

光学共振反射器及其在激光技术中的应用

朱智敏 陈绍和 陈庆浩 曹渭楼 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

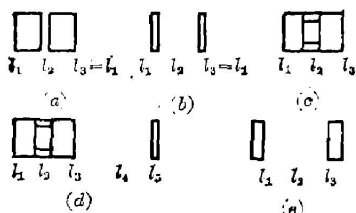
本文用电子计算机求解了共振反射器的反射频谱,把共振反射器归纳为简并型和非简并型两大类,分别讨论了它们的共振峰线型,包络调制变,周期分布规律,调谐特征和两个有关的性质。此外还用压电调谐的共振反射器在Nd:YAG激光器上得到调谐范围为2Å的单纵模激光输出。这项研究工作为共振反射器的设计和应用提供了可靠的根据。

一、引 言

共振反射器在大功率固体单纵模激光器中作为输出耦合腔板和选频器,对邻模和纵模都有较强的抑制能力。和腔内放置的倾斜标准具相比具有选择性强、承受光强大、损耗小和无横模干扰等优点。但是其反射频谱的结构比较复杂,解析式不能直观地反映出分布规律。本文用电子计算机画出各种结构的共振反射器的反射频谱,从几个方面剖析以得到比较深刻的认识。

二、共振反射器的计算

共振反射器由若干片互相平行的平板组成,如图1所示。各个区段的传输矩阵为^[1]



$$M_i = \begin{pmatrix} \cos K_0 n_i l_i & -j \frac{1}{n_i} \sin K_0 n_i l_i \\ -j n_i \sin K_0 n_i l_i & \cos K_0 n_i l_i \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中 $K_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$, λ_0 是真空中波长, $n_i l_i$ 为第 i 区段的光程, j 为单位虚数记号。系统的传输矩阵为

$$M = \prod_i M_i = \begin{pmatrix} m_{11} & j m_{12} \\ j m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

光强反射率为

$$R = \frac{(m_{11} - m_{22})^2 + (m_{12} - m_{21})^2}{(m_{11} + m_{22})^2 + (m_{12} + m_{21})^2}, \quad (3)$$

最大峰值反射率为^[1]

$$R_{max} = \left(\frac{n^{2N} - 1}{n^{2N} + 1} \right)^2, \quad (4)$$

其中 N 为组成共振反射器的玻璃片数。

图 2(a)、(b)、(c)、(d)、(e) 分别是由图 1(a)、(b)、(c)、(d)、(e) 计算得到的反射频谱, 它们是由各种不同频率的周期函数互相调制而成。周期最大的包络是由系统中光程最小的区段所决定, 而最小的周期是由系统中光程最大的区段所决定。如图 2(a) 的小周期 $T_1 = \frac{1}{2nl_1}$ 或 $\frac{1}{2nl_3}$, 大包络的周期为 $T_2 = \frac{1}{2l_2}$, 而图 2(b) 中的小周期 $T_1 = \frac{1}{2l_2}$, 大包络的周期为 $T_2 = \frac{1}{2nl_1}$ 或 $\frac{1}{2nl_3}$ 。

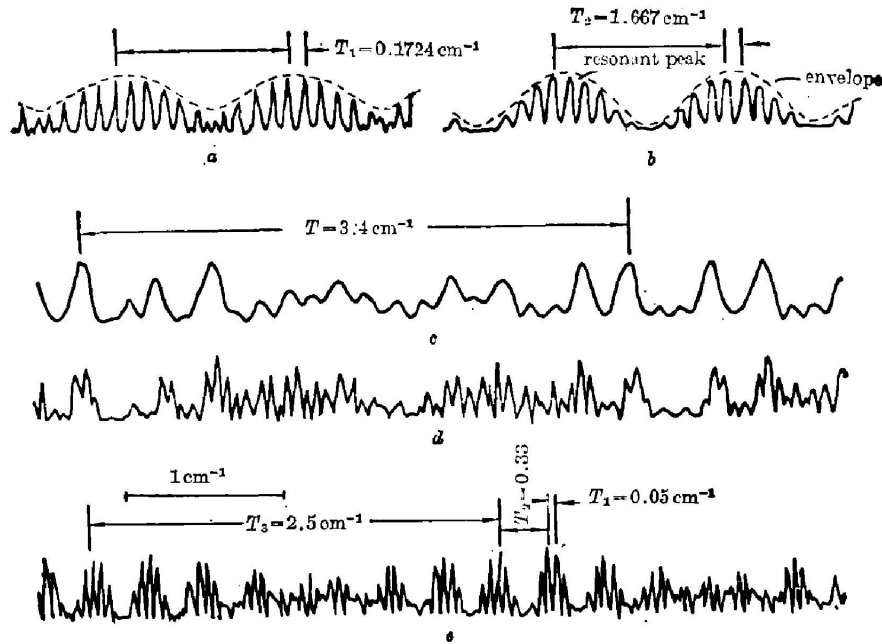


Fig. 2 Reflection spectra corresponding to the structures in Fig. 1

把共振反射器归纳为简并型、非简并型两类。当其中两个以上的区段的光程相等时称为简并型, 如图 1(a)、(b)。如果各个区段的光程都不相等则称为非简并型, 如图 1(c)、(d)、(e)。

简并型: 简并型又可以分为小周期简并和大包络简并, 根据光程相等的区段所决定的是共振峰的小周期或大包络的周期。由图 2(a)、(b) 可见, 大包络简并型具有较深的包络调制度, 简并度越高, 调制度越深。图 3(a)、(b) 说明小周期简并型具有比较锐的共振反射峰, 简并度越高, 反射峰越锐。图 3(c) 和 (a) 对应的光学结构相同, 只是把折射率从 1.45 增加到 2, 相应地减小厚度, 保持同样的光程, 这表明折射率越高共振峰的线型越平。但是 (4) 式表明, 折射率越低 R_{\max} 越小。如果在共振反射器上镀上反射膜, 即等价于提高介质的折射率, 则反射峰很平而透射峰很锐, 利用这种透射频谱可以做出分辨率极高的选频器。

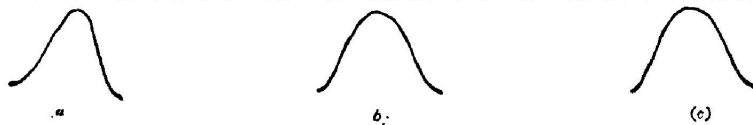


Fig. 3 Normalized line-shapes of resonant peaks with different types of degeneracy and refractive index

完全简并型共振反射器的频谱如图 4 所示,与多光束干涉的空间分布很相似,光学面的数目对应于光束的数目。

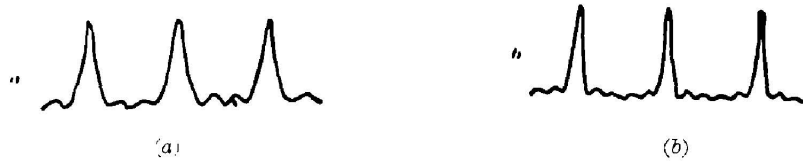


Fig. 4 Reflection spectra for completely degenerate type resonant reflectors
(a) two-slab structure, (b) three-slab structure

在图 1(a)中,要 l_1 和 l_3 的光程有微小的差别时,就会对光谱分布产生很大的影响,其中最大峰值反射率随差别量作周期性变化,如表 1 所示:

Table 1

difference $l_3(x)$	0	$\frac{\lambda}{16}$	$\frac{\lambda}{8}$	$\frac{\lambda}{4}$	$\frac{\lambda}{2}$	20λ	$20\frac{1}{4}\lambda$
max relative reflectivity	1	0.95	0.87	0.62	0.99	0.98	0.3

当差别量为 $\frac{\lambda}{4}$ 的奇数倍时最大反射率为极小值,偶数倍时为极大值。这就对简并型共振反射器的光学加工精度提出了要求。

非简并型:当各个区段的光程相差比较大的时候,频谱呈现明显的一层套一层的调制,如图 2(e)所示: T_1 受到 T_2 的调制,同时它们又受到了 T_3 包络的调制。三个明显的周期为

$$T_1 = 0.05 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \frac{1}{2l_2 + n(l_1 + l_3)} = 0.0505 \text{ cm}^{-1}; \quad (5)$$

$$T_2 = 0.33 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \frac{1}{n(l_1 + l_3)} = 0.335 \text{ cm}^{-1}; \quad (6)$$

$$T_3 = 2.5 \text{ cm}^{-1} \rightarrow \frac{1}{n(l_1 - l_3)} = 2.463 \text{ cm}^{-1}. \quad (7)$$

左边为测量值,右边为归纳出来的公式, $2n_2 + n(l_1 + l_3) \gg n(l_1 + l_3) \gg n(l_1 - l_3)$ 满足得越好,这组公式和计算结果也就符合得越好。在设计时,应使 T_3 为 T_2 、 T_2 为 T_1 的半整数倍。这样在相邻两个包络的中心就不能同时出现共振峰。图 1(c)中各区段的光程相差不大,故其频谱不呈现一层套一层的调制。但是图 1(d)中 l_4 的光程比其它的大得多,故其频谱为一个由 l_4 决定的小周期受到图 2(c)频谱的调制。

共振反射器的两个性质:

1. 正向传输和反向传输等价

证明:可以验证(1)式为么正矩阵,即: $M^+ = M^{-1}$ 。么正矩阵的乘积还是么正矩阵,故: $M^+ = M^{-1}$, 对于(3)式可以验证: $R(M) = R(M^+) = R(M^{-1})$, 即:

$$R(l_1, l_2, \dots, l_n) = R(l_n, l_{n-1}, \dots, l_1). \quad (8)$$

推论:对于频谱的周期规律也有:

$$T(l_1, l_2, \dots, l_n) = T(l_n, l_{n-1}, \dots, l_1), \quad (9)$$

(5)、(6)、(7)式满足了(9)式。

2. 放缩性质

(1)式中三角函数的变量为 $(2\pi\nu n_i l_i)$, 当 $l_i \rightarrow \alpha l_i$ 时, 则 $\alpha\nu$ 和原来 ν 的频谱完全一样, 即整个频谱扩展了 $\frac{1}{\alpha}$ 倍。

三、共振反射器的调谐实验

共振反射器的反射频谱比较复杂, 只要其中某个区段的光程改变 $\frac{\lambda}{4}$, 则频谱要发生很大的变化, 而光学加工总存在一定的误差。所以共振反射器的设计只能给出大致的频谱分布情况, 如图 2(d)、(e)的频谱, 在 Nd:YAG 的荧光谱线中心并不出现最大的反射峰。这样, 在使用共振反射器时一定要附加调谐和稳定措施。调谐的主要对象是大包络, 小周期共振峰的间隔比较小, 在荧光谱线中心邻近总会出现。

微调图 1(a)的间距 l_2 , $l_2 \rightarrow l_2 + \Delta l_2$ 。图 5 为这个过程的计算机解。随着 Δl_2 的增加包络往左移而共振峰的位置不动。

实验装置如图 6 所示, 腔长为 80 cm; 两个 $\frac{\lambda}{4}$ 波片和布鲁斯特角用来消除空间烧孔效应; PZT₁用来微调 l_2 ; PZT₂用来微调腔长, 使纵模频率和共振反射峰重合; 采用每秒钟 5 次的重复率脉冲泵浦源, 脉宽为 20 μ s, 系统工作在阈值附近; F-P 干涉仪的光学厚度为 3 mm。

连续改变 PZT₁ 的电压, 可以观察到 10 个分立的光谱。图 7 为对这 10 个光谱叠拍的照片。图 8 为此照片的黑度计扫描曲线。测得各相邻干涉环的频率间隔基本上相等并等于共振峰之间的间隔。说明小周期共振峰的周期和位置由 l_1 或 l_3 决定, 与间隔 l_2 无关, 大包络的周期和位置由 l_2 决定, 和 l_1 或 l_3 无关, 可以通过微调 l_2 达到调谐的目的, 这和计算的结果一致。把各个干涉环从小到大按①~⑩编号, 改变 PZT₁ 的电压, 从 0 增加到 370 V, 每隔 10 V 拍一张照片, 如图 9 所示。为了方便把图 9 列于表 2。

刚开始时第(7)环重复出现 7 次, 这是 PZT 的电滞效应的原因; 在 150 V 的地方两个共

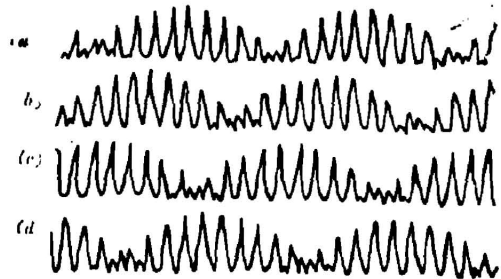


Fig. 5 Variation in spectrum when a resonant reflector is tuned.

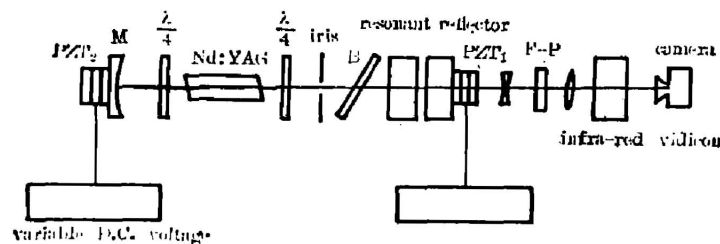


Fig. 6 Experimental setup of a tunable single axial mode laser with a tuned resonant reflector. The length of the cavity, 80 cm, is finely tuned by PZT₂; the resonant reflector is tuned by PZT₁

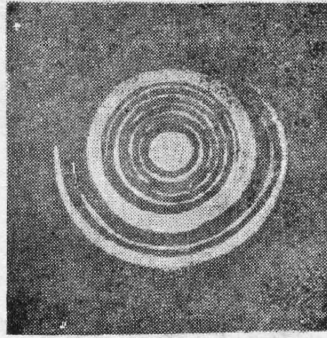


Fig. 7 Discrete output spectra of the laser by continuously adjusting the voltage on PZT₂. The optical thickness of the F-P interferometer is 3 mm



Fig. 8 Densitometric curve of the photograph in Fig. 7

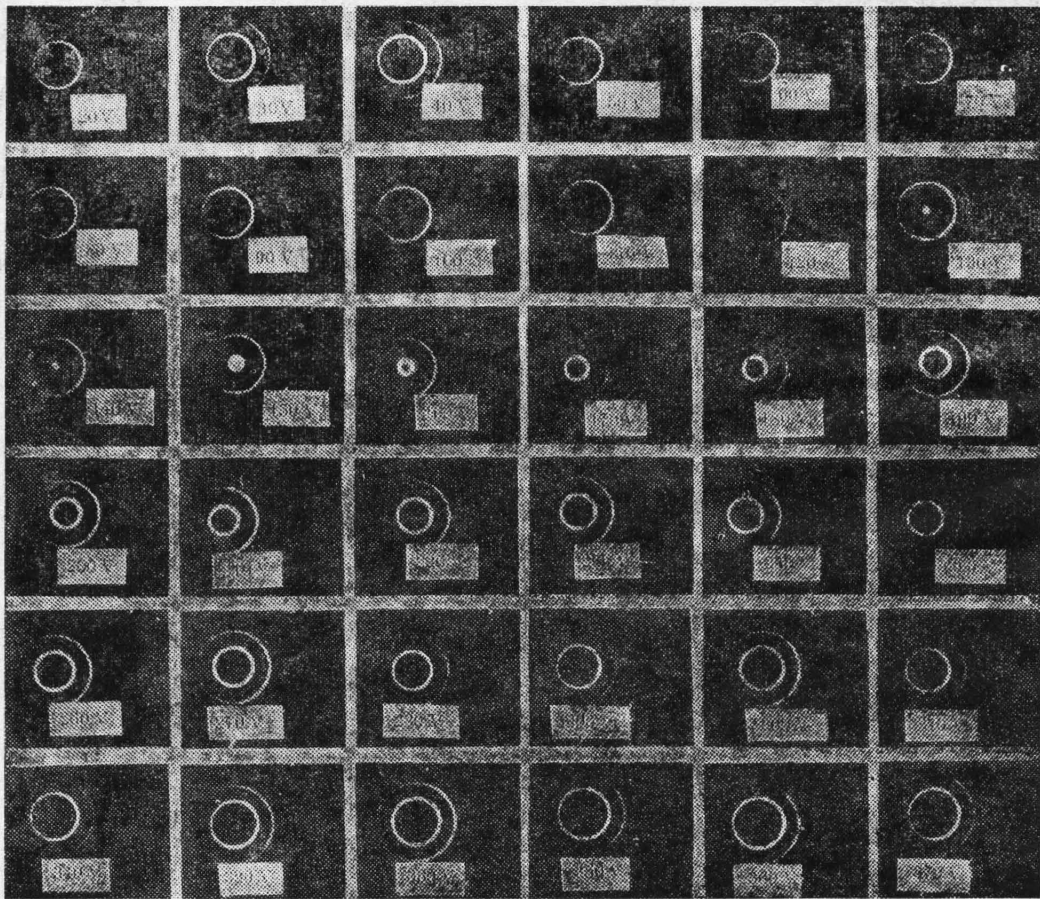


Fig. 9 A series of output spectra of the laser with the voltage on PZT₂ changed by step of 10 V

Table 2

range of voltage(V)	0 ~60	70 ~90	100 ~120	130 ~140	150	160	170 ~180	190 ~210	220 ~250	260 ~280	290 ~310	320 ~340	350 ~370
interference pattern	⑦	⑧	⑨	⑩	⑩①	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
repetition rate	7	4	3	2	1	1	2	3	4	3	3	3	3

振峰同时振荡或交替振荡,这是因为两个相邻的大包络对称地置于介质荧光谱线的两边,这时系统的阈值最高。

调节 PZT₂ 使激光腔的纵模频率位于共振反射峰中心,用 75 mm 长的标准具观察到了单纵模光谱。

华北电力所孙云龙同志为此项工作提出了宝贵的意见,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] M. Born, E. Wolf; *Principles of Optics*, Second ed.
 [2] D. J. Kuizenga; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1964.
 [3] A. L. Egorov, V. V. Korobkin *et al.*; *Sov. J. Q. E.*, 1975, **5**, No. 3 (Mar), 291.

Optical resonant reflectors and their application in laser technique

ZHU ZHIMING, CHEN SHAOHE, CHEN QINHAO, CAO WELLOU AND DENG XIMING
 (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 25 April 1985; revised 31 May 1985)

Abstract

Reflection spectra of resonant reflectors have been solved on a computer. They can be divided into two types: degenerate and non-degenerate. Line shapes of resonant peaks, modulability of envelopes, characteristics of periodic spectra and two relevant properties are discussed in detail. The single axial mode operation in a tuning range of 2Å has been obtained with a PZT tuned resonant reflector. This work provides a background for designing resonant reflectors.