

学校编码: 10384
学号: 23120141153131

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

可见光通信用 GaN 基发光二极管研究
Study on GaN-Based Light-Emitting Diodes for Visible Light
Communications

于欢

指导教师姓名: 张保平
专 业 名 称: 电子与通信工程
论文提交日期: 2017 年 4 月
论文答辩时间: 2017 年 5 月
学位授予日期: 2017 年 月

答辩委员会主席: _____
评 阅 人: _____

2017 年 4 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(张保平)课题(组)的研究成果,获得(张保平)课题(组)经费或实验室的资助,在(微纳光电子)实验室完成。

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。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

得益于 GaN 基 LED 的重大突破, 可见光通信逐渐发展并拥有广阔的应用前景, 成为当下的研究热点。由于 GaN 是宽禁带的直接带隙半导体材料, GaN 基 LED 具有很高的发光效率, 并且已经在照明和显示方面有着广泛的应用基础。另一方面, 作为可见光通信系统中的蓝绿光光源, GaN 基 LED 不仅可以极大地降低系统成本, 还可以大幅度提高可见光通信系统的实用价值。LED 的调制带宽是影响可见光通信系统传输速率的关键因素之一, 然而, 对于 GaN 基 LED 的调制带宽的研究仍然不够完善和深入。本论文旨在探究影响 LED 调制特性的因素, 特别是我们制作了不同尺寸的 LED 混合阵列, 研究了不同尺寸对 LED 的调制带宽、电学特性等的影响。主要研究工作与成果如下:

1. 设计了一套实验流程来制备不同尺寸的 LED 混合阵列。每个单元内包含 12 个尺寸的 LED 器件, 包含直径分别为 $30\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 、 $70\mu\text{m}$ 、 $80\mu\text{m}$ 、 $90\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 的微尺寸器件和直径分别为 $150\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ 、 $250\mu\text{m}$ 、 $300\mu\text{m}$ 的大尺寸器件, 每个单元内所有器件共用 n 型电极且外置每个器件的 p 型电极。

2. 搭建了一套 LED 调制带宽测试系统, 可快速测量系统的频率响应曲线, 得到-3dB 带宽值。该系统支持最大测试带宽为 1.2GHz, 波长范围为 200-1100nm 的测试。测试系统采用网络分析仪来记录频率响应曲线。

3. 研究了不同尺寸对器件电流-电压特性、功率-电流特性和电致发光特性的影响。随着器件尺寸的增加, 串联电阻逐渐减小, 开启电压逐渐减小, 最大光功率逐渐增加, 表明器件尺寸对于 LED 的性能有直接影响。随着电流的增加, 同一器件的发光峰出现蓝移, 但在相同的电流密度下, 不同尺寸器件的发光峰是几近相同的, 表明发光区内建电场的屏蔽效应依赖于注入的载流子密度。

4. 通过对不同尺寸和电流条件下各器件调制带宽的测试, 研究了影响器件调制带宽的因素。其中, 直径 $30\mu\text{m}$ 的器件在 110mA 下调制带宽可达 165MHz 左右。对于同一个器件, 随着电流的增加, 电流密度增加, 载流子复合寿命减小, 调制带宽逐渐增加。对于不同尺寸的 micro-LED 器件, 相同电流密度下的调制带宽是相近的, 结果表明载流子复合寿命是影响调制带宽的主要因素。

关键词: GaN; LED; 调制带宽

Abstract

With the breakthrough in GaN-based light-emitting diodes (LEDs), visible light communication (VLC) develops rapidly and shows high potential for applications. In recent years, it has attracted much attention for further research. Because of large and direct band-gap of GaN materials, GaN-based LEDs with high efficiency have been widely used in illumination and display applications. On the other hand, GaN-based LEDs as blue or green sources in VLC system can not only lower the cost but also increase the practical value of VLC system. The modulation bandwidth of LED is a key factor that affects transmission of VLC system. However, the research on the modulation mechanism of GaN-based LED is still not detailed. To solve this issue, in this study we fabricated the hybrid array of LEDs with different sizes and investigated the influence of device size on the characteristics of LEDs, including the modulation bandwidth and electrical properties. Here are the main results listed as follows:

1. We design the experimental details and fabricate the hybrid array of LEDs with different sizes. Each unit contains twelve different devices, including eight micro devices with the diameters from $30\mu\text{m}$ to $100\mu\text{m}$ increased by $10\mu\text{m}$ and four large devices with the diameters from $150\mu\text{m}$ to $300\mu\text{m}$ increased by $50\mu\text{m}$. For each unit, p-pads are individual while n-pad is common to all pixels.

2. We set up a system for LED modulation bandwidth measurement, which can measure frequency response curves of LED and obtain the -3dB bandwidth. Maximum bandwidth of the system is 1.2GHz, supporting light spectrum ranged from 200nm to 1100nm. The frequency response is recorded by a network analyzer.

3. We measure the characteristics of the devices with different sizes, including the current-voltage (I-V), output power-current (P-I) and electroluminescence (E-L) properties. With the device size increasing, series resistor and threshold voltage at 20mA gradually decreases, while the maximum light output power increases. It indicates that device size has an impact on the performance of LED. The emission peak of the device exhibits blue shift with the current increasing. However, the devices with different sizes but the same current density have almost the same

emission peak, which indicates that shielding effect of the built-in electric field in the light-emitting area depends on the injected carrier density.

4. We investigate the influence of device size and inject current on the characteristics of modulation bandwidth, based on the measurements in different conditions. Among them, the device with the diameter of $30\mu\text{m}$ exhibits a large -3dB bandwidth of $\sim 165\text{MHz}$ with the inject current of 110mA . Measurement results show that modulation bandwidth gradually improves along with the current increasing, due to the decrease of carrier recombination lifetime. On the other hand, for the micro-LEDs with different sizes but the same current density, the modulation bandwidths are similar. These results show that the current density (carrier recombination lifetime) plays a key role in the bandwidth modulation.

Keywords: GaN; LED; modulation bandwidth

目 录

第一章 绪论	1
1.1 GaN 基 LED 的研究	1
1.1.1 GaN 材料的基本结构及特性.....	1
1.1.2 GaN 基 LED 的研究进展.....	3
1.2 光通信技术	6
1.2.1 无线光通信.....	6
1.2.2 可见光通信的发展及其面临的问题.....	6
1.3 本论文的构成	10
第二章 可见光通信 LED 的制备技术及调制特性	11
2.1 GaN 基材料生长制备的关键技术及实验方法	11
2.1.1 MOCVD 外延生长技术.....	11
2.1.2 感应耦合等离子体刻蚀技术.....	13
2.1.3 光刻.....	15
2.1.4 压焊.....	16
2.1.5 电致发光.....	17
2.2 LED 的调制特性理论	18
2.3 提高 LED 调制速度的设计方案	22
2.4 本章小结	24
第三章 可见光通信 LED 的器件制备及调制带宽的测试	25
3.1 实验方案的设计	25
3.2 工艺制作过程	27
3.3 调试带宽测试系统的搭建	34
3.3.1 LED 调制特性测试原理.....	34
3.3.2 压焊制版.....	35
3.3.3 初期测试系统.....	37
3.3.4 测试系统的改进.....	38
3.4 本章小结	41

第四章 台面尺寸对 LED 光学特性的影响	42
4.1 不同台面尺寸下的 I-V 特性比较.....	42
4.2 不同台面尺寸下的 E-L 特性比较.....	44
4.3 不同台面尺寸下的 P-I 特性比较.....	50
4.4 本章小结	54
第五章 台面尺寸对 LED 调制特性的影响	55
5.1 不同台面下的带宽测试结果	56
5.2 电流对调制带宽的影响分析	62
5.3 台面尺寸对调制带宽的影响分析	63
5.4 本章小结	64
第六章 总结与展望	65
参考文献	67
致谢	6571

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research on GaN-based LEDs	1
1.1.1 The basic characteristic of GaN materials	1
1.1.2 The research progress of GaN-based LEDs	3
1.2 Optical communication technology	6
1.2.1 Wireless light communication.....	6
1.2.2 The development and difficulty of visible light communication.....	6
1.3 The structure frame of this thesis	10
Chapter 2 The fabrication technology and modulation characteristics of visible light communication	11
2.1 The key fabrication technology of GaN-based materials	11
2.1.1 MOCVD technique.....	11
2.1.2 ICP	13
2.1.3 Lithography.....	15
2.1.4 Bonding.....	16
2.1.5 Electroluminescence	17
2.2 Theory of LED modulation characteristics	18
2.3 Scheme of increasing the modulation bandwidth of LED	22
2.4 Summary of this chapter	24
Chapter 3 The fabrication and measurements of the LEDs for VLC application	25
3.1 Design of the experimental scheme	25
3.2 Process of device fabrication	27
3.3 Construction of the modulation test system	34
3.3.1 Principle of LED modulation characteristics test.....	34
3.3.2 Bonding process.....	35

3.3.3 Initial measurement system	37
3.3.4 Imporved measurement system.....	38
3.4 Summary of this chapter	41
Chapter 4 Size effects on the optical properties	42
4.1 I-V charcteristics with different sizes	42
4.2 E-L charcteristics with different sizes	44
4.3 P-I charcteristics with different sizes	50
4.4 Summary of this chapter	54
Chapter 5 Size effects on modulation characteristics	55
5.1 Bandwidth results with different sizes	56
5.2 Influence of the current on modulation bandwidth	62
5.3 Influence of device size on modulation bandwidth	63
5.4 Summary of this chapter	64
Chapter 6 Conclusions and prospects	65
References	67
Acknowledgement	71

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 GaN 基 LED 的研究

1.1.1 GaN 材料的基本结构及特性

元素周期表中, III 族铟(In)、镓(Ga)、铝(Al)与 V 族中氮(N)元素结合组成的化合物(GaN、InN、AlN)和它们混合组成的多元合金化合物半导体($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 、 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$)统称为 III 族氮化物半导体。III 族氮化物半导体材料主要依靠共价键结合,但由于不同材料的组分不同,电负性差异较大,导致化合键中会具有明显的离子型。III 族氮化物半导体材料具有以下三种结构^[1-3]: 闪锌矿、纤锌矿以及岩盐矿,如图 1-1 所示。其中,具有六方对称特性的纤锌矿结构是属于热力学稳定相;立方闪锌矿属于亚稳相结构,这两种结构在自然界中比较常见。岩盐矿结构只会在 50GPa 的高压条件下才会由纤锌矿结构转化而来。GaN 材料的纤锌矿结构属于六方相结构,由分别组成六方排列的两类原子形成双原子层堆积而成。上下两个面中的原子位于六方结构的顶角和面心的位置,中间再插入一层原子,此层原子中的每个原子都排列在中每三个原子之间的空档处。

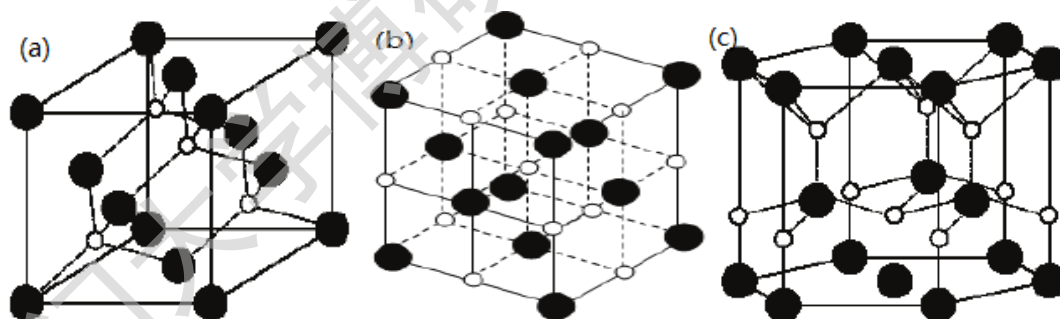


图 1-1 氮化物三种晶体结构 (a) 闪锌矿 (b) 岩盐矿 (c) 纤锌矿

半导体材料有三个主要的表征特性: 能带特性、电学特性和极化特性。从能带特性来看, 半导体材料中, 电子填满的能带被称为满带, 处于最上面的满带被称为价带。价带上层会有很多未被电子占据的空带, 处于最低层的空带被称为导带。价带与导带之间则称为禁带或带隙, 用 E_g 来表示禁带宽度, 表征导带底与价带顶这之间间隔的能量间隙。带隙可以随温度变化, 可以用一个普适函数近似地表示为:

$$E_g(T) \approx E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T+\beta} \quad (1.1)$$

上式中 $E_g(0)$ 是温度在 0 K 时的禁带宽度， α 、 β 代表材料的温度系数。室温条件下，会由于热激发使一些电子从价带跃迁到导带，从而在导带中出现少量电子，价带中产生少量空穴，即本征激发。半导体材料可以根据价带顶和导带底在 k 空间中的位置分为直接带隙半导体材料和间接带隙半导体材料。直接带隙半导体即导带顶和价带底在 k 空间的同一位置，在电子跃迁的过程中只需要吸收能量；间接带隙半导体材料即二者在 k 空间的不同位置，电子跃迁时，吸收能量的同时还要改变动量。所以直接带隙半导体材料相比于间接带隙半导体材料会拥有更高的复合速率，更适宜作为发光器件的材料。纤锌矿结构的 AlN、GaN、InN 化合物及合金皆属于直接带隙半导体材料。它们的合金材料 $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ 的禁带宽度可以通过组分的变化实现从 InN 的 0.7eV 连续变化到 GaN 的 3.4eV，再到 AlN 材料的 6.2eV^[4, 5]，如图 1-2 所示，覆盖的波长范围包括紫外到可见光到红外，是非常适合做发光器件的光电转换材料。

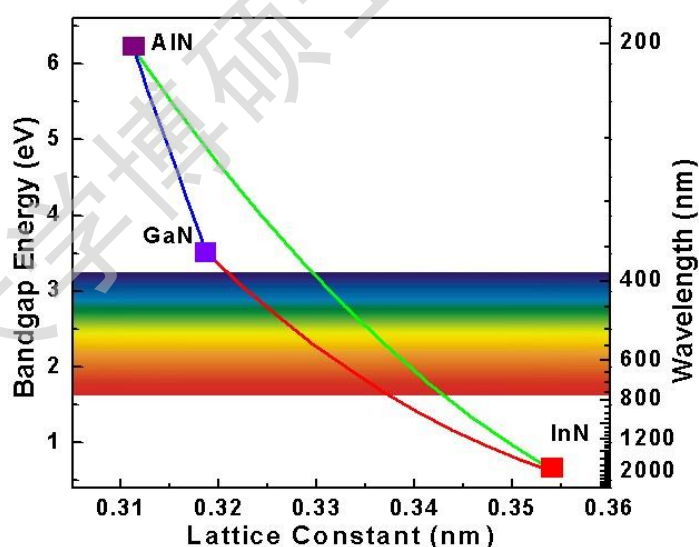


图 1-2 AlN、GaN、InN 的带隙和晶格常数的关系

在电学特性方面，GaN 材料作为第三代半导体材料具有巨大的优势：（1）与碳化硅材料一样属于宽禁带半导体材料，带隙宽度却是硅的三倍；（2）击穿电场强度高达 $3.3 \times 10^6 V/cm$ ，约是硅的 11 倍；（3）电子饱和迁移率在 $2.5 \times 10^7 cm/s$ 左右，几乎是硅的 2.5 倍^[6-8]。和硅相比，除了相近的热传导系数，其他的半导体

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.

厦门大学博硕士论文摘要库