

文章编号: 0253-2239(2006)05-0752-5

入射角对 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As-AlAs}$ 分布布拉格反射器 反射光谱的影响*

郑树文 范广涵 李述体 雷勇 黄琨

(华南师范大学光电子材料与技术研究所, 广州 510631)

摘要: 采用传输矩阵法对 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As-AlAs}$ 材料的发光二极管分布布拉格反射器进行入射角的反射光谱研究, 计算发现反射偏振光 p 和 s 随入射角的增大呈“V”形变化, 在 49.8° 处有最小反射值。不同入射介质[以空气和限制层 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 材料]下的反射光谱受入射角的影响差异很大, 其中入射角对空气入射介质的反射谱影响较小, 由 0° 入射的反射率 88.13% 降至 45° 的 84.94%, 反射峰值波长蓝移仅 10 nm; 但入射角对 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 入射介质的反射谱影响很大, 仅从 0° 到 45° 入射, 反射率降幅就超过 45%, 反射峰值波长蓝移超过 127 nm。为了减缓这种影响, 提出了多波长布拉格反射器结构设计。计算表明多波长分布布拉格反射器在 $0^\circ\sim 45^\circ$ 的入射角内比传统的分布布拉格反射器有更好的光谱特性, 这对提高发光二极管的出光效率有现实意义。

关键词: 光电子学; 分布布拉格反射器; 传输矩阵法; $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As-AlAs}$; 入射角

中图分类号: TN248; TN209 文献标识码: A

Research on Reflection Spectrum of $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As-AlAs}$ Distributed Bragg Reflector at Different Incidence Angles

Zheng Shuwen Fan Guanghan Li Shutu Lei Yong Huang Kun

(Institute of Opto-Electronic Materials and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631)

Abstract: The reflection spectra of $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As-AlAs}$ distributed Bragg reflector (DBR) at different incident angle are calculated by transfer matrix method. The reflection spectra curve of p-polarized and s-polarized plane waves vary with a ‘V’ shape with the rise of the incident angle and the lowest reflectivity is at 49.8° . The reflection spectra of different incident media [air and $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$] are greatly different at different incident angles. The change of the reflection spectrum from air to DBR is small, the reflectivity is 88.13% at incident angle 0° as well as 84.98% at 45° , and the peak wavelength of reflection spectrum is blue-shifted about 10 nm. But the change of reflection spectrum of from $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ to DBR is great, the reflectivity decreases over 45% and the peak wavelength is blue-shifted over 127 nm from incident angle 0° to 45° . In order to reduce the changes, a new multi-wavelength DBR design is brought forward. The theoretical result shows the reflectance spectrum of multi-wavelength DBR design is better than that of the conventional DBR design, which is important to enhance light extraction from LED.

Key words: optoelectronics; distributed Bragg reflector; transfer matrix method; $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As-AlAs}$; incidence angle

1 引 言

近几年, 超高亮度发光二极管 (HB-LED) 由于具有功耗低、亮度高、寿命长和发光效率高等优点, 已广泛应用于照明和信息显示等领域。对于四元系

的 AlGaInP 材料因为具有相匹配的 GaAs 衬底和通过调节 Al 组分获得 1.88~2.3 eV 的直接跃迁带隙, 所以成为制作高亮度红、橙和黄光的发光二极管 (LED) 材料^[1~3]。但由于 GaAs 衬底对红、橙和黄

* 广州市科技重点计划基金(1999-035-1)资助课题。

作者简介: 郑树文(1977~), 男, 广东湛江人, 硕士研究生, 主要从事光电子器件外延和器件的设计研究。

E-mail: fineday8815@163.com

收稿日期: 2005-05-08; 收到修改稿日期: 2005-09-20

波段光有强吸收性,这就限制发光二极管的出光效率,影响其应用市场。为了克服这问题,常用的方法是在 GaAs 衬底与 n 型限制层间生长分布布拉格反射器 (DBR)。 AlGaAs 和 AlAs 材料由于与 AlGaInP 材料生长相容、并与 GaAs 衬底匹配,故成为制备分布布拉格反射器的首选材料^[4]。

目前,关于 AlGaAs 材料系的分布布拉格反射器文献报道不少^[4~7],但它们的研究都以空气为入射介质,并只考虑光正入射于分布布拉格反射器的特殊情况。但实际上发光二极管属于自发辐射发光,从发光区发出的光入射到布拉格反射层的角度是分散的;又根据发光二极管结构可知,光是通过限制层介质后才入射到分布布拉格反射器表面而不是从空气介质入射到分布布拉格反射器表面。所以研究不同入射角和入射介质对分布布拉格反射器的反射光谱影响很有意义。本文以 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{AlAs}$ 材料分布布拉格反射器为例分析这些问题。

2 理论模型

2.1 传统发光二极管-分布布拉格反射器结构

图 1 为含 20 周期分布布拉格反射器的 AlGaInP 双异质发光二极管结构。该结构的限制层为 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 材料,发光层为 $(\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 材料。从发光层射出的 610 nm 光经 n 型限制层后入射到分布布拉格反射器表面。对于双异质结橙光发光二极管,其 n 型 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 限制层厚度一般为 $0.5 \mu\text{m}$ 左右,而发光二极管芯片的尺寸一般等于或大于 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$,所以出射光由 n 型限制层射向分布布拉格反射器表面的入射角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围。

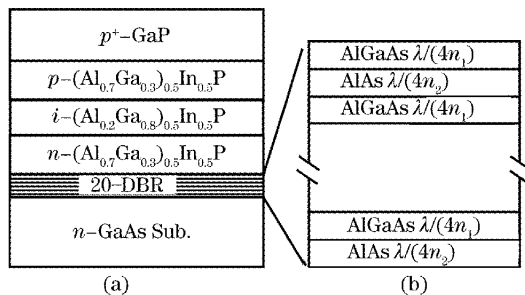


图 1 含传统 20 周期分布布拉格反射器 (b) 的 AlGaInP 发光二极管 (a) 结构

Fig. 1 Schematic cross-sectional view of AlGaInP LED (a) with 20-period conventional DBR (b)

2.2 分布布拉格反射器的理论方程

分布布拉格反射器是由与衬底相匹配、光学厚度为四分之一波长的高折射率和低折射率两种材料交替叠加而成,组成分布布拉格反射器的每层厚度 d 由 (1) 式决定:

$$d_{l,h} = \frac{m\lambda_0}{4n_{l,h}\cos\theta_{l,h}}, \quad (1)$$

式中 m 为奇数, λ_0 为中心设计波长,下标 l 和 h 分别表示低和高折射率两种材料, n 为分布布拉格反射器材料的折射率, θ 为光入射到分布布拉格反射器某一材料中的角度。

根据菲涅耳公式和电磁场的边界条件知,对于 S 层的分布布拉格反射器,其第 K 层的光学传输矩阵可表示为^[8]

$$\mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} \cos\delta_k & j\sin\delta_k \cdot \eta_k^{-1} \\ j\sin\delta_k \cdot \eta_k & \cos\delta_k \end{bmatrix}, \quad (2)$$

对于 p 光 (即 TM 波) 的光学导纳 $\eta_k = \eta_{kp} = n_k / \cos\theta_k$, 对于 s 光 (即 TE 波) 的光学导纳 $\eta_k = \eta_{ks} = n_k \cos\theta_k$ 。所以整个 S 层分布布拉格反射器反射器的传输矩阵可写为

$$\mathbf{M} = \prod_{k=1}^S \mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} \\ \mu_{21} & \mu_{22} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中的 μ_{ij} ($i = 1, 2; j = 1, 2$) 为 \mathbf{M} 的矩阵元。又分布布拉格反射器的反射系数 r 可写为

$$r = \frac{(\mu_{11} + \mu_{12}\eta_g)\eta_0 - (\mu_{21} + \mu_{22}\eta_g)}{(\mu_{11} + \mu_{12}\eta_g)\eta_0 + (\mu_{21} + \mu_{22}\eta_g)}, \quad (4)$$

(4) 式的入射介质光学导纳 η_0 为

$$\eta_0 = \eta_{0p} = n_0 / \cos\theta_0 \text{ (对于 } p \text{ 光);}$$

$$\eta_0 = \eta_{0s} = n_0 \cos\theta_0 \text{ (对于 } s \text{ 光).}$$

衬底的光学导纳 η_g 为 $\eta_g = \eta_{gp} = n_g / \cos\theta_g$ (对于 p 光); $\eta_g = \eta_{gs} = n_g \cos\theta_g$ (对于 s 光)。

由 (4) 式可求得整个 S 层分布布拉格反射器的 p 光反射率为 $R_p(\theta) = r_p \times r_p^*$, s 光反射率为 $R_s(\theta) = r_s \times r_s^*$ 。其中 r_p, r_p^* 分别为分布布拉格反射器对 p 光的反射系数及其复共轭, r_s, r_s^* 分别为分布布拉格反射器对 s 光的反射系数及其复共轭。所以整个 S 层分布布拉格反射器的平均反射率为

$$R(\theta) = \frac{1}{2} [R_p(\theta) + R_s(\theta)]. \quad (5)$$

利用上述方程可以对传统 20 周期 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ - AlAs 分布布拉格反射器进行计算分析。计算中用到的光学参量如表 1 示,设计的分布布拉格反射器中心反射波长为 610 nm。

表 1 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 和 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 材料的光学参量(610 nm, 25 °C)^[9~10]
Table 1 Optical parameters of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ and $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ (610 nm and 25 °C)

$(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$		$\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$		AlAs		GaAs	
n	k	n	k	n	k	n	k
3.25433	0.00045	3.61302	0.0024	3.13708	0.0003	3.883	0.2092

3 计算结果与分析

3.1 入射角对分布布拉格反射器的反射偏振光 p 和 s 的光谱分析

图 2 为传统 20 周期分布布拉格反射器的 p 和 s 光反射率随入射角的变化关系。由图 2 知在正入射时, p 和 s 光不分离, 反射率均为 66.35%。在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围, p 和 s 光发生分离, 且它们的反射率随入射角增大呈“V”形变化, 在 49.8° 处有极小值, 此时 p 光反射率为 0.28% 而不为零, 这主要因为 AlGaAs 材料对 610 nm 入射光有吸收性。在 90° 附近, p 和 s 光的反射率比 0° 入射时还高, 超过 90%。值得注意的是, 该 20 周期分布布拉格反射器在 49.8° 处的平均反射率 R 仅为 19.97%, 这与正入射下得到的 66.35% 反射率相差很大。所以说不同入射角对分布布拉格反射器反射光谱的影响比较大。

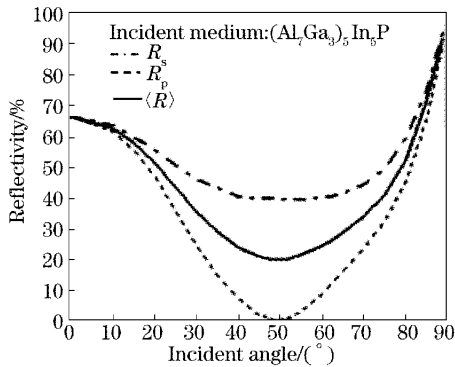


图 2 p 和 s 偏振光的反射率与入射角关系
Fig. 2 Reflectivity of incident p-polarized and s-polarized plane waves versus incident angles

图 3 为入射角对偏振光 p 和 s 反射谱峰值波长的影响情况。在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的入射范围, p 和 s 光的反射峰值波长从 610 nm 蓝移近 250 nm 处, 移动距离达 360 nm。图 3 还指出: 从 $0^\circ \sim 70.09^\circ$ 间, p 光的峰值波长比 s 光峰值波长蓝移慢些, 在 $70.09^\circ \sim 90^\circ$ 之间, p 光的峰值波长比 s 光峰值波长蓝移的快, 它们的变化存在一个转变角度。以空气入射介质计算 p 和 s 光的峰值波长变化, 也求得同一转变角度, 但在计算 20 周期 GaN/ $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ 材料分布布拉格反射器时, p 和 s 光的峰值波长转变角度在 53° 左右。可

见, 这个 p 和 s 光峰值波长的转变角度与入射介质无关, 可能与材料的折射率或折射率差相关。

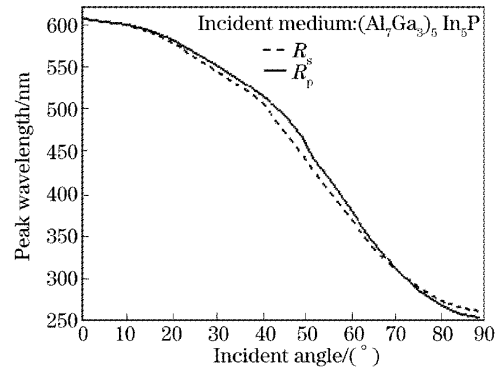


图 3 p 和 s 偏振光的反射峰值波长与入射角关系
Fig. 3 Reflective peak wavelength of p-polarized and s-polarized plane waves versus incident angles

3.2 不同入射介质下的分布布拉格反射器反射光谱分析

图 4 和图 5 分别表示光从空气介质和 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 介质入射到传统 20 周期分布布拉格反射器的光谱反射情况。由两图的反射谱可知: 随着入射角的增大, 不同入射介质下的反射谱峰值波长都向短波移动。这可从(1)式得到解释: 因入射角 θ 增大, $\cos \theta$ 值就变小, 而 n 、 m 和 d 为常量, 故反射的峰值波长 λ 就向短波长移动。图 4 的反射光谱受入射角的影响不是很明显, 峰值波长从 0° 的 608.17 nm 蓝移到 45° 时的 598.164 nm, 差距仅为

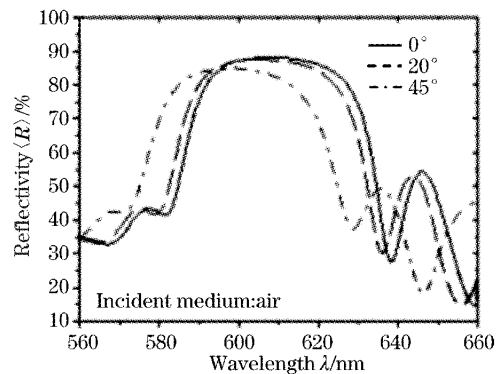


图 4 从空气介质入射下的不同角度反射光谱
Fig. 4 Reflection spectra at different incident angles by air incident medium (conventional DBR)

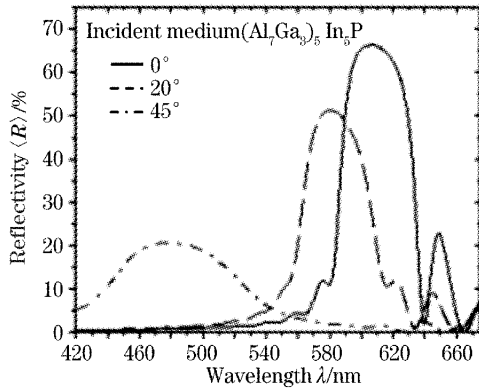


图 5 从 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 介质入射的不同角度反射光谱

Fig. 5 Reflection spectra of different incident angles by $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ incident medium (conventional DBR) 10 nm, 反射率只下降 3%。而图 5 表明以 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 为入射介质的反射光谱受到入射角的影响较大,由 0° 的 606.37 nm 峰值波长移动至 45° 的 479.05 nm,蓝移距离超过 127 nm,其反射率也由 0° 的 66.36% 下降至 45° 的 20.65%,下降幅度超过

表 2 入射角在不同入射介质下对两种分布布拉格反射器结构的反射光谱计算值

Table 2 The data of reflection spectra with different incident angles, different incident medium and different DBR designed

DBR structure	Incident medium	Incident angle / ($^\circ$)	Peak wavelength of Reflection Spectrum / nm	Half-width of peak wavelength / nm	Reflectivity / %	Integrated of Reflection Spectrum / (a. u.)
Conventional DBR	Air	0	608.17	52.0061	88.13	56.12
		20	605.04	52.3165	87.55	55.18
		45	598.164	55.2291	84.94	53.65
(20 periods)	$(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$	0	606.37	47.0799	66.36	34.59
		20	580.16	45.6865	51.22	25.90
		45	479.05	88.0206	20.63	21.20
Multi-wavelength DBR (40 layers)	$(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$	0	620.50	57.1598	70.83	38.94
		20	594.25	51.9213	55.15	29.19
		45	501.25	82.3229	20.66	21.79

Note: The numbers calculated of Embedded Area of Reflection Spectrum is based the ranges of wavelength: 560~650 nm for air incident medium, and 360~700 nm for $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ incident medium

3.3 多波长分布布拉格反射器设计与分析

由前面分析可知,入射角对传统分布布拉格反射器结构的反射光谱影响很大。为了减缓这一影响,本文设计了多波长分布布拉格反射器,其结构如图 6 所示(为与传统 20 周期分布布拉格反射器比较,该结构也设计 40 层)。它是由 DBR1、DBR2、DBR3 和 DBR4 共四个子部分分布布拉格反射器组成。各部分的分布布拉格反射器周期数都为 5 对,组成多波长分布布拉格反射器材料的各层厚度由公式(1)和各子部分分布布拉格反射器的中心反射波

长决定。

2/3。所以说以空气介质入射得到的反射光谱要比以 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 介质入射得到的反射光谱好。从表 2 的反射谱数据知:在正入射角时,从空气介质入射得到 88.13% 的光谱反射率,比从 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 介质入射获得 66.36% 的反射率高出 21.77%,这个差别很大。而目前实验室对分布布拉格反射器反射光谱的测量都基于让入射光从空气介质入射至分布布拉格反射器表面来测量的,所以说实验测得的分布布拉格反射器反射光谱值并不是其在发光二极管器件中的实际工作值,但实验值可以作为分布布拉格反射器结构设计的参考。一般而言,从空气介质入射获得的分布布拉格反射器反射率越大,那么从 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 介质入射得到的分布布拉格反射器反射率也就越高。表 2 的数据还指出:不同入射介质下的反射光谱面积都随入射角度的增大而减少,这说明随着入射角的增大,分布布拉格反射器对入射光的总反射量在减少,即有更多入射光被分布布拉格反射器结构本身或 GaAs 衬底所吸收。

长决定。

该多波长分布布拉格反射器反射光谱的计算结果见表 2。比较表 2 两种不同分布布拉格反射器结构的反射光谱值,多波长分布布拉格反射器的反射光谱比传统分布布拉格反射器的反射光谱有明显的改善:反射光谱半峰宽得到加大(特别在 $0^\circ\sim 20^\circ$ 范围),峰值波长随入射角的蓝移量得到一定减缓,反射率也更高,反射光谱的包络面积也得到增大。

图 7 为两种不同分布布拉格反射器结构在 610 nm 处的反射率与入射角关系,由图知多波长分

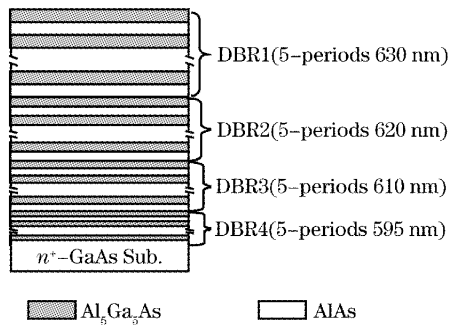


图 6 多波长 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ - AlAs 分布布拉格反射器结构(中心反射波长为 610 nm)

Fig. 6 The multi-wavelength DBR structure with $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ - AlAs (central reflective wavelength at 610 nm)

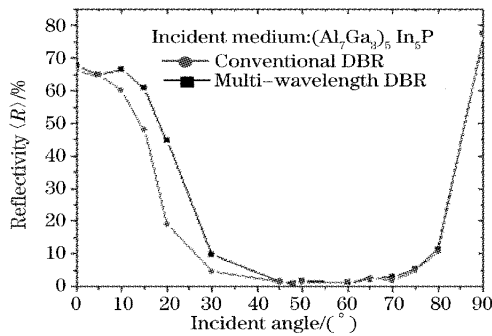


图 7 两种不同分布布拉格反射器结构的光谱反射率(在 610 nm)与入射角关系

Fig. 7 Reflectivity (610 nm) of two different DBR design versus incident angles

布布拉格反射器结构在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 入射角范围比传统分布布拉格反射器结构有更高反射率,而在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 入射范围,这两种结构的反射光谱差别不大。如果增加这多波长分布布拉格反射器结构的周期数,又考虑各子部分分布布拉格反射器的插层以及优化相关参量,多波长分布布拉格反射器会比传统分布布拉格反射器有更好的光谱特性。总之,多波长分布布拉格反射器对进一步提高发光二极管的出光效率,降低 GaAs 衬底的吸收有现实意义。

4 结 论

根据传输矩阵的理论方程对应用于发光二极管的 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ - AlAs 材料分布布拉格反射器反射光谱进行计算和分析。计算结果表明入射角对 p 和

偏振光 s 的反射光谱的变化明显不同。不同入射介质[空气介质和 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 介质]下的分布布拉格反射器反射光谱差异很大,因此实验中光谱仪测量的分布布拉格反射器反射光谱值并不是其在器件中的实际工作值。多波长分布布拉格反射器的结构设计比传统分布布拉格反射器的结构设计在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 间有更好的光谱特性,对减缓入射角对反射光谱的影响,提高发光二极管的出光效率,加快发光二极管的应用市场很有意义。下一步的工作是继续设计新的分布布拉格反射器器件结构以及优化相关参量。

参 考 文 献

- 1 Hideto Sugawara, Kazuhiko Itaya, Gen-ichi Hatakoshi, Hybrid-type InGaAlP/GaAs Distributed Bragg reflectors for InGaAlP light-emitting diodes[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1994, **33**(11): 6195~6198
- 2 H. Sugawara, K. Itaya. High-Brightness InGaAlP green light-emitting diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61** (15): 1775~1777
- 3 Hidenao Tanaka, Yuichi Kawamura, Hajime Asahi. Refractive indices of $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51-x}\text{Al}_x\text{P}$ lattice matched to GaAs[J]. *J. Appl. Phys.*, 1986, **59**(3): 985~986
- 4 T. Saka, M. Hirotsu, T. Kato *et al.*. Bragg reflector of GaAlAs/AlAs layers with wide bandwidth applicable to light emitting diodes[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**(1): 380~383
- 5 A. Bhattacharya, M. Nasarek, U. Zeimer *et al.*. Comprehensive characterization of MOVPE growth AlGaAs/AlAs distributed Bragg reflector structures by optical reflectance, X-ray diffraction and atomic force microscopy[J]. *J. Crystal Growth*, 2005, **274**(3~4): 331~338
- 6 Zhao Run. Designing of DBR of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ material for HB-LED[J]. *Semiconductor Information*, 1999, **36**(2): 44~47 (in Chinese)
赵 润. 用于 HB-LED 的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料 DBR 的设计[J]. 半导体情报, 1999, **36**(2): 44~47
- 7 Wei Jiyong, Huang Baibiao, Yu Yongqin *et al.*. AlGaAs/AlAs DBR growth by MOCVD and its uniformity [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(8): 781~783 (in Chinese)
尉吉勇,黄柏标,于永芹等. AlGaAs/AlAs 体系 DBR 的 MOCVD 生长及表征[J]. 光电子·激光, 2002, **13**(8): 781~783
- 8 Wang Guohong. High brightness AlGaInP light emitting diode fabrication [D]. Beijing: Institute of Semiconductor of The Chinese Academy of Sciences, 1998. 42~43 (in Chinese)
王国宏. 高亮度 AlGaInP 发光二极管的研制[D]. 北京:中国科学院半导体研究所, 1998. 42~43
- 9 Aleksandra B. Djuricic, Aleksandar D. Rakic, Paul C. K. Kwok *et al.*. Modeling the optical constants of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ alloys[J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **86**(1): 445~451
- 10 D. E. Aspnes, S. M. Kelso, R. A. Logan *et al.*. Optical properties of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [J]. *J. Appl. Phys.*, 1986, **60**(2): 754~766