

光波导微环谐振器用于二进制格式变换研究*

张利斌 陈少武[†] 费永浩 曹彤彤 曹严梅 雷勋

(中国科学院半导体研究所, 集成光电子学联合国家重点实验室, 北京 100083)

(2013年4月26日收到; 2013年5月28日收到修改稿)

实验观测到了微环对入射二进制码的格式转换作用, 且这种转换作用对入射光波长具有强烈的依赖关系. 使用线性耦合模理论, 结合傅里叶变换以及电光马赫曾德强度调制作用, 理论再现了这一实验结果, 并通过使用简化的传递函数对此进行了解释. 理论分析还表明, 对于非临界耦合微环, 通过格式转换后波形的非对称性可以直观地判断微环的耦合状态, 即过耦合或欠耦合有不同的输出波形特点.

关键词: 微环谐振器, 数据格式转换, 耦合模方程, 传递函数

PACS: 42.30.Lr, 42.60.Da, 42.82.Et, 02.30.Nw

DOI: 10.7498/aps.62.194201

1 引言

近年来, 许多课题组基于光学非线性效应对全光数据格式转换进行了研究^[1-3], 其中一些课题组实现了硅基微环全光数据格式转换, 如 Su 等人基于硅的非线性性质研究了非归零码 (NRZ) 向相移键控 (PSK) 的高速转换^[4], 以及非归零码向归零码 (RZ) 的高速转换^[5]. 在某些特定条件下, 基于材料的线性性质同样也可以实现数据的格式转换, 如 Zhou^[6] 和 Zhai^[7] 等人分别实验验证了线性条件下硅基微环可以将 NRZ 转换为 PRZ (伪归零码), 其中 Zhou 使用微环的滤波方程对这种现象进行了理论分析. 微环对入射光数据格式的线性变换作用非常类似于微分器^[8,9], 因此, 许多课题组基于单个微环或者级联微环实现了对入射光波信号的一阶及高阶微分^[10-12].

在这篇文章中, 我们实验观察到了微环在入射光功率较低的情况下对二进制数据流的格式转换现象, 即输出光在二进制码由“0”变为“1”的上升沿和由“1”变为“0”的下降沿出现了脉冲波形. 当入射光波长相对于谐振波长发生红移和蓝移时, 实验得到的输出光波形正好相反 (时间反演对称现象). 通过使用线性耦合模理论推导得到传递函数, 结合傅里叶分析方法, 并考虑电光马赫曾德 (MZ)

强度调制器的调制作用, 理论再现了这一现象. 理论结果还显示, 若采用电吸收调制器 (理想情况, 忽略相位的微弱变化), 则这种时间反演对称现象将消失, 取而代之的是入射光波长红移或蓝移相同波长时, 得到相同的输出光波形.

微环对输入二进制数据的格式转换作用还依赖于微环与波导的耦合强弱, 理论分析表明, 过耦合和欠耦合条件下得到的转换波形的形状恰好相反. 因此, 通过判断谐振波长下微环对输入矩形波的转换波形的形状, 可以便捷地判断此时微环所处的耦合状态. 而之前评判微环耦合状态的方法通常需要测试不同耦合强度的微环, 通过比较品质因子或消光比等方法得到^[13].

2 实验装置与结果

实验采用如图 1 所示的装置, 可调谐连续波激光器输出的光经过偏振控制器后, 被电光 MZ 强度调制器调制, 调制之后的连续波 (CW 光) 变为矩形二进制码信号. 该信号光经过 EDFA 放大后, 通过锥形保偏光纤耦合进硅波导中, 并在耦合区与微环发生相互作用. 输出光经过锥形光纤后分别进入光功率计 (判断耦合效果)、光谱仪 (测量微环的谐振波长和消光比) 和光电探测器 (其输出电学信号进入示波器, 用于分析输出信号的波形).

* 国家自然科学基金 (批准号: 60877013, 61021003) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: swchen@semi.ac.cn

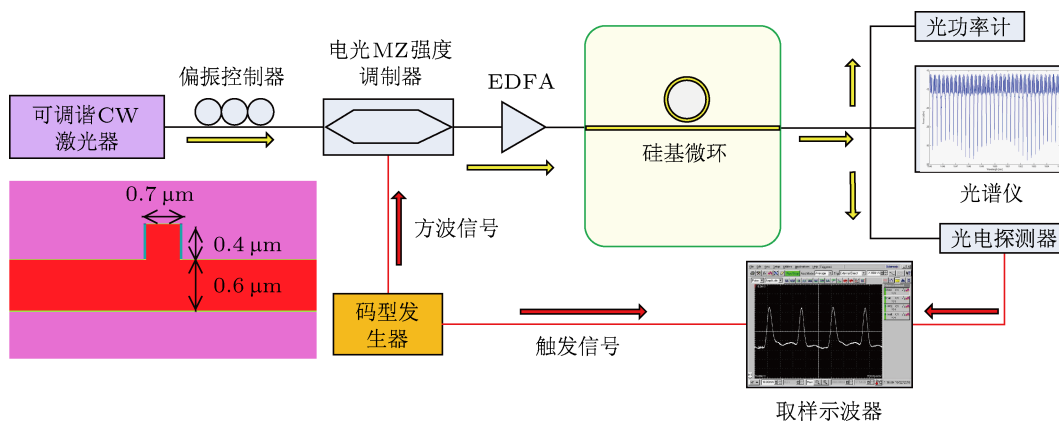


图1 硅基微环格式转换实验装置图(插图为波导横截面尺寸图,中间脊形区为硅,周围为二氧化硅)

实验所用的微环横截面如图1的插图所示,波导采用脊形结构,脊高 $1\ \mu\text{m}$,宽 $0.7\ \mu\text{m}$,平板区高 $0.6\ \mu\text{m}$.微环为跑道型微环,半径 $300\ \mu\text{m}$,跑道长 $170\ \mu\text{m}$,周长约 $2.22\ \text{mm}$.实验测试得到的微环静态光谱如图2所示,该图显示微环的静态消光比约为 $20\ \text{dB}$.由静态光谱图测量得到微环的 $3\ \text{dB}$ 宽度约为 $0.07\ \text{nm}$,对应的品质因子为 $Q_{\text{load}} = 22000$.微环近似处于临界耦合,由此计算得到微环的内品质因子为 $Q_0 = 44000$,由内品质因子与微环波导损耗的关系式 $Q_0 = 2\pi n_g / (\alpha_0 \lambda_0)^{[14]}$,计算得到微环波导损耗 $\alpha_0 = 3.2\ \text{cm}^{-1}$ (其中,群折射率取 3.477).临界耦合下,波导损耗等于耦合损耗,因此得到耦合损耗与总损耗分别为 $\alpha_c = 3.2\ \text{cm}^{-1}$, $\alpha = \alpha_0 + \alpha_c = 6.4\ \text{cm}^{-1}$.

采用如图1所示的实验装置,实验测试得到了不同波长的入射光经微环格式转换后的时域波形,如图3所示.该图显示,当入射光波长恰好等于谐振波长时,即 $\Delta\lambda = 0$,微环对输入的矩形信号只在上升沿和下降沿有响应,表现为脉冲信号.当入射光波长小于谐振波长,即 $\Delta\lambda < 0$ 时,此时入射光波长相对谐振波长发生“蓝移”,微环输出光对二进制码下降沿的响应程度增强,使得下降沿的脉冲峰值高于上升沿的脉冲峰值.当入射光波长大于谐振波长,即 $\Delta\lambda > 0$ 时,此时入射光波长相对谐振波长发生“红移”,微环输出光对二进制码上升沿的响应程度增强,使得上升沿的脉冲峰值高于下降沿的脉冲峰值.此外,当入射光波长处于非谐振波长时,微环的滤波作用被削弱,入射光波长偏离谐振波长越远,则输出光波形越接近输入波形.

微环对二进制码的上升沿和下降沿有脉冲响应是因为微环中的光强从零到最大(或从最大到零)需要一定的建立(或衰减)时间.即当一束连

续光进入波导时,光在耦合处耦合进入微环,而微环中的光强从零增加到饱和状态需要一定的积累时间;同样,当外界入射光突然停止时,由于微环对光的储存作用,输出光不会立刻消失,而是从耦合端逐渐耦合输出.微环中的光建立平衡状态需要的时间与入射二进制码的上升沿、下降沿时间有关,也与微环的光子寿命有关.实验使用的输入波形的上升沿和下降沿时间约为 $80\ \text{ps}$ (强度变化 $10\%—90\%$ 的时间间隔),微环的光子寿命(用符号 τ_{ph} 表示)与其损耗(包括耦合损耗和波导损耗)成反比,即 $\tau_{\text{ph}} = n_0 / (c\alpha) = 18\ \text{ps}$,其中有效折射率 $n_0 = 3.477$.因此,输出脉冲波形的脉宽主要受到输入矩形波的上升沿和下降沿时间制约,该时间越长,则输出脉冲波的脉宽越宽.

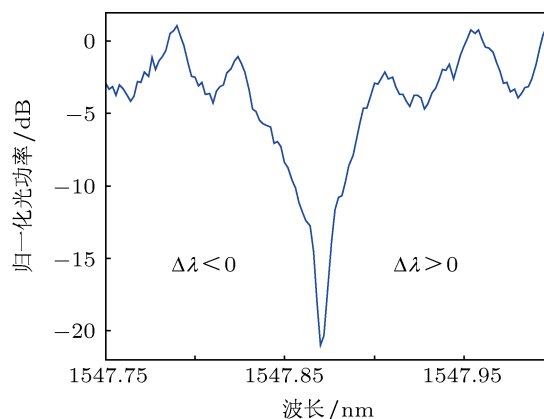


图2 微环静态光谱测试图

3 理论建模与分析

当入射光波长与微环的谐振波长一致时,微环输出光的时域图形表现为在上升沿和下降沿出现脉冲尖峰,Zhou等^[6]使用滤波方程对该现象进行了分析,但是对于入射光波长偏离谐振波长的情形,

他们却没有进行分析. 在这里需要指出的是, 入射光波长偏离谐振波长时得到的输出波形所表现出的特点不仅与微环的波长响应有关, 而且与进入微环之前的光波相位有关, 而后者是已有的文献所没

有述及的. 和已经报道的理论分析方法不同, 我们结合微环线性耦合模理论和电光 MZ 强度调制器的调制特点, 对该现象进行了理论建模, 并得到了与实验符合的理论结果.

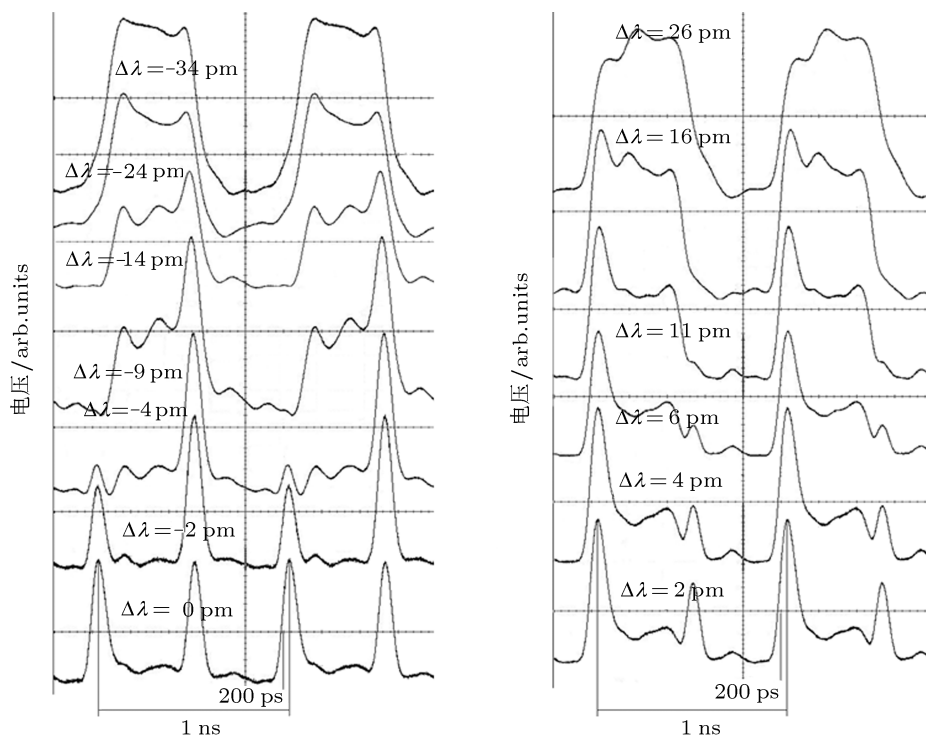


图3 不同波长的入射光经微环式转换后的输出光时域波形图(示波器显示图)(图中的 $\Delta\lambda$ 表示入射光波长相对谐振波长的偏移量, 即 $\Delta\lambda = \lambda_{in} - \lambda_{ring}$. $\Delta\lambda < 0$ 表示入射光波长小于微环谐振波长, 为“蓝移”; 而 $\Delta\lambda > 0$ 则表示入射光波长大于微环谐振波长, 为“红移”)

假设 $s(t)$ 表示进入微环之前的光复振幅, 其包含随着光功率变化的相位项, $|s(t)|^2$ 表示光功率 P . $b(t)$ 表示经过微环后的输出端时域光振幅. 那么根据线性耦合模方程^[15,16], 可以得到

$$\frac{\partial b}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial t} + \left[i(\omega_0 - \omega_c) - \frac{c\alpha}{2n_0} \right] b + \left[-i(\omega_0 - \omega_c) + \frac{c\alpha}{2n_0} - \frac{c\alpha_c}{n_0} \right] s, \quad (1)$$

其中, ω_0 表示微环的某个谐振峰频率, ω_c 表示入射光的频率, α 表示微环的总损耗, α_c 表示微环和直波导的耦合损耗, n_0 表示微环的有效折射率.

对 (1) 式进行傅里叶变换, 得到

$$i\omega B = i\omega S + \left[i(\omega_0 - \omega_c) - \frac{c\alpha}{2n_0} \right] B + \left[-i(\omega_0 - \omega_c) + \frac{c\alpha}{2n_0} - \frac{c\alpha_c}{n_0} \right] S, \quad (2)$$

其中 B 是 $b(t)$ 的傅里叶变换, S 是 $s(t)$ 的傅里叶变换, ω 是傅里叶空间的频率.

计算 (2) 式, 得到在傅里叶空间中的输出光表

达式为

$$B(\omega) = \left(1 - \frac{\Gamma_c}{i\omega - i(\omega_0 - \omega_c) + \Gamma_0} \right) S(\omega) \equiv H(\omega)S(\omega), \quad (3)$$

其中, $\Gamma_0 = \frac{c\alpha}{2n_0}$, $\Gamma_c = \frac{c\alpha_c}{n_0}$, $H(\omega)$ 为传递函数.

对 (3) 式进行傅里叶逆变换, 即可得到输出光时域图形. 注意到, (3) 式等号右边括号中的函数 $H(\omega)$ 与全光微分器的传递函数^[10] 相同. 例如, 临界耦合条件下 ($\Gamma_0 = \Gamma_c$), 当入射光波长等于微环谐振波长 ($\omega_0 = \omega_c$) 时, (3) 式变为 $H(\omega) = B(\omega)/S(\omega) = i\omega/(i\omega + \Gamma_0) \approx i\omega/\Gamma_0$. 其中频率 ω 为傅里叶空间频率, 已经减去了载波频率, 其值远小于 Γ_0 . 显然这是一阶时域微分器的典型方程.

其次, 我们简单推导 CW 光经过电光 MZ 强度调制器后的复振幅表达式. 用 A_0 表示 CW 光振幅, 其光载频为 ω_c , 功率为 P_0 . 经过 MZ 调制器得到的

复振幅为

$$A(t) = A_0 \cos(\Delta\varphi/2) \exp(i\Delta\varphi/2) = A_0 [1 + \exp(i\Delta\varphi)]/2, \quad (4)$$

其中忽略了 MZI 两条臂中相同的相位部分, 功率为 $P(t) = P_0(1 + \cos \Delta\varphi)/2$.

理论模拟时, 我们可以构造输入光功率波形, 即, 通过数学构造得到 $P(t)/P_0$, 记为 P_1 , 这样就可以得到相位差 $\Delta\varphi$ 与功率波形之间的关系

$$\Delta\varphi = \arccos(2P_1 - 1). \quad (5)$$

将 (5) 式代入 (4) 式, 即可得到输入光时域振幅表达式

$$A(t) = A_0 [P_1 + i\sqrt{P_1(1-P_1)}]. \quad (6)$$

忽略 MZ 调制器输出调制光到达微环过程中的光相位变化, 认为在该传输过程中光波只发生强度衰减 (衰减因子 k), 那么微环谐振腔的入射端光振幅可以表示为

$$s(t) = k \cdot A(t) = kA_0 [P_1 + i\sqrt{P_1(1-P_1)}]. \quad (7)$$

理论计算时, 首先构造经过电光 MZ 调制器后的光强二进制码型序列, 由 (7) 式计算出时域振幅序列. 经过快速傅里叶变换得到傅里叶空间的频率序列 $S(\omega)$, 由 (3) 式计算得到输出端的傅里叶序列 $B(\omega)$, 再经过傅里叶逆变换得到时域图形.

为简单起见, 模拟时取 (7) 式中的衰减因子 $k = 1$. 构造的二进制码型如图 4 的左上图所示 (二

进制码的速率为 2 Gb/s). 其他参数和微环谐振腔的参数一致, 得到的拟合结果如图 4 所示. 拟合结果显示, 当入射光波长恰好等于谐振波长 ($\Delta\lambda = 0$) 时, 输出光表现为只在入射光从“0”到“1”的上升沿和从“1”到“0”的下降沿出现脉冲峰. 当入射光波长蓝移 ($\Delta\lambda < 0$) 和红移 ($\Delta\lambda > 0$) 时, 输出光波形在入射矩形波的上升沿和下降沿出现不同的响应波形, 并且红移和蓝移相同波长所得到的输出波形表现出很好的时间反演对称性. 这些理论结果与实验具有较好的符合度.

虽然微环可以提取输入二进制码型在上升沿和下降沿的时钟信号, 但是, 从模拟结果可以看到, 得到的脉冲峰值相比输入码型的最大值已经减小了许多. 这一现象也已经从实验中观察到. 使用临界耦合下的传递函数 $H(\omega) = i\omega/\Gamma_0$ 可以对得到的脉冲高度进行分析. 由于微环可以作为光学微分器, 因此输出光在二进制码的上升沿和下降沿时刻出现脉冲, 脉冲的高度与入射光的上升沿和下降沿的斜率有关, 还与常数 Γ_0 有关 ($\Gamma_0 = c\alpha/2n_0$). 提高脉冲高度可以通过减小输入矩形波的上升沿和下降沿时间, 或者减小微环的损耗, 增加微环的光子寿命等方法实现. 但是需要指出的是, 增加光子寿命也就意味着微环对光的存储时间增加, 因此输出的脉冲光宽度将会增加, 文献 [6] 已经对此问题进行了理论分析.

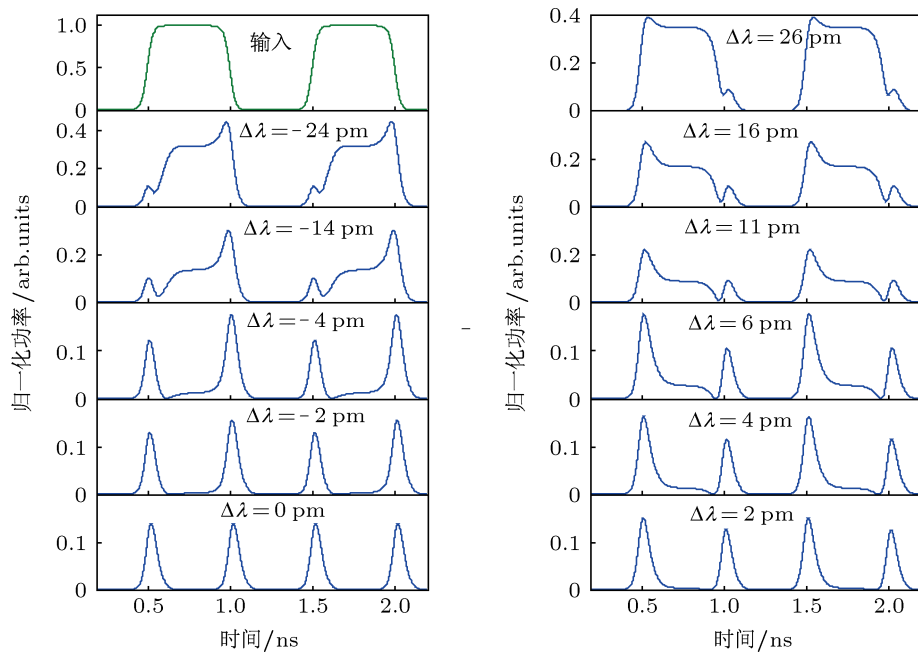


图 4 临界耦合时, 不同波长入射光经过微环后的输出光功率时域图 (入射光为 CW 波经过 MZ 强度调制得到的矩形波)

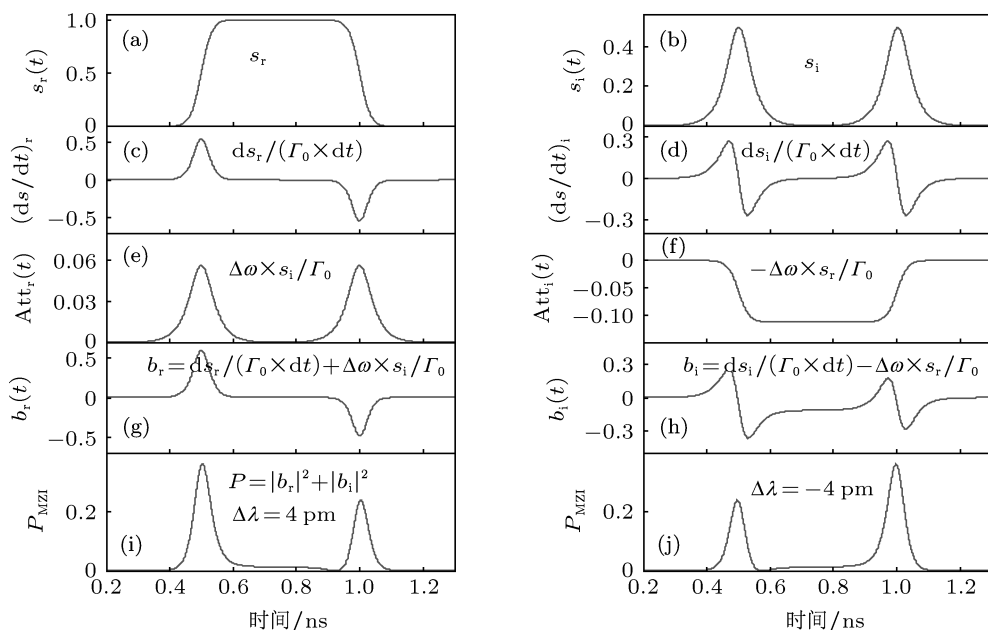


图5 使用传递函数图解微环对非谐振波长的入射二进制码型信号的时域响应原因(其中入射码型经MZ电光调制器调制)(a)和(b)表示入射光复振幅的实部和虚部;(c)和(d)表示微分项的实部和虚部;(e)和(f)表示衰减项的实部和虚部;(g)—(i)表示入射光波长偏移4pm时输出光振幅的实部、虚部和输出光功率的时域图,(j)表示入射光波长偏移-4pm时输出光功率时域图

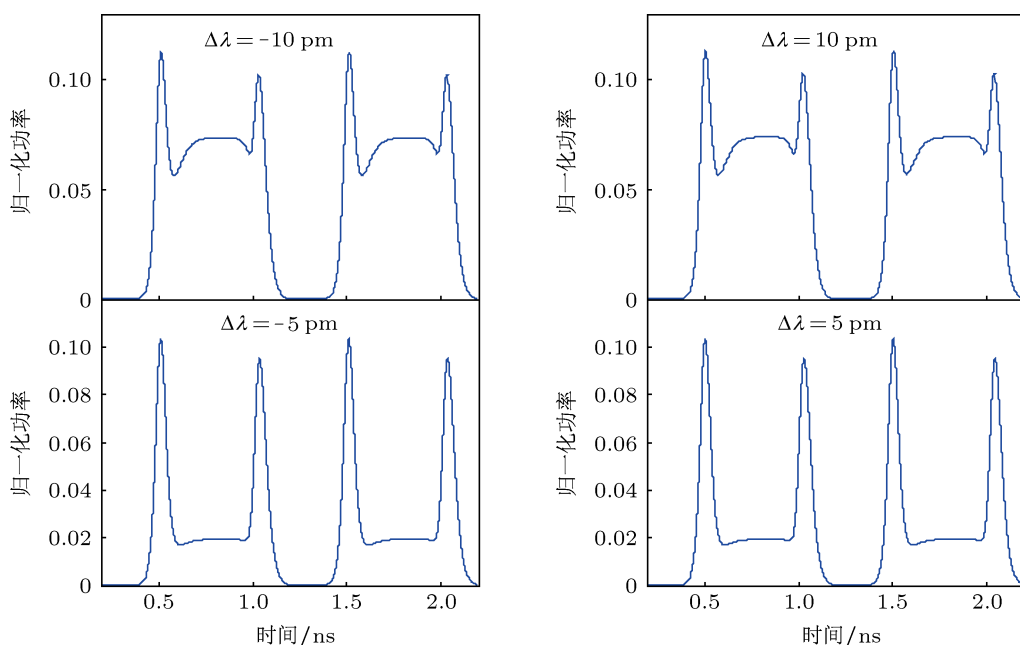


图6 入射矩形波采用电吸收调制时,不同波长入射光经过微环后的输出光功率时域图

对于入射光波长偏离谐振波长的情形,我们可以用简化之后的传递函数进行说明.此时(3)式中的传递函数可以写为

$$H(\omega) = \frac{i\omega - i(\omega_0 - \omega_c)}{i\omega - i(\omega_0 - \omega_c) + \Gamma_0} \approx \frac{i\omega}{\Gamma_0} - \frac{i(\omega_0 - \omega_c)}{\Gamma_0} \quad (8)$$

该式推导过程中假设 $\omega_0 - \omega_c \ll \Gamma_0$, $\omega \ll \Gamma_0$. (8) 式

显示,传递函数包含两部分:第一部分为微分项,第二个部分为衰减项.微分项和谐振波长时的表达式相同,表明输出光仍然会在输入光的上升沿和下降沿产生脉冲光;而衰减项则会改变输出光复振幅在上升沿和下降沿等时刻的数值.图5(a)—(i)对入射光发生红移($\Delta\lambda = 4$ pm)的情形进行了解析说明,可以看到,由于衰减项的存在,输出光复振幅的实部和虚部在上升沿的绝对值增加,而在下

降沿的绝对值减小, 因此输出功率曲线在上升沿的数值大于其在下降沿的数值. 同理, 对于入射光发生蓝移的情形 (图 5(j)), 可以得到相反的分析结果. 需要说明的是, 由于 (8) 式中的传递函数经过了化简, 由此得到的计算结果 (图 5) 与使用 (3) 式得到的精确结果 (图 4) 形式相同, 但是脉冲幅值存在差异.

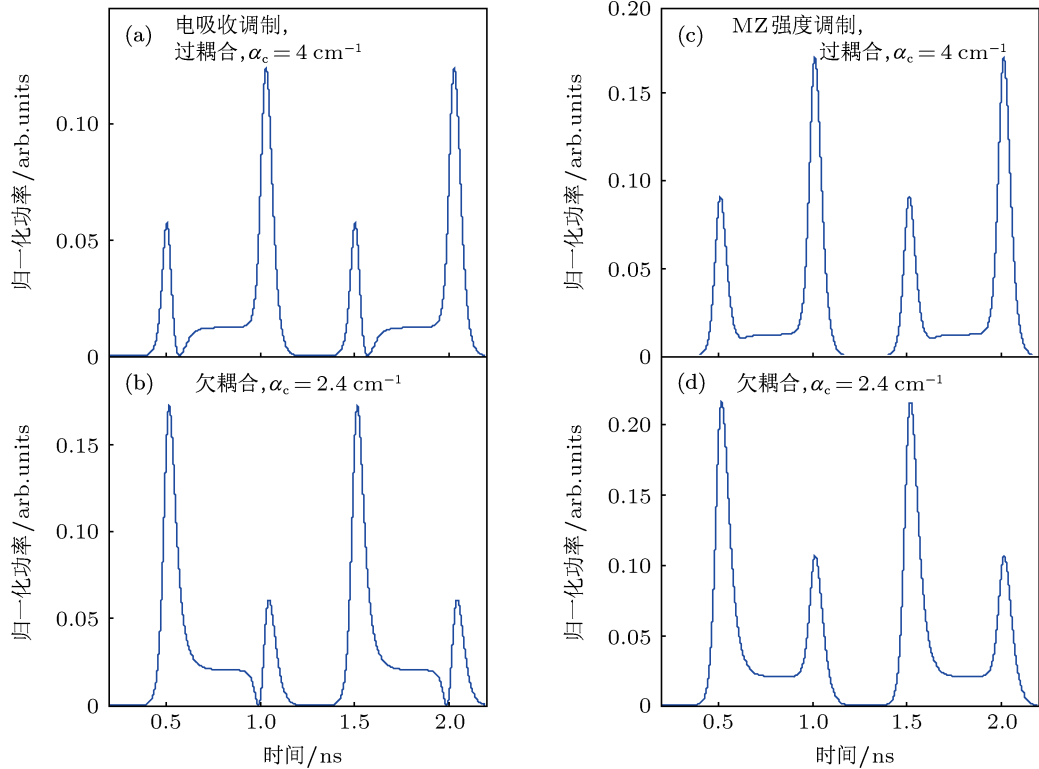


图 7 微环在过耦合 (a), (c) 和欠耦合 (b), (d) 时的输出波形图 (入射光波长为谐振波长, 微环线性损耗均取 3.2 cm^{-1}) (a), (b) 对应电吸收调制; (c), (d) 对应电光 MZ 强度调制

对于非临界耦合情形, 该理论模型可以较好地判断微环是处于欠耦合还是过耦合状态. 理论模拟时, 固定微环的线性损耗不变 $\alpha_{\text{ring}} = 3.2 \text{ cm}^{-1}$, 改变耦合损耗 α_c . 分别采用电光 MZ 调制器和电吸收调制器进行模拟, 得到如图 7 所示的结果. 从图中可以看出, 不论是电光强度调制, 还是电吸收调制, 得到的结果都基本相同, 即当入射光波长等于谐振波长时, 过耦合的微环对矩形波的下降沿具有更强的脉冲响应, 而欠耦合则与之相反. 使用传递函数可以很好地解释该现象: 非临界耦合, 入射光波长等于谐振波长时, 微环的传递函数近似为

$$H(\omega) = \frac{i\omega}{\Gamma_0} + \frac{\Gamma_0 - \Gamma_c}{\Gamma_0},$$

即包含一个微分器和一个衰减器, 此时出射光的振

当采用电吸收调制器 (忽略微弱的相位变化) 调制入射光信号时, 入射光的相位项不随入射光功率发生变化, 入射光波长蓝移或红移相同量所得到的时域图形完全一致, 如图 6 所示. 这是由于如果入射光的振幅只有实数项, 经过传递函数变换之后, 波长红移和蓝移相同量得到的输出光复振幅相互共轭, 因而功率波形完全相同.

幅表达式为

$$b(t) = \frac{1}{\Gamma_0} \frac{ds(t)}{dt} + \frac{\Gamma_0 - \Gamma_c}{\Gamma_0} s(t).$$

以电吸收调制器为例, 入射光振幅的微分值在上升沿为正 $ds(t)/dt > 0$, 而在下降沿为负 $ds(t)/dt < 0$. 过耦合时, 传递函数中的衰减项小于零 ($\Gamma_0 < \Gamma_c$), 这就使得 $|b(t)|_{\text{上升沿}} < |b(t)|_{\text{下降沿}}$, 即出射光功率在下降沿的峰值高于上升沿峰值. 同理可以得到欠耦合时 $|b(t)|_{\text{上升沿}} > |b(t)|_{\text{下降沿}}$, 即出射光功率在上升沿的峰值高于下降沿峰值.

此外, 使用耦合模理论可以对该过程进行动态分析. 以过耦合为例, 当入射光经历上升沿时, 由于耦合较强, 从直波导进入微环的光强快速增加, 输出光尚未得到足够的增长, 便因微环的谐振消光作用而减少, 因此脉冲幅度较低; 当入射光经历下降

沿时, 耦合平衡被打破, 此时由于耦合系数较高, 从微环耦合输出的光强快速增加, 因此输出端表现出更高的脉冲波形. 此外, 由于微环处于非临界耦合状态, 其对二进制码的格式转换效果减弱, 因此码型为“1”时有一定的光强输出.

4 结论

使用硅基微环, 实验观察到了微环对入射二进制码的格式转换作用, 即能够提取码型的上升沿和

下降沿. 通过使用线性耦合模理论 (传递函数)、傅里叶分析方法以及电光 MZ 强度调制方程, 我们在理论上建立了完善的分析模型, 模拟结果与实验测试结果比较一致. 由于微环对码型变化的快速提取功能不依赖非线性性质, 因此需要的入射光功率较低, 且光功率可以任意变化. 文中还指出, 微环对二进制码格式转换后的波形可以用于判断微环是否处于临界耦合状态, 以及处于何种状态. 运用这种方法, 并结合微环的静态光谱, 可以估算非临界耦合时微环的损耗参数, 即线性损耗和耦合损耗.

-
- [1] Lei X, Wang B C, Baby V, Glesk I, Prucnal P R 2003 *IEEE Photonic Tech. L.* **15** 308
 - [2] Li D, Zhang X L, Huang D X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2223 (in Chinese) [李达, 张新亮, 黄德修 2007 物理学报 **56** 2223]
 - [3] Hui Z Q, Zhang J G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084209 (in Chinese) [惠战强, 张建国 2013 物理学报 **62** 084209]
 - [4] Lu Y Y, Liu F F, Qiu M, Su Y K 2007 *Opt. Express* **15** 14275
 - [5] Ye T, Yan C S, Lu Y Y, Liu F F, Su Y K 2008 *Opt. Express* **16** 15325
 - [6] Zhou L J, Chen H, Poon A W 2008 *J. Lightwave Technol.* **25** 14275
 - [7] Zhai Y, Chen S W, Ren G H 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 104203
 - [8] Slavik R, Park Y, Kulishov M, Morandotti R, Azaña J 2006 *Opt. Express* **14** 10699
 - [9] Dong J J, Luo B W, Zhang Y, Lei L, Huang D X, Zhang X L 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 014203
 - [10] Liu F F, Wang T, Qiang L, Ye T, Zhang Z Y, Qiu M, Su Y K 2008 *Opt. Express* **16** 15880
 - [11] Hu Y T, Zhang L, Xiao X, Li Z Y, Li Y T, Chu T, Su Y K, Yu J Z 2012 *J. Opt.* **14** 065501
 - [12] Dong J J, Zheng A L, Gao D S, Liao S S, Lei L, Huang D X, Zhang X L 2013 *Opt. Lett.* **38** 628
 - [13] Spillane S M, Kippenberg T J, Painter O J, Vahala K J 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 043902
 - [14] Rabiei P, Steier W H, Zhang C, Dalton L R 2002 *J. Lightwave Technol.* **20** 1968
 - [15] Vahala K 2004 *Optical Microcavities* (Vol.5) (Singapore: World Scientific Press) pp1-37
 - [16] Little B E, Chu S T, Haus H A, Foresi J, Laine J P 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 998

Study of data format transform with optical waveguide resonators*

Zhang Li-Bin Chen Shao-Wu[†] Fei Yong-Hao
Cao Tong-Tong Cao Yan-Mei Lei Xun

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 26 April 2013; revised manuscript received 28 May 2013)

Abstract

Based on the linear property of silicon microring resonators, we experimentally observed that such resonator can transform square-wave signal into pulse-wave signal, and the output waveform is strongly dependent on the input wavelength. We then proposed a mathematical model, which utilized linear coupling mode theory, Fourier transform and electro-optical Mach-Zehnder (MZ) intensity modulation functions. The numerical simulation results fit well with the experimental results. Besides, we gave a detailed explanation based on the transfer function of microrings. Furthermore, we have studied the case when the ring resonator is deviated from the critical coupling condition, and found that the coupling state, over coupling or under coupling, can be easily judged through the output waveform.

Keywords: microring resonator, format transform, coupling mode theory, transfer function

PACS: 42.30.Lr, 42.60.Da, 42.82.Et, 02.30.Nw

DOI: 10.7498/aps.62.194201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60877013, 61021003).

[†] Corresponding author. E-mail: swchen@semi.ac.cn