

学校编码: 10384
学号: 23120121152897

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

ICP 轰击下的 In 掺杂及 GaN 基 LED 外延
材料和器件性能的研究

Study of ICP-induced In doping and the
properties of GaN-based LED wafers and
devices

曾勇平

指导教师姓名: 张保平教授

专 业 名 称: 光学工程

论文提交日期: 2015 年 5 月

论文答辩时间: 2015 年 5 月

学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2015 年 5 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

摘要

GaN 材料属于第三代半导体材料，具有宽的直接带隙以及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。在信息显示领域，GaN 基高亮度蓝、绿发光二极管可以用于户外大屏幕全色显示以及交通信号灯等方面；在照明领域，GaN 基白光 LED 可以用于背光源、路灯和景观照明以及通用照明等。GaN 基器件的研究已经取得巨大进展，但是在器件的制备过程中仍存在一些问題，如 GaN 材料的 p 型欧姆接触问題则是限制 GaN 器件发展的主要因素之一。有两方面的原因阻碍低阻 p-GaN 欧姆接触的实现：一方面是难以生长高空穴浓度的 p-GaN 材料；另一方面是缺乏合适的接触金属材料。目前用于提高 p-GaN 材料空穴浓度的方法主要有热退火，激光掺杂、离子注入等。本文提出了利用感应耦合等离子体技术（Inductively Coupled Plasma, ICP），对 p-GaN 上方一层 ITO 薄膜进行轰击，使得 ITO 中的 In 原子扩散至 p-GaN 中，降低受主激活能，从而提高了 p-GaN 材料空穴浓度，降低欧姆接触电阻。并对未经掺杂和经过 ICP In 掺杂的发光二极管（LED）样品的电学特性以及光学性能进行系统研究分析，具体研究内容如下：

1. 通过在 p-GaN 上方制作欧姆接触并进行电流电压特性测试，结果显示：经过 ICP In 掺杂的 p-GaN 样品的 I-V 特性与未经 ICP 掺杂的样品 I-V 特性相比有所提高，计算得出，前者欧姆接触电阻为 $4.35 \times 10^3 \Omega$ ，后者欧姆接触电阻为 $7.09 \times 10^3 \Omega$ 。

2. 采用 X 射线光电子能谱仪（XPS）测试了样品表面元素分布情况，对 ICP 掺杂后样品 p-GaN 欧姆接触特性的提高机理进行了分析说明，阐明了 In 元素对于提高 p-GaN 空穴浓度的作用。

3. 通过低温光致发光测试对 InGaN/GaN 多量子阱光学性能进行了研究分析，提出了 p-GaN/InGaN 量子阱晶格展宽模型。

4. 通过改变 ICP 不同工艺条件，对 GaN 材料进行刻蚀，并通过台阶仪测量刻蚀厚度、AFM 测量被刻蚀 GaN 样品表面形貌，分析了不同工艺条件下刻蚀速率、表面形貌与各参数之间的关系。

5. 在 ICP In 掺杂技术的基础上制备了 GaN 基蓝光 LED，并对不同 LED 器件的 I-V 特性、P-I 特性进行了对比分析。

关键词：p-GaN；ICP；LED；欧姆接触

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

GaN-based wide-band gap semiconductors belong to the third generation of semiconductor materials, which are the ideal materials of emitting devices and photovoltaic devices because of their excellent physical and chemical properties. In the field of information display, GaN-based high-brightness blue and green light emitting diodes (LEDs) can be used in outdoor large screen display and traffic lights. In the field of lighting, GaN-based white LEDs can be used for backlights, landscape lighting and general lighting, and so on. Although great progresses have been made, there are still several problems toward further development and improvement of GaN-based LEDs. The p-type Ohmic contact is one of the main difficulties. There are two reasons accounting for the high resistance of p-type Ohmic contact. On the one hand, it is difficult to grow high hole concentration of p-GaN. On the other hand, there are no proper metal to make high quality Ohmic contact. Currently, thermal annealing, laser-induced doping, ion implantation process, and so on, have been used to improve the hole concentration of p-GaN. In this paper, the electrical property of p-GaN layer was improved by depositing a layer of ITO on the p-GaN surface followed by ICP etching, which made the diffusion of In atoms into p-GaN. As a result, the incorporation of In atoms reduces the activation energy of acceptors and then improves the hole concentration and Ohmic contact. In addition, the electrical and optical properties of LEDs with and without In-doping were studied as the following:

1. The In-doped p-GaN showed a better I-V characteristic than the sample without doing. The Ohmic contact resistance was $4.35 \times 10^3 \Omega$ for In-doped sample, which was lower than that, $7.09 \times 10^3 \Omega$, for the sample without doping.

2. The content of the elements on p-GaN surface was measured by X-ray photon spectrometer (XPS) and the mechanism of the improvement of Ohmic contact was discussed. It was indicated that the diffusion of In atoms was beneficial to improve hole concentration of p-GaN.

3. The optical property of InGaN/GaN MQWs was measured by low-temperature photoluminescence (PL). We tentatively propose a model of lattice expansion for the In-doped p-GaN and the lattice beneath of InGaN/GaN MQWs.

4. We changed the process conditions of ICP process to etch GaN material. The

etching thicknesses were measured by step measuring instrument and the morphology of GaN surface was measured by AFM measurement. Finally, the relationship among etching rate under different conditons, surface morphology and parameters was analyzed.

5. GaN-based blue LED devices were made and the I-V, P-I characteristics of In-doping LED and as-grown LED were measured and compared.

Keywords: p-GaN; ICP; LED; Omic contact

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要.....	I
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 基材料 p 型欧姆接触存在的问题.....	5
1.4 本论文的研究内容和结构安排.....	8
参考文献:	9
第二章 实验方法及原理	13
2.1 MOCVD 材料生长技术.....	13
2.2 感应耦合等离子体刻蚀技术.....	15
2.3 材料的表面表征方法.....	18
2.3.1 X 射线光电子谱.....	18
2.3.2 原子力显微镜.....	19
参考文献:	26
第三章 利用 ICP 进行 In 掺杂对 GaN 基 LED 材料性能的影响	27
3.1 ICP 轰击进行 In 掺杂实验过程.....	27
3.2 In 的浓度分布及掺杂的机制分析.....	29
3.3 In 掺杂对 p 型欧姆接触的影响.....	32
3.4 In 掺杂对 InGaN 量子阱光学性能的影响.....	35
3.5 本章小结.....	38
参考文献:	39
第四章 基于 ICP In 掺杂技术的 GaN 基 LED 器件的研制与分析	42
4.1 ICP 刻蚀实验与分析.....	42
4.1.1 实验步骤.....	42
4.1.2 刻蚀条件对 GaN 材料刻蚀速率的影响.....	43
4.1.3 刻蚀样品表面形貌与各工艺参数的关系.....	47
4.2 GaN 基 LED 器件的制备.....	52

4.2.1 外延片的处理.....	52
4.2.2 芯片的制备.....	53
4.3 结果测试与分析	56
4.3.1 I-V 特性.....	56
4.3.2 L-I 特性.....	58
4.4 本章小结	59
参考文献:	60
第五章 结论与展望	62
在学期间发表的论文.....	64
致谢.....	64

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	2
1.3 The problems of GaN-based p-type Ohmic contact	5
1.4 The structure frame of this thesis	8
References	9
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 Inductively Coupled Plasma	错误! 未定义书签。
2.3 Methods of characterization	错误! 未定义书签。
2.3.1 X-ray photoelectron spectroscopy	18
2.3.2 Atomic Force Microscope	19
References	错误! 未定义书签。
Chapter 3 Effect of ICP-induced In doping on the properties of GaN-based LED materials	错误! 未定义书签。
3.1 Experimental process of ICP-induced In doping	错误! 未定义书签。
3.2 In distribution and analysis of doping mechanism	29
3.3 Influence of In doping on the p-type ohmic contact	错误! 未定义书签。
3.4 Influence of In doping on the optical properties of InGaN/GaN MQWs	错误! 未定义书签。
3.5 Summary	错误! 未定义书签。
References	39
Chapter 4 Fabrication of GaN-based LEDs based on ICP-induced In doping	错误! 未定义书签。
4.1 Analysis of ICP etching experiments	错误! 未定义书签。
4.1.1 Experiental procedure	错误! 未定义书签。
4.1.2 Effect of etching conditions on etching rate of GaN materials.....	错误! 未定义书签。
4.1.3 Relationship between etching conditons and surface morphology.....	56
4.2 Fabrication of GaN-based LEDs	52

4.2.1 Process of the LED epitaxial wafer	52
4.2.2 Fabrication of the LED chip.....	53
4.3 Results and analysis	56
4.3.1 I-V characteristics	57
4.3.2 L-I characteristics.....	57
4.4 Summary.....	58
References.....	60
Chapter 5 Conclusions and prospects	62
Publications during master degree study.....	64
Acknowledgement.....	65

厦门大学博硕士论文摘要库

第一章 绪论

1.1 GaN 基材料的结构与性质

在半导体材料的发展进程中, 第一代半导体材料主要有四族的 Ge、Si; 第二代半导体材料主要有 GaAs、InP、InAs、GaP 及其合金; 到了 20 世纪 90 年代, 第三代半导体材料 GaN、SiC 等宽带隙半导体材料成为重点研究材料。由于第三代半导体材料具备介电常数小、化学稳定性好、禁带宽度大、电子迁移率高一级抗辐射能量强等良好的物理性质和化学性质, 这些是第一代、第二代半导体材料所不具备的, 因此成为了发光器件和光伏器件制作的理想材料^[1-2]。

在 GaN 材料成为研究热点之前的很长时间内, ZnSe 和 SiC 则是宽带隙材料研究开发的重点, 并且在 GaN 蓝光发光二极管实现商业化之前, SiC 蓝光 LED 成为了唯一商业化的蓝光 LED 产品。虽然 SiC 材料具备很多优点, 包括抗辐射、高温稳定性好、耐化学腐蚀等, 但是由于其是间接带隙材料, 制备而成的蓝光 LED 发光亮度较低, 无法满足高亮度照明领域需求。此外, ZnSe 基材料由于实现了蓝光激光器的激射而成为了重点材料, 且其带隙覆盖了从绿光至蓝光波长范围, 但由于其发光器件的寿命较短, 约为几个小时, 因此无法实现蓝光 ZnSe 激光器的商业化^[3-4]。

在元素周期表中, IIIA 族 Al、Ga、In 元素与 V 族 N 元素组合而成的半导体化合物 (GaN、InN、AlN) 以及由它们共同组成的多元合金材料 ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 、 $\text{AlIn}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ 等) 共同组成了 III 族氮化物半导体材料。III 族的氮化物半导体材料主要有以下三种不同结构, 包括纤芯矿结构、闪锌矿结构和岩盐矿结构。上述三种结构中, 纤芯矿结构属于稳定相, 它的空间群为 $P63\text{mc}$, 属于六角晶系, 该结构下的 III 族氮化物半导体材料都属于直接带隙材料, 且随着合金组分的逐渐改变, 其禁带宽度从 0.7 eV 至 6.2 eV^[5-7]连续可调, 如图 1-1 所示, 正因为其禁带宽度连续可调, 所以其发光波长覆盖了从可见光至深紫外的整个光谱范围。此外, 闪锌矿结构属于亚稳相, 空间群为 $F43\text{m}$, 属于立方晶系。一般情况下, 单晶 GaN 只呈现出纤芯矿和闪锌矿两种结构, 只有在极端高压的条件下才会出现第三种结构, 即岩盐矿结构^[8-9]。三种结构如图 1-2 所示。

研究显示, GaN 是 III 族氮化物材料中研究最广泛的半导体材料。由于 GaN 材料具有介电常数小、热稳定性好、禁带宽度大、热导率高和化学性质稳定等一

系列优点，使得 GaN 材料在发光二极管（LED）、激光器以及太阳能电池等发光、照明领域具备广阔的应用前景。

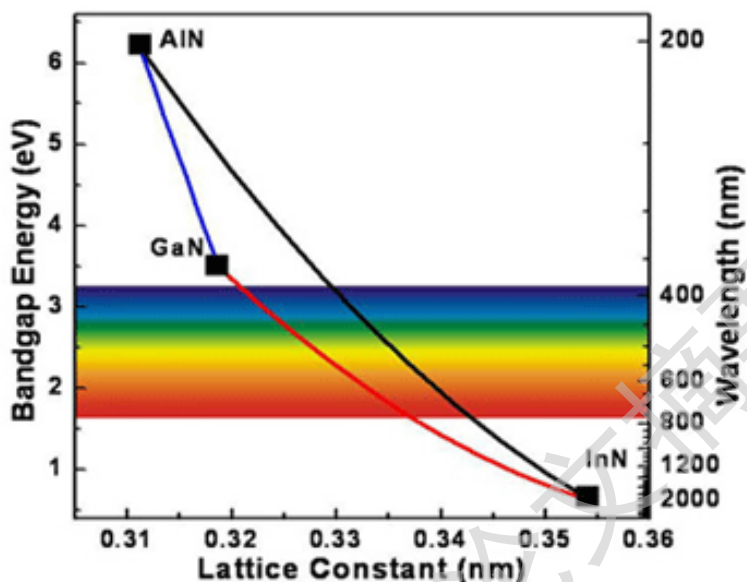


图 1-1 GaN、InN 和 AlN 化合物的带隙和晶格常数之间的关系

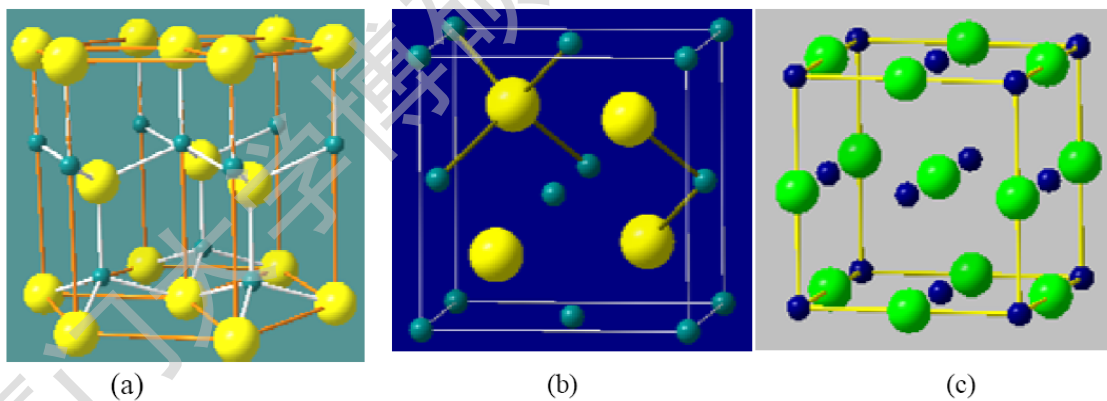


图 1-2 GaN 材料三种基本结构：(1)纤锌矿结构 (2) 闪锌矿结构 (3)岩盐矿结构

GaN 半导体材料的电学特性可以用来表征该材料质量的好坏，因此对于制备 GaN 基光电子器件具有重要影响。金属有机化学气相沉积技术的不断改善，使得 GaN 半导体材料的质量不断提高。在 Binari^[10]等人的报道中，GaN 材料室温迁移率达到 $900 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。此外，GaN 材料的击穿电压高达 $3 \times 10^6 \text{ V/cm}^{[11]}$ 。生长在蓝宝石衬底上的非故意掺杂 GaN 材料的 n 型本底载流子浓度都较高，现在质量较好的 GaN 材料的本底 n 型载流子浓度可降到 $10^{16} / \text{cm}^3$ 左右^[12]。

1.2 GaN 基 LED 的发展现状

早在 1971 年，来自美国普林斯顿大学的 Pankove 教授等人研制出了当时世界上第一个 GaN 基蓝光 LED，但是由于当时 GaN p 型掺杂问题无法得到解决而采用 MIS 结构，导致器件的发光效率较低，只有 0.03%~0.1%^[13]。1983 年，Yoshida 等人将一层 AlN 淀积在蓝宝石衬底上作为缓冲层，使得 GaN 的表面结构以及晶体质量得到了明显的提高；20 世纪八十年代末，来自日本名古屋大学的 Hiroshi Amano 教授等人利用低能电子束辐射法对掺 Mg GaN 材料进行处理，大大降低了 GaN 电阻率，从 $10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ 降到 $35 \Omega \cdot \text{cm}$ ，而空穴浓度提高到 $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ，由此制备出了当时世界上第一个 GaN 基 p-n 结 LED，发光效率也得到了明显提高^[14]。图 1-3 为第一个 p-n 结 LED 结构。

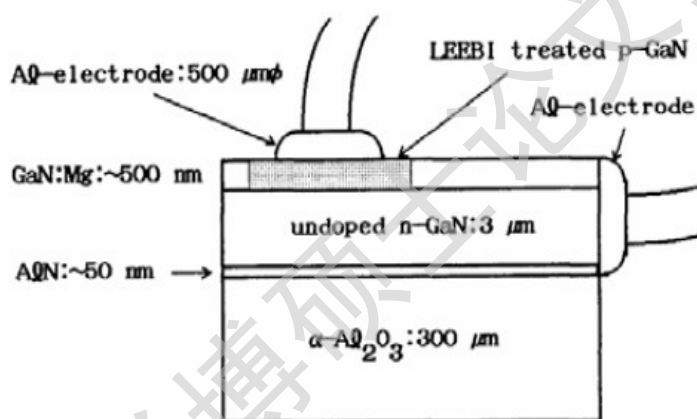


图 1-3 GaN 基 p-n 结 LED 结构

此后，GaN 基 LED 得到了快速发展。来自日本日亚化学公司的 Nakamura 等人在 1991 年成功地研制出了当时世界上第一个掺 Mg 同质结 GaN 基蓝光 LED^[15]，并在 1992 年末成功研制出了世界上第一只 p-GaN/n-InGaN/n-GaN 双异质结蓝光 LED。此后，在全世界范围内引发了氮化物研究热潮。1993 年，Nakamura 等人研制出了高亮度 InGaN/AlGaIn 双质结蓝光 LED^[16]，如图 1-4 所示。该 LED 采用了 Zn 掺杂的 InGaIn 作为有源层，其中峰值波长为 450 nm，光谱半高宽为 70 nm，外量子效率达到了 5.4%，在输入电流为 20 mA 情况下工作电压仅为 3.6 V，光输出功率达到了 1.5 mW，发光亮度大于 1 cd。仅仅过了一年，该小组研发出的蓝光 LED 光输出功率已达到 3 mW，发光强度也大幅提高，是当时世界上性能指标都领先的蓝光 LED 产品。

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts 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.