

# 外腔中半导体激光器的双频振荡

陈建国

(四川大学物理系)

**提要:** 本文报道了外腔中半导体激光器的双频振荡现象。这种现象起因于两束反馈光线——一束通过有源区, 一束通过无源区——之间的干涉效应。由此亦可解释可调谐布儒斯特角半导体激光器的输出功率对波长曲线上的调制现象。

## Dual-wavelength oscillation of semiconductor lasers in external cavities

Chen Jianguo

(Physics Department, Sichuan University)

**Abstract:** Dual-wavelength oscillation of a semiconductor laser in an external cavity has been observed. This phenomenon has been attributed to the interference of the two feedback beams, of which one pass through the active layer and the other through the cladding layer (s). The modulation phenomenon on the tuning curve of the tunable semiconductor laser in the external cavity has therefore been explained.

### 一、引言

人们熟知,即使是在多模振荡的情况下,孤立半导体激光器的振荡模式也是围绕着一个特定的中心模式的。当半导体激光器外腔工作时,端面反射镜提供的反馈将使激光器的输出模式结构发生变化。这种变化的主要特征就是激光器的输出谱线大大变窄<sup>[1,2]</sup>。本文要报道另一个观察现象,即在特定的情况下,这种外腔式半导体激光器会产生两个分立的模式(组),同时或交替振荡。下面给出对这一现象的理论分析和观察结果。

### 二、理论分析

我们利用只有一个端反镜的情况进行简单分析。在图1中,假设外腔的端面反射镜( $M_1$ )的反射率为1,准直光用的显微镜物镜 $MO_1$ 和 $MO_2$ 无损耗(因为在这段分析中,这无关紧要),而布儒斯特角二极管的有源区增益系数为 $g_a$ ,吸收系数 $\alpha_a$ ,无源区的吸收系数为 $\alpha_p$ 。由于光路系统还不可能把全部反射光都耦合进 $0.2\mu\text{m}$ 厚的有源区,因而只有部分光能( $X^2$ )被耦合进有源区,而其余部分

收稿日期: 1984年10月5日。

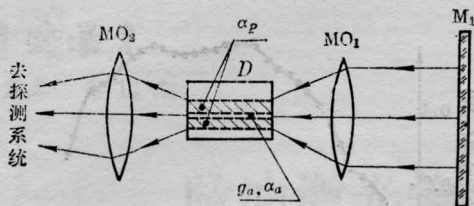


图1 由端面镜反射的光束的光路图  
(其中二极管为侧视)

$(1-X^2)$ 则进入无源区。Kobayashi 等人<sup>[3]</sup>曾报道过,在他们特定的系统中,  $X^2 \sim 13\%$ ; 在文献[4]中,  $X^2$ 的实测值约为12%。由于缺乏导波作用,耦合到无源区的光能中只有小部分符合通过的条件,得以衰减地通过无源区,对振荡产生贡献。在此我们假设这部分光能对进入无源区的光能的比例为  $y^2$ 。在通过无源区后,可以求得其透过的光能为

$$y^2(1-X^2)\exp(-\alpha_p l),$$

其中  $l$  为二极管长度。

假设进入有源区和无源区的两束光线之间无位相差(在振荡情况下可能为  $2\pi$  的整数倍),则输出端产生干涉极大时的光场为

$$I_{\max} = \left\{ X \exp \left[ \frac{1}{2} (g_0 - \alpha_a) l \right] + y \sqrt{1 - X^2} \exp \left( -\frac{1}{2} \alpha_p l \right) \right\}^2 \quad (1)$$

输出端产生干涉极小时的光场为

$$I_{\min} = \left\{ X \exp \left[ \frac{1}{2} (g_0 - \alpha_a) l \right] - y \sqrt{1 - X^2} \exp \left( -\frac{1}{2} \alpha_p l \right) \right\}^2 \quad (2)$$

通常认为半导体为均匀加宽,其增益系数可写为<sup>[5]</sup>

$$g_0 = g_0 \left\{ 1 + 4 \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_g} \right)^2 \right\}^{-1} \quad (3)$$

式中  $g_0$  为峰值增益系数,  $\lambda_0$  为峰值处波长,  $\Delta\lambda_g$  为增益线半宽。

考虑在最简单的情况下,即峰值波长  $\lambda_0$  对应的是干涉极小,而  $\lambda_0 \pm \frac{1}{2} \delta\lambda$  波长对应干

涉极大,那么只要有

$$\left\{ X \exp \left[ \frac{\frac{1}{2} g_0 l}{1 + (\delta\lambda/\Delta\lambda_g)^2} - \frac{1}{2} \alpha_a l \right] + y \sqrt{1 - X^2} \exp \left( -\frac{1}{2} \alpha_p l \right) \right\}^2 > \left\{ X \exp \left[ \frac{1}{2} (g_0 - \alpha_a) l \right] - y \sqrt{1 - X^2} \exp \left( -\frac{1}{2} \alpha_p l \right) \right\}^2 \quad (4)$$

激光器就会在  $\lambda_0 \pm \frac{1}{2} \delta\lambda$  附近振荡。作为初步近似,可取  $\alpha_a = \alpha_p$ , 则方程4变为

$$y^2 > \frac{X^2}{4(1-X^2)} \left\{ \exp \left( \frac{1}{2} g_0 l \right) - \exp \left[ \frac{\frac{1}{2} g_0 l}{1 + (\delta\lambda/\Delta\lambda_g)^2} \right] \right\}^2 \quad (5)$$

在我们的实验条件下,  $\Delta\lambda_g \sim 15 \text{ nm}$ ,  $\delta\lambda \sim 3.1 \text{ nm}$ ,  $g_0 \sim 100 \text{ cm}^{-1}$ ,  $l = 500 \mu\text{m}$ ,  $X^2 \sim 0.12$ , 从而有  $y^2$  大于 0.05, 或者说只要有 5% 的光能符合穿过无源区的条件,激光器就能振荡在波长  $\lambda_0 \pm \frac{1}{2} \delta\lambda$  附近。从光束特征来分析,  $y^2$  是完全可能大于 5% 的。

在文献[4]中,已经给出了波长  $\lambda$ , 两区折射率差  $\Delta n$  和  $\delta\lambda$  的关系为

$$\Delta n \sim \lambda^2 / (l\delta\lambda) \quad (6)$$

### 三、实验装置和结果

本实验中使用的布儒斯特角二极管激光器(俯视)如图2所示。图中  $FP$  为调频元件(标准具的自由光谱程为 35 nm);  $BS$  为分光片;激光功率计为 Model 44 XL 型;显微镜

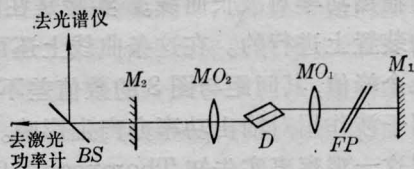


图2 可调谐布儒斯特角二极管激光器装置图

物镜  $MO_1$  和  $MO_2$  的放大率为 20 倍, 数值孔径为 0.5; 光谱仪为 Monospek 1000, 分辨率可达  $0.25 \text{ \AA}$ ; 外腔的两个反射镜为  $M_1$  和  $M_2$ , 其中  $M_1$  为全反射镜,  $M_2$  为部分反射镜 (反射率约为 0.9);  $D$  为二极管。

首先测量了有源区介质的有效折射率  $n_e$ , 测量是在零度角二极管激光器上进行的。该管是与布儒斯特角管子在同一基底片上生产的, 且尺寸相同 ( $500 \mu\text{m}$  长)。在大致相同于布儒斯特角半导体激光器的运行电流情况下, 测得腔模间距  $\Delta\lambda$  在  $0.17$  至  $0.19 \text{ nm}$  之间。利用文献 [6] 给出的有效折射率公式

$$n_e \sim \lambda^2 / (2L\Delta\lambda) \quad (7)$$

可得到有源区的有效折射率  $n_e$  在  $3.8$  至  $4.2$  之间。而无源区的折射率  $n_p$  则由制造者提供的数据可知为  $3.4$  左右。

现在讨论  $\delta\lambda$  的测量。在图 3 中, 我们给出了单面反馈 (即  $R_2=0$ ) 且腔内无标准具时测得的布儒斯特角二极管的输出谱。由图可得到源于干涉效应的两相邻峰间的波长间距  $\delta\lambda \sim 3.1 \text{ nm}$ 。当一峰波长在  $845 \text{ nm}$  时, 利用式 (6) 可得到两区折射率差  $\Delta n \sim 0.46$ , 该值落在了  $n_e$  与  $n_p$  的差值范围之内。

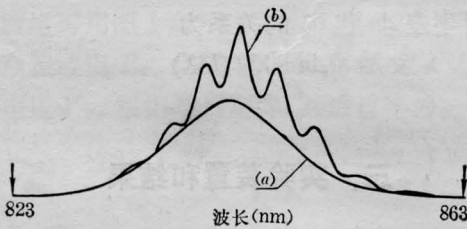


图 3

- (a) 无单面反馈时布儒斯特角二极管的输出光谱
- (b) 有单面反馈时的输出光谱

图 4 给出了可调谐布儒斯特角二极管激光器的输出功率对波长曲线。实验是在图 2 所示的装置上进行的。在这条曲线上还可以看到几个峰值, 其间距与图 3 的数值差不多, 这表明干涉作用对输出功率亦产生影响。作者曾把这一观察事实告知 Thompson, 后者重复了该项实验, 并观察到了相同的现象 [7]。

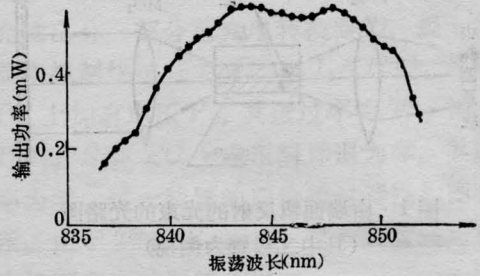


图 4 可调谐布儒斯特角半导体激光器的输出功率对波长曲线

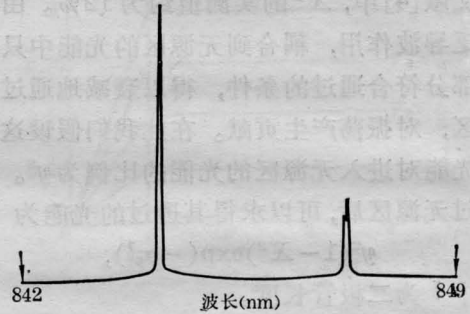


图 5 一个双频振荡的布儒斯特角二极管激光器的输出谱

在这条曲线上还可以看到, 在靠近输出功率较大的波段的两个峰值处, 激光器的输出功率相近。这预示着在不加调频元件的情况下, 激光器可能在这两个波长上同时振荡。

实验观察证实了这一点。在图 5 中, 我们给出了一个双频振荡的外腔式布儒斯特角二极管激光器的输出谱。

当系统处在不大稳定状态下的时候, 我们观察到了双频交替振荡的情况。图 6 的 (a)、(b) 和 (c) 就给出了这种情况下不同时刻测得的输出谱。这种波长的切换是一种慢过程。我们曾用红外望远镜对光谱仪输出端的屏幕进行过观察, 看到了在系统处于启动或有外界干扰的情况下, 许多管子均有这种双频切换的现象。这意味着这种切换现象很可能是起因于外腔系统的波动 (如光学元件的扰动等) 或偏置电流的波动。

在实验中, 我们对两个波长的振荡均进行了偏振检验, 结果表明它们均系  $TE$  振动。



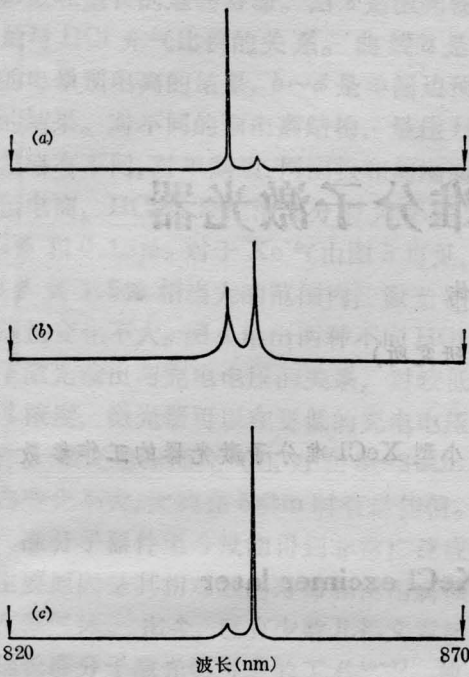


图6 一个双频交替振荡的布儒斯特角二极管激光器在不同时刻的输出谱

事实上,我们对一只零度角的二极管激光器亦进行了检验。在加单面外腔反射的情况下,也测到了双频振荡,这两个输出波长的间距也接近 3.1 nm,结果示于图 7。附带说一句,在该图中,左边的双模还给出了孤立半

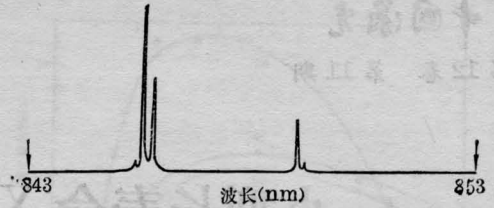


图7 一个运行在有单面外腔反馈情况下的二极管激光器的双频振荡谱

导体激光器内腔模式的间距  $\Delta\lambda \sim 0.18 \text{ nm}$ 。作者谨向提供了帮助的 Dr. W. Sibbett 和 Dr. J. I. Vukusic 表示感谢,并向提供实验中使用的二极管的英国 STL 公司表示谢意。

### 参 考 文 献

- [1] R. Ludeke *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**, No. 12, 499.
- [2] M. W. Fleming, A. Mooradian; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1981, **QE-17**, No. 1, 44.
- [3] S. Kobayashi, T. Kimura; *Electron. Lett.*, 1980, **16**, No. 6, 230.
- [4] J. Chen, Ph. D. Thesis; Univ. of London, 1984, 223.
- [5] 徐承材等;《中国激光》, 1983, **10**, No. 2, 83.
- [6] J. Manning *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1983, **QE-19**, No. 10, 1525.
- [7] G. H. B. Thompson; Private Communication.

(上接第 702 页)

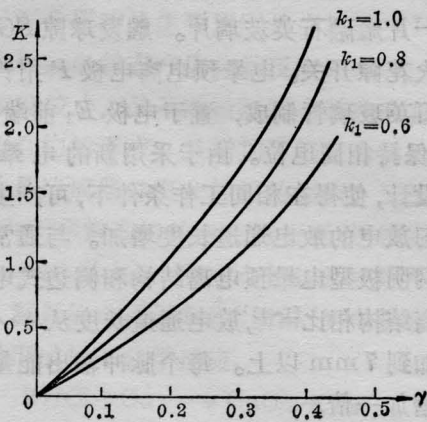


图 3

和透射波再现像相差无几。

至于两次折射和片基右表面的反射作用,只是

稍稍改变了一下光线  $A_2E$  的位置,并使  $E$  处的光强度更弱。右表面反射的光线通过平面  $M'N'$  时还将发生衍射,也能形成虚像,不过其位置离开  $I'$  稍远些罢了。但就宏观效果而言,它会使  $I'$  的亮度更强,同时使像有些模糊。这两方面的影响都会使  $K$  更加提高,这就是看上去反射波再现像也很亮的原因。

### 参 考 文 献

- [1] H. M. Smith; “全息学原理”, 科学出版社, 1972 年
- [2] 陈怀琳, 秦诚; 《中国激光》, 1983, **10**, No. 12, 861.
- [3] 蔡履中; 《山东大学学报》, 1984, No. 3, 112.
- [4] 母国光, 战元龄; “光学”, 人民教育出版社, 1979, p. 128, 133~134, 145, 195.

(西安交通大学工程力学系 于乃甸  
1984 年 9 月 12 日收稿)