

## 光梯度力驱动的纳米硅基光开关\*

林建潇<sup>1)2)</sup> 吴九汇<sup>1)2)†</sup> 刘爱群<sup>3)</sup> 陈喆<sup>1)2)</sup> 雷浩<sup>1)2)</sup>

1)(西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

2)(西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049)

3)(新加坡南洋理工大学电子电气学院, 新加坡 639798)

(2015年1月16日收到; 2015年2月3日收到修改稿)

通过一道光改变另一道光的传输路线是光子集成网络中重要而长远的目标, 然而, 由于硅材料的光学非线性较弱, 在硅材料上实现开关的全光控制难以实现. 因此本文提出了一种由光梯度力驱动的纳米硅基光开关, 实现了硅基光开关的全光控制. 该光开关由一个部分悬空的微环谐振器和一个交叉波导结构构成, 当通入一道控制光时, 悬空的微环谐振器在光梯度力的作用下发生弯曲, 微环谐振器的谐振波长随之发生变化, 从而实现光信号的传输路线发生改变. 该光开关利用纳米光子制造技术在标准绝缘体上硅晶圆上制造, 实验数据得出其最小消光比为 10.67 dB, 最大串扰为 -11.01 dB, 开关时间分别为 180 ns 和 170 ns. 该光开关具有尺寸小, 响应速度快, 低损耗和可拓展等优点, 在片上集成光路、高速信号处理以及下一代光纤通信网络中具有潜在应用.

**关键词:** 光开关, 光梯度力, 微环谐振器, 绝缘体上硅**PACS:** 42.65.Pc, 37.10.Vz, 42.60.Da, 77.55.df**DOI:** 10.7498/aps.64.154209

## 1 引言

光开关是一种具有一个或多个可选择的传输窗口, 可对光传输线路或集成光路中的光信号进行物理切换或逻辑操作的器件. 在光通信领域中, 硅基片上网络的构建使全光网络代替光电混合网络成为可能<sup>[1]</sup>. 光开关是光互连网络中关键的器件, 其作为连接各单元器件的枢纽, 具有网络管理、网络保护、网络恢复以及增强整体光互连网络能力的作用<sup>[2]</sup>. 目前研究的光开关大多基于以下原理实现, 有热光效应<sup>[3,4]</sup>、电光效应<sup>[5]</sup>、磁光效应<sup>[6]</sup>、静电力驱动<sup>[7]</sup>、光子晶体<sup>[8,9]</sup>以及光学非线性效应<sup>[10-15]</sup>. 其中光学非线性效应包括光克尔效应和双光子吸收效应是实现纳米硅光子全光开关的主要手段, 但是由于硅基材料的光学非线性较弱, 基于光学非线性效应的全光开关普遍具有阈值开关

功率过高(几瓦到几十瓦)或者抽运光需要垂直入射的问题, 这类光开关在集成光路中显然是不实用的. 最近的研究表明光力可以实现光波导纳米级别的致动<sup>[16]</sup>, 为纳米硅基全光开关的设计提供了一种新的方法.

光波导中的光力能够将纳米光子和纳米机械的优势进行有效地结合<sup>[16-18]</sup>, 光力的发现和理论的进一步完善大大促进了纳米光机械领域的发展. 最近的研究表明: 光学微腔, 尤其是微环谐振腔能够大大增强光场梯度, 从而使倏逝耦合波导中的光梯度力增大数个量级<sup>[19,20]</sup>. 微环谐振器作为光开关的基础单元具有结构简单、尺寸小、谐振峰陡峭、梳状传输谱等优点, 同时, 谐振腔对光场的增强还能有效地降低输入控制光的功率.

在此之前, 本课题组对于光梯度力驱动的光开关已经进行过相关的研究<sup>[21]</sup>, 但是之前提出的光开关并不具备可拓展性, 开关功能也只能实现一条

\* 长江学者和创新团队发展计划资助(批准号: IRT1172)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ejhwu@mail.xjtu.edu.cn

线路通断, 并不具备切换光路的功能, 这大大限制其在大阵列光开关和集成光路中的应用. 本文提出了一个主动式纳米硅基可拓展光开关, 该光开关由一个部分悬空的微环谐振器和一个交叉波导结构构成, 当在直波导中通入一道控制光时, 控制光能够耦合到微环谐振器当中, 在微环上产生光梯度力使微环发生弯曲, 微环的谐振波长也随之改变, 这时, 原本不满足谐振条件的信号光耦合到微环当中, 从而改变信号光的传输路线. 该纳米硅基光开关通过纳米光子制造技术在标准绝缘体上硅(SOI)晶圆上进行制造, 利用光机械的耦合实现光开关的全光控制. 通过理论和实验测试分析相结合的方法, 我们对该光开关进行了设计、制造和测试.

## 2 纳米硅基光开关研究

### 2.1 光开关设计

光开关的设计示意如图1所示, 该光开关由一个四分之一悬空的微环谐振器和一个交叉波导结构构成, 包含输入, 直通, 下载和加载四个光出入口(图1(a)), 光纤通过特制的夹子固定在可伐合金板上, 通过反锥形耦合器将光信号从光纤耦合到纳米光波导中, 微环谐振器的衬底一部分被刻蚀而悬空, 通过在微环中产生光力实现光路的切换. 光开关中微环谐振器的半径为15  $\mu\text{m}$ , 光波导和微环的横截面尺寸为宽 $\times$ 高(450 nm $\times$ 220 nm), 微环悬空部分和二氧化硅衬底之间的间距为200 nm.

图1(b)为光开关工作原理示意图, 当开关为“关”状态时, 信号光直接由左至右从直通端输出, 当开关状态为“开”时, 信号光被耦合到微环谐振器

当中并且在微环中得到增强, 接着耦合到邻近的直波导中, 最终由下载端输出. 微环谐振器的传输谱具有陡峭的谐振峰, 且成梳状分布(图1(c)), 其传输公式为

$$T_t(\lambda) = \frac{E_t}{E_{in}} = \frac{t_0 - t_0^2 t_1 A \exp(i\theta) + \kappa_0^2 t_1 A \exp(i\theta)}{1 - t_0 t_1 \exp(i\theta)}, \quad (1)$$

$$T_d(\lambda) = \frac{E_d}{E_{in}} = \frac{\kappa_0 \kappa_1 A^{0.25} \exp(i0.25\theta)}{1 - t_0 t_1 \exp(i\theta)}, \quad (2)$$

其中,  $T_t(T_d)$ 是直通端(下载端)的电场传输率,  $E_t(E_d)$ 是直通端(下载端)的电场幅值,  $E_{in}$ 为输入端的电场幅值,  $\kappa_x, t_x(x=0, 1)$ 分别为耦合系数和传输系数,  $A$ 为微环谐振器振幅传输系数,  $\theta$ 为光在微环中传输一个周后的相位延迟, 当输入光波长满足微环谐振条件时,

$$\theta = \frac{4\pi^2 r n_{\text{eff}}}{\lambda} = 2m\pi, \quad (3)$$

其中,  $n_{\text{eff}}$ 为模态的有效折射率,  $m$ 为任意整数值. 当输入光耦合到微环当中时, 环中的光由于相长干涉和内部反射逐圈建立强度, 形成回音廊模式, 光功率在微环中得到放大. 调节控制光波长 $\lambda_c$ 为微环谐振器某一谐振波长 $\lambda_{r2}$ , 信号光波长 $\lambda_s$ 稍大于另一谐振波长 $\lambda_{r1}$ . 当没有控制光输入时, 信号光 $\lambda_s$ 从输入端通入光波导中, 由于信号光波长 $\lambda_s$ 不满足微环谐振器的谐振条件, 直接由直波导传输至直通端输出; 当通入一道满足谐振条件的控制光, 控制光被耦合至微环谐振器中, 光功率在微环中得到放大并且在微环谐振器上产生向下的光梯度力, 光梯度力逐渐增大后使微环逐渐弯向二氧化硅衬底, 微环的有效折射率随着环的弯曲而增大, 与此

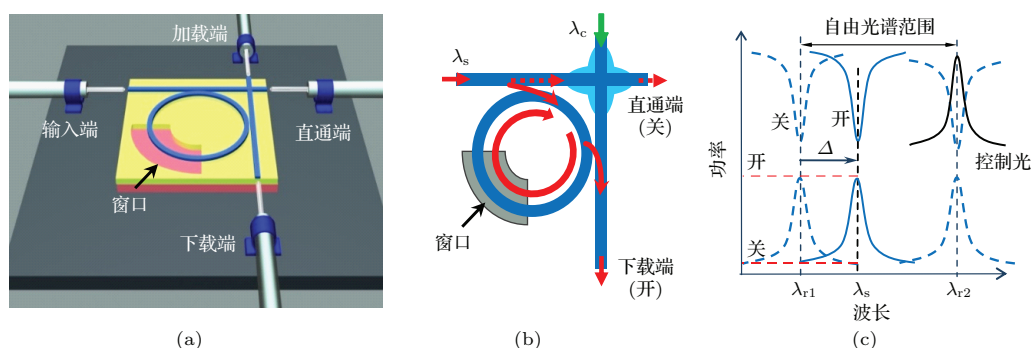


图1 (网刊彩色) 光开关示意图 (a) 结构示意图; (b) 原理示意图; (c) 光谱示意图

Fig. 1. (color online) Schematic illustration of the optical switch: (a) configuration of switching element based on microring resonator; (b) working principle of the switch; (c) the spectral response at different switching states.

同时, 微环的谐振波长 $\lambda_{r1}$ 也随之增大,  $\lambda'_{r1} = \lambda_{r1} + \delta\lambda_r$ , 其中 $\lambda_{r1}$ 为微环未发生弯曲时的谐振波长,  $\delta\lambda_r$ 为谐振波长变化量. 通过改变微环的谐振条件使其谐振波长 $\lambda_{r1}$ 增大到信号光波长 $\lambda_s$ , 此时, 原来不满足谐振条件的信号光被耦合至微环谐振器中, 之后耦合至下载端光波导, 光路由原来的直通端输出变为下载端输出. 对于直通端, 端口状态由“开”状态变为“关”状态; 对于下载端, 端口状态由“关”状态变为“开”状态.

## 2.2 光梯度力计算

微环中光功率可以表示为<sup>[22]</sup>

$$U = \frac{2/\tau_e}{4\pi^2 \left( \frac{\Delta}{\lambda_c \lambda_r} \right)^2 + \left( \frac{1}{\tau} \right)^2} E_1^2, \quad (4)$$

其中 $\lambda_c$ 为控制光波长,  $\lambda_r$ 为微环谐振器谐振波长,  $\Delta = \lambda_c - \lambda_r$ 为调谐量,  $E_1^2$ 为通入直波导的光功率,  $1/\tau$ 为振幅延迟常数,  $1/\tau_e$ 为衰减系数, 对于特定的微环, 其环内功率与输入直波导的光功率和波长相关. 在微环谐振器上产生的光梯度力可以表示为<sup>[23]</sup>

$$F_{\text{opt}} = -\frac{1}{n_{\text{eff}}} g_{\text{om}} U, \quad (5)$$

其中,  $g_{\text{om}} = -\partial n_{\text{eff}}/\partial g$ 为光机械耦合效率,  $g$ 为悬空环和衬底的间距. (5)式中的负号表示光力的方向指向衬底. 除了光梯度力在该系统中还有一个方向向上的机械回复力 $F_{\text{mech}}$ . 整个微环可以简化为弹簧质量块模型,  $F_{\text{mech}} = kx$ , 通过COMSOL多物理场耦合软件计算出其等效弹性系数曲线如图2所示, 其值为 $k = 0.146 \text{ N/m}$ . 由图可以看出光梯度力曲线和机械回复力曲线有a, b, c三个交点, 即光梯度力与机械回复力相等, 对应于微环的三个平衡状态.

为了分析此三个平衡状态的稳定性, 将光弹簧和系统刚度的概念引入. 类比于机械刚度, 光弹簧的刚度可定义为 $k_{\text{opt}} = \partial F_{\text{opt}}/\partial x$ . 根据(5)式, 可推导出光弹簧的刚度为

$$k_{\text{opt}} = \frac{U}{\lambda_{r0}^2} \left( 2 \left( \frac{\partial \lambda_r}{\partial x} \right)^2 - \lambda_{r0} \frac{\partial^2 \lambda_r}{\partial x^2} \right). \quad (6)$$

微环悬空部分的系统刚度可以表示为

$$k_{\text{syst}} = k_{\text{mech}} + \frac{U}{\lambda_{r0}^2} \left( 2 \left( \frac{\partial \lambda_r}{\partial x} \right)^2 - \lambda_{r0} \frac{\partial^2 \lambda_r}{\partial x^2} \right). \quad (7)$$

具有负刚度( $k_{\text{syst}} < 0$ )的平衡位置是不稳定的, 这是因为该位置与相邻的潜在平衡点相比具有更高的能量. 通过(7)式可知, 光梯度力和机械回复力三个交点中, b点为不稳定点, a, c两点为稳定平衡点, 这是光力驱动微环谐振器的双稳态现象, 在实际系统中由无光到通光的过程中, c点为显态, 表征微环的弯曲状态. 当控制光波长增大时, 微环弯曲量随其增大(c点沿着回复力直线增大), 直到b点与c点重合时(d点), 此时微环的谐振波长和输入光波长相等, 光力和微环变形都达到最大值.

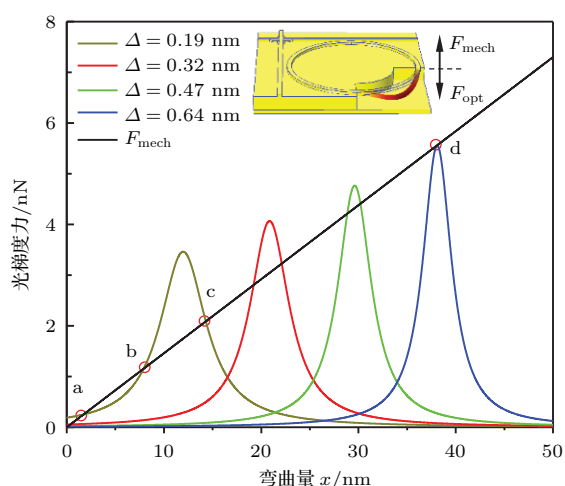


图2 (网刊彩色) 光梯度力随微环弯曲量变化图

Fig. 2. (color online) Simulation results of the optical force and mechanical force under different wavelengths of control light.

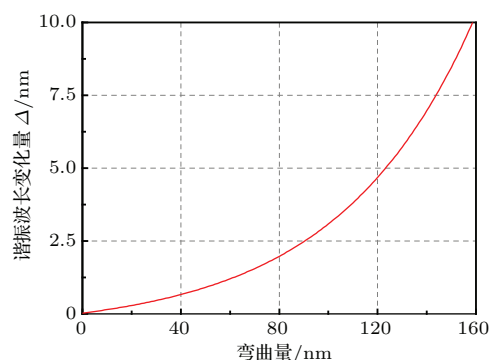


图3 谐振波长变化量随微环弯曲量变化图

Fig. 3. Simulation results of the resonance shift corresponding to the deflection of the ring.

微环的谐振波长随微环弯曲量的变化而变化, 通过其谐振条件可以得出谐振波长的变化规律(图3). 微环谐振波长随弯曲量增大而增大, 呈现指数函数的关系, 谐振波长变化率随微环弯曲量增大而增大. 当微环发生160 nm的变形时, 谐振波长

的变化量达到 10 nm. 正是由于微环谐振波  $\lambda_r$  随微环弯曲量发生变化, 所以弯曲量  $x$  可以直接通过检测传输普中谐振波长的变化  $\lambda_r$  得到, 为测量纳米尺度的位移量提供了有效的方法.

### 3 实验结果和讨论

该光开关利用纳米光子制造技术在标准绝缘体上硅晶圆 (220 nm 厚的硅结构层和 2  $\mu\text{m}$  厚的掩埋氧化物层组成) 上制造, 图 5(a) 是制造的纳米硅基光开关扫描电镜图, 其由一个微环谐振器和一个交叉波导结构构成. 为了保证单模传输, 光波

导和微环的横截面都为 450 nm  $\times$  220 nm. 微环和直波导之间的距离为 200 nm 以保证有效的耦合效率. 通过深紫外光刻, 等离子体干法刻蚀将光波导图案从光刻胶上转移至硅结构层 (作为导光层) 上, 之后, 通过 PECVD 沉积上一个 2  $\mu\text{m}$  SiO<sub>2</sub> 包层用以减少光波导传输的损耗和保证光波导两边结构对称. 为了保护刻蚀的器件层结构和释放衬底, 在 SiO<sub>2</sub> 层外还要沉积上一层 40 nm 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 最后, 将释放衬底的窗口由光刻胶转移至 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中, 通过 HF 蒸气将 SiO<sub>2</sub> 衬底进行刻蚀, 形成部分悬空的微环结构. 图 5(b) 为衬底释放之后的窗口的细节图, 悬空微环和衬底之间距离为 200 nm.

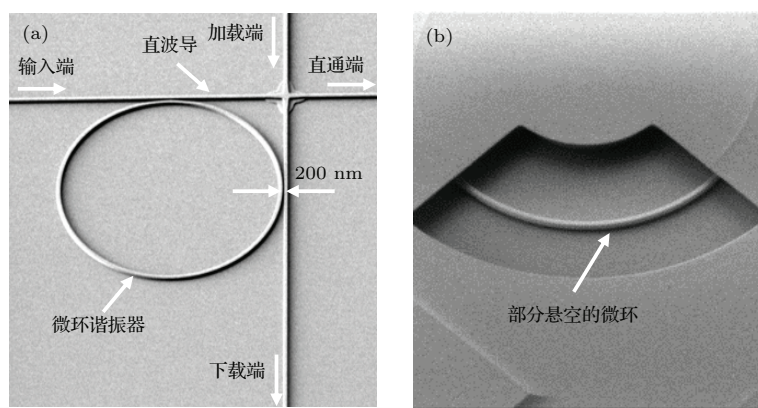


图 4 扫描电镜图 (SEM 图) (a) 未覆盖包层前的光开关; (b) 部分悬空的微环

Fig. 4. SEM images of the fabricated optical switch on the SOI wafer: (a) overview of the optical switch before cladding; (b) the free-standing arc of the ring resonator.

在实验中, 从光开关输入端通入一道大功率 (5 mW) 单波长控制光和一道小功率宽谱检测光, 大功率单波长控制光用来产生光力, 控制信号光出口的切换, 小功率宽谱光用来检测微环谐振器谐振波长的变化情况. 通入的光信号在直通端进行收集并送到光谱分析仪中分析. 测量的光谱如图 5(a) 所示, 图中黑色虚线为只通入宽谱检测光 (未通入控制光) 时的输出响应, 可以观察到微环谐振器相邻的两个本征谐振峰分别为  $\lambda_{r0} = 1596.06$  nm 和  $\lambda_{r1} = 1601$  nm, 半高宽为 0.097 nm, 相对应的微环谐振器的  $Q$  值为  $1.64 \times 10^4$ . 当通入控制光  $\lambda_c = 1595.5$  nm 时, 控制光不耦合到微环中, 谐振峰并不发生偏移. 当通入控制光满足谐振条件时, 控制光被耦合到微环谐振器中从而在微环上产生方向向下的光力, 微环的谐振波长随着微环弯曲量变化而变化, 可以观察到光谱上的谐振峰向右偏移, 控制光波长不同谐振峰偏移量  $\delta\lambda_r$  不同, 当通

入控制光  $\lambda_c = 1597.11$  nm 时, 谐振偏移量  $\delta\lambda_r$  达到最大值  $\delta\lambda_{r-\max} = 0.83$  nm.

实验结果和理论计算结果的比较如图 5(b) 所示, 通入控制光在微环中产生光力之后, 微环谐振器发生弯曲, 其有效折射率随之变化又反作用于光力的大小. 因此, 谐振偏移量会随控制光波长的增大而增大, 其增大的幅度和微环有效折射率  $n_{\text{eff}}$  随微环和衬底间距变化相关. 通过改变控制光的波长, 改变微环谐振器的弯曲量, 从而调节可用信号光的波长.

图 5(c) 为通入控制光前后, 直通端和下载端的开关响应. 可以观察到微环谐振器的梳状谐振特性,  $\lambda_{r3} = 1585.09$  nm 和  $\lambda_{r4} = 1589.93$  nm 是其中两个谐振峰, 当未通入控制光时, 信号光信号  $\lambda_{s1} = 1585.76$  nm 和  $\lambda_{s2} = 1590.67$  nm 不满足微环谐振条件, 直接在直波导中传输至直通端输出, 此时信号光到下载端的串扰为 -11.01 dB; 当通入控

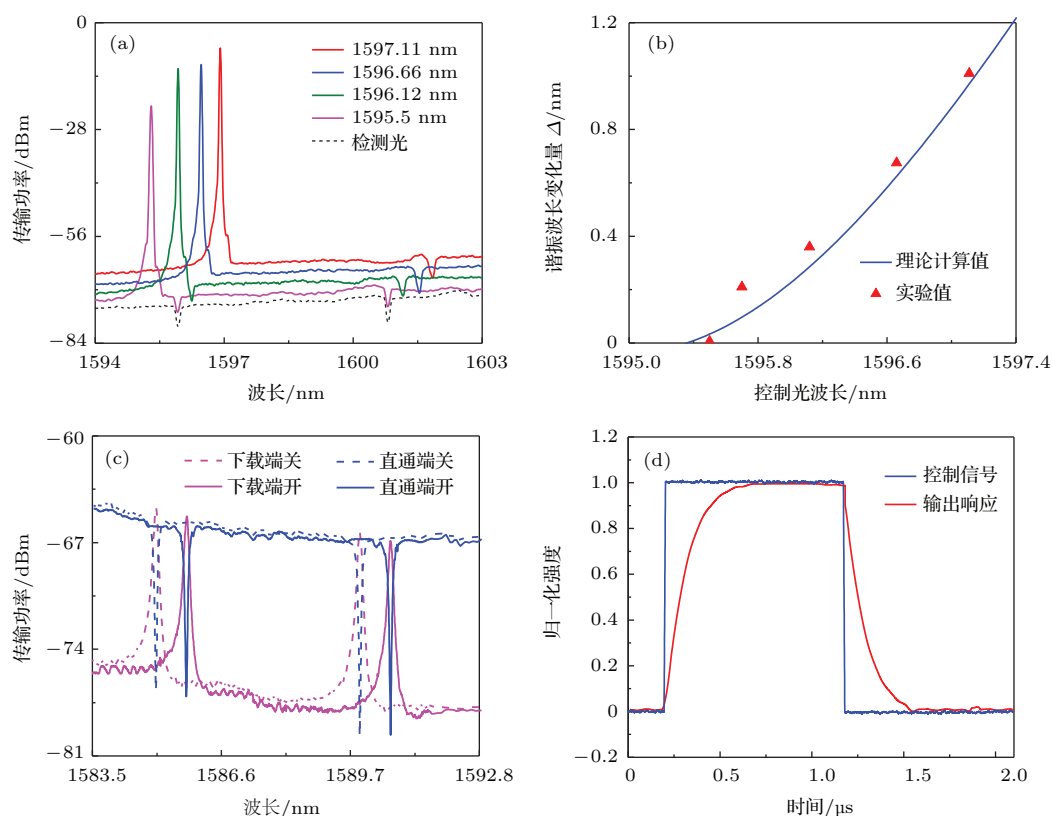


图5 (网刊彩色) 实验结果图 (a) 不同控制光下的光谱; (b) 谐振波长变化量与控制光波长关系; (c) 不同出口在开和关时的光谱; (d) 开关速度响应

Fig. 5. (color online) Testing results of the optical switch. (a) Transmission spectra of control light at different wavelengths after passing through the switch; (b) Simulation and experimental results of wavelength shift corresponding to different control lights; (c) Transmission spectra of signal light at drop port and thru port, without and with control light, respectively; (d) Switch dynamic response under a 0.5-MHz modulated light signal: waveforms of the control and output response signals of the switch.

制光时, 微环上产生光力使微环的谐振波长发生偏移,  $\lambda'_r = \lambda_r + \delta\lambda = \lambda_s$ , 微环谐振峰变为  $\lambda'_{r3} = 1585.76$  nm 和  $\lambda'_{r4} = 1590.67$  nm, 信号光波长满足谐振条件被耦合到微环谐振器中, 并由下载端输出, 完成光传播线路由直通端到下载端的切换, 此时信号光到直通端的串扰为  $-12.74$  dB. 在开关过程中, 直通端的消光比为  $10.67$  dB, 下载端的消光比为  $12.95$  dB.

在开关时间测试中, 使用可调谐激光器产生一道连续 (CW) 光, 并将该连续光调制为  $0.5$  MHz. 10% 的调制光被分光器分开作为响应的参考, 将剩下 90% 的调制光和检测光同时从输入端耦合到直波导中, 在下载端输出的光被收集到检测系统, 通过可调谐滤波器过滤掉多余的控制光, 光电转换器将光信号转化为电信号, 最后通入示波器中进行开关响应的测量. 归一化之后的开关时间响应如图 5 (d) 所示. 10%—90% 和 90%—10% 的开关时间

分别为  $180$  ns 和  $170$  ns, 该光开关时间大大快于传统的光开关. 同样可以观察到, 开关响应能够很快的恢复到稳定状态, 并无巨大的残留波动. 因此可以看出所设计的光开关较传统光开关具有快速的响应速度和稳定的响应特性.

## 4 结 论

本文提出了利用悬空的微环谐振器结构, 由光梯度力驱动的纳米硅基光开关. 从实验上验证了该开关的最小消光比为  $10.67$  dB, 最大串扰为  $-11.01$  dB, 开关时间为  $180$  ns 和  $170$  ns, 阈值开关功耗仅为  $5$  mW. 该开关利用和互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺兼容的纳米光子制造技术在 SOI 晶圆上制造, 所以其具有低成本和高度集成性的特点. 除此之外, 该开关还具有尺寸小、响应速度快、低损耗、可拓展成大阵列开关等特点, 而且利用该开关的梳状传输谱, 还可以通过波分复用技术拓展

该开关的传输带宽. 无论是在片上集成光路、高速信号处理还是全光通信网络中, 该开关都具有重要的潜在应用价值.

感谢新加坡南洋理工大学电子电气学院董斌博士以及蔡红博士的讨论.

## 参考文献

- [1] Saha E S, Manley D, Deogun J S 2009 *IEEE 3rd Int. Symposium on Advanced Networks and Telecom. Syst. (ANTS)* **1** 1
- [2] Wu M C, Solgaard O, Ford J E 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4433
- [3] Zhu W M, Zhong T, Liu A Q, Zhang X M, Yu M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 261106
- [4] Fang Q, Song J F, Liow T Y, Cai H, Yu B M, Lo G Q, Kwong D L 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 525
- [5] Dong P, Liao S, Liang H, Qian W, Wang X, Shafiha R, Feng D, Li G, Zheng Z, A Krishnamoorthy V, Asghari M 2010 *Opt. Lett.* **35** 3246
- [6] Didosyan Y, Hauser H, Reider A G 2002 *IEEE Trans. Magn.* **38** 3243
- [7] Lin L Y, Goldstein E L, Tkach R W 1998 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10** 525
- [8] Teo S H G, Liu A Q, Zhang J B, Hong M H, Singh J, Yu M B, Singh N, Lo G Q 2008 *Opt. Express* **16** 7842
- [9] Tanabe T, Notomi M, Shinya A, Mitsugi S, Kuramochi E 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 151112
- [10] Espinola R L, Tsai M C, Yardley J T, Osgood R M Jr. 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 1366
- [11] Almeida, Vilson R, Barrios, Carlos A, Panepucci, Roberto R, Lipson, Michal 2004 *Nature* **431** 1081
- [12] Dong P, Preble SF, Lipson M 2007 *Opt. Express* **15** 9600
- [13] Först M1, Niehusmann J, Plötzting T, Bolten J, Wahlbrink T, Moormann C, Kurz H 2007 *Opt Lett.* **32** 2046
- [14] Waldow M, Plötzting T, Gottheil M, Först M, Bolten J, Wahlbrink T, Kurz H 2008 *Opt. Express* **16** 7693
- [15] Wen Y H, Kuzucu O, Hou T, Lipson M, Gaeta A L 2011 *Opt Lett.* **36** 1413
- [16] Thourhout D V, Roels J 2010 *Nat. Photonics.* **4** 211
- [17] Weis S, Rivie're R, Del\_eglise S, Gavartin E, Arcizet O, Schliesser A, Kippenberg T J 2010 *Science* **330** 1520
- [18] Li M, Pernice W H P, Tang H X 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 223901
- [19] Lee B G, Biberman A, Sherwood N-Droz, Poitras C B, Lipson M, Bergman K 2009 *Lightwave J Technol.* **27** 2900
- [20] Yu Y F, Zhang J B, Bourouina T, Liu A Q 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 093108
- [21] Cai H, Dong B, Tao J F, Ding L, Tsai J M, Lo G Q, Liu A Q, Kwong D L 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 023103
- [22] Little B E, Chu S T, Haus H A, Foresi J, Laine J P 1997 *Lightwave J Technol* **15** 988
- [23] Wiederhecker G S, Chen L, Gondarenko A, Lipson M 2009 *Nature* **462** 633

# A nano-silicon-photonic switch driven by an optical gradient force<sup>\*</sup>

Lin Jian-Xiao<sup>1)2)</sup> Wu Jiu-Hui<sup>1)2)†</sup> Liu Ai-Qun<sup>3)</sup> Chen Zhe<sup>1)2)</sup> Lei Hao<sup>1)2)</sup>

1) (School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3) (School of EEE, Nanyang Technological University, Singapore 639798)

( Received 16 January 2015; revised manuscript received 3 February 2015 )

## Abstract

Using light to dynamically and stably redirect the flow of another beam of light is a long-term goal for photonic-integrated circuits. However, it is challenging to realize a practically all-optical switching device in silicon owing to its weak optical nonlinearity. Major published work on all-optical switches were using single-photon absorption and two-photon absorption, which requires ultrahigh switching energy. This paper presents a nano-silicon-photonic all-optical switch driven by an optical gradient force, in which a fast switching speed with low power consumption is obtained. Each switching element is composed of a waveguide crossing connection and a micro-ring resonator. The ring resonator is side-coupled to a double-etched waveguide crossing, while the micro-ring resonator is partially released from the substrate and becomes free-standing. When the “drop” port is in “OFF” state, the wavelength of the signal light from the “input” port does not satisfy the resonant condition in the micro-ring. Therefore, light is mainly transmitted to the “thru” port without control light. When a control light is loaded to the “add” port, of which the wavelength satisfies the resonance condition in the micro-ring, a strong optical gradient force is generated by the induced evanescent optical field. The freestanding arc of the ring is then bent down to the substrate, leading to a cavity resonance wavelength shift. As a result, the signal light is diverted to the “drop” port and the corresponding transmission state is switched to the “ON” state. The optical switch is fabricated by nano-photonic fabrication processes using standard silicon-on-insulator (SOI) wafer. The waveguide structures have a width of 450 nm and a height of 220 nm for a single mode transmission; the outer radius of the ring in the switching element is 15  $\mu\text{m}$ ; the coupling gap between the ring and the nano-waveguide is 200 nm; the system is fabricated through two-step lithography and plasma dry etching processes while the free-standing arc is released by undercutting the buried oxide layer.

A switching time of 180 ns(rise) and 170 ns (fall) is experimentally demonstrated, which is much faster than that of conventional optical switches. The present optical switch can reach a high extinction ratio (10.67 dB) and a low crosstalk (−11.01 dB). In addition, the proposed switch has the advantages of compact size and low power consumption. Potential applications of this optical switch include photonic integrated circuits, signal processing, and high speed optical communication networks.

**Keywords:** optical switch, optical gradient force, ring resonator, SOI

**PACS:** 42.65.Pc, 37.10.Vz, 42.60.Da, 77.55.df

**DOI:** 10.7498/aps.64.154209

<sup>\*</sup> Project supported by the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (Grant No. IRT1172).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [ejhwu@mail.xjtu.edu.cn](mailto:ejhwu@mail.xjtu.edu.cn)