

学校编码: 10384
学号: X2009181009

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

GaN 基 LED 器件中多物理场的耦合及其应用

Coupling relationship and application of GaN based LEDs

杨 旭

指导教师姓名: 康俊勇 教授

专业名称: 电子与通信工程

论文提交日期: 2013 年 6 月

论文答辩时间: 2013 年 9 月

学位授予日期: 2013 年 9 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013 年 9 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, 与同课题组成员合作共同完成的研究成果。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

摘要

GaN 基 LED 技术的迅速发展带来了照明技术新的革命，使人们的生活进入了固体照明时代。随着 LED 光效的提升，要求器件具有更大的尺寸和更高的注入电流。如何在大功率的工作条件下，仍能保持并进一步提升器件的光电转换效率，对器件结构设计提出了更大的挑战，也成为了近年来的研究热点。

本论文详细介绍了影响器件性能最为重要的三个物理场因素：电场、热场以及光场。在归纳总结了正装、倒装及垂直结构 LED 的电流分布解析模型的基础上，提出了改善电流分布均匀性的器件设计方案。讨论了包括焦耳热、非辐射复合热、汤姆逊热及光吸收热等器件自热效应的起源及其模型。着重分析了器件反射基底和表面等离子激元出光增强技术。在分析各物理场模型的基础上，梳理了它们相互之间的耦合关系及其对器件性能的影响，提出了根据材料性质和器件结构选取合适的物理模型和合理的边界条件，运用有限元的方法对器件进行网格化并逐点求解泊松方程、连续性方程、输运方程以及热流方程，以呈现器件多物理场的计算方法。利用多物理场耦合关系的研究方法，设计了一种新型的深紫外 LED 器件结构——分布式布拉格反射与小面积金属接触复合三维电极结构。通过计算分析表明，该器件结构具有均匀的电流分布、良好的散热水平及较高的出光效率。为多物理场耦合关系的器件设计方法提供更为全面、精细及有效的设计思路，对器件制备具有重要的指导意义。

关键词：GaN 基 LED；多物理场；深紫外；垂直结构

Abstract

The substantial development of GaN based light-emitting diodes (LEDs) has brought a new revolution in lighting technology, making people living into the new age of solid-state lighting. To enhance the optical power of LED, much larger chip size and higher injection current should be applied. However, it is still currently a challenge to keep and further enhance the wall-plug efficiency at high injection current. Therefore, how to optimize the device structure for the high power LED becomes a hot topic in recent years.

In this thesis, the most important physical fields that impact the LEDs performance, including electrical field, thermal field and optical field, have been reviewed in detailed. For the electrical field, the devices current analytical distribution models for face-up, flip-chip, and vertical LEDs structures have been analysed, and a design concept has been proposed for improving the current distribution uniformity of device. For the thermal field, we discussed the origin and model of self-heating effect, including joule heat, non-radiative recombination heat, Thomson heat and light absorbing heat. And for the optical field, we emphasized on the reflective submount and surface plasmons effect which is closely related to the device extraction efficiency. Base on the analysis of each physical field models, we clarified the coupling relationship of these multi-physics that affect the device performance, and proposed a numerical analysis method for the device multi-physics calculation, in which appropriate physical models and reasonable boundary condition are selected, and the device structure are meshed by finite element method to solve the Poisson equation, continuity equation, transport equation and heat flow equation in each element. Finally, by utilizing the coupling relationship of multi-physics, we designed a novel three dimension deep-ultraviolet LEDs structure which combines the distributed bragg reflectors with pixel metal contact. The numerical analysis results show that such structure device has uniform current distribution, much higher heat dissipation levels and well light extraction efficiency. These indicate that the research approach based on the multi-physics coupling relationship provide us a much more comprehensive, accurate, and effective way for the device fabrication.

Keywords: GaN; light-emitting diodes; multi-physics; deep-ultraviolet; vertical structure

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录	
第一章 绪 论	1
1.1 GaN 基 LED 器件研究进展	1
1.2 GaN 基 LED 器件结构与器件设计的关键问题	3
1.3 本论文框架	7
参考文献	8
第二章 GaN 基 LED 器件物理场理论与增强技术	13
2.1 电流分布理论模型与设计规则	13
2.1.1 等效电路模型(Guo 氏模型)与电流扩展长度 L_s	13
2.1.2 Thompson's 模型与电流扩展长度 L_s 的测量	17
2.1.3 GaN 基 LED 器件电流分布的设计规则	19
2.2 自热效应理论	20
2.2.1 自热效应的起源	20
2.2.2 热流方程	22
2.2.3 减少自热效应与提高器件散热水平的方法	24
2.3 LED 器件增强出光的方法	25
2.3.1 反射基底(Reflective submount)	26
2.3.2 表面等离子激元增强技术	30
2.4 本章小结	33
参考文献	35
第三章 GaN 基 LED 器件中多物理场耦合	39
3.1 电流分布、自热效应与器件出光三者之间的关系	39
3.1.1 电流分布与自热效应的关系—载流子与声子相互作用	39
3.1.2 电流分布与器件出光的关系—载流子与光子相互作用	40
3.1.3 自热效应与器件出光的关系—声子与光子相互作用	40
3.2 多物理场耦合关系的研究方法	43
3.2.1 能带模型	44
3.2.2 迁移率模型	45

3.2.3 自发辐射复合模型	47
3.3 本章小结	47
参考文献	49
第四章 基于多物理场耦合关系的深紫外 LED 器件结构设计	51
4.1 外延结构与能带	52
4.2 传统垂直结构 LED 特性分析	53
4.3 n 型电极的设计与优化	55
4.4 反射基底（全方位角反射镜）的结构设计	58
4.5 p 型阵列电极的设计与优化	62
4.6 表面等离子激元增强深紫外 LED 器件光提取效率	66
4.7 本章小结	68
参考文献	70
第五章 总结与展望	71
附录 硕士期间发表论文	73
致谢	74

Contents

Chapter 1 Introduction.....1

1.1 Progress in GaN based LEDs1

1.2 Critical problems in GaN based LEDs device structure3

1.3 Thesis structure7

References8

Chapter 2 Physical field theory and enhancement technology for GaN based LEDs.....13

2.1 Current distribution theory and design rules13

 2.1.1 Guo's models and current spreading length L_s 13

 2.1.2 Thompson's models and measurement for L_s17

 2.1.3 Design rules for GaN based LED current distribution.....19

2.2 Self heating theory20

 2.2.1 Origin of self heating20

 2.2.2 Heat flux equation22

 2.2.3 Approach for alleviating self heating and improving devices dissipation24

2.3 Enhancement of light extraction for LEDs.....25

 2.3.1 Reflective submount.....26

 2.3.2 Surface plasmons30

2.4 Conclusions33

References35

Chapter 3 Multi-physics coupling relationship in GaN based LEDs..39

3.1 Relationship among current distribution,self heating and light extraction39

 3.1.1 Relationship between current distribution and self heating—carriers and phonons interaction.....39

 3.1.2 Relationship between current distribution and light extraction —carrier-

rs and photons interaction	40
3.1.3 Relationship between self heating and light extraction—phonons and photons interaction.....	40
3.2 Multi-physics coupling relationship calculation methods	43
3.2.1 Energy band structures	44
3.2.2 Mobility models	45
3.2.3 Spontaneous recombination models	47
3.3 Conclusions	47
References	49
Chapter 4 Deep UV LEDs structure design based on Multi-physics coupling relationship	51
4.1 Epitaxy and energy band structures	52
4.2 Characteristics of conventional vertical thin film LEDs	53
4.3 Design and optimization of n-contact structure	55
4.4 Design of Reflective submount(Omnidirectional reflector)	58
4.5 Design and optimization of p-contact pixels	62
4.6 Surface plasmons enhancement of light extraction efficiency	66
4.7 Conclusions	68
References	70
Chapter 5 Summary and prospect	71
Appendix	73
Acknowledgements.....	74

第一章 绪 论

1.1 GaN 基 LED 器件研究进展

从1993年世界第一个InGaN/GaN蓝光LED的诞生之始的二十年里，GaN基LED的研究工作在半导体材料生长、器件制备及波长转换等方面都取得了长足的进步，推动其进入了通用照明领域，并不断地创造LED发光功率率新记录。2012年4月，Cree公司再次刷新了白光功率型LED的记录：在标准室温、350 mA驱动电流、相关色温4408 K条件下，光效达到254 lm/W^[1]，接近于白光LED 260-300 lm/W的理论最大光效值^[2]。然而，当人们在追求着高LED发光功率时，要求器件芯片尺寸越来越大，输入功率和注入电流需要相应提高。单个白光LED的驱动电流已由起初的25 mA，增加到350 mA甚至更高。在大电流注入的情况下，LED器件无法避免地出现器件内量子效率(η_{int})衰减的问题^[3]，也即efficiency droop效应。Droop效应是当前制约大功率LED器件效率进一步提升的主要瓶颈，是近年来的研究热点。尽管关于其产生的机理仍存有争论，但人们已经认识到其与电子过流^{[4][5]}、焦耳热^[6]、载流子—载流子和载流子—声子碰撞造成辐射复合率降低^[7]以及俄歇复合^[7]等多种物理效应有关。

人们尝试了不同的方法来减少droop效应，以提高器件的量子效率。例如，Schubert等人尝试采用AlGaInN四元氮化物作为量子阱势垒^[8]，Zhao等人运用Al_{0.83}In_{0.17}N/GaN/Al_{0.83}In_{0.17}N结构作为量子阱势垒^[9]，而Choi等人则发现Al_{0.82}In_{0.18}N作为电子阻挡层(Electron-blocking layer, EBL)能够比AlGaInN更有效的抑制电子过流^[10]；最近Shioda等人的研究表明，对于绿光LED，使用AlGaInN/GaN/AlGaInN结构作为量子阱势垒不仅能起到限制载流子，而且也能很有效提高器件的量子效率^[11]。此外，采用AlGaInN作为盖层可以大幅度降低量子阱中的应力和位错密度^[12]，这一特性也可以同时与AlGaInN/InGaInN超晶格构成的量子阱势垒和电子阻挡层^[13]相结合，减少droop效应。改善内量子效率除了上述降低非辐射复合率的方法之外，另一种思路就是增加辐射复合率。为此，人们也尝试了多种方法来增加量子阱中电子和空穴波函数的空间交叠，以减少极化场带来的负

面影响增大辐射复合率。交错量子阱(staggered quantum well)^{[14][15][16][17]}和II类异质结量子阱^[18]则能增强这一交叠效果。InGaN量子点结构不仅能够释放由InGaN和GaN外延层晶格失配产生的应力,也可以更好地实现电子-空穴交叠^[19]。此外,生长在非极性和半极性面的InGaN/GaN结构亦能减弱极化场,理论上能完全实现电子空穴波函数的空间交叠^{[20][21][22]}。另一方面,LED材料生长也进入了同质外延时代,Zhang等人采用三元氮化物半导体InGaN材料作为外延衬底,进一步提高了InGaN量子阱的辐射复合率并减小了发光波长蓝移的问题^[23]。通过选择合适的In组分InGaN衬底使其与上部的量子阱材料实现较好的晶格匹配减少材料缺陷,可以降低载流子阈值进而抑制俄歇复合^[24]。

除了从材料结构方面改变物理场之外,人们愈加认识到,器件结构也可以进行有效的调控。其中垂直结构LED(Vertical LED, VLED)器件在诸多方面具有性能优势^{[25][26][27][28]}。可以通过准分子激光完全剥离高阻抗(高电阻和高热阻)的蓝宝石衬底,并采用更多种材料(主要为金属)作为导电的转移衬底;也可以直接减薄蓝宝石衬底,并有选择地刻蚀掉部分衬底,以便n-GaN直接与金属形成接触^[29]。该器件内部形成了更为均匀的电流分布的同时,也极大地提高器件的散热水平,使其更能胜任大电流、高功率LED的应用。提高器件的出光效率,使有源区内光子能够尽可能多的射出器件,也是调控LED中物理场的一有效措施。光子晶体(photonic crystals, PC)是众多改善出光效率技术中应用最广泛的一种,在n-GaN层下方形成空气孔洞阵列光子晶体能够有效增强TE模偏振光的发射和光线的偏振度^[30],通过设计光子晶体的图案也能控制远场的光线方向^[31]。此外,在器件表面使用聚苯乙烯(polystyrene, PS)微球制作微透镜,不仅增加了光子的逃逸角,也能减少光子在GaN/SiO₂/PS/air界面的全反射,提高器件出光效率2倍以上^{[32][33]}。表面等离子激元(surface plasmon, SP),则是另一种具有应用前景的光提取技术,有源区的发射光子与百纳米的尺寸金属电子耦合形成共振,可以提高光强达5倍^{[34][35][36]}。

总之,LED应用市场的发展与器件的效率密切相关,而效率改善和提高进程就是人们调控LED结构材料和器件中物理场的过程。

与此同时,由于高Al组分AlGaN和AlN等更宽带隙半导体材料生长技术的提升,在高显色指数白光照明、空气净化环保、生物医疗、以及高密度的信息储存

和保密通讯等领域有着重要应用前景的深紫外LED(DUV-LED)也得到了快速的发展。目前其外量子效率也已超过了10%，发光波长在278 nm，连续电流20 mA下的光输出功率达到9.36 mW^[37]。

1.2 GaN 基 LED 器件结构与器件设计的关键问题

GaN基LED器件结构主要基于其衬底的性质。目前，主要有SiC和蓝宝石衬底。由于SiC衬底本身具有良好的导电和导热性能，其LED器件的制备工序较为简单，可与AlGaInP基的LED器件结构兼容，而且由于其*p*和*n*电极分别位于器件的两侧，因此能够很好地实现电流扩展，更适用工作于大功率的状态。目前，SiC衬底的氮化物外延专利技术主要掌握在Cree公司手上，其它公司多采用绝缘的蓝宝石(Sapphire)作为GaN基LED衬底。这就要求LED器件结构更为复杂，目前主要有如图1所示几种器件结构^[38]。

(1) 正装结构。该结构通过刻蚀外延材料正面的部分区域，在暴露的*n*型区域制作欧姆接触电极；在未刻蚀的器件台面(mesa)上制作*p*型电极。由于*p*型GaN:Mg层电阻较大($\sim 1\Omega \cdot \text{cm}^2$)，从*p*型焊盘注入的电流难以在*p*型GaN层中实现均匀的电流分布。为此，通常会在*p*型焊盘和*p*型GaN层之间制作一层半透明或者透明的欧姆接触层(例如Ni/Au合金或者ITO)作为电流扩展层(Current spreading layer, CSL)。由于CSL层会降低光透射率进而降低器件的光提取效率，必须在电流扩展和器件出光矛盾中合理设计电场和光场，提高器件整体的光辐射效率(wall-plug efficiency)。

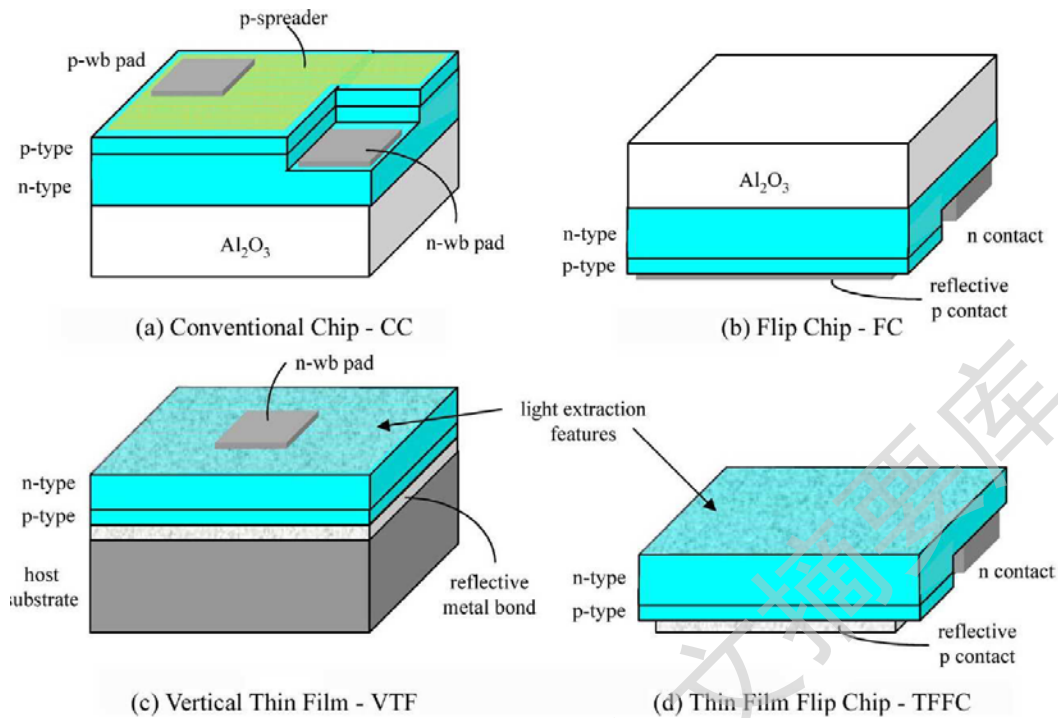


图 1.1. GaN 基 LED 常用的器件结构(a) 传统正装器件，采用了半透明的金属接触层；(b) 倒装器件，采用反射 p 型电极；(c) 垂直结构器件，键合在反射金属基板上；(d) 薄膜倒装结构， n 型 GaN 作为出光面。

(2) 倒装结构(Flip chip, FC)。对于传统正装结构LED器件，不仅需要解决好上述所遇到的提高电流分布均匀性与增强出光相矛盾的问题，而且由于蓝宝石本身较高的热阻抗，器件的有效散热成为另一需要重视的问题。倒装结构器件相比正装结构则在解决上述两个问题上，特别是在大电流高功率的工作条件下，具有明显的优势^{[39][40]}。该结构的 n 型电极制备方式与正装结构相似， p 型电极则通常采用具有较高反射率的厚金属薄膜，两电极通过键合方法倒装焊接在金属基板上，而原本的外延蓝宝石衬底则成为器件的出光面。特别是当器件量子阱发光区域与 p 型反射电极的间距 d 达到发光波长 λ_n 的整数倍时，就会出现明显的光学谐振腔效应，进而改变器件的光提取效率(η_{ext})，而有源区的光辐射模式也会随之发生变化^{[42][41]}。如图1.2所示，为InGaN/GaN量子阱和Ag反射电极在正装(a)、优化倒装结构($d = 0.67\lambda_n$) (b)、以及优化前($d = 0.94\lambda_n$) (c)的光辐射模式。从图中可以明显看出通过调节了量子阱和反射电极的间距 d 之后，可以将有源区光辐射控制在器件光逃逸角 ($\theta_c = 39^\circ$) 范围内，大幅度增加了器件的光提取效率。此外，倒装结构中的有源区和用于散热的热沉距离十分贴近，也提高了器件的散热效果。

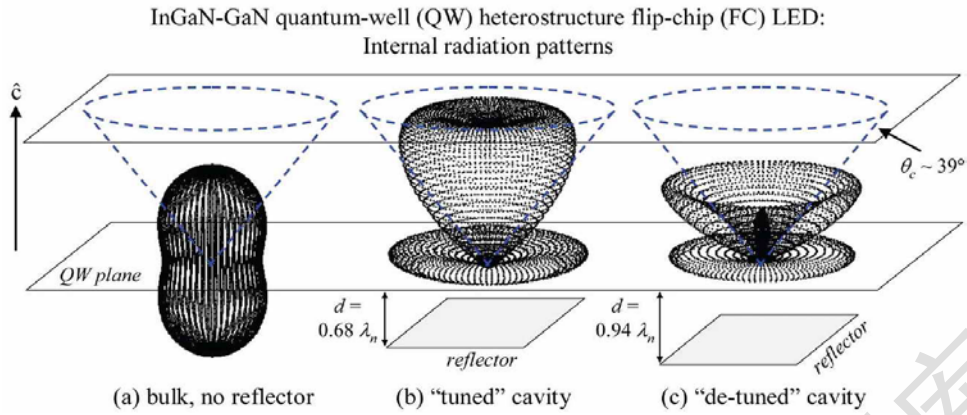


图 1.2. InGaN/GaN 量子阱光辐射模拟计算结果。(a)为无 Ag 反射镜的情况；(b)为优化了微腔距离的情况，大部分光发散角度都在器件光逃逸角内部；(c)为未优化微腔距离的情况，大部分光线都无法从光逃逸角最终出射到封装器件外部。光逃逸角 θ_c 为光线在蓝宝石和环氧树脂界面发生全反射的角度。

(3) 垂直结构(Vertical thin film, VTF)。该结构的主要特点是将带有 p 电极的 p -GaN表面键合在高反射率的金属基板上，通过准分子激光剥离蓝宝石衬底，将 n 电极制作在剥离后的 n -GaN上面，并作为出光面^{[42][43]}。通过粗化 n -GaN非金属接触表面，提高器件的光提取效率($\eta_{ext} \sim 70\%$)^[44]。通过控制刻蚀条件，使 n -GaN表面形貌为规则的圆锥状纳米结构（如图1.3所示），并优化圆锥的角度抑制光线在 n -GaN和空气界面的全反射，实现光提取效率 $\eta_{ext} > 87\%$ ，进而使发光效率比传统的正装器件提高了最高318%^[45]。另外垂直结构的 p 和 n 电极分别位于器件的两边，也避免了台面结构所带来的电流拥堵问题。由于在外延材料和热沉之间存在着键合高反射率金属基板，其散热效果不及倒装结构的LED器件。

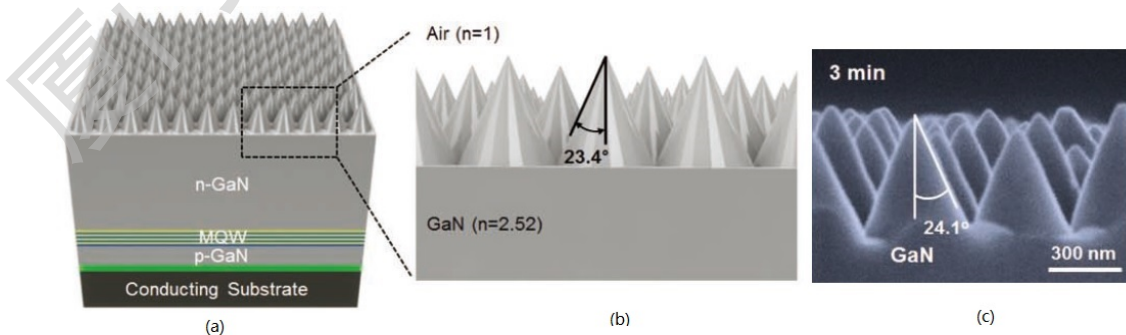


图 1.3. 圆锥状纳米 n -GaN 表面的 VTF-LED 的结构示意图(a)和(b)及干法刻蚀后 n -GaN 表面的 SEM 形貌图(c)。

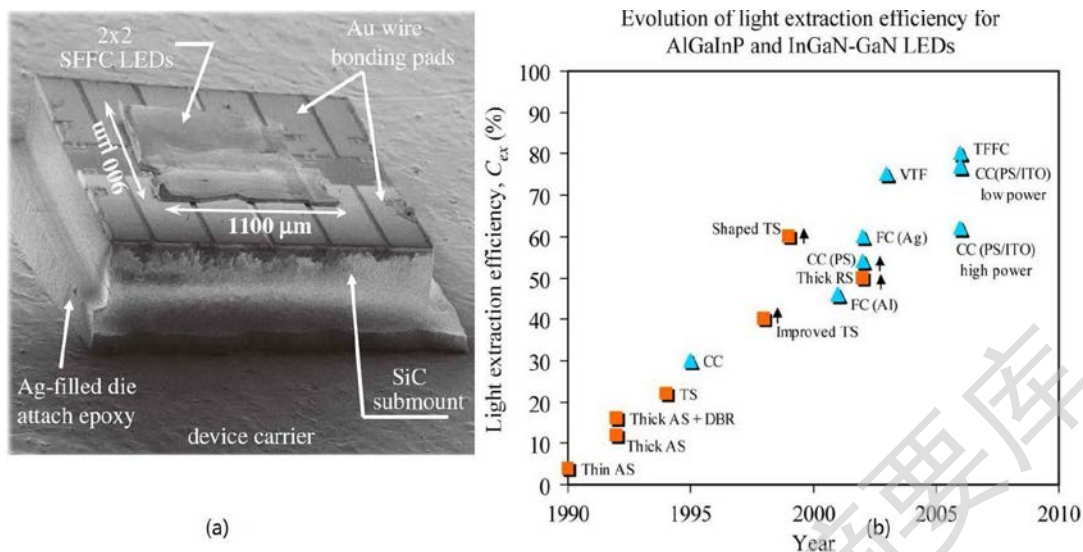


图1.4.(a)276nm波长的AlGaInP TFFC结构LED器件SEM形貌图，芯片的尺寸为 $1100 \times 900 \mu\text{m}^2$ ；(b)表明各种GaInP基LED器件结构（三角）与AlGaInP基LED器件结构（方块）光提取效率技术进展。“FC(Al)”与“FC(Ag)”分别表示采用Al和Ag作为反射镜的倒装结构器件；“CC(PS)”正装图形衬底结构；“CC(PS/ITO)”为正装图形衬底和ITO做p电极的结构。

(4) 薄膜倒装结构(Thin-Film Flip Chip, TFFC)。该结构结合了垂直结构光提取效率高和倒装结构器件散热性能好两者的优势^[46]。其制备方式与传统的倒装结构相近，不同是器件在倒装键合之后移除了蓝宝石衬底，并在n-GaN表面进行了表面粗化，光提取效率在80%以上。图1.4(a)为发光波长在276nm的AlGaInP深紫外LED的TFFC结构SEM形貌图，外延薄膜固定在镀有Au的SiC基板上^[47]。

各种器件结构的演化和改进都一定程度提高了器件的光提取效率，如图1.4(b)所示^[38]。事实上，结构改进的目标，并不仅限于光提取效率，而是LED整体电光转换效率（包括内量子效率、外量子效率等）的提升。在尽力将电能转化为有效的光能过程中，不可避免地会存在损耗。这些损耗除了无法使用的辐射光子能量之外，绝大部分都是以热能的形式存在，但半导体材料中涉及到光电转换的关键参数又都是温度的函数，如不能恰当地控制器件温度，则会直接降低LED内（外）量子效率，严重影响器件性能。所以LED器件的温场控制也是结构设计的重要考量。而出光与热都产生于电流的注入，电流注入模式的设计则会直接影响到电能向光能和热能转换的权重和水平。由于这三方面因素的关联性很强，单从一方面入手，无法得到器件真实的情况，降低设计的准确性。因此器件结构的

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