

氧化限制型垂直腔面发射激光器串联电阻分析*

佟存柱 韩 勤 彭红玲 牛智川 吴荣汉

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 含氧化限制孔的 VCSEL 具有低的阈值电流,但氧化孔的存在也会加大串联电阻. 本文采用理论模型,详细计算了氧化限制型 VCSEL 的串联电阻. 把串联电阻分解为垂直方向电阻和横向电阻,分析了串联电阻与氧化孔半径的关系,提出了降低 VCSEL 串联电阻的具体方法.

关键词: 垂直腔面发射激光器; 氧化孔; 串联电阻

PACC: 4255P; 4260B; 8160C

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)07-1459-05

1 引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有良好的波长选择特性、高量子效率、低制备成本、利于实现大规模单片集成等优越性而成为光纤通信系统中具有重要应用的核心关键器件. 其核心结构为 P-F-N 结构,分别包括上层分布布拉格反射镜(DBR,由多层光学厚度为 $\lambda/4$ 薄膜构成)、量子阱有源层、下 DBR 等. 其中 DBR 层的电阻对整个器件的阈值特性以及频率响应特性都有着重要影响^[1]. 目前新型的 VCSEL 器件大都采用氧化限制结构,即在量子阱和上下 DBR 层之间分别插入一层一定厚度的 AlGaAs 或 AlAs 层. 利用侧向氧化产生氧化铝,形成绝缘性好的低折射率限制区域,用来作为电限制和光限制,可以使 VCSEL 实现极低阈值连续激励^[2].

虽然氧化限制可以大大降低激光器的阈值电流,但也会增大 VCSEL 的电阻,从而影响 VCSEL 的高频特性^[3,4]和热特性^[5],降低总转换效率(wall-plug efficiency). DBR 结构可由具有一定折射率差的材料如 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, ZnSe/CaF_2 , $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, Si/SiO_2 等构成. 对于 GaAs 基 VCSEL,出于生长连续性考虑,常采用 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 作为 DBR 材料. 由于构成侧向限制的氧化层为纯 AlAs 或 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$,因此在采用 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$

做 DBR 时,为避免 DBR 中含 AlGaAs 层的严重氧化导致 DBR 的破坏,DBR 通常采用 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ 制备. 本文采用理论模型,详细计算了氧化限制型 VCSEL 的串联电阻,分析了影响串联电阻的诸多因素,给出了串联电阻与氧化孔半径之间的关系,提出了降低 VCSEL 串联电阻的具体方法.

2 基本理论

VCSEL 器件垂直串连电阻分别来自上下 DBR、侧向氧化层、有源区等. 而减小电阻需要优化设计的部分主要为 DBR 结构和侧向氧化层. 因此本文主要计算分析 DBR 和氧化孔径的优化参数.

2.1 DBR 的电阻

图 1 为典型 VCSEL 结构. 在 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ DBR 中,电流周期性地流经 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ 界面和 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 界面. GaAs 为直接带隙材料, $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 为间接带隙材料,带隙大于 GaAs. 两者相接触时,会在界面附近窄带隙的 GaAs 一侧形成载流子积累层,宽带隙的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 一侧则形成载流子耗尽区. 同型异质结两种材料会有不同的势垒高度.

半导体异质结导电主要有扩散机制、热电子发射和隧道隧穿机制^[6]. 对于 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 突

*国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA312080),国家重点基础研究发展规划(批准号: TG2000036603)和国家自然科学基金(批准号: 60137020)资助项目

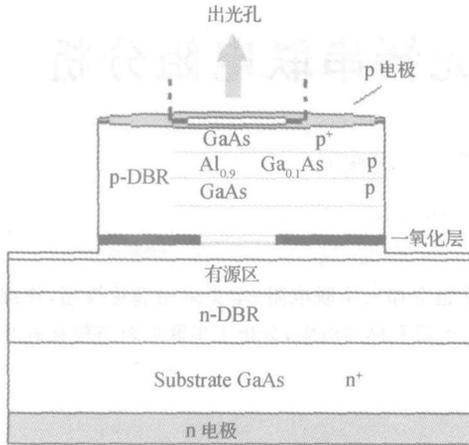


图 1 典型 VCSEL 结构示意图
Fig. 1 Typical structure of VCSEL

变异质结,掺杂浓度在 10^{18} cm^{-3} 量级时主要以热电子激发为主^[6]. 当加外电压时,根据热电子发射模型^[6],得到流过两种界面的电流密度分别为:

GaAs/ $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 界面:

$$J_{12} = qn_0 \left(\frac{kT}{2m^*}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{qV_{D2}}{kT}\right) (1 - \exp\left(-\frac{qV_2}{kT}\right)) \quad (1)$$

$\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ / GaAs 界面:

$$J_{21} = qn_0 \left(\frac{kT}{2m^*}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{qV_{D2}}{kT}\right) (\exp\left(\frac{qV_2}{kT}\right) - 1) \quad (2)$$

下角标 1,2 分别代表 GaAs 和 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 的参数;其中 q 为电荷; n_0 为载流子浓度,对于 p 型和 n 型 DBR,它近似为掺杂浓度; k 为玻尔兹曼常数; T 为温度; m^* 为载流子的有效质量,对于 p 型 DBR, $m^* = m_p^*$,对于 n 型 DBR, $m^* = m_n^*$; V_2 为加电压 V 后 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 的分压, GaAs 分压为 V_1 , $V = V_1 + V_2$. V_{D1} 和 V_{D2} 分别为 GaAs, $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 接触时各自的势垒高度. 依据电中性条件,解泊松方程可以得到同型异质结接触电势 V_{D1} 和 V_{D2} , 满足以下方程^[6]:

$$\begin{cases} \frac{\exp(-\phi_1) - \phi_1 - 1}{\exp(-\phi_2) + \phi_2 - 1} = \frac{N_2}{N_1} \\ \phi_1 = qV_{D1}/kT \\ \phi_2 = qV_{D2}/kT \\ V_{D1} + V_{D2} = V_D = E_F \end{cases} \quad (3)$$

其中 ϕ_1 和 ϕ_2 分别为 GaAs 和 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 的介电常数; N_1 和 N_2 分别为两者的掺杂浓度. 杂质完全电离时, E_F 可由下列两个公式给出:

p 型半导体:

$$E_F = E_v + \frac{3}{2} kT \ln(m_{p1}^*/m_{p2}^*) - kT \ln(N_{p1}/N_{p2})$$

n 型半导体:

$$E_F = E_c - \frac{3}{2} kT \ln(m_{n1}^*/m_{n2}^*) - kT \ln(N_{n1}/N_{n2})$$

对于 GaAs 和 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$, E_v 约为 0.284eV ^[7]. 当加一电压 V 后, 1、2 变为:

$$\phi_1 = q(V_{D1} - V_1)/kT \quad (4)$$

$$\phi_2 = q(V_{D2} - V_2)/kT \quad (5)$$

解联立方程 (3), (4), (5) 可求得 V_1 和 V_2 , 在 V 为 10^{-2}V 时, $V_2 \approx 0.9\text{V}$.

根据欧姆定律,可以算得单位面积的微分电阻为:

$$RS = \frac{dV}{S dJ} = \frac{dV}{dJ} \quad (6)$$

解联立方程 (1) ~ (6) 可求得 GaAs/ $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 界面和 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ / GaAs 界面的单位面积电阻率 $\rho_{12}(V)$ 和 $\rho_{21}(V)$. 对于 p 型 DBR, 计算得到:

$$\rho_{12}(V) = (B \exp\left(\frac{0.9Vq}{kT}\right))^{-1} \quad (7)$$

$$\rho_{21}(V) = (B \exp\left(-\frac{0.9Vq}{kT}\right))^{-1} \quad (8)$$

$$B = 100qp_0 \frac{q}{kT} \left(\frac{kT}{2m_p^*}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{qV_{D2}}{kT}\right) \quad (9)$$

其中 100 是单位转换因子,这里 $\rho_{12}(V)$ 和 $\rho_{21}(V)$ 的单位为 $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

由于电子的有效质量比空穴的小得多,而且 n-DBR 电阻不受氧化孔影响,因此 p-DBR 比 n-DBR 电阻大得多,VCSEL 串联电阻大部分来自于 p-DBR. 图 2 为 $\rho_{12}(V)$ 和 $\rho_{21}(V)$ 与电压关系,可以看到 $\rho_{12}(V)$ 随电压升高值变得很小,而 $\rho_{21}(V)$ 则随电压

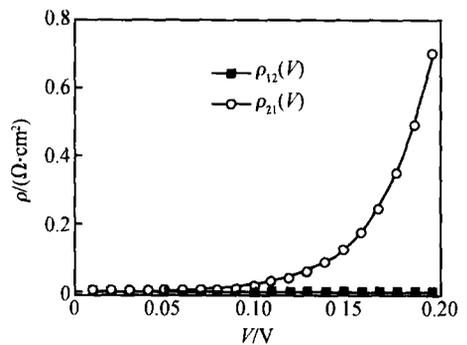


图 2 异质结电阻率与电压关系

Fig. 2 Calculated resistivity of heterojunction versus voltage

升高而呈指数升高,这是 VCSEL 串连电阻主要来源于 p-DBR 电阻的原因.

2.2 氧化孔径对 VCSEL 电阻的作用计算

由于 p-DBR 电阻占 VCSEL 串联电阻的主要部分,这里主要分析 p-DBR 电阻物理机制.图 3 为电流在上 DBR 中分布示意图.可以看到,氧化孔的作用相当于一个透镜,它把电流汇聚,大大提高电流密度,从而降低激射阈值.电流从电极流向氧化孔,既有电流在薄膜中的横向输运,也有垂直方向的输运.对于圆柱形上 DBR,横向电阻可由下式计算^[8]:

$$R(r) = \frac{1}{2} \ln \frac{r}{a} \quad (9)$$

其中 t 为薄膜厚度; r 为半径; a 为氧化孔半径.垂直方向电阻可根据欧姆定律来分析.垂直方向电阻分为两部分,一为半导体本身的电阻 R_t ,二为异质结的电阻 R_j .具体电阻与电流流通过程有关,详细分析电流流经路径较困难,但由欧姆定律可知,电流主要会沿电阻最小的路径流动.如图 3 所示,有多种典型路径 A、B、C 等.由于上 DBR 高仅几个微米,电流可能流经截面面积介于氧化孔面积 ($20\mu\text{m}^2$) 和 p 电极面积 ($3600\mu\text{m}^2$) 之间, R_t, R_j 与截面面积成反比,所以 A 路径电阻最小.近似地以 A 路径来分析实际电

阻,可以大大简化计算.

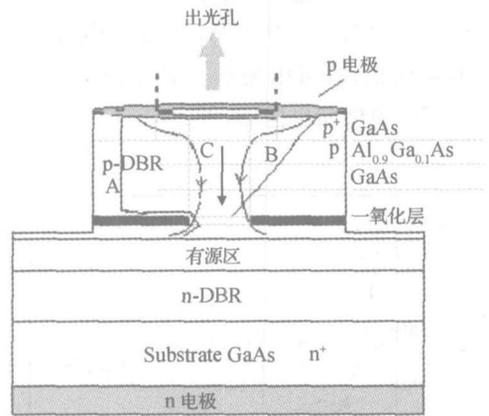


图 3 上 DBR 电流分布示意图

Fig. 3 Distribution of current in top DBR of VCSEL

总电阻 $R = R(r) + R_t + R_j + R_{ox}$, R_{ox} 为氧化孔处电阻, R_t, R_j, R_{ox} 都可由欧姆定律求出, $R(r)$ 主要决定于氧化层上一层物质的性质,这里我们取从 p 电极内外径到氧化孔电阻的平均值.

本文以典型的 1310nm VCSEL 为例,上 DBR (p 型) 为 25 对,下 DBR (n 型) 为 40 对,假设 DBR 压降 1V,主要降在上 DBR,每个结压降约为 0.02V.其他参数列于表 1 中.

表 1 计算采用的参数(温度为 300 K)

Table 1 Values of structure parameters of VCSEL in calculation

参数	数值	参数	数值
p ⁺ GaAs 掺杂浓度	$1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	n GaAs 厚度	95.3nm
p ⁺ GaAs 电阻率	$1.56 \times 10^{-3} \cdot \text{cm}$	n GaAs 掺杂浓度	$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
p GaAs 厚度	95.3nm	n GaAs 电阻率	$3.7 \times 10^{-4} \cdot \text{cm}$
p GaAs 掺杂浓度	$3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	n Al _{0.9} Ga _{0.1} As 厚度	111.5nm
p GaAs 电阻率	$5.2 \times 10^{-3} \cdot \text{cm}$	n Al _{0.9} Ga _{0.1} As 掺杂浓度	$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
p Al _{0.9} Ga _{0.1} As 厚度	111.5nm	n Al _{0.9} Ga _{0.1} As 电阻率	0.01 ·cm
p Al _{0.9} Ga _{0.1} As 掺杂浓度	$3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	GaAs 电子有效质量	0.067 m_0
p Al _{0.9} Ga _{0.1} As 电阻率	0.01 ·cm	GaAs 空穴有效质量	0.48 m_0
p 电极半径	60μm	Al _{0.9} Ga _{0.1} As 电子有效质量	0.139 m_0
出光孔半径	20μm	Al _{0.9} Ga _{0.1} As 空穴有效质量	0.759 m_0

3 计算结果及讨论

图 4 为计算得到的电阻 R 与氧化孔半径 a 的关系.可以看到,氧化孔越小,电阻越大.氧化孔半径 $a < 5\mu\text{m}$ 时,电阻开始急剧升高; $a = 5\mu\text{m}$ 时,电阻已达 320,这对于 VCSEL 激射会有很大影响,因此实际器件中氧化限制孔径不能太小.我们计算得到

的电阻略大于实验值^[8].根据公式(9)和(3),(4),可以通过降低异质结势垒来降低垂直方向电阻.具体可通过缓变结、组分渐变、界面超晶格和调制掺杂等方法实现^[9~11].氧化层的上一层为 GaAs 时的电阻比 Al_{0.9}Ga_{0.1}As 时大,氧化孔半径为 5μm 时,前者电阻为 320,而后者为 230,这是因为 GaAs/AlAs 异质结势垒比 Al_{0.9}Ga_{0.1}As/AlAs 大得多.可见,在氧化层的上一层为 AlGaAs,可以降低电阻.

图 5 为氧化层上层为 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 时各类电阻比较,可以看到横向电阻占比重大。根据公式(9),可知对这层进行高掺杂、增加厚度、减小电极半径(但不减小电极面积,这可由缩小出光孔径来实现)可以降低 VCSEL 的横向电阻。

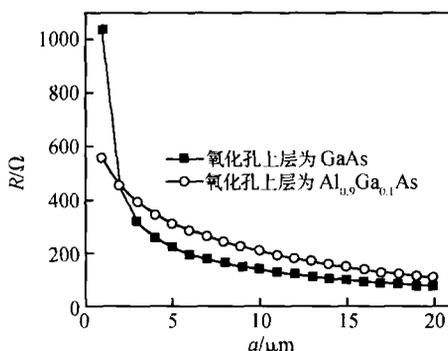


图 4 电阻 R 与氧化孔半径 a 的关系

Fig. 4 Resistance versus radius of oxide aperture

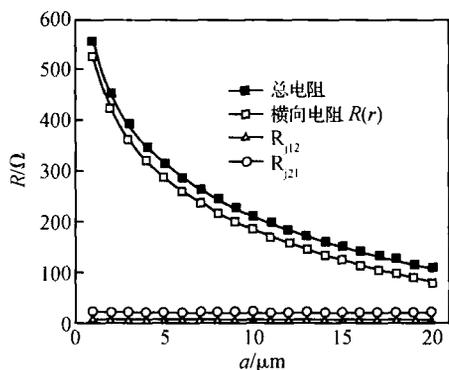


图 5 各类电阻所占比例

Fig. 5 Proportions of transverse resistance and hetero-junction resistances in total resistance

4 结论

分析了氧化限制型 VCSEL 器件串联电阻,提出了降低 VCSEL 串联电阻的具体方法:降低垂直方向串联电阻可以通过降低 DBR 异质结势垒来实现;减小上电极直径,同时缩小出光孔径,而不使上电极面积减小,可以降低横向电阻;采用高掺杂、较

厚的 AlGaAs 作为氧化层的上一层,可以降低氧化孔处的电阻。

参考文献

- [1] Peters M G, Thibeault B J, Young D B, et al. Band gap engineered digital alloy interfaces for lower resistance vertical-cavity surface-emitting lasers. *Appl Phys Lett*, 1993, 63:3411
- [2] Choquette K D, Schneider P R Jr, Lear K L, et al. Low threshold voltage vertical-cavity lasers fabricated by selective oxidation. *Electron Lett*, 1994, 30:2043
- [3] Kang Xiangning, Song Guofeng, Ye Xiaojun, et al. Effect of high aluminum AlGaAs oxidized layers on vertical-cavity surface emitting lasers. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(5):589 (in Chinese) [康香宁, 宋国峰, 叶晓军, 等. 高铝 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 氧化层对垂直腔面发射激光器的影响. *半导体学报*, 2004, 25(5):589]
- [4] Wang Haisong, Du Guotong, Xu Chengdong, et al. 850nm vertical cavity surface emitting laser fabricated by large angle ion implantation using tungsten as mask and its modulation character. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(9):1143 (in Chinese) [王海嵩, 杜国同, 许成栋, 等. 钨丝掩模大角度倾斜离子注入 850nm 垂直腔面发射激光器及其高频调制特性. *半导体学报*, 2004, 25(9):1143]
- [5] Piprek I J. Electro-thermal analysis of oxide-confined vertical-cavity lasers. *Phys Status Solidi A*, 2001, 188(3):905
- [6] Yu Lisheng. *Physics of semiconductor heterostructures*. Beijing: Science Press, 1990:90 (in Chinese) [虞丽生. *半导体异质结物理*. 北京: 科学出版社, 1990:90]
- [7] Nabiev R F, Chang-Hasnain C J. Voltage drop in n - and p -Bragg reflectors for vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1995, 7:733
- [8] MacDougall M H, Geske J, Lin C K, et al. Low resistance intracavity-contacted oxide-aperture VCSELs. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1998, 10(1):9
- [9] Tai K, Yang L, Wang Y H, et al. Drastic reduction of series resistance in doped semiconductor distributed Bragg reflectors for surface-emitting lasers. *Appl Phys Lett*, 1990, 56:2496
- [10] Fastenau J M, Robinson G Y. Low-resistance visible wavelength distributed Bragg reflectors using small energy band offset heterojunctions. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(25):3758
- [11] Chalmers 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. *Appl Phys Lett*, 1993, 62:1585

Analysis of Series Resistance of Oxide-Aperture Confined Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers^{*}

Tong Cunzhu, Han Qin, Peng Hongling, Niu Zhichuan, and Wu Ronghan

(*Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: While AIAs oxide confined aperture may reduce the threshold current of vertical-cavity surface emitting lasers (VCSELs), it might also enlarge the series resistance of the VCSELs. In this paper, a theoretical model and calculation of series resistance of oxide confined VCSELs are presented. In the model, series resistance is split into two parts: the perpendicular part and the transverse part. Suggestions for reducing the series resistance of the VCSELs are given.

Key words: vertical-cavity surface emitting lasers; oxide aperture; series resistance

PACC: 4255P; 4260B; 8160C

Article ID: 0253-4177(2005)07-1459-05

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA312080), the National Basic Research Program of China (No. TG2000036603) and the National Natural Science Foundation of China (No. 60137020)

Received 14 September 2004, revised manuscript received 4 November 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics