

四棱镜扩束染料激光器的多线振荡

褚玉喜 罗才雁

(武汉大学物理系, 武汉 430072)

提 要

从实验和机理上研究了四棱镜扩束染料激光器产生的多线振荡, 结果表明: 其振荡线间隔、单线线宽、多线带宽是与多界面反射器-光栅复合腔对光束的频率和空间调制特性相符合的.

关键词 四界面反射器, 光栅复合腔, 多线振荡.

多棱镜-光栅组合常被用于压缩染料激光器的输出线宽. 在多棱镜激光系统中, 其输出通常是一条光谱线, 但有时也会出现多带光谱结构^[1]、带卫星线的光谱^[2]、甚至出现腔内寄生振荡现象^[3]. 这类异常光谱至今尚未见专门研究的报道, 本文从实验上研究了四棱镜扩束染料激光器的多线振荡特性, 其机理是该棱镜组不仅具有扩束作用, 且具有多界面反射器的功能. 由于多界面对光束在频率和空间上的双重调制, 加上染料的高增益特性, 便产生了这种特殊振荡光谱.

1 装置与干涉环图

实验装置如图 1 所示. 其中棱镜组为倍率均分色散补偿型, 总倍率 $M=40$, 棱镜用 K₉ 玻璃, 其顶角 A 为 38.84° , 光学面未镀膜. 对于这种棱镜-光栅组合, 由色散传递原理^[4]得出的往返角色散

$$\left(\frac{d\alpha_{11}}{d\lambda}\right)^n = 2\tan A(m - m^2 - m^3 + m^4) \frac{dn}{d\lambda} - 2m^4 \frac{\tan\theta}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 $m = M^{1/2}$, $\theta = 44.97^\circ$, 取 $\lambda = 589 \text{ nm}$, $(dn/d\lambda) = 1 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-1}$. 于是由(1)式得角色散为 $1.33 \times 10^{-1} \text{ nm}^{-1}$. 图 1 中, 染料池激活区直径 0.1 mm , 激活中心对返程光出射点张角 2.5 mrad , 由此得出激光器单程线宽计算值为 $1.88 \times 10^{-2} \text{ nm}$, 即频宽 16 GHz .

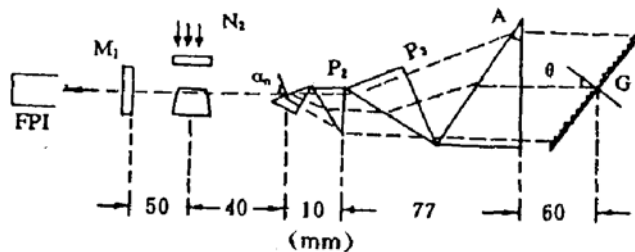


Fig. 1 Experimental setup

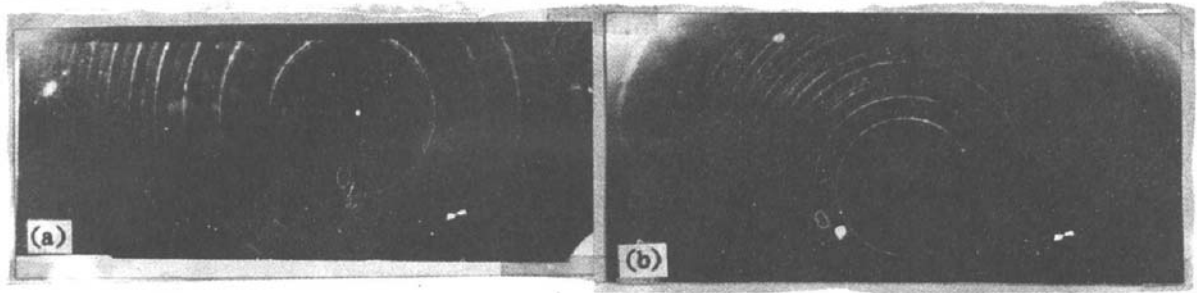


Fig. 2 F-P fringes for multiline Oscillation of the laser (a) in tuning to yellow light (b) tune to red light

图 2(a)、(b)是激光器调谐在黄光和红光位置时,利用法布里-珀罗干涉仪分别摄得的输出激光干涉环:从若干图片的环图看,干涉环的分布是周期性的,多个圆环构成一个周期;每个周期的圆环分布约为三组,称作 α 、 β 、 γ 组;每个组的圆环数在 2~4 之间,其间距大致相等. 这里,干涉仪的自由光谱范围 16.5 GHz,细度 $F = 50$, 透镜焦距 1000 mm.

采用 WPL 型棱镜摄谱仪对输出激光摄谱,结果是:环图中的多谱线简并成为一条单谱线,表明:多线分布带宽起码小于该谱仪的分辨波长.

2 干涉环图的识别

用法布里-珀罗测量单谱线的波长,干涉环中心处级次

$$(K + \epsilon) = 2hn/\lambda, \tag{2}$$

中心外第 m 环所围面积 S_m 可写成^[5]

$$S_m = \pi f^2 [n\lambda(m - 1 + \epsilon)/h]. \tag{3}$$

对于给定干涉仪和波长、相邻环面积差

$$\Delta S_n = \pi f^2 n\lambda/h \tag{4}$$

为常数. 设 S_1 为第一环面积、则干涉级次小数

$$\epsilon = S_1/\Delta S_n. \tag{5}$$

因此,若胶片放在干涉仪焦面上,引入已知波长 λ^* ,通过精确测量 ΔS_n , 利用比较法由(4)式可定出待测波长. 对于多谱线法布里-珀罗干涉环、亦可通过测量各环系相邻环面积差 ΔS_n 定出相应环系的波长 λ_j .



Fig. 3 Ring distribution of the negative plate in the view of micrometer microscope.

(a) in Fig. 2 (a); (b) in Fig. 2 (b)

图 3(a)、(b)是图 2 相应负片在微米计视场内圆环的径向分布. 设强线系为 α , α 外分别为 β 、 γ , 实验测得三线系各级干涉环直径、面积以及相应波长列于表 1、表 2, 其中黄光和红光位

Table 1 Characteristic parameter for the yellow ring fringes

	α_{1j}			β_{1j}			γ_{1j}		α_{2j}				
	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	3		
$D/2$ (mm)	8.964	9.400	9.794				14.149	14.449	14.874	15.130	15.389		
S mm ²	252.4	277.6	301.4				628.9	655.9	695.1	719.2	744.0		
ΔS_n mm ²									442.6	441.6	442.6		
ϵ	0.571	0.628	0.681	0.017	0.072	0.127	0.422	0.483					
$d\lambda$ nm	.001	.000	-.001	.011	.010	.009	.004	.003					
$\lambda = 579.400$ nm	.426	.425	.424	.436	.435	.434	.429	.428					
	β_{2j}			γ_{2j}			α_{3j}			β_{3j}			γ_{3j}
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1
$D/2$ (mm)	16.850	17.080	17.306	18.479	18.707	19.036	19.234	19.474	20.593	20.783	20.977	21.962	
S mm ²	892.0	916.3	940.9	1072.8	1099.4	1138.5	1162.3	1185.3	1332.3	1357.0	1382.4	1515.3	
ΔS_n mm ²				443.9	443.5	443.4	443.3	441.3	440.3	440.7	441.6	442.5	

Table 2 for the red ring fringes

	α_{1j}		β_{1j}				γ_{1j}				α_{2j}	
	1	2	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
$D/2$ (mm)	7.895	8.438	9.850	10.443	10.807	11.158	11.664	12.316	12.772	13.204	14.447	14.742
S mm ²	195.8	223.7	304.8	342.6	366.9	391.1	427.5	476.5	512.5	547.7	655.7	682.7
ΔS_n mm ²											459.9	459.0
ϵ	0.426	0.487	0.663	0.745	0.798	0.851	0.931	0.037	0.116	0.196		
$d\lambda$ nm	.000	-.001	-.005	-.006	-.007	-.008	-.010	.008	.006	.005		
$\lambda = 579.400$ nm	.880	.879	.875	.874	.873	.872	.870	.888	.886	.885		
	β_{2j}			γ_{2j}				α_{3j}		β_{3j}		
	1	2	3	1	2	3	4	1	2	1	2	
$D/2$ (mm)	15.606	15.959	16.188	16.803	17.270	17.575		18.833	19.06	19.764	20.048	
S mm ²	765.2	800.1	823.3	887.0	937.0	970.4		1114.3	1141.3	1227.2	1262.7	
ΔS_n mm ²	460.4	457.5	456.4	459.5	460.5	458.0		458.6	458.6	462.0	462.6	

置的基本波长 λ_{n1} 是引入 He-Ne 干涉环用比较法确定的. 在附表中, 基于两个原因可以认定图 (2) 中 (a) 和 (b) 的多线在光谱范围 2×10^{-3} nm 的干涉仪中分别具有相同的最大级次: 1) 表中各环系的 ΔS_n 在测量误差内是个常数; 2) 黄光或红光区的这些线没有被分辨本领为 8.4×10^4 的光栅分开. 因此, 在干涉环图中这些线只是级次小数有所不同, 而各环系的 ϵ_j 可由 (5) 式给出. 这样, 各环系相应波长可写成

$$\lambda_j = \lambda_{n1} + d\lambda = \lambda_{n1} - (\lambda_{n1}^2/2lu)d\epsilon_j \quad (6)$$

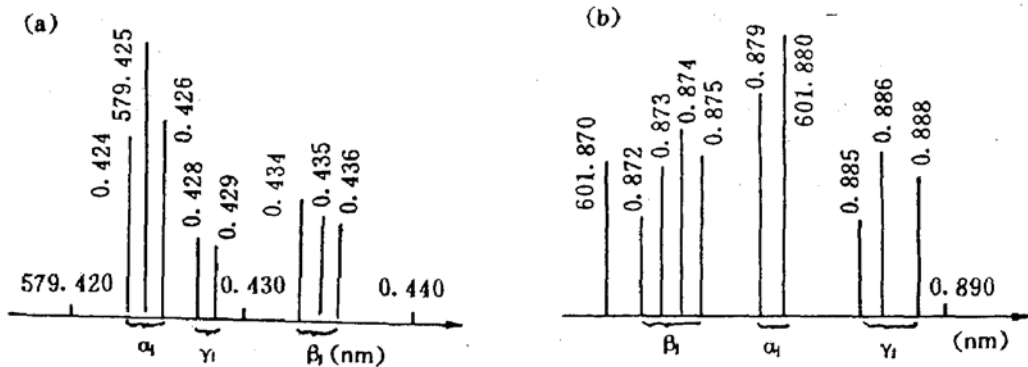


Fig. 4 Spectra of the multiline oscillation (a) in the yellow light (b) in the red light

结合负片环线的黑度测量,从中得出,图2干涉环有对应于图4(a)、(b)的多线振荡光谱,且振荡线具有如下特征:

- 1) 谱线线宽很窄,测量值小于1 pm.
- 2) 谱线间隔最小值1 pm,合频率间隔约860 MHz.
- 3) 多线分布带宽分别为 1.2×10^{-2} nm和 1.8×10^{-2} nm约等于该激光器输出线宽计算值.

3 多界面反射器效应

如图1,来自染料池的宽带放大自发辐射,按照非相干光透射、反射原理、棱镜组对P光的透射和反射率

$$T_p = (T_1 T_2)^4, \quad (7)$$

$$R_p = (T_1^2 + T_1^4 T_2^2 + T_1^6 T_2^4 + T_1^8 T_2^6) R_2, \quad (8)$$

这里 $T_1 = 4 \text{ nm}/(n+m)^2$, $T_2 = 4n/(1+n)^2$ 分别为棱镜的斜面和直角面透射率, R_2 为直角面反射率,代入实际数据得 $T_p = 66\%$ 、 $R_p = 11\%$.透射光经光栅衍射,线宽以 10^{-3} 量级压缩,相干性大大提高.因此,光栅返程光穿过棱镜组是相干的,依据矢量合成法,棱镜组的P光振幅反射系数为

$$\begin{aligned} r_p &= r_2 \{1 + T_2 T_1 \exp(-2i\sigma_1) + T_2^2 T_1^2 \exp[-2i(\sigma_1 + \sigma_2)] \\ &\quad + T_2^3 T_1^3 \exp[-2i(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)]\} \\ &= r_2 \sum_{k=2}^3 T_2^k T_1^k \exp(-2i \sum_{j=0}^k \sigma_j), \end{aligned} \quad (9)$$

σ_j 为相应直角面之间的相位厚度.若直角面间厚度在扩束方向略有倾斜,则 σ_j 可写成^[6]

$$\sigma_j = (2\pi/\lambda)(nd_j + \alpha_j x) \quad (10)$$

α_j 为第j段两直角面对最大倍率位置的倾角, x 为直角面上光束离光轴的距离.棱镜组对返程光的反射率

$$R(\lambda, x) = R_2 \sum_{k=0}^3 \sum_{k'=0}^3 T_2^k T_1^k T_2^{k'} T_1^{k'} \exp(-2i \sum_{j=0}^k \sigma_j) \exp(2i \sum_{j=0}^{k'} \sigma_j), \quad (11)$$

参考文献[7],对于 $k \neq k'$,令 $k + k' = t$, t 在1~5间取值,在 $k - k' > 0$ 的条件下,上述可写成

$$R(\lambda, x) = R_2 \left[\sum_{k=0}^3 T_2^{2k} T_1^{2k} + \sum_{t=1}^5 (2T_2^t T_1^t \sum_{j=0}^k \cos 2(\sum_{j=0}^k \sigma_j - \sum_{j=0}^{t-k} \sigma_j)) \right] \quad (12)$$

\sum 表示在某个 t 值下对可能的 k 值个数求和,其极大发生在相干增长的波长和位置上

$$R_m(\lambda, x) = R_2 \left(\sum_{k=0}^3 T_2^{2k} T_1^{2k} + \sum_{t=1}^5 2T_2^t T_1^t + 2T_2^3 T_1^3 \right) \quad (13)$$

其值为49.8%.相干项之和为0时, $R(\lambda, x) = 12.4\%$,一般值处在极大与极小之间.

图5是He-Ne束透过四棱镜扩束器后,沿 x 方向扫描探测到的强度分布曲线.图中,干涉条纹叠加在扩束了的高斯束上,透射峰宽度,间隔显示出明显的多样性,这个结果与略有倾斜的非简并共振反射器对单色光的空间调制特性相符^[6].

4 复合腔模型

在以上棱镜-光栅腔中,依据复合腔原理,棱镜组可与光栅组合成复合腔的一个干涉系统,其总反射率

$$R_{tot} = \frac{R(\lambda, x) + \rho_{g1} - 2[R(\lambda, x)\rho_{g1}]^{1/2}\cos\sigma_g}{1 + R(\lambda, x)\rho_{g1} - 2[R(\lambda, x)\rho_{g1}]^{1/2}\cos\sigma_g} \quad (14)$$

这里, σ_g 是第四直角面至光栅的相位厚度, ρ_{g1} 为光栅在 λ_0 的一级衍射效率,当 $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$ 时

$$\rho_{g1}(\lambda) = \rho_{g1}\text{sinc}^2(\pi N\Delta\lambda/\lambda_0) \quad (15)$$

N 是光栅被照亮的条纹数,于是(14)式变成

$$R_{tot} = \frac{\left\{ R(\lambda, x) + \rho_{g1}\text{sinc}^2\left(\pi N \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}\right) - 2\text{sinc}\left(\pi N \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}\right) [R(\lambda, x)\rho_{g1}]^{1/2}\cos\sigma_g \right\}}{\left\{ 1 + \text{sinc}^2\left(\pi N \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}\right) \rho_{g1}R(\lambda, x) - 2[R(\lambda, x)\rho_{g1}]^{1/2}\text{sinc}\left(\pi N \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}\right)\cos\sigma_g \right\}} \quad (16)$$

Table 3 Maximum and minimum of $R_{tot}(\lambda)$

$\Delta\lambda$	$\text{sinc}\left(\pi N \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}\right)$	R_m	R_{min}
0	1.0	0.90	0.27
$\lambda_0/4N$	0.90	0.85	0.12
$\lambda_0/3N$	0.83	0.81	0.05
$\lambda_0/2N$	0.64	0.70	0.0008
$2\lambda_0/3N$	0.41	0.56	0.06
$4\lambda_0/5N$	0.0339	0.45	0.155
λ_0/N	0	0.30	0.30

图 6 是总反射率的波长调制曲线^[8],对于某个确定的 x 或 $\alpha_j = 0$, R_{tot} 的分光特性只随波长变化,相邻反射峰的间隔

$$\Delta\lambda_j = \lambda_0^2 / \sum(2nd_j + \alpha_j x). \quad (18)$$

当反射极大发生在第二直角面与光栅之间时,实测 $\sum 2nd_j \approx 32 \text{ cm}$, 则 $\Delta\lambda_j = 1.1 \text{ pm}$; 当反射极大发生在第四直角面与光栅之间, $\Delta\lambda_j = 2.9 \text{ pm}$, 相应频率间隔分别为 940 MHz 和 2.5 GHz , 因此反射峰间隔可取不同值. 反射峰分布带宽,约为光栅可分辨最小波长差的两倍

$$\Delta\lambda_b = 2\lambda_0/N. \quad (19)$$

实验中 $N = 8.4 \times 10^4$, 由此得 $\Delta\lambda_b = 1.4 \times 10^{-2} \text{ nm}$, 反射峰半高宽

$$\delta\lambda < \lambda_0^2 / \sum(2nd_j + \alpha_j x) \quad (20)$$

估算值在 10^{-1} pm (10^2 MHz) 量级. 由复合腔模型得出的这些结果,与激光器多线振荡光谱的实验值是相符合的.

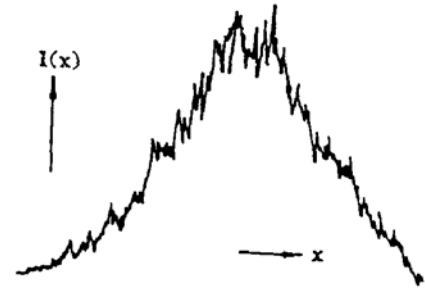


Fig. 5 1-D distribution of transmitted He-Ne light of the expander

若取棱镜组反射率 $R(\lambda, x) = 30\%$, $\rho_{g1} = 70\%$, $\lambda_0 = 589 \text{ nm}$, 则 $R_{tot}(\lambda)$ 的极大、极小值求得如表 3. 从(16)式还可以看出: R_{tot} 取极大值的波长, 应满足 $\cos\sigma_g = -1$, 且 $R(\lambda, x)$ 应处在峰值上, 即棱镜组各段光程满足

$$\sum 4(nd_j + \alpha_j x) = m\lambda. \quad (17)$$

这样,不同波长的纵模只有占住复合腔模体内的有利位置才能获得反射极大,干涉系统的反射率同时具有频率和空间双重调制作用.

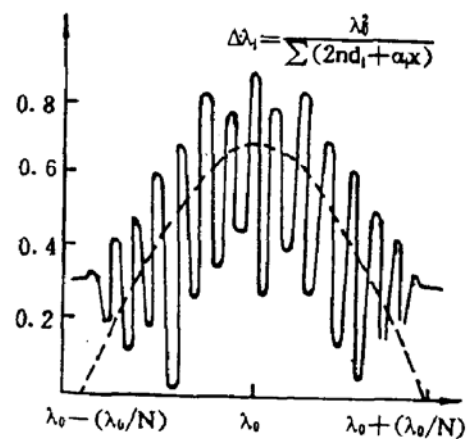


Fig. 6 Dispersion curve of $R_{tot}(\lambda)$ $\lambda_0 = 589 \text{ nm}$, $N = 8.4 \times 10^4$

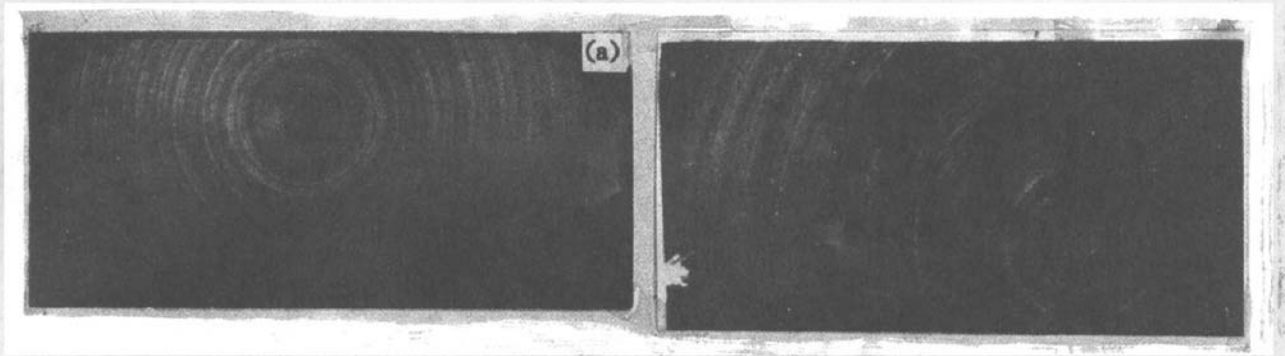


Fig. 7 F-P fringes of the multiline

(a) in out focus of pump light (b) in the case of replacing 2400 l/mm grating by 1800 l/mm one

实验中,随着每次泵浦,输出的多线频谱在分布带宽范围内是随机变化的.图 7(a)是染料液泵浦光散焦时输出激光的干涉环,与聚焦泵浦相比,振荡谱线更多,激活区接受角更大,因而分布带宽变宽;图 7(b)是改用 1800 l/mm 平面光栅,整个装置重新调整后用相同干涉仪拍摄的输出激光干涉环.可以看出,其振荡线与上述多线振荡特性基本一致,比较而言,每条单线略宽一点,锐度也有所降低.

5 结束语

实验观测和研究了四棱镜扩束染料激光器的多线振荡,其单线线宽小于 1 pm,振荡线分布带宽为 $1.2 \sim 1.8 \times 10^{-2}$ nm,约等于棱镜-光栅腔输出线宽的计算值.多线振荡归因于由棱镜、光栅组成的干涉系统对腔内光束在频域和空域提供的选择性反射,加上激活区的高增益特性,致使多个反射峰在频率和空间的竞争中能够振荡起来.事实上,这种多线振荡不同于一般的寄生振荡,后者可以不通过主腔,仅由某些界面和侧面引起宽带振荡^[9],而前者随主腔调谐而变,它是腔内多界面形成的一种复合腔的多模输出^[10].

参 考 文 献

- [1] F. C. Strome, Jr., J. P. Webb, Flashtube-pumped dye laser with multiple-prism tuning. *Appl. Opt.*, 1971, 10 (6):1348~1353
- [2] M. L. Stitch, *Laser Handbook*. Amsterdam, New York, Oxford: North-Holland Pub. Co., 1979, 3:316
- [3] 刘庆, 张国威, 腔内扩束棱镜的损耗特性. *中国激光*, 1987, 14(4):216
- [4] F. J. Duarte, J. A. Piper, Dispersion theory of multiple-prism beam expanders for pulsed dye lasers. *Opt. Comm.*, 1982, 43(5):303~307
- [5] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*. Pergamon Press, 1980:330
- [6] 何伟明, 陈绍和, 尤南昌等, 三片光学共振反射器及其设计中的若干问题. *光学学报*, 1987, 7(11):976~981
- [7] 李瑞铭, 叶声华, 王春和, 双法布里-珀罗干涉仪传感模型的理论分析. *光学学报*, 1990, 10(9):809~813
- [8] 陈钰清, 马养武, 楼波, 复合腔可调谐 CO₂ 波导激光器的研究. *中国激光*, 1986, 13(1):29~33
- [9] D. C. Brown, S. D. Jacobs, N. Nee, Parasitic Oscillation, absorption, Stored energy density and heat density in active-mirror and disk amplifiers. *Appl. Opt.*, 1978, 17(2):211~224
- [10] K. Dasgupta, R. Khare, S. Daulatabad et al., Spectral structures in broadband pulsed dye laser. *Appl. Opt.*, 1990, 29(12):1714~1715

Multiline oscillation of pulsed dye laser with four-prism expander

CHU Yuxi LUO Caiyan

(Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072)

(Received 3 March 1992; revised 30 June 1992)

Abstract

Multiline oscillation of the dye laser with four prisms and a grating has been observed and studied. The results are shown that the output spectral features, such as wavelength interval of the neighboring lines, distributive bandwidth of the multiline and singlet width, are in agreement with the theory of compound cavity with multisurface reflector and grating combination.

Key words four-surface reflector, grating compound cavity, multiline oscillation.