ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

亐题

硅基马赫曾德电光调制设计优化与实现

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6868.2017.05.005

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20170904.0953.002.html

周林杰等

# 硅基马赫曾德电光调制设计优化与实现 Design Optimization and Implementation of Silicon Mach-Zehnder Electro-Optic Modulators

周林杰/ZHOU Linjie 周砚扬/ZHOU Yanyang 陆梁军/LU Liangjun

(上海交通大学,上海 200240) (Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**在**基电光调制器由于其综合性能出众,吸引了全球各高校、研究 所和企业的持续关注。中科院半导 体所、上海交通大学和北京大学[1-10] 等是中国最早开展相关研究的科研 机构,同时中兴通讯、武汉光迅等企 业已经开展了硅基调制器的产品化 工作,并取得了初步的成果。在其他 国家,知名的研究机构和高校如美国 的诺基亚贝尔实验室、康奈尔大学、 加州大学圣芭芭拉分校、特拉华大 学、加拿大的麦吉尔大学、多伦多大 学、新加坡微电子研究所、英国萨里 大学、南安普敦大学和比利时的根特 大学等在硅基调制器方面也进行了 多年研究,涵盖了调制器设计和集 成,也在新材料的应用、工艺加工和 新结构探索方面持续创新,推动硅基 调制器的进步和实用化发展[11-23]。此 外,美国的Intel、Cisco、Acacia和日本 的 Fujikura 等公司均已推出了 100 G

#### 中图分类号:TN929.5 文献标志码:A 文章编号:1009-6868 (2017) 05-0021-009

摘要: 对单端推挽驱动硅基调制器进行了优化设计和实验验证。为了获得较高的 调制器性能,首先对 PN 结的结构参数和掺杂浓度进行了仿真优化,以提高调制效 率并降低光传输损耗;其次,对行波电极的阻抗匹配、相位匹配和微波损耗予以了 研究,重点分析了低掺杂平板区宽度、行波电极传输线宽度(TWE)和间距对调制性 能的影响。在理论分析和仿真计算的基础上,对单端推挽驱动调制器进行了频谱测 试、小信号响应测试和高速调制码型测试。调制器的片上插入损耗在 7~9 dB,半 波电压约为5 V。偏置电压为0 V时,优化后的调制器的带宽大于18 GHz,入射端反 射系数低于-20 dB,行波电极具有较好的阻抗匹配。当反偏电压大于4 V时,调制 器的带宽可增加到 30 GHz以上,并且能实现 56 Gbit/s 的二进制强度(OOK)调制和 40 Gbit/s 的二进制相移键控(BPSK)调制。

关键词: 电光调制器;硅基光电子;高速收发模块;光电子器件

Abstract: In this paper, the design optimization and experimental demonstration of single-drive push-pull silicon electro-optic modulators are presented. In order to improve the modulation efficiency and lower the optical propagation loss, the PN junction profile and doping concentrations are firstly optimized. Next, the impedance match, phase match and microwave loss are studied, and in particular, the influence of low-doping slab width, travelling-wave electrode (TWE) width and spacing on the modulator performance are analyzed. Following the comprehensive theoretical analysis and numerical simulation, the modulator performance measurements, including the optical transmission spectrum upon single-drive push-pull tuning, small-signal microwave signal response, and high-speed digital signal modulation are consequently carried out. The on-chip insertion loss of the modulators is around 7 -9 dB and the half-wave voltage is 5 V. At a bias voltage of 0 V, the optimized modulator has a modulation bandwidth of >18 GHz. The microwave reflectivity at the entrance of the TWE is less than -20 dB, suggesting good impedance match. When the reverse bias voltage is increased to 4 V, the modulation bandwidth can exceed 30 GHz, allowing for realization of 56 Gbit/s on-off keying (OOK) and 40 Gbit/s binary phase-shift keying (BPSK) modulations.

Keywords:) electro-optic modulator; silicon photonics; high-speed transceiver; optoelectronic devices

的光模块,投放在光互连市场。随着 今后光网络升级到400G以及数据中 心规模的进一步扩大,对硅基载流子 耗尽型马赫曾德调制器(MZI)的进 一步研究将主要集中在3个方面: (1)提高带宽同时减小功耗;(2)调制器、驱动电路和激光器的集成;
(3)采用波分复用和高阶码型调制提高数据速率。

提高带宽和减小功耗主要通过

收稿日期:2017-08-02

网络出版日期:2017-09-04 基金项目:国家重点基础研究发展 (\*973")规划(ID2011CB301700);国家 高技术研究发展(\*863")计划 (2013AA014402);国家自然科学基金 (61422508、61535006)

优化行波电极和PN二极管结构来实 现。加拿大麦吉尔大学所设计的硅 基调制器[24],行波电极不同于传统共 面波导(CPW)和共面带状线(CPS) 结构,它在两条传输线内侧面向波导 方向引入"金属桥",然后连接一块金 属电极,构成T型结构,用于驱动PN 二极管。此结构通过优化T型结构 参数,可以提高调制性能。在PN二 极管中影响调制效率的主要是耗尽 层与光模式的交叠部分,波导两侧壁 附近的掺杂区域除了带来光传输的 损耗之外,并没有对调制效率的提高 有太多有益的影响。通过对波导边 缘区域进行补偿掺杂降低该区域的 载流子浓度,可以有效减小光传输损 耗四。提高调制效率也可以采用一 种改进后的 PN 二极管结构<sup>[25]</sup>,此结 构同时存在横向 PN 结和纵向 PN 结, 形成L形耗尽区域。当施加反向电 压后,整个波导的中心部分均为耗尽 区域,因此实现了更高的调制效率。

硅为间接带隙材料,不能直接用 于制作激光器,目前主流的激光器与 硅调制器集成方案为异质混合集成 或在硅上外延生长III-V族材料。法 国里昂大学的研究团队将布拉格光 栅反射镜、激光器、波导模式转换器、 移相器、MZI调制器和波导光纤耦合 器集成在同一个芯片上<sup>™</sup>。法国Ⅲ-V 族实验室联合 CEA-Leti、 MINATEC、IMEC 和 Bell 共同研发了调 制器与激光器集成芯片,其中分布式 布拉格光栅激光器的输出波长范围 可以覆盖整个C波段,调制器的调制 带宽在13 GHz以上,从而可以实现 25 Gbit/s 的调制速率[27]。另一种目前 主流的集成方式是将电驱动芯片和 硅光芯片混合集成在同一基板上。 武汉邮电科学院实现了集成化硅光 调制器[28],将硅光调制器芯片与驱动 芯片通过金线键合实现一体化封装, 可以实现25 Gbit/s的调制速率。IBM 的集成芯片也是将硅光调制器芯片 和驱动芯片集成在同一个基板上[29], 该芯片的特点为调制器采用分段行 波电极,每段电极均配有驱动电路,可以实现 25 Gbit/s 的二进制启闭键控(OOK)调制和 46 Gbit/s 的脉幅调制(PAM-4)调制。

采用波分复用和高阶码型调制 可以获得更高速率调制。Luxtera公 司研发的硅光集成波分复用光收发 芯片<sup>[30]</sup>,集成了4路 MZI 调制器、4路 波分复用与解复用模块、4路光探测 模块和其他附属功能模块,每路可以 产生 10 Gbit/s 的调制信号。诺基亚 贝尔实验室研发了偏振复用QPSK光 发射芯片<sup>[3]</sup>,正交相移键控(QPSK) 信号由 IQ 调制器产生(一个 MZI 调制 器产生I路信号,另一个平行 MZI 调 制器产生()路信号)。输入光分两路 分别进入两组 IQ 调制器进行 QPSK 调制,其中一组由偏振旋转器将调制 后的信号由准横电波模式(TE)旋转 成准横磁波模式(TM),再和另一组 TE 合成构成 PDM-OPSK 调制器。每 一路的 IQ 调制器可实现 56 Gbit/s 的 QPSK 调制,经过偏振复用就能达到 112 Gbit/s的PDM-QPSK调制。之后, 贝尔实验室在该工作的基础之上,通 过两级 QPSK 的级联并与锗探测器集 成研发出了 224 Gbit/s 的 PDM-16-QAM 光收发模块<sup>[32]</sup>。

#### 1 高速电光调制器设计

硅基载流子色散型电光调制器 的基本设计思路可以概括为如下几 个步骤:首先是光学结构的设计,可 以是简单直波导实现相位调制,或者 是基于干涉或谐振结构实现强度调 制;其次是载流子色散效应的电学结 构实现,可以采用PN 二极管或者金 属氧化物半导体(MOS)电容;最后是 高速电极设计,电极好坏直接关系到 调制器的响应速度,需要精确设计电 路结构。光学结构目前采用较多是 微环谐振腔和马赫曾德干涉仪,在光 学设计中波导的几何尺寸对器件的 性能有着很大的影响:提高波导宽度 可以有效减少波导侧壁粗糙度引起 的光损耗,但波导太宽会导致高阶光 波导模式出现,降低器件的性能;增 加平板层厚度可以减小波导侧壁粗 糙度对光传输的影响,同时提高单模 波导宽度的上限,但由于一部分光泄 露到波导两侧,会降低光调制效率。 载流子色散效应根据电学实现方式 可以归总为载流子注入、载流子耗尽 和载流子积累踢。在电学结构设计 中,要着重考虑电学结构所能实现的 调制效率以及对光传输损耗的影响, 其中载流子浓度分布形状影响较 大。电极设计可以采用集总电极或 行波电极。集总电极较小,可以灵活 布局于芯片上任意位置,设计时所需 要考虑的因素是减小电容和电阻以 提高带宽;而行波电极长度通常在毫 米量级,在设计时需要考虑3方面因 素:(1)减小微波传输损耗;(2)行波 电极的特性阻抗需要匹配到 50  $\Omega$ , 满足与微波系统中标准的50Ω端口 兼容,减少反射损耗,确保行波电极 上的有效驱动电压;(3)行波电极的 有效折射率与光波群折射率相匹配, 使微波信号和与光信号达到最强相 互作用。将上述不同光学结构、电学 结构和电极结构进行组合,就可以构 成不同类型调制器。

#### 1.1 单端推挽驱动调制器整体结构

如图1所示为单端推挽驱动硅基 马赫曾德调制器结构示意图<sup>34</sup>。该 调制器基于绝缘衬底上的硅(SOI)晶 圆设计,光学部分采用的是非对称 MZI结构,可以通过调节波长来选择 调制器的偏置点。调制器的3dB分 路器和合路器采用多模干涉结构 (MMI), MMI 结构的特点是分光均匀 损耗小。由截面图所示, MZI 两臂的 波导中均嵌入 PN 二极管,波导的外 侧为P型掺杂,内侧为N型掺杂。 MZI 两臂外侧的平板层为高浓度的 P 型重掺杂区,用于连接行波电极保证 良好欧姆接触。MZI两臂内侧平板 区为高浓度的N型重掺杂区,一方面 将两个PN二极管连接,另一方面连 接直流偏置电极。行波电极使用的

是共面微带线结构,两条传输线位于 MZI外侧,分别为信号线(S)和接地 线(G)。相比双端差分驱动调制器, 该调制器具有如下两个特点:

(1)行波电极的信号线通过 P型 电阻、PN 结电容、N型电阻、PN 结电 容和 P型电阻连接到行波电极的接 地线。其中两个 PN 结电容串联,其 电容值减小一半,可以有效降低行波 电极的微波损耗。需要注意的是输 入微波信号的幅度也相应需要增加 一倍,因为微波信号被均分负载在两 个 PN 结上。

(2)采用单端口微波输入,即可 实现推挽驱动,减小了驱动电路复杂 度,利于实现多个调制器的集成。假 设微波信号驱动电压为 V<sub>m</sub>\*sin(wt),直 流偏置电压为 V. 通过 MZI 中间 N 型 重掺杂区加载到调制器上。当直流 和微波信号同时施加在调制器时,一 个调制臂 PN 结上的电压为 -V<sub>4</sub> +V<sub>4</sub>/ 2\*sin(wt),另外一个调制臂 PN 结上的 电压为- $V_b$ - $V_{pp}/2*\sin(wt)$ 。由此可见, 在一个驱动信号周期内,调制器形成 以-V,为偏置电压,在[-V,12,-V,12]范 围内交替变化的完美推挽驱动。相 比双端差分驱动调制器,该调制器仅 用一个端口就可以实现推挽驱动,推 挽信号由调制器电极自身结构产生, 可以确保相位严格相差p,幅值相 同。采用推挽驱动的调制器可以有 效减小信号啁啾,提高长距离传输时 的信号质量。

#### 1.2 驱动臂上PN结设计

MZI 调制器驱动臂上 PN 结设计 分成 2 个部分:第1部分为波导和 PN 结几何结构,第2部分为 PN 结掺杂 浓度。重要的几何参数包括:波导宽 度  $W_{rb}$ 、波导高度  $H_{rb}$ 、平板层高度  $H_{tab}$ 、低浓度平板层宽度  $S_{dop}$ 、N型重掺 杂平板层宽度  $W_p$ 。我们采用硅光器件常规 的脊型波导结构,即 $H_{rb}$ 为 220 nm,  $W_{rb}$ 为 500 nm。 $H_{dat}$ 的增大将导致 PN 结串联电阻减小,有利于提高调制器 带宽;但同时 H<sub>stab</sub> 的增大会导致更多的光能量扩散到 slab 层中,减小了光场与 PN 结耗尽区的交叠积分,会使调制效率降低。综合考虑两者因素,我们选择 H<sub>stab</sub>为 90 nm。

PN 结的掺杂浓度 N<sub>A</sub>(P型掺杂) 和 N<sub>D</sub>(N型掺杂)是影响调制器性能 的两个关键参数。根据等离子色散 效应,硅中的自由载流子浓度会对折 射率的实部和虚部同时产生影响,即 影响调制器的调制效率和光传输损 耗。我们使用多物理场仿真软件 (Comsol)来仿真调制器的调制效率 和光损耗。 N<sub>A</sub>和 N<sub>D</sub>的变化区间为  $10^{17}$ /cm<sup>3</sup>~ $10^{18}$ /cm<sup>3</sup>,由于耗尽区的宽度 与 PN 结所加的偏置电压 V<sub>A</sub>有关,所 以调制效率可通过波导的有效折射 率对电压求导近似得到,其中在偏置 电压为 V<sub>i</sub>的情况下半波电压的计算 公式为:

$$V_{\pi}L\frac{\mathrm{dn}_{eff}}{dV}\bigg|_{V=V_{e}} = \frac{\lambda}{2}$$
(1)

调制效率 $V_{\mu}$ ·L可以通过 $V_{\mu}$ 与高 速移相器的长度L的乘积得到。 **2**a)中所示为调制器效率仿真的结 果。PN结在波导内的偏移量 $\Delta_{jan}$ 为 100 nm,波长为1550 nm,偏置电压  $V_{\mu}$ =0V,长度L为3 mm。可以看出提 高掺杂浓度可以有效提高调制效率, 但当 $N_{\mu}$ 和 $N_{\mu}$ 的浓度大于9×10<sup>17</sup>/cm<sup>3</sup>以 后调制效率的增长趋于恒定。另一 方面,由图2b)可知,当掺杂浓度提 高后,由于载流子吸收效应增强,会



▲图1 单端推挽驱动硅基马赫曾德调制器结构示意

2017年10月 第23卷第5期 Oct. 2017 Vol.23 No.5 23 中兴通讯技术

**ZTE TECHNOLOGY JOURNAL** 

专题

周林杰 等 硅基马赫曾德电光调制设计优化与实现



▲图2 偏置电压为0 V时的调制效率和光损耗随掺杂浓度变化关系

使调制器的光损耗增大。因此,在选择 PN 结掺杂浓度时要综合考虑调制 效率和光损耗。

PN 结的偏移量 $\Delta_{\mu\nu}$ 也是决定调制 器性能的关键参数,当PN 结向 N 区 偏移 0.05 mm 时,波导的有效折射率 变化(0 V 和-4 V 下波导有效折射率 差别)最大,即调制器的调制效率最 高。对于光损耗,当PN 结向正轴偏 移量越大,波导的光损耗越小,这是 因为空穴对光的吸收效应要小于电 子。如果追求最高的调制效率, $\Delta_{\mu\nu}$ 选择 50 nm 为最优值,如果综合考虑 调制效率和光损耗, $\Delta_{\mu\nu}$ 选择 100 nm 为最佳。

图 3 所示为 PN 结的掺杂浓度对行波电极特性的影响。提高掺杂浓度可以有效减小行波电极的特性阻抗,增大行波电极的有效折射率以及增大微波的传输损耗。为了能够实现较高的调制效率和带宽,同时兼顾较低的光损耗和微波损耗。我们选择 P型掺杂为 4×10<sup>17</sup>/cm<sup>3</sup>, N型掺杂为 1×10<sup>18</sup>/cm<sup>3</sup>, 在该浓度下,当 V<sub>6</sub> = 0 V,掺杂引起的光损耗为 1.85 dB/mm,调制器效率为 1.05 V·cm。

#### 1.3 高速行波电极设计

影响行波电极性能的参数有:电极宽度 $W_{mt}$ 、电极传输线间距 $G_{mt}$ 、电极厚度 $T_{mt}$ 、通孔间距 $G_{via}$ 、通孔宽度 $W_{via}$ 、SiO<sub>2</sub>上包层厚度 $H_{clad}$ 和 PN 结结构的尺寸,其中需要重点优化的是 $S_{dop}$ , $W_{mt}$ 

和 $G_{mto}$ 

低掺杂平板区宽度 Sdap 对微波传 输损耗的影响较大,而对特性阻抗和 微波有效折射率的影响较小。减小 Sdap 时因为 PN 结的串联电阻会减小, 微波损耗会减小,从而可以提高调制 器带宽。减小 Sdap 的代价是会增大光 的传输损耗,因此需要在光损耗和微 波损耗间做个折中选择。采用分段 PN结可以有效阻止电流在平板层的 传输,有利于减小微波损耗。随着频 率的升高,采用分段 PN结的行波电 极比常规非分段 PN结的行波电极微 波损耗减小更加明显。

行波电极金属传输线宽度 W<sub>mt</sub>和 间距 G<sub>mt</sub> 这两个参数共同影响电磁场 的分布,它们对行波电极特性的影响 是相互关联的。 图 4 所示为仿真得 到的不同 W<sub>mt</sub>和 G<sub>mt</sub> 组合下调制器的 电光(EO)带宽。减小 W<sub>mt</sub> 会提高调 制器带宽;减小 G<sub>mt</sub> 会先增大 EO 带 宽,当达到一个临界值后会使带宽下 降。重掺杂平板区宽度(W<sub>p</sub>, W<sub>n</sub>)对微 波有效折射率、传输损耗和特性阻抗 会有一定影响。增大 W<sub>p</sub>和 W<sub>n</sub>会使微 波传输损耗和微波有效折射率同时 增大,两者对特性阻抗影响并不大。





▲图3 PN结掺杂浓度对行波电极的影响

、中兴通讯技术 24 2017年10月 第23卷第5期 Oct. 2017 Vol.23 No. 5

我们选取多种组合 W, 和 W,, 分别侧 重降低微波传输损耗或实现更好的 光与微波的相位匹配。

综合上述仿真分析,我们在调制 器设计中选取多种参数组合(见表 1),之后通过实验来检测不同设计对 调制器性能的影响。

# 2 端推挽驱动硅基调制器 实验测试

#### 2.1 直流测试

图 5 为 MZM-5 与 MZM-7 传输频 谱和调制效率的测试结果图。这两 个调制器 PN 结的差别在于结的位置 偏移量Δ<sub>im</sub>不同,分别为0.1 mm 和 0.05 mm。改变偏置电压会使频谱移 动,说明了载流子色散效应起到了改 变相位的效果。它们的静态消光比 都在15 dB以上,说明了 MMI 具有较 均匀的分光比。频谱最高点代表了 整个测试链路的损耗,包括光纤的传 输损耗、偏振控制器插损、光纤与波 导的耦合损耗和调制器片上损耗,其 中片上损耗包括载流子吸收损耗和 波导固有损耗。我们通过测试参考 直波导得到了光纤与波导的耦合损 耗约为4.5 dB,两个端面的损耗合计 为9dB,MMI分路器和合路器的损耗 为0.9 dB,光纤链路和偏振控制器损 耗约为1 dB。因此 MZM-5 的片上损 耗为7 dB, MZM-7 的片上损耗约合计 为9 dB。

根据 MZI 的传输函数,频谱移动 一个自由光谱范围(FSR)相当于相 位改变了 2p,因此可以通过频谱移动 的距离来确定相位的变化。根据实 验结果可知 MZM-5的 $V_p$ 约为5.25 V, MZM-7的 $V_p$ 约为5 V。图 5c)和d)为 提取的 MZM-5和 MZM-7的调制效率 随反偏电压变化曲线。偏置电压升 高会使调制效率降低,因此在较低的 偏置电压下,可以用较小的驱动电压 实现调制,但调制带宽也会相应变 小。当 $\Delta_{\mu m}$ 从 0.05 mm 变化到 0.1 mm 时,损耗的降低较为明显而调制效率 的变化不是很明显。

#### 2.2 微波小信号测试

调制器小信号动态测试主要测 试行波电极的S参数、特性阻抗和调 制器的EO带宽。在S参数测试中, 矢量网络分析仪(VNA)的两个端口 分别通过探针加载到行波电极的输 入和输出端,测试前先进行校准来去 掉线缆、转接头和探针的影响。这里 我们使用标准的校准基片,对微波链 路短路、开路、阻抗匹配和通路4种 状态进行校准,简称SOLT (shortopen-load-thru)法。图6所示为表1给 出的7种调制器结构在偏置电压 $V_{s}=$ 0V的情况下,行波电极(EE)S参数 的测试结果。在这7种调制器中, MZM-1为参考调制器,其他调制器均 是以它为基础进行改进优化。由图 6a)所示,该行波电极S<sub>21</sub>电学6.4 dB 带宽为14.9 GHz。采用6.4 dB EE 带 宽作为衡量标准是因为在阻抗和相 位匹配条件下,6.4 dB EE 带宽对应于 3 dB EO 带宽。调制器 MZM-2、3 S<sub>11</sub>

#### ▼表1调制器设计参数

调制器	$W_{mt}$ /mm	G <sub>mt</sub> /mm	W <sub>n</sub> /mm	$W_{P}/mm$	$\mathcal{S}_{\scriptscriptstyle dop}$ /mm	$\Delta_{jun}/mm$
MZM-1	60	50	16.2	20.7	0.5	0.1
MZM-2	40	6	6	5	0.6	0.1
MZM-3	40	6	6	5	0.5	0.1
MZM-4	80	40	16.2	15.7	0.5	0.1
MZM-5	40	28	14	10.5	0.5	0.1
MZM-6	40	15	12	15	0.5	0.1
MZM-7	60	50	16.2	20.7	0.5	0.05

MZM: 多模干涉结构



▲图5 MZM--5与MZM--7传输频谱和调制效率的测试结果

2017年10月 第23卷第5期 Oct. 2017 Vol.23 No.5 / 25 中兴通讯技术



▲图6 偏置电压0 V下行波电极S参数测试结果

参数明显大于调制器 MZM-4、5、6, 说明其阻抗匹配较差。MZM-5 具有 较高的电学带宽(18.3 GHz),同时 MZM-5 微波反射系数 S<sub>11</sub>基本上可以 低于-20 dB。MZM-7在 MZM-1的结 构上改用了分段 PN 二极管结构,实 验结果表明该结构可以提高行波电 极电学带宽。

图 7a)为 MZM-2 和 MZM-3 在 偏 置电压4V的情况下S21的测试结 果。MZM-2的S21曲线和MZM-3的S21 曲线较为接近,带宽差别不大,说明 S<sub>dop</sub>变化 0.1 mm (从 0.6 mm 变化到 0.5 mm)对行波电极影响不大。图7b)为 在4V偏置电压下, MZM-1、5、7的S21 测试结果。MZM-1为参考调制器,其 S21参数最差。MZM-5在MZM-1基础 上对电极结构进行了优化,因此其表 现出更好的 S21 参数。 MZM-7 与 MZM-1的行波电极结构一样,但采用 了分段 PN 二极管结构。根据等效电 路模型的理论,该结构减少了slab层 对微波损耗的影响,因此减小了微波 损耗。

我们接着进一步对调制器 MZM-

1、5、7进行了 EO 带宽测试,结果如 图 8a) 所示。MZM-1的 EO-3 dB 带宽



为 29 GHz, 经 过 优 化 的 MZM-5 的 EO-3 dB 带 宽 可 以 达 到 33 GHz, MZM-7 由于采用了分段 PN 二极管结

构,因此其 EO 响应的表现也好于 MZM-1,带宽在 30 GHz 以上。图 8b)

所示为 MZM-5 在不同偏置电压下的 EO S21 响应,可以明显的看出提高偏

置电压可以有效地增加调制器的 EO

带宽。当偏置电压增大后, PN 结的

耗尽层增大导致结电容减小,因而提

我们对设计的调制器进行高速

调制测试,信号源采用40~56 Gbit/s 的脉冲模式发生器(PPG)(keysight N4975A),它能产生码型为2<sup>15</sup>-1的伪

随机码(PRBS),示波器选用keysight

的数字信号分析仪(DSA-X 93204A)。由于单端驱动调制器中有

专用的直流偏置信号线,因此偏置电

压可经直流探针直接加载到调制器

上。在 OOK 调制时, 调制器的工作

高了调制器的带宽。

2.3 调制信号眼图测试

▲图7 在4 V直流反偏电压下的 EE--S₂1 测试结果



▲图8调制器反向偏压下的EO--S₂1响应

、中兴通讯技术 26 2017年10月 第23卷第5期 Oct. 2017 Vol.23 No. 5

硅基马赫曾德电光调制设计优化与实现 周林杰 等

点选择在 MZI 传输谱的-3 dB 处,即 两臂相位差为 p /2。在 BPSK 调制时, 调制器的工作点选择在 MZI 传输谱 的最低点处,即两臂相位差为 p, BPSK 的星座图可以通过光调制分析 仪测得(OMA N4392A)。由于待测的 调制器采用非等臂的 MZI,故可以通 过调节波长来改变调制器的工作点。

图 9 所示为 MZM-7 在调制速率 为 32 Gbit/s 情况下输出信号的眼图, 眼图上方显示的为示波器测得的实 时波形,其中蓝色线为时钟信号,黄 色线为数据信号。图 9a)给出调制器 在偏置电压 V<sub>i</sub>为 0.7 V 微波信号幅度 V<sub>i</sub><sup>m</sup>为 1.4 V 条件下的眼图。调制信号 消光比为 4.2 dB,Q值为 3.9。图 9b) 为 V<sub>i</sub>增大到 1.5 V,V<sub>i</sub>m提高到 3 V时的 调制信号眼图。此时,消光比提高到 了 6.6 dB,而 Q值也提高到了 5.24。 实验结果表明:该调制器具有较高的 调制效率和带宽,采用低驱动电压就 可以获得清晰的调制眼图。

图 10 所示为 MZM-5 在 50 Gbit/s 速率下输出调制信号的眼图。为了 获得较高的消光比, PPG 的输出信号 经电放大器放大到 V",为 7.8 V。在 V。 为2V情况下,调制信号的下降沿出 现两条重影,说明此时调制器的带宽 已经不能很好支持该调制速率。从 眼图上方测得的实时码型图中可以 看出,过长的上升沿时间或下降沿时 间使得信号还没完成"0"和"1"电平 之间的完全翻转就又产生变化。为 了解决该问题,我们通过增大偏置电 压来提高器件的EO带宽。当Va增加 到6V时,眼图质量得到了较为明显 的改善,获得的消光比为6dB,Q值 为 5.05。

图 11 所示为 MZM-5 和 MZM-7 在 56 Gbit/s 速率下测得的眼图。驱动电 压为 V<sub>b</sub>=6 V和 V<sub>p</sub>=7.8 V。 MZM-5 的 消光比为4 dB, Q值为 3.73,由于 MZM-7 的 EO带宽小于 MZM-5,所以 其眼图质量较差。对比 50 Gbit/s 的 眼图,56 Gbit/s 时的调制信号质量有 了明显的恶化,这是一方面是由于调 制器的带宽限制,另一方面是由于 PPG输出信号已经达到最大速率,其 输出电信号质量本身已经下降。

在对调制器进行 BPSK 测试时, 工作点选择在 MZI 的最小传输点。 BPSK 输出信号的特点是信号幅值恒 定而相位在 0 和 *p* 间变换,实现 *p* 相 移对调制效率有着较高的要求,因此 在测试是我们将偏置电压 V。降低为 4 V。图 12 所示为通过调制分析仪 测试得到的 BPSK 信号误码率与接收 光功率之间的关系。当 MZM-5 调制 信号的信噪比(OSNR)为 15.56 dB 时,信号的Q值为6.578,信号幅度误 差和相位误差分别为18.9%和6.9%, 误差向量幅度(EVM)为21.99%。输



▲图9 MZM--7在32 Gbit/s速率下OOK调制的眼图



▲图 10 MZM-5 在 50 Gbit/s 速率的 OOK 调制眼图



▲图 11 56 Gbit/s OOK 调制的眼图

2017年10月 第23卷第5期 Oct. 2017 Vol.23 No.5 / 27 中兴通讯技术

周林杰 等 硅基马赫曾德电光调制设计优化与实现





出信号的(二进制)误码率(BER)在 10<sup>-13</sup>量级以下,低于前向纠错技术对 误码率的要求,提高接收信号的光功 率可以进一步减小误码率。MZM-7 的误码测试结果与MZM-5接近。

### 3 结束语

大规模数据中心的广泛建立以 及骨干网和城域网的升级换代,市场 对 100 G 和 400 G 光模块的需求日益 增长,并且对器件成本和集成度的要 求也显著提高。硅基光电子技术是 近十年来发展速度最快、最具有前景 的光电子技术之一,由于它的制作工 艺与现有微电子互补金属氧化物半 导体(CMOS)工艺兼容,造就了其成 本低、功耗小、便于和电芯片集成的 独特优势。另外由于硅波导对光波 具有很强的限制能力,因此可以减小 器件尺寸,提高单位面积上光器件的 集成度。调制器是光收发模块中的 核心器件,近年来发展十分迅速,其 中载流子耗尽型调制器是目前研究 最为广泛的硅基调制器类型。文章 中,我们研究了单端推挽驱动调制器 的设计与优化,并对加工后的器件进 行了系统测试和对比。芯片测试结 果表明调制器的 EO 带宽在偏置电 压-4 V时可以达到 30 GHz以上,能 实现 56 Gbit/s OOK 调制和 40 Gbit/s BPSK调制。硅基调制器性能的提高 还需要进一步优化电学和光学结构,

一方面可以设计新型行波电极结构 (比如分段电极),以同时满足阻抗匹 配和相位匹配两方面要求,另一方面 设计新型的 PN 结结构,以增强载流 子和光波的作用,提高调制器效率。

参考文献

- [1] DING J F, CHEN H T, YANG L, et al. Low-Voltage, High-Extinction-Ratio, Mach-Zehnder Silicon Optical Modulator for CMOS-Compatible Integration[J]. Optics Express, 2012,20(3):3209–3218. DOI: 10.1364/OE.20.003209
- [2] XIAO X, LI X Y, XU H, et al. 44–Gb/s Silicon Microring Modulators Based on Zigzag PN Junctions[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(9):1712–1714. DOI: 10.1109/LPT.2012.2213244
- [3] XU H, XIAO X, LI X Y, et al. High Speed Silicon Mach–Zehnder Modulator Based on Interleaved PN Junctions[J]. Optics Express, 2012,(20):15093–15099. DOI: 10.1364/ OE.20.015093
- [4] ZHOU Y Y, ZHOU L J, ZHU H K, et al. Modeling and Optimization of a Single–Drive Push–Pull Silicon Mach–Zehnder Modulator [J]. 2016,4(4): 153–161. DOI: 10.1364/ PRJ.4.000153
- [5] ZHU H K, ZHOU L J, WANG T, et al. 64 Gb/s Silicon QPSK Modulator with Single–Drive Push–Pull Traveling Wave Electrodes[EB/OL]. (2015–05–10)[2017–08–15]. https://www. osapublishing.org/abstract.cfm?uri= CLEO\_SI-2015–SW3N.7
- [6] LI T T, WANG D, ZHANG J L, et al. Demonstration of 6.25 Gbaud Advanced Modulation Formats with Subcarrier Multiplexed Technique on Silicon Mach– Zehnder Modulator[J].Optics Express, 2014, 22(6): 19818–19823. DOI: 10.1364/ OE.22.019818
- [7] WANG D, LI T T, ZHANG J L, et al. 100 Gbps, 160 km IM–DD Transmission of WDM Nyquist–16QAM Signal Based on Silicon Mach–Zehnder Modulator[J].2014 European

Conference on Optical Communication (Ecoc). IEEE: USA, 2014. DOI: 10.1109/ ECOC.2014.6964046

- [8] WANG M, ZHOU L, ZHU H, et al. Low–Loss High–Extinction–Ratio Single–Drive Push– Pull Silicon Michelson Interferometric Modulator[J]. Chinese Optical Letter, 2017, (15): 042501. DOI: 10.3788/ COI 201715.042501
- [9] ZHOU Y, ZHOU L, SU F, et al. Linearity Measurement and Pulse Amplitude Modulation in a Silicon Single–Drive Push– Pull Mach–Zehnder Modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(14): 3323– 3329. DOI: 10.1109/JLT.2016.2567067
- [10] ZHOU Y, ZHOU L, WANG M, et al. Linearity Characterization of a Dual–Parallel Silicon Mach–Zehnder Modulator[J].IEEE Photon Journal, 2016,8(6): 7805108–7805116. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2616488
- [11] DONG P, XIE C J, BUHL L L, et al. Silicon In-Phase/Quadrature Modulator With On-Chip Optical Equalizer[C]// 2014 European Conference on Optical Communication (ECOC).USA:IEEE,2015: 1191–1196. DOI: 10.1109/ECOC.2014.6963887
- [12] STRESHINSKY M, DING R, NOVACK A, et al. 50 Gb/s Silicon Traveling Wave Mach– Zehnder Modulator near 1300 nm[J]. Optics Express, 2013, 21(25):30350–30357. DOI: org/10.1364/OE.21.030350
- [13] DONG P, CHEN L, CHEN Y K. High–Speed Low–Voltage Single–Drive Push–Pull Silicon Mach–Zehnder Modulators[J].Optics Express, 2013, 20(6): 6163–6169. DOI: 10.1364/OE.21.004116
- [14] YU H, PANTOUVAKI M, VERHEYEN P, et al. Silicon Dual–Ring Modulator Driven by Differential Signal[J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 6379–6382. DOI: 10.1364/ OL.39.006379
- [15] LI R, PATEL D, SAMANI A, et al. An 80 Gb/ s Silicon Photonic Modulator Based on the Principle of Overlapped Resonances[J].
   IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3) : 4900311. DOI: 10.1109/JPHOT.2017.
   2702101
- [16] YONG Z, SACHER W D, HUANG Y, et al. U– Shaped PN Junctions for Efficient Silicon Mach–Zehnder and Microring Modulators in the O–Band[J]. Optics Express, 2017, 25(7): 8425–8439
- [17] XUAN Z, MA Y J, LIU Y, et al. Silicon Microring Modulator for 40 Gb/s NRZ–OOK Metro Networks in O–Band[J]. Optics Express, 2014,22(23): 28284–28291.DOI: 10.1364/OE.22.028284
- [18] AKIYAMA S, BABAaba T, IMAI M, et al. 12.5–Gb/s Operation with 0.29–V.cm V pi L Using Silicon Mach–Zehnder Modulator Based–On Forward–Biased pin Diode[J]. Optics Express,2014, 22(23): 2911–2923. DOI: 10.1364/OE.22.028284
- [19] DONG P, SINSKY J H, GUI C C. Coplanar– Waveguide–Based Silicon Mach–Zehnder Modulator Using A Meandering Optical Waveguide and Alternating–Side PN Junction Loading[J].Optics Letters, 2016, 41 (18): 4401–4404. DOI: 10.1364/ OL.41.004401
- [20] VERMEULEN D, AROCA R, CHEN L, et al. Demonstration of Silicon Photonics Push– Pull Modulators Designed for

、中兴通讯技术 28 2017年10月 第23卷第5期 Oct. 2017 Vol.23 No. 5

#### **ZTE TECHNOLOGY JOURNAL**

专题

#### 硅基马赫曾德电光调制设计优化与实现

周林杰 等

Manufacturability[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(10): 1127-1129.DOI: 10.1109/LPT.2016.2532322

- [21] TZUANG L D, SOLTANI M, LEE Y H D, et al. High RF Carrier Frequency Modulation in Silicon Resonators by Coupling Adjacent Free-Spectral-Range Modes[J]. Optics Letters, 2014,(39):1799-1802. DOI: 10.1364/OL.39.001799
- [22] DUBRAY O, MENEZO S. Simulation and Measurements of Chirp Penalties for Silicon Ring Resonator Modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(3): 280-283. DOI: 10.1109/LPT.2015.2494863
- [23] PANTOUVAKI M, YU H, RAKOWSKI M, et al. Comparison of Silicon Ring Modulators With Interdigitated and Lateral p-n Junctions[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, (19): 10.1109/JSTQE.2012.2228169
- [24] PATEL D, GHOSH S, CHAGNON M, et al. Design, Analysis, and Transmission System Performance of a 41 GHz Silicon Photonic Modulator[J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14263-14287. DOI: 10.1364/OE.23.014263
- [25] LIOW T Y, SONG J F, TU X G, et al. Silicon Optical Interconnect Device Technologies for 40 Gb/s and Beyond[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2013, (19): 8200312. DOI: 10.1109/ JSTQE.2012.2218580
- [26] FERROTT T, BLAMPEY B, JANY C, et al. Co-Integrated 1.3 mu m Hybrid III-V/Silicon Tunable Laser and Silicon Mach-Zehnder Modulator Operating at 25Gb/s[J].Optics Express, 2016, 24(26): 30379-30401. DOI: 10.1364/OE.24.030379
- [27] DUAN G H, JANY C, LIEPVRE Le A, et al. Hybrid III-V on Silicon Lasers for Photonic Integrated Circuits on Silicon[J], IEEE

Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, (20): 6100213. DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2296752

- [28] QI N, XIAO X, HU S, et al. Co-Design and Demonstration of a 25-Gb/s Silicon-Photonic Mach-Zehnder Modulator With a CMOS-Based High-Swing Driver[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016,(22): 3400410. DOI: 10.1109/JSTQE.2016.2602102
- [29] HUYNH T N, DUPIS N, RIMOLO-DONADIO R, et al. Flexible Transmitter Employing Silicon-Segmented Mach-Zehnder Modulator With 32-nm CMOS Distributed Driver[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 22(15): 5129-5136
- [30] LOCKWOOD D J, PAVESI L. Silicon Photonics II : Components and Integration [M]. Germany: Springe, 2011
- [31] DONG P, XIE C J, CHEN L, et al. 112-Gb/s Monolithic PDM-QPSK Modulator in Silicon [J]. Optics Express, 2012, 26( 20):B624-B629. DOI: 1364/OE.20.00B624
- [32] DONG P, LIU X, CHANDRASEKHAR S, et al. 224-Gb/s PDM-16-QAM Modulator and Receiver based on Silicon Photonic Integrated Circuits[C]//2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (Ofc/Nfoec).USA:IEEE,2013:1-838
- [33] REED G T, MASHANOVICH G, GARDES F Y, et al. Silicon Optical Modulators[J]. Nature Photonics, 2010,(4):518-526.DOI: 10.1038/nphoton.2010.179
- [34] WANG J, ZHOU L, ZHU H, et al. Silicon High-Speed Binary Phase-Shift Keying Modulator with a Single-Drive Push-Pull High-Speed Traveling Wave Electrode[J]. Photonics Research, 2015, 3:58-62

## 作者简介



**周林杰**,上海交通大学教 授、区域光纤通信网与新 型光通信系统国家重点实 验室博士生导师;研究方 向为集成光电子器件和芯 片;作为负责人主持并参 与了"863"、自然基金等各 类科研项目20多项;2014 年获得自然科学基金优秀 青年基金并入选上海市启

明星计划,2015年入选首届青年长江学者, 2016年获得牛顿高级学者基金;在国际知名 期刊上共发表学术论文 160 余篇(其中 SCI论 文70余篇),在OFC、OECC、ACP等国际会议 上做特邀报告40余次。



**周砚扬**,上海交通大学电 信学院电子工程系博士研 究生;研究方向为硅基调 制器及其在光通信系统和 微波光子信号处理中的相 关应用。



**陆梁军**,上海交通大学助 理教授、区域光纤通信网 与新型光通信系统国家重 点实验室硕士生导师、 IEEE/OSA 会员等;研究方 向为光电子集成器件、硅 基光电子集成芯片;参与 "973"计划、"863"计划、自 然科学基金等多个项目; 已在全球知名刊物和会议

上发表论文40余篇,SCI收录17篇。

