

## 硅-有机复合集成电光调制器的优化与制备

邹艳慧, 王艺蒙, 张小雪, 武震林, 陈卓, 薄淑晖, 刘若男, 李志华, 王迪, 谭庆贵, 谷一英, 赵明山, 韩秀友

引用本文:

邹艳慧, 王艺蒙, 张小雪, 等. 硅-有机复合集成电光调制器的优化与制备[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2138–2150.

ZOU Yan-hui, WANG Yi-meng, ZHANG Xiao-xue, et al. Optimal design and preparation of silicon-organic hybrid integrated electro-optic modulator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2138–2150.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202810.2138>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 全光纤结构的石墨烯电吸收调制器

All-fiber graphene electro-absorption modulator

*光学精密工程*. 2016, 24(9): 2117–2125 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162409.2117>

### 沿光轴通光的LiNbO<sub>3</sub>的横向电光调制特性

LiNbO<sub>3</sub> transverse electro-optical modulation characteristics for light pass along optical axis

*光学精密工程*. 2015, 23(5): 1227–1232 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152305.1227>

### 弹光和电光级联的组合相位调制型椭偏测量术

Phase-modulated ellipsometry combined photo-elastic modulation with electro-optic modulation

*光学精密工程*. 2016, 24(4): 690–697 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162404.0690>

### 基于强度-相位级联调制的微波光子下变频法

Microwave photonic down-conversion method using intensity-phase cascaded modulation

*光学精密工程*. 2017, 25(4): 827–834 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172504.0827>

### 基于LCP径向偏振光输出的掺镱MOPA脉冲光纤激光器

Yb-doped fiber MOPA system with radially polarized output beam based on LCP vortex retarder

*光学精密工程*. 2020, 28(5): 997–1004 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202805.0997>

文章编号 1004-924X(2020)10-2138-13

# 硅-有机复合集成电光调制器的优化与制备

邹艳慧<sup>1</sup>, 王艺蒙<sup>1</sup>, 张小雪<sup>1</sup>, 武震林<sup>1</sup>, 陈卓<sup>2</sup>, 薄淑晖<sup>2, 5</sup>, 刘若男<sup>3</sup>,  
李志华<sup>3</sup>, 王迪<sup>4</sup>, 谭庆贵<sup>4</sup>, 谷一英<sup>1</sup>, 赵明山<sup>1</sup>, 韩秀友<sup>1\*</sup>

(1. 大连理工大学 光电工程与仪器科学学院, 辽宁 大连 116024;

2. 中国科学院 理化技术研究所, 北京 100190;

3. 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029;

4. 西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710100;

5. 中央民族大学 理学院, 北京 100081)

**摘要:** 硅-有机复合光子集成技术充分发挥了硅光的大规模集成优势和有机聚合物材料的高电光系数优势, 在高性能集成微波光子系统中极具应用潜力。本文对硅-有机复合集成电光调制器结构进行了较为全面地优化设计和初步制备研究。电光有机聚合物填充在硅 Slot 波导的狭缝中, 优化 Slot 波导结构得到光场限制因子为 0.32, 使得光波场与射频电场高度重合, 提高了电光调制效率。采用锥型波导模式转换结构实现 Strip-to-Slot 的低损耗耦合, 耦合效率为 99.55%。重点分析了电极长度、宽度等参数对调制器频率响应的影响, 优化得到 3 dB 带宽为 77 GHz, 半波电压-长度积为 0.045 V·cm。根据仿真结果设计了用于制备调制器的 MASK。实验制备了 Slot 波导并进行了聚合物的填充实验研究, 获得了良好的结果。

**关键词:** 电光调制器; 硅-有机复合集成; Slot 波导; Strip-to-Slot 模式转换器; 半波电压-长度积

**中图分类号:** TN256; TN252 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202810.2138

## Optimal design and preparation of silicon-organic hybrid integrated electro-optic modulator

ZOU Yan-hui<sup>1</sup>, WANG Yi-meng<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-xue<sup>1</sup>, WU Zhen-lin<sup>1</sup>, CHEN Zhuo<sup>2</sup>,  
BO Shu-hui<sup>2, 5</sup>, LIU Ruo-nan<sup>3</sup>, LI Zhi-hua<sup>3</sup>, WANG Di<sup>4</sup>, TAN Qing-gui<sup>4</sup>,  
GU Yi-ying<sup>1</sup>, ZHAO Ming-shan<sup>1</sup>, HAN Xiu-you<sup>1\*</sup>

(1. *Institute of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;*

2. *Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

3. *Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

4. *Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China;*

5. *College of Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: xyhan@dlu.edu.cn*

**收稿日期:** 2020-02-19; **修订日期:** 2020-04-08.

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (No. 2019YFB2203202); 国家领域基金重点项目 (No. 61404130403); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61875028, No. 62075026); 辽宁省高等学校创新人才支持计划 (No. LR2019017); 大连市科技创新基金资助项目 (No. 2018J11CY006); 大连理工大学大学生创新训练项目 (No. 2020101412100010090, No. 2019101412100010059)

**Abstract:** Silicon-organic hybrid photonic integration technology fully utilizes the advantages of large-scale integration of silicon photonics and the high electro-optic coefficient of organic polymer materials. This accords great application potential in high-performance integrated microwave photonics systems to it. This paper discusses a comprehensive optimal structural design and preliminary preparation of a silicon-organic hybrid integrated electro-optic modulator. The slit of the silicon slot waveguide is filled with electro-optic organic polymer. The optical field confinement factor reaches 0.32 when the structure of the slot waveguide is optimized. The optical wave field and radio-frequency electric field overlap considerably, thereby improving the electro-optic modulation efficiency. The tapered waveguide mode conversion structure is used to achieve low-loss coupling between the strip and slot waveguides with a coupling efficiency of 99.55%. The frequency modulation response is addressed by analyzing the influence of the electrode length and width. The 3 dB bandwidth is optimized to 77 GHz, and the half-wave voltage-length product reaches 0.045 V · cm. The MASK used in manufacturing the modulator is designed based on the simulation results. Experiments involving the slot waveguide and the filling polymer in the slot waveguide are performed with good results.

**Key words:** electro-optic modulator; silicon-organic hybrid integration; slot waveguide; strip-to-slot mode converter; half-wave voltage-length product

## 1 引 言

电光调制器是高速光纤通信系统、超宽带微波光子系统的核心器件之一,其主要功能是将数字电信号或高载频模拟电信号调制到光载波上,从而进行光域传输或处理。在微波光子技术领域,高性能的微波光子调制器应具有低的半波电压-长度积( $V_{\pi}L$ )、大的调制带宽,这是实现高效调制、多频段信号处理、低功耗微波光子链路的保证。随着大规模阵列化微波光子信号传输与处理技术的发展,电光调制器在满足上述条件的同时,小型化、阵列化集成也是未来发展的重要方向<sup>[1-4]</sup>。

根据电光调制的物理机制,高速电光调制器的工作原理可分为基于电光晶体或电光材料的电光效应、基于硅基材料的等离子体色散效应等<sup>[5]</sup>。铌酸锂波导电光调制器利用铌酸锂晶体的电光效应实现电光调制功能,具有插入损耗低、对光功率承受能力强和工作波段宽等优势<sup>[6]</sup>,是目前商品化和工程应用最为广泛的电光调制器。然而,铌酸锂波导调制器通常采用 Ti 扩散、质子交换等工艺来制备,难以和其他光电子器件集成。目前也有研究单位将铌酸锂薄膜与 SiO<sub>2</sub> 波导、Si 波导等集成,在铌酸锂薄膜调制器方面取得了良好的进展<sup>[7-10]</sup>。聚合物调制器利用高电光系数的有机聚合物作为波导材料,在波导两侧施加电场改变波

导折射率实现电光调制,具有带宽大、功耗低等优势<sup>[11-12]</sup>。然而,纯聚合物电光调制器的加工工艺与 CMOS 工艺的兼容性较差,大规模集成会受到一定程度的阻碍。硅是中心反演对称结构,非线性电光效应,二阶非线性电光效应也非常微弱。因此,硅基调制器通常对硅波导进行载流子掺杂,在电极上施加电信号后改变载流子浓度,利用等离子体色散原理改变波导的折射率实现调制,具有响应时间短、尺寸小、与 CMOS 工艺兼容等优势<sup>[13-15]</sup>。

硅-有机复合光子集成技术充分发挥了硅光的大规模集成优势和有机聚合物的高电光系数优势,在实现调制器的大带宽、低半波电压,以及与其他光电子器件集成构成高性能微波光子系统方面极具潜力,相关研究受到国内外科研工作者的极大关注<sup>[16]</sup>。美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 Ray T. Chen 课题组研究了基于光子晶体狭缝波导的复合集成电光调制器,通过光子晶体的慢光效应来获得微波光波相速匹配<sup>[17]</sup>。德国卡尔斯鲁厄理工学院 Christian Koos 课题组对硅-有机复合光子集成平台工艺、调制器以及在高速通信系统中的应用进行了研究<sup>[18-22]</sup>。瑞士苏黎世联邦理工学院 Juerg Leuthold 课题组对硅-有机复合集成光电子器件进行了深入的研究,包括波导狭缝填充液晶材料、高电光系数有机聚合物材料等,取得了一系列重要的成果<sup>[24-25]</sup>。日本九州大学 Shiyoshi Yokoyama 课题组研究了基于超薄硅波

导的有机复合集成电光调制器,并对器件的长期稳定性进行了研究,为器件的实际应用奠定了良好的基础<sup>[26-27]</sup>。

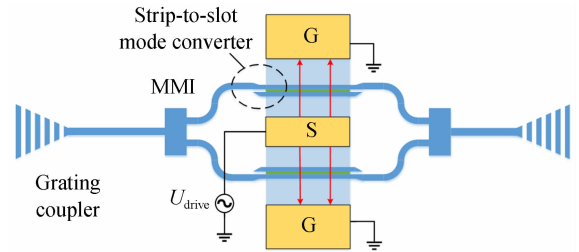
高性能、高集成度的硅-有机复合集成电光调制器应具有大的带宽和低的半波电压-长度积。文献[21]中实验测量得到调制器的带宽为 65 GHz,但其半波电压-长度积为  $0.13 \text{ V} \cdot \text{cm}$ 。文献[22]报道了半波电压-长度积为  $0.032 \text{ V} \cdot \text{cm}$  的调制器,但是其 6 dB 带宽仅为 43 GHz。通过进一步改进器件的结构参数,带宽获得了提升,3 dB 带宽为 40 GHz,而半波电压-长度积为  $0.041 \text{ V} \cdot \text{cm}$ <sup>[23]</sup>。目前,已报道的研究工作尚没有在带宽和半波电压-长度积两个性能方面同时获得较为理想的结果。

本文基于项目组自主研发的 CLD 为发色团的电光系数有机聚合物材料,设计了一种 Slot 结构的硅-有机复合集成电光调制器。通过对 Slot 结构的槽宽度、波导宽度及平板层高度等结构参数进行优化设计,获得了高的光场限制因子,使得光场与调制电场高度重叠,提高了电光调制效率。对锥型波导模式转换结构进行优化设计,得到 Strip-to-Slot 模式转换器的耦合效率为 99.55%。在考虑电极下方实际波导结构的条件下,对波导电极频率响应随电极长度和宽带变化的特性进行了分析和优化,得到调制器的 3 dB 带宽达到 77 GHz,半波电压-长度积为  $0.045 \text{ V} \cdot \text{cm}$ ,与已报道的研究结果相比<sup>[21-23]</sup>,获得了较大的改进。基于仿真结果设计了用于调制器流片的 MASK。制备了 Slot 硅波导并进行了聚合物在波导狭缝的填充,获得了良好的填充效果。

## 2 电光调制器的基本结构

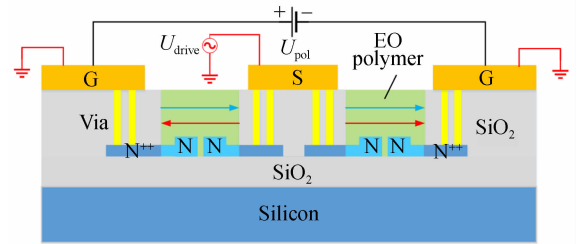
基于 Slot 波导的硅-有机复合集成电光调制器的基本结构为马赫-曾德尔干涉结构,如图 1(a)所示。光通过光栅耦合进入波导,经过 MMI 分束器、Strip-to-Slot 模式转换器进入两臂的相位调制区。调制区的横截面结构如图 1(b)所示(彩图见期刊电子版),绿色部分为 Slot 波导狭缝内填充的高电光系数的有机聚合物材料。在一定温度下,通过调制器地电极施加极化电压  $U_{\text{pol}}$ ,在 Slot 狭缝内形成极化电场,电光材料中的发色团

偶极子沿极化场排列,如图 1(b)中蓝色箭头所示。调制器工作时,将调制射频信号加载到信号电极上,电极通过金属通孔 Via 和下方分段掺杂的硅波导与 Slot 波导相连接,使得外加的驱动电压在狭缝内形成强的电场,电场方向如图 1(b)中的红色箭头所示。从图 1(b)可以看出,左侧调制臂  $U_{\text{drive}}$  产生的调制电场与发色团的极化方向反平行,右侧调制臂的调制电场与发色团极化方向平行,从而实现了推挽调制功能。



(a) 整体结构示意图

(a) Schematic of overall structure



(b) 调制区横截面结构示意图

(b) Cross section of the modulation area

图 1 硅-有机复合集成电光调制器

Fig. 1 Silicon-organic hybrid integrated electro-optic modulator

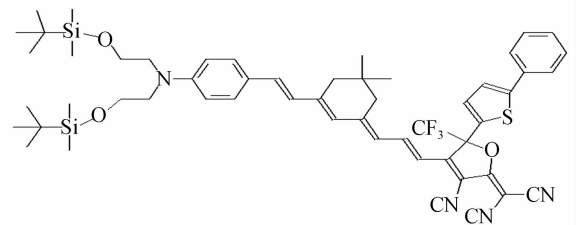


图 2 CLD 发色团分子式

Fig. 2 Molecular formula of CLD chromosphere

采用自主研发的有机电光聚合物填充 Slot 波导的狭缝区域,有机电光聚合物的发色团 CLD 分子式结构如图 2 所示。图 3(a)所示是填充有机聚合物的 Slot 波导结构示意图,有机电光聚合

物的介电常数为 2.343,硅材料的介电常数为 11.5,二者差值极大,根据介质不连续特性,光波场被有效地限制在 Slot 狭缝内,如图 3(b)所示。通过掺杂的硅波导和通孔与电极连接,射频电场

也集中在 Slot 狭缝内,如图 3(c)所示。光波场和调制微波电场有效地重叠在狭缝区域,极大提高了电光调制效率。

### 3 Slot 波导结构参数优化

为了将光场大部分能量集中在狭缝区,需要对 Slot 波导结构进行设计优化。采用 SOI 晶圆的硅层高度为 220 nm,下包层二氧化硅层厚度为 2 μm,在光波中心波长为 1.55 μm 的条件下,采用光束传播法仿真分析波导结构参数对光波场分布的影响。

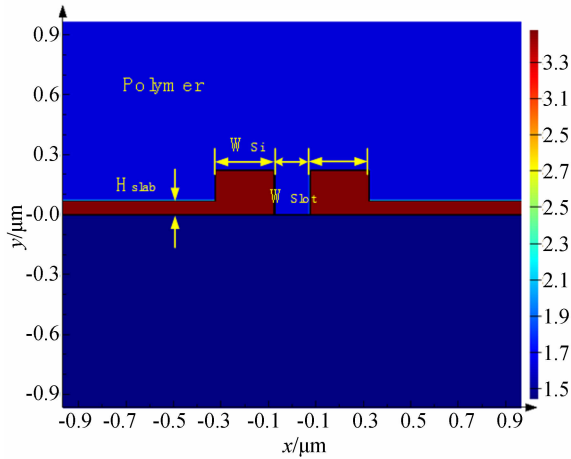
为了量化狭缝处的光功率,定义光波场的限制因子为狭缝区光场强度与输入光场强度的比值:

$$\Gamma = \frac{\iint_{\text{slot}} |E(x,y)|^2 dx dy}{\iint |E(x,y)|^2 dx dy} \quad (1)$$

为了提高 Slot 波导的光场限制因子,对波导的狭缝宽度  $W_{\text{slot}}$ ,平板层高度  $H_{\text{slab}}$  以及硅波导宽度  $W_{\text{si}}$  进行仿真分析(硅波导厚度为 220 nm 不变),仿真结果如图 4 所示。

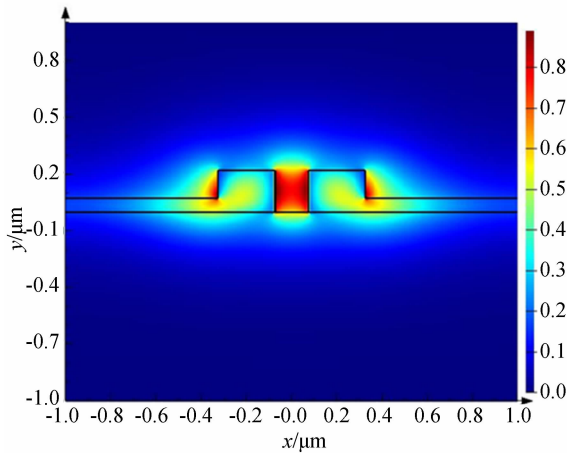
由图 4(a)仿真结果可以看出,限制因子随着狭缝宽度  $W_{\text{slot}}$  的增加而减小,为了提升光场的限制因子,需要减小狭缝宽度。但是狭缝宽度不能过小,否则在电光聚合物极化过程中,分子极化方向会偏离极化电场方向,导致极化后的电光聚合物的电光系数下降,难以获得高的电光系数;另外狭缝宽度如果过小,会增大调制器的等效电容,造成调制器 RC 时间常数的增加,会降低调制带宽。因此,综合考虑上述因素以及 Slot 波导的电子束刻蚀工艺,Slot 波导的狭缝宽度  $W_{\text{slot}}$  选取为 100 nm。从图 4(a)中可以看出,在狭缝宽度为 100 nm,硅波导宽度为 240 nm 的条件下,光波场的限制因子达到最大值,为 0.32。

在确定狭缝宽度  $W_{\text{slot}}$  及硅波导宽度  $W_{\text{si}}$  后,分析平板层高度  $H_{\text{slab}}$  对光场限制因子的影响,仿真结果如图 4(b)所示。可以看出,当平板层高度  $H_{\text{slab}}$  在 10~70 nm 处附近变化时,其限制因子变化范围不大,当  $H_{\text{slab}}$  大于 70 nm 时,其限制因子下降趋势明显,当平板层高度达到硅波导高度的一半时(110 nm),光场的限制因子下降到 0.1。减小  $H_{\text{slab}}$  会增大调制器的等效电阻,进而会在一定程度上限制调制器的带宽。因此,结合硅光加



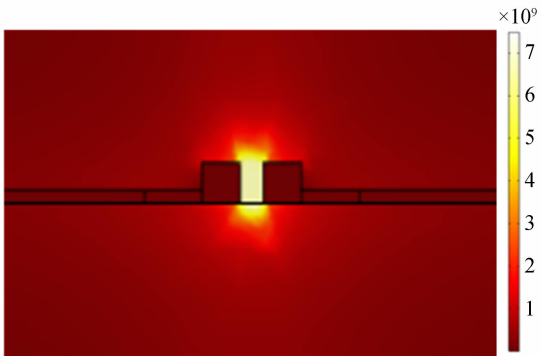
(a) 填充聚合物的 Slot 波导结构示意图

(a) Schematic of Slot waveguide structure filled with polymer



(b) Slot 波导光波场分布

(b) Optical wave field distribution in Slot waveguide



(c) Slot 波导调制微波电场分布

(c) Microwave electric field distribution in Slot waveguide

图 3 Slot 波导

Fig. 3 Slot waveguide

工工艺, 平板层高度  $H_{\text{slab}}$  选取为 70 nm。

综上, 经过仿真优化的 Slot 波导结构参数

为:  $W_{\text{slot}} = 100 \text{ nm}$ ,  $W_{\text{Si}} = 240 \text{ nm}$ ,  $H_{\text{slab}} = 70 \text{ nm}$ , 限制因子为 0.32。

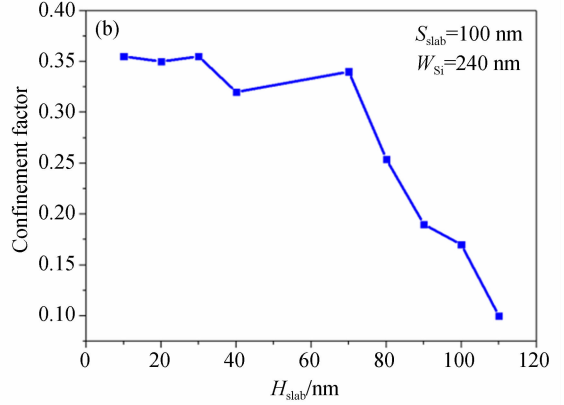
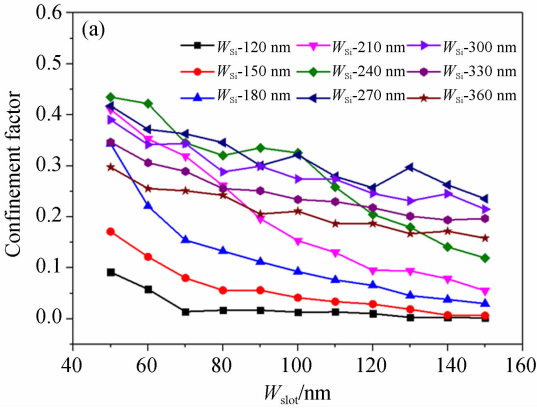


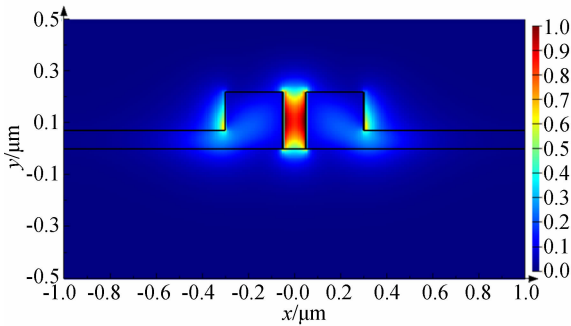
图 4 (a)不同波导宽度下限制因子随狭缝宽度的变化曲线;(b)限制因子随平板层高度的变化曲线

Fig. 4 (a) Confinement factor versus slot width under different waveguide widths; (b) Confinement factor versus slab layer height

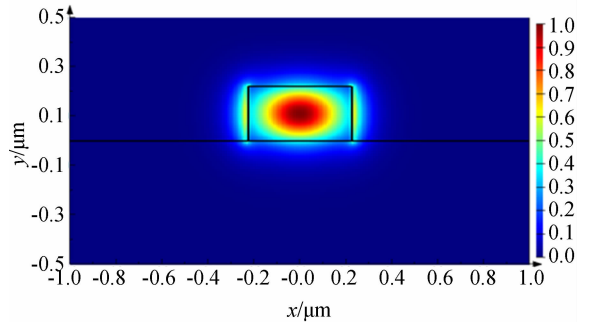
### 4 Strip-to-Slot 模式转换器优化

硅-有机复合集成电光调制器的调制区采用 Slot 结构, 可以使得光波场和调制微波场高度重合, 获得高电光调制效率, 其光波模场是非高斯模式<sup>[28]</sup>, 模场分布如图 5(a) 所示, Slot 结构一般用

在电光调制功能区。硅光集成芯片中通常采用 Strip 波导结构进行光波传输, 具有易加工、光学损耗低的优势<sup>[29]</sup>, 光波模场是高斯模式, 模场分布如图 5(b) 所示。Slot 波导与 Strip 波导存在模式不匹配, 直接连接损耗较大, 因此需要对 Strip-to-Slot 模式转换结构进行优化设计, 以减少模式转换损耗。



(a) Slot 波导 (非高斯模式)  
(a) Slot waveguide(non-Gaussian-like mode)



(b) Strip 波导 (高斯模式)  
(b) Strip waveguide(Gaussian-like mode)

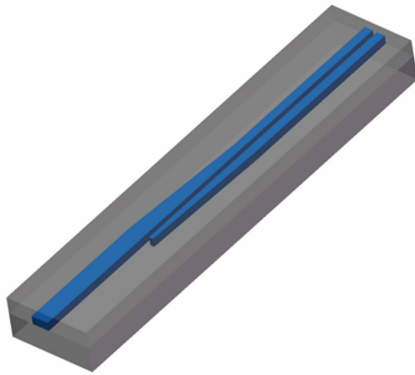
图 5 光模场分布

Fig. 5 Optical mode field distribution

采用锥型波导模式转换结构实现 Strip 波导与 Slot 波导的连接, 如图 6 所示。根据调制器波导结构和加工工艺, Strip-to-Slot 模式转换器的上包层和下包层均为  $\text{SiO}_2$ 。光波在 Strip 波导中传输, 由于 Strip 波导宽度逐渐变窄, 光波导逐渐耦合进入到另一侧的锥型波导, 经过一定长度的

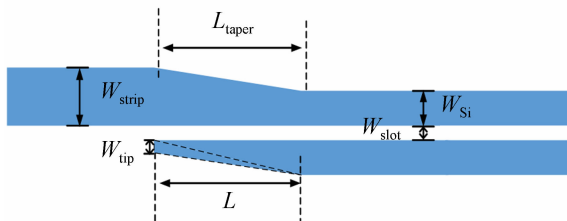
渐变区, 转换成在 Slot 波导中稳定传输的光波模式。

硅基波导加工采用光刻-刻蚀工艺, 尖端结构会出现钝化的现象, 因此在设计锥型波导 Strip-to-Slot 模式转换器的时候, 需要考虑实际工艺带来的影响。结合实际加工工艺, 硅基直波导的宽



(a) 三维示意图

(a) Three-dimensional schematic diagram



(b) 俯视图

(b) Top view

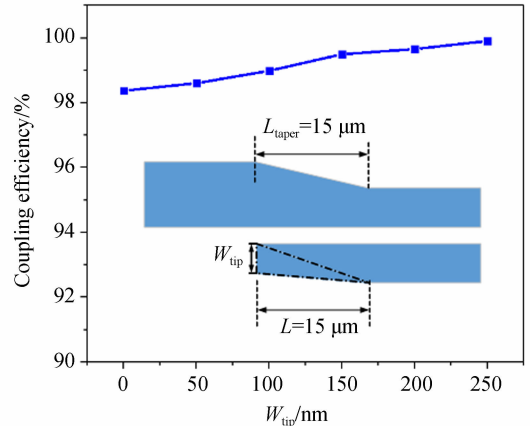
图 6 Strip-to-Slot 模式转换器

Fig. 6 Strip-to-Slot mode converter

度  $W_{strip}$  设置为 450 nm, Slot 两侧宽度  $W_{si}$  为 240 nm,  $W_{slot}$  暂设置为 150 nm。利用 Lumerical 软件中的 Mode Solution, 仿真分析尖端宽度  $W_{tip}$ 、渐变波导长度  $L_{taper}$  对 Strip-to-Slot 模式转换器耦合效率的影响。

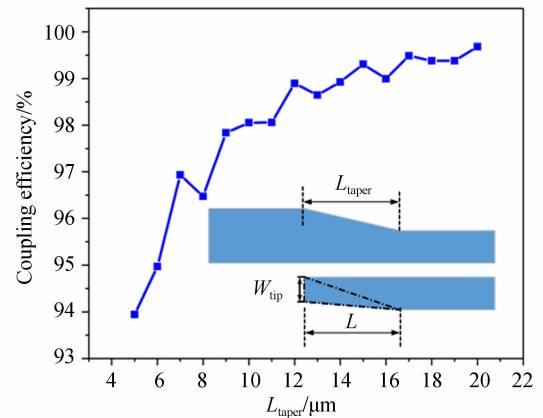
图 7(a)给出了耦合效率随尖端宽度  $W_{tip}$  的变化曲线, 可以看出耦合效率基本保持在 98%~99%附近, 表明  $W_{tip}$  对锥型波导 Strip-to-Slot 模式转换器的影响不大。因此在模式转换器结构设计时, 采用  $W_{tip}=130$  nm 的梯型渐变波导来避免尖端波导的钝化现象。

图 7(b)分析了  $L_{taper}$  在 5~20  $\mu\text{m}$  的 Strip-to-Slot 模式转换器的耦合效率, 从图中可以看出, 耦合效率基本随着  $L_{taper}$  的增大而增大, 当  $L_{taper}=15$   $\mu\text{m}$  时, 耦合效率达到 99.31%, 继续增大  $L_{taper}$ , 耦合效率变化不明显。为了减小器件尺寸, 降低额外的传输损耗, 优化后的渐变波导长度  $L_{taper}$  选取为 15  $\mu\text{m}$ 。



(a) 耦合效率随尖端宽度的变化曲线

(a) Coupling efficiency versus tip width



(b) 耦合效率随渐变波导长度的变化曲线

(b) Coupling efficiency versus graded waveguide length

图 7 耦合效率的变化曲线

Fig. 7 Variation of coupling efficiency

对于 Slot 波导结构, 狭缝宽度  $W_{slot}$  越小, 对光的限制能力越强, 限制因子越大, 仿真狭缝宽度  $W_{slot}$  对锥型波导 Strip-to-Slot 模式转换器耦合效率的影响, 结果如图 8 所示。从图 8 可以看出, 随着狭缝宽度的增加, 耦合效率先增大后下降, 变化幅度在  $\pm 0.3\%$  之内, 综合考虑光场限制因子, 选择  $W_{slot}$  为 100 nm, 此时耦合效率为 99.55%。经过仿真分析, 锥型波导 Strip-to-Slot 模式转换器的优化结构参数为:  $L_{taper}=L=15$   $\mu\text{m}$ ,  $W_{tip}=130$  nm,  $W_{slot}=100$  nm, 优化后 Strip-to-Slot 模式转换器的传输光场如图 9 所示, 耦合效率为 99.55%。

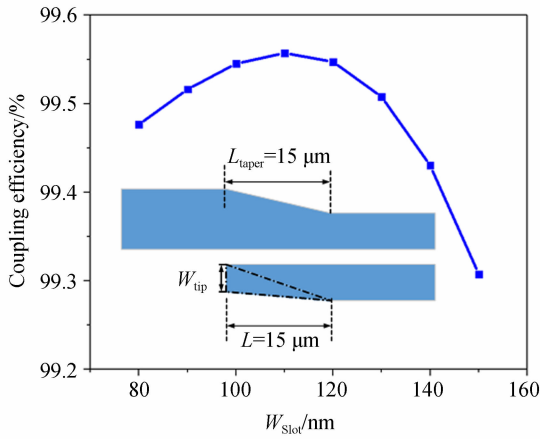


图 8 耦合效率随 Slot 波导宽度的变化曲线

Fig. 8 Coupling efficiency versus width of slot waveguide

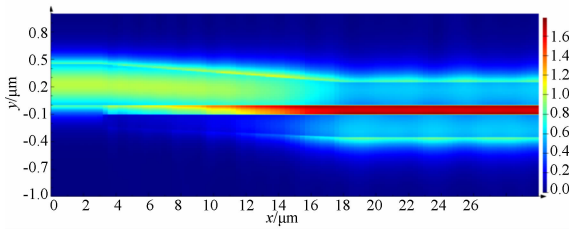


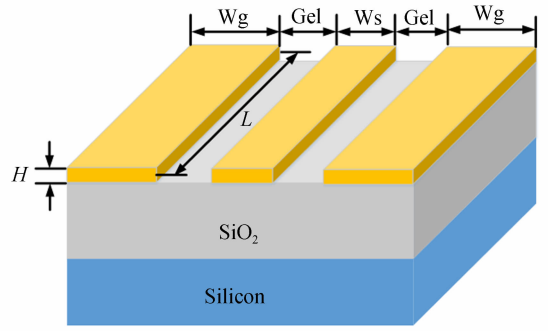
图 9 优化后 Strip-to-Slot 模式转换器的传输光场

Fig. 9 Transmission light field of the Strip-to-Slot mode converter after optimization

### 5 调制器电极结构优化

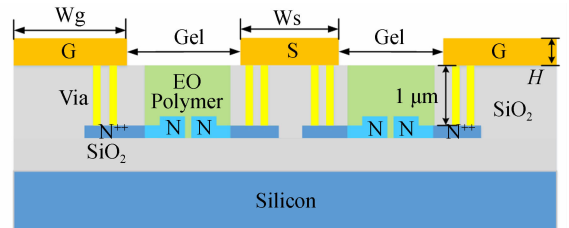
调制器电极的作用是将微波信号加载到 Slot 波导中传输的光波上,对调制器的调制性能有着重要的影响,因此除了对光波导结构进行设计外,还需要对调制电极的结构参数进行优化,降低微波传输损耗,增强微波与光波传输的相速匹配,满足阻抗匹配,减少回波损耗。与普通传输线结构不同,调制区中的微波传输是一个立体结构,掺杂的硅波导及金属通孔都会影响调制微波的传输特性。因此,在利用 HFSS 软件建立模型进行电极结构优化时,需要加入行波电极下方金属通孔及掺杂硅层的结构,从而尽量接近实际的相位调制区结构。图 10(a)是电极波导三维结构简图,图 10(b)是考虑金属通孔及掺杂硅层的实际电极波导结构截面图,其中 Via 为金属通孔,浅蓝色和深蓝色分别表示轻掺杂区和重掺杂区(彩图见期刊电子版)。

首先设置电极长度  $L = 1 \text{ mm}$ ,地电极宽度



(a) 简化的电极波导三维结构图

(a) Schematic of three-dimensional electrode waveguide in simplified structure



(b) 实际的电极波导结构截面图

(b) Cross section of real electrode waveguide structure

图 10 电极结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of electrode structure

$W_g = 50 \mu\text{m}$ ,信号电极  $W_s = 10 \mu\text{m}$ ,电极间距  $G_{el} = 5 \mu\text{m}$ ,电极厚度  $H = 1.2 \mu\text{m}$ ,对比有无考虑电极下方金属通孔和掺杂波导两种情况下的特征阻抗,仿真结果如图 11 所示。从图 11 可以看出,考虑电极下方实际波导结构的特征阻抗比简化电极结构的特征阻抗下降了近  $25 \Omega$ ,表明电极下方

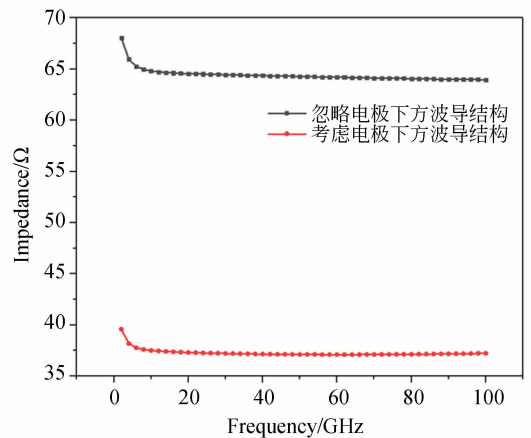


图 11 硅波导结构对电极特征阻抗的影响

Fig. 11 Effect of silicon waveguide structure on characteristic impedance of electrodes

金属通孔和掺杂硅波导的存在会对电极性能产生较大的影响,因此,考虑电极下方实际结构对仿真结果的真实性十分必要。

按照图 10(b)所示的调制区实际结构,设置电极下方硅波导的尺寸和掺杂浓度等参数,用 HFSS 软件建立仿真模型。电极下方 SiO<sub>2</sub> 厚度设置为 1 μm。电极间距 G<sub>el</sub> 设置为 5 μm,这里主要考虑当电极间距过小时,会对 Slot 波导中的光产生较大的吸收损耗,而且间距过小在工艺上不易实现。电极厚度 H 设置为 1.2 μm,主要考虑电极调制带宽受 RC 常数限制<sup>[24]</sup>,厚度过小,电阻增大,带宽会下降,而当电极厚度增大时,不利于实现阻抗匹配。HFSS 建立的电极模型如图 12 所示,主要对信号电极的宽度、长度进行仿真分析,以获得大的带宽。

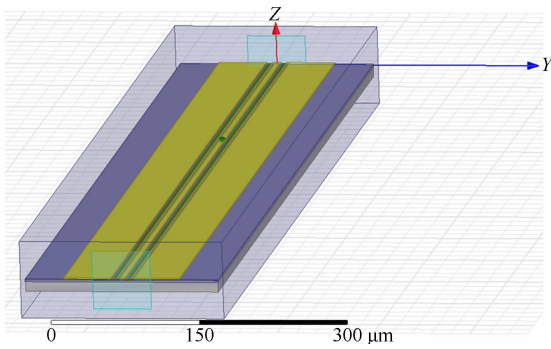


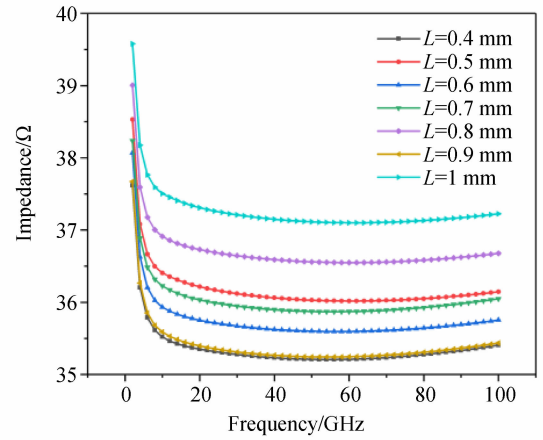
图 12 调制区电极的 HFSS 仿真模型

Fig. 12 HFSS simulation model of electrode in modulation area

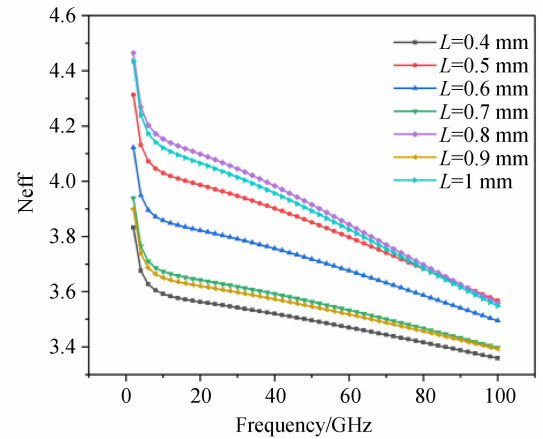
首先对电极长度进行优化,设置电极宽度  $W_s = 10 \mu\text{m}$ ,电极间距  $G_{el} = 5 \mu\text{m}$ ,电极厚度  $H = 1.2 \mu\text{m}$ ,地电极宽度  $W_g = 50 \mu\text{m}$ ,仿真得到的特征阻抗、有效折射率和 S 参数等结果如图 13 所示。从图 13(a)中可以看出,电极的特征阻抗总体趋势是随着电极长度的增加而增大。由于特征阻抗是电极整体结构的体现,不是单纯的线性关系,存在个别曲线存在跳变的现象。对硅波导进行了掺杂,通孔数目较多,因此整体的特征阻抗分布在 35~38 Ω。

HFSS 模型只考虑了调制区的电极结构,由于实际电极结构还会存在过渡区,封装时与 PCB 板相连接,还会产生额外的电阻,因此调制区电阻的取值小于 50 Ω。由图 13(b)可知,有效折射率基本分布在 3.4~4,电极长度对有效折射率的影响不大。

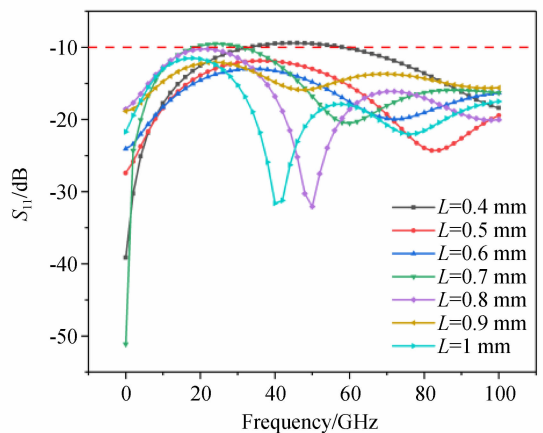
从图 13(c)中可知,  $S_{11}$  参数基本小于 -10 dB,表明回波损耗较小。从图 13(d)可以看出,3 dB 带宽基本随着电极长度的增大而减小,电极长度为 0.4 mm 时,调制带宽达到 70 GHz。



(a) 特征阻抗  
(a) Characteristic impedance



(b) 有效折射率  
(b) Effective refractive index



(c) S<sub>11</sub> 参数  
(c) S<sub>11</sub> parameter

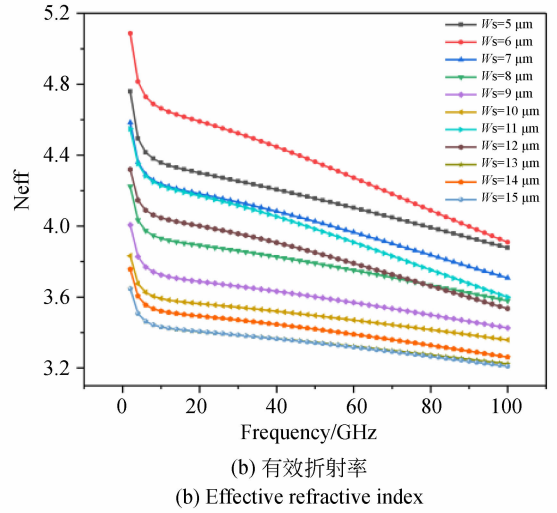
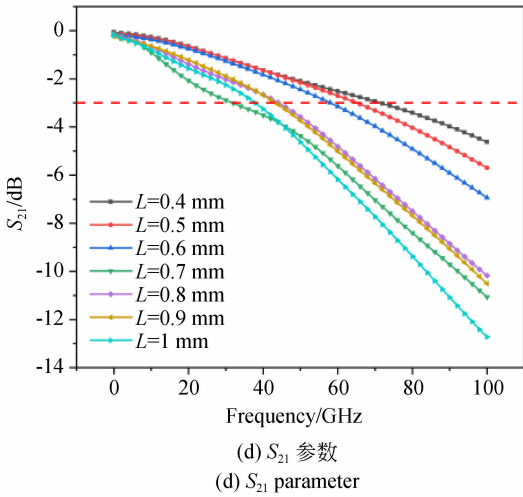


图 13 不同电极长度下的调制器特征参数

Fig. 13 Modulator characteristic parameters at different electrode lengths

然后分析电极宽度对电极性能的影响。设置电极长度  $L=0.4$  mm, 电极间距  $G_{el}=5$   $\mu\text{m}$ , 电极厚度  $H=1.2$   $\mu\text{m}$ , 地电极宽度  $W_g=50$   $\mu\text{m}$ , 电极宽度  $W_s$  在  $5\sim 15$   $\mu\text{m}$  变化, 仿真得到的特征阻抗、有效折射率和 S 参数等结果如图 14 所示。从图 14(a)中可以看出, 随着电极宽度的增大, 特征阻抗逐渐减小。图 14(b)反映出电极宽度对有效折射率的影响规律不是很明显。从图 14(c)中可以看出,  $S_{11}$  参数基本小于  $-10$  dB, 表明反射损耗较小。图 14(d)表明了不同电极宽度下的  $S_{21}$  参数, 均大于 40 GHz, 当电极宽度为 12  $\mu\text{m}$  时, 3 dB 带宽达到 77 GHz。

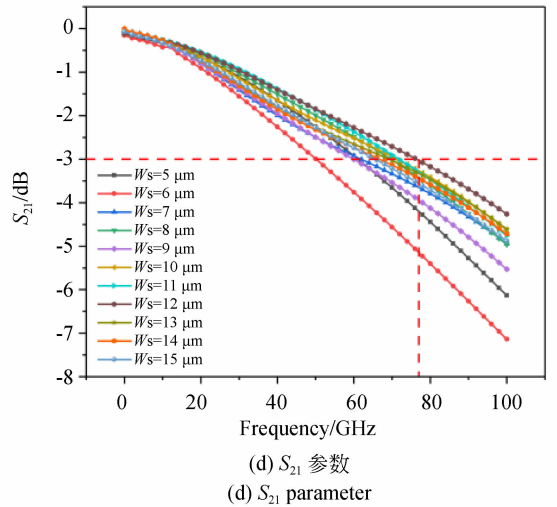
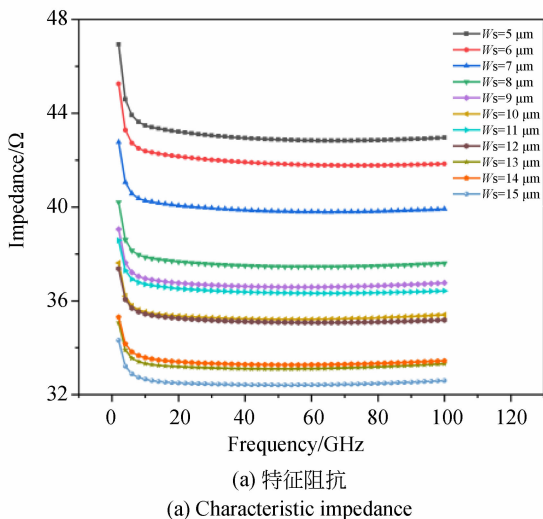
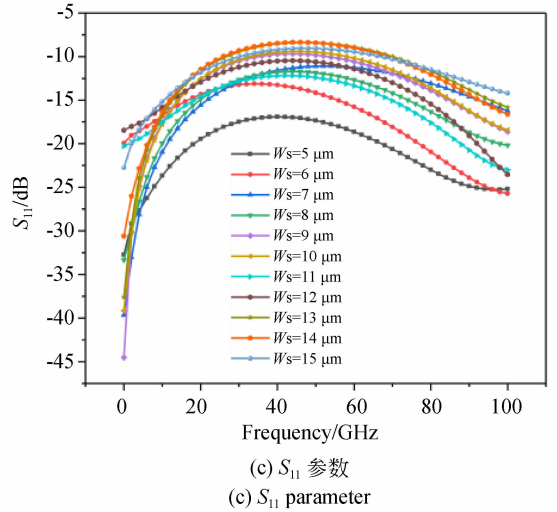


图 14 不同电极宽度下的调制器特征参数

Fig. 14 Modulator characteristic parameters at different electrode widths

在电极长度为 0.4 mm,电极宽度为 12 μm,电极厚度为 1.2 μm,电极间距 5 μm 的条件下,分析调制器的半波-电压长度积。根据波导优化的结果,在 Slot 狭缝宽度 100 nm 的条件下,输入光场为 TE 模式时,电场和光场的重叠因子为 31.68%,推挽结构 Slot 波导调制器的半波电压-长度积表示为:

$$V_{\pi}L = \frac{\lambda W_{\text{slot}}}{2n^3 \gamma_{33} \Delta}, \quad (2)$$

其中:Δ 为重叠因子,λ 为光波波长,n 为聚合物材料的折射率,γ<sub>33</sub>为聚合物材料的电光系数。本文采用的有机聚合物的电光系数是 150 pm/V。经过计算得到调制器的半波电压-长度积(V<sub>π</sub>L)为 0.045 V·m,半波电压(V<sub>π</sub>)为 1.14 V。

### 6 MASK 设计

根据优化结果,选择带宽比较大的电极结构参数,设计用于制备电光调制器的 MASK。根据调制器芯片实际测试情况和探针尺寸,合理安排光栅的位置及电极 PAD 之间的间距。行波电极需要满足阻抗匹配条件,即电极的特征阻抗与负载抗相等,以减少回波损耗,提高调制带宽。匹配阻抗考虑两种形式,一种是片上匹配,一种外接匹配。调制器单元结构的 MASK 如图 15 所示(彩图见期刊电子版),图中红色框中紫色方块之间连接的部分是片上匹配电阻,蓝色框中的 PAD 部分可以在测试时外接 50 Ω 电阻进行片外阻抗匹

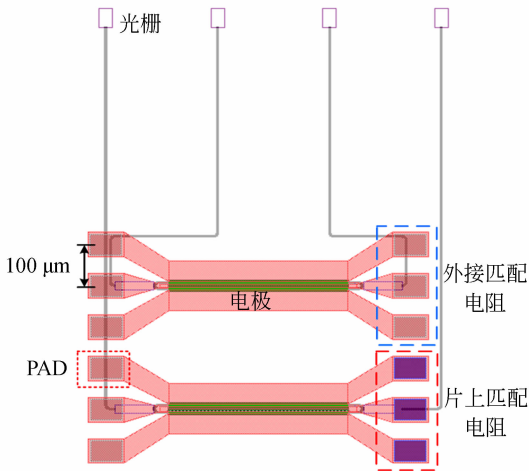


图 15 MASK 中的调制器结构

Fig. 15 Modulator structure in MASK

配。目前,调制器芯片已完成制版,调制器流片加工正在进行中。

### 7 实验

Slot 波导作为硅-有机复合集成电光调制器的核心功能部分,含有有机发色团分子的聚合物材料必须充分填充在 Slot 波导的狭缝中,才能使限制在狭缝内的光波场、调制微波电场与有机电光材料进行充分的交叠,从而发挥 Slot 波导结构的强光场限制和高调制效率的优势。Slot 波导的狭缝宽度通常在 100~200 nm,因此,有机聚合物电光材料在狭缝中的充分填充是发挥 Slot 波导优势的前提。项目组对有机聚合物电光材料在 Slot 波导狭缝中填充工艺进行了实验研究。

为了使得电光有机聚合物材料在 Slot 波导狭缝中充分填充,将聚合物与发色团分子以一定的浓度制成溶液,以旋涂的方式将溶液填充至狭缝。溶液的浓度控制非常重要,如果浓度过大,溶液的黏度太大,会对液体进入狭缝造成困难,若浓度太低,溶液填充进狭缝,溶剂挥发后会造成功空结构。旋涂时旋涂机的转速也很重要,若转速过低,成膜不平滑,同时离心力过小,对填充狭缝有不利影响;若转速过高,容易造成填充不充分。将 CLD 类发色团以 30% 的质量浓度掺杂到 PMMA,将两者溶解到苯甲醚溶剂中。过滤后利用稳定性、均匀高的旋涂机进行涂膜,得到均一、平整的薄膜,照片如图 16 所示,薄膜膜厚(从中心测)约为 1 μm。

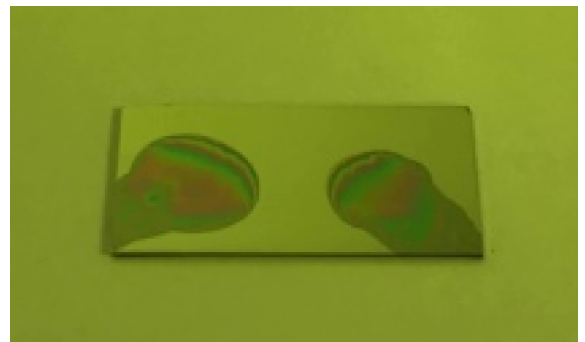
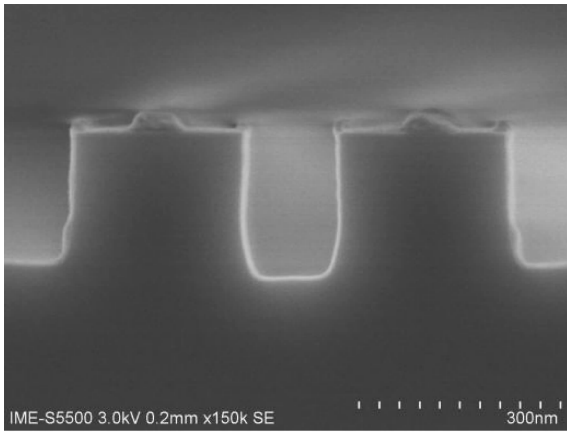


图 16 填充聚合物的 Slot 波导硅片

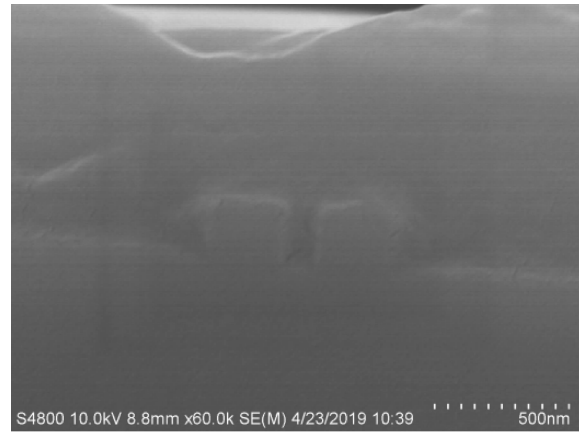
Fig. 16 Slot silicon waveguide wafer filled with polymer

将涂好膜的硅片沿与波导垂直方向解理,利用扫描电子显微镜观测断面,同时与未填充聚合物的波导断面的 SEM 图像进行对比,如图 17 所

示。从图 17(b)的断面图可以看出,Slot 波导狭缝已被聚合物完全填充,为下一步聚合物的片上极化奠定了良好基础。



(a) 未填充聚合物  
(a) Without polymer



(b) 已填充聚合物  
(b) Filled with polymer

图 17 Slot 波导横截面的 SEM 照片

Fig. 17 SEM photograph of cross section of slot waveguide

## 8 结 论

本文对硅-有机复合集成电光调制器的 Slot 波导结构、Strip-to-Slot 模式转换器和电极结构等进行了优化设计。通过对 Slot 波导的  $W_{Si}$ ,  $H_{slab}$  和  $W_{slot}$  等参数进行优化设计,光波场限制因子达到 0.32。对锥型波导模式转换器的  $L_{taper}$ ,  $W_{tip}$  和  $W_{slot}$

等参数进行仿真,得到耦合效率为 99.55%。对调制区电极的长度和宽度进行了优化设计,得到 3 dB 带宽达到 77 GHz,半波电压-长度积为  $0.045 \text{ V} \cdot \text{cm}$ ,满足大带宽低功耗调制器的要求。根据仿真结果进行了调制器流片的 MASK 设计,现在已完成制版。实验制备了硅 Slot 波导,成功实现了聚合物在 Slot 波导狭缝内的完全填充,为硅-有机复合集成电光调制器的制备奠定了良好基础。

## 参考文献:

- [1] 田中成, 靳学明, 朱玉鹏. 微波光子电子战技术原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018.  
TIAN ZH CH, JIN X M, ZHU Y P. *Principles and Applications of Microwave Photonic Electronic Warfare Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)
- [2] 祝宁华, 李明, 郝跃. 光电子器件与集成技术[J]. 中国科学:信息科学, 2016, 46(8): 1156-1174.  
ZHU N H, LI M, HAO Y. Optoelectronic devices and integration technologies [J]. *Scientia Sinica. Informationis*, 2016, 46 (8): 1156-1174. (in Chinese)
- [3] 高晖, 邓晔, 张金平, 等. 微波光子相控阵的技术分析与展望[J]. 雷达学报, 2019, 8(2): 251-261.

- GAO H, DENG Y, ZHANG J P, *et al.*. Analysis and prospects of phased array radar based on microwave photonics [J]. *Journal of Radars*, 2019, 8 (2): 251-261. (in Chinese)
- [4] MARPAUNG D, YAO J P, CAPMANY J. Integrated microwave photonics [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(2): 80-90.
- [5] 李金野, 于丽娟, 刘建国. 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 [J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(5): 15-20.  
LI J Y, YU L J, LIU J G. Broadband electro-optical modulator and development trend of new silicon-based hybrid integrated modulator [J]. *ZTE Technology Journal*, 2017, 23(5): 15-20. (in Chinese)
- [6] WOOTEN E L, KISSA K M, YI-YAN A, *et al.*. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems [J]. *IEEE Journal of*

- Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(1): 69-82.
- [7] 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.
- [8] WEIGEL P O, ZHAO J, FANG K, *et al.*. Bonded thin film lithium niobate modulator on a silicon photonics platform exceeding 100 GHz 3-dB electrical modulation bandwidth[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 23728-23739.
- [9] WANG C, ZHANG M, STERN B, *et al.*. Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1547-1555.
- [10] HE M B, XU M Y, REN Y X, *et al.*. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit · s<sup>-1</sup> and beyond[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(5): 359-364.
- [11] LEE M, KATZ H E, ERBEN C, *et al.*. Broadband modulation of light by using an electro-optic polymer[J]. *Science*, 2002, 298(5597): 1401-1403.
- [12] LIU J, XU G, LIU F, *et al.*. Recent advances in polymer electro-optic modulators[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(21): 15784-15794.
- [13] LIU A S, 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.
- [14] 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.
- [15] LI M F, WANG L, LI X, *et al.*. Silicon intensity Mach-Zehnder modulator for single lane 100 Gb/s applications[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(2): 109-116.
- [16] 齐影, 安俊明, 王玥, 等. 硅-有机材料混合电光调制器的原理及研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 070004.  
 QI Y, AN J M, WANG Y, *et al.*. Principle and progress of silicon-organic hybrid electro-optic modulators[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 070004. (in Chinese)
- [17] ZHANG X Y, CHUNG C J, HOSSEINI A, *et al.*. High performance optical modulator based on electro-optic polymer filled silicon slot photonic crystal waveguide[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(12): 2941-2951.
- [18] KOOS C, VORREAU P, VALLAITIS T, *et al.*. All-optical high-speed signal processing with silicon-organic hybrid slot waveguides[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(4): 216.
- [19] ALLOATTI L, PALMER R, DIEBOLD S, *et al.*. 100 & # 8197; GHz silicon-organic hybrid modulator[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(5): e173.
- [20] 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*, 8(1): 2598.
- [21] UMMETHALA S, KEMAL J N, LAUERMANN M, *et al.*. Capacitively coupled silicon-organic hybrid modulator for 200 gbit/s PAM-4 signaling[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, California, Washington, D.C. ; OSA*, 2019.
- [22] 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.
- [23] KIENINGER C, FÜLLNER C, ZWICKEL H, *et al.*. SOH Mach-Zehnder modulators for 100 Gb/s PAM4 signaling with sub-1 dB phase-shifter loss[C]. *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020, San Diego, California, Washington, D.C. ; OSA*, 2020.
- [24] LEUTHOLD J, KOOS C, FREUDE W, *et al.*. Silicon-organic hybrid electro-optical devices[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(6): 114-126.
- [25] HENI W, KUTUVANTAVIDA Y, HAFFNER C, *et al.*. Silicon-organic and plasmonic-organic hybrid photonics[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(7): 1576-1590.
- [26] SATO H, MIURA H, QIU F, *et al.*. Low driving voltage Mach-Zehnder interference modulator constructed from an electro-optic polymer on ultrathin silicon with a broadband operation[J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 768-775.
- [27] YOKOYAMA S, LU G W, CHENG X Y, *et al.*. Long-term stable electro-optic polymer for hybrid integration[C]. *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019, San Diego, California, Washington, D.C. ; OSA*, 2019.

[28] BAEHR-JONES T, HOCHBERG M, WALKER C C, *et al.*. High-Q optical resonators in silicon-insulator-based slot waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(8): 081101.

[29] DENG Q Z, LIU L, LI X B, *et al.*. Strip-slot waveguide mode converter based on symmetric multimode interference [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(19): 5665-5668.

作者简介:



邹艳慧(1994—),女,辽宁朝阳人,硕士研究生,2018年于大连理工大学获得学士学位,主要研究方向为集成电光调制器件。E-mail: zouyanhui@mail.dlut.edu.cn

通讯作者:



韩秀友(1977—),男,河北沧州人,教授,博士生导师,2006年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事集成光子学、微波光子学领域的研究。E-mail: xyhan@dlut.edu.cn