实现外腔半导体激光器连续调谐的两个基本要求

周小红 李大义 陈建国 卢玉村
(四川大学光电系, 成都, 610064)

摘要: 定量讨论了实现外腔式半导体激光器连续调谐的两个基本要求: 同时改变外腔长度及光栅反射波长, 半导体激光器(LD) 端面镀减反膜。分析表明: 前人给出外腔的可调整范围并非是实现最大调谐范围的必要条件, 而是实现调谐连续性的一种可行选择。针对具体的减反射膜, 对在 ECLD 上可能实现的连续调谐范围进行了研究。

关键词: 外腔半导体激光器 调谐

Two fundamental requirements for realization of continuously tuning external cavity semiconductor lasers

Zhou Xiaohong, Li Dayi, Chen Jianguo, Lu Yucun
(Dept. of Opto-Elect. Science & Technology, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: Two fundamental requirements on the simultaneous adjustments of the grating reflection wavelength and cavity length, antireflection coating stacked on the rear facet of the semiconductor laser (LD) have been discussed quantitatively in order to realize a continuous tuning in an external semiconductor lasers. Studies indicate that the reported adjustable range of the cavity length is not a precondition for achieving the maximum tuning range, but rather a condition for practically achieving a continuous tuning. For certain antireflection coating stacked on the rear facet of the diode, the achievable continuous tuning range has been investigated.

Key words: external cavity semiconductor laser wavelength tuning

15ns 的 Q 开关 Nd: YAG 激光照射猴眼, 阈值为 68±12μJ。Taboada[5] 等用脉宽 5ps~ 9ps 钕玻璃锁模激光单脉冲照射猴眼, 阈值 ED_{50}= 3.5μJ。

徐碣敏研究员和魏光辉教授始终参加、指导了该实验工作, 在此表示致谢。

参 考 文 献

1 赵国衡. 耦合腔注入锁模-理论和实验研究(申请工学博士学位论文), 北京: 北京理工大学 1991. 4
2 徐碣敏, 胡富根, 曹维群. 军事医学科学院院刊, 1985; 3: 315
3 史宏敏. 激光医学基础. 广州: 华南理工大学出版社, 1990: 80, 117
4 Ham W J, Mueller H A, Goldman A I *et al*. Science, 1974; 185: 362
5 Taboada J, Ebbers R W. Appl Opt, 1978; 17: 2871

* * *

作者简介: 陈宗礼, 男, 1938 年出生。高级工程师。长期从事激光器件、激光测量及防护方面的工作。

收稿日期: 1996-06-24 收到修改稿日期: 1997-03-25

一、引　　言

外腔式半导体激光器(ECLD)是产生可调谐窄线宽输出的重要光源。为了实现连续调谐,人们对 ECLD 进行了大量的理论和实验研究。目前,人们已经认识到外腔长度与波长选择元件(如光栅等)同时调节的必要性以及半导体激光器(LD)端面镀减反射膜的必要性[1,2]。在研究中,前人总结出下面的经验公式[2]

$$\delta\lambda/\lambda_0 = \delta L/L_0 \tag{1}$$

式中,L_0 是 ECLD 在波长 λ_0 振荡时外腔的长度,$\delta\lambda$ 是调谐后的波长对 λ_0 的偏差,要在调整后的波长实现振荡,外腔长度相应的调整量是 δL。然而在实验中,我们可以观察到,实现 ECLD 的最大调谐范围所要求的 δL 远比(1)式给出的值小。

在本文中,我们将定量地讨论外腔长度与光栅反射波长同时调节的必要性和 LD 面对光栅的那个端面(下称后端面)镀减反射膜的必要性。针对第一个必要性,给出了在不同波长振荡时所需外腔长度的解析表达式,通过对解的分析进一步指出:前人对腔长需调整的范围的估计,即(1)式,只不过是外腔长度多种选择中的一种,因而这种估计可能在物理上引起一些混淆。针对第二个必要性,我们从在 LD 的反共振波长实现 ECLD 振荡的考虑出发(因为此时振荡阈值取极大值),给出了所需后端面反射率的表达式,并且针对实际的减反射膜对在 ECLD 上可能实现的连续调谐范围进行了讨论。

二、理　论　分　析

为方便讨论,假设 ECLD 由一个 LD 和一个(空)外腔构成,LD 在右边,它的后端面靠近光栅,前端面为 ECLD 的输出端;外腔在左边,它被限定在光栅和 LD 的后端面之间。采用通常的作法,外腔中光学元件(如准直用的显微物镜等)的损耗均用光栅的反射率来描述[3]。无论用等效腔法[3]还是用射线法[4]均可导出 ECLD 的阈值参量满足

$$0 = 1 - rr_1\exp(-i\varphi) - rr_2F\exp(-i\eta) + r_1r_2F\exp[-i(\varphi+\eta)] \tag{2}$$

式中,r_1, r 和 r_2 分别为光栅,LD 后端面和前端面反射系数的绝对值,它们相应的反射率则为 R_1, R 和 R_2,并且

$$\varphi = 4\pi L/\lambda \tag{3a}$$

$$\eta = 4\pi nl/\lambda \tag{3b}$$

$$F = \exp[(\Gamma g - \gamma)l] \tag{3c}$$

在(3a~3c)式中,L 和 l 分别为外腔和 LD 的长度,n 为 LD 的有效折射率,Γ 为限制因子,γ 为损耗系数,λ 为振荡波长,增益系数 g 可表示为

$$g = a(N/H - N_0) \tag{4}$$

式中,a 是微分增益,N 为阈值载流子数密度,N_0 为透明载流子数密度,且

$$H = 1 + (\lambda - \lambda_g)^2/Q^2 \tag{5}$$

在(5)式中,λ_g 和 $2Q$ 分别表示增益峰值波长和线宽(FWHM)。

从(2)式可以看出,ECLD 要实现振荡,需同时满足增益和位相两个条件,换句话说,要实现连续调谐,外腔长度应该可调。在简化的理论处理中,光栅反射系数 r_1 可以用 delta 函数来近似,即只在光栅选定的波长 λ_f 处不为零。利用(2)式可以求得当 ECLD 在波长 λ 振荡时,参量 F 满足

$$F(\lambda) = \{[R(1-R_1)^2\cos^2\eta + (R_1 - R)(1-RR_1)]^{1/2} - r(1-R_1)\cos\eta\}/[r_2(R_1-R)] \tag{6}$$

于是,由(3c)和(4)式可知,阈值载流子密度满足

$$N(\lambda) = H(\lambda)\{N_0 + [r + \ln F(\lambda)/l](a\Gamma)\} \tag{7}$$

结合(6)和(7)两式,我们就得到了当 ECLD 被调在选定波长振荡所需的阈值载流子数密度。显然,N 随波长而周期变化,其周期等于 LD 模式间距 $\Delta\lambda_{ld}$。从(6)式也可以看出,起重要作用的是振荡波长与其相邻 LD 模式的波长差 ε,即$(\lambda - \lambda_m)$。此处 λ_m 是 LD 第 m 个模式的波长。(7)式是我们导出的 ECLD 在任意波长振荡的阈值载流子数密度显函数形式的解析解。到目前为止,文献中仅报导了隐函数形式的解析解,只是当 ECLD 在 LD 的共振和反共振波长振荡的特殊情况下得到了显函数形式的解析解[3]。可以用几种办法求得当 ECLD 被调在选定波长振荡时所需的外腔长度,例如,由(2)式虚部和实部导出两个式子,再把 cosφ 用 η 的正余弦和 F 的函数来表示,从而求得外腔长度。在这里,我们采用另外一种方法,利用阈值时(2)式绝对值为零,把它写成如下形式

$$0 = K\{1 + \cos[\varphi + \psi(\lambda)]\} \tag{8}$$

式中,

$$\psi(\lambda) = \arccos(Y_1/Y_2) \tag{9a}$$

$$Y_1 = r_2F(1+R)\cos\eta - r(1+R_2F^2) \tag{9b}$$

$$Y_2 = \{[r_2F(1+R)\cos\eta - r(1+R_2F^2)]^2 + R_2[F(1-R)\sin\eta]^2\}^{1/2} \tag{9c}$$

(8)式中常数 K 与下边的讨论无关,这里就不再给出其表达式。为了使(8)式成立,应该有

$$\cos[\varphi + \psi(\lambda)] = -1 \tag{10}$$

结合(6)式与(9)式,我们可由(10)式求得 ECLD 在选定波长振荡所需的外腔长度。

三、计算与讨论

从(10)式可以看到,外腔长度 L 有多种选择,在实践中,我们可以根据某种原则来进行选择。比方说,可附加如下两个原则中的一个来选择外腔长度,第一个原则可称为固定(ECLD 模)原则,第二个原则可称为就近(选择模式)原则。所谓固定原则是指某个固定的 ECLD 模式振荡;所谓就近原则是指微调外腔长度使得最靠近光栅反射波长 λ_f 的 ECLD 模式在调整后其波长变为 λ_f。对于两电极或三电极式的可调谐半导体激光器而言,上述两个原则的差别并不显著,因为 ECLD 模式间距 $\Delta\lambda_{f_1}$ 与 LD 的模式间距 $\Delta\lambda_{ld}$多半是可比拟的。但对于外腔长度远大于 LD 腔长的 ECLD,上述两种方式的差别就很大了。

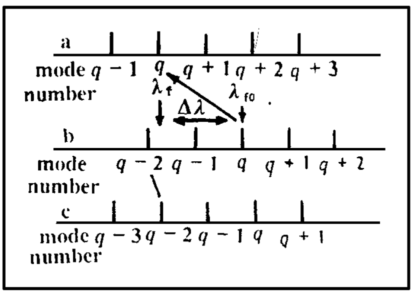

Fig. 1　The mode of ECLD under (a) fixed mode principle, (b) external cavity length being L_0, (c) minimized change principle

在图 1 中,给出了这两种方式的简要说明。假设在开始(图 1b)的时候,光栅反射波长为 λ_{f_0}(如图中虚线所示),ECLD 在某个腔模 q 振荡,当光栅反射波长改变到 λ_f 后,为使 ECLD 能在新的波长振荡,外腔长度将改变 δL。在固定模式原则下(图 1a),腔长的改变使得 λ_{f_0}原来所对应的腔模 q 被调来与 λ_f 重合。因此,波长的增大与腔长的增大是同步的。这就要求外腔长度可调整的范围($\delta L/L$)与

所需波长调谐范围($\delta\lambda/\lambda$) 一致。由于这种同步性使得在实践上实现 ECLD 连续调谐变得可行, 不过, 由于机械上的原因又使得最大可调谐范围受到限制。在就近原则下(图 1c) , 腔长改变量不需超过半个波长就可以使原来最靠近 λ_f 的 ECLD 腔模 $q-2$ 被调来与 λ_f 重合。可见, 在就近原则下, 外腔长度的改变始终不超过半个波长, 但是, 这种改变一会儿是正, 一会儿是负, 在实践中很难采用。在 ECLD 振荡波长扫过一个 LD 模式间距的过程中, 外腔长度将来回变化约 $L/(nl)$ 次。

假设在开始时, ECLD 的振荡波长为 λ_0, 外腔长度为 L_0, 假设 λ_0 是 LD 的某个反共振波长, 即

$$nl = m\lambda_0/2 \tag{11a}$$

式中, m 为整数, 此时, 由(10) 式应有

$$L_0 = (2q_0 + 1)\lambda_0/4 \tag{11b}$$

式中, q_0 为一个大整数。注意, 由于光栅反射引入了一个 π 相移, 因而光线在 ECLD 全腔往返一周的总相移是 π 的偶数倍。调整光栅反射波长, 要使 ECLD 在 λ 处振荡, 外腔长度也相对于 L_0 增加 δL, 结合(10) 式和(11) 式可以导出

$$\delta L = \lambda_0[k + \delta\lambda/\Delta\lambda_{at} - \phi(\lambda)/(2\pi)]/2 \tag{12}$$

式中, k 为整数, $\Delta\lambda_{at}$ 为外腔模式间距, $\delta\lambda$ 为波长改变值。虽然, $\delta\lambda$ 可能会远大于外腔的模式间距, 但我们可以选择合适的 k 值, 使得 δL 不大于 $\lambda_0/2$。这就是就近原则下外腔长度变化的表达式。

直接采用(10) 式, 可以证明在固定模式原则下有

$$\delta L/L_0 = \delta\lambda/\lambda_0 - \phi(\lambda)/[(2q_0 + 1)\pi] \tag{13}$$

在实践上, q_0 是个很大的数, 因而可以认为波长的相对变化与外腔长度的相对变化成正比, 这样, 我们从数学上导出了实现连续调谐所需外腔长度的表达式。在图 2 中, 画出了 δL 随 $\delta\lambda$ 变化的关系曲线。其中, 图 2a 是固定模式原则下的计算结果, 图 2b 是就近原则下的计算结果。计算中使用的参数为: $\lambda_0 = 1300$nm, $L_0 = 100 \times nl + \lambda_0/4$nm, $n = 4.16$, $R = 0.01$, $R_1 = 0.1$, $R_2 = 0.31$, $l = 0.02$cm, $a = 2.5 \times 10^{-16}$cm^2, $Q = 40$nm, $\gamma = 30$cm^{-1}, $\Gamma = 0.3$。

从图 2a 中我们可以看到: 在固定模式原则下, $\delta\lambda$ 与 δL 成正比, 因此当波长变化 $\Delta\lambda_d$ 时, 外腔长度的变化 δL 较大, 达到了六十多个微米。从图 2b 中可以看到: 利用就近原则, 外腔长度的变化时正时负, 因而在实际的系统中很难应用。但它说明了一点: 即使外腔长度可以调整的范围很小, 大范围调谐依然是可能的, 文献[2] 认定 $\delta\lambda/\lambda$ 必须等于 $\delta L/L$ 的观点是不妥的。事实上, 我们在实验上也观察到, 有些外腔长度几乎不可调, 但由于机械上存在着某些可调整性, 大范围调谐依然可以实现。

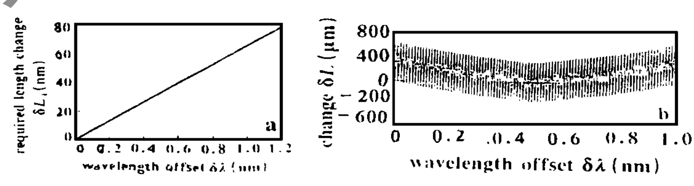

Fig. 2　Required external cavity length change δL versus the wavelength offset $\delta\lambda$ for (a) fixed mode principle, (b) minimized change principle, respeetivity

上边我们仅就 ECLD 的外腔长度进行了讨论, 事实上, 为了实现连续调谐, 还得考虑其它因素。比方说, LD 的后端面反射率 R。从(6) 式可以看到, 当 ECLD 在 LD 的反共振波长振荡时, 阈值载流子数密度取极大值。同时, 由于 R 不可能为零, 因而 ECLD 还可能 LD 单管振

荡，这使得 LD 腔内载流子密度不能超过某个上限 N_{max}。如果要使 ECLD 在某一波长范围内实现连续调谐，那么它就必须能在该范围内所有 LD 的反共振波长处振荡，即在整个调谐范围内，N 不大于N_{max}。由(6)式知，要在 LD 的反共振波长振荡，所需的 F 参量为

$$F_{max} = (1 - rr_1)/[r_2(r_1 - r)] \tag{14a}$$

当 LD 单管振荡时，腔内载流子密度 N_{in}使得其 F 参量满足

$$F_{in} = 1/(rr_2) \tag{14b}$$

并且此时振荡波长近似等于增益峰值波长 λ_g，要使 ECLD 可能在 LD 的反共振波长处振荡，LD 后端面反射系数 r 应小于某个临界值 r_{ct}，其表达式为

$$r_{ct} = 1/r_1 - (1/R_1 - 1)^{1/2} \tag{15}$$

另外一个限制外腔振荡的因素是振荡波长对增益峰值波长的偏离，因为阈值载流子密度 $N(\lambda)$随偏离增大而增大，对于给定(小于 r_{ct})的 r，可以证明 ECLD 能够在 LD 反共振波长振荡的最大波长范围 δ_{at}为 $\delta_{at} = 2Q\{\ln(F_{in}/F_{max})/[(\gamma + a\Gamma N_0)l + \ln F_{max}]\}^{1/2}$　　(16)

由于一般的减反射膜的反射率均与波长有关[5]，而且也很难得到一个普适的公式，根据该文献的具体情况，反射率与波长的关系大致可写作

$$\lg R(\lambda) = -3.7 + 0.05|\lambda - \lambda_{ar}| \tag{17}$$

式中，λ_{ar}为减反射膜最小反射率处的波长，波长的单位为 nm。假设 $\lambda_g = \lambda_{ar} = \lambda_0$，在图 3 中我们画出了 ECLD的可能连续调谐范围，计算时参数 R 由(17)式得到，其它参数与图 2 中采用的相同。由该图可以看到光栅的等效反射率 R_1 越大，可能实现的连续调谐范围越宽。此外，我们还想说明一下，如果增益峰与减反射膜最小反射波长不重合的话，连续调谐范围将会有所减小。此外，在上边的计算中，我们略去了增益峰值波长随载流子密度的变化，如果把这个因素也考虑进去的话[6]，所得结论不会发生实质性的变化，但计算将变得更为复杂。

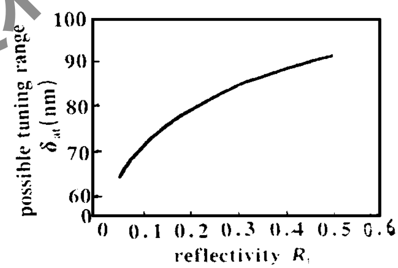

Fig. 3　Dependence of the possible continuous tuning range δ_{at} of ECLD on reflectivity R_1

参　考　文　献

1　Trutna W R, Stokes L F. Lightwave Technol, 1993; 11(8): 1279～1286
2　Murata S, Mito I. Opt & Quant Electron, 1990; 22(1): 1～15
3　Kakiuchida H, Ohtsubo J. Quant Electron, 1994; 30(9): 2087～2097
4　Wu Z, Xia G, Chen J *et al*. Opt Lett, 1995; 20(5): 477～479
5　Luo B, Wu L, Chen J *et al*. Photon Technol Lett, 1993; 5(11): 1279～1281
6　Wang J, Chen J, Hao Y *et al*. Photon Technol Lett, 1993; 5(10): 1171～1173

*　　　　*　　　　*

作者简介：周小红(附照片)，女，1966 年 4 月出生。讲师。现从事传感技术及半导体激光器方面的教学和研究工作。

李大义，男，1940 年 6 月出生。副教授。现从事半导体激光器及光纤通信的研究工作。

陈建国，男，1945 年 8 月出生。教授。现从事半导体激光器及光纤通信的研究工作。

卢玉村，男，1936 年 8 月出生。教授。现从事薄膜物理与技术及半导体激光器的研究工作。

收稿日期：1996-04-29　　收到修改稿日期：1996-10-05