

复合布拉格反射镜高亮度 AlGaInP 发光二极管*

于晓东[†] 韩 军 李建军 邓 军 林委之 达小丽 陈依新 沈光地

(北京工业大学光电子技术实验室, 北京 100022)

摘要: 采用光学薄膜理论中干涉矩阵模型计算了峰值波长为 630nm 的 AlGaInP 红光 LED 的 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}/\text{AlAs}$ 材料的常规 DBR 和复合 DBR 的反射谱特性, 用 LP-MOCVD 方法生长了模拟设计的 DBR 结构, 测量了其白光反射谱, 实验与模拟结果基本符合. 制备了采用 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}/\text{AlAs}$ 复合 DBR 的 LED 器件, 未封装输出光功率为 2.3mW, 外量子效率为 5.6%, 发光效率可达 12 lm/W, 比常规 DBR 器件提高了 35%. 验证了复合 DBR 与常规 DBR 相比, 可以大幅度提高 AlGaInP 红光 LED 的出光效率.

关键词: 红光 LED; 复合分布式布拉格反射镜; 金属有机物化学气相沉积; 光提取效率

EEACC: 4260D

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)01-0100-04

1 引言

近年来, 高亮度 AlGaInP 红光发光二极管 (light emitting diode, LED) 的应用日趋广泛, 市场需求不断扩大, 在各种显示照明系统、汽车尾灯及全色显示系统等领域起着越来越重要的作用^[1]. 比起早期的红光 LED 材料 GaP, GaAsP 及 AlGaAs, $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 材料在 In 组分固定为 0.5 时, 晶格常数与 GaAs 衬底精确匹配, 并且随着 Al 和 Ga 元素组分的变化, 可以发出从 650nm 的红光到 560nm 的黄绿光^[2]. 以 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 材料作为有源区的 LED 具有较高的内量子效率, 可达 90% 以上^[3]. 而目前影响 AlGaInP 红光 LED 性能的主要原因是光提取效率低, 即有源区辐射复合产生的光无法从器件内部射出, 导致传统红光 LED 的外量子效率只有 3% 左右.

提高 LED 光提取效率的方法有很多^[3], 如加厚电流扩展层、倒装结构、透明衬底、表面粗化、倒金字塔结构等. 还有一种比较有效的方法是分布式布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR), 即在有源区与衬底之间生长由两种折射率高低不同的材料组成的周期性结构, 每层厚度为 1/4 介质波长. 它可以将有源区向下发射的光波反射到器件出光面, 避免被 GaAs 衬底吸收, 从而提高了出光效率. 带 DBR 结构 LED 的优势是器件基本结构由一次外延完成, 材料晶格常数与衬底匹配, 反射率高, 对器件的电学特性影响小, 因此广泛应用于 LED 器件中.

但传统 DBR 只对垂直入射和小角度入射的光波提供高反射率, 而对大倾斜角入射光波的反射率很小. 由于有源区的自发辐射是各向同性的, 即发光点在整个立体角范围内均匀发光, 大角度入射光的 DBR 反射率比较低, 大部分将透过 DBR 被 GaAs 衬底吸收. 为解决以上传统 DBR 的不足, 我们引入了由两种不同中心波长的 DBR 组合而成的复合结构^[4], 称为复合 DBR. 本文通过模拟计算和器件实验, 说明复合 DBR 与传统 DBR 相比的优越性, 它可以大幅度提高 AlGaInP 红光 LED 器件的性能.

2 DBR 的设计与实验

2.1 结构设计和模拟计算

我们首先设计了常规 DBR 和复合 DBR, 具体结构如表 1 所示. 为了便于比较, 两种结构都采用 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ 和 AlAs 材料, 衬底采用 Si 掺杂 n 型 15° 倾斜角的 GaAs 衬底, 厚度为 350 μm . 常规 DBR

表 1 常规 DBR 和复合 DBR 设计结构

Table 1 Structure of normal DBR and coupled DBR

类型	常规 DBR		复合 DBR			
	材料	厚度	材料	厚度		
结构	$(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$	300nm	$(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$	300nm		
	15° 对	$\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$	$\lambda/4$	15° 对	$\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$	$\lambda/4$
		AlAs	$\lambda/4$		AlAs	$\lambda/4$
	GaAs 衬底	350 μm	15° 对	$\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$	$(1+8\%)\times\lambda/4$	
				AlAs	$(1+8\%)\times\lambda/4$	
			GaAs 衬底	350 μm		

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB604902), 北京市人才强教计划 (批准号: 05002015200504) 和北京工业大学第四届研究生科技基金资助项目

[†] 通信作者. Email: paulmartin@emails.bjut.edu.cn

2006-07-06 收到, 2006-09-27 定稿

周期数为 15, 中心波长为 630nm, 每层材料厚度为中心波长在该层波长的 1/4. 复合 DBR 上级 DBR 结构与常规 DBR 相同, 下级 DBR 周期数为 15, 每层材料厚度比常规 DBR 加厚 8%, 对应中心波长为 680nm. 为了接近实际器件, DBR 上部入射介质均选定为和实际器件一样的 $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$, 厚度为 300nm.

根据薄膜光学中的干涉矩阵法^[5], 可以计算常规 DBR 和复合 DBR 的反射谱, 结果如图 1 所示, 模拟中 GaAs 的消光系数取 0.2. 由图可见, 复合 DBR 的反射谱带宽比常规 DBR 的宽很多, 这样可将更多的入射光反射出去, 提高了反射效率.

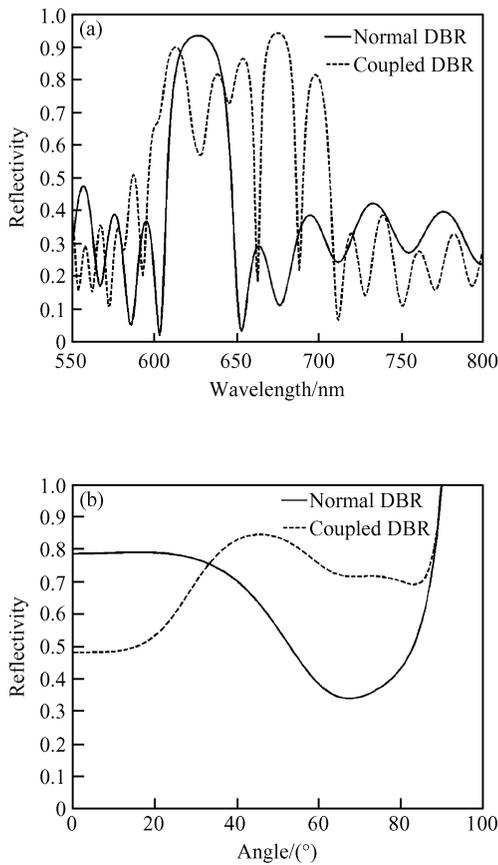


图 1 常规 DBR 和复合 DBR 的模拟反射谱 (a) 不同波长垂直入射的反射谱; (b) 630nm 相同波长不同入射角度的反射谱
Fig. 1 Simulated reflective spectra of normal DBR and coupled DBR (a) Reflectivity as function of wavelength with zero incident angle; (b) Reflectivity as function of incident angle with 630nm wavelength

2.2 材料实验

我们按表 1 设计的结构生长了两种 DBR 样品. 采用美国 Emcore 公司的 D125 型 MOCVD 系统, 在 700°C 和 0.8Pa 的条件下生长. III 族金属有机

物采用 TMGa, TMAI 和 TMIIn, V 族氢化物采用 AsH₃ 和 PH₃ 作源材料. 生长的同时进行 n 型掺杂, 掺杂剂采用 SiH₄. 同时, 用在位监测技术精确控制 DBR 的生长周期^[6], 以得到材料的准确光学厚度.

用 Accent 公司的 RPM100 型 PL 测试系统, 在相同室温条件下测量了两种 DBR 的白光反射谱, 用 Woollam 公司的光谱椭圆仪对样品进行了 20°~90° 的变角度反射率测试, 结果如图 2 所示. 图 2(a) 中纵坐标为反射光所产生光电流的强度, 与模拟结果相比出现较大振荡峰的原因是上下两层 DBR 之间的相互干扰调制效应, 以及顶层材料 $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$ 的影响, 反射光通过该层后将产生干涉, 但整体包络曲线与模拟结果相符, 复合 DBR 可以提供较高的反射谱带宽, 反射效果更好. 材料生长方面, $Al_xGa_{1-x}As$ 材料晶格常数与 GaAs 衬底匹配, 生长时引入晶格缺陷很少, 对有源区辐射效率影响很小. 电学特性方面, 研究表明 n 型掺杂适当时, DBR 的引入不会对器件的电学特性带来明显影响, 其串联电阻可以忽略不计^[7,8].

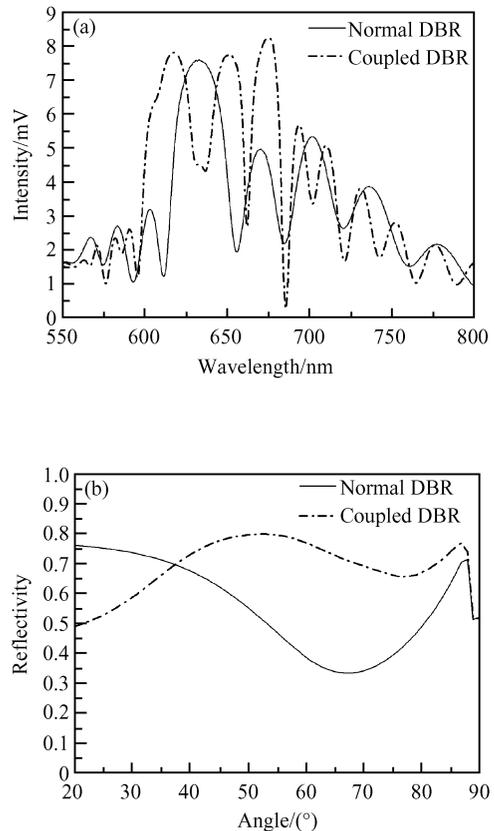


图 2 常规 DBR 与复合 DBR 材料的反射谱 (a) 垂直入射白光反射谱; (b) 630nm 波长不同角度入射反射谱
Fig. 2 Reflective spectra of normal DBR and coupled DBR (a) Normal incident with variable wavelength; (b) 630nm wavelength with variable incident angle

3 器件测试结果与分析

基于 DBR 相同的实验条件,利用 MOCVD 生长了三个 LED 样品,基本结构如图 3 所示.其中,样品 1 为不带 DBR 的基本 LED 结构,有源区周期数为 60 的多量子阱结构,上下加限制层,总厚度约为 $2\mu\text{m}$,有源区上部 GaP 窗口层厚度约为 $8\mu\text{m}$.之前实验表明,有源区采用 60 周期的多量子阱结构既可以较好地限制载流子,其自吸收又不很明显.样品 2 为样品 1 加常规 DBR 的 LED;样品 3 为加复合 DBR 的 LED,两种 DBR 结构与前面设计一致.外延生长结束后,进行 LED 的后工艺管芯制备.芯片大小为 $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$,顶部 p 型电极采用 AuZnAu 材料,底部 n 型电极采用 AuGeNi 材料.

p-GaP window layer
p-(Al _{0.7} Ga _{0.3}) _{0.5} In _{0.5} P cladding layer
MWQ active layer
n-(Al _{0.7} Ga _{0.3}) _{0.5} In _{0.5} P cladding layer
n-DBR
n-GaAs substrate

图 3 器件结构图

Fig. 3 Structure of the sample LEDs

我们在相同设备条件下测试了未封装器件的性能.20mA 注入电流下,得到的 EL 谱如图 4 所示;器件的输出光功率如图 5 所示.器件的外量子效率为注入电流乘以工作电压所得输入电功率与测量得到的输出光功率的比值.在主波长约为 620nm,峰值波长约为 630nm 时,未加 DBR 器件的输出光功率为 1.24mW,轴向光强为 80.4mcd,发光效率为 6.4lm/W,外量子效率约为 3.1%.加入常规 DBR 后,输出光功率为 1.87mW,增幅约 50%,轴向光强为 134mcd,增幅约为 66%,发光效率为 9.38 lm/W,外量子效率约为 4.7%.带复合 DBR 器件的输出光

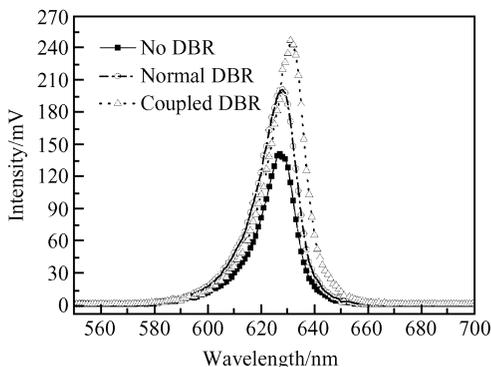


图 4 三种器件的 EL 谱

Fig. 4 Emission spectra of the sample LEDs

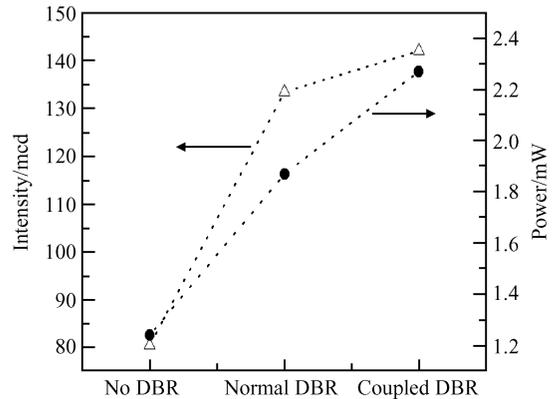


图 5 三种器件的未封装轴向光强和输出光功率

Fig. 5 Luminous intensity and output optical power of the sample LEDs

功率为 2.3mW,增幅约为 85%,比常规 DBR 器件提高 35%,轴向光强为 142mcd,增幅约为 76.6%,发光效率为 12 lm/W,外量子效率约为 5.8%.

由于生长过程中受设备条件所限,测试波长难免发生漂移,图 4 中三个样品的 EL 峰值波长略有不同.测试结果表明,复合 DBR 器件与常规 DBR 器件相比,轴向光强改善不是十分明显,只提高了 6%.产生以上结果的原因主要是,发光强度测试是在芯片未封装条件下,轴向 15° 范围内测量的,而器件输出光功率是在整个立体空间内用积分球测量的.复合 DBR 主要提高了器件的大角度方向的出光强度,对轴向光强的提高不十分明显,因而输出功率能更好地说明复合 DBR 对光提取效率的改善作用.

4 结论

对于 AlGaInP 红光 LED 的 Al_{0.6}Ga_{0.4}As/AlAs 常规 DBR 和复合 DBR,采用光学薄膜理论中干涉矩阵模型计算了峰值波长为 630nm 的反射谱特性,并用 LP-MOCVD 方法实验生长了所模拟的 DBR 结构,测量了其白光反射谱,实验与模拟结果基本符合,显示复合 DBR 器件反射特性明显优于常规 DBR 器件.实验制备了采用 Al_{0.6}Ga_{0.4}As/AlAs 复合 DBR 的 LED 器件,未封装输出光功率为 2.3mW,外量子效率为 5.8%,发光效率可达 12 lm/W,其出光效率较常规 DBR 可以提高约 35%.如配合以其他优化结构,复合 DBR 结构对 LED 光提取效率的改善效果会更为明显.

参考文献

- [1] Streubel K, Linder N, Wirth R, et al. High brightness Al-GaInP light-emitting diodes. IEEE J Sel Topics Quantum E-

- lectron, 2002, 8(2): 321
- [2] Gessmann T, Schubert E F. High-efficiency AlGaInP light-emitting diodes for solid-state lighting applications. *J Appl Phys*, 2004, 95(5): 2203
- [3] Altieri P, Jaeger A, Windisch R, et al. Internal quantum efficiency of high-brightness AlGaInP light-emitting devices. *J Appl Phys*, 2005, 98: 086101. 1
- [4] Chiou S W, Lee P C, Huang C K, et al. Wide angle distributed Bragg reflectors for 590nm amber AlGaInP light-emitting diodes. *J Appl Phys*, 2000, 87(4): 2052
- [5] Lin Yongchang, Lu Weiqiang. Principle of optical films. Beijing: National Defence Industry Press, 1990: 35 (in Chinese) [林永昌, 卢维强. 光学薄膜原理. 北京: 国防工业出版社, 1990: 35]
- [6] Deng Jun, Li Jianjun, Lian Peng, et al. Growth high quality material of VCSEL by MOCVD in-situ optical monitoring. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(7): 827 (in Chinese) [邓军, 李建军, 廉鹏, 等. MOCVD 原位监测垂直腔面发射激光器材料生长. *光电子 · 激光*, 2004, 15(7): 827]
- [7] Fanstenu J M, Robinson G Y. Low-resistance visible wavelength distributed Bragg reflectors by using small energy band offset heterojunctions. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(25): 3758
- [8] Winston D W, Hayes R E. Optoelectronic device simulation of Bragg reflectors and their influence on surface-emitting laser characteristics. *IEEE J Quantum Electron*, 1998, 34(4): 710

High Brightness AlGaInP LED with Coupled Distributed Bragg Reflector*

Yu Xiaodong[†], Han Jun, Li Jianjun, Deng Jun, Lin Weizhi, Da Xiaoli,
Chen Yixin, and Shen Guangdi

(*Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China*)

Abstract: An $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}/\text{AlAs}$ distributed Bragg reflector (DBR) for a 630nm peak wavelength high brightness AlGaInP LED is studied. The reflective characteristics of normal DBR and coupled DBR are simulated using the interference matrix model. The simulated DBR structures and corresponding LEDs are grown by LP-MOCVD. The simulated and experimental results both indicate that the coupled DBR can remarkably increase the light extraction efficiency of an AlGaInP LED. The non-encapsulated LED with the coupled DBR performs well, with 2.3mW output optical power, 12 lm/W luminous efficiency, and 5.6% external quantum efficiency, with an improvement of 35% over that with a normal DBR.

Key words: red LED; coupled DBR; MOCVD; light extraction efficiency

EEACC: 4260D

Article ID: 0253-4177(2007) 01-0100-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2006CB604902), the Beijing Municipal Program of Talent and Education Development (No. 05002015200504), and the Beijing University of Technology (BJUT) 4th Graduate Students' Research Fund

[†] Corresponding author. Email: paulmartin@emails.bjut.edu.cn

Received 6 July 2006, revised manuscript received 27 September 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics