

封面：

分类号_____

密级_____

U D C_____

编号_____

厦 门 大 学

博 士 后 研 究 工 作 报 告

高效大功率垂直结构芯片（紫外、蓝、绿光）的研究与开发

梁兴华

工作完成日期 2014.11

报告提交日期 2015.06

厦门大学

年 月

题名页

高效大功率垂直结构芯片（紫外、蓝、绿光）的研究与开发

Investigation and Development of the High-Efficiency Vertical Chip

博 士 后 姓 名 梁兴华

流动站（一级学科）名称 物理学

专 业（二级学科）名称 微电子学

研究工作起始时间 2012 年 11 月

研究工作期满时间 2014 年 11 月

厦 门 大 学

年 月

厦门大学博士后研究报告著作权使用

声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用博士后研究报告的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交该报告的纸质版和电子版，有权将该报告用于非赢利目的的少量复制并允许该报告进入学校图书馆被查阅，有权将该报告的内容编入有关数据库进行检索，有权将博士后研究报告的标题和摘要汇编出版。保密的博士后研究报告在解密后适用本规定。

本研究报告属于： 1、保密（ ）， 2、不保密（ ）

纸本在 年解密后适用本授权书；

电子版在 年解密后适用本授权书。

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

中文摘要

摘要

GaN 基 LED 一般生长在蓝宝石衬底上，由于蓝宝石是绝缘体和不良的导热物质，使得传统的正装芯片在大功率下工作时，容易因散热不佳导致失效。本论文利用外延转移技术把蓝宝石衬底更换成更好的导热导电衬底，制备成薄膜垂直芯片，以利于大电流，大功率下应用。

本论文所述芯片，使用 ICP damage 作为电流阻挡层，使用基板键合技术将导电导热衬底和 GaN 结合，然后用激光剥离方式将蓝宝石衬底去除，为了增加出光效率，对 GaN 表面进行粗化。

我们发现 PCB-ICP 条件会导致垂直结构 LED 在老化过程发生漏电，通过更换镜面 Mir 的金属及 EMMI&SEM 分析，发现引起老化漏电的原因来源于镜面金属——Ag 迁移所致，迁移通道可能来源于 PCB-ICP 打开穿透位错的封口。进一步设计实验，在缺陷位错内填入低电迁移金属，既解决老化漏电问题，同时不影响 Mir 的反射率。

我们在蓝光垂直芯片的制程基础上，针对绿光外延的特性作进一步制程优化，成功制备符合客户需求的绿光产品，并通过高温、高温高湿、冷热冲击的试验。

我们开发了近紫外光的芯片制程，成功制备符合客户需求的紫外光产品，405nm 已通过高温老化试验；415nm 的老化验证在观察中，另外后续我们将搭配

外延团队，制备更短波长的紫外产品，为市场提供更多可选的紫外产品。

我们成功制备了 Pro-VTF 芯片，使得其在大电流密度下 ($2\text{A}/\text{mm}^2$) 比一般的 VTF 亮度超过 20%。同时通过改进工艺条件，降低了电压和提升了亮度。在 $2\text{A}/\text{mm}^2$ 电流密度下的高温老化测试已经通过，后续将改进工艺，争取在更高电流密度下通过老化，及早把产品推向市场。

关键词：大功率 薄膜垂直芯片 高效率

英文摘要

Abstract

As GaN-base LED is usually grown on sapphire substrate, the conventional lateral chip is normally failed to be applied in high power application for the electrical insulated and poor heat conductor. We use epi-transfer technology to transfer the sapphire to a better thermal dissipation and conductive substrate and manufacture the vertical thin-film for the high power application.

The vertical thin-film LEDs were fabricated by the ICP damage current blocking layer, wafer bonding, laser lift-off techniques and rough of the surface

We found the condition of the PCB-ICP would damage the surface and cause the leakage at reliability test. With the experiment of the change of the reflective metal and EMMI&SEM analysis, we found the root reason for the failure of the Ir leakage is from the Ag migration. The channel for the Ag migration might be open of the penetrating dislocation by the ICP treatment. We use new experiment to located some metal with low electromigration and we solved the Ir issue.

Based on the process of the blue VTF, we successfully make the green and UV ones, passed the qualification and offer the product to the customer

Additionally, we successfully fabricated the Pro-VTF structural chip. The brightness of the Pro-VTF can exceed the VTF by 20% at high current density ($2A/mm^2$). By optimization of the process, we decrease the voltage and increase the brightness.

Keywords: High power VTF High efficiency

目 录

厦门大学博士后研究工作报告著作权使用声明	iii
中文摘要	iv
英文摘要	vi
第一章 简介	1
1-1 III-V 族氮化物在 LED 器件方面的发展历史	1
1-2 III-V 族氮化物 LED 器件提升光效简介	2
1-3 III-V 族氮化物大功率 LED 器件简介	3
1-4 本论文结构	4
参考文献	5
第二章 蓝光垂直结构芯片	8
2-1 外延转移技术	8
2-1-1 基板键合技术	8
2-1-2 激光剥离技术	9
2-2 GaN 表面粗化技术	10
2-3 电流阻挡技术	10
2-4 结果和讨论	12
2-4-1 ICP damage 电流阻挡层 (CB) 老化异常	12
2-4-2 老化异常分析、原因厘清	13
2-4-3 新实验设计, 问题解决	14
2-5 结论	16
参考文献	16
第三章 绿光垂直结构芯片	19
3-1 绿光 LED 的发展及应用	19
3-2 垂直绿光 LED 的制备流程	22
3-3 结果与讨论	22
3-4 结论	25
参考文献	25
第四章 近紫外光垂直结构芯片	26
4-1 紫外 LED 的发展及应用	27
4-2 结果与讨论	28
4-3 结论	31

参考文献	31
第五章 超垂直结构芯片	34
5-1 超垂直结构芯片简介	34
5-2 结果与讨论	36
5-3 结论	41
参考文献	41
致谢	43
博士期间发表的论文	45
博士后期间发表的专利	46
个人简历	49

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 简介

1-1 III-V 族氮化物在 LED 器件方面的发展历史

发光二极管（英文为 Light Emitting Diode，简称 LED）是一种半导体发光器件，由于其具有环保、亮度高、功耗低、寿命长、工作电压低、易集成化等优点，被广泛用作指示灯、显示屏等显示或照明领域。随着技术的进步和成熟，白光 LED 将继白炽灯、荧光灯和高强度放电灯（如高压钠灯）之后，成为第四代的照明光源。

在发光二极管领域，最引人注目的是 III-V 族氮化物材料¹，如 InN、GaN、AlN 及其它们的合金化合物等。这类氮化物之所以重要是因为其直接能隙可从 0.7eV (InN)²连续变化到 6.2eV (AlN)³，如图 1-1 所示。若制成光电器件，其波长可覆盖红外光到紫外光波段的所有应用，相比于其它的 III-V 族化合物（如 GaAs、GaP 等）有更广泛的用途。同时，该类 III-V 族氮化物可在更高温和更大功率下应用，也使得其在性能上更胜一筹。

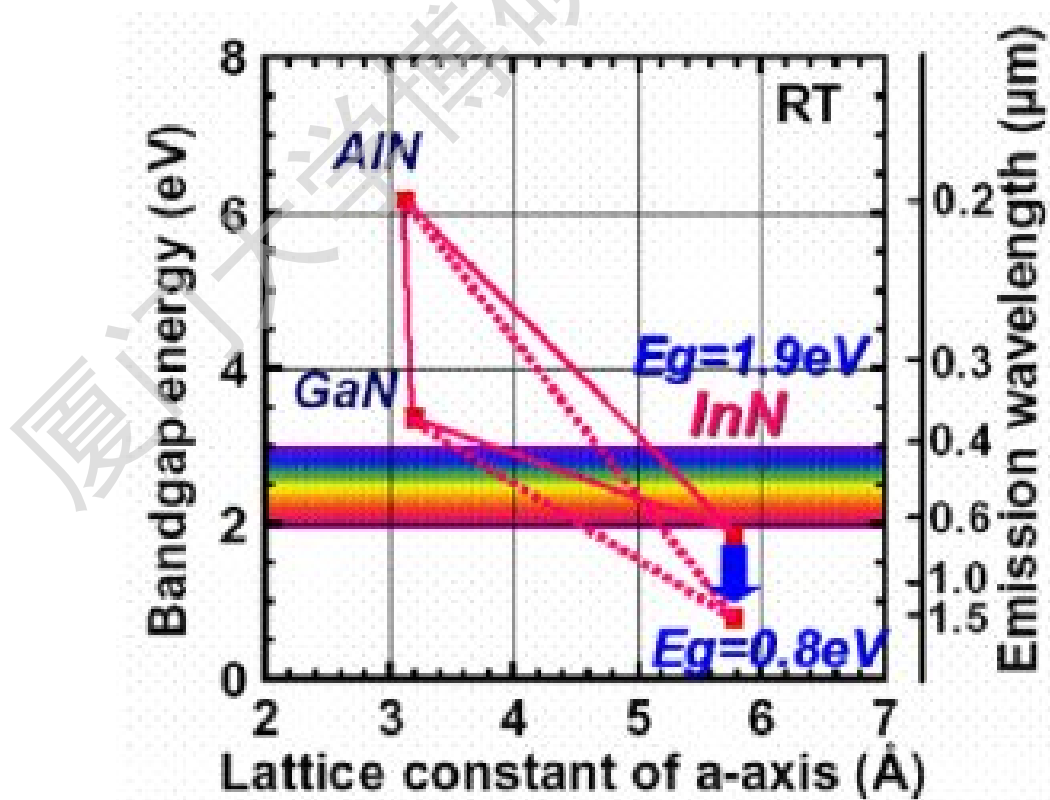


图 1-1 III-V 族氮化物晶格常数-能隙图

自 1972 年 J. I. Pankove 等⁴基于 III-V 族氮化物制备了第一个蓝光 LED 器件后，人们便开始相关的研究。但由于缺少合适的外延衬底和极低的 p-GaN 导电率，研究进展很慢。直到十九世纪八十年代，H. Amano 等人⁵发现，通过在低温下生长缓冲层以及利用低能电子束与外延表面作用可以获得良好导电性的 p-GaN，最终制得的 GaN 基的蓝光 LED 在器件性能上比之前的有了极大地提升。虽然 H. Amano 等人的发现开创了 LED 研究的新局面，但是由于该方法制备的 p-GaN 中的受体浓度仍然很低，导致该方法的可靠性不足从而限制了其应用。最后 S. Nakamura 等人⁶发现，在 N₂ 氛围下对 GaN 进行热退火处理 (>750℃) 可以获得更好导电性的 p-GaN。由于这一方法简单易行，重现性高，从而使得商品化的蓝光 LED 成为可能。进一步的，利用蓝光 LED 和荧光粉可以实现白光，从而使得 LED 照明变得触手可及。因此，2014 年的诺贝尔物理学奖颁给了发明蓝光 LED 的 I. Akasaki、H. Amano 和 S. Nakamura 等三人，嘉奖他们为发明高效环保的蓝光 LED 及进一步的白光 LED 的贡献。由于诺奖的效应和照明的广大市场的刺激，LED 的应用将会越来越广。不管是为了增加 LED 的应用途径，还是提升 LED 产品的竞争力，提升 LED 的光效是最有效的手段。

1-2 III-V 族氮化物 LED 器件提升光效简介

提升 LED 光效的方式目前主要集中在三个方面，分别是外延、芯片和衬底等。在外延方面，前后经历了从同质结、异质结、双异质结、单量子阱、多量子阱等一系列优化过程。目前已可实现大于 50%的内量子效率⁷。在芯片技术方面，由于 GaN 材料在可见光波段的折射率~2.4，与空气的折射率 (1.0) 相差很大。若 GaN 表面是平面结构，根据 Snell's 定律，从发光层发射的光线很易在 GaN-空气界面发生全反射，从而使得光线被困在 GaN 内，进一步被 GaN 内的缺陷等其它吸收层所吸收。因此，为了利于这部分困于 GaN 内的光线射出，GaN 基的芯片开发了表面粗化⁸、电流扩展层⁹、DBR¹⁰、电流阻挡层¹¹、切削 LED 成为特殊几何体¹²等方法来增加 LED 出光的效率。AlGaInN 材料，一般在蓝宝石衬底上生长，但是由于晶格常数失配，导致长成的外延上穿透位错密度偏高。因此有人研究在体相的 GaN、AlN、SiC 及 Si 上生长 AlGaInN 材料¹³，通过利用衬底与外延的低失配率、衬底良好的导热性及导电性，开发了适于在大功率下使用的 LED。

但是，由于体相的 GaN、AlN 价格极为昂贵，SiC 价格也偏贵且专利掌握在少数大厂手中，不适合大量研发和生产。而对于 Si 衬底，由于失配的问题未能解决，目前还在发展中，大批量生产还较难实现。因此，高效大功率 LED 的制备对研发和生产都是巨大的挑战。

1-3 III-V 族氮化物大功率 LED 器件简介

如前所述，一般的正装芯片结构不适合大功率应用。目前在产业界和学界用于高效大功率的芯片结构主要是倒装芯片（Flip chip, FC）和垂直薄膜芯片（Vertical Thin Film, VTF），如图 1-2 所示。

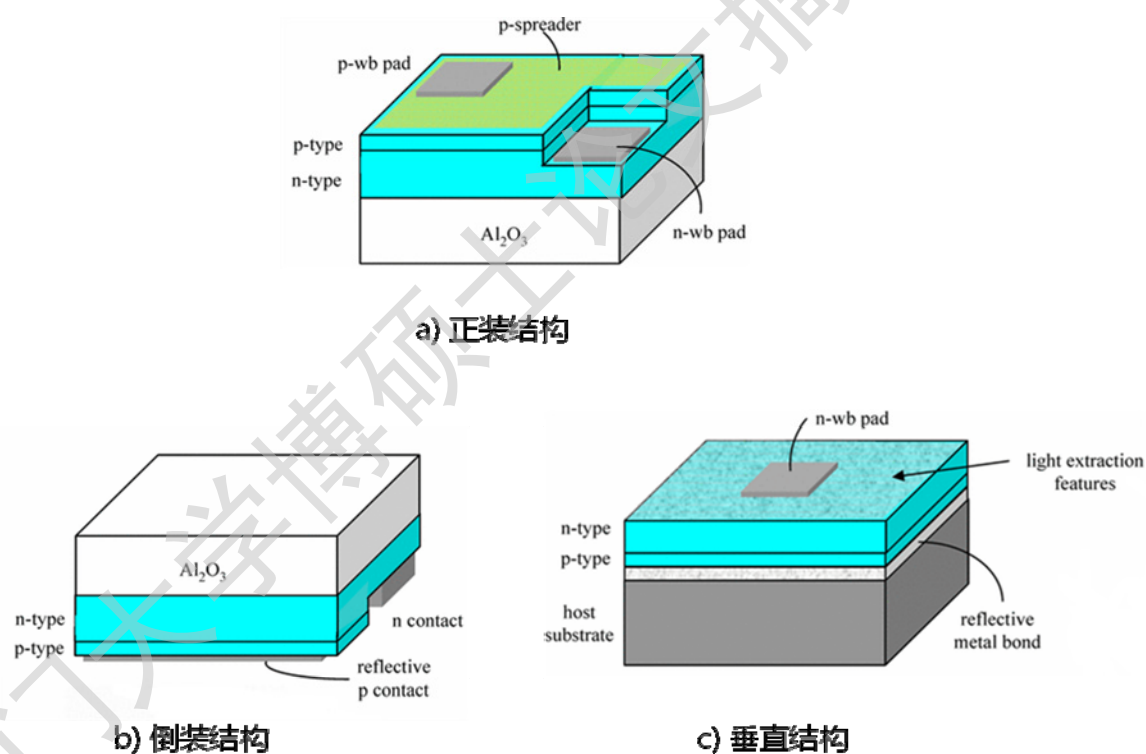


图 1-2 三种典型的 LED 芯片结构

倒装芯片技术是指在具有不同连接位置的基板上将芯片粘结上去。由于一般的正装芯片的焊点（Pad）固晶后都是朝上，而倒装芯片是朝下，因此被命名为 flip chip。此工艺最早由 IBM 在 20 世纪 60 年代研发出来，由于其优越的电学、热学性能及高 I/O 引脚数、高封装密度等，倒装芯片工艺已渐渐成为 IC 领域封装的主流。随着人们对大功率 LED 的需求越来越大，业界对 LED 的电学和导热性能提出了更高的要求。如图 1-2 a) 所示，正装结构的 GaN 基 LED 芯片一般是在蓝宝石基底上生长 GaN，由于蓝宝石导热性能比金属差很多，使得正装结

构芯片在大功率下使用时易因散热问题导致失效，从而无法应用于大功率。另一方面，由于蓝宝石是绝缘体，使得芯片 p、n-Pad 必须在芯片同一侧，且位于 LED 出光路径上，出光效率会因 Pad 吸光而降低。倒装芯片（图 1-2 b）通过金属键合到基板上，使得其有更好的导热性能。另一方面，倒装工艺使得芯片翻转过来，光线从蓝宝石面出射，由于不经过吸光的 Pad 而提高了发光效率；同时由于蓝宝石-空气的折射率差异小于 GaN-空气的，其出射临界角更大，也提高了出光效率。

阻碍 GaN 基正装芯片结构在大功率下使用的因素主要是因为其生长衬底——蓝宝石是绝缘体和不良的导热物质，使得芯片设计受限以及在大功率下工作时，不易散热导致失效。倒装芯片把芯片翻转过来使用，并通过金属与封装衬底连接，导电的同时也实现导热。既然阻碍 GaN 基正装芯片大功率应用的因素是蓝宝石衬底，另外一种直接的方式就是把衬底更换成更好的导热导电衬底，也就是本论文要重点介绍的垂直芯片工艺。该芯片工艺的发展和成熟，需要依赖外延转移（Epilayer-transfer）技术的发展。最早在发展 AlGaInP 基的 LED 芯片时，人们就发展了晶片键合¹⁴和基底剥离¹⁵等外延转移技术来提升 AlGaInP 基的 LED 芯片亮度。由于 GaN 基 LED 的衬底一般为蓝宝石，很难用机械或化学研磨的方法剥离，导致 GaN 基的垂直芯片工艺进展很慢。直到 Kelly 等人¹⁶以及 Wong 等人¹⁷的发明了激光剥离技术（Laser LiftOff, LLO），GaN 垂直芯片的才有了突飞猛进的发展。LLO 技术的原理是选择特殊波长的激光，使得其激发的光子虽然能穿透蓝宝石，但是会被交界面的 GaN 所吸收，使得局部温度升高，从而导致界面的 GaN 被加热分解成氮气和 Ga 原子，最终剥离掉蓝宝石衬底。

1-4 本论文结构

本论文将在将在第二章详细介绍垂直结构芯片的相关工艺，主要包括基板键合技术、激光剥离技术、GaN 表面粗化技术、电流阻挡技术等。并着重介绍我们在防止老化漏电方面做的相关工作。第三章和第四章将介绍和讨论我们将垂直芯片工艺应用到绿光和紫外光 LED 芯片上的进展和总结。第五章将着重介绍我们在发展超垂直结构芯片方面的工艺及发展。第六章是对整体工作的总结。

参考文献

-
- ¹ a) S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh, *Appl. Phys. Lett.*, 67, 1687 (1994); b) S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, and S. Nagahama, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 34, L797 (1995); c) G. Y. Xu, A. Salvador, W. Kim, Z. Fan, C. Lu, H. Tang, H. Markoc, G. Smith, M. Estes, B. Goldberg, W. Yank, and S. Krishnankutty, *Appl. Phys. Lett.*, 71, 2154 (1997); d) T. G. Zhu, D. J. H. Lambert, B. S. Shelton, M. N. Wong, U. Chowdhury, H. K. Kwon, and R. D. Dupuis, *Electron Lett.*, 36, 1971 (2000); e) G. T. Dang, A. P. Zhang, F. Ren, X. A. Cao, S. J. Pearton, H. Cho, J. Han, J. I. Chyi, C. M. Lee, C. C. Chuo, S. N. G. Chu, and R. G. Wilson, *IEEE Trans. Electron Devices*, 47, 692 (2000); f) B. S. Shelton, D. J. H. Lambert, H. J. Jang, M. M. Wong, U. Chowdhury, Z. T. Gang, H. K. Kwon, Z. Liliental-Weber, M. Benarama, M. Feng, and R. D. Dupuis, *IEEE Trans. Electron Devices*, 48, 490 (2001); g) A. P. Zhang, J. Han, F. Ren, K. E. Waldrio, C. R. Abernathy, B. Luo, G. Dang, J. W. Johnson, K. P. Lee, and S. J. Pearton, *Electronchem. Solid-State Lett.*, 4, G39 (2001)
- ² T. Matsuoka, H. Okamoto, M. Nakao, H. Harima, and E. Kurimoto, *Appl. Phys. Lett.*, 81, 1246 (2002)
- ³ H. Morkoc, *Nitride Semiconductors and devices*, (Springer-Verlag, Berlin, 1999)
- ⁴ J. I. Pankove, E. A. Miller, and J. E. Berkeyheiser, *J. Luminescence*, 5, 84 (1992)
- ⁵ a) H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda, *Appl. Phys. Lett.*, 48, 353 (1986); b) H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28, L2112 (1989)
- ⁶ S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, and N. Jwasa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31, 1258 (1992)
- ⁷ E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, (Cambridge University, 2003)

-
- ⁸ H. W. Huang, J. T. Chu, C. C. Kao, T. H. Hseuh, T. C. Lu, H. C. Kuo, S. C. Wang, and C. C. Yu, *Nanotechnology*, 16, 1844, (2005)
- ⁹ C. H. Kuo, S. J. Chang, Y. K. Su, R. W. Chuang, C. S. Chang, L. W. Wu, W. C. Lai, J. F. Chen, J. K. Sheu, H. M. Lo, and J. M. Tsai, 106, 69 (2004)
- ¹⁰ R. A. Logan, H. G. White, and W. Wiegmann, *Appl. Phys. Lett.*, 13, 139 (1968)
- ¹¹ C. Huh, J. M. Lee, D. J. Kim, and S. J. Park, *J. Appl. Phys.*, 92, 2248 (1986)
- ¹² M. R. Krames, M. Ochiai-Holcomb, G. E. Hofler, C. Carter-Coman, E. I. Chen, I.-H. Tan, P. Grillot, N. F. Gardner, H. C. Chui, J.-W. Huang, S. A. Stockman, F. A. Kish, M. G. Craford, T. S. Tan, C. P. Kocot, M. Hueschen, J. Posselt, B. Loh, G. Sasser, and D. Collins, *Appl. Phys. Lett.*, 75, 2365 (1999)
- ¹³ J. Y. Tsao, Optoelectronics Industry Development Association (OIDA) (2002)
- ¹⁴ a) S. Blackstone, *Microelectronic Engineering*, 48, 313, (1999); b) Y. T. Cheng, L. Lin, and K. Najafi, *J. Microelectromech. Syst.*, 9, 3, (2000); c) D. Sparks, G. Queen, R. Weston, G. Woodward, M. Putty, L. Jordan, S. Zarabadi, and K. Jayakar, *J. Micromech. Microeng.*, 11, 630, (2001); d) Niklaus F, Enoksson P, Kalvesten E and Stemme G, *J. Micromech. Microeng.*, 11, 100, (2001)
- ¹⁵ a) F. A. Kish et al., *Appl. Phys. Lett.*, 64, 2839, (1994); b) Tan I-H, Vanderwater DA, Huang J-W, Hofler GE, Kish FA, Chen EI, Ostentowski TD, *Journal of Electronic Materials*, 29, 2, 188, (2000); c) W. C. Peng and Y. S. Wu, *Appl. Phys. Lett.*, 84, 1841, (2004); d) R. H. Horng, D. S. Wu, S. C. Wei, C. Y. Tseng, M. F. Huang, K. H. Chang, P. H. Liu and K. C. Lin, *Appl. Phys. Lett.*, 75, 3054, (1999); e) R. H. Horng, Y. C. Lien, W. C. Peng, D. S. Wu, C. Y. Tseng, C. H. Seieh, M. F. Huang, S. J. Tsai and J. S. Liu, *Jpn. J. Appl. Phys.* 40, 2747, (2001)
- ¹⁶ M. K. Kelly, O. Ambacher, B. Dahlheimer, G. Groos, R. Dimitrov, H. Angerer, and M. Stutzmann, *Appl. Phys. Lett.*, 69, 1749, (1996)

¹⁷ W. S. Wong, T. Sands, and N. W. Cheung, Appl. Phys. Lett., 72, 599-601, (1998)

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第二章 蓝光垂直结构芯片

由于氮化物熔点高以及合成时还需保持极高的 N_2 气压，所以在制备体相的同质外延氮化物是很困难的。在成本及量产因素的考量下，不得不选取蓝宝石 (Al_2O_3) 作为衬底。由于蓝宝石导热性差以及电流拥挤效应，使得一般的 GaN 基的 LED 芯片不适用于大功率使用。而当前商业应用是越来越趋向于大功率应用，因此使得学界和业界不断加强对大功率 LED 芯片工艺——垂直 LED 结构芯片的开发。本文将介绍 GaN 基蓝光垂直结构芯片的相关工艺和我们在减少老化漏电方面所做的成果。

2-1 外延转移技术

GaN 基垂直芯片的快速发展，有赖于 Kelly 等人¹以及 Wong 等人²发明的 GaN 基的外延转移技术。其主要包括两部分：基板键合和激光剥离技术。

2-1-1 基板键合技术

因为直接对剥离了蓝宝石衬底的 GaN 进行工艺操作在当前的工艺水平下是不可行的。因此，一般在进行激光剥离前先将待转移过去的基板键合上去，也就是所谓的“paste-and-cut”³，其步骤包括 1) 将待键合基板和外延及其生长衬底键合；2) 将生长衬底从键合后的整体剥离。最基本的要求是键合界面的机械强度 (γ_{bond}) 要高于剥离界面 (γ_{cut}) 的机械强度，如图 2-1 所示。目前用的比较多的键合方法有：阳极键合 (anodic bonding)、直接键合 (directing bonding)、金属键合 (metal bonding) 以及聚合物键合 (polymeric bonding)。在对 GaN 于 Si 衬底或金属衬底进行键合时的关键是选择键合材料和处理热应力。键合材料需要粘结外延和新的衬底，因此其需要能够覆盖表面的微米级的粗糙度，与两种表面都能充分接触。其次，键合的温度不能太高，减少热应力对晶片的破坏以及温度对器件的影响。再次，键合材料的电阻不能太高，减少其对器件电学性能的影响。Wong 等人发展了以 Pd-In 为键合材料键合 GaN 和 Si⁴；Jasinski 等人报告了直接通过晶片融合键合 GaN/GaAs⁵；以及随着激光剥离技术和键合技术的发

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.