

一种新的光学鉴频方法

刘永智 沈 革

(电子科技大学光电子技术系。成都 610054)

摘 要 报道一种用光学色散元件进行光学鉴频的新方法。在干涉滤光片构成的实验系统上证实了最初的理论设想。

关键词 光色散, 光学鉴频, 光谱识别。

1 引 言

在激光领域, 激光鉴频或波长测量是激光稳频与光谱识别的一项关键技术。为了获得高的鉴频灵敏度与宽的波长测量范围已经研究了许多方法, 其中在采用光学元部件进行鉴频的方法中, 以法布里-珀罗腔的应用最广^[1~9]。法布里-珀罗腔鉴频具有灵敏度高优点, 但其动态范围较窄不适于宽光谱的波长测量, 而且其结构较复杂调整也较难。本文根据光学色散元件特性构思了一种新型光学鉴频方法, 应用这一方法可根据不同的需要设计高鉴频灵敏度或宽光谱, 或两者兼顾的测量系统。而且所构成的系统结构简单调整方便, 具有实时性。本文就该法的原理, 系统设计原则以及在干涉滤光片实验系统上得到的论证结果作一介绍。

2 原 理

众所周知, 对于具有传输特性 $T_j(\nu, \nu_j)$ 的光色散元件如干涉滤光片、衍射光栅等, 当具有功率 $P_i(\nu, \nu_0)$ 的激光束通过时, 在其输出端所获得的光功率如以光电流形式表示将是

$$\left. \begin{aligned} I_j(\nu) &= D_j \int_{-\infty}^{+\infty} P_i(\nu, \nu_0) T_j(\nu, \nu_j) d\nu = D_j \int_{-\infty}^{+\infty} P_{i0} g(\nu, \nu_0) T_j(\nu, \nu_j) d\nu, \\ P_{i0} &= \int_{-\infty}^{+\infty} P_i(\nu, \nu_0) d\nu, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} g(\nu, \nu_0) d\nu = 1, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 D_j 为光电探测器响应率, P_{i0} 、 $g(\nu, \nu_0)$ 为输入激光功率及其线型函数, ν_0 、 ν_j 分别为激光与色散元件工作中心频率。 $I_j(\nu)$ 决定于输入激光功率、色散元件的传输系数及其光谱分布。当输入激光的光谱半宽 $\Delta\nu$ 远小于色散元件的光谱半宽 $\Delta\nu_j$ 即 $\Delta\nu \ll \Delta\nu_j$ 时, (1)式可近似为

$$I_j(\nu) = D_j P_{i0} T_j(\nu_0, \nu_j) \int_{-\infty}^{+\infty} g(\nu, \nu_0) d\nu = D_j P_{i0} T_j(\nu_0, \nu_j), \quad (2)$$

可见,在这种情况下,如 D_j 、 P_{i0} 一定,则 $I_j(\nu)$ 仅与 $T_j(\nu_0, \nu_j)$ 有关. 这意味着 $I_j(\nu)$ 与 ν_0 相对于 ν_j 位置有关,依赖于传输特性 $T_j(\nu, \nu_j)$ 的形状,且很大程度上限制了一些色散元件的应用. 按照图 1 所示系统可以改善这种局限性. 此时,输入激光被分成两束功率相等的光分别送至色散元件 T_1 和 T_2 ,并在光电探测器 D_1 、 D_2 上获得对应光电流. 选择 T_1 、 T_2 的传输特性 $T_1(\nu, \nu_1)$ 、 $T_2(\nu, \nu_2)$ 使得两者除中心频率 $\nu_2 > \nu_1$ 外,其余完全相同. 这样利用 D_1 、 D_2 输出的光电流 $I_1(\nu)$ 与 $I_2(\nu)$ 即可构成两种新鉴频系统.

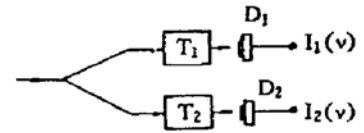


Fig. 1 Construction of the optical frequency discrimination system

2.1 差分鉴频系统

选择 $\Delta\nu_{12} = \nu_2 - \nu_1$, 使 $\Delta\nu_{12} \approx \Delta\nu_j$ ($j = 1, 2$); 并设 $D_1 = D_2 = D$, $P_{10} = P_{20} = (P_{i0}/2)$. 则输入激光频率,在 $\nu_1 \leq \nu_0 \leq \nu_2$ 范围内,鉴频输出呈单调变化,为

$$I(\nu) = I_1(\nu) - I_2(\nu) = (DP_{i0}/2)[T_1(\nu_0, \nu_1) - T_2(\nu_0, \nu_2)]. \tag{3}$$

图 2 给出传输特性具有高斯分布形式下系统的鉴频输出曲线. 由图可见,其特性较之于单个色散元件时有了明显的改善. 为简单起见,设 $T_1(\nu, \nu_1)$ 与 $T_2(\nu, \nu_2)$ 分别为

$$T_1(\nu, \nu_1) = A_1 \exp[-B_1(\nu - \nu_1)^2], \quad T_2(\nu, \nu_2) = A_2 \exp[-B_2(\nu - \nu_2)^2], \tag{4}$$

取 $\Delta\nu_1 = \Delta\nu_2 = \Delta\nu_{12}$, $A_1 = A_2 = 1$, $B_1 = B_2 = B$, 并定义系统鉴频灵敏度为

$$S = dI(\nu)/d\nu. \tag{5}$$

则由(2)式与(4)式可得 $\nu = \nu_j \pm \sqrt{1/2B}$ 处,单个色散元件系统的最大鉴频灵敏度 $S_{j,max}$ 为

$$S_{j,max} \propto \left. \frac{dT_j(\nu, \nu_j)}{d\nu} \right|_{max} \approx -1.4\Delta\nu_j^{-1}. \tag{6}$$

由(4)式、(5)式可到得在 $\nu = \nu_j \pm (\Delta\nu_{12}/2)$ 处差分系统的最大鉴频灵敏度,为(取“+”时 $j = 1$, “-”时 $j = 2$)

$$S_{max} \propto \left. \frac{d}{d\nu} [T_1(\nu, \nu_1) - T_2(\nu, \nu_2)] \right|_{max} \approx -2.8\Delta\nu_j^{-1}. \tag{7}$$

显然 $S_{max} > S_{j,max}$. 从图 2 还可看到,差分系统鉴频的线性动态范围也有所增加. 比较图 3 所给出的几种鉴频曲线可看出,当 $\Delta\nu_{12} = \Delta\nu_j$ 时,鉴频灵敏度与动态范围都较好.

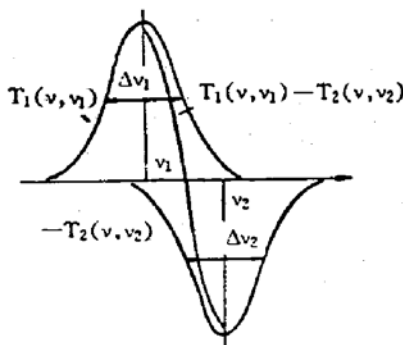


Fig. 2 Curve of difference frequency discrimination

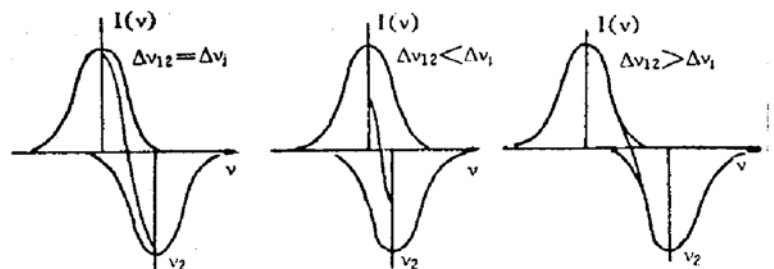


Fig. 3 Influence of $\Delta\nu_{12}$ on the output of difference frequency discrimination at $\Delta\nu_j = \text{constant}$

2.2 规一化鉴频系统

差分鉴频系统的最大缺点是鉴频特性与光电探测器响应率 D_j 以及输入激光功率 P_{i0} 大小

有关. 为了最大限度地消除这些影响可以采用规一化鉴频方式. 与前同, 在不改变系统结构情况下选择鉴频输出特性为 $I_1(\nu)$ 与 $I_2(\nu)$ 之比, 即

$$I(\nu) = [I_1(\nu)/I_2(\nu)] = [T_1(\nu, \nu_1)/T_2(\nu, \nu_2)]. \quad (8)$$

即 $I(\nu)$ 仅与色散元件的传输特性有关. 由(2)式当 $D_1 \neq D_2$, $P_{10} \neq P_{20}(P_{10}/2)$ 时, (8)式可示为

$$I(\nu) = \frac{D_1 P_{10} T_1(\nu, \nu_1)}{D_2 P_{20} T_2(\nu, \nu_2)} = K_s \frac{T_1(\nu, \nu_1)}{T_2(\nu, \nu_2)}, \quad (9)$$

式中 K_s 为规一化鉴频系统常数, 它与输入激光频率无关. 图 4 给出这一系统的鉴频输出曲线, 与差分系统比较, 它有良好的鉴频灵敏度, 且输出特性与输入激光功率的变动无关. 由(4)式得 S 为

$$S = -a \exp(-b\nu), \quad (10)$$

式中 a 、 b 为与 ν_1 、 ν_2 有关的常数. 显然在鉴频范围内 S_{max} 在 $\nu = \nu_1$ 处.

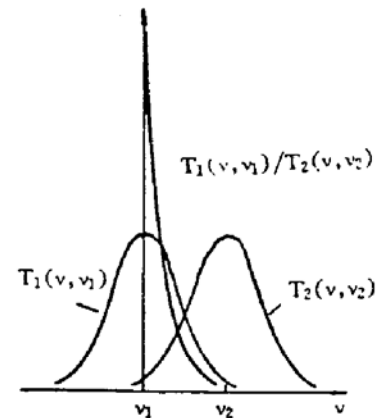


Fig. 4 Curve of normalized frequency discrimination

3 干涉滤光片鉴频系统特性

应用相同膜系制作的干涉滤光片可以按照图 1 方式构成差分与归一化鉴频系统. 设两滤光片的传输特性分别为

$$T_1(\nu, \nu_1) = \frac{1}{1 + F \sin^2 B_1(\nu - \nu_1)}, \quad T_2(\nu, \nu_2) = \frac{1}{1 + F \sin^2 B_2(\nu - \nu_2)}, \quad (11)$$

$$T_1(\lambda, \lambda_1) = \frac{1}{1 + F \sin^2 B_1[(1/\lambda) - (1/\lambda_1)]}, \quad T_2(\lambda, \lambda_2) = \frac{1}{1 + F \sin^2 B_2[(1/\lambda) - (1/\lambda_2)]}, \quad (12)$$

光谱半宽为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\lambda_j &= (\lambda_j^2 / \pi n d \sqrt{F}), \\ F &= 4R / (1 - R)^2, \quad B_j = cB_j = 2\pi n d, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中 R 、 n 、 d 分别为膜系反射率, 间隔层折射率与厚度, c 为光速, 由(3)式与(9)式, 其鉴频输出特性分别为 ($\lambda_2 > \lambda_1$).

1) 差分鉴频 ($B_1 \approx B_2$)

$$I(\lambda) \propto \frac{1}{1 + F \sin^2 B_1[(1/\lambda) - (1/\lambda_1)]} - \frac{1}{1 + F \sin^2 B_2[(1/\lambda) - (1/\lambda_2)]}, \quad (14)$$

2) 规一化鉴频 ($B_1 \approx B_2$)

$$I(\lambda) \propto \frac{1 + F \sin^2 B_1[(1/\lambda) - (1/\lambda_1)]}{1 + F \sin^2 B_2[(1/\lambda) - (1/\lambda_2)]}, \quad (15)$$

两种方式的鉴频输出特性曲线与图 3、图 4 相似. 只要通过 F 和 B 调节, 即可选择适当的鉴频灵敏度与动态范围.

4 实验结果与讨论

实验用两干涉滤光片的传输特性示于图 5, 其中滤光片 T_1 的 $\lambda_1 = 631 \text{ nm}$, $\Delta\lambda_1 = 14 \text{ nm}$; T_2 的 $\lambda_2 = 637 \text{ nm}$, $\Delta\lambda_2 = 13.5 \text{ nm}$. 光电探测器采用 Si-PIN 其光谱响应范围 $0.4 \mu\text{m} \sim 1.1 \mu\text{m}$, D

$=0.2 \mu\text{A}/\mu\text{W}$. 差分实验系统布局如图 6 所示. 由光源 LS 发射的光经透镜 L_1 会聚后送入单色仪 M , 然后再经透镜 L_2 准直送至分光板 S , 由 S 分出的光 1 经反射镜 M_1 后以平行光透过滤光片 T_1 , 最后经 L_3 会聚于光电探测器 PD_1 上; 由 S 分出的光 2, 直接以平行光透过滤光片 T_2 , 最后经 L_4 会聚于光电探测器 PD_2 上. 由 PD_1 、 PD_2 产生的光电流 $I_1(\lambda)$ 和 $I_2(\lambda)$ 分别送到差分电路进行比较放大, 最后获得误差电压信号 $V(\lambda)$. 图 6 中 M 为 WDG-30 型光栅单色仪(分辨率 $\leq 0.1 \text{ nm}$, 准确度 0.2 nm). 图 7 给出输入光在 $628 \text{ nm} \sim 640 \text{ nm}$ 波长范围下鉴频输出特性. 由图在 $\lambda = 634 \text{ nm}$ 下, 其鉴频灵敏度 S 可达到 $840 \text{ mV}/\text{nm}$, 线性动态范围 ($S \leq \pm 5\% S_{\text{max}}$) 约 6 nm .

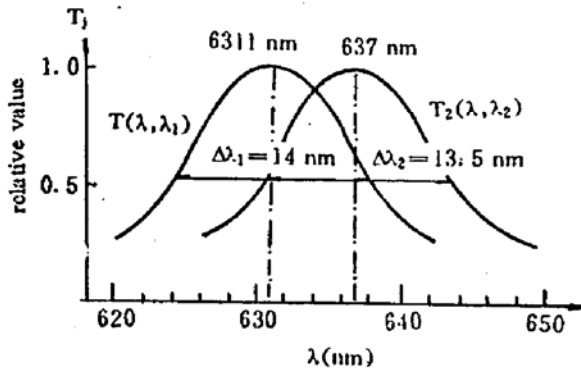


Fig. 5 Transmission characteristics of interference filters T_1 and T_2

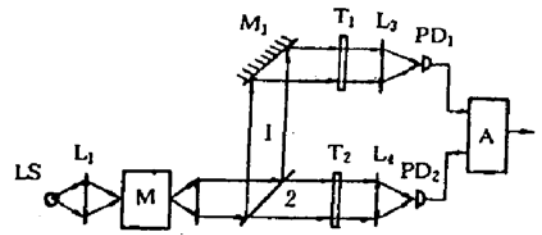


Fig. 6 Experimental system constructed by the interference filters

将图 6 中差分电路代之以除法电路则得到规一化鉴频输出特性(图 8), 在 $\lambda = 631 \text{ nm}$ 其系统鉴频灵敏度 S 约为 $1200 \text{ mV}/\text{nm}$, 线性动态范围约 6 nm . 图中滤线为输入光功率下降 10% 结果, 从图 8 可见其影响不明显.

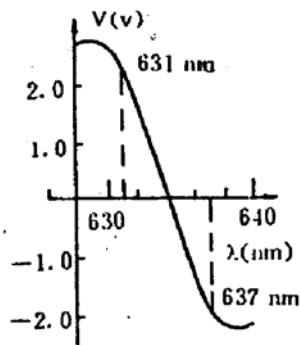


Fig. 7 Difference frequency discrimination curve measured by the experiment

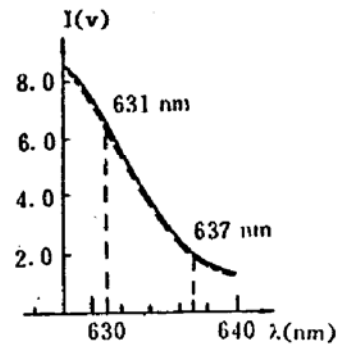


Fig. 8 Normalized frequency discrimination curve measured by the experiment

利用(12)、(13)、(14)式和(15)式代入滤光片 T_1 、 T_2 的特征参数计算的差分鉴频特性与规一化鉴频特性分别示于图 9 中, 两者都与实验一致.

讨 论 本方法的理论分别是在作了一定假设情况下得到的. 尽管如此, 由此提出的一些设计原则在实验鉴频系统中仍不失其指导意义. 在实际系统中, 影响鉴频输出的因素主要有: 输入光谱形状与宽度以及其功率变动; 光电探测器对称性; 色散元件传输特性的一致性; 放大电路的稳定性与线性动态范围等等. 由(1)式出发本文对设定的几种输入光谱进行了计算, 结果表明, 它们对鉴频特性几乎无影响. 正如前所述, 采用归一化鉴频方式可以较好地消除输入光功率波动与光电探测器特性的不对称性影响. 色散元件传输特性的不一致性只是对鉴频曲线形状产生固定影响. 因此, 就一个实际系统而言, 放大电路的性能是影响鉴频输

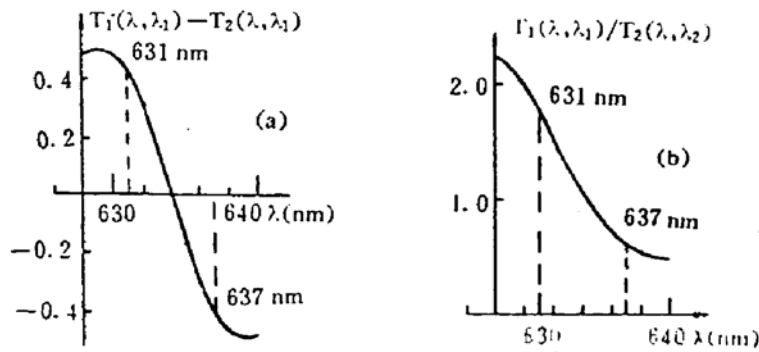


Fig. 9 A, b-difference and normalized frequency discrimination curves calculated by the function fitting with the characteristic parameters of T_1 , T_2 respectively

出特性一致性最主要的因素,同时它对系统鉴频灵敏度高低产生很重要的影响。

按照理论模型,只要选择不同中心频率 ν_j 以及不同光谱半宽 $\Delta\nu_j$ 的光色散元件即可构成窄带高灵敏鉴频或宽光谱识别,或两者兼顾的系统。

最后指出,该法除适用于泸光片系统(包括由多模光纤蒸镀滤光片系统)外,还适于光栅以及单模光纤系统。其鉴频灵敏度 $(\Delta\lambda/\lambda)$ 可作到 10^{-9} 至 10^{-11}

参 考 文 献

- [1] 屠世谷编著, 稳频与测频技术. 科学出版社, 北京, 1986.
- [2] B. Stahlbeg, Control of laser frequencies using a Fabry-Perot interferometer and DAC techniques. *J. Phys. E: Scient. Instrum.*, 1985, 18(2): 1049~1053
- [3] H. N. Rutt, A heterodyne frequency offset locking technique for pulsed or CW laser. *J. Phys. E: Scient. Instrum.*, 1984, 17(8): 704~709
- [4] H. Tsuchida, T. Toshiharu, Highspeed frequency stabilization of AlGaAs semiconductor laser. *Jap. J. Appl. Phys.*, 1983, 22(10): 1543~1545
- [5] N. S. Bergn, Wavelength discriminator method for measuring dynamic chirp in DFB laser. *Electron. Lett.*, 1988, 24(20): 1296~1297
- [6] G. C. Bjorklund, Frequency modulation spectroscopy: measuring weak absorption and dispersions. *Opt. Lett.*, 1980, 15(1): 15~17
- [7] M. Hercher, The spherical mirror Fabry-Perot interferometer. *Appl. Opt.*, 1968, 7(5): 951~956
- [8] F. Favre, D. L. Gven, High frequency stability of laser diode for heterodyne communication systems. *Electron. Lett.*, 1980, 16(18): 709~710
- [9] T. Okoshi, K. Kikuchi, Frequency stabilization of semiconductor laser for heterodyne type optical communication systems. 1980, *Electron. Lett.*, 16(5): 179~181

A New Optical Frequency Discrimination Method

Liu Yongzhi Shen Ge

(Department of Opto-Electronic Technology, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054)

(Received 5 August 1992)

Abstract A new optical frequency discrimination method is presented in this paper. The initial theoretical envisage is demonstrated on the experimental system constructed by the interference filters.

Key words optical dispersion, optical frequency discrimination, light spectrum distinction.