

## GaAsN/GaAs量子阱在1 MeV电子束辐照下的退化规律

雷琪琪,郭旗,艾尔肯·阿不都瓦衣提,玛丽娅·黑尼,李豫东,王保顺,王涛,莫镜辉,庄玉,陈加伟

引用本文:

雷琪琪, 郭旗, 艾尔肯・阿不都瓦衣提, 等. GaAsN/GaAs量子阱在1 MeV电子束辐照下的退化规律[J]. 发光学报, 2020, 41(5): 603-609.

LEI Qi-qi, GUO Qi, Aierken ABUDUWAYITI, et al. Degradation of GaAsN/GaAs Quantum Well Under 1 MeV Electron Beam Irradiation[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(5): 603–609.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3788/fgxb20204105.0603

#### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 高In组分InGaNAs/GaAs量子阱的生长及发光特性

Growth and Photoluminescence Characteristics of InGaNAs/GaAs QW with High In Composition 发光学报. 2017, 38(11): 1510–1515 https://doi.org/10.3788/fgxb20173811.1510

#### 基于GaAs膜的GaInP/AlGaInP无杂质空位扩散诱导量子阱混杂的研究

Impurity-free Vacancy Diffusion Induces Intermixing in GaInP/AlGaInP Quantum Wells Using GaAs Encapsulation 发光学报. 2018, 39(8): 1095-1099 https://doi.org/10.3788/fgxb20183908.1095

#### Be掺杂对InGaAsN/GaAs量子阱性能的提高

Improvement of Properties of GaAs-based Dilute Nitrides by Beryllium Doping 发光学报. 2017, 38(8): 1056-1062 https://doi.org/10.3788/fgxb20173808.1056

#### 高灵敏度InAs/AlSb量子阱的霍尔器件

High Sensitivity Hall Devices with AlSb/InAs Quantum Well Structure 发光学报. 2017, 38(12): 1650–1653 https://doi.org/10.3788/fgxb20173812.1650

高注量1 MeV电子辐照下InGaAs单结太阳电池退化规律与机制

Radiation Effects of InGaAs Single Junction Solar Cell by High Fluence 1 MeV Electron 发光学报. 2019, 40(9): 1115–1122 https://doi.org/10.3788/fgxb20194009.1115

文章编号:1000-7032(2020)05-0603-07

# GaAsN/GaAs 量子阱在1 MeV 电子束辐照下的退化规律

雷琪琪<sup>1,2</sup>,郭旗<sup>1\*</sup>,艾尔肯·阿不都瓦衣提<sup>1,3</sup>,玛丽娅·黑尼<sup>1</sup>,李豫东<sup>1</sup>, 王保顺<sup>1,2</sup>,王 涛<sup>1,4</sup>,莫镜辉<sup>3</sup>,庄 玉<sup>3</sup>,陈加伟<sup>1,2</sup> (1. 中国科学院新疆理化技术研究所,中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室,

新疆电子信息材料与器件重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

中国科学院大学,北京 100049; 3. 云南师范大学 能源与环境科学学院,云南 昆明 650500;
 4. 新疆大学 物理科学与技术学院,新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要:**为研究 GaAsN/GaAs 量子阱在电子束辐照下的退化规律与机制,对 GaAsN/GaAs 量子阱进行了不同注 量(1×10<sup>15</sup>,1×10<sup>16</sup> e/cm<sup>2</sup>)1 MeV 电子束辐照和辐照后不同温度退火(650,750,850 ℃)试验,并结合 Mulassis 仿真和 GaAs 能带模型图对其分析讨论。结果表明,随着电子注量的增加,GaAsN/GaAs 量子阱光学性能急剧 降低,注量为1×10<sup>15</sup> e/cm<sup>2</sup> 和1×10<sup>16</sup> e/cm<sup>2</sup> 的电子束辐照后,GaAsN/GaAs 量子阱 PL 强度分别衰减为初始 值的 85% 和 29%。GaAsN/GaAs 量子阱电子辐照后 650 ℃退火 5 min,样品 PL 强度恢复到初始值,材料带隙 没有发生变化。GaAsN/GaAs 量子阱辐照后 750 ℃和 850 ℃各退火 5 min 后,样品 PL 强度随退火温度的升高 不断减小,同时 N 原子外扩散使得样品带隙发生约 4 nm 蓝移。退火温度升高没有造成带隙更大的蓝移,这 是由于进一步的温度升高产生了新的 N—As 间隙缺陷,抑制了 N 原子外扩散,同时导致 GaAsN/GaAs 量子阱 光学性能退化。

关 键 词:稀氮;光致发光;电子辐照;GaAsN;退火
 中图分类号:TN304.2<sup>+</sup>3;0475
 文献标识码:A
 DOI: 10.3788/fgxb20204105.0603

# Degradation of GaAsN/GaAs Quantum Well Under 1 MeV Electron Beam Irradiation

LEI Qi-qi<sup>1,2</sup>, GUO Qi<sup>1\*</sup>, Aierken ABUDUWAYITI<sup>1,3</sup>, Maliya HEINI<sup>1</sup>, LI Yu-dong<sup>1</sup>, WANG Bao-shun<sup>1,2</sup>, WANG Tao<sup>1,4</sup>, MO Jing-hui<sup>3</sup>, ZHUANG Yu<sup>3</sup>, CHEN Jia-wei<sup>1,2</sup>

(1. Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Materials and Devices, Key Laboratory of Functional

Materials and Devices for Special Environments of Chinese Academy of Sciences, Xinjiang Technical Institute of

Physics & Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Energy and Environment Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

4. School of Physics and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

\* Corresponding Author, E-mail: guoqi@ ms. xjb. ac. cn

Abstract: The radiation effects of MBE grown GaAsN/GaAs quantum well irradiated by 1 MeV electron with different dose  $(1 \times 10^{15}, 1 \times 10^{16} \text{ e/cm}^2)$  and post thermal annealing (650, 750, 850 °C) have been studied. The degradation mechanism and annealing effects were discussed by Mulassis

基金项目: 国家自然科学基金(61534008); 中国科学院新疆理化技术研究所所长基金(Y55B171101); 中科院西部之光(2017-XBQNXZ-B-004); 电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室开放基金(ZHD201705)资助

收稿日期: 2020-01-03; 修订日期: 2020-03-17

Supported by National Natural Science Foundation of China(61534008); Director Foundation of Xinjiang Technical Institute of Phys. &Chem. CAS(Y55B171101); Western Light Foundation, Chinese Academy of Sciences(2017-XBQNXZ-B-004); Opening Project of Science and Technology on Reliability Physics and Application Technology of Electronic Component Laboratory (ZHD201705)

simulation and GaAs energy bandgap model. The results show that the GaAsN/GaAs quantum well PL intensity significantly decreased with the increase of electron does. The PL intensity of the GaAsN GaAs quantum well decayed to 85% and 29% of the initial value after electron irradiation with doses of  $1 \times 10^{15}$  e/cm<sup>2</sup> and  $1 \times 10^{16}$  e/cm<sup>2</sup>, respectively. The PL intensity of GaAsN/GaAs quantum well returned to original value after annealing at 650 °C for 5 min, and the bandgap of the material remained unchanged. The PL intensity of GaAsN/GaAs samples decreased as the annealing temperature increased after annealed at 750 °C and 850 °C for 5 min, and the bandgap blue shifted about 4 nm due to the diffusion of N atoms from GaAsN quantum well to GaAs barrier layer. The increase of annealing temperature did not cause additional blue shifts of the band gap. This was due to the further increase in temperature, which caused new N—As defects, suppressed N-atom diffusion, and degraded the optical properties of GaAsN/GaAs quantum well.

Key words: dilute nitride; photoluminescence; electron irradiation; GaAsN; annealed

# 1引言

将微量氮原子(<6%)注入到Ⅲ-V族半导 体材料中,可以形成物理性质独特的稀氮材 料[1]。N 原子替代了V族 As 原子晶格位置后,会 导致原Ⅲ-V族半导体禁带宽度和晶格常数降低, 同时实现带隙裁剪和与传统衬底 Ge、GaAs 的晶 格匹配<sup>[2]</sup>。鉴于稀氮材料这种独一无二的特性, 稀氮材料在许多红外半导体器件应用中具有很大 的吸引力,例如异质结双极晶体管(HBTS)<sup>[3]</sup>、红 外激光器<sup>[4]</sup>、稀氮太阳能电池<sup>[5]</sup>等。理论计算表 明,GaInP/GaInAs/ GaInNAs/Ge 四结稀氮空间太 阳能电池在 AMO 太阳光谱下可以达到 50% 的转 换效率<sup>[5]</sup>。但是令人惋惜的是,向Ⅲ-V族半导体 材料中加入微量 N 原子将会在材料中产生大量 的晶格缺陷,比如 Ga 空位、N 间隙等<sup>[6]</sup>。研究表 明,适当温度的退火不仅可以有效降低稀氮材料 缺陷密度,也是研究稀氮材料缺陷性质演变的重 要途径,但是退火会引起稀氮材料禁带宽度的 增大[7]。

应用于复杂空间环境中的半导体器件会受到 高能粒子(主要是电子、质子和γ射线)的辐射损 伤影响<sup>[8]</sup>。稀氮材料(Ga(In)AsN)作为稀氮太 阳电池的重要组成部分,它在提高太阳能电池效 率方面起着至关重要的作用,在空间航天领域有 着巨大潜力,但人们对稀氮材料的辐射效应和损 伤机理尚未完全了解。因此,本研究团队率先进 行了 GaInAsN 材料和 GaAs 基半导体太阳电池粒 子辐照效应研究<sup>[9-11]</sup>,结果表明粒子辐照严重退 化了 GaInAsN 材料和太阳电池的性能。Pavelescu 团队研究了注量为1×10<sup>13</sup>~1×10<sup>18</sup> e/cm<sup>2</sup> GaIn-AsN 材料的电子辐射效应<sup>[12-15]</sup>。研究表明,在低 注量电子辐照情况下,GaInAsN 材料的光学性能 得到改善。随着电子辐照注量的增加,GaInAsN 材料的光学性能和电学性能产生了剧烈的退化。 至于 GaAsN 材料,国内外至今还没有关于 GaAsN 材料电子辐照效应的研究报道,对 GaAsN 材料电 子辐照退化规律与机制尚不明确。因此,为充分 了解稀氮多结空间太阳能电池电子辐射效应,研 究电子对 GaAsN 材料的辐照损伤效应是重要且 必要的。

在本工作中,我们用低温(T = 10 K)光致发 光研究了1 MeV 电子辐照与辐照后不同温度退 火对 GaAsN/GaAs 量子阱的影响,其中,电子注量 点是1×10<sup>15</sup> e/cm<sup>2</sup> 和1×10<sup>16</sup> e/cm<sup>2</sup>,退火温度选 取了 650,750,850 ℃三个温度点。

#### 2 实验方法

本实验采用分子束外延(Molecular beam epitaxy)方法制备了 GaAsN/GaAs 量子阱结构稀氮 试验样品,其样品结构如图 1(a)所示。辐照实验 在中国科学院新疆理化技术研究所 ELV-8 型电 子加速器上完成,辐照过程保持常温。电子能量 为1 MeV,注量率选用 1×10<sup>12</sup> e/(cm<sup>2</sup> · s),辐照 选取的注量点是 1×10<sup>15</sup> e/cm<sup>2</sup> 和 1×10<sup>16</sup> e/cm<sup>2</sup>。 稀氮样品电子辐照过程中,样品与电子束源口保 持较远距离(40 cm),这样就可以保证在样品辐 照过程中样品不受电子辐照引起的热效应,样品 表面温度与电子加速器室温度保持一致。稀氮样 品本身存在大量的固有点缺陷,电子辐照后样品 的光学性能会产生剧烈的退化。本实验样品在室 温下测出的 PL 信号微弱, 而低温条件下得到的 样品 PL 强度较大,因此,为了更清楚地研究电子 辐照对稀氮样品的影响,我们选择低温(T=10 K)PL测试条件。PL光谱的测试是采用波长为 532 nm 的激光器作为激发光源,利用 InGaAs 探 测器采集样品发出的光信号。本试验中稀氮样品 电子束辐照后依次进行了 650,750,850 ℃退火, 即样品辐照后先 650 ℃ 退火、PL 测试, 然后进行 750 ℃退火、PL 测试,再进行 850 ℃退火、PL 测 试,所有样品的退火过程是在优化的快速烧结炉 中进行的。首先,为了保证退火温度与退火时间 的准确性,本实验在快速烧结炉中预设了退火温 度与时间的变化关系。为了验证实际退火温度是 否与预设温度一致,实验采用热电偶实际测试了 快速烧结炉内实际温度随时间的变化,其中实际 温度1、2、3分别为650,750,850℃退火热电偶测 出的快速烧结炉内实际温度随时间的变化,如表 1 所示。除此之外,退火过程中一直使稀氮样品 处于高浓度氮气环境中,同时为了防止高温下 As



图 1 (a) GaAsN/GaAs 量子阱结构图;(b) GaAsN/GaAs 量子阱 HR-XRD 测试(上) 与拟合(下)图。

Fig. 1 (a) Structure of GaAsN/GaAs quantum well. (b) Measured(upper) and simulated(lower) HR-XRD (002) rocking curve of GaAsN/GaAs quantum well. 的流失,退火时稀氮样品面对面放置在砷化镓晶 片上。

## 表 1 GaAsN/GaAs 样品 650,750,850 ℃过程中快速烧 结炉内实际温度随时间的变化

Tab.1 Change of actual temperature in fast sintering furnace with time in GaAsN/GaAs sample at 650, 750, 850  $^{\circ}\mathrm{C}$ 

时间/s	实际温度 1∕ ℃	实际温度 2∕ ℃	实际温度 3/ ℃
30	283	384	455
60	621	744	836
90	651	753	852
130	678	763	864
170	691	784	877
210	681	775	873
250	678	770	868
290	670	760	850
330	663	755	849
370	656	758	844
400	470	510	550
430	380	405	443

我们采用高分辨率 X 射线衍射(HR-XRD)方 法研究了 GaAsN/GaAs 量子阱结构样品的氮含 量,如图 1(b)所示。为得到 GaAsN/GaAs 量子阱 中的 N 组分,首先测得 GaAsN/GaAs 量子阱材料 的 HRXRD 谱,然后使用不同 As 组分去拟合,直 到拟合出与 HRXRD 谱类似的谱线。本试验得到 As 组分为 99.2%,因此可以得到样品中 N 组分 为0.8%。

## 3 结果与讨论

#### 3.1 电子辐照后结果分析

图 2 为 1 MeV 电子辐照 GaAsN/GaAs 量子阱 的 PL 光谱,其中电子辐照注量为 1 × 10<sup>15</sup> e/cm<sup>2</sup> 和 1 × 10<sup>16</sup> e/cm<sup>2</sup>。从图 2 可以看出,经过注量为 1 × 10<sup>15</sup>, 1 × 10<sup>16</sup> e/cm<sup>2</sup> 的电子辐照后,GaAsN/ GaAs 量子阱的 PL 强度分别衰减到辐照前的 85% 和 29%。因此,随着电子注量的增加, GaAsN/GaAs 量子阱材料的 PL 强度急剧降低,材 料的光学性能发生剧烈的退化。电子辐照后, GaAsN/GaAs 量子阱样品 PL 光谱的峰值位置没 有发生变化(~899 nm),即材料的带隙没有改变,



图 2 GaAsN/GaAs 量子阱不同注量电子辐照后的 PL 光谱

Fig. 2 LT-PL(T = 10 K) spectra of GaAsN/GaAs quantum well after electron irradiation with the doses of  $1 \times 10^{15}$  e/cm<sup>2</sup> and  $1 \times 10^{16}$  e/cm<sup>2</sup>

同时 GaAsN/GaAs 量子阱 PL 光谱的半高宽为 20 MeV,也没有发生变化。

从图2可以看出,经过电子束辐照 GaAsN/ GaAs 量子阱 PL 强度产生剧烈的降低,即 GaAsN/ GaAs 量子阱材料光学性能发生严重退化。产生 这种现象是由于1 MeV 电子辐照 GaAsN/GaAs 量 子阱时,入射电子与靶材料发生库仑相互作用,这 种碰撞使得晶格原子获得足够的能量离开原来的 晶格位置,形成大量的空位型缺陷,即产生了位移 损伤效应。这种辐射感生空位型缺陷在 GaAsN/ GaAs 量子阱禁带中引入新的缺陷能级,这些缺陷 能级在禁带内起着复合、产生、捕获或散射中心的 作用,降低了 GaAsN/GaAs 量子阱辐射复合的效 率,最终表现为电子辐照后 PL 强度降低。位移 损伤剂量方法是研究太阳电池和材料位移损伤的 一个很好的方法,通常采用 D(D) Displacement damage dose, DDD)表示带电粒子在太阳电池或材料 中产生的辐射损伤,如公式(1)<sup>[16]</sup>所示:

$$D = E_{\text{NIEL}} \times \Phi, \qquad (1)$$

其中, $\Phi$ 是电子注量,本文采用的注量是 1×10<sup>15</sup> e/cm<sup>2</sup>和1×10<sup>16</sup> e/cm<sup>2</sup>, $E_{\text{NIEL}}$ 是电子在材料中产生的非电离能量损失(Non-ionizing energy loss)。我们采用欧洲航天局的空间环境信息系统中的Mulassis 仿真软件计算了 1 MeV 电子辐照阱产生的位移损伤,仿真结果如表 2 所示。Mulassis 仿真结果显示材料中的位移损伤(DDD)随电子注量的增加而增加,DDD 越大表示电子在材料中产生的缺陷越多,材料的光学性能退化越严重。从图 2 观察到随着电子注量的增加,GaAsN/GaAs 量

#### 表 2 采用 Mulassis 仿真得到每个注量点对应的 DDD

Tab. 2 DDD corresponding to each fluence point calculated by Mulassis simulation

Sample	1 MeV electron	Mulassis	
	fluence/( e $\cdot$ cm $^{-2}$ )	DDD/(MeV $\cdot$ g <sup>-1</sup> )	
GaAsN QW	$1 \times 10^{15}$	$3.14 \times 10^{10}$	
	$1 \times 10^{16}$	$3.14 \times 10^{11}$	

子阱光学性能不断退化。因此,仿真结果与实验 结果保持一致。这也更进一步证明辐照引起的位 移损伤导致了 GaAsN/GaAs 量子阱光学性能的 退化。

#### 3.2 电子辐照后退火结果分析

图 3 (a)、(b)分别是注量为 1 × 10<sup>15</sup> e/cm<sup>2</sup> 和 1 × 10<sup>16</sup> e/cm<sup>2</sup> 的 1 MeV 电子辐照 GaAsN/GaAs 量子阱后 650,750,850 ℃ 退火的 PL 光谱。从图 3 可以看出,650 ℃ 退火 5 min,所有样品的 PL 强 度几乎增加到辐照前强度,材料的光学性能得到 恢复。除此之外,650 ℃ 退火 5 min 后,GaAsN/ GaAs 量子阱带隙没有发生变化(~899 nm)。样



- 图 3 GaAsN/GaAs 量子阱在注量为 1 × 10<sup>15</sup> e/cm<sup>2</sup>(a) 和 1 × 10<sup>16</sup> e/cm<sup>2</sup>(b) 电子辐照后退火的 PL 光谱
- Fig. 3 LT-PL(T = 10 K) spectra of GaAsN/GaAs quantum well annealed for 5 min after electron irradiation with the dose of  $1 \times 10^{15}$  e/cm<sup>2</sup> (a) and  $1 \times 10^{16}$  e/cm<sup>2</sup> (b)

品 650 ℃退火后进行了 750 ℃退火,结果表明, GaAsN/GaAs 量子阱材料 PL 强度出现了大幅度 的降低,材料带隙发生了蓝移,电子注量为 1 ×  $10^{15}$  e/cm<sup>2</sup> 和 1 ×  $10^{16}$  e/cm<sup>2</sup> 的样品退火后 PL 强 度分别下降到辐照前强度的 18% 和 31%,注量为 1 ×  $10^{15}$  e/cm<sup>2</sup> 和 1 ×  $10^{16}$  e/cm<sup>2</sup> 的样品退火后蓝 移量分别是 3 nm 和 4 nm。GaAsN/GaAs 量子阱 750 ℃退火后进行了 850 ℃退火,材料 PL 强度进 一步降低,注量为1×10<sup>15</sup> e/cm<sup>2</sup>和1×10<sup>16</sup> e/cm<sup>2</sup> 的样品 PL 强度都下降到辐照前强度的 12%。 GaAsN/GaAs 量子阱 850 ℃ 退火后带隙没有出现 更进一步的蓝移。所有样品电子辐照和辐照后退 火都没有引起 PL 光谱半高宽的变化(~20 meV)。 为了更清楚地展示电子辐照和退火后 PL 光谱的 变化情况,我们将图 2 和图 3 中的光学参数进行 了提取,如表 3 所示。

#### 表 3 GaAsN/GaAs 量子阱电子辐照后和退火后 PL 光谱光学参数提取

Tab. 3 Extract the parameters of PL peak position, PL peak shift, normalized PL intensity, FWHM from PL spectra after irradiation and annealing

Condition	PL peak position/nm	PL peak shift/nm	Normalized PL intensity	FWHM/meV
As grown	899	0	1	21
1E15 irr	900	+ 1	0.85	20
1E16 irr	899	0	0.29	20
1E15 irr+650 $^\circ\!\!\mathrm{C}$ ann	900	+ 1	1.02	21
1E15 irr +750 $^\circ\!\!\mathrm{C}$ ann	896	- 3	0.18	20
1E15 irr+850 $^\circ\!\! C$ ann	895	- 4	0.12	20
1E16 irr + 650 $^\circ\!\! C$ ann	899	0	1.02	21
1E16 irr + 750 °C ann	895	- 4	0.31	21
1E16 irr + 850 °C ann	895	- 4	0.12	19

GaAsN/GaAs 量子阱在 750.850 ℃ 退火 5 min 后 PL 光谱发生了明显的蓝移现象。GaAsN/GaAs 量子阱高温退火出现蓝移主要原因是退火过程中 量子阱中的 N 原子热扩散到 GaAs 势垒层中。研 究表明,将微量 N 原子添加到 GaAs 材料后, N 原 子替代 As 原子晶格位置,导致原 GaAs 禁带宽度 减小[1],即发生带隙红移;反之,量子阱中晶格替 代位 N 原子的数量减少, GaAsN 材料的带隙将发 生蓝移。Li 等<sup>[17]</sup>研究了 GaAsN/GaAs 量子阱的 热退火效应,他们发现了蓝移现象,认为蓝移是由 于量子阱中的 N 原子扩散到邻近的 GaAs 势垒层 中。他们通过假设误差函数扩散和采用粒子传输 计算求解任意势阱的薛定谔方程来模拟蓝移,在 假设了 N 和 As 的各向同性扩散后,计算了观察到 的蓝移与退火温度的关系。研究表明<sup>[18]</sup>,GaAsN/ GaAs 量子阱 750 ℃ 退火 5 min 后, XRD 光谱向较 低的布拉格角发生了移动,该研究结果也证明 GaAsN/GaAs 材料 750 ℃退火后发生了晶格应变 弛豫, GaAsN 量子阱中的氮原子扩散到了 GaAs 势垒层中,使得量子阱中 N 原子数量减少, GaAsN/GaAs 材料带隙发生蓝移。我们认为本实 验中也出现了类似的过程,其能带模型图如图 4 所示。高温退火使得 GaAsN/GaAs 量子阱中的 N 原子热扩散到 GaAs 势垒层中,量子阱中 N 原子 的降低使得材料带隙蓝移,即材料禁带宽度发生增 大。退火后蓝移的大小为: $\Delta E_{\mu} = h\nu_1 - h\nu_2$ 。







从图 3 和表 2 可以看到, GaAsN/GaAs 量子 阱 750 ℃退火后 PL 峰发生了蓝移,并且 PL 强度 产生了剧烈的降低,接着 850 ℃退火后材料 PL 峰 强度继续降低,但是没有造成更大的蓝移。Liu 等<sup>[19]</sup>研究表明, GaAsN/GaAs 量子阱生长过程中, 存在大量的 N—N 间隙缺陷(两个 N 原子占据一 个 As 原子晶格位置)和 N—As 间隙缺陷(一个 N 原子和一个 As 原子占据一个 As 原子晶格位 置),高温退火后,N-N间隙缺陷浓度降低,N-As 间隙缺陷浓度增大。Krispin 等<sup>[20]</sup>也通过 DLTS 测试得到,Ga(As,N) 材料 720 ℃ 退火后,N—As 间隙缺陷依旧存在。Liu 等<sup>[21]</sup> 也发现对 GaAsN 材料高温退火后,样品的光学性能出现了退化的 现象。在本工作中, GaAsN/GaAs 量子阱 750 ℃ 和850 ℃退火后,材料中的 N—N 间隙缺陷转化 为 N—As 间隙缺陷,一个 N—N 间隙缺陷会形成 两个 N—As 间隙缺陷,产生了大量的点缺陷,这 些点缺陷在材料中充当非辐射复合中心,降低了 量子阱材料光学性能,所以观察到退火后材料光 致发光强度降低。750 ℃退火后 PL 峰发生蓝移 是由于 N 原子外扩散,但是 850 ℃退火后没有进 一步发生蓝移,这是由于退火过程中 N-N 间隙 缺陷转化为 N—As 间隙缺陷, N—As 缺陷的形成 阻止了 N 原子的外扩散,使得 850 ℃ 退火后材料 带隙没有发生更大的蓝移。

4 结 论

本文采用低温光致发光(LT-PL)研究了 1 MeV电子辐照及辐照后不同温度热退火对 GaAsN/GaAs单量子阱的影响,其中电子辐照注

量为1×10<sup>15</sup>,1×10<sup>16</sup> e/cm<sup>2</sup>,辐照后退火温度为 650,750,850 ℃。通过高分辨率 X 射线衍射 (HR-XRD)测试与拟合得到 GaAsN/GaAs 量子阱 样品的氮含量为 0.8%。研究结果表明,1 MeV 电子辐照严重退化了 GaAsN/GaAs 量子阱的光学 性能,这是由于电子辐照在材料中产生大量点缺 陷,这些点缺陷充当非辐射复合中心,降低了 GaAsN/GaAs 量子阱发光效率。随着电子辐照注 量的增加,产生的缺陷密度急剧增加,因此材料光 学性能急剧退化。电子辐照 GaAsN/GaAs 量子阱 后 650 ℃ 退火 5 min. 样品 PL 强度恢复到辐照前 初值 PL 强度,该温度下,样品带隙没有发生改 变。辐照样品 750 ℃退火 5 min 后,样品的 PL 强 度发生了明显的降低,这是由于高温退火使得 N—N 间隙缺陷转化为数量更多的 N—As 间隙缺 陷,减少了材料的质量。同时,750 ℃退火样品带 隙发生明显的蓝移,这是由于量子阱中的 N 原子 热扩散到 GaAs 势垒中,使得样品带隙蓝移。 GaAsN/GaAs 量子阱 850 ℃ 退火 5 min, 样品 PL 强度进一步降低,但是 GaAsN/GaAs 量子阱带隙 没有产生更大的蓝移,这是由于高温退火使得 N—N 间隙缺陷转化为数量更多的 N—As 间隙缺 陷,不仅减少了材料的质量,同时抑制了 N 原子 在高温下的外扩散。

#### 参考文献:

- [1] FRANCOEUR S, SIVARAMAN G, QIU Y, et al. Luminescence of as-grown and thermally annealed GaAsN/GaAs [J]. Appl. Phys. Lett., 1998,72(15):1857-1859.
- [2] SHAN W, WALUKIEWICZ W, AGER Ⅲ J W, et al. Band Anticrossing in GaInNAs alloys [J]. Phys. Rev. Lett., 1999, 82(6):1221-1224.
- [3] LEW K L, YOON S F, WANG H, et al. GaAsNSb-base GaAs heterojunction bipolar transistor with a low turn-on voltage
   [J]. J. Vac. Sci. Technol. B, 2006,24(3):1308-1310.
- [4] TANSU N, KIRSCH N J, MAWST L J. Low-threshold-current-density 1 300-nm dilute-nitride quantum well lasers [J]. Appl. Phys. Lett., 2002,81(14):2523-2525.
- [5] ESSIG S, STÄMMLER E, RÖNSCH S, et al. Dilute nitrides for 4- and 6- junction space solar cells [C]. Proceedings of the 9th European Space Power Conference, Saint Raphaël, France, 2011.
- [6] LI W, PESSA M, AHLGREN T, et al. Origin of improved luminescence efficiency after annealing of Ga(In) NAs materials grown by molecular-beam epitaxy [J]. Appl. Phys. Lett., 2001,79(8):1094-1096.
- [7] CHEN X Z, ZHANG D H, JIN Y J, et al. Effect of rapid thermal annealing on behavior of nitrogen in GaAsN alloys [J].
   J. Cryst. Growth, 2013,362:197-201.
- [8] 丛忠超,余学峰,崔江维,等. 半导体器件总剂量辐射效应的热力学影响 [J]. 发光学报, 2014,35(4):465-469.
   CONG Z C, YU X F, CUI J W, et al.. Thermodynamic impact on total dose effect for semiconductor components [J].
   Chin. J. Lumin., 2014,35(4):465-469. (in Chinese)

- [9] LEI QQ, AIERKEN A, SAILAI M, et al. 150 KeV proton irradiation effects on photoluminescence of GaInAsN bulk and quantum well structures [J]. Opt. Mater., 2019,97:109375-1-5.
- [10] 慎小宝,李豫东,玛丽娅・黑尼,等. 高注量1 MeV 电子辐照下 InGaAs 单结太阳电池退化规律与机制 [J]. 发光学报, 2019,40(9):1115-1122.
   SHEN X B, LI Y D, HEINI M, et al.. Radiation effects of InGaAs single junction solar cell by high fluence 1 MeV electron

[J]. Chin. J. Lumin., 2019,40(9):1115-1122. (in Chinese)

- [11] 李占行,艾尔肯·阿不都瓦衣提,玛丽娅·黑尼,等.1 MeV 电子辐照下晶格匹配与晶格失配 GaInP/GaInAs/Ge 三 结太阳电池辐射效应研究 [J]. 发光学报, 2017,38(4):463-469.
  LI Z H,ABUDUWAYITI A, HEINI M, et al. Radiation effects of lattice matched and upright metamorphic GaInP/GaIn-As/Ge triple-junction solar cells by 1 MeV electrons [J]. Chin. J. Lumin., 2017,38(4):463-469. (in Chinese)
- [12] PAVELESCU E M, GHEORGHIU A, BALTATE N, et al. . Influence of electron irradiation and postannealing on photoluminescence of GaInNAs/GaAs quantum wells [C]. Proceedings of 2004 International Semiconductor Conference, Sinaia, 2004.
- [13] PAVELESCU E M, KUDRAWIEC R, BÅLŢÅŢEANU N, et al. Enhancement in photoluminescence from 1 eV GaInNAs epilayers subject to 7 MeV electron irradiation [J]. Semicond. Sci. Technol., 2013,28(2):025020-1-4.
- [14] PAVELESCU E M, KUDRAWIEC R, PUUSTINEN J, et al. Effects of 7-MeV electron irradiation on photoluminescence from 1-eV GaInNAs-on-GaAs epilayers [J]. J. Lumin., 2013,136:347-350.
- [15] PAVELESCU E M, BÅLŢÅŢEANU N, SPÂNULESCU S I, et al. Very high dose electron irradiation effects on photoluminescence from GaInNAs/GaAs quantum wells grown by molecular beam epitaxy [J]. Opt. Mater., 2017,64:361-365.
- [16] INGUIMBERT C, MESSENGER S. Equivalent displacement damage dose for on-orbit space applications [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2012,59(6):3117-3125.
- [17] LI L H, PAN Z, XU Y Q, et al. Effects of rapid thermal annealing and SiO<sub>2</sub> encapsulation on GaNAs/GaAs single quantum wells grown by plasma-assisted molecular-beam epitaxy [J]. Appl. Phys. Lett., 2001,78(17):2488-2490.
- [18] SPRUYTTE S G, COLDREN C W, HARRIS J S, et al. . Incorporation of nitrogen in nitride-arsenides: origin of improved luminescence efficiency after anneal [J]. J. Appl. Phys., 2001,89(8):4401-4406.
- [19] LIU H F, XIANG N, CHUA S J. Annealing behavior of N-bonding configurations in GaN<sub>0.023</sub>As<sub>0.977</sub> ternary alloy grown on GaAs (0 0 1) substrate by molecular beam epitaxy [J]. J. Cryst. Growth, 2006,290(1):24-28.
- [20] KRISPIN P, GAMBIN V, HARRIS J S, et al. Nitrogen-related electron traps in Ga(As, N) layers ( $\leq 3\%$  N) [J]. J. Appl. Phys., 2003,93(10):6095-6099.
- [21] LIU Z L, CHEN P P, LI T X, et al. Effect of rapid thermal annealing on the optical properties of MBE growth GaNAs films [J]. J. Lumin., 2006,119-120:546-550.



**雷琪琪**(1994 -),男,甘肃陇西人, 硕士研究生,2017 年于新疆大学获 得学士学位,主要从事太阳电池和 稀氮材料(Ga(In)AsN)辐射效应的 研究。

E-mail: 1243642152@qq. com



**郭旗**(1964 -),男,新疆乌鲁木齐人, 学士,研究员,博士研究生导师,1986 年于北京理工大学获得学士学位,主 要从事光电材料与器件空间辐射效应 方面的研究。

E-mail: guoqi@ms.xjb.ac.cn