

# Research Progress on GaAs/InGaAs Heterostructure Nanowires Directional Epitaxy Growth

Lina Zeng, Lin Li\*, Zaijin Li, Zhongliang Qiao, Yi Qu, Hongyan Peng

College of Physics and Electronics Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan  
Email: \*licust@126.com

Received: Feb. 12<sup>th</sup>, 2020; accepted: Feb. 26<sup>th</sup>, 2020; published: Mar. 4<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Semiconductor nanowires (NWs) have potential applications in optoelectronic devices such as semiconductor lasers, nanowire-field effect transistors, solar cells and infrared photodetectors, and have consequently become a topic of intense research due to the direct bandgap and high carrier mobility of these materials. Most of the research institutions in the world study the directional growth of nanowires based on nano-patterned substrate. However, it is difficult to obtain high-quality GaAs/InGaAs heterostructure nanowires due to the nanosize patterned effects. We introduce the performance advantages and development status of the GaAs/InGaAs heterostructure nanowires. The research progress of directional epitaxy growth and luminescent properties of GaAs/InGaAs heterogeneous nanowires is reviewed, and its technical difficulties and development prospects are discussed.

## Keywords

Semiconductor, Nanowires, Epitaxial Growth

# GaAs/InGaAs异质结构纳米线定向生长的研究进展

曾丽娜, 李林\*, 李再金, 乔忠良, 曲轶, 彭鸿雁

海南师范大学, 物理与电子工程学院, 海南 海口  
Email: \*licust@126.com

收稿日期: 2020年2月12日; 录用日期: 2020年2月26日; 发布日期: 2020年3月4日

\*通讯作者。

文章引用: 曾丽娜, 李林, 李再金, 乔忠良, 曲轶, 彭鸿雁. GaAs/InGaAs 异质结构纳米线定向生长的研究进展[J]. 光电子, 2020, 10(1): 8-17. DOI: 10.12677/oe.2020.101002

## 摘要

GaAs/InGaAs异质结构纳米线具有直接带隙、载流子迁移率高等优点,在半导体激光器、场效应晶体管、太阳能电池及红外光探测器等光电子器件领域具有广阔的应用前景,受到国内外广泛关注。目前,研究机构大多数基于纳米图形的纳米线定向生长研究,但由于图形的纳米尺寸效应,导致GaAs/InGaAs柱状纳米线生长质量变差。本文介绍了GaAs/InGaAs异质结构纳米线的性能优势和发展现状,综述了GaAs/InGaAs异质结构纳米线定向外延生长及其发光特性的研究进展,讨论了其技术难题及发展前景。

## 关键词

半导体, 纳米线, 外延生长

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

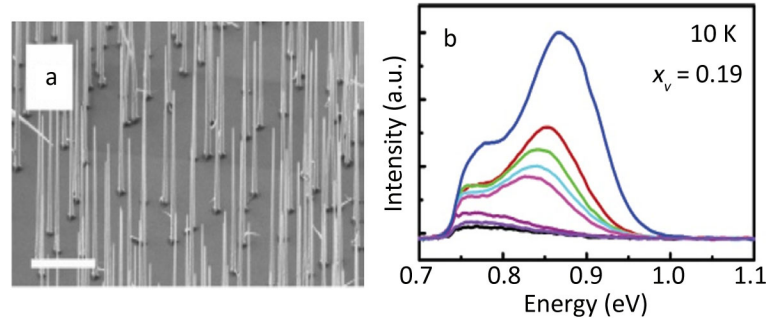
## 1. 引言

由于半导体纳米线具有高表面-体积比特性,适合于制备光电集成器件,在新一代光电子材料与器件领域具有广阔的应用前景,成为国内外研究的热点之一,受到了研究机构密切关注和研究[1]-[13]。其中 III~V 族 GaAs/InGaAs 纳米线因其具有窄带宽、复合中心少、载流子迁移率高、量子效率高、漏电流小和抗辐射等优点,在半导体激光器[1] [2] [3] [4] [5]、场效应晶体管[6] [7] [8] [9]、太阳能电池[10] [11] [12] 及红外光探测器[13]等光电子器件领域更具有实际应用价值。然而,纳米线在外延生长过程中,由于 In 原子不稳定且迁移长度大于 Ga 原子, In 原子向邻近的纳米线迁移扩散,以及 GaAs/InGaAs 异质结构柱状纳米线晶格失配引起的应变和位错等原因,导致纳米线生长质量变差,表面显微形貌难以得到有效控制,常出现“锥形”、“曲折”、“细丝状”等现象[14]-[19] [23]-[28]。这些成为纳米图形 GaAs/InGaAs 异质结构纳米线定向生长的主要因素。近几年研发纳米图形的 GaAs/InGaAs 异质结构柱状纳米线定向生长已经成为国内外光电子领域研究的前沿和热点,研发机构大多数都基于纳米图形的 GaAs/InGaAs 异质结构柱状纳米线定向生长研究,但由于图形的纳米尺寸效应,外延生长机理复杂的原因,导致 GaAs/InGaAs 异质结构纳米线生长质量变差,难以获得高质量 GaAs/InGaAs 异质结构柱状纳米线。

## 2. GaAs/InGaAs 纳米线国内外研究现状

由于半导体纳米线在新一代光电子材料与器件领域具有广阔的应用前景,成为国内外研究的热点之一,受到了研究机构密切关注和深入的研究。澳大利亚国立大学的 Yong Kim 等人[17]研究了利用金属有机化学气相沉积设备(MOCVD)在 GaAs(111)B 衬底上外延生长 Au 催化 GaAs/InGaAs 纳米线的生长质量和显微形貌特性。图 1(a)为样品的扫描电子显微镜(SEM)图,实验结果表明纳米线的密度和尺寸会影响纳米线的锥形程度和表面显微形貌;图 1(b)表明了不同区域 GaAs/InGaAs 纳米线的发光特性具有明显差异。出现这种现象的主要原因是:由于 In、Ga 原子在 GaAs(111)B 衬底上的迁移长度不同,In 原子的迁移长度大于 Ga 原子,因此控制 GaAs/InGaAs 纳米线的 In 组分和均匀性非常困难,In 组分越高难度就越大。还由于参与反应的邻近纳米线原子间的迁移和吸附等原因,造成了相邻纳米线之间的 In 组分不同,低密度的纳米线中 In 的组分很高。因而在 GaAs/InGaAs 纳米线的外延生长过程中,如何限制 In 原子在邻近

纳米线之间的迁移，成为改善纳米线显微形貌和锥形程度的一个主要研究问题。

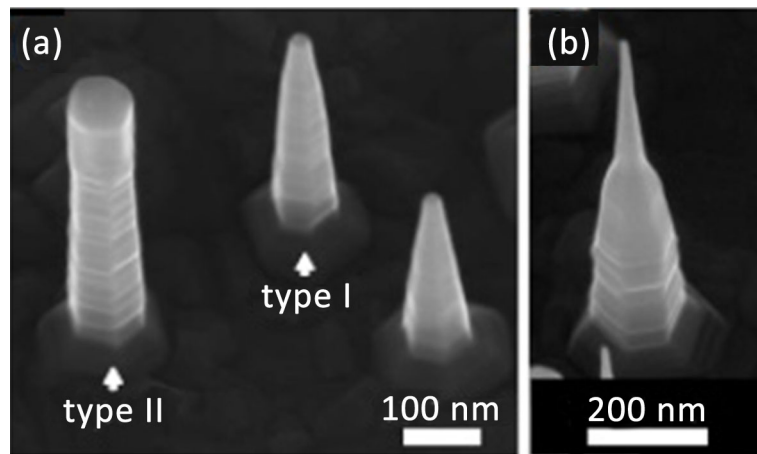


**Figure 1.** (a) SEM images of  $\text{In}_{0.19}\text{Ga}_{0.81}\text{As}$  nanowires ( $1.5 \times 1.5 \mu\text{m}^2$ ); (b) PL spectra of  $\text{In}_{0.19}\text{Ga}_{0.81}\text{As}$  nanowires at 10 K [17]

**图 1.** (a)  $\text{In}_{0.19}\text{Ga}_{0.81}\text{As}$  纳米线的 SEM 图( $1.5 \times 1.5 \mu\text{m}^2$ ); (b)  $\text{In}_{0.19}\text{Ga}_{0.81}\text{As}$  纳米线低温 10 K 下发光特性[17]

德国莱比锡大学 Jens Bauer 等人[18]研究了在 GaAs(111)B 衬底上 MOCVD 生长 Au 催化 InAs 纳米线材料的生长特性。实验结果表明 Au 催化剂颗粒中包含 Au、Ga、In 原子，Ga、In 原子以一定的浓度存在于 Au-Ga-In 合金颗粒当中，该合金的共熔温度比 InAs 纳米线的生长温度低，增大 V/III 比或升高外延生长温度，都会使 Ga、In 原子的表面扩散长度变大，从而进一步影响纳米线的表面显微形貌。该研究结果表明，生长温度及 Au 的合金颗粒的尺寸和面密度是影响 InAs 纳米线表面显微形貌的主要因素。在一定的外延生长条件下，使用 Au 催化 InAs 纳米线将会生成锥形(类型 I)和柱形(类型 II)两种类型，如图 2 所示，柱形(类型 II)纳米线在一定条件下可转变成锥形(类型 I)纳米线，而锥形(类型 I)纳米线在任何条件下都无法转变成柱形(类型 II)纳米线。

马来西亚工业大学 D Gustiono 等人[19]研究报道了在低温下 MOCVD 生长了 Au 催化 GaAs/InGaAs 纳米线，当降低生长温度为  $400^\circ\text{C}$  时，纳米线与衬底垂直呈六棱柱形，其直径尺寸约为  $80\sim 150 \text{ nm}$ 。该研究结果表明，较低的生长温度能够抑制柱形纳米线转变为锥形纳米线，但 In 组分会严重影响纳米线的锥形生长模式，锥形纳米线的数量会随着 In 组分的增加而增多，同时纳米线的锥形程度也会随着纳米线中 In 组分的增加而加剧。



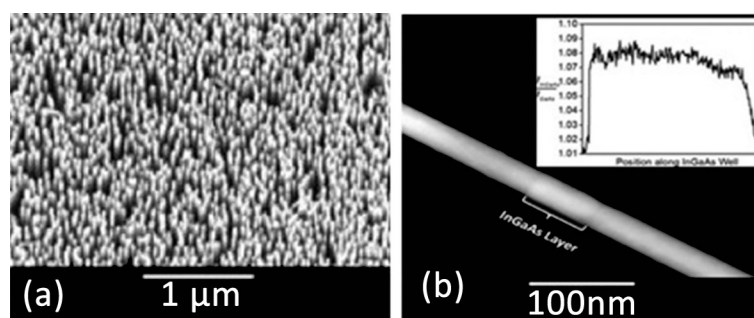
**Figure 2.** (a) SEM images of InAs NW (type I and type II); (b) On the same sample exhibiting a transition from morphology type II to type I [18]

**图 2.** (a) InAs 纳米线主要柱形和锥形两种类型的 SEM 图; (b) 柱形纳米线在一定条件下转换成锥形纳米线的 SEM 图[18]

由于 InGaAs 与 GaAs 材料之间存在较大晶格失配, 纳米线样品本身存在较大“长度与直径比”, 表面显微形貌难以得到有效控制, 常出现“锥形”、“扭折”、“细丝状”等现象。另外, In 原子不稳定且迁移长度大于 Ga 原子, In 原子会向邻近的纳米线扩散, 造成 GaAs/InGaAs 纳米线 In 组分不均匀, 从而导致材料生长质量及显微形貌特性受到影响。为了改善 GaAs/InGaAs 纳米线的表面显微形貌, 提高纳米线的生长质量, 国内外的研究机构对纳米线尺寸和密度可控的定向外延生长方法进行了进一步深入研究。

### 3. GaAs/InGaAs 纳米线定向生长研究进展

美国威斯康星大学 Aloysius A. Gunawan 等人[20]采用阳极氧化铝辅助方法刻蚀制作纳米图形 GaAs 衬底, 研究了 GaAs/InGaAs 纳米线尺寸和密度可控的定向外延生长。在 GaAs(111)B 纳米图形衬底上沉积 2 nm 厚的金层, 经过退火在图形 GaAs(111)B 衬底上形成了 Au 纳米颗粒后, MOCVD 外延生长 GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs 径向异质结构(核壳结构)纳米线, 样品的显微结构如图 3 所示, InGaAs 纳米线的长度约为 70~100 nm。他们的研究表明 Au 颗粒的面密度越大, InGaAs 纳米线的尺寸分布偏差越小, 越有利于获得密度可控的 InGaAs 纳米线, 但其中 In 组分不稳定和纳米线显微形貌难以控制的问题仍然存在, 这个难题没有得到解决。



**Figure 3.** (a) SEM images of GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs core-shell nanowires; (b) STEM images of one GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs core-shell nanowires

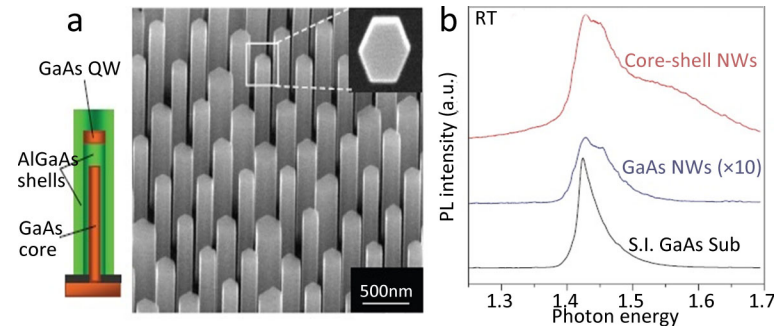
**图 3.** (a) GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs 核壳纳米线 SEM 图; (b) 单根 GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs 核壳纳米线 STEM 图[20]

为了解决纳米线定向外延生长难题, 日本北海道大学 K. Hiruma 等人[21]研究了在无催化生长条件下, 在亚微米掩模图形 GaAs 衬底上采用 MOCVD 外延生长 GaAs/AlGaAs 径向异质结构(核壳结构)纳米线, 纳米线的生长方向与衬底方向垂直, 呈现明显柱形或六棱柱形, 如图 4(a)所示。光致发光谱(Photoluminescence, 简称 PL 谱)研究结果表明, 核壳结构纳米线有效地增强了纳米线材料的 PL 强度。如图 4(b)所示, 比较 GaAs 纳米线、GaAs/AlGaAs 核壳结构纳米线和 GaAs 衬底的 PL 谱可知, GaAs/AlGaAs 核壳结构纳米线室温 PL 谱强度约为 GaAs 纳米线强度的 20 倍, 这种发光特性表明了这种核壳结构的纳米线能够应用在光电子器件中。

在解决纳米线定向外延生长难题情况下, 各国研究人员开展纳米线的发光特性研究, 东京大学研究人员率先取得突破性成果。日本东京大学 Arakawa 教授研究组[22]进一步报道了基于分布布拉格反射镜(DBRs)纳米图形, 制备一种包含 In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As 量子点的新型 GaAs 纳米线结构。利用 MOCVD 设备首先在 GaAs(111)B 衬底上外延生长 Al<sub>0.65</sub>Ga<sub>0.35</sub>As/GaAs 分布布拉格反射镜(DBRs), 然后在 DBRs 上制作纳米图形, 最后在 DBRs 纳米图形上外延生长多层 In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs 量子点/纳米线, 含有 In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As 量子点的 GaAs 纳米线 SEM 图, 如图 5(a)~(b)所示。从单根纳米线的扫描透射电子显微镜(scanning transmission

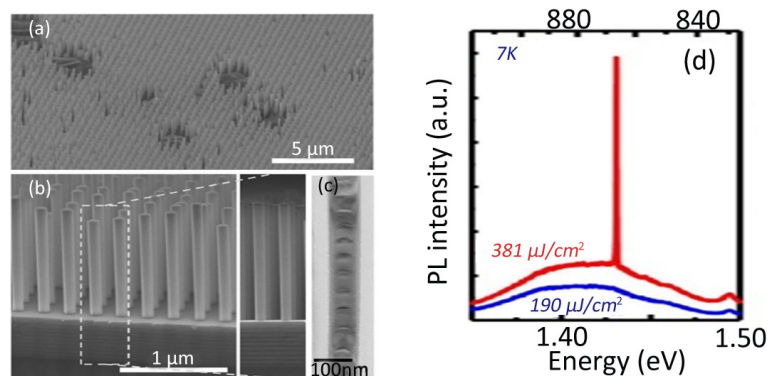


electron microscopy, STEM)图可以看出,量子点在单根纳米线中的分布状态清晰可见,如图 5(c)所示。在  $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}/\text{GaAs}$  DBRs 上制备的纳米线结构包含了 75 层  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  量子点的 GaAs 纳米线,在低温 7K 条件下实现了光泵激射发光,激射光谱峰值波长约为 870 nm,如图 5(d)所示。



**Figure 4.** (a) SEM images of GaAs/AlGaAs core-shell nanowires; (b) PL of GaAs nanowires, GaAs/AlGaAs core-shell nanowires [21]

**图 4.** (a) GaAs/AlGaAs 核壳结构纳米线示意图和 SEM 图; (b) GaAs 纳米线、GaAs/AlGaAs 核壳结构纳米线的室温 PL 谱[21]



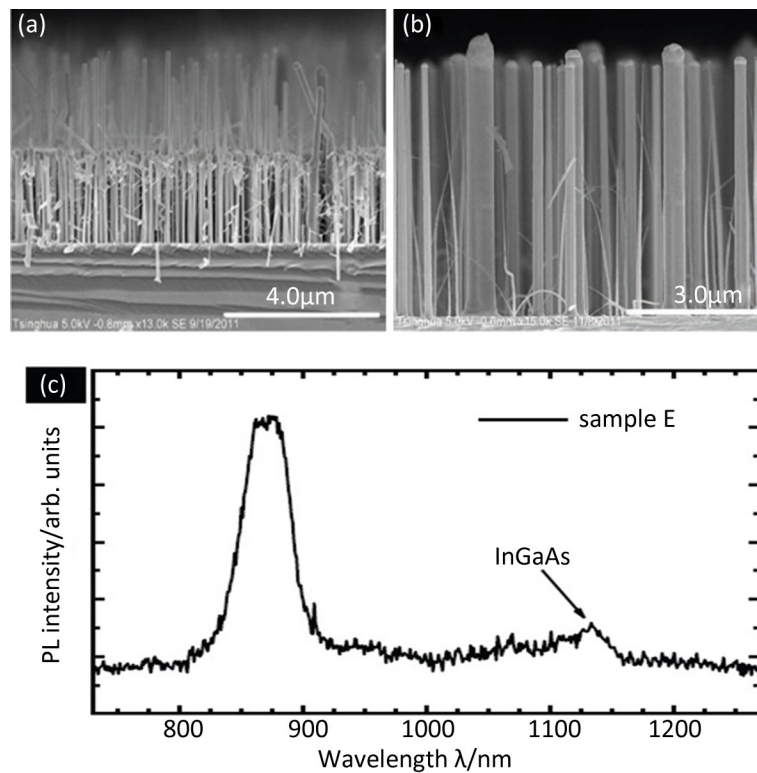
**Figure 5.** (a) (b) SEM and (c) STEM images of GaAs NW array containing 75-stacked  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$  NW QDs, (d) PL spectra at 7 K of a single GaAs NW

**图 5.** (a) (b) 含有  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  量子点的 GaAs 纳米线 SEM 图; (c) 单根纳米线 STEM 图; (d) 低温 7K 条件下光泵激射光谱[22]

国内对于 GaAs、InGaAs 及 GaAs/InGaAs 异质结构柱状纳米线的研究起步较晚,成果相对较少。下面简要归纳总结一下国内在这方面的研究进展。

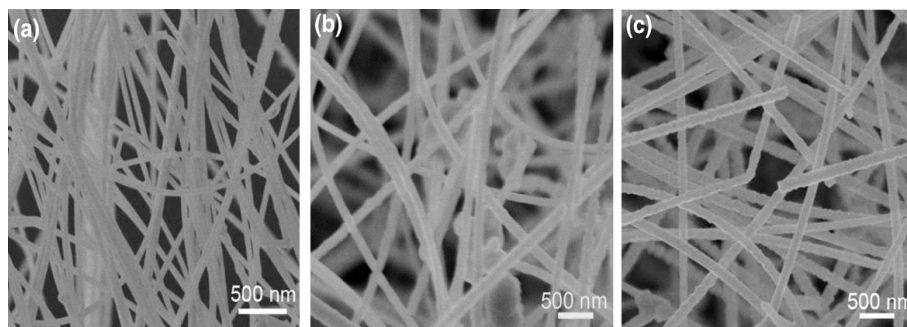
北京邮电大学吕晓龙等人[23]开展了 GaAs 基 III-V 族化合物异质结构柱状纳米线的外延生长、显微形貌和发光特性研究。在 GaAs(111)B 衬底上 MOCVD 外延生长了 Au 催化  $\text{GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  双异质结纳米线,  $\text{GaAs}/\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$  双异质结纳米线的 PL 谱峰值波长约为 1130 nm,分析了纳米线的生长温度以及 In 组分等外延生长参数对纳米线显微形貌的影响。如图 6 所示, SEM 测试结果表明,随着 In 组分增大,纳米线的生长质量变差,出现“扭折”的现象,并伴随出现大量“细丝”状纳米线。该小组的研究结果表明 InGaAs 量子点的大小、密度和量子点分布状态对样品的发光特性有非常大的影响[24][25]。

湖南大学潘安练研究组[26]利用气相沉积设备(CVD)合成了非定向生长的 InAs 纳米线,伴随温度的升高,纳米线直径增大,纳米线直径约为 100~190 nm。沉积温度在 400℃~460℃的 InAs 纳米线 SEM 图,如图 7 所示,可以看出 InAs 纳米线在各个方向生长,纳米线的直径很难有限控制。



**Figure 6.** SEM images of GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs nanowires: (a)  $x = 1$ ; (b)  $x = 0.2$ ; (c) PL of GaAs/In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs nanowires [23]

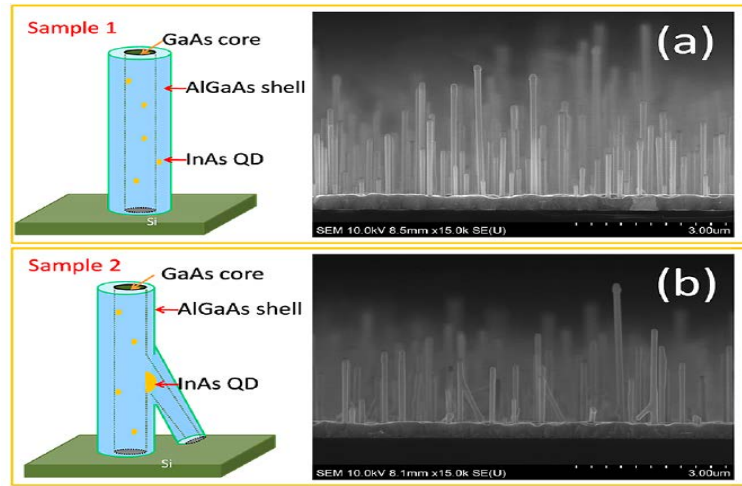
**图 6.** GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs 双异质结纳米线 SEM 图: (a)  $x = 1$ ; (b)  $x = 0.2$ ; (c) GaAs/In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs 双异质结纳米线 PL 谱图[23]



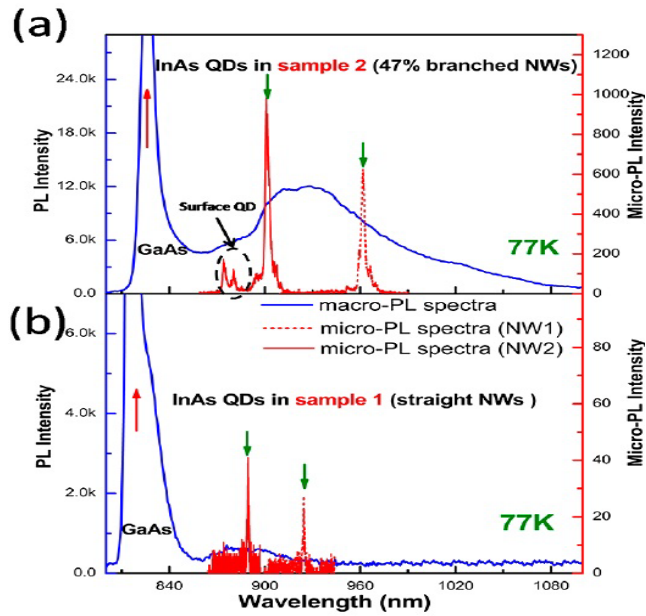
**Figure 7.** SEM images of InAs nanowires, growth temperature: (a) 400°C; (b) 440°C; (c) 460°C

**图 7.** InAs 纳米线 SEM 图, 生长温度分别为(a) 400°C; (b) 440°C; (c) 460°C [26]

中科院半导体所牛智川研究组[27]利用 MBE(分子束外延)设备研究了在 Si(111)衬底上外延生长的无 Au 催化的 GaAs/AlGaAs 核壳纳米线的显微形貌和发光特性。InAs 量子点在纳米线上存在两种状态:一种是直接在纳米线侧壁上“附着” InAs 量子点,如图 8(a)所示;另一种是带有“枝状”结构的纳米线,如图 8(b)所示, InAs 量子点位于“枝”与“干”的交接处, InAs 量子点掩埋在枝状 GaAs/AlGaAs 纳米线中。在低温 77K 下,这种带有“枝状”结构纳米线的 InAs 量子点 PL 谱强度比纳米线侧壁上“附着”的 InAs 量子点 PL 谱强度提高了约 20 倍,如图 9 所示。研究表明,该枝状结构纳米线可形成 InAs 量子点纳米微腔结构,这种纳米微腔结构能够增强 InAs 量子点的发光特性,有望应用于新型光电子器件中。



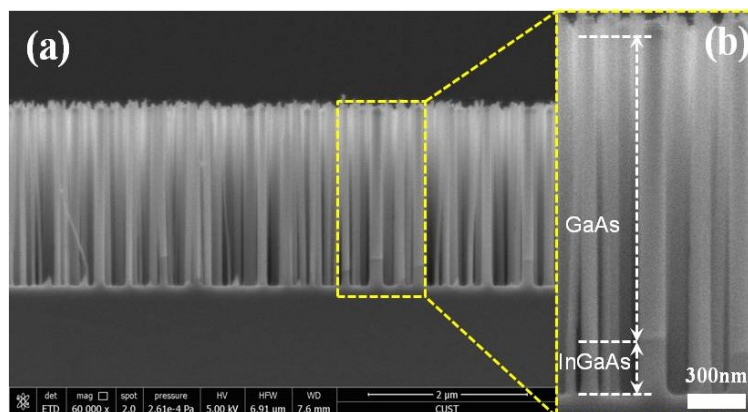
**Figure 8.** Typical SEM side-view images of sample 1 (a) and sample 2 (b) [27]  
**图 8.** 不同结构的 GaAs/AlGaAs 纳米线示意图和侧向 SEM 图: (a) 直接在纳米线侧壁上“附着” InAs 量子点; (b) 带有“枝状”纳米线的 InAs 量子点[27]



**Figure 9.** PL (blue) and micro-PL (red) spectra measured at 77 K for branched nanowire sample 2 (a) and straight nanowire sample 1 (b). The excitonic lines in solid and dotted red are the emissions from InAs QDs of separated NWs  
**图 9.** (a) 带有“枝状”纳米线的 InAs 量子点 PL 谱; (b) 直接在纳米线侧壁上“附着” InAs 量子点 PL 谱[27]

在 GaAs(111)B 衬底上 MOCVD 外延生长 Au 催化 GaAs/InGaAs 异质结纳米线, 我们研究其外延生长参数(生长温度和 V/III 束流比)对 GaAs/InGaAs 异质结纳米线显微形貌的影响[28] [29]。从 GaAs/InGaAs 轴向单异质结构柱状纳米线 SEM 测试结果可以看出, 绝大部分纳米线尺寸均匀, 但是也存在少量的“倾倒”、“扭折”的纳米线, 如图 10(a)所示。我们可以清晰看见 GaAs/InGaAs 异质结纳米线的界面, 如图 10(b)所示。国内外的研究结果表明, GaAs/InGaAs 异质结构柱状纳米线定向生长及其发光特性方面的研究报道偏少, 获得高质量 GaAs/InGaAs 异质结构柱状纳米线仍然十分困难, 不利于进一步深入研究纳米

线显微形貌及其发光特性。



**Figure 10.** (a) SEM image of GaAs/InGaAs nanowires with axial heterostructures; (b) Local enlargement for GaAs/InGaAs nanowires [29]

**图 10.** (a) GaAs/InGaAs 轴向单异质结构柱状纳米线 SEM 图; (b) GaAs/InGaAs 纳米线 SEM 局部放大图[29]

#### 4. 结束语

目前我国 GaAs/InGaAs 异质结构柱状纳米线的整体研究水平仍落后于欧美日等发达国家, 相关研究多集中在纳米线非定向生长、显微形貌表征以及生长机理方面, 而在 GaAs/InGaAs 异质结构柱状纳米线定向生长及其发光特性方面的研究报道偏少。国外研究机构大多数报道是基于纳米掩模图形的纳米线定向生长研究, 但由于纳米图形的尺寸效应, 难以获得高质量的 GaAs/InGaAs 异质结构柱状纳米线。因此, 如何提高 GaAs/InGaAs 异质结构柱状纳米线的定向外延生长质量、改善纳米线显微形貌及其发光特性, 对推动和加快国内外新型光电子材料与器件的研究具有重要意义。

#### 基金项目

2019 年海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目(2019RC192), 海南省高等学校科学研究重点项目(Hnky2020ZD-10), 海南省自然科学基金(2018CXTD336, 618MS055, 618QN241)资助。

#### 参考文献

- [1] Scofield, A.C., Kim, S.-H., Shapiro, J.N., Lin, A., Liang, B., Scherer, A. and Huffaker, D.L. (2011) Bottom-Up Photonic Crystal Lasers. *Nano Letters*, **11**, 5387-5390. <https://doi.org/10.1021/nl2030163>
- [2] Saxena, D., Mokkalapati, S., Parkinson, P., Jiang, N., Gao, Q., Tan, H.H. and Jagadish, C. (2013) Optically Pumped Room-Temperature GaAs Nanowire Lasers. *Nature Photonics*, **7**, 963-968. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.303>
- [3] Tatebayashi, J., Kako, S., Ho, J., Ota, Y., Iwamoto, S. and Arakawa, Y. (2015) Room-Temperature Lasing in a Single Nanowire with Quantum Dots. *Nature Photonics*, **9**, 213-242. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.111>
- [4] Kim, H., Lee, W.-J., Farrell, A.C., Morales, J.S.D., Senanayake, P., Prikhodko, S.V., Ochalski, T.J. and Huffaker, D.L. (2017) Monolithic InGaAs Nanowire Array Lasers on Silicon-On-Insulator Operating at Room Temperature. *Nano Letters*, **17**, 3465-3470. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b00384>
- [5] Hua, B., Motohisa, J., Kobayashi, Y., Hara, S. and Fukui, T. (2009) Single GaAs/GaAsP Coaxial Core-Shell Nanowire Lasers. *Nano Letters*, **9**, 112-116. <https://doi.org/10.1021/nl802636b>
- [6] Tomioka, K., Yoshimura, M. and Fukui, T. (2012) A III-V Nanowire Channel on Silicon for High-Performance Vertical Transistors. *Nature*, **488**, 198-192. <https://doi.org/10.1038/nature11293>
- [7] Shen, L.-F., Yip, S.P., Yang, Z.-X., Fang, M., Hung, T.F., Pun, E.Y.B. and Ho, J.C. (2015) High-Performance Wrap-Gated InGaAs Nanowire Field-Effect Transistors with Sputtered Dielectrics. *Scientific Reports*, **5**, Article No.



16871. <https://doi.org/10.1038/srep16871>
- [8] Gu, J.J., Wang, X., Wu, H., Gordon, R.G. and Ye, P.D. (2013) Variability Improvement by Interface Passivation and EOT Scaling of InGaAs Nanowire MOSFETs. *IEEE Electron Device Letters*, **34**, 608-610. <https://doi.org/10.1109/LED.2013.2248114>
- [9] Tomioka, K. and Fukui, T. (2014) Current Increment of Tunnel Field-Effect Transistor Using InGaAs Nanowire/Si Heterojunction by Scaling of Channel Length. *Applied Physics Letters*, **104**, Article ID: 073507. <https://doi.org/10.1063/1.4865921>
- [10] Cho, H., Toprasertpong, K., Sodabanlu, H., Watanabe, K., Sugiyama, M. and Nakano, Y. (2017) Stability and Controllability of InGaAs/GaAsP Wire-on-Well (WoW) Structure for Multi-Junction Solar Cells. *Journal of Crystal Growth*, **464**, 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.11.087>
- [11] Ali, L.M. and Abed, F.A. (2017) Investigation the Absorption Efficiency of GaAs/InGaAs Nanowire Solar Cells. *Optical Materials*, **72**, 650-653. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.07.014>
- [12] Yao, M., Huang, N., Cong, S., Chi, C.-Y., Seyedi, M.A., Lin, Y.-T., Cao, Y., Povinelli, M.L., Dapkus, P.D. and Zhou, C. (2014) GaAs Nanowire Array Solar Cells with Axial p-i-n Junctions. *Nano Letters*, **14**, 3293-3303. <https://doi.org/10.1021/nl500704r>
- [13] Tan, H., Fan, C., Ma, L., Zhang, X., Fan, P., Yang, Y., Hu, W., Zhou, H., Zhuang, X., Zhu, X. and Pan, A. (2016) Single-Crystalline InGaAs Nanowires for Room-Temperature High-Performance Near-Infrared Photodetectors. *Nano-Micro Letters*, **8**, 29-35. <https://doi.org/10.1007/s40820-015-0058-0>
- [14] Wu, J., Borg, B.M., Jacobsson, D., Dick, K.A. and Wernersson, L.-E. (2013) Control of Composition and Morphology in InGaAs Nanowires Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, **383**, 158-165. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2013.07.038>
- [15] Mohseni, P.K., Behnam, A., Wood, J.D., English, C.D., Lyding, J.W., Pop, E. and Li, X. (2013) In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As Nanowire Growth on Graphene: Van der Waals Epitaxy Induced Phase Segregation. *Nano Letters*, **13**, 1153-1161. <https://doi.org/10.1021/nl304569d>
- [16] Shin, J.C., Kim, D.Y., Lee, A., Kim, H.J., Kim, J.H., Choi, W.J., Kim, H.-S. and Choi, K.J. (2013) Improving the Composition Uniformity of Au-Catalyzed InGaAs Nanowires on Silicon. *Journal of Crystal Growth*, **372**, 15-18. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2013.02.025>
- [17] Kim, Y., Joyce, H.J., Gao, Q., Tan, H.H., Jagadish, C., Paladugu, M., Zou, J. and Suvorova, A.A. (2006) Influence of Nanowire Density on the Shape and Optical Properties of Ternary InGaAs. *Nano Letters*, **6**, 599-604. <https://doi.org/10.1021/nl052189o>
- [18] Bauer, J., Gottschalch, V. and Wagner, G. (2008) The Influence of the Droplet Composition on the Vapor-Liquid-Solid Growth of InAs Nanowire on GaAs(111)B by Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy. *Journal of Applied Physics*, **104**, Article ID: 114315. <https://doi.org/10.1063/1.3033556>
- [19] Gustiono, D., Wibowo, E. and Othaman, Z. (2013) Synthesis and Characterization of InGaAs Nanowires Grown by MOCVD. *Journal of Physics: Conference Series*, **423**, Article ID: 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/423/1/012047>
- [20] Gunawan, A.A., Jha, S. and Kuech, T.F. (2010) Growth of Size and Density Controlled GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs (x = 0.10) Nanowires on Anodic Alumina Membrane-Assisted Etching of Nanopatterned GaAs. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, **28**, 1111-1119. <https://doi.org/10.1116/1.3498753>
- [21] Hiruma, K., Tomioka, K., Mohan, P., Yang, L., Noborisaka, J., Hua, B., Hayashida, A., Fujisawa, S., Hara, S., Motohisa, J. and Fukui, T. (2012) Fabrication of Axial and Radial Heterostructures for Semiconductor Nanowires by Using Selective-Area Metal-Organic Vapor-Phase Epitaxy. *Journal of Nanotechnology*, **2012**, Article ID: 169284. <https://doi.org/10.1155/2012/169284>
- [22] Tatebayashi, J., Kako, S., Ho, J., Ota, Y., Iwamoto, S. and Arakawa, Y. (2017) Growth of InGaAs/GaAs Nanowire-Quantum Dots on AlGaAs/GaAs Distributed Bragg Reflectors for Laser Applications. *Journal of Crystal Growth*, **468**, 144-148. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.12.022>
- [23] Lü, X.-L., Zhang, X., Liu, X.-L., Yan, X., Cui, J.-G., Li, J.-S., Huang, Y.-Q. and Ren, X.-M. (2013) Growth and Characterization of GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs Axial Nanowire Heterostructures with Symmetrical Heterointerfaces. *Chinese Physics B*, **22**, Article ID: 066101. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/22/6/066101>
- [24] Yan, X., Zhang, X., Ren, X., Lv, X., Li, J., Wang, Q., Cai, S. and Hang, Y. (2012) Formation Mechanism and Optical Properties of InAs Quantum Dots on the Surface of GaAs Nanowires. *Nano Letters*, **12**, 1851-1856. <https://doi.org/10.1021/nl204204f>
- [25] Yan, X., Zhang, X., Ren, X., Li, J., Cui, J., Wang, S., Fan, S., Wang, Q. and Huang, Y. (2013) Morphological and Temperature-Dependent Optical Properties of InAs Quantum Dots on GaAs Nanowires with Different InAs Coverage. *Applied Physics Letters*, **103**, Article ID: 172102. <https://doi.org/10.1063/1.4826612>

- 
- [26] Ren, P., Zhu, X., Han, J., Xu, J., Ma, L., Li, H., Zhuang, X., Zhou, H., Zhang, Q., Xia, M. and Pan, A. (2014) Synthesis and Diameter-Dependent Thermal Conductivity of In As Nanowires. *Nano-Micro Letters*, **6**, 301-306. <https://doi.org/10.1007/s40820-014-0002-8>
- [27] Yu, Y., Li, M.-F., He, J.-F., He, Y.-M., Wei, Y.-J., He, Y., Zha, G.-W., Shang, X.-J., Wang, J., Wang, L.-J., Wang, G.-W., Ni, H.-Q., Lu, C.-Y. and Niu, Z.-C. (2013) Single InAs Quantum Dot Grown at the Junction of Branched Gold-Free GaAs Nanowire. *Nano Letters*, **13**, 1399-1404. <https://doi.org/10.1021/nl304157d>
- [28] Yuan, H., Li, L., Li, Z., Wang, Y., Qu, Y., Ma, X. and Liu, G. (2018) Axial Heterostructure of Au-Catalyzed In-GaAs/GaAs Nanowires Grown by Metal-Organic Chemical Vapor Deposition. *Chemical Physics Letters*, **692**, 28-32. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2017.11.061>
- [29] 苑汇帛, 李林, 曾丽娜, 等. 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 [J]. 物理学报, 2018, 67(18): 188101.