

学校编码: 10384

分类号____密级____

学号: 19820090153675

UDC____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

功率型 LED 的性能及检测技术研究

Study on the Characteristics and Measuring Techniques of
High-Power Light-Emitting Diodes

林 岳

指导教师姓名: 陈 忠 教授

吕毅军 副教授

专业名称: 无 线 电 物 理

论文提交日期: 2012 年 10 月

论文答辩时间: 2012 年 12 月

学位授予日期: 2012 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2012 年 12 月

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

目 录

摘要	I
第一章 绪论	1
1.1 LED 的历史和现状	1
1.2 大功率 LED 概述	3
1.2.1 p-n 结发光原理	3
1.2.2 LED 结构	4
1.3 LED 检测方法概述	6
1.3.1 光度学、色度学检测技术	6
1.3.2 热学检测技术	7
1.4 芯片量子效率问题	8
1.5 选题依据及主要工作	13
第二章 LED 相关色温计算方法的优化	20
2.1 引言	20
2.2 色度学基础	20
2.2.1 CIE1931XYZ 标准色度系统	21
2.2.2 麦克亚当椭圆	23
2.2.3 1960 UCS 色度空间	24
2.2.4 色温与相关色温	25
2.3 色温 (相关色温) 经典算法	26
2.3.1 直接内插法	26
2.3.2 逐点法	27
2.3.3 曲线拟合法	28
2.4 两种优化色温新算法	29
2.4.1 二分法优化色温算法	29
2.4.2 等间隔法计算 (相关) 色温	31
2.5 二分法, 等间隔法与传统方法的比较	33
2.5.1 黑体辐射理论光谱测量	34
2.5.2 LED 光谱测试	34
2.6 小结	35
第三章 LED 热阻测试方法优化	39
3.1 引言	39
3.2 LED 热阻电学测试法	40
3.2.1 结温-电压关系	40
3.2.2 LED 热阻稳态测试法	41
3.2.3 LED 热阻瞬态测试法	43
3.2.3 基于时间常数谱的热阻测试新方法	44
3.3 基本原理	45
3.4 实验过程	48
3.5 误差理论分析及讨论	50
3.5.1 误差理论分析	50

3.5.2 热阻和温度的关系.....	52
3.6 小结和展望.....	52
第四章 InGaN LED 光谱结温测试法.....	56
4.1 引言.....	56
4.2 温度非接触测试法.....	57
4.2.1 红外光谱法.....	57
4.2.2 拉曼光谱法.....	58
4.2.3 光谱高能带法.....	59
4.3 电流与温度对载流子分布和能带的影响.....	59
4.3.1 能带间隙与温度的关系.....	59
4.3.2 能带填充效应.....	60
4.3.3 量子限制斯塔克效应.....	61
4.4 光谱与电流和结温模型.....	61
4.4.1 模型的概念.....	61
4.4.2 实验过程.....	63
4.4.3 数据分析以及模型构建.....	64
4.4.4 误差分析.....	66
4.5 小结.....	66
第五章 InGaN 蓝光 LED 效率 Droop 效应的空间分辨研究.....	70
5.1 引言.....	70
5.2 实验过程.....	72
5.3 结果与讨论.....	73
5.3.1 电致发光谱和光致发光谱扫描.....	73
5.3.2 空间分辨的外量子效率 Droop 特性研究.....	79
5.4 小结.....	84
第六章 总结和展望.....	90
6.1 总结.....	90
6.2 展望.....	94
攻读博士学位期间研究成果.....	97
致谢辞.....	99

CONTENTS

Abstract.....	IV
Chapter 1 Introductions.....	1
1.1 Histroy and Status of LEDs.....	1
1.2 Introductions on HP-LEDs.....	3
1.2.1 The machanism of p-n Junction Emission	3
1.2.2 Structures of LEDs.....	4
1.3 Introduction on LED Measuring Methodology.....	6
1.3.1 The Measuring Technology of Photometry and Chromaticity	6
1.3.2 The Measuring Technology of Thermodynamics.....	7
1.4 The External Quantum Efficiency Issues of Chips	8
1.5 Topic Basis and Main Works.....	13
Chapter 2 Optimizations on Correlated Color Temperature Algorithm	20
2.1 Introductions	20
2.2 Basis of Chromaticity.....	20
2.2.1 CIE1931XYZ Standard Chromaticity System	20
2.2.2 MacAdam Ellipse.....	23
2.2.3 1960 UCS Color Space	24
2.2.4 Color Temperature and Correlated Color Temperature	25
2.3 Classical Algorithms of Correlated Color Temperature	26
2.3.1 Direct Interpolation.....	27
2.3.2 Point-by-Point	28
2.3.3 Curve-Fitting.....	29
2.4 Two Optimized CCT Algorithms	29
2.4.1 Dichotomy Optimized Algorithm.....	29
2.4.2 Equal-Interval Algorithm	31
2.5 Comparison among Dichotomy, Equal-Interval and Classical Ones	33
2.5.1 Measurement of Theoretical Black-body Spectra	34
2.5.2 Measurement of LEDs Spectra	34
2.6 Conclusions.....	35
Chapter 3 Optimizations on Thermal Resistance of LED Packages	39
3.1 Introductions	39
3.2 Electrical test Method of Thermal Resistance.....	40
3.2.1 T_j - V_f Relationship.....	40
3.2.2 The Static Method	41
3.2.3 The Transient Method	42
3.2.3 A New Method based on Time Constants Spectra	44
3.3 Principle	45
3.4 Experiments	48
3.5 Analysis on Errors and Discussions	50
3.5.1 Theoretical Analysis on Errors.....	50

3.5.2 R_{th} - T Relationship	52
3.6 Conclusions and Expectations.....	52
Chapter 4 Spectrum-based Junction Temperature Measurement of InGaN LEDs.....	56
4.1 Introductions	56
4.2 Classical non-Contact Method of T_j Measurement	57
4.2.1 Infrared Spectroscopy	57
4.2.2 Raman Spectroscopy.....	58
4.2.3 High-Energy wing on Spectra	59
4.3 The I_f and T dependence of Carriers distribution and Energy band	59
4.3.1 The Temperature dependence of Band-gap	59
4.3.2 Band-Filling Effect.....	60
4.3.3 Quantum Confinement Stark Effect.....	60
4.4 The model on the relationship among spectra, I_f and T_j	61
4.4.1 Principle.....	61
4.4.2 Experiment	63
4.4.3 Data Analysis and Modle build-up.....	64
4.4.4 Error Analysis	66
4.5 Conclusions.....	66
Chapter 5 Spatially Resolved Study of Quantum Efficiency Droop in InGaN LEDs.....	70
5.1 Introductions	70
5.2 Experiments	72
5.3 Results and Discussions	73
5.3.1 Electroluminescence and Photoluminescence Mapping	73
5.3.2 Spatially Resolved EQE Droop.....	80
5.4 Conclusions.....	84
Chapter 6 Conclusions and Expectations.....	90
6.1 Conclusions.....	90
6.2 Prospects	94
List of Publications	97
Acknowledgements.....	99

作者姓名：林岳

论文题目：功率型 LED 的性能及检测技术研究

作者简介：林岳，男，1985 年 6 月出生，2007 年 8 月师从于厦门大学陈忠教授，于 年 月获博士学位。

摘 要

随着半导体照明技术的发展，LED 在许多方面面临着技术的瓶颈，例如材料、工艺以及色度学、热学检测技术都亟需改进和提高。另外，如何在大电流下维持外量子效率也是一个重要的课题。本文针对以上几个方面，分别在色温检测、热阻与结温检测等技术上提出了一些改进的方法，并且对提高大电流下外量子效率进行了深入地研究。主要的工作以及创新点有以下几个方面：

1. LED 相关色温计算方法的优化。相关色温是 LED 光源的重要参量。从原始光谱数据到色品坐标(u, v) 再到色温和相关色温的计算过程相当复杂，需要一种优化算法来简化计算量。本文基于色温的色度学定义，简要分析了直接内插法、逐点法和函数曲线拟合法三种色温计算的经典算法，并分别指出了它们的优缺点，在它们基础上提出了二分法和等间隔法这两种新的色温优化算法。详细介绍了这两种方法的基本思想、程序流程等。利用软件编程实现这几种算法，通过普朗克黑体辐射公式计算得到一系列色温的理论光谱和白光 LED 测试光谱，对比二分法，等间隔法和各种经典算法的速度和结果，证明了二分法较等间隔法优越，是一种适合于计算机程序化实现的高精度高速度的色温算法。
2. LED 热阻测试方法优化。大功率 LED 在亮度提高的同时也带来了巨大的发热。热阻是衡量 LED 封装结构散热性能的重要参数。因此如何能精确且便捷的测定 LED 封装结构热阻是一个重要的课题。结构中每一层的热阻值累加后的得到总热阻值。本文提出了一种测算 LED 封装结构分层热阻的新方法。这种方法基于瞬态电学测试法和时间常数谱理论。通过大量实验，发现结温瞬态曲线的一阶导函数和时间常数谱的内在联系：即前者是后者被一个

加权函数模糊后的结果。基于实验观测结果，本文通过计算结温瞬态曲线的一阶导数上的极小点，可以得到结温瞬态曲线上的拐点。并利用这些拐点判断出分层结构每一层的热阻值。由于这种方法只需要一个自然散热热沉，因此可以很便捷迅速的得出结果。理论计算和实验结果都证明了这是一种能在 LED 工作环境中检测 LED 热阻的好方法。

3. InGaN LED 光谱结温测试法。所有针对 LED 封装结构散热通道的热仿真与设计的目的就是在 LED 工作时能尽量降低结温。然而如何在 LED 正常工作时准确测定结温是比较困难的。本文通过分析 InGaN 蓝光 LED 的光谱随着结温和驱动电流变化的关系，给出了一种基于光谱温度敏感系数的 LED 结温实时检测技术。首先研究了“质心波长”与半高宽随着结温和正向电流的变化关系。通过实验手段分别测试这两个温度敏感系数对结温和电流的变化关系，用简单的数学函数拟合出经验公式，在此基础上分别建立温度敏感系数与正向电流和结温的二维数学函数模型。利用这个模型，只要在 LED 正常工作时测定光谱和正向电流，就可以代入求解出实时的结温数据，实现了结温的非接触性实时监控。通过实验分析可知，作为光谱温度敏感系数，半高宽比质心波长具有更高的精确度。
4. InGaN 蓝光 LED 效率 Droop 效应的空间分辨研究。外量子效率 Droop 问题已经研究了十几年，以往的文献中报告在不同的 LED 样品中存在两种不同的 Droop 特性。一种具有很高的外量子效率峰值电流，并且在电流超过该峰值后外量子效率下降的比较慢；另外一种具有较小的外量子效率峰值电流，并且当电流超过该峰值后外量子效率迅速下降。通常这两种 Droop 都是在独立的样品中观测到的，是芯片发光整体平均的结果。本文通过考察空间分辨的 Droop 特性，结合显微光致发光谱，在同一样品中研究了这两种不同的 Droop 形式。从而摒除了一些样品间不确定因素，得到了引起 Droop 的机制。考察了两种分别基于自支撑 GaN 衬底和蓝宝石衬底的样品，它们具有不同数量级位错密度，并在前者中发现在不同位置具有截然不同的 Droop 特性和光致发光谱与电致发光谱特性。综合各种实验结果，可以认为：微缺陷与扩展缺陷对载流子的俘获是导致了 Droop 的发生的主要原因。同时组分与量子阱宽度的浮动可导致一些有源区中的能带陷阱，使得其中形成载流子局域化

效应。它们能在中等激发密度下防止载流子被缺陷能级俘获,暂时缓解 Droop 效应的发生,却无法避免而在大电流下,载流子去局域化效应发生后的 Droop。第一种 Droop 形式发生在有源区相对均匀,无能带陷阱的区域,而第二种则发生在有源区存在能带陷阱的区域。可以认为,只有切实减小微缺陷与扩展缺陷的密度,才能从根本上减轻和消除 Droop 效应的发生。而单一的关注如何提高 Droop 发生时的电流大小也许是没有意义的。

关键词: 大功率 LED; 色温(相关色温); 热阻; 结温; 外量子效率 Droop

厦门大学博硕士学位论文摘要

Study on the Characteristics and Measuring Techniques of High-Power Light-Emitting Diodes

Yue Lin

Abstract

As the development of solid-state lighting, high-power Light-emitting diodes (HP LED) face with technique bottleneck in various aspects. For instance, the techniques for measurement of parameters of chromaticity and thermodynamics need to be improved. Besides, it becomes a critical issue that maintaining the external quantum efficiency (EQE) under high injection levels. In this dissertation, we give some optimized solutions for the algorithms or measuring methodologies of color temperature (or correlated color temperature), thermal resistance and junction temperature respectively. In addition, we study the mechanism of the EQE droop in InGaN blue LEDs in detail, and give a suggestion on mitigating it. This article contents the following parts:

a) Optimizations on Correlated color temperature (CCT) algorithm. CCT are important parameters of the LED light sources. The procedure for calculating colorimetric parameters, such as color coordinates (u , v) and CCT from spectra data, is rather complicated. An advanced algorithm is necessary to simplify the computation. Based on the definition of chromaticity, the advantages and disadvantages of three classical CCT algorithms are analyzed, respectively, and a new dichotomy optimization algorithm as well as an equal-interval one, is proposed, whose principle and procedure are illustrated in detail. By comparing the results of dichotomy with the other classical algorithms by Planck formula and actual white LEDs spectra, it is proved that the dichotomy, better than the equal-interval, is a CCT algorithm with higher accuracy and faster speed.

b) Optimizations on thermal resistance of LED packages. The appearance of

high-power LEDs lead to surge in luminous intensity, as well as great heat dissipation, which is quantified by thermal resistance. The total thermal resistance of a LED package is the sum of that of every single layer. It becomes a critical issue that measuring the thermal resistance of LED packages accurately and conveniently. A new evaluation method for thermal resistance of LED packages is proposed. The method is based on the electrical test method and the time constant theory. We realized an intrinsic connection between the 1st order derivative curve and time constant spectrum through out lot of experiments, that is, the former is the latter blurred by a core function. The thermal resistance of every single layer on the heat dissipation path is obtained by the appropriate inflection point on thermal transient response, which is calculated by the minimum point of the 1st derivative curve. Since the method only requires a natural convection heat sink, the thermal resistance of LED packages can be measured quickly and conveniently. The theoretical and experimental results show that it is an effective approach to the measurement of thermal resistance of LED packages in practical situations.

c) Junction temperature measurement of InGaN LEDs via their spectra. The ultimate goal of all the thermal simulations and designs of LED packages is to lower the junction temperature to the greatest extent when LEDs are working. However, it is a fairly hard work to test the junction temperature under working circumstance. We investigate the current and temperature dependence of GaN-based high power blue light-emitting diodes and identify a set of temperature sensitive optical parameters (TSOPs) that can provide a real-time solution for determining the junction temperature (T_j). The relationships among T_j , forward current and TSOPs, “center of mass” wavelength, and, in particular, full width at half maximum (FWHM) have been studied. The temperature dependence and forward-current dependence are tested in experiment respectively. Empirical equations with simple expressions are established via curve fitting. Based on these equations, a two-dimension mathematic model among TSOPs, junction temperatures and forward current is established. The junction temperature of LEDs on working circumstance could get by measuring the spectra and forward-current data and substituting them to this model. The analysis indicates

that using FWHM may yield higher accuracy than using other parameters as TSOPs.

d) Spatially resolved study of quantum efficiency droop in InGaN LEDs. The EQE droop problem has been investigated for decade. In the literature, two distinctly different types of EQE droop have been observed from different devices. One is those have a high forward current when EQE reach its maximum, and a slow droop rate when the current keeps on increasing; the other one is those have a low forward current when EQE reach its maximum, and a fast droop rate when the current keeps on increasing. In general, these two droop types, observed in individual devices, are spatially averaged results. A spatially resolved study of the droop, in conjunction with μ -PL, is performed to examine the two droop types in one single device, thus offering unambiguous analyses on the underlying material physics, without the complications of the processing variation. Two sorts of devices with different order of magnitudes, grown on free-standing GaN and sapphire substrates respectively, are investigated. It is found that in the former, the droop behaviors, as well as PL and EL, are totally different in different chip areas. Considering various experiment data, we suggest that the carrier capturing by microscopic defects and extended defects dictate the mechanisms of the droop. Energy traps in active region caused by the alloy composition fluctuation as well as the QW width fluctuation lead to carriers localization effect, may screen carriers from capturing by defect energy levels, relieving droop effect temporarily in the middle injection level, but is unable to prevent it when the carrier delocalization effect kicks in if the current keeps increasing. The first type corresponds to the average active region without any energy traps, while the second type corresponds to the active region contented energy traps. We suggest that to mitigate and eliminate the EQE droop essentially, one should reduce the density of micro defects and extended defect. It may be meaningless to concentrate simply on increasing the current when droop start.

Keywords: High-power Light-emitting diodes; Correlated-color temperature; Thermal resistance; Junction temperature; External quantum efficiency droop

第一章 绪论

1.1 LED 的历史和现状

发光二极管 (Light-emitting diode, LED), 是一种基于 p-n 结二极管的发光器件。在正向偏置电流作用下, p-n 结周围发出的电致发光光谱 (EL), 是源于 p 型和 n 型层的多数载流子——空穴和电子——的辐射复合作用。迄今为止, 从人类第一次观察到半导体的发光现象开始, LED 已经走过了一百多年的历史。早在上个世纪的 1907 年, 英国电子工程师 Henry Joseph Round 在研究碳化硅 (SiC) “触须整流器” (cat’s whisker rectifier) 时, 观测到金属节点的附近半导体发出了各种颜色的光线^[1]。这是人类有记录以来首次观测到的半导体电致发光现象。此后的 30 多年间, 陆续有诸如 Ge、Si 等半导体材料, 甚至氧化铜, 在和金属电极接触的结点表面上发出可见光的报道, 但是当时人们并不清楚这些现象的原因。

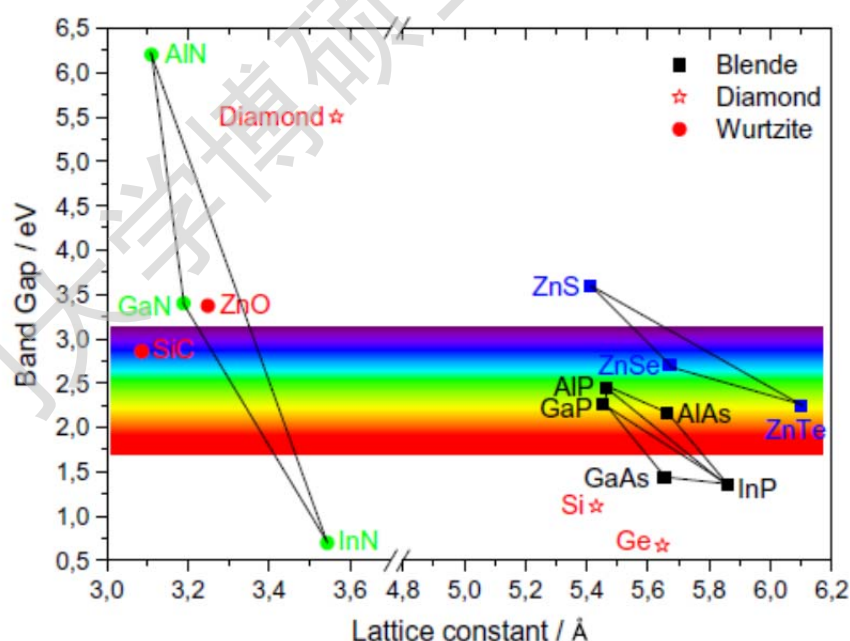


图 1.1 不同半导体材料的能带间隙^[9]

二战后, 美国的贝尔实验室重新启动了半导体材料在通信工程中的应用研发, 此举措带动了在全世界范围半导体技术的发展, 尤其是在 p-n 结能带理论方面,

William Shockley 提出了一个后来被广泛接受的物理模型^[2-3]，使人们更加深入的理解了 p-n 结的物理原理。例如，直接带隙和间接带隙半导体的区别，载流子的移动和寿命^[4]，少数载流子的发射^[5]，电子空穴对复合以及光的产生^[6]等等。这些成果，使得 LED 呼之欲出。1962 年，第一个实用型 LED 在美国通用电气公司 (General Electric Company) 诞生^[7]，这是一个用 GaAs 材料做的红光二极管。从此以后，III-V 族 LED 技术蓬勃发展，使用不同的半导体材料，例如 GaAs、GaN、ZnS 等 LED 可使能带间隙 (Band-gap) 范围从 0.7 eV 至 6.28 eV，理论上实现了从远红外到深紫外全光谱的涵盖(图 1.1)。同时，以金属有机气相沉积法 (MOCVD) 为代表的 LED 制造技术也不断进步^[8]。

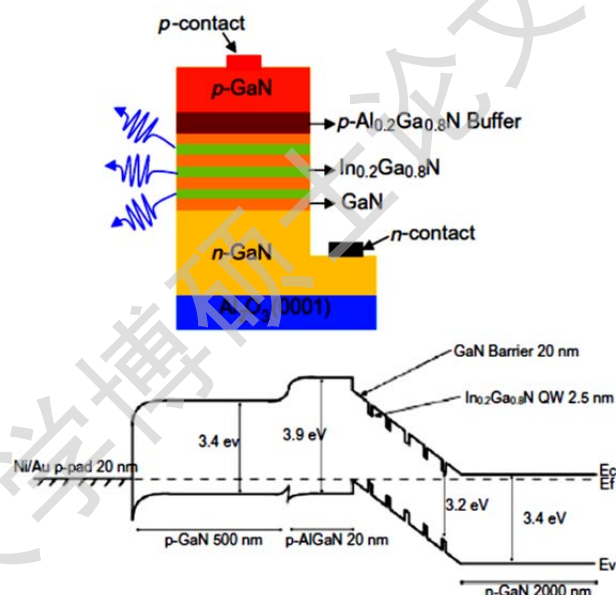


图 1.2 LED 器件结构(上)与能带图(下)^[9]

进入二十世纪九十年代后，大功率 LED 尤其是蓝光 GaN 基技术的发展将 LED 由指示灯领域引入照明工程领域。随着 1999 第一颗商用 1 W 大功率 LED 的诞生^[10]，照明用大功率白光 LED 技术迅猛发展。发光效率不断提高，据美国 Cree 公司 (Cree, Inc.) 最新的报告，2012 年 4 月，该公司的大功率白光 LED 的光效已经达到破纪录的 254 Lumin/W^[11]。在比拼效率和功率的同时，各个公司也在不断优化 LED 作为照明光源的视觉性能，比如优化光谱结构，增加显色性等等。迄今为止，LED 已经广泛用于照明工程的各个领域，如室内照明，道路照

明，显示屏背光等等，并且，正在进一步扩大市场份额。

1.2 大功率 LED 概述

1.2.1 p-n 结发光原理

如图 1.2 所示，LED 的核心是一个 p-n 结。p-n 结内建电压构成了一定的势垒，当外加正向偏置时势垒下降，p 区和 n 区的多数载流子向对方扩散。由于电子迁移率比空穴迁移率大得多，大量电子向 P 区扩散，构成对 P 区少数载流子的注入。这些电子与价带上的空穴复合，得到的能量以光能的形式释放，即载流子对复合生成一定能量光子，这就是 p-n 结发光的原理。发光的波长或频率取决于选用的半导体材料的能带间隙 E_g ，它的单位为电子伏特 (eV)。其与波长的关系为：

$$E_g = hv/q = hc/(\lambda q) \quad (1.1)$$

$$\lambda = hc/(qE_g) \quad (1.2)$$

式(1.1)和式(1.2)中， λ 为发光波长， q 为基本电荷常数。

半导体材料依照能带特性可分为直接带隙和间接带隙两种。在直接带隙半导体材料中，导带最小值和满带最大值在 k 空间中处于同一位置，电子跃迁到导带上时只需要吸收能量而不须改变动量。而在间接带隙半导体材料中，电子跃迁过程中需要与晶格相作用，从而释放声子。发光二极管大都采用直接带隙材料，这样可使电子直接从导带跃迁到价带与空穴复合而发光，获得较高的效率。反之，采用间接带隙材料，有一部分电子能量将转换为晶格振动能量，因此，效率相对较低。

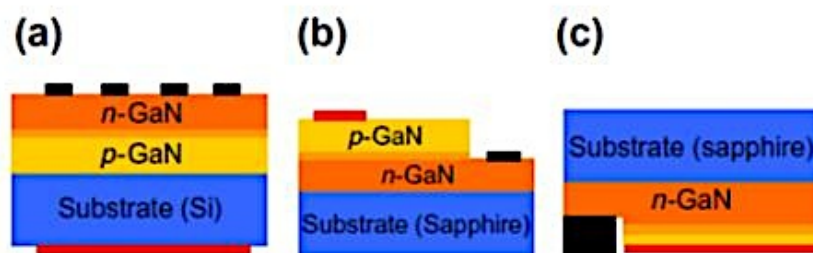


图 1.3 三种芯片结构：(a) 垂直结构；(b) 台阶结构；(c) 倒装结构^[9]

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