

硅衬底垂直结构 InGaAlN 多量子阱发光二极管 电致发光谱的干涉现象研究^{*}

熊传兵[†] 江风益 王 立 方文卿 莫春兰

(南昌大学教育部发光材料与器件工程研究中心,南昌 330047)

(晶能光电(江西)有限公司,南昌 330029)

(2008 年 4 月 18 日收到,2008 年 7 月 18 日收到修改稿)

测试了硅衬底垂直结构芯片在不同空间角度上的电致发光(EL)谱,指出硅衬底垂直结构 InGaAlN 多量子阱发光二极管的 EL 谱中多个峰型来源于干涉现象,而不是来自于多个异质层的发光.干涉峰的疏密反映 p 型层厚度的一致性,干涉现象的强弱反映 p 型欧姆接触层反光能力的强弱.芯片法线方向附近发光最强干涉现象最明显,芯片侧边的发光几乎没有干涉现象且发光强度最弱.

关键词: InGaAlN, 发光二极管, 垂直结构, 电致发光

PACC: 7280E, 7360L, 7865P, 7860F

1. 引 言

近几年,在硅衬底上生长 InGaAlN 多量子阱(MQW)发光二极管(LED)已成为一个研究热点,并且取得了显著的进展^[1-7].如果将硅衬底上生长的 InGaAlN LED 薄膜转移到新的衬底上制成垂直结构的 LED,就可以克服同侧电极结构器件的某些缺点,使器件光电性能得到明显改善^[8-11].将蓝宝石衬底上生长的 InGaAlN MQW LED 薄膜转移到新的衬底上,也同样会使器件性能有所提高^[12-14].尽管将 GaN 基 LED 薄膜从外延衬底转移到新衬底会引起性能变化的报道较多^[15-19],并且这些研究工作对垂直结构芯片中的干涉现象也有涉及^[20],然而目前还少有关于垂直结构 LED 干涉现象系统研究的报道.垂直结构芯片中的干涉问题是很难避免的物理现象,它会对准确地研究垂直结构芯片的发光机制带来一定困难^[21],干涉引起的发光峰型变化很容易与多量子阱发光的峰型变化相混淆^[22-24].垂直结构 LED 芯片的干涉现象及光强空间分布是器件封装设计必需考虑的因素,因而对硅衬底垂直结构芯片干涉现象的研究显得很有必要.

本文研究了硅衬底垂直结构 LED 芯片在不同

空间角度上的电致发光(EL)谱的谱型及光强分布.

2. 实 验

本文研究的垂直结构芯片是用外延片压焊和湿法腐蚀相结合的技术获得的 InGaAlN MQW LED 芯片,其结构包括 AlN 及 GaN 缓冲层、n 型 GaN 层、5 个周期的 InGaN/GaN 多量子阱层和 p 型 GaN 层,本文采用的芯片面积为 $160 \mu\text{m} \times 160 \mu\text{m}$.其详细外延生长及芯片制造过程请参见文献 [7-10].

测试装置如图 1 所示.测试过程如下:首先,将芯片阵列用 Disco 划片刀划成长条形,使图 1 中电极引线所在的那列芯片 LED 薄膜边缘尽量靠近划片

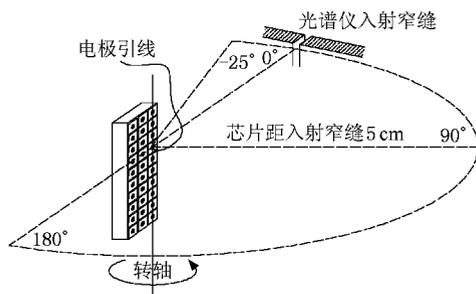


图 1 垂直结构 InGaAlN MQW LED 芯片不同方向的 EL 谱测试装置示意图

^{*} 国家高技术研究发展计划(批准号:2005AA311010,2003AA302160)和信息产业部电子发展基金(批准号:2004125,2004479)资助的课题.

[†] E-mail: chuanbingxiang@ncu.edu.cn

刀痕,LED 薄膜边缘与基板边缘距离为 $2\ \mu\text{m}$ 左右。然后,将 3 列芯片的长条固定在一个转轴上,使得焊有电极引线的那列芯片的中心线与转轴重合,转轴离光栅单色仪的距离为 $5\ \text{cm}$ 。为了避免电极引线的挡光作用,尽量使电极引线朝芯片台面的法线方向拉长。最后,转动转轴使其处于不同的角度,分别测试不同方向的 EL 谱,其中靠近基板边缘的芯片侧边定义为 0° ,芯片法线方向定义为 90° ,芯片另一未

划开的边缘定义为 180° 。

测试在室温下进行,测试时芯片上所通的正向电流为 $20\ \text{mA}$,光谱采集系统为国产卓立汉光 SPM500 型光栅单色仪,扫描步长为 $0.5\ \text{nm}$ 。

3. 结果及讨论

图 2 是垂直结构芯片在不同空间方向的 EL 谱。

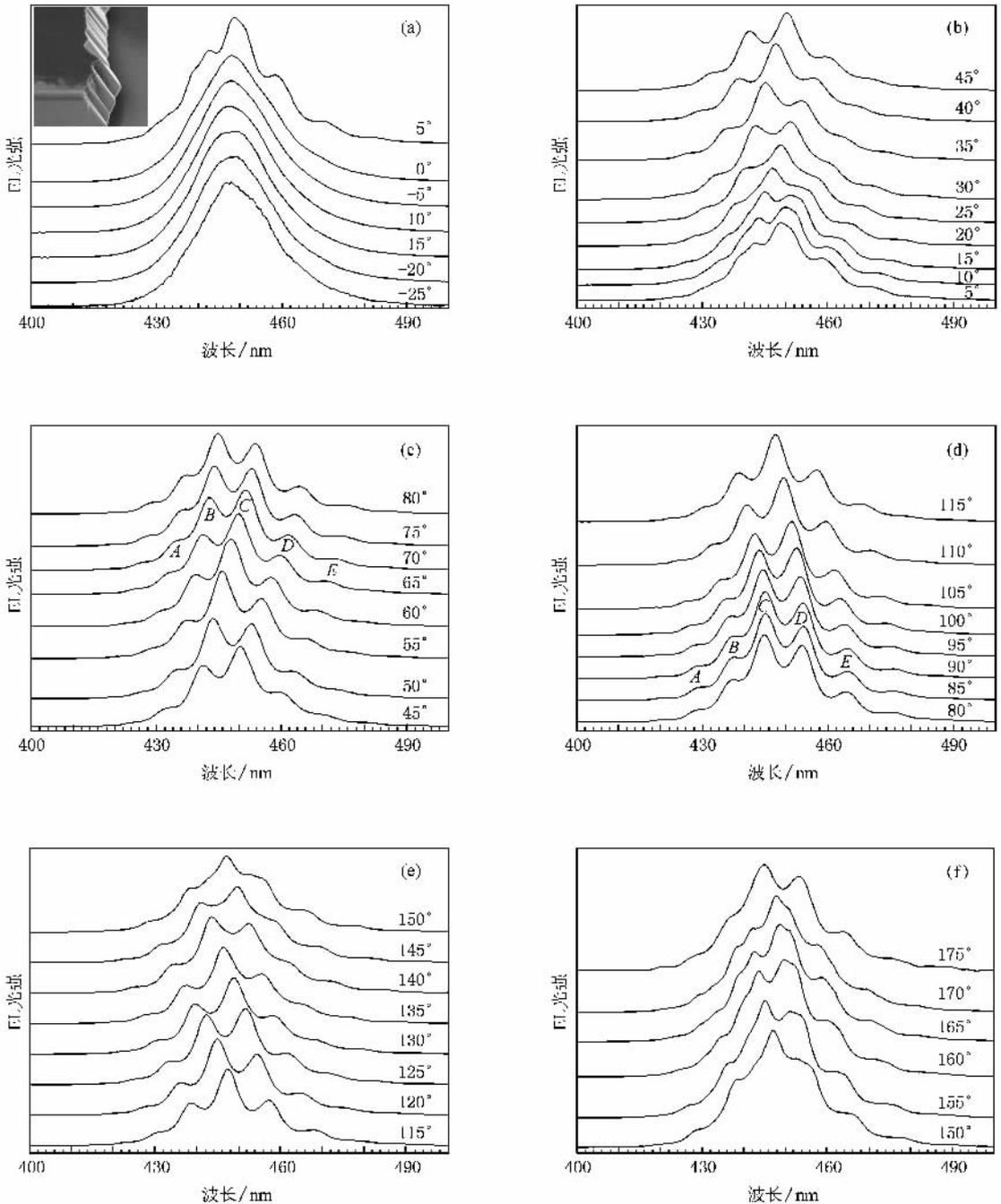


图 2 垂直结构 InGaAlN MQW LED 芯片不同空间方向的 EL 谱 (a) -25° — 5° (b) 5° — 45° (c) 45° — 80° (d) 80° — 115° , (e) 115° — 150° (f) 150° — 175°

从图 2(a)可以看出,芯片侧边 -20° , -15° , -10° 和 0° 的 EL 光谱仅有单一峰型, -25° 时 EL 谱主峰稍往左偏,在 5° 时 EL 谱中出现明显的多个峰型,图 2(a)的内插图为芯片侧边的扫描电子显微镜 (SEM) 图片.从图 2(b)可以看出,随着测试角度的增加多个峰型的波峰和波谷的落差不断加大.从图 2(c)~(f)可以看出,随着测试角度不断向法线方向即 90° 靠近时,其多个波形的间距逐渐缩小,当测试角度继续加大时,波峰的间距不断加大,波峰与波谷间的落差不断减小.从图 2 还可以看出,在大于 90° 的某些角度的谱形与小于 90° 的某些角度的谱型基本一致,例如 130° 与 45° 的谱型.

虽然各个方向 EL 谱的峰型不同,然而它们是由同一个芯片在同一正向电流时获得的光谱,它们所对应的芯片发光的内在本质应该是相同的.本文对不同角度的 EL 谱的高斯拟合谱线进行了分析,所有角度 EL 谱的高斯拟合谱型是一致的,只有光强上的差别.如果将所有角度的高斯拟合谱型进行归一化处理,则所有谱线能够很好重合.因而,本文将谱线中的多个峰型归因为干涉现象所引起.

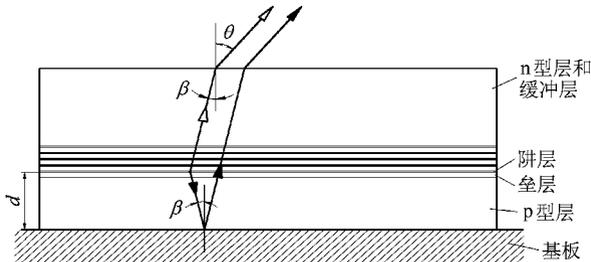


图 3 垂直结构 InGaAlN MQW LED 芯片干涉现象形成的光路图

图 3 是干涉现象产生的光路图.干涉是由两路光的相消和相长产生的,其中一路光来源于阱层发出的光(本文所使用的芯片外延结构设计是使第 5 阱层发光)经过 n 型层和缓冲层后折射到空气中,另一路光来源于阱层发出的光经 p 型欧姆接触层反射后再经过 n 型层和缓冲层折射到空气中,这两路光形成了干涉.

设发光阱层距 p 型欧姆接触层的距离为 d ,则图 3 中两路发生干涉效应的光在 GaN 中的光程差为 $2d/\cos\beta$.取 GaN 在蓝光波段的折射率为 $2.4^{[25,26]}$,则 GaN 中的光程差折合成空气中的光程差为 $4.8d/\cos\beta$.当

$$4.8d/\cos\beta = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

时,则发生相长干涉,当

$$4.8d/\cos\beta = (n + 0.5)\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

时,则发生相消干涉,其中 λ 为空气中的波长.

当测试角度为 90° 时,EL 谱的相长峰位波长列于表 1.表 1 中的 A, B, C, D 和 E 分别代表 5 个相长峰位,其位置如图 2(d)所示.将 90° 时的相长峰位波长代入 $4.8d/\cos\beta = n\lambda$,取 $n = 1$ (因取 $n = 1$ 时所得 p 型层厚度与外延生长厚度相当),此时 $\beta = 0$,计算所得的发光阱层距 p 型欧姆接触层的距离 d 如表 1 所列.按照表 1 中所列 p 型层厚度,计算 45° 和 70° 时波谱中应该出现的峰位(当图 3 中 $\theta = 45^\circ$ 时,则 $\beta = 17.135^\circ$;当 $\theta = 70^\circ$ 时,则 $\beta = 8.193^\circ$),计算所得相长峰位和实测峰位波长列于表 1,其中有 3 个实测峰由于强度较弱没有列入表中.从表 1 数据可以看出,计算所得相长干涉峰位与实测相长干涉峰位基本相符.

表 1 由 90° 谱型得到 p 型层厚度后计算所得 45° 和 70° 干涉峰位与实测峰位的对比

	A	B	C	D	E
90° 实测相长峰位/nm	429.5	437.5	445	454	464.5
计算获得的 p 型层厚度/nm	89.48	91.15	92.7	94.58	96.77
45° 位置计算所得相长峰位/nm	449.5	457.8	465.6	475.1	486.1
45° 实测的相长峰位/nm	450	458.8	—	—	—
70° 位置计算所得相长峰位/nm	433.9	442	450	459	469.5
70° 实测的相长峰位/nm	434	442.5	451	461	470

本文对其他角度计算所得相长峰位与相消峰位也进行了比较,计算峰位和实测峰位均能符合,其中某些干涉峰位在取 $n = 2$ 时相符.因此,本文认为图 2 中干涉峰位的改变是由于测试角度变化时光程差

发生了变化所致,干涉峰位的疏密能反映 p 型层厚度的一致性.图 2(a)中 0° 以下的角度几乎没有干涉峰位,这是由于不存在形成干涉的界面条件,同时芯片侧边的形貌也起到了扰乱光路形成干涉的作用.

图 4 是 EL 光谱积分强度在不同角度的分布.从图 4 可以看出,芯片的发光强度并非法线方向最强,光强最强的角度是 80° 和 75° . 出现法线方向不是芯片光强最强方向的原因是由于 p 型层的厚度存在一定梯度.图 5 为当外延层厚度存在一定梯度时的出光示意图.例如,当测试角度为 80° 时,出光方向与芯片台面的夹角为 80° ,此时光线在 GaN 内部与芯片台面法线方向的夹角为 4.15° ,可能是 GaN 中两路相干光正好与稍微倾斜了的 p 型欧姆接触层垂直,就造成了这个角度的干涉最强.从图 2 也可以看出此时的相长干涉和相消干涉的落差最大,这也说明光在 GaN 内部可能是垂直于 p 型欧姆接触层,因为此时两束光最容易满足形成干涉的相位条件.从图 4

还可看出,光强分布的对称性不是很好,这也可能是由于 p 型层厚度分布不一致所造成.超过 175° 时探测不到光强是由于测试时芯片转过近 180° 后,芯片侧边发出的光被周边芯片遮挡所造成.

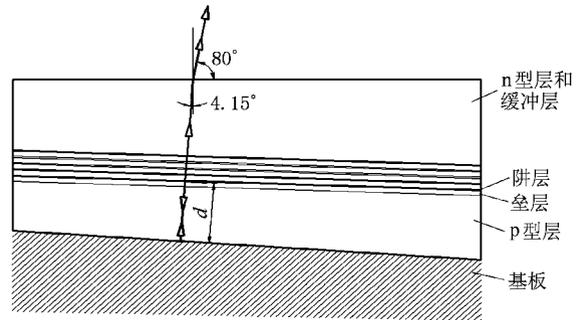


图 5 当外延层厚度存在一定梯度时垂直结构 InGaAlN MQW LED 芯片的出光示意图

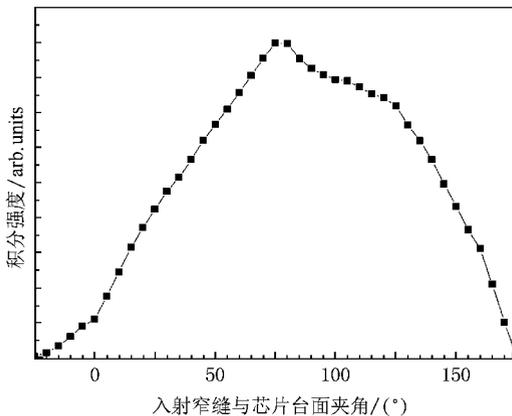


图 4 垂直结构 InGaAlN MQW LED 芯片不同空间方向的 EL 光强分布

4. 结 论

本文通过测试垂直结构芯片在不同空间方向的 EL 谱,说明了硅衬底垂直结构 InGaAlN MQW LED 的 EL 谱中多个峰型来源于干涉现象.干涉峰的疏密反映了 p 型层厚度的一致性,干涉现象的强弱反映了 p 型欧姆接触反光性能的强弱.芯片法线方向不是光强最强的方向,这是由于 p 型层的厚度存在一定的梯度所致.芯片侧边的发光几乎没有干涉现象且发光强度最弱.

- [1] Wu F, Zamir S, Meyler B, Salzman J, Golan Y 2002 *J. Electron. Mater.* **31** 88
- [2] Chen C H, Yeh C M, Hwang J, Tsai T L, Chiang C H, Chang C S, Chen T P 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 161912
- [3] Zhang B S, Liang H, Wang Y, Feng Z H, Ng K W, Lau K M 2007 *J. Cryst. Growth* **298** 725
- [4] Honda Y, Kuroiwa Y, Yamaguchi M, Sawaki N 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 222
- [5] Wang D, Jia S, Chen K J, Lau K M, Dikme Y, Gemmer P V, Lin Y C, Kalisch H, Jansen R H, Heuken M 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 056103
- [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—123** 693
- [7] Mo C L, Fang W Q, Pu Y, Liu H C, Jiang F Y 2005 *J. Cryst. Growth* **285** 312
- [8] Xiong C B, Jiang F Y, Fang W Q, Wang L, Liu H C, Mo C L 2006 *Sci. China E* **49** 313
- [9] Xiong C B, Jiang F Y, Fang W Q, Wang L, Mo C L, Liu H C 2007 *J. Lumin.* **122—123** 185
- [10] Xiong C B, Jiang F Y, Fang W Q, Wang L, Mo C L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3176 (in Chinese) [熊传兵、江风益、方文卿、王立、莫春兰 2008 物理学报 **57** 3176]
- [11] Zhang B J, Egawa T, Ishikawa H, Liu Y, Jimbo T 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 071113
- [12] Wang S J, Uang K M, Chen S L, Yang Y C, Chang S C, Chen T M, Chen C H, Liou B W 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 011111
- [13] Wu Y S, Cheng J H, Peng W C, Ouyang H 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 251110
- [14] David A, Fujii T, Moran B, Moran B, Nakamura S, DenBaars S P, Weisbuch C, Benisty H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 133514
- [15] Wong W S, Sands T, Cheung N W, Kneissl M, Bour D P, Mei P, Romano L T, Johnson N M 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 1360
- [16] Gao Y, Fujii T, Sharma R, Fujito K, DenBaars S P, Nakamura S, Hu E L 2004 *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** L637

- [17] Chu C F ,Lai F I ,Chu J T ,Yu C C ,Lin C F ,Kuo H C ,Wang S C 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 3196
- [18] Stach E A ,Kelsch M ,Nelson E C ,Wong W S ,Sands T ,Cheung N W 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 1819
- [19] Zhang B ,Egawa T ,Ishikawa H ,Liu Y ,Jimbo T 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 071113
- [20] Martin R W ,Kim H S ,Cho Y ,Edwards P R ,Watson I M ,Sands T ,Cheung N W ,Dawson M D 2002 *Mater. Sci. Eng. B* **93** 98
- [21] Reshchikov M A ,Morkoç H 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 061301
- [22] Kuokstis E ,Yang J W ,Simin G ,Asif Khan M ,Gaska R ,Shur M S 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 977
- [23] Gu X L ,Guo X ,Liang T ,Lin Q M ,Guo J ,Wu D ,Xu L H ,Shen G D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5531 (in Chinese) [顾小玲、郭 霞、梁 庭、林巧明、郭 晶、吴 迪、徐丽华、沈光地 2007 物理学报 **56** 5531]
- [24] Luo Y ,Guo W P ,Shao J P ,Hu H ,Han Y J ,Xue S ,Wang L ,Sun C Z ,Hao Z B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2720 (in Chinese) [罗 毅、郭文平、邵嘉平、胡 卉、韩彦军、薛 松、汪 莱、孙长征、郝智彪 2004 物理学报 **53** 2720]
- [25] Hums C ,Finger T ,Hempel T ,Christen J ,Dadgar A ,Hoffmann A ,Krost A 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 033113
- [26] Lei S Y ,Shen B ,Zhang G Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2386 (in Chinese) [雷双瑛、沈 波、张国义 2008 物理学报 **57** 2386]

The investigation on the interference phenomenon in electroluminescence spectrum of vertical structured InGaAlN multiple quantum well light-emitting diodes *

Xiong Chuan-Bing[†] Jiang Feng-Yi Wang Li Fang Wen-Qing Mo Chun-Lan

(Engineering Research Center for Luminescence Materials and Devices of Ministry of Education ,Nanchang University ,Nanchang 330047 ,China)

(Lattice Power Photoelectricity (Jiangxi) Corporation ,Nanchang 330029 ,China)

(Received 18 April 2008 ; revised manuscript received 18 July 2008)

Abstract

The electroluminescence (EL) spectrum of vertical structured InGaAlN multiple-quantum-well light-emitting diodes were obtained at different space angles. It was found that the multiple EL peak pattern was caused by the interference phenomenon and the distance between the peaks could indicate the thickness uniformity of the p-type layer. The intensity difference between the wave crest and the wave trough of the peak pattern indicates the reflectance ratio of p-type ohmic contact layer. The integral EL intensity in the normal direction of the chip was not so strong , while in the directions of 80° and 75° the intensities were the largest and the interference phenomenon was the sharpest. The intensity of the EL and the interference phenomenon of the side face of the chip was the weakest.

Keywords : InGaAlN , light-emitting diode , vertical structure , electroluminescence

PACC : 7280E , 7360L , 7865P , 7860F

* Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grants Nos. 2005AA311010 ,2003AA302160) and the Electronic Development Foundation from Ministry of Information Industry , China (Grants Nos. 2004125 2004479).

[†] E-mail :chuanbingxiong@ncu.edu.cn