

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0282-05

基于硅微环电光调制器的相移键控调制技术及系统性能

宋牟平 邹良港

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 硅光子是新一代大规模光/电集成的理想技术,可实现各种常见光器件,其中硅微环电光调制器是一个重要器件。相对于幅度光调制,相移键控(PSK)光调制具有更好的功率利用率,是代替普通开关键控(OOK)调制方式的较好技术。相移键控光调制一般应用马赫-曾德尔调制器(MZM)来完成,但由于尺寸和工艺上的限制,普通铌酸锂马赫-曾德尔调制器难以应用于光集成系统。而尺寸在微米量级的硅微环电光调制器具有规模生产和光集成的前景。这里研究基于硅微环电光调制器的相移键控光调制,采用耦合模方程和一维时域有限差分(FDTD)方法分析了其静态和动态调制特性,以及光纤传输性能。采用 1 bit 时延马赫-曾德尔干涉仪解调,结果显示信号 Q 值可达 20 dB 以上,可实现无差错通信。

关键词 集成光学;相移键控;微环;硅光子;电光调制器

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL2009360s2.0282

Silicon Microring Electro-Optic Modulator-Based Phase Shift Keying Modulation and Its System Performance

Song Muping Zou Lianggang

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Silicon photonics is a novel technique for high scale optical/electronic integration, with which most kind of optical devices can be achieved. Silicon microring-based electro-optic modulator is one of the most important devices for photonic integration. Compared to the amplitude modulation, optical phase shift keying (PSK) is a better choice for the optical power efficiency. The Mach-Zehnder modulator (MZM) is usually used to obtain the phase shift keying modulation, but its bulky size and producing technic make it hard for the LiNbO₃ MZM to be used in the optical integrating system. The μm -sized silicon microring modulator holds the capability of mass-produce and optic integration. Here the silicon microring modulator is used to achieve optical phase shift keying. The coupling mode and 1-D finite difference time domain (FDTD) are adopted to analyze its characteristics and optical-fiber communication. The results show that the signal Q-factor of the silicon microring modulator can be larger than 20 dB, which means the error-free communication is reachable.

Key words integrated optics; phase shift keying; microring; silicon photonics; electro-optic modulator

1 引言

在现代光通信系统中,高级光调制格式的实现是一项非常重要的技术^[1~3]。如相移键控(PSK)调制相对于普通的幅度调制开关键控(OOK),接收灵敏度可提高 3 dB,非线性容忍度也更好^[4]。光 PSK 一般采用铌酸锂(LiNbO₃)相位调制器或马赫-曾德尔调制器(MZM)。由于 MZM 具有 $\pm 90^\circ$ 相位突

变,并且变化发生在幅度响应最低点,这些有利于 PSK 产生较好的频谱特性,因此常用的 PSK 光调制器件是 MZM^[3,4]。另外,对于差分相移键控(DPSK)的解调,一般采用延迟线干涉仪(DLI)进行解调^[5,6]。但这些器件的尺寸在厘米数量级,结构复杂且价格昂贵,难以应用于接入/局域网、光互联、和光集成系统中。

作者简介: 宋牟平(1971—),男,副教授,博士,主要从事新型光子器件、光纤通信/传感等方面的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn

硅可构成高折射率差光波导,且在光通信波长区间具有较低的损耗,是实现微(纳)米光子器件的理想材料^[7]。基于 CMOS 工艺的硅光子器件,包括滤波器、调制器、光开关、光电检测器等,具有规模生产的能力,并能和 CMOS 硅集成电路同质融合在同一芯片内,构成光电集成系统^[8]。其中一个重要元件是电光调制器,它是电光信息转换的开始,也是高速光开关的基础。采用微环(Microring)谐振腔结构,利用高 Q 值微环储存的高功率光来提高电光效应,可使调制器的尺寸达到几十微米以下^[9,10]。本文采用高速硅微环调制器来实现光相移键控调制,结合耦合模理论和一维时域有限差分(FDTD)方法来分析其静态和动态特性,以及调制信号的光纤传输性能。

2 原理

硅微环电光调制器的基本光学结构由微环和传输波导组成,如图 1 所示。根据一般的耦合模理论,可计算得到功率传递函数 T 和相位 Φ 变化为^[11]

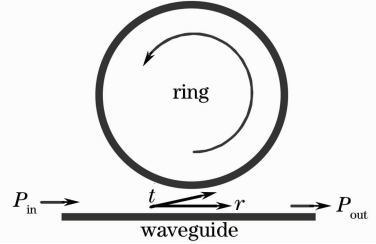


图 1 由波导和环组成的硅微环
Fig. 1 Silicon microring composed of waveguide and ring

$$T = P_{out}/P_{in} = \frac{\alpha^2 - 2r\alpha \cos \phi + r^2}{1 - 2r\alpha \cos \phi + r^2 \alpha^2}, \quad (1)$$

$$\Phi = \arg(E_{out}/E_{in}) = \pi + \phi + \arctan\left(\frac{r \sin \phi}{\alpha - r \cos \phi}\right) + \arctan\left(\frac{\alpha r \sin \phi}{1 - \alpha r \cos \phi}\right), \quad (2)$$

式中 P_{in} 和 P_{out} 分别是波导的输入和输出光功率; E_{in} 和 E_{out} 分别是波导的输入和输出光场; r 和 t 分别是波导和环之间的传输系数与耦合系数,满足 $r^2 + t^2 = 1$; α 和 $\phi = 2\pi n_{eff}L/\lambda_0$ 分别是光在环中绕一圈的损耗和相位变化, n_{eff} 是有效折射率, L 是环周长, λ_0 是真空中光波长。除了以上参数外,环的另一个重要参数是腔 Q 值,它决定环的带宽大小。

根据微环和波导的结构以及耦合系数的不同,如图 2 所示,用于电光调制器的微环有 3 类^[12]。类型 1,单波导结构,且处于欠耦合状态,即环和波导的耦合系数小于环的损耗,其幅度是下凹的洛伦兹(Lorentzian)曲线,相位只在谐振波长(λ_0)附近发生幅度为 π 的震荡变化。类型 2,单波导结构,且处于过耦合状态,即环和波导的耦合系数大于环的损耗,其幅度,和类型 1 一样,也是下凹的洛伦兹曲线,相位在谐振波长附近产生幅度为 2π 的跳变。类型 3,双波导结构,一般假定输入、输出波导与环的耦合系数是一样的,因而环谐振腔一定处于欠耦合状态,即功率耦合到环的系数肯定小于环由于自身及耦合到输出波导导致的损耗系数,其幅度响应是上凸的洛伦兹曲线,相位在谐振波长附近产生幅度为 π 的跳变。考虑到二元相移键控(BPSK)或差分相移键控(DPSK)需要幅度为 π 的相位变化,同时‘0’和‘1’对应的信号幅度要一样,从上面给出的不同类型微环的静态传输特性可看出,只有类型 2 能达到此要求。

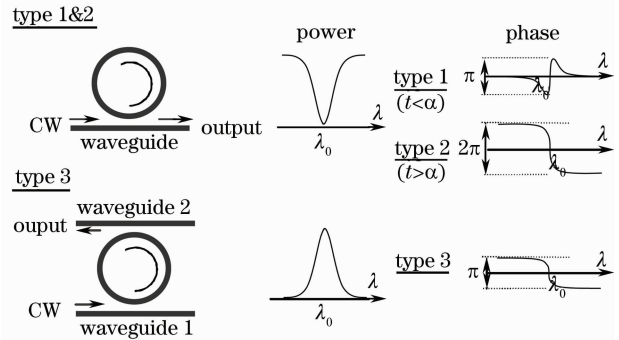


图 2 3 种类型微环及其幅度和相位响应
Fig. 2 Amplitude and phase responses of three types of microring-resonator modulators

在高速微环电光调制器中,通过移动环谐振腔的谐振频率来控制输出光功率。这一般通过自由载流子等离子体色散效应^[13]来实现,即由电驱动来改变硅微环的载流子浓度,随之改变环的折射率,从而移动环的谐振频率。对于 $1.55 \mu\text{m}$ 工作波长,自由载流子浓度的改变会引起如下的光折射率和损耗系数的变化^[13, 14]

$$\Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h = - [8.8 \times 10^{-22} \Delta N + 8.5 \times 10^{-18} (\Delta P)^{0.8}], \quad (3)$$

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_e + \Delta \alpha_h = 8.5 \times 10^{-18} \Delta N + 6.0 \times 10^{-18} \Delta P, \quad (4)$$

式中 Δn_e 是电子的浓度变化引起的折射率改变; Δn_h 是空穴的浓度变化引起的折射率改变; ΔN 和 ΔP 分

别是电子和空穴以 cm^{-3} 为单位的浓度; $\Delta\alpha_e$ 和 $\Delta\alpha_h$ 分别是由电子和空穴浓度变化引起的损耗改变。由(3)式可看出,空穴浓度的变化对光折射率改变的作用大于电子浓度变化的影响,而且这种变化是 0.8 次方的指数关系,不是线性函数。从(4)式可看出,在利用等离子体效应进行电光调制过程中,伴随着环的折射率变化,环的损耗会受到改变,即环的腔 Q 值变小。

在相移键控光调制中,采用 MOS 电容电极^[10]的类型 2 硅微环电光调制器,如图 3 所示。当加上驱动电压时,MOS 电容电极的有源层中的自由载流子浓度随之产生变化,根据(3)式和(4)式,环的折射率和损耗系数发生改变。如图 3 所示,折射率的改变使得微环的中心谐振波长产生移动;损耗系数的改变使得微环的腔 Q 值下降,即使得微环的传输频谱变‘胖’,中心波长的下降变‘浅’。当输入直流光的波长位于不加电驱动时的中心谐振波长时,输出光将随环传输频谱的移动产生强度调制,伴随着相应的相位变化。当选择直流光波长工作点,使得‘0’和‘1’分别位于传递函数的左右两侧时,则可得到 BPSK 或 DPSK 所需的相位变化和幅度不变。

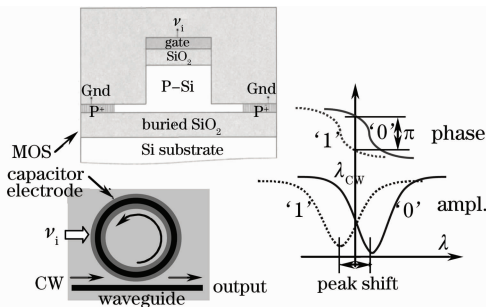


图 3 MOS 电容电极结构的硅基微环电光调制器
Fig. 3 Silicon microring electro-optical modulator with MOS capacity electrode

为了提高电光调制效率和降低电驱动功率,硅微环电光调制器一般使用高 Q 值的环谐振腔。这时环的光子寿命带来的动态腔对调制的作用将不能忽略,需要合适的动态模型进行分析。如采用完整的二维或三维 FDTD 进行微环光场传输计算,受时间和内存的限制,一般只能得到调制光的上升/下降时间等信息。难以得到与系统应用直接相关的信息:如调制信号的 Q 值、误码率、消光比和频率啁啾等,以及调制信号的光纤传输特性。因此,这里采用 1-D FDTD 来进行硅微环光传输的动态模拟,如图 4,把波导和环按一维传输方向进行分割,分割成由计算单元 δl 组成的环和波导,再按有限差分方程来

计算含相位信息的光场幅度 $A(l,t)$ ($|A(l,t)|^2$ 表示光功率)为

$$A(l,t+\delta t) = A(l-\delta l,t) \exp\{i[n_{\text{eff}}(t)]\omega(\delta l)/c\}, \quad (5)$$

式中 $\delta t = n_{\text{eff}}(\delta l)/c$; n_{eff} 是有效折射率,对于环,其根据电调制信号发生随时间的变化; c 是真空中光速。考虑到波导模式场的一维传输特性,这样一维计算处理后,对于调制过程的计算,不仅计算精度下降很少,同时计算量得到大幅度降低。从而在加上调制电信号后,可计算得到硅微环调制后的动态变化时域信号。

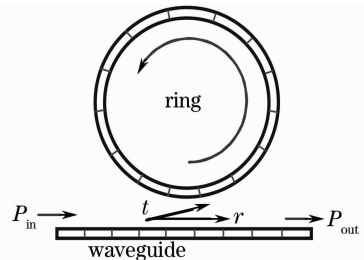


图 4 采用 1-D FDTD 计算微环的示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the 1-D FDTD based calculation method for the microring

3 结 果

应用图 3 所示的硅微环电光调制器,采用图 5 所示的模拟系统来研究相移键控调制。硅微环调制器的相关参数如下:在电结构方面,采用 MOS 电容电极^[14],电渡越时间(transit time)设定为 16 ps;在光结构方面,微环的半径为 $5 \mu\text{m}$,腔 Q 值为 19000 (对应微环 3 dB 带宽约为 0.08 nm,即 10 GHz);并设定移动环中心谐振波长 0.08 nm 需要 2.2 V 的驱动电压。采用线宽为 0.01 MHz(以减少光源线宽对调制的影响)、功率为 10 mW 的直流光源;当未加电驱动时,直流光波长预先放置在距离微环中心谐振波长为 0.018 nm 的位置。采用伪随机码作为输入信号,电驱动电压幅度为 1.0 V。应用前面提出的一维 FDTD 分析方法,图 6 给出了 10 Gb/s-DPSK 的调制结果,可看出信号各比特都有相似的光功率,但由于调制带宽的限制,单比特‘0’或‘1’时未能达到连‘0’或连‘1’时的功率;‘0’和‘1’的相位差约为 π 。因此采用硅微环调制器产生了 PSK 调制信号。

不经过光纤,解调前的信号眼图如图 7(a)所示,虽然是较清晰的眼图,但存在与 MZM 调制结果不同的两个特点:分裂的信号轨迹和不同的上升/下

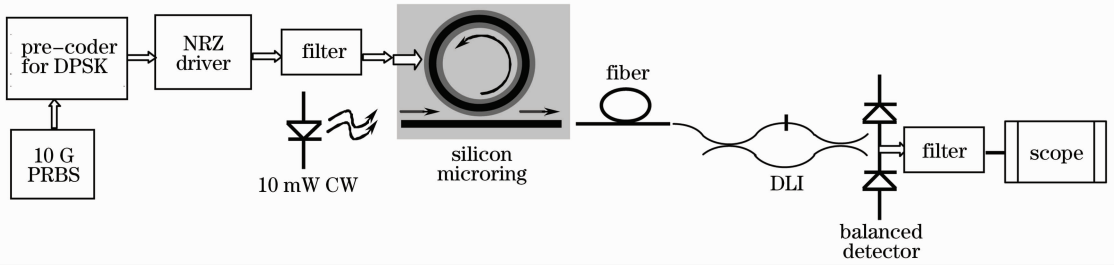


图 5 硅微环相移键控调制的模拟系统

Fig. 5 Simulation system for the microring based PSK

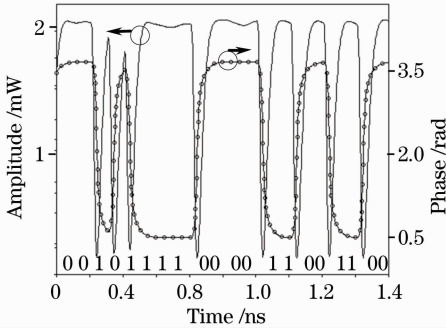


图 6 硅微环的 DPSK 调制信号

Fig. 6 DPSK signal from the silicon microring

降沿,这是硅微环谐振腔的动态特性造成的。再采用 1 bit DLI 对图 6 的 DPSK 信号进行解调,经过平衡光电检测后得到如图 7(b)所示的信号眼图。可看出硅微环的 DPSK 信号得到了较好的解调,眼图较清晰,信号 Q 值(Q-factor)达到 22 dB。但眼图的信号轨迹分裂了,这也是和 MZM 不同的调制结果,产生的原因是微环谐振腔的动态特性,即当微环中心谐振波长随调制信号移动时,其光传输变化特性在中心波长的左和右是不同的。

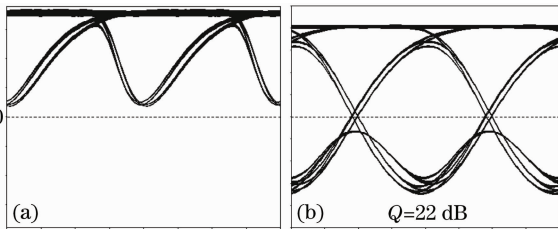


图 7 硅微环的 DPSK 调制(a)和解调信号(b)眼图

Fig. 7 Eye-diagrams of the DPSK modulated (a) and demodulated signals (b) from the silicon microring

光 PSK 调制信号对光源线宽敏感,而在原理上微环谐振腔是一多光束干涉仪,因此对光源线宽的影响比较敏感。采用图 6 和图 7 相同的参数,图 8 显示的是 DPSK 解调信号 Q 值随光源线宽的变化,可看出,当光源线宽在 1 MHz 以下时,由光源线宽带来的信号 Q 值损伤(Penalty)在 1 dB 以内,但当光源线宽大于 2 MHz 时,信号 Q 值将快速下降,超

过 10 MHz 后,背靠背(back-to-back)的无差错通信 ($f_{BER} < 10^{-9}$)将不能实现。另外,在图 7 中,即使把光源线宽减少到很小,信号 Q 值也不能得到有效提高,这是由于微环谐振腔的动态特性,造成如图 7 所示的信号轨迹不能重合,从而限制了图 8 中解调信号 Q 值的提高。

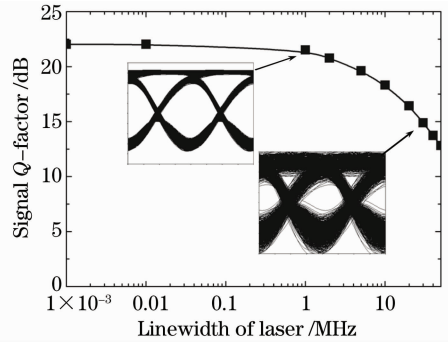


图 8 解调信号 Q 值随光源线宽的变化

Fig. 8 Signal Q-factor varies with the linewidth of laser

在实际应用硅微环电光调制器中,电渡越时间是一项关键参数,它取决于电极结构、掺杂浓度和驱动器性能等。采用 1 MHz 线宽光源,其他参数同图 8,图 9 显示的是 DPSK 解调信号 Q 值随电渡越时间的变化,可看出信号 Q 值基本上是随电渡越时间的增加呈线性下降,超过 40 ps 以后,背靠背的无差

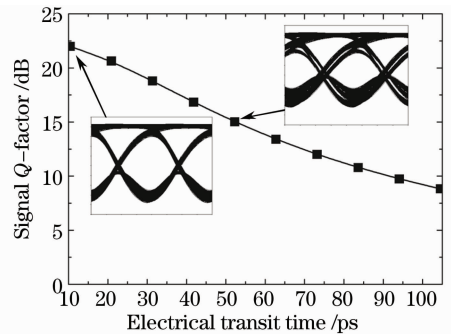


图 9 解调信号 Q 值随电渡越时间的变化

Fig. 9 Signal Q-factor varies with the electrical transit time

错通信将不能实现。信号 Q 值下降的原因是:当电渡越时间增加时,硅微环电光调制器的带宽将随之下降,由此造成单‘0’或‘1’的光功率下降,同时相位差减少,从而达不到相移键控所需的功率和相位变化。

硅微环具有和 MZM 不同的幅度和相位响应,造成的结果是:硅微环调制信号的上升、下降沿是不同的,且信号是频率啁啾(chirp)的,这将影响信号在光纤中的传输。采用图 5 所示的相移键控调制模拟系统,光源线宽为 1 MHz,电渡越时间为 16 ps。图 10 给出了解调信号 Q 值随普通单模光纤长度的变化,可看出在整体上信号 Q 值随光纤长度的增加而下降。但在开始的 10 km 光纤内,信号 Q 值几乎不下降,这是由于硅微环相移键控调制信号的波形和频率啁啾相互配合共同与光纤色散作用产生的。当传输光纤大于 50 km 时,信号 Q 值将快速下降,因为这时光纤累积的色散起主导作用,使得信号比特间产生交叠,无差错通信距离可达 80 km。

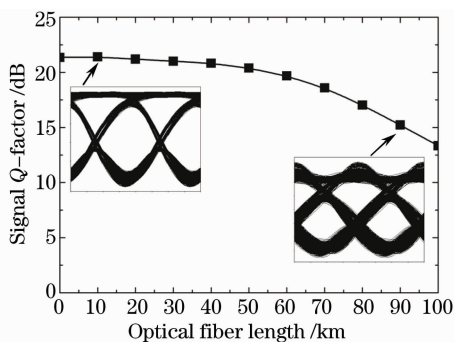


图 10 解调信号 Q 值随传输光纤长度的变化
Fig. 10 Signal Q -factor varies with the optical fiber length

4 结 论

相移键控光调制具有更好的功率利用率,是代替 OOK 调制方式的较好技术。研究尺寸在微米量级的硅微环电光调制器,进行相移键控光调制。提出了适合微环分析的一维 FDTD 方法,并结合耦合模方程研究了硅微环相移键控光调制的静态和动态特性,以及光纤传输性能。结果表明,硅微环能完成 DPSK(或 BPSK)调制所需的幅度和相位变化,采用

1 bit 时延干涉仪解调后信号 Q 值可达 20 dB 以上,可实现 80 km 普通单模光纤的无差错通信,但信号质量受光源线宽和电渡越时间限制。

参 考 文 献

- Chen Yong, Cao Jihong, Chen Ting *et al.*. Optimal modulation formats for 2560 km optical transmission with low-power penalty [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 331~335
陈 勇,曹继红,陈 婷等. 优化调制格式实现 2560 km 低价无差错传输[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3): 331~335
- Qin Xi, Chen Yong, Cao Jihong *et al.*. Influence of dispersion compensation schemes on phase noise of phase modulation systems[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 64~68
秦 曦,陈 勇,曹继红等. 色散补偿方式对相位调制系统中相位噪声的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 64~68
- He Jing, Liu Limin, Chen Lin *et al.*. Generation of advanced modulation formats based on Mach-Zehnder modulators [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1185~1190
何 晶,刘丽敏,陈 林等. 基于马赫-曾德尔调制器的先进调制格式的产生[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1185~1190
- A. H. Gnauck, P. J. Winzer. Optical phase-shift-keyed transmission [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(1): 115~130
- E. A. Swanson, J. C. Livas, R. S. Bondurant. High sensitivity optically preamplified direct detection DPSK receiver with active delay-line stabilization[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(2): 263~265
- Qi Ming, Zhang Xinliang, Huang Dexiu. Tunable differential phase-shift keying demodulator using the Mach-Zehnder interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1643~1647
齐 鸣,张新亮,黄德修. 可调马赫-曾德尔干涉仪型差分相移键控解调器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1643~1647
- Graham T. Reed. The optical age of silicon[J]. *Nature*, 2004, **427**: 595~596
- D. Deer. Silicon optics aims to combine the best of both worlds [J]. *IEEE Computer*, 2006, **39**(6): 16~19
- Q. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan *et al.*. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator[J]. *Nature*, 2005, **435**: 325~327
- Q. Xu, S. Manipatruni, B. Schmidt *et al.*. 12.5 Gbit/s carrier-injection-based silicon micro-ring modulators[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(2): 430~436
- A. Yariv. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **36**(4): 321~322
- L. Zhang, Y. Li, J. Y. Yang *et al.*. Performance and design guidelines for silicon-based micro-ring modulators in 10 Gbits/s systems[C]. in *National Fiber Optic Engineers Conference*, OSA Technical Digest Series (CD) (Optical Society of America, 2007), paper JWA39
- R. A. Soref, B. R. Bennet. Electrooptical effects in silicon[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(1): 123~129
- C. A. Barrios, M. Lipson. Modeling and analysis of high-speed electro-optic modulation in high confinement silicon waveguides using metal-oxide-semiconductor configuration [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **96**(11): 6008~6015