

doi:10.3788/gzxb20134212.1473

绝缘体上硅微环谐振腔电光调制器的分析与最优设计

韦丽萍¹, 王永华¹, 臧俊斌³, 崔丹凤¹, 李艳娜¹, 刘耀英¹, 薛晨阳^{1, 2}

(1 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

(2 中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051)

(3 中北大学 朔州校区, 山西 朔州 036000)

摘要:针对高频电光调制器的应用需求,提出了一种基于绝缘体上硅微环谐振腔的 P-I-N 型电光调制器.利用散射矩阵法描述了微环谐振腔谐振特性机理,结合等离子体色散效应中载流子浓度对硅有效折射率变化的影响,系统分析了微环谐振腔电光调制器的理论模型.在此基础上,利用 Rsoft 仿真软件对脊型波导截面光场分布进行了仿真分析,得到了光场局域性能较优的脊型纳米波导微环谐振腔设计;结合 Sentaurus TCAD 仿真软件对不同掺杂浓度下的 P-I-N 型二极管性能进行了仿真计算,理论得出了 Q 值仅为 5×10^3 时频移量达 58.74 GHz 的微环谐振腔最优电光调制器结构,为电光调制器的深入研究提供了理论参考.

关键词:等离子体色散效应;微环谐振腔;电光调制器;脊型波导;P-I-N 型二极管

中图分类号:TN252; TN256

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)12-1473-5

Analysis and Optimum Design of Silicon-on-insulator Micro-ring Resonator Electro-optic Modulator

WEI Li-ping¹, WANG Yong-hua¹, ZANG Jun-bin³, CUI Dan-feng¹, LI Yan-na¹,
LIU Yao-ying¹, XUE Chen-yang^{1, 2}

(1 Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

(2 Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China,
Taiyuan 030051, China)

(3 North University of China, Shuozhou, Shanxi 036000, China)

Abstract: Aiming at application requirements of high-frequency electro-optic modulators, a P-I-N type electro-optic modulator based on SOI resonator has been proposed. Describing the resonance characteristic of micro-ring resonator via the Scattering Matrix Method, combining the variation of effective refractive index of silicon resulted from carrier concentration changing, the plasma dispersion effect, analyzing the theoretical model of the micro-ring resonator electro-optic modulator systematically. Based on the simulation and analysis of the cross-section optical field distribution of rib waveguide by Rsoft simulation software, a design of rib waveguide micro-ring resonator with better performance of optical field confinement has been obtained. Furthermore, the performance of the P-I-N type diode for different doping concentrations has been simulated by Sentaurus TCAD simulation software. Finally, a blue shift of 58.74GHz is achieved from the theoretical model. It is demonstrated that the optimum design of the electro-optic modulator is reasonable and meaningful in further study of electro-optic modulator.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61076111)资助

第一作者:韦丽萍(1988-),女,硕士,主要研究方向为光波导电光调制器. Email:weiliulu666@163.com

导师(通讯作者):薛晨阳(1971-),男,教授,博士,主要研究方向为半导体薄膜光学、新型微米纳米器件. Email:xuechenyang@nuc.edu.cn

收稿日期:2013-07-11;录用日期:2013-10-16

Key words: Plasma dispersion effect; Micro-ring resonator; Electro-optic modulator; Rib waveguide; P-I-N type diode

0 引言

随着集成光学的迅猛发展,绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)微环谐振腔作为光子集成电路中的重要功能部件,因其与互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)工艺兼容且具有滤波选频特性等,已经广泛地应用于光源^[1]、光学滤波器^[2-3]、光调制器^[4-6]、光学传感器^[7]、非线性光学部件^[8-9]等光器件中.硅基光调制器主要是利用硅材料的热光效应、电光效应^[10]等,产生波导折射率的改变,从而对光信号进行调制^[11].由于微环谐振腔的谐振特性可大大增强折射率变化灵敏度,保证高速调制,因此基于SOI微环谐振腔的光调制器吸引了国内外研究人员的广泛关注.其中利用热光效应制备的波导器件其制作工艺简单,并可实现较高的消光比,但是受热扩散和散热的限制,因而响应速度较慢.电光型调制器件由于其超高速的优势,在高速光调制器和光开关的制作中倍受青睐.电光型调制器主要利用硅的等离子体色散效应,利用自由载流子浓度的变化引起吸收系数的变化来改变硅材料的有效折射率,对于波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的光,当载流子浓度达到 $10^{18}/\text{cm}^3$ 时,折射率变化即可达到 -0.001 ,足以用于制备电光调制器.

因此本文主要基于SOI微环谐振腔结构,利用硅材料的等离子体色散效应进行P-I-N型电光调制器的设计,系统地分析论证了此种调制器的可行性,并在此基础上提出了最佳结构设计.

1 理论分析

1.1 微环谐振腔理论分析

SOI微环谐振腔是整个调制器的核心结构,其谐振特性与波导结构的有效折射率变化有着直接的联系,使其具有作为调制器的优越性.

利用Yariv的方法^[12]来分析微环谐振腔的谐振特性,光在微环谐振腔中的传输如图1.

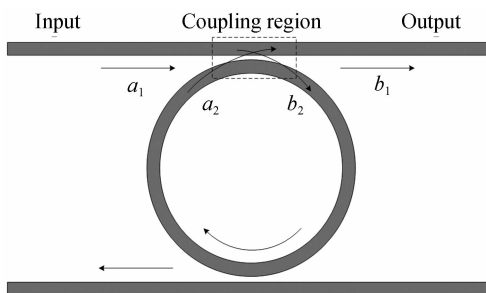


图1 微环谐振腔耦合原理

Fig. 1 The coupling schematic of micro-ring resonator

首先,假设在高品质耦合谐振的情况下,光波只沿一个方向传播,且耦合结构几乎无损耗.

然后,通过散射矩阵^[13],用两个常量 t 和 k 来描述耦合

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & \kappa \\ -\kappa^* & -t^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 a_1 和 a_2 分别是波导和微环的输入光信号振幅, t 是传输系数, k 为耦合系数, b_1 和 b_2 分别为波导和微环的输出光信号振幅.其中,传输系数 t 与耦合系数 κ 的关系为

$$|t|^2 + |\kappa|^2 = 1 \quad (2)$$

绕微环一周之后的传输表示为

$$a_2 = K_1 b_2 \exp(j\theta) \quad (3)$$

K_1 代表绕微环传输一周的传输效率, θ 是绕环一圈的相移.由式(1)、(2)和(3)得 b_1 与 a_1 的关系为

$$\frac{b_1^2}{a_1^2} = \frac{K_1^2 + |t|^2 - 2K_1|t|\cos\theta}{1 + K_1^2|t|^2 - 2K_1|t|\cos\theta} \quad (4)$$

为进行归一化计算处理,将输入功率 $|a_1|^2$ 单位化.并将相移 θ 表示成传输常量与绕微环一周的光程 L 的乘积,则式(4)可写成

$$|b_1|^2 = \frac{K_1^2 + |t|^2 - 2K_1|t|\cos\left(\frac{2\pi n_c L}{\lambda}\right)}{1 + K_1^2|t|^2 - 2K_1|t|\cos\left(\frac{2\pi n_c L}{\lambda}\right)} \quad (5)$$

式(5)即微环谐振腔的输出功率表达式.其中, n_c 是波导的有效折射率.根据式(5)可得微环谐振腔透射谱线,如图2.图中设定微环半径为 $10\ \mu\text{m}$, $K_1 = 0.94$ (94%传输效率,相应的光波导损耗为 $0.27\ \text{dB}$),传输系数 $t = 0.96$, $n_c = 3.476$.由图还可以计算出其 Q 值约为 5×10^3 .

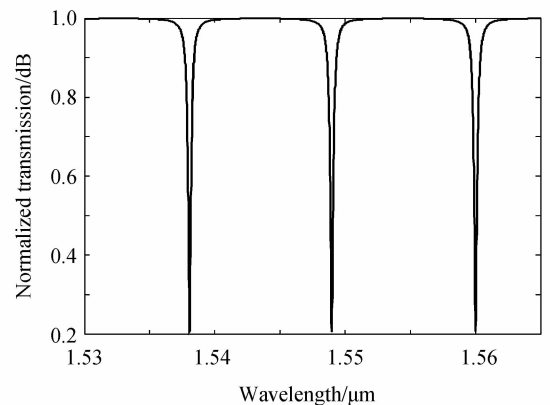


图2 半径 $10\ \mu\text{m}$ 的微环谐振腔输出透射谱线

Fig. 2 The transmission spectrum of $10\ \mu\text{m}$ radius micro-ring resonator

1.2 硅等离子体色散效应

硅等离子体色散效应主要是指在硅半导体中由

于自由载流子浓度的改变,从而引起了材料折射率系数改变,具体的参量关系最早源于 Soref 的经验公式. 根据 Soref 等利用折射率和光吸收谱的实验结果得出的折射率和吸收系数变化的经验公式^[14-15]

$$\Delta n = -\left(\frac{e^2 \lambda}{8 \pi^2 c^2 \epsilon_0 n}\right) \left[\frac{\Delta N_e}{m_{ce}^*} + \frac{\Delta N_h}{m_{ch}^*}\right] \quad (6)$$

$$\Delta \alpha = \left(\frac{e^3 \lambda^2}{4 \pi^2 c^3 \epsilon_0 n}\right) \left[\frac{\Delta N_e}{m_{ce}^{*2}} \mu_e + \frac{\Delta N_h}{m_{ch}^{*2}}\right] \quad (7)$$

式中的 e 为电子电荷量、 ϵ_0 为自由空间介电常量、 n 为材料的折射率系数、 m_{ce}^* 为自由载流子中电子的有效质量、 m_{ch}^* 为空穴的有效质量. 而目前对此色散效应的应用研究大部分集中在通信光波段范围内,因此,对于波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 的折射率系数变化函数和自由载流子光谱吸收函数 Soref 经验公式简化为

$$\Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h = -\left[8.8 \times 10^{-22} \cdot \Delta N_e + 8.5 \times 10^{-18} \cdot (\Delta N_h)^{0.8}\right] \quad (8)$$

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_e + \Delta \alpha_h = 8.5 \times 10^{-18} \cdot \Delta N_e + 6.0 \times 10^{-18} \cdot \Delta N_h \quad (9)$$

式中 Δn_e 和 $\Delta \alpha_e$ 分别为自由电子浓度 ΔN_e 变化时折射率系数和吸收系数的变化量; Δn_h 和 $\Delta \alpha_h$ 分别是自由空穴浓度 ΔN_h 变化时折射率系数和吸收系数的变化量,各参量的下表 e 和 h 分别表示自由载流子的电子和空穴.

根据 Soref 等的经验公式,采用 MATLAB 进行仿真直观得出了自由电子与空穴对 Δn (折射率系数变化) 的影响关系,其对应参量关系图如图 3.

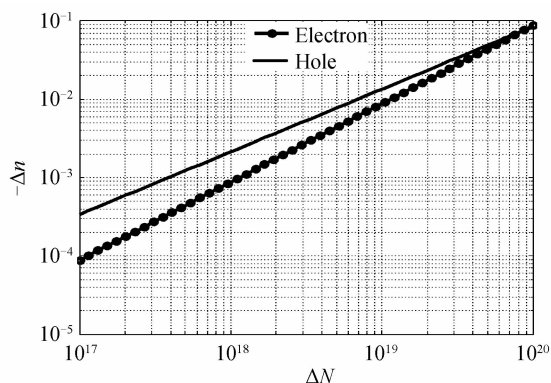


图 3 有效折射率差 Δn 随载流子浓度变化 ΔN 的关系
Fig. 3 The relationship between effective refractive index difference and carrier concentration changes

从仿真计算结果图可知当掺杂浓度达到 $10^{18}/\text{cm}^3$ 以上,折射率系数的改变便可达 10^{-3} . 且有效折射率系数随着掺杂浓度的增加而减小. 曲线图谱中的交叉点是由于电子和空穴对折射率系数的影响程度不同所引起的.

假设半径为 $10 \mu\text{m}$ 的微环谐振腔的有效折射率改变 10^{-3} , 通过式(5)对微环谐振腔特性的描述可得,谐振腔的谐振谱线将发生 0.48 nm 的频移,如图 4. 其中实谱线对应的有效折射率为 3.476 ,虚谱线对应的有效折射率为 3.475 ,由图可得,当有效

折射率减小 10^{-3} 时,微环谐振腔的透射谱线发生蓝移 0.48 nm ,即频移量为 59.11 GHz ,消光比为 11.71 dB ,调制深度为 0.81 ,满足调制器的要求.

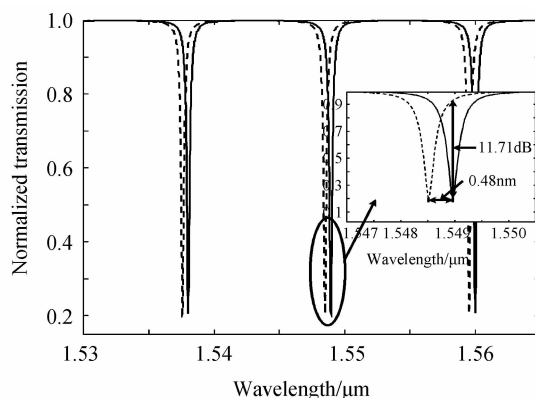


图 4 半径 $10 \mu\text{m}$ 微环谐振腔有效折射率减小 10^{-3} 理论蓝移为 0.48 nm

Fig. 4 The theoretical blue shift of $10 \mu\text{m}$ radius micro-ring resonator when the effective refractive index decreasing 10^{-3}

综上所述,硅材料的有效折射率随自由载流子浓度的增大而减小,这就导致了微环谐振腔的谐振谱线蓝移,且对于半径为 $10 \mu\text{m}$ (Q 值约为 5×10^3) 的微环谐振腔,其有效折射率减小 10^{-3} 时理论频移量为 59.11 GHz ,即可满足电光调制器的需求. 由于 Q 值随着微环半径的增大而增大,因此,对于半径更大、 Q 值更高的微环谐振腔,调制效应将更明显. 这就在理论上系统地分析论证了硅基电光调制器的可行性.

2 仿真设计与实现

为在微环谐振腔中实现等离子体色散效应,需要在波导两侧进行离子注入形成 P-I-N 结,因此采用脊型波导微环谐振腔作为基本结构. 脊型波导 P-I-N 型二极管电光调制区结构示意图如图 5 所示, H' 为平板高度.

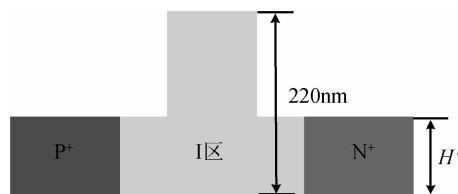


图 5 波导区 P-I-N 结构图

Fig. 5 P-I-N structure in the waveguide

由于当平板高度较高时,脊型波导的对光场的局域能力较弱,光场向两边的平板分散;当平板高度逐渐减小时,趋近于矩形波导,光场的局域能力逐渐增强. 因此,利用 Rsoft 软件的 BMP 工具对不同平板高度的脊型波导光场分布进行了仿真. 针对目前广泛应用的顶层硅厚度为 220 nm 的 SOI 材料,波

导脊宽 500 nm 时,分别设置平板高度为 40 nm、50 nm、60 nm、70 nm、80 nm 和 90 nm. 通过分析对比,得到平板高度小于 60 nm 时,光场主要集中在脊区,平板区域分散较少,脊型波导对光场的局域能力较强;当平板高度大于 60 nm 时,平板区域光场较分散,脊型波导对光场的局域能力较弱,如图 6. 因此,脊型波导的平板高度应尽量小于 60 nm.

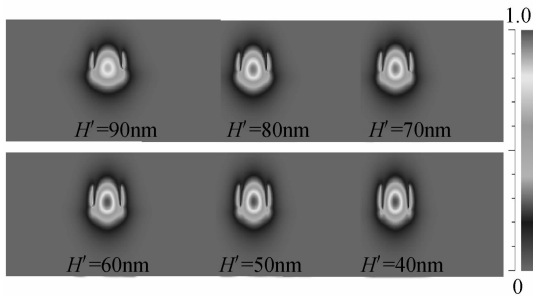


图 6 不同平板高度的脊形波导截面光场分布
Fig. 6 Cross-sectional optical distribution of rib waveguide with different slab height

由于平板高度 H' 、 P^+ 区、 N^+ 区和 I 区离子掺杂浓度对于 P-I-N 型二极管的性能具有直接的影响,于是本文进一步采用 Sentaurus 提供的 TCAD 对脊型纳米波导微环谐振腔光电调制器进行结构优化设计仿真.

首先,为保证有效折射率变化足够大,根据等离子体色效应,选定 P^+ 和 N^+ 区掺杂浓度为 $10^{18}/\text{cm}^3$,然后针对不同平板高度 H' 进行输出特性仿真测试,I-V 特性曲线如图 7. 可以看出,当二极管开启后,二极管的 I/V 比值随着平板高度 H' 增大而增大,即平板高度越大二极管特性越明显. 结合对脊型波导截面光场分布的仿真,可以看出当平板高度大于 50 nm 时,I-V 特性已经很明显.

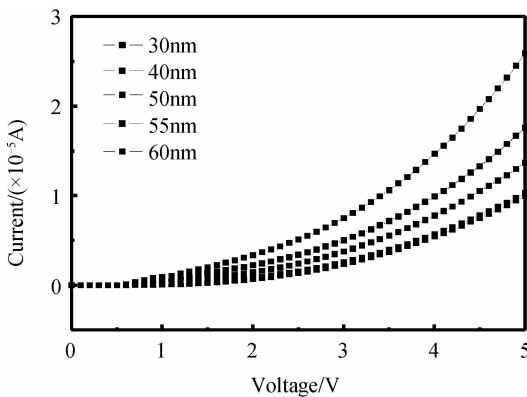


图 7 不同 H' 对应的输出 I-V 曲线图
Fig. 7 I-V diagram of the P-I-N diode with different slab heights

此外,由于 P-I-N 结的电流主要是较宽的势垒区及 I 区的复合电流. 因此 I 区的离子浓度 ρ 值必然会影响到整体载流子电子-空穴对的漂移、扩散复合

水平. 所以整体结构仿真中需要对 I 区中 ρ 值的变化情况与 I-V 输出特性的影响进行仿真分析,其输出 I-V 曲线如图 8 所示. 从仿真输出的 I-V 曲线中可以明显看出其结点开启阈值电压满足 Si 半导体二极管的正向开启电压条件,且随 I 区注入离子 ρ 值的增大而增大,当 I 区 ρ 值超过 $10^{14}/\text{cm}^3$ 时,I/V 比值增加较多.

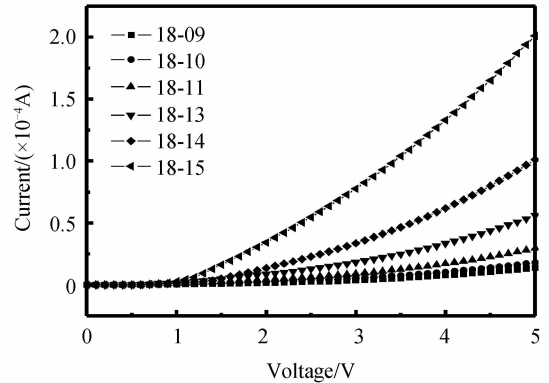


图 8 P^+ 和 N^+ 区浓度为 $10^{18}/\text{cm}^3$, 随 I 区 ρ 变化的输出 I-V 曲线
Fig. 8 I-V diagram of the carrier concentration variation of I area, when the carrier concentration of P^+ and N^+ area is $10^{18}/\text{cm}^3$

针对以上所设计结构的仿真结果,初步确定了两组较为可行的 H' 、I 区 ρ 值参量,并对两组参量值进行进一步的仿真分析,输出 I-V 曲线结果如图 9 所示. 由图可得,平板高度 50 nm、掺杂浓度 $10^{15}/\text{cm}^3$ 时 I-V 特性略优于平板高度 60 nm、掺杂浓度 $10^{14}/\text{cm}^3$ 时的 I-V 特性.

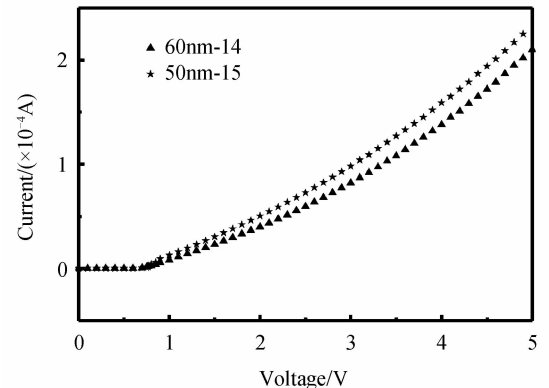


图 9 两种特定 H' 和 ρ 下对应的 I-V 特性曲线
Fig. 9 I-V characteristic curve of two settled structure

因此,再结合考虑到纳米波导的单模态传输条件,本文选取了 I 区 ρ 为 $10^{15}/\text{cm}^3$ 的离子注入浓度、 P^+ 和 N^+ 重掺杂区掺杂浓度为 $10^{18}/\text{cm}^3$ 、平板高度为 50 nm 的最优结构设计参量来实现光电调制.

根据上述分析计算所得的最优结构参量,利用 FDTD 软件进行仿真验证,结果如图 10. 从图中可以看出随 Δn_e 变化 10^{-3} 时,谐振频移值 $\Delta \lambda$ 约为

0.45 nm, 对应频移量为 58.74 GHz, 这一结果与上述散射矩阵法对同一结构的 Matlab 计算分析结果一致, 充分说明了, 上述电光调制器优化设计方案的可行性. 又由式(4)可知, 载流子浓度的增大会导致波导吸收系数的增大, 导致波导的吸收损耗增加, 因此载流子浓度增加引起谐振谱线蓝移的同时, 谱线的峰值也在减小. 对于波分复用 (Wavelength-Division-Multiplex, WDM) 应用需求窗口较大时, 可通过增大 P+ 和 N+ 区的掺杂浓度来增大调制器的频移量. 通过仿真计算已得出当掺杂浓度为 $10^{19}/\text{cm}^3$ 时, 折射率变化可达 0.01, 频率量可达 4.46 nm, 可以达到 WDM 的应用需求.

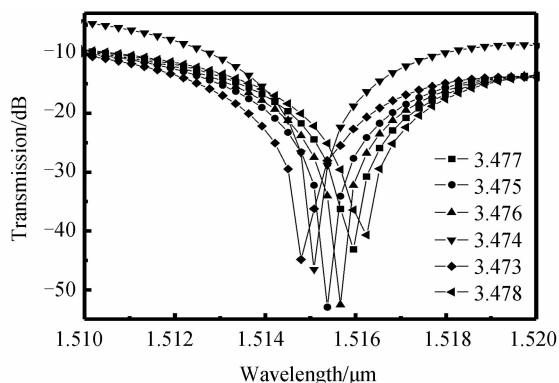


图 10 谐振腔半径为 $10 \mu\text{m}$ 时, 谐振点随 n_e 变化仿真图
Fig. 10 Simulation graph of resonance point changing with effective refractive index of the $10 \mu\text{m}$ radius resonator

3 结论

本文系统地分析论证了一种基于 SOI 微环谐振腔的 P-I-N 型电光调制器, 并通过对脊型波导横截面光场分布以及 P⁺、N⁺ 和 I 区掺杂浓度不同的 P-I-N 型二极管特性进行仿真对比, 提出了调制器结构优化设计方案. 最佳设计方案得出的 Q 值仅为 5×10^3 时微环谐振腔电光调制器频移量达 58.74 GHz, 与理论计算值接近, 可满足高频电光调制器的要求, 对于电光调制器的深入研究具有重要意义.

参考文献

[1] LIANG D, FIORENTINO M, OKUMURA T, *et al.* Electrically-pumped compact hybrid silicon microring lasers for optical interconnects [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(22): 20355-20364.
[2] DONG P, FENG Ning-ning, FENG D, *et al.* GHz-bandwidth optical filters based on high-order silicon ring resonators[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(23): 23784-23789.

[3] YUTAKA U, YOSHIJI N. *et al.* Demonstration of 12.5-Gbps optical interconnects integrated with lasers, optical splitters, optical modulators and photodetectors on a single silicon substrate[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(26): B256-B263.
[4] XU Q, SCHMIDT B, PRADHAN S, *et al.* Micrometre-scale silicon electro-optic modulator[J]. *Nature*, 2005, **435**(7040): 325-327.
[5] DING Jian-feng, ZHANG Lei, YANG Lin, *et al.* Electro-optical response analysis of a 40 Gb/s silicon Mach-Zehnder optical modulator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(14): 2434-2440.
[6] LI Yong-qian, WANG Hu, LI Huan, *et al.* Theoretical mode land experimental study of electro-optic modulator in rayleigh BOTDA system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1286-1291.
李永倩, 王虎, 李欢, 等. 瑞利布里渊光时域分析系统中电光调制器的理论模型与实验研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(11): 1286-1291.
[7] WANG Jian-wei, DAI Dao-xin. Highly sensitive Si nanowire-based optical sensor using a Mach-Zehnder interferometer coupled micro-ring [J]. *Optic Letters*, 2010, **35**(24): 4229-4231.
[8] DEKKER R, USECHAK N, FORST M, *et al.* Ultrafast nonlinear all-optical processes in silicon-on-insulator waveguides[J]. *Journal of Physics D*, 2007, **40**(14): R249-R271.
[9] ZHOU Zi-gang, LUO Chen, YANG Yong-jia, *et al.* Fabrication of 1×4 optical waveguide splitter by femtosecond laser in LiNbO_3 [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 402-404.
周自刚, 罗晨, 杨永佳, 等. 飞秒激光刻写 1×4 铌酸锂光波导功分器的研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(4): 402-404.
[10] ZHANG Li-ping. Electro-optic effect of glass waveguides with lower threshold of poling conditions[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 394-398.
张立平. 低阈值极化电压玻璃光波导电光效应的研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(4): 394-398.
[11] STEFAN M, HANJO R. Matching p-i-n-junctions and optical modes enables fast and ultra-small silicon modulators [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(13): 16210-16221.
[12] YARIV A. Critical coupling and its control in optical waveguide-ring resonator systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **14**: 483-485.
[13] GIGUERE, FRIEDMAN, SOREF R, *et al.* Simulation studies of silicon electro-optic waveguide devices[J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, **68**(10): 4964-4970.
[14] SOREF R, LORENZO J. All-silicon active and passive guided-wave components for $\lambda = 1.3$ and $1.6 \mu\text{m}$ [J]. *IEEE Journal of Quantum Electron*, 1986, **22**(6): 873-879.
[15] BRIMONT A, GARDES F, SANCHISL P. Design of a micro-ring resonator electro-optical modulator embedded in a reverse biased PN junction [J]. *Ecio-Conference*, 2008, Proc. 14th, 11-13.