

## 940 nm VCSEL 中 DBR 的反射特性分析

潘智鹏<sup>1,2</sup>, 李伟<sup>1\*</sup>, 吕家纲<sup>1,2</sup>, 常津源<sup>1,2</sup>, 王振诺<sup>1,2</sup>, 刘素平<sup>1</sup>, 仲莉<sup>1</sup>, 马晓宇<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程中心, 北京 100083;<sup>2</sup>中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

**摘要** 应用传输矩阵法计算并分析了分布式布拉格反射镜(DBR)的堆叠方式对反射谱的影响,当入射介质为 GaAs 材料、出射介质为空气时, DBR 以低折射率层/高折射率层(LH)的方式排列具有更高的反射率。研究了入射角度对 DBR 反射率的影响,利用角度相关的传输矩阵模型对 DBR 反射谱进行计算,结果表明, DBR 反射谱随着入射角度的增加而蓝移,最大反射率随着入射角度的增加而增大。建立了 940 nm 波长下  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  的材料折射率与铝的原子数分数  $x$  之间的线性拟合模型,并通过多层剖分等效法,计算分析了渐变层对 DBR 反射谱特性的影响。相比于突变型 DBR 结构,渐变型 DBR 结构在维持最高反射率基本不变的情况下,反射带宽有所减小。

**关键词** 激光器; 传输矩阵法; 垂直腔面发射激光器; 分布式布拉格反射镜; 入射角度; 渐变层; 反射谱

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221034

## 1 引言

940 nm 波段的垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有转换效率高、斜率效率高、易于集成、分辨率高和可避免红外曝光等特性,是 3D 摄像头的理想光源,有望被应用于虚拟现实、增强现实以及汽车辅助驾驶中<sup>[1-5]</sup>。具有高反射率、低串联电阻的分布式布拉格反射镜(DBR)对于改善 VCSEL 的阈值特性以及热特性都有重要意义<sup>[6]</sup>,目前常用的 DBR 结构有突变型和渐变型,在维持高反射率的同时,渐变型 DBR 结构能有效降低异质结串联电阻,从而抑制自生热效应,改善器件性能并提高可靠性<sup>[7-9]</sup>。王小东等<sup>[10-11]</sup>研究了非均匀渐变界面 DBR 的光学特性,发现渐变层的引入会导致整个 DBR 结构反射相位的移动。马丽娜等<sup>[7]</sup>对不同渐变结构 DBR 的反射谱和势垒特性进行了研究,发现渐变型 DBR 能有效降低 P-DBR 的串联电阻。张冠杰等<sup>[12]</sup>研究了  $\text{AlGaAs}$  材料 DBR 的生长特性,证明界面平整度会影响 DBR 的反射谱特性。宁永强等<sup>[13]</sup>对 980 nm VCSEL 的 DBR 进行了设计优化,将串联电阻降低至  $0.05 \Omega$ 。

本文研究了 940 nm VCSEL 中 DBR 的排列方式、DBR 的周期数、入射角度、渐变层厚度对反射谱特性的影响,该 DBR 结构由  $\text{Al}_{0.89}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.00}\text{GaAs}$  材料组成。计算分析了不同堆叠方式和不同周期数对 DBR 反射率的影响,研究发现低折射率层/高折射率层(LH)堆叠方式下 DBR 的反射率更高。利用角度相关

的传输矩阵模型对不同入射角度下的 DBR 反射谱进行了计算分析,结果显示,随着入射角度的增加, DBR 反射谱整体蓝移。为了简化渐变 DBR 结构反射谱特性的计算,首先对  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  的材料折射率与铝的原子数分数  $x$  的关系进行了线性拟合,再利用多层剖分等效法,将  $\text{Al}_{x_1-x_2}\text{GaAs}$  线性渐变层划分为折射率近似为常数的小区间,验证了随着渐变层厚度的增加, DBR 最高反射率基本保持不变、高反带宽变窄的结果。

## 2 计算方法

2.1  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  的折射率线性模型

对于 GaAs 基垂直腔面发射激光器而言,  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  是应用最广的 DBR 材料<sup>[14-17]</sup>,需要对其折射率特性进行比较详细的研究。 $\text{Al}_x\text{GaAs}$  材料是一种由  $\text{AlAs}$ (原子数分数为  $x$ )和  $\text{GaAs}$ (原子数分数为  $1-x$ )重新组合的半导体合金材料,  $x$  的取值范围为  $0\sim 1$ ,  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  材料的折射率会随着铝的原子数分数  $x$  的变化而变化。我们通过 Sellmeier 等式,能够准确计算  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  材料的折射率<sup>[18-19]</sup>:

$$E_x = 1.425 + 1.155x + 0.37x^2, \quad (1)$$

$$\Delta_x = 1.765 + 1.115x + 0.37x^2 - E_x, \quad (2)$$

$$\chi_1 = hc/(\lambda E_x), \quad (3)$$

$$\chi_2 = hc/[\lambda(E_x + \Delta_x)], \quad (4)$$

$$f_x = \left[ 2 - (1 + \chi)^{1/2} - 2 - (1 - \chi)^{1/2} \right] / \chi^2, \quad (5)$$

$$A_x = 6.3 + 19.0x, \quad (6)$$

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-08-01; 录用日期: 2022-08-10; 网络首发日期: 2022-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(62174154)

通信作者: \*liwei66@semi.ac.cn

$$B_x = 9.4 - 10.2x, \quad (7)$$

$$n_x = \sqrt{A_x \left[ f_{\chi_1} + \frac{f_{\chi_2}}{2} \left( \frac{E_x}{E_x + \Delta_x} \right)^{3/2} \right] + B_x}, \quad (8)$$

式中:  $E_x$  为  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  材料的带隙能量;  $\Delta_x$  为自旋分裂带能量与直接带隙的差值;  $\chi_1$  为光子能量与带隙能量的比值;  $\chi_2$  为光子能量与自旋分裂带能量的比值;  $\lambda$  为真空波长;  $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  为普朗克常数;  $c=2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$  为真空光速;  $f_x$  为带间跃迁简化模型的能量相关项;  $\chi=\chi_1, \chi_2$ ;  $A_x$  和  $B_x$  均为拟合常数;  $n_x$  为  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  材料的折射率;  $f_{\chi_1}$  和  $f_{\chi_2}$  分别为带隙能量和自旋分裂带能量相关项。如图 1 中点线所示, 我们首先计算了在波长  $\lambda=940 \text{ nm}$  的情况下,  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  的材料折射率与铝的原子数分数  $x$  的变化关系。为了简化渐变层结构的传输矩阵模型计算, 对  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  的材料折射率与  $x$  的关系进行线性拟合, 可以得到  $n_{\text{Al}_x\text{GaAs}} = -0.572x + 3.550$ , 其中  $n_{\text{Al}_x\text{GaAs}}$  是  $940 \text{ nm}$  波长下  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  的材料折射率。图 1 中的实线是通过线性拟合关系绘制的  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  的材料折射率与  $x$  的关系, 与 Sellmeier 等式计算结果基本吻合, 因此对于后续有关  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  材料折射率的计算, 可以直接采用线性拟合的计算结果。对于渐变 DBR 结构而言,  $\text{Al}_{x_1-x_2}\text{GaAs}$  渐变层材料中铝的原子数分数在  $x_1 \sim x_2$  的范围内线性变化, 其折射率在  $n_1 \sim n_2$  的范围内线性变化。我们在  $\text{Al}_{x_1-x_2}\text{GaAs}$  渐变层的传输矩阵计算过程中, 采用多层剖分等效法将  $\text{Al}_{x_1-x_2}\text{GaAs}$  渐变层分割成足够小的超薄等厚层, 在每个区间内铝近似均匀分布, 因此每个区间的折射率能够用常数代替, 只要划分的区间足够多, 这种阶梯层状结构就可以真实地代替渐变层结构。

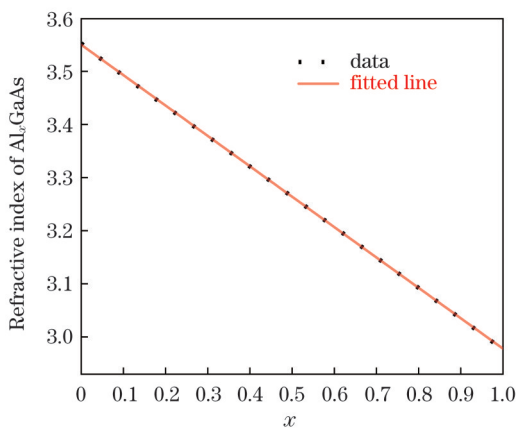


图 1 940 nm 波长下  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  的折射率与  $x$  的关系

Fig. 1 Refractive index of  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  versus  $x$  at 940 nm wavelength

## 2.2 多层介质膜的传输矩阵模型

在常见的 VCSEL 结构中, 需要在谐振腔两侧放置具有高反射率的反射镜结构, 该结构一般由光学厚度为  $1/4$  波长的高低折射率材料交替组成, 这种 DBR

结构的反射率由材料的折射率以及周期数决定<sup>[6]</sup>。传输矩阵法是用矩阵的形式来描述电磁波在多层介质中的传播情况, DBR 作为一种多层膜系结构, 可以采用传输矩阵理论进行详细的研究<sup>[20-24]</sup>。

DBR 多层结构的传输矩阵模型如图 2 所示, 共有  $N$  对 DBR 结构, 即共有  $2N$  层光学厚度为  $\lambda/4$  的半导体薄层。其中, 入射电场和出射电场为  $E$ , 入射磁场强度和出射磁场强度为  $H$ , 各薄层半导体材料的折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$ , 与之对应的各层厚度为  $d_1 = \frac{\lambda}{4n_1}$  和  $d_2 = \frac{\lambda}{4n_2}$ , 入射介质的材料折射率为  $n_s$ , 出射介质的材料折射率为  $n_0$ , 真空介质中入射光波长为  $\lambda$ 。假设光由入射介质垂直入射到 DBR 结构中, 则第  $j$  ( $1 \leq j \leq 2N$ ) 层的传输矩阵可以表示为

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / n_j \\ i n_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}. \quad (9)$$

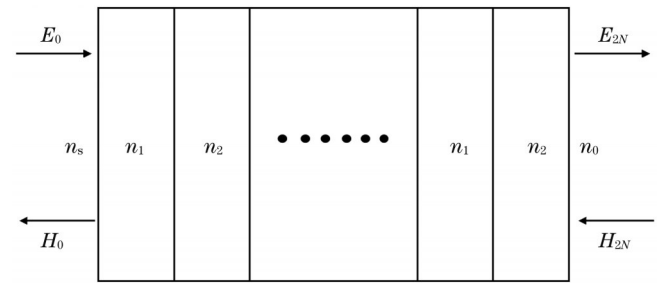


图 2 DBR 多层介质膜的传输矩阵模型

Fig. 2 Transmission matrix model of DBR multilayer dielectric film

在不考虑 DBR 结构中的吸收损耗和散射损耗的情况下, 光在半导体薄层第  $j$  层中传输的相位差为  $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j$ , 其中  $n_j$  和  $d_j$  分别是第  $j$  层的材料折射率和厚度。在图 2 所示的 DBR 多层介质膜结构中, 入射电磁场 ( $E_0$  和  $H_0$ ) 和出射电磁场 ( $E_{2N}$  和  $H_{2N}$ ) 之间的关系可以由总的传输矩阵来表示:

$$\begin{bmatrix} E_0 \\ H_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{2N} \\ H_{2N} \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^m \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / n_j \\ i n_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{2N} \\ H_{2N} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中:  $m$  为 DBR 的层数。那么整个 DBR 结构的反射率<sup>[24]</sup>可以表示为

$$R = \frac{(n_s B - C)(n_s B - C)^*}{(n_s B + C)(n_s B + C)^*}, \quad (11)$$

式中:  $*$  表示取复共轭运算。

## 2.3 DBR 的角度反射谱修正模型

考虑到入射角度对 DBR 结构反射率的影响, 需要对式 (9) 进行修正<sup>[21]</sup>, 并对其中的一些参数进行修改。由菲涅耳折射率定律可知, 当光在 DBR 结构中传播时, 其在各层的传输角度是不同的。从图 3 可以清楚地看出一束单色光在 DBR 半导体薄层中的传输角度

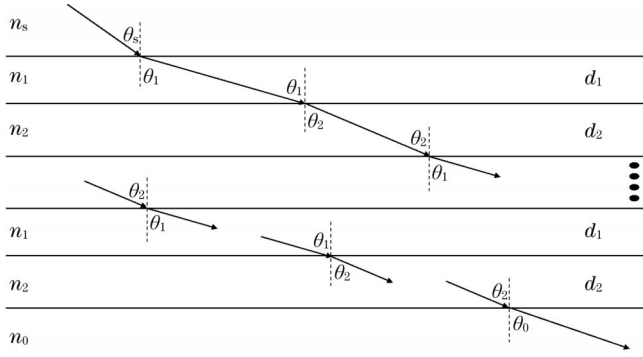


图 3 DBR 各层结构中的传输角度模型

Fig. 3 Transmission angle model of each layer in DBR structure

的变化。传输角度在各层界面之间的变化主要由材料的折射率决定,并且由于各介质薄层为均匀介质,因此只需要考虑突变介质界面处传输角度的变化。其中,光在折射率为  $n_s$  的入射介质中的传输角度为  $\theta_s$ 、在折射率为  $n_1$  的介质中的传输角度为  $\theta_1$ , 折射率为  $n_1$  的介质的厚度为  $d_1$ , 光在折射率为  $n_2$  的介质中的传输角度为  $\theta_2$ , 折射率为  $n_2$  的介质的厚度为  $d_2$ , 光在折射率为  $n_0$  的出射介质中的角度为  $\theta_0$ 。根据菲涅耳折射率定律可知,入射角度为  $\theta_s$  的光在折射率为  $n_1$  的介质中的传输角度  $\theta_1 = \arcsin\left(\sin \theta_s \cdot \frac{n_s}{n_1}\right)$ , 在折射率为  $n_1$  的薄层介质中传输的光学相位差为  $\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \theta_1$ 。同理,光在折射率为  $n_2$  的介质中的传输角度  $\theta_2 = \arcsin\left(\sin \theta_1 \cdot \frac{n_1}{n_2}\right)$ , 在折射率为  $n_2$  的薄层介质中传输的光学相位差为  $\delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 \cos \theta_2$ 。在考虑到入射角度对 DBR 反射谱特性的影响后,可以将式(9)修正<sup>[25]</sup>为

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / (n_j \cos \theta_j) \\ i n_j \cos \theta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中:  $\theta_j$  是光在半导体薄层第  $j$  层中的传输角度;  $\delta_j$  是光在半导体薄层第  $j$  层中的相位差。

### 2.4 渐变 DBR 层的多层剖分等效模型

如图 4(a)所示,渐变 DBR 结构中的一个周期可以分为四个部分,分别是折射率为  $n_1$  的  $\text{Al}_{x_1}\text{GaAs}$  层、厚度为  $D$  且折射率在  $n_1 \sim n_2$  间线性变化的  $\text{Al}_{x_1 \sim x_2}\text{GaAs}$  渐变层、折射率为  $n_2$  的  $\text{Al}_{x_2}\text{GaAs}$  层、厚度为  $D$  且折射率在  $n_2 \sim n_1$  间线性变化的  $\text{Al}_{x_2 \sim x_1}\text{GaAs}$  渐变层。由于  $\text{Al}_{x_1 \sim x_2}\text{GaAs}$  或  $\text{Al}_{x_2 \sim x_1}\text{GaAs}$  渐变层的折射率并不是常数,无法直接采用式(9)来描述光波在渐变层中的传输特性。为了解决这个问题,我们采用多层剖分等效法。如图 4(b)所示,将整个渐变层划分为  $N$  个超薄等厚的小区间,可以认为每一个小区间是折射率不变的均匀介质,并且相邻区间之间的折射率差值是一样的。整个渐变层就可以看作是  $N$  个折射率阶梯变化的小区间,只要划分的区间个数  $N$  足够大,阶梯层状结构就可以有效地代替渐变层结构,折射率的阶梯变化则被认为是准连续的线性渐变。以渐变层  $\text{Al}_{x_1 \sim x_2}\text{GaAs}$  为例对式(9)进行修正,  $\text{Al}_{x_1 \sim x_2}\text{GaAs}$  渐变层厚度为 0 时所对应的铝的原子数分数为  $x_1$ 、折射率为  $n_1$ ,  $\text{Al}_{x_1 \sim x_2}\text{GaAs}$  渐变层厚度为  $D$  时所对应的铝的原子数分数为  $x_2$ 、折射率为  $n_2$ 。通过第 2.1 节的  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  折射率线性模型可知,由于渐变层的铝含量是随厚度线性变化的,因此渐变层的折射率也是随厚度线性变化的。如图 4(b)所示,  $\delta n$  为相邻区间的折射率差值,小区间个数为  $N = (n_2 - n_1) / \delta n$ , 小区间的厚度为  $\Delta d = D / N$ , 第  $z$  个区间的平均折射率为  $n(z) = n_1 + (z - 1) \cdot \delta n + \delta n / 2$ , 光在第  $z$  个区间传输的光学相位差可以表示为  $\sigma_z = n(z) \cdot \Delta d \cdot k_0$ , 其中  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$  是入射波长在真空下的波矢大小,所以光在第  $z$  个小区间的传输矩阵可以表示为  $M_z = \begin{bmatrix} \cos \sigma_z & i \sin \sigma_z / n(z) \\ i n(z) \sin \sigma_z & \cos \sigma_z \end{bmatrix}$ , 我们通过累积法可以将  $\text{Al}_{x_1 \sim x_2}\text{GaAs}$  渐变层的传输矩阵表示为  $M_a = \prod_{z=1}^N M_z$ 。同理,可以用传输矩阵  $M_b$  来描述光在  $\text{Al}_{x_1 \sim x_2}\text{GaAs}$  渐变层中的传输特性。

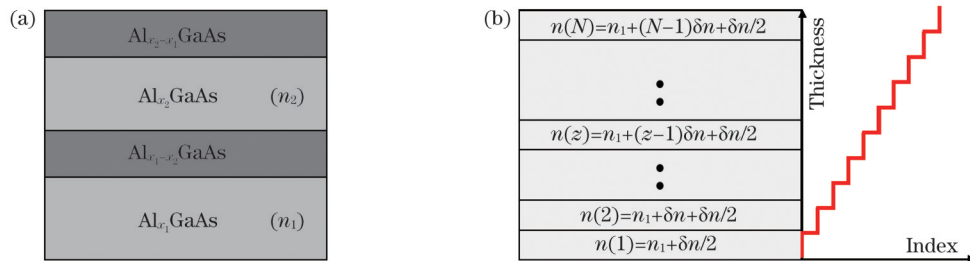


图 4 渐变 DBR 结构。(a)一对渐变 DBR 结构;(b)  $\text{Al}_{x_1 \sim x_2}\text{GaAs}$  渐变层的多层剖分等效模型

Fig. 4 Gradient DBR structures. (a) A pair of gradient DBR structures; (b) multilayer dissection equivalent model of  $\text{Al}_{x_1 \sim x_2}\text{GaAs}$  gradient layer

### 3 计算分析

对于 GaAs 衬底的 940 nm VCSEL, DBR 的材料一般选用  $\text{Al}_x\text{GaAs}$ , 一是可以提高 DBR 材料折射率对比度, 二是可以保证与 GaAs 衬底晶格相匹配。我们在接下来的计算过程中, 选用  $\text{Al}_{0.89}\text{GaAs}$  作为 DBR 低折射率层材料, 选用  $\text{Al}_{0.09}\text{GaAs}$  作为 DBR 高折射率层材料。我们根据第 2.1 节  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  材料折射率与铝含量的线性模型, 得到  $\text{Al}_{0.09}\text{GaAs}$  和  $\text{Al}_{0.89}\text{GaAs}$  在 940 nm 处的折射率分别为 3.497 和 3.040, 记为  $n_H$  和  $n_L$ 。

#### 3.1 DBR 的周期数以及堆叠方式对反射谱的影响

对于含有一个波长谐振腔的 VCSEL 而言, 有源区附近一般为低折射率层<sup>[15-17]</sup>。如图 5 所示, 当入射介质的折射率为  $n_s = 3.5$ , 出射介质的折射率为  $n_0 = 1$  时, 我们计算了 25 对 DBR 结构下不同高低折射率层的堆叠顺序对反射谱的影响。其中, 图 5 中的实线表示的是以  $n_s/(n_H/n_L/\dots/n_H/n_L)/n_0$  方式组成的 DBR 的反射谱, 记为 DBR-HL; 虚线则表示的是以  $n_s/(n_L/n_H/\dots/n_L/n_H)/n_0$  方式组成的 DBR 的反射谱, 记为 DBR-LH。堆叠方式主要由衬底、高折射率层、低折射率层以及出射介质材料的折射率决定。从图 5 所示的两种不同 DBR 结构的反射谱中, 可以明显地看到, 以 LH 方式排列的 DBR 结构的最高反射率(99.86%)明显比以 HL 方式排列的结构最高反射率(98.32%)大, 但是两种结构的反射谱带宽基本是相同的。在实际计算过程中, 如果将入射介质和出射介质的材料折射率进行互换, 可以得到与之相反的结果, 即以 HL 方式排列的 DBR 结构具有更高的反射率, 这与文献[22]中的结果一致。

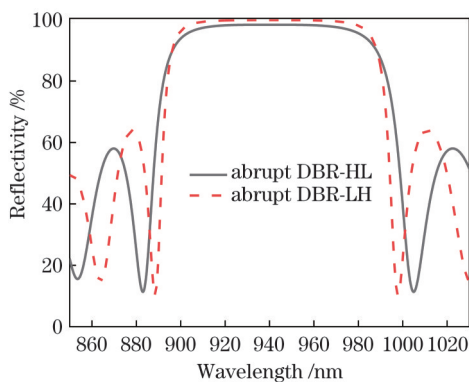


图 5 不同堆叠方式对 DBR 反射谱的影响

Fig. 5 Influence of different stacking methods on DBR reflectance spectrum

我们利用传输矩阵法进一步研究了 DBR 的周期数对其反射谱的影响, 对于以  $\text{Al}_{0.09}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.89}\text{GaAs}$  为高/低折射率材料、以 LH 堆叠方式组成 DBR 的 VCSEL, 由于其等效谐振腔长度较短, 因此 DBR 需

要具有高的反射率才能实现 VCSEL 的激射。如图 6 所示, 我们计算了 15~50 对 DBR 之间的最高反射率, 可以明显看到, 随着 DBR 对数的增加, DBR 的最高反射率逐渐接近 1, 但是反射率的增加速度逐渐变慢; 当周期数超过 40 后, 随着 DBR 对数的增加, DBR 的反射率基本不再变化。当 DBR 周期数为 15 时, 反射率就能达到 98.3%, 周期数大于等于 17 时 DBR 的反射率高于 99%, 周期数大于等于 20 时反射率高于 99.5%, 周期数大于等于 40 时反射率高于 99.99%。因为顶发射 VCSEL 的出光面在顶部即 P 侧, 所以需要 P-DBR 的反射率大于 99%。但是反射率不能过高以免器件无法出光, 周期数为 20 左右的 P-DBR 既可以获得 99.5% 以上的反射率, 还可以获得相对低的串联电阻; 对于 N 型掺杂 DBR(N-DBR), 其反射率尽可能达到 99.9% 及其以上, 但串联电阻和吸收损耗也会随 DBR 厚度的增加而增加, 因此周期数为 40 左右的 N-DBR 较为合适<sup>[1-2]</sup>。

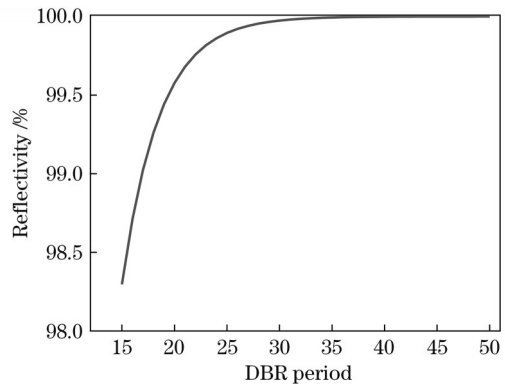


图 6 DBR 结构的反射率随周期的变化

Fig. 6 Reflectivity versus period for DBR structure

#### 3.2 入射角度对 DBR 反射谱的影响

我们在计算分析入射角对 DBR 反射谱的影响时, 采用以 LH 方式堆叠的  $\text{Al}_{0.09}\text{GaAs}$  和  $\text{Al}_{0.89}\text{GaAs}$  材料, 入射介质的折射率  $n_s = 3.5$ , 出射介质的折射率  $n_0 = 1$ , 周期数为 25。如图 7 所示, 我们分别计算了入射角度  $\theta_s$  为  $0$ 、 $\frac{\pi}{12}$ 、 $\frac{\pi}{6}$ 、 $\frac{\pi}{4}$ 、 $\frac{\pi}{3}$  时 DBR 的反射谱, 可以明显看到, 当增大入射角度  $\theta_s$  时, DBR 的反射谱会整体向短波长方向移动。其原因可能是随着入射角度的增加, 介质层的光程差降低, 因此反射谱蓝移。当入射角度为  $0$  (垂直入射) 时, DBR 反射谱的中心波长在 940 nm 附近; 当入射角度为  $\frac{\pi}{3}$  时, DBR 反射谱的中心波长漂移至 910 nm, 即中心波长受入射角度的影响较大。不同的入射角度对反射带宽无明显的影响, 根据 DBR 结构的高反带宽计算公式  $\Delta_g = \frac{4}{\pi} \arcsin \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$ <sup>[13]</sup> 可知, 高反带宽主要与折射率差值有关。为了进一步研究不同入射角度对 DBR 最高反

射率的影响,如图 8 所示,计算了在中心波长处的 DBR 最高反射率随入射角度的变化。可以看出,随着入射角度的增加,DBR 的最高反射率会逐渐增加至 100%。当光垂直于 DBR 入射即入射角度为 0°时,DBR 的最高反射率为 99.47%;当光平行于 DBR 入射即入射角度为 90°时,DBR 的反射率达到 100%。可见入射角度是影响 DBR 反射谱范围的主要因素,但对 DBR 最高反射率的影响较小,对 DBR 高反带宽几乎没有影响。

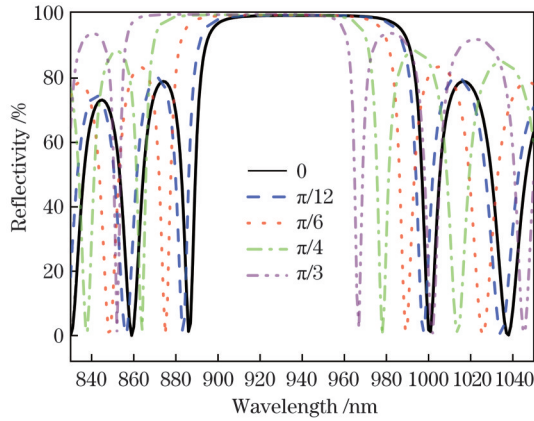


图 7 DBR 的反射谱与入射角度的关系

Fig. 7 Relationship between reflection spectrum of DBR and incident angle

### 3.3 DBR 渐变层对反射谱的影响

我们在计算渐变 DBR 结构的传输矩阵时,需要

表 1 渐变 DBR 结构中各个部分的厚度

Table 1 Thickness of each part in gradient DBR structure

Al <sub>x</sub> GaAs	D=0 nm	D=10 nm	D=20 nm	D=30 nm	D=40 nm
Al <sub>0.89</sub> GaAs	77.30 nm	66.55 nm	55.80 nm	45.05 nm	34.30 nm
Al <sub>0.89-0.09</sub> GaAs	0 nm	10 nm	20 nm	30 nm	40 nm
Al <sub>0.09</sub> GaAs	67.20 nm	57.85 nm	48.50 nm	39.16 nm	29.81 nm
Al <sub>0.09-0.89</sub> GaAs	0 nm	10 nm	20 nm	30 nm	40 nm

对于渐变 DBR 结构来说,修正后的传输矩阵形式为  $M = (M_1 M_a M_2 M_b)^N$ , 其中  $M_1$ 、 $M_a$ 、 $M_2$ 、 $M_b$  分别是 Al<sub>0.89</sub>GaAs 层、Al<sub>0.89-0.09</sub>GaAs 渐变层、Al<sub>0.09</sub>GaAs 层、Al<sub>0.09-0.89</sub>GaAs 渐变层所对应的传输矩阵。如图 9 所示,我们计算了入射介质折射率为  $n_s = 3.5$ 、出射介质折射率为  $n_0 = 1$ 、DBR 堆叠方式为 Al<sub>0.89</sub>GaAs/Al<sub>0.89-0.09</sub>GaAs/Al<sub>0.09</sub>GaAs/Al<sub>0.09-0.89</sub>GaAs、周期数为 24 时不同渐变层厚度下的反射谱。可以看到,当反射率 > 99.4% 时,突变 DBR (D=0 nm) 的高反带宽最大为 89 nm, D=10 nm 的 DBR 的高反带宽为 88 nm, D=20 nm 的 DBR 的高反带宽为 85 nm, D=30 nm 的 DBR 的高反带宽为 81 nm, D=40 nm 的 DBR 的高反带宽为 75 nm。随着 DBR 结构中渐变层厚度 D 的不断增大,反射谱的高反带宽不断减小。这是因为相比

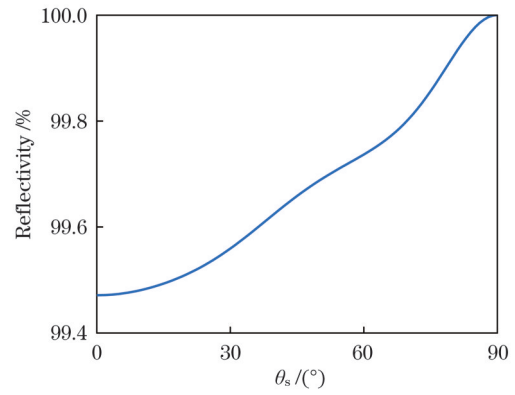


图 8 DBR 中心波长 940 nm 处的反射率随入射角的变化

Fig. 8 Reflectance of DBR versus incident angle at center wavelength of 940 nm

保证高低折射率层和渐变折射率层的光学厚度之和为  $\frac{\lambda}{4}$ 。对于渐变层厚度为 D、高低折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$  的渐变 DBR 结构,其渐变层的平均折射率为  $n_a = \frac{n_1 + n_2}{2}$ , 高折射率层的厚度为  $h_1 = (\frac{\lambda}{4} - Dn_a)/n_1$ , 低折射率层的厚度为  $h_2 = (\frac{\lambda}{4} - Dn_a)/n_2$ 。

如表 1 所示,我们计算了渐变层厚度 D 为 0、10、20、30、40 nm 时 DBR 结构中各个部分的厚度,其中计算用到的高折射率材料为 Al<sub>0.09</sub>GaAs, 折射率为  $n_1 = 3.497$ , 低折射率材料为 Al<sub>0.89</sub>GaAs, 折射率为  $n_2 = 3.040$ 。

于突变结构 DBR 结构,渐变 DBR 中等效的高低折射率层之间的折射率差值随着渐变层厚度的增加越来越小,等效布拉格反馈系数降低,所以反射谱的带宽会变窄。为了更加详细地研究渐变层厚度 D 对 DBR 最高反射率的影响,如图 10 所示,我们计算了 DBR 的最高反射率与渐变层厚度的关系,可以明显看到,突变 DBR 的最高反射率超过了 99.85%。渐变 DBR 的最高反射率随着渐变层厚度的增加逐渐降低,当渐变层厚度 D=40 nm 时 DBR 的最高反射率仍然大于 99.6%,与突变 DBR 的最高反射率相差不大。因此,对于渐变 DBR 来说,其在保持较高的反射率的同时,能够有效地降低异质结的串联电阻<sup>[7,9]</sup>,减少自生热现象,提高输出功率,提升器件的可靠性。

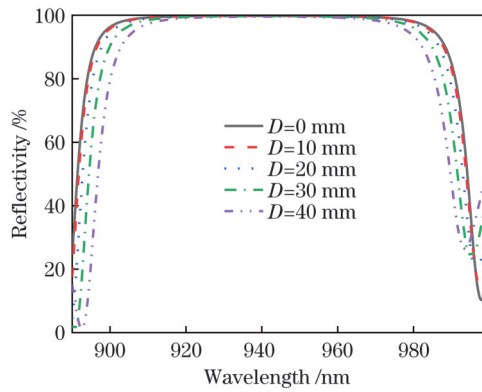


图 9 不同渐变 DBR 结构的反射谱

Fig. 9 Reflectance spectra of different gradient DBR structures

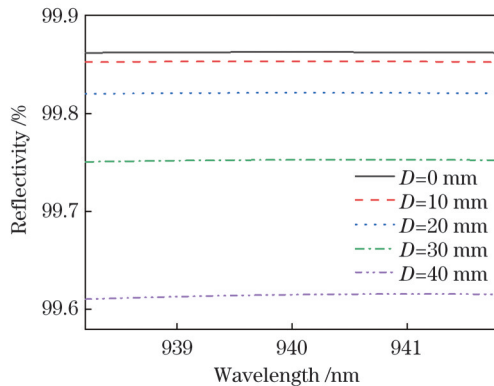


图 10 不同渐变层厚度下 DBR 的最高反射率

Fig. 10 Maximum reflectances of DBRs under different gradient layer thicknesses

## 4 结 论

利用传输矩阵模型,研究了 DBR 的排列方式、DBR 的周期数、入射角度、渐变层厚度对  $\text{Al}_{0.89}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.09}\text{GaAs}$  DBR 反射谱特性的影响。在 940 nm 波长下,  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  的材料折射率与铝的原子数分数  $x$  呈线性变化关系,可以表示为  $n_{\text{Al}_x\text{GaAs}} = -0.572x + 3.550$ ,与 Sellmerier 公式的计算结果吻合。当入射介质为 GaAs 材料、出射介质为空气时, DBR 以 LH 方式排列的结构具有更高的反射率,并且当 DBR 周期数大于 17 时,在 940 nm 波长处的反射率就能达到 99%。对修正后的角度相关传输矩阵模型进行计算分析,证明随着入射角度的增加, DBR 的反射谱会向短波长方向移动,并且 DBR 的最高反射率有所增加。利用多层剖分等效法,用折射率阶梯状结构代替折射率渐变结构,对渐变 DBR 的反射谱特性进行分析,发现随着渐变层厚度的增加, DBR 的反射带宽变窄,中心波长处的反射率基本不受影响。

## 参 考 文 献

[1] 于洪岩, 尧舜, 张红梅, 等. 940 nm 垂直腔面发射激光器的设计及制备[J]. 物理学报, 2019, 68(6): 064207.  
Yu H Y, Yao S, Zhang H M, et al. Design and fabrication of 940 nm vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Acta Physica

Sinica, 2019, 68(6): 064207.  
[2] 潘智鹏, 李伟, 戚宇轩, 等. 光子晶体垂直腔面发射激光器的设计分析[J]. 光学学报, 2022, 42(14): 1414002.  
Pan Z P, Li W, Qi Y X, et al. Design and analysis of photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(14): 1414002.  
[3] 颜伟年, 王秋华, 周亨杰, 等. 氧化限制结构 940 nm 垂直腔面发射激光器[J/OL]. 激光与光电子学进展: 1-14[2022-04-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220722.1949.022.html>.  
Yan W N, Wang Q H, Zhou H J, et al. Oxidation-confined structure 940 nm vertical cavity surface emitting laser[J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress: 1-14[2022-04-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220722.1949.022.html>.  
[4] Xun M, Pan G Z, Zhao Z Z, et al. Analysis of thermal properties of 940-nm vertical cavity surface emitting laser arrays[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(1): 158-163.  
[5] Khan Z, Ledentsov N, Chorchos L, et al. Single-mode 940 nm VCSELs with narrow divergence angles and high-power performances for fiber and free-space optical communications[J]. IEEE Access, 2020, 8: 72095-72101.  
[6] 伊贺健一, 小山二三夫. 面发射激光器基础与应用[M]. 郑军, 译. 北京: 科学出版社, 2002.  
Iga K, Koyama E. Fundamentals and applications of surface emitting lasers[M]. Zheng J, Transl. Beijing: Science Press, 2002.  
[7] 马丽娜, 郭霞, 盖红星, 等. 低电阻 p-DBR 结构的模拟分析[J]. 半导体技术, 2005, 30(6): 56-59.  
Ma L N, Guo X, Gai H X, et al. Simulation analysis on low resistance p-type DBR structure[J]. Semiconductor Technology, 2005, 30(6): 56-59.  
[8] 李鹏飞, 邓军, 陈永远, 等. 垂直腔面发射激光器 DBR 的优化设计[J]. 半导体光电, 2013, 34(2): 190-192.  
Li P F, Deng J, Chen Y Y, et al. Optimization design of vertical cavity surface emitting lasers DBR[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(2): 190-192.  
[9] 许晓芳, 邓军, 李建军, 等. 垂直腔面发射激光器 DBR 的生长优化[J]. 半导体光电, 2022, 43(2): 332-336.  
Xu X F, Deng J, Li J J, et al. Growth optimization of vertical cavity surface-emitting laser DBR[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(2): 332-336.  
[10] 王小东, 吴旭明, 王青, 等. 具有非均匀渐变界面 DBR 的光学特性分析[J]. 物理学报, 2006, 55(10): 4983-4986.  
Wang X D, Wu X M, Wang Q, et al. Optical characteristics of DBR with inhomogeneous graded interfaces[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(10): 4983-4986.  
[11] 王小东, 吴旭明, 王青, 等. 数值分析渐变 DBR 对垂直腔面发射激光器谐振腔模的影响[J]. 半导体学报, 2006, 27(11): 2011-2014.  
Wang X D, Wu X M, Wang Q, et al. Numerical analysis of the effect of a DBR with graded interfaces on the resonant cavity of a VCSEL[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(11): 2011-2014.  
[12] 张冠杰, 舒永春, 皮彪, 等. AlAs/GaAs 分布布拉格反射镜 (DBR) 的反射谱拟合与优化生长[J]. 人工晶体学报, 2005, 34(6): 977-981.  
Zhang G J, Shu Y C, Pi B, et al. Reflectance spectrum simulation and optimized growth of AlAs/GaAs distributed Bragg reflector (DBR)[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2005, 34(6): 977-981.  
[13] Li T, Ning Y Q, Hao E J, et al. Design and optimization of DBR in 980 nm bottom-emitting VCSEL[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2009, 52(7): 1266-1271.  
[14] Cheng C L, Ledentsov N, Agustin M, et al. Ultra-fast Zn-diffusion/oxide-relief 940 nm VCSELs[C] // 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019.  
[15] Qi Y X, Li W, Liu S P, et al. Optimized arrangement of vertical cavity surface emitting laser arrays to improve thermal characteristics [J]. Journal of Applied Physics, 2019, 126(19): 193101.

- [16] Li W, Qi Y X, Liu S P, et al. High power density and temperature stable vertical-cavity surface-emitting laser with a ring close packing structure[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 132: 106510.
- [17] Qi Y X, Wei L, Liu S P, et al. Comprehensive design and simulation of a composite reflector for mode control and thermal management of a high-power VCSEL[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2020, 37(11): 3487-3495.
- [18] Afromowitz M A. Refractive index of  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ [J]. Solid State Communications, 1974, 15(1): 59-63.
- [19] Adachi S. GaAs, AlAs, and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ : material parameters for use in research and device applications[J]. Journal of Applied Physics, 1985, 58(3): R1-R29.
- [20] Djuricic A B, Rakic A D, Li E H, et al. Continuous optimization using elite genetic algorithms with adaptive mutations[M]//McKay B, Yao X, Newton C S, et al. Simulated evolution and learning. Lecture notes in computer science. Berlin: Springer, 1999, 1585: 365-372.
- [21] 王辉, 李永平. 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构[J]. 物理学报, 2001, 50(11): 2172-2178.
- Wang H, Li Y P. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(11): 2172-2178.
- [22] Wang Y H, Bao B X. Optical analysis and optimization of lossless and lossy distributed Bragg reflector using transfer matrix method [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(2): 184-191.
- [23] 马海霞, 武艳军, 王吉明, 等. 基于传输矩阵法的多层介质膜反射特性研究[J]. 大学物理, 2020, 39(8): 25-30.
- Ma H X, Wu Y J, Wang J M, et al. Reflection characteristics of multilayer dielectric film based on transfer matrix method[J]. College Physics, 2020, 39(8): 25-30.
- [24] Keskar D, Survase S, Thakurdesai M. Reflectivity simulation by using transfer matrix method[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1913(1): 012051.
- [25] Ghatak A, Thyagarajan K, Shenoy M. Numerical analysis of planar optical waveguides using matrix approach[J]. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(5): 660-667.

## Reflection Characteristics Analysis of DBR in 940 nm VCSEL

Pan Zhipeng<sup>1,2</sup>, Li Wei<sup>1\*</sup>, Lü Jiagang<sup>1,2</sup>, Chang Jinyuan<sup>1,2</sup>, Wang Zhennuo<sup>1,2</sup>, Liu Suping<sup>1</sup>,  
Zhong Li<sup>1</sup>, Ma Xiaoyu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

<sup>2</sup>College of Materials Science and Optoelectronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Objective** As an ideal light source for 3D cameras, 940 nm vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) have broad application prospects and can be used in virtual reality and car-assisted driving. The optimal design of the distributed Bragg reflector (DBR) is crucial for improving the performance characteristics of 940 nm VCSELs. In traditional research, there are few studies on DBRs in the 940 nm band. To provide guidance for the design and optimization of DBR structures in 940 nm VCSELs, we systematically study the reflection properties of various DBR structures. In the present study, we apply the transmission matrix method (TMM) to multilayer dielectric films to calculate and analyze the influence of different stacking methods and periods on the DBR reflection spectrum. The model is modified and the influence of the incident angle on the DBR reflection spectrum is calculated and analyzed. A linear fitting model between the refractive index of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  and Al atomic fraction  $x$  at a wavelength of 940 nm is established. The effect of the gradient layer on the reflectance spectrum characteristics of the DBR is calculated and analyzed using the multilayer division equivalent method. Through our research analysis, the relationship between the DBR structure and its reflective properties can be understood more clearly.

**Methods** In this study, we choose  $\text{Al}_{0.89}\text{Ga}_{0.11}\text{As}$  as the DBR low-refractive-index layer material (L) and  $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{As}$  as the DBR high-refractive-index layer material (H) with refractive indices of 3.497 and 3.040, respectively. The reflection characteristics of different DBR structures are analyzed using the TMM. First, we use the transmission matrix of the multilayer dielectric film to study the effects of different stacking methods and periods on the reflection characteristics of the DBR structure. Subsequently, considering the influence of the incident angle on the reflection spectrum, we modify the transmission matrix and study the influence of different incident angles on the reflection characteristics of the DBR. Finally, to simplify the calculation of reflection spectrum characteristics of the gradient layer structure, we linearly fit the relationship between the refractive index of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  material and the aluminum atomic fraction  $x$ , and we adopt the multilayer division equivalent method by dividing the  $\text{Al}_{x_1-x_2}\text{Ga}_{1-x_1-x_2}\text{As}$  gradient layer into sufficiently small ultra-thin and equal thickness layers; when the divisions are sufficiently large, this stepped layered structure can truly replace the gradient layer structure.

**Results and Discussions** The highest reflectivity (99.86%) of the DBR structure arranged using the LH stacking method is significantly greater than that (98.32%) of the structure arranged using the HL stacking method, but the reflection spectral bandwidths of the two structures are basically the same (Fig. 5). When the number of DBR periods is 15, the reflectivity can reach 98.3%; when the number of periods is >17, the reflectivity of the DBR is >99%; when the number of periods is >20, the reflectivity is >99.5%; and when the number of periods is >40, the reflectivity is >99.99% (Fig. 6). As the incident angle increases, the optical path

difference of the dielectric layer decreases, and the DBR reflection spectrum shifts to the short-wavelength direction as a whole. When the incident angle is 0 (normal incidence), the central wavelength of the DBR reflection spectrum is  $\sim 940$  nm, and when the incident angle is  $\pi/3$ , the central wavelength of the DBR reflection spectrum shifts to 910 nm; that is, the central wavelength is greatly affected by the incident angle (Fig. 7). When the reflectivity is  $>99.4\%$ , the stop bandwidth of the mutant DBR ( $D=0$  nm) is 89 nm, the stop bandwidth of the DBR with  $D=10$  nm is 88 nm, the stop bandwidth of the DBR with  $D=20$  nm is 85 nm, the stop bandwidth of the DBR with  $D=30$  nm is 81 nm, and the stop bandwidth of the DBR with  $D=40$  nm is 75 nm (Fig. 9). The maximum reflectivity of the gradient DBR gradually decreases with an increase in the thickness of the gradient layer. The highest reflectivity of the mutant DBR exceeds 99.85%, and the highest reflectivity of the DBR with  $D=40$  nm is still  $>99.6\%$  (Fig. 10).

**Conclusions** In this study, using the transfer matrix model, the effects of the DBR stacking method, number of DBR periods, incident angle, and thickness of the gradient layer on the reflectance characteristics of an  $\text{Al}_{0.89}\text{GaAs}/\text{Al}_{0.09}\text{GaAs}$  DBR are investigated. At a wavelength of 940 nm, the refractive index of  $\text{Al}_x\text{GaAs}$  has a linear relationship with the aluminum atomic fraction  $x$ , which can be expressed as  $n_{\text{Al}_x\text{GaAs}} = -0.572x + 3.550$ , which is consistent with the calculation result of the Sellmerier formula. When the incident medium is GaAs and the output medium is air, the DBR with the LH stacking method has greater reflectivity. To study the relationship between the incident angle and the DBR reflection spectrum, the TMM is modified. It is found that, with an increase in the incident angle, the reflection spectrum of the DBR structure moves in the short-wavelength direction, and the reflectivity of the DBR increases. Using the multilayer division equivalent method, the refractive index gradient structure is replaced by a refractive index stepped structure, and the reflection spectrum characteristics of the gradient DBR are analyzed. It is found that, with an increase in the thickness of the gradient layer, the reflection bandwidth of the DBR narrows and the reflectivity at the center wavelength is essentially unaffected. In follow-up research and device preparation, our calculation results can provide a useful guide for the design and optimization of the DBR structure in 940 nm VCSELs.

**Key words** lasers; transmission matrix method; vertical-cavity surface-emitting laser; distributed Bragg reflector; incident angle; gradient layer; reflection spectrum