

三界面激光谐振反射器特性研究

邱文法 颜 旻 范琦康

(浙江大学光仪系, 杭州)

摘要: 本文应用薄膜光学的特征矩阵法计算三界面谐振反射器的特性, 给出了用于全息红宝石双脉冲激光器的镀膜三界面谐振反射特性和温度调谐特性曲线, 并对其作出了深入的研究。

Study on three-surface laser resonant reflector's characteristics

Qiu Wenfa, Yan Min, Fan Qikang

(Department of Optical Instrument, Zhejiang University)

Abstract: The characteristic matrix in thinfilm optics is used in studying three-surface resonant reflector. "Reflectance-wavelength" curve and temperature scanning curves are deduced for coated three-surface reflector used in holographic double-pulsed ruby laser. The characteristic of the coated three-surface resonant reflector is studied in details.

一、引言

作为激光器中常用的选模装置, 多界面谐振反射器比内插F-P标准具选模装置有许多优越性, 尽管从原理上讲它与F-P标准具类似, 都是利用多层反射面的相干干涉, 但谐振反射器是利用其反射率特性, 既起选模作用又兼作输出反射镜, 它消除了内插F-P标准具所造成的插入损耗^[1]。

多界面谐振反射器的特性早有人对它进行了研究, 提出了许多应用装置, 有四界面^[2], 六界面, 甚至更多界面的谐振反射器^[3], 也有两界面镀膜的蓝宝石谐振反射器^[4]。多界面谐振反射器(四界面以上)因其要求组合的平晶厚度必须严格相等, 这必然造成工艺加工和应用上的困难。平晶的厚度误差对系统组合反射率特性的影响是极其严重的, 并且还影响到系统的温度敏感性, 给温度调谐带来困难。两界面谐振反射器则因为其反射率峰的波宽很

大，没有次级峰结构而使它的选模能力受到限制。三界面谐振反射器则能很好地解决上述问题，虽然结构类似于四界面谐振反射器，也是由两块平晶中间用隔圈分开一定空气间隔组成，但因为它的一个界面镀了完善的减反射膜而在干涉中不起作用，所以两块平晶就不存在严格等厚的要求了。本文对应用于全息红宝石双脉冲激光器中用普通材料（K₂O玻璃）平晶构成的三界面谐振反射器的反射特性和温度调谐特性作出了较深入细致的研究。

二、未镀膜三界面谐振反射器的特性

我们设计的三界面谐振反射器结构如图1所示，由两块K₂O玻璃平晶构成，中间用隔圈分开一定厚度的空气间隔，最后一个界面镀了一层完善的减反膜，如图中虚线所标示的面，参与反射和相干干涉的只有1、2、3这三个界面了，因此后块平晶的厚度也就无关紧要了。

我们选用了常见的K₂O玻璃作为组合平晶的材料，其折射率为 $n = 1.5163$ ($\lambda_0 = 6943 \text{ \AA}$)。隔圈选用线性膨胀系数较小的石英玻璃。为便于计算，选取平晶厚度为 $h = 2.5 \text{ mm}$ ，空气间隔圈厚度为 $H = 20 \text{ mm}$ 。

对于不镀膜三界面谐振反射器，其组合反射率最大值可用下述公式估算：

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

式中， n 为组合平晶的折射率； N 为总的界面数。三界面谐振反射器 $N = 3$ ，组合平晶用K₂O玻璃时其最大组合反射率为 $R_{\max} \approx 0.30$ 。即使用高折射率的蓝宝石平晶组成的未镀膜三界面谐振反射器，其最大组合反射率也只有0.4左右，显然这对于低增益的全息红宝石双脉冲激光器是无法提供最佳耦合输出率的。

三界面谐振反射器的反射率特性可以用它的“反射率-波长”分布曲线来表示，对于未镀膜三界面谐振反射器，文献[5]中提出用反射光波矢量叠加法计算，并给出了由蓝宝石平晶组成的三界面谐振反射器的反射率特性曲线。但是这种方法的计算误差较大，这在有关四界面谐振反射器特性的文献[2]中已有详述。我们采用薄膜光学的特征矩阵法进行计算。

运用薄膜光学的方法^[6,7]，入射总光场 (E_3, H_3) 与出射总光场 (E_0, H_0) (如图1所示) 可用下述等式相关联：

$$\begin{pmatrix} E_3 \\ H_3 \end{pmatrix} = M_T \begin{pmatrix} E_0 \\ H_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

M_T 为系统的特征矩阵，对于图1所示的三界面谐振反射器， M_T 可写为：

$$M_T = \prod_{j=1}^2 \begin{pmatrix} \cos g_j & -\frac{i}{n_j} \sin g_j \\ -in_j \sin g_j & \cos g_j \end{pmatrix} = M_1 \cdot M_2 = \begin{pmatrix} a & -ib \\ -ic & d \end{pmatrix} \quad (3)$$

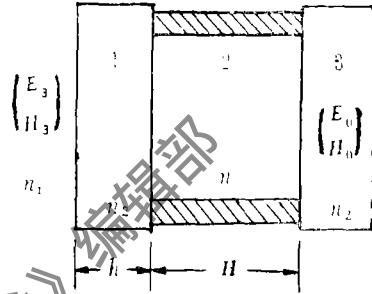


图1 三界面谐振反射器结构示意图

$$n_1 = 1.0 \quad n_2 = n$$

式中, $g_j = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_j h_j$; $h_1 = H$; $h_2 = h$ 。

根据入射场、出射场的定义^[9]可得出组合反射率表达式如下:

$$R = \frac{(a - \frac{n_2}{n_1}d)^2 + (n_2b - \frac{1}{n_1}c)^2}{(a + \frac{n_2}{n_1}d)^2 + (n_2b - \frac{1}{n_1}c)^2} \quad (4)$$

在IBM PC/AT计算机上以 0.005 \AA 为步长, 计算从 6942.2 \AA 到 6943.8 \AA 的 R 值, 并输入作图软件得到未镀膜的三界面谐振反射器的“反射率-波长”分布曲线如图2所示, 从图中

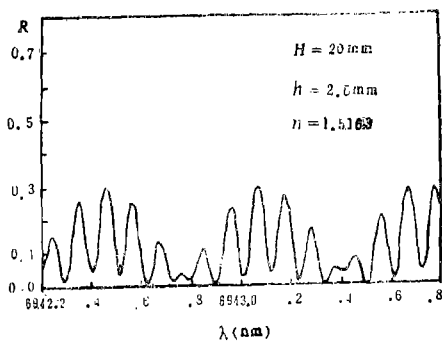


图2 未镀膜三界面谐振反射器“ $R-\lambda$ ”曲线

可以看出组合反射率最大值约 0.3 , 与由公式(1)得出的估算值一致。从图中还可以看出三界面谐振反射器的反射率特性曲线类似于四界面, 不仅具有固有周期, 即“细结构”的反射率峰, 也具有约束“细结构”的包络周期, 即“粗结构”。测得粗结构周期为 $\Delta\lambda_1 \approx 0.61 \text{ \AA}$, 而用平晶光学厚度近似估算得粗结构周期为 $\Delta\lambda_1' = \lambda_0^2 / 2nh \approx 0.63 \text{ \AA}$, 二者基本一致, 细结构周期测得值为 $\Delta\lambda_2 \approx 0.10 \text{ \AA}$, 用反射器总光学厚度 $(n \cdot h + H)$ 估算细结构周期得 $\Delta\lambda_2' = \lambda_0^2 / [2(n \cdot h + H)] \approx 0.10 \text{ \AA}$, 二者也是一致的。粗、细结构周期决定了三界面谐振反射器的选模特性^[1,9], 为了保证在激光工作物质的荧光宽范围内有足够大的反射率极大的频谱间隔, 使激光作用仅在一个峰上出现, 必须保证粗结构周期有一定宽度, 一般要使粗结构周期大于或等于荧光宽。细结构周期宽度则决定了选取模式数的多少, 对于某些相干性要求高的激光器, 如全息用的双脉冲红宝石激光器, 要求选单纵模, 这就要求细结构周期足够小, 一般要使细结构周期小于或等于激光器腔纵模间隔, 并且要保证只有一个细结构峰处在粗结构峰的最大值处。

改变组合平晶厚度或空气间隔会使粗、细结构周期发生变化, 但却不会影响其组合反射率的最大值。如图3所示为 H 变成 30 mm 其它参数不变时的“反射率-波长”分布曲线, 很明显地可以看到细结构周期改变了, 但反射率峰极大值没变。可见, 三界面谐振反射器的最大组合反射率只取决于平晶材料的折射率而和其它参数无关。因此, 为了提高三界面谐振反射器的组合反射率, 必须给三个反射界面镀上一定反射率的增反膜。

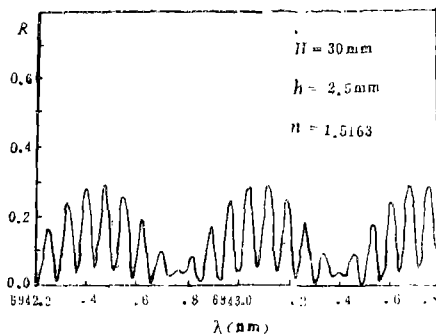


图3 未镀膜三界面反射器“ $R-\lambda$ ”曲线

三、镀膜三界面谐振反射器的反射率特性

为计算方便起见，我们将三个反射界面上所镀的膜层简化为单层增反膜，如 $n=1.70$ 、厚度为 $\lambda_0/4$ 的单层膜，即可使每一反射界面得到 $R_i=0.1$ 的单面反射率（未镀膜时单面反射率为 $R_i \approx 0.04$ ），镀膜三界面谐振反射器的反射率特性也可用薄膜光学的特征矩阵法计算，并且可以沿用前述未镀膜三界面谐振反射器的运算过程。只要在未镀膜的三界面谐振反射器的特征矩阵表达式中插入三个所镀膜层的特征矩阵，即可以得到镀膜后三界面谐振反射器的特征矩阵：

$$M_{\tau}^* = M_0 M_1 M_0 M_2 M_0 = \begin{pmatrix} a^* & -ib^* \\ -ic^* & d^* \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中， M_0 为所镀单层增反膜的特征矩阵，

$$M_0 = \begin{pmatrix} \cos g_0 & -\frac{i}{n_0} \sin g_0 \\ -in_0 \sin g_0 & \cos g_0 \end{pmatrix} \quad g_0 = \frac{\pi}{2} - n_0$$

组合反射率的表达式同（4）式，只须将式中的 a, b, c, d 代以 a^*, b^*, c^*, d^* 。在计

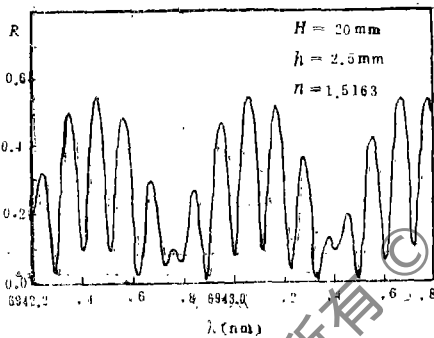


图4 镀膜三界面反射器“ $R-\lambda$ ”曲线

算机上运算并作出“反射率-波长”分布曲线，如图4所示，其组合反射率峰值为0.56，显然可以满足低增益的全息双脉冲红宝石激光器的应用要求。由图4以及上机计算结果分析可以得出，镀膜对“ $R-\lambda$ ”曲线的粗、细结构周期影响很小，仍能得出粗、细结构周期分别约为 $\Delta\lambda_1 \approx 0.61 \text{ \AA}$ ， $\Delta\lambda_2 \approx 0.10 \text{ \AA}$ 。由此可知镀膜对器件的选模性能影响很小，而大大提高了其组合反射率，使镀膜三界面谐振反射器足以提供最佳耦合输出率。

四、镀膜三界面谐振反射器的温度调节性能

谐振反射器因为兼作输出反射镜，不能象内插式F-P标准具那样，可以通过微调其对光轴倾角使反射率峰与激光工作物质的增益带宽中心频率相吻合并实现小范围的频率调谐。因此只能试图通过温度控制以改变 H 和 nh ，实现对反射率曲线的波长扫描。

设 K_0 玻璃平晶和石英玻璃隔圈的线性膨胀系数分别为 α_h, α_H ，平晶的折射率温度增量为 β_h ，空气层的折射率温度增量为 β_H ，温度控制使 n_1, n_2, h, H 均为温度的函数。

$$\begin{cases} n_1(T) = n_1 + \Delta T \cdot \beta_H \\ n_2(T) = n_2 + \Delta T \cdot \beta_h \\ h(T) = h + \Delta T \cdot \alpha_h \\ H(T) = H + \Delta T \cdot \alpha_H \end{cases} \quad (6)$$

我们先用近似方法估算三界面谐振反射器的温度敏感性。由于影响粗结构周期的主要参数为 $n_2 h$ ，可以粗略地认为在 $\Delta(n_2 h) = \lambda_0/2$ 时粗结构移动一个周期，所需温度调节量为 $\Delta T_1 = \lambda_0/[2h(\beta_h + n_2 h)] \approx 10.3^\circ\text{C}$ ，而细结构周期主要取决于 $(n_2 h + H)$ ， $n_2 h + H$ 变化 $\lambda_0/2$ 时频移一个周期，此时所需温度调节量为 $\Delta T_2 = \lambda_0/\{2[h(\beta_h + n_2 \cdot \alpha_h) + Ha_H]\} \approx 9.1^\circ\text{C}$ 。

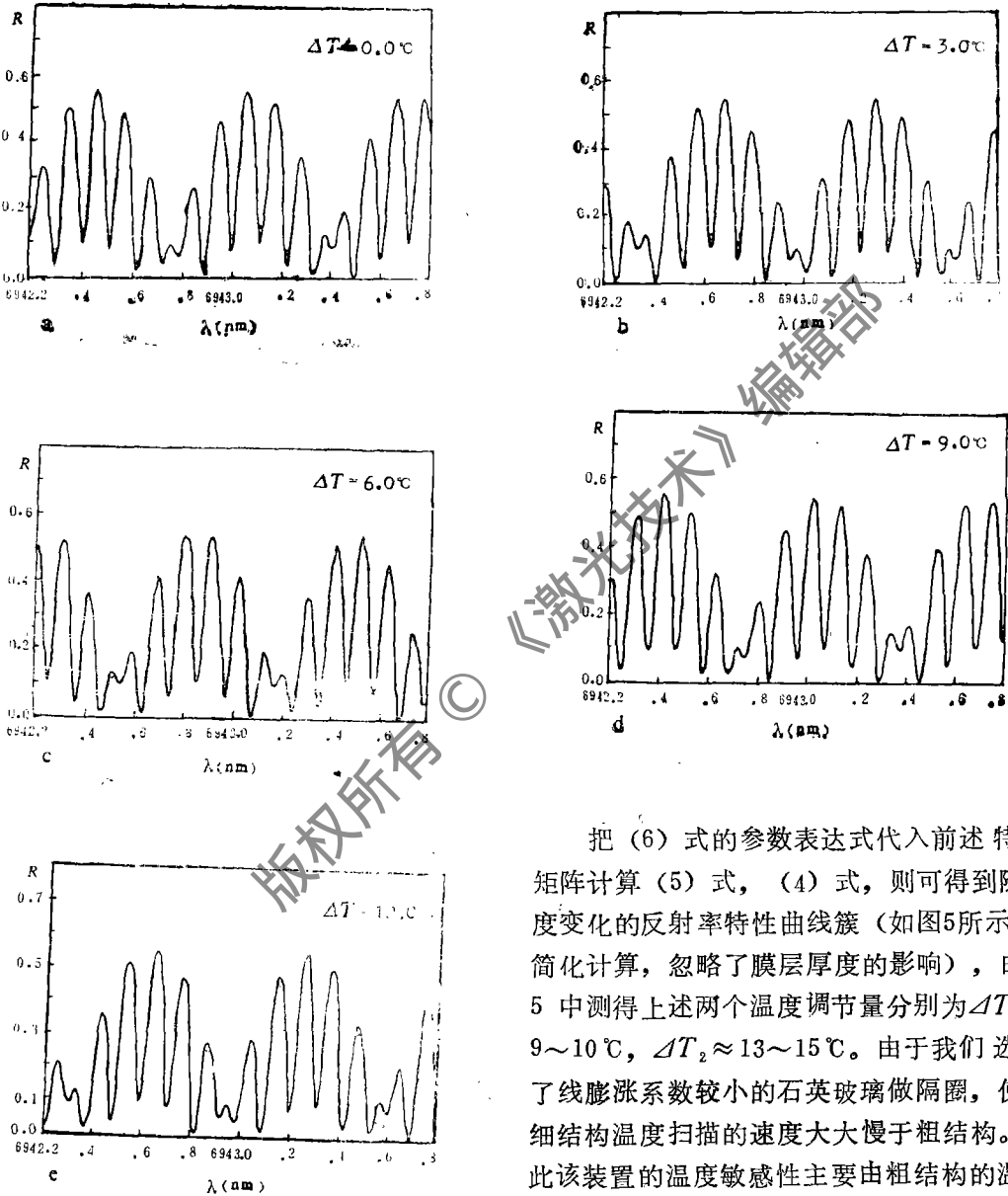


图5 镀膜三界面谐振反射器温度扫描曲线

把(6)式的参数表达式代入前述特征矩阵计算(5)式，(4)式，则可得到随温度变化的反射率特性曲线簇(如图5所示，为简化计算，忽略了膜层厚度的影响)，由图5中测得上述两个温度调节量分别为 $\Delta T_1 \approx 9 \sim 10^\circ\text{C}$ ， $\Delta T_2 \approx 13 \sim 15^\circ\text{C}$ 。由于我们选用了线膨胀系数较小的石英玻璃做隔圈，使得细结构温度扫描的速度大大慢于粗结构。因此该装置的温度敏感性主要由粗结构的温度调谐量决定，由计算数据分析可知，频率漂移 0.01 \AA 的温度调谐量达到近 0.2°C ，所以，虽然隔圈的材料选取没有满足温度“自恰”条件^[4]——使粗、细结构温漂同步的条件，

而产生两个细结构反射率峰等高跨在粗结构峰最大值两侧的现象,给选模带来不便,但足够的温度调谐量使我们可以较宽容的恒温条件下通过温度调节和控制使细结构反射率峰与粗结构峰吻合实现稳定的频率运转,同时还可以在较小的范围内实现激光器的频率调谐。

经我们设计加工的三界面谐振反射器已用于双脉冲红宝石激光器中,并获得了满意的结果,有关实验数据待发表。

参 考 文 献

- [1] 赫光生 雷仕湛编著,《激光器设计基础》,上海科学技术出版社,1979年6月,第264页。
- [2] 陆祖康 邱文法,《光学学报》,1984年,第4卷,第5期,第457页。
- [3] J. K. Watts, Appl. Opt., 1968, Vol.7, No.8, P.1621.
- [4] M. M. Johnson & A. H. LaGrone, Appl. Opt., 1973, Vol.12, No.3, P.510.
- [5] M. Young & A. Hicks, Appl. Opt., 1974, Vol.13, No.11, P.2486.
- [6] W. Weistein, Vacuum 4, No.1, (1954, Jan), P.3.
- [7] M. 玻恩, E. 沃耳夫,《光学原理》上册,科学出版社,1978年12月,第77页。
- [8] M. L. 斯蒂琪,《激光技术和应用的进展》——《激光手册》第七分册,科学出版社,1986年7月,第521页。

*

*

*

作者简介:邱文法,男,1955年3月出生。工程师。现从事固体激光器方面的研究。

颜 旻,男,1966年10月出生。研究生。现从事紫外激光与物质作用的研究。

范畴康,男,1938年10月出生。副教授,非线性光学研究室主任。现从事非线性光学研究。

收稿日期:1989年6月12日。

· 简 讯 ·

美国“首次”进行准分子激光手术

据说,堪萨斯城眼科专家John D. Hunkeler博士做了第一个美国准分子激光手术,为一位73岁的患者校正散光眼。由麻省沃特敦Summit技术公司研制的ExciMed UV200型激光器使用紫外光来刻蚀和修补眼睛的角膜,使用强大的光能量来汽化细胞组织。准分子激光器也可用来医治其它眼病,包括近视眼、远视眼、白内障和青光眼等眼病。

译自 L. & O., 1988, No.11, P.17.

邹福清 译 邹声荣 校