第15卷 第1期 光 学 学 报 Vol. 15, No. 1
1995年1月 ACTA OPTICA SINICA January, 1995

镀减反射膜后半导体激光器端面反射率谱的测量

卢玉村 陈建国 罗 斌** 武 岚
(四川大学光电科学技术系，成都 610064)

摘 要 比较相同偏置条件下镀减反射膜前后的半导体激光器端面自发辐射谱，测得了端面反射率随波长变化的关系曲线。该方法突破了 Kaminow 法单一波长测量的限制，同时也避免了 Kaminow 法在两端面镀膜后所遇到的调制度过小的问题。实验中确定出了低于 8×10^{-5} 的第二镀膜端面反射率。

关键词 半导体激光器， 减反射膜， 端面自发辐射谱。

1 引 言

目前，在光通信领域中极受重视的行波式半导体激光放大器主要是在半导体激光器(LD)两端面镀制减反射膜而获得[1]。因端面反射率直接影响行波式半导体激光放大器的主要特性[2]，故而对放大器端面反射率的测量就显得十分重要了。由于半导体激光器有效端面积很小，常规测量反射率的方法难以应用。Kaminow 等人首先报道了一种方法[3]。然而，该法有其局限性：1) 只能确定镀前阈值偏置下，增益峰值波长处的端面反射率；2) 在两端面镀减反射膜以后，自发辐射谱上调制度过小，测量可靠性降低。实际上，因器件的工作电流远大于镀前阈值电流，此时的增益峰值波长已向短波长方向移动了很多。因此，更有意义的是测量端面反射率随波长变化的关系曲线。针对 Kaminow 法存在的问题，Eisenstein 等人采用了外加窄带可调谐光源的方法[4]，它可测出调谐波长范围内任意波长处的端面反射率。然而该法必须假设从半导体激光器到光纤的耦合损耗(可测量)与从光纤到半导体激光器的耦合损耗(不可直接测量)相等。考虑衍射时，这一假设无法证明。此外，外光源的引入，使得设备复杂、系统调节不便，这些因素都直接影响了测量结果的准确性。

本文提出了比较法测量端面反射率。基本原理是：在相同偏置条件下，测出半导体激光器镀减反射膜前后的端面自发辐射谱，分别计算两张谱图上同一波长处的调制度，由后面的理论分析可知，调制度是关于端面反射率的函数，镀减反射膜前后的端面反射率之比可以从

* 四川省科委基金和国家教委留学人员基金资助项目。

** 罗斌，西南交通大学。

收稿日期：1993年11月26日；收到修改稿日期：1994年1月24日

两张谱图上的调制度间接计算出来。

2 理论分析

对腔长为 L、两端面反射率分别为 R_1 和 R_2 的半导体激光器，考虑到半导体激光器 由自发发光中心造成的自发辐射谱与从半导体激光器端面探测到的光谱有所区别以后，可以得到 R_2 端面发射功率谱的波峰与波谷处的功率 P_p 与 P_v 分别为[5]：

$$P_p = A(1-R_2)(Q-1)(\sqrt{R_1}Q+1)/[g(1-\sqrt{R_1R_2}Q)^2],$$
$$P_v = A(1-R_2)(Q-1)(\sqrt{R_1}Q+1)/[g(1+\sqrt{R_1R_2}Q)^2]. \tag{1}$$

将式中的 R_1 和 R_2 互换即可得到对应于端面 R_1 的情况。其中，g、Q 满足：

$$g = a\Gamma\{N[1-(\lambda-\lambda_g)^2/B^2]-N_0\}-\alpha。\qquad Q=\exp(gL)。 \tag{2}$$

各式中，A 为与腔内自发发光中心产生的自发辐射谱有关的参量，g 为有效增益系数，Γ 为限制因子，N、N_0 分别为注入、透明载流子密度，λ 为波长，λ_g 为增益峰值波长，$2B$ 为增益线宽，a 为一常数，α 为分布损耗系数。

定义自发辐射谱模式调制度：

$$M=(P_p-P_v)/(P_p+P_v), \tag{3}$$

式中 P_p 和 P_v 限定为谱图上相邻波峰和波谷处的功率。考虑到它们之间的波长差别远小于增益线宽和腔内自发发光中心的自发辐射线宽，计算调制度时，尽管(1)和(2)式中 A、g 对 λ 有一定的依赖性，但存在的差别可忽略，因而：

$$M=2\sqrt{R_1R_2}Q/(1+R_1R_2Q^2),\qquad \sqrt{R_1R_2}Q=M^{-1}-\sqrt{M^{-2}-1}。 \tag{4}$$

由此可见，调制度是关于端面反射率的函数，这正是比较法的原理所在。考虑镀膜端面 R_2，设其镀膜后反射率变为 R_2'，自发辐射谱上调制度为 M'，由于两张谱图是在同样的偏置条件下测得，所以 Q 相同，从(4)式中容易推出：

$$R_2/R_2'=[(M^{-1}-\sqrt{M^{-2}-1}-1)/(M'^{-1}-\sqrt{M'^{-2}-1})]^2, \tag{5}$$

(5)式中，镀膜前的端面反射率 R_2 由器件材料折射率决定，它在讨论的范围内与波长基本无关，对普通的 InGaAsP 激光器，其值为的 0.31 左右。M 和 M' 是与波长有关，这样，(5)式中就给出了镀膜后的端面反射率随波长的变化关系。

3 实验结果及讨论

采用主动监控法[6]，对几只普通的 InGaAsP 激光器镀制了 SiO_x 单层减反射膜。这批器件腔长约为 350 μm，镀前阈值电流在 25 至 30 mA 之间。

图 1 给出了一只半导体激光器两端面镀减反射膜以后，在 30、60、90 和 120 mA 电流偏置下的端面自发辐射谱，图 2 是另一只半导体激光器在略低于阈值电流（$I_{th}=27$ mA）时，镀减反射膜前后的端面自发辐射谱。由图可以看出，两端面镀减反射膜以后，镀前阈值电流工作时，自发辐射谱上的调制度已经非常小，这是 Kaminow 法面临的一大困难；同时，还可发现镀减反射膜以后，端面自发辐射谱峰值波长与镀膜以前相比，明显向短波长方向移动(这一现象将另撰文予以解释)，它与增益峰值波长已不重合，这意味着 Kaminow 法将过于乐观估计端面反射率，因为 Kaminow 法的前提隐含着镀后的端面自发辐射谱峰值波长处的调制度

在镀膜以前等于 1，由于观察到的峰值波长移动，这一前提已不成立。

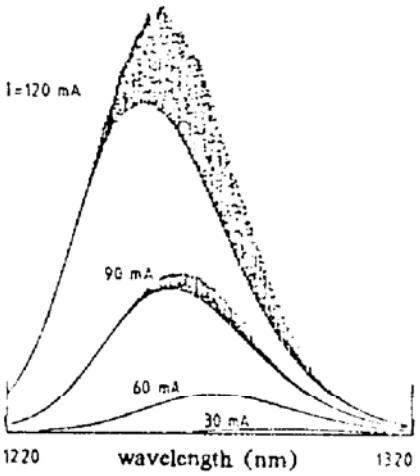

Fig. 1 Spontaneous emission spectra of the diode, at different currents, with both facets being AR coated

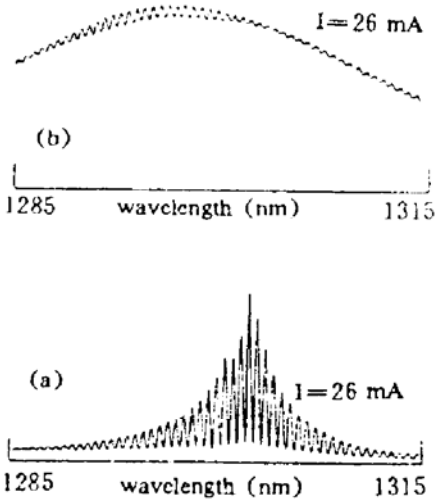

Fig. 2 Spontaneous emission spectra of the diode (a) before, and (b) after one facet being AR coated

由本文提出的比较法，利用图 2 的测量结果，对镀减反射膜后的反射率谱进行了计算，结果由图 3 所示。其中，最低反射率等于 8×10^{-5}，该模式的模号编为 0. 增益峰值波长对应模号－3。波长随模号上升而增大。对于比较法，因为测量的是相对量，光路调节好坏并不直接影响测量结果，影响测量结果的主要因素是测谱系统(单色仪)的分辨率[7]，本文调制度的测量误差在 $\pm5\times10^{-4}$ 以内，为保证测量的可靠性，调制度应大于 5×10^{-3}。实际上，图 3 仅对镀减反射膜以后，自发辐射谱上调制度超过 1%的模式进行了计算，测量可靠性能保证。

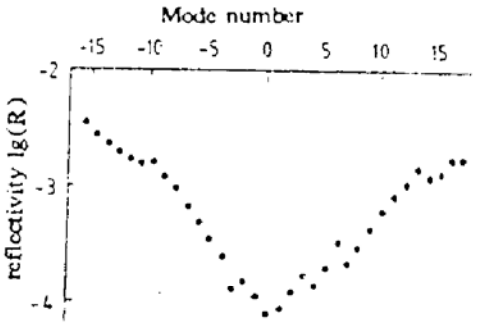

Fig. 3 Wavelength dependence of the reflectivity at the AR coated facet

最后需说明，在比较法中，由于采用了镀减反射膜前后的两张谱图，因此避免了只采用一张谱图的 Kaminow 法存在的一些问题。特别是测量谱图时不再仅仅局限于镀前阈值电流，这对于两端面镀减反射膜以后的测量非常有利，因为通过选择合适的工作电流，可以使谱图上的调制度比较大，以保证测量结果的可靠性。同时，能在相当宽的波长范围内测量出反射率，对行波式半导体激光放大器的研究也有一定的帮助。

参 考 文 献

[1] T. Saitoh, T. Mukai, Recent progress in semiconductor laser amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(11): 1656～1664

[2] M. J. O' Mahony, Semiconductor laser optical amplifiers for use in future systems. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(4): 531～544

[3] I. P. Kaminow, G. Eisenstein, L. W. Stulz, Measurement of the model reflectivity of an antireflection coating on a superluminescent diode. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**(3): 493～495

[4] G. Eisenstein, G. Raybon, L. W. Stulz, Deposition and measurements of electron-beam-evaporated SiO_x antireflection coatings on InGaAsP injection laser facets. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(1): 12～15

[5] L. Thylen, Amplified spontaneous emission and gain characteristics of Fabry-Perot and travelling wave type semiconductor laser amplifiers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(8): 1532～1537

[6] J. Chen, D. Li, Y. Lu, Experimental and theoretical studies on monitored signals from semiconductor diodes undergoing antireflection coatings. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(31): 4554～4559

[7] 武岚，罗斌，陈建国等， 半导体激光器端面剩余模式反射率测量结果的分析. 中国激光，1993，**20**(5): 350～353

Specifying the Variation of Reflectivity with Wavelength of a Semiconductor Diode Facet After AR Coated

Lu Yucun Chen Jianguo Luo Bin Wu Lan

(*Optoelectronics Department, Sichuan University, Chengdu* 610064)

(Received 26 November 1993; revised 24 Jauary 1994)

Abstract Comparison between spectra from the facet of a semiconductor laser before and after AR coated under the same bias condition has led to the establishment of the variation curve of the facet reflectivity vs. the wavelength. This method is applicable to a certain wavelength range, and overcomes the difficulty encountered when Kaminow's method is implemented to determine the very low reflectivity of the diode with both facets AR coated. As a result, a reflectivity of less than 8×10^{-5} at the second coated facet has been measured.

Key words semiconductor laser, AR coating, spontaneous emission spectrum from end facet.