

基于快慢光技术的高光谱灵敏度干涉仪的理论研究

蔡元学¹, 明成国¹, 掌蕴东²

¹天津科技大学理学院物理系光子学与先进传感技术实验室, 天津 300457;

²哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 分析了光学材料的正常色散与反常色散特性,证明了基于光学材料色散特性的干涉仪可以实现慢光与快光的结合。理论分析了基于快慢光技术的 Mach-Zehnder(M-Z)干涉仪的光谱灵敏度,与具有相同结构的传统 M-Z 干涉仪和仅依赖于慢光技术的 M-Z 干涉仪相比,基于快慢光技术的 M-Z 干涉仪的光谱灵敏度大幅提升。

关键词 光谱学; 色散特性; 干涉仪; 光谱灵敏度

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.093002

Theoretical Study on High Spectral Sensitivity Interferometer Based on Superluminal and Slow Light Technology

Cai Yuanxue¹, Ming Chengguo¹, Zhang Yundong²

¹Laboratory of Photonics and Advanced Sensing Technology, Department of Physics, College of Science, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

²National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Institute of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract We analyze the normal and anomalous dispersion characteristics of optical materials, and prove that a kind of interferometer based on dispersion characteristics of optical materials can realize the combination of superluminal light and slow light. We also theoretically analyze the spectral sensitivity of Mach-Zehnder (M-Z) interferometer based on superluminal and slow light technology. Compared with the conventional M-Z interferometer which has the same structure with the above interferometer and the M-Z interferometer based on slow light technology, the spectral sensitivity of the M-Z interferometer based on superluminal and slow light technology increases sharply.

Key words spectroscopy; dispersion characteristic; interferometer; spectral sensitivity

OCIS codes 300.6340; 300.6420; 300.6470

1 引言

光学干涉仪的光谱性能与干涉过程中各光路之间的相位关系息息相关,并在很大程度上决定着通过干涉仪能够获取的信息量。传统光学干涉仪采用的光学材料一般多为非色散介质,并采用物理量光程差来描述干涉仪中各光路之间的相位关系,而在非色散介质中群速度与相速度的大小几乎相等,因此,这种方法能够很好地解释目前所遇到的诸多光学干涉现象。

随着研究的深入,人们对基于色散特性实现快慢光现象的物理机制有了更深的理解。最近的研究结果表明,慢光技术在激光光谱学、光通信、光缓存等领域存在着巨大的潜在应用价值。基于慢光技术提高光学干涉仪的光谱灵敏度与光谱分辨率等光谱性能方面的研究取得了较大进展,并有利地证明了慢光干涉仪比传统光学干涉仪具有更高的光谱分辨率与灵敏度^[1-3]。针对慢光干涉仪工作光谱范围过窄的问题,研究人员提出利用温度来控制色散材料的光谱范围等改进方案^[4]。相对于慢光技术在诸多领域的应用研究进展,快

收稿日期: 2016-12-12; 收到修改稿日期: 2017-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(61405146)、天津市应用基础与前沿技术研究计划(14CQNJC01700)

作者简介: 蔡元学(1982—),男,博士,讲师,主要从事激光光谱学方面的研究。E-mail: yuanxue_cai@tust.edu.cn

光技术的应用性研究进展得相对缓慢,且鲜有文献报道。目前仅在基于结构色散特性提高探测器共振响应特性,以及提高激光陀螺灵敏度等方面有着少许报道^[5-6]。虽然实现快慢光技术的方式有多种^[7-8],但结合快慢光技术改进光谱仪器性能的研究报道还很少。

本文分析了光学材料的正常色散与反常色散对光波传播特性的影响,证明了基于光学材料的色散特性可以实现超光速与慢光现象。此外还分析了由光学材料正常色散与反常色散介质构成的干涉仪的相位变化与光谱特性,并得出了基于材料色散特性的快慢光技术可以显著提高传统干涉仪光谱灵敏度的结论。本文提出的理论模型及技术方案可为后续实验研究的开展提供理论依据,并在激光陀螺、激光光谱学、激光雷达、高速光开关等领域具有巨大的潜在应用价值,可为其应用性研究提供新的思路。

2 基于快慢光技术的干涉仪光谱灵敏度理论模型

快慢光现象与光学系统中的光学材料色散特性有着紧密的联系。研究表明,基于光学材料的正常色散特性可以获得较大的群折射率,从而在介质中获得极慢光速,而介质的较大群折射率使光波在介质内部的传播产生较大的时间延迟。同时,基于光学材料的反常色散特性可以获得负群折射率,从而实现超光速现象^[9]。而干涉过程中相位的变化与群折射率有着密切的联系^[1-3],因此,对于采用正常色散与反常色散介质作为光学材料的慢光干涉仪,不能再单纯地以各光路之间的光程关系来描述它的干涉过程,而必须重新分析影响其干涉过程的因素。

图1所示为Mach-Zehnder(M-Z)高光谱灵敏度干涉仪示意图,在M-Z干涉仪中,经过分束器BS的光束分别沿着不同的路径传播,其中一路光束通过折射率为 n_1 [$n_1 = n_1(\nu)$, ν 为入射光的频率]、长度为 L 的正常色散介质,另一束光则在折射率为 n_2 [$n_2 = n_2(\nu)$]、长度为 L 的反常色散介质中传播。因折射率不同,两束光存在光程差。若通过调解使两个分束器BS与反射镜M1、M2都严格平行,并假设系统中两光路的光学材料厚度相同,则其透射强度为

$$I_t = \frac{I_0}{2}(1 + \cos \Delta\phi), \quad (1)$$

式中 I_0 为入射光强, $\Delta\phi = 2\pi\nu c^{-1} n_{\text{eff}}(\nu)L$ 为两光路之间的相位差。其中, $n_{\text{eff}}(\nu) = n_1(\nu) - n_2(\nu)$ 为重新定义的有效折射率, c 为光在真空中的传播速度, $n_1(\nu)$ 为正常色散介质的折射率, $n_2(\nu)$ 为反常色散介质的折射率,通常情况下 $n_1(\nu) > 0, n_2(\nu) < 0$ 。

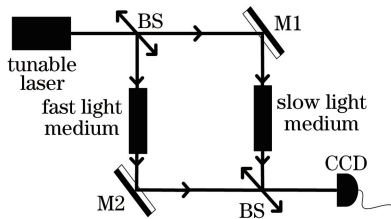


图1 Mach-Zehnder高光谱灵敏度干涉仪示意图

Fig. 1 Schematic of Mach-Zehnder high spectral sensitivity interferometer

由(1)式可知,两光路之间的相位差 $\Delta\phi$ 是频率 ν 与横向坐标的函数,当光学干涉系统中的各参数确定后,相位差 $\Delta\phi$ 正比于有效折射率 $n_{\text{eff}}(\nu)$ 。因此,在分光束干涉过程中,若改变入射光频率 ν ,必然会引起相位 $\Delta\phi$ 的变化,从而引起透射光强度变化与干涉条纹的重新分布。因此,可通过探测透射光强度变化对频率 ν 变化的响应能力来描述光谱灵敏度。即干涉仪的光谱灵敏度可以定义为

$$\frac{d\Delta\phi}{d\nu} = \frac{d}{d\nu} \left[\frac{2\pi\nu}{c} n_{\text{eff}}(\nu)L \right] = \frac{2\pi L}{c} \left(n_{\text{eff}} + \nu \frac{dn_{\text{eff}}}{d\nu} \right) = \frac{2\pi L n_{g,\text{eff}}}{c}, \quad (2)$$

式中 $n_{g,\text{eff}}$ 为干涉系统的有效群折射率, $n_{g,\text{eff}} \equiv n_{g,1} - n_{g,2}$, $n_{g,1} \equiv n_1 + \nu dn_1(\nu)/d\nu$ 为正常色散介质的群折射率,通常在其吸收带附近具有很强的色散特性。因 $\nu \cdot dn_1(\nu)/d\nu \gg 1$,故 $n_{g,1}$ 远大于0,因此可以实现较大的时间延迟效应,获得慢光现象。 $n_{g,2} \equiv n_2 + \nu \cdot dn_2(\nu)/d\nu$ 为反常色散介质的群折射率,且 $\nu \cdot dn_2(\nu)/d\nu \ll 0$,因此 $n_{g,2}$ 远小于0,可以实现超光速现象。同时(2)式表明,除了与两光路的介质厚度相

关之外,干涉仪的光谱灵敏度正比于介质的有效群折射率 $n_{g,eff}$ 。此外,在快慢光结合的干涉系统中, $n_{g,eff}$ 取决于慢光介质的群折射率 $n_{g,1}$ 与快光介质的群折射率 $n_{g,2}$,因此,相比于单独采用色散介质的干涉系统,快慢光结合的干涉系统具有更大的有效群折射率。

由 Kramers-Kronig 色散关系可知^[10],色散介质在吸收峰区域通常伴随着较大的折射率变化,这使得色散介质的群折射率在该区域变得很大。因此,通过光学材料的强色散特性可以有效提高干涉仪的光谱灵敏度。在传统干涉仪中多采用群折射率与折射率几乎相同($n_g \approx n$)的非色散介质作为光学材料。因此,传统楔型干涉仪的光谱灵敏度仍可认为正比于折射率 n 。这也进一步说明,与传统干涉装置相比,基于快慢光技术设计的干涉仪在相同条件下可以使干涉仪的光谱灵敏度提高 $n_{g,eff}/n$ 倍。此外,结合正常色散与反常色散介质所具有的较大的有效群折射率,可以使干涉仪在较小的距离内产生较大的强度变化,这将非常有利于装置的小型化,从而满足航空航天等特定领域对仪器装置小型化的需求。

3 高光谱灵敏度快慢光干涉仪理论结果及讨论

在探索未知世界的过程中,随着研究的深入,人们对光谱仪器性能提出了更高的要求,而光波在光学介质中的传播特性是介质性能的主要影响因素之一。因此,基于控制光速,并将其效应应用于改善仪器性能指标的光谱仪器具有重要意义,人们已在气体、固体、人造结构介质等光学材料中获得了慢光与快光现象。Bigelow 等^[9]利用 476 nm 激光器与 488 nm 激光器,在室温下 4 cm 长的紫翠玉晶体中成功观察到了慢光现象与快光现象,其群速度分别可以达到 $91 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 与 $-800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对应的慢光群折射率 $n_{g,1}$ 为 3.3×10^6 ,负群折射率 $n_{g,2}$ 为 -3.75×10^5 。由此可知,紫翠玉晶体所能获得的有效群折射率 $n_{g,eff}$ 为 3.675×10^6 。2008 年,Residori 等^[11]利用 532 nm 脉冲激光器在液晶材料中实现了慢光与快光,其群速度分别达到了 $0.13 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 与 $-0.21 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。Baba^[12]对利用光子晶体的结构色散特性实现慢光的方法进行了梳理。可以将这些材料的快慢光特性有机组合起来,在一定光谱范围内利用其光波传播特性来提高光谱仪的光谱灵敏度等光谱特性。

以半导体材料 ZnSe 作为慢光介质,并结合快光介质紫翠玉晶体来分析结合快慢光技术的高光谱灵敏度干涉仪。图 2 是 II-VI 族半导体材料 ZnSe 的折射率与群折射率分布,ZnSe 的带隙能为 2.28 eV,高光谱灵敏度慢光干涉仪的工作光谱范围为 $482 \sim 500 \text{ nm}$ ^[13]。由图 2 可知,ZnSe 在 488 nm 附近存在较大的折射率变化,可获得较大的群折射率($n_{g,1}=10$)。因此,结合 II-VI 族半导体 ZnSe 与紫翠玉晶体,在 488 nm 附近能够获得的有效群折射率为 $n_{g,eff}=375010$ 。相对于具有相同结构的传统干涉装置,结合快慢光技术的干涉仪的光谱灵敏度提高了 138893 倍。此外,若在上述干涉结构中,仅采用慢光介质作为光学材料,则其有效群折射率仍依赖于慢光介质的群折射率,干涉仪的光谱灵敏度正比于群折射率 n_g 。因此,结合快慢光技术的干涉仪利用光学材料的正、负群折射率与其对应的快慢光现象,可以在同结构条件下使光谱灵敏度提高 $n_{g,eff}/n_g$ 倍,远大于单独使用慢光技术的同等结构干涉仪的光谱灵敏度,采用非色散介质($n_g \approx n$)的传统干涉仪的光谱灵敏度也将提高 $n_{g,eff}/n$ 倍。

结合光学材料的正负色散特性可以显著地提高干涉仪的光谱灵敏度,但通过上述分析发现,若要使上述技术得到推广与实际应用,还需要解决以下 2 个问题:1) 材料的色散特性(正色散或负色散)通常存在于吸

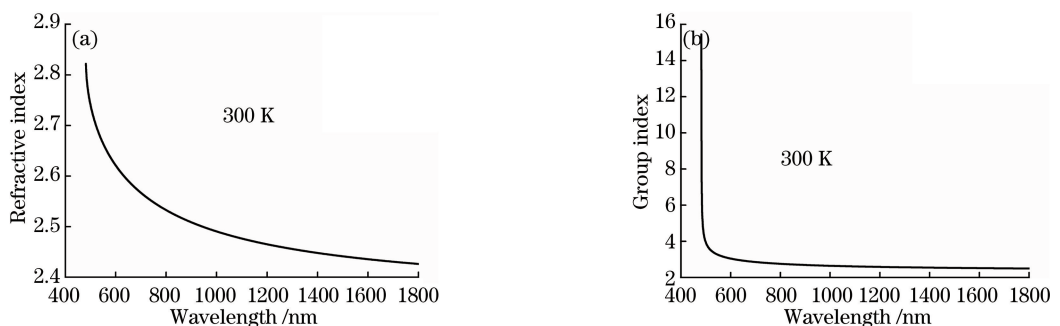


图 2 ZnSe 的(a)折射率和(b)群折射率^[13]

Fig. 2 (a) Refractive index and (b) group index of ZnSe^[13]

收较大的区域,因此若要实现较大的有效群折射率与高透射率,需要结合电磁感应透明等技术,使快慢光介质在色散区域内实现透明;2) 结合快慢光技术在 488 nm 附近可以获得较大的光谱灵敏度,但对于光谱仪器而言,工作光谱范围也是一个非常重要的指标,因此通过控制温度^[4]、压力、应力等改变快慢光介质的光学特性,在较大的光谱范围内实现快慢光现象是非常重要的。图 3 为半导体材料 GaAs 在不同温度下的光学特性^[4]。由图 3 可知,随着温度变化,半导体材料的截止频率会有较大的移动,在调谐温度 200 K 以内即能获得近 100 nm 的工作光谱调谐范围,远大于单一温度下约 30 nm 的工作光谱范围。上述 2 个问题是快慢光技术在光谱仪器中进一步应用的制约因素之一,也是需要进一步研究解决的问题。本课题组的研究结果表明,前文所述内容可在多种材料中实现,并不局限于某一特定材料^[13]。

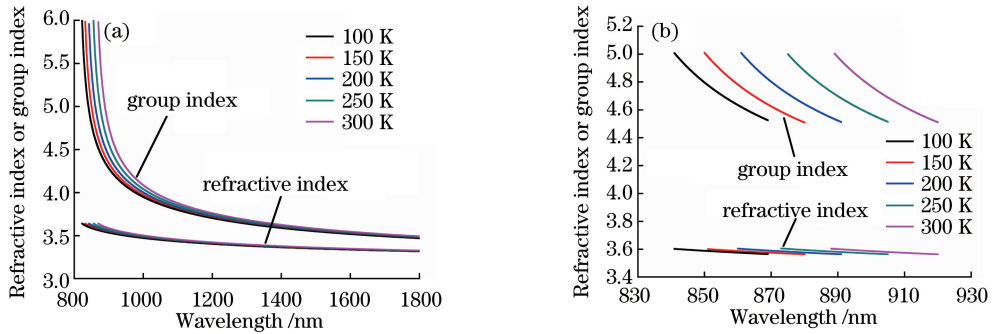


图 3 GaAs 在不同温度下的光学特性。(a) 折射率与群折射率;(b) 工作光谱范围

Fig. 3 Optical properties of GaAs at different temperatures. (a) Refractive index and group index; (b) working spectral range

4 结 论

通过分析光学材料的正常色散与反常色散对光波传播特性的影响,理论分析了 M-Z 干涉仪的相位变化关系与光谱灵敏度,并分析了结合 ZnSe 半导体材料正常色散特性的慢光技术与紫翠玉晶体反常色散特性的快光技术的干涉仪的光谱灵敏度,证明通过快慢光技术的结合,可以更好地提高干涉仪的光谱灵敏度。此外,分析了结合快慢光技术干涉仪的局限性,给出了今后研究人员有待解决的问题,而这也将为开展后续实验研究提供理论依据,并为结合快慢光技术提高仪器光谱性能、光纤陀螺精度、光学传感器响应能力等应用性研究提供新思路。

参 考 文 献

- [1] Shi Z M, Boyd R W, Camacho R M, *et al.* Slow-light Fourier transform interferometer[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(24): 240801.
- [2] Cai Y X, Ming C G, Ren X B, *et al.* Enhanced spectral resolution of NIR Fourier transform interferometer based on the dispersive property of GaAs[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(7): 208.
- [3] Magaña-Loaiza O S, Gao B, Schulz S A, *et al.* Enhanced spectral sensitivity of a chip-scale photonic-crystal slow-light interferometer[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1431-1434.
- [4] Zhang Y D, Cai Y X, Dang B S, *et al.* Tunable spectral range slow light interferometer based on the temperature characteristics of semiconductor GaAs[J]. *Journal of Physics D*, 2010, 43(50): 505104.
- [5] Salit M, Pati G S, Salit K, *et al.* Fast-light for astrophysics: super-sensitive gyroscopes and gravitational wave detectors[J]. *Journal of Modern Optics*, 2007, 54(16/17): 2425-2440.
- [6] Shahriar M S, Pati G S, Tripathi R, *et al.* Ultrahigh enhancement in absolute and relative rotation sensing using fast and slow light[J]. *Physical Review A*, 2007, 75(5): 053807.
- [7] Boyd R W, Gauthier D J. Controlling the velocity of light pulses[J]. *Science*, 2009, 326(5956): 1074-1077.
- [8] Boyd R W. Slow and fast light: fundamentals and applications[J]. *Journal of Modern Optics*, 2009, 56(18/19): 1908-1915.
- [9] Bigelow M S, Lepeshkin N N, Boyd R W. Superluminal and slow light propagation in a room-temperature solid[J]. *Science*, 2003, 301(5630): 200-202.

- [10] Boyd R W. Nonlinear optics[M]. 2nd ed. New York: Elsevier Science Incorporated, 2003.
- [11] Residori S, Bortolozzo U, Huignard J P. Slow and fast light in liquid crystal light valves[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 203603.
- [12] Baba T. Slow light in photonic crystals[J]. Nature Photonics, 2008, 2(8): 465-473.
- [13] Cai Yuanxue, Zhang Yundong, Dang Boshi, *et al.* High sensitivity slow light interferometer based on dispersive property of III-V and II-VI semiconductor materials[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(4): 040701.
蔡元学, 掌蕴东, 党博石, 等. 基于 III-V 与 II-VI 族半导体材料色散特性的高灵敏度慢光干涉仪[J]. 物理学报, 2011, 60(4): 040701.