

# 三片光学共振反射器及其设计中的若干问题

何伟明 陈绍和 龙南昌 邓锡铭

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

本文分析了共振反射器系统的调制特性,重点分析了简并型共振反射器的各区段光程间的偏差对频率调制的影响,以及各光学面相对不平行产生的空间调制,从而提出了对共振反射器的高精度设计要求及其解决方法。对非简并型共振反射器也作了讨论。

关键词: 三片光学共振反射器;非简并共振反射器。

共振反射器和 F-P 标准具均可用作激光器的选频器。F-P 标准具是倾斜地插入腔内,通过调角来选频的,这样势必带来较大腔损耗,而且在某些场合 F-P 标准具难以做得很薄。而共振反射器可直接用作腔片,通过调节空气隙来选频,其损耗小,选择性更好。迄今已成功地用它来压窄带宽,产生调 Q 单纵模脉冲<sup>[1~3]</sup>和调谐锁模脉冲<sup>[4]</sup>。本文讨论设计共振反射器中存在严重影响调制质量的一些问题,如共振反射器各区段光程的厚差、各光学面的相对不平行等。系统地研究了简并型共振反射器,并将结论推广到一般情形。

## 一、共振反射器频率调制特性

对于一共振反射器系统,各区段光的传播由传输矩阵表示<sup>[5]</sup>:

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos \beta_j & -\frac{i}{P_j} \sin \beta_j \\ -iP_j \sin \beta_j & \cos \beta_j \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中  $\beta_j = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_j L_j \cos \theta_j$ ,  $n_j L_j$ ,  $\theta_j$  分别为各区段的光程和偏离光轴的角度,  $\lambda_0$  是真空中波长。 $P_j = n_j \cos \theta_j$ 。整个系统的传输矩阵为:

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

光强反射率为:

$$R(\lambda) = \frac{(m_{11}P_0 - m_{22}P_i)^2 + (m_{12}P_i \cdot P_0 - m_{21})^2}{(m_{11}P_0 + m_{22}P_i)^2 + (m_{12}P_i P_0 + m_{21})^2}, \quad (3)$$

$P_0$ 、 $P_i$  为共振反射器系统两端外部介质的参数,如放在空气中,则  $P_0 = P_i = \cos \theta_0$ 。

文献[5]已对二片共振反射器的频率调制特性作了较深入的研究。一般来说共振反射器的调制是相当复杂的, 很难寻求其一般规律, 但是简并型共振反射器具有很好的规律性, 通过计算机的计算、画图我们将其归纳为如下几点:

1. 若  $L_1=L_3=L_5=\dots$ ,  $L_2=L_4=\dots$  则称之为简并型共振反射器。如果光程  $nL_1$ 、 $nL_2$  相差两倍以上, 那么系统中光程最小的区段决定简并包络, 光程最大的区段决定简并小峰。

2. 简并包络的简并度越高, 包络调制越深; 同样简并小峰的简并度越高, 小峰越锐。小峰间的次小峰数为小峰简并度减 1。提高腔片折射率或腔片表面镀以增反膜, 均能使反射小峰变高、变平坦、透射峰则变锐。

3. 小角度斜入射相当于有效折射率变小, 频率调制曲线平移。

4. 若  $L_1$ 、 $L_2$  接近, 且  $|nL_1-L_2| < nL_1$  或  $< L_2$ , 则大包围由光程差  $|nL_1-L_2|$  决定。图 1(a) 为这种情形, 其包络周期  $1.34 \text{ \AA}$ , 已经考虑了腔片间  $0.2 \mu\text{m}$  的厚差。利用第 3 点, 通过小角度转角以及调节空气隙使曲线小峰与包络整体地移动, 用 He-Ne 激光照射, 测量其反射率, 图 1(b) 为我们测得的实验点对理论曲线的拟合曲线。

5. 对于各区段光程不等的非简并型共振反射器, 调制十分复杂, 如图 2。对于二片的共振反射器在:

$2L_2+n(L_1+L_3) \gg n(L_1-L_3) \gg n|L_1-L_3|$  时, 三个可能调制周期为<sup>[5]</sup>:

$$T_1 = \frac{1}{2L_2+n(L_1+L_3)},$$

$$T_2 = \frac{1}{n(L_1+L_3)},$$

$$T_3 = \frac{1}{2n|L_1-L_3|}.$$

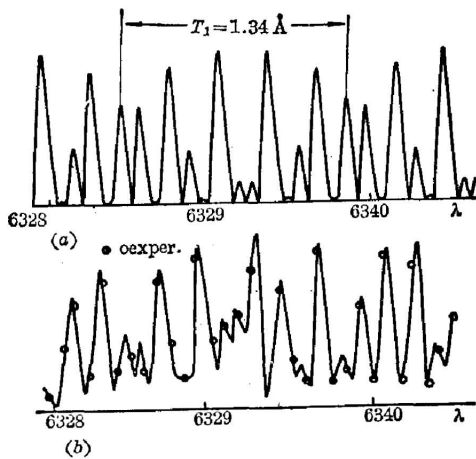


Fig. 1 Reflection spectra of resonant reflector with two glass plates for  $L_1 \approx L_2$ :  $L_1=5.15\text{mm}$ ,  $L_2=6\text{mm}$   $L_3=L_1+0.2\mu\text{m}$

(a) theoretical spectra  
(b) experimental spectra

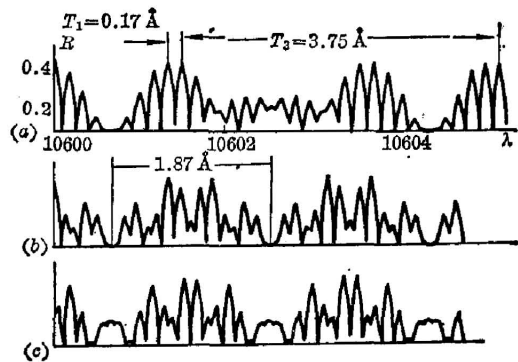


Fig. 2 Reflection spectra of non-degenerate types

(a)  $L_1=2\text{mm}$ ,  $L_2=30\text{mm}$ ,  $L_3=3\text{mm}$   
(b)  $L_1=2\text{mm}$ ,  $L_2=30\text{mm}$ ,  $L_3=8\text{mm}$   
(c) As in (b) but  $L_3$  increased by  $\lambda/6$

## 二、共振反射器各区段光程间的偏差对频率调制的影响

对(3)式就垂直入射计算了各种情形下的  $R(\lambda)$ , 多片简并型共振反射器具有多重包络:

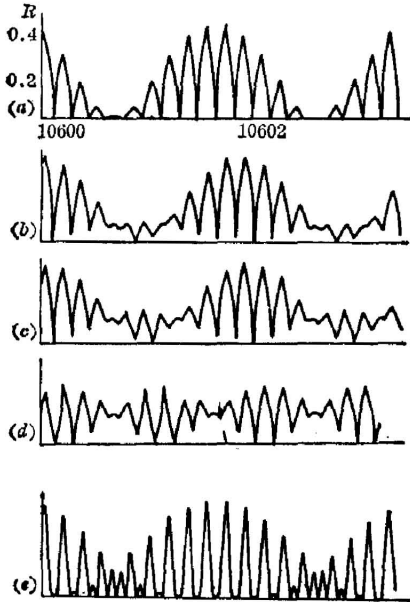


Fig. 3 Reflection spectra of resonant reflector with two glass plates under the influence of slight difference between two plates thickness

- (a)  $L_1=L_3=2\text{ mm}$ ,  $L_2=30\text{ mm}$   
 (b), (c), (d) As in (a) but  $nL_2$  increased by  $\lambda/8, \lambda/6$  and  $\lambda/4$  respectively  
 (e)  $L_1=L_3=20\text{ mm}$ ,  $L_2=3\text{ mm}$

一个小峰简并包络、若若干个次小峰包络。对于简并包络的简并度大于简并小峰的简并度情形, 此共振反射器调制简并包络与各次小峰包络同相位, 反之则反相位。现分别讨论之。

1. 共振反射器的频率调制对决定简并包络的区段光程间的偏差十分灵敏。随着偏差的增大, 简并包络峰值下降, 次小峰包络上升, 片数越多, 次小峰包络上升得越快, 简并包络下降得越慢。对于简并包络简并度大于小峰简并度情形, 由于简并包络与次小峰包络移动的速度不同, 使得包络谷起伏变大, 包络调制度迅速变小。图 3 为二片共振反射器的调制, 在  $n\Delta d = \frac{\lambda}{4}$  时, 调制变得最坏, (其中  $\Delta d$  为腔片间厚差), 此时包络峰值从 44.5% 下降到 27%, 简并包络周期也变成一半。在  $n\Delta d = \frac{\lambda}{2}$  时, 变化呈一个周期。为使简并度下降较小, 一般要求  $n\Delta d \leq \frac{\lambda}{8}$ 。三片调制的包络峰由二片的 44.5% 增加到 70%, 如果要求相同的包络调制度允许值, 腔片间厚差必须:  $n\Delta d < \frac{\lambda}{6}$ 。

对于简并包络简并度小于简并小峰简并度情形, 偏差并不影响包络与次小峰包络的相位关系, 它们以同一速度移动, 但是由于次小峰包络峰刚好处于简并包络谷, 它的迅速上升会严重影响简并包络的调制度。与由空气隙决定简并小峰的三片调制相比, 由腔片决定简并小峰的三片调制, 及相同的光程差下, 调制度不到前者的一半, 因此要求空气隙的厚差  $\Delta d < \frac{\lambda}{9}$ 。对于空气隙, 能通过压电陶瓷调节, 一般能达到较高的匹配精度。但是由于温度的变化很难保持其稳定性<sup>[6]</sup>, 因此必须保持恒温以提高稳定性。

对于仅利用小峰情形, 厚差允许值可适当放宽, 尤其是对多片共振反射器, 厚差对包络峰影响不是很大。

2. 决定简并小峰的区段间的偏差主要影响包络峰值, 而包络谷值几乎不变。对于包络简并度大于小峰简并度情形, 随着偏差的增大, 次小峰包络迅速升高, 最后达到几乎和小峰相同高度, 对于包络简并度小于小峰简并度情形, 次小峰包络并不增高, 但次小峰包络谷则随偏差的增加而升高, 最后几乎与小峰等高, 此时次小峰包络谷成为包络峰。二片和三片

的调制包络峰及包络谷随着决定小峰的区段间的光程差的相对变化值列于表 1~3。据此我们可根据实际需要对手差提出要求,若我们要求包络峰变化小于 10%,则腔片要求厚差小于  $\frac{\lambda}{12}$ ,空气隙厚差小于  $\lambda/6$ 。

Table 1  $nL_1=30\text{mm}, L_2=3\text{mm}, nL_3=nL_1+n\Delta d$

difference $n\Delta d$	0	$\frac{3}{40}\lambda$	$\frac{1}{10}\lambda$	$\frac{1}{8}\lambda$	$\frac{1}{6}\lambda$	$\frac{1}{4}\lambda$	$\frac{3}{8}\lambda$	$\frac{1}{2}\lambda$	$\frac{9}{4}\lambda$	$\frac{10}{4}\lambda$
max relative reflectivity	1	0.97	0.94	0.91	0.82	0.62	0.90	1	0.62	1
min relative reflectivity	1	0.97	1	0.98	1.04	1.16	1.01	1	1.17	1

Table 2  $nL_1=nL_3=30\text{mm}, L_2=L_4=3\text{mm}, nL_5=nL_1+n\Delta d$

difference $n\Delta d$	0	$\frac{3}{40}\lambda$	$\frac{1}{10}\lambda$	$\frac{1}{8}\lambda$	$\frac{1}{6}\lambda$	$\frac{1}{4}\lambda$	$\frac{3}{8}\lambda$	$\frac{1}{2}\lambda$	$\frac{9}{4}\lambda$	$\frac{10}{4}\lambda$
max relative reflectivity	1	0.97	0.96	0.94	0.86	0.69	0.92	1	0.69	1
min relative reflectivity	1	1	1.03	1.02	1.04	1.19	0.97	1	1.19	1

Table 3  $nL_1=nL_3=nL_5, L_2=30\text{mm}, L_4=L_2+\Delta d$

difference $\Delta d$	0	$\frac{1}{8}\lambda$	$\frac{1}{6}\lambda$	$\frac{1}{4}\lambda$	$\frac{1}{3}\lambda$	$\frac{1}{2}\lambda$				
max relative reflectivity	1	0.95	0.90	0.76	0.89	1				

从以上分析知道,简并型共振反射器对腔片匹配的精度要求是较高的,但通过切片方法容易达到此要求。找一片平行度在  $1''$  以下的平面片子,测出其平面干涉条纹方向(或用其它方法测两面倾斜方向),如图 4,垂直于条纹切割、对称相对折合后,对所用光斑范围内腔片间的厚差可达到很小。

对非简并型共振反射器,由于简并的消失,腔片或空气隙的偏值仅仅改变小峰结构或平移包络,如图 2(b)、(c)。因此如果仅使用小峰,对包络无要求,则采用非简并型是合适的<sup>[1]</sup>,虽然小峰没有简并型那么陡,但它对各区段光程要求不高,从而使用方便。

腔片单面度对频率调制的影响可归诸于厚差的影响。

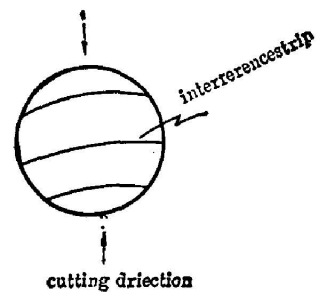


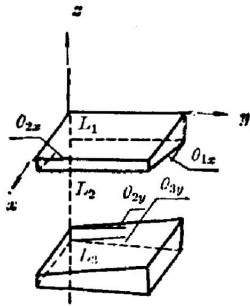
Fig. 4 Cutting the plate

### 三、共振反射器各光学面相对不平行产生空间调制

如图 5 所示,共振反射器腔片及空气隙的不平行使得(1)式中的  $L_j$  为  $x, y$  的函数,我们将第一光学面决定为  $xy$  面,则:

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= -\theta_{x1} \cdot x - \theta_{y1} \cdot y + L_{10} \\ L_2 &= (\theta_{x1} - \theta_{x2}) \cdot x + (\theta_{y1} - \theta_{y2}) \cdot y + L_{20} \\ L_3 &= (\theta_{x2} - \theta_{x3}) \cdot x + (\theta_{y2} - \theta_{y3}) \cdot y + L_{30} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中  $L_{j0}$  为第  $i+1$  面在  $z$  轴上的截距,  $\theta_{xj}, \theta_{yj}$  为第  $j+1$  面与  $xz, yz$  平面的交线与  $x, y$  轴



的交角。一般地,  $\theta_{xj}, \theta_{yj}$  为秒的量级, 我们仍定为垂直入射, 由于  $\theta_{xj}, \theta_{yj}$  很小, 认为  $\cos \theta_{xj} = \cos \theta_{yj} = 1$ 。光学面的相对不平行, 会产生空间干涉调制, 严重影响光斑质量。为方便起见, 将

Fig. 5 Relative positioning of glass plates

腔片相对放置方式用矩阵  $\begin{pmatrix} \theta_{x1} & \theta_{y1} \\ \theta_{x2} & \theta_{y2} \\ \theta_{x3} & \theta_{y3} \\ \vdots & \vdots \end{pmatrix}$  来表示, 图 6(a)、(b) 是在

一个方向上用计算以方式  $\begin{pmatrix} 12 & 0 \\ 0 & 13 \\ 12 & 13 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 12 & 0 \\ 65 & 0 \\ 77 & 0 \end{pmatrix}$  画的反射光强分

布曲线, 图 6(c)、(d) 为对平行度为  $12''$  的腔片以上述方式放置所摄得的反射光斑在某一方向的

黑度分布。由于腔片放置方式的多样性, 空间调制是相当复杂的, 通过画图比较, 以方式

$\begin{pmatrix} \theta_{x1} & 0 \\ \theta_{x2} & 0 \\ \theta_{x2} - \theta_{x1} & 0 \end{pmatrix}$  放置的二片空间调制曲线最为平坦。然而腔片切割后倒转相对放置会带来

腔片间的厚差, 影响频率调制质量, 但只要腔片平行度足够高(如  $< \pm 1''$ ), 由此带来的厚差是非常小的。另一方面, 如果  $L_{10}, L_{30} \dots$  有一厚差也会使得空间调制曲线移动, 但这种移动也

是较小的。如图 7(a) I、II 线分别是二片的共振反射器在  $\begin{pmatrix} 0.2 & 0 \\ 2 & 0 \\ 1.8 & 0 \end{pmatrix}$  原点厚差为  $0, 0.05 \mu\text{m}$  下的空间调制曲线。曲线移动量较小, 而在上述方式下,  $< 0.05 \mu\text{m}$  的厚差是很容易满足的。图 7(a)~(d) 是不同腔片平行度和空气隙平行度下的空间调制曲线, 可见在腔片平行度接近于空气隙平行度时, 调制曲线较为平坦, 在腔片平行度远小于空气隙平行度时, 提高腔片平行度并不能改善曲线平坦程度。对于波长有一  $\Delta\lambda$  移动, 空间调制曲线也随之移动, 因此实际设计中应考虑在频带宽度内, 保证各频率的反射空间均匀, 一般要求空间调制曲线峰值的 90% 范围应是所用光斑直径的 10 倍, 以保证光斑内各频率光强起伏  $< 1\%$ 。根据曲线 (f), 我们要求腔片平行度应  $< 0.5''$ 。空气隙平行度  $< 1''$ 。对于所用频宽很窄情形, 此条件可适当放宽<sup>[2]</sup>。图 7(e) 为三片共振反射器的空间调制, 其参数与图 7(b) 相同。由于峰

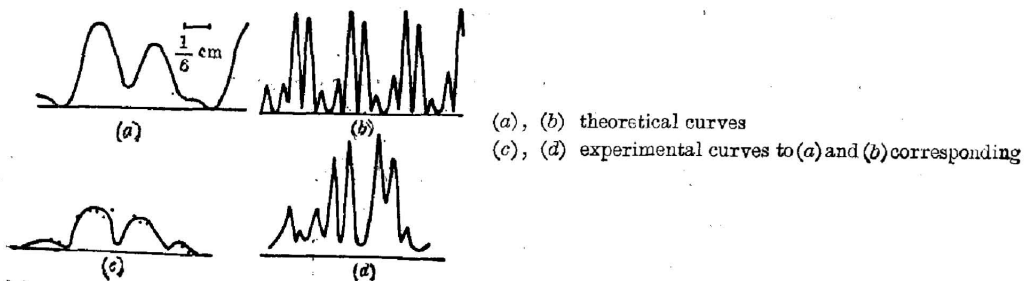


Fig. 6 Reflection space spectra in Fig. 9(a), (b) in one direction

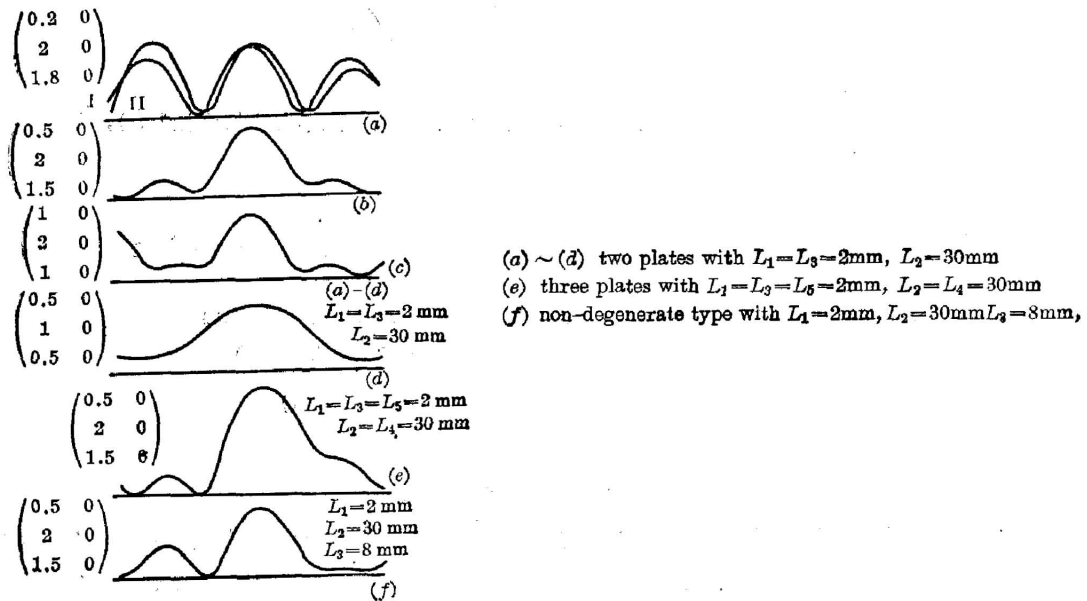


Fig. 7 Reflection space spectra for various parameters of type

$$\begin{pmatrix} \theta_{x1} & 0 \\ \theta_{x2} & 0 \\ \theta_{x3} & 0 \\ \vdots & \vdots \end{pmatrix}$$

值的提高,其陡度相对增大,因此三片以上的共振反射器系统对各光学面间的平行度要求应稍高些。

空间调制的分布与各区段光程关系不大,主要决定于各光学面的相对平行度。图 7(f) 为非简并型的空间调制,与图 7(b) 是基本相同的,因此简并型共振反射器对平行度的要求适用于非简并型。

平面度对空间调制的影响也可归诸于平行度、厚差的作用。

使用压电陶瓷调节的共振反射器,压电陶瓷必须具有良好的均匀伸展性;空气隙平行度要求较高,对调整架也提出了高精度要求。

#### 四、结 束 语

简并型共振反射器对腔片间厚差及平行度要求是较高的,但是通过切片方法还是能够达到的。空气隙平行度可用 1" 的平行光管检测,或用海丁格干涉仪原理测量。系统必须保持恒温以提高稳定性。

感谢余文炎研究员的有益讨论。

#### 参 考 文 献

- [1] Dirk J. Kuizenga; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 9 (Sep), 1694~1708.  
 [2] A. L. Egorov *et al.*; *Sov. J. Q. E.*, 1975, **5**, No. 3 (Mar), 291~293.

- [ 3 ] M. Hercher; *Appl. Phys. Lett.*, 1965, **7**, No. 2(Jul), 39~41.  
[ 4 ] L. A. Lompre *et al.*; *J. of Appl. Phys.*, 1977, **48**, No. 4(Apr), 1570~1575.  
[ 5 ] 朱智敏等;《光学学报》,1986, **6**, No. 1(Jan), 6~11.  
[ 6 ] John B. Shan *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1977, **QE-63**, No. 12(Dec), 950~954.  
[ 7 ] M. Born, E. Wolf;“*Principles of Optics*”, (second ed.), 58;《光学原理》, (科学出版社,北京,1978), 86.

## Three-plate optical resonant reflectors and their design

HE WEIMING, CHEN SHAOHE, YOU NANGCHANG AND DENG XIMING  
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 30 December 1986; revised 23 February 1987)

### Abstract

This paper describes characteristics of frequency and space reflection spectra of multiplate resonant reflectors. We mainly analyse the effects of thicknesses of glass and air gap on reflection spectra and the space reflection spectra due to each optical plane not being parallel in the degenerate resonant reflectors. The requirements for designing the resonant reflectors are provided and some methods to solve the problems are shown. Non-degenerate resonant reflectors are also discussed.

**Key Words:** Three-plate resonant reflectors; Nondegenerate resonant reflectors.