

光学谐振系统中慢光特性研究*

张敬 掌蕴东[†] 张学楠 喻波 王金芳 王楠 田赫 袁萍

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 可调谐激光器国家重点实验室, 哈尔滨 150080)

(2009年11月4日收到; 2010年4月27日收到修改稿)

针对两环形腔与直波导耦合的系统, 考虑光纤耦合器的插入损耗, 发现两个耦合器反射值的不同匹配, 却可以在谐振处得到相同的透过率峰值, 因此可以不必限定某两个具体反射值, 通过数值模拟得到中心频率处透过率峰值与群折射率的反比关系. 由于群延迟与群折射率相对应, 所以群延迟的增加势要以牺牲峰值透过率为代价. 将增益介质加入到三环形腔与直波导耦合的系统中, 可以使结构的色散响应由反常色散转化为正常色散, 同样体现出慢光的特性. 在频域和时域范围内分别对群延迟做了定量的分析.

关键词: 慢光, 透过率, 有效相移, 群延迟

PACS: 42.81.Qb, 42.79.Gn, 07.60.-j

1. 引言

自1960年激光产生以来, 人们对于光速的探索不断深入, 光速减慢逐渐成为专家学者们研究的热点问题. 现在普遍认同的光速减慢的方式有两种, 一种是在色散介质中光与原子分子的相互作用改变光学介质的群折射率, 譬如电磁感应透明技术(EIT)、相干布居振荡技术(CPO)、受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS)等; 另一种是在色散结构中由于光束的相干作用导致群折射率的改变, 例如 Fabry-Perot 谐振腔^[1]、耦合谐振光波导(CROW)^[2-6]、耦合谐振诱导透明(CRIT)^[7-10]以及光子晶体^[11,12]等. EIT技术由 Harris 等^[13]于1990年提出, 它是指在有外加电磁场的情况下, 使介质本应处于强吸收的区域变得透明; 1999年美国 Harvard 大学的 Hau 等^[14]利用 EIT 技术在玻色-爱因斯坦凝聚状态下实现光速减慢到 17 m/s, 而在 2001 年 Hau 等^[15]利用 EIT 技术实现了光脉冲完全静止, 光速为零. 2003 年, Boyd 等^[16]在室温条件下利用光谱烧孔技术在红宝石晶体中观测到了极慢光传输现象. 上述在减慢光速方面的研究都是基于第一种方式. 运用第二种方式来达到对光速可控的

研究在最近几年受到了越来越多的关注, 具有结构简单、体积小, 波长输出可控, 更加利于集成等优点. 不需要苛刻的实验条件, 以及不需要光波的输入波长精确对准原子分子的吸收谱线. 2004 年 Smith 等^[17]就在理论上分析了耦合谐振诱导透明现象, 与 EIT 现象做近似类比. 在 2005 年 Smith 等^[18]又进一步解释了由于光子的相干作用对耦合谐振结构的影响, 以及各个谐振腔中的耦合参数匹配产生快慢光的条件. 2006 年 Smith 等^[19]又在光纤中观察到了耦合谐振诱导透明现象. 2006 年 Totsuka 和 Tomita^[20]在实验中观测光脉冲传输经过微球与光纤锥耦合的系统之后, 出现耦合谐振透明现象并伴随着一定的脉冲展宽和变形, 其脉冲延迟时间为 8.5 ns. 2008 年 Dumeige 等^[21]在慢光介质中通过巧妙的实验设计, 在含有掺铒光纤的耦合谐振透明系统中测量出其结构所产生的有效相移. 文中根据实际情况, 把光纤耦合器的插入损耗考虑在内, 主要针对两环形腔与直波导耦合的谐振系统和三环形腔与直波导耦合的谐振系统, 分别对耦合特性和增益特性进行深入的研究, 从而体现出系统的慢光特性. 上述研究内容可以作为重要的理论依据, 使光学谐振系统应用在光速可控理论、传感器^[22,23]、滤波器以及光缓存器等实用新型领域.

* 国家自然科学基金(批准号:60478014, 60878006, 60272075, 61078006)和国家高技术研究发展计划(批准号:2007AA12Z112)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: ydzhang@hit.edu.cn

2. 基础理论

2.1. 理论模型

如图 1 所示,通常情况下,将直接通过光波导的光设为直通光,将部分耦合进入环形谐振腔中的光定义为耦合光,经过光纤环形腔的耦合光由于多光束干涉的结果,则相对于直通光的相位产生了一个附加的相位,定义为有效相移,最后两束光在输出端口发生再次干涉现象. 对下述情况进行假定:一是两束光的偏振方向相同,因为这样才能使得相干原理得以运用;二是两个环形谐振腔的长度相等,考虑光纤的自然损耗和光纤耦合器所引入的插入损耗,对光纤的熔接损耗以及耦合器的功率损耗以及散射损耗等因素暂不考虑.

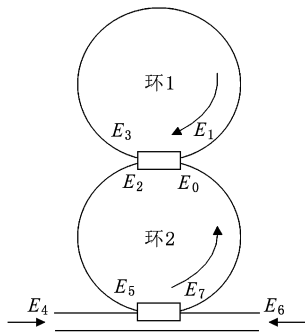


图 1 两环形谐振腔与直波导耦合的谐振系统

首先,在稳态耦合模理论近似的情况下运用迭代的方法对两个光纤谐振器与直波导耦合的情况进行分析^[24]. 根据图 1 所示,经过推导在两束光发生干涉之后,输出端产生的光场强度振幅的表达式为

$$\tau_1 = \frac{E_2}{E_0} = \frac{r_1 b_1 - b_1^2 a_1 \tau_1 \exp(i\phi_1)}{1 - r_1 a_1 b_1 \tau_1 \exp(i\phi_1)}, \quad (1)$$

$$\tau_2 = \frac{E_6}{E_4} = \frac{r_2 b_2 - b_2^2 a_2 \tau_1 \exp(i\phi_2)}{1 - r_2 a_2 b_2 \tau_1 \exp(i\phi_2)}, \quad (2)$$

其中 $\tau_n (n = 0, 1, 2, \dots)$ 为传递函数且 $\tau_0 = 1$, 主要用来表示光波场强振幅输出与输入之比,其与光场的透过率曲线以及有效相移有紧密联系,因此又可以表示成

$$\tau_2 = |\tau_2| \exp(i\phi_2^{\text{eff}}) = \sqrt{T_2} \exp(i\phi_2^{\text{eff}}), \quad (3)$$

r_1, r_2 为反射系数; a_1, a_2 为损耗系数,表达为 $a_1 = \exp(-\alpha_1 L_1), a_2 = \exp(-\alpha_2 L_2)$, 这里 α_1, α_2 为光在

环形谐振腔中传播的自然损耗; b_1, b_2 为插入损耗值,表示为 $b_1 = 10^{-\frac{\gamma_1}{20}}, b_2 = 10^{-\frac{\gamma_2}{20}}$, 这里 γ_1, γ_2 代表的是耦合器的插入损耗; L_1, L_2 为光纤环的环长; R_1, R_2 为耦合器的反射值, $R_1 = 100r_1^2, R_2 = 100r_2^2$; φ_2 为通过第二个环形谐振腔的相移,表示为 $\phi = \phi_1 = \phi_2 = \beta_2 L$, 而且长度相等 $L = L_1 = L_2$.

2.2. 分析与讨论

在耦合器插入损耗一定的情况下,透过率 T 的大小主要由光纤耦合器的反射值以及光在光纤中传播的损耗系数决定. 数值模拟结果显示,在谐振频率附近适当调整耦合器的反射值可以得到相同的透过峰值,不过光强对比度的变化比较明显. 对于两环形谐振腔与直波导耦合组成的谐振系统,图 2 和图 3 中举例来说明透射光谱图,即使系统中两个反射值的不同匹配,也可以在中心谐振频率处得到相同的透射峰值. 在长度相等且为 3 m 的两个环形谐振腔中,耦合器的插入损耗为 $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.2$ dB, 损耗系数为 $a_1 = a_2 = 0.9993$. 图 2 和图 3 中所示的透过率曲线(输出光强度与输入光强度的比值),分别用实线、虚线以及点线表示,并且当图 2 中的反射值分别为 $R_1 = 92, R_2 = 64; R_1 = 88, R_2 = 51; R_1 = 82, R_2 = 36$ 时,其透过率的峰值都为 75%, 而三条曲线的最低点分别为 24%, 38% 和 52%. 图 3 中的反射值分别为 $R_1 = 96, R_2 = 72; R_1 = 93, R_2 = 57; R_1 = 90, R_2 = 44$ 时,在中心频率处的透射峰值为 65%, 而三条曲线的最低点分别为 15%, 32% 和 44%. 两图的共同点是透过率曲线中的极小值不同,从而造成对比度的明显不同.

耦合器反射值的随机匹配可以得到相同透过

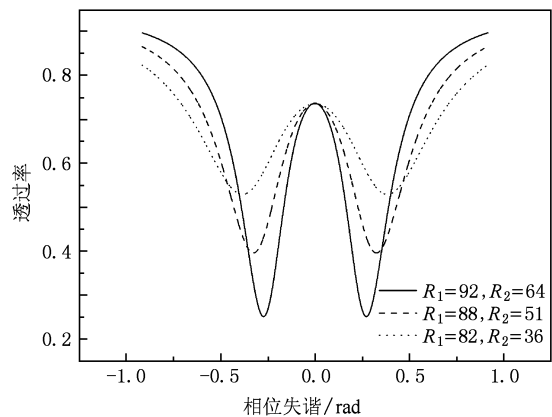


图 2 两环形谐振系统的透过率曲线 实线、虚线及点线的反射值分别为 $R_1 = 92, R_2 = 64; R_1 = 88, R_2 = 51; R_1 = 82, R_2 = 36$

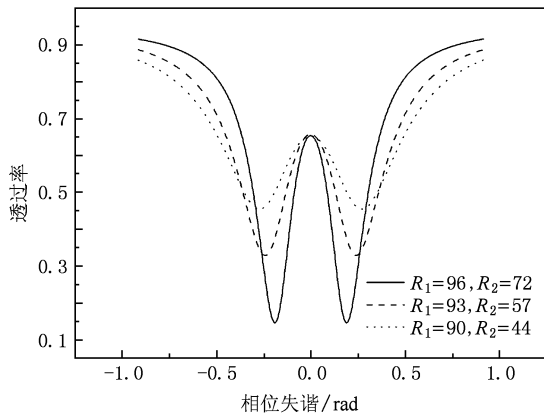


图3 两环谐振系统的透过率曲线 实线、虚线及点线的反射值分别为 $R_1 = 96, R_2 = 72; R_1 = 93, R_2 = 57; R_1 = 90, R_2 = 44$

率,这不仅仅是巧合,通过细致的计算可以发现,一系列反射值的两两组合都可以在谐振处得到相同的传递函数值,进而得到相同的透过光强.光经过环形谐振腔之后相位发生了变化,相对于输入端的起始相位,有效相移 $\phi_2^{\text{eff}} = \arg(\tau_2)$, 经过进一步推导,谐振点处的有效相移具体表达式为

$$\phi_2^{\text{eff}} \Big|_{\phi_1 = \phi_2 = 0} = \arctan \left(\frac{-a_2 b_2^2 (1 - r_2^2) |\tau_1| \sin(\phi_1^{\text{eff}})}{r_2 b_2 (1 + a_2^2 |\tau_1|^2 b_2^2) - a_2 b_2^2 |\tau_1| (1 + r_2^2) \cos(\phi_1^{\text{eff}})} \right), \quad (4)$$

其中 $\tau_1 = \frac{r_1 b_1 - a_1 b_1^2}{1 - r_1 a_1 b_1}$, 当系统处于欠耦合时 ($r_1 > a_1 \gamma_1$), $\phi_1^{\text{eff}} = m \cdot 2\pi$ (m 为正整数); 当系统处于临界耦合时 ($r_1 = a_1 \gamma_1$), $\phi_1^{\text{eff}} = 0$; 当系统处于过耦合时 ($r_1 < a_1 \gamma_1$), $\phi_1^{\text{eff}} = n \cdot \pi$ (n 为正整数). 有效相移的灵敏度表达为 $\frac{d\phi_2^{\text{eff}}}{d\phi_2}$, 而系统的色散特性由有效相移的灵敏度决定. 即 $\frac{d\phi_2^{\text{eff}}}{d\phi_2} > 0$, 为正常色散; 反之,则为反常色散. 群折射率与有效相移的灵敏度成比例^[25], 并且近似表示为

$$n_g = \frac{d\phi_2^{\text{eff}}}{d\phi_2} \cdot n_0, \quad (5)$$

在长度相等且同为 3 m 的两环形谐振腔中,耦合器的插入损耗为 $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.2$ dB, 损耗系数为 $a_1 = a_2 = 0.9993$, 相折射率为 $n_0 = 1$, 耦合器的反射值 R_1 由 1 到 100 和 R_2 由 1 到 100 的范围内取值, 经过数值模拟使 R_1, R_2 任意组合, 最终由图 4 表示出透过率与群折射率的反比关系曲线. 该曲线是由

几千个点组成, 每一个点表示了中心谐振频率对应的透过峰值与群折射率二者之间一一对应的关系. 从图 4 中内插的放大图可以看出当透过率在 0.55—0.8 之间变化时, 群折射率的变化范围为 10—2, 因为前面已经证明了 R_1, R_2 的不同匹配可以得到相同的透过率, 此时不用考虑 R_1, R_2 具体的组合系数. 增大群折射率, 透过率峰值减小; 减小群折射率, 透过率峰值增大.

研究表明, 较大的群折射率意味着较小的群速度, 即较大的群延迟时间, 进一步可以推导出在谐振处群延迟时间与透过率也是成反比关系. 通过控制系统中的反射值与损耗系数, 就获得较大群延迟, 这也正是获取极慢光速的重要研究手段.

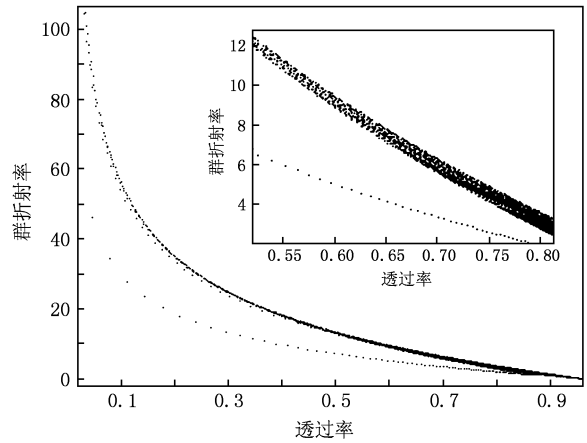


图4 两环谐振系统中, 谐振处透过率峰值与群折射率的反比关系曲线 内插图为透过率在 0.55—0.8 的局部放大图

对于两环形谐振腔与直波导耦合的谐振系统来说, 选择适合的反射值和损耗系数, 在谐振频率附近可以使有效相移曲线表现出正常色散响应, 进而在正常色散区域会产生慢光. 而对于三环形谐振腔与直波导耦合的系统来说, 通常情况下在中心谐振附近会出现极低透过率, 并且有效相移曲线呈现出反常色散特性. 经过研究发现, 若使三环谐振系统在中心频率附近表现出慢光特性, 其中一种方式就是改变系统的损耗系数, 也就是减少光在环形谐振腔中传播所引起的自然损耗. 仅仅弥补自然损耗 ($a_1 \leq 1, a_2 \leq 1, a_3 \leq 1$), 仍然不能达到使反常色散变为正常色散的目的, 因而需要在三个光纤环形腔内掺入增益介质, 譬如镧系元素中的铒和镱, 使得整个系统处于增益无损耗状态 ($a_1 > 1, a_2 > 1, a_3 > 1$). 掺入增益介质的浓度不同或是抽运功率的不同, 都会起到不同的作用. 较低的浓度或是较低

的抽运功率可以补偿光在光纤传播中的损耗,这些损耗主要来源于光纤对光的吸收、散射和反射作用.较高的浓度或是较高的抽运功率不但可以抵消损耗,而且可以促成增益——使反常色散向正常色散转化.光由快变慢的过程体现出光速的可控性,使人们对于光速的理解和掌握更加深一步.由于系统中增益作用的存在,还可以使透过率曲线的取值发生变化,出现了在两环形谐振系统中常见的耦合谐振诱导透明现象.增大其环内增益,有效相移的灵敏度明显增大,使群速变得更慢,通过精确控制环内的增益,可以对群速进行有效的控制.

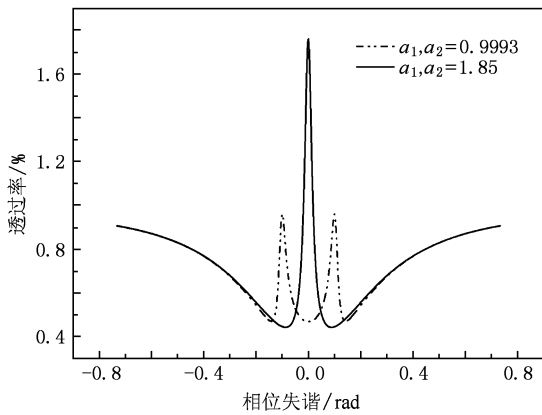


图5 掺入增益介质前后的透过率曲线

为简单起见,对下述情况中固定参数进行假定,耦合器的插入损耗为 $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0$ dB (只考虑有无增益对光速特性的影响);耦合器的反射值为 $R_1 = R_2 = 99, R_3 = 90$,三环形谐振腔长度相等均为 3 m.图5—7中的虚线均表示在未加增益的情况下,损耗系数为 $a_1 = a_2 = 0.9993, a_3 = 0.76$;实线均表示在有增益作用的情况下,损耗系数变为 $a_1 = 1.85, a_2 = 0.9993, a_3 = 0.76$.图5表示掺入增益介质前后的透过率曲线.光纤环形腔内的增益作用可以减小光在环中传播产生的损耗,使得输出的光强远大于输入的光强,在谐振处透过率的峰值由47%上升为176%,使本该强吸收的谐振频率附近出现很窄范围的透明现象.耦合谐振诱导透明的出现,使得中心频率处呈现出极大值,从而有利于对输出光强度的探测和研究.

图6表示掺入增益介质前后的有效相移曲线.在谐振处有效相移的斜率由负变正,使得有效相移的灵敏度发生变化,意味着此光学谐振结构的色散响应由反常色散向正常色散变化,从而证明了三环谐振系统能够产生慢光.

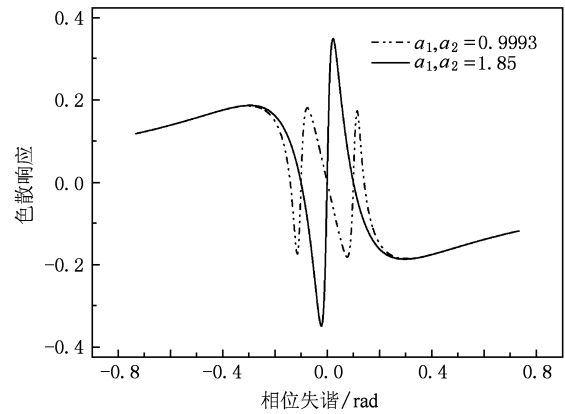


图6 掺入增益介质前后的有效相移曲线

此系统具有慢光特性,一般可以用光经过系统后产生的群延迟来描述.群延迟公式表示为

$$\tau_g = \frac{d\phi_3^{eff}(w)}{dw} \quad (6)$$

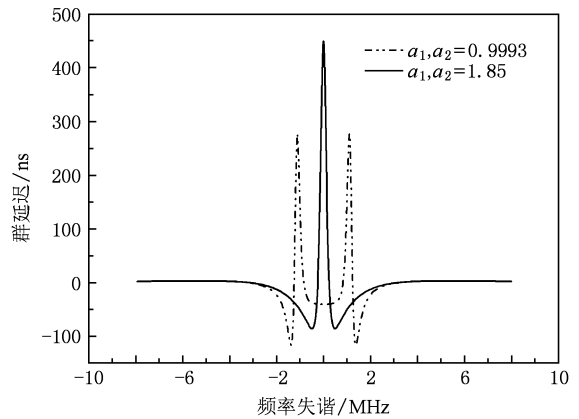


图7 在频域范围内掺入增益介质前后的群延迟

图7从稳态的理论出发,得到在频域范围内有无增益作用的群延迟曲线.这是在谐振处光速由快变慢,或者说是由超前变为延迟的理论描述,其群延迟由最初的-43 ns变到加入增益介质后的447 ns.在中心频率附近,由于增益作用的存在,使得原来两个延时极大值转变为负值(超前).

考虑单一脉冲由直波导输入端输入,经由整个三环谐振系统到达直波导输出端,其与时间相关的输出脉冲通过傅里叶变换可以表示如下:

$$E_{out}(t) \propto \int_{\Delta\omega} f(\omega) E_{out}(t) \exp(-i\omega t) d\omega \quad (7)$$

其中 $f(\omega)$ 为输入脉冲的傅里叶因子.图8表示在时域范围内,模拟出有无增益介质存在时暂态的脉冲延迟和脉冲超前波形.输入脉冲的脉宽为 1.6 μ s,可

以得到脉冲延迟为 $0.248 \mu\text{s}$, 分别用虚线、实线表示, 脉冲超前则用点线表示. 此时实线的系数为 $a_1 = 1.85, a_2 = 0.9993, a_3 = 0.76$, 点线的系数为 $a_1 = a_2 = 0.9993, a_3 = 0.76$. 由于图 8 中时间坐标轴用微秒表示, 无增益情况下, 由于脉冲超前 $0.0402 \mu\text{s}$, 因此输出脉冲相对于输入脉冲来说只是略微超前, 由于损耗因素, 致使输出脉冲振幅强度比输入脉冲幅值有明显的下降; 有增益情况下, 光经过谐振结构时, 系统内的增益介质不但弥补损耗因素的影响, 而且对光具有放大作用, 使输出脉冲的振幅大于输入脉冲, 伴随着一定程度的脉冲展宽.

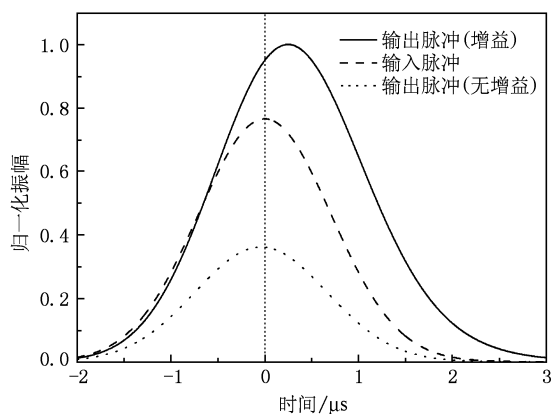


图 8 在时域范围内掺入增益介质前后的输出脉冲超前和延迟

无增益系统处于谐振时, 整个系统处于未耦合状态, 进入谐振腔中的循环光场强值小于直接通过直波导的光场强值, 使得脉冲的后沿受损, 造成最终输出脉冲峰值前移, 相对于输入脉冲来说产生脉冲超前现象, 产生快光. 增益系统处于谐振时, 由于增益作用, 此时进入谐振腔中的循环光场强与直接通过直波导的光场强相比, 后者场强小于前者的场强, 输出脉冲中心峰值后移, 相对于输入脉冲来说产生脉冲延迟现象, 产生慢光.

3. 结 论

近几年来, 慢光技术对光缓存、光学滤波器、光

调制器等光纤通信领域的发展起到了重要的推动作用. 在类似微结构中研究慢光特性, 虽然具有较大的可调带宽和体积小、集成度高等特点, 但是就目前的制作和加工技术来看, 在微结构(微环、微球、微盘)中想要通过实验验证并将其广泛应用, 这是相当困难的. 相比之下在光纤环型谐振腔中更易实现, 进而可以更广泛地应用在高速率的光纤通信及信息存储技术方面. 本文研究了两环形谐振腔与直波导耦合系统, 并着重考虑了光纤耦合器插入损耗对系统慢光特性的影响, 在一定的理论计算与数值模拟的基础上, 发现两个耦合器反射值经过不同的匹配, 在入射光强相等的情况下, 却可以在谐振处得到相同的透过光强. 这样就能解决光学谐振系统中对耦合器反射值要求苛刻的难题, 在实际情况中就可以利用现有的耦合器参数进行下一步实验. 因此为实验中输出光强度幅值的可控特性和光纤耦合器反射值的随机匹配提供了便利. 并且在反射值随机匹配的条件下, 得出谐振处透过率峰值与群折射率的反比关系. 因此在下一步进行实验设计中, 要选择适合的实验参数, 透过光强的可控性及透过率和群延迟的权衡关系都是值得深入思考的重要因素. 进一步又研究了三环形谐振腔与直波导耦合系统, 根据相干原理, 一般情况下在谐振处奇数环形谐振腔由于产生破坏性干涉, 使得系统的有效相移呈现出反常色散响应. 为了研究此结构的慢光特性, 在远离直波导的环中掺入增益介质, 使得在中心频率处透过率曲线峰值取得极大值, 有效相移呈现出正常色散响应; 通过对系统的损耗参数做适当的调整, 即可改变有效相移的灵敏度, 使得慢光在提高新型传感器和慢光干涉仪的灵敏度方面具有重要的探索意义. 就此情况通过数值模拟分别在频域和时域范围内得到相应的群延迟, 并对系统产生快慢光的原理做了定性的解释. 通过加入增益介质的不同, 可以使光由快变慢, 进而调节光的快慢程度, 为光速可控理论提供了可行的途径.

[1] Minin S, Fisher M R, Chuang S L 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 17
 [2] Yariv A, Xu Y, Lee R K 1999 *Opt. Lett.* **24** 711
 [3] Uenuma M, Moooka T 2009 *Opt. Lett.* **34** 5
 [4] Xu Q F, Sandhu S, Povinelli M L, Shakya J, Fan S H, Lipson M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 12

[5] Tian H, Zhang Y D, Wang H, Qiu W, Wang N, Yuan P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6400 (in Chinese) [田 赫、掌蕴东、王号、邱 巍、王 楠、袁 萍 2008 物理学报 **57** 6400]
 [6] Tian H, Zhang Y D, Wang H, Ouyang Q Y, Wang N, Yuan P 2009 *Chin. Phys. B* **18** 221

- [7] Groblacher S, Hammerer K, Vanner M R, Aspelmeyer M 2009 *Nature* **460** 7256
- [8] Totsuka K, Kobayashi N, Tomita M 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 21
- [9] Tomita M, Totsuka K, Hanamura R, Matsumoto T 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 4
- [10] Wang N, Zhang Y D, Wang J F, Tian H, Wang H, Zhang X N, Zhang J, Yuan P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7672 (in Chinese) [王楠、掌蕴东、王金芳、田赫、王号、张学楠、张敬、袁萍 2009 物理学报 **58** 7672]
- [11] Sauvan C, Lalanne P, Hugonin J P 2004 *Nature* **429** 6988
- [12] Khorshid Ahmad A, Kirk A G 2009 *Opt. Lett.* **34** 19
- [13] Harris S E, Field J E, Imamoglu A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 10
- [14] Hau L V, Harris S E, Dutton Z, Behroozi C H 1999 *Nature* **397** 6720
- [15] Liu C, Dutton Z, Behroozi C H, Hau L V 2001 *Nature* **409** 6819
- [16] Bigelow M S, Lepeshkin N N, Boyd R W 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 11
- [17] Smith D D, Chang H, Fuller K A, Rosenberger A T, Boyd R W 2004 *Phys. Rev. A* **69** 6
- [18] Smith D D, Chang H 2004 *J. Mod. Opt.* **51** 2503
- [19] Smith D D, Lepeshkin N N, Schweinsberg A, Gehring G, Boyd R W, Park Q H, Chang H, Jackson D J 2006 *Opt. Commun.* **264** 1
- [20] Totsuka K, Tomita M 2006 *J. Opt. Soc. Am. B* **23** 10
- [21] Dumeige Y, Nguyen T K N, Ghisa L, Trebaol S, Feron P 2008 *Phys. Rev. A* **78** 013818
- [22] Wang N, Zhang Y D, Wang H, Tian H, Qiu W, Wang J F, Yuan P 2010 *Chin. Phys. B* **19** 014216
- [23] Zhang J X, Qu D K, Feng S, Wang Y Q, Wang C K 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8339 (in Chinese) [张建心、屈道宽、冯帅、王义全、王传奎 2009 物理学报 **58** 8339]
- [24] Smith D D, Chang H R, Fuller K A 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 9
- [25] Peng C, Li Z B, Xu A S 2007 *Appl. Opt.* **46** 19

Characteristics of subluminal for optical resonators*

Zhang Jing Zhang Yun-Dong[†] Zhang Xue-Nan Yu Bo Wang Jin-Fang Wang Nan Tian He Yuan Ping

1) (State Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology University, Harbin 150080, China)

(Received 4 November 2009; revised manuscript received 27 April 2010)

Abstract

The insertion loss of fiber couplers in the two fiber rings waveguide system is studied. The peak power is the same by matching coupler strength of two couplers at the resonant area. The peak transmittance is inversely proportional to the group refractive index regardless of the two reflection values. Group delay increases at the expense of reduction of the peak transmissivity. The three rings waveguide structure manifests the subluminal properties accompanying normal dispersion by doping gain media. Group delay is analyzed in the frequency domain and the time domain, respectively. This study could be regarded as the significant theoretical foundation for applications in the field of controllable light velocity theory, sensors, filters, optical buffers and so on.

Keywords: slow light, transmission, effective phase shift, group delay

PACS: 42.81.Qb, 42.79.Gn, 07.60.-j

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60478014, 60878006, 60272075, 61078006) and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2007AA12Z112).

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