



基于串联哑铃型微环谐振腔的二维相干光码分多址编解码器

吉喆 严英占 贾大功

Two-dimensional coherent optical en/decoder based on serially coupled dumbbell microring resonator

Ji Zhe Yan Ying-Zhan Jia Da-Gong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 014206 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20200057

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20200057>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于串联哑铃型微环谐振腔的二维相干光码分多址编解码器*

吉喆¹⁾ 严英占^{2)†} 贾大功³⁾

1) (石家庄铁道大学机械工程学院, 石家庄 050043)

2) (中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081)

3) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息科学与技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(2021 年 6 月 4 日收到; 2021 年 11 月 3 日收到修改稿)

利用微环谐振腔阵列进行光码分多址编解码过程中, 微环谐振腔反射谱的自由频谱宽度 (FSR) 范围制约该系统用户容量的提升. 本文提出了一种新型的基于游标效应的串联哑铃型微环谐振腔光编解码器. 利用 Matlab 建立了半径分别为 $40\ \mu\text{m}$ - $30\ \mu\text{m}$ - $40\ \mu\text{m}$ 的哑铃型微环谐振腔光编解码器模型. 详细分析了光反射谱伪模抑制与耦合系数的关系, 研究了耦合系数、码片速率对串联哑铃型微环谐振腔光编解码器性能的影响. 结果表明, 与半径分别为 $40\ \mu\text{m}$ - $40\ \mu\text{m}$ - $40\ \mu\text{m}$ 的传统串联微环谐振腔编解码器相比, 哑铃型微腔编解码器 FSR 值扩大了 4 倍. 理想情况下, 用户容量可呈指数增长. 同时, 互相关峰值比 (P/W) 与自相关峰值旁瓣比 (P/C) 分别提高了约 33% 和 8%.

关键词: 微环谐振腔光编解码器, 用户容量, 自相关峰值旁瓣比, 互相关峰值比

PACS: 42.79.Sz, 42.82.-m, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.71.20200057

1 引言

光码分多址 (OCDMA) 技术具有接入方式简单、系统容量大、访问延迟低、完全异步传输、高服务质量控制以及信息安全性高等优点, 是未来带宽接入和全光通信网络的最具前景方案之一^[1-3]. 光编解码器作为 OCDMA 系统的核心器件, 其参数选择、结构性能决定了系统的用户容量、功率损耗、误码率以及系统的灵活性等特性^[4]. 当前, 光编解码器结构主要有光纤延迟线 (FDL)^[5,6]、阵列波导光栅 (AWG)^[7]、光纤布喇格光栅 (FBG)^[8] 和微环谐振腔^[9-14] 等. FDL 编解码器编码原理简单, 但可编址能力弱; AWG 编解码器制备工艺复杂, 插入损耗大, 难以满足现代光通信的要求; FBG 对

温度和应力的变化非常敏感^[15], 故其编解码精度不易控制. 微环谐振腔编解码器具有高集成度、低损耗、可编程、易调谐和相位控制精确等特点^[16], 成为编解码器的可行方案之一. 但是在利用微环谐振腔编解码过程中, 由于编解码方案以及微环结构设计的原因, 存在潜在用户数量较少的问题^[17], 且其系统的用户容量直接由微环谐振腔列数决定^[9]. 假设 OCDMA 系统中的编解码由 M 行 \times N 列微环谐振腔阵列组成, 那么系统可容纳的用户容量 A 可以表示为 $A = (N! \times 2^{(N-1)})/2$. 显然, 微腔列数决定系统用户容量^[18]. 因此, 在微腔可调谐的自由频谱宽度 (FSR) 内增加微腔列数可以扩展用户容量. 然而, 微腔列数的增加会加剧微环反射谱的串扰, 降低编解码器性能. 因此, 扩大微环 FSR 范围是增加微腔列数, 扩容用户容量的基础. 目前,

* 国家自然科学基金 (批准号: 2019B1-0171) 和河北省教育厅青年基金 (批准号: QN2016182) 资助课题.

† 通信作者. E-mail: yyz712@126.com

国际上以 Anjali 等^[18,19]、Wang 和 Gao^[20,21] 为代表的科研小组, 从理论和结构方面论证了微环谐振腔编解码器的可行性. Anjali 等^[18,19] 在 2005 年率先提出利用级联四微环谐振腔作为编解码器进行一维编码, 并实现了 4 用户传输速率为 2.5 Gb/s 的数据传输¹. Wang 和 Gao^[20,21] 在后续的研究中, 利用并联双微环谐振腔反射器实现了二维相干编码, 仿真实现了 P/W 值和 P/C 值分别约为 4.8 和 6.0 的光编解码系统. 以上前人利用微环谐振腔作为编解码进行研究, 主要在结构更紧凑, 提高 P/W 值和 P/C 值方面进行结构设计, 但均未对如何扩展用户容量进行结构研究. 结合前人工作, 本文以扩展微环谐振腔阵列的 FSR 为基础, 提出了一种基于游标效应 (Vernier 效应)^[22] 的串联哑铃型微环谐振腔编解码结构. 与传统的仅仅利用减小微环半径提高 FSR 值的微环结构相比, 该结构可以获得 5—10 倍的 FSR 展宽^[23–24], 并且不会增加因弯曲半径较小带来的弯曲损耗. 此外, 展宽后的 FSR 值可包容更多微环谐振腔列数, 从而使得用户容量呈指数增长.

文中首先建立了串联哑铃型微环阵列的光传输模型, 通过耦合模理论详细地分析了哑铃型微环反射谱单一反射峰条件以及伪模抑制特性. 在此基础上, 详细研究了编解码器耦合系数、码片速率对编解码器性能的影响. 最后, 对串联哑铃型微腔阵列进行编解码仿真, 获得其编解码性能参数. 和现有的微环谐振腔的编解码器相比, 本文设计的串联哑铃型微环谐振腔编解码器提高了编解码性能, 并且极大地扩展了用户容量.

2 哑铃型微环谐振腔结构理论分析

2.1 哑铃型微环谐振腔结构

哑铃型微谐振腔结构由三个微环串联而成, 分别是半径相等, 数值较大的两个微环 (其半径为 R) 和一个半径较小的微环 (其半径为 r), 如图 1 所示. 箭头代表光的传输方向, E_{in} , E_{through} 代表输入

端, 传输端的光场复振幅; E_{add} 和 E_{out} 代表上/下载端的光场复振幅. 假设忽略额外损耗, 大环与上/下波导间的传输系数相等, 均为 t_{rb} ; 则大环与上/下波导间的耦合系数均为 k_{rb} ; 类似的, 大环与小环耦合区域的传输系数相等, 均为 t_{rr} , 对应的耦合系数均为 k_{rr} , 并且满足 $k_{\text{rb}}^2 + t_{\text{rb}}^2 = 1$, $k_{\text{rr}}^2 + t_{\text{rr}}^2 = 1$. 设微环和直波导间的传输矩阵为 \mathbf{Q}_i , 根据耦合模理论, 可以得到

$$\mathbf{Q}_i = \frac{1}{-ik_i} \begin{bmatrix} -t_i & 1 \\ -1 & t_i \end{bmatrix} \quad (i = \text{rb}, \text{rr})$$

同理, 令环与环间的传输矩阵为 \mathbf{P}_m , 那么

$$\mathbf{P}_m = \begin{bmatrix} 0 & \exp(-i\phi_m) \\ \exp(i\phi_m) & 0 \end{bmatrix}$$

($m = 1, 2, 3$, 分别代表自左而右的三个微环)^[25]. 这里, $\phi_m = \pi R'_m(\beta - i\alpha)_m$, 表示光绕微环传输半周产生的光程差; R' 为微环的半径, β 为微环传输常数. 根据传输矩阵 \mathbf{Q}_i , \mathbf{P}_m 可以得到 E_{add} , E_{out} 与 E_{in} , E_{through} 间的传输方程:

$$\begin{pmatrix} E_{\text{add}} \\ E_{\text{out}} \end{pmatrix} = \mathbf{Q}_{\text{rb}} \mathbf{P}_1 \mathbf{Q}_{\text{rr}} \mathbf{P}_2 \mathbf{Q}_{\text{rr}} \mathbf{P}_3 \mathbf{Q}_{\text{rb}} \begin{pmatrix} E_{\text{in}} \\ E_{\text{through}} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} E_{\text{in}} \\ E_{\text{through}} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

对方程 (1) 进行矩阵变换, 即可得到 E_{in} , E_{out} 与 E_{add} , E_{through} 的传输矩阵方程:

$$\begin{pmatrix} E_{\text{in}} \\ E_{\text{out}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{A_{12}}{A_{11}} & \frac{1}{A_{11}} \\ A_{22} - \frac{A_{12}A_{21}}{A_{11}} & \frac{A_{21}}{A_{11}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\text{through}} \\ E_{\text{add}} \end{pmatrix} = [\mathbf{T}_1] \begin{pmatrix} E_{\text{through}} \\ E_{\text{add}} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中 $[\mathbf{T}]$ 即为哑铃型微腔结构输入端/下载端的传输矩阵.

根据传输方程 (1) 和方程 (2), 输入端至下载端的光强传递函数 D 可以得到:

$$D = \left| \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} \right|^2 = \left| \frac{A_{12}A_{21} - A_{11}A_{22}}{A_{22}} \right|^2 = \left| \frac{k_{\text{rr}}^2 k_{\text{rb}}^2 (\tau_1 \tau_2 \tau_3)^{\frac{1}{2}} \exp(i(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3))}{1 - t_{\text{rr}}^2 \tau_2 \exp^{2i\phi_2} + t_{\text{rr}} t_{\text{rb}} (\tau_2 \exp^{2i\phi_2} - 1) (\tau_1 \exp^{2i\phi_1} + \tau_3 \exp^{2i\phi_3}) + t_{\text{rb}}^2 \tau_1 \tau_3 \exp^{2i(\phi_1 + \phi_3)}} \right|^2. \quad (3)$$

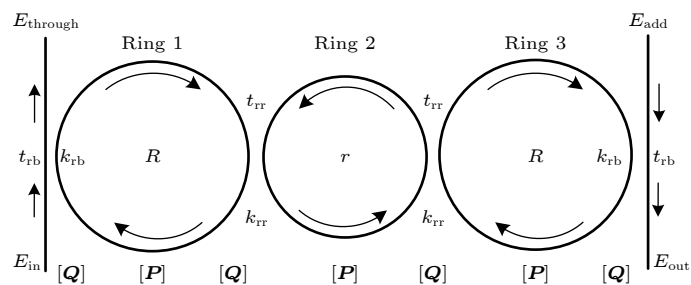
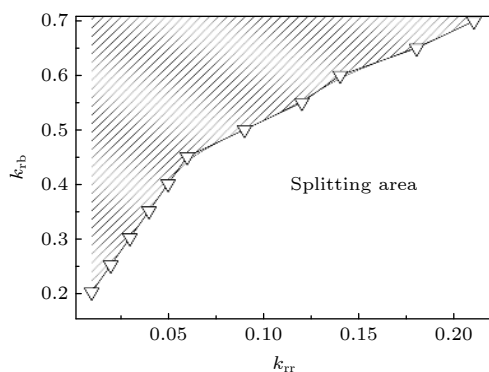


图 1 哑铃型微环谐振腔结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of serially coupled dumbbell microring resonator.

2.2 反射谱伪模抑制分析

利用哑铃型微环下载端反射峰进行波长编码时,需要反射谱具有良好的箱型滤波特性,且具有单一反射峰,即不存在分裂峰^[13].针对半径分别为 $40\text{ }\mu\text{m}$ - $30\text{ }\mu\text{m}$ - $40\text{ }\mu\text{m}$ 串联哑铃型微环,利用方程(1)得到当反射谱不存在分裂峰时,耦合系数 k_{rb} 与 k_{rr} 的对应变化曲线,如图 2 所示.当 k_{rb} 与 k_{rr} 的取值在斜线区域内(即阴影部分区域),反射谱不存在分裂峰,满足编码的基本条件.相反的,当 k_{rb} 与 k_{rr} 的取值在空白区域时,反射谱会出现分裂峰,此时不符合编码条件.

图 2 反射谱无分裂峰时 k_{rb} 和 k_{rr} 的关系Fig. 2. Dependence of k_{rb} and k_{rr} in achieving single peak reflection.

由于哑铃型微腔反射谱存在游标效应,某些波长的光不能同时在串联的三个微环环中谐振^[26].也就是在中心频率处有透射峰外,在中心频率 \pm 也就是处出现伪模.伪模严重影响哑铃型微腔的反射谱特性,导致编解码错误,因此需要进行伪模抑制.一般情况下,在哑铃型微腔的半径已知的前提下,耦合系数主要决定伪模的抑制程度.文中哑铃型三微环的半径分别为 $40\text{ }\mu\text{m}$ - $30\text{ }\mu\text{m}$ - $40\text{ }\mu\text{m}$,在满足主反射峰不发生分裂的前提下,哑铃型微腔反

射谱的 FSR 与反射谱特性如图 3 所示. FSR 值为 13 nm ,如图 3(a) 所示.在一个 FSR 范围内,存在 7 个伪模(图中圆圈标出),且以中心伪模对称分布,如图 3(b) 所示.讨论波长较小(标号 1—4)的 4 个伪模特性与耦合系数的关系.

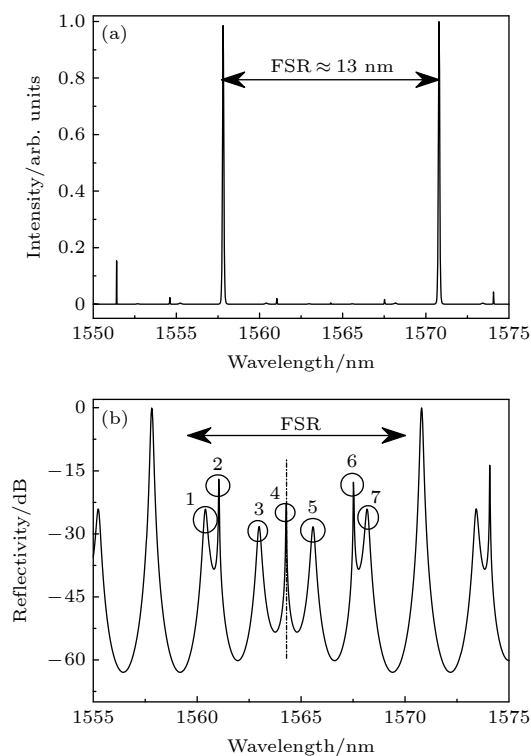


图 3 哑铃型微腔反射谱特性 (a) FSR; (b) 伪模分布

Fig. 3. Intensity of reflection spectrum of dumbbell microring resonator: (a) FSR; (b) distribution of spurious modes within the FSR.

图 4 分别讨论了标号 1—4 伪模的峰值透射率与 k_{rb} 的变化规律.图 4(a) 描述了当耦合系数 k_{rr} 为 0.02 和 0.03 时,伪模 1 和 3 峰值透射率与耦合系数 k_{rb} 的变化关系.伴随 k_{rb} 的增大,伪模 1 和 3 的峰值透射率均降低.同时,相同的 k_{rb} ,耦合系数 k_{rr} 越小,伪模抑制程度越好.也就是说,对于伪

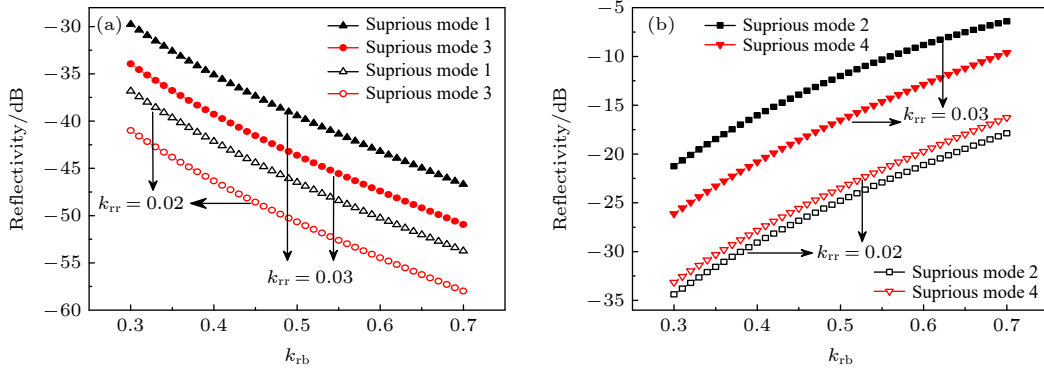


图 4 哑铃型微腔伪模的峰值透射率变化与 k_{tb} 的关系 (a) 伪模 1 和 3 随耦合系数的变化曲线; (b) 伪模 2 和 4 随耦合系数的变化曲线

Fig. 4. Peak reflection of different spurious modes versus k_{tb} : (a) Reflectivity of spurious mode 1 and 3 versus k_{tr} and k_{tb} , respectively; (b) reflectivity of spurious mode 2 and 4 versus k_{tr} and k_{tb} , respectively.

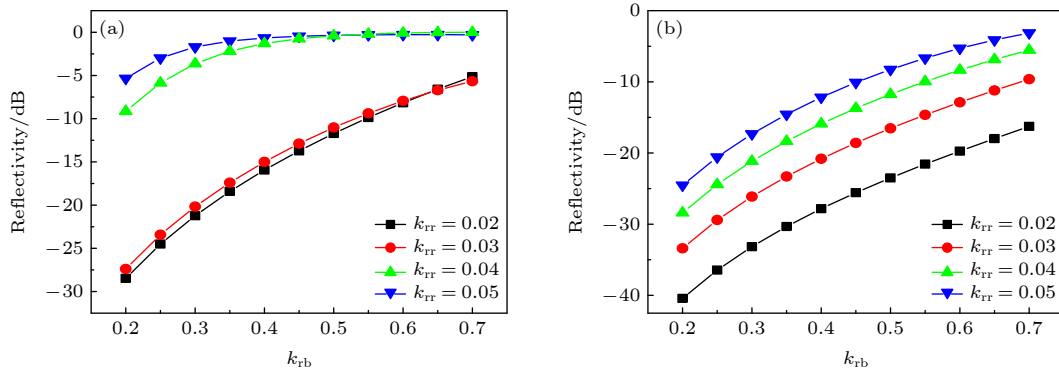


图 5 耦合系数 k_{tb} 与伪模 2、4 反射率的关系 (a) 伪模 2; (b) 伪模 4

Fig. 5. Relationship between coupling coefficients k_{tb} and reflectivity of spurious mode 2 and 4: (a) Spurious mode 2; (b) spurious mode 4.

模 1 和 3 而言, 较大的耦合系数 k_{tb} 与较小的耦合系数 k_{tr} 会使伪模 1 和 3 得到良好的抑制. 图 4(b) 描述了当耦合系数 k_{tr} 为 0.02 和 0.03 时, 伪模 2 和 4 峰值透射率与耦合系数 k_{tb} 的变化关系. 与图 4(a) 变化趋势相反, 对于相同的 k_{tr} , 伴随 k_{tb} 的增加, 伪模伪模 2 和 4 的峰值透射率增加. 如 $k_{tr} = 0.02$ 时, 当 k_{tb} 变化区间在 0.3—0.7 时, 伪模 2 和 4 的峰值透射率分别增长约 15 dB 和 17 dB. 此外, 伪模 (1, 3) 的透射率明显小于伪模 (2, 4) 的峰值透射率. 也就是说, 需要主要考虑耦合系数对伪模 (2, 4) 的抑制. 综合考虑伪模 1—4 的峰值透射率, 伪模 (1, 3) 和伪模 (2, 4) 的峰值透射率与耦合系数 k_{tr} 的变化趋势相同, 即较小的 k_{tr} 有利于伪模抑制. 本文取 k_{tr} 在 0.02—0.05 之间. 如图 4(b), 当 $k_{tb} = 0.3$, $k_{tr} = 0.02$ 时, 伪模 2 和 4 的透射率取得最小值 -35 dB, 伪模 1 和 3 的透射率的值也小于

-35 dB. 因此, 伪模 1 和 3 与伪模 2 和 4 的均被抑制, 为后续编解码提供参数保障.

2.3 主峰反射特性分析

主谐振峰的通带特性将直接影响编解码性能, 需要同时考虑主谐振峰反射特性与伪模抑制情况. 当 k_{tr} 在 0.02—0.05 区间内变化时, 图 5(a) 仿真分析了耦合系数 k_{tb} 与伪模 2 透射率的关系. 类似地, 图 5(b) 仿真分析了耦合系数 k_{tb} 与伪模 4 透射率的关系. 如图 5 所示, 相同的参数下伪模 4 (图 5(b)) 的抑制始终优于伪模 2 (图 5(a)) 的抑制, 因此, 只要保证伪模 2 的抑制即可. 并且伪模 2 的抑制效果将随 k_{tb} 值与 k_{tr} 值的减小而增强. 综上所述, 结合伪模 2 和 4 的抑制效果, 最终 k_{tb} 取值范围在 0.2—0.35, k_{tr} 取值介于 0.02—0.035 之间.

3 微环结构参数对编解码器性能的影响

3.1 编解码原理

哑铃型微腔阵列利用微腔下载端反射波长与集成在总线上的相移器的相位变化实现二维编解码。如图6所示,编码器是由 N 列哑铃型微环结构组成的,每列微腔结构单元都有一组对应于地址码的特定的谐振反射波长和相位变化值。利用热光效应,通过调节每个微环上的热阻器件调制每列微环的反射波长。同时,利用集成在每列微环后的相移器对每个波长附加0或 π 的相移^[26]。一束由多个波长组成的宽带光信号经过哑铃型微环阵列时,满足谐振条件的波长将被反射后从下载端口输出,不满足波长谐振条件的光信号从传输端输出,沿着直波导继续传播,依次经过每个串联微环列并发生波长反射和相位改变。最终从输出端输出具有特定时间顺序且附有特定相位的波长序列,从而实现波长-相位的二维编码。解码过程在微环阵列接收端进行。将微环阵列按照与编码阵列反向的顺序进行排布,相移器采用相反相位,其余参数与编码阵列相同,即可进行解码。当解码正确时,输出端会出现尖锐的自相关峰,自相关峰值比用 P/W 表示;当解码错误时,输出端出现类似于白噪声的互相关,互相关峰值比用 P/C 值^[24]。

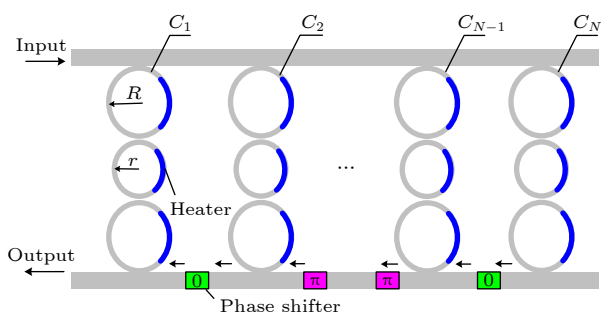


图6 哑铃型微腔编码器原理示意图

Fig. 6. Schematic of the proposed optical en/decoder; the heater is shown in blue.

3.2 耦合系数与 P/W , P/C 的关系

利用反射谱的波长进行编解码时,反射谱的反射峰值和3 dB带宽影响编解码器性能。根据方程(3)可知,耦合系数影响反射谱特性,讨论耦合系数与反射谱特性关系。如图7曲线所示,当 k_{rb} 分别为0.2, 0.25, 0.3, k_{rr} 介于0.01—0.03之间时,满

足单一反射谱条件与伪模反射强度(< -25 dB)要求,在该取值范围内讨论耦合系数的影响。图7(a)讨论了耦合系数 k_{rb} 分别为0.2, 0.25, 0.3时, k_{rr} 与 P/W , P/C 的关系。对于相同的 k_{rb} , P/W 值随着 k_{rr} 的增加(0.01—0.025区间内)迅速增加,这主要是由于当 k_{rb} 一定时,反射峰的3 dB带宽与反射率随着 k_{rr} 的增加呈近线性增加,获得自相关峰值较大,如图7(b)所示。当 k_{rr} 超过0.025时, P/W 值增长缓慢。这主要由于 k_{rr} 的增加使得反射峰从洛伦兹型逐渐越接近箱型,且反射率逐渐趋于1,导致 P/W 变化趋于平缓。此外, P/C 值受耦合系数的变化趋势与 P/W 值的变化相同,但没有后者影响明显。综上所述,当 k_{rr} 固定时, k_{rb} 取值较小,有利于提高编解码性能。

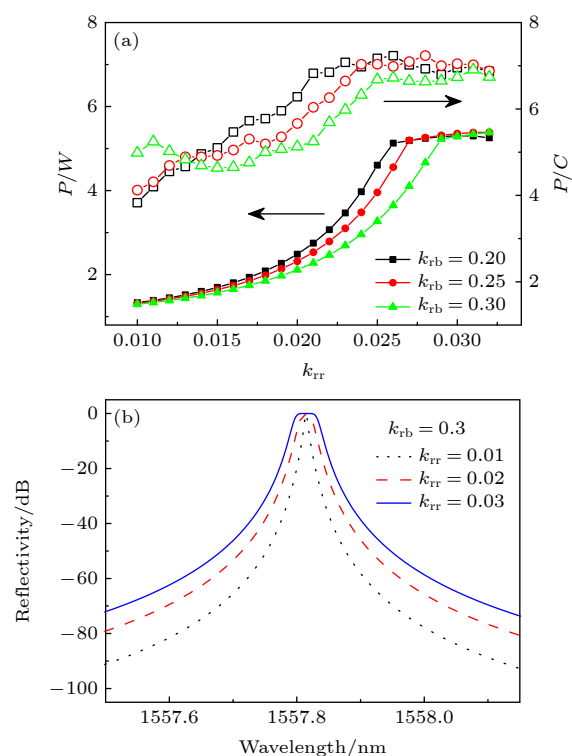


图7 (a) 耦合系数与 P/W , P/C 的关系; (b) $k_{rb} = 0.3$ 时,不同 k_{rr} 取值下,反射谱特性

Fig. 7. (a) Relationship between coupling coefficient and P/W , P/C ; (b) when $k_{rb} = 0.3$, the peak reflectance of reflection spectrum corresponding to different k_{rr} .

3.3 码片速率与 P/W , P/C 的关系

哑铃型微环阵列编码器的码片速率与相邻阵列间距存在关系 $v = c/n\Delta$ 。 v 表示码片速率, c 代表光速, n 表示直波导的折射率, Δ 为相邻阵列间距。显然,当阵列间距确定时,码片速率也是确定

表 1 阵列间距对应的码片速率值
Table 1. Chip rate value corresponding to array spacing.

Λ/mm	0.6	0.8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Chip rate/(Gchip·s ⁻¹)	166.7	125	100	50	33.3	25	20	16.7	14.3	12.5	11.1	10

的. 若相邻阵列间距用 mm 表示, 相应的码片速率用 Gchip/s 表示. 根据码片速率与相邻阵列间距关系可以获得码片速率, 如表 1 所列.

根据相应的 v , 可以得到 Λ 与编解码器 P/W , P/C 值的相互关系. 如图 8 所示, 当 Λ 从 0 增加到 10 mm 时, P/W 值因为由编解码器结构参数决

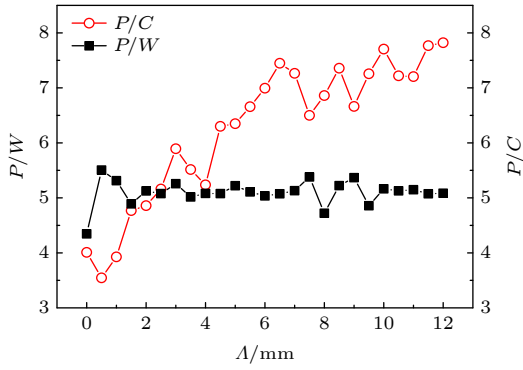


图 8 阵列间距与编解码性能关系

Fig. 8. Relationship between array spacing and en/decoding performance.

定, 因而浮动较小. 而 P/C 值由于受 Λ 的变化影响而明显增加. 当 $\Lambda < 7 \text{ mm}$ 时, P/C 值随着 Λ 的增加升高明显. 这是因为随着 Λ 的增加, v 降低, 码片间干扰和叠加下降, 使得 P/C 值从低值不断上升. 当 $\Lambda > 7 \text{ mm}$ 时, P/C 值随着 Λ 的增加缓慢增加. 这主要是由于 Λ 增加降低了码片叠加的影响. 为了获得较为稳定的 P/C 值, Λ 大于 6 mm, 此时 v 约为 16.7 Gchip/s.

4 编解码器实现

本文设计的串联哑铃型微环阵列编解码器结构参数为: 哑铃型微环半径分别为 $40 \mu\text{m}$ - $30 \mu\text{m}$ - $40 \mu\text{m}$, 有效折射率均为 3, k_{tb} 为 0.25, k_{tr} 为 0.032, 阵列间距 Λ 为 6 mm. 经计算, 该参数下, 微环阵列的 FSR 约为 13 nm, 3 dB 带宽约为 0.05 nm, 反射峰归一化强度接近 1, 反射谱主峰的矩形因子约为 0.61, 码片速率约为 17 GHz/chip, 码片周期

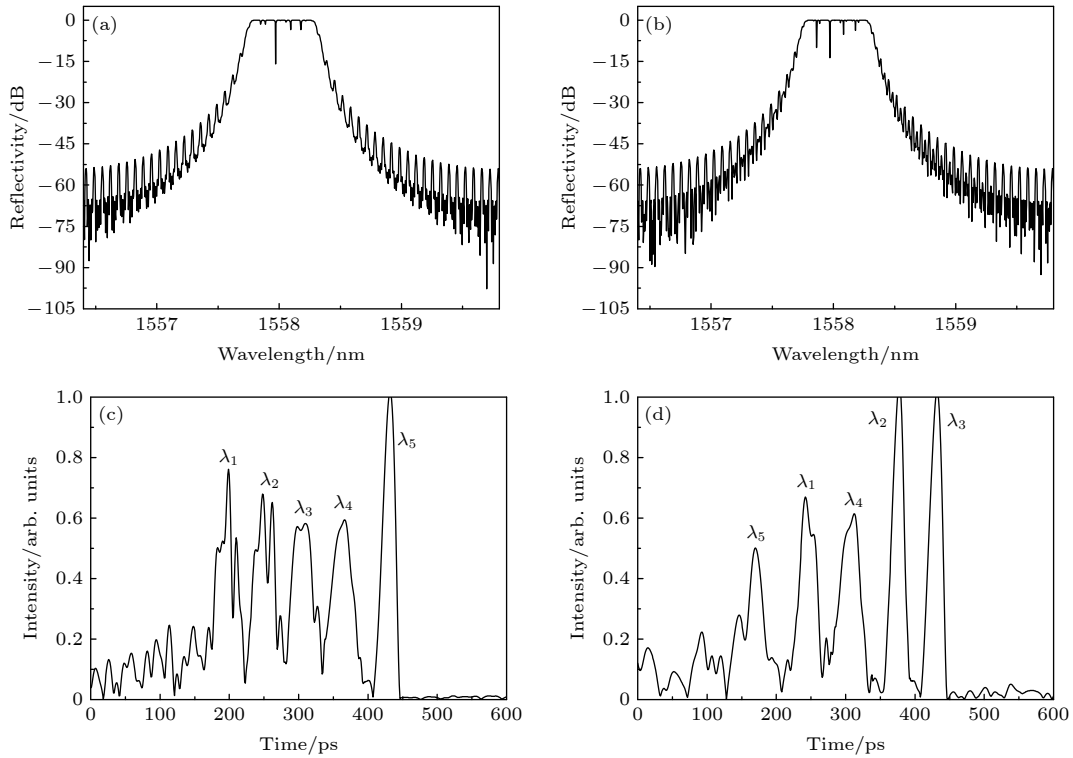


图 9 不同码字对应的编码后的光谱图与时域波形图

Fig. 9. Encoded spectrum and corresponding waveforms for different 2-D optical codes.

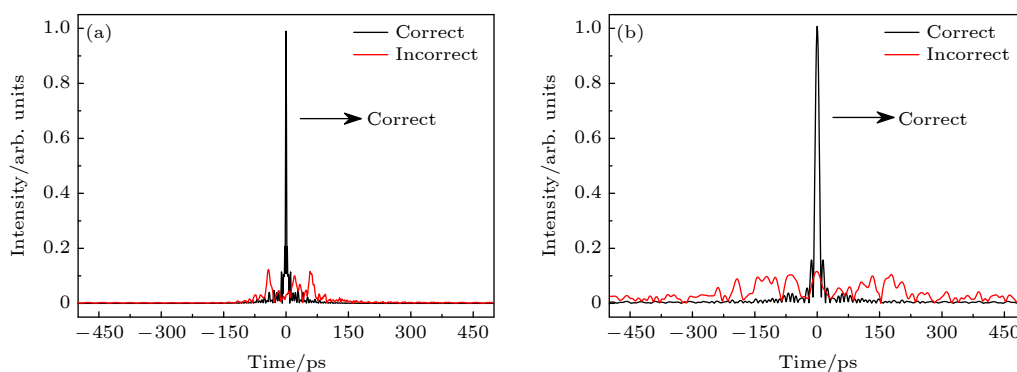


图 10 匹配与非匹配的光解码器波形图 (a) 半径相同串联微环编解码器; (b) 哑铃型微环编解码器

Fig. 10. Auto-/cross-correlation signals with correct and incorrect codes: (a) Serial microring en/decoder with same radius; (b) dumbbell Microring en/decoder.

约为 0.06 ns. 利用 Matlab 对该结构参数下的编解码器进行仿真. 仿真中采用两组不同的地址码, 地址码 1 为跳频码{1, 2, 3, 4, 5}/双极码{1, 1, 1, 1, 1}, 地址码 2 为跳频码{5, 1, 4, 2, 3}/双极码{1, -1, -1, 1, 1}. 图 9 描述了两组地址码下, 编解码器的反射峰特性以及输出时域波形图. (图 9(a) 和图 9(c) 对应地址码一时输出情况, 图 9(b) 和图 9(d) 对应地址码二时输出情况)

图 10 仿真得到了哑铃型微环结构 (半径分别为 40 μm -30 μm -40 μm) 与半径相同的串联微环结构 (半径分别为 40 μm -40 μm -40 μm) 的编解码器匹配与非匹配的光解码器波形图.

表 2 对比了哑铃型微环结构与半径相同的串联微环结构的编解码性能. 如表 2 所列, 与半径相同的串联微环结构性能相比, 与文中哑铃型串联微环结构的 FSR 扩大了 4 倍, 同时, P/W 值与 P/C 值分别提高了约 33% 和 8%. 此外, 本文选用 5 组哑铃型微腔进行编码. 理想情况下, 最大可以容纳的用户约为 960 个 ($5! \times 2^{(5-1)}/2$). 当微环谐振腔编解码器当再增加一列微环时, 系统可以容纳的用户数为 161280, 用户容量扩大 168 倍. 并且随着列数的增加, 用户容量呈指数增长趋势. 因此, FSR 的展宽保证了系统可以容纳微环列数的增多, 从而达到用户容量扩大的目的.

表 2 哑铃型微环结构与半径相同串联微环结构性能对比

Table 2. Comparison of dumbbell-shaped microring structure and series micro-ring structure with the same radius.

半径/ μm	FSR/nm	P/W	P/C
40-30-40	13	6.39	8.71
40-40-40	3.2	4.78	8.05

5 结 论

在利用微环谐振腔阵列进行光码分多址编解码过程中, 微环谐振腔反射谱的 FSR 范围制约该系统用户容量的提升. 本文利用游标效应可展宽 FSR 范围的特性, 提出了一种串联哑铃型微环谐振腔二维相干光编解码器. 从该编解码器的光反射谱特性以及编解码性能入手, 获得了该编解码器结构参数. 根据结构参数, 进行光编码仿真实验, 结果表明, 半径分别为 40 μm -30 μm -40 μm 的串联哑铃型微环谐振腔结构, 当 k_{tb} 为 0.25, k_{tr} 为 0.032, 其 FSR 约为 13 nm, P/W 值约为 8.71, P/C 值约为 6.39. 与半径分别为 40 μm -40 μm -40 μm 的串联微环结构相比, 哑铃型微环结构的 FSR 扩大了 4 倍, P/W 值与 P/C 值分别提高了约 33% 和 8%. 理想情况下, 由于 FSR 范围的增大, 可以容纳更多的微环阵列, 用户容量可以实现指数增加.

参考文献

- [1] Yeteng T, Tao P, Hua Z, Jilin Z, Guorui S, Juan L 2020 *Opt. Fiber Technol.* **58** 102254
- [2] Mohammad H, Mohammad R P 2017 *J. Lightwave Technol.* **35** 2853
- [3] Ankita R, Deepak K 2019 *J. Opt. Commun.* **40** 463
- [4] Li C Q, Sun X H 2005 *Chin. J. Quantum Electron.* **22** 326 (in Chinese) [李传起, 孙小茜 2005 量子电子学报 **22** 326]
- [5] Li X B, Sun Y Y, Song J Z 2003 *Chin. J. Lasers* **4** 353 (in Chinese) [李晓滨, 孙玉勇, 宋建中 2003 中国激光 **4** 353]
- [6] Liu X Y, Lu J M, Zhang Y L 2006 *J. Jinan Univ. (Nat. Sci. Med. Ed.)* **1** 66 (in Chinese) [刘新宇, 卢金明, 张永林 2006 暨南大学学报(自然科学与医学版) **1** 66]
- [7] Yin B, Liu B C, Bai Y C, Tang M, Jiang D X 2007 *Semicond. Optoelectron.* **1** 108 (in Chinese) [尹波, 刘必晨, 白瑶晨, 唐敏, 蒋东新 2007 半导体光电 **1** 108]
- [8] Gao H J, Xiao T, Li P 2018 *Opt. Commun. Technol.* **42** 39

- (in Chinese) [高欢姜, 筱彤, 李萍 2018 光通信技术 **42** 39]
- [9] Vahala K J 2003 *Nature* **424** 839
- [10] Zhang Y, Chen M X, Li Y Y, Yuan J 2015 *Laser Optoelectron. Prog.* **52** 11 (in Chinese) [张莹, 陈梅雄, 李莹颖, 袁杰 2015 激光与光电子学进展 **52** 11]
- [11] 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]
- [12] Gu H M, Huang Y Q, Wang H H, Wu G, Duan X F, Liu K, Ren X M 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 144201 (in Chinese) [谷红明, 黄永清, 王欢欢, 武刚, 段晓峰, 刘凯, 任晓敏 2018 物理学报 **67** 144201]
- [13] Ji Z, Jia D G, Nie P Ch, Zhang H X, Zhang D L, Zhang Y M 2015 *Opt. Commun.* **347** 123
- [14] Ji Z, Jia D G, Zhang H X, Zhang D L, Zhang Y M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 034218 (in Chinese) [吉喆, 贾大功, 张红霞, 张德龙, 刘铁根, 张以谟 2015 物理学报 **64** 034218]
- [15] Tu X H, Zhao Y C 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 244204 (in Chinese) [涂兴华, 赵宜超 2019 物理学报 **68** 244204]
- [16] Xu Y Q, Wang C 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 184216 (in Chinese) [徐依全, 王聪 2020 物理学报 **69** 184216]
- [17] Shah J 2003 *Opt. Photonics News* **14** 42
- [18] Anjali A, Paul T, Ronald M 2006 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **18** 1952
- [19] Anjali A, Paul T, Ronald M, Shahab E, Janet J, Jeffrey Y, Thomas B 2005 *J. Lightwave Technol.* **24** 77
- [20] Wang X, Gao Z S 2011 *Proceedings of Photonics and Optoelectronics Meetings* Wuhan, China, November 02, 2011 p833302
- [21] Wang X, Gao Z S 2011 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **23** 591
- [22] Otto S 2007 *Opt. Commun.* **271** 424
- [23] Choi S J, Zhen P, Yang Q, Choi S J, Dapkus P D 2005 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **17** 106
- [24] Zhang X B, Huang D X, Hong W 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 1939 (in Chinese) [张小贝, 黄德修, 洪伟 2007 光学学报 **27** 1939]
- [25] Fegadolli W S, Vargas G, Wang X, Valini F, Barea L A M, Oliveira J E B, Frateschi N, Scherer A, Almeida V R, Panepucci R R 2012 *Opt. Express* **20** 14722
- [26] Nawrocka M S, Liu T, Wang X 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 071110

Two-dimensional coherent optical en/decoder based on serially coupled dumbbell microring resonator^{*}

Ji Zhe¹⁾ Yan Ying-Zhan^{2)†} Jia Da-Gong³⁾

1) (*School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China*)

2) (*The 54 th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China*)

3) (*Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology, Ministry of Education, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

(Received 4 June 2021; revised manuscript received 3 November 2021)

Abstract

Free spectral range (FSR) of reflection spectrum of micro-ring resonator restricts the improvement in user capacity of the optical code division multiple access (OCDMA) system using micro-ring resonator array. Vernier effects can expand FSR of cascaded optical microring resonator. Based on vernier effect, a novel two-dimensional coherent optical en/decoder using serially coupled dumbbell micro-ring resonator is proposed in this paper. The theoretical model of optical transmission for series dumbbell-shaped microring resonators is established. The relation between the suppression of pseudo-modes in optical reflection spectrum and the coupling coefficient is analyzed in detail. The effects of coupling coefficient, processing error and chip rate on the performance of series dumbbell microring resonator optical en/decoder are studied. The en/decoding simulation experiments are carried out on a series dumbbell-shaped micro-ring resonator with radius of 40 μm -30 μm -40 μm respectively. The results show that comparing with the traditional series micro-ring resonator with radius of 40 μm -40 μm -40 μm respectively, the FSR value of dumbbell microcavity is increased by 4 times and the user capacity can increase exponentially. Meanwhile, the ratio of autocorrelation peak to maximum wing (P/W) and the cross-correlation ratio (P/C) are increased by about 33% and 8%, respectively.

Keywords: optical micro-ring resonator en/decoder, user capacity, auto-correlation peak level over maximum wing level (P/W), auto-correlation peak level (P/C)

PACS: 42.79.Sz, 42.82.-m, 42.60.Da

DOI: 10.7498/aps.71.20200057

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 2019B1-0171) and the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. QN2016182).

[†] Corresponding author. E-mail: yyz712@126.com