

文章编号 1004-924X(2017)01-0059-06

单光学谐振器感应透明现象的窄带透射峰

田 赫^{1*}, 掌蕴东², 白 岩³

(1. 东北林业大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 哈尔滨工业大学 光电子技术研究所与可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

3. 东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:基于光学谐振器结构的感应透明现象通常是利用双光学谐振器产生的,但由于谐振器间易失谐,因此感应透明现象难以稳定。本文研究利用单光学谐振器实现稳定的感应透明现象,并获得透过率大、带宽窄的透射峰。首先建立单光学谐振器自干涉结构,利用传输矩阵理论讨论该结构的透射谱,研究结构参数对透射谱的影响,实验上,基于理论结果选择适当的结构参数,利用单模光纤制作单光学谐振器自干涉结构,建立实验系统测量结构的透射谱,最后讨论了该结构的应用。实验结果表明:利用基于单光学谐振器感应透明现象可获得带宽很窄的透射峰,峰值透过率为0.62,透射峰带宽为0.54 MHz,透射峰带宽与波导长度乘积为6.48 MHz·m。基于单光学谐振器感应透明现象的窄带透射峰可用于窄带滤波、光学信息处理、高精度光学参量测量及检测等。

关键词:光学谐振器;感应透明;窄带透射峰;光学测量;滤波

中图分类号:TH713;TH741 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172501.0059

Transmission peak with narrow bandwidth in single optical resonator induced-transparency

TIAN He^{1*}, ZHANG Yun-dong², BAI Yan³

(1. College of Science, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2. Institute of Opto-Electronics and National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

* Corresponding author, E-mail: tianhe@163.com

Abstract: Induced-transparency based on optical resonator structure is usually generated by utilizing double optical resonators. However the induced-transparency is not stable due to the detuning between resonators. In this paper, stable induced-transparency, of which the transmission peak has high transmittance and narrow bandwidths, was achieved by using a single optical resonator. First a single optical resonator self-interference structure was established, and the transmission spectra of the structure were discussed using transfer matrix theory in order to investigate the influence of structural

收稿日期:2016-09-13;修订日期:2016-10-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61307076);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2572017BB17)

parameters on the transmission spectra. Based on the theoretical results, a single optical resonator self-interference structure with single-mode fiber was fabricated with appropriate structure parameters. Then the experimental system for measuring the transmission spectra of the structure was established. Finally, the applications of the structure were discussed. The experimental results show that the transmission peak with very narrow bandwidths can be obtained by using the single optical resonator induced-transparency. The peak transmittance is 0.62, the bandwidth of the transmission peak is 0.54 MHz, and the product of the transmission peak bandwidth and the length of the waveguide is 6.48 MHz · m. The transmission peak with narrow bandwidth can be applied to filters, optical information processing, high precision optical measurements and detections.

Key words: optical resonator; induced-transparency; transmission peak with narrow bandwidth; optical measurement; filtering

1 引言

电磁感应透明是由斯坦福大学的 S. E. Harris 等人提出的^[1]。在原子系统中,强的耦合光所导致的量子干涉相消,抵消了来自基态至相干叠加态上能级的吸收,从而产生电磁感应透明现象。电磁感应透明在滤波、光学开关、光学传感等方面有着广泛的应用。最近的理论和实验研究表明,经典的破坏性干涉产生的电磁感应透明也可以发生在耦合光学谐振器结构中,所以研究人员提出利用不同的光学谐振器结构实现感应透明现象,如双耦合的微粒^[2],双环型谐振器与平行波导耦合的结构^[3],嵌入式环谐振器组^[4],和 Ring-Bus-Ring Mach-Zehnder 干涉仪^[5]。在这些结构中,谐振器具有不同的本征损耗和耦合系数,谐振器间的模式分裂和破坏性干涉会引发感应透明现象。对于两个相互耦合的光学谐振器结构,透明产生于两谐振器反射光的破坏性干涉,两个谐振器间的不同谐振频率阻止了透射峰的退化;而对于嵌入式光学谐振器结构,只有在内外两谐振器的谐振级数之差为奇数时,才会产生感应透明现象。

同其它产生感应透明的结构相比,光学谐振器结构相对简单,通过两个相互耦合的谐振器的相互作用,就可产生类似电磁感应透明的相干效应,并可获得较大的透过率。光学谐振器结构中的感应透明是依靠光在谐振器间的相互耦合、干涉形成的,因此具有如下特点:感应透明特性主要由谐振器结构自身的结构参数决定,可在任意波长处产生透明;光学谐振器通常由光波导或光纤制作,器件尺寸小,与目前的光学器件兼容性好;

通过设计结构参数可获得几乎任意的透明带宽,适合应用于光通信领域的全光信息处理。由此可知,光学谐振器结构中的感应透明可应用于全光可调延迟^[6]、波分复用^[7]、基于背向散射的色散^[8]、光学非稳^[9]、光开关^[10]等器件中,同时,通过这些研究感应透明特性设计灵活的特点逐渐显现出来。

但目前用于产生感应透明现象的光学谐振器结构均是由两个相互耦合的谐振器组成,结构相对复杂,特别是环境中可变因素的波动(如温度、压力等的变化)^[11-13],对两个谐振器的作用不可能完全相同,从而导致两谐振器间失谐,且两谐振器间失谐状态不断变化。因此,透射谱的位置和形状不断变化,即便某一时刻获得感应透明现象,这种现象也很不稳定,并且会很快消失。

本文利用单光学谐振器实现了稳定的感应透明现象,同时获得了透过率大、带宽窄的透射峰。利用传输矩阵理论讨论单光学谐振器自干涉结构的透射谱,基于理论结果选择适当的结构参数,利用单模光纤制作单光学谐振器自干涉结构,建立实验系统测量结构的透射谱。单光学谐振器感应透明现象的窄带透射峰可用于窄带滤波、光学信息处理、高精度参量光学测量及检测等领域。

2 模型的建立及分析

2.1 单光学谐振器自干涉结构

单光学谐振器自干涉结构如图 1 所示,该结构只包含一个光学谐振器。谐振器由波导 L_1 , L_2 及两个耦合器构成,结构中的两个耦合器由波导 L_v 连接。

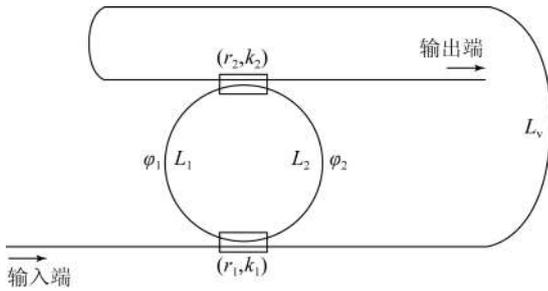


图 1 单光学谐振器自干涉结构

Fig. 1 Schematic diagram of single optical resonator self-interference

$$T = \alpha_v e^{i\varphi_v} \left[\frac{(r_1 - r_2 \alpha e^{i\varphi})(r_2 - r_1 \alpha e^{i\varphi})}{(1 - r_1 r_2 \alpha e^{i\varphi})^2} + \frac{k_1^2 k_2^2 \alpha e^{i\varphi}}{(1 - r_1 r_2 \alpha e^{i\varphi})^2} \right], \quad (1)$$

式中: r_1, r_2 为耦合器的振幅透射系数, k_1, k_2 为耦合器的振幅耦合系数, 满足 $r_1^2 + k_1^2 = 1, r_2^2 + k_2^2 = 1$ 。 $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \omega n_{\text{eff}} L / c$, 为在谐振器中传输一周的相位变化, 其中 $\varphi_1 = \omega n_{\text{eff}} L_1 / c, \varphi_2 = \omega n_{\text{eff}} L_2 / c$, 分别为在波导 L_1, L_2 中传输一周的相位变化; ω 为光波角频率、 n_{eff} 为波导折射率、 c 为真空中光速、 L 为谐振器长度且 $L = L_1 + L_2, \alpha$ 为光波在谐振器中传输一周的振幅衰减系数, $\varphi_v = \omega n_{\text{eff}} L_v / c$ 为光波在波导 L_v 中的相位变化, α_v 为光波在波导 L_v 中的振幅衰减系数, 谐振器的谐振角频率为 ω_0 。式(1)中, 第一项对应到达输出端的第一束光, 第二项对应到达输出端的第二束光。

2.2 透射谱分析

图 2 所示为不同振幅透射系数时单光学谐振器自干涉结构的透射谱, 结构参数为: $L = 12 \text{ m}, \alpha = 0.98, \alpha_v = 1, n_{\text{eff}} = 1.5$ 。图中结果为 $r_1 = r_2$ 时的透射谱。

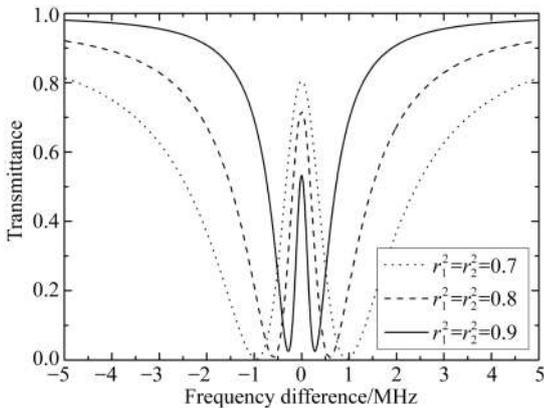


图 2 $r_1 = r_2$ 时, 不同振幅透射系数下谐振器自干涉结构的透射谱

Fig. 2 Spectra of self-interference structures with different amplitude transmission coefficients when $r_1 = r_2$

如图 1 所示, 输入光在进入单光学谐振器自干涉结构的输入端口后分为两束。第一束光先由第一耦合器输出, 然后经波导 L_v , 由第二耦合器输出到达输出端; 第二束光由第一耦合器进入谐振器后, 由第二耦合器输出, 然后经波导 L_v , 再次由第一耦合器进入谐振器, 并由第二耦合器输出到达输出端; 两束光在输出端发生干涉。利用传输矩阵理论^[14-16], 可得到单光学谐振器自干涉结构的传递函数(输出端与输入端光的振幅之比)为:

如图 2 所示, 自干涉结构的透射谱呈现感应透明现象, 振幅透射系数对透射谱谱线的影响明显。随着振幅耦合系数的增大, 透射谱中两低透过率模式逐渐靠近; 因此透射峰带宽逐渐减小, 但低透过率模式的透过率略有增加, 且透射峰最大透过率下降明显, 这不利于透射峰的应用。

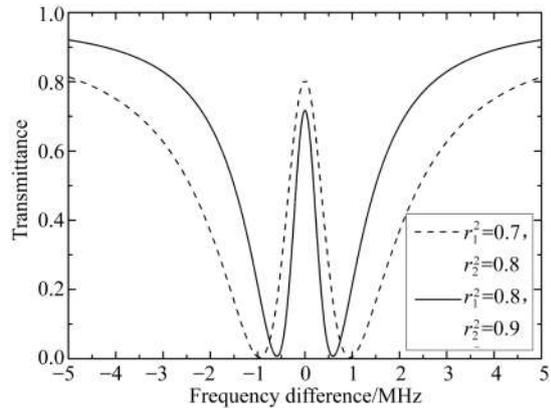


图 3 $r_1 \neq r_2$ 时, 不同振幅透射系数时谐振器自干涉结构的透射谱

Fig. 3 Spectra of self-interference structures with different amplitude transmission coefficients when $r_1 \neq r_2$

当 $r_1 \neq r_2$ 时, 振幅透射系数对单光学谐振器自干涉结构透射谱的影响如图 3 所示, 结构参数为: $L = 12 \text{ m}, \alpha = 0.98, \alpha_v = 1, n_{\text{eff}} = 1.5$ 。此时, 振幅透射系数对结构透射谱的影响与 $r_1 = r_2$ 时相似, 振幅透射系数的增大有利于减小透射峰带宽, 但会降低透射峰的透过率。需要注意的是, $r_1^2 = 0.7, r_2^2 = 0.8$ 时的透射谱与 $r_1^2 = 0.8, r_2^2 = 0.7$ 时的透射谱相同, 因此在图 3 中二者的透射谱是重合的, 无法体现。由此可见, 振幅耦合系数 r_1, r_2 对感应透明影响相同。由以上结果可得, 实际中,

应衡量所需透射峰的带宽和透过率,选择合适的耦合系数,使透射峰的带宽和透过率达到良好的平衡,方能满足需求。

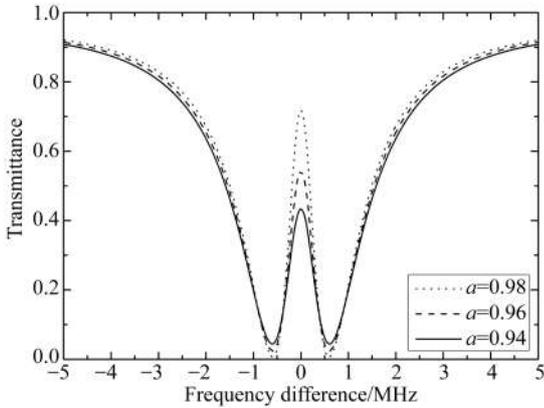


图 4 不同振幅衰减系数时自干涉的透射谱

Fig. 4 Spectra of self-interference structures with different amplitude attenuation factors

图 4 为不同振幅衰减系数时单光学谐振器自干涉结构的透射谱,结构参数为: $L=12\text{ m}$ 、 $\alpha_r=1$ 、 $n_{\text{eff}}=1.5$ 、 $r_1=r_2=0.8$ 。振幅衰减系数主要影响结构透射谱的透过率,随着振幅衰减系数的减小,透射谱中两低透过率模式的透过率增大,而透射峰透过率减小,导致透射峰透过率对比度(透射峰的最大透过率和最小透过率二者之差除以二者之和)下降,感应透明现象减弱。但振幅衰减系数不影响透射峰与两低透过率模式的位置。

综上所述,感应透明现象发生时,光功率不能全部由输出端输出。对于未能通过结构的光功率,一部分在谐振器内损耗掉,另一部分则由输入端反射输出。如果谐振器内损耗与耦合器的振幅透射系数不匹配,会大大降低输出端感应透明现象透射谱的透过率。此时,未能通过结构的光功率大部分由输入端反射输出(如图 2 和图 3 所示,振幅衰减系数相同,但透射谱的透过率却不同)。

3 实验结果及讨论

3.1 实验装置

实验装置如图 5 所示,可调谐激光器输出中心波长为 1550 nm 的偏振光,激光线宽小于 10 kHz 。信号发生器产生频率为 100 Hz 的三角波电压信号,加载到激光器的频率调谐端口,实现激光频率的连续调谐。激光器输出的偏振光先进入隔离器,由于结构存在反射输出,隔离器用于阻隔结构的反射光。激光经由偏振控制器选择偏振态后进入单光学谐振器自干涉结构,结构的输出光由探测器探测,示波器直接采集探测器的输出信号。实验中,单光学谐振器自干涉结构是由普通单模光纤和两个单模光纤耦合器构成的,为了减少连接过程中的损耗及光反射,采用光纤熔接机进行熔接连接。熔接后形成的谐振器长度约为 12 m ,两耦合器的振幅透射系数为 $r_1^2=r_2^2=0.85$ 。

3.2 实验结果

实验获得的单光学谐振器自干涉结构的窄带感应透明现象如图 6 所示。与双光学谐振器结构相比,本文中光的谐振只发生在一个谐振器内,因此可以稳定地获得感应透明现象。环境(如温度)的变化仅会改变透射谱的位置,不会改变透射谱的形状,更不会使感应透明现象消失。

窄带透射峰的峰值透过率为 0.62 ,透过率对比度为 85% ,带宽为 0.54 MHz ,带宽与波导长度的乘积为 $6.48\text{ MHz}\cdot\text{m}$ 。如果需提高透射峰的峰值透过率及透过率对比度,可减小振幅透射系数,但透射峰带宽会相应增大。由于透射峰带宽与波导长度乘积为一常数,可通过增大谐振器长度来压缩透射峰带宽,从而提高透射峰透过率、并减小透射峰带宽,可依据需求调整结构参数。

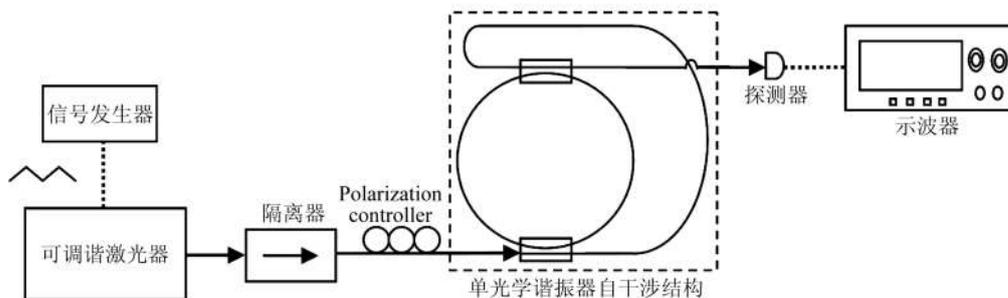


图 5 单光学谐振器感应透明实验装置

Fig. 5 Experimental setup of single optical resonance induced transparency

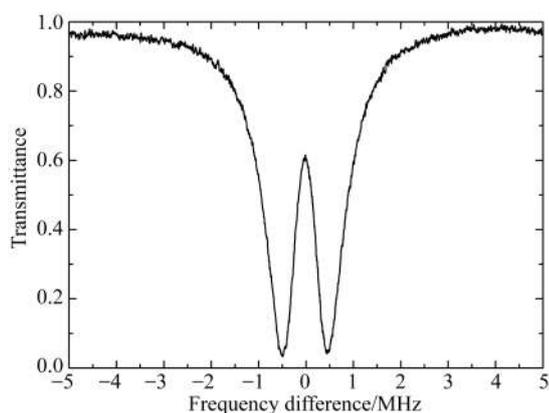


图6 实验中获得的基于单光学谐振器感应透明现象的窄带透射峰

Fig. 6 Transmission peak with narrow bandwidth based on single optical resonator induced-transparency in experiment

4 结 论

本文利用单光学谐振器来实现稳定的感应透明现象,并获得了透过率大、带宽窄的透射峰。与双光学谐振器结构相比,单光学谐振器结构可以获得稳定的感应透明现象,而不受环境(如温度)变化的影响。利用单模光纤制作单光学谐振器自

干涉结构,并构建实验系统,测量了结构的透射谱,获得了窄带透射峰,其峰值透过率为0.62,透过率对比度为85%,带宽为0.54 MHz,透射峰带宽与波导长度的乘积为6.48 MHz·m。由于该结构中感应透明现象容易调控,可采用掺杂光纤构造单光学谐振器自干涉结构,通过调节注入泵浦光的强度来改变谐振器中信号光的损耗,进而调整透射峰峰值透过率及透过率对比度;也可将结构的耦合器改为耦合比可调的耦合器,通过调整振幅耦合系数来达到调控结构输出特性的目的。

对于采用光纤制作的单光学谐振器自干涉结构,谐振器的长度相对较长,在相同耦合系数条件下,其感应透明现象的透射谱带宽更窄。在滤波和光学信息处理方面,窄带宽透射谱滤波后的光的线宽窄(即单色性更好),滤波性能更佳;并可提取特定频率的光,对这部分光所携带的信息(强度、相位等)进行存储或修改。在光学传感方面,当外界温度或压力变化时,会导致感应透明现象透射谱位置的移动,通过检测透射谱移动的频率量,可获得外界温度或压力的变化量,此时,透射谱带宽越窄,传感精度越高。

参考文献:

- [1] HARRIS S E, FIELD J E, KASAPI A. Dispersive properties of electromagnetically induced transparency [J]. *Physical Review A*, 1992, 46 (1): R29-R32.
- [2] NAWOOD A, FARCA G, SHOPOVA S I, *et al.*. Induced transparency and absorption in coupled whispering-gallery microresonators [J]. *Physical Review A*, 2005, 71(4): 043804.
- [3] XU Q F, SANDHU S, POVINELLI M L, *et al.*. Experimental realization of an on-chip all-optical analogue to electromagnetically induced transparency [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(12): 123901.
- [4] ZHANG L, SONG M P, WU T, *et al.*. Embedded ring resonators for microphotonic applications [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(17): 1978-1980.
- [5] ZHANG Y, DARMAWAN S, TOBING L Y M, *et al.*. Coupled resonator-induced transparency in ring-bus-ring Mach-Zehnder interferometer [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(1): 28-36.
- [6] SULTANA P, TAKAMI A, MATSUMOTO T, *et al.*. Delayed optical images through coupled-resonator-induced transparency [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3414-3416.
- [7] MANCINELLI M, BETTOTTI P, FEDELI J M, *et al.*. Reconfigurable optical routers based on coupled resonator induced transparency resonances [J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23856-23864.
- [8] ANG T Y L, NGO N Q. Enhanced coupled-resonator-induced transparency and optical fano resonance via intracavity backscattering [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2012, 29(5): 1094-1103.
- [9] LU Y, XU L J, SHU M L, *et al.*. Proposal to produce coupled resonator-induced transparency and bistability using microresonator enhanced Mach-Zehnder interferometer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(7): 529-531.
- [10] MANCINELLI M, GUIDER R, BETTOTTI P, *et al.*. Coupled-resonator-induced-transparency con-

- cept for wavelength routing applications [J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12227-12240.
- [11] 胡鹏程, 时玮泽, 梅健挺. 高精度铂电阻测温系统 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 988-995.
HU P CH, SHI W Z, MEI J T. High precision Pt-resistance temperature measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 988-995. (in Chinese)
- [12] 李国华, 胡志云, 王晟, 等. 基于相干反斯托克斯拉曼散射的二维温度场扫描测量 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1): 14-19.
LI G H, HU ZH Y, WANG SH, *et al.*. 2D scanning CARS for temperature distribution measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1): 14-19. (in Chinese)
- [13] 崔玉国, 朱耀祥, 楼军强, 等. 压电微夹钳钳指位移与夹持力的检测 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1372-1379.
CUI Y G, ZHU Y X, LOU J Q, *et al.*. Detection of finger displacement and gripping force of piezoelectric micro-gripper [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1372-1379. (in Chinese)
- [14] TIAN H, ZHANG Y D, QI D W, *et al.*. Control of dispersion in fiber coupled resonator-induced transparency structure [J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(6): 064204.
- [15] ZHANG Y D, TIAN H, ZHANG X N, *et al.*. Experimental evidence of enhanced rotation sensing in a slow-light structure [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(5): 691-693.
- [16] TIAN H, ZHANG Y D, ZHANG X N, *et al.*. Rotation sensing based on a side-coupled spaced sequence of resonators [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9185-9191.

作者简介:



田 赫(1983—),男,山东莱芜人,博士,讲师,2005年、2012年于哈尔滨工业大学分别获得学士、博士学位,主要从事激光、光学传感及检测方面的研究。E-mail: tianhe@163.com



掌蕴东(1957—),男,辽宁锦州人,博士,教授,博士生导师,1982年于大连理工大学获得学士学位,1991年、1997年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事激光、光学滤波、非线性光学、光纤传感等方面的研究。E-mail: ydzhang@hit.edu.cn