

图形分析法求半导体激光器端面减反膜的有效反射率

李大义 陈建国 周小红 卢玉村
(四川大学光电系, 成都, 610064)

摘要: 采用图解的方法, 对镀制在半导体激光二极管(LD)端面的单层减反射膜的实际效果进行了分析。研究表明: 在减反膜的反射率曲线的谱线宽度有限的情况之下, LD 镀膜面上的有效反射率 R_{eff} 一般均高于反射率曲线的最小值 R_{min} ; 对 LD 来说, 存在着一个最佳波长 λ_{opt} , 当反射率曲线的最小值所处的波长 λ_f 与之相等时, R_{eff} 最接近 R_{min} 。

关键词: 图形分析 半导体激光器 减反膜 有效反射率

Extracting effective reflectivity at AR coated diode facets using graphical analysis method

Li Dayi, Chen Jianguo, Zhou Xiaohong, Lu Yucun
(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: In terms of graphical analysis method, the effective reflectivity of antireflection film deposited on the facet of semiconductor laser diode has been studied. The results show, if the spectral width of reflective curve of the antireflective film is finite, the reflectivity is generally greater than the minimum of reflectivity curve. It is possible to minimize the effective reflectivity through carefully choosing the wavelength at which the reflectivity curve reaches its minimum.

Key words: graphical analysis semiconductor laser antireflection coating effective reflectivity

引 言

减反射膜被广泛地用于半导体激光器的端面, 以适应外腔式半导体激光器、准行波半导体激光放大器、超发光二极管等的需要。前人的研究表明, 当 LD 端面的反射率被降到很低的时候, 反射率对波长的依赖关系将变得不可忽略, 反射率曲线的低反射区的谱线宽度不能被当作是无穷大^[1, 2]。尽管人们认识到了这一事实, 但在多数有关镀减反射膜后的半导体激光器件的研究中, 反射率对波长的依赖关系往往被忽略。同时, 在许多文献中, 干脆就把反射率曲线的最小值 R_{min} 当作是镀膜端面的实际反射率。面对这种状况, 显然有必要在考虑反射率对波长的依赖关系的情况下, 对镀制了减反射膜的 LD 端面反射率作进一步的研究。

由于镀制相对方便且易于实现折射率匹配, SiO_x 单层膜被广泛地用来降低 LD 端面的反射率^[3, 4], 其反射率曲线也可以通过比较相同偏置电流下镀膜前和镀膜后同一 LD 输出谱来得到^[2]。实践表明, 与介质的增益线宽相比, 该反射率曲线的谱线宽度显然是不能被当作无穷大的。研究表明, 在 LD 一端镀减反射膜之后, LD 中可以建立起的载流子数密度的上限 N_{up} 将比未镀膜时 LD 的阈值载流子数密度 N_V 有明显地提高, 相应于上述载流子数密度的变化, 增益峰值波长也会发生变化^[5]。显然, 图形分析法只要求知道增益峰值波长随载流子密度变化的规律而不在乎是什么样的规律, 为简便计, 在本文中我们采用了下述近似公式^[5]:

$$\lambda_g(N) - \lambda_g(N_{\text{ref}}) = b(N - N_{\text{ref}}) \quad (1)$$

式中, $\lambda_g(N)$ 和 $\lambda_g(N_{ref})$ 分别是当 LD 腔内载流子数密度为 N 和某个参考载流子数密度 N_{ref} 时的增益峰值波长, b 是一个小于零的常数。与增益峰值波长的变化范围相比, 反射率曲线的谱线宽度也不见得可以看作是无穷大。于是, 在具体的镀膜 LD 中, 实际起作用的反射率可能会比 R_{min} 大。在本文中, 我们将对广泛使用的一端镀单层减反膜的半导体激光二极管 (ARLD) 进行研究, 考查镀膜端面实际起作用的有效反射率 R_{eff} , 以及在什么情况下 R_{eff} 能够尽可能地接近反射率曲线的最小值 R_{min} , 即尽可能的发挥减反膜的功效。

从大多数的文献报道来看, 目前似乎还很难找到一个简单而普适的解析式来描述 LD 端面单层减反膜的反射率曲线。从我们以往的实验来看, 减反膜的效果也有一定的随机性。因而, 事实上我们研究的出发点将是一个不一定能找到解析表达式的反射率曲线, 虽然, 该曲线可以通过比较相同偏置电流下镀膜前和镀膜后同一 LD 输出谱来得到^[2]。针对这种情况, 我们采用了一种图形分析的方法来研究 ARLD。这是一种既不同于计算机数值求解 (虽然其结果常以曲线的形式给出), 也不同于常规的解析求解的办法, 但在现在这种情况下却是行之有效的办法。对于给定的反射率曲线, 借助图形分析, 我们求得了 LD 端面的实际起作用的有效反射率, 了解了如何选择反射率曲线最低反射所处的波长才能使有效反射尽可能的低。

一、一般分析

考虑到减反射膜的反射率(曲线) $R(\lambda)$ 多半是在对数坐标中给出的, 因而在形式上我们总可以把这个大于零的数写成

$$R(\lambda) = R_{min} \exp[F(\Lambda)] \quad (2a)$$

式中,

$$\Lambda = \lambda - \lambda_0 \quad (2b)$$

在上边的式子中, λ_0 就是反射率曲线上最小值 R_{min} 所处的波长 (在本文中称为最小波长), F 就是用来描述 R 对波长 λ 的依赖关系的函数。对具体的减反膜, 我们不一定能找到 F 的解析表达式, 至少在使用图形分析的方法时我们并不需要知道 F 的解析表达式。研究表明^[1,2], 在我们关心的波长范围内: (1) 反射率曲线只有一个极小值。在数学上意味着: 在 $\Lambda = 0$ 时, F 应等于零。(2) 当 Λ 的绝对值足够大时, $R(\lambda)$ 随波长的变化将变得非常缓慢, 因而可以近似地认为在 Λ 为无穷大时, F 趋于某个常数, 亦即 R 趋于 R_i 。顺便提一句, 如果在正负无穷远处 R 的值不同的话, R_i 取其中较大的那一个。

根据自再生条件可以证明, 要想使 ARLD 在波长 λ 处满足增益等于损耗, 所需的载流子数密度 N 就应该满足

$$N(\lambda) / \{1 + [\lambda - \lambda_g(N)]^2\} = N_T - F(\Lambda) / (2a\Gamma L) \quad (3)$$

式中, $\lambda_g(N)$ 是当 LD 中载流子数密度等于 N 时的增益峰值波长, a 是微分增益系数, Γ 是限制因子, L 是 LD 的腔长, 且 $N_T = N_0 + [2\gamma L - \ln(R_{min}R_0)] / (2a\Gamma L)$

$$\quad (4)$$

式中, N_0 为透明载流子密度, γ 为损耗系数, R_0 是 LD 未镀膜端面的反射率。

参量 N_T 表示出了要克服端面反射率分别为 R_{min} 和 R_0 的 ARLD 的各种损耗所需的载流子密度 (如果该 ARLD 能振荡的话, 就是阈值)。从 (3) 式可以看到, LD 的增益线型已用洛伦兹函数来描述; 同时, 为了计算方便, 波长已经被归一化到表征增益线宽的因子 Q (在洛伦兹函数的情况下, 线宽等于 $2Q$)。类似地, 我们还可以定义另外两个有用的参量 N_U 和 N_V , 它们分别是把 (4) 式中的 R_{min} 用 R_i 和 R_0 来代替而得到的。显然, N_V 就是镀膜之前 LD 的阈值载流子数密度。

一般而言, 半导体激光器表现为均匀加宽, 因而并非凡是能满足 (3) 式的 N 就能存在于

相切的曲线(如图1中的虚线所示)。假设该洛伦兹曲线的顶点为 W (其对应坐标为 N_W 和 λ_W)，它与反射率曲线之间的切点为 X (该处的波长为 λ_X)。于是，我们就用图解法求得了ARLD的载流子数密度上限 $N_{up}(=N_W)$ ，如果这个ARLD能振荡的话，其振荡波长 λ_{th} 应等于 λ_X (它与增益峰值波长 λ_W 不一定相同)。为了定量描述ARLD端面减反膜的实际效果，我们根据在ARLD内实际上可以建立的最大载流子数密度 N_{up} 按下式引入了一个有效反射率 R_{eff}

$$R_{eff} R_0 \exp\{2L[a\Gamma(N_{up} - N_0) - \gamma]\} = 1 \quad (6)$$

上式表明，虽然减反射膜的最小反射率 R_{min} 可以很小，但在具体的ARLD上，其效果与反射率为 R_{eff} 的宽谱线减反射膜差不多。由于 N_{up} 通常是小于 N_T 的，因而有效反射通常是大于反射率曲线上的最小值 R_{min} 的。由图形分析，可求得在图1中所使用的ARLD的 R_{eff} 约等于 3×10^{-3} ， N_{up} 略小于 $2.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ，振荡波长比 λ_0 短 0.4 (对应 12.1nm)。而上述的几个参量的实验值分别为 $2.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ， 2.9×10^{-3} 和 0.44 (对应 13.2nm)。看来，图形分析的预计与实验测得的结果基本上是一致的。

在单层减反膜的镀膜过程中，要精确控制 λ_0 并不容易，即使采用主动监控的办法也不见得十分理想^[3]。这将使得在实际的ARLD中，参量 Δ_T 或 $(\lambda_T - \lambda_0)$ 有一些不确定。在应用图形分析的时候，这种不确定性将表现为图1中的反射率曲线与线段 TUV 之间有一个相对移动。从图1可以看到：(1) 当 Δ_T 等于很大的负数时，反射率曲线负半支的尾部将与 TV 相交。可以证明，过交点的增益曲线在交点波长处是满足增益等于损耗的。换句话说，ARLD的载流子数密度上限不能大于交点所对应的载流子数密度的。可见，如果最小波长控制不好，ARLD的有效反射率接近 R_i 。在 Δ_T 趋于正无穷大时，情况亦类似。(2) 在 Δ_T 处于某个范围内时，曲线 TV 可能低于反射率曲线的正半支而与负半支相交(设交点为 W_1)。可以证明，在交点对应的波长处，以交点为顶点的增益等于损耗。同时根据图形的特点还可看到，以交点为顶点的洛伦兹线还会与反射率曲线负半支的尾部相交。总之，在这两个交点所在的波长处，满足增益等于损耗所需的载流子数密度是相同的。在这种情况下，我们可以在 W_1V 之间靠近 W_1 的地方选择另外一个点 W_2 。如果以 W_2 为顶点的增益曲线与反射率曲线还有两个交点的话，可以重复上边的过程，直到找到点 W 。以 W 为顶点的增益曲线与反射率曲线相切于 X 。于是 W 所代表的载流子数密度和波长就是 N_{up} 和峰值增益波长；如果该ARLD能振荡的话，切点代表的波长就是它的振荡波长。此时就可能会出现ARLD的振荡波长与峰值波长不等的现象。(3) 在 Δ_T 由小变到大的过程中，当变到某个最佳波长(本文中记为 λ_{opt}) 处，载流子数密度上限将达到某个最大值 N_{opt} 。此时，ARLD端面的有效反射率 R_{eff} 将达最佳值 R_{opt} 。在镀制减反射膜的时候，应该让 $(\lambda_T - \lambda_0)$ 等于 λ_{opt} ，这样才能使减反膜发挥最大的功效。在采用主动监控法^[8] 镀制减反膜时，可选择合适的偏置电流，使LD在该电流下的载流子数密度大致等于 N_{opt} ，从而镀制出来的减反膜具有较低的有效反射率。

在图2中，我们画出了由图解法求得的有效反射率和 $(\lambda_{th} - \lambda_0)$ 随 $(\lambda_T - \lambda_0)$ 或 Δ_T 变化的

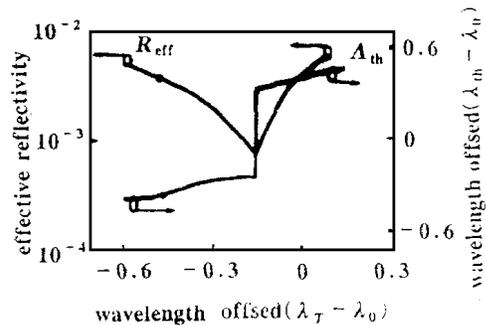


Fig. 2 Graphical analysis predicted dependences of R_{eff} and λ_{th} on $(\lambda_T - \lambda_0)$ or Δ_T

高光束质量磷酸盐钕玻璃板条多程放大系统的研究*

吕百达 邵怀宗 冯国英 罗时荣 蔡邦维
(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 建立了磷酸盐钕玻璃布儒斯特角板条激光振荡-多程放大系统, 其中, 提出了用两棱镜折返光路的新型三程放大器, 用 Cr^{4+} : YAG 色心晶体作为被动 Q 开关。实验得到高光束质量($M_x^2 = 1.49$ 和 $M_y^2 = 1.57$) 和能量增益为 23 的激光脉冲输出。实验数据与数值计算结果比较, 符合得较好。

关键词: 磷酸盐钕玻璃板条 多程放大器 光束质量

Study of phosphate Nd glass slab multipass amplifier system with high beam quality

L Baida, Shao Huaizong, Feng Guoying, Luo Shirong, Cai Bangwei
(Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: A phosphate Nd glass Brewster angled slab oscillator and multipass amplifier system has been built up, where a novel three-pass amplifier with two prisms has been proposed and a Cr^{4+} : YAG colour center crystal has been used as the passive Q-switcher. In our experiment the output with high beam quality of $M_x^2 = 1.49$ and $M_y^2 = 1.57$ and with an energy gain of 23 has been achieved. The experimental data have been compared with the numerical calculation results, showing a good consistency.

Key words: phosphate Nd glass slab multipass amplifier beam quality

* 国家高技术惯性约束聚变主题资助。

关系曲线。除了 λ_0 与 λ_l 的相对关系在不断变化之外, 求解时使用的反射率曲线与图 1 相同。图中两个实心圆点是实验测得的数据。从图中可以看到最佳波长 λ_{opt} 的存在。

我们曾假想反射率曲线可以用不太复杂的解析函数来描述, 然后用计算机进行计算; 同时, 在计算中也曾使用过好几种函数。计算结果表明, 图形分析对 ARLD 的主要特征所作的预测, 在用假象曲线进行的计算中都得到了反映。

参 考 文 献

- 1 Eisenstein G, Raybon G, Stulz L. W. IEEE Lightwave Technol, 1988; 6(1): 12~ 15
- 2 Luo B, Wu L, Chen J et al. IEEE Photonics Technol Lett, 1993; 5(11): 1279~ 1281
- 3 Olsson N A, Oberg M G, Tzang L D et al. Electron Lett, 1988; 24(9): 569~ 570
- 4 Saitoh T, Mukai T, Mikami O. IEEE Lightwave Technol, 1985; 3(2): 288~ 293
- 5 Wang J, Chen J, Hao Y et al. IEEE Photonics Technol Lett, 1993; 5(10): 1171~ 1173
- 6 Vassalo C. Electron Lett, 1988; 24(1): 61~ 62
- 7 Dutta N K, Deimel P P. IEEE Quantum Electron, 1983; 19(4): 496~ 498

* * *

作者简介: 李大义, 男, 1940 年 6 月出生。副教授。现从事光纤通信及非线性光学方面的科研和教学工作。

收稿日期: 1997-10-30 收到修改稿日期: 1998-01-18