

文章编号: 0253-2239(2010)06-1749-06

# 不同基板 1 W 硅衬底蓝光 LED 老化性能研究

汪延明<sup>1</sup> 熊传兵<sup>1,2</sup> 王光绪<sup>1</sup> 肖宗湖<sup>1</sup> 熊贻婧<sup>1</sup> 江风益<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 南昌大学教育部发光材料与器件工程研究中心, 江西 南昌 330047)  
<sup>2</sup> 晶能光电(江西)有限公司, 江西 南昌 330029)

**摘要** 将硅(Si)衬底上外延生长的氮化镓(GaN)基 LED 薄膜,通过电镀的方法转移到铜支撑基板、铜铬支撑基板以及通过压焊的方法转移到新的硅支撑基板,获得了垂直结构蓝光 LED 器件,并对其老化特性进行了对比研究。研究表明,在三种基板中铜支撑基板的器件老化后光电特性最稳定。把这一现象归结于三种样品的应力状态以及基板热导率的不同,其中应力状态可能是影响器件可靠性的最主要因素。

**关键词** 发光二极管;氮化镓;硅衬底

**中图分类号** TN312<sup>+</sup>.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103006.1749

## Study on Aging Characterization of 1 W Epitaxy on Si Substrate Blue LED Based on Different Substrates

Wang Yanming<sup>1</sup> Xiong Chuanbing<sup>1,2</sup> Wang Guangxu<sup>1</sup> Xiao Zonghu<sup>1</sup>  
Xiong Yijing<sup>1</sup> Jiang Fengyi<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Education Ministry Engineering Research Center for Luminescence Materials and Devices,  
Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China  
<sup>2</sup> Lattice Power(Jiangxi) Corporation, Nanchang, Jiangxi 330029, China)

**Abstract** GaN-based light-emitting diodes (LED) thin films were successfully transferred from the original Si(111) substrate to Si substrate via bonding, copper substrate and copper-chromium substrate via electroplating respectively, and then the vertical-structure LED were fabricated. The aging characteristic of those LED was investigated. The result indicated that the devices of copper substrate have the most stable photoelectric properties. These different performances were attributed to the different stress states and thermal conductivities, and it was possible that the main influencing factor of reliability of LED was the stress state of the device.

**Key words** light-emitting diode(LED); GaN; Si substrate

## 1 引言

GaN 材料自 20 世纪 90 年代以来逐渐在显示、指示、背光和固态照明等领域广泛应用<sup>[1~4]</sup>,已形成巨大的市场。到目前为止,三种衬底(蓝宝石、碳化硅和硅)上制备的氮化镓(GaN)基发光二极管(LED)均已实现商品化。近几年来,硅衬底 GaN 基 LED 技术备受关注。因为硅(Si)衬底具有成本低、晶体尺寸大、易加工和易实现外延膜的转移等优点,在功率型 LED 器件应用方面具有优良的性能价格比。

很多研究组在 Si 衬底上生长了 GaN 外延膜<sup>[3~15]</sup>并且有些获得了器件<sup>[5,6,11~15]</sup>或者对 Si 基 GaN 相关性能进行了研究<sup>[3,4,7~13]</sup>。在 LED 的制备过程中,将 GaN 薄膜转移到新的支撑基板上制备垂直结构的器件,获得了比同侧结构器件更优良的光电性能<sup>[14~20]</sup>。

本文将 Si 衬底上生长的 GaN 外延膜通过电镀的方法转移到了铜支撑基板、铜铬支撑基板以及通过压焊的方法转移到 Si 支撑基板上,获得了垂直结

**收稿日期**: 2009-10-12; **收到修改稿日期**: 2009-12-28

**基金项目**: 国家 863 计划(2006AA03A128)和教育部长江学者与创新团队发展计划(IRT0730)资助课题。

**作者简介**: 汪延明(1981—),男,硕士研究生,主要从事 Si 衬底 GaN 基 LED 器件方面的研究。

E-mail: wym8105@163.com

**导师简介**: 江风益(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事宽禁带半导体发光材料与器件等方面的研究。

E-mail: jiangfy@ncu.edu.cn(通信联系人)

构发光器件,并对三种样品进行了老化对比研究。

## 2 实 验

实验用的外延片是在硅(111)衬底上用 MOCVD 方法生长的 2 in(50.8 mm)的蓝光 InGaN/GaN 多量子阱外延片,其芯片尺寸为  $1000\ \mu\text{m}\times 1000\ \mu\text{m}$ ,生长方法已有报道<sup>[6]</sup>。实验准备同炉生长的外延片三片,其中一片用压焊的技术及化学腐蚀的方法将 GaN 外延膜转移至 Si 基板上并获得发光器件,称为样品 A,另外两片用电镀及化学腐蚀的方法将 GaN 外延膜分别转移到电镀的铜基板和电镀的铜铬基板上并获得发光器件,分别称为样品 B、样品 C。三种样品除了外延膜转移方式及支撑基板不一样外,其他器件制作工艺都是一致的。

由于同类样品个体之间稍有差异,因此对样品 A、B、C 进行初测,分别选出有代表性的芯片进行实验及测试。每种芯片都为裸芯封装。通常尺寸为

$1000\ \mu\text{m}\times 1000\ \mu\text{m}$  的芯片工作电流为 350 mA,为了加速老化,对样品 A、B、C 常温下通直流电流 900 mA。用电源 KEITHLEY 2635 和光谱仪 Compact Array Spectrometer (CAS) 140 CT 测试了各样品老化前后的电流-电压( $I$ - $V$ )特性曲线、电致发光(EL)光谱、各样品在各电流下的相对光强等。

## 3 结果与讨论

### 3.1 $I$ - $V$ 特性分析

表 1 为三种样品老化前、老化 80,150 和 200 h 的  $V_f$  和  $I_r$  值,老化条件为常温 900 mA,其中  $V_f$  为 350 mA 下的电压值, $I_r$  为反向 10 V 下的漏电流值,通常反向漏电流  $I_r$  在反向 5 V 下测量,为比较结果,选择更苛刻的条件,在反向 10 V 下测量。图 1 是三种样品老化前、老化 80,150 和 200 h 后的  $I$ - $V$  特性曲线,分别为图 1(a)~(d)。图 1(a)显示

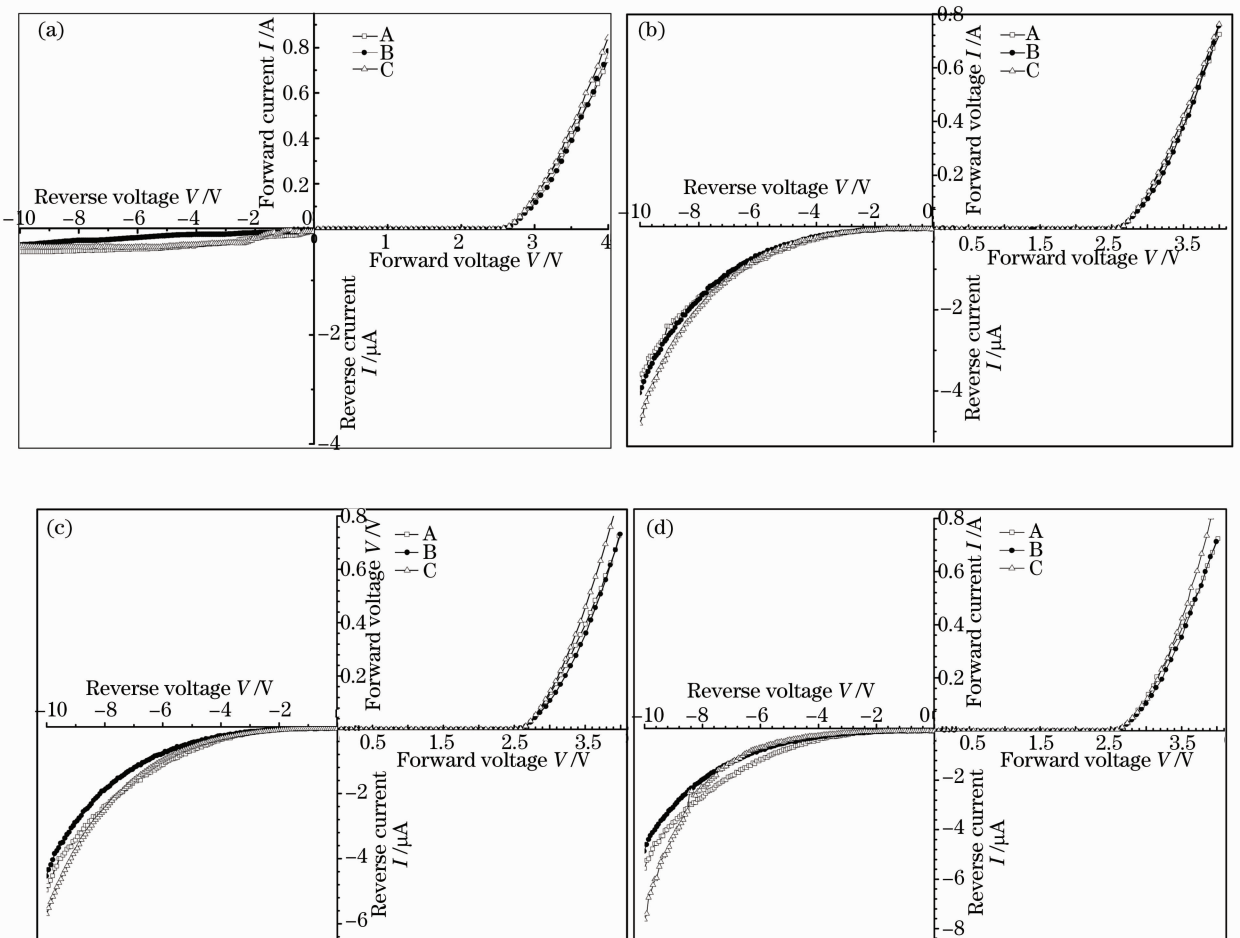


图 1 三种样品老化前后  $I$ - $V$  特性曲线

Fig. 1 Current-voltage characteristics curves of before and after aging of three types samples

了 A, B, C 三种样品在老化前都有较好的  $I$ - $V$  特性, 其开启电压在 2.5 V 左右, 反向 10 V 下电流都在  $10^{-9}$  A 数量级。老化 200 h 后三种样品在反向 10 V 下其漏电流  $I_r$  都比老化前明显增加。表 1 说明了经大电流 200 h 老化后相同反压(-10 V)下 B 样品的漏电流最小, A 样品次之, C 样品最大, 而且随着老化时间的推移, 三种样品在相同反压下的漏电流差别越来越大。InGaN MQW LED 在老化后正向电压稍有升高, 是因为大电流长时间老化使得裸露的 n 电极(铝)局部氧化从而导致接触电阻变大造成。老化后漏电变大的原因<sup>[21,22]</sup>为: InGaN LED

pn 结耗尽层的宽度主要由 p 型层载流子浓度决定, 芯片经过大电流长时间老化后, 由于 Mg-H 复合体的分解, 受主 Mg 被重激活, 使得 p 型载流子浓度升高, 导致耗尽层变窄, 反向偏置时势垒区变薄, 隧道击穿成分增多, 反向电流增加; 另外, 芯片经过大电流长时间老化后, 量子阱区缺陷密度增加, 反向偏置时有缺陷和陷阱辅助隧穿引起漏电流, B, A, C 三种样品热导率依次降低, 所以在老化时产生的缺陷和陷阱密度依次降低, 因此在相同反压下三种样品漏电流依次增大(如表 1 和图 1 所示)。

表 1 老化前后三种样品的  $V_f$  值和  $I_r$  值

Table 1  $V_f$  and  $I_r$  of three kinds of samples before and after aging

		Before aging	After aging for 80 h	After aging for 150 h	After aging for 200 h
A	$V_f/V$	3.40	3.44	3.43	3.45
	$I_r/\mu A(-10 V)$	-0.0098	-3.70	-4.97	-5.56
B	$V_f/V$	3.41	3.43	3.46	3.50
	$I_r/\mu A(-10 V)$	-0.0077	-4.05	-4.54	-4.87
C	$V_f/V$	3.38	3.39	3.37	3.42
	$I_r/\mu A(-10 V)$	-0.0091	-4.80	-5.70	-7.63

### 3.2 EL 光谱分析

图 2 是三种样品常温下 900 mA 持续老化 168 h 前后的 1, 10, 100, 500, 800, 1000 和 1200 mA 下的电致发光(EL)光谱图[图 2(a1)~(a3)]以及三种样品老化前后的 EL 波长随电流的变化关系图[图 2(b1)~(b3)], 图中实线表示老化前的光谱, 虚线表示老化后的光谱。图 2(a1)~(a3)展示了经过归一化处理老化前后的 EL 光谱, 三种样品老化前后各电流下的 EL 谱波形除了大电流下峰值波长有所红移外都没有明显变化。图 2(b1)~(b3)展示了老化前后三种样品的波长随电流的变化有明显差别, 其中 B 样品老化前后的波长随电流的变化关系几乎一致, 只是老化后同等电流下其波长稍有增加。A, B, C 三种样品由于基板热导率有差别, 在老化时各样品的结温不一样, 所以老化后相同电流下的波长漂移 C 样品最大, A 样品次之, B 样品最小。另外, 由于三种样品基板材质以及芯片转移方法不一样, 使得 GaN 外延膜转移后在新的基板上受到的应

力状况不一样。文献[23]研究表明, GaN 从硅衬底上通过压焊和化学腐蚀转移到新的硅基板上后整个 GaN 层受到的张应力减小, 量子阱 InGaN 层受到的压应力增大。用电镀的方法实现薄膜转移的 GaN 应力松弛更加彻底, 使得量子阱受到的压应力更大<sup>[24]</sup>, 所产生的极化电场更大, 从而导致能带倾斜更大, 因此载流子复合时释放光子的能量降低, 表现为 EL 波长更长。因此, 老化前后 EL 谱中压焊在硅基板上的 A 样品波长最短, C 样品次之, B 样品最长, 且 B 样品和 C 样品非常接近。图 2 还反映了老化前后从小电流到大电流下 B 样品的波长红移最大, 这可能与以下几个方面有关, 一方面结温升高使得 GaN 禁带宽度变小引起波长红移, 另一方面由于 B 样品应力松弛最彻底, 因此 B 样品量子阱受到的压应力最大, 所以 B 样品多量子阱区的极化效应最强, 极化效应产生强的内建电场, 此电场导致显著的量子限制斯塔克(Stark)效应, 引起发光波长的红移。

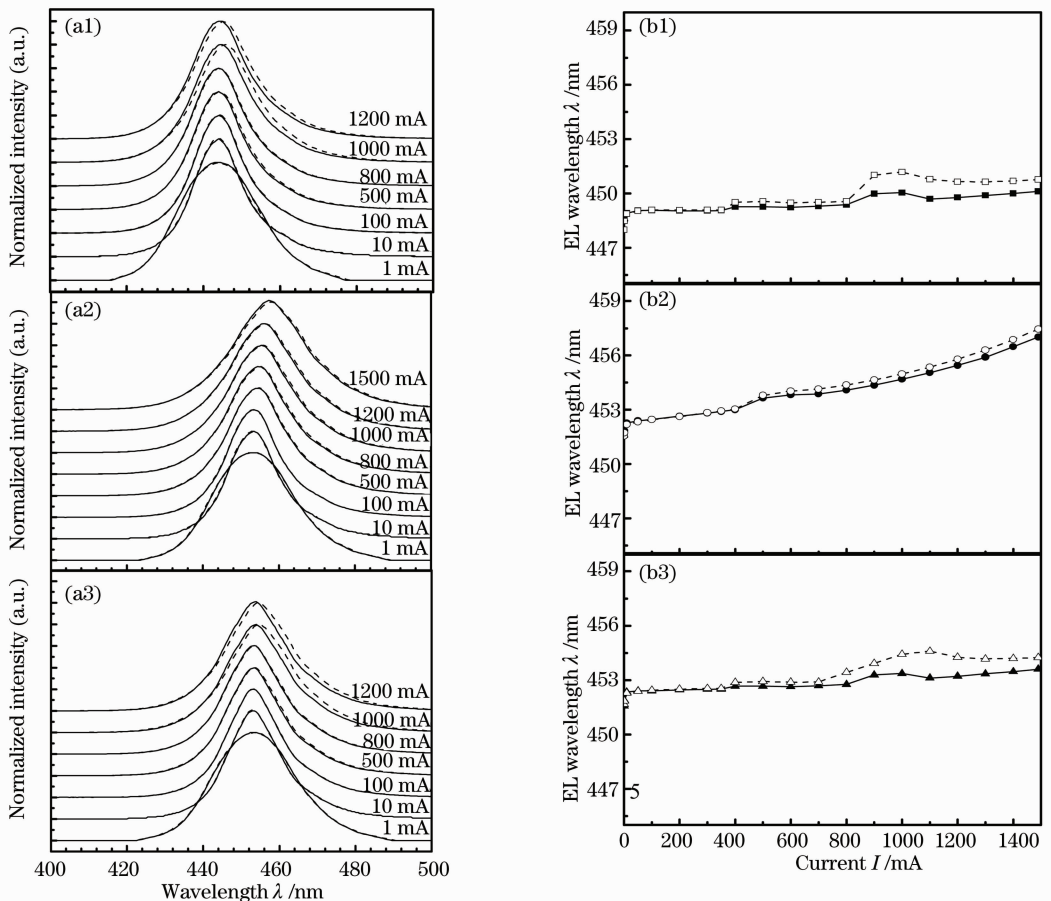


图2 三种样品 900 mA 常温老化 168 h 前后的 EL 谱图[(a1)~(a3)]及老化前后三种样品波长随电流的变化关系[(b1)~(b3)]

Fig. 2 EL spectrum of three samples before and after aging under 900 mA for 168 h at room temperature (a1)~(a3) and wavelength versus current of three kinds of samples before and after aging (b1)~(b3)

### 3.3 功率-电流( $L-I$ )关系分析

图3是350 mA电流下各样品相对光强随老化时间的变化关系,三种样品都以老化前的光强为100%。从图3中可以看到,A,B,C三种样品光强都随老化时间的增加而先增大后减小,其中以A样品在老化2 h后光强增加最多,随后随着老化的进行光强就开始减小了,而B,C样品分别在老化了32 h,10 h光强才开始下降,并且下降的趋势比A样品慢。而且可看出在常温900 mA老化后,A,B,C三种样品350 mA下光强都经过一个最大值然后减小,C样品减小最多,A次之,B样品的光强值虽在减小,但仍然比老化前的值大。此现象的原因为:MOCVD方法生长的GaN有部分受主Mg由于与

H形成Mg-H复合体而钝化<sup>[25]</sup>,Mg的激活率很低,导致空穴浓度较低,在大电流老化中,有部分Mg-H键被打断而使受主Mg被激活,从而空穴浓度增加,可能载流子浓度变得更加匹配,发光效率变高。另一方面,老化使GaN材料中位错、缺陷等非辐射复合中心密度升高,从而发光效率降低,光强下降。这两种机制相互竞争,在老化初期,Mg受主激活机制占主导,因此同等电流下三种样品光强都增加,随着老化的进行,位错、缺陷等非辐射复合中心增生机制逐渐占主导,因此大电流老化一段时间后三种样品光强都减小。三种样品光衰的快慢不同可能是由于三种样品量子阱的应力状态及支撑基板热导率不一样造成非辐射复合中心增生的程度不一样引起的。

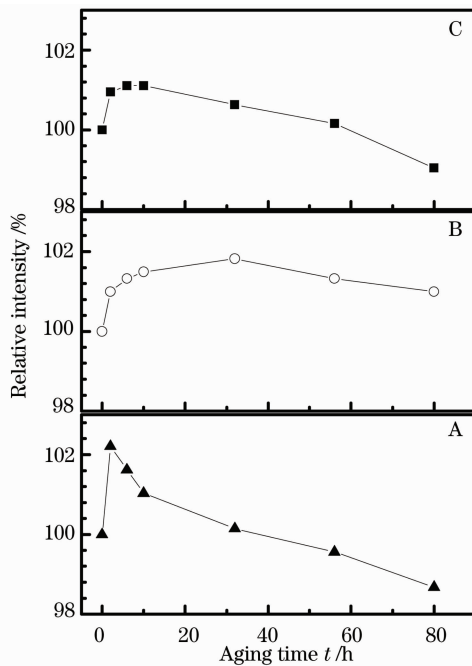


图 3 350 mA 电流下相对光强随常温 900 mA 老化后时间的变化关系(以老化前光强为 100%)

Fig. 3 Relative EL intensity change with aging time under 350 mA current (set the intensity before aging as 100%) after aging under 900 mA at room temperature

## 4 结 论

通过对硅衬底上外延生长的、转移到硅基板、铜基板和铜铬基板 GaN 基蓝光 LED 进行对比老化研究, 研究结果表明, 在同等电流下铜基板的器件 EL 波长最长, 是因为电镀转移到铜基板后 GaN 外延膜的应力松弛更彻底。通过对三种不同基板 LED 器件的老化可知影响 LED 可靠性的主要因素可能是其应力状态。研究了三种基板 LED 老化前后的  $I-V$  特性、 $L-I$  特性以及 EL 光谱, 对比得知铜基板器件具有更好的老化性能。

## 参 考 文 献

- 1 S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh. Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(13): 1687~1689
- 2 S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama *et al.*. InGaN multi-quantum-well structure laser diodes grown on MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> substrates[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(15): 2105~2107
- 3 H. Tang, S. Haffouz, J. A. Bardwell. Si(111) substrates as highly effective pseudomasks for selective growth of GaN material and devices by ammonia-molecular-beam epitaxy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(17): 172110-1
- 4 R. K. Debnath, R. Meijers, T. Richter *et al.*. Mechanism of molecular beam epitaxy growth of GaN nanowires on Si(111) [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(12): 123117
- 5 S. Guha, N. A. Bojiazuk. Ultraviolet and violet GaN light emitting diodes on silicon [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **72**(4): 415~417
- 6 Chunlan Mo, Wenqing Fang, Yong Pu *et al.*. Growth and characterization of InGaN Blue LED structure on Si (111) by MOCVD[J]. *J. Cryst. Growth*, 2005, **285**: 312~317
- 7 M. Poschenrieder, F. schulze, J. Blasing *et al.*. Bright blue to orange photoluminescence emission from high-quality InGaN/GaN multiple-quantum-wells on Si(111) substrates[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(9): 1591~1593
- 8 Z. Yang, R. N. Wang, S. Jia *et al.*. Mechanical characterization of suspended GaN microstructures fabricated by GaN-on-patterned-silicon technique [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(4): 041913-1
- 9 S. A. Nikishin, N. N. Faleev, V. G. Antipov *et al.*. High quality GaN grown on Si(111) by gas source molecular beam epitaxy with ammonia [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(14): 2073~2075
- 10 K. Fehse, A. Dadgar, A. Krtischil *et al.*. Impact of thermal annealing on the characteristics of InGaN/GaN LEDs on Si(111) [J]. *J. Cryst. Growth*, 2004, **272**: 251~256
- 11 Xiong Chuanbing, Jiang Fengyi, Fang Wenqing *et al.*. Different properties of GaN-based LED grown on Si(111) and transferred onto substrate [J]. *Science in China; Series E Technological Sciences*, 2006, **49**(3): 313~321
- 12 Xiong Chuanbing, Jiang Fengyi, Fang Wenqing *et al.*. The characteristics of GaN-based blue LED on Si substrate[J]. *J. Lumin.*, 2007, **122-123**: 185~187
- 13 A. Dadgar, M. Poschenrieder, J. Blasing *et al.*. Thick crack-free blue light-emitting diodes on Si(111) using low-temperature AlN interlayer and in situ Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub> masking [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(20): 3670~3672
- 14 Su Liwei, You Da, Cheng Haiying *et al.*. Characterization of high-power GaN-based green LED on Si substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1066~1069
- 苏丽伟, 游 达, 程海英等. Si 衬底功率型 GaN 基绿光 LED 性能[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1066~1069
- 15 Zhou Yinhua, Tang Yingwen, Rao Jianping *et al.*. Improvement for extraction efficiency of vertical GaN-based LED on Si substrate by photo-enhanced wet etching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 252~255
- 周印华, 汤英文, 饶建平等. 光增强湿法刻蚀提高 Si 衬底垂直结构 GaN 基 LED 的出光效率[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 252~255
- 16 S. J. Wang, K. M. Uang, S. L. Chen *et al.*. Use of patterned laser lift-off process and electroplating nickel layer for the fabrication of vertical-structured GaN-based light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(1): 011111-1
- 17 Y. S. Wu, J. H. Cheng, W. C. Peng *et al.*. Effects of laser sources on the reverse-bias leakages of laser lift-off GaN-based light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(25): 251110-1
- 18 A. David, T. Fujii, B. Moran *et al.*. Photonic crystal laser lift-off GaN light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(13): 133514-1
- 19 C. N. Han, T. L. Chou, C. F. Huang *et al.*. Sapphire-removed induced the deformation of high power InGaN light emitting diodes [C]. Euro Sim E2008, 2008
- 20 Y. C. Jiunn, F. C. Chen, C. C. Chao *et al.*. Highly reliable and bright GaN vertical LED on metal alloy substrate using corrugated pyramid shaped surface technology [C]. *SPIE*, 2008, **6984**: 69840X-1
- 21 G. Meneghesso, S. Levada, E. Zanoni *et al.*. Failure modes and mechanisms of DC-Aged GaN LEDs [J]. *Phys. Stat. Sol(a)*,

- 2002, **194**(2): 389~392
- 22 T. Hashizume, J. Kotani, H. Hasegawa. Leakage mechanism in GaN and AlGaIn Schottky interfaces[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(24): 4884~4886
- 23 Xiong Chuanbing, Jiang Fengyi, Fang Wenqing *et al.*. Change in stress of GaN light-emitting diode films during the process of transferring the film from the Si(111) growth substrate to new substrate[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(5): 3176~3181  
熊传兵, 江风益, 方文卿 等. 硅衬底 GaN 蓝色发光材料转移前后应力变化研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(5): 3176~3181
- 24 Xiong Chuanbing. The Study of the Properties of Si Substrate GaN LED Associated with the Film Transferring[D]. Nanchang: Nanchang University, 2008. 61~93  
熊传兵. 硅衬底 GaN 基 LED 转移前后相关性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008. 61~93
- 25 W. Gotz, N. M. Johnson, J. Walker *et al.*. Hydrogen passivation of Mg acceptors in GaN grown by metalorganic chemical vapor deposition [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(18): 2666~2668

## 光 学 界 百 科 全 书

——《光学手册》(新版)面世在即

五十年前,随着第一台红宝石激光器的问世,光学进入到一个全新的领域和崭新的发展时代。五十年间,光学界发生了史无前例、翻天覆地的变化,毫不夸张地说,光学已经深入到我们社会生活的每一个角落,影响着所有人的生活。

如今,从事光学研究的学者越来越多,光学专业的学生越来越多,应用光学的行业也越来越多。此时,一本内容丰富全面、涵盖光学领域所有学科的光学百科全书成为相关人士日益迫切的需求。在这种需求下,新版《光学手册》应运而生,经历六年反复酝酿,四年悉心编撰,该书将于近期与广大读者见面。

新版《光学手册》是原《光学手册》(25章,230万字)的修订版。原书出版于1986年,出版后得到了严济慈、王大珩、龚祖同等老一辈科学家的高度评价,称之为填补国内空白,“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”,手册迄今仍是许多光学技术人员案头必备的权威参考书。

但是,在原《光学手册》出版后的25年间,光学理论和技术飞速发展,发生了质的飞跃,完成了从传统光学向现代光学的转变。现代光学包涵传统光学、光电子学和光子学。原书中全部章节内容需要更新,新发展起来的涉及光学的边缘学科需要增添。因此,新版《光学手册》绝非传统意义上的修订,而是一个创新的版本。

“一本有国际影响力的能反映时代脉搏的观念创新的学术性工具书”——这是编者对新版《光学手册》的定位。

新版《光学手册》包含38章、49个光学学科、460万余字,其内容精深到位,基本涵盖了目前光学领域所涉及的所有学科,为光学工作者和非光学科技人员提供了几乎所有光学分科的基本概念、基本原理、基本方法、基本公式和基本数据,翔实而新颖,实用而方便,可谓内容丰富,近乎光学百科全书而更为精深之,实属又一部高水平学术专著。在本书中,诸如电磁光学、纳米光子学、生物光子学、瞬态光学、同步辐射光学、太赫兹波光学、中子光学、非成像光学及自由曲面光学、近场光学和金属表面等离子体光学之类新兴光学学科也将与大家见面。