

# 大功率垂直腔面发射激光器中 减小 p-DBR 串联电阻的途径

张建伟<sup>1,2</sup>, 宁永强<sup>1</sup>, 王贞福<sup>1,2</sup>, 李 特<sup>1</sup>, 崔锦江<sup>1,2</sup>, 张 岩<sup>1,2</sup>,  
刘光裕<sup>1,2</sup>, 张 星<sup>1,2</sup>, 秦 莉<sup>1</sup>, 刘 云<sup>1</sup>, 王立军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**为了使垂直腔面发射激光器(VCSEL)实现大功率、高效率的激光输出,对p型分布布喇格反射镜(DBR)形成的同型异质结在界面处存在大势垒导致的高串联电阻和严重发热现象进行了研究。为降低串联电阻,实现VCSEL在室温下的大功率连续发射,分析了p型DBR异质结的势垒结构,对突变异质结的串联电阻进行了计算分析,提出降低势垒高度以及增加扩散浓度是减小串联电阻的主要途径,而漏斗状的掺杂能有效降低体电阻。通过对梯度渐变异质结的分析得出缓变结能有效降低势垒高度,而用Matlab对能带图的数值分析表明,Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As/AlAs接触层中Al组分采取双曲线形式的渐变也能有效降低势垒高度,即降低串联电阻。此外,对于渐变区缓变结的比较表明,采用20~25 nm的渐变区宽度即可以得到比较低的势垒高度,同时也不会对DBR的反射率有太大的影响,是较合适的选择。

**关键词:**垂直腔面发射激光器, p型分布布喇格反射镜, 渐变异质结, 势垒高度, 串联电阻, 泊松方程  
中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

## Optimization of p-DBR of high power vertical cavity surface emitting laser with low series resistance

ZHANG Jian-wei<sup>1,2</sup>, NING Yong-qiang<sup>1</sup>, WANG Zhen-fu<sup>1,2</sup>, LI Te<sup>1,2</sup>, CUI Jin-jiang<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Yan<sup>1,2</sup>, LIU Guang-yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Xing<sup>1,2</sup>, QIN Li<sup>1</sup>, LIU Yun<sup>1</sup>, WANG Li-jun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** To obtain the high power and high efficiency laser output for Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL), the high series resistance and internal heating caused by a big barrier existed in heterojunction from p type Distribution Bragg Reflector (p-DBR) were investigated. In order to reduce the series resistance of

p-DBR and realize the continued emitting of a laser, the basic elements and band diagram of the DBR were analyzed in this paper, also the series resistance in the mutation was calculated. On the basis of analysis and calculation, this paper suggests that the main method to reduce series resistance is to decrease the height of barrier and increase the diffusion concentration using funnel-shaped doping. After analyzing the gradient gradual heterojunction, a conclusion shows that the gradually changed heterojunction can reduce the height of the barrier effectively. Numerical analysis of the band diagram by Matlab also indicates that the change in hyperbolic form can reduce the height of the barrier. thereby, the series resistance can be reduced effectively by above methods. Moreover, for the graded region, the wider the band is, the lower the height of the barrier is; for getting a higher reflectivity and a lower barrier, the band width of 20 ~ 25 nm is optimal selection.

**Key words:** Vertical Cavity Surface Emitting Laser( VCSEL ); p-Distribution Bragg Reflecto( p-DBR ); gradient heterojunction ;serial resistance ;Poisson equation

## 1 引言

垂直腔面发射激光器( VCSEL )具有良好的波长选择特性、且量子效率高、制备成本低、利于实现大规模单片集成,因此,已成为光纤通信中具有重要应用价值的核心关键器件。近年来,随着 VCSEL 激光输出功率的大幅度提高,在固体激光泵浦、激光测距等方面又开拓了新的应用,但对于实现大功率、高效率激光输出, p 型分布布喇格反射镜( DBR )形成的同型异质结在界面处存在的较大的势垒导致的高串联电阻和严重发热会引起 VCSEL 内部温度升高,从而影响器件性能,导致阈值升高、内量子效率下降、激射波长改变等,致使 VCSEL 难于实现连续工作。因此,降低 p 型 DBR 的串联电阻是实现 VCSEL 室温下大功率连续激射的关键问题之一。

VCSEL 由于有源区厚度仅几个纳米,单程增益很低。为实现激射必须在有源区上、下两侧生长分布布喇格反射镜( DBR )高反射镜。典型的 DBR 反射镜结构是通过 1/4 波长厚的高、低折射率薄膜交替生长几十个周期来得到设计预期的反射率。图 1 给出了典型 VCSEL 的结构示意图。但 VCSEL 的电流流经 1/4 波长多层反射膜,产生一定的串联电阻,对 VCSEL 特性影响很大。因此研究 DBR 结构与串联电阻的关系对改善 VCSEL 的性能是十分必要的。

VCSEL 的串联电阻高,主要是由多层反射膜

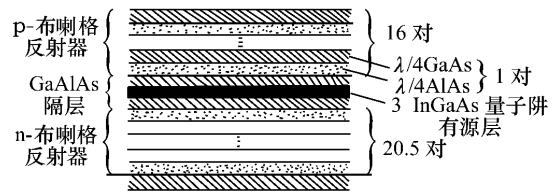


图 1 VCSEL 基本结构图

Fig. 1 Basic structure of VCSEL

内的同型异质结引起的<sup>[1]</sup>,而每层包括一个正向结和一个反向结。正向结的电阻很小,而反向结使电阻明显增大。

VCSEL 有源区上下分别是 p-p、n-n 同型异质结的多层反射膜。由于空穴的有效质量较大且其迁移率较小,加之所设计的器件是在 p 型 DBR 上进行电流控制,而 n 型 DBR 处电流扩散区域很大, DBR 的串联电阻很小,所以, VCSEL 的串联电阻主要由 p 型 DBR 决定。这样优化 p 型 DBR 的设计,降低串联电阻是制作垂直腔面发射激光器的关键之一<sup>[2-5]</sup>。

本文对反射率为 99.99% 材料组成为  $Al_{0.1}Ga_{0.9}As/AsAl$  周期性排列的典型 p-DBR 异质结势垒结构进行了分析,认为降低势垒高度以及增加扩散浓度是减小串联电阻的主要途径。

## 2 数值模拟

p 型 DBR 结构为 1/4 波长的  $Al_{0.1}Ga_{0.9}As/$

AlAs 交替排列,这样电流流经 p 型 DBR 时,分为两种情况:

一种情况为电流由窄带材料  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  流向宽带材料 AlAs;另一种情况为电流从宽带材料 AlAs 流向窄带材料  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  [6]。

通过 Anderson 给出的各种同型异质结在外加偏压下的电流表达式 [9] 可以推得电流从宽带材料 AlAs 注入到窄带材料  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  的情况,即正向偏压时以及反向偏压时的电流密度  $j_1$  和  $j_2$  分别为:

$$j_1 = qp_2 \left( \frac{kT}{2\pi m_p} \right)^{1/2} \exp\left( -\frac{qV_{D2}}{kT} \right) \left[ \exp\left( \frac{qV_2}{kT} \right) - 1 \right],$$

$$j_2 = qp_2 \left( \frac{kT}{2\pi m_p} \right)^{1/2} \exp\left( -\frac{qV_{D2}}{kT} \right) \left[ 1 - \exp\left( \frac{qV_2}{kT} \right) \right],$$

其中  $q$  为电子电荷量,  $p_2$  为宽带一侧的载流子浓度,  $k$  为波尔兹曼常数,  $T$  为温度,  $m_p$  为空穴的有效质量,  $V_{D2}$  为宽带一侧的势垒高度,  $V_2$  为宽带一侧的电压。

由  $r = R \cdot S = \frac{dV}{dI} \cdot S = \frac{dV \cdot S}{S \cdot dj} = \frac{dV}{dj}$ , 其中  $R$  为电阻,  $S$  为电流流过的总面积, 故正向和反向串联电阻  $r_1$  和  $r_2$  可分别表示为:

$$\frac{1}{r_1} = qp_2 \left( \frac{kT}{2\pi m_p} \right)^{1/2} \exp\left( -\frac{qV_{D2}}{kT} \right) \cdot \frac{q}{kT} \cdot \exp\left( \frac{qV}{kT} \right)$$

$$\frac{1}{r_2} = qp_2 \left( \frac{kT}{2\pi m_p} \right)^{1/2} \exp\left( -\frac{qV_{D2}}{kT} \right) \cdot \frac{q}{kT} \cdot \exp\left( -\frac{qV}{kT} \right)$$

以上分析中假设电压基本降落在宽带材料上,即  $V_2 \approx V$ 。由此可见,  $r_1$  随外加电压  $V$  增加而减少,对电流基本无阻挡作用,而  $r_2$  不随外加电压增加而降低,并随外加电压指数增长,故成为 p 型 DBR 串联电阻的主要来源。

由此得知每对 DBR 的串联电阻主要由窄带材料的体电阻  $r_{\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}}$  和宽带材料的体电阻  $r_{\text{AlAs}}$  以及电流由宽带到窄带的异质结的微分电阻  $r_1$  和电流由窄带到宽带的异质结的微分电阻  $r_2$  组成,即:

$$r = r_1 + r_2 + r_{\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}} + r_{\text{AlAs}}$$

且有  $r_2 \gg r_1 > r_{\text{AlAs}} > r_{\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}}$ , 故以后的讨论只考虑  $r_2$  的影响。

减小体电阻  $r_{\text{AlAs}}$  以及  $r_{\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}}$  的方法可以从增加掺杂浓度来实现。因为电导率  $\sigma = ne\mu_n +$

$pe\mu_p$ , 式中  $\mu_n$ 、 $\mu_p$  分别为电子和空穴的迁移率,温度变化不大时可以看作常数,故只要载流子浓度  $n$  和  $p$  足够大即可。但过高的掺杂将影响界面的晶体质量,导致反射率的降低。所以掺杂时可使有源区四周的 p 型 DBR 高掺杂,从而降低其串联电阻。而有源区上方的 DBR 不掺杂,以保证其具有高的反射率,这样电流由扩散区的 DBR 漏斗状的注入有源区。扩散区的掺杂浓度越高电阻越小,一般情况下通过 Zn 掺杂可以达到较好效果 [7]。

减小  $r_1$  和  $r_2$  的途径可通过其公式  $r_2 \propto \exp(qV_{D2}/kT)$ ,  $r_1 \propto \exp(qV_{D2}/kT)$  得到,故减小其势垒高度为减小其串联电阻的主要途径。这里首先通过 Al 组分的梯度渐变来分析渐变结对于串联电阻的影响。

由电阻  $r$  的计算公式,加入渐变层后相当于原来的一个异质结变为两个串联异质结,假设它们的势垒高度分别为  $V_{D1}$  和  $V_{D2}$ , 应有  $qV_{D1} < qV_D$ ,  $qV_{D2} < qV_D$  ( $V_D$  为原来异质结的势垒高度)。则总的串联电阻为:

$$r_1 + r_2 = A \exp\left( \frac{V}{2V_T} + \frac{V_{D1}}{V_T} \right) + A \exp\left( \frac{V}{2V_T} + \frac{V_{D2}}{V_T} \right) =$$

$$A \exp\left( \frac{V}{2V_T} \right) \left[ \exp\left( \frac{V_{D1}}{V_T} \right) + \exp\left( \frac{V_{D2}}{V_T} \right) \right] =$$

$$A \exp\left( V \right) \left[ \exp\left( \frac{V_{D1} - \frac{V}{2}}{V_T} \right) + \exp\left( \frac{V_{D2} - \frac{V}{2}}{V_T} \right) \right],$$

其中  $r_1$  和  $r_2$  分别为两个分异质结的电阻。温度一定时  $A$  为常数,  $A = \left[ qp_2 \left( \frac{kT}{2\pi m_p} \right)^{1/2} \cdot \frac{q}{kT} \right]^{-1}$ ;  $V_T = kT/q$ ,  $V$  为加在异质结上的电压,这里考虑的异质结中有  $V_{D1} - \frac{V}{2} \leq \frac{V_D}{2}$  以及  $V_{D2} - \frac{V}{2} \leq \frac{V_D}{2}$ 。

$$\text{令 } X_1 = \frac{V_{D1} - \frac{V}{2}}{V_T}, X_2 = \frac{V_{D2} - \frac{V}{2}}{V_T}, X = \frac{V_D}{V_T},$$

$$\text{则 } e^{X_1} + e^{X_2} \leq e^{\frac{X}{2}} + e^{\frac{X}{2}} = e^{\frac{X}{2} \ln 2} \leq e^X,$$

故有  $r_1 + r_2 = A \cdot e^V \cdot (e^{X_1} + e^{X_2}) \leq A \cdot e^V \cdot e^X = r$ , 故加一渐变层后串联电阻比原来减小了。

根据上面分析可知,若加入两个渐变层,则其串联电阻一定比一个渐变层的低,故当加入无数个渐变层后,串联电阻将会有很大改善,此时相当

于 Al 组分的变化  $x$  为缓变的,即  $x$  与渐变区的坐标有一定的函数关系,这样即可以很好地改善串联电阻问题。

对于突变同型异质结,这里做如下假设(1)杂质完全电离(2)少数载流子(此处是电子)对空间电荷的贡献可以忽略(3)空穴的分布服从玻尔兹曼统计分布。在其结两侧 p 型  $Al_{0.1}Ga_{0.9}As$  和 p 型 AlAs 的泊松方程分别为<sup>[8]</sup>:

$$\frac{d^2\beta_1}{dx^2} = \frac{\exp[\beta_1(x)] - 1}{2L_1^2},$$

$$\frac{d^2\beta_2}{dx^2} = \frac{1 - \exp[-\beta_2(x)]}{2L_2^2},$$

其中 
$$\beta_1(x) = \frac{q[V(x) - V(x_1)]}{kT},$$

$$L_1^2 = \frac{\epsilon_1 kT}{2q^2 N_{A1}},$$

$$\beta_2(x) = \frac{q[V(x) - V(x_2)]}{kT},$$

$$L_2^2 = \frac{\epsilon_2 kT}{2q^2 N_{A2}},$$

其中  $L_1$  和  $L_2$  分别为两侧的扩散长度,  $\epsilon$  为介电常数,  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  分别表示窄带侧与宽带侧的量。而  $N_{A1}$  与  $N_{A2}$  分别为两侧的掺杂浓度,  $V(x)$  为在缓变位置  $x$  处的电位,故电势的变化可以通过  $\beta_1$  和  $\beta_2$  来体现。

图 2 给出了渐变异质结的简略能带图,  $E_C$  和  $E_V$  分别为导带与价带能级,  $E_F$  为平衡时的费米能级,平衡时  $E_F$  固定。

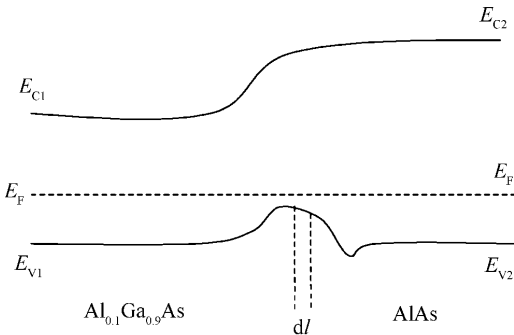


图 2 渐变异质结接触能带图

Fig. 2 Energy band of graded heterojunction(Al)

这里取在  $l-l+dl$  处的材料来计算。假设  $dl \rightarrow 0$ , 则在  $dl$  处的材料 Al 含量可以看作是固定的,平衡时假设此材料与 Al 组分为  $x$  的材料  $Al_xGa_{1-x}As$ 、 $Al_{0.1}Ga_{0.9}As$  接触,通过对势垒高度的分析<sup>[9]</sup>得到在  $Al_xGa_{1-x}As$  一侧,势垒高度满足:

$$\frac{d^2\beta}{dx^2} = \frac{\exp(\beta_2(x) - 1)}{L_2^2},$$

其中,

$$L_2 = \left( \frac{\epsilon kT}{8\pi q^2 p_2} \right)^{1/2}$$

通过解此泊松方程来求价带能量值。此方程没有精确解,需要采用数字法,这里采用四阶 Runge-Kutta 法对泊松方程进行求解。对渐变形式,取线性渐变,抛物线渐变 1,抛物线渐变 2,双曲线渐变等 4 种形式。对介电常数取线性差值  $\epsilon = (13.1 - 30x)\epsilon_0$ 。

通过 Matlab 编程求解得到了泊松方程的数值解,其结果如图 3 所示。

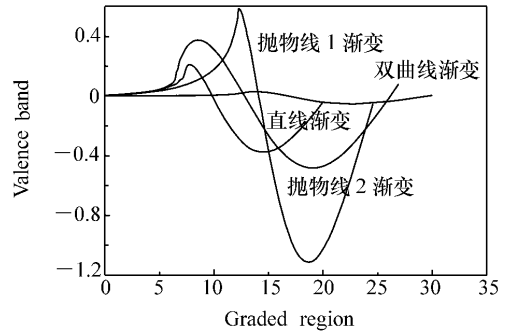


图 3 Matlab 数值求解所得渐变结价带能带图

Fig. 3 Energy band of the heterojunction(Al changed in different forms) by Matlab

由图 3 可以看出,当 Al 组分采取双曲线渐变形式时,势垒高度得到有效降低,并且能带曲线变化平缓,有利于降低势垒;Al 组分采取抛物线渐变 1 的形式时,势垒高度最大,并且不平滑;而直线渐变形式的平滑程度介于二者之间。

通过对组分和价带能带关系的对比可以看出,Al 组分渐变形式对势垒影响很大,线性渐变虽然形式简单,但是它产生的势垒较高,双曲线渐变比在降低势垒高度以及提高平滑度方面优于上

述几种渐变形式, 且比较适合利用 MOCVD 技术生长, 故对于 VCSEL 的 DBR 结构应采取双曲线渐变形式。

对于实际的异质结, 其生长形式不可能像所设想的那么规范, 并且材料的改变形式也不能按某种特定规则设定, 故这里只能设想渐变区按扩散规律分布。在以下讨论中, 假设材料的掺杂浓度为恒定的  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 对渐变区宽度假设为  $L$ 。采用带隙能量  $E_g$  与电子亲和势  $\chi$  按扩散规律分布的模型<sup>[9]</sup>为:

$$E_g(x) = \frac{\Delta E_g}{2} \tanh\left(\frac{x}{L}\right),$$

$$\chi(x) = \frac{\Delta\chi}{2} \tanh\left(\frac{x}{L}\right),$$

其中  $\Delta E_g$  和  $\Delta\chi$  分别是两侧的禁带宽度与电子亲和势之差。泊松方程为:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{e^{-\psi} - 1}{L_D^2} - \frac{d^2X}{dx^2},$$

其中

$$\psi = \frac{E_F - E_V}{kT} - \ln \frac{N_V}{N_A},$$

$$L_D^2 = \frac{kT\epsilon}{q^2 N_A}, \quad X = \frac{\chi + E_g}{kT},$$

其中  $E_F - E_V$  为费米能级与价带顶的距离,  $E_F$  一定时  $\psi$  反映  $E$  的变化;  $N_V$  为价带有效状态密度, 为常量;  $N_A$  为掺杂浓度, 在研究渐变区宽度对能带影响时, 假设两侧掺杂相同, 即  $N_A$  为定值且等于载流子浓度。

与前面分析类似, 这里采用四阶 Runge-Kutta 法对泊松方程进行求解, 对不同的  $L$  值, 用数值法求解并模拟出缓变异质结的价带能带图变化如图 4 所示。

对于上式,  $L$  分别取为 10、20、30 nm 模拟分析, 可得出对于渐变结, 渐变区宽度越大, 则势垒高度越小, 能带变化越平缓;  $L$  值越小, 则势垒高度越大, 对于宽渐变层的异质结, 有利于减小势垒, 进而减小串联电阻。

参考文献:

[1] YOFFE G W. Rectification in heavily doped p-type GaAs/AlAs heterojunctions[J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, 70(2): 1081-1083.  
 [2] GEELS R S, CORZINE S W, SCOTT J W, et al. Low threshold planarized vertical-cavity surface emitting lasers[J].

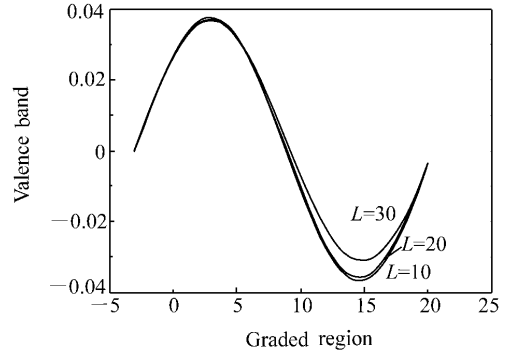


图 4 价带随渐变区宽度变化的曲线图

Fig. 4 Diagram of valance band changed with width of graded region

然而, 并不是说渐变层的宽度越大越好, 对于渐变 DBR, 当渐变区宽度在 25 ~ 30 nm 时, DBR 的反射率会有明显下降, 在 20 ~ 25 nm, 反射率下降不明显, 故一般取渐变层宽度在 20 ~ 25 nm 之间即可。

### 3 结 论

对于 VCSEL, 通过分析可得其电阻主要由 p-DBR 决定。而 p-DBR 的串联电阻与势垒高度呈指数关系, 体电阻与浓度成正比, 故减小串联电阻有以下途径:

(1) 对 p 型 DBR 进行漏斗式扩散, 扩散浓度尽可能大, 而有源区正上方的 DBR 掺杂浓度不可过大以免影响其反射特性;

(2) 在 p 型 DBR 的  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{AlAs}$  接触处加入渐变层  $\text{Al}_{0.1-1}\text{Ga}_{0.9-0}\text{As}$ , 通过模拟分析得出双曲线渐变形式的缓变结可较大程度地降低势垒高度;

(3) 通过对不同渐变区宽度的缓变结进行比较, 从而得出在 20 ~ 25 nm 的渐变宽度下既可以得到比较低的势垒高度, 同时对 DBR 的反射率也不会有太大影响。

*IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1990, 2(4) 234-236.

- [ 3 ] TAI K ,YANG L ,WANG Y H *et al.* . Drastic reduction of series resistance in doped semiconductor distributed Bragg reflectors for surface emitting lasers[ J ]. *Appl. Phys. Lett.* ,1990 56( 25 ) 2496-2498.
- [ 4 ] CHAMERS S A ,LEAR K L ,KILLEEN K P. Low resistance wavelength-reproducible p-type( Al ,Ga )As distributed Bragg reflectors grown by molecular beam epitaxy[ J ]. *Appl. Phys. Lett.* ,1993 62( 14 ) 1581-1585.
- [ 5 ] SUGIMOTO M ,KOSAKA H ,KURIHARA K *et al.* . Very low threshold current density in vertical-cavity surface-emitting laser diodes with periodically doped distributed Bragg reflectors[ J ]. *Electron. Lett.* ,1992 28( 4 ) 385-387.
- [ 6 ] 刘颖. 钨丝掩模质子轰击 GaAlAs/GaAs 垂直腔面发射激光器的研究[ D ]. 长春 :吉林大学 ,1995.  
LIU Y. Research on tungsten wire mask proton bombardment GaAlAs/GaAs VCSEL[ D ]. *Changchun :Jilin University* , 1995. ( in Chinese )
- [ 7 ] 高洪海 ,高俊华 ,林世鸣 ,等. Zn 扩散工艺在降低 VCSEL<sub>p</sub> 型 DBR 串联电阻中的应用[ J ]. *半导体光电* ,1996 ,17( 3 ) 243-247.  
GAO H H ,GAO J H ,LIN SH M *et al.* . Apply of lower series resistance using Zn proliferation[ J ]. *Semiconductor Optoelectronics* ,1996. 17( 3 ) 243-247.( in Chinese )
- [ 8 ] 虞丽生. 半导体异质结物理( 第二版 ) [ M ]. 北京 :科学出版社 ,2006.  
YU L SH. *Heterojunction Semiconductor Physics*[ M ]. Beijing Science Press ,2006.( in Chinese )
- [ 9 ] 刘恩科 ,朱秉升. 半导体物理学 [ M ]. 北京 :国防工业出版社 ,1998.  
LIU E K ,ZHU B SH. *Semiconductor Physics*[ M ]. Beijing :National Defense Industry Press ,1998.( in Chinese )

作者简介 张建伟( 1985— ) ,男 ,硕士研究生 ,主要研究方向为 VCSEL 的结构优化。E-mail zcjlw1985@126.com

宁永强( 1965— ) ,男 ,研究员 ,博士生导师 ,目前研究方向为新型半导体激光器及其相关物理特性。

E-mail ningyq@ciomp.ac.cn