

探测微弱信号的双楔形干涉仪的结构分析

严高师, 张志勇

(电子科技大学光电信息学院 成都 610054)

【摘要】针对楔形多光束干涉仪产生等间距细锐条纹的特性,结合双路探测系统相减可消去背景噪声的优点,提出一种新型的正交双楔形干涉仪结构。该结构中所有部件都相对固定,且两路楔形板厚度差为一定值,激光入射时,两路干涉仪产生相位差为 $\pi/2$ 的等间距条纹,条纹信号叠加在背景噪声信号之上,通过差分放大,使背景非相干光信号相减为零,提高了系统在强噪声背景下弱信号探测能力。该结构可用于微弱激光信号的探测,并能通过条纹间距计算出入射激光的波长。根据该干涉仪的基本原理,通过计算机仿真设计了其结构参数。

关键词 干涉仪; 双楔形; 背景噪声; 激光

中图分类号 O434.12 文献标识码 A

Structure Analyzing of Orthogonal Two-Wedge Interferometer to Detect Weak Laser Signal

YAN Gao-shi, ZHANG Zhi-yong

(School of Opto-Electronic Information, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract A new structure of two orthogonal wedge interferometers is proposed by combining the properties of wedge multi-beams interferometers and two-ways detecting systems. All of the components are fixed, and the thickness difference of two interferometers is designed in a fixed value, which could make their fringe patterns have a fixed phase shift of $\pi/2$ when laser beams incoming. Two signals were subtracted through a differentiating amplifier. The background noise, which is superimposed on the fringe signals, could be removed and result in higher contrast ratio fringe signals. The proposed structure could be used in detecting weak laser signal in high background noise, and the wavelength of incident laser beams could be calculated simultaneity. The optical parameters were analyzed by computer simulation.

Key words interferometer; two wedge structure; background noise; laser

多光束干涉仪能够产生出十分细锐的干涉条纹是标准具最重要的特性之一。典型的利用多光束干涉原理的仪器是法布里-帕罗干涉仪和迈克耳逊干涉仪。

双路F-P干涉仪结构能够去除背景噪声,但是需采用振动结构,降低了系统灵敏度^[1-2];迈克耳逊干涉仪产生的干涉条纹非常细锐,具有较高的灵敏度,但是由于不能较好地去除背景噪声,系统的探测灵敏度也受到限制^[3-4]。如果楔形平板两面也涂以高反膜,在其下表面就能产生多光束干涉条纹^[5],而且此干涉条纹具有两个特点:(1)类似等厚干涉产生平行等间距的条纹;(2)有多光束干涉的特征,条纹十分细锐。该文结合多光束干涉仪的优点和双路相减去噪的原理,提出双楔形干涉仪结构。

1 楔形多光束干涉仪的基本原理^[6]

楔形干涉仪的两面都是平面，相交成一个很小的角度 α ，而且入射光是平面波，传播方向与劈棱垂直如图1所示。由于两面之间的多次反射，透射光中形成一组传播方向不同的平面波。

各透射波的振幅依次为 ($A^{(i)}$ 是入射波的电矢量振幅) $tt'A^{(i)}e^{id_1}, tt'r'^2A^{(i)}e^{id_2}, \dots, tt'r'^{2(p-1)}A^{(i)}e^{id_p}, \dots$, 无限多个这种波相叠加，在 P 点产生的合振幅为：

$$A^{(i)} = A^{(i)}tt' \sum_{p=1}^{\infty} r'^{2(p-1)} e^{id_p} = A^{(i)}T \sum_{p=1}^{\infty} R^{p-1} e^{id_p} \quad (R = r^2, T = 1 - r^2) \quad (1)$$

则入射波合成光强：

$$I_t = I_i T^2 \left| \sum_{p=1}^{\infty} R^{p-1} e^{id_p} \right|^2 \quad (2)$$

式中 对于相位差， p 为有限项， α 很小时，可按幂次展开，保留到二次项，且当正入射时 ($q' = 0$) 得到：

$$d_p = \left(\frac{4\pi}{I_0} n'h + 2F \right) (p-1) - \frac{4\pi}{I_0} n'h \frac{(p-1)^3}{2} \alpha^2$$

为简化计算，忽略后面一项，计算得到透射光强度

$$I_t = \frac{T^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(d_0/2)} I_i \quad (d_0 = \frac{4\pi}{I} n'h + 2F) \quad (3)$$

与F-P腔透射光强分布有类似的形式。通过如图2所示Matlab仿真可以看出，楔形干涉仪产生的干涉条纹具有与爱立分布条纹极相近的规律，因此其条纹间距可以表示为：

$$d = I / 2n'\alpha \quad (4)$$

上述近似过程带来的误差通过仿真计算为： $\Delta d / d \approx 5 \times 10^{-4}$ ，在系统误差允许的范围。

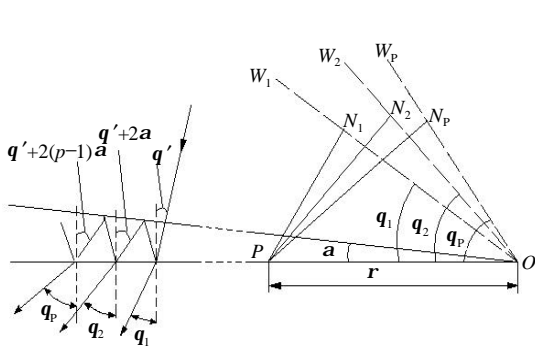


图1 楔形标准具光路图

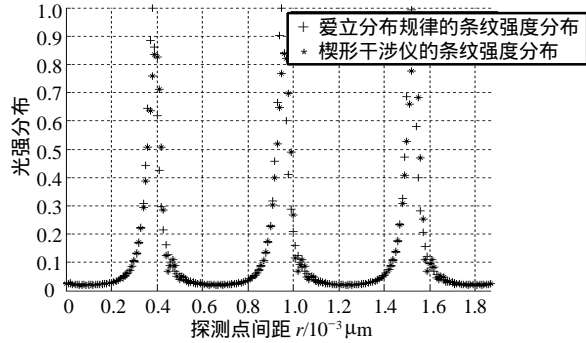


图2 2种干涉条纹分布规律的比较

2 双楔形干涉仪的结构与参数设计

2.1 双楔形干涉仪探测系统的基本原理

入射光先通过如图3中“1”所示的带通滤波器，可滤除通带以外的噪声。再经过分束器后，分为光强相等的两束光。

一束光通过楔形标准具A(其平均厚度为 h)和线阵探测器A，放大后形成信号 S_1 ；另一束光通过光程补偿、楔形标准具B(其平均厚度为 $h - \Delta h$)和线阵探测器B放大后形成信号 S_2 。激光通过干涉仪后的光强为：

$$I_t = \frac{T^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(d_0/2)} I = T_B I \quad (d_0 = \frac{4\pi}{I} n'h + 2F) \quad (5)$$

二臂的输出信号强度可以表示为：

$$S_1 = IT_{LA} + BT_{B1} \quad S_2 = IT_{LB} + BT_{B2} \quad (6)$$

式中： I 为激光光强； B 为背景光强； T_{LA} 、 T_{LB} 为干涉仪A、B对激光的透过率； T_{B1} 、 T_{B2} 为干涉仪A、B对背

景光的透过率。由于 $T_{B1} = T_{B2}$ ，得到：

$$S_1 - S_2 = (T_{LA} - T_{LB})I \quad (7)$$

激光通过两个楔形标准具的厚度差 Δh ，但其条纹分布 I_A 、 I'_B 的间距相同。因此可以设计两个楔形标准具的厚度差，使得 T_{LA} 、 T_{LB} 在两个探测器对应的位置上有足够的相位差，从而 I_A 的亮条纹恰好对应于 I'_B 的暗条纹。如图4所示，条纹信号叠加在背景噪声信号之上，通过差分放大器，背景光信号相减为零，而相干光信号得以保留，形成正负交叠的信号，达到了去除背景噪声目的。

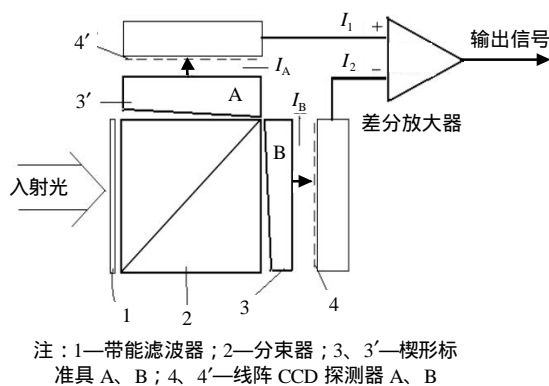


图3 双楔形干涉仪基本原理框图

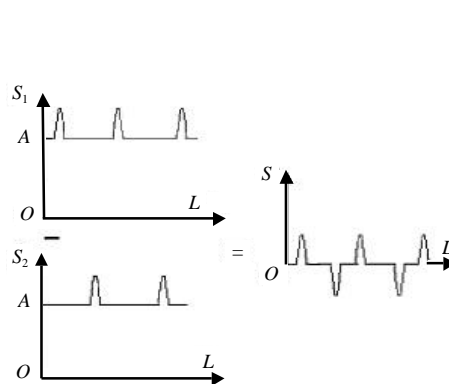


图4 干涉仪双路信号叠加示意图

相干光的相干长度和相干时间都比非相干光大的多，这是可以区分出激光和背景辐射光的依据。因而，如果合理地设计干涉仪的结构，使得其光程差远大于非相干光的相干长度，而小于相干光的相干长度；这样当激光和背景辐射光通过干涉仪时，前者能产生干涉条纹，而后者仅直接穿过干涉仪，不能形成干涉条纹。通过探测、分析观察平面上的周期性条纹，就可以判断出入射激光的参数。

2.2 楔形干涉仪参数的确定

2.2.1 楔形干涉仪的相干长度的确定

适当选择楔形标准具最小厚度 h 和楔形角 α ，使自然光不能产生干涉条纹，而波长范围在 $0.6 \sim 1.06 \mu\text{m}$ 之内的激光能满足时间相干性。

时间相干条件：

$$t \Delta n \ll 1 \Rightarrow h < \frac{L}{2n'} \quad (8)$$

空间相干条件：

$$b^2 \cdot 2n'h \ll L \quad (9)$$

式中 L 为激光光源相干长度； b 为光源束角； c 为光速； h 为标准具平均厚度。

2.2.2 干涉仪平均厚度的设计

2.2.2.1 平均厚度设计

干涉仪平均厚度设计要满足由相干长度和相干时间决定的边界值。要选取干涉仪的相干长度比军用激光相干长度小，而比背景光源相干长度大，则激光入射时，其透射光受到调制，而非相干光入射时，其透射光不发生调制。背景光源相干长度不到 $1 \mu\text{m}$ ，军用激光相干长度大致在零点几毫米到数米之间。

由厚度与 L 的公式，取入射激光最小相干长度为 $L_{\min} = 3 \text{ mm}$ 时，得到 $h \approx 1 \text{ mm}$ ，代入式(9)，也满足空间相干条件。

2.2.2.2 两个干涉仪厚度差的设计

相干光入射时，在厚度为 h 的标准具A的下表面，相邻两束光的光程差为 $OPD = 2n'h - (l/2)$ ，在厚度为 $(h - \Delta h)$ 的标准具B的下表面，其光程差为 $OPD' = 2n'(h - \Delta h) - (l/2)$ ，可以调整两个楔形标准具的厚度，使得在探测器对应的位置上， I_A 出现亮条纹， I'_B 恰好出现暗条纹。由于多光束干涉条纹的精细度高，对于所测量波长范围内的激光来说，都能满足上述条件。取：

$$OPD' = OPD \pm \frac{I}{2} \Rightarrow \Delta h = \frac{I}{4n'} \quad (10)$$

式中 n' 为干涉仪介质的折射率, 设 $n' = 1.51$; I 取 $0.6 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 的中心值, 能使两路条纹的最大值不在对应的位置交叠。

2.2.3 角度的设计

由出射波的合成光强为:

$$I_t = I_i T^2 \left| \sum_{p=1}^{\infty} R^{p-1} e^{id_p} \right|^2 \quad (11)$$

通过仿真, 得到激光干涉条纹强度与楔形角的关系如图5所示。为了减小系统探测误差, 一般需要采集 10 条干涉条纹; 因此选取楔形夹角为 0.02° 。

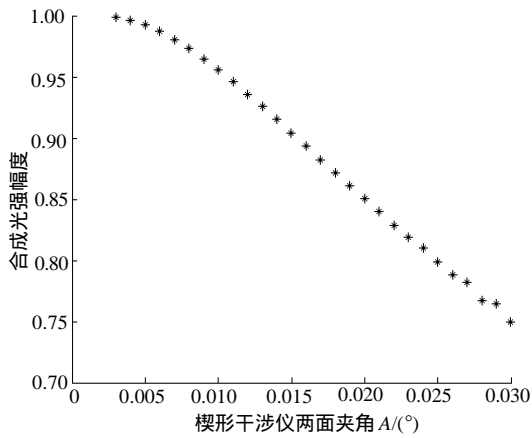


图5 干涉条纹强度与楔形角的关系

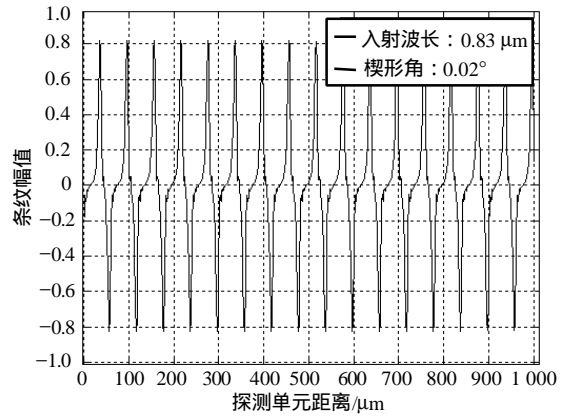


图6 两组条纹图案相减得到信号的波形

2.3 激光通过干涉仪的仿真结果与分析

入射光通过双干涉仪所得信号分别为 I_1 、 I_2 , 两图像信号后相减得到信号为 $I_{rr} = I_1 - I_2$ 。信号幅度分布如图6所示。由于两个干涉仪存在厚度差 Δh , 在干涉时引入了相位差, 使两组条纹之间产生相对移位。从仿真结果看到, 两路条纹信号相减后, 呈现出相互交错、一正一负波形, 与前面推出的结论非常符合。这样可得到正、负两组条纹数据, 根据干涉条纹的间距可计算出入射激光的波长。

3 结 论

通过分析楔形结构的干涉仪, 设计了其结构参数。采用该双楔形干涉仪结构能够有效地去除背景非相干光噪声, 从而提高系统探测的灵敏度, 并可分析得出入射激光波长等参数。提供了一种可用于高背景噪声下微弱激光信号的光学探测方法。

参 考 文 献

- [1] 李世祥. 光电对抗技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000
- [2] 魏光辉. 激光技术在兵器工业中的应用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995
- [3] 施德恒, 高宗江. 光谱识别型激光警戒系统述评[J]. 激光与红外, 1999, 29(1): 9-13
- [4] 施德恒, 郭 峰. 相干识别型激光警戒系统述评[J]. 激光与红外, 1998, 28(3): 136-139
- [5] James C. Russell. Coherent laser warning system[P]. 美国, 6151114. 2000-11
- [6] 波恩 M, 沃耳夫 E. 光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1978

编 辑 徐安玉