

# 硅-有机材料混合电光调制器的原理及研究进展

齐影<sup>1</sup> 安俊明<sup>1,2</sup> 王玥<sup>1</sup> 张家顺<sup>1,2</sup> 王亮亮<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083

<sup>2</sup>河南仕佳光子科技有限公司, 河南 鹤壁 458030

**摘要** 硅-有机材料混合(SOH)集成平台通过结合绝缘层上硅(SOI)波导和功能有机非线性材料打开了高速、超紧凑电光器件的发展之路。目前,基于SOH平台的电光调制器频率响应带宽可达100 GHz,在能耗仅为640 fJ/bit时,数据传输速率可达112 Gbit/s。介绍了SOH集成平台,针对目前主要的SOH电光调制器类型,如马赫-曾德干涉仪型SOH电光调制器、SOH同步/正交相位型(IQ)电光调制器、微环型SOH电光调制器等,介绍了其工作原理、基本特性及国内外发展状况和趋势。

**关键词** 光学器件; 硅-有机材料混合平台; 光学调制器; 调制电压; 调制速率

中图分类号 TN252

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.070004

## Principle and Progress of Silicon-Organic Hybrid Electro-Optic Modulators

Qi ying<sup>1</sup> An Junming<sup>1,2</sup> Wang Yue<sup>1</sup> Zhang Jiashun<sup>1,2</sup> Wang Liangliang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

<sup>2</sup>Henan Shijia Photons Technology Co., Ltd, Hebi, Henan 458030, China

**Abstract** Silicon-organic hybrid (SOH) platform combined with silicon-on-insulator (SOI) waveguides and the functional organic nonlinear materials opens a route to highly-speed ultra-compact electro-optic devices. Recently, bandwidth of frequency responses of modulators based on SOH is up to 100 GHz, and enabled operation is up to 112 Gbit/s with an energy consumption of 640 fJ/bit. Main SOH electro-optic modulators, such as the Mach-Zehnder interferometer (MZI) modulator, in-phase/quadrature-phase (IQ) modulator and microring-resonator modulator, are introduced. Meanwhile, the design principle, characteristics and research status of the modulators are illustrated.

**Key words** optical devices; silicon-organic hybrid platform; optical modulator; modulation voltage; modulation speed

**OCIS codes** 230.2090; 250.4100; 250.7360

## 1 引言

随着家庭办公、互联网电视(IPTV)、网络游戏等宽带业务的不断推出,通信网络的数据量呈现出高速增长态势,对高性能计算机、传输骨干网及接入网传输速率的要求越来越高。然而,电互联受到带宽、空间密度、延时、能耗等方面的限制却日益明显,成为集成电路进一步发展的巨大障碍。光互联无电互联固有的阻抗匹配问题,具有宽带宽、低损耗等优势,可解决电互联带宽不足和能耗太高等难题,光互联代替电互联成为必然趋势。光学调制器作为光互联的关键组成部分,是近年来光通信领域的研究热点。

硅基微纳光子学被认为是未来光电信息处理系统的核心动力,为高度集成的近红外光波导器件提供了

收稿日期: 2015-02-13; 收到修改稿日期: 2015-03-23; 网络出版日期: 2015-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(61274047)、国家自然科学基金重点项目(61435013)、国家自然科学基金青年基金(61307034)

作者简介: 齐影(1986—),女,硕士研究生,主要从事硅基光电集成、电光调制器方面的研究。

E-mail: qiying@semi.ac.cn

导师简介: 安俊明(1969—),男,博士,研究员,主要从事硅基、InP基光波导及集成器件等方面的研究。

E-mail: junming@semi.ac.cn (通信联系人)

平台<sup>[1-7]</sup>。近年来,各种基于硅基有源、无源光波导器件,如滤波器<sup>[2]</sup>、光开关<sup>[3]</sup>、光调制器<sup>[4-5]</sup>、光学路由器<sup>[6]</sup>等发展迅速。绝缘层上硅(SOI)基光子集成已经达到了工业应用的成熟条件,但硅为中心反演对称结构,非线性电光效应,二阶非线性电光效应(克尔效应)也非常微弱。因此,传统的硅基调制器主要依靠pn结<sup>[8]</sup>、pin结<sup>[9]</sup>或金属氧化物半导体(MOS)结构<sup>[10]</sup>中的自由载流子注入或耗尽产生的等离子体效应来实现电光调制。自由载流子注入型调制器半波电压-长度积 $U_{\pi}L$ 较小,可达 $0.36 \text{ V}\cdot\text{mm}$ ,但由于其调制速率受少数载流子寿命限制,一般只有几Gbit/s<sup>[9]</sup>;而载流子耗尽型调制器调制速率可达40 Gbit/s,而 $U_{\pi}L$ 却增大至 $10\sim 40 \text{ V}\cdot\text{mm}$ <sup>[11]</sup>。因此,基于等离子体效应的电光调制器需在调制速率与半波电压-长度积之间做出权衡。并且,由于等离子体效应型电光调制器同时伴随着强度调制和相位调制,因此其不适用于生成对信号相位和振幅同时进行编码的高阶正交幅移调制格式如正交振幅调制(QAM)等。

硅-有机物材料混合(SOH)集成平台<sup>[12-18]</sup>结合了绝缘层上硅光波导和有机非线性电光材料的优势,可将横电(TE)模式的信号光限制在波导的槽型区与填充在槽型区的非线性有机材料相互作用实现线性电光调制。基于SOI的SOH电光调制器克服了自由载流子等离子体效应作为调制原理的固有限制,具有小尺寸、高调制速率、低损耗等优点,更能满足全球信息通信对高传输速率的要求,成为近几年国际上硅基平台高速调制器研究的热点课题之一。目前,基于SOH平台的电光调制器频率响应带宽可超过100 GHz<sup>[19]</sup>,在能耗仅为640 fJ/bit时,数据传输速率可达112 Gbit/s<sup>[20]</sup>。

本文首先对SOH平台的槽型光波导及有机非线性电光材料进行简单介绍;接着重点对基于SOI的SOH电光调制器和基于SOH的相移器的几种主要结构进行总结,介绍了各种结构的基本原理,并对其特点给予分析。

## 2 SOH平台

SOH平台由传统的SOI波导与有机覆层非线性聚合物材料构成。可由基于互补金属氧化物半导体(CMOS)加工技术的SOI晶圆高产工艺与功能型有机材料淀积工艺实现。基于SOI的槽型波导与传统的硅基纳米线波导不同,可将光主要限制在折射率较低的槽型区传播,槽型区可填充非线性聚合物材料从而实现特定功能。因此基于SOI的槽型波导是SOH平台的常用波导结构,无特殊说明一般默认SOH平台的波导结构为槽型波导。以下将分别讨论SOH平台的两大重要组成部分:槽型波导与有机非线性电光材料。

### 2.1 SOH槽型波导结构与工作原理

为了达到光场与有机覆层间的最大相互作用,实现光场与外加调制电场间的最大重叠面积,优化不同光模式间的相位匹配,减小光损耗,SOH电光调制器的波导一般选用带有平板区的槽型波导结构。该结构由硅平板区与槽型波导构成,其中,硅平板区经过N掺杂,具有导电性,用来导通槽型波导与金属电极。槽型波导结构是由Almeida V R等<sup>[21-22]</sup>在2004年提出的,其结构如图1(a),(b)所示。

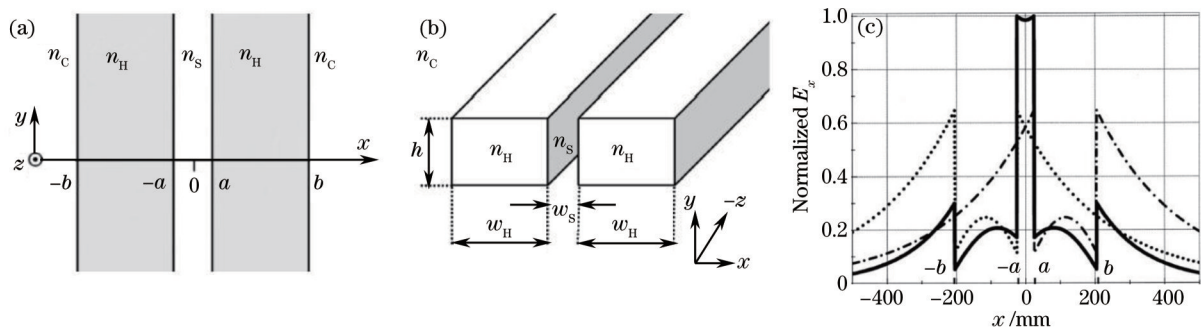


图1 (a) 槽型波导高度无穷大时情况结构原理图; (b) 槽型波导高度有限高时情况结构原理图; (c) 槽型波导在中心波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的准TE模式下的横向电场的归一化能量分布

Fig.1 (a) Schematic of the slot waveguide structure with infinite height; (b) schematic of the slot waveguide structure with finite height; (c) normalized transverse electric-field distribution of the fundamental TE eigenmode for the slab-based slot waveguide at  $1.55 \mu\text{m}$  center wavelength

由麦克斯韦方程出发,为满足电位移 $D$ 法向连续,有

$$D_{x,\text{slot}} = D_{x,\text{Si}} \rightarrow \epsilon_{\text{slot}} E_{x,\text{slot}} = \epsilon_{\text{Si}} E_{x,\text{Si}}, \quad (1)$$

$$\frac{\epsilon_{\text{Si}}}{\epsilon_{\text{slot}}} = \left( \frac{n_{\text{Si}}}{n_{\text{slot}}} \right)^2. \quad (2)$$

又知硅的折射率( $n_{\text{Si}}=3.48$ )远大于槽型区填充的有机物折射率( $n_{\text{slot}}=1\sim 2$ ),可知有: $E_{x,\text{slot}} > E_{x,\text{Si}}$ ,即光场的横向电场主要集中在槽型区如图1(c)所示。从而提高了光场与槽型区填充材料的相互作用。

槽型波导一般分为水平槽型波导结构与垂直槽型波导结构,考虑到工艺的成熟稳定性,一般选用以上介绍的垂直槽型波导结构。

## 2.2 有机非线性电光材料

用于SOH平台的有机非线性材料包层主要分为两大类:有机晶体<sup>[23-26]</sup>材料和施主发色团聚合物,一般简称为电光聚合物<sup>[27-30]</sup>。

有机晶体材料是通过液体或熔体有机分子在硅波导周围生长生成的,组成晶体的发色团通过晶体晶格结构保持定向从而产生非线性,因此不需要进行极化。最典型的电光晶体材料为有机吡啶盐4-N,N-二甲氨基-4'-N'-甲基-吡啶甲磺酸盐(DAST)<sup>[26]</sup>,在中心波长为1550 nm时,其电光系数50 pm/V,但由于分子结构在其熔点温度时不稳定、易分解,因此只能使用溶液生长法。另一种典型的电光晶体材料是2-(3-(4-羟乙基)-5,5-二甲基-2-enylidene(OH1)丙二腈)<sup>[31]</sup>,在中心波长为1320 nm时,电光系数为527 pm/V。这种材料是在DAST上发展而来,在熔点温度时,结构稳定,可使用熔融生长法。

电光聚合物材料可通过旋涂方式直接淀积到波导上,但此类型的电光发色团是嵌入在聚合物基体中的,需进行极化使其产生定向而表现非线性。极化效率与极化条件密切相关,一般需在高温(100 °C~150 °C)下外加极化电场(典型的为100~200 V/ $\mu\text{m}$ )。几种典型的施主发色团型聚合物的电光特性总结见表1<sup>[29, 32-33]</sup>。

表1 几种典型的施主发色团聚合物材料电光特性

Table 1 Electro-optic characteristics of several typical chromophores hosted polymer materials

Materials	Wavelength /nm	Electro-optic coefficient /(pm/V)
AJC146/PMMA-AMA	1550	140~170
LPD-80/APC	1310	90
LX-M1	1550	70

有机晶体材料生长熔点相对较高,光化学稳定性好,适用于高温等恶劣环境,且不需极化。但其折射率较高不利于微波与光波间的速率匹配,不适用于宽带宽、高速率的调制器。电光聚合物电光系数较大,折射率较小,可用于小驱动电压、高速率调制器。但由于其发色团定向需进行极化,与其他器件集成时会产生附加效应。并且,当聚合物达到玻璃转化温度(100 °C~150 °C)时,发色团会逐渐失去定向排列,因此其工作条件对温度的要求相对较高,不适用于高温环境。

## 3 基于SOI的SOH电光调制器的研究进展

### 3.1 马赫-曾德干涉仪型SOH电光调制器

电光调制器通常使用马赫-曾德干涉仪(MZI)结构,其干涉臂相当于两个相位调制器。电信号S通过共平面波导电极(GSG)加载到MZI结构的调制臂上,使得波导槽型区建立起了反向电场,因此MZI调制器以推挽方式工作。此种条件下,光信号通过相移臂调制后输出的光振幅为<sup>[18]</sup>:

$$E_s = \frac{1}{2} \exp \left[ j \left( \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right] \cos \left( \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \right), \quad (3)$$

式中 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别为MZI结构两调制臂加上电压后的相位改变量。当MZI调制器以推挽式工作且有 $\theta_1 = -\theta_2$

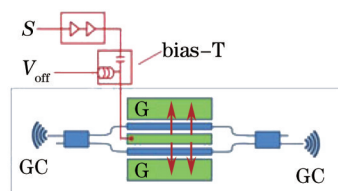


图2 MZI调制器原理图

Fig.2 Configuration of MZI modulator



时,可获得理想的无啁啾效应的幅移键控信号(ASK)。并且,推挽式工作可使半波电压  $V_{\pi}$ (相对于非推挽式)减半,即当偏置电压为  $V_{\pi}/2$  时,MZI 结构产生  $\pi$  相移。MZI 型调制器结构如图 2 所示。

根据 MZI 调制器两臂上相位调制器结构不同,其工作原理分以下几种。

### 3.1.1 类 CMOS 金属堆叠型相位调制器

美国的 Palmer R 等<sup>[34]</sup>利用类 CMOS 金属堆叠槽型波导结构作为相移臂上的相位调制器,其横截面如图 3(a)所示。波导结构为带有平板区的槽型波导结构,电极采用 GSG 结构,射频(RF)传输线的铜电极通过金属钨通孔与高掺杂的硅平板区相导通。此类 CMOS 金属堆叠结构在金属电极与波导间淀积二氧化硅层作为缓冲层,允许光波导与电传输线间交叉。填充的有机非线性材料通过加载到调制器两接地电极的极化电压  $U_{\text{poling}}$  进行极化激活。非线性材料的生色团极化后的定向如蓝色箭头所示,而 GSG 传输线上的射频调制电场方向如红色箭头所示,调制器在推挽式模式下工作。由图 3(b)、(c)可知,光信号的横向电场与调制电场均限制在槽型区,两者重叠且相互作用,实现电光信号之间的转换。目前由该结构相位调制器作为相移臂的 SOH MZI 型调制器的半波电压-长度积  $U_{\pi}L$  低至  $0.52 \text{ V} \cdot \text{mm}$ ,调制器速率可达  $40 \text{ Gbit/s}$ 。

这种结构是 SOH 相位调制器中最简单的一种。但由于电极与槽型波导通过 N 掺杂的平板区导通,掺杂浓度越高平板区电阻率越小,电学响应对带宽的限制越小,但同时光学损耗增大,调制效率降低,必须在两者之间做出权衡,不能同时兼备。

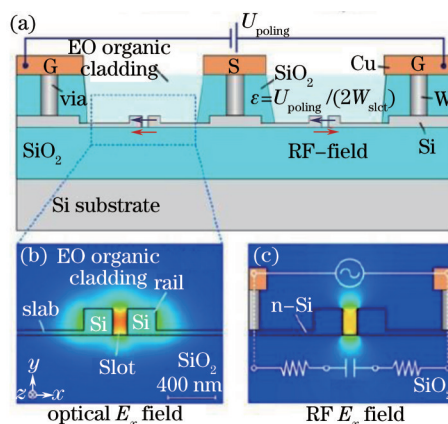


图 3 (a) MZI 调制器横截面图; (b) 槽型波导结构在准 TE 模式下的光场分布; (c) 槽型波导结构的 RF 模式下电场分布

Fig.3 (a) Cross-section of the MZI modulator; (b) simulated optical mode of the slot waveguide at quasi-TE mode;

(c) simulated RF mode field of the slot waveguide

### 3.1.2 类金属-绝缘体-半导体型相位调制器

Alloatti L 等<sup>[33]</sup>提出了一种类金属-绝缘体-半导体(MIS)型相位调制器,通过一种不造成显著光损耗的新方法来提高导通槽型区与调制器电极的硅平板区电导率,不需要进行离子注入,简化了制造工艺,实验获得调制速率可达  $42.7 \text{ Gbit/s}$ 。

该调制器的结构如图 4(a)所示,其光波导结构与类 CMOS 堆叠型相位调制器相同。衬底采用电导率为  $\sigma = 0.05 \text{ } \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$  的硅材料作为栅极。2 mm 厚的二氧化硅隔开了硅衬底与硅平板层,此结构与众所周知的 MIS 结构类似。当外加正栅电压  $V_{\text{gate}}$  时,平板区的能带发生弯曲如图 4(c)所示,在平板区靠近 Si/SiO<sub>2</sub> 界面处产生高迁移率的电子积累层,不需要再对平板区进行掺杂。

类 MIS 型相位调制器不需要离子注入便能降低平板区的电阻率,减小光学损耗。且与离子注入型结构相比,平板区厚度较薄,可小于 60 nm,槽型区对光场的限制作用更强,调制效率更高。但是由于需额外对衬底与平板区间加栅极电压,制作工艺相对复杂。

### 3.1.3 P-S-N 二极管电容器型相位调制器

新加坡国立大学 Xin Maoqing 等<sup>[35]</sup>人提出了一种 P-S-N(S 代表槽型)二极管电容器型相位调制器,其二维横截面结构图如图 5(a)所示,图 5(b)为相应的等效电路图。这种相位调制器是将二极管电容器,与槽型波导结构相结合的一种新型结构。普通的槽型波导相位调制器,主要依靠的是槽型区的光场与电场的重叠以及相互作用实现电光调制,要求减小槽型区的宽度以及硅平板区的厚度,即高纵横比的槽型波导结构,而这样的结构对于目前的纳米加工技术来说是个巨大挑战。而这种 P-S-N 二极管电容器型相位调制器,不仅存

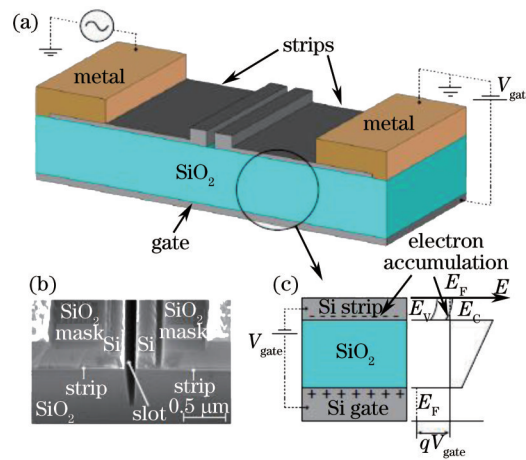


图4 (a) 类 MIS 型相位调制器的结构原理图; (b) 器件横截面的扫描式电子显微镜图; (c) 对 2 μm 厚的 SiO<sub>2</sub> 层外加正栅电压, 在平板区将形成高迁移率电子积累

Fig.4 (a) Structure of the MIS-like phase modulator; (b) scanning electron microscope image of the cross section of the fabricated device; (c) when a positive gate voltage is applied across the 2 μm thick SiO<sub>2</sub> layer, a highly conductive electron accumulation layer forms in the strips

在槽型区的普克尔非线性电光效应,在硅脊内也存在自由载流子效应,两种效应共同作用,实现该器件的电光调制。P-S-N 二极管电容器型相位调制器由普克尔非线性效应与自由载流子效应共同作用产生相移,且载波光信号以横磁(TM)模式为最佳。

该器件的槽型波导结构要求其纵横比较小,这不仅降低了制造工艺的难度,也使得时间常数 RC 减小,进而提高器件的调制速度。当对电极外加射频电压信号时,该结构在 5.5 V/cm 高调制效率下的 3 dB 带宽可达 269 GHz。此外,该器件的直流能耗接近于 0,交流能耗极低,为 5.83 pJ/bit,在绿色低能耗的光电子应用方面具有广阔的应用前景。

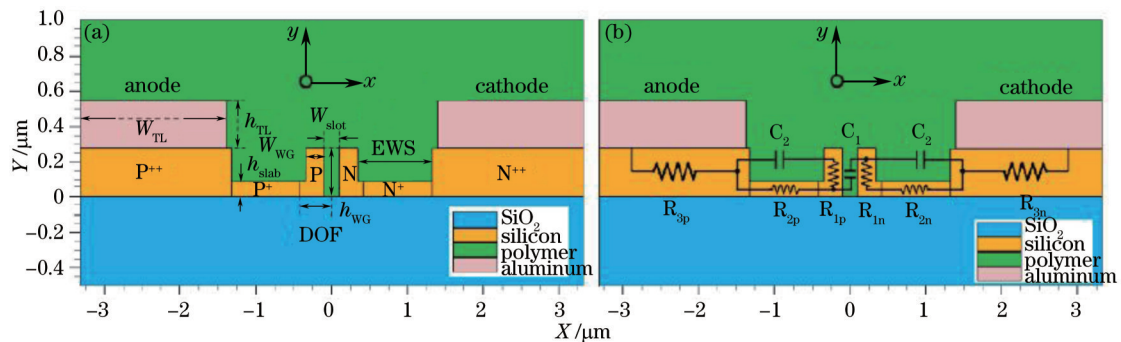


图5 (a) P-S-N 二极管电容器型相位调制器的二维横截面原理图; (b) 为与(a)图相对应的等效电路图

Fig.5 (a) 2D schematic cross section of the P-S-N diode capacitor phase modulator;

(b) equivalent circuit corresponding to (a)

### 3.1.4 槽型-光子晶体慢光相位调制器

德国卡尔斯鲁厄大学的 Brosi J M 等<sup>[12,36]</sup>提出了一种长度仅为 80 μm、带宽 78 GHz、传输速度达 100 Gbit/s 的槽型-光子晶体慢光相位调制器,其原理结构图如图 6(a)所示。该慢光相位调制器由填充了非线性电光有机材料的槽型光子晶体波导构成,TE 模式下的光场 E<sub>z</sub> 分量被强限制于槽型区,见图 6(b)。此慢光相位调制器除了对光场在槽型区的强限制效应外,由于槽型-光子晶体波导的慢光效应,经过调制区的光场群速度减小,显著提高了光场与微波电场的相互作用时间,进而减小了调制器的长度。由于群速度随光频率的变化明显,如图 6(c)所示,为避免光脉冲畸变失真,器件的结构参数经优化可在 1 THz 的带宽范围内保持群速度仅为真空中光速的 4%。

槽型-光子晶体慢光相位调制器具有尺寸小、调制效率高、工艺简化和避免套刻误差等优点,且调制器带宽不受 RC 电学响应限制仅受光波与微波的速度匹配限制,非常适用于超紧凑集成应用。但这种调制器驱动电压相对较大约为 1 V,相应的能耗也较大。

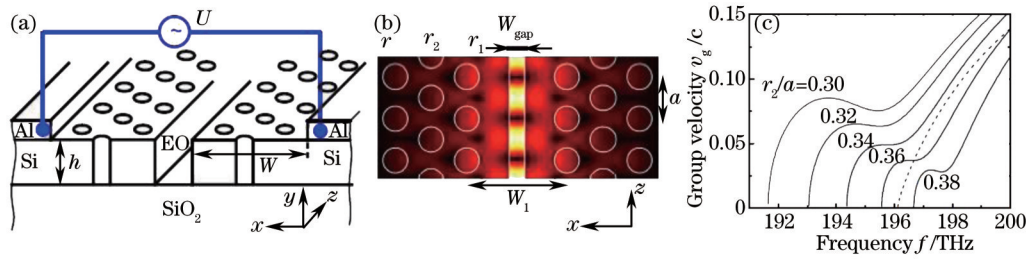


图6 (a) 槽型-光子晶体慢光相位调制器原理图; (b) 准TE模式下波导区的电场 $E_x$ 分布; (c) 槽型-光子晶体波导的色散曲线图

Fig.6 (a) Schematic of the slot-photonic crystal slow-light phase modulator; (b) dominant electric field component  $E_x$  at quasi-TE mode; (c) dispersion of the slot-photonic crystal waveguide

### 3.2 SOH同步/正交相位型(IQ)调制器

卡尔斯鲁厄大学的Kron D等<sup>[20,37]</sup>提出了基于SOH平台的IQ调制器。这种IQ调制器由两个MZI型SOH电光调制器嵌套构成,其结构如图7所示。每个MZI调制器可看作一个二元相位调制器,当调制器在最小传输点以推挽方式工作时,可产生 $\pi$ 相移。两个MZI型调制器嵌套构成IQ调制器,一路作为I同相位部分,另一路加上一个 $\pi/2$ 相移器,作为Q正交相位部分,可分别传输同相位数据流与正交相位数据流。这种结构可以对信号包络的任意相位与振幅关系进行编码。其中每个MZI型调制器的结构与3.1节介绍相同,在此不再赘述。目前,此结构的调制器可以112 Gbit/s的速率对16QAM信号进行编码,其能耗仅为640 fJ/bit,且该器件可无误差的产生或接收56 Gbit/s正交相移键(QPSK)信号。

非谐振结构的调制器(如上述简单的MZI型调制器)一般使用对关键控(OOK)调制方式对信号进行编码再加载到载波光信号上。这种最简单的幅移键控调制方式是通过器件足够大的消光比控制光的开、关,适用于对消光比和线性度要求较低的短途数据传输。与之相比,IQ调制器则可适用于高级调制方式如相移键控(PSK),QAM等,在频谱宽度一定时,先进的调制方式可提高频谱效率,降低能耗,更能满足全球信息通信对光传输系统的要求。

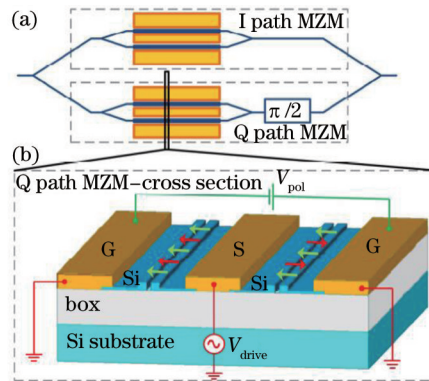


图7 (a) 由两MZI调制器嵌套构成的IQ调制器的俯视图; (b) 嵌套的SOH MZI型调制器的横截面图

Fig.7 (a) Top view of the IQ modulator with nested MZI modulators; (b) cross section of a nested SOH MZI modulator

### 3.3 微环型SOH电光调制器

美国华盛顿大学的Gould M等<sup>[38]</sup>提出了基于SOH槽型波导的微环型电光调制器,结构如图8(a)所示。对于微环结构,只有满足谐振条件: $2\pi R=mN_{\text{eff}}$ 的光才会进入下路通道,而主通道末端将探测不到该波长的光波。采用SOH平台,利用非线性材料的普克尔电光效应,当电场改变时,微环的有效折射率发生变化,谐振波长也随之改变,原来无法到达主通道末端的光波便可到达主通道末端,这样就实现了电信号到光信号的转换,即实现了电光调制。图8(b)为微环型电光调制器对应的等效电路图。其中, $R_1$ 表示平板区电阻, $R_0$ 表示微环外边缘电阻,C表示槽型区的等效电容。由等效电路图可知该器件的响应速度与平板区电阻和微环外边缘电阻有关,电阻越小响应速度越快。该结构调制器的微环半径为60  $\mu\text{m}$ ,其6 dB带宽为1 GHz,可调谐性为12.7 pm/V,这与目前性能最好的基于等离子体效应的微环调制器的性能相差无几。

与MZI型调制器相比,微环型调制器具有尺寸小,能耗低,电极可采用集总型省去了行波电极设计上的麻烦等优点。但同时,微环型调制器调制带宽较窄,工艺容差较小,不利于高速数据传输。目前对于SOH微



环型调制器的研究还比较少。

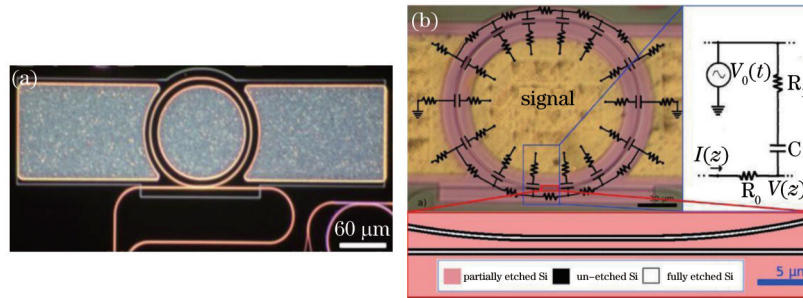


图8 (a) 微环谐振型调制器的光学显微镜暗场图像; (b) 器件的等效电路模型

Fig.8 (a) Dark field optical micrograph of the microring-resonator modulator; (b) equivalent circuit model of device

## 4 结 论

系统介绍了SOH平台的当前进展,介绍了其基本组成部分槽型光波导以及有机非线性材料。其中,有机晶体材料光化学稳定性好,不需极化适用于高温恶劣环境,但折射率较大不利于微波与光波间速度匹配,因此不适用于高速、宽带宽调制器;而电光聚合物电光系数较大,折射率较小,适用于小驱动电压、高速率调制器。但其发色团定向需进行极化,极化效率影响器件性能,且其工作条件对温度要求较高,不适用于高温环境。

接着重点介绍了基于SOH平台的三种类型电光调制器: MZI调制器、IQ调制器以及微环谐振型调制器。MZI型调制器结构简单,适用于简单的OOK调制,调制速度超过40 Gbit/s。IQ调制器嵌套了两个MZI型调制器,可同时对相位与振幅进行编码,适用于PSK, QAM等高级调制方式,调制速率可达112 Gbit/s,能耗仅为640 fJ/bit。微环谐振型调制器尺寸小,能耗低,但调制带宽较窄,工艺容差较小,不利于高速数据传输。

本文还着重介绍了类CMOS金属堆叠型、类MIS型、P-S-N二极管电容器型和槽型-光子晶体慢光型四种不同结构的相位调制器。目前采用最多的是类MIS型与槽型-光子晶体慢光型相位调制器,因为类MIS型相位调制器不需对硅平板区进行掺杂,光学损耗小,目前该类型相位调制器的频率响应带宽达100 GHz;而槽型-光子晶体慢光型相位调制器则是利用慢光效应提高微波与光信号间相互作用效率,尺寸减小至80 nm,带宽可达78 GHz。

## 参 考 文 献

- Masini G, Colace L, Assanto G. Si based optoelectronics for communications[J]. Materials Science and Engineering: B. 2002, 89(1-3): 2-9.
- Zou Pin, Han Xiuyou, Wang Yu, *et al.*. Study on a tunable radio frequency filter based on integrated optical waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1013001.  
邹品, 韩秀友, 王瑜, 等. 可调谐集成光波导射频滤波器研究[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1013001.
- Liu Yi, Tong Xiaogang, Yu Jinlong, *et al.*. All-optical switching in silicon-on-insulator serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205006.  
刘毅, 仝晓刚, 于晋龙, 等. 基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205006.
- Dong Zhengfang, Zhou Zhen, Wang Kunbo, *et al.*. Optimization and analysis for submicrometer-scale silicon waveguide optical phase modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 102301.  
董正芳, 周震, 王坤博, 等. 亚微米硅基波导光学相位调制器的优化分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 102301.
- Fan Liwen, Meng Zhou, Sun Qiao, *et al.*. Operating points control for Mach-Zehnder electro-optic modulator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0905001.  
樊理文, 孟洲, 孙乔, 等. 马赫-曾德尔电光调制器工作点自动控制[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0905001.
- Chen Qiaoshan, Yang Lin. Optical routers for photonic network-on-chip[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 110005.  
陈乔杉, 杨林. 用于片上光网络的片上光路由器研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 110005.
- Ren Yan, Song Muping. Optical NRZ-to-RZ modulation format conversion based on cross-phase modulation effects in

- silicon micro-ring resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706002.
- 任 艳, 宋牟平. 基于硅基微环谐振器交叉相位调制效应的非归零信号到归零信号光调制格式转换[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706002.
- 8 Liu Ansheng, Liao Ling, Rubin D, *et al.*. High-speed optical modulation based on carrier depletion in a silicon waveguide[J]. *Opt Express*, 2007, 15(2): 660-668.
- 9 Green W M, Rooks M J, Sekaric L, *et al.*. Ultra-compact, low RF power, 10 Gb/s silicon Mach-Zehnder modulator[J]. *Opt Express*, 2007, 15(25): 17106-17113.
- 10 Liu Ansheng, Jones R, Liao Ling, *et al.*. A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor[J]. *Nature*, 2004, 427(6975): 615-618.
- 11 Liao Ling, Liu Ansheng, Basak J, *et al.*. 40 Gbit/s silicon optical modulator for highspeed applications[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(22): 1196-1197.
- 12 Freude W, Brosi J, Koos C, *et al.*. Silicon-organic hybrid (SOH) devices for nonlinear optical signal processing[C]. *Transparent Optical Networks*, 2008. ICTON 2008. 10th Anniversary International Conference on IEEE, 2008, 2: 84-87.
- 13 Koos C, Vorreau P, Vallaitis T, *et al.*. All-optical high-speed signal processing with silicon-organic hybrid slot waveguides [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(4): 216-219.
- 14 Leuthold J, Freude W, Brosi J M, *et al.*. Silicon organic hybrid technology—a platform for practical nonlinear optics[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(7): 1304-1316.
- 15 Koos C, Alloatti L, Korn D, *et al.*. Silicon-organic hybrid (SOH) electro-optical devices advanced photonics[C]. *Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics*. Optical Society of America, 2011.
- 16 Alloatti L, Korn D, Pfeifle J, *et al.*. Silicon-organic hybrid devices[J]. *SPIE*, 2013, 8629: 86290P.
- 17 Koos C, Leuthold J, Freude W, *et al.*. Silicon-organic hybrid (SOH) technology: a platform for efficient electro-optical devices[C]. *Optical MEMS and Nanophotonics (OMN)*, 2013 International Conference on IEEE, 2013: 85-86.
- 18 Leuthold J, Koos C, Freude W, *et al.*. Silicon-organic hybrid electro-optical devices[J]. *Selected Topics in Quantum Electronics*, *IEEE Journal of*, 2013, 19(6): 114-126.
- 19 Alloatti L, Palmer R, Diebold S, *et al.*. 100 GHz silicon-organic hybrid modulator[J]. *Light-Science & Application*, 2014, 3: e173.
- 20 Korn D, Palmer R, Yu Hui, *et al.*. Silicon-organic hybrid (SOH) IQ modulator using the linear electro-optic effect for transmitting 16QAM at 112 Gbit/s[J]. *Opt Express*, 2013, 21(11): 13219-13227.
- 21 Almeida V R, Xu Qianfan, Barrios C A, *et al.*. Guiding and confining light in void nanostructure[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(11): 1209-1211.
- 22 Xu Qianfan, Almeida V R, Panepucci R R, *et al.*. Experimental demonstration of guiding and confining light in nanometer-size low-refractive-index material[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(14): 1626-1628.
- 23 Rezzonico D, Kwon S J, Figi H, *et al.*. Photochemical stability of nonlinear optical chromophores in polymeric and crystalline materials[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2008, 128(12): 124713.
- 24 Figi H, Bale D H, Szep A, *et al.*. Electro-optic modulation in horizontally slotted silicon/organic crystal hybrid devices[J]. *Journal of the Optical Society America B-Optical Physics*, 2011, 28(9): 2291-2300.
- 25 Fujiwara M, Maruyama M, Sugisaki M, *et al.*. Determination of the d-Tensor Components of a single crystal of N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(11): 1528.
- 26 Jazbinsek M, Figi H, Hunziker C, *et al.*. Organic electro-optic single crystalline films for integrated optics[C]. *SPIE*, 2010, 7774: 77740Q.
- 27 Elder D L, Benight S J, Song Jinsheng, *et al.*. Matrix-assisted poling of monolithic bridge-disubstituted organic NLO chromophores[J]. *Chemistry of Materials*, 2014, 26(2): 872-874.
- 28 Greenlee C, Guilmo A, Opadeyi A, *et al.*. Mach-Zehnder interferometry method for decoupling electro-optic and piezoelectric effects in poled polymer films[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(4): 041109.
- 29 Luo Jingdong, Zhou Xinghua, Jen A K Y. Rational molecular design and supramolecular assembly of highly efficient organic electro-optic materials[J]. *Journal of Materials Chemistry*. 2009, 19(40): 7410-7424.
- 30 Jin Din, Chen Hui, Barklund A, *et al.*. EO polymer modulators reliability study[J]. *SPIE*. 2010, 7599: 75990H.
- 31 Hunziker C, Kwon S J, Figi H, *et al.*. Fabrication and phase modulation in organic single-crystalline configurationally locked, phenolic polyene OH1 waveguides[J]. *Opt Express*, 2008, 16(20): 15903-15914.



- 32 Takahashi S, Bholra B, Yick A, *et al.*. Photo-stability measurement of electro-optic polymer waveguides with high intensity at 1550-nm wavelength[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(5-8): 1045-1050.
- 33 Alloatti L, Korn D, Palmer R, *et al.*. 42.7 Gbit/s electro-optic modulator in silicon technology[J]. *Opt Express*, 2011, 19(12): 11841-11851.
- 34 Palmer R, Koeber S, Elder D L, *et al.*. High-speed, low drive-voltage silicon-organic hybrid modulator based on a binary-chromophore electro-optic material[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(16): 2726-2734.
- 35 Xin Maoqing, Png C E, Lim S T, *et al.*. A high speed electro-optic phase shifter based on a polymer-infiltrated P-S-N diode capacitor[J]. *Opt Express*, 2011, 19(15): 14354-14369.
- 36 Brosi J M, Koos C, Andreani L C, *et al.*. High-speed low-voltage electro-optic modulator with a polymer-infiltrated silicon photonic crystal waveguide[J]. *Opt Express*, 2008, 16(6): 4177-4191.
- 37 Palmer R, Alloatti L, Korn D, *et al.*. Silicon-organic hybrid MZI modulator generating OOK, BPSK and 8-ASK signals for up to 84 Gbit/s[J]. *Photonics Journal, IEEE*, 2013, 5(2): 6600907.
- 38 Gould M, Baehr-Jones T, Ding R, *et al.*. Silicon-polymer hybrid slot waveguide ring-resonator modulator[J]. *Opt Express*, 2011, 19(5): 3952-3961.

栏目编辑: 韩 峰