

快光增强型谐振式光学陀螺的研究进展

赵龙 张浩 邓思盛 陈佳阳 张峰 黄安平 肖志松

(北京航空航天大学物理科学与核能工程学院应用物理系, 北京 100191)

摘要 集成化、高精度和低成本代表了光学陀螺未来的发展方向,快光增强型谐振式光学陀螺反映了该领域的技术发展趋势。从快光效应的实现方式展开,结合介质色散和结构色散的相关报道,综述了快光增强型谐振式光学陀螺的研究进展情况。通过对比快光效应实现方式差异下陀螺系统的性能特点,指出结构色散方式更利于快光陀螺系统的集成化发展。提出了一种新型快光增强型谐振式陀螺结构,预期在民用领域有很大的应用潜力。最后展望了快光增强型谐振式光学陀螺在未来惯性导航系统上应用的发展前景。

关键词 非线性光学;光学器件;光学陀螺;耦合谐振环;快光效应

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.030007

Research Progress of Fast-Light Enhanced Resonant Optical Gyroscope

Zhao Long Zhang Hao Deng Sisheng Chen Jiayang Zhang Feng
Huang Anping Xiao Zhisong

(Department of Applied Physics, School of Physics and Nuclear Energy Engineering,
Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract Integration, high-precision, and low-cost optical gyroscope embodies the developing tendency of gyroscope, in which fast-light enhanced resonant optical gyroscope shows great potential. The development of the fast-light enhanced resonant optical gyroscope is overviewed through analyzing fast-light arising mechanism and considering experimental reports of dielectric dispersion and structural dispersion. By comparing the relative advantages and disadvantages in fast light generation mechanism, it is more suitable to integrate optical gyroscope system through implementing structural dispersion. Moreover, a novel structure of integrated fast-light enhanced resonant gyroscope is proposed, which may have great potential applications in low-cost civilian areas. Finally, the prospect for the development of fast-light enhanced resonant optical gyroscope in inertial navigation system is discussed.

Key words nonlinear optics; optical devices; optical gyroscope; coupled resonator; fast-light effect

OCIS codes 190.7110; 260.2030; 280.4788; 130.6010

1 引言

从 Brillouin^[1]由反常色散得出早期群速度传播理论开始,人们建立了不同的理论模型对光脉冲的超光速传播过程进行解释,并提出可利用共振吸收^[2]、非线性和线性增益^[3]或者隧穿势垒附近的反常色散区域^[4]实现快光效应。目前,国际上各研究小组用以实现光信号的超光速传播实验的方式分为两种,即介质色散和结构色散。介质色散是通过外加磁场、电场等途径在特定气态或固态介质中控制光脉冲的传输,而结构色散则为调整适当的结构参数,如谐振环耦合系数和半径等,调制整个系统的色散关系。从近 10 年的发展趋势

收稿日期: 2012-12-05; **收到修改稿日期**: 2012-12-31; **网络出版日期**: 2013-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(11074020, 51172009)和航空科学基金(2012ZC51030)资助课题。

作者简介: 赵龙(1988—),男,硕士研究生,主要从事集成光波导陀螺和谐振腔等方面的研究。

E-mail: zhaolongtianxuan@163.com

导师简介: 肖志松(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事稀土发光、集成光电材料和器件物理等方面的研究。

E-mail: zsxiao@buaa.edu.cn(通信联系人)

来看,快光效应的理论研究已渐渐应用于实际,尤其是在谐振式光学陀螺等器件中的应用^[5,6]。

随着近几年光波导技术(如光纤、狭缝波导等)的发展,越来越多的研究人员将兴趣投向灵敏度更高、体积更小、成本更低和可集成的谐振式光波导陀螺^[7]。从2000年开始国际上逐渐兴起研究“慢光”增强型光学陀螺的热潮^[8~13],各研究小组众说纷纭,目前理论上仍没有一致的认识,也没有准确的实验验证。最近,美国西北大学的 Shahriar 等^[14]展开的快光增强型光学陀螺研究成为了国际关注的热点,在理论无损条件下,相比慢光陀螺其极限灵敏度得到大幅提高。因此,快光增强型谐振式光学陀螺(以下简称快光陀螺)已成为国际上又一崭新课题,激励着越来越多的研究者投入这一领域。

本文综述快光陀螺的研究进展,对比分析介质色散方式和结构色散方式的优劣,提出了一种新型快光陀螺结构,并对快光陀螺在未来的惯性导航系统中应用的前景做了展望。

2 介质色散方式实现快光陀螺

2.1 介质色散中的快光效应

快光效应的实验验证中,通常利用电磁诱导透明(EIT)^[15,16]、受激布里渊散射(SBS)^[17]、受激拉曼散射(SRS)^[18]等方法改变光传输介质色散性质,使得介质折射率 n 随频率 ω 的变化为负值,实现“快光”效应,反之为“慢光”效应。

早在1982年,Chu等^[19]用可调谐染料激光器作为光源,在CaP:N介质的线性域中观察到了光脉冲群速度的异常传播。2000年以后,陆续有研究小组利用多普勒效应^[20]、磁光阱(MDT)^[21]、电磁诱导吸收(EIA)^[22]等技术在铯、铷、钾等原子气体介质中观察到光脉冲的超光速传播。尤其是Wang等^[23]通过双峰增益,即两条邻近的增益谱线,观察到反常色散频段。图1为色散曲线图,利用增益辅助的线性反常色散方法,在铯原子气室中,探测到群速度约为真空中光速的310倍,且脉冲波形保持良好。这一工作引起了物理学界的极大兴趣,因为如何同时实现光速加快和抑制脉冲形变一直是困扰人们的难题。

与此同时,国内外学者也有利用相干布居振荡^[24,25]、波频锁^[26,27]等技术在常温下固体介质,如紫翠玉晶体、红宝石晶体中观察到快光现象。Schweinsberg等^[28]在单模掺铒光纤中实现超光速传播,由于信号光工作在1550 nm波段,促进了快光效应在光通信领域的发展。Zhang等^[29]利用布里渊激光振荡在光纤中同样实现了快光,将光纤介质中反常色散的研究带入了新的阶段。

当然,在室温环境下实现脉冲超光速传播,无论是对于光控技术还是光学元件都是一个重大突破,但是,这些技术的实现仍需要特殊晶体或者特定温度的气体为基础,且对实验条件要求还比较高。

2.2 介质色散在快光陀螺的应用

光介质色散相关实验和报道数量的增多表明实现快光效应的技术日趋成熟。在快光条件下考虑增强Sagnac效应,提高惯性器件的灵敏度,例如光学陀螺的响应灵敏度等,成为国际上的热点课题。

Shahriar等^[14]最早通过介质色散的方式将快光效应应用到了光学陀螺中。他们对比讨论了慢光陀螺和快光陀螺各自的特点,通过推导色散介质的Sagnac增强效应,发现其灵敏度正比于群折射率的倒数,从而提出利用反常色散介质构建快光增强型陀螺的设计。其Salit等^[30]理论分析得到充满快光介质的谐振腔,相当于一个“白光腔”,即不论何种波长的光入射至白光腔中,其波长都会趋于相同。根据这个特性,在白光腔中因Sagnac效应产生的微小频移可在白光腔外的探测端引起巨大的频移量,从而大大提高陀螺灵敏度。

2008年,Pati等^[31]则间接从实验上验证了上述原理,并证实了能够利用快光效应提高谐振腔长度测量的灵敏度,但同时也指出了直接验证快光陀螺的困难性,相关实验还仅仅处在设计阶段。对于光源高稳定性和谐振腔窄线宽的苛刻要求限制了该实验的实施。此外,他们还论述了一个重要的结论:对于无源谐振腔结

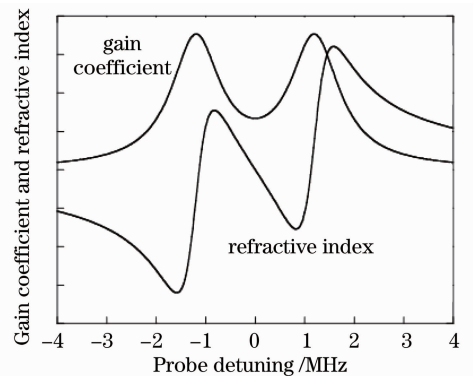


图1 双峰增益和介质折射率的色散曲线图^[23]
Fig. 1 Dispersion graph of frequency-dependent gain coefficient and refractive index^[23]

构,当处于严格反常色散条件,即群速度趋于零时,传播的信号光带宽会展宽,展宽效应抵消了快光效应所增大的 Sagnac 频移,因此综合起来并不会提高旋转灵敏度。但是,有源谐振腔结构的特性刚好相反,因为其线宽只取决于自身特性,不会因为严格的反常色散而发生展宽,所以可带来灵敏度的极大提高。这个结论将未来的研究方向指向了有源的快光激光陀螺。

而后 Yum 等^[32]从上述结论得到启发,通过完整的理论计算设计了一个快光激光陀螺。实验通过原子气的受激发射产生增益,并利用拉曼效应使原子气的增益峰中央产生增益凹陷,从而出现反常色散区域,当激光工作在此频段范围内时,便出现快光效应,由此推算其频率敏感程度将大大提高。然后 Salit 等^[33]从更严格的理论计算和实验两个方面考察了适合于气体介质条件下反常色散的条件,得出的结论是线性气体并不适用于实现快光环形激光陀螺(RLG),而非线性效应如增益饱和现象效应等更有前景。

虽然利用介质色散方式实现快光陀螺的研究进展逐步加快,已然从理论计算到实验构造出陀螺系统,但这些系统与人们希望的集成光学陀螺系统大相径庭,它们需要特定气体环境如铷、铯等,或外加电磁场,所以结构复杂、体积较大,不符合陀螺系统低功率、轻质小型化的发展趋势。

3 结构色散方式实现快光陀螺

3.1 结构色散中的快光效应

结构色散相对介质色散更利于器件小型化和集成化,并简化了实现条件,特别是光学耦合腔^[34]和耦合谐振环光波导(CROW)结构^[35~37]。该结构色散导致的快光效应可在多种耦合条件下实现,并伴随着谐振频率的分裂^[38],增加谐振式陀螺的拍频量。

Heebner 等^[37,39]提出边耦合集成间隔序列谐振环(SCISSOR)结构,如图 2 所示,该结构的相移量为失谐频率的敏感函数,通过调整谐振环参数和耦合系数可得到反常色散。之后又有学者探讨该结构的 Sagnac 效应^[40],同时展望了该结构在实现高灵敏度惯性传感器件方面的应用前景。

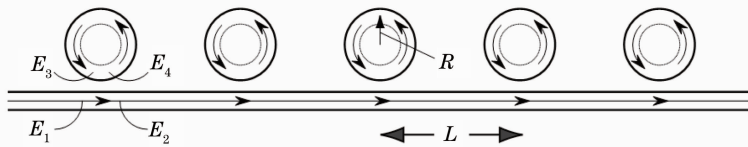


图 2 边耦合集成间隔序列谐振环结构示意图^[37]

Fig. 2 Schematic of side-coupled integrated spaced sequence of resonators^[37]

无独有偶,Ciminelli 等^[41]在理论上分析了一种集成垂直堆叠型双谐振环结构,如图 3 所示,该结构有两个不同平面的谐振环耦合,下层谐振环也与一直波导耦合,利用热光效应周期性调制两个垂直谐振环的耦合系数,可产生快光。这种结构相比单环结构提高了群速度可控的自由度,即增加了垂直环之间的耦合,并且微小耦合量变化可导致大范围群速度改变,在实现方式上也更加简单和集成化。

3.2 结构色散在快光陀螺的应用

反常色散的实现逐渐简单化,并越来越多地应用于实际,为制作出高集成度、高可靠性的光学器件奠定了基础。尤其是近些年,国内外研究小组不断致力于高灵敏度光学陀螺的研究,试图通过合理设计光色散结构实现反常色散,以此增强对旋转角速率的敏感程度。

Schaar 等^[42]在 2011 年国际快慢光研究进展会议上的一篇邀请文章通过结构色散方式,第一次在理论上设计了一个不需要反常色散介质参与的快光激光陀螺,其结构如图 4 所示。

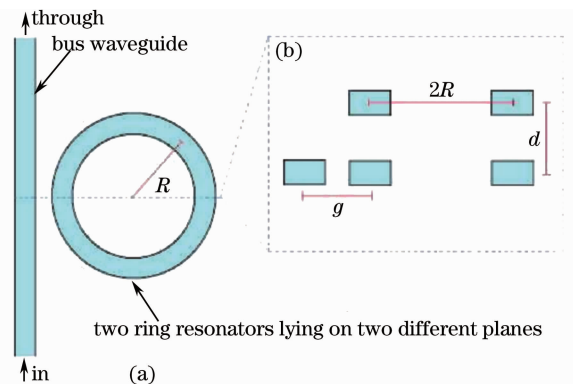


图 3 与直波导耦合的集成垂直堆叠型双谐振环结构。

(a) 顶视图;(b) 截面图^[41]

Fig. 3 Two vertically-stacked ring resonators coupled to a straight waveguide. (a) Top view; (b) cross section^[41]

该结构模型是在常规的环形激光陀螺基础上增加了一个无源增强谐振腔,它并不因旋转而改变色散性质,即无源谐振腔部分的有效 Sagnac 效应为零。通过调整无源增强谐振腔内透镜的透射率可实现结构上的反常色散,从而得到快光效应。陀螺系统旋转灵敏度增强系数 $S_{\text{enh}} = (d\Omega/d\omega)^{-1}$, 式中 Ω 和 ω 分别为空腔谐振频率和激光频率,理论推导得出在频率失谐量为零时,快光增强型环形激光陀螺系统的旋转灵敏度增强系数 $S_{\text{enh}} \approx 100$, 即相比普通环形激光陀螺提高了两个数量级。最后他们指出该“快光”结构在提高陀螺灵敏度的结构设计上存在巨大潜力。

通过结构色散方式产生快光效应相比介质色散更具有优势,前者结构设计更加紧凑,体积更小,这显然更利于器件集成化的发展。近期, Sorrentino 等^[43] 通过一系列耦合微型谐振环在硅基芯片上设计了一种集成光波导陀螺,芯片尺寸仅为 $0.1 \sim 1.0 \text{ mm}^2$, 结构如图 5 所示,光信号通过 3 dB 耦合器分束后进入微环的两端,经一系列谐振环后返回耦合器并输出。该结构关于中间微环对称,周期性控制微环间耦合系数变化,图中微环间黄色代表弱耦合区域,红色代表强耦合区域,以此调制结构色散关系。他们通过理论分析得出该结构旋转灵敏度可达 $0.001^\circ/\text{h}$ 。

可以看出,系统的结构优化设计和结构参数调制将逐步取代复杂的介质传输理论,结构色散的研究成果将促进未来光学器件的发展进程。尽管快光陀螺的研究进展在国际上深受关注,理论研究渐渐加深,但该领域的发展仍处于起步阶段,真正意义上的快光陀螺还有诸多问题亟待提出和解决,这更需要世界范围内各研究小组的共同努力。Yan 等^[44] 在分析耦合谐振环结构色散的基础上导出了光学陀螺相灵敏度的表达式,进一步我们设计了一种新型集成化快光增强型陀螺结构,如图 6 所示。



图 5 平面基板上微谐振环耦合结构集成光学陀螺^[43]
Fig. 5 Illustration of micro-resonator CROW integrated optical gyroscope on planar substrate^[43]

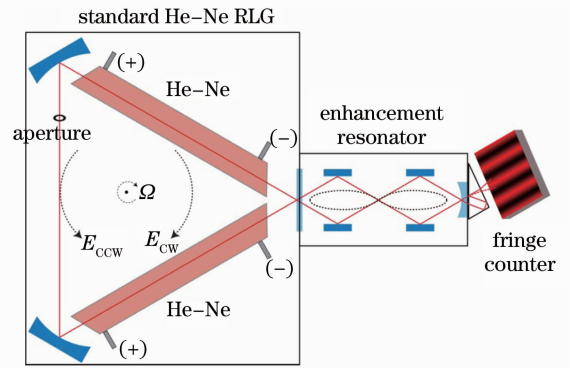


图 4 快光增强型氦氖环形激光陀螺结构示意图^[42]
Fig. 4 Schematic of a fast light enhanced He-Ne RLG^[42]

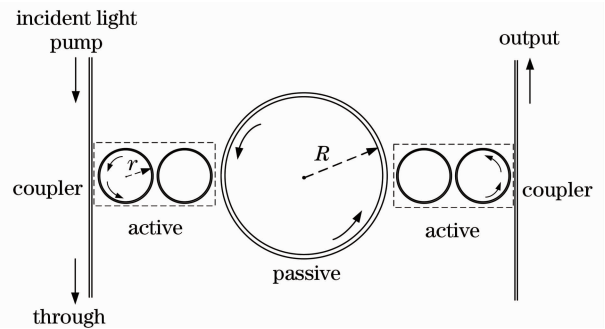


图 6 集成快光增强型谐振式光学陀螺结构示意图
Fig. 6 Schematic of integrated fast-light enhanced resonant optical gyroscope

该结构主要由一个半径为 R 的无源谐振环(即 Sagnac 敏感环)和 4 个半径为 r 的有源谐振环(即色散调制环)串联耦合组成,这些谐振环的左端和右端均为无源直波导,其中左端直波导用于信号光及抽运光输入输出,右端直波导用于信号光输出和检测。通过对比输入信号光和输出信号光的拍频量,即可推得当前旋转角速率大小。

谐振环结构的性能优劣决定了谐振式集成光学陀螺的性能,因此,采用标准微电子工艺在硅基上制备近红外区超低光传输损耗的有源稀土元素掺杂(如铟镱掺杂)的谐振环结构将有利于提高陀螺的整体性能^[45]。一方面,通过有源增益可在小环中补偿光信号吸收和散射损耗;另一方面,有源结构能在一定程度上抑制带宽展宽效应。但更重要的是,有源增益大小直接关系到系统反常色散的调制,并间接影响到陀螺性能。计算模拟表明,该结构谐振环的半径和各谐振环之间、谐振环与直波导之间的耦合系数等对于整个系统的色散关系有重要影响,通过合理调节各参量可获得系统所需的快光效应。而在大环中采用无源结构,其结构简单,

避免了激光陀螺中的闭锁问题^[46],起到增强 Sagnac 效应的目的。

此外,利用快光效应可提高陀螺绝对灵敏度,从而也弥补了增强 Sagnac 效应需要大面积和长光路的不足。相比目前正在研究中的快光激光陀螺或干涉式光纤陀螺,该结构优势在于集成化、小型轻量化和低功耗,预计未来将在众多领域尤其是民用领域发挥巨大潜力。

4 结束语

本文综述了快光实现的两种方式即介质色散和结构色散,并分别讨论了依据这两种方式实现快光增强型谐振式光学陀螺的研究进展情况。相比介质色散,通过合理的结构设计能更好地实现陀螺系统集成化,为实现高精度、小型化快光陀螺提供理论和实验基础。另外,还提出了一种集成化快光增强型陀螺结构,由谐振环间耦合系数及有源增益的调制产生快光效应从而优化系统性能。总之,快光增强型谐振式光学陀螺代表了该领域的发展方向,为实现低成本、小型化、可集成和高灵敏度角速率响应提供了可能,对于新型惯性技术研发和导航器件研制具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 L. Brillouin. Wave Propagation and Group Velocity [M]. New York: Academic Press, 1960. 56~97
- 2 A. M. Akulshin, S. Barreiro, A. Lezama. Steep anomalous dispersion in coherently prepared Rb vapor [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**(21): 4277~4280
- 3 A. M. Steinberg, R. Y. Chiao. Dispersionless, highly superluminal propagation in a medium with a gain doublet [J]. *Phys. Rev. A*, 1994, **49**(3): 2071~2075
- 4 A. M. Steinberg, P. G. Kwiat, R. Y. Chiao. Measurement of the single-photon tunneling time [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**(5): 708~711
- 5 M. Fleischhauer, A. Imamoglu, J. P. Marangos. Electromagnetically induced transparency: optics in coherent media [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2005, **77**(2): 633~673
- 6 H. N. Yum, J. Yablon, K. Salit *et al.*. Ultra-precise rotation sensing with a superluminal ring laser[C]. 2010 IEEE Sensors, 2010. 10~14
- 7 Deng Sisheng, Xiao Zhisong, Yan Lu *et al.*. The status and prospects of integrated optical gyroscopes and related topics [J]. *Physics*, 2012, **41**(3): 179~185
邓思盛,肖志松,燕路等.集成光学陀螺及相关技术研究的现状与展望[J].物理,2012,**41**(3):179~185
- 8 U. Leonhardt, P. Piwnicki. Ultrahigh sensitivity of slow-light gyroscope [J]. *Phys. Rev. A*, 2000, **62**(5): 055801
- 9 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): 107~112
- 10 J. Scheuer, A. Yariv. Sagnac effect in coupled-resonator slow-light waveguide structures [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(5): 053901
- 11 C. Peng, Z. B. Li, A. S. Xu. Rotation sensing based on a slow-light resonating structure with high group dispersion [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(19): 4125~4131
- 12 M. Terrel, M. J. F. Dignonnet, S. Fan. Performance comparison of slow-light coupled-resonator optical gyroscopes [J]. *Laser & Photon. Rev.*, 2009, **3**(5): 452~465
- 13 Zhou Jin, Gu Lingling, Yu Weikun *et al.*. Study of the coupled-resonator slow light structures and their applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(12): 120607
周瑾,谷玲玲,于伟坤等.基于耦合谐振系统的慢光结构及其应用[J].激光与光电子学进展,2011,**48**(12):120607
- 14 M. S. Shahriar, G. S. Pati, R. Tripathi *et al.*. Ultrahigh enhancement in absolute and relative rotation sensing using fast and slow light [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(5): 053807
- 15 A. H. Safavi-Naeini, T. P. Mayer Alegre, J. Chan *et al.*. Electromagnetically induced transparency and slow light with optomechanics [J]. *Nature*, 2011, **472**(7341): 69~73
- 16 Liu Zhengdong, Wu Qiang. Electromagnetically induced transparency in four-level atomic system driven by three coupled fields [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(9): 2970~2973
刘正东,武强.被三个耦合场驱动的四能级原子的电磁感应透明[J].物理学报,2004,**53**(9):2970~2973
- 17 R. W. Boyd. Slow and fast light: fundamentals and applications [J]. *J. Mod. Opt.*, 2009, **56**(18): 1908~1915

- 18 M. D. Stenner, D. J. Gauthier. Pump-beam-instability limits to Raman-gain-doublet “fast-light” pulse propagation [J]. *Phys. Rev. A*, 2003, **67**(6): 063801
- 19 S. Chu, S. Wong. Linear Pulse propagation in an absorbing medium [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **48**(11): 738~741
- 20 H. Tanaka, H. Niwa, K. Hayami *et al.*. Propagation of optical pulses in a resonantly absorbing medium: observation of negative velocity in Rb vapor [J]. *Phys. Rev. A*, 2003, **68**(5): 053801
- 21 W. G. Brown, R. McLean, A. Sidorov *et al.*. Anomalous dispersion and negative group velocity in a coherence-free cold atomic medium [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(12): C82~C86
- 22 A. M. Akulshin, A. Cimmino, G. I. Opat. Negative group velocity of a light pulse in cesium vapour [J]. *Quantum Electron.*, 2002, **32**(7): 567~569
- 23 L. J. Wang, A. Kuzmich, A. Dogariu. Gain-assisted superluminal light propagation [J]. *Nature*, 2000, **406**(6793): 277~279
- 24 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
- 25 Qiu Wei, Zhang Yundong, Ye Jianbo *et al.*. Controllable group velocity of light pulse in erbium-doped optical fiber at room temperature [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(12): 7009~7014
邱巍, 掌蕴东, 叶建波等. 室温条件下掺铒光纤中光脉冲群速可控特性的研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(12): 7009~7014
- 26 F. Bo, G. Q. Zhang, J. J. Xu. Transition between superluminal and subluminal light propagation in photorefractive Bi₁₂SiO₂₀ crystals [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(20): 8198~8203
- 27 R. T. Glasser, U. Vogl, P. D. Lett. Stimulated generation of superluminal light pulses via four-wave mixing [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, **108**(17): 173902
- 28 A. Schweinsberg, N. N. Lepeshkin, M. S. Bigelow *et al.*. Observation of superluminal and slow light propagation in erbium-doped optical fiber [J]. *Europhys. Lett.*, 2006, **73**(2): 218~224
- 29 L. Zhang, L. Zhan, K. Qian *et al.*. Superluminal propagation at negative group velocity in optical fibers based on Brillouin lasing oscillation [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, **107**(9): 093903
- 30 M. Salit, G. S. Pati, K. Salit *et al.*. Fast-light for astrophysics: super-sensitive gyroscopes and gravitational wave detectors [J]. *Mod. Opt.*, 2007, **54**(16): 2425~2440
- 31 G. S. Pati, M. Salit, K. Salit *et al.*. Demonstration of displacement-measurement-sensitivity proportional to inverse group index of intra-cavity medium in a ring resonator [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(19): 4931~4935
- 32 H. N. Yum, M. Salit, J. Yablon *et al.*. Superluminal ring laser for hypersensitive sensing [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(17): 17658~17665
- 33 M. Salit, K. Salit, P. Bauhahn. Prospects for enhancement of ring laser gyroscopes using gaseous media [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(25): 25311~25318
- 34 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
- 35 K. Totsuka, M. Tomita. Slow and fast light in a microsphere-optical fiber system [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(10): 2194~2199
- 36 K. Totsuka, M. Tomita. Observation of fast light in Mie scattering processes [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, **73**(4): 045602
- 37 J. E. Heebner, R. W. Boyd. “Slow” and “fast” light in resonator-coupled waveguides [J]. *J. Mod. Opt.*, 2002, **49**(14): 2629~2636
- 38 Q. Li, Z. Y. Zhang, J. Wang *et al.*. Fast light in silicon ring resonator with resonance-splitting [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(2): 933~940
- 39 J. E. Heebner, R. W. Boyd. SCISSOR solitons and other novel propagation effects in microresonator-modified waveguides [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4): 722~731
- 40 H. Tian, Y. D. Zhang, X. N. Zhang *et al.*. Rotation sensing based on a side-coupled spaced sequence of resonators [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(10): 9185~9191
- 41 C. Ciminelli, C. E. Campanella, F. Dell’Olio *et al.*. Fast light generation through velocity manipulation in two vertically-stacked ring resonators [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(3): 2973~2986
- 42 J. E. Schaar, H. N. Yum, S. M. Shahriar. Theoretical description and design of a fast-light enhanced helium-neon ring-laser gyroscope [C]. *SPIE*, 2011, **7949**: 794914

- 43 C. Sorrentino, J. R. E. Toland, C. P. Search. Ultra-sensitive chip scale Sagnac gyroscope based on periodically modulated coupling of a coupled resonator optical waveguide [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(1): 354~363
- 44 L. Yan, Z. S. Xiao, X. Q. Guo *et al.*. Circle-coupled resonator waveguide with enhanced Sagnac phase-sensitivity for rotation sensing [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(14): 141104
- 45 Yan Lu, Xiao Zhisong, Zhang Feng *et al.*. Advances of silicon-based integrated photonic devices and applications in optical gyroscope and optical communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 547~553
燕路, 肖志松, 张峰等. 硅基光子器件研究进展及其在光陀螺与光通信中的应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 547~553
- 46 Su Jue, Qian Jingren. Lock-in effect in fiber ring laser gyros [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2487~2490
苏觉, 钱景仁. 光纤环形腔激光陀螺中的闭锁效应[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2487~2490