

GaN基蓝光LED峰值波长蓝移现象分析及解决措施

刘一兵^{1, 2}

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 邵阳职业技术学院 机电工程系, 湖南 邵阳 422000)

摘要: 分析了引起GaN基蓝光LED峰值波长不稳定的原因, 它是由多量子阱区内极化效应引起的量子限制斯塔克效应造成的。讨论了通过弱化压电场, 采用四元系结构, 优化外延材料的生长条件和总应变变量等措施来提高波长的稳定性, 并指出了提高GaN基蓝光LED峰值波长稳定性的最优方案。

关键词: 氮化镓; 蓝光LED; 峰值波长蓝移; 压电效应; 多量子阱

中图分类号: TN304.2+3

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)03-0087-04

Phenomenon Analysis and Solution Measure for Blue GaN-Based LEDs Peak Wavelength Blue Moves

Liu Yibing^{1,2}

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Shaoyang Professional Technology College, Shaoyang Hunan 422000, China)

Abstract: Analyzing the unstable reason of GaN-based blue light LED peak wavelength, it was the quantum restriction Stark effect caused by the multi- quantum well area. Some measurements can improve the stability of wave length by discussing the electric field through the attenuation pressed, using four Yuan departments structures, optimizing extension material growth condition and total variables. Then, it pointed out the most superior plan for enhancing stability of GaN -blue light LED peak wavelength.

Key words: GaN; blue light LED; the peak wavelength blue moves; piezoelectric effect; multi-quantum well

20世纪90年代以来, 由于异质外延缓冲层技术及GaN材料P型掺杂技术取得突破, 引发了全球科研工作者对GaN材料的研究。以GaN为代表的Ⅲ族氮化物属直接跃迁型的宽带隙半导体材料, 其发光谱覆盖了从紫光到红光的整个可见光波段, 且具有电子漂移饱和速度高、热导率高、硬度大、介电常数小、化学性质稳定及抗辐射、抗高温等优点, 使得其广泛地应用于高亮度蓝绿光LEDs、蓝紫光LDs的研制, 成为当今国内外半导体研究领域的一大热点^[1]。

随着对GaN基蓝光LED研究的深入和应用范围的扩展, 暴露出一些问题, 如LED的输出光波长等将随注入电流、温度和时间的影响而变化^[2]。这给GaN基LED的实际应用带来两个问题: 1) 在全彩色显示应用

中, 波长的漂移将引起发光颜色变化, 导致色彩不纯, 影响显示屏的视觉效果; 2) 在半导体照明领域, 蓝光LED峰值波长的变化将引起色度坐标的漂移, 造成白光的颜色或色温发生变化。由此可见, 获得高波长稳定性的LED器件是材料外延中研究的重点之一。本文对GaN基蓝光LED产生峰值波长蓝移的原因进行了细致分析, 并提出了抑制这种现象的具体措施。

1 GaN基蓝光LED峰值波长蓝移的原因分析

图1所示为GaN基蓝光LED的峰值波长随注入电流的变化曲线, 可以看出, 随着注入电流的增加, LED

收稿日期: 2008-03-25

作者简介: 刘一兵(1964-), 男, 湖南邵东人, 邵阳职业技术学院高级工程师, 湖南大学硕士生, 主要研究方向为半导体器件制造工艺及设计。

发光峰值波长向短波长方向移动,即发生了蓝移。在实际应用中,蓝绿光波段5 nm左右的波长变化足以让人眼感觉到颜色的差异。而造成这种蓝光LED峰值波长蓝移的主要原因,是由于InGaN/GaN多量子阱区强烈的极化效应,下面讨论极化效应产生的机理。

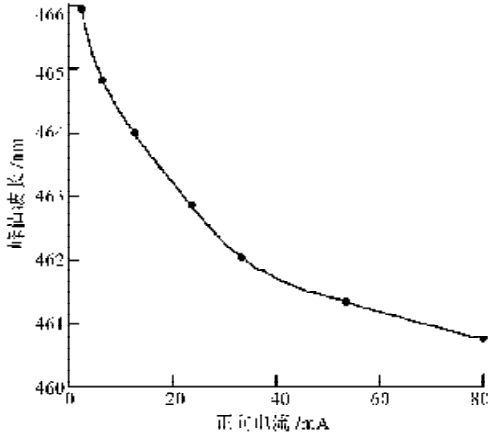


图1 GaN基蓝光LED峰值波长随注入电流变化曲线
Fig. 1 Change curve of blue GaN-based LEDs peak wavelength along with pours into the electric current

GaN基半导体材料存在3种晶体形态^[3]:纤锌矿(Wurtzite)结构,属六方相,为稳定结构;闪锌矿(Zincblende)结构,属立方相,为亚稳态结构;岩盐(Rock salt)结构,需要在高压下才能形成。由于GaN晶格排列缺乏反演对称性,因此表现出强烈的极化效应。它表现为两个方面:1)沿(0001)晶向生长的纤锌矿结构GaN材料缺少变换对称性,GaN薄膜结构中Ga原子集合和N原子集合的质心不重合($c/a=1.633$ 时,GaN原子集合的质心重合),从而形成电偶极子,在材料内部产生固有的自发极化(SP)。2)在MOCVD外延生长量子阱时,由于InGaN和GaN存在较大的晶格失配和热膨胀系数失配产生应力,导致形成压电极化(PE)。拉伸应变时,对于Ga面系材料,自发极化 P_{SP} 和压电极化 P_{PE} 方向相同,压缩应变则相反,且其极化系数比传统III-V族GaAs材料高(见表1^[4])。

表1 纤锌矿结构III-V族半导体极化系数

Table 1 Semiconductor susceptibility of spiauterite structure III-V race $c \cdot m^{-2}$

半导体名称	自发极化系数 P_{SP}	压电极化系数 e_{31}	压电极化系数 e_{33}	压电极化系数 e_{35}	$[e_{31} - (C_{31}/C_{33})e_{33}]e_1$
InN	0.032	-0.54	-0.92	—	-0.90
GaN	-0.029	-0.41	-0.69	-0.32	-0.68
AlN	-0.081	-0.59	1.5	-0.48	-0.86
GaAs	—	0.093	-0.185	0.093	—

注: $1(c \cdot m^{-2}) = 6.25 \times 10^{14}(e \cdot m^{-2})$ 。

对于一个应力层来说,有效压电极化强度 P_{PE} 为:
 $P_{PE} = [e_{31} - (C_{31}/C_{33})e_{33}]e_1$, 其中, e_1 是层内应力,且
 $e_1 = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}$; C_{31} 和 C_{33} 是弹性常数。在InGaN材料

中,由于 $In_xGa_{1-x}N$ 和GaN的自发极化强度之差很小,为 $\Delta P_{SP} = 1.88x \times 10^{12}(e \cdot m^{-2})$,而GaN上的 $In_xGa_{1-x}N$ 层是处在压应力作用下,且 $P_{PE} = 1.1x \times 10^{14}(e \cdot m^{-2})$,如果InN的摩尔分数为0.15,那么 $P_{PE} = 1.65x \times 10^{13}(e \cdot m^{-2})$,此时压电极化占支配地位。由于III族纤锌矿氮化物存在较大的压电极化系数,极化率在界面处的急剧变化将产生大量极化电荷,直接使体系内出现内建电场^[5]。在考虑极化效应时,InGaN/GaN量子阱的能带结构如图2所示。

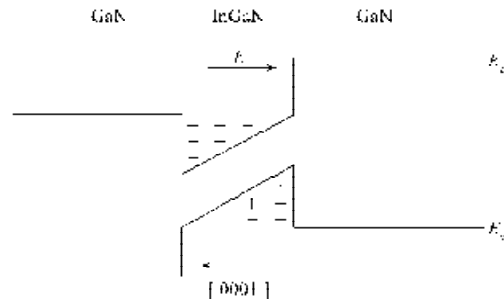


图2 InGaN/GaN量子阱考虑极化效应时能带图
Fig. 2 Energy band chart of InGaN/GaN quantum pitfall consideration polarization effect

在通常使用的InGaN/GaN量子阱的(0001)方向上,内建电场强度粗略计达到MV/cm量级^[6]。这个内强电场将阻止发光器件中载流子的注入,引起显著的量子限制斯塔克效应(QCSE)^[7],导致能带倾斜,发光波长向长波段方向移动(即红移)。随着注入电流的增大,由于载流子在导带(或价带)内的驰豫时间(约ps量级)比载流子寿命(约ns量级)要短得多,这样多量子阱区的自由载流子增加,屏蔽了部分内建电场,削弱了QCSE效应,阱中基态升高,从而使LED峰值波长向短波方向移动^[8]。这种蓝移就是LED峰值波长随注入电流变化的内在原因。由于量子限制斯塔克效应的影响,应力诱导极化场,激子跃迁能量减少大致为 $eE_p d$ (E_p 为压电场, d 为量子阱厚度),一般当InGaN/GaN量子阱宽超过3 nm时,阱内电子空穴波函数空间分裂严重,波函数重叠积分大大减小,电子空穴对的复合辐射几率降低,限制了器件内量子效率的提高^[9]。

2 GaN基蓝光LED峰值波长蓝移的解决措施

由于极化效应引起GaN基LED峰值波长蓝移造成波长稳定性差,使其在应用中引起一系列的问题,近年来,学者们研究了一系列解决蓝移的措施。

由于压电电场是沿C轴方向产生的,如果在非极性面(相对于c面垂直的a面或m面)的法线(a轴或

m 轴)方向上,或者半极性面(相对于 c 面倾斜的斜面)的法线方向上生长晶体,就可以弱化压电电场对于生长轴方向的影响。这样既可以减小蓝移现象所造成发光波长的变动幅度,还可以提高外部量子效率。但采用常规外延工艺获得的非极性或半极性GaN存在表面粗糙、缺陷多和不稳定等缺点,因此,必须采用侧向外延、氢化物气相外延(HVPE)技术和优化外延生长参数来完善它。日亚化学中村修二等已成功生长了室温最高空穴浓度达 $2 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ 的 a 面P-GaN,这比 c 面P-GaN的空穴浓度要高得多,还生长了堆垛层错密度达 $3 \times 10^3/\text{cm}^3$,位错密度达 $5 \times 10^6/\text{cm}^3$ 的光滑表面的 m 面GaN,由此制成的蓝光(450 nm)LED芯片,在20 mA和300 mA电注入下测得的光功率分别达0.24 mW和2.95 mW,封装后在20 mA连续电注入和1 A脉冲电注入(占空比为0.25%)下测得光功率分别达0.6 mW和23.5 mW,在高电流下没有饱和迹象,且波长稳定性很好^[10]。虽然非极性面还在晶体质量、MQW的界面平整度、压电极化及优化设计和有效注入电流等方面存在问题,但非极性LED正逐渐显示出其优越性。已有最新报道,非极性白光LED的发光效率达到200 lm/W。而 a 面蓝宝石衬底更容易解理和易于获得更大尺寸(6英寸以上)且无裂纹的GaN外延片,这对GaN基电子器件是很重要的,为此,王涛、张国义等^[11]比较了以 a 面、 c 面蓝宝石为衬底生长的GaN外延层晶体取向、完整性和光学特性。

采用四元混合晶体AlInGaN作为量子阱垒层材料代替GaN,由于AlInGaN在能带和晶格大小的裁减上有着更大的自由度,可得到与InGaN晶格匹配很好的结构,能减少应力和缺陷,提高界面平整度等,从而提高了有源区的质量,有效抑制了QCSE效应。实验证明,这种有源区的发光机理为带到带的跃迁发光,非常适合制备宽量子阱的大功率LED。测试表明,虽然当电流低于120 mA时,发光功率不如常规结构,但当电流高于120 mA时,这种优越逐渐显现,且线性很好也不易饱和(见图3)。这种InGaN/AlInGaN多量子阱结构LED的电致发光谱(EL)的峰值随注入电流变化的敏感程度下降,发光亮度得到提高^[12]。

在生长MQW前先生长一层掺Si的 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ 层^[13], $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ 层相当于一个宽阱,只要匹配好,当宽阱和有源层里的电子能量相等时,电子就会隧穿到有源层,从而提高了电子的浓度,当达到 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 时,可完全屏蔽掉压电极化场的影响。同时,宽阱 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ 层的引入,相当于一个良好的电流分散层,能削弱由于电流拥挤导致电场分布不均匀的影响,提高输出功率、减小驱动电压,提高发光均匀性。

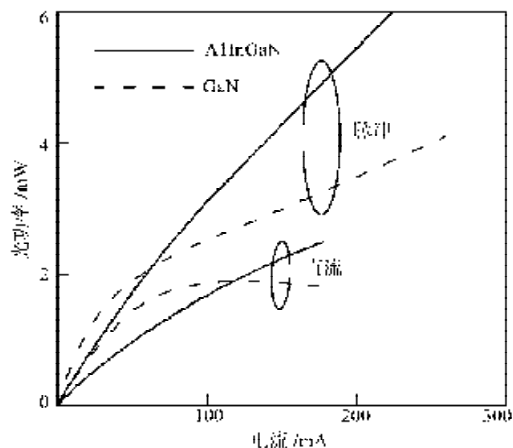


图3 AlInGaN和GaN作为量子阱垒层的LED在不同电注入方式下的光功率-电流曲线

Fig. 3 The different electricity light power - current curve when it pour into AlInGaN and GaN build the level as the quantum pitfall LED

为增强GaN基LED波长的稳定性,可采用脉冲电流消除热效应的影响,但要从根本上解决波长的稳定性问题,必须尽量降低极化场强的大小。InGaN材料起主导作用的压电极化强度与器件的总应变变量成正比,且当压电效应一定时,电流注入导致的能带填充效应也会对发射波长的变化产生一定影响,因此,必须设法使量子阱中的应力驰豫。罗毅等^[14]通过优化LED器件材料的生长条件和总应变变量,在 $700 \sim 740^\circ\text{C}$ 生长5个周期具有极平整界面的InGaN(1.8 nm)/GaN(11 nm)多量子阱作为发光区的LED外延片,由此制作出的LED器件,在 $0 \sim 120$ mA注入电流下,发光波长变化小于1 nm(如图4所示),在20 mA的正向电流下,其光谱半高全宽(FWHM)只有18 nm,当正向电流达到120 mA时,光谱的FWHM仍只有21 nm,变化仅3 nm(如图5所示),且随流入电流变化较小。因此,通过优化外延生长条件,调节量子阱中阱层与垒层的厚度,可抑制极化效应,降低极化场强来稳定GaN基LED的波长。

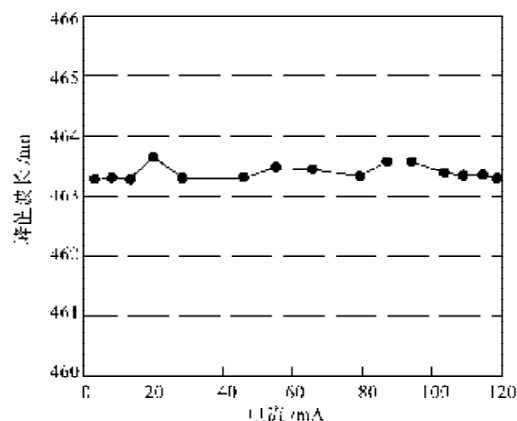


图4 蓝光LED芯片峰值波长随注入电流的变化

Fig. 4 The change of the blue LED chip peak wavelength along with pours into the electric current

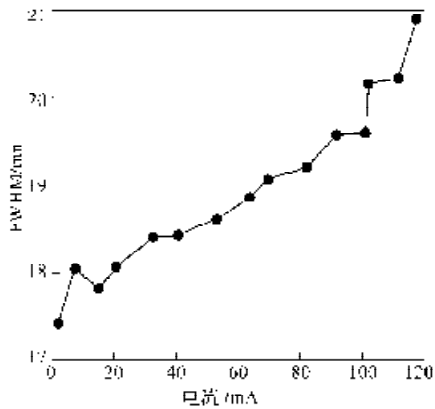


图5 蓝光LED FWHM随注入电流的变化

Fig. 5 The change of blue light LED FWHM along with pours into the electric current

3 结语

GaN基蓝光LED目前主要采用InGaN/GaN多量子阱结构,而这种结构由于InGaN和GaN晶格常数失配产生应力存在强烈的压电极化现象,造成LED的峰值波长蓝移,引起LED在实际应用中出现一系列的问题。本文研究了造成峰值波长不稳定的原因,介绍了目前提高波长稳定性的主要解决措施。根据以上分析,笔者认为:采用非极性的GaN衬底,在MQW之前引入用于改善外延材料应力的InGaN/GaN超晶格,优化外延生长条件,将是提高GaN基蓝光LED峰值波长稳定性的最优方案。

参考文献:

- [1] Sheu J K, Pan C J, Chi G C, et al. White-light emission from InGaN-GaN multiquantum-well light-emitting diodes with Si and Zn codoped active well layer[J]. IEEE Photon Technol. Lett., 2002, 14(4): 450-452.
- [2] Muthu S, Schuurmans F J, Pashleg M D. Red green and blue LED based white light generation issues and control[C]// IEEE Industry Application Conference. [s. l.]: [s. n.], 2002: 327-333.
- [3] 陈平,王启明. GaN非线性光学效应研究进展[J]. 物理学进展, 2005, 25(4): 430-440.
- [4] 罗毅,张贤鹏,韩彦军,等. 半导体照明关键技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(3): 17-28.
- [5] Kim J J, Park S K, Kim H M. Piezoelectric and spontaneous polarization effects on exciton binding energies in wurtzite GaN/AlGaIn quantum wells[J]. J. Korean Physical Society, 2003, 43(1): 149-153.
- [6] Shi J J, Xia C X, Wei S Y, et al. Exciton states in wurtzite InGaIn strained coupled quantum dots Effects of piezoelectricity and spontaneous polarization[J]. J. Appl. Phys., 2005, 97(8): 083704-083707.
- [7] Leroux M, Grandjean N, Laugt M, et al. Quantum confined Stark effect due to built-in interlayer polarization fields in (Al Ga) N/GaN quantum wells[J]. Physical Review B., 1998, 58(20): 13371-13374.
- [8] Traetta G, Carlo A D, Reale A, et al. Charge storage and screening of the interlayer field in GaN/AlGaIn quantum wells[J]. J. Crystal Growth, 2001, 230(3): 492-496.
- [9] Teng C C, Wang H C, Tang T Y, et al. Depth dependence of optical property beyond the critical thickness of an InGaIn film[J]. J. Crystal Growth, 2006, 288(1): 18-22.
- [10] 张国义,陆敏,陈志忠. 高亮度白光LED用外延片的新进展[J]. 物理, 2007, 36(5): 377-384.
- [11] 王涛,姚健全,张国义. 金属有机化学气相沉积外延技术生长GaN基半导体发光二极管和激光二极管(II)[J]. 物理, 2005, 34(10): 718-724.
- [12] Lai Weichih, Chang Shoujinn, Meiso Yokogam, et al. InGaIn/AlInGaIn multiquantum-well LEDs[J]. IEEE Photon Technol. Lett., 2001, 13(6): 559-561.
- [13] Sheu J K, Chi G C, Jou M J. Enhanced output power in InGaIn-GaN multiquantum-well light-emitting diode with an InGaIn current-spreading layer[J]. IEEE Photon Technol. Lett., 2001, 13(11): 1164-1166.
- [14] 罗毅,郭文平,邵嘉平,等. GaN基蓝光发光二极管的波长稳定性研究[J]. 物理学报, 2004, 53(8): 2720-2723.

(责任编辑:廖友媛)