

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*

蔡元学 掌蕴东[†] 党博石 吴昊 王金芳 袁萍

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室光电电子技术研究所, 哈尔滨 150080)

(2010年6月10日收到; 2010年7月14日收到修改稿)

分析了Ⅲ-V与Ⅱ-VI族半导体材料的光学特性, 证明半导体慢光介质不但可以提高干涉仪的光谱灵敏度, 而且可以获得远大于气体慢光介质的的工作光谱范围. 实验证明, 基于慢光介质 GaAs 的干涉仪光谱灵敏度相对于传统的干涉仪提高约 3.2 倍.

关键词: 干涉仪, 非线性光学, Ⅲ-V与Ⅱ-VI族半导体材料

PACS: 07. 60. Ly, 42. 65. - k, 72. 80. Ey

1. 引言

干涉仪在现代高精度干涉测量、地球物理环境观测、生物工程以及量子信息处理等领域有着广泛的应用, 并随着科学技术研究水平的提高, 人们对干涉仪的光谱性能也提出了更高的要求. 自 Hua 小组^[1]采用电磁感应透明技术在钠原子蒸气中实现超慢光速以来, 经多年的研究积累及探索, 研究人员已在原子蒸气^[1]、固体介质^[2,3]、光子晶体^[4-6]等介质中实现了对光速的有效控制, 而在慢光介质中的光速减慢, 将会影响干涉过程中的相位关系, 进而影响干涉仪的光谱特性. 基于慢光技术, 人们率先在提高干涉仪的光谱灵敏度与分辨率方面开展了应用研究, 如基于半导体材料的色散特性提高干涉仪的光谱灵敏度^[7-9]、利用原子蒸气的大群折射率提高傅里叶变换干涉仪的光谱分辨率^[10]、利用电磁感应透明技术提高 Sagnac 干涉仪的旋转灵敏度等^[11].

虽然研究人员已在原子蒸气中实现了相对较大的光谱分辨率的提高, 但作为干涉仪的实际应用而言气体慢光介质工作光谱范围过窄的缺陷势必限制其应用范围^[8]. 相对于气体慢光介质, 半导体材料则可在禁带附近的较大光谱范围内实现对光

速的有效控制, 这将使我们能够在较小的空间距离内获得较大的光程变化与相位变化, 使慢光干涉仪同时具有高光谱灵敏度与较大工作带宽^[7,9]. 此外, 现代成熟的半导体工艺水平以及日趋精密的机电控制等因素, 也将非常有利于固体慢光介质的实际应用. 在本文中我们分析讨论了Ⅲ-V与Ⅱ-VI族半导体材料的光学特性, 给出与它们相对应的慢光区域, 证明了这些半导体材料都可以使干涉仪在较大的工作光谱范围内获得光谱灵敏度的较大提高.

2. 干涉仪的光谱灵敏度与介质群折射率的关系

如图 1 所示, 在 Mach-Zehnder 干涉仪中, 经过分束器 BS 的光束分别沿着不同路径传播, 其中一路光束通过折射率为 $n = n(\nu)$, 长度为 L 的色散介质, 另一束光则在自由空间中传播, 则两束光的光程就存在差异. 若通过调解使两个分束器 BS 与反射镜 M1, M2 都严格平行, 并补偿与介质厚度相对应的光程, 则其透射强度为

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

其中, I_0 为入射光强, 相位差 $\Delta\phi = \frac{2\pi\nu}{c}n(\nu)L$, ν 为入射光的频率, c 为光在真空中的传播速度. 由 (1)

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2007AA12Z112), 国家自然科学基金(批准号:60878006)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: ydzhang@hit.edu.cn

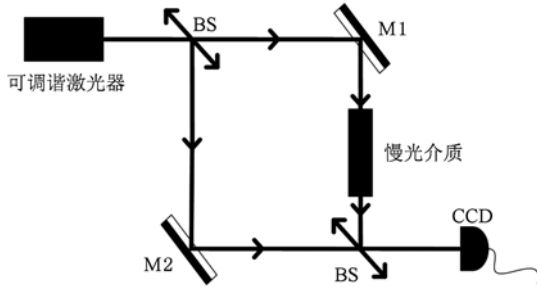


图1 Mach-Zehnder 慢光干涉仪示意图

式可知, $\Delta\phi$ 是频率 ν 与横向坐标的函数. 因此, 在分光干涉过程中, 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, 我们可以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. 即光谱灵敏度可以定义为^[7-9]

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\phi}{d\nu} &= \frac{d}{d\nu} \left[\frac{2\pi\nu}{c} n(\nu)L \right] \\ &= \frac{2\pi L}{c} \left(n + \nu \frac{dn}{d\nu} \right) = \frac{2\pi L n_g}{c}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $n_g \equiv n + \nu \frac{dn}{d\nu}$ 是慢光介质的群折射率. 由(2)式可知, 光谱灵敏度正比与介质的群折射率 n_g . 由 Kramers-Kronig 色散关系可知^[12], 色散介质在吸收峰区域, 常伴随着很大的折射率变化, 而这将使介质的群折射率 n_g 变得很大. 因此, 通过慢光介质的强色散特性, 可以有效提高干涉仪的光谱灵敏度. 相对于慢光干涉仪, 在传统干涉装置中多采用非色散材料 ($n_g \approx n$) 光学材料, 因此, 传统楔型干涉仪的光谱灵敏度将正比于折射率 n . 因此, 采用慢光介质

可以使干涉仪的光谱灵敏度提高 n_g/n 倍. 此外, 慢光介质具有的大群折射率, 可以使干涉仪在较小的距离变化内产生较大的相位改变, 这将非常有利于装置小型化.

3. III-V 与 II-VI 族半导体材料的折射率与群折射率

简并 n (或 p)-型 III-V 与 II-VI 族半导体材料在吸收边缘附近的折射率可通过下列量子理论来运算:

$$\begin{aligned} n(a) &= n(o) - [c_0 a/n(o)] [\pi/2 \\ &\quad - c_1 \tan^{-1}(y_F/a)], \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $n(o)$ 是半导体材料在吸收边的折射率; $c_0 = (3/2)\eta(w_v^2/w_c^2)$; $c_1 = 1$; n_c 是载流子浓度; $y_F = 2(n_c/N_v)1/3$ ^[13]. 下面给出 III-V 族半导体 GaAs, InP, InSb 与 II-VI 族半导体材料 CdTe, ZnSe, ZnTe 的折射率与相应群折射率理论计算结果, 并给出通过这些半导体材料能够获得高光谱灵敏度的光谱区域.

表1 半导体材料在吸收带附近的折射率由下列参数给出^[13]

参数	参数
$w_g = G/\hbar =$ 频率	$m_n =$ 电子有效质量
$m_p =$ 空穴有效质量	$l/m_r = l/m_n + l/m_p$
$G =$ 带隙能量	$\alpha_0 = (G/2m_n c^2)^{1/2}$
$\lambda_c = \hbar/m_n \alpha_0 c$	$V_c = \pi^2 \lambda^3 / 2$
$N_v = (4/3)1/V_c$	$\hbar\omega =$ 光子能量
$N_v^* = N_v (m_r/m_n)^{3/2}$	$w_v^2 = (4\pi e^2 N_v^* / m_n)$
$a = (1 - X)1/2$	$X = \hbar\omega/G$

III-V 族半导体材料的折射率与群折射率, 如图 2—4 所示.

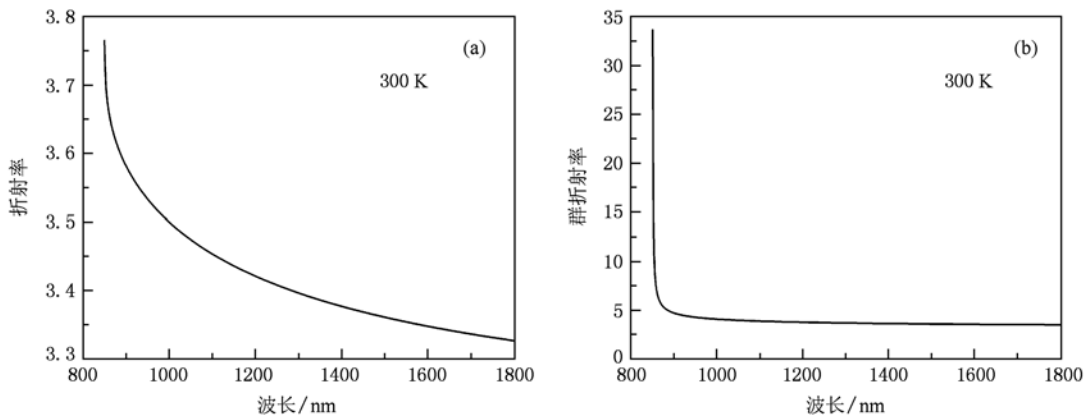


图2 高光谱灵敏度慢光干涉仪工作光谱范围: 880—1000 nm, 带隙能 $G = 1.43$ eV; $n_c = 6 \times 10^{16}$ cm⁻³ (a) 高阻 GaAs 折射率; (b) 高阻 GaAs 群折射率

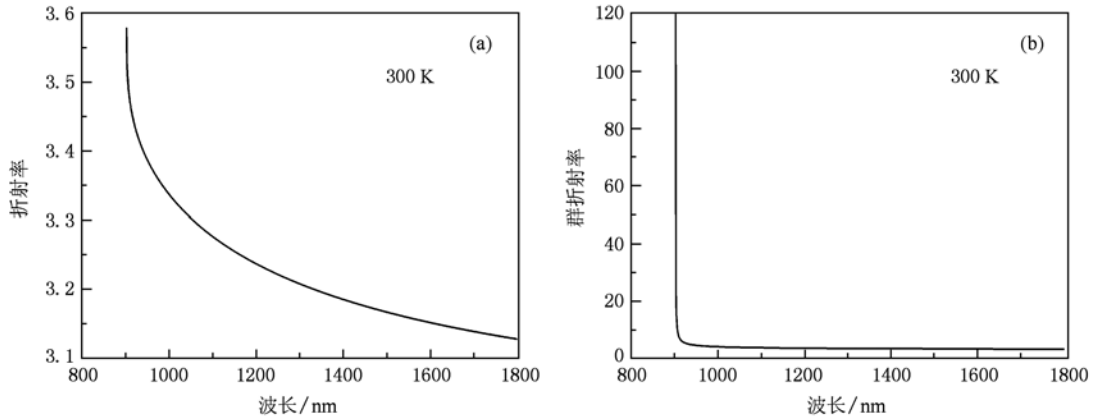


图3 高光谱灵敏度慢光干涉仪工作光谱范围:920—1000 nm,带隙能 $G = 1.35 \text{ eV}$, $n_e = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (a) InP 折射率; (b) InP 群折射率

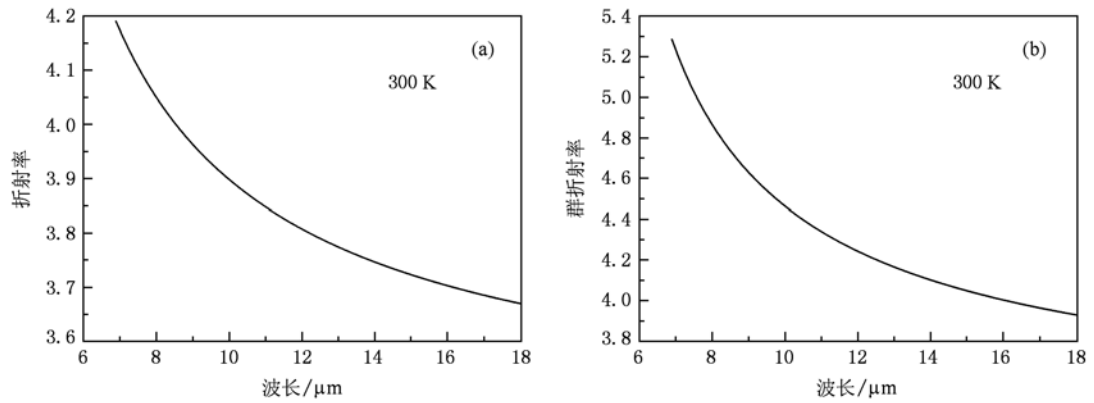


图4 高光谱灵敏度慢光干涉仪工作光谱范围:6.9—8 μm ,带隙能 $G = 0.18 \text{ eV}$, $n_e = 2.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (a) InSb 折射率; (b) InSb 群折射率

II-VI族半导体材料折射率与群折射率,如图5—7所示。

图2到图7为由(3)式得到的III-V与II-VI族

各半导体材料在禁带附近的折射率与群折射率。由图可知,III-V半导体 GaAs, InP, InSb 与II-VI组半导体材料 CdTe, ZnSe, ZnTe 在禁带附近都表现出折

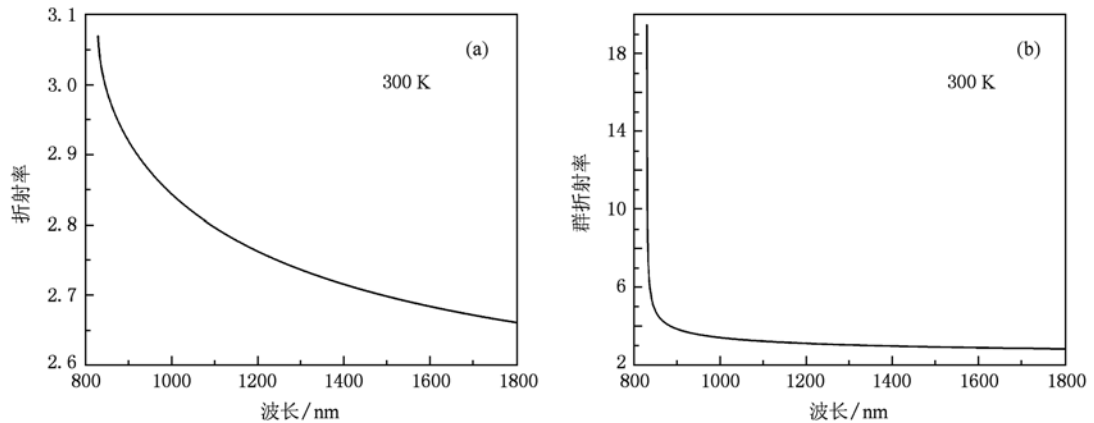


图5 高光谱灵敏度慢光干涉仪工作光谱范围:829—850 nm,带隙能 $G = 1.50 \text{ eV}$ (a) CdTe 折射率; (b) CdTe 群折射率

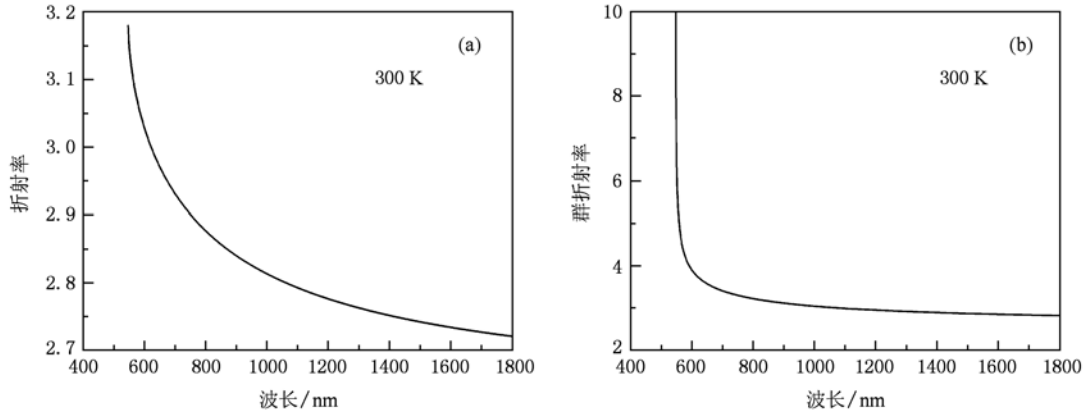


图6 高光谱灵敏度慢光干涉仪工作光谱范围:482—500 nm,带隙能 $G=2.28$ eV (a) ZnTe 折射率;(b) ZnTe 群折射率

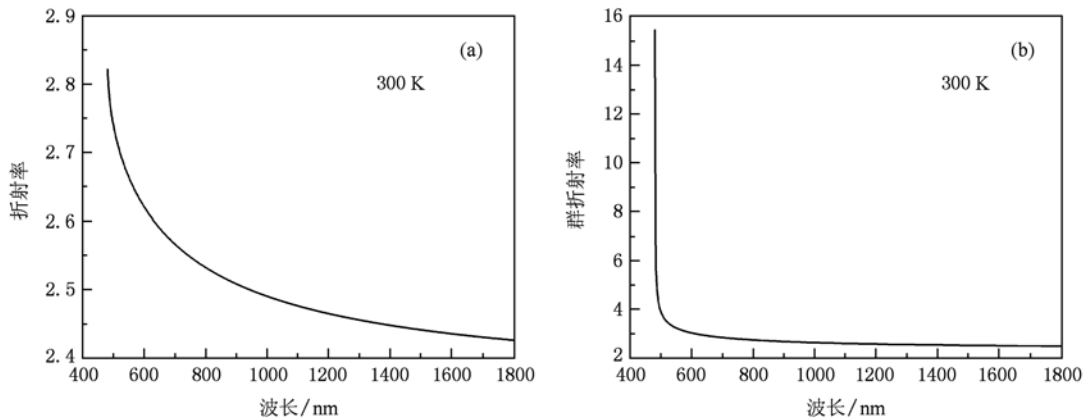


图7 高光谱灵敏度慢光干涉仪工作光谱范围:546—600 nm,带隙能 $G=2.58$ eV (a) ZnSe 折射率;(b) ZnSe 群折射率

射率的较大变化,使我们能够在禁带附近获得较大的群折射率.此外,由图2到图7可知,半导体材料可以使我们在较大的光谱区域内获得较大的群折射率,而其远大于气体慢光介质所能提供的几个 GHz 的光谱范围^[7,9,10].

4. 基于 III-V 族半导体 GaAs 的楔型干涉仪光谱灵敏度实验结果

在室温下高阻 GaAs 的带隙能量约为 1.43 eV,对应于波长 900 nm 左右.由图2(a)可知,室温下高阻 GaAs 在禁带 900 nm 附近折射率变化迅速,可获得较大的群折射率 n_g .

楔型慢光干涉仪的光谱灵敏度可以表示为^[9]

$$S \approx \frac{2L_0}{\lambda^2} n_g, \quad (4)$$

其中 $n_g \equiv n + \omega \frac{dn}{d\omega}$ 为色散介质的群折射率, L_0 为楔

形慢光介质的平均厚度, λ 为入射光波波长.

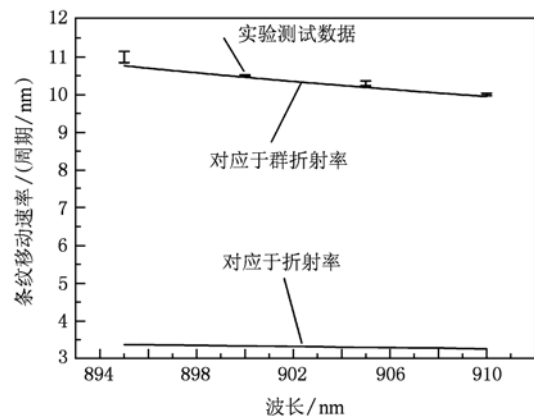


图8 楔型干涉仪光谱灵敏度对比图,实线为采用慢光介质情况;虚线为采用非色散介质情况($n \approx 1.5$),楔角 $\theta \approx 0.7^\circ$, $L_0 \approx 900 \mu\text{m}$

图8为楔型慢光干涉仪光谱灵敏度的实验测试结果.实验结果表明干涉仪的光谱灵敏度是群折射

率 n_g 的函数,而并不仅仅与介质的折射率 n 有关.同时实验结果也表明,通过慢光介质的强色散特性可以在较大的光谱范围内有效提高干涉仪的光谱灵敏度,并且光谱灵敏度正比于色散介质的群折射率 n_g ^[9].由楔型慢光干涉仪与采用非色散材料作为光学器件的传统楔型干涉装置的对比分析可知,在 900 nm 附近基于慢光介质 GaAs 的色散特性可以使传统干涉仪的光谱灵敏度提高 $n_g/n \approx 3.2$ 倍以上.

此外,由上述对 III-V 与 II-VI 族各半导体材料的分析可知,每种半导体材料均在特定光谱区域表现出大群折射率效应.因此,可根据干涉仪的具体应用光谱范围,选取特定半导体慢光材料可以有效提高干涉仪的光谱性能,而此种方法可以在从可见光波段到红外波段的较大光谱范围内得到应用.最后,由(4)式可知,光谱灵敏度不仅依赖于群折射率,还与所使用慢光介质长度有关.因此,

适当增加介质长度可以使我们获得更高的光谱灵敏度.

5. 结 论

在本文中,我们给出了 III-V 与 II-VI 族半导体材料的光学特性以及与其对应的群折射率较大的工作光谱区域,并分析了半导体慢光介质的色散特性对干涉仪光谱灵敏度的影响,同时证明了通过慢光介质的引入,可以使传统干涉仪的光谱灵敏度提高 n_g/n 倍.这说明,基于半导体慢光介质的干涉仪在有效提高其光谱灵敏度的同时,可以很好地克服气体慢光介质工作光谱范围过窄的问题.我们的研究结果将为半导体慢光介质在其他各种干涉装置与更宽光谱范围内的应用提供依据.

- [1] Hau L V, Harris S E, Dutton Z, Behroozi C H 1999 *Nature* **397** 594
- [2] Bigelow M S, Lepeshkin N N, Boyd R W 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 113903
- [3] Fan B H, Zhang Y D, Yuan P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4692 (in Chinese) [范保华、掌蕴东、袁萍 2005 物理学报 **54** 4692]
- [4] Jacobsen R, Lavrinenko A, Frandsen L, Peucheret C, Zsigri B, Moulin G, Fage-Pedersen J, Borel P 2005 *Opt. Express* **13** 7861
- [5] Liu H Y, Meng H Y, Dai X F, Wu L J, Lan S, Liu S H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4702 (in Chinese) [刘海英、蒙自明、戴峭峰、吴立军、兰胜、刘颂豪 2009 物理学报 **58** 4702]
- [6] Shen H J, Tian H P, Ji Y F 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2820 (in Chinese) [沈宏君、田慧平、纪越峰 2009 物理学报 **59** 2820]
- [7] Shi Z M, Boyd R W, Gauthier D J 2007 *Opt. Lett.* **32** 915
- [8] Chamanzar M, Momeni B, Adibi A 2009 *Opt. Lett.* **34** 220
- [9] Cai Y X, Zhang Y D, Yang C B, Dang B S, Wang J F, Yuan P 2009 *Opt. Express* **17** 22254
- [10] Shi Z M, Boyd R W, Camacho R M, Vudiyasetu P K, Howell J C 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 240801
- [11] Purves G T, Adams C S, Hughes I G 2006 *Phys. Rev. A* **74** 023805
- [12] Boyd R W 2003 *Nonlinear optics Second Edition.* (New York USA:Elsevier Science Inc.) p56
- [13] Jensen B, Torabi A 1983 *IEEE J. Quantum Electron.* **19** 448

High sensitivity slow light interferometer based on dispersive property of III-V and II-VI semiconductor materials^{*}

Cai Yuan-Xue Zhang Yun-Dong[†] Dang Bo-Shi Wu Hao Wang Jin-Fang Yuan Ping

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

(Received 10 June 2010; revised manuscript received 14 July 2010)

Abstract

We investigate the optical properties of III-V and II-VI semiconductors. The results show that the sensitivity of the interferometer can be greatly enhanced by the dispersive property of semiconductor. Furthermore, the analyses show that the semiconductor slow light medium has a more wider working spectral range than gas slow light medium. Moreover, we experimentally demonstrate that the sensitivity of the interferometer based on the semiconductor GaAs is 3.2 times higher than those of traditional interferometers.

Keywords: interferometers, nonlinear optics, III-V and II-VI semiconductors

PACS: 07.60.Ly, 42.65.-k, 72.80.Ey

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA12Z112), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60878006).

[†] Corresponding author. E-mail: ydzhang@hit.edu.cn