动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250321002

高效率光学调制器的研究进展

秦　莉[1]，许映帅[1,2]，邱　橙[1*]，陈泳屹[1,3*]，周志鹏[1,2]，张训宇[1,2]，乔一曼[1,2]，王玉冰[1]，梁　磊[1]，雷宇鑫[1]，宋　悦[1]，贾　鹏[1]，曾玉刚[1]，宁永强[1]，王立军[1]

（1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 特种发光科学与技术全国重点实验室，长春 130033；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 吉光半导体科技有限公司，长春 130102）

摘　要： 光学调制器是利用外源性能量来改变光信号特征的基础光子器件，主要功能包括对光信号的振幅、频率和相位等物理参数进行精确调控。基于调制器构建的集成光子芯片凭借其大带宽、高速信号处理能力和极低功耗的优势，已成为未来光通信、光互连和光计算的核心硬件平台。传统研究聚焦于调制速度，而当前微型化需求和能效优化目标逐渐将研究重点转移到调制效率上。文章系统阐释光学调制器的能效优化机制，重点对比分析硅基材料、Ⅲ-Ⅴ族元素、铁电体、合成聚合物和石墨烯等不同材料的光相位调制器。通过多维度性能评估与作用机理解析，为未来高效光学调制器件的创新提供参考。

关键词： 硅光子学；光学相位调制器；等离子体色散效应；铁电材料；二维材料；有机聚合物；Ⅲ-Ⅴ基团材料

中图分类号： TN36　**文章编号：** 1001－5868(2025)03－0381－15

Research Progress on High-Efficiency Optical Modulators

QIN Li[1], XU Yingshuai[1,2], QIU Cheng[1], CHEN Yongyi[1,3], ZHOU Zhipeng[1,2], ZHANG Xunyu[1,2], QIAO Yiman[1,2], WANG Yubing[1], LIANG Lei[1], LEI Yuxin[1], SONG Yue[1], JIA Peng[1], ZENG Yugang[1], NING Yongqiang[1], WANG Lijun[1]

(1. State Key Laboratory of Luminescence Science and Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, CHN; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN; 3. Jlight Semiconductor Technology Co., Ltd. Changchun 130102, CHN)

Abstract: Photonic modulators are fundamental photonic devices that use external energy to alter the characteristics of optical signals, primarily enabling precise control over physical parameters such as amplitude, frequency, and phase. Integrated photonic chips based on these modulators, leveraging their high bandwidth, high-speed signal processing capabilities, and extremely low power consumption, have become the core hardware platforms for future optical communication, interconnects, and computing. Technological advancements in this field have consistently attracted significant academic interest and R&D investment in recent years. While traditional research has focused on modulation speed, current demands for miniaturization and energy efficiency are gradually shifting the emphasis toward modulation efficiency. This article systematically elucidates the

收稿日期：2025－03－21.

基金项目：中国科技部重点研发计划项目(2023YFB2805100)；国家自然基金委项目(62090050, 62121005, 61934003, 62227819, 62090051)；吉林省杰出青年科技人才项目(20230508097RC)；吉林省科技发展计划项目(20220508036RC, 20230201033GX)；长春光机所旭光/曙光人才计划.

*通信作者：邱　橙，陈泳屹

mechanisms for optimizing the energy efficiency of photonic modulators, with particular emphasis on a comparative analysis of phase modulators based on silicon, Ⅲ-Ⅴ compounds, ferroelectrics, synthetic polymers, and graphene. Through multi-dimensional performance evaluation and mechanism analysis, it provides a reference for forthcoming innovations in efficient photonic modulation devices.

Key words: silicon photonics; optical phase modulators; plasmonic dispersion effect; ferroelectric materials; two-dimensional materials; organic polymers; Ⅲ-Ⅴ group materials

0 引言

光学调制器作为现代光系统的核心器件,在光通信、光互连及传感检测中发挥关键作用,其性能直接决定系统的传输与处理能力[1-4]。其集成化设计具有低功耗、高带宽与微米级尺寸等优势,成为突破后摩尔时代光电集成瓶颈的关键方案[5]。在5G/6G通信技术驱动数据指数增长的时代背景下,面对数据洪流与摩尔定律瓶颈的双重挑战,光子芯片通过光电子协同创新实现多维技术融合,展现出下一代信息系统的颠覆性应用潜力[6-7]。

现有光调制器研究多集中于调制速度的提升[2,7-9],而在精密相移控制、高密度集成与超低功耗等技术需求中[10-12],调制效率已成为关键指标。其通过降低半波电压(兼容CMOS工艺)和缩短相移长度(提升集成密度),推动光电协同设计发展,为集成移相器、激光雷达(LiDAR)及光子计算等前沿领域提供核心支撑[13-16]。

本文系统综述硅基[2,17-22]、Ⅲ-Ⅴ族[23-31]、铌酸锂铁电材料[32-45]、有机聚合物[46-63]及二维材料(含石墨烯[64-70])等材料体系的光调制器研究进展,聚焦调制效率指标剖析其物理机制,评估性能极限与挑战,提出效率提升路径及发展趋势。全文分为五部分:引言概述光调制器特性与应用;第一节阐释调制原理与评价指标;第二至四节分别解析硅基、Ⅲ-Ⅴ族、铌酸锂调制器的效率优化机制;第五和第六节探讨有机聚合物与石墨烯二维材料的独特优势;最终总结进展并展望未来高效率光调制器的研究方向。

1 光调制器的原理及评价指标

1.1 光调制器的工作原理

电光调制器(EOMs)[40,71-75]与电吸收调制器(EAMs)[30,76-82]是光通信领域的两类主流器件。EOMs基于电光效应,通过电场调控硅、铌酸锂等材料的折射率,实现光相位/偏振的精确操控;EAMs则利用电吸收效应,通过电压改变材料吸收特性,实现光强调制。EAMs在微型化与低功耗方面优势显著,而EOMs兼具相位/强度双调制能力,具有高消光比与宽带宽特性。EOMs的核心机理是电光效应[40,72-75],其本质是外加电场诱导光学介质产生各向异性,导致折射率发生可控变化,为光波参数调控提供物理基础。介质的折射率变化可通过级数展开式进行数学表征,其一般表达式为:

$$n=n_0+aE+bE^2+\ldots \tag{1}$$

式中,n表示实际折射率,n_0表示材料固有折射率,E为施加的外电场,系数a与b表征折射率随电场变化的程度。当外电场为零时,高阶项可忽略,实际折射率n退化为材料本征值n_0。

在该级数展开式的分析中,第一项反映材料固有折射特性;第二项对应折射率变化的Pockels效应(线性响应);第三项对应Kerr效应(二阶响应)。

对称晶体材料中,电场引起折射率变化满足$aE=a(-E)$,故$a=0$,Pockels效应消失。该效应仅存在于非中心对称材料,本文讨论的基于非中心对称铁电材料调制器即利用此二阶效应,无需载流子输运,具有低功耗优势。

电吸收调制器基于Franz-Keldysh效应[82],通过电压诱导能带倾斜改变光吸收特性。该效应虽普遍存在于半导体中,但效率受能带结构限制,需借助量子阱或应变工程实现性能优化。

此外,量子限制斯塔克效应(Quantum-Confined Stark Effect, QCSE)[83]在量子阱/点/线等低维结构中影响显著,外电场使载流子能级偏移,改变带隙并调控光吸收与辐射特性,广泛应用于光调制器设计。

硅材料的中心对称性使其缺乏Pockels效应且Kerr效应较弱,其光调制主要依赖载流子浓度变化。自由载流子密度增加对折射率实部较虚部(吸收相关)有更显著影响,而虚部通过克喇末-克勒尼希(Kramers-Kronig,K-K)关系反作用于实部,最终

协同调控光波相位，这一机制称为等离子体色散效应[84-85]。其引起材料的折射率与吸收系数变化可被表述为：

$$\Delta n=\frac{-q^2\lambda_0^2}{8\pi^2c^2n\varepsilon_0}\left(\frac{\Delta N_e}{m_{ce}^*}+\frac{\Delta N_h}{m_{ch}^*}\right) \tag{2}$$

$$\Delta\alpha=\frac{-q^3\lambda_0^2}{4\pi^2c^3n\varepsilon_0}\left(\frac{\Delta N_e}{m_{ce}^{*2}}+\frac{\Delta N_h}{m_{ch}^{*2}\mu_h}\right) \tag{3}$$

式中，物理量的下标 e 和 h 分别表示电子和空穴，λ 表示光波的波长。m^*表示有效质量，n 表示折射率，ε_0 表示自由空间的介电常数，c 表示真空中的光速。

对于 1 550 nm 波长光波，存在经验公式[86]：

$$\Delta n=-5.40\times10^{-22}N_e^{1.011}-1.53\times10^{-18}N_h^{0.838} \tag{4}$$

$$\Delta\alpha=8.88\times10^{-21}N_e^{1.167}+5.84\times10^{-20}N_h^{1.109} \tag{5}$$

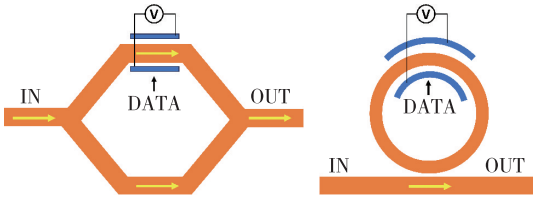
而对于波长为 1 310 nm 的情况，存在另一个经验公式：

$$\Delta n=-6.2\times10^{-22}\Delta N_e-6.0\times10^{-18}(\Delta N_h)^{0.8} \tag{6}$$

$$\Delta\alpha=6.0\times10^{-18}\Delta N_e+4.0\times10^{-18}\Delta N_h \tag{7}$$

硅基光学特性受电场影响主要表现为：克尔效应数量级约为 10^{-4}，等离子体色散效应达 10^{-3} 量级。因此，硅基电光调制器性能主要依赖等离子体色散效应。

目前光调制器主要有两种结构：马赫-曾德尔干涉仪（Mach-Zehnder Interferometer，MZI）和微环谐振器（Microring Resonator），其结构如图 1 所示。



（a）MZI结构　　（b）微环结构

图 1　MZI 与微环调制器结构示意图

MZI 调制器基于光干涉原理，通过调制臂施加相位调制实现光强调制。如图 1(a)所示，入射光分束后沿调制臂传输，未加电压时两束光相位匹配发生相长干涉；施加电压后折射率变化导致相位失配，经合束器干涉后输出光强改变，实现光信号调制。

微环谐振器则是由直波导与闭合环形波导构成的光学谐振器件[17, 87]。当入射光通过直波导时，部分光经倏逝场耦合进入环形波导。数学表征为：

$$2\pi Rn_c=m\lambda \tag{8}$$

式中，R 表示微环半径，n_c 表示微环内光学模式的有效折射率，λ 为波长，m 为整数。

满足谐振条件的光波被保留于环形波导内形成谐振增强，未满足条件的光波则耦合输出。通过电光效应调控微环折射率可实现谐振波长调谐，适用于高速调制。但微环结构对温度波动敏感，需集成热调谐元件或温度补偿机制以维持热稳定性。

1.2　光调制器的性能评估指标

在光调制器的实际应用中，光调制器的性能需统一表征。以下是需要重点关注的调制器关键性能指标。

1.2.1　调制效率

调制效率可通过半波电压-长度积（$V_\pi L_\pi$）表征，反映调制器的效率与空间利用率。半波电压 V_π 定义为在长度为 L_π 的移相器上产生 π 相移所需电压。通常基于 MZI 结构测量：在一臂嵌入移相器，施加直流电压调制 MZI 输出特性获得 $V_\pi L_\pi$ 值。响应值越小，表明调制效率越高，关系可表示为：

$$L_\pi=\frac{\lambda}{2\Delta n_{\mathrm{eff}}(V_\pi)} \tag{9}$$

$$V_\pi L_\pi=\frac{V_\pi\lambda}{2\Delta n_{\mathrm{eff}}(V_\pi)} \tag{10}$$

式中，Δn_{eff} 为有效折射率的变化，λ 为光波的波长。

1.2.2　插入损耗

插入损耗是光调制器的关键指标，定义为输入与输出光功率比。插入损耗越低，表明调制器对信号保持越好；过高则需额外补偿以抵消信号衰减。因此，在光调制器的选型与设计过程中，需与其他参数平衡损耗。

1.2.3　品质因数：效率损耗积

插入损耗与调制效率通常呈现相互制约的关系，即损耗增大往往伴随调制效率提升。品质因数即损耗-效率积（$FoM=\alpha V_\pi L$）可用于综合评价二者的平衡，其中 α 为损耗系数，$V_\pi L$ 表征效率。FoM 值越小，表明器件综合性能越优。

1.2.4　调制带宽

调制带宽指当透射率降至最大值 50% 时的频率（即幅度下降 3 dB），反映了器件动态性能，决定光信号的信息承载速率。大带宽支持更高阶的调制格式与更宽带的信号频谱，有助于高速数据传输。通常以单位时间内可传输的比特数或符号率（Baud）作为量化指标。

调制带宽受波导结构、载流子迁移率等因素影

响。优化载流子注入效率、降低寄生电容等方法可提升调制带宽，已成为光通信器件研究的重要方向。特别是MOS型调制器存在效率-带宽矛盾，其响应速度受限于载流子输运时间和结电容效应。器件的结电容由耗尽层厚度与掺杂浓度决定，载流子迁移率与注入效率共同影响等效电阻，由此形成的RC时间常数（$\tau=RC$）直接限制调制带宽。因此，提升调制效率需要增强载流子注入浓度，这会增大电容并延长载流子复合时间，导致带宽下降。

1.2.5 调制深度

调制深度表征透射率从最大（I_{max}）到最小光强（I_{min}）的变化，与消光比（$ER=10\cdot\log_{10}(I_{max}/I_{min})$）直接相关。$ER$值越大，表明调制器开关控制能力越强。调制深度反映光强调制的动态范围，更高的调制深度可产生更易探测的光信号差异，在光通信中有利于降低误码率并提升灵敏度。

1.2.6 器件尺寸

光调制器尺寸指光子集成电路中的关键三维几何参数，如长度、宽度和高度。微型化有助于高密度光子集成，尤其在光互连和光子计算等芯片面积敏感领域，可显著提升系统集成密度和运行效率。紧凑设计不仅提高芯片级系统传输通量，还能通过规模化生产降低单片成本，优化光通信与光子计算的经济性。

2 传统的硅基调制器

传统硅基调制器基于等离子体色散效应实现光调制，其电学架构按载流子调控方式分为积累型[18-22, 87-93]、注入型[94-107]与耗尽型[108-125]三类，其结构示意图如图2所示。

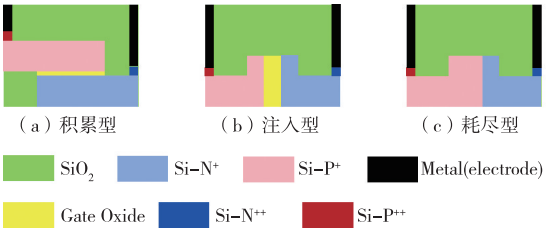
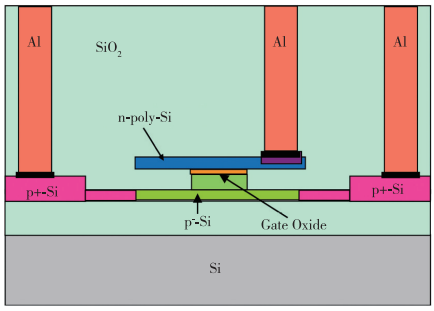


图2 传统硅基调制器三种基本调制方式的结构示意

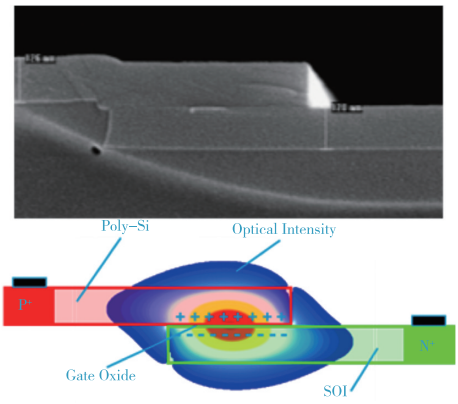
2.1 载流子积累调制器

载流子积累型调制器利用在波导中插入薄绝缘层形成电容结构，随电压增加载流子在两侧的积累，可诱导产生显著的空间折射率变化区，显著引起折射率变化实现高效调制[89]，是实现高效调制器的重要途径之一。目前调制效率极限约为0.2 V·cm[89]，为实现更高的调制效率，需保持结构对称使光场中心与高载流子区重合，调制效率极限约为0.2 V·cm。该调制效率提升是通过高电压驱动增强载流子积累实现的，会因电容增加导致带宽受限。尽管通过优化驱动电压（选择1.2～2.2 V）和电路设计（将调制器视为集总RC元件），在效率与带宽之间找到了平衡点，支持28 Gbps NRZ信号的传输，但效率与带宽的相互制约关系在物理机制上仍然存在。图2(a)展示的MOS电容型调制器[90]采用SOI工艺制备，利用n型单晶硅与p型多晶硅掺杂，由于空穴低损耗特性增强折射率变化。两侧重掺杂（p-Si：1×10^{18} cm^{-3}，n-Si：2×10^{18} cm^{-3}）用于载流子补充与形成欧姆接触，5 nm氧化层下仿真的高调制效率达0.16 V·cm。然而，多晶硅因晶界处的光散射与吸收（体损耗）、高浓度掺杂引起的自由载流子吸收，以及干法刻蚀导致的侧壁粗糙度（界面损耗）将导致大的损耗[126]。

具有光场中心对称性的垂直结构调制器结构紧凑，可通过几何优化提升微扰重叠积分。图3(b)展示了垂直MOS电容硅基调制器[89]，含p型多晶硅、10 nm栅氧化层和n型SOI层。



（a）垂直积累型光调制器[90]



（b）垂直对称MOS积累结构扫描电镜图像及横截面和光学模式[89]

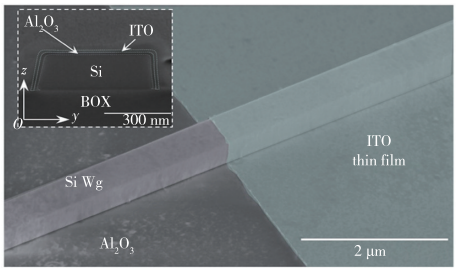
图3 垂直积累型光调制器原理及结构示意

施加电压后，氧化层两侧电荷激增，形成与光模重叠的高密度电荷区，增强微扰重叠积分。测试显示调制效率小于 0.2 V·cm，消光比为 9 dB，传输损耗约为 65 dB/cm，这种损耗大部分是因 p 型多晶硅层造成的，这限制了效率-损耗积的进一步优化，效率-损耗积小于 13 dB·V。MOS 型调制器的整体性能优化需兼顾效率-带宽-损耗三角关系。高调制效率要求的强载流子积累会牺牲带宽并增加损耗。未来的研究方向将考虑硅基异质集成、引入新型电介质或光场-载流子分布协同设计缓解此矛盾。

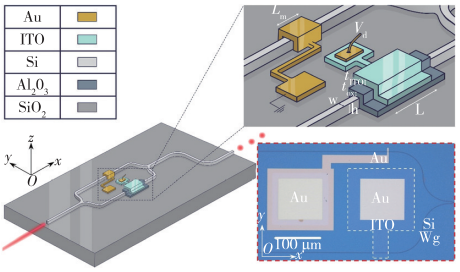
在硅基调制器电容结构设计中，选用异质栅极材料（如透明导体氧化物 TCOs[91-92]或Ⅲ-Ⅴ[22, 93]族材料）可显著提升调制器性能。氧化铟锡（Indium Tin Oxide，ITO）作为典型的透明导体氧化物，基于等离子体色散效应，是一种高掺杂简并半导体，其掺杂浓度高于硅，调谐范围更宽。如图 4（a）和（b）显示 ITO 栅极积累型调制器[91]的调制效率达 0.052 V·cm，但受限于等离子体色散效应效率-损耗积通常大于 80 dB·V[91]。该调制器存在调制效率与带宽的相互制约问题：因 ITO 与硅波导接触的高电阻（约为 600 MΩ）以及器件电容（约为 170 fF），当前设计的 RC 带宽限制，调制速度仅约为 1.5 kHz。尽管通过优化掺杂和降低接触电阻可提升至吉赫兹范围，但提升调制效率的同时需平衡电容与电阻参数，以避免带宽的显著下降。

Ⅲ-Ⅴ族材料（如 InGaAsP/InP）因高折射率调谐和低电子吸收变化，可在不显著增加光学损耗的情况下实现高效率调制。如图 4（c）和（d）所示[22,93]，调制效率达 0.047 V·cm[22]，约为硅基的五倍。高电子迁移率 InGaAsP 替代多晶硅，可降低串联电阻，改善调制带宽达 40 Gbit/s。主要调制机理并非等离子体色散效应，其 FoM 低至 0.22 dB·V，但需复杂键合工艺，限制了其进一步发展应用。而 InP/Si 混合调制器通过超薄 InP 膜可降低损耗达 2.3 dB/cm，调制效率达 0.54 V·cm。然而，为进一步提高效率需减小等效氧化层厚度（Equivalent Oxide Thickness，EOT），依然存在调制效率与带宽的固有权衡[93]。表 1 详细对比了不同栅极材料及其性能特性。

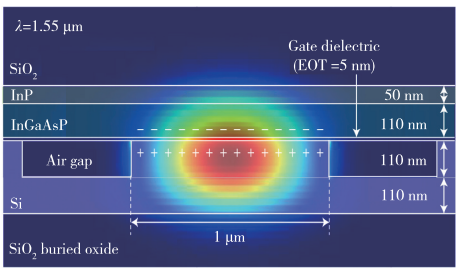
要实现载流子积累结构的高效调制，需优化电介质材料、掺杂浓度及几何结构。高介电常数、薄介电层可增强载流子积累，提升调制效率。此外，提升掺杂浓度并优化几何结构使光场与载流子中心重合，可进一步提升调制性能。



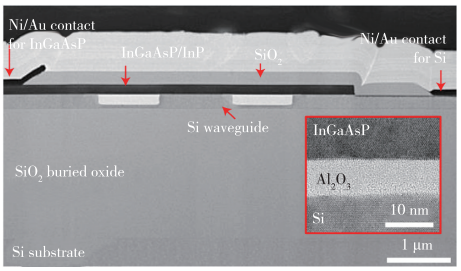
（a）ITO 栅极材料调制器电镜图[91]



（b）ITO 栅极材料调制器制作示意图[91]



（c）InGaAsP 栅极材料调制器制作示意图[22]



（d）对应（c）的电镜图[22]

图 4　不同栅极材料调制器示意图

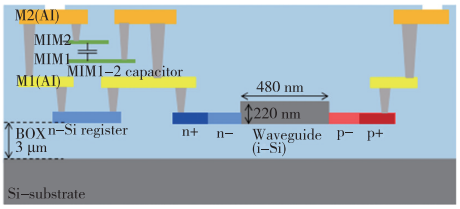
表 1　不同栅极材料的性能特性比较

栅极材料	氧化层材料	$V_\pi L$/(V·cm)	*Loss*/(dB/cm)	$\alpha \cdot V_\pi L$/(dB·V)
ITO[91]	Al_2O_3	0.052	>1 500	>80
ITO[92]	Al_2O_3	0.095	16 000	152
InGaAsP[22]	Al_2O_3	0.047	4.6	<1
InP[93]	SiO_2/Al_2O_3	0.54	2.3	1.24
Poly-Si[87]	SiO_2	1.8	>30	>48
Poly-Si[89]	SiO_2	0.2	65	13
Poly-Si[90]	SiO_2	0.16	35	<8

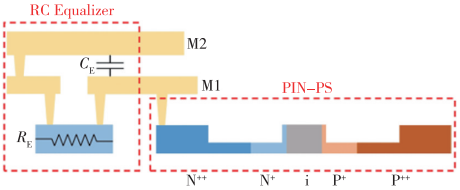
2.2　载流子注入调制器

载流子注入结构用本征层替代氧化物层，形成 P-I-N 结构[94-107]，外加电压控制本征层中的载流子密度，使其成为紧凑尺寸和高调制效率的主要设

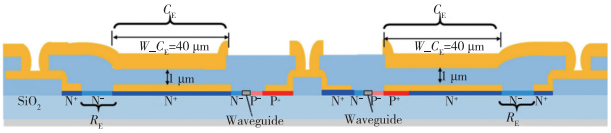
计。由于载流子寿命限制，其调制效率高但带宽受限，通常需集成无源RC均衡器以扩展带宽。一种集成PIN移相器和无源RC均衡器构成的MZM调制器如图5(a)[102]所示。该均衡器由一个简单的n掺杂硅电阻和一个与标准CMOS工艺兼容的金属-绝缘体-金属(MIM)电容组成以补偿二极管的窄带特性。测试结果表明，调制器实现了35～37.5 GHz带宽、2 V·cm调制效率及27.8 dB/cm的损耗和55.6 dB·V效率损耗积。集成CMOS工艺兼容的无源RC均衡器和PIN调制器，获得大调制效率和带宽，是目前基于PIN调制器设计的主流方法。



(a) 无源RC均衡器结构的PIN移相器等效电路模型[102]



(b) 集成无源RC均衡器的PIN移相器截面结构[103]



(c) 集成RC均衡器的PIN二极管移相器的Si MZM截面图[104]

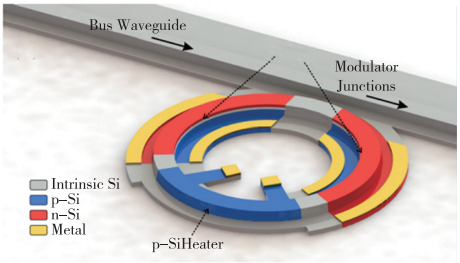
图5 RC均衡器结构的截面图及等效电路模型

而如图5(b)的类似设计[103]，由简单的掺杂硅电阻和平行板金属电容器构成无源均衡器。这种设计更关注效率，但牺牲了带宽。试验结果表明，120 μA偏置电流下$V_\pi L$为0.31 V·cm，带宽达到17 GHz；200 μA电流下效率-损耗积小于15 dB·V，明显高于前期研究。两项研究结果均表明，PIN调制器可以平衡调制效率和带宽，并且实现相当大的调制效率。2023年，Yu等提出双工作状态的PIN调制器，如图5(c)[104]所示。该调制器通过调节加载电信号位置来切换两种状态，同时采用无源RC均衡方案提高调制效率和带宽。高效状态下$V_\pi L$为0.008 8 V·cm，这是PIN-RC结构中报道的最佳指标，高速状态下带宽达7 GHz、$V_\pi L$为1.43 V·cm。该结构移相器仅500 μm，插损为1.29 dB，效率-损耗积低至0.23 dB·V，创造了硅基等离子体色散效应调制器纪录。

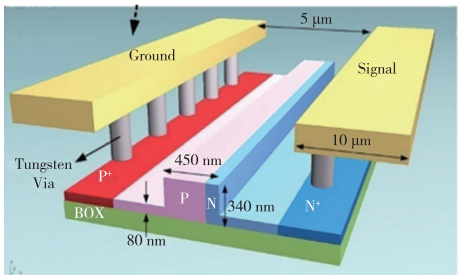
进一步提高载流子注入调制器的效率可采用Si/SiGe/Si PIN注入结构。SiGe因其高载流子迁移率、CMOS工艺兼容及强电吸收效应，将驱动电压降至传统结构的一半，实现$V_\pi L$为0.042 V·cm[105]。此外，基于应变SiGe层结构的调制器，能够达到0.67 V·cm[106]的效率，低于传统PIN结构的指标。优化P/N区载流子浓度可进一步提升性能，如结合多目标遗传算法(MOGA)优化设计[107]，使调制效率提升超20%。

2.3 载流子耗尽调制器

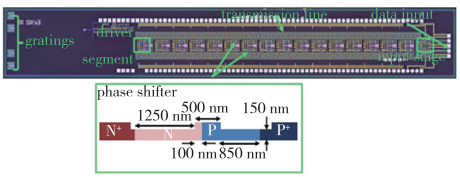
载流子耗尽型调制器基于PN结反向偏置形成耗尽层[108-118]，具有高调制带宽和低效率的特点。目前耗尽型硅基微环调制器的最佳效率为0.52 V·cm[114]。如图6(a)所示，在微环谐振器的腔体内集成了硅加热器以解决与激光器之间的波长失配问题，实现全自由光谱范围(FSR)热调谐。但与其他MZI光学结构相比，其在工艺制造上更复杂。



(a) 微环调制器[114]



(b) 波导调制器[116]



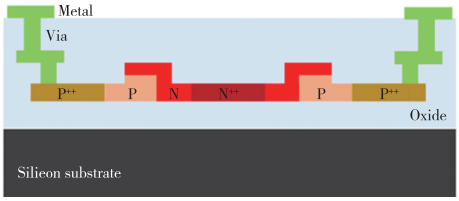
(c) 多级级联MZI型调制器[115]

图6 耗尽型调制器结构示意图

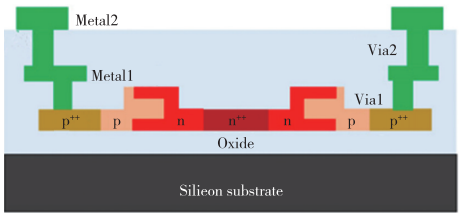
优化PN结设计，如更宽的p侧可提升性能：图6(c)采用宽p区(p型区域宽度为400 nm，掺杂浓度

为 3×10^{17} cm^{-3} 的硼）与窄 n 区（n 型区域宽度 100 nm，浓度为 1×10^{18} cm^{-3} 的砷），采用多级级联 MZI 光学结构，在 1 V 反偏电压下，效率达 2.7 V·cm[115]。类似结构的调制器结构如图 6(b)[116]所示，移相器长度为 750 μm，插入损耗为 1.9 dB，且 $V_\pi L_\pi$ <2 V·cm，效率-损耗积小于 50 dB·V。

上述两个结果均表明，载流子耗尽型 MZI 调制器效率通常限制在 2 V·cm。采用 L/U 型等特殊 PN 结结构可增强电场，进一步提升载流子耗尽的效果。图 7(a)的 L 型结构效率达 0.37 V·cm[117]；图 7(b)的 U 型调制器效率为 0.34 V·cm，效率-损耗积小于 35 dB·V[118]，均优于传统设计。



（a）L 型损耗调制器设计示意图[117]



（b）U 型损耗调制器设计示意图[118]

图 7　特殊 PN 结结构的损耗调制器

2.4　传统硅基光调制器的总结

硅基调制器的尺寸因结构不同而差异显著。注入型 MZM 约为 1 000 μm^2[119-121]，采用微环型结构可缩至 10 μm^2[119-123]；耗尽型 MZM 约为 10 000 μm^2，微环结构缩至 10 μm^2[113-114]；积累型约为 2 000 μm^2[89]。由于与 CMOS 工艺的兼容性，硅光制造技术已经成熟且发展迅速，光调制器正不断沿着小型化的趋势发展。

综上所述，硅基调制器基于等离子体色散效应主要分为三类：注入型、耗尽型与积累型。注入型调制器采用正向偏置 PIN 二极管结构，通过载流子注入实现最高调制效率，在紧凑化与低功耗设计中具有显著优势，但其带宽受限于载流子复合寿命。相比之下，耗尽型调制器利用反向偏置 PN 结形成载流子耗尽层，凭借高带宽特性与工艺简易性，成为硅光子互连（SiP）的主流方案，但其调制效率较低且需更大的器件面积。积累型调制器通过集成金属-氧化物-半导体（MOS）电容结构，在光波导内构建载流子积累区，兼具高效率（$V_\pi L_\pi$ 低至 0.2 V·cm）与宽带宽（约为 40 Gbit/s）特性，成为平衡效率、速度与面积的最优选择。随着异质集成技术（如硅基Ⅲ-Ⅴ材料键合）与能带工程（如应变硅锗掺杂）的突破，硅基调制器在光通信与光子集成电路中的性能边界将持续拓展，推动高密度光电集成系统的演进。具有不同电气结构的光调制器的比较见表 2。

表 2　具有不同电气结构的传统光调制器的比较

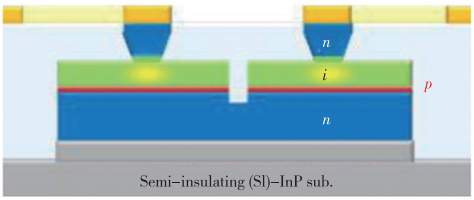
不同结构	$V_\pi L$/(V·cm)	*Speed*/(Gb/s)	$\alpha V_\pi L$/(dB·V)	L_π/mm	*Footprint*/μm^2
载流子累积	≥0.16	≤40	≥20	≤0.5	MZM-2000
载流子注入	≥0.0088	≤40	≥10	≤0.3	MZM-1000 Ring-10
载流子耗尽	≥0.52	≥40(120)	≥20	≥1	MZM-10000 Ring-10

由于等离子体色散效应的物理机制，传统硅基高效调制器的调制效率与损耗正相关，这限制了硅基调制器的进一步发展。因此，研究方向已经开始转向其他异质材料，这些材料可以提供替代的调制机制，打破效率-损耗正相关性，在广泛的应用场景中发展更先进的光子器件。

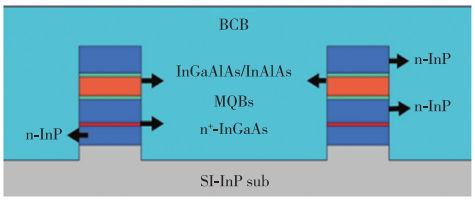
3　基于Ⅲ-Ⅴ族材料的光调制器

InP 基调制器凭借直接带隙特性，在 1.31 μm/1.55 μm 波段损耗极低，兼容 GaAs/InGaAsP 等Ⅲ-Ⅴ族材料，适于片上激光集成[23-31]。其电吸收调制（EAM）采用量子阱异质结，通过电场调控光吸收，兼具高调制效率与低损耗优势，尤其适用于 1.55 μm 通信波段。典型 InGaAsP/InP 量子阱相位调制器[28]在 1.55 μm 下实现 π 相位调制仅需 1.1 V（对应 4 mm 长的器件），效率小于 0.5 V·cm，损耗小于 1 dB/cm。同类研究[29]效率进一步降至 0.4 V·cm，充分凸显 InP 高效特性。另外，InP 调制器可平衡效率与速率：图 8(a)所示 n-i-p-n 型结构[31]以 0.6 V·cm 效率实现 80 GHz 速率；优化后的 n-i-n 结构（图 8(b)）[30]在 2 mm 长度下效率达 0.22 V·cm，带宽仅为 40 GHz，效率指标遥遥领先。

相比于硅基调制器，重要的是 InP 调制器损耗通常小于 5 dB/cm，效率-损耗积约为 2.5 dB·V。然而，其依赖昂贵的小尺寸 InP 晶圆，生产成本高，无法得到和硅光同等的超高产量和低成本光子集



（a）具有n-i-p-n结构的示意图[31]



（b）具有n-i-n结构的示意图[30]

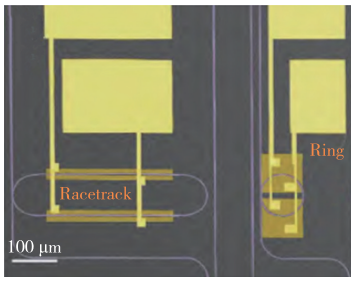
图8 InP基光调制器

成电路（PICs）。另外主流的器件面积约为15 mm²[28-31]，远大于硅基，制约了InP调制器的光子集成与商业部署。

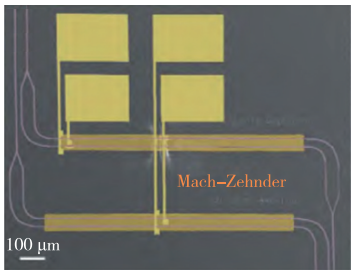
4 铁电材料调制器

铁电材料（如$LiNbO_3$）因高电光系数（大于100 pm/V）、低损耗（小于3 dB/cm）及纳秒级响应，成为高效调制器的理想选择[32-33]。近年来，绝缘体上铌酸锂（Lithium Niobate on Insulator，LNOI）技术的快速发展为光子集成提供了新平台。LNOI技术可提升波导-衬底折射率对比度，增强光/电场重叠，降低半波电压并拓宽调制带宽[34-36]。

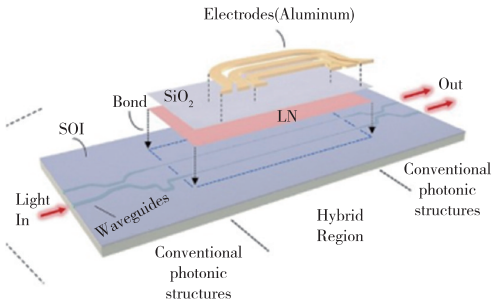
哈佛团队在LNOI平台上首次系统级构建MZI/微环调制器等多种调制结构，如图9（a）和（b）所示[37]。在总长为2 mm的器件上实现了1.8 V·cm的高效率及3 dB/cm的低损耗。基于普克尔斯效应突破了传统硅基效率-损耗矛盾，如硅-LNOI键合异质结构[38]实现了带宽大于100 GHz及效率小于2 V·cm。最新研究提出一种集成光学隔离沟槽的薄膜LNOI调制器[39]，通过紧密电极排布增强电场强度，实现1.2 V·cm调制效率，同时保持宽带宽特性。另一研究在850 nm/1 550 nm波长下分别实现了0.78 V·cm与1.29 V·cm的调制效率[40]。此外，一种采用新型双电容结构调制器[41]更是将调制效率推进至0.64 V·cm，刷新了性能极限。中国科学院半导体所团队在混合铌酸锂平台上首次实现慢光马赫-曾德尔调制器[42]，采用布拉格光栅波导利用慢光效应增强调制效果，将器件尺寸压缩至0.3 mm×1.2 mm。实现0.67 V·cm调制效率、1.9 dB插入损耗及高达60 Gbps数据传输速率，为当前综合性能最优方案。



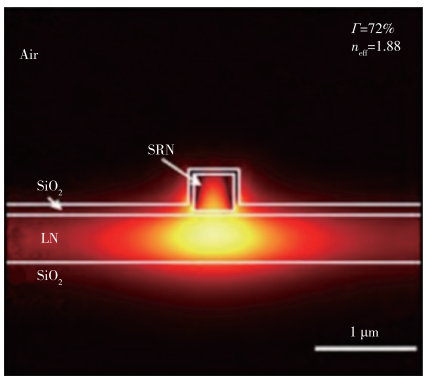
（a）轨道型和微环光调制器[37]



（b）MZI光学结构光调制器[37]



（c）键合铌酸锂制造的光调制器[38]



（d）利用慢光效应的铌酸锂光调制器[42]

图9 基于薄膜铌酸锂工艺平台的光调制器原理图

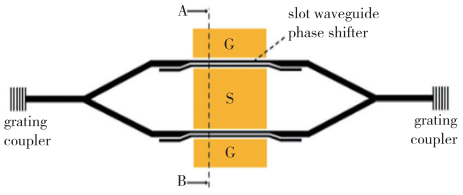
虽然铌酸锂光调制器在高调制带宽下可以实现高调制效率，但当前铌酸锂调制器尺寸大约2 000 μm²[43-45]，生产成本高于成熟硅基工艺。未来发展趋势会集中在优化材料、结构及驱动技术上，以降低能耗并提升集成度。

5　有机聚合物调制器

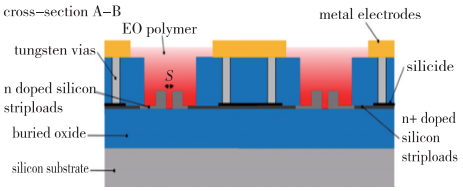
有机材料光学调制器是目前有可能突破调制速度和效率限制[46]的解决方案之一。有机材料因高 Pockels 系数(大于 1 000 pm/V)、超快响应(小于 10 fs)及柔性特性,产生了较高的调制效率(小于 0.01 V·cm),大调制带宽(大于 70 GHz),近年来已经引起了广泛的关注,在可穿戴/柔性光子学领域中潜力显著[47-51]。

典型硅-有机混合(SOH)调制器如图 10(a)和(b)[52]所示,将有机材料填充至硅波导,效率达 0.053 V·cm。如图 10(c)和(d)[47]的 SOH-MZM 调制器,在 0.15 cm 长度下实现 $V_\pi L$=0.031 5 V·cm,速率为 40 Gbit/s,损耗为 10 dB/cm。对比该结构的同类研究的效率普遍小于 0.06 V·cm[53-55],验证了其性能优势。

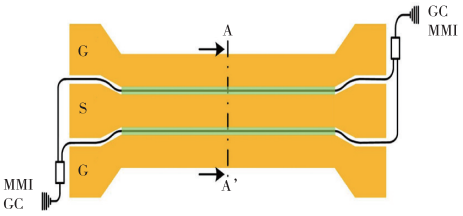
SOH 调制器虽然显示了良好的高调制效率和低损耗,但也面临尺寸挑战。因其移相长度通常大于 0.5 mm,导致器件面积约为 5 000 μm²,最先进工艺也达到了 2 000 μm²[56-63]。缩小尺寸是其进一步发展的关键。此外,SOH 光调制器制备工艺相当复杂。需兼容硅与有机材料的物化特性差异,精密控制波导尺寸与光刻精度,这制约了其规模化应用。解决这些挑战以简化和完善生产过程对于 SOH 调制器的发展至关重要。



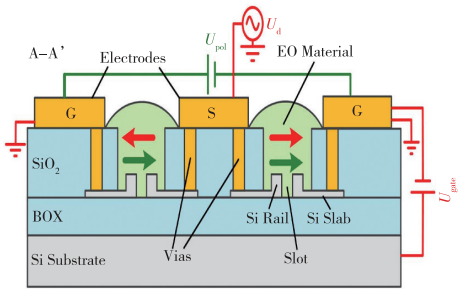
(a) 基于 MZI 结构的聚合物光调制器示意图[52]



(b) AB 端器件结构示意图[52]



(c) 基于 MMI 结构的有机聚合物实际图像[47]



(d) AA 段器件示意图[47]

图 10　聚合物型光调制器原理及结构示意

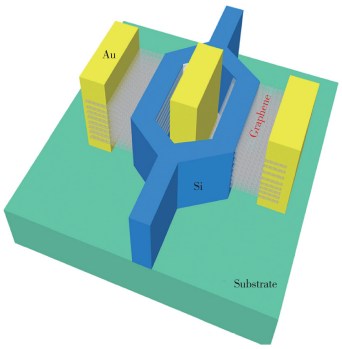
6　二维材料调制器

石墨烯是一种典型的零带隙二维材料,因其超高载流子迁移率(大于 2×10^5 cm²/(V·s))、低电阻(约为 10^{-6} Ω·cm)及 CMOS 工艺兼容性[64]等优势,其光子吸收可以通过快速带间填充完成,进而可实现超高速的高效调制[65-70, 127-129]。

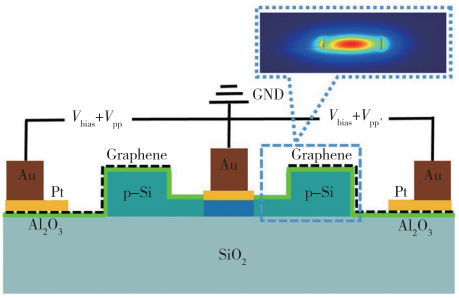
2012 年,Grigorenko 等首次提出石墨烯 MZI 调制器[69],后续改进为嵌入 8 层石墨烯结构[70],如图 11 所示。仿真显示其效率为 0.02 V·cm、消光比为 35 dB,尺寸为 30 μm×4 μm。同设计下,8 层结构效率达 0.000 131 6 V·cm,尺寸缩至 2 μm×4 μm[127],为当前最优指标之一。

实际制造多采用单层石墨烯-氧化物-硅结构:通过 CVD 制备单层石墨烯并转移至氧化物层,如图 11(c)和(d)[128]的 MZI-电容器方案,在 1 550 nm 波长下仅需 300 μm 移相器实现了 0.28 V·cm 的调制效率。改用 Al_2O_3 替代 SiO_2,如图 11(b)[129]所示,40 μm 长度下效率达 0.129 V·cm,创单层石墨烯调制器纪录。

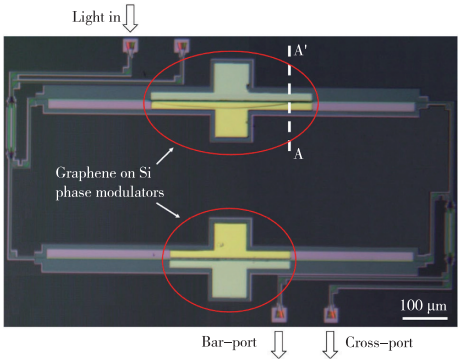
基于单层石墨烯的波导集成电吸收调制器,其有效器件面积仅为 25 μm²左右,是当前报道的同类型器件中最为紧凑的尺寸之一。但石墨烯基光调制器面对高损耗(大于 160 dB/cm)及复杂集成工艺挑战,需优化材料兼容性与制造流程,发挥其高效、紧凑优势。



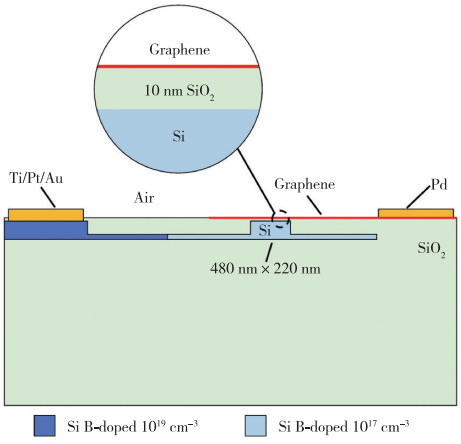
(a) 嵌入八层石墨烯的光调制器原理图[70]



（b）石墨烯光调制器的二维示意图[129]



（c）带有石墨烯移相器的MZI结构俯视图[128]



（d）石墨烯光调制器结构示意图[128]

图11 引入二维材料的石墨烯光调制器结构示意图

7 总结和展望

本文对基于硅、Ⅲ-Ⅴ族、铁电、有机和石墨烯等材料的光调制器展开分析，重点围绕调制效率提升展开探讨，得出以下结论与展望。

硅基调制器凭借工艺成熟度优势，载流子积累/注入型结构仍是实现高效电光调制的首选方案，但其依赖等离子体色散效应导致效率-损耗固有矛盾突出，需在效率、损耗与速率间协同优化。Ⅲ-Ⅴ族材料（如InP基）调制器兼具高效率与低损耗特性，但因大尺寸及CMOS不兼容性，需要推动其与硅基异质集成以兼顾高效率与紧凑性。铁电材料（如$LiNbO_3$）依托普克尔斯效应与LNOI平台，为低损耗高效调制提供创新技术路径，通过慢光效应增强及硅基异质集成，可在维持高带宽的同时显著提升调制效率。有机聚合物调制器凭借超低驱动电压优势展现潜力，但受限于复杂制备工艺及材料稳定性问题，需提升工艺兼容性以适配规模化生产。石墨烯调制器凭借超高速响应与亚微米级紧凑结构突破尺寸极限，但高传输损耗（＞160 dB/cm）与复杂集成工艺制约其发展，需通过异质集成与能带工程突破性能瓶颈。

当前，面向高速光通信、光子计算等场景的高效光调制器需在光子集成芯片中实现损耗、效率与速率的协同优化，并持续推进小型化。短期内，硅基载流子积累型调制器凭借成熟的CMOS工艺与低功耗特性占据主流；长期趋势中，基于硅-InP、硅-LNOI等异质集成方案的调制器通过材料特性互补突破效率-损耗性能极限，将成为高密度光子集成的关键技术路径。

参考文献：

[1] Romagnoli M, Sorianello V, Midrio M, et al. Graphene-based integrated photonics for next-generation datacom and telecom [J]. Nature Reviews Materials, 2018, 3(10): 392-414.

[2] Witzens J. High-speed silicon photonics modulators [J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(12): 2158-2182.

[3] Rotta D, Preve G B, Serrano Rodrigo A, et al. The ESA project PIOTS: setting up a complete pilot line for the packaging of photonic integrated circuits for space applications [J]. Proc. SPIE, 2021: 195.

[4] Xiao Z, Liu W, Xu S, et al. Recent progress in silicon-based photonic integrated circuits and emerging applications [J]. Advanced Optical Materials, 2023, 11(20): 2301028.

[5] Rahim A, Ryckeboer E, Subramanian A Z, et al. Expanding the silicon photonics portfolio with silicon nitride photonic integrated circuits [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(4): 639-649.

[6] Yan Z, Han Y, Lin L, et al. A monolithic InP/SOI platform for integrated photonics [J]. Light, Science & Applications, 2021, 10(1): 200.

[7] Xiao X, Wang L, Li M, et al. High speed silicon optical modulators: applications, technologies and integrations [C]// 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), 2016: 3376.

[8] Takiguchi M, Yokoo A, Nozaki K, et al. Continuous-wave operation and 10-Gb/s direct modulation of InAsP/InP sub-wavelength nanowire laser on silicon photonic crystal [J]. APL Photonics, 2017, 2(4): 046106.

[9] Kato H, Bull J D, Tsou B P C, et al. A high-speed GaAs-based electro-optic modulator for polarization, intensity, and phase modulation[J]. Proc. SPIE, 2013: 883205.

[10] Boeuf F, Han J H, Takagi S, et al. Benchmarking Si, SiGe, and III - V/Si hybrid SIS optical modulators for datacenter applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(18): 4047-4055.

[11] Dong G, Liang S L, Yu Y, et al. Direct optical modulation of photonic crystal Fano laser *via* the mirror [C]//OSA Nonlinear Optics 2021, 2021: NF2A. 2.

[12] Lau K Y, Perros A P, Li D, et al. Scalable graphene electro-optical modulators for all-fibre pulsed lasers[J]. Nanoscale, 2021, 13(21): 9873-9880.

[13] Cox C, Ackerman E, Helkey R, et al. Techniques and performance of intensity-modulation direct-detection analog optical links[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45(8): 1375-1383.

[14] Roder H. Amplitude, phase, and frequency modulation[J]. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1931, 19(12): 2145-2176.

[15] Thomson D J, Zhang W, Ebert M, et al. High efficiency and high-speed silicon optical modulators [C]//2023 23rd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2023: 1-4.

[16] Zhou H, Dong J, Cheng J, et al. Photonic matrix multiplication lights up photonic accelerator and beyond[J]. Light, Science & Applications, 2022, 11(1): 30.

[17] Rigrod W. The optical ring resonator [J]. 1965, 44(5): 907-916.

[18] Debnath K, Thomson D J, Zhang W, et al. All-silicon carrier accumulation modulator based on a lateral metal-oxide-semiconductor capacitor[J]. Photonics Research, 2018, 6(5): 373.

[19] Jin L, Chen Q, Liu W, et al. Electro-absorption modulator with dual carrier accumulation layers based on epsilon-near-zero ITO[J]. Plasmonics, 2016, 11(4): 1087-1092.

[20] Abraham A, Dubray O, Olivier S, et al. Low-voltage and low-loss silicon modulator based on carrier accumulation using a vertical slot waveguide[C]//2015 IEEE 12th International Conference on Group IV Photonics (GFP), 2015: 118-119.

[21] Kajikawa K, Tabei T, Sunami H. An infrared silicon optical modulator of metal - oxide - semiconductor capacitor based on accumulation-carrier absorption [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2009, 48(4S): 04C107.

[22] Han J H, Boeuf F, Fujikata J, et al. Efficient low-loss InGaAsP/Si hybrid MOS optical modulator [J]. Nature Photonics, 2017, 11: 486-490.

[23] Fiedler F, Schlachetzki A. Optical parameters of InP-based waveguides [J]. Solid-State Electronics, 1987, 30(1): 73-83.

[24] Griffin R A, CArter A C. Advances in inp optical modulators [C]// 2008 Asia Optical Fiber Communication & Optoelectronic Exposition & Conference, 2008: 1-3.

[25] Foyt A. The electro-optic applications of InP [J]. Journal of Crystal Growth, 1981, 54(1): 1-8.

[26] Griffin R A, Jones S K, Whitbread N, et al. InP Mach - Zehnder modulator platform for 10/40/100/200-Gb/s operation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(6): 3401209.

[27] Kikuchi N, Yamada E, Shibata Y, et al. High-speed InP-based Mach-Zehnder modulator for advanced modulation formats [C]// IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, 2012: 1-4.

[28] Tsang H K, Soole J B D, LeBlanc H P, et al. Efficient InGaAsP/InP multiple quantum well waveguide optical phase modulator[J]. Applied Physics Letters, 1990, 57(22): 2285-2287.

[29] Mohseni H, An H, Shellenbarger Z A, et al. Highly linear and efficient phase modulators based on GaInAsP-InP three-step quantum wells[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(3): 031103.

[30] Xing J, Sun C, Xiong B, et al. 40 GHz and 1.1-V Vπ InP-based n-i-n EO modulator[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2022: SM3N. 6.

[31] Ogiso Y, Ozaki J, Ueda Y, et al. 80-GHz bandwidth and 1.5-V Vπ InP-based IQ modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(2): 249-255.

[32] Weis R S, Gaylord T K. Lithium niobate: summary of physical properties and crystal structure[J]. Applied Physics A, 1985, 37(4): 191-203.

[33] Qi Y, Li Y. Integrated lithium niobate photonics [J]. Nanophotonics, 2020, 9(6): 1287-1320.

[34] Zhu D, Shao L, Yu M, et al. Integrated photonics on thin-film lithium niobate [J]. 2021, 13(2): 242-352.

[35] Xu Y. Ferroelectric Materials and Their Applications[M]. Amsterdam: Elsevier, 1991

[36] Setter N, Damjanovic D, Eng L, et al. Ferroelectric thin films: review of materials, properties, and applications[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 100(5): 051606.

[37] Wang C, Zhang M, Stern B, et al. Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators[J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1547-1555.

[38] Wang X, Weigel P O, Zhao J, et al. Achieving beyond-100-GHz large-signal modulation bandwidth in hybrid silicon photonics Mach Zehnder modulators using thin film lithium niobate[J]. APL Photonics, 2019, 4(9): 096101.

[39] Chen N, Yu Y, Lou K, et al. Ultra-high efficiency electro-optic modulator on thin-film lithium niobate [C]// 28th Microoptics Conference (MOC), 2023: 1-2.

[40] Li Y, Lan T, Yang D, et al. High-performance Mach-Zehnder modulator based on thin-film lithium niobate with low voltage-length product [J]. ACS Omega, 2023, 8(10):

9644-9651.

[41] Jin M, Chen J, Sua Y, et al. Efficient electro-optical modulation on thin-film lithium niobate[J]. Optics Letters, 2021, 46(8): 1884-1887.

[42] Huang X, Liu Y, Guan H, et al. High-efficiency, slow-light modulator on hybrid thin-film lithium niobate platform[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(19): 1093-1096.

[43] Pan B, Cao H, Huang Y, et al. Compact electro-optic modulator on lithium niobate[J]. Photonics Research, 2022, 10(3): 697-702.

[44] Pan B C, Liu H X, Xu H C, et al. Ultra-compact lithium niobate microcavity electro-optic modulator beyond 110 GHz [J]. Chip, 2022, 1(4): 100029.

[45] Pohl D, Messner A, Kaufmann F, et al. 100-GBd waveguide Bragg grating modulator in thin-film lithium niobate [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(2): 85-88.

[46] Kaino T, Tomaru S. Organic materials for nonlinear optics [J]. Advanced Materials, 1993, 5(3): 172-178.

[47] Kieninger C, Kutuvantavida Y, Elder D L, et al. Ultra-high electro-optic activity demonstrated in a silicon-organic hybrid modulator[J]. Optica, 2018, 5(6): 739.

[48] Koeber S, Palmer R, Lauermann M, et al. Femtojoule electro-optic modulation using a silicon - organic hybrid device [J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(2): e255.

[49] Liu C F, Lin H, Li S S, et al. Smart responsive photoelectric organic modulator integrated with versatile optoelectronic characteristics[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32 (17): 2111276.

[50] Ullah F, Deng N, Qiu F. Recent progress in electro-optic polymer for ultra-fast communication[J]. PhotoniX, 2021, 2 (1): 13.

[51] Liu J, Xu G, Liu F, et al. Recent advances in polymer electro-optic modulators[J]. RSC Advances, 2015, 5(21): 15784-15794.

[52] Lauermann M, Palmer R, Koeber S, et al. Low-power silicon-organic hybrid (SOH) modulators for advanced modulation formats [J]. Optics Express, 2014, 22(24): 29927-29936.

[53] Lin C Y, Wang X, Chakravarty S, et al. Electro-optic polymer infiltrated silicon photonic crystal slot waveguide modulator with 23 dB slow light enhancement[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(9): 093304.

[54] 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.

[55] Zhang X, Hosseini A, Lin X, et al. Polymer-based hybrid-integrated photonic devices for silicon on-chip modulation and board-level optical interconnects [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(6): 3401115.

[56] Wang Y, Liu T, Liu J, et al. Organic electro-optic polymer materials and organic-based hybrid electro-optic modulators [J]. Journal of Semiconductors, 2022, 43(10): 32-42.

[57] Kamada S, Ueda R, Yamada C, et al. Superiorly low half-wave voltage electro-optic polymer modulator for visible photonics[J]. Optics Express, 2022, 30(11): 19771-19780.

[58] Rutirawut T, Talataisong W, Gardes F Y. Designs of silicon nitride slot waveguide modulators with electro-optic polymer and the effect of induced charges in Si-substrate on their performance [J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(2): 6600715.

[59] Alloatti L, Palmer R, Diebold S, et al. 100 GHz silicon - organic hybrid modulator[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(5): e173.

[60] Lu G W, Hong J, Qiu F, et al. High-temperature-resistant silicon-polymer hybrid modulator operating at up to 200 Gbit s^{-1} for energy-efficient datacentres and harsh-environment applications [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 4224.

[61] Wolf S, Zwickel H, Kieninger C, et al. Coherent modulation up to 100 GBd 16QAM using silicon-organic hybrid (SOH) devices[J]. Optics Express, 2018, 26(1): 220-232.

[62] Janjan B, Zarifkar A, Miri M. Ultra-compact high-speed electro-optical modulator with extremely low energy consumption based on polymer-filled hybrid plasmonic waveguide[J]. Plasmonics, 2016, 11(2): 509-514.

[63] Wolf S, Zwickel H, Hartmann W, et al. Silicon-organic hybrid (SOH) Mach-Zehnder modulators for 100 gbit/s on-off keying[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 2598.

[64] Falkovsky L A. Optical properties of graphene[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 129: 012004.

[65] Sun Z, Fang S, Hu Y H. 3D graphene materials: from understanding to design and synthesis control[J]. Chemical Reviews, 2020, 120(18): 10336-10453.

[66] Li W, Chen B, Meng C, et al. Ultrafast all-optical graphene modulator[J]. Nano Letters, 2014, 14(2): 955-959.

[67] Phare C T, Lee Y D, Cardenas J, et al. Graphene electro-optic modulator with 30 GHz bandwidth [J]. Nature Photonics, 2015, 9(8): 511-514.

[68] Liu J, Khan Z U, Wang C, et al. Review of graphene modulators from the low to the high figure of merits [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(23): 233002.

[69] Grigorenko A N, Polini M, Novoselov K S. Graphene plasmonics[J]. Nature Photonics, 2012, 6(11): 749-758.

[70] Hao R, Du W, Chen H, et al. Ultra-compact optical modulator by graphene induced electro-refraction effect[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(6): 061116.

[71] Reed G T, Mashanovich G, Gardes F Y, et al . Silicon

optical modulators[J]. Nature Photonics, 2010, 4: 518-526.

[72] Kim Y, Takenaka M, Osada T, et al. Strain-induced enhancement of plasma dispersion effect and free-carrier absorption in SiGe optical modulators[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 4683.

[73] Ahmad Noorden A F, Daud S, Ali J. Implication of plasma dispersion effect for controlling refractive index in microresonator [C]//International Conference on Plasma Science and Applications, 2017: 030001.

[74] Rahim A, Hermans A, Wohlfeil B, et al. Taking silicon photonics modulators to a higher performance level: state-of-the-art and a review of new technologies [J]. Advanced Photonics, 2021, 3(2): 024003.

[75] Zhang L, Sun X, Yu H, et al. Plasmonic metafibers electro-optic modulators[J]. Light, Science & Applications, 2023, 12(1): 198.

[76] Zhou D B, Liang S, Wang H T, et al. Analysis and optimization of 1.5- μm InGaAsP/InP MQWs electroabsorption modulator[J]. Optik, 2019, 182: 1088-1092.

[77] Jeong U S, Kim K, Lee K, et al. A compact and low-driving-voltage silicon electro-absorption modulator utilizing a Schottky diode operating up to 13.2 GHz in C-band [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2020, 59(12): 122001.

[78] Han S K, Ramaswamy R V, Li W Q, et al. Efficient electrooptic modulator in InGaAlAs/InP optical waveguides [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(1): 46-49.

[79] Rouvalis E, Metzger C, Charpentier A, et al. A low insertion loss and low Vπ InP IQ modulator for advanced modulation formats [C]//2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC), 2014: 1-3.

[80] Ozaki J, Nakano S, Ogiso Y, et al. Ultra-low power dissipation (<2.4 W) coherent InP modulator module with CMOS driver IC[C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), 2018: 1-3.

[81] Letal G, Prosyk K, Millett R, et al. Low loss InP C-band IQ modulator with 40GHz bandwidth and 1.5V Vπ[C]//2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2015: 1-3.

[82] Ralph H I. On the theory of the franz-keldysh effect[J]. Journal of Physics C: Solid State Physics, 1968, 1(2): 378-386.

[83] Wen G, Lin Y, Jiang H, et al. Quantum-confined Stark effects in semiconductor quantum dots[J]. Physical Review B, 1995, 52(8): 5913.

[84] Treyz G V, May P G, Halbout J M. Silicon Mach-Zehnder waveguide interferometers based on the plasma dispersion effect[J]. Applied Physics Letters, 1991, 59(7): 771-773.

[85] Almeida V R, Xu Q, Lipson M. Ultrafast integrated semiconductor optical modulator based on the plasma-dispersion effect[J]. Optics Letters, 2005, 30(18): 2403-2405.

[86] Soref R, Bennett B. Electrooptical effects in silicon[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1987, 23(1): 123-129.

[87] Zhang W, Debnath K, Chen B, et al. High bandwidth capacitance efficient silicon MOS modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(1): 201-207.

[88] Sodagar M, Hosseinnia A H, Isautier P, et al. Compact, 15 Gb/s electro-optic modulator through carrier accumulation in a hybrid Si/SiO(2)/Si microdisk[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 28306-28315.

[89] Webster M, Gothoskar P, Patel V, et al. An efficient MOS-capacitor based silicon modulator and CMOS drivers for optical transmitters [C]//11th International Conference on Group IV Photonics (GFP), 2014: 1-2.

[90] Fujikata J, TAkahashi S, TAkahashi M, et al. High-performance MOS-capacitor-type Si optical modulator and surface-illumination-type Ge photodetector for optical interconnection [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2016, 55(4S): 04EC1.

[91] Amin R, Maiti R, Carfano C, et al. 0.52 V mm ITO-based Mach-Zehnder modulator in silicon photonics [J]. APL Photonics, 2018, 3(12): 126104.

[92] Amin R, Maiti R, Gui Y, et al. Sub-wavelength GHz-fast broadband ITO Mach-Zehnder modulator on silicon photonics [J]. Optica, 2020, 7(4): 333-335.

[93] Ohno S, Li Q, Sekine N, et al. Taperless Si hybrid optical phase shifter based on a metal-oxide-semiconductor capacitor using an ultrathin InP membrane[J]. Optics Express, 2020, 28(24): 35663-35673.

[94] Manipatruni S, Xu Q, Schmidt B, et al. High speed carrier injection 18 gb/s silicon micro-ring electro-optic modulator [C]//LEOS 2007 - IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting Conference Proceedings, 2007: 537-538.

[95] Nedeljkovic M, Littlejohns C G, Khokhar A Z, et al. Silicon-on-insulator free-carrier injection modulators for the mid-infrared[J]. Optics Letters, 2019, 44(4): 915-918.

[96] Manolatou C, Lipson M. All-optical silicon modulators based on carrier injection by two-photon absorption[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(3): 1433-1439.

[97] Kim Y, Fujikata J, Takahashi S, et al. SiGe-based carrier-injection Mach-Zehnder modulator with enhanced plasma dispersion effect in strained SiGe [C]//2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2015: 1-3.

[98] Kim Y, Fujikata J, Takahashi S, et al. First demonstration of SiGe-based carrier-injection Mach-Zehnder modulator with enhanced plasma dispersion effect[J]. Optics Express, 2016, 24(3): 1979-1985.

[99] Spector S J, Grein M E, Schulein R T, et al. Compact

carrier injection based Mach-Zehnder modulator in silicon [C]//Integrated Photonics and Nanophotonics Research and Applications / Slow and Fast Light, 2007: ITuE5.

[100] Akiyama S, Usuki T. High-speed and efficient silicon modulator based on forward-biased pin diodes[J]. Frontiers in Physics, 2014, 2: 65.

[101] Hanim A, Mardiana B, Hazura H, et al. On the modulation phase efficiency of a silicon p-i-n diode optical modulator [C]//International Conference on Photonics 2010, 2010: 1-3.

[102] Sobu Y, Simoyama T, Tanaka S, et al. 70 gbaud operation of all-silicon Mach - Zehnder modulator based on forward-biased PIN diodes and passive equalizer [C]//2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), 2019: 1-3.

[103] Baba T, Akiyama S, Imai M, et al. 25-Gb/s broadband silicon modulator with 0.31-V·cm VπL based on forward-biased PIN diodes embedded with passive equalizer [J]. Optics Express, 2015, 23(26): 32950-32960.

[104] Yu H, Tu D, Huang X, et al. A novel silicon forward-biased PIN Mach-Zehnder modulator with two operating states[J]. Micromachines, 2023, 14(8): 1608.

[105] Feng S, Hu X, Feng L, et al. The numerical investigations of SiGe/Si heterojunction electro-optic modulator in mid-infrared[J]. Frontiers in Physics, 2022, 10: 1019113.

[106] Feng S, Li L B, Xue B. Research on a micro-nano Si/SiGe/Si double heterojunction electro-optic modulation structure [J]. Advances in Condensed Matter Physics, 2018, 2018 (1): 8297650.

[107] Sariang L, Arya S C. Mathematical modeling of carrier injection based PIN junction optical phase shifter using evolutionary algorithm [C]//2019 2nd International Conference on Innovations in Electronics, Signal Processing and Communication (IESC), 2019: 1-6.

[108] 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.

[109] Zhou J, Wang J, Zhu L, et al. High baud rate all-silicon photonics carrier depletion modulators [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(2): 272-281.

[110] Ding J, Chen H, Yang L, et al. Ultra-low-power carrier-depletion Mach-Zehnder silicon optical modulator[J]. Optics Express, 2012, 20(7): 7081-7087.

[111] Wang J, Qiu C, Li H, et al. Optimization and demonstration of a large-bandwidth carrier-depletion silicon optical modulator [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(24): 4119-4125.

[112] Feng N N, Liao S, Feng D, et al. High speed carrier-depletion modulators with 14V-cm V_πL integrated on 025μm silicon-on-insulator waveguides[J]. Optics Express, 2010, 18(8): 7994.

[113] Park J W, You J B, Kim I G, et al. High-modulation efficiency silicon Mach-Zehnder optical modulator based on carrier depletion in a PN Diode[J]. Optics Express, 2009, 17(18): 15520-15524.

[114] Sun J, Kumar R, Sakib M, et al. A 128 gb/s PAM4 silicon microring modulator with integrated thermo-optic resonance tuning[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(1): 110-115.

[115] Petousi D, Rito P, Lischke S, et al. Monolithically integrated high-extinction-ratio MZM with a segmented driver in photonic BiCMOS [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(24): 2866-2869.

[116] 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.

[117] Liu J, Zhou G, Du J, et al. Silicon mode-loop Mach-Zehnder modulator with L-shaped PN junction for 0.37 V·cm $V_{\pi}L$ high-efficiency modulation[J]. Photonics Research, 2022, 10(1): 214.

[118] Zhou G, Zhou L, Guo Y, et al. High-efficiency silicon Mach-Zehnder modulator with U-shaped PN junctions[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics, 2019: JTh2A.42.

[119] Tanaka S, Simoyama T, Aoki T, et al. Ultralow-power (1.59 mW/gbps), 56-gbps PAM4 operation of Si photonic transmitter integrating segmented PIN Mach - Zehnder modulator and 28-nm CMOS driver [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(5): 1275-1280.

[120] Ramesh Gabriel J S, Arunagiri S. Performance analysis of carrier depletion silicon PIN phase shifter [J]. Journal of Optical Communications, 2024, 44(s1): s131-s137.

[121] Tanaka S, Usuki T, Tanaka Y. Accurate SPICE model of forward-biased silicon PIN Mach - Zehnder modulator for an energy-efficient multilevel transmitter [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(10): 1959-1969.

[122] Dubray O, Abraham A, Hassan K, et al. Electro-optical ring modulator: an ultracompact model for the comparison and optimization of p-n, p-i-n, and capacitive junction[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(6): 3300110.

[123] Baba T, Akiyama S, Imai M, et al. 50-Gb/s ring-resonator-based silicon modulator [J]. Optics Express, 2013, 21(10): 11869-11876.

[124] 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(2): 7900308.

[125] Li G, Zheng X, Yao J, et al. 25Gb/s 1V-driving CMOS ring modulator with integrated thermal tuning [J]. Optics Express, 2011, 19(21): 20435-20443.

[126] Zhu S, Fang Q, Yu M B, et al. Propagation losses in

undoped and n-doped polycrystalline silicon wire waveguides [J]. Optics Express, 2009, 17(23): 20891-20899.

[127] Hao R, Jin J M. Graphene embedded modulator with extremely small footprint and high modulation efficiency[J]. Journal of Photonics, 2014, 2014(1): 309350.

[128] Sorianello V, Midrio M, Contestabile G, et al. Graphene-silicon phase modulators with gigahertz bandwidth [J]. Nature Photonics, 2017, 12(1): 40-44.

[129] Shu H, Su Z, Huang L, et al. Significantly high modulation efficiency of compact graphene modulator based on silicon waveguide[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 991.

作者简介：

秦　莉(1969—)，女，黑龙江省人，研究员，博士生导师，主要研究方向为半导体激光技术等；

邱　橙(1984—)，副研究员，博士，主要研究方向：快速可调谐激光光源、非厄密特性作用下的半导体激光芯片、片上光神经网络技术与基于深度学习的光子学器件逆向设计策略；

陈泳屹(1984—)，研究员，博士，主要研究方向：半导体激光芯片的外延及结构设计、可调谐半导体激光器。