

引用格式:刘永超,纪鹏飞,何卫锋. 一种低损耗硅基 MZ 电光调制器的驱动电极设计[J]. 微电子学与计算机,2020,37(10): 13-17. [LIU Y C, JI P F, HE W F. Design of low-loss silicon MZ electro-optic modulator driving electrodes[J]. Microelectronics & Computer,2020,37(10):13-17.]

一种低损耗硅基 MZ 电光调制器的驱动电极设计

刘永超,纪鹏飞,何卫锋

(上海交通大学 微纳电子学系,上海 266240)

摘 要: 为了满足高数据带宽的硅光互联应用要求,高速硅光调制器的设计至关重要. 本文基于 IMEC 的硅光子 SOI 工艺,提出了一种低损耗高带宽的行波 MZ 调制器的驱动电极. 在详细分析了趋肤效应、行波损耗、邻近效应等物理效应对行波电极信号完整性的影响的基础上,通过在行波电极上增加一定宽度的顶层金属的方法,使 MZ 调制器的低频损耗降低了 13%,高频损耗降低了 5%,并使电光调制 3 dB 带宽提高至 28 GHz.

关键词: 电光调制器;高速行波电极;趋肤效应;损耗

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2020)10-0013-05

Design of low-loss silicon MZ electro-optic modulator driving electrodes

LIU Yong-chao, JI peng-fei, HE Wei-feng

(Department of Micro-Nano Electronics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to meet the requirements of silicon optical interconnect applications with high data bandwidths, the design of high-speed silicon optical modulators is of vital importance. Based on the silicon photonic SOI process of IMEC, a driving electrode for a low-loss and high-bandwidth traveling wave MZ modulator is proposed. Based on a detailed analysis of the effects of skin effects, traveling wave loss, proximity effects and other physical effects on the traveling wave electrode signal, a small amount of metal with a certain width is added to the top of traveling wave electrode, which leads to the low-frequency loss of MZ modulator decreasing by 13% and the high-frequency loss decreasing by 5%. Additionally, the 3dB bandwidth of MZ modulator is enhanced to 28GHz.

Key words: electro-optic modulator; high-speed traveling-wave electrodes; skin-effect; low-loss

1 引言

近年来,云计算、大数据及人工智能等技术的迅速发展带来了海量数据的存储、传输和计算需求. 面对数据流量持续高速增长的发展趋势,数据中心对于更快数据传输与互联的需求也在逐年攀升,因此互联速率和吞吐量已成为实现高性能数据处理系统的关键因素. 当前,铜互连广泛用于芯片间、芯片与模块间的互联接口,但由于电互联串扰噪声、均衡电

路高功耗以及长距离驱动能力不足等问题,使得电互联越来越难以满足日益提高的数据传输速度要求. 光互联作为新型的信息载体,有望突破电学的限制,实现传输速率更快、系统能效更高、易于大规模集成的互联系统,成为当前和未来海量数据传输的解决方案.

硅基马赫-曾德尔(MZ)调制器是高速光发射器的一种核心器件,主要由行波电极、光波导和相移器三部分组成^[1],其中行波电极的传输性能对 MZ 调

制器的性能有着非常重要的影响. 行波电极的损耗决定了电极能够传输的信号带宽, 而信号带宽决定了 MZ 调制器能够传输的比特率. 但是在现有的 MZ 调制器的设计结构中, 由于其传输电极的损耗较大^[2], 导致 MZ 调制器的光电调制 3 dB 带宽下降. 本文基于 IMEC SOI 硅光子工艺, 在已有 MZ 调制器结构的基础上, 分析了趋肤效应和邻近效应的基本原理并利用其物理效应优化传输线电极的性能, 最后利用优化后的行波电极设计了一种低损耗行波驱动电极 MZ 调制器, 并通过系统仿真验证了设计的准确性.

2 MZM 驱动电极的设计

2.1 行波驱动 MZ 调制器

行波电极的传输线的结构有两种, 一种是共面波导(CPW), 另一种是共面微带线(CPS), 为节省芯片面积, 降低耦合电容, 选用 CPS 作为传输线的设计方案^[3-4]. 图 1 为使用 CPS 设计的 MZ 调制器, 图 2 为 MZ 调制器的等效电路模型, 其中 R_E 、 L_E 、 G_E 、 C_E 分别为传输线电极等效的电阻、电感、电导和电容, R_S 和 C_D 分别为耗尽区 PN 结的寄生电阻和等效结电容.

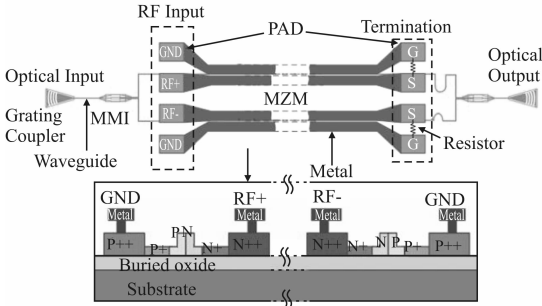


图 1 采用 CPS 传输线设计的 MZ 调制器

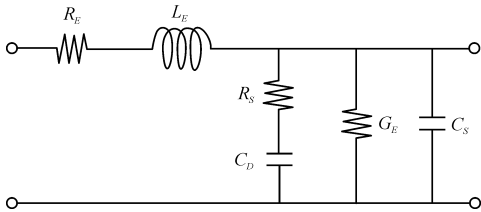


图 2 带 PN 结负载的传输线电路模型

利用该模型可以分析出带 PN 结负载传输线的传输常数 γ 为^[5]:

$$\gamma = \sqrt{(R_E + j\omega L_E)(1/R_T + G_E + j\omega(C_T + C_E))} \quad (1)$$

式中, $R_T = R_S(1 + 1/\omega^2 C_D^2 R_S^2)$;

$C_T = C_D/(\omega^2 C_D^2 R_S^2 + 1)$. 传播常数 γ 描述了信号在传播过程中的衰减和相位变化, 该常数可以用

来计算带 PN 结负载传输线的损耗和传播速度.

行波电极损耗主要来源于两部分: (1) 传输线本征损耗, 包括电介质损耗和趋肤效应; (2) 来自 PN 结负载的损耗. 其损耗系数 α 可以描述为^[5]:

$$\alpha = \text{Re}(\gamma) = \frac{R_E \sqrt{\frac{C_D + C_E}{L_E}} + \omega^2 C_D R_S \sqrt{\frac{L_E}{C_D + C_E}}}{2} \quad (2)$$

$$\text{Loss} = 20 \log(e - R_e(\gamma)) \approx -8.686 R_e(\gamma) \quad (3)$$

2.2 趋肤效应

当导体中存在高频电流时, 导体中的时变电流会在导体周围产生时变磁场, 时变磁场又在导体中心产生感生电流, 导体中心感生电流的方向与原导体中的电流方向相反, 迫使原来导体中的电流只能靠近表面流动, 此时导体横截面上越靠近导体表面处电流密度越大, 这一现象称为趋肤效应. 电流聚集在导体表面的厚度, 称为趋肤深度.

在直流或者低频情况下, 传输线不存在趋肤效应, 表现为电流可以在传输线的横截面上均匀分布, 因此传输线的电阻主要取决于材料的电阻率、导体的长度和横截面积, 即:

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (4)$$

式中, R 为传输线电阻; ρ 为传输线材料的电阻率; L 为传输线的长度; S 为传输线的横截面积.

但在高频情况下, 传输线的趋肤效应表现明显, 此时高频电流主要集中在厚度为趋肤深度的表面中, 使得传输线有效横截面积减小, 从而使传输线的电阻增加.

图 3 为载有时变电流的矩形传输线, 其时变电流 I 产生了时变磁场 H , H 的方向与 I 垂直.

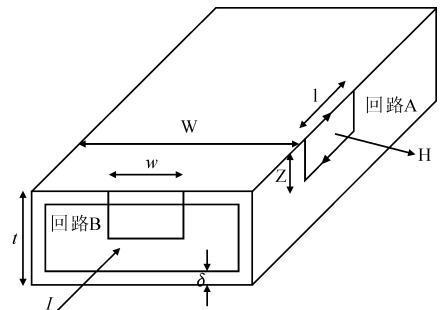


图 3 载有时变电流的矩形传输线

在回路 A 中应用基尔霍夫电压定律, 得到:

$$J\rho l - J_0\rho l = \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_0^{\infty} Bldz \quad (5)$$

式中, J 为导体内部电流密度; J_0 为导体表面电流密度; ρ 为电阻率; l 为路径长度; Φ 为垂直于表面的磁通量; B 为磁感应强度, 该式表明了由于磁场的存在, 导体表面的电流密度大于导体内部电流密度。

在回路 B 中应用安培定律, 得到:

$$I_{\text{encl}} = \omega \int_0^z J dz = \omega H_0 - \omega H \quad (6)$$

式中, I_{encl} 为闭合路径电流; J 为电流密度; ω 为角频率; H 为磁场强度, 该式表明了磁场沿一条封闭路径的积分等于这条路径所包围的总电流。

联立方程 (5) 和方程 (6) 可以得到二阶微分方程:

$$\frac{d^2 J_s}{dz^2} = \frac{j\omega\mu}{\rho} J_s \quad (7)$$

其解为:

$$J_s = J_{s0} \exp\left(-\frac{z}{\delta}\right) \exp\left(-\frac{jz}{\delta}\right) \quad (8)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (9)$$

式中, J_s 为传输线内部深度为 z 处的电流密度; J_{s0} 为传输线表面的电流密度; δ 为趋肤深度。 $\omega = 2\pi f$ 为角频率; μ 为磁导率; σ 为电导率。由公式可以看出, 传输线中的电流密度从表面起按指数衰减, 因此可以将传输线视为一个厚度为 δ , 电流密度均匀的导体, 前提条件为所有的曲率半径以及各项厚度至少是趋肤深度的 3 ~ 4 倍^[3]。

此时可以计算出电阻:

$$R = \frac{\rho l}{2\delta t + 2\delta W} \approx \frac{\rho l}{2\delta(t + W)} \quad (10)$$

式中, t 为传输线厚度; W 为传输线宽度。随着传输线电流频率升高, 传输线的趋肤深度逐渐降低, 有效横截面积逐渐减少, 等效电阻逐渐增大, 损耗增加。

图 4 为无限大铜导体中的趋肤深度随频率变化关系图, 从图中可以看出, 当频率小于 15 GHz 时, 其趋肤深度大于 0.5 μm , 而文献[4]中所使用的铜电极厚度仅为 500 nm, 因此限制了行波电流的横截面积, 使交流损耗增加。

3 低损耗行波电极的设计

3.1 低损耗行波电极

在高速行波电极设计中, 由传输线电介质和 PN 结负载引起的损耗很难降低, 但可以利用趋肤深度来增加行波电流流经的横截面积, 从而减少传输线的高频行波损耗。本文基于 IMEC SOI 硅光子

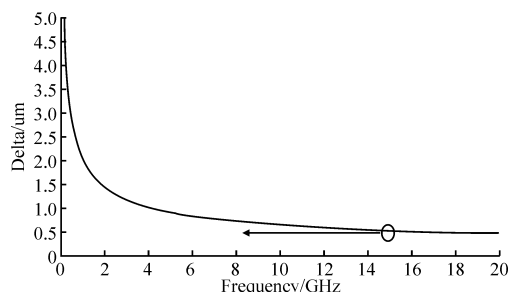


图 4 无限大铜传输线趋肤深度随频率变化关系图

工艺进行设计, 该工艺包含两层可用于传输线设计的铜金属层, 其中第一层金属 M1 的厚度为 500 nm, 第二层金属 M2 的厚度为 700 nm. 与其他设计不同的是, 我们在第一层金属上方通过 via 增加第二层金属, 以此来降低传输线损耗。低损耗行波传输电极设计结构如图 5 所示。

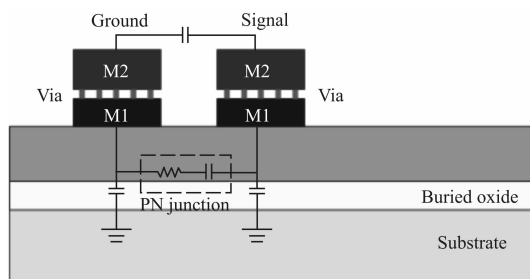


图 5 低损耗行波传输电极结构

使用仿真软件提取该传输线的 RLGC 参数, 并通过式 (2) (3) 计算出传输线的损耗因子, 从而计算出电极损耗, 将电阻和损耗随频率变化的曲线绘制在图 6 中。可以发现, 当只使用 M1 时, 随着电流频率升高, 趋肤效应愈加明显, 其等效电阻变化剧烈; 当使用 M1 和 M2 设计传输线时, 电流的趋肤效应使得电流分布在 M1 和 M2 的边缘, 此时行波电流具有较大的横截面积, 因此电阻较小, 损耗较低。随着频率持续升高寄生电容和寄生电感成为影响传输线损耗的主要因素。因此, 在高频时其损耗曲线逐渐趋于一致。

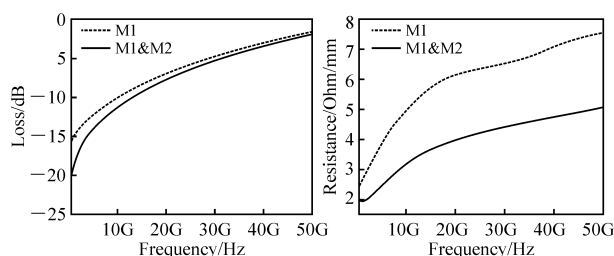


图 6 电阻与损耗随频率变化关系图

3.2 速度匹配与阻抗匹配

由于行波电极驱动的 MZ 调制器的设计需要考虑三个方面:(1)减小微波传输损耗;(2)电光速度相匹配,即行波电极的有效折射率和光波群折射率相匹配,使电极信号的调制效果达到最佳;(3)行波电极与前后电路模块的阻抗匹配,减少信号完整性带来的发射损耗^[1]. 因此在电极设计时,应在降低传输线损耗的同时,保持另外两部分不受影响才能最大程度优化 MZ 调制器的性能.

为了实现光电速度匹配,我们使用 Lumerical 仿真软件计算出光波在 1550 nm 处的群折射率为 3.978. 因此在设计低损耗 MZ 调制器时应保持行波电极在奈奎斯特频率(15 GHz)附近的有效折射率为 3.978 左右. 如果直接在 M1 上方增加相同宽度的 M2,通过仿真软件可以计算出各个频率点下的有效折射率如图 7 所示,偏离光波群折射率^[6].

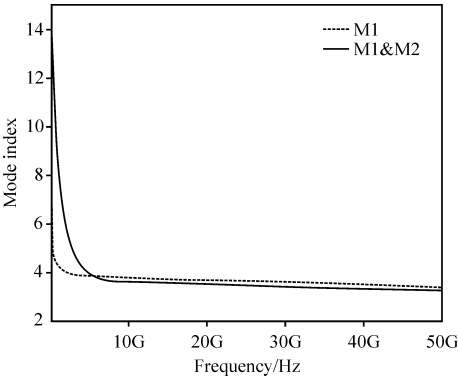


图 7 有效折射率随频率变化关系图

考虑高频信号的邻近效应,当高频电流在两导体中彼此反向流动时,电流会集中于导体临近侧流动^[7]. 在 CPS 结构中,GND 作为 RF 信号的返回路径,其高频电流方向与 RF 信号方向相反,因此存在邻近效应. 邻近效应表明,在高频电流流经传输线时,其大部分电流均集中在 PN 结两侧,外侧金属对高频电流的影响很小. 因此,可以在 M1 的外侧增加 M2,如图 8 所示,该结构可以在保持有效折射率和交流阻抗基本不变的情况下,降低传输线的交流损耗,同时增加电光调制 3 dB 带宽.

本设计取 M2 宽度为 26 μm ,略低于 M1 宽度 30 μm ,利用临近效应保持传输线的有效折射率和交流阻抗基本不变,如图 9 所示;同时,利用趋肤效应降低了传输线损耗并把电光调制 3 dB 带宽提高至 26.86 GHz,如图 10 所示.

3.3 低损耗行波 MZ 调制器仿真结果

根据 3.2 节中设计的低损耗行波电极驱动 MZ

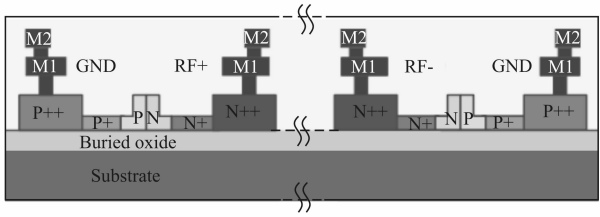
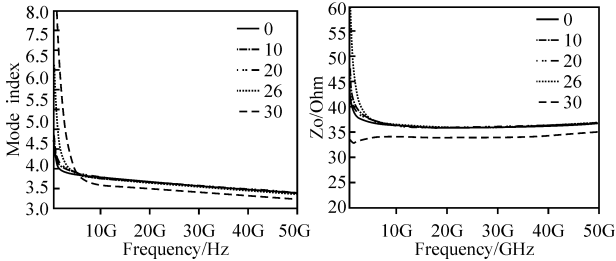
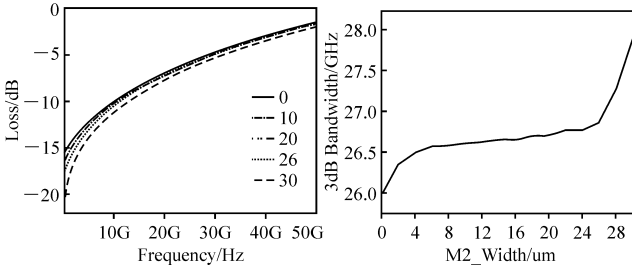


图 8 低损耗 MZ 调制器设计结构图



(a)有效折射率(b)交流阻抗

图 9 有效折射率和阻抗随 M2 宽度的变化



(a)传输线损耗(b)电光调制 3dB 带宽

图 10 传输线损耗和电光调制 3dB 带宽随 M2 宽度的变化

调制器,仿真验证了其电学传输特性和光电转换特性. 如图 11 所示为使用 ADS 软件对驱动电极进行 S 参数的仿真结果. 从结果可以看出,本文设计的低损耗行波电极驱动 MZ 调制器的电光调制 3 dB 带宽为 28 GHz,且损耗低于-6.764 dB.

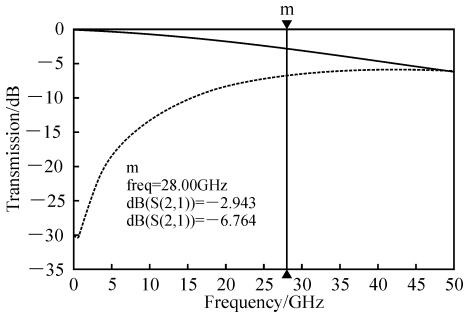


图 11 传输线输入端反射系数 S11 和传输系数 S21

4 结束语

本文分析了行波驱动 MZ 调制器的损耗来源,利用趋肤效应和邻近效应对行波电极进行优化,在

保持电光速度匹配和阻抗匹配的前提下,降低了传输线损耗,提高了电光调制带宽.最后基于 IMEC SOI 硅基光电子工艺设计了低损耗行波 MZ 调制器,电光调制带宽为 28 GHz,传输速率为 25 Gbps,可应用在后续的低损耗电光集成电路设计中.

参考文献:

[1] ZHOU L J, ZHOU Y Y, LU L J. Design optimization and implementation of silicon mach-zehnder electro-optic modulators [J]. ZTE Technology Journal, 2017 (5):25-33.

[2] KIM S, LEE C U, SONG M, et al. Design and characterization for travelling waveelectrodes of highspeed Mach-Zehnder electro-optic modulator on an n-doped InP substrate[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2018, 60(6):1558-1562. t

[3] LEE THOMAS H. The Design of CMOS Radio-Frequency Integrated Circuits [M]. Second Edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry. 2006: 114-120.

[4] JI P F, HE W F. Design of 25 Gbps silicon MZ electro-optic modulator driving electrodes[J]. Microelec-

tronics & Computer, 2018, 35(8):6-10.

[5] DING J, CHEN H, 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.

[6] GAO JING, WU HUI. Multi-function Mach-Zehnder modulator for pulse shaping and generation[J]. Optics Express, 2016, 24(19):22239-22249.

[7] LGUIZHEN, GQINGXIN, LZENGRUI. Study of the proximity effect and the distribution parameters of multi-conductor transmission line[C]// 2016 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). IEEE, 2016.

作者简介:

刘永超 男(1995-),硕士研究生.研究方向为硅基光互联、高速集成电路、模拟集成电路.
Email: liuyongchao@sjtu.edu.cn

纪鹏飞 男(1995-),博士研究生.研究方向为硅基光互联、高速集成电路、模拟集成电路.

何卫锋 男(1976-),博士,硕士生导师,副研究员.研究方向为光电混合集成电路技术,超低功耗集成电路技术.