

基于半导体材料微纳波导全光逻辑门的研究进展

翟耀[†] 孙阳 徐学俊 陈少武

(中国科学院半导体研究所 集成光电子国家重点实验室 北京 100083)

摘要 全光逻辑门是全光计算以及全光信号处理系统中关键的光子器件. 随着互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺的发展, 基于半导体材料微纳波导全光逻辑门已经成为集成光学领域中的重要方向; 尤其是硅基光子集成器件在近些年成为了国际研究热点. 文章主要对基于绝缘体上的硅(SOI)和Ⅲ-V族化合物材料不同波导结构(马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder interferometer)微环谐振腔和条形波导结构)的全光逻辑门的研究进展进行了介绍, 并且在器件的工作速率和功耗方面, 分别对上述基于SOI和Ⅲ-V族化合物材料三种不同波导结构的全光逻辑门进行了分析和比较.

关键词 全光逻辑, 微环谐振腔, 非线性光学, 双光子吸收, 半导体微纳波导

ALL-optical logic gates based on micro-nanometer semiconductor waveguides

ZHAI Yao[†] SUN Yang XU Xue-Jun CHEN Shao-Wu

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

Abstract All-optical logic gates are key photonics devices in all-optical computing and signal processing systems. With the development of CMOS techniques, all-optical logic gates based on micro-nanometer semiconductor waveguides have become an important research field in integrated photonics. In particular, silicon-based integrated photonic devices have attracted great attention. We shall describe various kinds of all-optical logic gates based on silicon-on-insulator and Ⅲ-V group compounds, which have three different waveguide structures, namely, the Mach-Zehnder interferometer, microring resonator and strip waveguide. An analysis and comparison of these logic gates with regard to operation speed and power dissipation will be presented

Keywords all-optical logic, microring resonator, nonlinear optics, two-photon absorption, micro-nanometer semiconductor waveguide

1 引言

全光逻辑门是未来光计算中的基本逻辑单元, 是关键的核心理器件. 类似于电子学中的逻辑门, 全光逻辑门是以波导中的光子作为信息的载体, 通过控制泵浦光来调制信号光的输出. 波导的各个输入输出端的对应关系可以构成一个真值表, 其中逻辑状态(“0”或“1”)由端口的泵浦光和信号光的光功率决定. 之所以称为全光逻辑门, 是因为信号光由泵浦光

调制, 即用光来控制光^[1]. 与电光调制方式相比, 全光调制避免了信号在光-电-光之间的转换, 从而可以获得更高的调制速率以及更低的功耗, 并且基于半导体材料微纳波导的全光逻辑门可以在更高集成度的单芯片集成中扮演更重要的角色. 除了可以实现上述的组合逻辑, 全光逻辑门也可以实现时序逻辑, 进行全光信号处理. 例如, 在高速大容量光通

2009-04-27 收到初稿, 2009-06-04 收到修改稿

[†] 通讯联系人. Email: zhaiyao@semi.ac.cn

信网络中,全光逻辑门可以用来实现头信号提取和全光路由^[2]等功能.因此,全光逻辑门也是未来全光通信网络中的关键器件.

近些年来,国际上报道了基于半导体光放大器(SOA)不同逻辑功能全光逻辑门^[3,4].由于SOA对光信号有很强的增益效果,基于SOA的全光逻辑门主要是光功率光波在SOA中表现出的光学非线性效应,如交叉增益调制(XGM, cross-gain modulation),交叉相位调制(XPM, cross-phase modulation),四波混频(FWM)来实现全光逻辑功能.在国内,黄德修教授^[5,6]等人已经利用四波混频效应实现与门,非门,或非门等逻辑结构的运算,其工作速率可达40Gb/s.

2 全光逻辑基于的非线性光学效应

全光逻辑门的工作原理主要是直接或者间接地利用了波导中的非线性光学效应^[7-9]来实现全光控制.同时由于等离子色散效应^[10],材料的折射率和吸收系数都会发生变化,因此可以对波导中的光子进行调控.

克尔效应是指介质折射率随光功率的变化而改变,其变化关系如公式1所示,

$$n(I) = n_0 + n_2 \cdot I \quad (1)$$

其中, n_2 为克尔系数, I 为光强.利用克尔效应(Kerr效应),可以在介质波导中用高功率的光对另一束光进行相位调制.由于折射率随光功率的瞬时变化时间很短,因此可以获得比较高的调制速率.然而,利用克尔效应的全光调制要求控制光有很高的功率.

双光子吸收效应是指半导体材料可以同时吸收两个能量光子($1/2E_g < E_{\text{光子}} < E_g$)激发价带电子形成电子空穴对.以硅为例,当通信波段1550nm光波在硅波导中传播时,光子的能量小于硅的禁带宽度,一个光子不足以激发价带电子形成电子空穴对.但是,当光波功率较高时,价带电子可以同时吸收两个光子,激发到导带产生电子空穴对.由于等离子色散效应,材料的折射率和吸收系数分别会随着载流子浓度变化.

$$\Delta n = - \left(\frac{e^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 \epsilon_0 n} \right) \left[\frac{\Delta N_e}{m_e^*} + \frac{\Delta N_h}{m_h^*} \right] \quad (2)$$

$$\Delta \alpha = \left(\frac{e^3 \lambda^2}{4\pi^2 c^3 \epsilon_0 n} \right) \left[\frac{\Delta N_e}{m_e^* \mu_e} + \frac{\Delta N_h}{m_h^* \mu_h} \right] \quad (3)$$

其中, $\Delta N_e, \Delta N_h$ 分别表示电子空穴浓度变化; m_e^*, m_h^* 分别表示电子空穴的有效质量; μ_e, μ_h 分别表示电子空穴迁移率.

3 全光逻辑门的研究进展

3.1 SOI 基微环谐振腔的 AND/NAND 逻辑门^[11]

IV族材料硅不仅在微电子领域中处于绝对的统治地位,而且硅以其自身的优势,在集成光学领域同样占有举足轻重的地位,拥有广阔的发展前景.尽管Si的非线性光学性能较弱,但是SOI这种高折射率差的材料可以对光波有很强的限制作用,因此可以作为理想的光波导材料.并且,它与成熟的CMOS工艺相兼容,成本较低,成为集成光学领域中理想的材料.

近些年来,微环谐振腔以其特有的优势成为研究热点,并且已经报道了小尺寸、高Q值、高消光比的微环谐振腔^[12].当强的泵浦脉冲在微环谐振腔中传播时会引起双光子吸收,从而产生电子空穴对.根据等离子色散效应,由公式(2)可以看出,这些光生载流子会使波导的折射率降低,从而改变谐振腔的谐振波长.此时,微环谐振腔对新谐振波长的光波具有很高的耦合效率,而之前在谐振腔中振荡的光波则透射出微环谐振腔,沿直波导出.如果该逻辑门是AND门(与门),则应把信号光调谐到微环谐振腔的谐振波长上;如果该逻辑门实现NAND门(与非门)逻辑功能,则应把信号光调谐到蓝移后的谐振波长上.在SOI基微环谐振腔AND/NAND逻辑门中,其波导结构如图1所示.其具体实现方式如下所述.

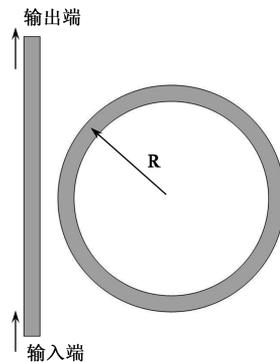


图1 SOI基微环谐振腔示意图

微环谐振腔在两个谐振波长(1550.7和1568.7nm)上的Q值分别为11076和9804.全光逻辑门的时序图如图2所示,(a)(b)分别表示两束控

制光,当两束控制光同时为高光强时,即真值对应为“1”时,对应于 AND 门逻辑结构可以在信号接收端探测到信号光.但是,只要有其中任意一束控制光功率降低,对应的真值是“0”,那么此时的控制光总光强低于阈值条件则不能改变微环谐振腔的谐振波长,信号光在谐振腔中谐振,从而探测器对信号光的响应为“0”,其对应的时序如图(c)所示.相反,对于 NAND 逻辑门,信号光的波长开始调谐到微环谐振腔蓝移后的谐振波长上,当两束控制光均为“1”时,总光强超过阈值,产生的自由载流子足以使微环谐振腔的谐振波长蓝移,此时微环谐振腔对于信号光有很强的吸收,从而末端探测器对信号光的响应为“0”;当有其中一束或两束控制光较弱不足以使微环谐振腔谐振波长蓝移,此时微环谐振腔对信号光的吸收较弱,末端探测器对信号光的响应为“1”,从而实现 NAND 逻辑功能.该实验中全光逻辑门的工作速率为 310Mbit/s,消光比约 10dB.

值得注意的是,TPA 效应(双光子吸收效应)产生的自由载流子寿命依然是限制器件工作速率的主要因素.尽管载流子的复合产生的热会改变硅的折射率,但是由热导致折射率改变的时间量级是 us,远远大于基于自由载流子色散效应的全光开关时间.因此,可以忽略热效应对器件开关时间的影响.为了提高器件的工作速率,各国研究人员已经采用一些办法来降低自由载流子寿命来提高器件的工作速率. Preble^[13] 等人在该器件结构的基础上引入 p-i-n 结构,利用电场对自由载流子的抽取把自由载流子的寿命降低到 50ps 左右. 2007 年 Först^[14] 等人利用离子注入的方法,将氧离子注入到微环谐振腔中,把自由载流子寿命降低到 55ps,可以把工作速率提高到 20Gbit/s.

3.2 基于 III-V 族化合物(GaAs, InP 等)的全光逻辑门

III-V 族化合物(如 GaAs, InP 等)本身是直接带隙材料,并且具有较高的非线性光学系数.与此同时,通过改变其各组分的成分可以调节 III-V 族化合物的禁带宽度和折射率,使其工作在 1310/1550nm 的通信窗口.当其禁带宽度为 0.8eV 时, GaAs 和 InP 的折射率分别为 3.4 和 3.1.用这种较高的折射率的材料制作的光学波导可以获得更好的光学限制因子,并且可以减小器件的尺寸,提高器件的集成度.因此,III-V 族化合物可以作为理想的光波导材料.下面我们将以基于 InP 微环谐振腔的 AND/NAND 逻辑门为例,介绍基于 III-V 族化合

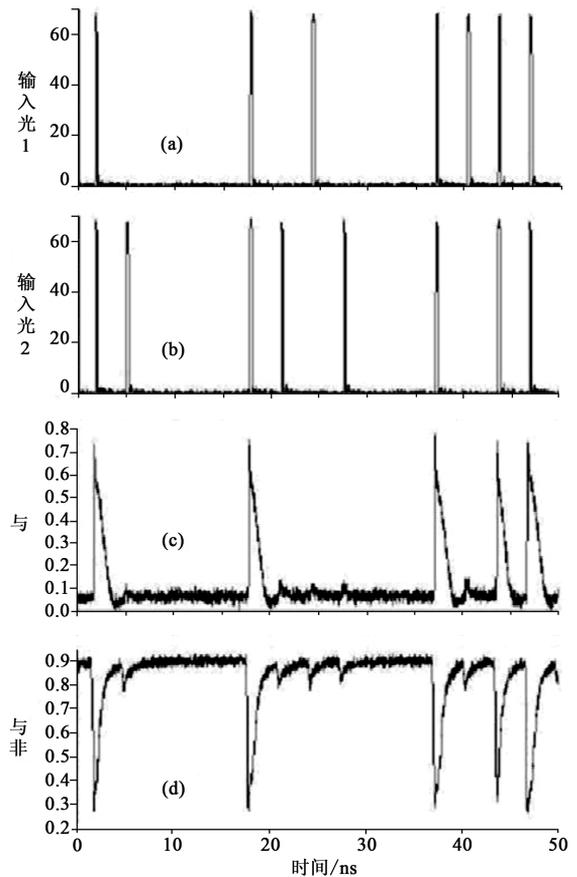


图 2 SOI 基微环谐振腔全光逻辑 AND/NAND 门信号时序图物的全光逻辑门^[15].

III-V 族化合物微环谐振腔型 AND/NAND 全光逻辑门的工作原理与 SOI 基微环谐振腔型 AND/NAND 全光逻辑门的工作原理相同:都是利用光生载流子的等离子色散效应改变材料的折射率,从而对光波进行调制.当强的泵浦脉冲在微环谐振腔中传播时会引起双光子吸收,从而产生电子空穴对.根据等离子色散效应,这些光生载流子会使波导的折射率降低,从而改变谐振腔的谐振波长.此时,微环谐振腔对新谐振波长的光波具有很高的耦合效率,使其在微环谐振腔中谐振,而之前在谐振腔中振荡的光波则透射出微环谐振腔,沿直波导导出.

图 3 是 InP 基跑道型微环谐振腔的 SEM 图.实验中的微环谐振腔是侧向耦合跑道型微环谐振腔,微环半径 10um,耦合区长度为 3um,波导由 GaInAsP 组成.该微环谐振腔的谐振波长为 1550nm,消光比为 20dB, 3dB 带宽 1.8nm.由于受到自由载流子寿命的限制,测得器件的开关时间为 100ps,这意味着该与门的工作速度能够达到 10Gbit/s.另外,利用 GaAs 基微环谐振腔实现的与门和与非门开关时间为 35ps,工作速度可达到 30Gbit/s.

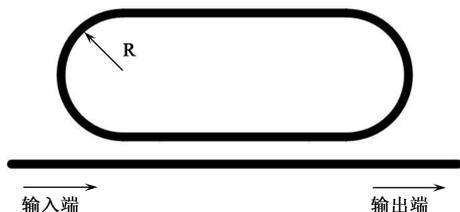


图3 InP基跑道型微环谐振腔示意图

在单环的基础上,可以对称引入2个级联微环谐振腔^[16],实现全光逻辑功能.引入级联结构可以提供更多的信道,这样可以更好地分离某一信道的信号,防止信号的负反馈和串扰,并且可以减少其他分离元件的数量,如环行器、衰减器等.图4是2个级联对称微环谐振腔形成的NOR门(或非门)逻辑门.

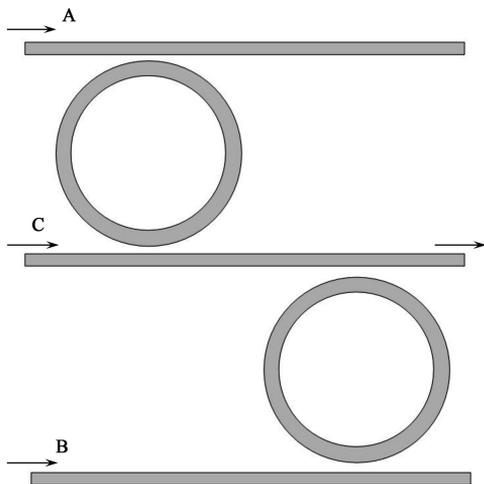


图4 级联微环谐振腔全光逻辑门的结构示意图(A,B是泵浦光,C是信号光)

如图4所示,其中A和B为输入的泵浦脉冲,波长略微偏离谐振波长,C为连续的信号光,其波长调到微环谐振腔谐振波长蓝移后的另一个谐振波长上.因此A和B中只要有一个“1”输入,就可以使得谐振波长蓝移到信号光的波长上,得到“0”输出,从而实现或非门的逻辑功能.在该波导结构中,自由载流子寿命约为40ps,器件工作速率可达25Gbit/s.

3.3 SOI基slot波导MZI结构的全光逻辑门

将非线性光学效应引入到MZI波导结构中,改变波导的相位差,利用干涉效应也可以实现全光逻辑功能.研究人员从理论上给出了模拟结果,下面我们将介绍基于SOI基slot波导MZI结构的全光XOR逻辑门(异或逻辑门)^[17].

研究人员将slot波导引入到MZI(马赫-岑德干涉仪)中,作为获得非线性光学效应的部件.全光逻辑XOR门结构示意图如图5所示,在MZI的两个波导臂上分别插入非线性光学结构.非线性光学结构是个slot波导,它由两个窄间距脊型波导组成,在这个空气缝中间填充着低折射率的Si-nc. Si-nc可以表现出很强的非线性光学特性,它的Kerr系数比硅高两个数量级,并且slot波导对光场的强限制作用,同时可以增强非线性Kerr效应.利用这个效应,可以使光波产生 π 相移,通过在合束端发生干涉相应实现XOR逻辑功能.XOR逻辑的真值表是,对应于两个信号,当其相同时逻辑输出“0”;当两个信号逻辑不同时,逻辑输出“1”.所以在这个逻辑门中,当信号光A,B同时出现或不出现时,控制光经过Y型分支器经过MZI的两臂会产生 π 的相位差,从而在输出端口发生相消干涉,得到“0”的逻辑值;当A,B中有一个信号出现时,控制光会在非线性光学部分产生 π 相移,从而在输出端口发生相长干涉,得到“1”的逻辑值.

因为材料的折射率随控制光功率的变化是瞬时的,所以这种结构可以满足高速信号处理的要求.通过减少模式体积提高光功率密度可以降低器件功耗.导模的有效面积随着slot波导的宽度减小而减小,并且其有效面积也与邻近Si波导的尺寸结构有关;通过对波导结构的优化来减小器件功耗.

利用谐振腔结构可以进一步减小器件尺寸并降低器件的工作功率^[18].器件结构如图6所示.微环谐振腔对光强有增强的效果,并且利用谐振腔,改变很小的相位就可以得到很大的耦合效率的改变,因此引入微环谐振腔结构可以降低泵浦光功率.

3.4 条形波导的全光逻辑NOR门^[19]

上文中已经提到,双光子吸收效应可以产生自由载流子.根据公式(3),材料对光波的吸收系数增大,因此可以利用这个机理对波导中的信号光进行振幅调制来实现逻辑“或非”功能.图7(c)所示的就是或非门的结构示意图.其中脉冲光P1和P2耦合到一起作为泵浦光,一束连续光作为信号光.只要两个输入泵浦光信号中有一个是“1”,信号光就会由于泵浦光的双光子吸收引起较大的损耗.如果两个输入泵浦光信号都是“0”,信号光在波导中传输时就不会产生额外的非线性损耗,这样就能够实现或非逻辑门.图7(a)中所示的是上述的工作原理.器件实现过程中所要注意的是要合理地选择泵浦光的功率大小,并配合数字“0”和“1”所表示的功率水平的大

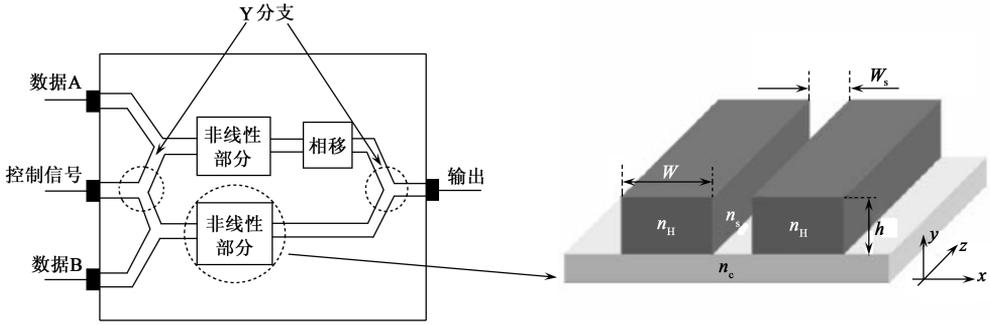


图5 SOI基 slot 波导 MZI 结构全光逻辑 XOR 门

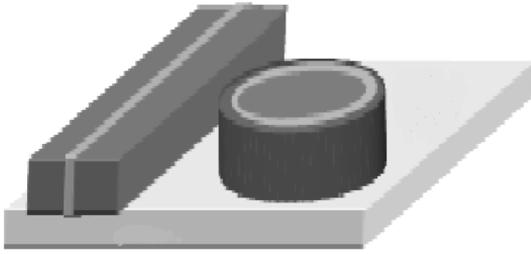


图6 边耦合 slot 微环谐振腔结构示意图

小,以满足图 7(b)所示的或非逻辑门的真值表。

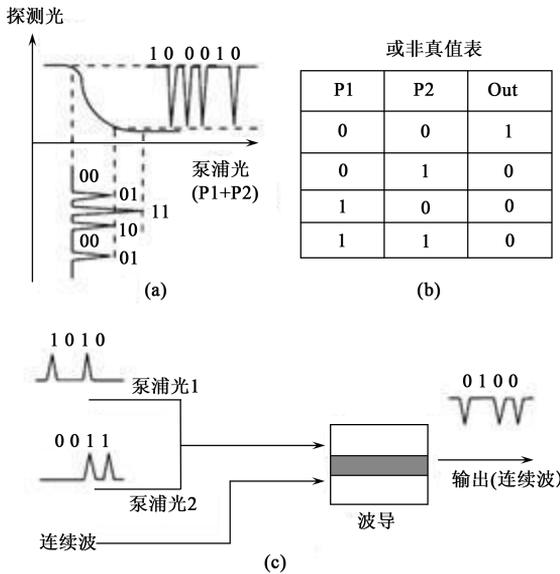


图7 或非门的(a)工作原理;(b)真值表;(c)结构示意图

在这种实现逻辑门功能机制中,载流子的积累是限制器件最大工作速度的主要因素. 实验中已经测得上述或非门能够在超过 10Gbit/s 的实际信号上工作,进一步降低信号脉宽有助于减少载流子的积累,从而提高器件工作速度。

4 讨论和总结

近些年来,光子集成器件有了迅猛发展,尤其是伴随着 CMOS 工艺的发展和成熟以及硅基材料巨大的成本优势,硅基光子集成成为了光子集成器件发展的主流方向,并且具有广阔的应用前景. 上文中介绍的几种硅基全光逻辑门主要是利用硅的非线性光学效应对波导中的光进行调控. 下面将对其进行综合比较。

基于微环谐振器结构的全光逻辑门多数是利用微环谐振腔的谐振波长对波导折射率的敏感性,通过改变谐振波长调整其对信号光的耦合效率,从而达到全光逻辑的功能. 由于在微环中会产生谐振,所以微环谐振腔对特定波长的光波相当敏感,微环材料折射率很小的改变即可改变谐振波长,因此用微环谐振腔的全光逻辑门的响应非常快,并且可以获得很高的调制深度. 同样是因为谐振增强的效果,以及 SOI 材料对光场的强限制性,可以降低器件的工作功率. 与此同时,微环谐振器的尺寸很小,可以大大地提高集成度. 然而,波导侧面刻蚀的粗糙度会增加光波的散射,加上 Si 的非线性光学效应较弱,这些因素要求很高功率的泵浦光. 因此,具有高品质因子高消光比的微环谐振腔是获得较低泵浦光功率的关键. 另外,由于是利用等离子色散效应,光生载流子的寿命依然是限制器件工作速度的主要因素. 因此,减小自由载流子的寿命将是提高器件工作速度的关键方法。

MZI 全光逻辑门的工作原理主要是利用相位调制,利用控制光在波导臂中产生的 Kerr 效应改变信号光的相位,使在两个波导臂中传播的信号光产生相位差,在 Y 分支口出口发生干涉效应实现逻辑功能. 在 MZI 结构中,利用 Kerr 效应的全光逻辑门可以获得更高的工作速度,这是因为其工作速率不

会受到载流子寿命的限制.最后,MZI 结构相对简单,在工艺制作方面也容易加工,这也是 MZI 结构的另外一个优势.

对于条形波导全光逻辑门,主要是利用产生的自由载流子对光强较弱的信号光进行直接吸收,因此,它的工作速率主要受到产生的自由载流子寿命所限制.并且,为了获得较高的消光比,所需的自由载流子浓度较高,这无疑增加了器件对泵浦光功率的需求.

以 GaAs, InP 为代表的 III—V 族化合物材料,是直接带隙晶体,并且其禁带宽度可以通过改变化合物组分进行调节.另外,III—V 族化合物材料的非线性光学系数较高,在 III—V 族化合物材料波导中可以获得较强的非线性光学特性,因此,III—V 族化合物材料是微纳波导的非常好的材料.并且,随着键合技术的发展,III—V 族化合物材料波导可以实现硅基混合集成,这无疑拓宽了 III—V 族化合物材料在集成光学领域的发展.

综上所述,基于半导体材料微纳波导结构光子集成器件是集成光学中非常重要的发展方向.基于半导体材料微纳波导全光逻辑门是光计算的核心关键器件,同时也是全光通信网络中的关键器件,并且更高速率、更低功耗、更高集成度的全光逻辑门将在未来的光计算和全光通信网络中扮演着至关重要的角色.

参考文献

- [1] Almeida V R, Barrios C A, Panepucci R R *et al.* Nature, 2004, 431: 1081
- [2] Xu Q F, Michal L. Optics Letters, 2006, 31: 341
- [3] Kim J H, Jhon Y M, Byun Y T *et al.* IEEE Photonics Technology Letters, 2002,14 (10):1436
- [4] Kim S H, Kim J H, Yu B G *et al.* Electronics Letters, 2005, 41 : 1027
- [5] Dong J J, Zhang X F, Xu J *et al.* Optics Communications, 2008,281 :1710
- [6] Dong J J, Zhang X L, Fu S N *et al.* IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2008,14:770
- [7] Oskar J, Painter Q L, Govind P A. Optics Express, 2007, 15: 16604
- [8] Yamada H, Shirahe M, Chu T *et al.* Japanese Journal of Applied Physics 2005,44 (9A):6541
- [9] Usechak N, Dekker R, Forst M *et al.* Journal of Physics D: Applied Physics, 2007,40(14):R249
- [10] Richard A S, Brian R B. Journal of Quantum Electronics, 1987,23 (1):123
- [11] Xu Q F, Lipson M. Optics Express, 2007,15 :924
- [12] Baehr-Jones T, Hochberg M, Walker C *et al.* Applied Physics Letters, 2004,85 : 3346
- [13] Preble S R, Xu Q F, Schmidt B S *et al.* Optics Letters, 2005, 30: 2891
- [14] Forst M, Niehusmann J, Plotzing T *et al.* Optics Letters, 2007, 32: 2046
- [15] Ibrahim T A, Grover R, Kuo L C *et al.* IEEE Photonics Technology Letters, 2003,15: 1422
- [16] Ibrahim T A, Amarnath K, Kuo L C *et al.* Optics Letters, 2004, 29: 2779
- [17] Sanchis P, Cuesta-Soto F, Blasco J *et al.* "All-optical MZI XOR logic gate based on Si slot waveguides filled by Si—nc embedded in SiO₂," 2006 3rd IEEE International Conference on Group IV Photonics,2006,81—83:263
- [18] Sanchis P, Blasco J, Martinez A *et al.* Journal of Lightwave Technology, 2007,25:1298
- [19] Liang T K, Nunes L R, Tsuchiya M *et al.* Optics Communications, 2006,265 (1):171

• 读者和编者 •

《中国大百科全书·物理学》(第二版)邮购信息

《中国大百科全书·物理学》(第二版)收条约 1700 条,图表 1400 多幅,200 多万字,精装 16 开,638 页,全彩印刷,订价 185 元.为方便《物理》的读者订阅该书,经与出版社协商,《物理》编辑部获得该书的代理发行权,并以 150 元/本的优惠价(8 折,含邮费)发行,欢迎各位读者向编辑部订阅.订购款汇款方式:

1、邮局汇款

地址:北京 603 信箱,邮编 100190

收件人:《物理》编辑部

附言:大百科全书

2、银行汇款

户名:中国科学院物理研究所

帐号:30948821—250101040005699

开户行:农行北京科院南路支行

又:汇款时请注明“《物理》大百科全书”

请您汇款后及时发邮件到:physics@iphy. ac. cn,告知收件人详细地址、发票抬头等详细订购信息,以便书籍及时、准确的寄到您手里.

咨询电话:010—82649029,82649266