

文章编号: 1005-5630(2024)02-0007-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202303080045

异质微环谐振腔双稳态及全光存储器应用

王婷^{1,2}, 沈微宏¹, SCHOENHARDT Steffen¹, 张启明¹

(1. 上海理工大学光子芯片研究院, 上海 200093;

2. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 提出了一种基于异质集成波导的微环谐振腔, 对其双稳态现象进行了研究分析, 并将其应用于全光存储功能的实现。异质集成波导具有超高的克尔非线性效应, 不受热光效应和载流子响应的限制, 在超快克尔非线性效应的支持下, 该结构具有快速全光切换的能力。设计了一个高品质因子 $Q = 77565$ 的微环谐振腔, 用耦合模式理论模拟了其双稳态现象。在峰值功率为 474 fJ, 宽度为 20 ps 的脉冲激励下, 该微环谐振腔很好地实现了全光存储功能, 并通过波分复用的串联微环结构展示了波长可寻址的四位光存储器。研究了基于超高克尔非线性效应的双稳态现象, 为实现超快切换速度提供了可能性, 在光存储、光开关、人工智能研究等方面具有一定的参考价值。

关键词: 微环谐振腔; 双稳态; 克尔非线性效应; 光存储

中图分类号: O 436.4 **文献标志码:** A

Bistability in hybrid micro-ring resonator for all-optical memory

WANG Ting^{1,2}, SHEN Weihong¹, SCHOENHARDT Steffen¹, ZHANG Qiming¹

(1. Institute of Photonic Chips, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In this paper, we propose a heterogeneous integrated waveguide platform. The bistable behavior of a micro-ring resonator is observed and analyzed, and the implementation of all-optical memory is shown. The proposed heterogeneous integrated waveguide has strong Kerr nonlinear effect, without the restrictions on thermo-optical effect and free-carrier lifetime. Pure Kerr nonlinear effect enables the ultra-fast all-optical switching. We designed a micro-ring resonator with high quality factor $Q = 77565$. The bistable behavior was simulated based on coupled mode theory (CMT), and an all-optical memory was realized under the pulse excitation with peak power of 474 fJ and pulse width of 20 ps. Besides, we demonstrated the wavelength addressable four-bit optical memory using four micro-ring resonators cascaded by wavelength division multiplexing.

收稿日期: 2023-03-08

基金项目: 上海张江国家自主创新示范区专项发展资金重大项目(ZJ2019-ZD-005)

第一作者: 王婷(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为基于微环谐振腔的光子突触。

E-mail: 1106753228@qq.com

通信作者: 张启明(1983—), 男, 教授, 研究方向为纳米光子学器件、光存储。E-mail: qimingzhang@usst.edu.cn

This paper investigates the bistability based on high Kerr nonlinear effect, which provides the possibility of achieving ultra-fast all-optical switching, and shows certain research significance on optical storage, optical switching, and artificial intelligence.

Keywords: micro-ring resonator; bistability; Kerr nonlinear effect; optical memory

引 言

光学双稳态广泛应用于光学开关、光学逻辑门、光学存储等方面,是集成光子学持续关注的一个话题。目前用于实现全光双稳态的主要几何结构是光子晶体^[1-4]和微环谐振腔^[5-7],这2个结构的双稳态现象都是利用自由载流子色散、热光效应、克尔非线性效应导致的谐振位移来产生的。基于互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide semiconductor, CMOS)兼容的绝缘体上硅(silicon-on-insulator, SOI)、氮化硅(Si_3N_4)材料的集成光学平台表现出优异的非线性光学性能。虽然SOI平台具有强大的模式约束性和较高的非线性效应,但在SOI微环中实现双稳态主要依赖于自由载流子色散和热光效应,克尔非线性影响非常弱。这导致光开关速度受到载流子寿命和热弛豫时间的影响,被限制在几十到几百纳秒内^[5,7-8]。 Si_3N_4 作为另一个CMOS兼容技术成熟的非线性光学集成平台,具有极低的波导损耗,可以实现高品质因子 Q 的谐振腔,使得非线性光学开关的脉冲持续时间低至3.9 ps^[9]。虽然 Si_3N_4 的热光效应明显低于硅,但与克尔效应相比,其热光效应仍占主导地位。人们还发现钙钛矿材料具有相对较大的三阶非线性^[10],可以应用于光调制器,这在集成光子学领域引起了极大的关注。

光学随机存储器(optical random access machine, ORAM)是一种不需要光电转化即可实现数据存储和读取的存储设备。20多年来,人们一直在研究具有非线性腔的光学双稳态开关和双稳态激光器来开发ORAM功能。双稳态开关比双稳态激光器消耗更少的功率,但是双稳态开关的存储时间通常是有限的^[11-12]。Nozaki等^[4]在InGaAsP光子晶体中实现了一个纳米腔,通过改变输入功率,切换输入光通过腔体的透射率,实现了44 ps的切换速度,同时解决了双稳

态开关存储时间有限的问题。

由于像锆钛酸铅^[13]和钛酸钡^[14]这样的钙钛矿材料具有相对较大的一阶非线性,可以使超快速的光调制器不受载流子流动性的限制,它们在集成光子学领域受到了极大的关注。同样,关于这些材料具有较大的三阶非线性的报道^[15-16]也鼓励人们进一步研究这些钙钛矿材料,以增强现有集成光子平台的非线性效应。

本文基于 Si_3N_4 /钙钛矿材料异质集成波导集成平台设计微环谐振器,研究了仅利用克尔非线性效应实现的光学双稳态特性,并利用波分复用技术展示了多位ORAM的应用能力。利用克尔光学双稳态特性,通过调制微环谐振腔的共振频率来实现数据的写入和读取,具有高速、低能耗的优点。基于克尔效应的超快响应、钙钛矿材料的强克尔非线性和微环谐振腔的高 Q 值,提出的 Si_3N_4 /钙钛矿异质集成波导微环谐振腔可实现较快的开关速度和较低的开关阈值。在能耗、尺寸以及切换速度的综合考虑与优化设计下,本文采用0.23 μm 厚的钙钛矿材料薄膜,0.3 μm 厚,1 μm 宽的 Si_3N_4 脊波导结构,半径为50 μm 的微环,在474 fJ脉冲激励下实现20 ps的切换时间。利用波分复用技术,将4个半径略有不同的微环串联,实现了四位光存储器,展示了微环ORAM的扩展能力。

1 异质集成波导结构设计

根据Alexander等^[13]采用的技术来制作 Si_3N_4 /钙钛矿异质集成波导,中间的低损耗衬基层可以直接沉积在 SiO_2 和 Si_3N_4 上。异质集成波导的截面如图1(a)所示,3 μm 厚的 SiO_2 基底上覆盖一层厚度为 d 的钙钛矿薄膜,材料折射率为2.3,顶层为0.3 μm 厚、宽度为 b 的 Si_3N_4 脊波导,折射率为1.99(输入光波长为1550 nm)。微环谐振腔通常使用单模波导,以保证谐振腔中只存在一个稳定的谐振模式。因此,首先对异质

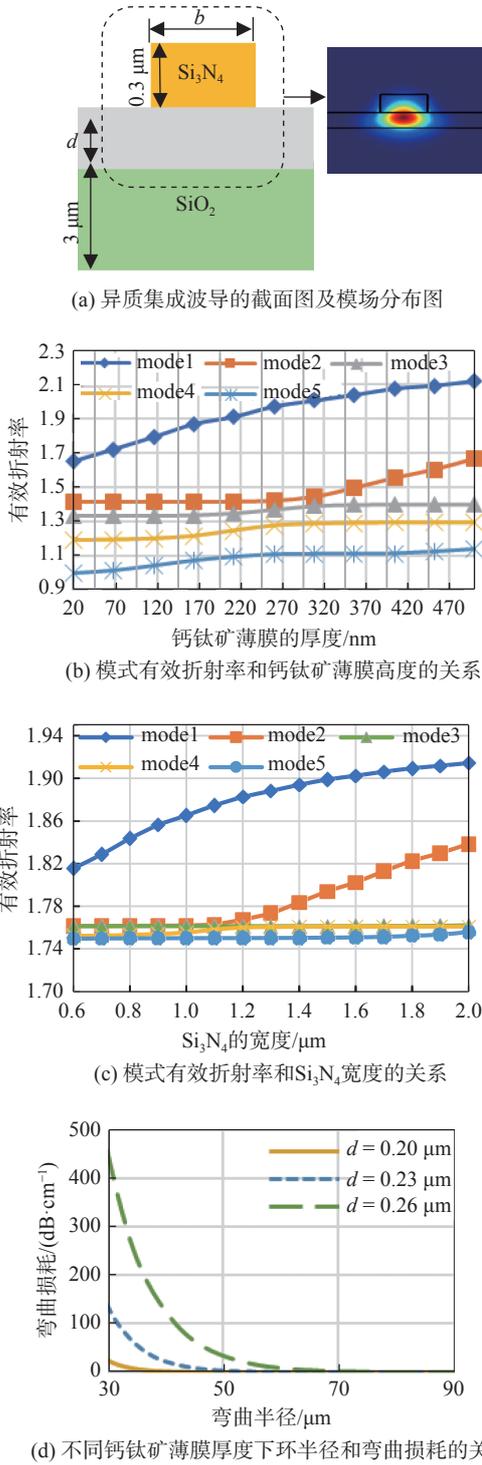


图 1 波导截面结构及单模波导的参数设计

Fig. 1 Schematics of waveguide cross-section and design of geometric parameters for single mode waveguide

集成波导进行单模设计。使用电磁仿真软件 Lumerical MODE 的 FDE solver 计算异质集成波导中的光场分布, 结果见图 1(a)。图 1(b)所示为异质集成波导中模式 1 至 5 之间的有效折射率

与钙钛矿薄膜厚度之间的关系, 随着钙钛矿薄膜厚度的增加, 模式的有效折射率增加, 异质集成波导中的模式数量也随之增加。当钙钛矿薄膜的厚度在 0.22~0.26 μm 时, 模式 1 的有效折射率接近于 Si₃N₄ 的有效折射率, 并且模式 1 的有效折射率在空间上和其他模式的有效折射率能有效分离开。

Si₃N₄ 波导的宽度也是影响单模波导设计的关键参数。Si₃N₄ 波导的宽度越小, 波导内的光模能量就越容易泄露, 产生损耗; Si₃N₄ 波导的宽度越大, 越能支持多模传输。因此, 有必要使 Si₃N₄ 波导在确保单模波导的条件下尽可能宽。图 1(c)所示为 Si₃N₄ 的宽度与不同模式的有效折射率的关系曲线, 当 Si₃N₄ 波导的宽度 $b = 1 \mu\text{m}$ 时, 可以实现性能理想的单模波导结构。

微环谐振器的品质因子 Q 主要由总损耗决定, 损耗越低, 器件的 Q 值越大。微环谐振腔的损耗主要包括吸收损耗、散射损耗、弯曲损耗和耦合损耗。吸收损耗主要由材料、带边吸收、自由载流子吸收引起。Si₃N₄ 波导和钙钛矿材料薄膜之间的吸收损耗约为 1 dB/cm^[13]。散射损耗是由波导表面的光散射引起的, 主要受加工条件影响。弯曲损耗是由于波导弯曲过大, 导致模式光的能量不能完全被限制在波导中, 部分模式光的能量溢出到波导的包层中, 从而产生损耗。微环谐振腔的微环半径会直接影响微环谐振腔的弯曲损耗, 它对微环谐振腔的性能非常关键。图 1(d)所示为钙钛矿材料薄膜厚度为 0.20 μm、0.23 μm 和 0.26 μm 时, 波导的弯曲损耗与微环半径的关系。在半径为 50 μm 时, 0.20, 0.23 和 0.26 μm 厚度的钙钛矿材料薄膜微环的弯曲损耗分别为 0.148, 3.571 和 36.767 dB/cm。相同钙钛矿材料薄膜厚度下, 微环半径越小, 产生的弯曲损耗越大; 相同半径时, 钙钛矿材料薄膜厚度越小, 损耗越低。

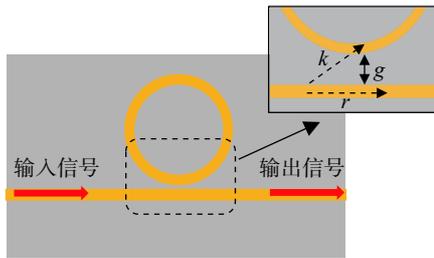
因此, 综合考虑波导的单模传输情况、弯曲损耗、尺寸大小等因素, 将钙钛矿材料薄膜的厚度设置为 $d = 0.23 \mu\text{m}$ 。在高强度光场条件下, 材料会展现出三阶非线性响应, 并以光学克尔效应为主, 由此引起的波导折射率改变量与光强成正比 $\Delta n = n_2 I$ 。对于异质集成波导来说, 光场主要限制在 Si₃N₄ 材料的波导脊和钙钛矿材料的平板薄膜层中, 如图 1(a)所示, 为了准确计算异

质集成波导的克尔非线性效应, 需要计算有效非线性系数 $n_{2,\text{eff}}$ 来综合考虑 2 种材料的非线性效应。根据文献 [17], 计算出本文混合单模波导的有效非线性系数 $n_{2,\text{eff}} = 3.7 \text{ m}^2/\text{W}$ 。同时, 根据模式的有效面积, 计算出波导模式的非线性参数 $\gamma = \omega n_{2,\text{eff}} / (c A_{\text{eff}}) = 1.9 \times 10^6 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, ω 是输入光的传输频率, c 是真空中光的传播速度, A_{eff} 是模式的有效面积。通常 Si 和 Si_3N_4 的非线性参数一般为 $3 \times 10^5 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 和 $1.2 \times 10^3 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ [18], 可见混合单模波导的非线性参数约是 Si 的非线性的 6 倍, 比 Si_3N_4 的非线性大了约 3 个数量级, 具有极强的非线性效应。

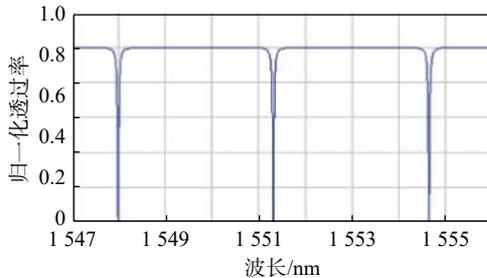
2 微环谐振腔结构设计

全通微环谐振腔是由总线波导和环形波导耦合而成, 如图 2(a) 所示, 微环的半径为 R , 环与总线波导的间距为 g 。当腔内的波长是 $2\pi\lambda$ 的整数倍时, 环内的光场将与总线波导的光场发生干涉, 形成腔内谐振。总线波导两端的传输率表达式为 [19]

$$T = \frac{I_o}{I_i} = \frac{u^2 - 2ur \cos \phi + r^2}{1 - 2ur \cos \phi + (ru)^2} \quad (1)$$



(a) 微环谐振腔结构示意图



(b) 透过率光谱图

图 2 微环谐振腔结构示意图和透过率光谱图

Fig. 2 Schematic diagram of micro-ring resonator and transmission spectrum

式中: $\phi = \beta L$, 是单程相移, 其中 β 是传播常数, L 是微环周长; u 是单程振幅传输系数, 它与功率衰减系数 α [1/cm] 的关系为 $u^2 = e^{-\alpha L}$, 包括了环内的传播损耗和耦合损耗; r 是自耦合系数, k 是交叉耦合系数, 在没有耦合损耗的情况下, $r^2 + k^2 = 1$ 。当相位 ϕ 发生 2π 的整数倍相移时, 耦合损耗等于自耦合系数 ($u = r$), 环形谐振腔发生共振, $T = 0$ 。图 2(b) 所示为半径 $R = 50 \mu\text{m}$, $g = 0.68 \mu\text{m}$ 时的透射率谱。图中展示的共振波长 $\lambda_{r1} = 1547.97 \text{ nm}$, $\lambda_{r2} = 1551.30 \text{ nm}$, $\lambda_{r3} = 1554.65 \text{ nm}$, 对应的 Q 值分别为 77 398, 77 565 和 77 732。

3 微环谐振腔的双稳态

微环谐振腔中的双稳态是一种光学非线性现象 [20-21], 当输入光强高于一定阈值时, 腔内折射率会受到非线性效应的影响 (如载流子色散、热光效应、克尔效应等) 而发生变化, 从而影响环内模式和总线波导的模式之间的耦合程度, 导致微环谐振光谱发生位移。在一定输入光场强度范围内, 腔内存在耦合程度相同的 2 种模式, 对应着双稳态的 2 种平衡态, 即稳定状态和不稳定状态。当微环谐振腔处于稳定状态时, 微环谐振腔的输出位于高状态 (on); 反之, 光信号会迅速衰减, 处于低状态 (off)。

根据归一化的耦合模理论 (coupled mode theory, CMT) [22], 对异质集成波导微环谐振腔的双稳态现象进行计算, 由于该异质集成波导的载流子效应和热效应可以忽略, 仅考虑了克尔非线性对双稳态的影响, 计算式为

$$\frac{da}{dt} = (i(\delta + \chi n) - 1)a + \sqrt{P} \quad (2)$$

$$\tau \frac{dn}{dt} = |a|^2 - n \quad (3)$$

式中: χ 是克尔效应的系数; n 是归一化的折射率偏差; a 是归一化的腔内场; $|a|^2$ 是归一化的腔内能量; τ 是归一化的时间常数; P 是总线波导耦合到环内的归一化能量, 对应于真正的输入功率 $P_{\text{in}} = (\Gamma_0^2 / \gamma) P$; Γ_0 是归一化参数, 满足 $1/\Gamma_0 = 2Q/\omega_0 = 2\tau_c$, 其中 Q 是微环谐振腔的品质因子, ω_0 是谐振频率, τ_c 是腔内的光子寿命。

在研究中, 有 2 个归一化的参数是至关重要的: 一个是输入光的频率失谐量 $\delta = (\omega_0 - \omega)/\Gamma_0$, 其中 ω 是输入频率; 另一个是归一化的时间常数 $\tau = \tau_k/(2\tau_c)$, τ_k 是实际的非线性反应时间。钙钛矿材料的 τ_k 小于 70 fs^[23], 是实现超快切换的基础。

通过求解上述方程, 得到不同频率失谐量下双稳态现象的功率范围, 如图 3 所示, P 是总线

波导耦合到环内的归一化能量, E 是环内的归一化电场强度。双稳态阴影区域内同一个输入对应着 2 个输出, 这个范围和频率失谐量紧密相关, 当失谐量越大, 实现双稳态的功率范围越大, 同时激发双稳态所需要的阈值功率也越大。频率失谐量 $\delta = 4.0$ 时, 对应的实际失谐波长 $\Delta\lambda = 40$ pm, 双稳态实际输入功率范围为 2~4.6 mW。

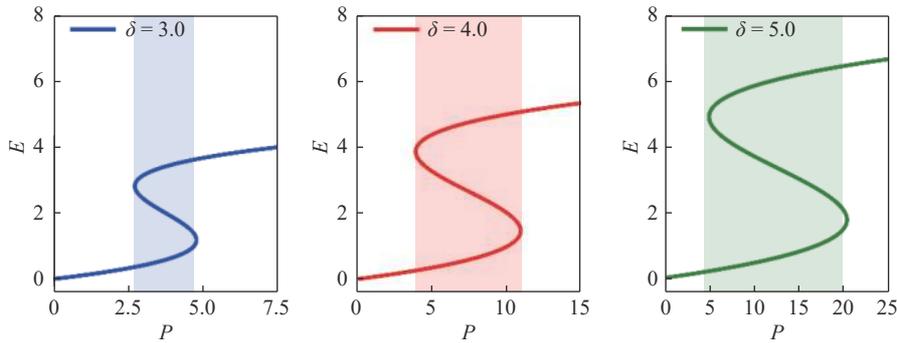


图 3 不同频率失谐量下的双稳态现象(归一化结果)

Fig. 3 Bistable behaviors at different frequency detuning

4 基于微环谐振腔的 ORAM 应用

利用微环谐振腔的双稳态特性实现了 ORAM 的功能。微环谐振腔存在多个共振频率, 当输入光信号与微环谐振腔的共振频率匹配时, 能量会在微环中得到积累, 导致光强变大。当共振频率

发生变化时, 光强也会随之发生变化。因此, 通过光学双稳态调制微环谐振腔的共振频率, 可以实现数据的写入和读取。图 4 所示为微环谐振腔作为 ORAM 的工作过程, 当输入的光偏置为 3.7 mW 时, 输出将维持在高状态(on), 实现存储功能; 当输入光在偏置功率基础上加入一个

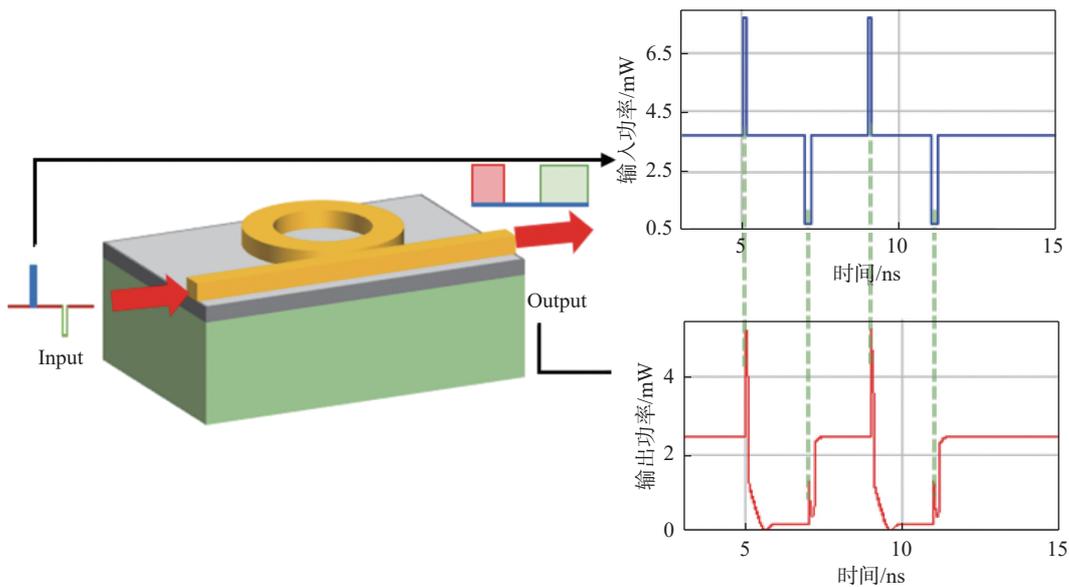


图 4 ORAM 三维立体结构示意图和输入输出信号

Fig. 4 Schematic diagram of ORAM three-dimensional structure and input and output signals

功率为 7.7 mW, 脉冲为 100 ps 的正脉冲, 输出将回到低状态(off), 实现擦除功能; 再给输入一个脉宽为 200 ps 的负脉冲, 输出将回到原来的高状态, 实现写入功能。on-off 切换的上升沿时间、下降沿时间分别为 390 ps 和 200 ps。因此, 通过输入正/负脉冲进行擦除/写入操作, 可以实现输出光的 on-off 切换, 输入脉冲消失之后仍保持该切换状态。当环的腔内能量达到一定值时, 就可以实现输出的高状态向低状态的转化。该结构在强克尔非线性作用下, 偏置功率为 3.7 mW, 脉冲宽度为 20 ps 时, 仅需要 474 fJ 的能量即可实现 on-off 状态的切换。

接下来, 利用微环谐振腔的波分复用功能,

将 4 个半径略有差别的微环在同一根总线波导上串联, 实现了一个波长可寻址的四位光存储器。如图 5 所示, 4 个微环的半径分别为 $R_1 = 50.000 \mu\text{m}$, $R_2 = 50.005 \mu\text{m}$, $R_3 = 50.010 \mu\text{m}$, $R_4 = 50.015 \mu\text{m}$ 。图 5 展示的四位 ORAM 实例中, 偏置功率为 3.7 mW, 脉冲宽度为 20 ps, 脉冲功率为 23.7 mW。输入信号为“1010”, 每一个比特位的信息分别加载在 4 路不同的波长中, 微环谐振腔初始状态均处在高状态(on), 输入信号“1”代表输入一个连续偏置光, 输入信号“0”代表输入一个正脉冲激励。经过级联的 4 个微环谐振腔后, 输出 4 路波长信号分别为“0101”, 实现了四位光切换与存储功能。

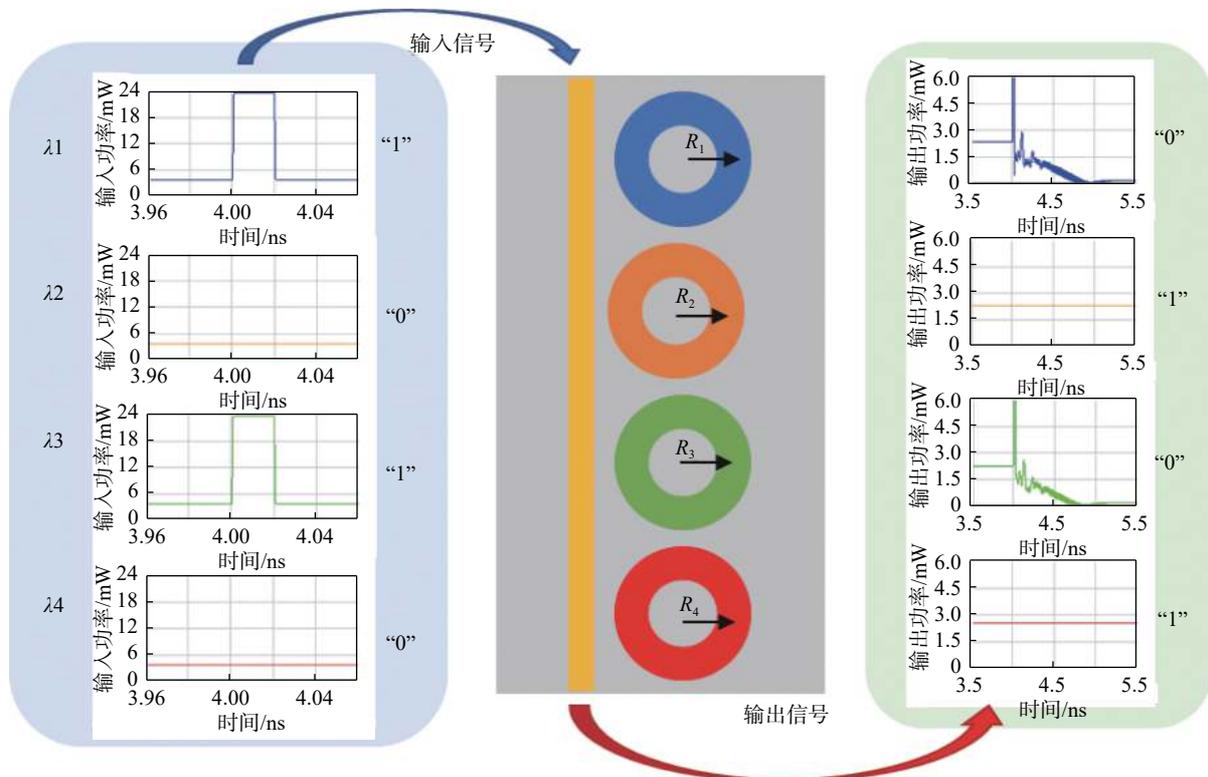


图 5 波长可寻址的四位光存储器结构图

Fig. 5 Schematic of wavelength-addressable four-bit optical memory

5 结 论

本文提出的混合单模波导具有极高的非线性参数 $\gamma = 1.91 \times 10^6 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$, 是硅光波导的 6 倍, 比 Si_3N_4 高出 3 个数量级。对异质集成波导进行了单模设计和弯曲损耗分析, 设计了一个高品质因子 $Q = 77\ 565$ 的微环谐振腔结构, 在

纯克尔非线性效应下讨论了双稳态现象。在脉冲功率为 474 fJ, 宽度为 20 ps 的脉冲激励下, 混合微环谐振腔实现了 ORAM 功能, 并通过波分复用的串联微环展示了一个波长可寻址的四位光存储器。本文证明了基于高克尔非线性效应的双稳态现象, 为实现超快切换速度提供了可能性, 在光存储、人工智能、调制器研究等方面有着一

定的参考价值。

参考文献:

- [1] NOTOMI M, SHINYA A, MITSUGI S, et al. Optical bistable switching action of Si high-Q photonic-crystal nanocavities[J]. *Optics Express*, 2005, 13(7): 2678 – 2687.
- [2] TANABE T, NOTOMI M, MITSUGI S, et al. Fast bistable all-optical switch and memory on a silicon photonic crystal on-chip[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(19): 2575 – 2577.
- [3] YANIK M F, FAN S H, SOLJAČIĆ M. High-contrast all-optical bistable switching in photonic crystal microcavities[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(14): 2739 – 2741.
- [4] NOZAKI K, SHINYA A, MATSUO S, et al. Ultralow-power all-optical RAM based on nanocavities[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(4): 248 – 252.
- [5] ALMEIDA V R, LIPSON M. Optical bistability on a silicon chip[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(20): 2387 – 2389.
- [6] PRIEM G, DUMON P, BOGAERTS W, et al. Optical bistability and pulsating behaviour in Silicon-On-Insulator ring resonator structures[J]. *Optics Express*, 2005, 13(23): 9623 – 9628.
- [7] XU Q F, LIPSON M. Carrier-induced optical bistability in silicon ring resonators[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(3): 341 – 343.
- [8] CHEN S W, ZHANG L B, FEI Y H, et al. Bistability and self-pulsation phenomena in silicon microring resonators based on nonlinear optical effects[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7454 – 7468.
- [9] LÜPKEN N M, HELLWIG T, SCHNACK M, et al. All-optical switching using transverse modes in integrated waveguides[C]//2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference. Munich: IEEE, 2017.
- [10] KONDO S, YAMADA T, YOSHINO M, et al. Revealing intrinsic electro-optic effect in single domain Pb(Zr, Ti)O₃ thin films[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(10): 102902.
- [11] KURAMOCHI E, NOZAKI K, SHINYA A, et al. Large-scale integration of wavelength-addressable all-optical memories on a photonic crystal chip[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(6): 474 – 481.
- [12] XIAOGANG T, JUN L, CHENYANG X. Thermal nonlinear effect in high Q factor silicon-on-insulator microring resonator[J]. *Optics Communications*, 2017, 395: 207 – 211.
- [13] ALEXANDER K, GEORGE J P, VERBIST J, et al. Nanophotonic Pockels modulators on a silicon nitride platform[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3444.
- [14] NIKOGOSYAN D N. Nonlinear optical crystals: a complete survey[M]. New York: Springer, 2005.
- [15] IZYUMSKAYA N, ALIVOV Y I, CHO S J, et al. Processing, structure, properties, and applications of PZT thin films[J]. *Critical reviews in solid state and materials sciences*, 2007, 32(3/4): 111 – 202.
- [16] YUST B G, RAZAVI N, PEDRAZA F, et al. Enhancement of nonlinear optical properties of BaTiO₃ nanoparticles by the addition of silver seeds[J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 26511 – 26520.
- [17] TIEN M C, BAUTERS J F, HECK M J R, et al. Ultra-low loss Si₃N₄ waveguides with low nonlinearity and high power handling capability[J]. *Optics Express*, 2010, 18(23): 23562 – 23568.
- [18] MOSS D J, MORANDOTTI R, GAETA A L, et al. New CMOS-compatible platforms based on silicon nitride and Hydex for nonlinear optics[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(8): 597 – 607.
- [19] BOGAERTS W, DE HEYN P, VAN VAERENBERGH T, et al. Silicon microring resonators[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(1): 47 – 73.
- [20] XIANG J L, TORCHY A, GUO X H, et al. All-optical spiking neuron based on passive microresonator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(15): 4019 – 4029.
- [21] VAN VAERENBERGH T, FIERS M, MECHET P, et al. Cascadable excitability in microrings[J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20292 – 20308.
- [22] ARMAROLI A, MALAGUTI S, BELLANCA G, et al. Oscillatory dynamics in nanocavities with noninstantaneous Kerr response[J]. *Physical Review A*, 2011, 84(5): 053816.
- [23] SUGITA A, MORIMOTO M, KAWATA Y, et al. Ultrafast optical response of Lead lanthanum zirconium titanate ceramics[C]//International Conference on Ultrafast Phenomena. Snowmass, Colorado United States: Optical Society of America, 2010: ThE2.

(编辑: 李晓莉)