

文章编号: 1000-7032(2022)06-0862-07

In_{0.49}Ga_{0.51}P 材料有序度对发光特性的影响

刘伟超^{1,2}, 王海珠^{1,2*}, 王嘉宾^{1,2}, 王曲惠^{1,2}, 范 杰^{1,2}, 邹永刚^{1,2}, 马晓辉^{1,2}

(1. 长春理工大学 高功率半导体国家重点实验室, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学 重庆研究院, 重庆 401135)

摘要: In_{0.49}Ga_{0.51}P 材料因与 GaAs 晶格匹配且具有较宽的能量带隙, 在 GaAs 基短波长激光器和无铝激光器等研究方向上受到了广泛关注。不同领域的应用对 In_{0.49}Ga_{0.51}P 材料的性能提出了不同的需求, 导致 In_{0.49}Ga_{0.51}P 材料的有序度发生变化, 进而导致其发光特性发生改变。本文利用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 技术, 在半绝缘的 GaAs 衬底上开展 In_{0.49}Ga_{0.51}P 材料有序度对其发光特性影响的研究。通过改变硅烷 (SiH₄) 和二乙基锌 (DEZn) 掺杂剂的掺杂流量和 V/III 比的方法来改变 In_{0.49}Ga_{0.51}P 材料的有序度。室温光致发光测试 (PL) 和低温 PL 测试结果表明, 两种掺杂剂掺杂流量增加都会导致 In_{0.49}Ga_{0.51}P 有序度降低, 从而使 InGaP 的发光波长蓝移。此外, V/III 比增加会导致 In_{0.49}Ga_{0.51}P 有序度增加, 使样品的发光波长红移。

关键词: 金属有机化学气相沉积; 镓磷/镓砷; 光致发光; 故意掺杂

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20220059

Effect of Orderliness of In_{0.49}Ga_{0.51}P Material on Luminescence Characteristics

LIU Wei-chao^{1,2}, WANG Hai-zhu^{1,2*}, WANG Jia-bin^{1,2}, WANG Qu-hui^{1,2},

FAN Jie^{1,2}, ZOU Yong-gang^{1,2}, MA Xiao-hui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Research Institute of Chongqing, Changchun University of Science and Technology, Chongqing 401135, China)

* Corresponding Author, E-mail: whz@cust.edu.cn

Abstract: The In_{0.49}Ga_{0.51}P material, as a semiconductor material with broad energy bandgap and matching lattice parameters with GaAs, has obtained widespread attention and application, such as GaAs-based short-wavelength lasers and aluminum-free lasers. Aiming on its applications in different fields, different demands are proposed on the properties of In_{0.49}Ga_{0.51}P materials, which lead to changes in the orderliness of In_{0.49}Ga_{0.51}P, and then, its luminescence properties. In this paper, the luminescence-characteristics effect of the orderliness of In_{0.49}Ga_{0.51}P material on semi-insulated GaAs substrate was studied using metal organic chemical vapour deposition (MOCVD) technology. The doping flux of SiH₄ and DEZn and the change of V/III ratio can affect the ordering of In_{0.49}Ga_{0.51}P material. The results of room temperature PL test and low temperature PL test show that the increase of the doping flux of the two dopants can lead to the decrease of the order degree of In_{0.49}Ga_{0.51}P, thus causing the blue-shift of the emission wavelength of InGaP. In addition, the increase of V/III ratio leads to the increase of the orderliness of In_{0.49}Ga_{0.51}P, which leads to the red shift of the luminescence wavelength of the sample.

收稿日期: 2022-03-01; 修订日期: 2022-03-20

基金项目: 吉林省科技发展计划 (20210201089GX); 重庆市自然科学基金 (cstc2021jcyj-msxmX1060) 资助项目

Supported by Jilin Science and Technology Development Plan (20210201089GX); Natural Science Foundation of Chongqing City (cstc2021jcyj-msxmX1060)

Key words: metal organic chemical vapour deposition (MOCVD); InGaP/GaAs; photoluminescence; intentional doping

1 引言

InGaP是应用在太阳能电池、发光二极管和异质结双晶体管等发光器件中的重要材料^[1-2]。与GaAs晶格匹配的 $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ (为了简洁,下文统一采用InGaP替代 $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$)材料被认为是AlGaAs/GaAs材料体系的替代方案,从而实现无Al化高质量和高可靠性器件的制备^[3]。AlGaAs/GaAs材料体系因晶格匹配、外延工艺成熟等优点受到了广泛的关注和应用^[4-6]。然而,由于AlGaAs材料易氧化,会导致器件的端面复合速率增加而产生光学灾变损伤,使器件的工作寿命和可靠性下降^[7-9]。与传统的AlGaAs/GaAs材料体系相比,使用InGaP/GaAs体系的半导体激光器具有如下优点:(1)InGaP材料的表面复合速率较低,可有效地降低半导体激光器的端面温度,从而能够实现高输出功率下的可靠工作^[10-11];(2)InGaP限制层材料的较高导电性和导热性使得半导体激光器可在高功率下获得更好的转换效率^[12];(3)由于再生界面上没有含Al化合物,所以有利于进行多次外延和构成掩埋结构的半导体激光器发展^[13]。因此开展GaAs基InGaP材料的研究极具意义。

金属有机化学气相沉积(MOCVD)技术因为可以制备高质量的异质结构受到了广泛的关注和研究^[14-16]。利用MOCVD技术生长InGaP/GaAs异质结时,InGaP的发光特性会随着生长参数的改变而发生变化^[17]。这是因为InGaP材料具有一种有序现象,并且InGaP的有序倾向比其他III-V族三元化合物更强。InGaP有序结构的衍射模式对应于Cu-Pt型晶体结构。完全有序的InGaP材料中GaP和InP单层沿闪锌矿结构对角线 $\langle 111 \rangle$ 方向交替排列^[18]。当InGaP材料从有序结构变化到无序结构时,许多物理性质也会发生突变,有序的InGaP的能量带隙比Ga原子和In原子完全随机分布的无序结构的能量带隙窄约160 meV^[19]。对于InGaP材料而言,掺杂水平和V/III比等因素会影响到InGaP材料的有序度^[20],从而改变InGaP的能量带隙。因此,本文通过改变掺杂源流量和V/III比进行InGaP有序度对发光特性影响的探究工作,通过室温PL和低温PL测试分析不同生长参

数下样品发光特性随有序度的变化情况。

2 实验

利用德国Aixtron公司200/4型MOCVD外延设备进行InGaP材料的制备。以三甲基镓(TMGa)和三甲基铟(TMIn)为III族源,砷烷(AsH_3)和磷烷(PH_3)为V族源,采用高纯氢气(H_2)作为III族源的载气,外延生长过程在富V族源的情况下进行。反应室压力始终保持为10 000 Pa(100 mbar),托盘的旋转速度约为100 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。为了降低样品生长过程中其他因素的影响,所有样品的生长温度、生长速率和衬底类型等生长参数都保持不变。使用半绝缘GaAs(100)衬底进行InGaP掺杂外延层的生长,生长温度为650 $^{\circ}\text{C}$,生长厚度为500 nm。

选用 SiH_4 作为N型掺杂剂,N型变掺杂源流量样品的V/III比设定为200,掺杂源流量设定为0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。选用DEZn作为P型掺杂剂,变V/III比掺Zn-InGaP样品的掺杂源流量为4 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,V/III比分别设定为40, 90, 160, 200。P型变掺杂源流量样品的V/III比设定为200,掺杂源流量设定为0, 2, 4, 8, 10, 20, 30, 40 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

为了评估所有样品的光学性能、电学性能和表面质量,采用(RPM 2000)室温PL光谱测试了InGaP样品的光学性质,光源波长为477 nm,功率密度为2.05 $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。利用iHR550光谱仪对样品进行了低温PL测试,光源波长为477 nm,功率密度为80 $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。采用美国Bio-Rad的直流霍尔测试设备(HL5500PC)对样品的电学性能进行测试。使用原子力显微镜(AFM)分析变V/III比样品的表面形貌和均方根(RMS)表面粗糙度。

3 结果与讨论

3.1 SiH_4 流量对掺Si-InGaP发光特性的影响

为了探究Si掺杂对InGaP样品发光特性的影响,本文对含不同 SiH_4 流量的N型InGaP样品进行室温PL测试,测试结果如图1所示。从图中可知,本征InGaP材料的发光波长在663.3 nm附近,随着 SiH_4 流量的增加,InGaP的发光波长逐渐发生蓝移。 SiH_4 流量为60 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,样品的发光波长最短,该掺杂样品的能量带隙比本征InGaP

宽 79.94 meV 左右。InGaP 波长发生蓝移是因为 SiH₄ 流量的增加导致 InGaP 样品中载流子浓度增加,在存在大量施主供体的情况下,InGaP 掺杂费米能级的移动增加了带负电荷的 III 族原子空位点缺陷的浓度,III 族原子空位点缺陷的扩散系数也

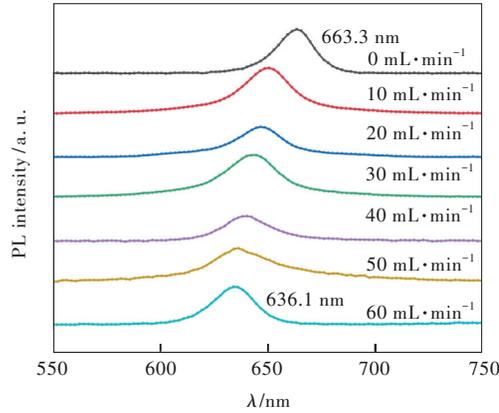


图 1 掺 Si-InGaP 室温 PL 与 SiH₄ 流量的关系

Fig.1 The room temperature PL of Si-doped InGaP as a function of SiH₄ flow rate

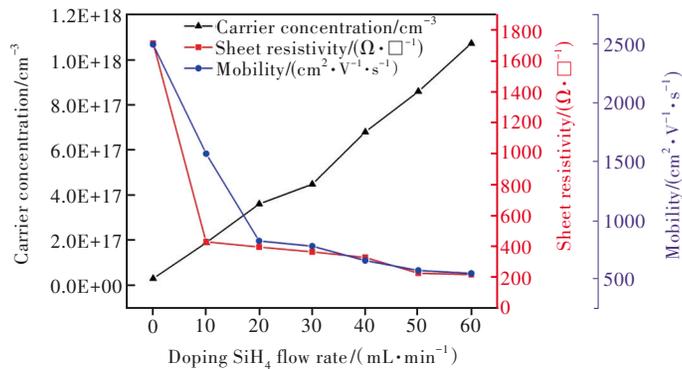


图 2 掺 Si-InGaP 的电性能与 SiH₄ 流量的关系

Fig.2 The electrical properties of Si-doped InGaP as a function of SiH₄ flow rate

3.2 V/III 比对掺 Zn-InGaP 发光特性的影响

为了探究 V/III 比对掺 Zn-InGaP 发光特性的影响,在生长温度为 650 °C、DEZn 流量为 4 mL·min⁻¹ 的条件下,生长不同 V/III 比的样品并进行室温 PL 测试,测试结果如图 3 所示。随着 V/III 比的增加,InGaP 的发光波长逐渐从 638.1 nm 红移到 652.8 nm,样品的能量带隙变窄 43.75 meV 左右。InGaP 的发光波长红移是由于 V/III 比增大提高了外延片表面 PH₃ 及其聚合物的浓度,使 III 族原子在外延片表面的停留时间减短^[20],从而优化了材料的表面形貌,增加了材料的有序度,减小 InGaP 材料的能量带隙。

为了验证 InGaP 有序度的增加是由材料表面质量提高所导致的,对部分变 V/III 比样品进行了 AFM

随之增加^[21],从而使 III 族原子的扩散系数增加^[22]。III 族原子的扩散系数增加使 InGaP 中大量的 In 和 Ga 原子发生相互扩散,使得有序结构在后续的生长过程中随机化^[23]。因此, SiH₄ 流量的增加降低了 InGaP 的有序度,使 InGaP 的能量带隙变宽。

为了进一步验证 InGaP 有序度的降低是由 Si 掺杂引起载流子浓度增加所导致的,对 N 型掺杂样品进行了 Hall 测试,测试结果如图 2 所示。随着 SiH₄ 流量的增加,样品的载流子浓度从 $2.93 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 增加到 $1.10 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、载流子迁移率从 $2490 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低到 $542 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 、面电阻率从 $1710 \text{ } \Omega \cdot \square^{-1}$ 降低到 $215 \text{ } \Omega \cdot \square^{-1}$ 。SiH₄ 流量的增加使样品中杂质能级增多,本征状态时无法跃迁至导带的电子数量增多。同时,价带中形成电子的数量也增多,导致样品中的载流子浓度增加。Hall 测试证明 SiH₄ 掺杂流量的增加导致 InGaP 中的载流子浓度增大,降低了 InGaP 材料的有序度,增大其能量带隙。

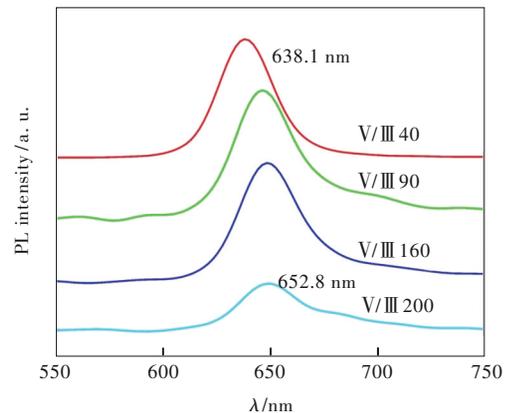


图 3 掺 Zn-InGaP 室温 PL 与 V/III 比的关系

Fig.3 The room temperature PL of Zn-doped InGaP as a function of V/III ratio

测试,测试结果如图 4 所示。图 4(a)是 V/Ⅲ 比为 90 的掺 Zn-InGaP 样品测试图,该样品台面高度差距较大,其表面粗糙度 Ra 为 3.11 nm。图 4(b)为 V/Ⅲ 比为 200 的掺 Zn-InGaP 样品测试图,该样品台面高度较为均匀^[24],其表面粗糙度 Ra 为 2.52 nm。AFM 测试证明,随着 V/Ⅲ 比的增加,掺 Zn-InGaP 材料的表面粗糙度降低,表面质量得到了提升,从而使得 InGaP 的有序度增加,能量带隙减小。

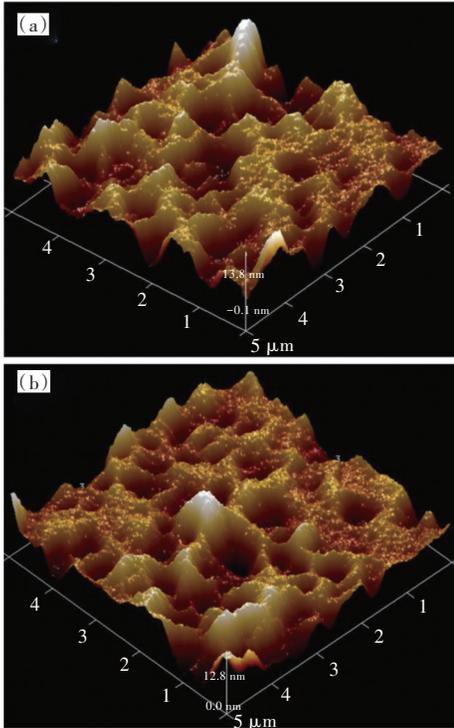


图 4 掺 Zn-InGaP 样品变 V/Ⅲ 比的 AFM 测试图

Fig.4 The surface quality of Zn-doped InGaP as a function of V/Ⅲ ratio

3.3 Zn 流量对掺 Zn-InGaP 发光特性的影响

为了探究 Zn 掺杂对样品发光特性的影响,对掺 Zn-InGaP 样品进行了室温 PL 测试,测试结果如图 5 所示。从图中发现随着 DEZn 流量的增加,

InGaP 的发光波长逐渐发生蓝移。当 DEZn 流量从 $8 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 增加到 $40 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,样品的波长从 650.7 nm 蓝移到 634.0 nm,样品的能量带隙变宽 50.20 meV 左右。InGaP 波长发生蓝移是由于 DEZn 流量的增加导致 InGaP 样品中载流子浓度增大,在存在大量受主供体的情况下,InGaP 的掺杂费米能级向价带移动,增大了带正电的Ⅲ族自间隙点缺陷的浓度;此外,Zn 掺杂浓度增大将会诱导带正电荷的Ⅲ族自间隙点缺陷达到过饱和^[25],加强Ⅲ族原子的互扩散^[26],引起 InGaP 有序度降低,使其能量带隙增大。

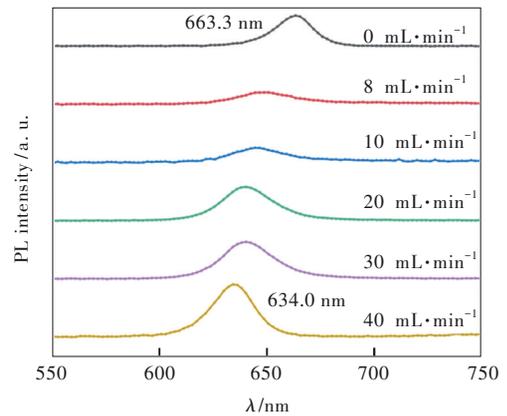


图 5 掺 Zn-InGaP 的室温 PL 与 DEZn 流量的关系

Fig.5 The room temperature PL of Zn-doped InGaP as a function of DEZn flow rate

为了验证 InGaP 有序度的降低是由 Zn 掺杂引起载流子浓度增加所导致的,对掺 Zn-InGaP 样品进行了 Hall 测试,测试结果如图 6 所示。从图中可知,本征 InGaP 样品中载流子浓度为 $-2.93 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,样品的载流子浓度随着 DEZn 流量的增加而增加,样品的面电阻率随 DEZn 流量的增加呈现出先增大后减小的趋势。且当 DEZn 流量达到 $2 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,面电阻率为最大值,即 $2690 \Omega\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

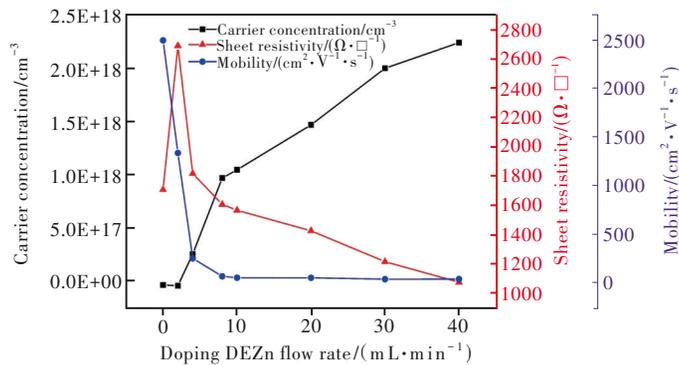


图 6 掺 Zn-InGaP 的电学性能与 DEZn 流量的关系

Fig.6 The electrical properties of Zn-doped InGaP as a function of DEZn flow rate

\square^{-1} , 此时样品处于杂质的高度补偿状态^[27]。样品中的载流子迁移率随着 DEZn 流量的增加逐渐降低, 从 $2\,490\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低到 $52\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。Hall 测试证明了随着 DEZn 流量的增加, InGaP 中载流子浓度逐渐增大, 降低了 InGaP 的有序度, 使其能量带隙增大。

为了进一步验证掺 Zn 对 InGaP 材料发光特性产生的影响, 分别选用本征和载流子浓度为 $2.6\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 的 InGaP 样品进行低温 PL 测试, 两个样品分别命名为 A 和 B, 利用其在 20 K 下 PL 的能量带隙进行有序度计算。本征 InGaP (A 样品) 的变温 PL 光谱如图 7 所示, A 样品从 15 K 逐渐升温到 300 K 的过程中只有一个发光峰 (将该峰命名为 P_1) 存在。 P_1 峰的峰位随着温度升高逐渐发生红移, 这是由于晶格振动导致材料的能量带隙发生变化。20 K 下 P_1 峰为自由激子复合发光峰, 其能量带隙为 1 893 meV, 利用公式 (1) 来计算本征 InGaP 的有序度^[28]:

$$\eta = \sqrt{\frac{2005 - E_{\text{PL}}}{471}}, \quad (1)$$

其中 E_{PL} 为 20 K 下 InGaP 的能量带隙, 通过公式 (1) 计算得到 η 值为 0.487, 这与文献中利用 MOCVD 生长的本征 InGaP 样品的 η 值 0.5^[25] 差距较小, 说明本文利用 MOCVD 生长的本征 InGaP 的有序度较好。

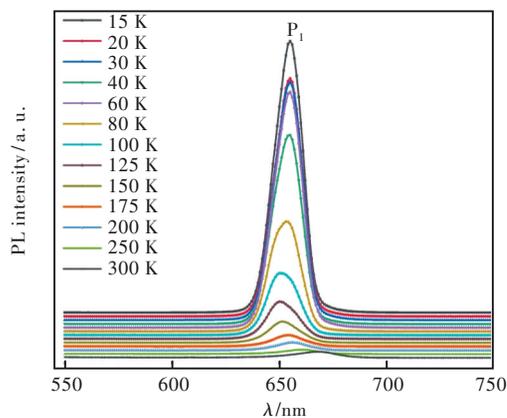


图 7 A 样品变温 PL 测试图

Fig.7 Variable temperature PL test diagram of sample A

同样, 对载流子浓度为 $2.6\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 的掺 Zn-InGaP (B 样品) 进行低温 PL 测试, 测试结果如图 8 所示。测试结果显示 B 样品在 15 K 时存在 3 个发光峰 (分别将其命名为 P_1 、 P_2 和 P_3 峰)。此时 P_3 峰的发光强度最强, P_1 、 P_2 峰的发光强度较弱。随着温度升高, P_1 、 P_2 和 P_3 峰的发光强度

逐渐减弱, 但 P_2 和 P_3 峰发光强度的衰减趋势更强, 最后 P_2 和 P_3 峰逐渐并入到 P_1 峰中, 且三个峰的峰位均随着温度升高发生红移。 P_1 峰为自由激子复合发光峰, P_2 和 P_3 峰为 Zn 掺杂引入的杂质发光峰。利用能量带隙最高的 P_1 峰进行有序度计算, 将 P_1 峰在 20 K 下的能量带隙 1 977 meV 代入公式 (1) 中计算得出 η 值为 0.244。通过低温 PL 测试发现 Zn 的引入导致了 InGaP 材料出现杂质发光峰, 使 InGaP 的能量带隙变宽、有序度参数 η 的值降低。

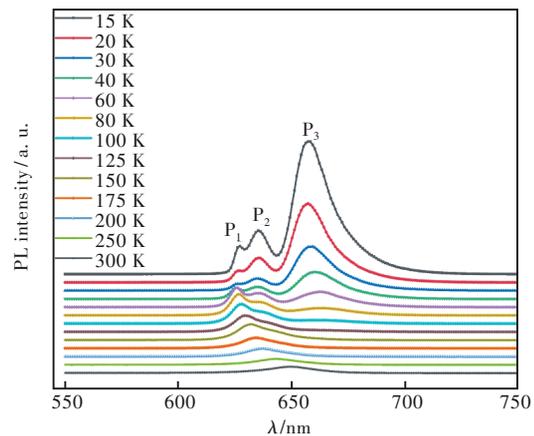


图 8 B 样品变温 PL 测试图

Fig.8 Variable temperature PL test diagram of sample B

4 结 论

本文采用 MOCVD 技术, 针对 InGaP 材料有序度影响其发光特性这一现象进行了探究。通过改变掺杂源流量和 V/III 比的方式来改变 InGaP 的有序度, 分别采用室温 PL 和低温 PL 测试对样品的发光特性进行表征。通过测试分析发现, 两种掺杂剂流量的增加都会导致 InGaP 中载流子浓度增大, 使 InGaP 中不同的带电点缺陷浓度增加, 从而使 III 族 In 原子和 Ga 原子发生相互扩散, 降低 InGaP 的有序度, 使其发光波长发生蓝移。而 V/III 比的增加会减少 InGaP 中 III 族原子在表面的迁移时间, 提升材料的表面质量, 导致 InGaP 的有序度增大, 使其发光波长发生红移。低温 PL 测试也表明 DEZn 的掺入会使得 InGaP 材料中出现杂质发光峰, 使 InGaP 的能量带隙变宽, 有序度参数 η 值下降。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220059>.

参 考 文 献:

- [1] 陈仲谋,张博. 基于InGaP/GaAs HBT工艺超宽带高线性度单片放大器[J]. 电子元件与材料, 2022,41(1): 83-88.
CHEN Z M, ZHANG B. Ultra-wideband high linearity monolithic amplifier based on InGaP/GaAs HBT process [J]. *Electr. Comp. Mater.*, 2022,41(1):83-88. (in Chinese)
- [2] 赵斌. 金属衬底InGaP/GaAs双结薄膜太阳能电池的制备与特性[D]. 北京:中国科学院物理研究所, 2019.
ZHAO B. *Fabrication and Characteristics of INGAP/GaAs Double Junction Thin Film Solar Cells on A Metallic Substrate* [D]. Beijing: Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [3] ZHANG G, NÄPPI J, VÄNTTINEN K, *et al.* Low threshold current InGaAs/GaAs/GaInP lasers grown by gas-source molecular beam epitaxy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992,61(1):96-98.
- [4] SLIPCHENKO S O, SOBOLEVA O S, PIKHTIN N A. Unipolar quantum well InGaAs/AlGaAs heterostructures with impact ionization for efficient low-voltage light-emitting devices [J]. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 2021, 68(6): 2823-2828.
- [5] ZHANG X T, YI R X, GAGRANI N, *et al.* Ultralow threshold, single-mode InGaAs/GaAs multi-quantum disk nanowire lasers [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(5):9126-9133.
- [6] 常奕栋,王贞福,张晓颖,等. 808 nm 半导体激光芯片波导优化与效率特性分析[J]. 发光学报, 2021,42(7):1040-1048.
CHANG Y D, WANG Z F, ZHANG X Y, *et al.* Waveguide optimization and efficiency characteristic analysis of 808 nm laser diodes [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021,42(7):1040-1048. (in Chinese)
- [7] 付莹莹. 808 nm 无铝 GaAsP 量子阱大功率半导体激光器的制备与研究[D]. 北京:北京工业大学, 2016.
FU Y Y. *Fabrication and Research of 808 nm Al-free GaAsP Quantum Well High Power Semiconductor Lasers* [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [8] 刘翠翠,林楠,马骁宇,等. 带有非吸收窗口的高性能 InGaAs/AlGaAs 量子阱激光二极管[J]. 发光学报, 2022,43(1):110-118.
LIU C C, LIN N, MA X Y, *et al.* High performance InGaAs/AlGaAs quantum well semiconductor laser diode with non-absorption window [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022,43(1):110-118. (in Chinese)
- [9] 宋悦,宁永强,秦莉,等. 大功率半导体激光器抗腔面灾变性光学损伤技术综述[J]. 半导体光电, 2020,41(5): 618-626.
SONG Y, NING Y Q, QIN L, *et al.* Review on the methods of preventing catastrophic optical mirror damage in high-power diode lasers [J]. *Semicond. Optoelectron.*, 2020,41(5):618-626. (in Chinese)
- [10] 刘翠翠,林楠,熊聪,等. Si杂质扩散诱导 InGaAs/AlGaAs量子阱混杂的研究[J]. 中国光学, 2020,13(1):203-216.
LIU C C, LIN N, XIONG C, *et al.* Diffusion-induced InGaAs/AlGaAs quantum well hybridization by Si impurities [J]. *Chin. Opt.*, 2020,13(1):203-216. (in English)
- [11] 汤瑜,曹春芳,赵旭熠,等. InGaAs/GaAs/InGaP量子阱激光器的激光单模特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019,56(13):131402-1-5.
TANG Y, CAO C F, ZHAO X Y, *et al.* Laser single-mode characteristics of InGaAs/GaAs/InGaP quantum well lasers [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2019,56(13):131402-1-5. (in Chinese)
- [12] 李金友,王海龙,杨锦,等. InGaAs/GaAs/InGaP量子阱激光器的温度电压特性[J]. 发光学报, 2020,41(8): 971-976.
LI J Y, WANG H L, YANG J, *et al.* Voltage-temperature characteristics of InGaAs/GaAs/InGaP quantum well laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020,41(8):971-976. (in Chinese)
- [13] ZMUDZINSKI C, BOTEZ D, MAWST L I, *et al.* Three-core arrow-type diode laser: novel high-power, single-mode device, and effective master oscillator for flared antiguided MOPA's [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 1995, 1(2): 129-137.
- [14] 韩智明,缪国庆,曾玉刚,等. 两步生长法生长的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs材料及其性质[J]. 发光学报, 2015,36(3):288-292.
HAN Z M, MIAO G Q, ZENG Y G, *et al.* Properties of InGaAs deposited on GaAs substrate with two-step growth [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015,36(3):288-292. (in Chinese)
- [15] 董海亮. InGaAs/GaAsP量子阱界面结构及其激光器件性能研究[D]. 太原:太原理工大学, 2016.

- DONG H L. *Interfacial Structure of InGaAs/GaAsP Quantum Well and Performance of Laser Device* [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [16] 王旭, 王海珠, 张彬, 等. InGaAs/GaAsP应变补偿多量子阱MOCVD生长[J]. 发光学报, 2021, 42(4): 448-454.
WANG X, WANG H Z, ZHANG B, *et al.* Growth of InGaAs/GaAsP strain-compensated multiple quantum wells *via* MOCVD technology [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(4): 448-454. (in Chinese)
- [17] 缪国庆, 朱景义, 李玉琴, 等. Ga_{0.51}In_{0.49}P的MOCVD生长特性研究[J]. 发光学报, 1996, 17(1): 43-46.
MIAO G Q, ZHU J Y, LI Y Q, *et al.* The growth characteristic study of Ga_{0.51}In_{0.49}P by MOCVD [J]. *Chin. J. Lumin.*, 1996, 17(1): 43-46. (in Chinese)
- [18] FUOSS P, KISKER D, KUECH T, *et al.* *Common Themes and Mechanisms of Epitaxial Growth* [M]. San Francisco, CA: Materials Research Society, 1993.
- [19] SU L C, HO I H, KOBAYASHI N, *et al.* Order/disorder heterostructure in Ga_{0.5}In_{0.5}P with $\Delta E_g=160$ meV [J]. *J. Cryst. Growth*, 1994, 145(1-4): 140-146.
- [20] CHUN Y S, MURATA H, HSU T C, *et al.* Effects of V/III ratio on ordering in GaInP: atomic scale mechanisms [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, 79(9): 6900-6906.
- [21] DEPPE D G, HOLONYAK N JR, HSIEH K C, *et al.* Layer interdiffusion in Se-doped Al_xGa_{1-x}As-GaAs superlattices [J]. *J. Appl. Phys.*, 1987, 51(8): 581-583.
- [22] STRINGFELLOW G B. *Effects of the Surface on CuPt Ordering During OMVPE Growth* [M]. New York: Springer, 2002.
- [23] STRINGFELLOW G B, LEE R T, FETZER C M, *et al.* Surfactant effects of dopants on ordering in GaInP [J]. *J. Electron. Mater.*, 2000, 29(1): 134-139.
- [24] MURATA H, HO I H, SU L C, *et al.* Surface photoabsorption study of the effects of growth temperature and V/III ratio on ordering in GaInP [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, 79(9): 6895-6899.
- [25] YU S, TAN T Y, GÖESELE U. Diffusion mechanism of zinc and beryllium in gallium arsenide [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, 69(6): 3547-3565.
- [26] LEE S H, FETZER C M, STRINGFELLOW G B, *et al.* Step structure and ordering in Zn-doped GaInP [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, 86(4): 1982-1987.
- [27] 何志芳. 掺杂对GaAs/AlGaAs材料体系电学性能的影响研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
HE Z F. *Study of the Electrical Properties of GaAs/AlGaAs Materials via Element Doping* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [28] 吴静, 尚勤忠. InGaP/GaAs外延材料合金有序度的表征[J]. 材料导报, 2006(1): 20-22.
WU J, SHANG X Z. Characterization of alloy orderliness in InGaP/GaAs epitaxial materials [J]. *Mater. Rep.*, 2006(1): 20-22. (in Chinese)



刘伟超(1996-),男,吉林吉林人,硕士研究生,2019年于长春理工大学获得学士学位,主要从事半导体外延生长的研究。
E-mail: 2371032818@qq.com



王海珠(1983-),男,吉林长春人,博士,副研究员,博士生导师,2012年于吉林大学获得博士学位,主要从事半导体激光器外延材料制备及应用的研究。
E-mail: whz@cust.edu.cn