

# 利用光速调控技术提高干涉仪灵敏度

王 号 张春光\* 李 晖

(福建师范大学物理与光电信息科技学院, 福建省光子技术重点实验室,  
医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007)

**摘要** 为了提高光学干涉仪的灵敏度,从光速调控技术出发,理论上得到应用慢光以及超光速介质的光学干涉仪的灵敏度与介质群折射率的关系。该关系表明利用超光速介质的光学干涉仪可以获得很高的光学灵敏度,在慢光情况下对应材料的吸收区域对于弱信号的探测不利,而超光速情况下对于弱信号的探测更有优势。

**关键词** 非线性光学;光学干涉仪;光速调控;灵敏度

**中图分类号** O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.041902

## Sensitivity Improvement of Optical Interferometer Based on Controllable Group Velocity

Wang Hao Zhang Chunguang Li Hui

(Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology, Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine, Ministry of Education, School of Physics and Optoelectronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China)

**Abstract** In order to enhance the sensitivity of an optical interferometer, we deduce the relation between the group refractive index and the optical sensitivity of the interferometer by using slow or fast light material. The relation demonstrates that high optical sensitivity of an interferometer can be got by using fast light material. Under the condition of slow light, absorption area of corresponding material does harm to weak signal detection, but the condition of fast light benefits weak signal detection.

**Key words** nonlinear optics; optical interferometer; controllable light velocity; sensitivity

**OCIS codes** 190.0190; 270.0270; 260.2030

## 1 引 言

最近几年在非线性质中实现光速的调控成为相关领域的研究热点<sup>[1~9]</sup>。光速调控技术之所以如此吸引学者们的目光,一方面是光速调控可以重新审视已有的物理规律,并加深理解;另一方面,光速调控技术在光缓存以及高灵敏度光学传感器等方面有着潜在的应用前景<sup>[10~14]</sup>。通常来说单一频率的光波在介质中的传播速度为 $c/n$ ,这里 $c$ 为真空中的光速, $n$ 为介质的折射率。对于包含不同频率成份的光脉冲来说,通常用群速度 $v_g$ 来表示脉冲峰值位置的移动速度,可以表示为 $v_g = c/n_g$ , $n_g$ 为群折射率,可以表示为 $n_g = dk/d\omega$ , $\omega$ 为角频率, $k$ 为波数。对于正常色散介质 $n_g$ 可以很大,对应的群速度非常小,表示为群速度的超慢光速。同样,对应反常色散介质 $n_g$ 可以很小甚至为负值,对应群速度的超光速传播,包括绝对的超光速( $v_g > c$ )和负群速度( $v_g < 0$ )两种情况。随着光速调控技术研究的不断深入,关于可控光速的应用研究也有了新的进展。但是,到目前为止关于可控光速的应用研究主要集中在可控的慢光方面,而对于超光速的应用却很少提及。本文通过理论推导,证明了在传统的光学干涉仪中引入慢光和超光速介质都可以有效地提高干涉仪的灵敏度,

收稿日期: 2010-08-19; 收到修改稿日期: 2010-11-03

基金项目: 福建省自然科学基金计划(2010J05129, 2010J05131)资助课题。

作者简介: 王 号(1978—),男,博士,讲师,主要从事非线性光学和生物医学光子学等方面的研究。

E-mail: haowang@fjnu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: cgzhang@fjnu.edu.cn

干涉仪的灵敏度与介质的群折射率绝对值成正比。通过调节群速度也就是群折射率来控制干涉仪的灵敏度,在适当的条件下,干涉仪的灵敏度可以提高几倍到几十倍。理论结果表明,利用具有负群速性质的超光速介质也可以提高光学干涉仪的灵敏度。另外,根据 K-K 色散关系,所谓的正常色散介质与反常色散介质的区别就在于是共振吸收还是共振增益。如果是共振增益将产生正常色散对应慢光传播;如果是共振吸收将产生超光速,二者并无本质的不同。

## 2 理论分析和实验设计

以如图 1 所示的马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪为例,比较利用非色散介质以及色散介质干涉仪灵敏度的差别。从图 1 中可以看出,经过干涉仪上下两臂的两束光相位差可以表示为

$$\Delta\Phi = knL, \quad (1)$$

式中  $k$  表示波数,  $n$  表示介质的折射率。 $k$  可以表示为  $k = \omega n/c$ ,  $\omega$  为角频率,  $L$  是光学介质的长度。假设干涉仪上下两臂的相位差全部来自于光学干涉仪上臂插入的介质。该干涉仪的透过率可以表示为

$$T = (1 + \cos \Delta\Phi)/2, \quad (2)$$

随着干涉仪两臂光束相位差的不同,在干涉仪的出射面上将出现明暗相间的干涉条纹。调节入射光的频率,也就是改变了两束光的相位差  $\Delta\Phi$ ,将使干涉仪出射面的条纹移动,通过观察探测器上条纹的移动也能获得光源波长的变化情况。因此,利用光源波长变化和干涉仪条纹移动之间的关系来表示干涉仪的灵敏度  $S$ ,

$$S = \frac{d\Delta\Phi}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{\omega n L}{c} \right) = \frac{L}{c} \left( n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) = \frac{L n_g}{c}, \quad (3)$$

式中  $n_g = n + \omega dn/d\omega$  代表群折射率。该式建立了色散介质群折射率和干涉仪灵敏度的关系。表明干涉仪的灵敏度和材料群折射率成正比,也就是说通过利用具有大的群折射率的介质,可以获得很高光谱灵敏度的光学干涉仪。

从(3)式可以看出,对于应用具有大群折射率慢光介质的干涉仪来说,更高的光谱分辨本领是可以实现的。那么利用具有反常色散效应的负群速介质干涉仪的光谱灵敏度会如何变化呢?以楔形干涉仪为例,比较利用非色散介质以及色散介质干涉仪的灵敏度差别。

图 2 所示的楔形干涉仪的光强透过率可以表示为

$$I_t(y) \approx \frac{t^2 T_L}{(1 - rT_L)^2} \frac{1}{1 + F \sin^2 \Delta\Phi(y)}, \quad (4)$$

式中  $\Delta\Phi(y) = k(L_0 + \theta y) + \varphi_0$ ,  $F \equiv 4r_L^2/(1 - rT_L)^2$ ,  $r$ ,

$t$  分别表示空气到色散材料的反射率和透射率;  $T_L \equiv \exp(-\alpha L_0)$  为色散介质的透过率,  $\alpha$  为吸收系数;  $\varphi_0$  是由空气与介质之间的反射引起的光波的相变;  $F$  是非涅耳系数。这样,在入射信号光波长确定的情况下,在楔形材料的出射面上将形成稳定的干涉条纹。如果调谐光源的波长,将引入相位差变化,进而导致条纹的移动。因此,通过观测楔形干涉仪出射面的干涉条纹移动情况来获得光源信号的波长变化。以固定的速率调谐光源波长时,干涉仪的干涉条纹移动得越快说明该干涉仪的波长灵敏度越高。因此定义该干涉仪的波长灵敏度为

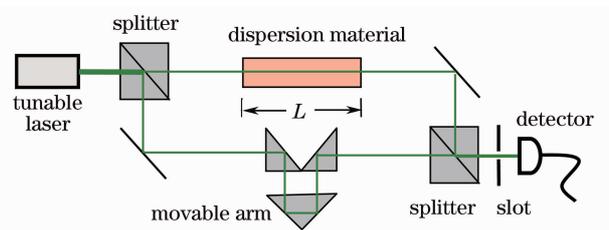


图 1 含有色散介质的 M-Z 干涉仪示意图

Fig. 1 M-Z interferometer with dispersion material

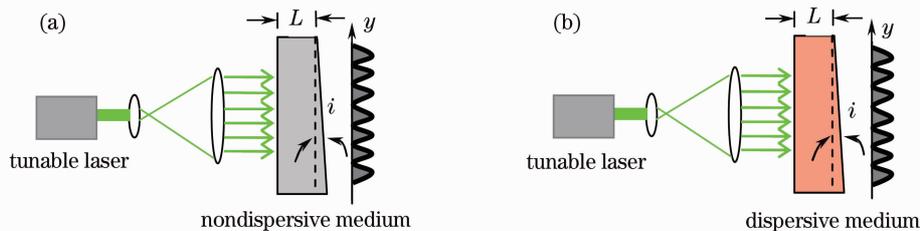


图 2 (a) 利用非色散介质的楔形干涉仪示意图, (b) 含有色散介质的楔形干涉仪示意图

Fig. 2 (a) Sketch of wedged interferometer with nondispersive medium, (b) sketch of wedged interferometer with dispersive medium

条纹的移动速度随着光源角频率的变化关系。给出在干涉仪出射面上的第  $m$  级条纹的位置,

$$y_m = \frac{2m\pi}{ink}. \quad (5)$$

从(5)式中可以得到,调谐光源的波长时,干涉仪条纹随着角频率的移动速率,可以表示为

$$\frac{dy_m}{d\omega} = -\frac{2m\pi c}{i\omega^2 n^2} \left( n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) = -\frac{2m\pi c}{i\omega^2 n^2} n_g. \quad (6)$$

(6)式表明如果  $n_g$  很大,条纹相对于角频率的移动速度将变大。这里负号的意义是表示干涉条纹的移动方向,也就是说如果定义慢光介质导致的条纹移动为正方向的话,那么具有负群速度的超光速介质所导致的条纹移动为负方向。只要  $n_g$  的绝对值很大,干涉仪的灵敏度就会相应提高。该灵敏度的提高表现为调谐激光的波长时,条纹移动的速度变快。而对于非色散介质来说  $n_g \approx n$ ,条纹的移动速度只和介质的相折射率有关。因此,比较采用色散介质的楔形干涉仪和采用非色散介质的干涉仪,由于介质的色散作用,色散介质干涉仪相比于非色散介质干涉仪的灵敏度提高为  $n_g/n$  倍。这里要强调的是,无论对于正常色散介质还是反常色散介质,该结论同样适用。比如,对应群折射率绝对值相同的正常色散和反常色散介质,它们对干涉仪灵敏度提高的贡献相同,都表现为  $n_g/n$  倍,只不过从实验观测看来,当调谐激光光源的波长时,干涉条纹的移动方向相反,但是条纹随着角频率的移动速率相同,也就是二者的灵敏度相同。

例如,文献[15]中给出了若丹明 6G 酒精溶液的色散曲线。从色散曲线可以获得,在 554 nm 表现出正常色散特性,群折射率约为 5,而相折射率约为 1.41。说明此时波长附近,若丹明 6G 表现出慢光材料特性,按前面的理论计算,在该波长附近利用若丹明 6G 的楔形干涉仪灵敏度将提高大约 3 倍。同样,540 nm 附近介质的群折射率约为 -2.5,而相折射率约为 1.4,也就是说在该波长附近表现出负群速特性,在该波长附近的超光速楔形干涉仪的灵敏度也将提高将近两倍。如果选取适当的色散材料,干涉仪的光谱灵敏度将进一步提高。

### 3 结 论

分析了利用色散介质的光学干涉仪光谱灵敏度问题。从理论分析可知,利用慢光介质可以提高光学干涉仪的光谱灵敏度,同样,该结论也适用于具有负群速特性的超光速材料。二者对于干涉仪灵敏度的提高均由群折射率的绝对值与相折射率的比值决定。而且由 K-K 色散关系可知,在慢光情况下,也就是正常色散对应材料的吸收区域对于弱信号的探测不利,而超光速情况下即反常色散时,工作在增益区,对于弱信号的探测更有优势。

### 参 考 文 献

- 1 L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton *et al.*. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas[J]. *Nature*, 1999, **397**(6720): 594~598
- 2 L. J. Wang, A. Kuzmich, A. Dogariu. Gain-assisted superluminal light propagation[J]. *Nature*, 2000, **406**(6793): 277~279
- 3 M. S. Bigelow, N. N. Lepeshkin, R. W. Boyd. Observation of ultraslow light propagation in a ruby crystal at room temperature[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(11): 113903-1~4
- 4 M. S. Bigelow, N. N. Lepeshkin, R. W. Boyd. Superluminal and slow light propagation in a room-temperature solid[J]. *Science*, 2003, **301**(5630): 200~202
- 5 Z. L., Y. Dong, Q. Li. Slow light in multi-line brillouin gain spectrum[J]. *Opt. Express*, 2006, **15**(4): 1871~1877
- 6 G. Zhang, F. Bo, R. Dong *et al.*. Phase-coupling-induced ultraslow light propagation in solids at room temperature[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(3): 133903-1~4
- 7 K. Y. Song, M. G. Herráez, L. Thévenaz. Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering[J]. *Opt. Express*, 2004, **13**(1): 82~88
- 8 A. Schweinsberg, N. N. Lepeshkin, M. S. Bigelow *et al.*. Observation of superluminal and slow light propagation in erbium-doped optical fiber[J]. *Europhysics Letters*, 2006, **73**(2): 218~224
- 9 H. Wang, Y. Zhang, N. Wang *et al.*. Observation of superluminal propagation at negative group velocity in C<sub>60</sub> solution

- [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(12): 121107-1~3
- 10 Y. Zhang, H. Wang, L. Ma *et al.*. Direct observation of signal evolution of slow and fast light in media with saturated and reverse saturated absorption[J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 2007, **89**(2~3): 141~143
- 11 Wang Hao, Zhang Yundong, Ye Jiaobo *et al.*. Direct observation of signal evolution of slow and fast light in Erbium-doped optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1938~1942  
王 号, 掌蕴东, 叶建波 等. 在掺铒光纤中直接观测慢光和超光速信号的演化[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1938~1942
- 12 L. Yosef Mario, M. Koy Chin. Optical buffer with higher delay-bandwidth product in a two-ring system[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 1796~1807
- 13 Z. Shi, R. W. Boyd, D. J. Gauthier *et al.*. Enhancing the spectral sensitivity of interferometers using slow-light media [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(8): 915~917
- 14 Z. Shi, R. W. Boyd, R. M. Camacho *et al.*. Slow-light fourier transform interferometer[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(24): 240801-1~4
- 15 W. Leupacher, A. Panzkofer. Refractive-index measurement of absorbing condensed media[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(10): 1554~1558