

文章编号: 1000-7032(2021)05-0629-06

Si 掺杂对 GaAs 纳米线发光特性的影响

李 想¹, 亢玉彬¹, 唐吉龙^{1*}, 方 铨¹, 房 丹¹, 李科学¹,
王登魁¹, 林逢源¹, 楚学影², 魏志鹏¹

(1. 长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 采用分子束外延技术(MBE)在 Si(111)衬底上生长了非掺杂和 Si 掺杂砷化镓(GaAs)纳米线(NWs)。通过扫描电子显微镜(SEM)证实了生长样品的一维性;通过 X 射线衍射(XRD)测试和拉曼光谱(Raman)证实了掺杂 GaAs 纳米线中 Si 的存在;通过光致发光(PL)研究了非掺杂和 Si 掺杂 GaAs 纳米线的发光来源,掺杂改变了 GaAs 纳米线的辐射复合机制。掺杂导致非掺杂纳米线中自由激子发光峰和纤锌矿/闪锌矿(WZ/ZB)混相结构引起的缺陷发光峰消失。

关键词: 光谱学; GaAs 纳米线; Si 掺杂; 光致发光; 分子束外延

中图分类号: O472+.3

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20210059

Effect of Si Doping on Photoluminescence Properties of GaAs Nanowires

LI Xiang¹, KANG Yu-bin¹, TANG Ji-long^{1*}, FANG Xuan¹,

FANG Dan¹, LI Ke-xue¹, WANG Deng-kui¹, LIN Feng-yuan¹, CHU Xue-ying², WEI Zhi-peng¹

(1. State Key Laboratory of High-power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding Author, E-mail: jl_tangcust@163.com

Abstract: Undoped and Si-doped gallium arsenide(GaAs) nanowires(NWs) were carried out on Si(111) substrates by molecular beam epitaxy(MBE). The one-dimensional properties of the nanowires were confirmed by scanning electron microscopy(SEM). The presence of Si in doped GaAs NWs was confirmed by X-ray diffraction(XRD) and Raman spectroscopy. The luminescence source of undoped and Si doped GaAs NWs was studied by photoluminescence(PL). The PL results showed that doping changed the radiation recombination mechanism of GaAs NWs. Compared with undoped NWs, the doping results that in the free exciton emission peak and the defect-related emission peak of wurtzite and zinc blende mixed structure disappear simultaneously.

Key words: spectroscopy; GaAs nanowires; Si doping; photoluminescence; MBE

1 引 言

由于 III-V 族材料比 Si 具有更高的载流子迁

移率和吸收系数,因此 III-V 族化合物半导体被广泛认为是下一代电子器件取代 Si 的更有前途的候选材料^[1-2]。GaAs 纳米线作为一种重要的

收稿日期: 2021-02-09; 修订日期: 2021-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(61674021,11674038,61704011,61904017,11804335,12074045); 吉林省教育厅项目(JJKH20200763KJ)资助
Supported by National Natural Science Foundation of China(61674021,11674038,61704011,61904017,11804335,12074045);
Project of Education Department of Jilin Province(JJKH20200763KJ)

III-V 族化合物半导体材料,具有较高的光电转换效率和适中的直接带隙,因此在光电探测器^[3-4]、场效应晶体管^[5-6]、纳米激光器^[7]等各种光电子器件中得到了广泛的应用。尽管目前的 GaAs 纳米线器件已经表现出了良好的性能,但是随着对下一代器件性能要求的不断增长,还需要提高其应用精度。

众所周知,杂质引入对于提高一维纳米光电器件的性能起着至关重要的作用。GaAs 纳米线具有大的表体比和高表面态密度,使得纳米线中载流子更趋向于填充表面态,表面态作为载流子非辐射复合中心,显著降低了器件的性能^[8-9]。最近,Sager 制备了锌掺杂 GaAs 纳米线(N 型)来抑制这一现象^[10],N 型掺杂导致能带向上弯曲并形成电子的势垒。Ali 等报道了 Be 掺杂 GaAs 纳米线(P 型)导致能带向下弯曲^[11],形成了限制空穴的势垒。势垒可以抑制载流子向纳米线表面传输,因此掺杂可以降低表面态对器件的不利影响,从而提高器件的性能。另外,Si 是具有多型掺杂行为的 IV 族元素,Si 掺杂 GaAs 纳米线可能表现出 N 型或 P 型掺杂行为^[12]。N 型或 P 型掺杂都可以形成势垒以此来提高器件性能。因此,研究 Si 掺杂 GaAs 纳米线的性质具有重要意义。目前,对 Si 掺杂 GaAs 纳米线的电学性质已有较多的研究^[13-14],而对其发光机理的研究较少,因此本文主要研究 Si 掺杂 GaAs 纳米线的光学性质。

本文采用分子束外延(MBE)生长技术并利用气-液-固(VLS)生长机制在 Si(111)衬底上生长非掺杂和 Si 掺杂 GaAs 纳米线。通过光致发光对其光学性质进行表征,分析了非掺杂和 Si 掺杂 GaAs 纳米线的发光机理,对进一步的材料生长和器件设计具有指导意义。

2 实 验

实验采用 DCA P600 型号 MBE 系统在 Si(111)衬底上外延生长非掺杂 GaAs 纳米线和 Si 掺杂 GaAs 纳米线。生长之前要先对衬底进行预处理以去除其表面杂质或有机物。首先,将衬底在乙醇溶液和去离子水中均超声清洗 5 min。然后,用氮气枪将衬底表面的水吹干。为了去除衬底表面残留的水和有机物,Si(111)衬底需要经历以下几个脱气步骤。首先,将衬底送入 MBE 的进样室($1.33 \times (10^{-6} \sim 10^{-7})$ Pa($10^{-8} \sim 10^{-9}$ Torr)),

使用卤素灯照射衬底,使其温度达到 200 °C 并持续 2 h;然后,将衬底转移到 MBE 的预处理室(1.33×10^{-8} Pa(10^{-10} Torr)),在 400 °C 下加热 2 h;最后,将即将进行纳米线生长的衬底送至生长室,在 750 °C 下进行 30 min 的脱气处理。处理完成后,采用 VLS 生长机制、自催化的生长方式在 Si(111)衬底上进行非掺杂 GaAs 纳米线的生长,生长温度为 600 °C,Ga 束流压为 8.25×10^{-6} Pa(6.2×10^{-8} Torr),V/III 束流比为 25.8,生长时间为 1 h。同样的条件下,控制 Si 源炉温度在 1280 °C 生长 Si 掺杂 GaAs 纳米线。

采用扫描电子显微镜(SEM)对样品的形貌进行表征;采用 D8 Focus 型 X 射线衍射仪测试获得样品的 XRD 图;采用 LabRAM HR Evolution, HORIBA 光谱仪在室温下对样品进行拉曼光谱测试。利用 iHR550 光谱仪对样品进行了光致发光测试,采用 InGaAs 探测器探测光信号,探测器工作温度保持在 -30 °C。在 10 ~ 100 K 的温度范围和 20 ~ 300 mW/cm² 的激发功率密度范围内进行了光致发光测试。

3 结果与讨论

图 1(a) 显示的是非掺杂 GaAs 纳米线 SEM 图像,图 1(b) 显示的为 Si 掺杂 GaAs 纳米线 SEM 图像,利用粒径分布统计得到非掺杂和 Si 掺杂 GaAs 纳米线的长度分别为 4.41 μm 和 4.36 μm,直径均为 90 nm。通过 SEM 图像证实了生长样品的一维性。图 2(a) 显示的是非掺杂和 Si 掺杂 GaAs 纳米线的 XRD 图,其中 Si 衬底的衍射峰 Si(111) 和 Si(222) 对应的角度分别为 28.5° 和 58.9°,GaAs 纳米线的衍射峰 GaAs(111) 和 GaAs(220) 对应的角度分别为 27.3° 和 45.4°。Si 掺杂后的 GaAs(111) 和 GaAs(220) 衍射峰强度明显较低,这是 Si 掺杂导致晶格质量下降引起的,证明了 Si 在纳米线中的掺杂^[15]。通过对掺杂前后的样品进行拉曼光谱测试,进一步分析样品的成分。拉曼光谱结果如图 2(b) 所示,GaAs 纳米线存在横向光学(TO)声子、纵向光学(LO)声子以及纤锌矿结构特有的 E2 声子,对应峰位分别为 268.5, 291.7, 258.6 cm⁻¹,这与文献报道的数值吻合较好^[16-17]。Si 掺杂 GaAs 纳米线主要存在 TO、LO 两个模式,对掺杂前后 GaAs 纳米线的拉曼光谱图进行了归一化处理,结果显示 Si 掺杂 GaAs 纳

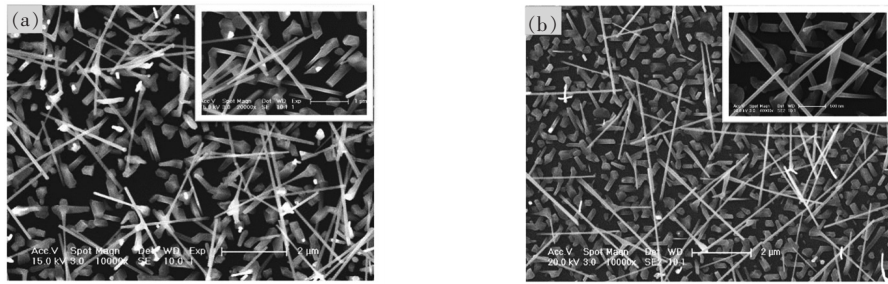


图 1 GaAs 纳米线 SEM 图像。(a)非掺杂 GaAs 纳米线 SEM 图像,插图为局部放大图;(b)Si 掺杂 GaAs 纳米线 SEM 图像,插图为局部放大图。

Fig. 1 SEM image of the GaAs NWs. (a)SEM image of the undoped GaAs NWs, the inset is partial image enlarged. (b)SEM image of the Si-doped GaAs NWs, the inset is partial image enlarged.

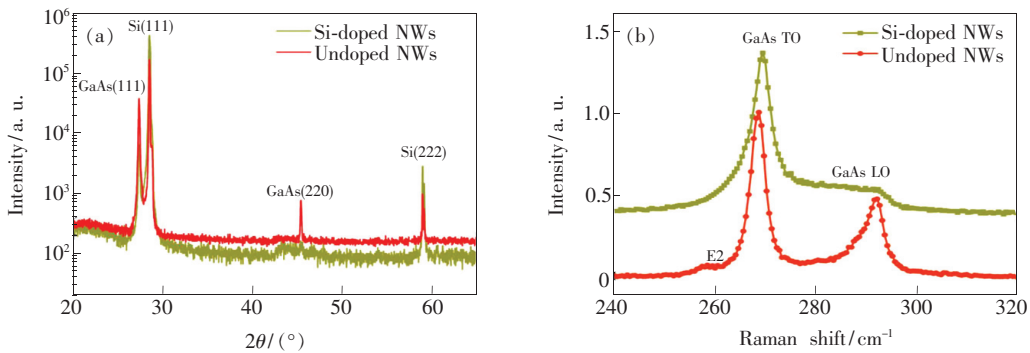


图 2 非掺杂 GaAs 纳米线和 Si 掺杂 GaAs 纳米线的 XRD 图和 Raman 光谱。(a)XRD 图像;(b)Raman 光谱。

Fig. 2 XRD image and Raman spectra of undoped and Si-doped GaAs NWs. (a)XRD image. (b)Raman spectra.

米线的 LO 峰强度减弱,这与文献报道的 Si 掺杂对 LO 峰的影响趋势一致^[18]。Si 掺杂 GaAs 纳米线中 E2 声子消失,证明了掺杂后纳米线中纤锌矿(WZ)结构消失,同样 Raman 光谱也证明了 GaAs 纳米线实现了 Si 的有效掺杂。

为了研究掺杂对 GaAs 纳米线发光特性的影响,进行了光致发光光谱测试。图 3 显示的是非掺杂 GaAs 纳米线和 Si 掺杂 GaAs 纳米线在 10 K 下的归一化光谱对比图。从图中观察到,非掺杂 GaAs 纳米线的发光峰位于 1.519 eV 和 1.494 eV 处,分别标记为 P1 和 P2;Si 掺杂 GaAs 纳米线的发光峰位于 1.457 eV 和 1.496 eV 处,分别标记为 P3 和 P4。掺杂导致 P1、P2 峰消失,发光由 P3、P4 峰主导,掺杂后 PL 光谱的半峰宽明显展宽。通过 PL 光谱半峰宽可计算 Si 掺杂 GaAs 纳米线的载流子浓度,关系式为^[19]:

$$FWHM = (3.84 \times 10^{-14})n^{2/3}, \quad (1)$$

其中 $FWHM$ 为 PL 的半峰宽, n 为载流子浓度。由图 3 可知, Si 掺杂 GaAs 纳米线的半峰宽为 0.115 eV,由公式(1)计算得到 Si 掺杂 GaAs 纳米

线中载流子浓度为 $5.18 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。掺杂前后纳米线的 PL 发光峰峰位发生改变,且掺杂后 GaAs 纳米线半峰宽展宽,这些现象表明 Si 掺杂改变了 GaAs 纳米线的发光机制。为了对掺杂前后 GaAs 纳米线的发光来源进行确认,接下来对非掺杂 GaAs 纳米线和 Si 掺杂 GaAs 纳米线进行了变温变功率 PL 光谱测试。

首先对非掺杂 GaAs 纳米线进行变功率 PL 的测试,如图 4(a)所示。从图中可以看出,随着激发功率密度的升高,P1 峰位并未发生移动,PL 峰强度与激发功率的关系可以用来确定发光峰位的来源,发光峰的积分强度与激发功率之间存在如下关系^[20-21]:

$$I = \eta I_0^\gamma, \quad (2)$$

其中, I 为光谱的积分强度, I_0 为激光辐射功率, η 为辐射效率, γ 为判断辐射复合机制的常数。根据 γ 的大小可对发光的辐射机制进行判断:当 $1 < \gamma < 2$ 时,发光来自于激子复合;当 $\gamma \approx 2$ 时,发光源于带边发光;当 $\gamma < 1$ 时,为杂质或者缺陷的发光。采用公式(2)对非掺杂 GaAs 纳米线变功率

光谱进行拟合,如图 4(b)所示,拟合得到的 P1 峰的 γ 值为 1.416,且峰位位于 1.519 eV,因此推断 P1 为自由激子的发光^[22],得到 P2 峰的 γ 值为 0.9,因此证明 P2 是与缺陷相关的发光。图 2(b)中 Raman 光谱测试结果证明非掺杂 GaAs 纳米线中存在 WZ 结构特有的 E2 声子,证明 P2 是纤锌矿/闪锌矿(WZ/ZB)混相结构引起的缺陷发光峰,这与文献报道的 1.494 eV 附近处为 WZ/ZB 混相相关的峰的结论符合^[23]。图 4(c)显示的是激发功率密度为 300 mW/cm² 的变温光谱,随着温度的升高,P1 峰峰位发生红移,这与 III-V 半导体材料带隙随温度升高红移的规律一致,是晶格振动导致的^[24]。图 4(d)为 P1 发光峰位随温度变化的拟合图,采用 Varshni 公式进行拟合^[22]:

$$E_g = E_0 - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}, \quad (3)$$

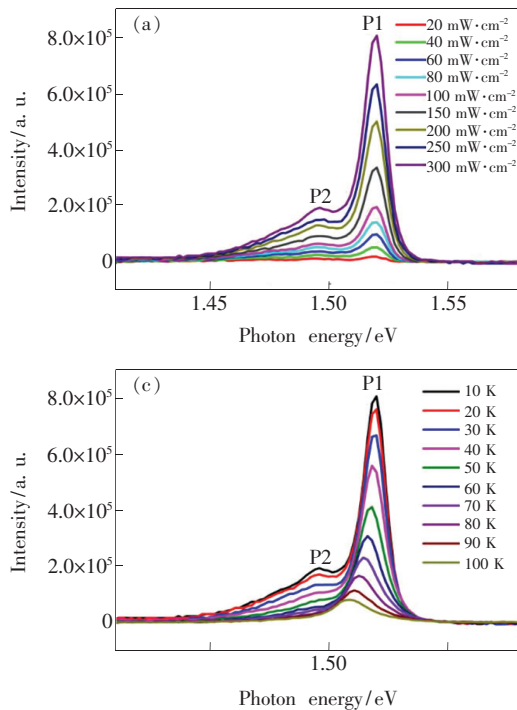


图 4 非掺杂 GaAs 纳米线的 PL 光谱。(a) 10 K 下变功率图;(b) 变功率 PL 光谱拟合曲线;(c) 变温 PL 光谱;(d) PL 峰变温拟合曲线。

Fig. 4 PL spectra of undoped GaAs NWs. (a) Power-dependent PL spectra at 10 K. (b) Fitting of power-dependent PL spectra. (c) Temperature-dependent PL spectra. (d) Fitting of temperature-dependent PL spectra.

$\alpha = 4.56 \times 10^{-4}$ eV/K, $\beta = 305.7$ K。与文献报道的 E_0 (1.517 ± 0.004 eV)、 α ($4.8 \times 10^{-4} \sim 6.2 \times 10^{-4}$ eV/K) 和 β (225 ± 89) K) 范围一致^[25],进一步证明 P1 峰是自由激子的发光。

接下来对掺杂 GaAs 纳米线进行变功率 PL 光谱测试,以对其发光来源进行判断,Si 掺杂

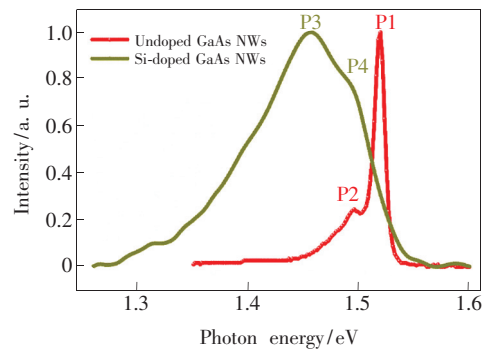
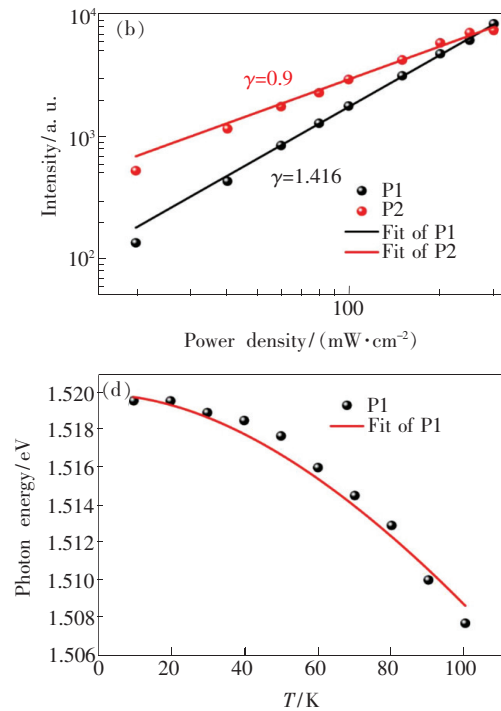


图 3 10 K 下非掺杂 GaAs 纳米线和 Si 掺杂 GaAs 纳米线归一化光谱

Fig. 3 Normalized PL spectra of undoped and Si-doped GaAs NWs at 10 K

其中, E_g 是温度为 T 时材料的带隙, E_0 是温度为 0 K 时的带隙, α 是 Varshni 系数, β 是与德拜温度相关的参数。拟合后的参数分别为 $E_0 = 1.5198$ eV,



GaAs 薄膜材料可能会形成与 Si 受主杂质相关的施主受主对(DAP)和带-受主的发光^[26]。图 5(a)为 Si 掺杂 GaAs 纳米线变功率 PL 光谱,插图为 P3、P4 的变功率拟合图,拟合得到的 γ 值分别为 0.54 和 0.65,证明 P3、P4 均是与掺入的 Si 杂质相关的复合发光。从图 5(b)可以看出,P3 峰位随着

激发功率密度的升高发生蓝移,这与 DAP 的发光规律一致,DAP 的发光存在如下关系^[27]:

$$h\nu = E_g - (E_D + E_A) + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}, \quad (4)$$

其中, $h\nu$ 表示 DAP 的发光能量, E_g 为禁带宽度, E_D 和 E_A 分别表示施主和受主的电离能, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ 为相对介电常数, r 为施主-受主分离的距离。等式的最后一项代表施主和受主之间

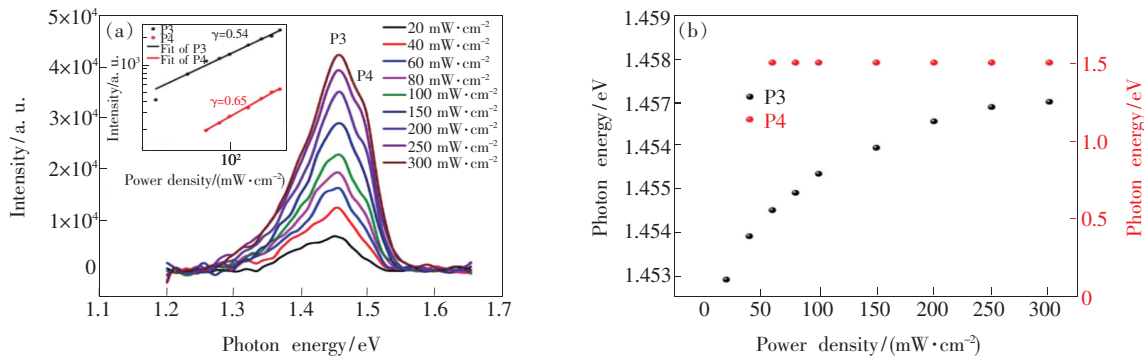


图 5 Si 掺杂 GaAs 纳米线的 PL 光谱。(a) 变功率图, 插图变为功率拟合图; (b) P3、P4 峰位随激发功率变化图。

Fig. 5 PL spectra of Si-doped GaAs NWs. (a) Power-dependent PL spectra image, the inset is the fitting of power-dependent PL spectra. (b) P3 and P4 peak position at various power density.

4 结 论

本文采用分子束外延技术,利用 VLS 生长机制在 Si(111) 衬底上生长了非掺杂和 Si 掺杂 GaAs 纳米线。通过形貌表征证实了非掺杂和 Si 掺杂 GaAs 纳米线的一维性;XRD 结果显示 Si 掺杂使得 GaAs(111) 和 GaAs(220) 强度减弱;Ra-

相互的库伦作用,随着激发功率的提高,施主和受主的密度增加,从而减小了施主-受主分离的距离,导致库伦作用增强,进而增大发光能量,使 DAP 发光峰位发生蓝移,因此证明 P3 是与 Si 受主杂质相关的 DAP 发光。P4 峰位随着激发功率密度的提高不发生移动,且带-受主的发光应在 DAP 的高能侧,因此 P4 是与 Si 受主杂质相关的带-受主复合发光。

man 光谱测试结果显示 Si 掺杂使得 LO 峰强度减弱,证明了 Si 的有效掺杂;通过 PL 测试分析了掺杂前后纳米线的发光来源,非掺杂 GaAs 纳米线存在两个发光峰,其中 P1 为自由激子发光,P2 为 WZ/ZB 混相引起的缺陷发光,Si 掺杂 GaAs 纳米线的发光峰 P3 为与 Si 受主杂质相关的 DAP 发光,P4 为与 Si 受主杂质相关的带-受主发光。

参 考 文 献:

- [1] DEL ALAMO J A. Nanometre-scale electronics with III-V compound semiconductors [J]. *Nature*, 2011,479(7373): 317-323.
- [2] DE ARQUER F P G, ARMIN A, MEREDITH P, *et al.*. Solution-processed semiconductors for next-generation photodetectors [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2017,2(3):16100-1-16.
- [3] ZHU X T, LIN F Y, ZHANG Z H, *et al.*. Enhancing performance of a GaAs/AlGaAs/GaAs nanowire photodetector based on the two-dimensional electron-hole tube structure [J]. *Nano Lett.*, 2020,20(4):2654-2659.
- [4] ZHU X T, LIN F Y, CHEN X Y, *et al.*. Influence of the depletion region in GaAs/AlGaAs quantum well nanowire photodetector [J]. *Nanotechnology*, 2020,31(44):444001-1-6.
- [5] KASAI S, ASAI T. Stochastic resonance in schottky wrap gate-controlled GaAs nanowire field-effect transistors and their networks [J]. *Appl. Phys. Express*, 2008,1(8):083001-1-3.
- [6] ULLAH A R, MEYER F, GLUSCHKE J G, *et al.*. P-GaAs nanowire metal-semiconductor field-effect transistors with near-thermal limit gating [J]. *Nano Lett.*, 2018,18(9):5673-5680.
- [7] SAXENA D, MOKKAPATI S, PARKINSON P, *et al.*. Optically pumped room-temperature GaAs nanowire lasers [J]. *Nat. Photonics*, 2013,7(12):963-968.

- [8] WOO R L, XIAO R, KOBAYASHI Y, *et al.*. Effect of twinning on the photoluminescence and photoelectrochemical properties of indium phosphide nanowires grown on silicon (111) [J]. *Nano Lett.*, 2008, 8(12):4664-4669.
- [9] PARKINSON P, JOYCE H J, GAO Q, *et al.*. Carrier lifetime and mobility enhancement in nearly defect-free core-shell nanowires measured using time-resolved terahertz spectroscopy [J]. *Nano Lett.*, 2009, 9(9):3349-3353.
- [10] SAGER D, GUTSCHE C, PROST W, *et al.*. Recombination dynamics in single GaAs-nanowires with an axial heterojunction: n- versus p-doped areas [J]. *J. Appl. Phys.*, 2013, 113(17):174303-1-5.
- [11] ALI H, ZHANG Y Y, TANG J, *et al.*. High-responsivity photodetection by a self-catalyzed phase-pure p-GaAs nanowire [J]. *Small*, 2018, 14(17):1704429-1-9.
- [12] HIJAZI H, MONIER G, GIL E, *et al.*. Si doping of vapor-liquid-solid GaAs nanowires: n-type or p-type? [J]. *Nano Lett.*, 2019, 19(7):4498-4504.
- [13] HAN N, YANG Z X, WANG F Y, *et al.*. Modulating the morphology and electrical properties of GaAs nanowires *via* catalyst stabilization by oxygen [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2015, 7(9):5591-5597.
- [14] BUSSONE G, SCHÄFER-EBERWEIN H, DIMAKIS E, *et al.*. Correlation of electrical and structural properties of single as-grown GaAs nanowires on Si (111) substrates [J]. *Nano Lett.*, 2015, 15(2):981-989.
- [15] IHN S G, RYU M Y, SONG J I. Optical properties of undoped, Be-doped, and Si-doped wurtzite-rich GaAs nanowires grown on Si substrates by molecular beam epitaxy [J]. *Solid State Commun.*, 2010, 150(15-16):729-733.
- [16] KETTERER B, UCCELLI E, FONTCUBERTA I, MORRAL A. Mobility and carrier density in p-type GaAs nanowires measured by transmission Raman spectroscopy [J]. *Nanoscale*, 2012, 4(5):1789-1793.
- [17] ZARDO I, CONESA-BOJ S, PEIRO F, *et al.*. Raman spectroscopy of wurtzite and zinc-blende GaAs nanowires: polarization dependence, selection rules, and strain effects [J]. *Phys. Rev. B*, 2009, 80(24):245324-1-11.
- [18] SIGNORELLO G, KARG S, BJÖRK M T, *et al.*. Tuning the light emission from GaAs nanowires over 290 meV with uniaxial strain [J]. *Nano Lett.*, 2013, 13(3):917-924.
- [19] ARAB S, YAO M Q, ZHOU C W, *et al.*. Doping concentration dependence of the photoluminescence spectra of n-type GaAs nanowires [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 108(18):182106-1-5.
- [20] BERGMAN L, CHEN X B, MORRISON J L, *et al.*. Photoluminescence dynamics in ensembles of wide-band-gap nanocrystallites and powders [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, 96(1):675-682.
- [21] GE X T, WANG D K, GAO X, *et al.*. Localized states emission in type-I GaAsSb/AlGaAs multiple quantum wells grown by molecular beam epitaxy [J]. *Phys. Status Solidi-Rapid Res. Lett.*, 2017, 11(3):1700001-1-5.
- [22] VURGAFTMAN I, MEYER J R, RAM-MOHAN L R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, 89(11):5815-5875.
- [23] 王鹏华, 唐吉龙, 元玉彬, 等. GaAs 纳米线晶体结构及光学特性 [J]. *物理学报*, 2019, 68(8):087803-1-7.
WANG P H, TANG J L, KANG Y B, *et al.*. Crystal structure and optical properties of GaAs nanowires [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2019, 68(8):087803-1-7. (in Chinese)
- [24] MANOOGIAN A, WOOLLEY J C. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors [J]. *Can. J. Phys.*, 1984, 62(3):285-287.
- [25] GRILLI E, GUZZI M, ZAMBONI R, *et al.*. High-precision determination of the temperature dependence of the fundamental energy gap in gallium arsenide [J]. *Phys. Rev. B*, 1992, 45(4):1638-1644.
- [26] BRIONES F, COLLINS D M. Low temperature photoluminescence of lightly Si-doped and undoped MBE GaAs [J]. *J. Electron. Mater.*, 1982, 11(4):847-866.
- [27] LUCKERT F, HAMILTON D I, YAKUSHEV M V, *et al.*. Optical properties of high quality $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ thin films [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(6):062104-1-3.



李想(1994 -), 男, 吉林榆树人, 硕士研究生, 2016 年于大连民族大学获得学士学位, 主要从事半导体材料表征方面的研究。

E-mail: 416944265@qq.com



唐吉龙(1977 -), 男, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 博士研究生导师, 2011 年于长春理工大学获得博士学位, 主要从事半导体材料外延生长与器件方面的研究。

E-mail: jl_tangcust@163.com