文章编号:1002-2082(2008)02-0271-04

扩展光源的时间和空间相干性效应分析

石友彬,陈春雷,黄振永,王文华

(广东海洋大学 理学院物理与光电科学系,广东 湛江 524088)

摘 要: 在干涉仪不同支路臂中分别加入透明光学层,将扩展光源入射到迈克尔逊干涉仪,观察 光场的时间和空间相干现象,发现2种情况下出射光的时间和空间相干包络极值位置发生错位现 象。论证了不同支路臂中的光学层可破坏干涉场中的光波相干特性,从而导致时间和空间相干性 出现超前或滞后的空间位置互易效应。利用该效应,在2个入射光源条件下,可以得到一种测量光 学样品的几何厚度和折射率的实验途径,并给出了相关的计算公式。

Commutation effects on time-coherence and space-coherence of extended lights

SHI You-bin, CHEN Chun-lei, HUANG Zhen-yong, WANG Wen-hua (College of Science, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: Michelson interferometer experiment for extended lights was performed. When the extended light was incident upon the Michelson interferometer, and the transparent optical layers were added into each interferential arm, the dislocation phenomena of the peak of the time and space coherent envelop for exit light was observed under two conditions. It is proved that the optical wave coherent characteristic in the interference field can be destroyed by adding optical layers in the different interferential arm, which results in lead or lag for the time and the spatial coherence. Based on this effect, the measurement of the thickness and refractive index of optical elements can be implemented experimentally with two incident beams. The relevant calculation formulas are given.

Key words: extended light; space-coherence; time-coherence; commutation effect

引言

具有一定谱线宽度的光源形成干涉时,能量以 脉冲形式出现,脉冲长度可以用光的时间相干长度 $l_c = \lambda_2 / \Delta \lambda$ 进行衡量^[1-3]。当相干光束的光程差为零 时,脉冲包络出现最大值^[4]。因迈克尔逊干涉议具 有直观、测量精度高等优势,常用来测量折射率、镀 膜厚度、介电常数等参量,故研究光源相干性同样 具有优势^[5-6]。如果在迈克尔逊干涉仪双臂中的一 个支路加入附加透明光学层,由于光学层的色散作 用,经过光学层的入射光与另一支路的入射光会产 生附加光程差,在出射光相干迭加时,会造成脉冲 包络的变化。附加光学层所处支路不同时,合成出 射光会产生时间和空间相干位置互换的对易效应, 这种效应包含了光源单色性和附加透明光学层的 折射率和几何厚度等信息。对出射脉冲干涉信号进 行研究,一方面可以测量未知透明材料的折射率或

收稿日期:2007-09-03; 修回日期:2007-09-26

基金项目:广东海洋大学引进人才启动基金资助项目(E05102/051202)

作者简介:石友彬(1967—),男,吉林市人,硕士,主要从事激光干涉测量研究工作。E-mail:shiyoubin@hotmail.com

几何厚度;另一方面也验证了利用迈克尔逊干涉仪 不仅可以观察到空间相干性,而且可以观察到时间 相干性。

1 实验装置及原理

时间及空间相干特性的含义可以通过下面的 公式进行表述:

$$\Gamma(\Delta y, \Delta z, \Delta t) = \langle U(y, z, t) U^*(y - \Delta y, z - \Delta z, t - \Delta t) \rangle$$

式中:U(y,z,t)是光波场;y和z分别代表横轴 和纵轴。从公式可见,光波相干性与横、纵向移动 $\Delta y, \Delta z$ 和光波场时间延迟 Δt 有关。如果 $\Delta t \neq 0$,而 横、纵向移位等于零,则 Γ 表现出时间相干特性;当 $\Delta t = 0$,而横、纵向移位不同时为零时,则 Γ 表现出 空间相干性。

实验装置如图 1 所示^[7-8]。实验采用迈克尔逊 干涉仪作为研究仪器,干涉仪两光路中的反射镜可 以沿光轴往复移动,移动幅度为 l_0 ,为了能明显观 察探测到脉冲包络时间和空间相干性的变化情况, 往返一次的移动幅度远大于相干长度 l_c 及纵向空 间相干长度 $y_{//}(y_{//}=2\lambda_0/\theta_2)$, θ 是观察平面上光束 的半孔径角^[6-7,9])。为了消除观察平面光场的横向 移动 Δy ,动镜应垂直于光轴,以满足 Δy 远远小于 横向相干半径^[6-7,9] $y_{\perp}(y_{\perp}=\lambda_0/2\theta)$ 。光电探测器探 测到的脉冲调制时变信号 f(t)经转换后用示波器 输出显示,并通过计算机进行分析比对。



 S_1 -宽频超荧光发光二极管; S_2 -准单色钠光源; M_1 -可动反射镜; M_2 -水平方向的动镜;BS-半反半透 镜;GP-平行薄板;PD-光电探测器;ADC-模数变 换器;PC-计算机

图1 双光源迈克尔逊干涉仪

Fig. 1 Michelson interferometer with dual-source

对于空间相干性和时间相干性的观察研究,光 源的本身特性起着重要作用,为了能明显观察记录 到 2 种相干现象,实验采用 2 个具有不同谱线宽度 的光源。经过准直的超荧光发光二极管($\lambda_0 =$ 0.85 μm, $\Delta\lambda$ =0.02 μm)和具有比较大的时间相干 性的低压钠灯 DHAC-18(双D线的相干长度 l_c = ($\lambda_1\lambda_2/\Delta\lambda_{12}$) ≈ 580 μm, λ_1 = 0.589 0 μm, λ_2 = 0.589 6 μm)进行空间及时间相干特性研究。将这 2 个光源形成的2 对干涉光束同时入射到与光轴垂 直的光电接收仪, --束具有较小的时间相干长度 l_c ≈36 μm, 另一束具有足够大的时间相干长度和空 间发散角, 全空间发散角 2 θ =0.2 rad。当动镜 M_2 在一定范围内连续移动时, 2 个光源分别形成独立 的干涉脉冲, 微调 M_1 , 可以在合适的位置记录到这 些干涉脉冲信号。附加光学层光学厚度 d 的变化, 可以采用专业角度变化仪, 按照需要的角度旋转透 明薄层, 改变光在透明层内的光程, 以此在干涉议 的支臂建立非平衡光学层(见图1所示)。

2 实验结果及理论分析

在干涉仪 M_1 和 M_2 支臂分别加入附加透明光 学层,改变光学厚度,得到图2 中的4 种实验数字波 形图。A 和B 分别代表时间相干脉冲和空间相干脉 冲信号,A,B 两种相干脉冲情况与光程差的大小 Δ $= 2\Delta X_M(t)$ 有关,其中 ΔX_M 是动镜 M_2 轴向移动的 距离。图2-1 和图 2-2 表示在干涉仪的第1 个臂 M_1 附加透明光学层;图 2-3 是对干涉光路进行补偿后 (d=0)得到的数字波形图;图 2-4 是透明光学层位 于干涉仪的 M_2 支路的情况。在脉冲信号相互叠加 的情况下,可以观察到干涉差拍振荡。



2-1, 2-2-在 M_1 支臂有附加光学层; 2-3-对光学层进行 补偿(d=0); 2-4-在 M_2 支臂有附加光学层

图 2 干涉脉冲的时间和空间相干性数字波形图

Fig. 2 Time and spatial coherence digital waveform of interference pulse

从图 2 可见,如果不对附加透明光学层进行光 程补偿,则会引起 2 支路的出射光场之间产生附加 时间延迟^[10-11],时间延迟的大小 $\delta t \approx \Delta_1/c = 2d(n-1)/c$,其中 *c* 是光速,*n* 是折射率。由此产生的相应 波列空间延迟距离 $\Delta_1 = 2d(n-1)$,因子 2 是因为光 束2次往返穿越透明层。图3可以直观表现出上述 光波场的相对滞后问题,迈克尔逊干涉仪的2个支 路几何长度相等,但由于其中一臂加入了透明光学 层,导致2个支路中的非平面光波场形成相对错位 效应,且超前于无光学层时的光场,错位的空间距 离可以近似用公式 $\delta z \approx 2d(n-1)/n$ 表示。对于具 有较小纵向空间相干长度 $y_{//} \approx \delta z$ 的光波场,错位 空间距离对干涉的影响显著。



U 和U₂ 为支臂中加入透明层后引起的光场变化;
 S 为扩展光源;BS 为半透半反镜;M₁和M₂ 为平
 面反射镜:GP 为平行薄层

图 3 波列及光波场变化示意图

Fig. 3 Variation of wave row and light wave field

图 4 给出了发散光源经过厚度为 d 的平行透 明层后入射光束光场的变化情况,其中 U_1 为无透 明层时的光场, U_2 是透明光学层厚度为 dn 时的光 场,这 2 个情况下的光波场分布具有如下的相关 性: $U_2(y,z,t) \approx U_1(y,z-\delta z,t+\delta t)$ 。加入透明层 后,由于色散 $n(\lambda)$ 作用,光波场的波前发生变化,因 此 2 光波场之间用约等号关联。



图 4 平行光学薄层引起光场的轴向改变 Fig. 4 Optical field axial change caused by parallel optical thin layer

在迈克尔逊干涉仪中,如果透明光学层位于第 2 个支路(如图1所示),则对于波列的相对滞后 Δ_1 (时间延迟为 δ_t)应沿轴移动 M_2 镜远离分光板,移 动的大小为d(n-1)。如果还原干涉脉冲的纵向相 干性,动镜 M_2 应移近干涉测量仪的分光镜,移动大 小为 $\delta_z = d(n-1)/n$ 。若透明光学层GP 位于干涉 仪的另一个支路臂里(镜 M₁),则动镜 M₂ 移动方向 与第1种情况相反。可见,在干涉仪不同支路臂中 加入透明光学层,则出射光的时间和空间相干包络 最大值位置发生互换效应,且振幅相对于没有附加 光学层时要相对减少。

由于附加光学层的存在而导致时间干涉位置 及空间干涉位置出现互换效应,包含光学层的内在 信息,因此可利用2个准单色光源(2光源的中心波 长接近)和2组干涉信号时间和空间相干性的位置 错位效应测量光学层厚度和折射率。从时间和空间 错位效应 Δ_1 和 δ_z 的表达式可知,只要测出 Δ_1 和 δ_z ,就可以根据 $d=0.5\Delta_1\delta_z/(\Delta_1-\delta_z)$ 和 $n=\Delta_1/\delta_z$ 来确定光学层的厚度和折射率^[12]。

如果在干涉仪中使用具有较大谱线宽度的单 个扩展光源,则在记录平面上会形成足够宽角谱分 布的干涉场信号。近似测定时,干涉仪出射信号形 成的变化包络线可以用时间相关系数 $\gamma_{11}(2\Delta z_M(t) \pm 2d(n-1))$ 和纵向空间相关系数 $\gamma_{12}(\delta z(t)2d(n-1)/n)$ 的模乘积来确定,即:

$$\begin{split} \bar{u}_{p}(t) &\sim |\boldsymbol{\gamma}_{11} [2\Delta z_{M}(t) \pm 2d(n-1)]| \cdot \\ &|\boldsymbol{\gamma}_{12} [\delta z(t) \mp 2d(n-1)/n]| \times \\ &\cos \Big[\frac{4\pi}{\lambda_{0}} [\Delta z_{M}(t) \pm d(n-1)] + \Delta \varphi_{0} \Big] \end{split}$$

式中 $\Delta \varphi_0$ 是初始相位差。

无论透明光学层位于哪个支路,在 2d(n-1)= l_c , $l_c < \rho_{//}$ 或 $2d(n-1)/n = y_{//}$, $l_c > y_{//}$ 的条件下, 出射信号的时间和空间相干性将被破坏,因此,在 $l_c < y_{//}$ 的情况下,为了对光波相互延迟进行补偿, 恢复光波场的空间和时间相干性,需要向着分光镜 的方向移动M₂,移动大小 $\Delta z_{M} = d(n-1)$ 。在干涉仪 的出射口, Δz_{M} 引起光波场相应的空间移动,大小 为2d(n-1),干涉波场总的纵向移动为 $\delta z = [2d(n-1)/n] + [2d(n-1)]$ 。但在纵向空间相干半径 $y_{//}$ 小于 δz 的情况下,即 $y_{//} < 2d(n^{2}-1)/n$,则光波场 间的干涉性不能得到复原,即使移动M₂镜,出射干 涉信号也不具备相干性。然而,由于纵向空间相干 半径的大小 $y_{//} = 2\lambda/\theta^{2}$,因此在减小 θ 的条件下,可 以复原光波场的相干性,从而观察到干涉信号的脉 冲输出。

作类似分析,当 $l_c > y_{//}$ 时,由于在干涉仪支路 臂加入光学层引起光波场的纵向移动,大小为 $\delta z = 2d(n-1)/n$,为了进行相干性补偿,需要改变动镜 M_2 ,使它远离分光镜,此时光程差将增大并达到 $\Delta = [2d(n-1)/n] + [2d(n-1)]$ 。如果光程差 Δ 超 过相干长度 *l_e*,则光波的相干性同样被破坏,因此, 为了能观察到干涉现象,要求增大相干长度 *l_e*。实际应用中,可在光路中加入滤光镜等以减小谱线宽度,增加相干长度。

3 结束语

时间及空间位置的错位效应发生在扩展光源 条件下,当用会聚光源作为实验光源时,只要光源 具有一定的角谱分布和谱线宽度,且满足光电探测 仪具有的探测区域,同样可以利用迈克尔逊干涉仪 观察到时间和空间相干的位置互易效应。通过对此 效应的研究,理论上证明了利用这种效应测量光学 样品的折射率及厚度的可行性。

参考文献:

 [1] 谢敬辉,赵达尊,阎吉祥.物理光学教程[M].北京: 北京理工大学出版社,2005:85-88.
 XIE Jing-hui,ZHAO Da-zun,YAN Ji-xiang. Physical

optics course [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press. 2005:85-88. (in Chinese)

[2] 马文蔚,解希顺,谈漱梅,等.物理学[M].北京:高等 教育出版社,2002:108-112.

MA Wen-wei, XIE Xi-shun, TAN Shu-mei, et al. Physics[M]. Beijing:Higher Education Press, 2002: 108-112. (in Chinese)

- [3] 孙柏忠.物理光学[M].武汉:华中理工大学出版社, 1989:164-170.
 SUN Bai-zhong. Physical optics [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology (HUST) Press, 1989:164-170. (in Chinese)
- [4] 常久伟,徐菌,史庆军.白光干涉的谱分析及其数据处 理[J].应用光学,2001,22(6):28-30.
 CHANG Jiu-wei, XU Yin, SHI Qing-jun. The analysis of white light interference pattern and data processing[J]. Journal of Applied Optics, 2001,22 (6):28-30. (in Chinese)
- [5] 李俊韬,朱健,王自鑫,等.发光二极管的时间与空间 相干性研究[J].中国激光,2005, 32(1):31-34.

LI Jun-tao,ZHU Jian,WANG Zi-xin, et al. Study of temporal and spatial coherence of light emitting diode[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005,32(1): 31-34. (in Chinese)

- [6] 蒋礼,罗少轩,阳艳,等.用迈克尔逊干涉仪测量全息 干板膜厚度[J].应用光学,2006,27(3):250-253.
 JIANG Li, LUO Shao-xuan, YANG Yan, et al. Thickness measurement of thin film for holographic plate by Michelson interferometer [J]. Journal of Applied Optics, 2006,27(3):250-253. (in Chinese)
- [7] WANG Wei, KOZAKI H, ROSEN J, et al. Synthesis of longitudinal coherence functions by spatial modulation of an extended light source: a new interpretation and experimental verifications [J]. Applied Optics, 2002,41(10):1962-1971.
- [8] ROSEN J, TAKEDA M. Longitudinal spatial coherence applied for surface profilometry [J]. Applied Optics, 2000, 39(23):4107-4111.
- [9] RYABUKHO V, LYAKIN D, LOBACHEV M. Influence of longitudinal spatial coherence on the signal of a scanning interferometer [J]. Optics Letters, 2004,29(7):667-669.
- [10] 祝继彬.提高迈克耳逊干涉仪灵敏度及精度的可能 性[J].光学学报,1982,2(6):573-574.
 ZHU Ji-bin. Possibilities of improving the sensitivity and measuring accuracy for the Michelson interferometer [J]. Acta Optica Sinica,1982,2(6): 573-574. (in Chinese)
- [11] 贾岩,杨远洪.宽谱光源干涉特性的实验研究[J].光 电子·激光,2006,17(3):372-376.
 JA Yan,YANG Yuan-hong. Experimentally study on coherence characteristics of broad band sources
 [J]. Journal of Optoelectronics.Laser, 2006,17(3): 372-376. (in Chinese)
- [12] OHMI M, NISHI H, KONISHI Y, et al. Highspeed simultaneous measurement of refractive index and thickness of transparent plates by lowcoherence interferometry and confocal optics [J]. Meas. Sci. Technol., 2004,15(8):1531-1535.