

# 1.3 $\mu\text{m}$ 量子点垂直腔面发射激光器 高频响应的优化设计\*

彭红玲 韩 勤 杨晓红 牛智川

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2006 年 5 月 15 日收到, 2006 年 8 月 9 日收到修改稿)

结合垂直腔面发射激光器(VCSEL)原理以及量子点增益特点,计算了有源层 p 掺杂结构的量子点 VCSEL 的材料增益和 3 dB 带宽,发现 p 掺杂结构可以大大提高频率特性.结合 VCSEL 激射条件和阈值特性,分析了对 VCSEL 结构的要求,分析了分布参数对频率特性的影响,对其外部封装提出了要求,设计了高频响应的含氧化限制层的 1.3  $\mu\text{m}$  量子点 VCSEL 结构.

关键词:量子点,垂直腔面发射激光器,微分增益,3 dB 带宽

PACC:4255P,7320D

## 1. 引 言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)因其自身特殊的结构,具有很多优点,如:因谐振腔体积小,易产生微腔效应,可实现极低阈值电流激射;因谐振腔短,纵模间距大,易实现动态单纵模工作;同样因谐振腔短,所以光子寿命短,调制频率可以达到很高;此外还具有低制备成本、易大规模单片集成等优点.随着高速、大容量光纤通信网络的发展,VCSEL 已经成为光通信领域最有前途的光源之一.虽然 1.3  $\mu\text{m}$  VCSEL 已有商业化产品推出,但规模不大,主要障碍是输出功率还不够高.而在高速应用方面,目前探测器理论值达到了 200 GHz 的带宽,商用的也已经达到 60 GHz<sup>[1]</sup>;但是 VCSEL 却没有达到如此的高速,一般在 10 Gb/s 左右.限制 VCSEL 调制带宽的因素有:1)大电流注入时其高的结温将使增益下降;2)严格的单模工作范围决定了模式最大光子密度,从而决定了最大共振频率;3)接触电极电容和外封装带来的电路寄生效应;4)外延结构没有充分优化以得到最佳的微分增益值等.

相对于 InP 基 VCSEL, GaAs 基 VCSEL 具有更简单的结构、集成优势和更好的温度特性,可以产生

1.3  $\mu\text{m}$  光增益的 GaAs 基半导体材料主要有 GaInNAs/GaAs 量子阱(QW)和自组织 InAs 量子点(QD). GaInNAs 量子阱可以提供比 InGaAsP 大的材料增益<sup>[2]</sup>,但 N 的并入又会降低发光效率<sup>[3]</sup>,难以激射<sup>[4]</sup>.而 QD 因其态密度的特点,可以使 QD 激光器有更低的阈值电流<sup>[5]</sup>、更高的斜率效率<sup>[6]</sup>、更高的调制速率等优点,但实际上 QD 的调制速率并没有很大改变<sup>[7]</sup>.采用调制掺杂<sup>[8]</sup>和 Tunneling injection<sup>[9]</sup>都可以将带宽提高.本文正是从 VCSEL 原理出发,结合 QD 的增益和频率响应特点,着重讨论了 p 掺杂对器件的影响,设计并优化了具有高速调制特性的 QD VCSEL 结构.

## 2. 理论分析

VCSEL 的典型结构如图 1 所示,是有源区夹在上下反射镜间形成的三明治结构.上下反射镜是由  $1/4\lambda$  多层膜堆栈形成的高反射率分布反馈 Bragg 光栅(DBR);中间是光学厚度为  $n\lambda$  的共振腔,其中心为有源区,提供光增益;上下 DBR 内有高铝组分的氧化限制层,用于电、光限制,提高载流子注入密度,降低阈值电流.

图 1 所示为双内电极结构的 VCSEL.通常还有

\* 国家重点基础研究发展规划(批准号: TG2000036603),国家重点基金资助项目(批准号: 60137020)和国家高技术研究发展计划(批准号: 2002AA312080)资助的课题.

上下电极结构的 VCSEL<sup>[10]</sup>,从文献 [10] 的分析中知道上下电极结构没有双内电极结构的阈值模式增益小,后文中还将分析其电阻也较大,不利于高频应用,因此本文仅介绍双内电极结构的 VCSEL.上下 DBR 均不掺杂,上 DBR 28 对,下 DBR 34 对,p,n 电极接触层掺杂分别为  $3 \times 10^{18}$  和  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,厚度分别为 100 和 200 nm.

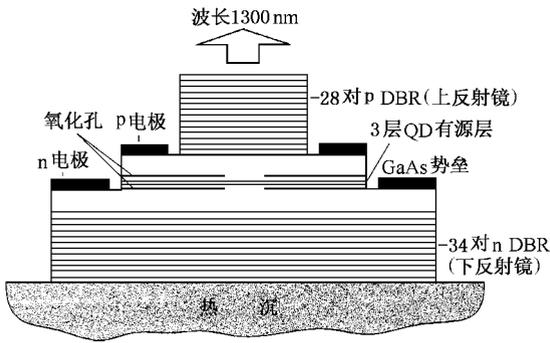


图 1 双内电极结构的 VCSEL

## 2.1. 有源层的结构设计

### 2.1.1. VCSEL 阈值模式增益

激光器要实现激射,就要有足够高的增益. VCSEL 实现激射的阈值模式增益为<sup>[11]</sup>

$$g_{th} = \alpha_d \left( 1 - \frac{L}{L_{eff}} \right) + \alpha_c \frac{L}{L_{eff}} + \frac{1}{L_{eff}} \ln \left( \frac{1}{\sqrt{R_t R_b}} \right), \quad (1)$$

式中  $\alpha_d$  为 DBR 的平均损耗系数,包括吸收损耗和衍射损耗; $\alpha_c$  为平均腔内损耗; $R_t$  和  $R_b$  为上下 DBR 的反射率; $L$  为实际腔长, $L_{eff}$  为等效腔长, $L_{eff} = L + L_t + L_b$ , $L_t$ , $L_b$  分别为上下 DBR 反射镜等效长度.对于  $1.3 \mu\text{m}$  的 GaAs 基 VCSEL,上下 DBR 反射率很高时, $L_t \approx L_b \approx 0.594 \mu\text{m}$ .

VCSEL 腔外的吸收损耗主要来自价带内跃迁光吸收和自由载流子吸收.上 DBR 平均吸收系数约为  $17 \text{ cm}^{-1}$ ,下 DBR 约为  $6 \text{ cm}^{-1}$ ,这里忽略了衍射损耗的影响.平均腔内损耗约为  $2 \text{ cm}^{-1}$ .计算得到双内电极结构的 VCSEL  $1\lambda$ ,  $3\lambda$  和  $5\lambda$  腔长的  $g_{th}$  分别为 22, 15 和  $12 \text{ cm}^{-1}$ .

### 2.1.2. 材料增益和微分增益

QD 激光器有源区一般采用 DWELL 结构<sup>[12]</sup>,即 QD 生长在 QW 里,这种结构的 QD 具有较高的面密度. InAs QD 激光器常采用多层 QD 堆垛<sup>[13]</sup>,浸润层

一般为  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ,各层 QD 之间用  $50 \text{ nm}$  GaAs 分隔.

由于 QD 的分立能级使其室温自发辐射线宽和增益谱带宽都小于 QW,可以得到很高的微分增益,因此有望提高其频率特性.但是有两个因素限制了 QD 的调制速率,一是由于 QD 大小的随机分布引起的非均匀展宽使光增益和微分增益都减小,一般在室温下自组织 QD 的均匀线宽为  $5 \text{ meV}$ ,而由于其尺寸大小不一致引起的非均匀线宽大约为  $30 \text{ meV}$ .二是被限制的空穴由于其分立能级较密集,导致注入的空穴不仅占据基态而且还占据很多空穴态,因此大部分注入的空穴就没有耦合进激射模式而是被浪费掉了.这样 QD 就没有能控制住载流子泄露,这似乎与 QW 中有源区 p 掺杂能提高频率的特性相违背.早期的研究只强调 QD 的调制速率低是因为光子的瓶颈效应,导致注入的载流子能量释放变慢,这样的分析并没有正确地指出空穴能级的重要作用.下面分析一下 QD 的调制特性,考虑非均匀展宽和密集的空穴能级的影响,定量地给出 QD 的优化频率特性.通过选择合适的有源区势垒层 p 掺杂<sup>[14]</sup>和合适的腔长等条件,可以得到优化的高速 VCSEL 材料结构.

根据文献 [14] 提供的公式我们对有源层为 QD 的 VCSEL 的增益特性进行如下讨论.假设电子和空穴的分布是准平衡状态,空穴能级分布密集,大量空穴能级能被热激发.注入电流包括辐射复合和能级间的充放电.假设能级间的辐射转换只发生在同能级的电子和空穴之间,这样其注入电流密度由下式表示

$$\begin{aligned} \frac{J}{q} = & N_{st} n_{QD} \sum_{m=0}^M s_m \frac{df_{m,e}}{dt} \\ & + N_{st} n_{QD} \sum_{m=0}^M s_m \gamma_{sp,m} f_{m,e} \\ & \times (1 - f_{m,h}) + v_g g_0(n_e) \frac{n_L}{WL}, \quad (2) \end{aligned}$$

总电子或空穴密度为

$$n_{\langle h \rangle} = N_{st} n_{QD} \sum_{m=0}^{M_{\langle h \rangle}} s_m f_{m,\langle h \rangle}, \quad (3)$$

根据电中性条件: $n_e + N_a^- = n_h$  可以计算得到准费米能级.

(2) 式是对整个 QD 的分立能级进行求和, $m$  代表各分立能级,上限  $M$  或  $M_{\langle h \rangle}$  要选得足够大,以忽略高能级占据态几率的影响. $N_a^-$  是势垒层的电荷

密度(此处即为掺杂浓度),  $W, L$  分别为激光器的宽度和腔长,  $n_L$  为激射的光子数,  $s_m$  为第  $m$  个能级的简并度,  $\gamma_{sp,m}$  为第  $m$  能级上进入到全光子态的自发辐射速率,  $n_{\text{QD}}$  为有源区的量子点密度,  $g_0(n_e)$  为基态增益,  $v_g$  为激射态的光速度,  $N_{\text{st}}$  为量子点层数.

进入激射模式的光子速率方程为

$$\frac{dn_L}{dt} = -\frac{\omega_0}{Q}n_L + v_g g_0(n_e) \times \left\{ \frac{f_{0,e}(n_e) [1 - f_{0,h}(n_e)]}{f_{0,e}(n_e) - f_{0,h}(n_e)} + n_L \right\}, \quad (4)$$

费米-狄拉克分布函数

$$f_{m,e(h)} = \frac{1}{e^{\frac{E_{e(h)} + m\Delta E_{e(h)} - F_{e(h)}}{kT}} + 1}, \quad (5)$$

其中  $\omega_0/Q$  是腔内光损耗,  $E_{e(h)}$  是电子(空穴)的基态能量值,  $\Delta E_{e(h)}$  是分立的电子(空穴)能级间隔,  $F_{e(h)}$  是电子(空穴)的准费米能级. 这样就得到基态的峰值模式增益函数为

$$g_0(n_e) = \sqrt{\frac{\ln(2)}{\pi}} \frac{c\lambda_0^2 \Gamma_0}{2n^3 v_g \Delta\omega \Delta z} N_{\text{st}} n_{\text{QD}} \times s_0 \gamma_{sp,0} [f_{0,e}(n_e) - f_{0,h}(n_e)], \quad (6)$$

式中  $\Delta z$  为有源区厚度,  $\Delta\omega$  为 QD 的非均匀线宽,  $n$  为材料的折射率. 参考文献 [14] 我们可将参数取值如下:  $\lambda_0 = 1.3 \mu\text{m}$ ,  $\hbar\Delta\omega = 30 \text{ meV}/10 \text{ meV}$ ,  $n = 3.4$ ,  $v_g = 6.7 \times 10^7 \text{ m/s}$ ,  $n_{\text{QD}} = 1.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ,  $\gamma_{sp,m} = 1.25 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta E_e = 80 \text{ meV}$ ,  $\Delta E_h = 10 \text{ meV}$ . 简并度  $s_m$  可以根据文献得到. 对于 VCSEL,  $\Gamma_0/\Delta z = 2/L_{\text{eff}}$ , 可以计算得到. 由模式增益与材料增益关系  $g = \Gamma G$  可算得饱和材料增益  $G_{\text{max}}$ .

计算得到的材料增益与注入电子数目之间的关系如图 2 (温度为 300 K,  $1\lambda$  腔长, 5 层 QD) 所示.

图 2 中掺杂浓度由每个 QD 有  $n$  (0, 25, 50, 90) 个空穴表示, 实际的掺杂浓度就是  $n \times n_{\text{QD}}$ . 可见, 随着 p 掺杂浓度的增加, 模式增益和微分增益增加, 透明载流子浓度 ( $g = 0$  对应的载流子浓度) 却随着 p 掺杂浓度的增加而减小, 从而使得  $J_{\text{th}}$  减小. 物理解释如下: 增益正比于电子和空穴的费米分布函数之差  $f_e - f_h = f_e(1 - f_h) - f_h(1 - f_e)$ , 其中等式右边第一项是受激发射项 (即载流子从导带到价带的转换概率), 第二项是受激吸收项 (即从价带跃迁至导带的概率). 当 p 掺杂时, 大量空穴将占据价带的高能态, 导致  $f_h$  接近零. 随着掺杂浓度的增加, 受激吸收项  $f_h(1 - f_e)$  减小, 因此在相同的电子注入密度下,

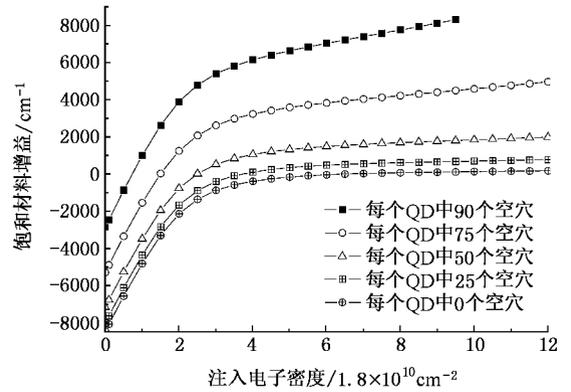


图 2 对应于不同注入电子密度, QD VCSEL 在不同掺杂浓度下的材料增益

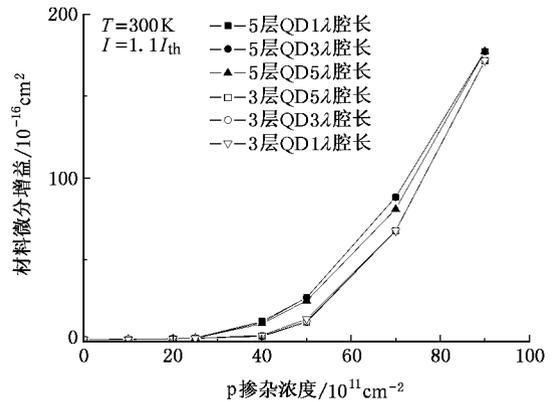


图 3 不同掺杂浓度对 QD 微分增益的影响

随着增益增加, 透明载流子(电子)浓度却下降.

当腔长确定后(如图 3 中的  $1\lambda$ ,  $3\lambda$  和  $5\lambda$  腔长), 有源区对应的阈值模式增益就确定了. 从图 3 可以看出, 对应于相同的阈值模式增益(即器件激射所需要克服的损耗相同), 当 QD 分别为 5 层和 3 层, 注入电流为  $1.1 \times I_{\text{th}}$  时, 虽然其对应的透明载流子浓度和阈值模式增益有所不同, 但其对应的材料微分增益随掺杂浓度的变化曲线却基本相同. 当 p 掺杂浓度增加到  $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  后, 微分增益都显著增加. 这说明材料的微分增益只和有源区的材料有关, 和其结构没有太大关系, 但是材料结构(如腔长和 QD 层数)对光限制因子和模式增益是有影响的, 进而影响到其频率特性.

对于阈值模式增益, 通过计算可知: 如果 QD 的面密度不高(如  $1.8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ) 则很难达到激射条件. 但是 p 掺杂后,  $1\lambda$  腔长、3 层 QD 就可以达到激射条件, 如果是 5 层 QD 就更容易激射. 对于 QD VCSEL, 更需要较高的面密度才能达到激射, 然后才

能有高频特性出来. 我们计算了面密度为  $10 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  的多层 QD VCSEL 的 3 dB 带宽与电流之间的关系, 曲线如图 4 所示.

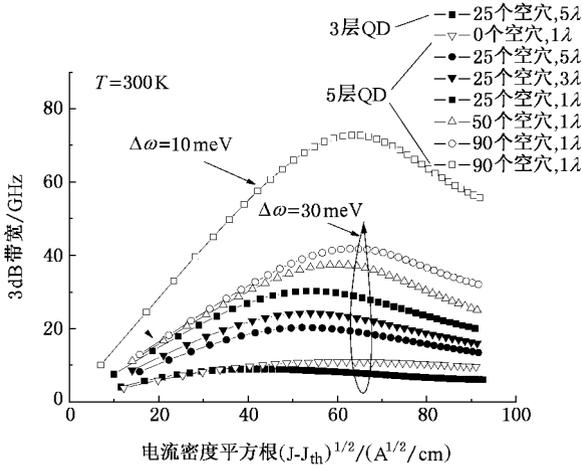


图 4 在不同掺杂浓度下, QD VCSEL 的 3 dB 带宽与电流密度平方根之间的关系曲线

图 4 中的  $1\lambda$ 、 $3\lambda$  和  $5\lambda$  指不同的腔长. 从图 4 可以看出, 随着掺杂浓度的增加, 其 3 dB 带宽有很大的提高. 当非均匀线宽减小到  $10 \text{ meV}$  时, 其 3 dB 带宽显著增加. 图中的四条实点线是在掺杂为  $25 \text{ n}_{\text{QD}}$  时, 在不同的腔长和 QD 层数时的关系曲线, 可以看出当腔长增加而保持 QD 层数为 5 时, 在同样的注入电流密度下其 3 dB 带宽是减小的; 当保持  $5\lambda$  腔长但 QD 层数从 5 减小为 3 时, 其 3 dB 带宽减小. 因此, 短腔长多层 QD 更有利于 VCSEL 器件的高频特性.

结论: p 掺杂可以有效的补偿密集的空穴能级带来的不利影响, 可以极大地提高 QD 激光器的性能. 计算结果表明, 非均匀线宽为  $30 \text{ meV}$ , 面密度为  $10 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  的情况下, 当每个 QD 中掺杂到 90 个空穴时, 可以使 3 dB 带宽提高到  $40 \text{ GHz}$  左右; 若面密度仅能达到  $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ , 则 3 dB 带宽频率只能到  $30 \text{ GHz}$  左右. 根据平衡模型我们知道主要是因为 p 掺杂提高了微分增益(由于能级间距小的空穴被填充了); p 掺杂使空穴浓度变大, 这样就保证了注入的电子总能找到基态空穴进行复合, 因此基态光增益得到提高, 同时微分增益也增加了. 同 QW 相比, QD 要获得大的空穴密度只需要较小的掺杂浓度, 并且 QD 容易增益饱和, 所以掺杂对其影响更大. 同时通过比较不同层数、不同腔长的 QD VCSEL 频率特性可知, 短腔长多层 QD 更有利于 VCSEL 器

件的高频特性.

### 2.1.3. 谐振腔的微小化

激光器的弛豫振荡频率表达式为<sup>[15]</sup>

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(\partial g / \partial n) P_{\text{out}}}{\eta_d \hbar \omega V_m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\Gamma v_g (\partial g / \partial n) (J - J_{\text{th}})}{ed}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\Gamma v_g (\partial g / \partial n) (I - I_{\text{th}})}{eWLd}}, \quad (7)$$

其中  $\eta_d$  为微分量子效率,  $V_m$  为有源区体积,  $W$ ,  $L$ ,  $d$  分别为有源区的宽、长和厚度,  $\Gamma$  为光限制因子,  $e$  为单位电子电荷. 根据弛豫振荡频率表达式可知, 为提高振荡频率: 1) 可采用调制掺杂来提高材料的微分增益, 从而提高其振荡频率; 2) 通过激光谐振腔的微小化使模体积减小; 3) 提高输出功率. 第三点一般不采用, 因为在光通信应用中, 都要求低能耗及高速工作.

有源区直径为  $D$ , 厚度为  $d$  的面发射激光器的阈值电流可以通过阈值电流密度表示如下:

$$I_{\text{th}} = J_{\text{th}} \pi (D/2)^2 = \frac{edN_{\text{th}}}{\eta_i \tau_s} \pi (D/2)^2 \approx eB_{\text{eff}} V_m N_{\text{th}} (\eta_i \eta_{\text{spn}}), \quad (8)$$

式中,  $N_{\text{th}}$  为产生光增益满足振荡条件时所必需的有源区的电子密度. 若要降低阈值电流, 减小有源区的体积  $V_m$  就可以. 但缩小激光器谐振腔时, 其损耗会增大, 结果造成振荡所需要的电子密度的增大, 同时也不得不使反射率增大. 反射率并不是越高越好, 只有使光输出最大时的反射率才是最佳反射率. 目前, VCSEL 厚度上的薄膜化已经达到极限, 只能依赖横向上的微型化, 即采用选择氧化 AlAs 层的 VCSEL, 其阈值大约与电流注入窗的直径平方成比例地减小<sup>[16]</sup>, 至于氧化层对频率特性的影响后面将继续讨论.

可见, 减小有源区的体积对于降低阈值电流和提高频率响应都很重要, 但也不是越小越好, 而是要通过优化得到最佳值. 腔长就需要有一个优化值, 腔长过长会增加光子的弛豫时间, 降低响应速率; 腔长过短增益容易饱和, 致使微分增益下降, 从而影响响应速率.

多层堆垛 QD 可以提高有源区光限制因子, 提高模式增益和弛豫振荡频率. 由于 QD 的光限制因子较小, 使得 QD 模式增益很小, 器件对光损耗也就很敏感. 降低光吸收损耗也就成为 QD VCSEL 制备

的一个关键, 我们可通过适当降低 DBR 掺杂浓度来实现。

## 2.2. 减小分布电容引起的高频限制

限制调制频率的外部因素有器件及封装的分布电容, 这是在实际器件中限制调制频率的主要原因之一。分布电容一部份源于电流窄化的结构: 氧化薄膜只有几十纳米厚, 分布电容  $C$  较大。另外在器件微型化的时候, 器件的串联阻抗将增加。这时的调制带宽将取决于分布电容的充电时间, 用下式表示:

$$f_{3\text{dB}} = \frac{1}{2\pi RC}$$

器件的电阻大部分是因为上 DBR 引起, 减小 DBR 电阻就成为当务之急。

VCSEL 芯片的等效电路<sup>[17]</sup>如图 5 所示。

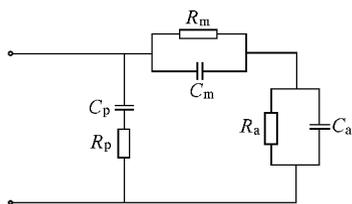


图 5 VCSEL 芯片的等效电路

图 5 中的  $R_a$ ,  $C_a$  为有源区等效电阻和电容,  $R_m$ ,  $C_m$  为上 DBR 等效电阻和电容,  $C_p$ ,  $R_p$  为寄生电容和旁路电阻。实际器件的  $C_m$ ,  $R_p$  很小可以忽略。氧化孔径处的电容很大, 等效在  $C_a$  中, 随着氧化孔径的增加,  $C_a$  增大,  $R_m$ ,  $R_a$  减小。而随着偏置电流的增加, 由于热效应  $R_m$  下降,  $R_a$  也下降,  $C_a$  增大。为减小器件电容可采用离子注入的方法, 与注入损伤相关的非辐射复合可减小氧化区域下面因扩散引起的电荷存储。  $C_a$  一般在 0.4—1.4 pF (氧化孔径 2—10  $\mu\text{m}$ ) 左右。

VCSEL 压焊金属电极制作在绝缘层  $\text{SiO}_2$  上,  $\text{SiO}_2$  下面是高掺杂电极层, 压焊金属电极和高掺杂电极层之间存在寄生电容  $C_p$ 。  $\text{SiO}_2$  厚度为 400 nm, 当电极为  $80 \times 80 \mu\text{m}^2$  时, 寄生电容大约为 0.59 pF, 与  $C_a$  几乎相当, 这将大大影响器件的高频性能。为减小寄生电容对分布参数的影响, 可以加大  $\text{SiO}_2$  厚度, 但腐蚀时工艺难度较大; 另外也可以在压焊金属电极下面做一层其他的绝缘介质膜 (如聚酰亚胺) 来减小电容。图 6 为不加聚酰亚胺和加了不同厚度的聚酰亚胺之后电容大小的比较, 图 6 中聚酰亚胺厚度为从 0 到 3  $\mu\text{m}$ 。可以看出对于比较厚的 VCSEL, 采

用厚聚酰亚胺可以明显减小电容。聚酰亚胺的厚度加到 2  $\mu\text{m}$  后, 在电极为  $120 \times 120 \mu\text{m}^2$  时电容在 0.2 pF 以下, 基本上不影响器件的 3 dB 带宽。

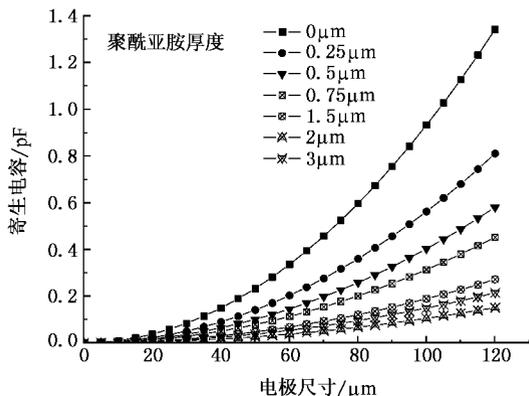


图 6 不同介质绝缘层对电极电容的影响

### 2.2.1. DBR 设计

由阈值模式增益公式可知, 要降低阈值模式增益, 可以增大腔长和上下 DBR 的反射率。下 DBR 对数一般都比较小, 当达到 34 对时反射率近似认为等于 1; 上 DBR 反射率越大阈值模式增益越小, 越容易激射, 一般采用 28 对就可以了。DBR 由  $\lambda/4$  的  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$  构成。对于掺杂的 DBR, 由于异质结势垒的存在而具有串联电阻, 这样 DBR 对数越多, 其串联电阻越大。高的 DBR 串联电阻会产生大量热, 影响激射和器件的高频特性。有几种方法可以减小 DBR 电阻, 下面先简单分析一下 DBR 的电阻。

半导体异质结导电主要有扩散机理、热电子发射和隧道隧穿机理<sup>[18]</sup>。对于  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  突变异质结, 掺杂浓度在  $10^{18} \text{cm}^{-3}$  量级时主要以热电子激发为主。当加外电压  $V$  时, 根据热电子发射模型, 可得到流过  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  和  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$  两种界面的电流密度, 然后可求得这两种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

$$\rho_{12}(V) = \left( B \exp\left(\frac{0.9Vq}{kT}\right) \right)^{-1}, \quad (9)$$

$$\rho_{21}(V) = \left( B \exp\left(\frac{-0.9Vq}{kT}\right) \right)^{-1}, \quad (10)$$

$$B = 100qp_0 \left(\frac{q}{kT}\right) \left(\frac{kT}{2\pi m_p^*}\right)^{1/2} \exp\left(\frac{-qV_{\text{bi}}}{kT}\right) \quad (11)$$

式中下角标 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,  $p_0$  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,  $m^* = m_p^*$ , n 型 DBR,  $m^* = m_n^*$ ,  $V_{dl}$  和  $V_{d2}$  分别为 GaAs,  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$  接触时各自的势垒高度.

从(9)–(11)式可知, 电阻(率)随着材料的势垒高度和载流子有效质量的增加而增加. 由于电子的有效质量比空穴的小得多, 因此 p-DBR 比 n-DBR 电阻大很多, VCSEL 串联电阻大部来自于 p-DBR.

对于侧向氧化的 p-DBR, 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. 其总电阻  $R = R(r) + R_l + R_j + R_{ox}$ , 其中  $R(r)$  为横向电阻, 可由下式计算<sup>[19]</sup>:

$$R(r) = \frac{\rho}{2\pi t} \ln\left(\frac{r}{a}\right), \quad (12)$$

式中  $t$  为薄膜厚度,  $r$  为电极半径,  $a$  为氧化孔半径,  $R(r)$  主要决定于氧化层上一层物质的性质. 垂直方向电阻分为两部分, 一是半导体本身的电阻  $R_l$ , 二是异质结的电阻  $R_j$ .  $R_{ox}$  为氧化孔处电阻,  $R_l$ ,  $R_j$ ,  $R_{ox}$  都可由欧姆定律求出. 根据(9)–(11)式, 可以通过降低异质结势垒来降低垂直方向电阻.

经计算可知氧化孔越小, 电阻越大. 氧化层上一层为 GaAs 时的电阻比 AlGaAs 时大, 因为 GaAs 的异质结势垒比 AlGaAs 大得多. 根据(12)式, 可知对氧化孔上一层进行高掺杂、增加厚度、减小电极半径可以降低 VCSEL 的横向电阻.

综合以上理论分析, 降低 VCSEL 串联电阻的具体方法有

1) 可以通过降低 DBR 异质结势垒来降低垂直方向串联电阻, 一般采取以下几种方法<sup>[20]</sup> (a) 台阶型 DBR (b) 界面组分渐变型 DBR (c) 界面处采用等效超晶格薄层 (d) 界面  $\delta$  掺杂或调制掺杂. 理论和实验结果都表明缓变结构比线性变化结构具有更好的降低串联电阻的效果, 采取这些措施以后, 串联电阻已从 80 年代中期的数千  $\Omega$  降至 30  $\Omega$  以下.

2) 减小上电极半径  $r$ , 同时缩小出光孔径, 而不使上电极面积减小, 可降低横向电阻.

3) 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.

4) 上 DBR 采用 n-DBR 而不是 p-DBR.

5) 根据(9)–(11)式, 可增加杂质浓度来减小异质结构的电阻. 但是提高掺杂同时也会增加材料的光吸收损耗.

6) 采用双内电极结构的 VCSEL 也是减小电阻的一个有效手段. 电流没有经过很厚的 DBR 层, 而

是直接从 100 nm 的上 DBR 高掺杂层经氧化孔、有源层之后到 200 nm 厚的下 DBR 高掺杂层, 电阻将大大降低.

### 2.2.2. 氧化限制层设计

GaAs 基 VCSEL 常采用  $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$  作为氧化层. 氧化层可以在上下 DBR 都设置, 也可以只设置在上 DBR. 氧化孔会产生衍射损耗, 如果把氧化层位置放在腔内光场驻波波腹位置, 则可以降低衍射损耗和阈值<sup>[21]</sup>. 当氧化层的厚度增加时, 有效模式增益随厚度的增加而增加(氧化层厚度小于 20 nm 时增加很快)<sup>[22]</sup>, 阈值电流下降. 氧化层不宜太厚, 一般在 30 nm 左右, 这时衍射损耗较小<sup>[23]</sup>. 虽然氧化孔径变小可以降低阈值电流, 但从 2.2.1 的分析可知氧化孔径减小对于降低器件的电阻是不利的, 也不利于高频响应. 并且当孔的尺寸与光模式波长可比拟时, 反而会增加损耗, 造成模式失配, 使阈值升高. 因此氧化孔不应太小, 应比光模式波长大得多.

### 2.2.3. 封装设计

好的器件封装应该不降低激光器芯片的高频特性, 封装占了整个器件成本的 60% 以上<sup>[24]</sup>.

封装的寄生参数包括管脚产生的电感、管脚和管座之间的电容、焊盘的电感和电容、热沉的电阻、金丝的电感等, 这些寄生参数限制了封装后器件的调制带宽.

为了减少封装的寄生参数的影响, 主要采取以下三点措施<sup>[25]</sup>:

1) 尽量做到阻抗匹配, 比如可以在芯片和焊接管脚之间通过插入一小段 50  $\Omega$  的传输线过渡来降低金丝的长度, 减少阻抗不连续.

2) 采用小尺寸的封装, 这样不仅可以减少寄生参数的影响, 而且可以提高产生谐振峰和滤波效应的调制频率.

3) 使用阻尼电阻, 以减少谐振峰的 Q 值, 但这样会增加功耗.

## 3. 结 论

根据以上分析, QD 作为 VCSEL 有源材料, 模式增益较小, 对腔内损耗很敏感, 因此如何提高模式增益从而降低光损耗成为 QD VCSEL 实现的关键. 采用有源层 p 掺杂后可以大大提高 QD 模式增益和微分增益, 而且透明载流子浓度随掺杂浓度的增加也减小, 这都有利于提高 QD 频率响应特性和实现低

阈值电流. 增加 QD 层数、减小 QD 非均匀展宽  $\Delta\omega$  (由 QD 尺寸均匀性决定) 都可以提高 QD 模式增益和微分增益, 从而使其 3 dB 带宽得到提高.

阈值模式增益随着腔长增加和上下 DBR 反射率的增加而降低, 但腔长过长又将增加光子的驰豫时间, 减小光限制因子, 降低响应速率, 而腔长过短增益容易饱和从而也影响响应速率. 适当降低 DBR

或电极层掺杂浓度可大大降低反射损耗和吸收损耗. 氧化层设计也要注意在降低腔内光学损耗和减小器件电阻方面进行优化. 封装必须考虑如何减小寄生参数对其频率特性的影响. 综上所述, 我们可以选择多层堆垛 QD、 $1\lambda$  腔、有源层 p 掺杂、氧化孔径合适、氧化层厚度 30 nm 左右的双内电极结构 VCSEL.

- [ 1 ] Agethen M, Keiper D, Janssen G, Brennemann A, Velling P, van den Berg C, Bertenburg R M 2002 *Indium Phosphide and Related Materials Conference 14<sup>th</sup> IPRM* p673
- [ 2 ] Borchert B, Egorov A Y, Illek S, Komainda M, Riechert H 1999 *Electron. Lett.* **35** 2204
- [ 3 ] Ni H Q, Xu X H, Zhang W, Xu Y Q, Niu Z C, Wu R H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1474 (in Chinese) [ 倪海桥、徐晓华、张纬、徐应强、牛智川、吴荣汉 2004 物理学报 **53** 1474 ]
- [ 4 ] Pan Z, Li L H, Zhang W, Lin Y W, Wu R H 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 214
- [ 5 ] Maximov M V, Asryan L V, Shernyakov Yu M, Tsatsul'nikov A F, Kaiander I N, Nikolaev V V, Kovsh A R, Mikhrin S S, Ustinov V M, Zhukov A E, Alferov Zh I, Ledenstov N N, Bimberg D 2001 *IEEE J. Quantum Electron.* **37** 676
- [ 6 ] Kovsh A R, Maleev N A, Zhukov A E, Mikhrin S S, Vasil'ev A P, Shernyakov Yu M, Maximov M V, Livshits D A, Ustinov V M, Alferov Zh I, Ledenstov N N, Bimberg D 2002 *Electron. Lett.* **38** 1104
- [ 7 ] Ishida M, Hatori N, Akiyama T, Otsubo K, Nakata Y, Ebe H, Sugawara M, Arakawa Y 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 4145
- [ 8 ] Deppe D G, Huang H, Shechekin O B 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 1587
- [ 9 ] Ghosh S, Pradhan S, Bhattacharya P 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 3055
- [ 10 ] Tong C Z, Niu Z C, Han Q, Wu R H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3651 (in Chinese) [ 佟存柱、牛智川、韩勤、吴荣汉 2005 物理学报 **54** 3651 ]
- [ 11 ] Li H E, Iga K, 2003 *Vertical-cavity surface-emitting laser devices* (Berlin: Springer-Verlag company) p59, 56
- [ 12 ] Liu G T, Stintz A, Li H, Newell T C, Gray A L, Varangis P M, Malloy K J, Lester L F 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 1272
- [ 13 ] Kong Y C, Zhou D Y, Lan Q, Liu J L, Miao Z H, Feng S L, Niu Z C 2003 *Chin. Phys.* **12** 97
- [ 14 ] Shechekin O B, Deppe D G 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 2758
- [ 15 ] Iga K, Koyama F 2002 *Vertical surface emitting laser's foundation and application* (Beijing: Science Press) p176 (in Chinese) [ 伊贺健一、小山二三夫 2002 面发射激光器基础与应用(北京: 科学出版社)第 176 页 ]
- [ 16 ] Iga K, Koyama F 2002 *Vertical surface emitting laser's foundation and application* (Beijing: Science Press) p27 (in Chinese) [ 伊贺健一、小山二三夫 2002 面发射激光器基础与应用(北京: 科学出版社)第 27 页 ]
- [ 17 ] Carlsson C, Martinsson H, Schatz R, Halonen J, Larsson A 2002 *J. Lightwave Technology* **20** 1740
- [ 18 ] Yu L S *Semiconductor heterojunction physics* (Beijing: Science Press) p90 (in Chinese) [ 虞丽生 半导体异质结物理(北京: 科学出版社)第 90 页 ]
- [ 19 ] MacDougall M H, Geske J, Lin C K, Bond A E, Dapkus P D 1998 *IEEE Photonics Technology Letters* **10** 9
- [ 20 ] Pan Z 1995 *The development and theory analyse of GaAs, InGaAs VCSEL* p32 (Doctor degree dissertation) (in Chinese) [ 潘钟 1995 GaAs, InGaAs 垂直腔面发射激光器的研制及理论分析(博士论文)第 32 页 ]
- [ 21 ] Demenlaenaere B, Bienstman P, Baets R G 1999 *IEEE J. Quantum Electron.* **35** 358
- [ 22 ] Sarzala R P 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 629
- [ 23 ] Hegblom E R, Babic D I, Thibeault B J 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 1757
- [ 24 ] Fokken G J, Walters W L, Mattson L F, Gilbert B K 2000 *IEEE Transactions on Advanced Packaging* **23** 42
- [ 25 ] Hall S H, Walters W L, Mattson L F, Fokken G J, Gilbert B K 1997 *IEEE Transactions on components, Packaging, and Manufacturing Technology B* **20** 191

# Modulation response analysis of 1.3 $\mu\text{m}$ quantum dot vertical-cavity surface-emitting lasers<sup>\*</sup>

Peng Hong-Ling Han Qin Yang Xiao-Hong Niu Zhi-Chuan

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

(Received 15 May 2006; revised manuscript received 9 August 2006)

## Abstract

Some important parameters, such as gain, 3 dB bandwidth and threshold current of 1.3  $\mu\text{m}$  quantum dot vertical-cavity surface-emitting laser (QD VCSEL) are theoretically investigated. Some methods are developed to improve the VCSEL's modulation response. Significant improvement are predicted for p-type modulation doping. In connection with the threshold characteristic, we found that a structure with short cavity, multilayer quantum dots stack, p-type modulation doping and double intracavity contact on an un-doped DBR is much better suited to high speed quantum dot VCSELs. The parasitic effects of the VCSEL are analyzed and the influence of packaging of the VCSEL on its modulation responds is analyzed.

**Keywords** : quantum dots, vertical-cavity surface-emitting laser, differential gain, 3 dB bandwidth

**PACC** : 4255P, 7320D

---

<sup>\*</sup> Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. TG2000036603), Key Program of National Nature Science Foundation of China (Grant No. 60137020) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2002AA312080).