

晶圆键合和激光剥离工艺对 GaN 基垂直结构发光二极管芯片残余应力的影响

王宏 云峰 刘硕 黄亚平 王越 张维涵 魏政鸿 丁文 李虞锋 张烨 郭茂峰

Effect of wafer bonding and laser liftoff process on residual stress of GaN-based vertical light emitting diode chips

Wang Hong Yun Feng Liu Shuo Huang Ya-Ping Wang Yue Zhang Wei-Han Wei Zheng-Hong Ding Wen Li Yu-Feng Zhang Ye Guo Mao-Feng

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 028501 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.028501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.028501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于反应动力学的 GaN LED 参数退化模型的研究

[The investigation of LED degradation model based on the chemical kinetics](#)

物理学报.2013, 62(21): 218503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.218503>

白光发光二级管用红色荧光粉 $\text{LiSrBO}_3:\text{Eu}^{3+}$ 的制备与发光性能研究

[Preparation and photoluminescence of \$\text{LiSrBO}_3:\text{Eu}^{3+}\$ red-emitting phosphors for white leds](#)

物理学报.2013, 62(10): 108504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.108504>

基于缺陷光子晶体结构的 GaN 基发光二极管光提取效率的有关研究

[Study on the light extraction efficiency of GaN-based light emitting diode by using the defects of the photonic crystals](#)

物理学报.2012, 61(20): 208502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.208502>

渐变型量子阱垒层厚度对 GaN 基双波长发光二极管发光特性调控的研究

[The investigation of performance improvement of GaN-based dual-wavelength light-emitting diodes with various thickness of quantum barriers](#)

物理学报.2012, 61(17): 178504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.178504>

硅衬底 InGaN/GaN 基蓝光发光二极管 droop 效应的研究

[Efficiency droop in blue InGaN/GaN light emitting diodes on Si substrate](#)

物理学报.2012, 61(17): 178503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.178503>

晶圆键合和激光剥离工艺对GaN基垂直结构发光二极管芯片残余应力的影响*

王宏¹⁾²⁾ 云峰^{1)2)3)†} 刘硕³⁾ 黄亚平²⁾ 王越²⁾ 张维涵²⁾ 魏政鸿²⁾
丁文¹⁾²⁾ 李虞锋¹⁾²⁾ 张焱²⁾ 郭茂峰²⁾³⁾

1)(西安交通大学电子与信息工程学院, 电子物理与器件教育部重点实验室, 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安 710049)

2)(西安交通大学电子与信息工程学院, 固态照明工程研究中心, 西安 710049)

3)(陕西新光源科技有限责任公司, 西安 710077)

(2014年8月16日收到; 2014年9月9日收到修改稿)

GaN基发光二极管(LED)中的残余应力状态对器件的性能和稳定性有很大影响. 通过使用三种不同的键合衬底(Al_2O_3 衬底, CuW衬底和Si衬底)以及改变键合温度(290°C , 320°C , 350°C 和 380°C), 并且使用不同的激光能量密度(875 , 945 和 $1015\text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$)进行激光剥离, 制备了不同应力状态的GaN基LED器件. 对不同条件下GaN LED进行弯曲度、Raman散射谱测试. 实验结果表明, 垂直结构LED中的残余应力的状态是键合衬底和键合金属共同作用的结果, 而键合温度影响着垂直结构LED中的残余应力的大小. 激光剥离过程中, 一定能量密度下激光剥离工艺一般不会对芯片中的残余应力造成影响, 但是如果该工艺对GaN层造成了微裂缝, 则会在一定程度上起到释放残余应力的作用. 使用Si衬底键合后, 外延蓝宝石衬底翘曲变大, 对应制备的GaN基垂直结构LED中的残余应力为张应力, 并且随着键合温度的上升而变大; 而 Al_2O_3 和CuW衬底制备的LED中的残余应力为压应力, 但使用 Al_2O_3 衬底键合制备的LED中压应力随键合温度上升而一定程度变大, CuW衬底制备的LED中压应力随键合温度上升而下降.

关键词: 残余应力, 垂直结构发光二极管, 晶圆键合, 激光剥离

PACS: 85.60.Jb, 68.35.Gy, 79.20.Eb

DOI: 10.7498/aps.64.028501

1 引言

GaN材料由于具有大的禁带宽度、好的化学稳定性以及高的电子迁移率等特点而被用于制备高效率的发光二极管(light emitting diode, LED)、激光二极管(laser diode, LD)以及高功率器件等^[1-3]. 其中近些年来对于大功率高亮度的GaN基LED的研究有了飞速的进展^[4-7]. 因为蓝宝石材料化学稳定性和热稳定性出色, 同时相比于SiC衬底和GaN衬底等价格低廉, 所以商业上通常使用金属有机物化学气相沉积(metal organic chemical vapor deposition, MOCVD)的方法在光

滑的蓝宝石衬底表面上生长GaN基LED^[8,9]. 由于蓝宝石材料与GaN材料在晶格常数失配将近13.8%, 热膨胀系数(coefficient of thermal expansion, CTE)的失配更是达36%, 因此室温下蓝宝石衬底上GaN材料受到很强的压应力, 并且伴随晶圆的翘曲^[10,11]. 同时因为蓝宝石的导热和导电性能差, 制成的平面结构LED存在着电流拥挤和散热不良的现象, 这些都阻碍了GaN基LED向大功率方向的发展. 因此通过使用激光剥离(laser lift-off, LLO)等手段将GaN从初始外延的蓝宝石衬底转移到一个新的导热导电性能良好的基板上, 制备而成的垂直结构GaN基LED是实现大功率目标的很好的选择^[12-15].

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2014AA032608)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fyun2010@mail.xjtu.edu.cn

在制备垂直结构LED过程中,键合工艺和激光剥离工艺会使GaN基LED芯片中的应力有较大的变化.由于键合衬底与GaN材料的CTE不同,从键合温度降到室温情况下,键合工艺中对GaN基LED产生一个额外附加的热应力.而激光剥离工艺中,由于蓝宝石衬底界面处GaN吸收激光能量而分解,使得GaN层和原始蓝宝石外延衬底分离,此时由蓝宝石衬底产生的压应力将会得到释放^[16].有研究表明,GaN基LED中的残余应力状态不仅会明显影响器件的电学和光学特性(例如辐射复合效率,发光波长等),而且还会影响器件的可靠性和稳定性^[17,18].而之前有关垂直结构LED中应力的研究多集中于使用Si衬底或者电镀Cu层作为键合转移衬底^[19,20],并且很少有关于键合温度以及LLO过程对LED芯片中残余应力影响的研究,所以充分了解晶圆键合和激光剥离工艺与残余应力之间的关系十分重要,而这正是本文所要研究的内容.

本文选取了三种不同CTE的转移衬底(Al_2O_3 衬底, CuW衬底和Si衬底)作为参考衬底,并在不同键合温度(290 °C—380 °C进行键合,制备出相应条件的GaN基垂直结构LED.通过测量GaN基垂直结构LED制备过程中的弯曲度和拉曼散射谱(Raman scattering spectra, Raman散射谱),比较对应谱图的前后变化以及实际残余应力大小,研究了不同CTE的键合衬底,不同键合温度条件对GaN基垂直结构LED芯片中残余应力和弯曲度的影响;同时研究LLO工艺中的激光能量密度变化对器件的残余应力的影响.

2 实验

本文中使用的GaN基LED外延结构是通过MOCVD在光滑的蓝宝石衬底表面上外延生长,其中LED器件结构包括25 nm的GaN缓冲层,2 μm 的非故意掺杂GaN层,3 μm 的n-GaN层,5对GaIn/InGaIn结构的多量子阱层,20 nm的Al-GaN电子阻挡层和300 nm的p-GaN层.首先通过

使用电感耦合等离子刻蚀(ICP)将GaN LED外延层刻蚀成1.3 mm \times 1.3 mm的LED芯片,使用电子束蒸发在p-GaN层上沉积一层Ni/Ag/Ti/Au的p型欧姆接触层,其中各层的优化厚度在之前研究中已有讨论^[21].将三种不同CTE的键合衬底(Al_2O_3 衬底, CuW衬底和Si衬底)通过在有机溶液和酸性溶液中清洗干净,然后使用热蒸发将键合金属AuSn合金蒸镀到键合衬底和p-GaN的欧姆接触层上.随后再通过使用键合设备(Tbon-100)将转移衬底和做好GaN基LED芯片的蓝宝石衬底分别在290 °C, 320 °C, 350 °C, 380 °C键合温度下键合在一起,其他键合参数包括键合压力240 kg,键合保持时间200 s.键合工艺完成以后,一束能量密度为875 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的KrF准分子激光(JPSA IX-6600, 248 nm, 25 ns)从蓝宝石衬底一侧射入,内界面处的GaN缓冲层吸收激光能量升温分解成Ga金属和 N_2 ,实现GaN基LED芯片从蓝宝石衬底到新衬底的转移.同时为了探讨激光能量密度对GaN基LED器件中残余应力的影响,能量密度分别为(875, 945和1015 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$)的KrF准分子激光被用于290 °C下与CuW衬底键合的GaN基LED芯片的剥离.

为了得到在不同键合衬底以及不同键合条件下GaN基LED中残余应力的变化,使用不同键合衬底的GaN基LED芯片在键合后以及激光剥离工艺后的Raman散射谱以及蓝宝石衬底的弯曲度都被测量,同时针对不同激光能量密度剥离后的GaN基LED芯片同样进行了Raman散射谱测量.

3 实验结果与讨论

3.1 弯曲度分析

衬底的弯曲度(bow)是指衬底中心与边缘在垂直方向上的差值.为了得到衬底的弯曲度,如图1所示,通过测量衬底正反两面中心的厚度 h_1 和 h_2 .则衬底在该状态下的弯曲度为

$$\text{bow} = h_2 - h_1. \quad (1)$$

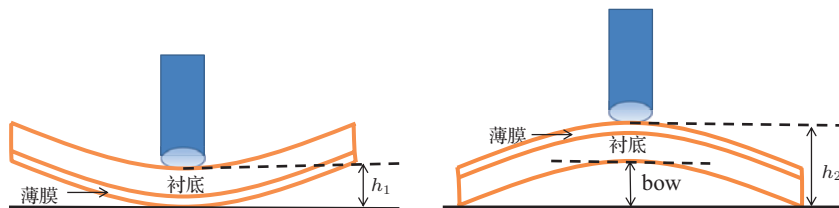


图1 衬底弯曲度测量示意

在实验中, 在激光剥离工艺之前测量弯曲度时, 将蓝宝石衬底向上测得的厚度表示为 h_1 , 键合衬底向上测得的厚度表示为 h_2 ; 激光剥离工艺之后, 则将 GaN 层向上测得的厚度表示为 h_1 , 键合衬底向上测得的厚度表示为 h_2 , 而弯曲度的测量是通过使用高精度微分表 (精度为 $1 \mu\text{m}$) 在一个校准后

的水平基面上测定的. 键合之前测量得到 Al_2O_3 衬底, CuW 衬底和 Si 衬底的厚度分别为 $392, 210$ 和 $440 \mu\text{m}$, 且初始弯曲度均为 $0 \mu\text{m}$. 表 1 中为三种衬底在 $290 \text{ }^\circ\text{C}, 320 \text{ }^\circ\text{C}, 350 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $380 \text{ }^\circ\text{C}$ 键合温度条件下激光剥离前后的弯曲度数据. 图 2 (a), (b) 为对应条件下激光剥离前后的弯曲度数据图形.

表 1 不同键合温度下 3 种键合衬底在激光剥离工艺前后的弯曲度

键合温度/ $^\circ\text{C}$	Si 衬底弯曲度/ μm		Al_2O_3 衬底弯曲度/ μm		CuW 衬底弯曲度/ μm	
	LLO 前	LLO 后	LLO 前	LLO 后	LLO 前	LLO 后
290	403	245	-4	-38	33	-120
320	465	Failed	3	-35	74	-101
350	514	Failed	-2	-42	108	-92
380	543	Failed	-3	-39	158	-70

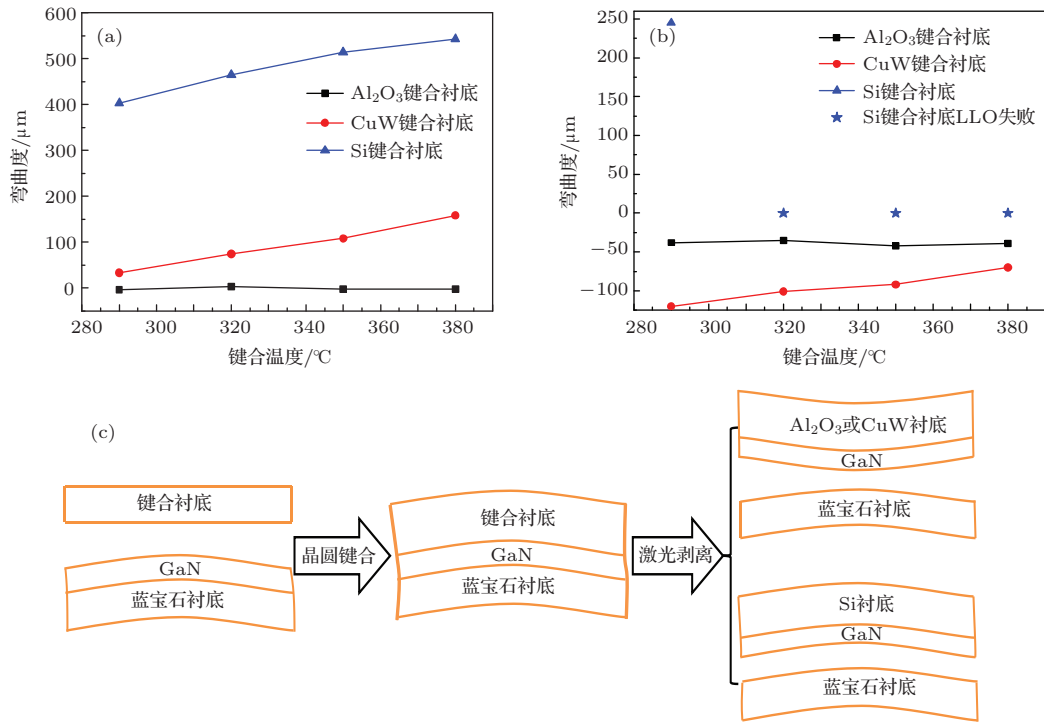


图 2 不同键合温度下 3 种键合衬底在激光剥离工艺前后的弯曲度以及剥离后图像 (a) 激光剥离工艺前衬底弯曲度; (b) 激光剥离工艺后衬底弯曲度; (c) 三种衬底键合剥离弯曲示意图; (d) $290 \text{ }^\circ\text{C}$ 下 CuW 作为键合衬底激光剥离后图像; (e), (f) $290 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $320 \text{ }^\circ\text{C}$ 下 Si 作为键合衬底激光剥离后图像

对于实验中使用的外延片,测得其弯曲度为 $20\ \mu\text{m}$,说明了外延的 Al_2O_3 衬底对 GaN 层产生了一个压应力.通过观察图 2(a),可以发现三种键合衬底在晶圆键合后的弯曲度呈现较大的差异.其中使用 Al_2O_3 衬底键合后, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 三层结构的弯曲度随着键合温度的变化仅仅在 $-4\text{--}3\ \mu\text{m}$ 范围内波动;而对于 CuW 衬底和 Si 衬底在键合工艺之后,对应三层结构的弯曲度均大于最初外延片的 $20\ \mu\text{m}$,并且随着键合温度的上升而变大,尤其对于 Si 衬底,其键合后的弯曲度甚至达到了 $400\ \mu\text{m}$ 以上. Al_2O_3 , CuW, Si 和 GaN 的 CTE 分别为 $7.6, 5, 2.6$ 和 $5.6\ \text{ppm}\cdot\text{C}^{-1}$ [22,23],而这种现象主要是由于三种衬底的 CTE 与 GaN 材料不同而在键合工艺中产生热应力造成的.对于键合的 Al_2O_3 衬底,在键合温度下表面与 GaN 表面黏结在一起,随着温度逐渐下降至室温,键合的 Al_2O_3 衬底由于 CTE 比 GaN 大,会对 GaN 施加一个由于热产生的压应力,该热压应力会使得 GaN 向键合衬底一侧弯曲,所以与最初外延片的弯曲方向相反,使得最终键合得到的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 三层结构弯曲度减小.而对于键合的 CuW 衬底,由于其 CTE 小于 GaN,所以键合工艺后, CuW 衬底由于温度下降而产生的收缩小于 GaN,会对 GaN 施加一个热张应力,使得 GaN 向 CuW 衬底一侧弯曲凸起,与最初外延片的弯曲方向相同.因此对应键合后得到的 $\text{CuW}/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 三层结构弯曲度变大,同时由于键合温度的上升,相应的热张应力更大,所以对应的弯曲度也随着温度上升而上升.和 CuW 衬底相同, Si 衬底的 CTE 小于 GaN,所以 Si 衬底在键合之后的 $\text{Si}/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 三层结构弯曲度也变大,只是由于两者的 CTE 差值过大,使得 Si 衬底对 GaN 施加的热张应力更大,所以对应的弯曲度远远大于 Al_2O_3 和 CuW 两种衬底.

图 2(b) 则是键合后的三层结构进行激光剥离之后键合衬底的弯曲度.可以看到,当键合衬底为 Al_2O_3 时,在 LLO 工艺以后, Al_2O_3 衬底的弯曲度均在 $-38\ \mu\text{m}$ 左右,相比于键合前的弯曲方向, Al_2O_3 衬底此时向 GaN 一侧凸起.之前已经分析键合工艺后作为转移的 Al_2O_3 衬底会对 GaN 层产生一个压应力,但是由于外延的 Al_2O_3 衬底同样对 GaN 产生了压应力,使得键合后的弯曲度很小,当 LLO 工艺后,外延的 Al_2O_3 衬底对 GaN 的压应力得到了释放,此时 GaN 层只受到键合的 Al_2O_3 衬底施加的热压应力,所以衬底向 GaN 一层凸起(图 2(c)).对于 LLO 工艺之后的 CuW 键合衬底

(图 2(d)),其弯曲方向同样发生了反转, $290\ \text{C}$ 下弯曲度达到 $-120\ \mu\text{m}$,并且随着键合温度的上升,衬底弯曲度下降.但是通过之前的分析, CuW 衬底对 GaN 层施加了一个热张应力,则在 LLO 后弯曲方向应该和键合后方向相同,不会出现弯曲方向改变的情况.这主要是因为 CuW 衬底是金属合金,在 LLO 工艺中 GaN 分解为 N_2 ,气体对 CuW 有一个反向的冲击,导致 CuW 衬底产生反向的塑性形变,使得衬底的弯曲方向不是按照热张应力分析的方向,而是呈现向 GaN 一侧凸起的弯曲.同时由于键合温度上升导致 CuW 衬底弯曲度上升,在相同的 N_2 气压的冲击下,较大弯曲度的衬底在 LLO 后的弯曲度偏小,所以对于 LLO 后的 GaN/CuW 衬底两层结构的弯曲度呈现了随键合温度的上升而减小的趋势.对使用 Si 衬底键合后的外延结构进行 LLO 时,只有在 $290\ \text{C}$ 下键合的结构保持了 Si 衬底的大体完整,如图 2(e),衬底的弯曲度达到 $245\ \mu\text{m}$,而对于 $320\ \text{C}$ 以及以上温度键合的结构剥离都造成了 Si 衬底的严重破损,如图 2(f).这主要是因为 Si 衬底和 GaN, Al_2O_3 衬底的 CTE 差值过大,导致键合后衬底弯曲严重,所以在 LLO 工艺中,已经剥离区域的 Si 衬底不再受到 Al_2O_3 衬底的束缚,有向减小弯曲方向的趋势,而未剥离的区域依然保持较大弯曲度的状态,因而已剥离区域和未剥离区域的 Si 衬底所受到应力状态有很大不同,当应力差值的强度超过 Si 衬底可以承受的范围, Si 衬底就会破裂,造成 LLO 失败.但是当键合后衬底弯曲程度在 Si 衬底可承受的范围之内, LLO 后的 Si 衬底由于依然对 GaN 施加了张应力,所以 GaN/Si 衬底两层结构依然是向 Si 衬底一侧凸起.

3.2 Raman 散射光谱分析

Raman 散射光谱通常被用来测量外延薄膜中的应力大小,其中 E_2 峰的峰值位置向高波数移动代表薄膜受到压应力,反之受到应力为张应力.图 3 为不同键合温度下三种不同键合衬底上 GaN LED 芯片在 LLO 前后 Raman 散射峰值位移图像.可以看到在键合之后,使用 Al_2O_3 衬底键合的 GaN LED 芯片的 Raman 位移相比于外延片时的 $569.36\ \text{cm}^{-1}$ (图 3 中蓝线) 向高波数方向移动,而 CuW 衬底和 Si 衬底键合后的 Raman 位移均向低波数方向漂移,其中使用了 Si 衬底键合后的波数漂移量达到 $0.6\ \text{cm}^{-1}$ 以上.从图 3 中可以得到 Al_2O_3 衬底键合后对 GaN 施加了一个额外的压应

力, 而CuW衬底和Si衬底对GaN施加了一个张应力, 这和之前通过弯曲度分析的结果相同. LLO后, 由于外延生长时的Al₂O₃衬底与GaN分离, 外延衬底对GaN施加的压应力得到释放, 所以三种衬底上的GaN LED芯片的Raman散射峰值位移均向低波数方向移动. 通过与无应力条件下GaN的Raman散射峰值位移568 cm⁻¹(图3中绿线)相比, 可以得到使用Al₂O₃衬底和CuW衬底作为转移衬底制备的GaN LED芯片中的残余应力为压应力, 而使用Si衬底制备的芯片中的残余应力为张应力, 并且Al₂O₃衬底键合制备LED芯片的压应力随键合温度的上升呈现上升趋势, CuW衬底上LED芯片的压应力随键合温度上升而下降, Si衬底上的LED芯片中的张应力随键合温度上升而变大.

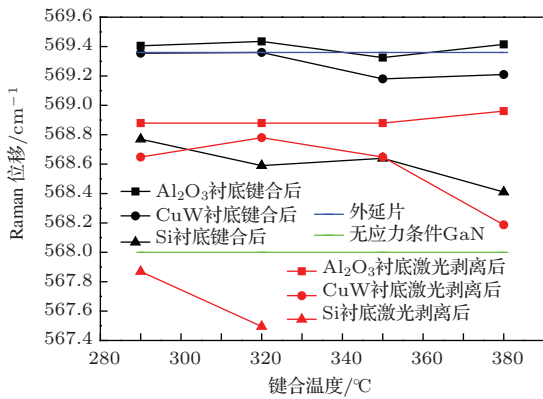


图3 (网刊彩色) 不同键合温度下三种不同衬底激光剥离前后Raman散射峰值位移图像

图4为三种衬底在290 °C下键合后以及LLO后GaN LED芯片的Raman散射谱. 可以看到采用Al₂O₃, CuW和Si衬底键合后LED芯片的Raman散射峰值位移分别为569.37, 569.24和568.78 cm⁻¹, 所以键合工艺后键合衬底对GaN层均施加了一定的应力, 其中Si衬底的键合对GaN层施加了一个明显的张应力. 而在LLO工艺后, 采用Al₂O₃, CuW和Si衬底键合后LED芯片的Raman散射峰值位移分别为568.96, 568.78和567.87 cm⁻¹. 通过公式

$$\sigma_{\text{GaN}} = \Delta\omega / 2.56 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{GPa}^{-1} [24], \quad (2)$$

其中 σ_{GaN} 为GaN中应力, $\Delta\omega$ 为Raman散射峰值位移差值, 可以得到相比于无应力条件下GaN的Raman位移568 cm⁻¹, 对应芯片中的残余应力分别为压应力375 MPa, 压应力304 MPa和张应力51 MPa.

同样通过公式:

$$\sigma_{\text{therm}} = (\alpha_{\text{sub}} - \alpha_{\text{GaN}}) \cdot \Delta T \cdot Y_{\text{GaN}}, \quad (3)$$

其中 σ_{therm} 表示键合过程产生的热应力, α_{sub} 和 α_{GaN} 分别为键合衬底和GaN层的CTE, ΔT 为键合温度和室温的差值, 约为265 °C, Y_{GaN} 表示GaN的杨氏模量, 为200 GPa [20]; 可以算得在290 °C键合条件下, Al₂O₃, CuW和Si衬底对GaN产生的热应力为105 MPa (压应力), -32 MPa (张应力)和-191 MPa (张应力). 而将LED芯片中残余应力大小与对应衬底产生的热应力大小相比较, 可以发现芯片的残余应力中还有一个额外的压应力作用. 因为制备GaN LED芯片中所采用的键合金属为AuSn合金, 而AuSn合金的CTE高达14—16.4 ppm·°C⁻¹, 所以在键合工艺过程中AuSn合金同样会对GaN层产生一个很强的压应力. 如果仅仅考虑AuSn合金作用, 在290 °C下键合对GaN产生的压应力高达445 MPa, 但是由于AuSn合金的厚度等影响, 其产生的压应力将小于该值. 所以LED芯片中的残余应力不仅和键合所使用的衬底有关, 还和键合的温度以及键合金属有关. 而键合衬底和键合金属对LED芯片施加的应力与LED芯片中残余应力的量化关系还有待继续研究.

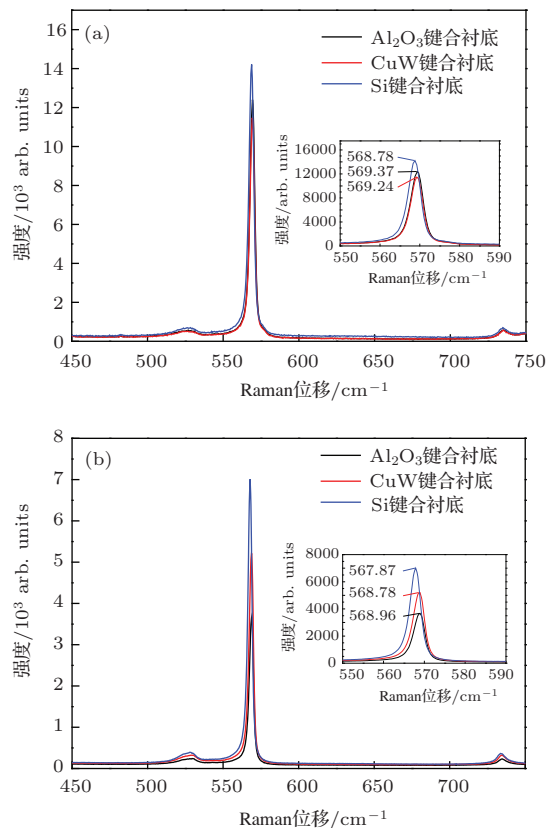


图4 (网刊彩色) (a) 290 °C下键合后三种衬底上GaN LED芯片Raman散射谱; (b) 290 °C下键合, 激光剥离后三种衬底上GaN LED芯片Raman散射谱

3.3 激光能量密度影响分析

使用能量密度分别为 875, 945 和 1015 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的 KrF 准分子激光对 290 $^{\circ}\text{C}$ 下 CuW 衬底键合的 GaN LED 芯片进行剥离, 对剥离后完整芯片的中心(如图 5(b) 绿点处)和破裂芯片的裂缝处(如图 5(c) 绿点处)进行 Raman 散射谱测量, 其结果如图 5(a).

可以发现使用了三种不同激光能量密度剥离的 GaN LED 芯片测得的 Raman 散射峰值位移均为 568.78 cm^{-1} , 并没有随激光能量密度的改变而发生漂移. 这是因为 GaN LED 芯片在键合工艺之后, 键合金属和键合衬底从 p-GaN 一侧已经施加了一个固定的热应力, 在 LLO 工艺过程中, 尽管外延 Al_2O_3 衬底界面处的 GaN 吸收激光能量温度升高而分解, 但是热量的传递距离仅仅有 $1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$ [22], 不会对 p-GaN 一侧温度产生影响, 所以键合金属和键合衬底对 GaN LED 芯片施加的热应力不会发生改变, 进而测得的 Raman 散射峰值位移不随剥离

激光的能量密度发生移动. 但是 LLO 过程中, 因为 GaN 分解出的 N_2 会在一个极短的时间内对 LED 芯片产生巨大的气体冲击, 会使得芯片的一部分区域从键合层界面与衬底分离, 失去了衬底的支撑和保护而发生突起和破裂(如图 5(c)), 通过对裂缝处 GaN 进行 Raman 散射谱测量, 发现峰值位移向低波数方向移动, 因此对于破损的 GaN LED 芯片, 其受到的键合热应力得到释放. 图 5(d), (e) 和 (f) 分别为使用能量密度为 875, 945 和 1015 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 激光剥离后衬底上芯片图像, 可以明显发现随着激光能量密度的上升, 破损芯片比例逐渐增加, 这主要是因为随着激光能量密度的增加, 在 LLO 过程中分解的 GaN 将会更多, 进而产生的 N_2 量也会增加, 于是在一个相同的剥离时间间隔中对芯片的冲击更大, 更容易超过一些 LED 芯片与键合衬底的黏结强度, 造成芯片突起和破裂. 所以 LLO 工艺中, 剥离所需的能量密度应当控制在一个合适的范围内.

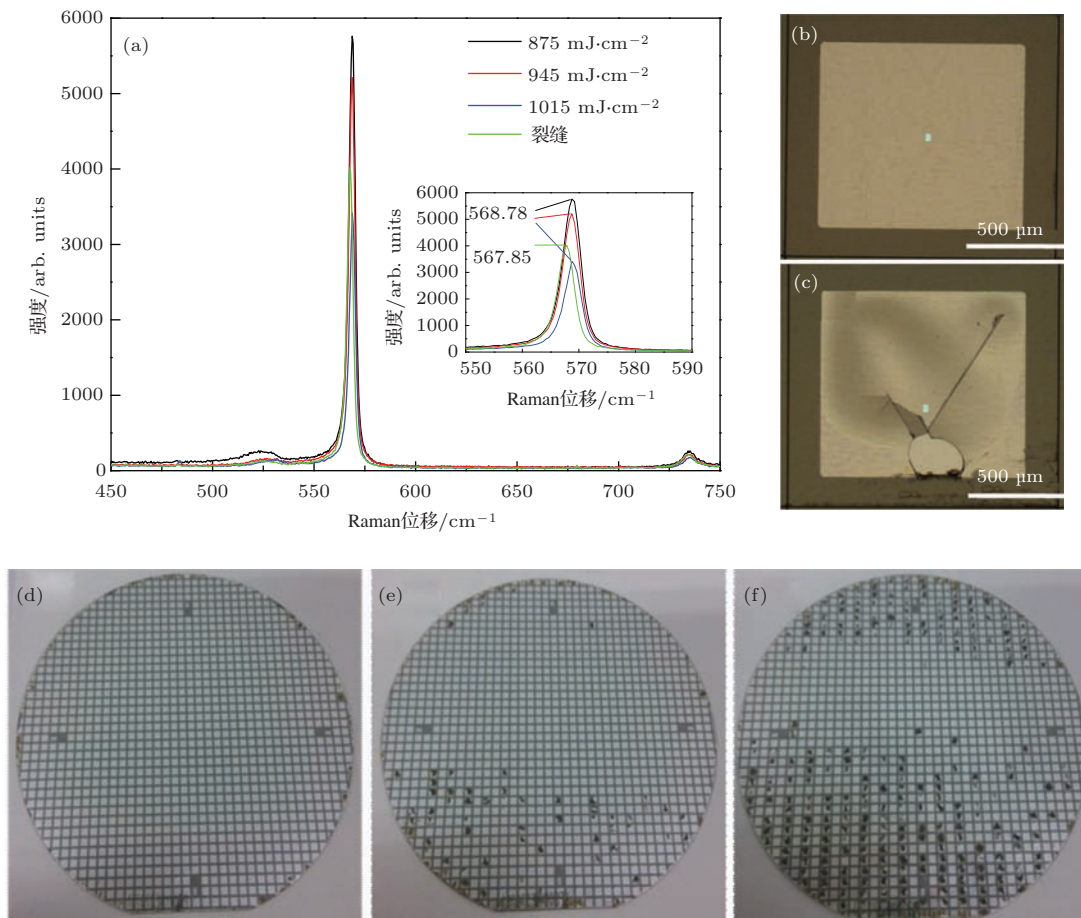


图5 (网刊彩色) (a) 使用能量密度为 875, 945 和 1015 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 激光剥离后芯片 Raman 散射谱; (b), (c) 在完整 LED 芯片和翘曲 LED 芯片中 Raman 散射测量位置(绿点处); (d), (e), (f) 分别为 875, 945 和 1015 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 激光剥离后衬底图像

4 结 论

使用 Al_2O_3 , CuW 和 Si 三种键合衬底在不同的键合温度下制备出 GaN 基垂直结构 LED 芯片. 由于三种键合衬底中 Al_2O_3 的 CTE 大于 GaN, CuW 和 Si 的 CTE 小于 GaN, 所以键合工艺以后 Al_2O_3 衬底弯曲度减小, CuW 和 Si 三种键合衬底弯曲度变大, 并且随键合温度的上升而增加; LLO 工艺后, Al_2O_3 和 CuW 衬底上芯片得到很好分离, 弯曲方向改变, 而因为 Si 和 GaN 的 CTE 相差较大, 使得剥离后衬底破裂. 通过对制备的 GaN 基垂直结构 LED 芯片测量 Raman 散射谱分析, 得到使用 Al_2O_3 和 CuW 衬底制备的 LED 中的残余应力为压应力, Si 衬底 LED 中残余应力为张应力, 所以垂直结构 LED 中残余应力的状态是键合衬底和键合金属共同作用的结果, 而键合温度影响着垂直结构 LED 中的残余应力的大小. 通过对不同能量密度激光剥离 GaN 基 LED 芯片的 Raman 散射谱分析, 一定能量密度下激光剥离工艺一般不会对芯片中的残余应力造成影响, 但是如果该工艺对 GaN 层造成了微裂缝, 则会在一定程度上起到释放残余应力的作用. 本文得到的晶圆键合和激光剥离工艺对残余应力的影响可以为制备高质量的 LED 器件提供指导.

感谢西安交通大学电信学院王宏兴教授以及颜建平硕士, 廖彦钦硕士提供测量仪器上的帮助.

参考文献

- [1] Nakamura S, Senoh M, Iwasa N 1996 *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** 217
- [2] Nakamura S, Senoh M, Nagahama S 1998 *Jpn. J. Appl. Phys.* **37** 1020
- [3] Kang T S, Wang X T, Lo C F 2012 *J. Vac. Sci. Technol. B* **30** 011203
- [4] Zhang B, Egawa T, Ishikawa H 2003 *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** L226
- [5] Ng W N, Leung C H, Lai P T 2008 *Nanotechnology* **19** 255302
- [6] Yang Y, Lin Y, Xiang P 2014 *Appl. Phys. Express* **7** 042102
- [7] Wu K, Wei T B, Lan D 2014 *Chin. Phys. B* **23** 028504
- [8] Chen W C, Tang H L, Luo P 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 068103 (in Chinese) [陈伟超, 唐慧丽, 罗平 2014 物理学报 **63** 068103]
- [9] Li J Z, Tao Y B, Chen Z Z, Jiang X Z 2014 *Chin. Phys. B* **23** 016101
- [10] Barghout K, Chaudhuri J 2004 *J. Mater. Sci.* **39** 5817
- [11] Yuseong J, Won Rae K, Dong-Hyun J 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 113537
- [12] Tan B S, Yuan S, Kang X J 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 2757
- [13] Chu C F, Lai F I, Chu J T 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 3916
- [14] Yongjian S, Tongjun Y, Chuanyu J 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 127303
- [15] Chen M, Zhang J Y, Lü X Q, Ying L Y 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 014203
- [16] Tetsuzo U, Masahiro I, Masaaki Y 2011 *Jpn. J. Appl. Phys. Lett.* **50** 041001
- [17] Hsu S C, Pong B J, Li W H 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 251114
- [18] Zhao D G, Xu S J, Xie M H 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 677
- [19] Xiong C B, Jiang F Y, Fang W Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3176 (in Chinese) [熊传兵, 江风益, 方文卿 2008 物理学报 **57** 3176]
- [20] Kim S 2011 *J. Electrochem. Soc.* **158** 904
- [21] Huang Y P, Yun F, Ding W 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 127302 (in Chinese) [黄亚平, 云峰, 丁文 2014 物理学报 **63** 127302]
- [22] Zhang L, Shao Y L, Hao X 2011 *J. Cryst. Growth* **334** 62
- [23] Lin B W, Wu N J, Wu Y C S 2013 *J. Display Technol.* **9** 371
- [24] Jinsub P, Takenari G, Takafumi Y, Seogwoo L 2013 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** 155104

Effect of wafer bonding and laser liftoff process on residual stress of GaN-based vertical light emitting diode chips*

Wang Hong¹⁾²⁾ Yun Feng^{1)2)3)†} Liu Shuo³⁾ Huang Ya-Ping²⁾ Wang Yue²⁾
Zhang Wei-Han²⁾ Wei Zheng-Hong²⁾ Ding Wen¹⁾²⁾ Li Yu-Feng¹⁾²⁾
Zhang Ye²⁾ Guo Mao-Feng²⁾³⁾

1) (Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education and Shaanxi Provincial Key Laboratory of Photonics and Information Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (Solid-State Lighting Engineering Research Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3) (Shaanxi Supernova Lighting Technology Co. Ltd. Xi'an 710077, China)

(Received 16 August 2014; revised manuscript received 9 September 2014)

Abstract

Residual stress conditions in GaN-based LEDs will have a significant influence on device performance and reliability. In this paper, GaN-based vertical LEDs under different stress conditions are fabricated by bonding with three types of submounts (Al_2O_3 submount, CuW submount and Si submount), changing the soak temperature (290 °C, 320 °C, 350 °C and 380 °C) and using different laser energy densities (875, 945 and 1015 $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$). The warpage and Raman scattering spectra of those GaN-based LEDs are measured. The experimental results show that the residual stress conditions in GaN-based vertical LEDs are a consequence of the bonded submounts and bonded metal, and the soak temperature is the primary factor that determines the degree of residual stress in LED chips. In the laser lift-off process, changing laser energy density in an appropriate range has little influence on residual strain of LED chips, and the micro-cracks in GaN layer caused by LLO process will play a role in releasing the residual stress. The warpage of epitaxial sapphire substrate becomes large after bonding with Si submount, the residual stress in GaN-based vertical LEDs is tensile stress and becomes larger with the soak temperature rising. When GaN epi wafer bonds with Al_2O_3 submount and CuW submount, the warpages becomes small and large respectively and the residual stress in chips is compressive stress. Because of the mismatch of coefficient of thermal expansion, the compressive stress in GaN-based LED chips increases for Al_2O_3 submount and drops for CuW submount with the soak temperature rising.

Keywords: residual stress, vertical light emitting diodes, wafer bonding, laser lift-off

PACS: 85.60.Jb, 68.35.Gy, 79.20.Eb

DOI: 10.7498/aps.64.028501

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2014AA032608).

† Corresponding author. E-mail: fyun2010@mail.xjtu.edu.cn