

基于新型三环谐振器的诱导透明效应分析

焦新泉 陈家斌 王晓丽 薛晨阳 任勇峰

Analysis of induced-transparency in an original three-order resonator system

Jiao Xin-Quan Chen Jia-Bin Wang Xiao-Li Xue Chen-Yang Ren Yong-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 144202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.144202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

面向谐振式微光学陀螺应用的球形谐振腔 DQ 乘积优化

Optimization of microsphere's DQ production based on resonant micro optical gyro

物理学报.2015, 64(15): 154206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154206>

温度测量范围加倍的单微环传感器

Doubled temperature measurement range for a single micro-ring sensor

物理学报.2014, 63(15): 154209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154209>

输出能量 4mJ 的 1kHz 飞秒掺钛蓝宝石激光再生放大研究

A 4 mJ femtosecond Ti:sapphire regenerative amplifier at 1 kHz repetition rate

物理学报.2014, 63(10): 104211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104211>

基于频率选择表面的双层改进型互补结构太赫兹带通滤波器研究

Terahertz bandpass filter using double-layer reformative complementary frequency selective surface structures

物理学报.2014, 63(10): 104209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104209>

一种带有 U 形波导的交叉信道单微环电光开关

A cross bus single microring electro-optical switch with U bend waveguide

物理学报.2014, 63(9): 094207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094207>

基于新型三环谐振器的诱导透明效应分析*

焦新泉^{1)2)†} 陈家斌¹⁾ 王晓丽²⁾³⁾ 薛晨阳²⁾³⁾ 任勇峰²⁾³⁾

1) (北京理工大学自动化学院, 北京 100081)

2) (电子测试技术重点实验室, 太原 030051)

3) (中北大学, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

(2014年12月6日收到; 2015年1月19日收到修改稿)

针对谐振式微腔的应用需求, 提出了一种新型三环谐振式微腔结构, 类似于原子系统中的电磁诱导透明, 耦合诱导透明 (CRIT) 效应在一个新的光学微腔系统中已被实验证明. 该结构在硅基上由三个尺寸完全一样的微环腔组成, 通过理论分析、制备和实验测试, 能够观察到 CRIT 现象, 其频谱具有低群速的狭窄透明峰, 与光栅耦合器的耦合效率为 34%, 并且谐振器的品质因数达到了 0.65×10^5 , 同时, 失谐的谐振波长可以通过温度变化来控制, 这在旋转传感、光滤波器、光存储器等方面的应用有重要意义.

关键词: 耦合诱导透明, 三环谐振器, 耦合效率, 品质因数

PACS: 42.60.Da, 42.82.Et, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.64.144202

1 引言

最近的研究表明, 类似于原子系统中的电磁诱导透明 (EIT) 现象也能在回音壁模式的谐振器中出现, 通常被称作耦合诱导透明 (CRIT) [1]. 相比于原子系统中的 EIT, CRIT 是基于结构散射. 因此, CRIT 系统有很多的优点: 有效频率不受固有原子跃迁的限制, 设计空间有很大的灵活性, 并且不受多普勒效应束缚 [2]. 在耦合谐振器中 [3-5], 通过不同微腔之间的相消干涉作用可以改变整个谐振器的特性, 并产生 CRIT 效应 [6], 其特性及潜力使该类微腔在集成光学和光学先驱应用上极具吸引力, 例如光学感测、激光反馈腔、光学过滤器等 [7-9].

已有一些文献中提出谐振器的 CRIT 效应与耦合插入损耗、环周长差以及环的倍数有很大的关系 [10]. 实际上, CRIT 主要通过控制光学谐振器来降低光学回路间的共振干涉, 因此, 必须对级联谐振器之间的周长差进行精确的控制 [11]. 在结构设

计和工艺制备过程中, 精确控制谐振器的周长差需要复杂的计算和很高的工艺要求. 迄今为止, 基于 CRIT 的双环谐振器报道比较普遍, 多环结构基本处于理论研究阶段, 对特定三环结构的设计、制备及测试尚未见报道. 针对上述问题, 本文提出了一种新型三环级联谐振器结构, 三环具有完全相同的尺寸, 相比于其他级联结构不需要精确计算各个微腔之间的周长差, 能够极大程度地降低设计和制备的难度, 同时, 该结构能够在获得高品质因数的基础上延迟光的传输时间. 基于这种新型三环级联结构, 对优化设计微环谐振器的结构、改善谐振器的耦合谐振诱导效应以及缩短制备周期等均有非常重要的意义.

2 理论分析

图 1 所示为三个几何尺寸完全相同的三阶耦合谐振器, 共振波长分别由 λ_1 , λ_2 和 λ_3 ($\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3$) 表示; g_n 是微环谐振器之间的间隙, g 是总线波

* 国家自然科学基金 (批准号: 91123036, 61178058, 61275166, 61076111) 和国家杰出青年科学基金 (批准号: 51225504) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: superjq@163.com

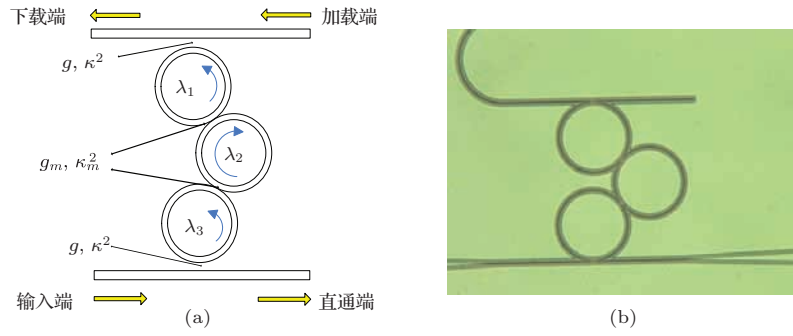


图1 (a) 三阶耦合谐振器原理图; (b) 三环谐振器电子扫描图

Fig. 1. (a) Schematic drawing of a third-order coupled micro-ring resonator; (b) scanning-electron micrographs of three-ring resonator.

导和微环谐振器之间的间隙; k^2 是总线波导和微环谐振器之间的功率耦合系数, k_n^2 是微环谐振器之间的相互耦合功率系数; 在各微环谐振器之间的往返传播功率损耗系数为 k_p^2 .

随着耦合模式理论的发展, 三阶微环滤波器在波长域的上升下降响应参数可以用以下矩阵方程式给出:

$$\begin{bmatrix} -j\frac{\lambda - \lambda_1}{FSR} + \frac{(k^2 + k_p^2)}{4\pi} & j\frac{k_n}{2\pi} & 0 \\ j\frac{k_m}{2\pi} & -j\frac{\lambda - \lambda_2}{FSR} + \frac{k_p^2}{4\pi} & j\frac{k_n}{2\pi} \\ 0 & j\frac{k_n}{2\pi} & -j\frac{\lambda - \lambda_3}{FSR} + \frac{(k^2 + k_p^2)}{4\pi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k^2}{2\pi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, s_1, s_2 和 s_3 代表耦合谐振系统中的归一化复波场, 复振幅传输通过端口分别由 $T_{\text{through}} = 1 - s_1$ 和 $T_{\text{drop}} = -s_3$ 表示, 相应的传输功率由 $|T_{\text{through}}|^2$ 和 $|T_{\text{drop}}|^2$ 表示, FSR 是自由谱宽.

D 来表示, D 为谐振频率的相位 $\varphi(\omega)$ 的二阶导数, 归一化延时 τ_n 是相位的负导数, T 是 FSR 的倒数:

$$\tau_n = -\frac{d}{d\omega}\varphi(\omega), \quad (2)$$

$$D = -c\frac{T}{\lambda^2}\frac{d}{d\omega}\tau_g(\omega). \quad (3)$$

对于通信方面的应用, 微环时间特性和频率响应对应于时变信号是非常关键的, 谐振器的延迟主要取决于谐振频率点. 该延迟可以用结构或二次散射

如图 2(b) 所示, 两个光路之间的相消干扰从而产生一个下降峰, 该峰即为 CRIT 效应 [12].

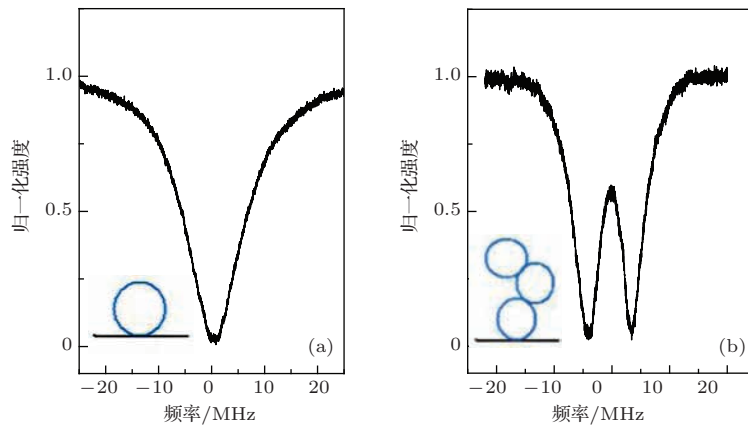


图2 (a) 通过单环谐振器的透射光谱; (b) 通过三环谐振器的透射光谱

Fig. 2. Transmission spectra as a function of the detuning frequency from resonance (a) through a single-ring resonators and (b) through a three- ring resonators.

3 制备和实验

当波导宽度小于 600 nm 时, 波导传输属于单模模式, 该模式能有效减小传输损耗. 而随着硅基光波导宽度的增加, 有效折射率随之增大, 同时, 光场倏逝波的强度和波导宽度成反比关系 [13]. 此外, 弯曲波导的有效折射率与波导宽度成正比, 并且有效折射率和弯曲半径的大小有密切关系. 利用光束传输法得到有效折射率与弯曲半径的关系曲线, 如图 3 所示. 综合理论和工艺, 我们选择波导宽度为 500 nm, 环形腔半径为 20 μm 来提高直波导与环腔的近场耦合, 并且能够有效降低环腔的弯曲损耗.

我们选用绝缘体上硅 (SOI) 材料进行器件制备, 顶部有 220 nm 厚的硅层和 1 μm 厚的掩埋氧化层. 光波导谐振器分两步制备: 首先, 均匀涂覆正性电子束抗蚀剂聚甲基丙烯酸甲酯, 并采用 100 kV 电子束光刻技术进行相关区域的曝光, 得到干法刻蚀的掩膜板; 其次, 利用感应耦合等离子体刻蚀技术完成光波导谐振器结构 [14].

图 4 为视频显微镜下光波导谐振器的结构图, 它由一个直径均为 20 μm 的三环谐振器和一对与之平行耦合的波导构成. 波导和环腔的宽度分别

为 500 nm 和 600 nm, 直波导和环腔之间的距离为 129 nm.

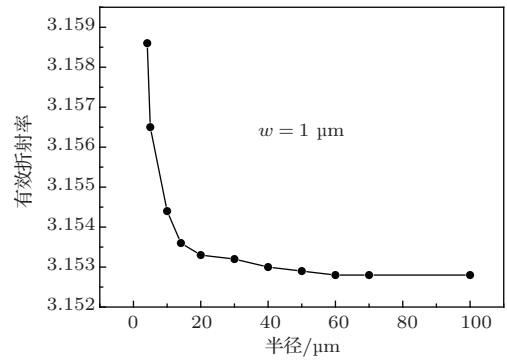


图 3 有效折射率与弯曲半径的变化关系

Fig. 3. The effective refractive index and bending radius vary diagram.

微腔测试系统如图 5 所示, 利用 NewFocus 可调谐激光器作为输入的激光光源, 与掺铒光纤放大器 (EDFA) 相连, 单模透镜光纤输入端在与波导耦合之前需要连接一个偏振控制器, 用来研究激光不同偏振态对光栅耦合效率的影响. 光输出到光栅耦合器, 能够与波导衍射光栅组成一个垂直耦合系统, 然后经过直波导传输到另一个相同光栅耦合器, 并将光波回收到输出端单模透镜光纤中 [15].

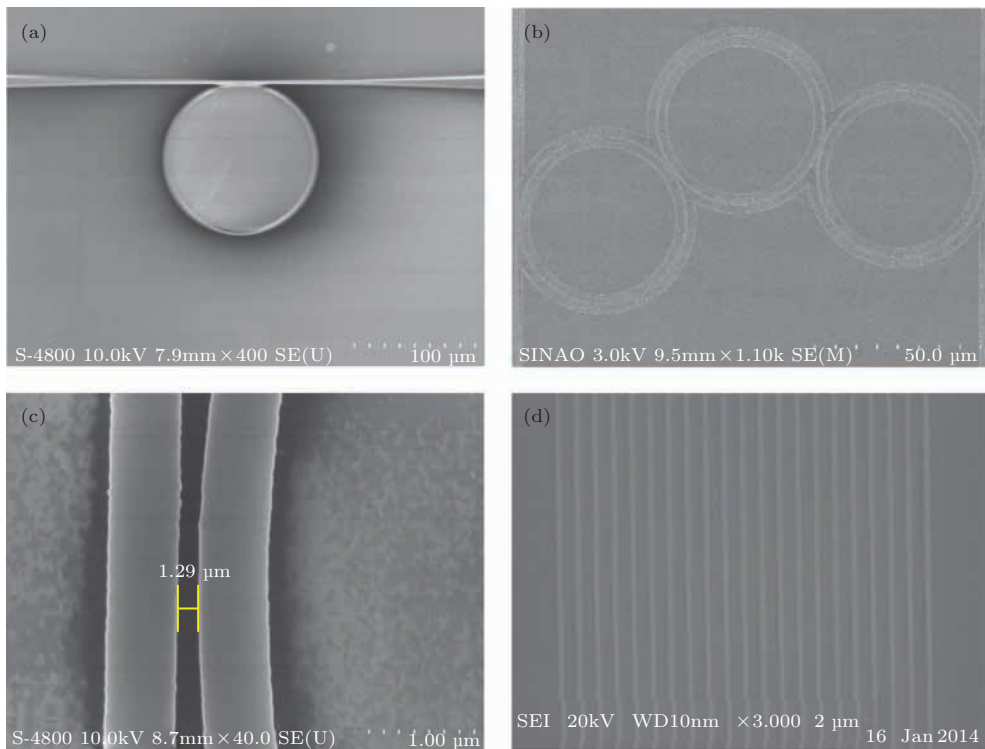


图 4 (a) 单环谐振器电子扫描图; (b) 三环谐振器电子扫描图; (c) 波导和环谐振器之间的间隙; (d) 光栅

Fig. 4. (a) Scanning-electron micrographs of a single-ring resonators and (b) a three-ring resonators, (c) gap between bus waveguide and ring resonator, and (d) grating.

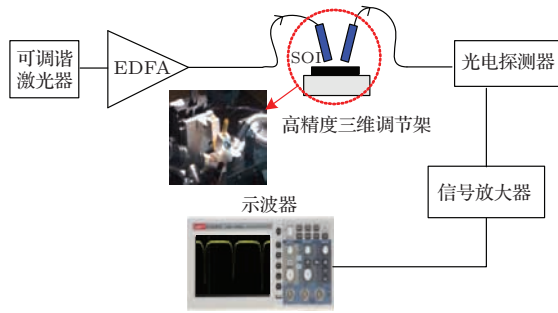


图5 微腔测试平台示意图

Fig. 5. Schematic of the micro-cavity measurement platform.

在测试过程中,使用高精度三维调节架将输入和输出的单模光纤固定,样品同样被固定在一个三维调节架上,同时,使用红外 CCD 和长焦距视频显微镜对光路进行实时观测,简化了单模光纤与光栅

的对准过程^[16].通过反复测试,如图6所示,得到波长为1550 nm 处光栅耦合器的效率为30%,通过对光栅表面均匀旋涂一层500 nm 厚的增透膜,耦合效率提高了34%.

用该平台分别对单环和三阶级联环形谐振器进行了测试^[17],三环谐振器的谐振峰分裂为两个,验证了 CRIT 效应,两种结构的下载端 TE 模式透射谱线对比如图7所示,红色谱线表示单环结构,黑色谱线表示三环级联结构.从图7中可以看出,三环谐振腔结构由于每个环形腔之间发生相互干涉作用,产生了两个谐振峰,通过测量和计算得到其中一个谐振峰的半高全宽为0.0244 nm,对应品质因数 Q 高达 0.65×10^5 ,比单环结构高了4倍,并且直通端与下载端谐振谱线一致性更好,这对硅传感器应用领域有重要意义.

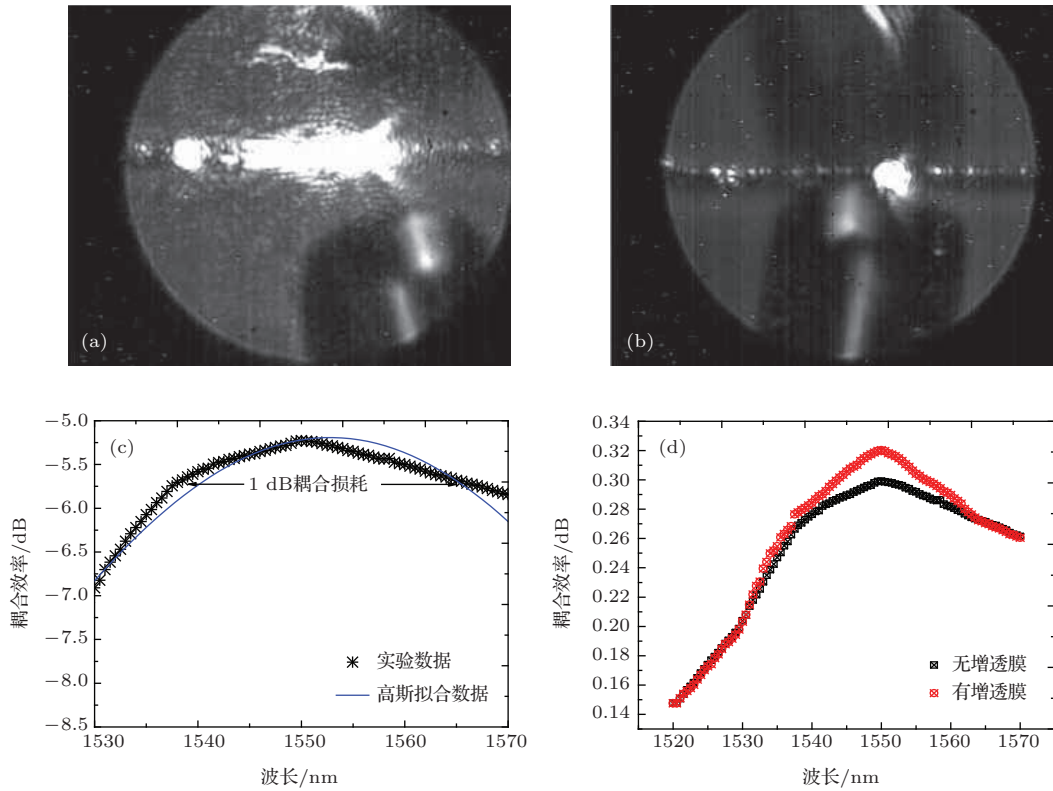


图6 (网刊彩色) (a) 垂直纳米光栅耦合输入效果图; (b) 输出效果图; (c) 测试结果曲线; (d) 耦合效率的测试结果比较

Fig. 6. (color online) (a) Vertical nano-grating coupled input renderings; (b) output renderings; (c) testing result curve; (d) comparing the test results of coupling efficiency.

由于谐振器会产生光功率损耗,损耗的一部分功率会转化为热能,使谐振器的温度升高,从而影响波导介质的折射率^[18].这种变化会引起谐振频率的漂移,进而使得器件的性能发生改变.为了得到级联环形谐振器对温度的敏感程度,对三环级联结构的谐振器进行了温度调谐实验.测试结果如

图8所示,图中不同颜色的曲线代表不同温度下的谐振谱线.从图8中可以看出,随着温度的升高,这种结构的谐振峰向着大波长的方向移动,即发生红移现象.经过计算分析得到三环级联谐振器随温度的变化关系为 $0.16 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,因此通过改变温度,可以控制失谐的谐振波长.

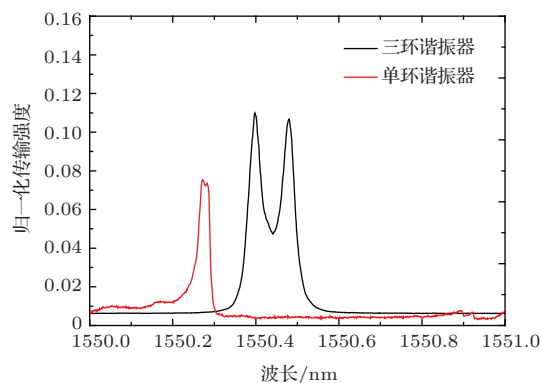
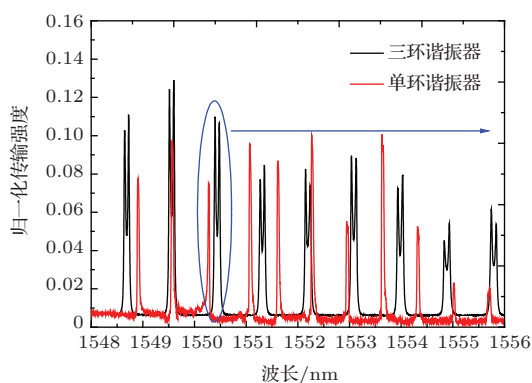


图7 (网刊彩色) 单环和三环谐振器的下载端透射光谱
Fig. 7. (color online) Drop transmission spectra of single-ring and three-ring resonators.

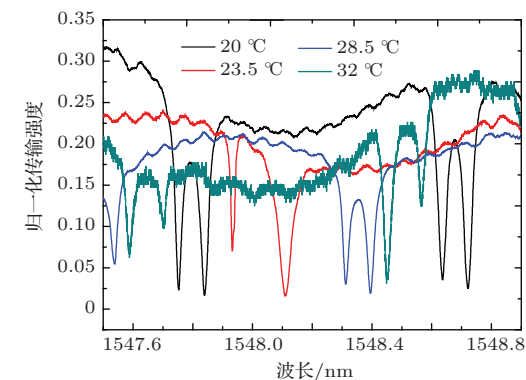


图8 (网刊彩色) 三环级联谐振器温度调谐谱线
Fig. 8. (color online) Three-ring cascade resonator temperature detuned spectrum.

4 结 论

本文对新型的三环谐振器进行了理论分析, 描述了制备过程, 最后对制备样片进行了测试和分

析, 得到了耦合效率和品质因数, 很好地验证了CRIT, 同时测试了谐振器对温度的敏感性. 相对于以往报道, 该三环谐振器比单环和双环有更高的品质因数, 比四环谐振器有更小的延时. 同时, 该结构在保证耦合效率和品质因数的基础上, 能有效降低设计和制备的难度, 具有很强的可行性.

参考文献

- [1] Smith D D, Chang H, Fuller K A, Rosenberger A, Boyd R W 2004 *Phys. Rev. A* **69** 063804
- [2] Oishi T, Suzuki R, Sultana P, Tomita M 2012 *Opt. Lett.* **37** 2964
- [3] Xu Q, Sandhu S, Povinelli M L, Shakya J, Fan S, Lipson M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 123901
- [4] Xu Q, Shakya J, Lipson M 2006 *Opt. Express* **14** 6463
- [5] Totsuka K, Kobayashi N, Tomita M 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 213904
- [6] Naweed A, Farca G, Shopova S, Rosenberger A 2005 *Phys. Rev. A* **71** 043804
- [7] Ren G H, Chen S W, Cao T T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 034215 (in Chinese) [任光辉, 陈少武, 曹彤彤 2012 物理学报 **61** 034215]
- [8] Cao T T, Zhang L B, Fei Y H, Cao Y M, Lei X, Chen S W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 194210 (in Chinese) [曹彤彤, 张利斌, 费永浩, 曹严梅, 雷勋, 陈少武 2013 物理学报 **62** 194210]
- [9] Xiong K, Xiao X, Hu Y T, Li Z Y, Chu T, Yu Y D, Yu J Z 2012 *Chin. Phys. B* **21** 074203
- [10] Wang N, Zhang Y D, Yuan P 2011 *Chin. Phys. B* **20** 044203
- [11] Zhang Y, Wang N, Tian H, Wang H, Qiu W, Wang J, Yuan P 2008 *Phys. Lett. A* **372** 5848
- [12] Totsuka K, Tomita M 2007 *Opt. Lett.* **32** 3197
- [13] Lee H, Chen T, Li J, Painter O, Vahala K J 2012 *Nat. Commun.* **3** 867
- [14] Tang Y H, Lin Y H, Chen P L, Shiao M H, Hsiao C N 2014 *Micro. Nano Lett.* **9** 395
- [15] Xiao S, Khan M H, Shen H, Qi M 2007 *Opt. Express* **15** 10553
- [16] Vlasov Y, McNab S 2004 *Opt. Express* **12** 1622
- [17] Maleki L, Matsko A, Savchenkov A, Ilchenko V 2004 *Opt. Lett.* **29** 626
- [18] Li X, Wang L N, Guo S L, Li Z Q, Yang M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 154209 (in Chinese) [李欣, 王禄娜, 郭士亮, 李志全, 杨明 2014 物理学报 **63** 154209]

Analysis of induced-transparency in an original three-order resonator system*

Jiao Xin-Quan^{1)2)†} Chen Jia-Bin¹⁾ Wang Xiao-Li²⁾³⁾
 Xue Chen-Yang²⁾³⁾ Ren Yong-Feng²⁾³⁾

1) (*Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

2) (*Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, Taiyuan 030051, China*)

3) (*Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

(Received 6 December 2014; revised manuscript received 19 January 2015)

Abstract

For the application requirements of resonant micro-cavity, an original three-ring resonant micro-cavity structure is proposed in this paper. Like electromagnetically induced transparency in an atomic system, the coupled resonator-induced transparency (CRIT) phenomenon in a new optical micro-cavity system is proven experimentally. Up to now, most of the resonators based on CRIT are just in the theoretical exploration stage, and the analysis of the double-ring structure has been relatively common. The CRIT effect of a resonator has a significant relationship with the coupler insertion loss, the ring circumference, and the multiples of the rings, which need high requirements in the structural design and preparation process. In order to reduce the difficulty in design and preparation, we propose a new three-ring cascade resonator structure with the same cavity size on silicon. According to the transfer matrix method and coupled mode theory, we find a CRIT effect after theoretical analysis. Our devices are fabricated on an SOI wafer. By using the micro-cavity measurement platform to repeat and analyze the tests of single ring and three-ring cascade resonator structure, we obtain a grating coupler efficiency of 30%. By applying the antireflection coating, the coupling efficiency of the grating coupler is up to 34%. During the test, the mutual interference between annular cavities of the three-ring resonators produces two transmission peaks, the output spectrum of the resonator with a narrow transparency peak at a low group velocity, which is verified in CRIT phenomenon. Compared with the traditional single-ring structure, the resonator has a quality factor increasing four times, reaching a value of up to 0.65×10^5 , the through and drop transmission spectra of the resonator are reconciled well with each other. At the same time, in order to obtain the sensitivity of the resonator to temperature, we conduct tuning tests of the resonator temperature characteristics, the resonant peak is moved to the large wavelength direction with temperature increasing, and detuning wavelength of the resonance can be controlled by changing temperature, which is called red-shift. Therefore, the original three-ring cascaded resonators have significant applications in the rotation sensing, optical filters, optical storage and temperature sensing elements.

Keywords: coupled resonator-induced transparency, three-ring resonator, coupling efficiency, quality factor

PACS: 42.60.Da, 42.82.Et, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.64.144202

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91123036, 61178058, 61275166, 61076111) and the National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 51225504).

† Corresponding author. E-mail: superjxq@163.com