related to power to the power of 1/3, and it is judged that it may be type-II luminescence caused by WZ/ZB mixed phase structure. At the same time, the peak position of the P2 position is fitted and parameter  $\alpha$  approximately equals 1.56, therefore P2 is a free exciton luminescence. A Raman spectrum test is performed on the nanowires, and an  $E_2$  phonon peak unique to the GaAs WZ structure is found from the spectrum. It is proved that the grown nanowires possess WZ/ZB mixed phase structures, and the hybrid phase structure of nanowires is more intuitively observed by high resolution transmission electron microscopy.

**Keywords:** GaAs nanowires, wurtzite/zincblende mixed phase structure, photoluminescence spectra, Raman spectra

**PACS:** 78.67.Uh, 61.46.Km, 78.55.-m, 78.30.-j

**DOI:** 10.7498/aps.68.20182116

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11674038, 61704011, 61674021, 61574022), the Science and Technology Development Plan of Jilin Province, China (Grant Nos. 20160204074GX, 20160519007JH, 20160101255JC), and the Science and Technology Innovation Fund of Changchun University of Science and Technology, China (Grant Nos. XJLJG-2016-11, XJLJG-2016-14).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [jl\\_tangcust@163.com](mailto:jl_tangcust@163.com)