

# 基于耦合谐振系统的慢光结构及其应用

周瑾 谷玲玲 于伟坤 张守军 魏晓丹 李乙钢

(南开大学物理科学学院, 天津 300071)

**摘要** 详细阐述了利用耦合共振诱导透明(CRIT)方法产生快慢光的基本原理。介绍了几种基于环形耦合谐振系统的慢光结构及其在高灵敏度、高集成化的光学转动传感器和光学陀螺方面的应用和研究进展。

**关键词** 光纤通信;慢光结构;耦合共振诱导透明;Sagnac效应

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.120607

## Study of the Coupled-Resonator Slow Light Structures and Their Applications

Zhou Jin Gu Lingling Yu Weikun Zhang Shoujun Wei Xiaodan Li Yigang

(Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** This paper describes the theory of using coupled-resonator-induced transparency (CRIT) to control the speed of light and introduces several different types of slow light structures composed of ring resonators. The applications and research progress of rotation sensors and gyroscopes with high sensitivity and compact integration are given as well.

**Key words** fiber optics communications; slow light structures; coupled-resonator-induced transparency; Sagnac effect

**OCIS codes** 060.2330; 060.1810; 060.1155

## 1 引言

随着现代通信技术、因特网技术和多媒体技术的发展,人们对信息传输速度的要求越来越高。然而目前的光通信网络中光电并存,使得数据传输速度较低,不能满足信息社会发展的需要。因此,科学家们将兴趣转向了光纤中的慢光技术,为实现全光网络寻求可能。

目前实现慢光的技术有很多。最初的慢光使用的是电磁诱导透明(EIT)技术。1990年,Harris等<sup>[1]</sup>提出这种方法并在1992年将光速降低2个数量级。其原理是利用量子相干效应消除电磁波传播过程中介质的影响,使原来对信号光不透明的介质变为透明,使探测光在介质中无衰减传播或透射率大大提高。2003年,Bigelow等<sup>[2]</sup>提出了相干布居数振荡(CPO)的方法,并在室温下的紫翠玉和红宝石中实现了慢光。其原理是对于均匀加宽的介质,强抽运光使弱探测光在其吸收曲线上产生烧孔。此外,还有利用光纤中的非线性效应实现快慢光的方法<sup>[3~5]</sup>,如受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)、光学参量放大(OPA)等。以上介绍的几种方法离实际应用都还有一段距离,如光纤中CPO可获得快慢光的带宽较窄、SBS慢光最大延迟量受限且伴随脉冲畸变<sup>[6]</sup>、SRS的延迟效率偏低、基于克尔非线性效应的光学参量放大对光纤色散曲线的波动较敏感等问题还有待进一步研究。

**收稿日期**: 2011-07-07; **收到修改稿日期**: 2011-09-05; **网络出版日期**: 2011-10-30

**基金项目**: 国家自然科学基金(60878010)、天津市应用基础及前沿技术研究计划(08JCYBJC14900)和国家973计划(2010CB934101)资助课题。

**作者简介**: 周瑾(1987—),女,硕士研究生,主要从事光纤非线性慢光方面的研究。

E-mail: zhoujin2010@mail.nankai.edu.cn

**导师简介**: 李乙钢(1962—),男,博士,教授,主要从事光电子激光、光纤非线性光学等方面的研究。

E-mail: liyigang@nankai.edu.cn(通信联系人)

近年来,另一种在耦合谐振系统中基于色散介质的光子相干作用产生慢光的技术得到了越来越多的关注,它有体积小、结构简单、波长可控、利于集成等优点。

2004年,Smith等<sup>[7]</sup>通过理论分析,在两个或多个耦合光学谐振系统的吸收谱中发现了类似于EIT的透明窗口,并称之为耦合共振诱导透明(CRIT)现象。光在耦合谐振系统中需要两次穿过耦合器,于是产生一个净余为 $\pi$ 的相移,与谐振腔中的初始信号相干相消,从而发生模式分裂。由于分裂是在单个谐振腔之间发生,因此避免了EIT中传输尺寸的限制。2005年,Naweed等<sup>[8]</sup>在耦合熔融SiO<sub>2</sub>微球中观察到了CRIT与耦合共振诱导吸收(CRIA)现象,并从此引发了对相干耦合光学谐振腔在光延迟线、光缓存器、光陀螺仪等领域的应用研究。2006年,Smith等<sup>[9]</sup>又研究了光纤环形谐振系统中的光子相干效应,并且用时域有限差分法分析了腔内场的瞬变响应,揭示了腔内的光子相干谐振现象,发现系统的响应与正常模式的简并度和分辨率有关。同年,Totsuka等<sup>[10]</sup>研究了单微球与直光纤锥的耦合谐振系统,所谓的光纤锥就是无玻璃包层直接裸露在空气中的光纤芯结构,纤芯的光会以倏逝波的形式溢出纤芯,可以通过控制微球与直光纤锥的距离调控二者之间的耦合系数的大小,从而在同一装置中观察到快光或者慢光现象。2009年,高峰等<sup>[11]</sup>采用分离光学腔镜法建立耦合腔,更加方便地调节耦合腔的各种参数,在实验上测得了两耦合腔由于相干作用产生的类EIT现象。

本文详细阐述利用CRIT实现慢光的基本原理,介绍几种慢光结构,并就其应用进行综述。

## 2 基本原理

通过对光纤单环和双环耦合谐振系统的理论分析,介绍耦合谐振系统实现慢光的基本原理。

### 2.1 单环谐振系统

光纤单环谐振腔与直波导构成的单环耦合谐振系统能在关于谐振中心对称的谐振区域产生强吸收,从而引起脉冲的延迟或超快,其结构如图1所示。在定向耦合理论<sup>[12]</sup>近似下,考虑吸收损耗、忽略耦合损耗等其他损耗,使用迭代法<sup>[13]</sup>,通过耦合方程和绕行光场复振幅关系式,可推导出系统光场复振幅的透射系数为

$$\tau \equiv \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} = \frac{r - a \exp(-i\phi)}{1 - ra \exp(i\phi)}, \quad (1)$$

式中 $r = \sqrt{1 - k^2}$ ,其中 $k$ 为耦合器的耦合系数; $a = \exp(-aL/2)$ 为衰减因子; $\phi = (\omega - \omega_R)nL/c$ 为光绕环形腔一周的相移,其中 $\omega_R$ 为共振频率, $\omega$ 为入射信号的频率,也即调制频率, $n$ 为光纤折射率, $L$ 为环形腔腔长。因此,此谐振系统的吸收为<sup>[13]</sup>

$$A = 1 - |\tau|^2, \quad (2)$$

输出光的有效相移为

$$\Phi^{\text{eff}} = \arg \tau, \quad (3)$$

系统积累的慢光延迟量为

$$\Delta T_d = \frac{\partial \Phi^{\text{eff}}}{\partial \omega}. \quad (4)$$

考虑到实际的环形谐振腔材料的固有吸收、弯曲损耗以及表面缺陷带来的散射损耗等,对于不同的耦合系数,环形谐振腔的增益和损耗的关系不同,当 $r=a$ 时为临界点。因此耦合系统可分为两种不同的情况:当 $a < 1$ 且 $a < r$ 时,称为弱耦合;反之, $a > r$ 时,系统进入强耦合状。

选择光纤环形腔的周长为4 m,考虑到不同的耦合比,分别数值模拟了系统的吸收、输出信号的有效相移和延迟量随环绕相移(调制频率 $\omega$ )的变化关系。图2所示为弱耦合情况,从系统的吸收谱图2(a)中可以看到,吸收峰值随耦合器耦合系数的增加而显著增大,吸收线宽也随之增大。这是因为,弱耦合下谐振腔总体起到损耗作用,耦合系数的增大使得进入谐振腔的光强越大,光的损耗效果越明显,透射光强越小。图2(b)显示,在共振频率附近有效相移的斜率为负值,此时系统处于反常色散区;远离共振频率区域时系统

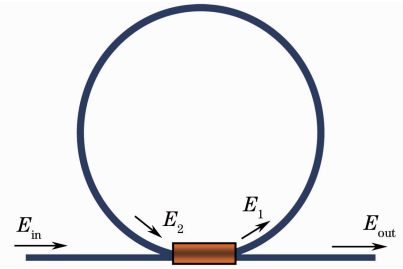


图1 单环耦合谐振系统的结构示意图

Fig. 1 Schematic of single-loop coupled resonator system

处于正常色散区。与此相对应,在正常色散区,群速度延迟时间  $\Delta T_d > 0$ ,产生慢光;在反常色散区,群速度延迟时间  $\Delta T_d < 0$ ,产生快光。而随着耦合系数的增加,有效相移的斜率变得更加陡峭,这是因为光的耦合作用越强,相消干涉越剧烈,引起的色散作用越强。图 2(c)给出了延迟时间随环绕相移的变化曲线,可见在弱耦合下,随着调制频率的变化,快慢光将交替出现。

图 3 所示为强耦合情况。从图 3(a)可以看到,系统在共振频率处具有较大吸收,但随着耦合系数的增加而迅速减小。这种情况与弱耦合时相反,因为此时谐振腔对光信号总体起到增益的作用,随着耦合系数的增加,透射光强将迅速增大。图 3(b)显示,有效相移的斜率随调制频率的变化在共振频率附近始终为正值,即系统一直处于正常色散区。且随着耦合系数的增加,有效相移的斜率趋于常量。这表明,系统的群延迟  $\Delta T_d > 0$ ,只产生慢光。在共振频率处,群延迟达到最大。随着耦合系数的增加,群延迟迅速减小,并在共振频率附近近似为常量,此结果也与弱耦合时相反,如图 3(c)所示。

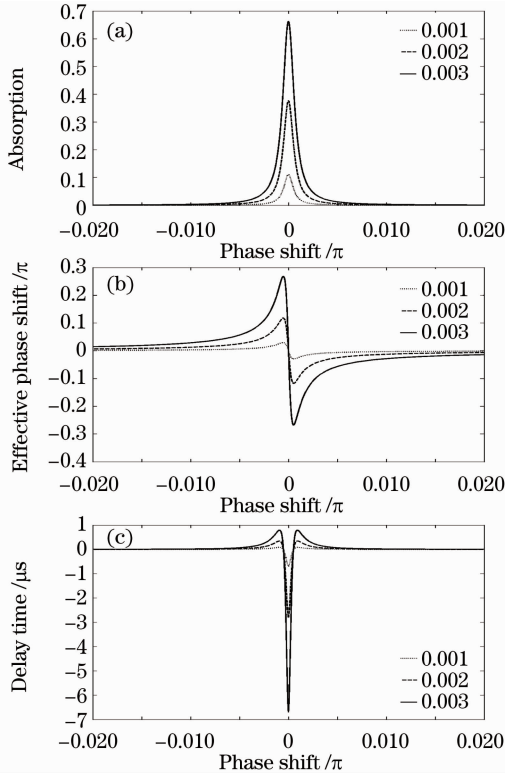


图 2 弱耦合下(a)单环谐振系统吸收谱;(b)出射光积累的有效相移量的变化;(c)系统延迟量的变化。实线、虚线、点线分别为耦合系数  $k = 0.03, 0.02, 0.01$  时的变化图

Fig. 2 (a) Normalized absorption intensity; (b) transmitted phase shift; (c) delay time of the coupled-single-ring-resonator system as a function of the frequency detuning under the undercoupling condition. The solid, dashed, dotted curves are the calculation results for the coupling coefficients  $k = 0.03, 0.02, 0.01$ , respectively

## 2.2 级联双环谐振系统

通过单环谐振系统的分析可知,虽然在共振频率处可以得到较大的延迟或超快量,但是,由于共振频率处有较强的吸收,会使得输出光强迅速减小,而且伴有强烈的脉冲畸变<sup>[14]</sup>,因此难以应用。为此,可以采用双环形腔的级联耦合结构产生 CRIT 效应来获得比较稳定的延迟光和超快光,该结构如图 4 所示。

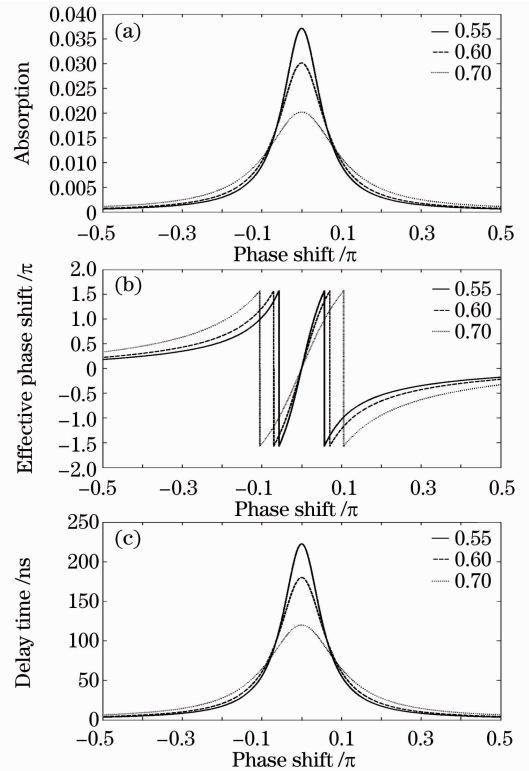


图 3 强耦合下(a)单环谐振系统吸收谱;(b)出射光的有效相移量的变化;(c)系统延迟量的变化。实线、虚线、点线分别为耦合系数  $k = 0.55, 0.60, 0.70$  时的变化图

Fig. 3 (a) Normalized absorption intensity; (b) transmitted phase shift; (c) delay time of the coupled-single-ring-resonator system as a function of the frequency detuning under the overcoupling condition. The solid, dashed, dotted curves are the calculation results for the coupling coefficients  $k = 0.55, 0.60, 0.70$ , respectively

类似单环谐振系统的分析方法,选取周长 4 m 的单环结构和两个周长 2 m 的双环级联结构相比较,其他参数一致,并在同一坐标中给出两个系统的吸收谱的变化关系,如图 5 所示,虚线和实线分别表示单环谐振结构和双环级联谐振结构的吸收谱。结果表明,相较于单环谐振系统,双环级联耦合系统由于环和环之间的相干耦合作用,导致共振频率处出现了一个宽的透明窗口,从而降低了共振频率处的强烈吸收。双环级联耦合系统的快慢光输出特性为慢光结构的实际应用提供了可能。

### 3 慢光结构的 Sagnac 效应及其应用

#### 3.1 慢光结构的 Sagnac 效应

近年来,利用光学耦合腔结构控制光速的研究已取得了一定的进展,出现了一些典型的耦合微腔结构,如耦合谐振光波导(CROW)<sup>[15~17]</sup>、级联间隔边耦合谐振腔结构(SCISSOR)<sup>[18,19]</sup>等。在此基础上,人们开始注意其成果的应用。2000年,Leonhardt等<sup>[20]</sup>提出了慢光陀螺仪这一概念,由此掀起了研究由慢光结构来获得高灵敏度、高集成的转动传感器和光学陀螺的热潮。

取图 1 所示的慢光结构,直波导中的光耦合进闭合环形腔并在其中不断旋转,每转一圈会有一个增加的相移。静止状态下假设光从左面进入,忽略损耗,则环绕光与直通光的有效相移为

$$\phi_0 = M \cdot n_0 \omega L_0 / c, \quad (5)$$

式中  $M$  为环绕次数,  $L_0$  为环形腔腔长,  $n_0$  为材料折射率,  $c$  为真空中光速。

此时,若该结构有一个逆时针转动的转速  $\Omega$ ,则线圈中相向传输的光的 Sagnac 效应相移<sup>[21]</sup>为

$$\Delta\phi = N \frac{4\omega s}{c^2} \Omega, \quad (6)$$

式中  $s$  为线圈面积,  $N$  为线圈匝数。

由此可得,每束光累积的有效相移变为<sup>[22]</sup>

$$\phi_{(\omega, \Omega)}^{\pm} = \frac{Mn_0 \omega L_0}{c} \pm N \frac{2\omega s}{c^2} \Omega, \quad (7)$$

因而带有慢光结构的转动传感器中相向传输的光波通过该装置后累积的总相移为<sup>[23]</sup>

$$|\Delta\Phi_{(\omega)}| = N \frac{4\omega s}{c^2} \Omega \frac{n_g}{n_0}. \quad (8)$$

总相移与调制频率的变化斜率为转动传感器的灵敏度。由(8)式可知,转动灵敏度与群折射率成正比。耦合谐振腔结构的高色散性增加了转动 Sagnac 效应的相位扰动,从而大大增加了转动传感器的转动灵敏度。

若有两束光同时从左右两个方向相向进入该结构,则同时改变了相向传输的电磁波的色散关系,使每个光波均产生与转动相关的相移。根据 Sagnac 效应,两相向传输的光波转动时积累的相位差又将增加,进一步提高转动传感器的灵敏度。

#### 3.2 新型慢光结构

鉴于慢光结构的高色散特性,人们纷纷构思各种各样的耦合谐振系统,以积累有效 Sagnac 相移,来获得高品质因数、高集成度、高灵敏度的转动传感器。

2004年, Matsko等<sup>[24]</sup>提出利用 SCISSOR 系统模仿高色散特性的传统波导,运用光与高  $Q$  值谐振腔的

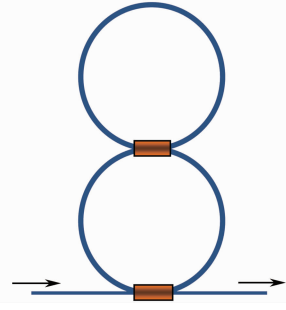


图 4 级联双环耦合谐振系统的结构示意图  
Fig. 4 Schematic of cascaded double-ring coupled resonator system

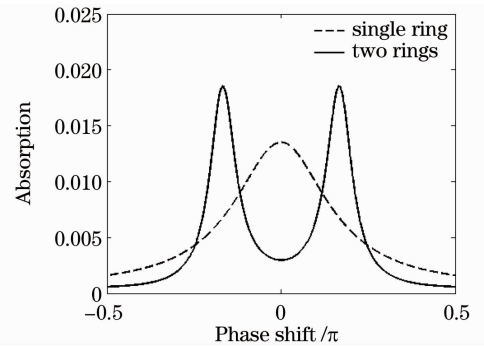


图 5 级联双环谐振系统的 CRIT 现象  
Fig. 5 CRIT for cascaded double-ring coupled resonator system

平均作用获得高色散特性来减小光速,从而获得高灵敏度的光学陀螺仪,其结构如图 6 所示。即在波导边缘间隔排列一周高  $Q$  值的回音壁模式(WGM)谐振腔。随后,2005年,Steinberg<sup>[25]</sup>研究了光子晶体缺陷耦合腔波导中的转动 Sagnac 效应,如图 7 所示。在六角光子晶体波导中制造环形缺陷排列,黑点和灰色点的排布分别表示在六角光子晶体波导中制造的不同局部缺陷类型的环形缺陷排列,其缺陷类型决定了谐振腔的共振频率  $\omega_0$ ,内部微腔间隔决定了波导色散区的带宽。与传统的光纤谐振腔相比,该系统利用光的隧道效应,使信号从一个微腔传播至下一个;此外,周期结构的环形逆时针波的传播模式有 Floquet-Bloch 波的特性,而且色散区域的带宽相对很窄。2006年,Scheuer 等<sup>[22]</sup>提出了可用于高集成转动传感器和光学陀螺仪的多耦合包层光波导谐振腔结构,如图 8 所示。光从入射波导进入,经一个 3 dB 耦合器均分成两路分别耦合进 CROW 环形器不同的终端,假设其中所有微环近似相同、忽略内部损耗、相邻微环间耦合系数都近似相等,相向传输的两列信号(图中灰白相差不大)最终在最前端的 3 dB 耦合器中发生干涉。经过理论模拟,得出此结构的转动灵敏度随着耦合系数的减小、微环半径的增大而增大,且近似与微环数量的 2 次方成正比。与传统 Sagnac 效应不同的是,其灵敏度与微环所包围的总面积和微环的排列无关,从而可以利用这种结构通过控制内部耦合的方向来提高灵敏度,同时又可以

提高芯片面积的利用率。由于这种谐振式微光学陀螺在实际应用中产生的谐振频率差很小,就需要对光信号的频率进行调制,此时最佳灵敏度的调节非常重要。针对这个问题,2010年,冯翔等<sup>[26]</sup>提出了一种最佳灵敏度的调节方法:当谐振频率对应光强跨度与锁模前后光强跨度的比值为 4:3 时,谐振陀螺系统具有最佳灵敏度,并在实际测试中验证了这种方法的正确性。此外,近年来,随着微纳加工工艺的提高,硅纳米微环以其尺寸小、结构简单、易集成等优点,已逐渐应用到集成化硅基绝缘光波导器件中,并出现了硅纳米微环和温度稳定性更高的槽波导微环<sup>[27]</sup>等结构。

### 3.3 慢光结构的其他应用

近年来出现了一些真空慢光结构的应用。2011年,Bortolozzo 等<sup>[28]</sup>在类克尔介质的非线性 Sagnac 探测干涉仪中加入慢光元素——真空环形谐振腔,如图 9 所示,将慢光效应与多波混频、自适应全息探测相结合,实现 Sagnac 效应的非线性自适应探测。同年,Marandi 等<sup>[29]</sup>在 Mach-Zehnder 干涉仪中运用慢光装置来平衡干涉仪的臂长,避免在测量时因臂长不匹配引起的对信号噪声的灵敏响应。在实验中运用环形谐振腔作为慢光元件,如

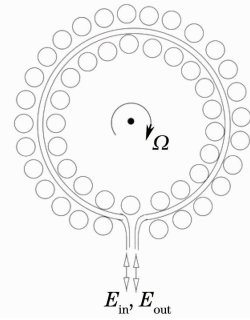


图 6 SCISSOR 结构示意图

Fig. 6 Schematic of side-coupled integrated sequence of spaced optical resonators

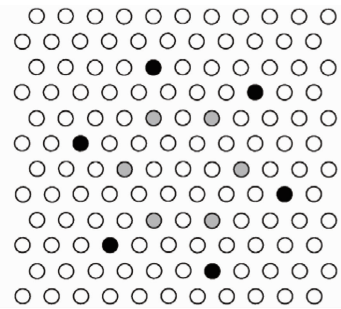


图 7 环形谐振耦合微腔波导示意图

Fig. 7 Schematic of ring resonator coupled cavities waveguide

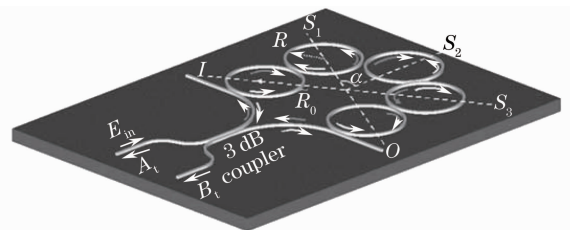


图 8 耦合谐振慢光旋转传感器结构示意图

Fig. 8 Schematic of the coupled-resonator slow-light rotation sensor

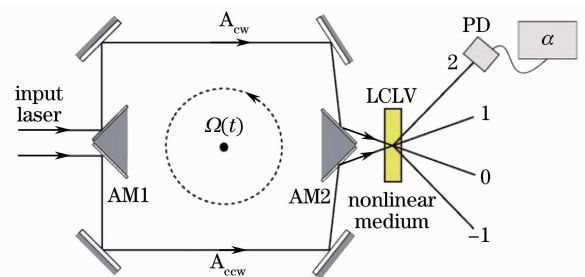


图 9 实验结构图。AM1、AM2 为反射镜;  $A_{cw}$ 、 $A_{ccw}$  为顺时针和逆时针旋转的光波; LCLV 为液晶光阀; PD 为光电二极管

Fig. 9 Experimental setup. AM1, AM2: mirrors;  $A_{cw}$ ,  $A_{ccw}$ : clockwise and counter clockwise beams; LCLV: liquid crystal light valve; PD: photodiode

图 10 虚线范围所示。运用 Pound-Drever-Hall (PDH)方法锁定激光器的调制频率,避免了对信号源的人为频率调制,而且能在控制带宽的条件下抑制信号源的噪声频率。

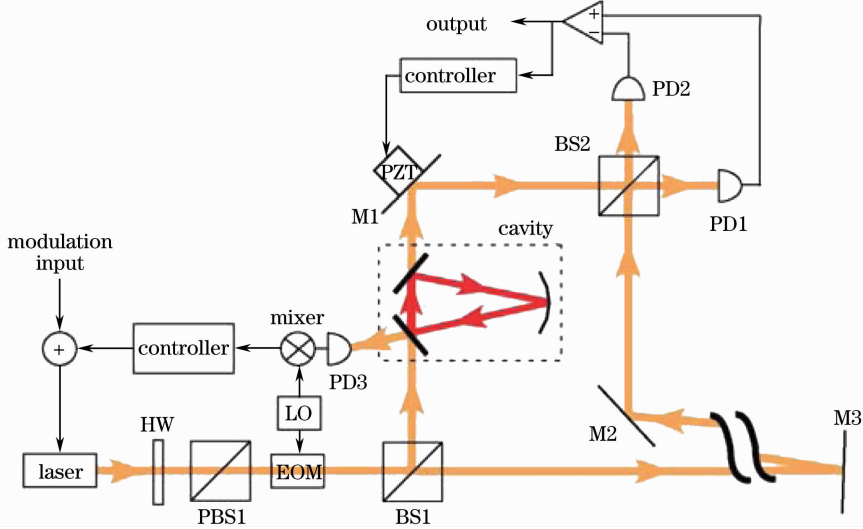


图 10 利用真空中环形腔慢光结构来补偿马赫-曾德尔干涉仪的臂长不匹配的原理图

Fig. 10 Schematic diagram of a Mach-Zehnder interferometer with a ring resonator in vacuum as slow-light element in one arm to compensate the arm-length mismatch

## 4 结束语

慢光的研究是非线性光学研究领域中新的拓宽与发展。随着全光通信网络的迅猛发展,慢光技术的研究不仅具有重要的科学意义,而且具有很高的实际应用价值。利用耦合谐振系统的 CRIT 现象可以获得较强的窄带色散区,从而实现对信号光群速度的快慢调控。基于耦合谐振系统的慢光装置具有结构简单、集成度高、使用条件低等得天独厚的特点,不仅在光传感器,而且在全光路由、全光缓存、滤波器和色散补偿等诸多方面也有非常好的应用前景。相信随着研究的进一步深入,利用这种慢光结构,超高灵敏度、超高集成度的光学转动传感器必能实现,耦合谐振慢光系统在其他方面的应用也将陆续出现。

## 参 考 文 献

- 1 S. E. Harris, J. E. Field, A. Imamoglu. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(10): 1107~1110
- 2 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
- 3 J. E. Sharping, Y. Okawachi, A. L. Gaeta. Wide bandwidth slow light using a Raman fiber amplifier[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16): 6092~6098
- 4 Y. Okawachi, M. S. Bigelow, J. E. Sharping *et al.*. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(15): 153902
- 5 J. E. Sharping, Y. Okawachi, J. Howe *et al.*. All-optical, wavelength and bandwidth preserving, pulse delay based on parametric wavelength conversion and dispersion[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(20): 7872~7877
- 6 Ding Yingchun, Ren Yurong. Latest developments of stimulated Brillouin scattering slow-light pulse delays in optical fiber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 51~57  
丁迎春, 任玉荣. 利用受激布里渊散射在光纤中实现慢光延迟线的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 51~57
- 7 D. D. Smith, H. Chang, K. A. Fuller *et al.*. Coupled-resonator-induced transparency[J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **69**(6): 063804
- 8 A. Naweed, G. Farca, S. I. Shipova *et al.*. Induced transparency and absorption in coupled whispering-gallery microresonators[J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **71**(4): 043804

- 9 D. D. Smith, N. N. Lepeshkin, A. Schweinsberg *et al.*. Coupled-resonator—induced transparency in a fiber system[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **264**(1): 163~168
- 10 Kouki Totsuka, Makoto Tomita. Slow and fast light in a microsphere-optical fiber system[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **23**(10): 2194~2199
- 11 Gao Feng, Ye Chenguang, Wang Pengjun *et al.*. Experimental investigation of electromagnetically-induced-transparency-like effect in optical coupled-resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2565~2569  
高峰, 叶晨光, 王鹏军等. 光学耦合腔中类电磁感应透明现象的实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2565~2569
- 12 Qian Jingren. Coupled-mode theory and its application to fiber optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1188~1192  
钱景仁. 耦合模理论及其在光纤光学中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1188~1192
- 13 D. D. Smith, H. Chang, K. A. Fuller. Whispering-gallery mode splitting in coupled microresonators[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(9): 1967~1974
- 14 A. Yariv, Y. Xu, R. K. Lee *et al.*. Coupled-resonator optical waveguide; a proposal and analysis[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(11): 711~713
- 15 A. Melloni, F. Morichetti, M. Martinelli. Linear and nonlinear pulse propagation in coupled resonator slow-wave optical structures[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2003, **35**(4-5): 365~379
- 16 M. F. Yanik, Shanhui Fan. Stopping light all optically[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(8): 083901
- 17 M. F. Yanik, W. Suh, Zheng Wang *et al.*. Stopping light in a waveguide with an all-optical analog of electromagnetically induced transparency[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(23): 233903
- 18 J. E. Heebner, P. Chak, S. Pereira *et al.*. Distributed and localized feedback in microresonator sequences for linear and nonlinear optics[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(10): 1818~1832
- 19 J. E. Heebner, W. Boyd. Slow light, induced dispersion, enhanced nonlinearity, and optical solitons in a resonator-array waveguide[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **65**(3): 036619
- 20 U. Leonhardt, P. Piwnicki. Ultrahigh sensitivity of slow light gyroscope[J]. *Phys. Rev. A*, 2000, **62**(5): 055801
- 21 E. J. Post. Sagnac effect[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1967, **39**(2): 475~493
- 22 J. Scheuer, A. Yariv. Sagnac effect in coupled-resonator slow-light waveguide structures[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(5): 053901
- 23 Chao Peng, Zhengbin Li, Anshi Xu. Rotation sensing based on a slow-light resonating structure with high group dispersion [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(19): 4125~4131
- 24 A. B. Matsko, A. A. Savchenkov, V. S. Ilchenko *et al.*. Optical gyroscope with whispering gallery mode optical cavities [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **233**(1-3): 107~112
- 25 B. Z. Steinberg. Rotating photonic crystals: a medium for compact optical gyroscopes[J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **71**(5): 056621
- 26 Feng Xiang, Ma Yingjian, Yu Huaiyong *et al.*. Investigation on the modulation of the optimized sensitivity for the resonator optic gyroscope[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1064~1067  
冯翔, 马迎建, 于怀勇等. 谐振式微光学陀螺最佳灵敏度调节的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1064~1067
- 27 Song Shijiao, An Junming, Zhao Lei *et al.*. Temperature characteristics of slot-waveguide ring resonators[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(12): 121301  
宋世娇, 安俊明, 赵雷等. 硅纳米槽微环谐振器温度特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(12): 121301
- 28 U. Bortolozzo, S. Residori, J. L. Rubin *et al.*. Sagnac interferometer with adaptive nonlinear detection[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(4): 520~522
- 29 A. Marandi, B. T. Lantz, R. L. Byer. Balancing interferometers with slow-light elements[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 933~935