

p型层结构与掺杂对GaInN发光二极管正向电压温度特性的影响

毛清华 刘军林 全知觉 吴小明 张萌 江风益

Influences of p-type layer structure and doping profile on the temperature dependence of the forward voltage characteristic of GaInN light-emitting diode

Mao Qing-Hua Liu Jun-Lin Quan Zhi-Jue Wu Xiao-Ming Zhang Meng Jiang Feng-Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 107801 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.107801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.107801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

物理学报.2015, 64(2): 028501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.028501>

光致电化学法提高垂直结构发光二极管出光效率的研究

Increase in light extraction efficiency of vertical light emitting diodes by a photo-electro-chemical etching method

物理学报.2015, 64(1): 018501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018501>

无序光子晶体提高GaN基蓝光发光二极管光提取效率的研究

Improvement of light extraction efficiency of GaN-based blue light-emitting diode by disorder photonic crystal

物理学报.2013, 62(1): 017805 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.017805>

分子束外延生长InGaN/AlN量子点的组分研究

Studies on the composition of InGaN/AlN quantum dots grown by molecular beam epitaxy

物理学报.2012, 61(23): 237804 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.237804>

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>

p型层结构与掺杂对GaInN发光二极管正向电压温度特性的影响*

毛清华 刘军林[†] 全知觉 吴小明 张萌 江风益

(南昌大学国家硅基LED工程研究中心, 南昌 330047)

(2014年11月13日收到; 2014年12月24日收到修改稿)

在温度变化时, 如果GaInN发光二极管能够保持相对稳定的工作电压对其实际应用具有重要意义. 本文通过金属有机化学气相沉积生长了一系列包含不同有源区结构、不同p型层结构以及不同掺杂浓度纵向分布的样品, 并对其在不同温度区间内正向电压随温度变化的斜率(dV/dT)进行了研究. 结果表明: 1) 有源区中包括插入层设计、量子阱结构以及发光波长等因素的变化对正向电压随温度变化特性影响很小; 2) 影响常温区间(300 K \pm 50 K)正向电压随温度变化斜率的最主要因素为p-AlGaInN电子阻挡层起始生长阶段的掺杂形貌, 具有p-AlGaInN陡掺杂界面的样品电压变化斜率为 $-1.3 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$, 与理论极限值 $-1.2 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$ 十分接近; 3) p-GaN主段层的掺Mg浓度对低温区间(<200 K)的正向电压随温度变化斜率有直接影响, 掺Mg浓度越低则 dV/dT 斜率越大. 以上现象归因于在不同温度区间, p-AlGaInN以及p-GaN发生Mg受主冻结效应的程度主要取决于各自的掺杂浓度. 因此Mg掺杂浓度纵向分布不同的样品在不同的温度区间具有不同的串联电阻, 最终表现为差异很大的正向电压温度特性.

关键词: 氮化镓, 发光二极管, 电压, 电致发光

PACS: 78.66.Fd, 85.60.Jb, 84.37.+q, 78.60.Fi

DOI: 10.7498/aps.64.107801

1 引言

近年来, 随着技术的进步, GaInN发光二极管(light-emitting diodes, LED)在诸多领域中都有着广泛的应用^[1-3]. 在路灯、汽车照明、户外显示以及太空等特定领域应用时, LED工作的环境温度往往在300 K \pm 50 K的范围内变化, 而温度的变化会引起LED工作电压的变化. 如果电压变化过于剧烈, 将会对LED的使用造成严重影响. 首先, 电压的变化会对LED的光电转换效率、色品质以及可靠性等性质产生负面影响; 其次, 过于剧烈的电压变化对LED工作器件的电源控制以及热管理都提出了极高的要求. 因此, 获得在温度变化时(尤其是在常温区间)电压变化极小的器件成为LED是否能

够适应在不同工作环境温度下应用的关键环节.

已有一些研究针对正向电压随温度的变化关系进行了分析. Xi和Schubert^[4]给出了正向电压随温度变化的表达式, 利用该表达式可以根据电压的变化测试器件结温^[5,6]. 在此基础上, Meyaard等^[7]对上述表达式进行了进一步的解析, 并解释了为何在常温区间以及低温区间存在不同的电压随温度变化的特性. 然而, 前述研究通常仅就单一样品进行分析, 对LED结构中各功能层在电压随温度变化的特性中分别所起的作用缺乏系统研究. 更为重要的是, 对于如何提高工作电压在温度变化时的稳定性仍然没有提出有效的方法. 针对这些问题, 本文通过改变外延结构(尤其是p型层结构), 研究了不同外延结构下电压随温度变化的特性, 明晰了其中各主要功能层在不同温度区间对电

* 国家自然科学基金(批准号: 61334001, 11364034, 21405076)、国家科技支撑计划(批准号: 2011BAE32B01)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2011AA03A101)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: liujunlin@ncu.edu.cn

压变化的贡献. 通过优化p型层设计, 获得了在常温阶段电压随温度变化幅度接近理论极限最低值的LED器件结构, 为LED器件在不同环境温度下的应用奠定了理论与工艺基础.

2 实验

采用Thomas Swan公司生产的CCS金属有机化学气相沉积(MOCVD)系统, 在2英寸的Si衬底上生长了多种具有不同外延设计的LED结构. 所有LED结构具有相同的缓冲层以及n层, 分别是约0.1 μm的高温AlN以及约2.4 μm的n-GaN层. 如图1所示, 首先生长了三种具有不同有源区以及p型区结构的样品. 在有源区中, 这三种样品的量子阱与n层之间的插入层设计, 量子阱结构以及发光波长均不同. 根据量子阱中垒的厚度以及发光波长, 标记薄垒蓝光结构为样品A, 厚垒蓝光结构为样品B以及厚垒绿光结构为样品C. 样品A采用薄p型结构, 而采用厚p型结构的样品B

和C的p型结构与掺杂浓度一致. 所有外延片均制作成Si衬底垂直结构的LED芯片, 芯片尺寸为1 mm × 1 mm, 制作过程可见文献[8]. 所选取的样品中, 薄垒蓝光与厚垒蓝光样品在室温、350 mA工作电流下测试主波长为450 nm, 厚垒绿光样品为520 nm. 在薄垒蓝光样品A结构的基础上, 通过改变p型掺杂获得p型层浓度纵向分布不同的三种样品. 这三种样品的有源区以及p型结构是完全一致的. 它们分别被标记为样品D(与样品A完全相同), E以及F. 所有样品的p型Mg掺杂浓度纵向分布均采用Cameca公司生产的IMS 7F二次离子质谱仪(SIMS)测试标定. LED芯片放置在变温系统对不同温度的工作电压进行测试. 变温系统中, 温控平台由MMR公司生产的Joule-Thomson变温装置和MMR K-20温度控制装置组成, 而电压测试则由Keithley 2635电源来实现. 在样品测试过程中, 输入脉冲电流进行测试, 从而尽可能地降低器件的发热.

(a)	p-GaN接触层(20 nm)	(b)	p-GaN接触层(20 nm)	(c)	p-GaN接触层(20 nm)
	p-GaN主段层(90 nm)		p-GaN主段层(170 nm)		p-GaN主段层(170 nm)
	p-AlGaIn(20 nm)		p-AlGaIn(20 nm)		p-AlGaIn(20 nm)
	InGaIn/GaN多量子阱(3 nm/4.5 nm) × 7		InGaIn/GaN多量子阱(3 nm/10 nm) × 9		InGaIn/GaN绿光多量子阱(2.8 nm/13 nm) × 7
	GaN电子注入层(15 nm)		GaN电子注入层(20 nm)		InGaIn/GaN蓝光多量子阱(2.5 nm/13 nm) × 6
	InGaIn/GaN超晶格(2 nm/5 nm) × 6		InGaIn/GaN超晶格(2 nm/2 nm) × 30		GaN电子注入层(20 nm)
	n-GaN(2.4 μm)		N-GaN(2.4 μm)		InGaIn/GaN超晶格(2 nm/5 nm) × 10
	AlN缓冲层(0.1 μm)		AlN缓冲层(0.1 μm)		n-GaN(2.4 μm)
	硅衬底		硅衬底		AlN缓冲层(0.1 μm)
					硅衬底

图1 (网刊彩色) 器件外延结构示意图 (a) 样品A, 薄垒蓝光结构; (b) 样品B, 厚垒蓝光结构; (c) 样品C, 厚垒绿光结构

Fig. 1. (color online) Schematic epitaxial structures of (a) sample A, blue multiquantum well (MQW) LED with thin barrier; (b) sample B, blue MQW LED with thick barrier; (c) sample C, green MQW LED with thick barrier.

3 结果与讨论

GaInN基LED器件正向电压随温度变化关系可表示为[4,7]

$$\frac{dV_f}{dT} = \left(\frac{qV_j - E_g}{qT} + \frac{1}{q} \frac{dE_g}{dT} - \frac{3k}{q} \right) - \frac{1}{2} I \left(\frac{E_a + 2S_p kT}{kT^2} R_{sp} + \frac{E_d + 2S_n kT}{kT^2} R_{sn} \right), \quad (1)$$

(1) 式中 V_f 为器件正向电压, E_g 为禁带宽度, q 为电荷量, k 为玻尔兹曼常数, E_a 与 E_d 分别为受主

Mg与施主Si的激活能, R_{sp} 与 R_{sn} 则分别代表器件p型和n型本身材料电阻以及其与金属形成欧姆接触的电阻. (1) 式的前后两项分别代表了LED外延结构的三个主要功能层(有源区, n层以及p层)在电压随温度变化中所起的作用, 其中前项代表的是有源区随温度变化而引起的电压的变化, 而后项则代表着p型以及n型区域材料体电阻以及欧姆接触电阻随温度变化所引起的电压变化. 考虑到n型GaInN中Si的激活能低至20 meV[9], 其体电阻基本不随温度发生变化, 所以n层对电压的影响基本可以忽略. 据此本文将重点关注有源区以及p型区域对电压变化的影响.

图2所示为样品A, B以及C电压随温度变化的关系. 由于器件电压在各电流下随温度变化的关系基本一致^[4,7], 本文选取了20 mA下各器件正向电压随温度变化的关系(dV/dT) 进行比较. 从图中可以看出, dV/dT 在200 K两侧的温度范围内呈现出两种不同的斜率. 为了便于分析, 在此定义低于200 K的温度区间为低温区间, 而300 K±50 K的温度区间为常温区间. 前述现象与文献^[7]在蓝宝石衬底上生长LED样品时获得的规律基本一致. 在常温区间, 样品A, B和C的 dV/dT 斜率均为 $-1.3 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$. 而在低温区间, 样品B和C的斜率一致, 为 $-15 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$; 但样品A的电压随温度降低而升高的幅度则要远低于B, C样品, 为 $-4.5 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$. 在200 K左右出现拐点的主要原因是此时随着温度的下降, Mg受主在p-GaN中的冻结效应使空穴浓度大大降低, 从而引起p-GaN层本身的体电阻以及欧姆接触电阻随着温度的下降而剧烈增加^[7]. 考虑到样品B和C具有一致的p型结构设计, 同时它们显示了相同的 dV/dT 斜率, 而具有更薄p型结构的样品A则显示出不同的 dV/dT 斜率. 因此低温区间三种样品 dV/dT 斜率的不一致主要归结为不同的p-GaN设计. 同时图2还说明, 有源区中插入层设计、量子阱结构以及发光波长等因素对 dV/dT 的斜率变化贡献很小.

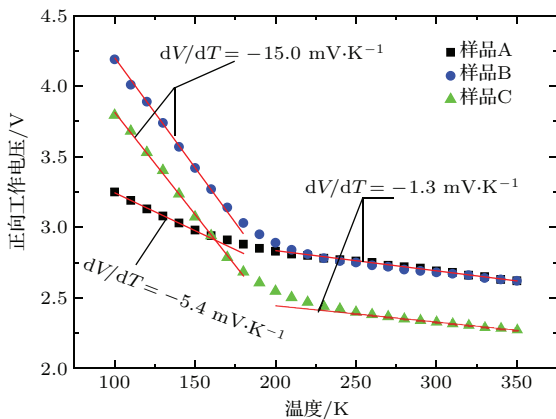


图2 (网刊彩色) 样品A, B以及C在20 mA下器件电压随温度的变化关系

Fig. 2. (color online) Forward voltage as a function of temperature for an injection current of 20 mA of samples A, B and C.

图3为利用SIMS获得的样品A, B和C中p型区域的Mg掺杂浓度的纵向分布. 从图3可以看出, 样品B和C显示了几乎一致的掺杂浓度纵向分布. 与样品A相比, 样品B和C的p-GaN主段层的浓度很低. 应该注意到, 在常温区间, 温度对

p-GaN的电阻没有明显影响. 因此样品A, B和C的p-GaN掺Mg浓度分布虽然不同, 但却呈现出相同的 dV/dT 斜率. 但当温度低于200 K时, p-GaN中的Mg将会被冻结. 而p型层的被冻结程度则取决于其掺杂浓度. 掺杂浓度越低的p型层激活能越高^[10], 使其冻结的程度越大. 因此, 由于样品B和C中p-GaN主段层的Mg浓度更低以及厚度更大, 使得它们比样品A在低温下具有更大的p-GaN体电阻, 从而导致了如图2所示的更为陡峭的 dV/dT 斜率.

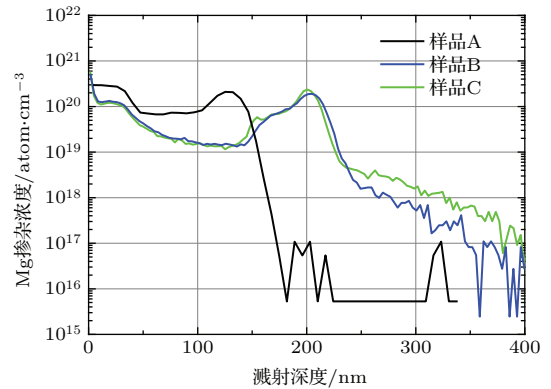


图3 (网刊彩色) SIMS测试样品A, B以及C的p型区域Mg掺杂浓度纵向分布

Fig. 3. (color online) Mg concentration depth profile measured by SIMS in p-type layers of samples A, B and C.

由于大部分LED是在常温区间应用, 因此相比于低温区间, 常温区间电压随温度的变化显然更值得关注. 事实上, 如果将合适的物理常量以及GaN的材料参数代入(1)式中, 可以求得 dV/dT 斜率的极限最小值为 $-1.2 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$ ^[7]. 但是, 文献^[4]报道的 $-2.3 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$ 以及文献^[7]报道的 $-1.7 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$ 均远大于这个理论值. Meyaard等^[7]认为在常温区间影响 dV/dT 斜率的主要因素为有源区的本身性质, 包括态密度、禁带宽度以及n型与p型的掺杂浓度等; 而 dV/dT 斜率实际值与理论值的差异主要来源于LED的串联电阻及其随温度的变化. 但是, 仍然有几个疑问尚未得到解答. 一是既然常温区间的 dV/dT 斜率是由有源区的固有特性决定的, 那么有源区某些特性的改变是否会对 dV/dT 斜率的变化产生影响? 二是导致常温阶段 dV/dT 斜率增加的串联电阻主要来源于何处?

从样品A—C的结果来看, 它们具有完全不同的有源区结构, 包括插入层的设计、量子阱的掺杂与结构, 禁带宽度以及p型的掺杂浓度等. 但是它

们却显示了在常温区间几乎一致的 dV/dT 斜率, 为 $-1.3 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$. 这个值与理论极限值已经十分接近, 所以我们认为有源区中这些因素的变化对 dV/dT 斜率的影响很小, 这也回答了以上关于有源区某些特性的改变是否会对 dV/dT 斜率变化产生影响的问题. 前文实验同样证实了 p-GaN 结构与掺杂分布主要对低温区间的 dV/dT 斜率产生影响, 而对常温区间的 dV/dT 斜率没有明显影响. 因此, 影响常温区间 dV/dT 斜率增加的因素应该来自于除有源区、p-GaN 以及 n-GaN 之外的其他层.

一般而言, 一个完整的 LED 结构应该包含有一层 p-AlGaIn 电子阻挡层. 该层的存在对于 LED 性能的提升有着重要作用 [8]. 但是, Meyaard 等 [7] 却忽略了随着温度降低, 由 p-AlGaIn 层电阻升高而引起的对器件电压的影响. 考虑到 p-AlGaIn 通常作为紧邻量子阱生长的第一层 p 型掺杂层, 因此 MOCVD 设备本身具有的记忆效应往往会引起其掺杂浓度纵向分布的变化 [11]. 与此同时, p-AlGaIn 层掺杂纵向分布的变化对 dV/dT 斜率的影响也未见报道. 因此, 本文生长了具有三种不同 p-AlGaIn 掺杂纵向分布的样品 D, E 以及 F, 从而就 p-AlGaIn 的掺杂纵向分布对不同温度下器件工作电压变化的影响进行探讨.

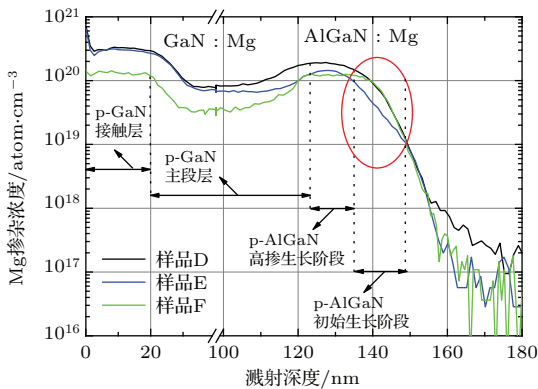


图4 (网刊彩色) SIMS测试样品D, E以及F的p型区域Mg掺杂浓度纵向分布 其中红色圆圈区域表示p-AlGaIn初始生长阶段

Fig. 4. (color online) Mg concentration depth profile measured by SIMS in p-type layers of samples D, E and F. The marked red circle region shows the initial growth stage of p-AlGaIn.

图4所示为样品D, E以及F的SIMS测试Mg掺杂浓度纵向分布. 从图中可以看出, 红色圆圈区域中三种样品在p-AlGaIn初始生长阶段表现出截然不同的Mg浓度上升斜率, 其中样品D与F具有较为陡峭的掺杂界面, 而样品E则较为平缓. 在

p-AlGaIn最高掺杂浓度以及p-GaN主段层处, 样品E要略低于样品D, 但要远高于样品F. 在与金属形成欧姆接触的p-GaN高掺杂接触层处, 样品D与样品E显示了几乎一致的掺杂浓度, 要高于样品F.

图5所示为样品D, E和F的电压随温度变化的关系. 从图5可以看出, 在低温区间, 样品F的 dV/dT 变化斜率为 $-13.8 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$, 远大于样品D的 $-5.4 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$ 以及样品E的 $-4.5 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$. 应该注意到, 在p-AlGaIn初始生长阶段, 样品F与D的掺杂浓度是一致的; 而在p-AlGaIn高掺杂区, 样品F与E的掺杂浓度十分接近. 因此, 可以认为p-AlGaIn的掺杂浓度纵向分布并非是引起样品F在低温区间极大 dV/dT 斜率的主因. 相较于样品D和E, 样品F在p-GaN主段层以及高掺杂接触层段中较低掺杂浓度均可能导致其陡峭的斜率. 但是, 本文所用样品高掺杂接触层浓度均大于 10^{20} cm^{-3} , 已达到该层实现低电阻欧姆接触所需的浓度值, 并且其厚度远小于p-GaN主段层. 因此, 样品F低温区间陡峭的斜率主要归因于p-GaN主段层中过低的掺杂浓度, 这与前文在样品A, B以及C中获得的结果是一致的.

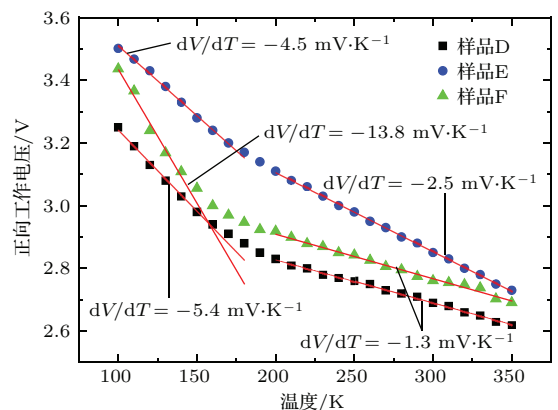


图5 (网刊彩色) 样品D, E以及F在20 mA下器件电压随温度的变化关系

Fig. 5. (color online) Forward voltage as a function of temperature for an injection current of 20 mA of samples D, E and F.

在常温区间, 样品D与F显示了几乎一致的 dV/dT 斜率, 为 $-1.3 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$. 而样品E则为 $-2.5 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$. 由图4可知, 样品F无论是在p-AlGaIn高掺杂段、p-GaN主段层还是p-GaN高掺杂接触层段均显示了最低的掺杂浓度, 但其 dV/dT 斜率却与各层掺杂浓度均最高的样品D相同. 因此, 可以认为这几个区域的掺杂浓度不是影响常温区间 dV/dT 斜率变化的主因. 除这些区域之外, p-AlGaIn中初始生长阶段的掺杂分布就成为可能

影响样品D、E以及F的常温阶段 dV/dT 斜率的惟一因素. 通过细致对比, 发现图5中常温阶段的 dV/dT 斜率与图4中 p-AlGaN 初始生长阶段的掺杂分布特征具有很强的对应关系, 陡峭掺杂界面对应较小的 dV/dT 斜率(样品D和F), 而相对平缓的掺杂界面对应较大的 dV/dT 斜率(样品E). 基于以上分析可知, p-AlGaN 初始生长阶段的Mg掺杂界面是引起常温区间 dV/dT 斜率变化的直接原因.

众所周知, p-AlGaN 的受主激活能要远大于 p-GaN, 且其激活能会随着Al组分的增加而增加. 对于常用的 p-AlGaN(Al组分15%—25%), 其激活能约为 220 meV [12,13]. 在如此高的激活能时, 当掺杂浓度很低时, 随着温度的降低, 其很容易被冻结成为半中性区, 从而增加器件的电阻. 与样品D与F相比, 样品E平缓的掺杂界面使 p-AlGaN 在起始生长区域的很长一段厚度中均处于低掺杂浓度状态. 相比于 p-GaN 主段层以及 p-GaN 高掺接触层段在 200 K 以下才开始发生冻结, 这些低掺的 p-AlGaN 的区域可能在常温以下就开始发生冻结现象. 这将导致在常温附近随着温度的降低, 样品E 的电压急速上升的情况. 与此同时, 样品D和F的 p-AlGaN 中该低掺区域的厚度较薄且浓度较高, 因此其对常温区间电压的上升几乎无贡献. 在 200 K 以下时, 样品D与F的 p-AlGaN 与 p-GaN 同时被冻结, 而由于样品E中相当一部分 p-AlGaN 区域在常温附近就已经被冻结, 因此在低温附近区域, 样品E的斜率 ($-4.5 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$) 较样品D的斜率 ($-5.4 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$) 更为缓和.

综上所述, 有源区中插入层设计、量子阱结构以及发光波长等因素对电压随温度变化的特性影响很小. 电压随温度变化特性主要取决于LED结构中p型层的结构与掺杂浓度的纵向分布. 陡峭的掺杂界面可以使 p-AlGaN 在更低的温度发生冻结, 从而在常温区间时电压随温度降低而升高的速率极为缓慢, 为 $-1.3 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$, 非常接近理论极限值 $-1.2 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$. 而在低温区间(200 K 以下), dV/dT 斜率取决于 p-GaN 主段层的掺Mg浓度, 掺Mg浓度越低则 dV/dT 斜率越大.

4 结 论

通过改变有源区结构、p型层结构与掺杂形貌, 研究了 GaInN 基 LED 各功能层对电压随温度

变化特性的影响. 结果表明: 在常温区间(300 K±50 K) 以及在低温区间(<200 K), 具有两种完全不同的电压随温度下降而升高的斜率 dV/dT . 有源区中插入层设计、量子阱结构以及发光波长等因素对 dV/dT 斜率的变化影响很小. p-AlGaN 初始生长阶段的掺杂界面陡峭程度决定了常温区间的 dV/dT 斜率, 掺杂界面越陡峭, 其电压随温度下降而升高的斜率越小. 而在低温区间, p-GaN 主段层的掺杂浓度是决定 dV/dT 斜率的主要因素, 掺Mg浓度越低则 dV/dT 斜率越大. 通过对 p-AlGaN 的陡峭掺杂获得了在常温区间 dV/dT 斜率为 $-1.3 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$ 、接近理论极限值 ($-1.2 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$) 的 LED 结构, 对 LED 器件在不同环境温度下工作具有重要的意义.

参考文献

- [1] Chen W C, Tang H L, Luo P, Ma W W, Xu X D, Qian X B, Jiang D P, Wu F, Wang J Y, Xu J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 068103 (in Chinese) [陈伟超, 唐慧丽, 罗平, 麻尉蔚, 徐晓东, 钱小波, 姜大朋, 吴锋, 王静雅, 徐军 2014 物理学报 **63** 068103]
- [2] Xie Z L, Zhang R, Fu D Y, Liu B, Xiu X Q, Hua X M, Zhao H, Chen P, Han P, Shi Y, Zheng Y D 2011 *Chin. Phys. B* **20** 116801
- [3] Jiang R, Lu H, Chen D J, Ren F F, Yan D W, Zhang R, Zheng Y D 2013 *Chin. Phys. B* **22** 047805
- [4] Xi Y, Schubert E F 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 2163
- [5] Keppens S, Ryckaert W R, Deconinck G, Hanselaer P 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 093104
- [6] Jiang F Y, Liu W H, Li Y Q, Fang W Q, Mo C L, Zhou M X, Liu H C 2007 *J. Lumin.* **122** 693
- [7] Meyaard D S, Cho J, Schubert E F, Han S H, Kim M H, Sone C 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 121103
- [8] Mao Q H, Jiang F Y, Cheng H Y, Zheng C D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8078 (in Chinese) [毛清华, 江风益, 程海英, 郑畅达 2010 物理学报 **59** 8078]
- [9] Götz W, Johnson N M, Chen C, Liu H, Kuo C, Imler W 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 3144
- [10] Kozodoy P, Xing H L, Denbaars S P, Mishra U K 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 1832
- [11] Ohba Y, Hatano A 1994 *J. Cryst. Growth* **145** 214
- [12] Suzuki M, Nishio J, Onomura M, Hongo C 1998 *J. Cryst. Growth* **189** 511
- [13] Tanaka T, Watanabe A, Amano H, Kobayashi Y, Akasaki I, Yamazaki S, Koike M 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 593

Influences of p-type layer structure and doping profile on the temperature dependence of the forward voltage characteristic of GaInN light-emitting diode*

Mao Qing-Hua Liu Jun-Lin[†] Quan Zhi-Jue Wu Xiao-Ming Zhang Meng Jiang Feng-Yi

(National Engineering Technology Research Center for LED on Si Substrate, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

(Received 13 November 2014; revised manuscript received 24 December 2014)

Abstract

Many GaInN light-emitting diodes (LEDs) are subjected to a great temperature variation during their serving. In these applications, it is advantageous that GaInN LEDs have a weak temperature dependence of forward voltage. However, the factors determining the exact temperature dependence of the forward voltage characteristics are not fully understood. In this paper, two series of GaInN LEDs are prepared for investigating the correlation between the epitaxial structural and the temperature dependence of the forward voltage characteristics. The forward voltage characteristics of samples are studied in a temperature range from 100 K to 350 K. The curves of forward voltage versus temperature (dV/dT) are compared and analyzed. For the three samples in series I, according to the barrier thickness and emitting wavelength, they are designated as blue multiquantum well (MQW) with thin barrier (sample A), blue MQW with thick barrier (sample B), and green barrier with thick barrier (sample C) respectively. Their structures of active region including the insertion layer between n-GaN and MQW, the MQW, and the emitting wavelength are different from each other. However, the same slopes of dV/dT at room temperature ($300\text{ K}\pm 50\text{ K}$) are observed in the samples. Moreover, samples B and C with the same p-type layer design also have the same slopes of dV/dT at cryogenic temperatures. Sample A with a much thinner p-type layer shows a lower slope than samples B and C. Based on the these experimental data, it is deduced that the intrinsic physic properties of active region such as structure and emission wavelength have a little influence on the variation of the slope of dV/dT either at room temperature or at cryogenic temperatures. Moreover, the Mg concentration of the p-GaN main region determines the slope of dV/dT at cryogenic temperatures. Low doping concentration leads to a high slope of dV/dT .

In order to find the decisive factor determining the slope of dV/dT at room temperature, three samples in series II are grown. For sample E, at the MQW-EBL (electron blocking layer) interface, the Mg concentration increases very slowly while an abruptly varying doping profile is observed for samples D and F. The slopes of samples D and F are both $-1.3\text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$. This is very close to the calculation value of the lower bond for the change in forward voltage ($-1.2\text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$). Meanwhile, the slope of sample E is $-2.5\text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$, which is much higher than those of samples D and F. Thus, it is suggested that the major factor influencing the slope of dV/dT at room temperature is the Mg doping profile of the initial growth stage of the p-AlGaIn electron blocking layer. These phenomena are mainly attributed to the changes of the activation energy of p-AlGaIn and p-GaN, since it relies on the doping concentration and temperature. Our findings clarify the roles of active region, p-AlGaIn and p-GaN in the temperature dependence of the forward voltage characteristic. More importantly, the results obtained in this study are helpful for optimizing the growth parameters to achieve LED devices with forward voltage that has a low sensitivity to temperature.

Keywords: gallium nitride, light-emitting diodes, forward voltage, electroluminescence

PACS: 78.66.Fd, 85.60.Jb, 84.37.+q, 78.60.Fi

DOI: 10.7498/aps.64.107801

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61334001, 11364034, 21405076), the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2011BAE32B01), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA03A101).

[†] Corresponding author. E-mail: liujunlin@ncu.edu.cn