

doi: 10.3788/gzxb20164505.0523003

调制损耗对硅基 MZI 结构光调制器 非线性特性的影响

桂林^{1a}, 左健存^{1a}, 邵宇丰^{1a}, 孙秋冬^{1a}, 王胜利^{1b}, 周志彬²

(1 上海第二工业大学 a 计算机与信息工程学院; b 文理学部, 上海 201209)

(2 湖南师范大学 物理与信息科学学院, 长沙 410081)

摘要:针对基于马赫-曾德干涉仪结构的硅基光调制器中非线性电光响应的问题,采用包含 PN 结非线性调制损耗和非线性折射率变化的模型,通过数值仿真方法,研究了上下两臂对称和不对称两种情况下,调制损耗对硅基光调制器非线性的影响.对比考虑调制损耗和忽略调制损耗的模型,发现在常规大信号情况下,当光调制器偏置相位为 0 时,调制损耗使得三次谐波增强,四次谐波减弱;当光调制器偏置相位为 $\pi/2$ 时,调制损耗使得二次和四次谐波增强;而在小信号情况下,三次和四次等高次谐波不明显,在光调制器偏置相位为 0 时,调制损耗在光调制器上下两臂不对称情况下增加了基频分量串扰;在光调制器偏置相位为 $\pi/2$ 时,调制损耗的影响主要表现为增加了二次谐波分量.

关键词:硅光子学;光调制器;非对称马赫-曾德干涉仪结构;非线性;光通信

中图分类号:TN256

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)05-0523003-6

The Influence of Modulating Loss on the Nonlinear Property of the MZI-based Optical Silicon Modulator

GUI Lin^{1a}, ZUO Jian-cun^{1a}, SHAO Yu-feng^{1a}, SUN Qiu-dong^{1a}, WANG Sheng-li^{1b}, ZHOU Zhi-bin²

(1 a College of Computer and Information Engineering; b College of Arts and
Science, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, China)

(2 School of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: Aiming at the nonlinear electro-optical response in the Mach-Zehnder Interferometer (MZI)-based silicon modulator, the model with the nonlinear modulating loss in PN junction and the nonlinear refractive index changing was utilized, and the influence of modulating loss on the silicon modulator was investigated for two cases; symmetric arm or asymmetric arm in the MZI-based modulator. By taking account of the modulating loss in the model, the results can be obtained that in the condition of large signal, the third order harmonic component is enhanced and the fourth order harmonic component is reduced when the bias phase of the optical modulator is 0, and the second order and fourth order harmonic component are all enhanced when the bias phase of the optical modulator is $\pi/2$. While in the condition of small signal, the high order harmonic components, such as the third order and fourth order harmonic components, are not obvious, and the crosstalk of fundamental frequency is enhanced by the modulating loss when the bias phase of the optical modulator is 0 and two arms in the modulator are asymmetric, the second order harmonic component is enhanced by the modulating loss when the bias phase of the optical modulator is $\pi/2$.

Key words: Silicon photonics; Optical modulator; Asymmetric Mach-Zehnder interferometer structure; Nonlinearity; Optical communication

OCIS Codes: 230.4320; 250.7360; 250.5300; 060.0060; 350.4010

基金项目:上海第二工业大学校级基金项目(Nos. EGD14XQD03, EGD14XQD01, EGD16XQD07)、上海第二工业大学校级重点学科(No. XXXKZD1302)和湖南省自然科学基金(No. 11JJ6053)资助

第一作者:桂林(1981-),男,副教授,博士,主要研究方向为光通信中的硅基光子器件、光接入技术. Email: guilin@sspu.edu.cn

收稿日期:2015-10-22;录用日期:2016-02-19

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

硅光子学(Silicon Photonics)的出现和硅基光子器件的发展为实现光通信系统的高集成化和低功耗奠定了基础^[1-4]. 硅基光调制器^[5]是采用便于集成的硅基器件制作而成,可应用于光互联互通、甚至是传统意义的长距离光传输中.自2004年,Intel公司利用电容的载流子积累效应首次制造出速率为1 Gbit/s的硅基光相位调制器^[6]以来,许多研究机构相继展开了对硅基光调制器的深入研究,所研制的硅基光调制器在调制速率^[7]和性能方面均有提升^[8].经过十多年的研究,简单OOK调制格式的硅基光调制器速率可以达到70 Gbit/s^[9],采用偏分复用正交幅度调制(Polarization Division Multiplexing Quadrature Amplitude Modulation, PDM-QAM)格式的硅基光调制器速率则可以达到224 Gbit/s^[10].

硅基光调制的机理基于Soref等^[11]研究的硅体材料中自由载流子色散(Free Carrier Dispersion, FCD)效应,以及伴随FCD效应同时出现的自由载流子吸收(Free Carrier Absorption, FCA)效应.这种新型的光调制机理一方面会影响光调制器的带宽等性能指标,另一方面会引入不必要的电学高次谐波,即具有独特的光调制器非线性特性.近年来,针对硅基光调制器非线性电光响应特性的研究受到广泛关注.

马赫-曾德干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)结构是硅基光调制器的基本结构,文献^[12-15]对该结构光调制器中的非线性特性进行了研究.A. Khilo等从硅基 MZI 结构光调制器的基本模型出发,研究了上下两臂等长的平衡结构 MZI 光调制器的非线性问题^[13];F. Vacondio 等实验研究了以硅基 MZI 光调制器的载波与三阶失真功率比值(Carrier-to-third-order Distortion Ratio, CDR3)等参数为代表的非线性特征^[14];A. M. Gutierrez 等在忽略硅基光调制器损耗的情况下,理论分析得到了 MZI 光调制器非线性功率的解析公式^[15].然而, MZI 光调制器的非线性问题较为复杂,它包含三方面的因素^[13-15]:1) MZI 结构光调制器本身的非线性影响,该非线性是 MZI 干涉结构产生的,和传统铌酸锂 MZI 结构光调制器的非线性问题类似,已经有较多的研究揭示其规律;2) 硅基光调制中伴随 FCD 效应产生的 FCA 效应对硅基光调制器非线性的可能影响,该影响在许多研究和模型中被忽略,研究人员尚未阐述它对非线性特性的影响;3) 硅基光调制器所加电压与折射率变化的非线性关系对整个硅基光调制器非线性的影响.这三种因素对硅基光调制器的影响同时存在,且相互交叉,因此在研究高线性度 MZI 光调制器之前,需要对其进行系统研究.

本文从包含器件本征损耗、调制损耗和 PN 结非

线性等因素的硅基 MZI 结构光调制器的基本模型出发,通过数值仿真,研究了射频调制信号为大信号和小信号两种情况下, MZI 结构中调制损耗对硅基光调制器非线性电光响应的影响.

1 硅基 MZI 光调制器的基本模型

硅基材料光调制的机理不同于传统光调制器中的电光效应,它包含硅体材料中的 FCD,以及与之同时产生的 FCA 效应,其中 FCD 效应改变光波相位,而 FCA 效应改变光波幅度.根据 Soref 等的实验研究,在光波长为 1 550 nm 附近的硅基材料中,当载流子浓度发生变化时,包括空穴和电子的浓度变化,单位长度吸收系数的变化 $\Delta\alpha_c$ 和(单位: cm^{-1})材料中折射率的变化 Δn_c 分别为^[11]

$$\Delta\alpha_c = 8.5 \times 10^{-18} \Delta N_e + 6.0 \times 10^{-18} \Delta N_h \quad (1)$$

$$\Delta n_c = -8.8 \times 10^{-22} \Delta N_e - 8.5 \times 10^{-18} (\Delta N_h)^{0.8} \quad (2)$$

图1是硅基 MZI 结构推挽光调制器的基本结构,图中 MZI 结构光调制器由2个分束器和2个移相器组成.分束器用来完成光波的分波与合波,而移相器则用来改变两臂的相移.为了减小器件啁啾,两臂均加电极调制,但所加电压相反,分别为 V_{eff} , $-V_{\text{eff}}$,即推挽结构.

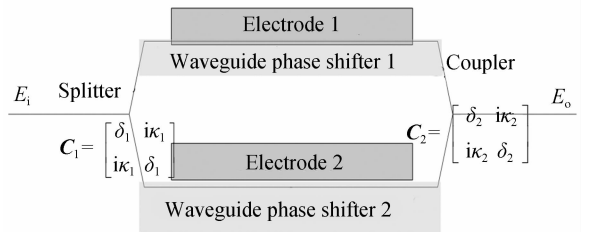


图1 硅基 MZI 结构推挽光调制器结构

Fig. 1 Scheme of the MZI based silicon push-pull optical modulator

移相器1的几何长度为 L_1 ,移相器2的几何长度为 L_2 .如果忽略硅基波导中的线性电光效应,同时考虑输入光功率不是很高的情况,例如进入硅基 MZI 器件的真实光功率在 0dBm 以下,硅基波导中的光学自相位调制、双光子吸收等三阶光学非线性效应很弱,则输入和输出光波满足

$$E_o = (\delta_1 \delta_2 e^{i\alpha_1 L_1} e^{i\alpha_2 L_2} - \alpha_1 \alpha_2 e^{i\alpha_1 L_2} e^{i\alpha_2 L_1}) E_i \quad (3)$$

式中, E_i 和 E_o 分别为输入和输出光场.对于分束器 C_1 和耦合器 C_2 来说,上支路的耦合功率比为 δ_j^2 ,下支路的耦合功率比为 α_j^2 , $j = 1, 2$.其中, δ_j 为耦合器中直通臂到该臂的耦合系数, α_j 为耦合器中直通臂到耦合臂的耦合系数,它们满足 $\delta_j^2 + \alpha_j^2 = 1$. α_l 和 β_l 分别为移相器 l 的总损耗系数和总相位常量,其中 $l = 1, 2$.在 MZI 结构的硅基光调制器中, α_l 不再是常量,它和 β_l 类似,包含未加电压时的本征分量和加载电压的增量.假设 α_0 和 β_0 是未加电压时波导的本征损耗系数和传播常

量,根据硅基器件材料特性,当电压加在某个波导上,波导的损耗系数和传播常量将会同时发生变化,则

$$\alpha_l(V_l) = \alpha_0 + f_\alpha(V_l) \quad (4)$$

$$\beta_l(V_l) = \beta_0 + f_\beta(V_l) \quad (5)$$

式中,函数 $f_\alpha(V_l)$ 和 $f_\beta(V_l)$ 将由硅基材料和横向波导结构等参数共同决定. 由于光波在硅基光调制器的 PN 结中传播,因此,函数 $f_\alpha(V_l)$ 和 $f_\beta(V_l)$ 的真实形状既受到光场本身特性的影响,又受到电学参数的影响.

对于相位-电压调制而言,忽略硅基波导中光场分布对函数 $f_\beta(V_l)$ 的影响,仅仅考虑由 PN 结中半导体材料耗尽区所加电压和电流的近似关系对函数 $f_\beta(V_l)$ 的影响,根据文献[13],可得

$$f_\beta(V) = \Delta n 2\pi/\lambda_0 = (2\pi/\lambda_0) k \ln(1+V/V_b) \quad (6)$$

式中, k 为一常量,可由实验测量得到,也可根据掺杂浓度通过式(2)得到. V_b 为 PN 结内建电场导致的电压, $V = V_{DC} + V_{rf}(t)$, $V_{rf}(t)$ 为射频信号电压, V_{DC} 为波导上所加的偏置电压. 为便于仿真,分离式(6)中直流与交流电压的影响,可以得到

$$f_\beta(V) = (2\pi/\lambda_0) k (\ln(1+V_{DC}/V_b) + \ln(1+V_{rf}(t)/(V_{DC}+V_b))) \quad (7)$$

从式(7)可以看出,对于单个波导,所加电压导致折射率的增量与电压的关系并不是线性关系,这使得硅基光调制器最终的调制波形随电压的变化显示出非线性特征.

对于损耗-电压调制而言,其变化关系也会受到光学和电学两方面的影响. 由于它的改变同样是由载流子浓度变化引起的,因此,此处假设它随电压变化也有类似的函数关系,即

$$f_\alpha(V) = k_\alpha (\ln(1+V_{DC}/V_b) + \ln(1+V_{rf}(t)/(V_{DC}+V_b))) \quad (8)$$

式中, k_α 为一常量,可以由实验测量得到,也可以根据掺杂浓度通过式(1)得到.

当 $V_{rf}(t)$ 它远小于 V_{DC} 或者 V_b 时,即加载射频电压为小信号时,式(7)和(8)可以化简为

$$f_\beta(V) = (2\pi/\lambda_0) k (\ln(1+V_{DC}/V_b) + V_{rf}(t)/(V_{DC}+V_b)) \quad (9)$$

$$f_\alpha(V) = k_\alpha (\ln(1+V_{DC}/V_b) + V_{rf}(t)/(V_{DC}+V_b)) \quad (10)$$

假设上下两臂加载的直流偏压分别为 V_{DC1} 和 V_{DC2} , V_{DC1} 和 V_{DC2} 可以独立选取,也可以按照现有的推挽结构选择为 $V_{DC2} = -V_{DC1}$. 为了减小光调制器产生的啁啾,上下两臂所加载的射频信号分别为 $V_{rf}(t)$ 和 $-V_{rf}(t)$, $V_{rf}(t) = 0.5V_{pp} \cos(2\pi f_{rf}t)$, V_{pp} 为射频的峰峰电压值, f_{rf} 为射频频率. 将式(4)~(10)代入式(3),可以得到硅基光调制器输出与输入光功率比值

$$r_P(t) = \frac{P_o(t)}{P_i} \quad \text{即}$$

$$r_P(t) = a_0 \left| 0.5a_1 e^{f_\alpha(V_a(t))L_1} e^{if_\beta(V_a(t))L_1 + \varphi_1} - \right.$$

$$\left. 0.5e^{f_\alpha(-V_a(t))L_2} e^{if_\beta(-V_a(t))L_2} \right|^2 \quad (11)$$

式中,器件的损耗为 a_0 , $a_0 = 4(\kappa_1 \kappa_2)^2 e^{2(\alpha_0 L_2 + f_\alpha(V_{DC2})L_2)}$; 上下两臂的相位差(包括直流电压引入的相位差)为 $\varphi_1 = \beta_0 \Delta L + f_\beta(V_{DC1})L_1 - f_\alpha(V_{DC2})L_2$; 上下两臂的功率不平衡因子为 $a_1 = e^{\alpha_0 \Delta L + f_\alpha(V_{DC1})L_1 - f_\alpha(V_{DC2})L_2} \delta_1 \delta_2 / \kappa_1 \kappa_2$; 两臂长度的几何差为 $\Delta L = L_1 - L_2$. 式(11)和线性电光调制器件的功率透射率类似,包含了上下两臂的相位差 φ_1 和功率不平衡因子 a_1 , 主要区别在于,上下两臂的损耗出现了 $e^{f_\alpha(V_a(t))L_1}$ 和 $e^{f_\alpha(-V_a(t))L_2}$ 等时变项,同时 $f_\alpha(V_l)$ 和 $f_\beta(V_l)$ 不再是线性关系. 文献[14]针对 φ_1 的影响和式(7)所定义的函数 $f_\beta(V_l)$ 进行了分析讨论,但是并未阐述 $e^{f_\alpha(V_a(t))L_1}$ 和 $e^{f_\alpha(-V_a(t))L_2}$ 等时变项的影响,以及式(8)所定义的函数 $f_\alpha(V_l)$ 对调制器非线性的影响. 本文对式(11)进行变换,即

$$R(\omega) = F(r_P(t)) \quad (12)$$

式中, $F(\cdot)$ 表示对 $r_P(t)$ 进行傅里叶变换. 通过仿真得到 $R(\omega)$ 的谱线,进而研究硅基光调制器的非线性特性.

2 仿真过程与基本参数

结合式(7)~(11)进行仿真,采用 Matlab 软件进行编程得到 $r_P(t)$,再通过式(12)得到信号的各种高次谐波. 为了保证信号频域的分辨率和谱线数据的准确性,将仿真的采样点数设置为 2^{17} 个,假定 $f_{rf} = 10$ GHz,则频域的窗口设置为 $[0 \sim 50$ GHz].

仿真时,光波长设定为 1 550 nm, $L_1 = 2$ mm. 假设在加载电压为 8.9 V 时,式(1)和(2)中载流子浓度达到 $\Delta N_e = \Delta N_h = 1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ (为常规掺杂时的浓度情况),硅基波导的有效折射率为 3,未加载电压时硅基波导的损耗为 1.5 dB/mm. 在 MZI 结构中,光分束器严格满足 3 dB 分光,即 $\delta_1 = \delta_2 = \sqrt{0.5}$.

3 果与讨论

根据式(8)和(11)可知,与电压相关的损耗将会影响 MZI 结构中上下两臂的光功率,且通常情况下它们随电压的变化关系是非线性的,仅仅在小信号情况下才是如式(10)所述的线性情况. V_b 是 PN 结结构与材料特性相关的量,假设 $V_b = 5$ V. 研究 ΔL 和 φ_1 取不同值时,射频调制信号为大信号和小信号的两种情况下,调制损耗对光调制器非线性特性的影响. φ_1 的取值对光调制器非线性的影响比较大, $\varphi_1 = 0$ 与 $\varphi_1 = \pi/2$ 是光调制器的两种特殊情况, φ_1 取其它值时光调制器的非线性介于这两种情况之间,因此考虑这两种情况下光调制器的非线性特性,即:当 $\varphi_1 = 0$ 时,光调制器工作在二倍频状态,当 $\varphi_1 = \pi/2$ 时,光调制器工作在基频最大的状态.

3.1 大信号情况

大信号情况为式(7)和(8)所描述的折射率和调制

损耗随射频电压变化的常规情况,考虑 $V_{pp}=6$ V 的结果,当 V_{pp} 取其它数值时,光调制器的电光响应有类似结论.在图 2 为 $\varphi_1=0$ 时调制损耗对硅基光调制器非线性特性的影响,二次谐波达到最大值,图中归一化的电功率所显示的功率值是各频率分量的功率相对于总功率的比例.图 2(a) 为光调制器上下两臂几何长度差为 0 的情况,此时仅存在二次谐波和四次谐波,调制损耗的影响主要表现在四次谐波上,二次谐波功率几乎没有变化,考虑调制损耗时的四次谐波功率为 -59 dB,比未考虑调制损耗时的四次谐波功率低了 24.5 dB.图 2(b) 为光调制器上下两臂存在几何长度差的情况,此时基频、二次到四次谐波均存在,调制损耗的影响主要表现在三次和四次谐波上,基频功率和二次谐波功率几乎没有变化,考虑调制损耗时的四次谐波功率与图 2(a) 的情况基本相同,但是三次谐波功率比未考虑调制损耗时的三次谐波功率高了 9 dB.图 2(a) 和 (b) 均说明调制损耗对硅基光调制器的非线性特性有影响,在图 2(a) 中,调制器上下两臂等长,调制损耗是导致两臂功率不平衡的原因,它减弱了原有的四次谐波分量;在图 2(b) 中,调制器上下两臂有一定的

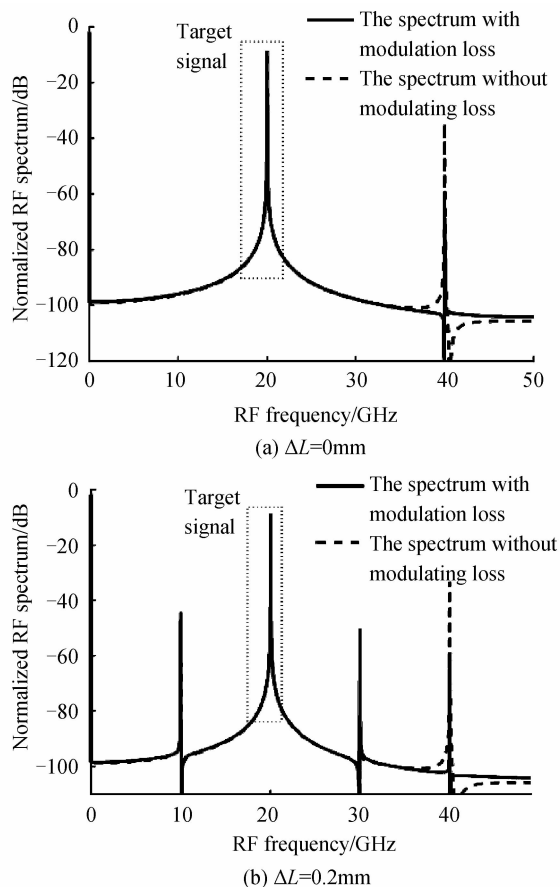


图 2 $\varphi_1=0$ 时大信号情况下调制损耗对硅基光调制器非线性特性的影响

Fig. 2 The influence of modulating loss on the nonlinearity of the silicon optical modulator when the radio-frequency signal is big and $\varphi_1=0$

长度差,两臂功率也存在一定的不平衡,因此光调制器本身会出现奇次谐波(基频和三次谐波),使调制损耗增加,三次和四次谐波功率改变.因此,当 $\varphi_1=0$ 时,调制损耗对光调制器的三次和四次谐波功率有很大影响,当调制损耗增加时,三次谐波功率将会增大.

图 3 为 $\varphi_1=\pi/2$ 时调制损耗对硅基光调制器非线性特性的影响,此时基频功率达到最大值.在光调制器上下两臂几何长度差为 0 的情况下,调制损耗产生的影响表现在二次和四次谐波上,如图 3(a).若不考虑调制损耗,二次和四次谐波分量几乎为 0,而考虑调制损耗时,二次和四次谐波处将会出现明显的功率分量.在光调制器上下两臂存在几何长度差的情况下,调制损耗产生的影响如图 3(b),调制损耗依然对二次和四次谐波有较大的影响,但是相比于图 3(a),这种差别在减小.图 3(a) 中,由于调制器上下两臂等长,不考虑调制损耗将不存在任何二次和四次谐波分量,因此,调制损耗使得二次谐波和四次谐波分量均增加了 60 dB 以上;而在图 3(b) 中,由于调制器上下两臂有一定的长度差,本身也会存在一定的二次谐波和四次谐波分量,调制损耗的存在仅仅是增加了这种非线性分量,即使得二次谐波分量增加了 27 dB,四次谐波分量增加了 15.7 dB.

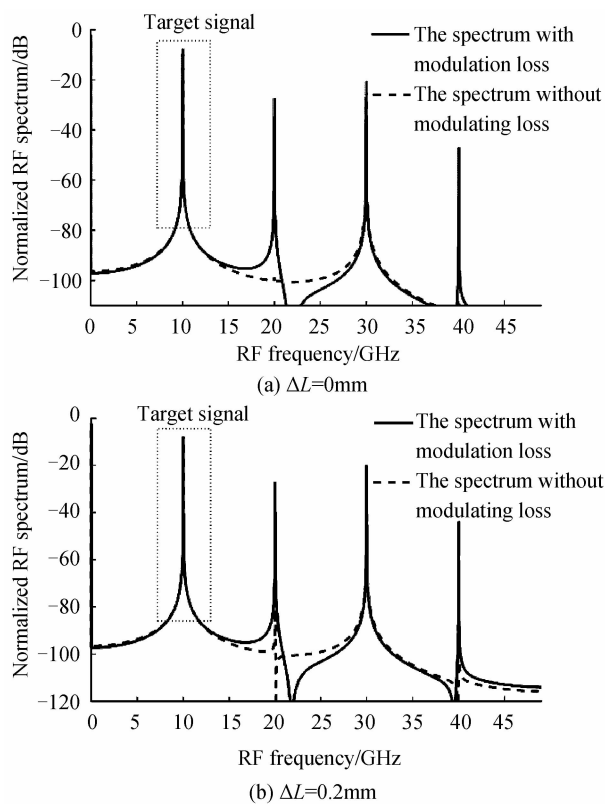


图 3 $\varphi_1=\pi/2$ 时大信号情况下调制损耗对硅基光调制器非线性特性的影响

Fig. 3 The influence of modulating loss on the nonlinearity of the silicon optical modulator when the radio-frequency signal is big and $\varphi_1=\pi/2$

3.2 小信号情况

小信号情况为式(9)和(10)所描述的折射率和调制损耗随射频电压线性变化的情况, 在 $V_{pp}=0.2\text{ V}$, 且其它参数和大信号条件下相同时, 可以得到光调制器的光电响应仿真结果. 图 4 为 $\varphi_1=0$ 时调制损耗对硅基光调制器非线性特性的影响, 二次谐波达到最大值. 在图 4(a) 中, 二次谐波以上的高阶频率分量很弱, 可以忽略, 此时, 由于光调制器上下两臂结构对称, 加上小信号情况下折射率和调制损耗随射频电压的变化是线性关系, 调制损耗对光调制后信号的电谱影响很小, 二次谐波非常纯净. 在图 4(b) 中, 调制损耗对光调制后信号的电谱影响主要表现在基频分量上, 即调制损耗加剧了此时的基频分量串扰, 这是由于光调制器上下两臂结构不再对称导致的. 同时, 光调制后信号的三次谐波也逐步增加, 但是调制损耗对三次谐波分量的影响并不大.

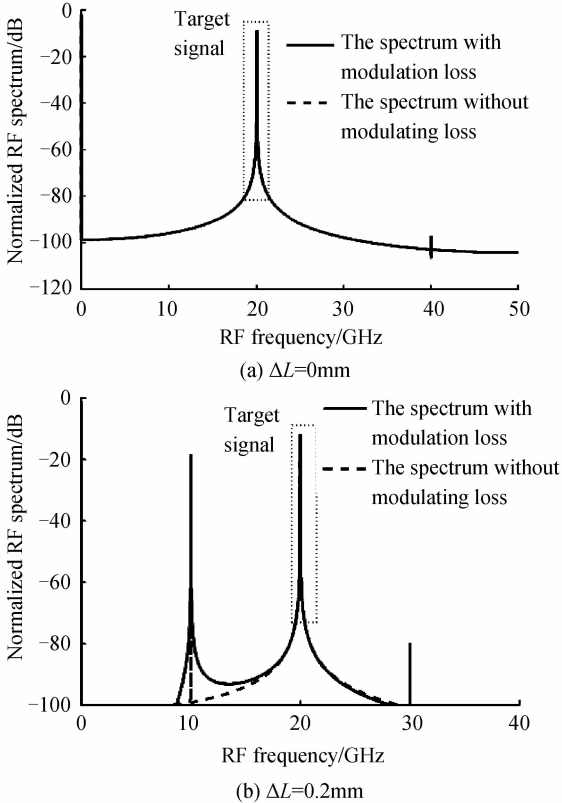


图 4 $\varphi_1=0$ 时小信号时情况下调制损耗对硅基光调制器非线性特性的影响

Fig. 4 The influence of modulating loss on the nonlinearity of the silicon optical modulator when the radio-frequency signal is small and $\varphi_1=0$

图 5 为 $\varphi_1=\pi/2$ 时调制损耗对硅基光调制器非线性特性的影响, 此时基频功率达到最大值, 无论光调制器上下两臂是否对称, 调制损耗对光调制后信号的电谱影响主要表现在二次谐波分量上, 即调制损耗加剧了此时的二次谐波串扰, 图 5(a) 的影响略大一些.

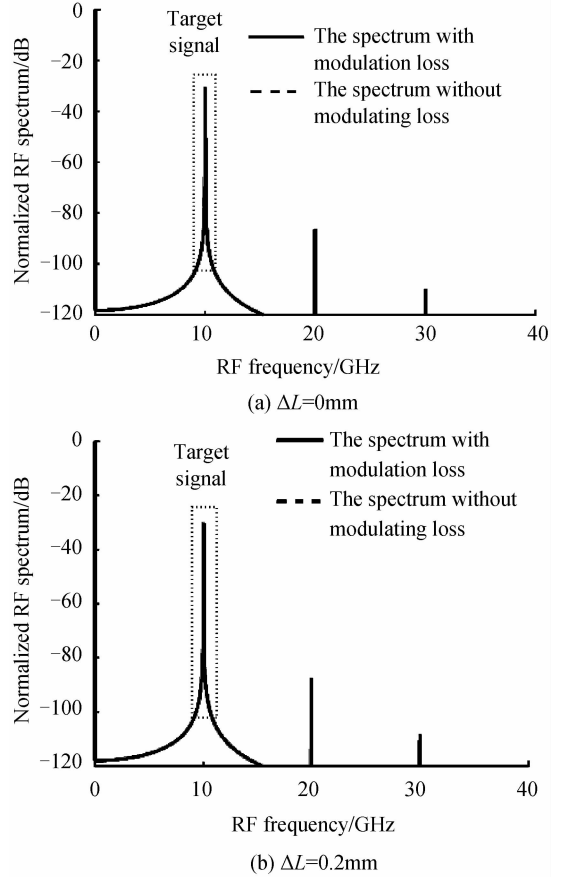


图 5 $\varphi_1=\pi/2$ 时小信号时情况下调制损耗对硅基光调制器非线性特性的影响

Fig. 5 The influence of modulating loss on the nonlinearity of the silicon optical modulator when the radio-frequency signal is small and $\varphi_1=\pi/2$

由此可见硅基光调制器的调制损耗会对调制器的非线性产生很大的影响, 在常规的大信号情况下, $\varphi_1=0$ 时, 调制损耗主要影响到三次谐波和四次谐波的产生, 即增强三次谐波分量并减弱四次谐波分量; $\varphi_1=\pi/2$ 时, 调制损耗主要影响到二次谐波和四次谐波的产生, 即同时增强二次谐波和四次谐波分量. 在小信号情况下, $\varphi_1=0$ 时, 调制损耗在光调制器上下两臂不对称情况下增加了基频分量串扰; $\varphi_1=\pi/2$ 时, 调制损耗的影响主要表现在增加了二次谐波分量上.

4 结论

针对 MZI 结构的硅基光调制器, 本文研究了调制损耗对硅基光调制器非线性的影响. 对比考虑调制损耗和忽略调制损耗的模型, 发现在常规的大信号情况下, 光调制器偏置相位为 0 时, 调制损耗使得三次谐波增强, 四次谐波减弱; 光调制器偏置相位为 $\pi/2$ 时, 调制损耗使得二次和四次谐波增强. 而在小信号情况下, 三次和四次等高次谐波不明显, 光调制器偏置相位为 0 时, 调制损耗在光调制器上下两臂不对称情况下增加了基频分量串扰; 光调制器偏置相位为 $\pi/2$ 时, 调制

损耗的影响主要表现在增加了二次谐波分量上. 研究结果有助于对硅基光调制器的非线性问题的理解, 可为面向模拟光传输和微波光子学的模拟集成光调制器的发展提供参考.

参考文献

- [1] JALALI B, FATHPOUR S. Silicon photonics[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(12): 4600-4615.
- [2] BARKAI A, CHETRIT Y, COHEN O, *et al.* Integrated silicon photonics for optical networks[J]. *Journal of Optical Networking*, 2007, **6**(1): 25-47.
- [3] ZHAO Yong, JIANG Xiao-qing, YANG Jian-Yi, *et al.* Silicon-based CMOS photonic devices using carrier dispersion effect[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2485-2490. 赵勇, 江晓清, 杨建义, 等. 载流子色散型硅基 CMOS 光子器件[J]. *光子学报*, 2009, **38**(10): 2485-2490.
- [4] LI Guo-Yi, WEI Yu-xin, ZHOU qiang, *et al.* Analysis of polarization-independent optical directional coupler based on slot waveguides for long-wave infrared[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(10): 1603-1606. 李国熠, 魏玉新, 周强, 等. 基于 slot 波导的硅基长波红外偏振无关定向耦合器分析[J]. *光子学报*, 2011, **40**(10): 1603-1606.
- [5] REED G T, MASHANOVICH G, GARDES F Y, *et al.* Silicon optical modulators[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(8): 518-526.
- [6] LIU A, JONES R, LIAO L, *et al.* A high-speed silicon optical phase modulator based on ametal-oxide-semiconductor capacitor[J]. *Nature*, 2004, **427**: 615-618.
- [7] THOMSON D J, GARDES F Y, FEDELI J M, *et al.* 50-Gb/s silicon optical modulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(4): 234-236.
- [8] XIAO X, XU H, LI X, *et al.* High-speed, low-loss silicon Mach-Zehnder modulators with doping optimization[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(4): 4116-4125.
- [9] XU H, LI X, XIAO X, *et al.* High-speed silicon modulators with band equalization[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(16): 4839-4842.
- [10] DONG P, LIU X, SETHUMADHAVAN C, *et al.* 224-Gb/s PDM-16-QAM modulator and receiver based on silicon photonic integrated circuits[C]. Optical Fiber Communication Conference Anaheim, California United States, OFC 2013.
- [11] SOREF R A, BENNETT B R. Electrooptical effects in silicon[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics* 1987, **23**(1): 123-129.
- [12] ZHOU H F, ZHAO Y, WANG W, *et al.* Performance influence of carrier absorption to the Mach-Zehnder-interference based silicon optical switches[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(9): 7043-7051.
- [13] KHILO A, SORACE C, KÄRTNER K. Broadband linearized silicon modulator[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(5): 4485-4500.
- [14] VACONDIO F, MIRSHAFIEI M, BASAK J, *et al.* A silicon modulator enabling RF over fiber for 802.11 OFDM signals[J]. *IEEE Journal of Selected Topics Quantum Electronics*, 2010, **16**(1): 141-148.
- [15] GUTIERREZ A M, BRIMONT A, HERRERA J, *et al.* Analytical model for calculating the nonlinear distortion in silicon-based electro-optic Mach-Zehnder modulators[J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(23): 3603-3613.