

宽带电光调制器的研究现状与新型硅基混合集成调制器的发展趋势

Broadband Electro-Optical Modulator and Development Trend of New Silicon-Based Hybrid Integrated Modulator

李金野/LI Jinye^{1,2}
于丽娟/YU Lijuan¹
刘建国/LIU Jianguo^{1,2}

(1. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)
(1. Institution of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

中图分类号: TN929.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2017) 05-0015-006

摘要: 雷达、电子对抗、无线通信正向着宽带化、集成化、阵列化的方向快速发展, 对电光调制器的带宽、半波电压、尺度等提出了更加苛刻的要求。分别对铌酸锂、磷化铟、硅基以及聚合物电光调制器进行了剖析, 证明单一材料体系已难以满足系统应用需求。指出硅基混合集成电光调制器融合了多种材料体系的优点, 将会对未来微波光子模拟光传输链路和信息处理的发展提供强有力的支撑。

关键词: 电光调制器; 硅基混合集成; 低半波电压; 小尺度

Abstract: Radar, electronic countermeasure and wireless communication have developed rapidly in the direction of broadband, integration and array, which brings more challenges on bandwidth, half-wave voltage and footprint of the electro-optical modulator. In this paper, modulators based on different material system, including the lithium niobate, indium phosphide, silicon and electro-optical polymer are analyzed, which shows that the single material system is difficult to meet the system application requirements. In this case, a silicon-based hybrid integrated electro-optical modulator combining the advantages of various material systems is proposed, which is expected to provide a strong support for the development of microwave photon analog optical transmission links and information processing.

Key words: electro-optic modulator; silicon-based hybrid integration; low half-wave voltage; small scale

近年来, 雷达与电子对抗、无线通信等信息系统正朝着宽带化、集成化和小型化的方向快速发展。这些信息系统对模拟光链路都具有严格的要求, 调制器是模拟光链路中的核心器件, 需要具有高带宽、低半波电压、低插入损耗、小体积以及高线性度等特性。

众多机构对研制高性能调制器进行了深入探索, 取得了卓有成效的进展和成果。按材料体系分类, 电光调制器主要分为铌酸锂(LiNbO₃)调制器、磷化铟(InP)调制器、硅调制器和聚合物电光调制器, 几种调制器各具特色。例如: LiNbO₃调制器是最成

熟的电光调制器, 带宽大、可靠性好, 但尺寸大, 难以实现与激光器和探测器集成; InP调制器易集成, 但损耗高、成熟度低; 硅调制器尺寸小, 损耗低, 但线性度差; 聚合物电光调制器带宽大, 但损耗高、可靠性差。因此, 单靠一种材料体系, 难以满足微波光子系统对宽带调制器的需求。硅基混合集成调制器融合了硅基材料体系易于集成和其他材料体系电光系数高的优势, 获得了高度关注并极有可能在未来宽带信息系统中发挥重

要的作用。

1 调制器发展现状分析

宽带光调制器按照材料分类主要分为LiNbO₃调制器、InP基调制器、硅基调制器, 以及聚合物电光调制器。

1.1 LiNbO₃电光调制器

LiNbO₃具有电光系数大、本征调制带宽大、波导传输损耗小、稳定性好等优点。LiNbO₃调制器是目前发

收稿日期: 2017-08-05

网络出版日期: 2017-09-13

基金项目: 科技部“973”与重点研发计划项目(2017YFF0104601, 2014CB340102) 国家自然科学基金项目(61527820, 11674313, 61535014, 61727815, 61625504)

展最成熟的调制器,其利用线性电光效应实现电信号对光信号的调制,通过外加电场改变光在晶体中传播的折射率,进而改变光的相位和偏振态,利用 Mach-Zehnder 结构可实现相位调制到强度调制的转换。所以 LiNbO₃ 调制器在模拟光链路中可作为相位调制器、偏振调制器和强度调制器。

早期 LiNbO₃ 调制器采用集总电极结构,但受到光波通过晶体的渡越时间以及外电路的电阻电容(RC)时间常数限制,器件调制带宽严重受限。为了克服这种限制,人们采用了行波电极结构,调制带宽不再受 RC 时间常数的限制。早在 1999 年,行波电极 LiNbO₃ 调制器的报道带宽就已达到 40 GHz^[1]。而此时光波与微波的速度匹配、源和传输线的阻抗匹配以及微波传输损耗则是影响带宽的主要因素。常采用的速度匹配方法有应用厚金属电极,引入开槽结构,在电极下镀一层低介电常数的缓冲层以及采用倒相电极结构和分段电极结构^[2]。这些方法有时会减小光场和电场的重叠^[3],从而降低调制效率。为了提高调制效率,又有减薄 LiNbO₃ 厚度,设计脊型钛扩散 LiNbO₃ 波导结构,减小地电极宽度等方法,调制带宽可达 105 GHz^[4]。在商业应用上,Photline 公司和 EO space 公司已有很成熟的 40 GHz/60 GHz LiNbO₃ 调制器产品,EO space 公司现已研发出 110 GHz 的调制器,小体积、低功耗的 LiNbO₃ 调制器也有很多突破,目前主要应用于军事及航天产业中^[5]。

上述传统的体材料 LiNbO₃ 调制器可以实现宽带调制,但一般 V_{π} 高,体积大,对偏振敏感,插入损耗大。所以近几年基于单晶 LiNbO₃ 薄膜的调制器备受关注,包括单晶 LiNbO₃ 薄膜与易刻蚀的材料形成的混合集成调制器,以及刻蚀单晶 LiNbO₃ 薄膜形成的微纳 LiNbO₃ 调制器。2017 年哈佛大学报道了纳米光子 LiNbO₃

调制器,利用高精度刻蚀工艺在二氧化硅(SiO₂)上的单晶 LiNbO₃ 薄膜上制备跑道型和 Mach-Zehnder 型电光调制器,最终带宽分别达到 30 GHz 和 15 GHz^[6]。

1.2 InP 基调制器

InP 基调制器多采用多量子阱结构(MQW),主要分为电吸收型和电光型。InP 基电吸收型调制器利用量子限制 Stark 效应(QCSE),通过外加电场改变 MQW 对光的吸收,进而改变光的强度;InP 基电光型调制器是利用 QCSE 引起的材料折射率变化实现对光场的相位调制,然后利用 Mach-Zehnder 结构将相位调制转化为强度调制。

在 InP 基调制器研究方面,德国 HHI 和日本 NTT 光子实验室处于国际领先地位,其他国家的一些研究机构也进行了相关研究并取得了一定成果。对其性能的研究和改进主要集中在电极的设计和有源区光波导的设计两方面,以下分别进行阐述。

早期的 InP 基 Mach-Zehnder 调制器也是集总电极型,为了克服 RC 常数对调制带宽的限制,采用行波电极结构,带宽提高可达 45 GHz。还有方案在两端集成了模斑变换器,大大降低了插入插损^[7];为了尽可能实现阻抗和速度匹配,Suguru AKIYAMA 等人提出了沿着光波导制作分段的行波电极来提高调制带宽^[8];在此基础上,将相位电极独立于行波电极来调整工作点,可形成驱动简单、零啁啾调制的串联推挽结构^[9];另外,InP 基调制器采用半绝缘衬底也可以增加调制带宽^[10]。

传统的 InP 基调制器的有源区是 pin 结构,而 p 型包层损耗大,薄非掺杂层电容大,很难满足速度和阻抗匹配^[11]。针对此问题,日本 NTT 实验室提出了 nin 型结构,降低了接触电阻和损耗,提高了载流子迁移率,实现了大于 40 GHz 的宽带调制^[12]。为了进一步提高调制效率,Yoshihiro

OGISO 等人提出了 nipn 结构,加了薄弱的 p 型层作为电子阻挡层,使电场更有效地施加在非掺杂的 i 层,最上层的 n 型结构应用反向梯形结构降低了接触电阻和寄生电容,最终实现了调制带宽大于 67 GHz、片上损耗小于 2 dB、半波电压低于 1.5 V 的高性能调制器^[13]。

InP 基调制器调制效率高,驱动电压小,通过适当的设计可实现宽带调制;另外,其器件结构紧凑,易于集成,尤其是与光源可实现单片集成,在这一点上已有相关报道。但 InP 基调制器对材料和工艺要求都很高,成本和集成难度也很大,目前中国在该方面的研究与国际先进水平相比还有很大差距。

1.3 硅基调制器

硅基电光调制器根据调控机理可以分为两种:电折射率调制器和电吸收调制器。前者是基于等离子色散效应^[14],后者是基于 Frankz-Keldysh 效应^[15]或者 QCSE 效应^[16]。其中,电折射率调制器根据光学结构的不同主要分为两种:微环谐振腔型和 Mach-Zehnder 型。微环结构的光调制是利用电信号改变微环结构中波导的有效折射率,从而改变微环的谐振状态,对特定波长实现光强的调制;而 Mach-Zehnder 型结构是通过外加电信号改变相移臂波导的有效折射率,使光的干涉效应发生变化,进而改变光强。

2004 年 Intel 的研究人员在 Nature 上报道了调制带宽达到 1 GHz 的 Mach-Zehnder 型硅基调制器^[17],并在 2005 年已经将其电学调制带宽优化到 10 GHz。2005 年,Cornell 大学的徐千帆等人通过优化波导截面,采用微环结构制作出了带宽达到 1.5 GHz 的高集成度的硅基微环调制器^[18]。2007 年,LIU Ansheng 等人制作出基于反偏 PN 结结构的调制器,采用多模耦合器结合 Mach-Zehnder 结构,调制带宽达到 20 GHz^[19]。随后,LIAO L

等人利用同样的器件,进一步优化电极,实现了 30 GHz 的调制带宽^[20]。另外,为了提高调制器的性能,多种改进方法相继被提出来,例如:通过掺杂补偿来减小波导传输损耗,通过采用包覆型 PN 结增加载流子与光场间的相互作用从而提高调制效率^[21],通过 pipin 掺杂方式减小载流子高掺杂引起的吸收损耗,通过推挽式电极驱动减小外置电压进而减小功耗^[22],通过采用插指 PN 结方式提高调制效率,通过在脊型硅波导上沉积一层氮化硅产生非对称应变进而提高线性度^[23],通过行波铜电极对行波铝电极的替换进一步提高调制带宽等。

微环谐振腔型调制器尺寸很小,电学结构简单,但其温度敏感性高,同时受限于光子寿命的影响,调制带宽相对较小,很难实现宽带调制; Mach-Zehnder 型调制器的调制带宽大,但对温度变化不敏感,相应的插入损耗也较大。总体来讲,硅基调制器通过合理的设计可以实现宽带、低 V_{π} 调制,且体积小,与互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺兼容,工艺成熟度高,易于实现大规模集成;但其线性度较差,有待于提高。

1.4 聚合物电光调制器

聚合物电光调制器利用线性电光效应来实现电信号对光信号的调制,在光波电场和外加电场的作用下,引起材料的非线性极化,并导致其光学各向异性,从而实现对光的相位、偏振态以及强度的调制。

1991 年出现了第一个高频聚合物调制器,带宽达到 20 GHz^[24],自此以后,聚合物调制器被广泛研究,并有大量相关文献进行报道。Hoechst Celanese Corp 采用相同的材料,设计了行波电极结构,实现了带宽超过 40 GHz 的调制器。美国加州大学洛杉矶分校、南加州大学与 TACAN 公司联合,成功制备和表征了超过 110 GHz 的高带宽聚合物调制器^[25], CHEN Datong 等人制备了带宽达 113

GHz 的聚合物调制器^[26], Bell 实验室后来更是将此记录改写,实现了高达 150~200 GHz 的调制带宽。除带宽之外,随着 NLO 发色基团和器件结构的改进,半波电压也大大降低,在文献 [27] 中,聚合物调制器在 1 300 nm 和 1 550 nm 波长处,500 GHz 以下调制时 V_{π} 分别低至 3.7 V 和 4.8 V; 通过改进,文献 [28] 又将上述 V_{π} 值分别减小到了 2.4 V 和 3.7 V。

相较于无机和半导体调制器而言,聚合物调制器有其独特的优点。比如:聚合物材料的微波介电常数低,更易实现速度匹配,有实现更大调制带宽的潜力;电光系数大,从而 V_{π} 更小;材料价格低廉,工艺兼容性好。但其也有很多缺点,比如:在通信波长范围内插入损耗较大,长期热稳定性差,光稳定性较差,聚合物的极化效率和电光系数难以保持等,所以要将其应用于商业设备,还需深入研究。

2 新型硅基混合集成调制器

单一材料体系调制器的固有限制促进了混合材料体系调制器的发展。包括硅基-有机物混合集成调制器、硅基-LiNbO₃ 混合集成调制器以及硅基-III-V 族混合集成调制器等。以下分别进行阐述。

2.1 硅基-有机物混合集成调制器

硅基-有机物混合集成 (SOH) 调制器是将电光聚合物材料填充到两个相距很近的脊型硅波导之间形成的狭缝 (slot) 波导中,其电光调制效率相比于传统的聚合物调制器有很大提高, $V_{\pi}L$ 减小了一个数量级^[29]。2008 年, Tom BAEHR-JONES 报道了硅狭缝波导和非线性聚合物包层形成的混合集成调制器, $V_{\pi}L$ 低至 0.5 V·cm^[30]。2010 年,该实验室报道了第一个近红外波段宽带 SOH 调制器,带宽为 3 GHz, $V_{\pi}L$ 为 0.8 V·cm。适当增加硅波导的厚度和合理掺杂,可以进一步提高调制带宽^[31]。2014 年出

现了第一个带宽达到 100 GHz 的 SOH 调制器^[32]。2016 年李凯丽等人仿真了硅基-有机物材料混合 Mach-Zehnder 型调制器,在条形波导和狭缝波导之间设计了模式转换器来提高模式转换效率,仿真得到调制带宽达 137 GHz^[33]。

SOH 调制器的原理如图 1 所示,光波导结构为填充有机聚合物材料的 slot 波导,光的准横电场 (TE) 模式限制在 slot 波导内,施加电压时, slot 波导内形成强电场,电场和光场模式之间有很大的交叠,因此调制效率较高^[32]。为了减小薄条形加载硅条的阻抗,采用加直流栅电压的方式形成高电导率的电子积累层进而减小阻抗,相比于掺杂方式,电子迁移率不受杂质散射的影响,提高带宽的同时降低了光损耗。如图 1a) 所示, slot 两侧的硅波导通过薄条形加载硅条连接电极,电光聚合物填充到 slot 中,轻掺杂的硅衬底被用作栅极。图 1b) 所示为波导的截面和准 TE 传输模式的电场分布图,光场被限制在 slot 中,图中也展示了等效 RC 电路 (C 为 slot 电容, R 为条形加载的电阻)。当在 SiO₂ 两侧加正电压时,栅极电压 V_{gate} 会使条形加载的能带弯曲,在条形加载中形成高电导率的电子累积层。 E_F 、 E_C 、 E_V 分别是费米能级、导带能级和价带能级, q 表示是电子电量,如图 1c) 所示。

2.2 硅基-LiNbO₃ 混合集成调制器

硅基-LiNbO₃ 混合集成调制器近几年取得了很大进展。2013 年, Vincent STENGER 等人通过离子注入与晶体键合技术相结合,在石英衬底上键合单晶铌酸锂 (LN) 薄膜,以此来形成电光调制器,调制带宽达 24 GHz^[34]。2014 年, CHEN Li 等人报道了混合集成的 LN 薄膜硅基环形电光调制器, 3 dB 带宽达到 5 GHz^[35]。2015 年,该实验室报道了高线性硅基-LiNbO₃ 混合集成的环形调制器^[36],无杂散动态范围 (SFDR) 在 1 GHz 和 10

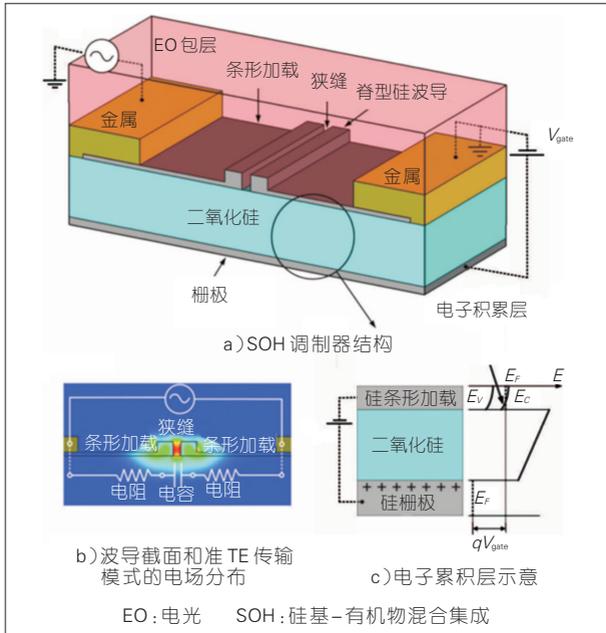


图1 SOH调制器原理

GHz 分别达到 98.1 dB/Hz²³ 和 87.6 dB/Hz²³, 优于传统的硅基环形调制器。2016年4月, JIN Shilei 等人报道了应用氮化硅脊型波导的硅基混合集成的 Mach-Zehnder 型调制器, 3 dB 带宽达 8 GHz, $V_{\pi}L$ 为 $3 \text{ V} \cdot \text{cm}$ ^[37]。2016年7月, Andrew J. MERCANTE 等人报道了与 CMOS 兼容的硅基混合电光调制器, RF 调制带宽达 110 GHz^[38]。在 2016年12月, Ashutosh RAO 等人报道了硅基-LiNbO₃ 混合集成的小型高性能 Mach-Zehnder 调制器, 调制带宽达 33 GHz, $V_{\pi}L$ 在直流和 50 GHz 下分别低至 $3.1 \text{ V} \cdot \text{cm}$ 和 $6.5 \text{ V} \cdot \text{cm}$ ^[39]。

Mach-Zehnder 型硅基-LiNbO₃ 混合集成调制器^[40]的结构如图 2a) 所示。在图 2b) 中, 左侧为 1550nm 波长处光场 TE 模式模场分布图, 右侧为 10 GHz 时的 RF 场分布, 其中标注 Au 处代表金属电极, 硫族化物(ChG)脊型结构用矩形白框表示。用离子注入与晶体键合技术相结合, 在硅衬底上的 SiO₂ 层上直接键合一层亚微米厚的单晶 LN 薄膜, LN 薄膜具有和体 LiNbO₃ 材料基本一致的大电光系数, 所以可实现高效率电光调制。利用 LN 薄膜和 SiO₂ 层的折射率差可实现光场的纵向限制, 而 LiNbO₃ 材料难

刻蚀的特点, 此方案在 LN 薄膜上沉积折射率匹配的 ChG, 形成脊型光波导, 从而加强对光场的横向限制。此种调制器利用了 LN 薄膜的大电光系数, 以及 LN 薄膜与 SiO₂ 层的高折射率差, 实现了对光场的强限制, 大大减小了电极间距, 从而使 $V_{\pi}L$ 参数显著降低, 且更有利于实现集成。另

外, 通过改变脊型材料的组分、结构参数可以进一步优化设计, 提高带宽且减小光损耗, 具有很大的优势和开发前景。

另外, III-V 族材料与硅基混合集成也可实现高速高效调制。2012年, UCSB 的 J.E.BOWER 小组提出了基于 QCSE 效应的硅基电吸收调制器, 实现 InP 基底和 SOI 材料的键合, 该器件在 1 300 nm 波段的调制带宽预测高达 74 GHz^[41]。2016年8月, UCSB 的 ZHANG Chong 等人报道了高线性度环形辅助 III-V/Si 基混合集成 Mach-Zehnder 调制器 (RAMZM), 结构如图 3 所示, 通过调控复合波导的介电常数以及环和相位调制臂的耦合系数, 可以减小 Mach-Zehnder 调制器传输函数的非本征、非线性特性, 进而提高线性度, 此方案中的 SFDR 在 10 GHz, 环形结构弱耦合条件下可以达到 117.5 dB/Hz^{23[42]}。

综合考虑模拟光链路对调制器的应用需求, 如大带宽、低 V_{π} 、低插入损耗、高成熟度、高稳定性等, 利用 LN 薄膜具有大的电光系数等特点, 同时考虑到硅波导的研究也已非常

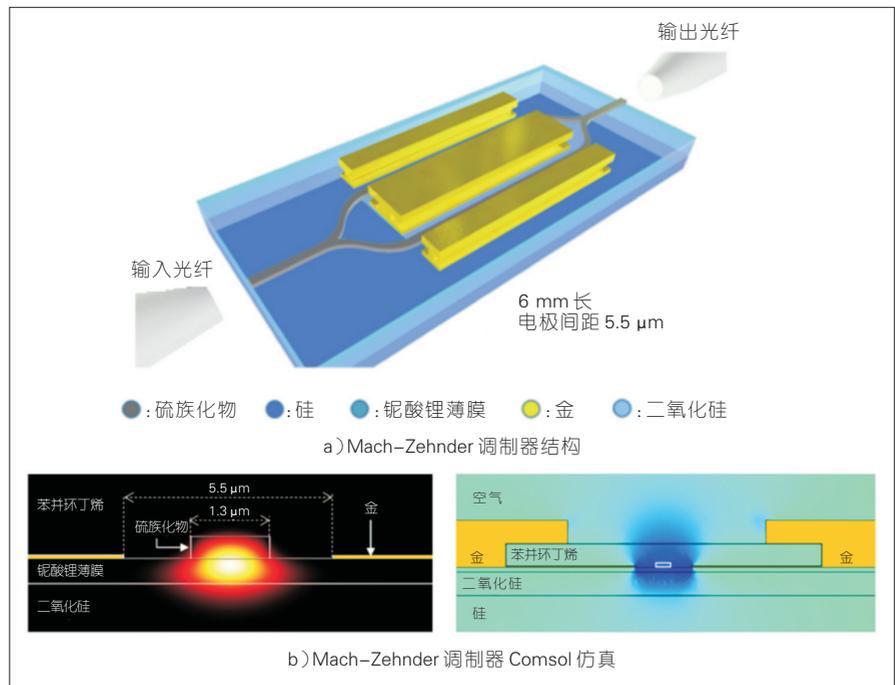


图2 硅基-LiNbO₃混合集成调制器示意

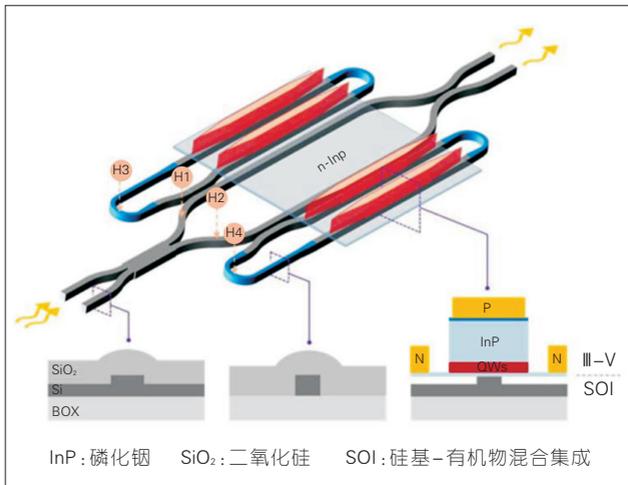


图3
III-V/Si异质集成
RAMZM结构示意图

成熟,将LN薄膜与硅基衬底集成,将带来独特的优势。通过合理的设计可实现宽带高效率调制,做到在与传统LiNbO₃调制器保持基本一致的调制带宽、消光比和动态范围时,降低尺寸、 V_{π} 以及损耗,且与CMOS工艺兼容,易于实现小型集成化,因此为未来的高速光电集成提供了很好的前景。

3 结束语

宽带电光调制器是宽带雷达、电子对抗以及无线通信领域中的核心电光转换器件,多年来一直是国际上的研究热点。传统的体材料LiNbO₃调制器发展最成熟,可以实现宽带调制,但一般半波电压高,体积大,插入损耗也大;InP基调制器性能较好,易于集成,但材料和工艺复杂,成本较高;硅基调制器体积小,有利于大规模集成,但线性度相对较差;聚合物调制器带宽很宽,但稳定性较差。基于硅基衬底的混合集成调制器可以通过优化设计实现不同材料体系的优势结合,提高调制器的整体性能,是当前的研究热点之一,极有可能在未来宽带信息网络中扮演重要角色。

参考文献

[1] GREENBLATT A S, HOWERTON M M, MOELLER R P, et al. Low Drive Voltage, 40GHz LiNbO₃ Modulators[C]// Optical Fiber Communication Conference. USA: Optical Society of America, 1999: 284–286.

- [2] NOGUCHI K. Ultra-High-Speed LiNbO₃ Modulators[J]. Journal of Optical & Fiber Communications Reports, 2007, 4(1): 1–13.
- [3] MACARIO J, YAO P, SHI S, et al. Full Spectrum Millimeter-Wave Modulation[J]. Optics Express, 2012, 20(21): 23623–23629. DOI: 10.1364/OE.20.023623
- [4] GHEORMA I L, SAVI P, OSGOOD R M. Thin Layer Design of X-cut LiNbO₃ Modulators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(12): 1618–1620. DOI: 10.1109/68.896326
- [5] CHARCZENKO W, CIMOLINO M, ABBAS G, et al. Wideband Modulators and Transmitters for Analog Fiber Optic Links[C]// Avionics, Fiber-Optics and Photonics Conference. USA: IEEE, 2013: 41–42. DOI: 10.1109/AVFOP.2013.6661613
- [6] WANG C, ZHANG M, STERN B, et al. Nanophotonic Lithium Niobate Electro-Optic Modulators[EB/OL]. (2017-01-23)[2017-07-20]. <https://arxiv.org/abs/1701.06470>
- [7] HOFFMAN D, STAROSKE S, VELTHAUS K O. 45GHz Bandwidth Travelling Wave Electrode Mach-Zehnder Modulator with Integrated Spot Size Converter[C]// International Conference on Indium Phosphide and Related Materials. USA: IEEE, 2004: 585–588. DOI: 10.1109/ICIPRM.2004.1442793
- [8] AKIYAMA S, ITOH H, SEKIGUCHI S, et al. InP-Based Mach-Zehnder Modulator With Capacitively Loaded Traveling-Wave Electrodes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(5): 608–615. DOI: 10.1109/JLT.2007.915278
- [9] BRAST T, KAISER R, VELTHAUS K O, et al. Monolithic 100Gb/s twin-IQ Mach-Zehnder Modulators for Advanced Hybrid High-Capacity Transmitter Boards[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition. USA: IEEE, 2011: 1–3
- [10] AKIYAMA S, HIROSE S, ITOH H, et al. 40Gb/s InP-Based Mach-Zehnder Modulator with A Driving Voltage of 3V pp[C]// International Conference on Indium Phosphide and Related Materials. USA: IEEE, 2004: 581–584. DOI: 10.1109/ICIPRM.2004.1442792
- [11] ROLLAND C, MOORE R S, SHEPHERD F, et al. 10 Gbit/s, 1.56 μm Multi-Quantum Well InP/InGaAsP Mach-Zehnder Optical Modulator[J]. Electronics Letters, 2002, 29(5): 471–472. DOI: 10.1049/el:19930315
- [12] KIKUCHI N, TSUZUKI K, YAMADA E, et al. InP-Based High-Speed Mach-Zehnder Modulator[J]. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 2005, 6014: 09–16. DOI: 10.1117/12.630438
- [13] OGISO Y, OZAKI J, UEDA Y, et al. Over 67 GHz Bandwidth and 1.5 V V_{π} InP-Based Optical IQ Modulator with n-i-p-n Heterostructure[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(8): 1450–1455. DOI: 10.1109/JLT.2016.2639542
- [14] SOREF R, BENNETT B. Electrooptical Effects in Silicon[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(1): 123–129. DOI: 10.1109/JQE.1987.1073206
- [15] JONGTHAMMANURAK S, LIU J, WADA K, et al. Large Electro-Optic Effect in Tensile Strained Ge-on-Si Films[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(16): 7097. DOI: 10.1063/1.2363948
- [16] KUO Y, LEE Y, REN S, et al. Strong Quantum-Confined Stark Effect in Germanium Quantum-Well Structures on Silicon[J]. Nature, 2005, 437(7063): 1334–1336. DOI: 10.1038/nature04204
- [17] LIU A, JONES R, LIAO L, et al. A High-Speed Silicon Optical Modulator Based on A Metal-Oxide-Semiconductor Capacitor[J]. Nature, 2004, 427(6975): 615–618. DOI: 10.1038/nature02310
- [18] XU Q, SCHMIDT B, PRADHAN S, et al. Micrometre-Scale Silicon Electro-Optic Modulator[J]. Nature, 2005, 435(7040): 325–327. DOI: 10.1038/nature03569
- [19] LIU A, LIAO L, RUBIN D, et al. High-Speed Optical Modulation Based on Carrier Depletion in A Silicon Waveguide[J]. Optics Express, 2007, 15(2): 660–668. DOI: 10.1364/OE.15.000660
- [20] LIAO L, LIU A, RUBIN D, et al. 40Gbit/s Silicon Optical Modulator for High-Speed Applications[J]. Electronics Letters, 2007, 43(22): 51–52. DOI: 10.1049/el:20072253
- [21] ROSENBERG J C, GREEN W M, ASSEFA S, et al. A 25 Gbps Silicon Microring Modulator Based on An Interleaved Junction[J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26411–26423. DOI: 10.1364/OE.20.026411
- [22] DONG P, CHEN L, CHEN Y K. High-Speed Low-Voltage Single-Drive Push-Pull Silicon Mach-Zehnder Modulators[J]. Optics Express, 2012, 20(6): 6163–6169. DOI: 10.1364/OE.20.006163
- [23] CHMIELAK B, WALDOW M, MATHEISEN C, et al. Pockels Effect Based Fully Integrated, Strained Silicon Electro-Optic Modulator[J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17212–17219. DOI: 10.1364/OE.19.017212
- [24] GIRTON D G, KWIATKOWSKI S L, LIPSCOMB G F, et al. 20 GHz Electro-Optic Polymer Mach-Zehnder Modulator[J]. Applied Physics Letters, 1991, 58(16): 1730–1732. DOI: 10.1063/1.105123
- [25] SHI Y, WANG W, BECHTEL J H, et al. Fabrication and Characterization of High-Speed Polyurethane-Disperse Red 19 Integrated Electrooptic Modulators for Analog System Applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(2): 289–299. DOI: 10.1109/2944.577380

[26] CHEN D, FETTERMAN H R, CHEN A, et al. Demonstration of 110 GHz Electro-Optic Polymer Modulators[J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(25): 3335-3337. DOI: 10.1063/1.119162

[27] LEE H M, HWANG W Y, OH M C, et al. High Performance Electro-Optic Polymer Waveguide Device[J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(26): 3779-3781. DOI: 10.1063/1.120541

[28] OH M C, ZHANG H, SZEP A, et al. Electro-Optic Polymer Modulators for 1.55 μ m Wavelength Using Phenyltetraene Bridged Chromophore in Polycarbonate[J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(24): 3525-3527. DOI: 10.1063/1.126695

[29] LUO J, JEN K Y. Highly Efficient Organic Electrooptic Materials and Their Hybrid Systems for Advanced Photonic Devices[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(6): 42-53. DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2268385

[30] BAEHR-JONES T, PENKOV B, HUANG J, et al. Nonlinear Polymer-Clad Silicon Slot Waveguide Modulator with A Half Wave Voltage of 0.25V[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(16): 163303-163303-3. DOI: 10.1063/1.2909656

[31] DING R, BAEHR-JONES T, LIU Y, et al. Demonstration of A Low V_{π} L Modulator with GHz Bandwidth Based on Electro-Optic Polymer-Clad Silicon Slot Waveguides[J]. Optics Express, 2010, 18(15): 15618-23. DOI: 10.1364/OE.18.015618

[32] ALLOATTI L, PALMER R, DIEBOLD S, et al. 100 GHz Silicon-Organic Hybrid Modulator [J]. Light Science & Applications, 2014, 3(5): e173. DOI: 10.1038/lsa.2014.54

[33] 李凯丽, 安俊明, 张家顺, 等. 硅-有机材料混合电光调制器的优化设计[J]. 光子学报, 2016, 45(5): 55-61. DOI: 10.3788/gzxb20164505.0523001

[34] STENGER V, TONEY J, POLLICK A, et al. Engineered Thin Film Lithium Niobate Substrate for High Gain-Bandwidth Electro-optic Modulators[C]//2013 Conference on CLEO. USA:IEEE, 2013: 1-2. DOI: 10.1364/CLEO_SI.2013.CW30.3

[35] CHEN L, XU Q, WOOD M G, et al. Hybrid Silicon and Lithium Niobate Electro-Optical Ring Modulator[J]. Optica, 2014, 1(2): 112-118. DOI: 10.1364/OPTICA.1.000112

[36] CHEN L, CHEN J, NAGY J, et al. Highly Linear Ring Modulator From Hybrid Silicon and Lithium Niobate.[J]. Optics Express, 2015, 23(10): 13255-13264. DOI: 10.1364/OE.23.013255

[37] JIN S, XU L, ZHANG H, et al. LiNbO3 Thin-Film Modulators Using Silicon Nitride Surface Ridge Waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(7): 736-739. DOI: 10.1109/LPT.2015.2507136

[38] MERCANTE A J, YAO P, SHI S, et al. 110 GHz CMOS Compatible Thin Film LiNbO3 Modulator on Silicon[J]. Optics Express, 2016, 24(14): 15590-15595. DOI: 10.1364/OE.24.015590

[39] RAO A, PATIL A, RABIEI P, et al. High-Performance and Linear Thin-Film Lithium Niobate Mach-Zehnder Modulators on Silicon Up to 50 GHz[J]. Optics Letters, 2016, 41(24):5700-5703. DOI: 10.1364/OL.41.005700

[40] RAO A, PATIL A, CHILES J, et al. Heterogeneous Microring and Mach-Zehnder Modulators Based on Lithium Niobate and Chalcogenide Glasses on Silicon [J]// Optics Express, 2015, 23(17): 22746-22752. DOI: 10.1364/OE.23.022746

[41] XIAO X, XU H, LI X, et al. 25Gbit/s Silicon Microring Modulator Based on Misalignment-Tolerant Interleaved PN Junctions.[J]. Optics Express, 2012, 20(3):2507-2515. DOI: 10.1364/OE.20.002507

[42] ZHANG C, MORTON P A, KHURGIN J B, et al. Highly Linear Heterogeneous-Integrated Mach-Zehnder Interferometer Modulators on Si[J]. Optics Express, 2016, 24(17):19040-19047. DOI: 10.1364/OE.24.019040

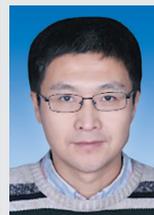
作者简介



李金野, 中国科学院半导体研究所 在读博士研究生; 主要研究方向为混合集成宽带调制器等。



于丽娟, 中国科学院半导体研究所 副研究员; 主要研究方向为半导体光电子器件和光电混合集成技术等; 已发表 SCI 检索论文 30 余篇。



刘建国, 中国科学院半导体研究所 研究员, 中国科学院大学 特聘教授、博士生导师; 主要研究方向为高速光电子器件、光通信与微波光子技术等; 曾获得国家杰出青年基金; 已发表 SCI 检索论文 120 余篇, 获得授权国家发明专利 30 余项。

《中兴通讯技术》2018 年专题计划

期次	专题名	专题名
1	5G 承载网技术和优化组网	中国联通研究院 张云勇 院长
2	大数据智能化无线网络技术	重庆邮电大学 陈前斌 教授
3	毫米波与太赫兹通信技术	东南大学 洪伟 教授 东南大学 王海明 教授
4	5G 回传网络光电子器件技术	中兴光电子技术有限公司 孙笑晨 技术总监 中兴光电子技术有限公司 徐积勇 总经理
5	可再生能源供电的无线通信	清华大学 牛志升 教授
6	区块链技术及其物联网应用	北京航空航天大学 刘建伟 教授