

学校编码: 10384
学号: 19820101152842

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

p-GaN 退火对 GaN 基 LED 外延材料及器件性能的影响

Influence of p-GaN annealing on the properties of GaN-based LED wafers and devices

孙丽

指导教师姓名: 张保平教授

专业名称: 微电子学与固体电子学

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩时间: 2013 年 6 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013 年 6 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

GaN 基宽禁带半导体材料具有优异的物理和化学性质，已被广泛用于全彩显示、信息指示和照明领域，成为当今半导体技术发展的热点。目前，GaN 及 GaN 基器件的研究已经取得了巨大的进展，但是 GaN 的生长和器件制备方面还存在一些困难。p 型掺杂困难是限制 GaN 基材料和器件发展的主要因素之一。热退火是用于提高 p 型 GaN 空穴浓度的常用方法，但具体的实验条件还有待进一步优化。本文针对 GaN 基材料的 p 型掺杂问题，将 GaN 基 LED 样品分别在 800 °C，N₂ 氛围下退火 20 min 和 500 °C，O₂ 氛围下退火 6 min，并对 N₂ 退火和 O₂ 退火的发光二极管（LED）样品进行光学性能和电学性能的系统研究与分析，基于这些研究本文的主要成果如下：

1. p-GaN 电流电压特性的测试结果显示：在 O₂ 较低温度下退火就可以达到与 N₂ 高温退火相似的电学特性。表明两种退火方法都可以实现 Mg 原子的有效激活。

2. 变温光致发光测试表明：N₂ 高温退火会在 InGaN 量子阱中形成 In 团簇，In 团簇作为深的势阱增加了对载流子的束缚，能够将载流子更好地局域在势阱中。然而 In 团簇形成的同时也伴随着大量位错的产生，使其 InGaN 量子阱中的位错密度大幅度提高，因此室温下 N₂ 退火样品的辐射复合效率低于 O₂ 退火样品的辐射复合效率。

3. 与 N₂ 高温退火相比，O₂ 低温退火后 GaN 基 LED 的性能得到了较大幅度的改善，具体表现为：在 20 mA 下，LED 的正向工作电压由 3.76 V 降到 3.18 V，电光转换效率提高了 41 %。

关键词：p-GaN；热退火；LED

Abstract

GaN-based wide-band gap semiconductors are being widely used in color display, signal indication and solid-state lighting due to their outstanding physical and chemical properties. It is now a hot topic in semiconductor research. Although great progresses have been made in the studies of GaN-based devices, several obstacles still act as the critical handicaps restricting the further development and improvement. Among these obstacles, p-type GaN doping is one of the most difficult problems in improving device performances. Thermal annealing is usually used to improve the concentration of holes in p-GaN, however the specific conditions of the experiments should be further optimized. This thesis is focused on the problem of p-type GaN doping and the GaN-based LEDs wafer are annealed at 800 °C in pure N₂ ambient for 20 min and at 500 °C in pure O₂ ambient for 6 min, then the optical and electrical properties of LEDs are systematically investigated. The main results are summarized as the following:

1. The current-voltage measurement of p-GaN shows: samples annealed at low-temperature in O₂ ambient and high-temperature in N₂ ambient show similar current-voltage characteristics which means these two methods both can improve the concentration of holes in p-GaN.

2. The temperature-dependent photoluminescence measurements shows: high-temperature thermal annealing in N₂ ambient can induce indium clusters in InGaN MQWs. Although the deep traps induced by indium clusters can act as localized centers for carriers, there are much more dislocations out of the trap centers due to high-temperature annealing. As a result, the radiative efficiency of the sample annealed in N₂ ambient is lower than that annealed in O₂ ambient at room temperature.

3. Compared with the high-temperature N₂ annealing, the low-temperature O₂ annealing shows superior characteristics in the improvement of LED: the forward voltage is decreased from 3.76 V to 3.18 V and the wall-plug efficiency is increased about 41 % at 20 mA.

Keywords: p-GaN; thermal annealing; LED

| | |
|--|----|
| 目录 | |
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 GaN 基材料的结构与性质 | 1 |
| 1.2 GaN 基 LED 的发展现状 | 3 |
| 1.3 GaN 基 p 型掺杂存在的问题 | 6 |
| 1.4 p-GaN 热退火的研究进展 | 8 |
| 1.5 本论文的研究内容和结构安排 | 10 |
| 参考文献 | 12 |
| 第二章 实验方法及原理 | 15 |
| 2.1 MOCVD 材料生长技术 | 15 |
| 2.2 高温退火 | 17 |
| 2.3 p-GaN 电学特性测试 | 19 |
| 2.4 光致发光 | 22 |
| 2.4.1 光致发光原理及复合机制 | 22 |
| 2.4.2 光致发光谱分析 | 23 |
| 2.4.3 光致发光系统介绍 | 24 |
| 参考文献 | 26 |
| 第三章 p-GaN 退火对 GaN 基 LED 材料性能的影响 | 27 |
| 3.1 N ₂ 退火与 O ₂ 退火的实验过程 | 27 |
| 3.2 N ₂ 退火与 O ₂ 退火对 p-GaN 电学性能的影响 | 28 |
| 3.2.1 p-GaN 电极的制备流程 | 28 |
| 3.2.2 p-GaN 电学性能测试与分析 | 30 |
| 3.3 N ₂ 退火与 O ₂ 退火对 InGaN 量子阱光学性能的影响 | 31 |
| 3.4 本章小结 | 38 |
| 参考文献 | 39 |
| 第四章 p-GaN 退火对 GaN 基 LED 器件性能的影响 | 41 |
| 4.1 LED 发光原理概述 | 41 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 4.2 GaN 基 LED 的制备 | 42 |
| 4.2.1 外延片的处理 | 42 |
| 4.2.2 芯片制备 | 42 |
| 4.2.3 LED 的封装 | 44 |
| 4.3 测试结果与分析 | 45 |
| 4.3.1 I-V 特性 | 45 |
| 4.3.2 L-I 特性 | 49 |
| 4.4 本章小结 | 51 |
| 参考文献 | 53 |
| 第五章 结论与展望 | 55 |
| 在学期间发表的论文 | 57 |
| 致谢 | 58 |

Contents

| | |
|---|-----------|
| Chapter 1 Preface | 错误！未定义书签。 |
| 1.1 The structure and properties of GaN-based materials ... | 错误！未定义书签。 |
| 1.2 The progress of GaN-based LEDs | 3 |
| 1.3 The problems of GaN-based p-type doping | 错误！未定义书签。 |
| 1.4 The progress of p-GaN thermal annealing | 错误！未定义书签。 |
| 1.5 The structure frame of this thesis | 错误！未定义书签。 |
| References | 错误！未定义书签。 |
| Chapter 2 Experimental methods and principles | 错误！未定义书签。 |
| 2.1 Growth of MOCVD | 错误！未定义书签。 |
| 2.2 High-temperature annealing | 错误！未定义书签。 |
| 2.3 Electrical measurement of p-GaN | 错误！未定义书签。 |
| 2.4 Photoluminescence | 错误！未定义书签。 |
| 2.4.1 Principle of photoluminescence and mechanism of recombination | 错误！未定义书签。 |
| 2.4.2 Analysis of photoluminescence..... | 错误！未定义书签。 |
| 2.4.3 Introduction of photoluminescence measurement system | 错误！未定义书签。 |
| References | 错误！未定义书签。 |
| Chapter 3 Influence of p-GaN annealing on the properties of GaN-based LED materials | 错误！未定义书签。 |
| 3.1 Experimental process of N₂ annealing and O₂ annealing | 错误！未定义书签。 |
| 3.2 Influence of N₂ annealing and O₂ annealing on the electrical properties of p-GaN | 28 |
| 3.2.1 Fabrication of conact on p-GaN..... | 28 |
| 3.2.2 Electrical measurement and analysis of p-GaN | 错误！未定义书签。 |
| 3.3 Influence of N₂ annealing and O₂ annealing on the optical properties of InGaN/GaN MQWs | 错误！未定义书签。 |
| 3.4 Summary | 38 |
| References | 39 |

| | |
|--|-----------|
| Chapter 4 Influence of p-GaN annealing on the properties of GaN-based LED devices | 错误！未定义书签。 |
| 4.1 Introduction of LED luminescence theory | 错误！未定义书签。 |
| 4.2 Fabrication of GaN-based LEDs | 错误！未定义书签。 |
| 4.2.1 Process of the LED epitaxial wafer | 错误！未定义书签。 |
| 4.2.2 Fabrication of the LED chip..... | 错误！未定义书签。 |
| 4.2.3 Package of the LED device..... | 错误！未定义书签。 |
| 4.3 Results and analysis | 错误！未定义书签。 |
| 4.3.1 I-V characteristics | 错误！未定义书签。 |
| 4.3.2 L-I characteristics..... | 49 |
| 4.4 Summary | 错误！未定义书签。 |
| References | 错误！未定义书签。 |
| Chapter 5 Conclusions and prospects | 错误！未定义书签。 |
| Publications during master degree study | 错误！未定义书签。 |
| Acknowledgement | 58 |

第一章 绪论

1.1 GaN 基材料的结构与性质

在半导体产业的发展过程中，一般将 Ge、Si 称为第一代半导体材料；将 GaAs、GaP、InP、InAs 及其合金称为第二代半导体材料；进入 20 世纪 90 年代，以 GaN、SiC 为代表的宽带隙半导体材料已成为继 Si、GaAs 之后重点研究的第三代半导体材料。与第一、二代半导体材料相比，第三代半导体材料具有禁带宽度大、介电常数小、电子迁移率高、化学稳定性好和抗辐射能力强等优异的物理和化学性质，是制作发光器件和光伏器件的理想材料^[1-2]。

在 GaN 成为研究的热点之前，在相当长的时间内，SiC 和 ZnSe 一直是宽带隙材料研究和开发的重点，SiC 蓝光 LED 是 GaN 蓝光发光二极管（LED）实现商业化之前唯一的商品化的蓝光 LED 产品。尽管 SiC 具有很多优点，例如抗辐射、耐化学腐蚀、高温稳定性好等，然而该材料是间接带隙材料，其蓝光 LED 的发光亮度很低。ZnSe 基材料由于实现了蓝光 LD，更被视为重点材料，尽管该材料的带隙覆盖了绿色和蓝色波长范围，但目前的实践表明，其发光器件的寿命比较短（蓝光 ZnSe LD 寿命约为几个小时）。

III 族氮化物半导体材料是指 GaN、AlN 和 InN 化合物以及由它们组成的多元合金材料（ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 等）。对于 III 族氮化物半导体材料，稳定相为纤锌矿结构，空间群为 P63 mc，属于六角晶系，纤锌矿结构的 III 族氮化物材料都是直接带隙材料，随着合金组分的改变，其禁带宽度可以从 0.7 eV（InN）到 6.2 eV（AlN）^[3-5]连续改变，如图 1-1 所示，发光波长覆盖光谱中整个可见光及深紫外的光谱范围；亚稳相为闪锌矿结构，空间群为 F43 m，属于立方晶系。单晶 GaN 通常只呈现纤锌矿和闪锌矿两种结构，但在极端高压下会出现岩盐矿结构。三种结构如图 1-2 所示。

GaN 是 III 族氮化物中的基本材料，也是目前研究最多的 III 族氮化物材料。纤锌矿结构 GaN 的弹性模量和金刚石的弹性模量在同一个数量级上。GaN 材料的热稳定性良好、热导率高，化学性质非常稳定，在室温下，GaN 不溶于水、酸和碱，而在热的碱溶液中以非常缓慢的速度溶解。

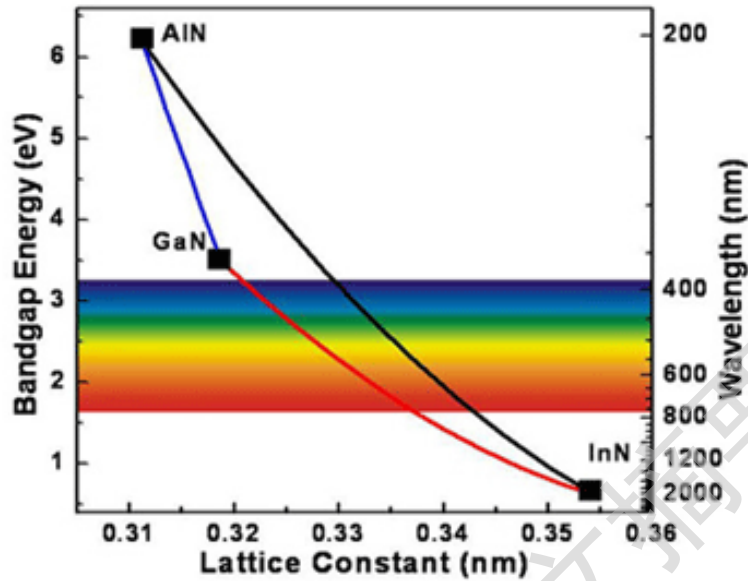


图 1-1 AlN、GaN 和 InN 化合物带隙和晶格常数的关系

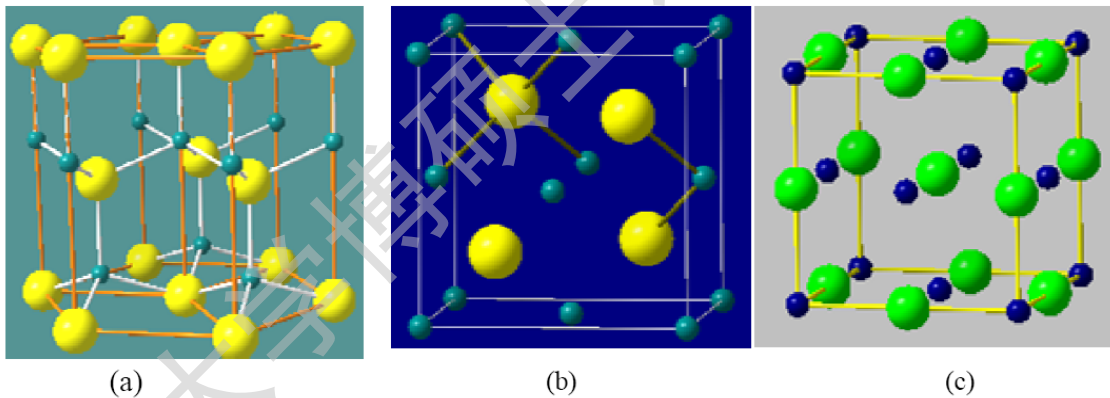


图 1-2 GaN 材料三种基本结构：(a)纤锌矿结构 (b) 闪锌矿结构 (c)岩盐矿结构

GaN材料的电学特性对于制作基于GaN的各类光电子器件具有重要的影响，随着金属有机化学气相沉积技术（Metal organic chemical vapor deposition, MOCVD）工艺水平的不断提高，高质量的GaN材料脱颖而出。目前报道的GaN室温迁移率可达到 $900 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ^[6]。GaN具有很高的击穿电压，可达 $3 \times 10^6 \text{ V/cm}$ ^[7]。在蓝宝石衬底上生长的非故意掺杂GaN样品存在较高的n型本底载流子浓度，现在较好的GaN样品的本底n型载流子浓度已可已降到 $10^{16}/\text{cm}^3$ 左右^[8]。

1.2 GaN 基 LED 的发展现状

早在 1971 年,普林斯顿大学 RCA 实验室的 Pankove 等人研制出第一个 GaN LED^[9], 由于当时不能进行 GaN p 型掺杂, 因此只能采用 MIS 结构, MIS 结构的 LED 发光效率较低, 仅有 0.03 %~0.1 %, 峰值波长为 485 nm, 半高宽为 70 nm, 正向工作电压为 7.5 V, 10 mA 下具有 2 mcd 的光输出, 但是其使用寿命较长。

1983 年, Yoshida 等人在蓝宝石衬底上淀积一层 AlN 作为缓冲层, 明显的提高了 GaN 的表面结构和晶体质量; 通过 Mg 掺杂并用低能电子束辐射 (LEEBI) 方法获得 p 型掺杂 GaN, 为 GaN p-n 结 LED 的产生奠定了基础。于是在 20 世纪 80 年代末, 名古屋大学 Hiroshi Amano 等人利用低能电子束辐射法对掺 Mg 的 GaN 进行处理, 使 GaN 电阻率从 $10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ 降至 $35 \Omega \cdot \text{cm}$, 空穴浓度为 $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, 这样就可以实现 p-GaN, 并利用 MOCVD 在 AlN 缓冲层上外延生长 GaN 薄膜, 制作出第一个 GaN p-n 结 LED^[10], 如图 1-3 所示。p-n 结 LED 的 I-V 特性和 DC-EL 特性都明显优于 MIS LED。

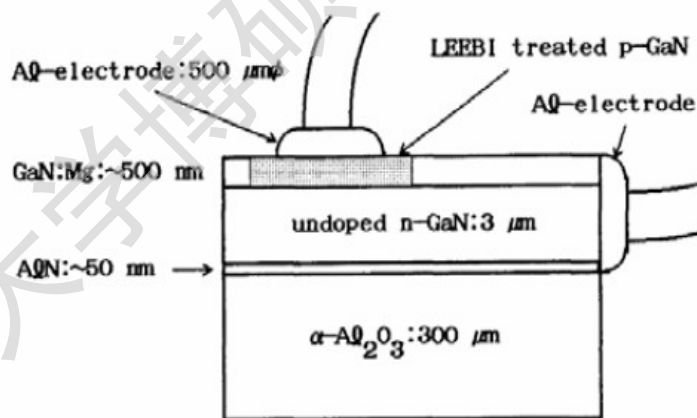


图 1-3 早期的 GaN 基 p-n 结 LED 结构

在此基础上, GaN 基 LED 得到了迅速发展。1991 年, 日本 Nichia 公司的 Nakamura 等人成功的研制出掺 Mg 的同质结 GaN 蓝色 LED^[11], 如图 1-4 所示, 并首次实现了在 GaN 缓冲层上利用双流 MOCVD 生长 GaN 薄膜, 从而大大提高了薄膜质量, 使其霍尔迁移率达到 $600 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 峰值波长达到 430 nm, 光谱半高宽为 55 nm, 其光输出外量子效率约为 0.18 %。

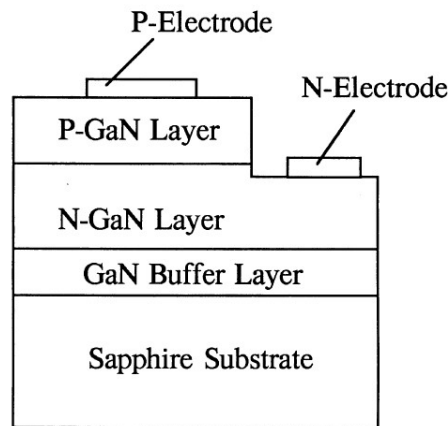


图 1-4 同质结 GaN 基 LED 结构

1992 年末, Nakamura 等人研制出世界上第一只 p-GaN/n-InGaN/n-GaN 双异质结蓝光 LED, 在全世界范围内掀起了氮化物的研究热潮。在此基础上, Nakamura 等人于 1993 年研发出高亮度 InGaN/AlGaN 双质结(DH)蓝色 LED^[12], 如图 1-5 所示。这是第一次采用 Zn 掺杂 InGaN 作为有源层, 以 Zn 杂质作为发光中心; 峰值波长为 450 nm, 光谱半宽仅为 70 nm, 外量子效率为 5.4%, 输入电流 20 mA 时工作电压电压为 3.6 V, 光输出功率达到 1.5 mW, 其发光亮度已超过 1 cd。到 1994 年, 蓝光 LED 的光输出功率达到 3 mW, 发光强度也非常大, 是当时性能指标都非常好的蓝光二极管产品。

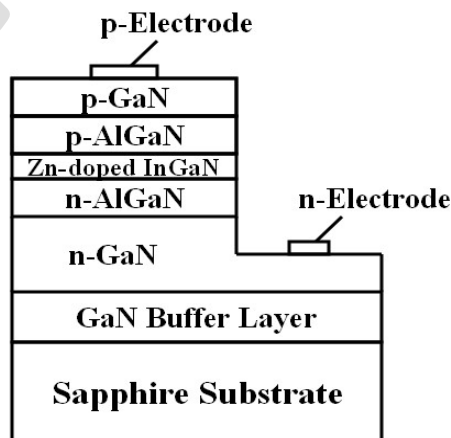


图 1-5 双异质结 InGaN 蓝光 LED 结构

1995年, Nakamura等人研制出了InGaN/GaN单量子阱蓝光LED^[13], 如图1-6所示, 使得光谱半峰宽非常窄, 更适合做全色显示器件, 外量子效率高达8.7%。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库