

Research Progress of Improvement of Emission Properties in GaAs Film

Wei Xiao, Huimin Jia*, Jilong Tang, Dan Fang, Xuan Fang, Xinwei Wang, Dengkui Wang, Zhipeng Wei, Xiaohua Wang

State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Email: 18844150423@163.com, *jiahuimin:huiminjia01@163.com

Received: Feb. 6th, 2018; accepted: Feb. 20th, 2018; published: Feb. 28th, 2018

Abstract

GaAs, as an important III-V group material, has been applied to various semiconductor photoelectrical devices for its prominent properties of high carriers mobility, low intrinsic carriers concentration, high luminescent efficiency and so on. The exploration of luminescent properties of GaAs can provide physical basis for the design of GaAs based photoelectrical devices. Moreover, how to improve luminescence properties of GaAs also plays a significant role in enhancing the performance of GaAs based devices. In this review, the progress of luminescence properties of GaAs film was briefly introduced. The methods to improve the photoluminescence of GaAs film were expounded. This study is significant for the further application of GaAs film in optoelectronic devices.

Keywords

GaAs Film, Photoluminescence, Rapid Thermal Annealing, Doping, Surface Passivation

GaAs薄膜发光改性研究进展

肖卫, 贾慧民*, 唐吉龙, 房丹, 方铤, 王新伟, 王登魁, 魏志鹏, 王晓华

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

Email: 18844150423@163.com, *jiahuimin:huiminjia01@163.com

收稿日期: 2018年2月6日; 录用日期: 2018年2月20日; 发布日期: 2018年2月28日

摘要

砷化镓(GaAs)作为一种重要的III-V族材料。具有电子迁移率高、本征载流子浓度低、发光效率高等特性,*通讯作者。

广泛应用于半导体光电器件中。对GaAs的发光特性的研究可以为GaAs基半导体光电器件的设计提供重要理论依据,而GaAs发光特性的改善对提高GaAs基器件的性能也尤为重要。文章综述了GaAs薄膜发光特性的国内外研究现状,总结了改善GaAs薄膜发光特性的方法,对促进GaAs薄膜在半导体光电器件的应用具有重要的意义。

关键词

GaAs薄膜, 光致发光, 快速退火, 掺杂, 表面钝化

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

GaAs 具有高电子迁移率、高发光效率等优异性能,广泛应用于激光通信、国防军事等领域[1] [2] [3];同时, GaAs 材料的发光波长在太阳光辐射范围内,且吸收系数高,抗辐照性强,也是制备空间太阳能电池的重要材料[4]。但是,对于 GaAs 薄膜材料而言,生长过程中引入的非故意掺杂、晶格失配、孪晶层错、点缺陷都会劣化 GaAs 材料的性质,极大的阻碍了 GaAs 材料及相关光电子器件性能的提升。

通过 GaAs 材料的光致发光谱可以判断生长过程中引入未知杂质和缺陷的种类,并且能根据实际的谱线位置确定杂质能级的位置[5]。通常 GaAs 薄膜材料会出现晶粒尺寸不均匀、表面缺陷态等,光致发光谱中表现为发光强度的降低及半峰宽的展宽,很大程度的降低了 GaAs 的发光特性。通过退火及表面处理等手段可以改善其发光特性,满足发光器件的高发光效率的要求。本文重点论述掺杂、退火及表面处理等手段对 GaAs 薄膜的发光特性的影响,实现对 GaAs 薄膜光致发光谱及发光效率的有效改善。

2. GaAs 薄膜的光致发光谱研究

光致发光谱是以光作为激励手段的辐射复合发光光谱,根据特征发光谱线的位置,可以识别 GaAs 薄膜中的杂质和缺陷。光致发光的过程大致是激励光源产生的光入射到半导体材料表面,半导体材料被激励光源产生的能量大于材料本身带隙的光子所激发,形成电子空穴对,电子空穴对复合并释放出光子,形成光致发光。依据光致发光光谱来判断生长过程中引入的杂质或其本征缺陷的相关信息已经进行了广泛研究。F. Brionesa 课题组最先指出 C 是生长 GaAs 薄膜的主要残余受主,在衬底温度为 545°C 和 625°C 之间生长的 GaAs 薄膜中,通过低温发光谱表征发现在 1.471 eV 到 1.491 eV 的光谱区域中观察到至少九个发光峰(图 1 和表 1)。这九个峰位是与缺陷络合物相关的跃迁。同时在 1.504 eV~1.511 eV 出现了缺陷相关的束缚激子峰[6]。

GaAs 薄膜在生长过程中会引入非故意掺杂的 C、Si 等,以及生长引起的本征缺陷都会严重影响了其发光效率,因此改善 GaAs 薄膜发光特性,提高其发光效率成了问题的关键。

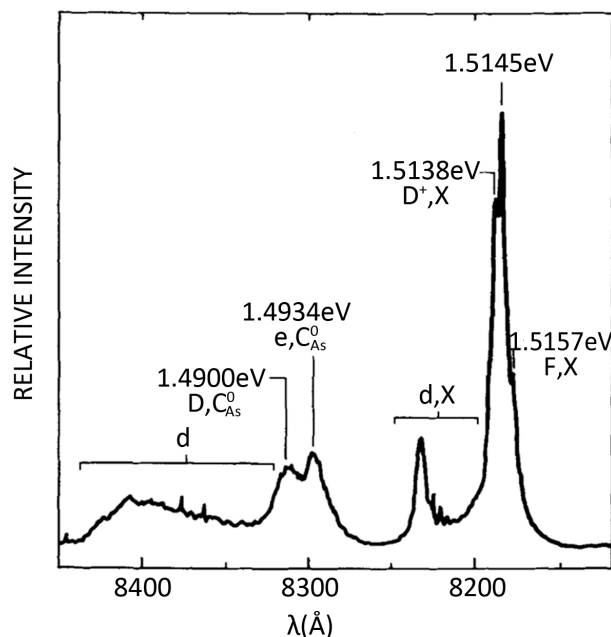
3. GaAs 薄膜发光特性的改善

3.1. 退火对 GaAs 薄膜发光特性的改善

快速热退火(RTA)升温速率很快,激活能不同的缺陷的消除几乎是同时进行的,这样可以有效的减小缺陷的复杂化。RTA 是目前改善薄膜的结晶质量,降低薄膜的缺陷密度的有效手段[7]。

Table 1. Low-temperature photoluminescence peak of the undoped GaAs film [6]**表 1.** 未掺杂 GaAs 薄膜低温 PL 峰列表[6]

峰位能量(eV)	峰位起源
1.512~1.517	自由激子
1.504~1.511	缺陷导致的束缚激子
1.490, 1.493	导带到 C 受主的跃迁
1.478, 1.483, 1.487	间隙 C 杂质相关
1.485	导带到中性 Si 受主跃迁
1.490	中性施主到中性受主的跃迁

**Figure 1.** Low-temperature photoluminescence spectroscopy of undoped GaAs film [6]**图 1.** 未掺杂 GaAs 薄膜的低温 PL 谱[6]

2007 年, T. Mano 对 GaAs 材料进行 800℃ 快速热退火处理, 发现退火后光致发光强度较未退火前提提高了近 50 倍[8]。2016 年, 日本的 Yasuhiro Ogawa 等人对 N 掺杂的 GaAs 薄膜进行了快速退火的研究, 退火后来源于 N 掺杂的 1.44 eV 峰发光强度减弱, 如图 2 所示。这是由于退火导致 N 原子的重新排列, 退火后样品的活化能增加, 表明快速热退火减少了其非辐射复合中心以及氮原子中的成分波动[9]。

江德生等人在低温下使用分子束外延生长 GaAs, 样品经过快速热退火处理后。得到迁移率高、载流子复合寿命短、性能稳定的半绝缘 GaAs 薄膜[10]。图 3 为 GaAs 样品及其衬底的光谱, 其中位于 1.518 eV 和 1.49 eV 处有两个发光峰分别来自 GaAs 衬底的激子发光和导带电子与受主中心间的复合发光。同时从未退火样品发光衰减曲线发现其存在一个寿命较长的载流子复合过程, 其来源于样品内部高浓度的缺陷。退火后样品可以发现长寿命的复合过程消失, 表明快速热退火有效降低了缺陷浓度, 抑制了载流子的陷阱效应[10]。

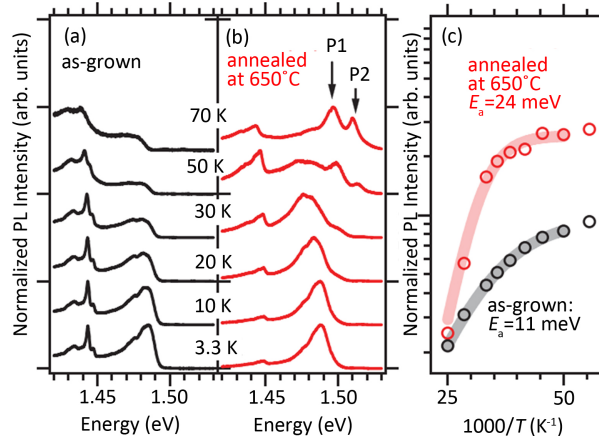


Figure 2. Temperature-dependent PL spectroscopy in (a) before-annealing sample; (b) after-annealing sample; (c) fitted activation energy [9]

图 2. (a) 未退火样品变温 PL 谱; (b) 退火后样品变温 PL 谱; (c) 活化能拟合图[9]

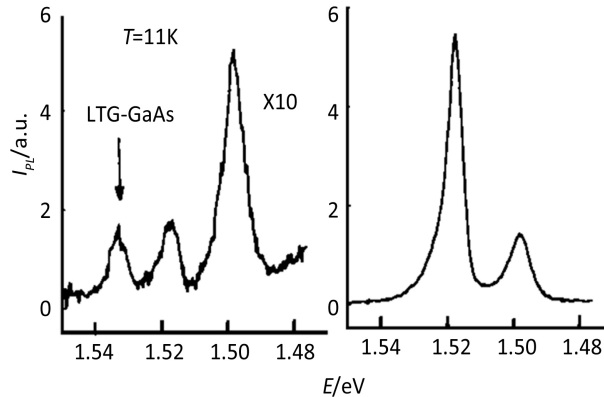


Figure 3. PL spectroscopy of (a) GaAs film; (b) GaAs substrate [10]

图 3. (a) GaAs 薄膜样品; (b) GaAs 衬底的光致发光光谱[10]

3.2. 掺杂对 GaAs 薄膜发光特性的改善

对于半导体材料而言, 掺杂是调控发光特性的重要手段。当掺入施主杂质时, 费米能级将会移动靠近导带, 费米能级与导带底的能级差随着掺杂浓度的增加而减小; 受主杂质在价带中的行为与施主杂质恰恰相反。GaAs 材料中掺杂的目的是引入浅施主或浅受主杂质。根据器件设计的需求进行掺杂得到 n 型或 p 型 GaAs 薄膜[11]。同时掺杂可以提高载流子浓度, 进而增大了电子与空穴的复合几率, 改善 GaAs 薄膜发光特性。

中科院半导体所胡天斗等人对高掺 Si 的 n-GaAs 及高掺 Be 的 p-GaAs 薄膜的光致发光谱分析得到, 在 n-GaAs 光谱中, 对光谱特性的影响主要是 Moss-Burstein 效应, 自由电子在导带的填充对峰位能量及峰位半峰宽的变化起主要作用, 而在 p-GaAs 中, 峰位能量的变化主要是因为由于高掺杂 Be 引起的带隙收缩[12]。中科院物理研究所的程文芹等人对不同掺杂浓度的 Be 掺杂 GaAs 薄膜的光致发光谱进行了分析, 得到随掺杂浓度的增加, 带隙逐渐变窄的变化趋势, 主要是因为价带的上移造成的, 受主能级的位置相对导带是不变的, 所以杂质的电离能是随着 Be 掺杂浓度的增加而降低的[13]。

中科院半导体所的牛智川等人对不同 Si 掺杂浓度的 GaAs 薄膜的 PL 谱做了研究, 随着 Si 掺杂浓度

的降低, 导致 Si 施主杂质浓度减小, (D-A, Si) 发光峰的强度逐渐减弱[14]。研究发现掺杂元素 Si 在 GaAs 中起两性(施主或受主)杂质作用, 同时适当提高 V/III 束流比可以抑制 Si 的自补偿效应, 从而减小载流子的补偿度, 进一步提高迁移率[15]。

Jiang 等人对不同掺杂浓度的 Te 掺杂 GaAs 薄膜进行研究, 发现随着 Te 掺杂浓度的增加, 由于 Burstein-Moss 效应, 费米能级进入导带, 本征光吸收边向高能方向移动。同时在掺 Te 的 GaAs 薄膜中最大可实现的载流子浓度为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 观察到的峰值位移达到大约 150 meV, 如图 4 所示。实现了对 GaAs 发光光谱的调控, 同时获得了具有较高载流子浓度的 GaAs 材料[16]。

3.3. 表面处理对 GaAs 薄膜发光特性的改善

GaAs 薄膜材料表面因周期性结构的中断而出现大量未饱和和悬挂键, 会导致高的表面态。同时这些悬挂键使得材料表面性质活跃, 易与空气中的氧发生作用, 生成各类氧化物, 钉扎费米能级, 同时也会导致表面性质严重退化, 如发光强度减弱, 严重制约了其在器件中的应用, 因此通过表面处理的方式来提高 GaAs 薄膜的发光特性[17]。对于 GaAs 薄膜来说, 提高 GaAs 薄膜的发光强度使用最广泛的方法是钝化技术。

1987 年, Sandroff 等人首先提出了 GaAs 表面的硫钝化方法, 他们利用 $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 溶液来处理 GaAs

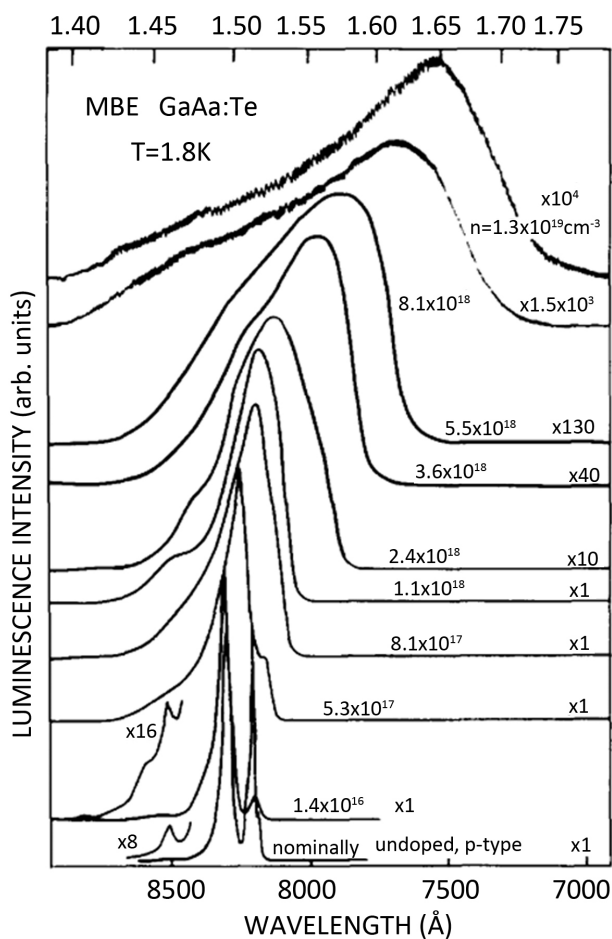


Figure 4. Low-temperature (1.8 K) luminescence spectrum under different doping concentration of Te [16]

图 4. 不同 Te 掺杂浓度下的低温(1.8 K) PL 谱[16]

异质结双极性晶体管的周边基区,发现钝化后 PL 强度相较钝化前的提高了 250 倍[18]。自此之后,关于 GaAs 表面硫钝化研究有了大量的报道,刘春玲等人采用湿法钝化的技术提高了 GaAs 发光强度,其研究不同钝化溶液对 GaAs 薄膜的钝化效果,如图 5 所示。 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ + 叔丁醇饱和溶液处理过的 GaAs 薄膜的光致发光强度最强,相对发光强度是未做钝化处理的 10 倍左右[19]。2012 年,周璐等在 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液中加入与 S 同族的 Se,调节了硫化铵溶液的介电常数,使 GaAs 材料表面的发光强度显著增大 20 倍,同时放置在空气中 3 h 后,衰退率只有 10%,提高了 GaAs 材料的光学稳定性[20]。日本的 Mac Innes 等报道了用金属有机化学气相淀积(MOCVD)在 GaAs 表面上沉积立方 GaS 薄膜,有效降低了 GaAs 表面复合速率,PL 强度有明显的增加。经过四个月时间,PL 强度并未发生明显变化,表明此方法可以有效的改善 GaAs 薄膜的发光特性并提高其光学稳定性[21]。

N 钝化是采用氮等离子体轰击材料表面发生作用,从而形成钝化薄膜[22] [23]。Sangan Anantathanasarn 等人通过 N 等离子体技术与 GaAs 薄膜发生反应,形成了 Ga-N 键,使得表面悬挂键饱和,从图 6 中可以观察到 N 钝化后的带边发光强度比钝化前的提高了十倍[24]。2016 年,许留洋等人采用射频(RF)等离子体方法对 GaAs 进行 150W 高功率等离子体氮钝化及快速退火处理。经过该方法钝化后的样品,光致发光(PL)强度较未处理之前提升了 91% [25]。

近年来,氧化物钝化在改善发光特性方面也表现出很大的潜力。王云华等人提出采用磁控溅射技术在 GaAs 上沉积一定厚度的 ZnO 薄膜作为钝化层,改善 GaAs 与自身氧化物界面由于高表面态密度引起的费米能级钉扎问题,通过光致发光光谱对钝化前后的发光特性进行了分析研究,发现经 ZnO 薄膜钝化后的 GaAs 样品本征 PL 峰强度提高了 112.5%,杂质峰强度下降了 82.4%。证明了 GaAs 表面沉积 ZnO 薄膜也是一种可行的、有效的改善发光的有效方法[26]。邹德恕等人采用射频磁控溅射的方法在 GaAs 薄膜材料上溅 SiO₂ 薄膜,对其发光光谱进行研究,发现 SiO₂ 薄膜钝化后的发光强度很明显的增加,并且伴随着半峰宽的变窄。达到了半导体激光器所需的高发光效率的要求[27]。

GaAs 薄膜材料的钝化效果随时间而衰退。为了提高钝化效果的稳定性,考虑在其表面使用 PEALD 法沉积致密的薄膜以隔绝空气,继而提高其光学稳定性。同时在使用 PEALD 法沉积 Al₂O₃ 薄膜时,小分子前驱体 TMA(三甲基铝)对 GaAs 表面的 As-As 二聚体具有一定的抑制作用。且 Al 为 III 族元素,性质活跃,能替代任何 Ga 空位,从而减小界面的缺陷。因此在 GaAs 薄膜钝化实验中引入 S 钝化之后使用 PEALD 设备立即在表面沉积 Al₂O₃ 薄膜来提高其光学稳定性,伍艳丽等人使用 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$:异丙醇 = 1:1 的溶液处理 GaAs 样品后立即在表面沉积 Al₂O₃ 薄膜,如图 7 所示,未沉积 Al₂O₃ 薄膜的 GaAs 样品,其发光

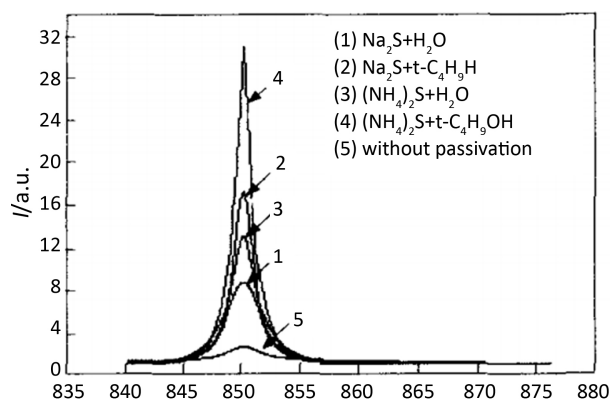


Figure 5. PL spectroscopy of GaAs film under different passivation method [19]

图 5. 不同钝化液处理后的 GaAs 薄膜的 PL 谱[19]

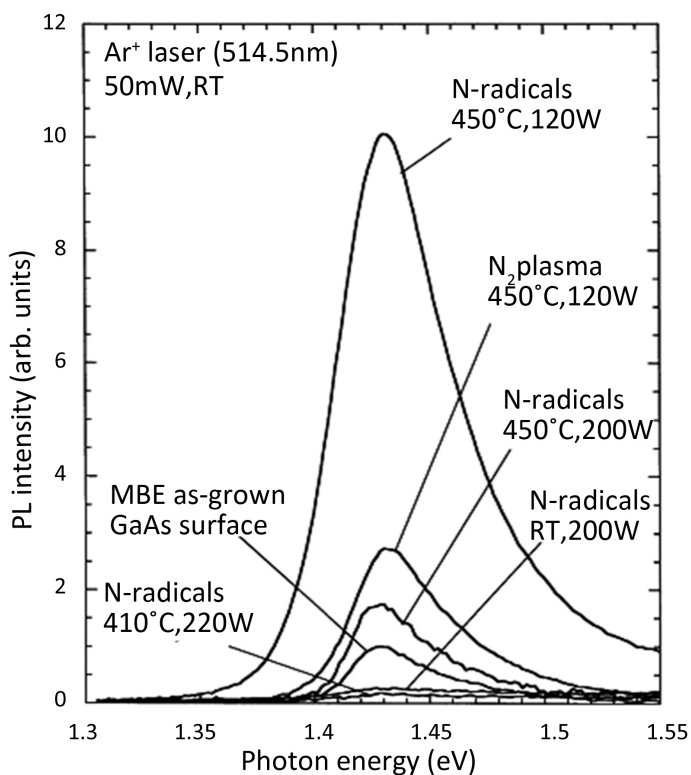


Figure 6. Luminescence spectrum of GaAs film in different temperature and N-passivated conditions [24]

图 6. 不同温度和氮化条件下 GaAs 薄膜的带边发光光谱[24]

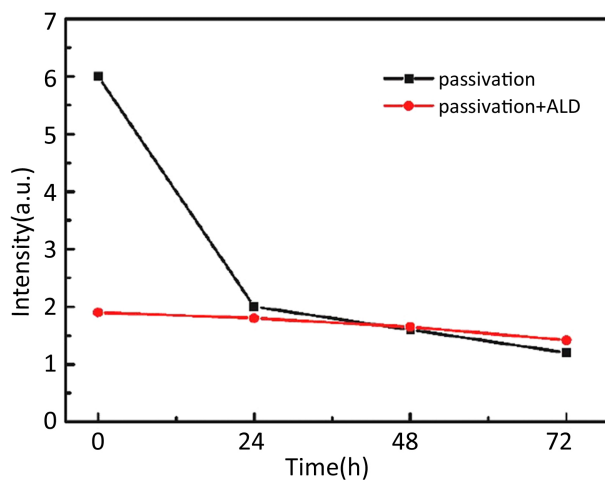


Figure 7. Curves of luminescence intensity of GaAs at different time before and after Al_2O_3 -passivation [28]

图 7. 沉积 Al_2O_3 薄膜前后 GaAs 发光强度随时间变化的曲线[28]

特性迅速衰退，最高达到 66%，且随着放置时间的增大而持续衰退，在放置 72 h 后，其表面钝化效果基本失效。沉积 Al_2O_3 薄膜后，其光学稳定性明显提高，平均衰退率不到 10%，表明沉积薄膜能有效提高 GaAs 样品的光学稳定性，减小空气对 GaAs 材料的影响。将氧化物钝化与 S 钝化结合起来，既能够改善 GaAs 薄膜的发光特性，也能有效提高其光学稳定性[28]。

4. 展望

近年来光致发光光谱研究已经延伸到 GaAs 一维纳米结构。纳米结构具有更加复杂的发光机制。需通过微区光致发光光谱来研究其发光特性，同时对于纳米结构的掺杂和表面处理也是非常复杂的过程，对 GaAs 纳米结构的发光特性改善需要更为先进的手段。从而获得具有优良发光特性的 GaAs 一维纳米结构。

5. 结论

本文从 GaAs 薄膜的光致发光光谱的角度出发，重点阐述了通过退火、掺杂及表面钝化等手段改善 GaAs 薄膜发光特性。对 GaAs 薄膜材料在半导体器件中的进一步应用具有实际意义。

基金项目

感谢国家自然科学基金(61474010, 61574022, 61504012, 61674021, 11674038, 61704011); 吉林省科技发展计划(20160519007JH, 20160101255JC, 20160204074GX, 20170520117JH); 长春理工大学科技创新基金(XJLJG-2016-11, XJLJG-2016-14)对本研究工作的支持。

参考文献 (References)

- [1] 王建利, 牛沈军, 兰天平, 等. 砷化镓材料[J]. 科技创新导报, 2010(32): 75-77.
- [2] Ye, P.D., Wilk, G.D., Kwo, J., *et al.* (2003) GaAs MOSFET with Oxide Gate Dielectric Grown by Atomic Layer Deposition. *IEEE Electron Device Letters*, **24**, 209-211. <https://doi.org/10.1109/LED.2003.812144>
- [3] Cho, S.J., Wang, C. and Kim, N.Y. (2014) High Power Density AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMTs Using an Optimised Manufacturing Process for Ka-Band Applications. *Microelectronic Engineering*, **113**, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2013.07.001>
- [4] 华文深, 刘晓光, 张大铭. 激光辐照单结砷化镓光伏电池的输出特性[J]. 激光与红外, 2016, 46(12): 1463-1466.
- [5] 方容川. 固体光谱学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- [6] Briones, F. and Collins, D.M. (1982) Low Temperature Photoluminescence of Lightly Si-Doped and Undoped MBE GaAs. *Journal of Electronic Materials*, **11**, 847-866. <https://doi.org/10.1007/BF02672399>
- [7] Pan, Z., Li, L.H., Zhang, W., *et al.* (2000) Effect of Rapid Thermal Annealing on GaInNAs/GaAs Quantum Wells Grown by Plasma-Assisted Molecular-Beam Epitaxy. *Applied Physics Letters*, **77**, 1280-1282. <https://doi.org/10.1063/1.1289916>
- [8] Mano, T., Kuroda, T., Mitsuishi, K., *et al.* (2007) Ring-Shaped GaAs Quantum Dot Laser Grown by Droplet Epitaxy: Effects of Post-Growth Annealing on Structural and Optical Properties. *Journal of Crystal Growth*, **301**, 740-743. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.11.216>
- [9] Ogawa, Y., Harada, Y., Baba, T., *et al.* (2016) Effects of Rapid Thermal Annealing on Two-Dimensional Delocalized Electronic States of the Epitaxial N δ -Doped Layer in GaAs. *Applied Physics Letters*, **108**, 388. <https://doi.org/10.1063/1.4944055>
- [10] 江德生, 吕振东. 低温下分子束外延生长 GaAs 的光致发光研究[J]. 发光学报, 1999, 20(1): 7-10.
- [11] Engel, H.A., Halperin, B.I. and Rashba, E.I. (2005) Theory of Spin Hall Conductivity in n-Doped GaAs. *Physical Review Letters*, **95**, Article ID: 166605. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.166605>
- [12] 胡天斗, 许继宗, 梁基本, 庄蔚华. MBE 高掺杂 n-GaAs:Si 和 p-GaAs:Be 的光致发光谱[J]. 半导体学报, 1989, 10(8): 607-614.
- [13] 程文芹, 梅笑冰, 刘双, 刘玉龙, 李永康, 周均铭. 掺杂浓度对 p-GaAs 的带隙变窄的影响[J]. 物理学报, 1992(6): 1032-1035.
- [14] Wu, X., Peltola, T., Arsenovich, T., *et al.* (2015) Processing and Characterization of Epitaxial GaAs Radiation Detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **796**, 51-55. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.03.028>
- [15] 牛智川, 黎健. MBE 生长轻掺硅 GaAs 材料荧光光谱杂质特性研究[J]. 固体电子学研究进展, 1996, 16(2): 133-136.

- [16] Jiang, D., Makita, Y., Ploog, K., *et al.* (1982) Electrical Properties and Photoluminescence of Te-Doped GaAs Grown by Molecular Beam Epitaxy. *Journal of Applied Physics*, **53**, 999-1006. <https://doi.org/10.1063/1.330581>
- [17] 谢长坤, 徐法强, 徐彭寿. GaAs 表面硫钝化研究新进展[J]. 物理, 2000, 29(11): 673-678.
- [18] Sandroff, C.J., Nottenburg, R.N., Bischoff, J.C., *et al.* (1987) Dramatic Enhancement in the Gain of a GaAs/AlGaAs Heterostructure Bipolar Transistor by Surface Chemical Passivation. *Applied Physics Letters*, **51**, 33-35. <https://doi.org/10.1063/1.98877>
- [19] 刘春玲, 张晶, 么艳平, 等. 多种含硫溶液钝化(100)GaAs 表面的实验研究[J]. 发光学报, 2007, 28(6): 904-906.
- [20] MacInnes, A.N., Power, M.B., Barron, A.R., *et al.* (1993) Enhancement of Photoluminescence Intensity of GaAs with Cubic GaS Chemical Vapor Deposited using a Structurally Designed Single-Source Precursor. *Applied Physics Letters*, **62**, 711-713. <https://doi.org/10.1063/1.108847>
- [21] 周路, 王云华. GaAs 表面硫钝化工艺新研究[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(5): 376-378.
- [22] Losurdo, M., Capezzuto, P., Bruno, G., *et al.* (1998) Chemistry and Kinetics of the GaN Formation by Plasma Nitridation of GaAs: An *in Situ* Real-Time Ellipsometric Study. *Physical Review B*, **58**, Article No. 15878. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.15878>
- [23] Anantathanasarn, S., Ootomo, S.Y., Hashizume, T., *et al.* (2000) Surface Passivation of GaAs by Ultra-Thin Cubic GaN Layer. *Applied Surface Science*, **159**, 456-461. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(00\)00077-5](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(00)00077-5)
- [24] Aksenov, I., Nakada, Y. and Okumura, H. (1999) Nitridation of GaAs (001) Surface Studied by Auger Electron Spectroscopy. *Japanese Journal of Applied Physics*, **38**, 2510-2520. <https://doi.org/10.1143/JJAP.38.2510>
- [25] 许留洋, 高欣, 袁绪泽, 等. GaAs 半导体表面的等离子氮钝化特性研究[J]. 发光学报, 2016, 37(4): 428-431.
- [26] 王云华, 高欣, 周路, 等. 溅射 ZnO 薄膜钝化 GaAs 表面性能的研究[J]. 光电子 o 激光, 2013(9): 1727-1732.
- [27] 邹德恕, 徐晨, 鲁鹏程, 等. 射频溅射法镀 LD 腔面光学薄膜的工艺研究[J]. 半导体光电, 2003, 24(6): 75-77.
- [28] 伍艳丽. GaAs 及其合金材料的表面钝化及光谱分析[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2016.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: ms@hanspub.org