

## 基于光子晶体纳米梁腔的反射壁下载型电光调制器

朱文玲<sup>1</sup>, 陈鹤鸣<sup>2\*</sup>, 徐文凯<sup>1</sup>, 胡宇宸<sup>1</sup><sup>1</sup>南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023;<sup>2</sup>南京邮电大学贝尔英才学院, 江苏 南京 210023

**摘要** 随着光通信产业和光互联技术的高速发展,具有高调制速率且易集成的小尺寸电光调制器件研究越来越重要。提出了一种以硅绝缘体(SOI)材料为基底的光子晶体纳米梁腔(PCNC)反射壁下载型电光调制器。信号光经过主线波导后首先被锥形波导耦合进一维光子晶体纳米梁腔中,然后进入下载波导并输出。优化主线波导与下载波导中反射圆孔的位置与个数,可以提高器件的整体透射率。纳米梁腔采用圆孔形渐变孔径,使得光束更好地被束缚在腔内。同时,在纳米梁腔两侧引入掺杂以形成PN结,施加较低偏压以改变纳米梁腔的谐振波长,从而实现工作波长光信号的“通”“断”调制。运用三维时域有限差分(3D-FDTD)法对调制器的光学特性和电学性能进行仿真分析。结果表明,该电光调制器可以实现波长为1550.01 nm的光信号调制,调制电压仅为1.2 V,插入损耗为0.2 dB,消光比为24 dB,面积仅为54  $\mu\text{m}^2$ ,调制速率为8.7 GHz,调制带宽为122 GHz,调制速率下的能耗仅为4.17 pJ/bit。所提出的电光调制器结构紧凑,性能优异,有望应用于高速大容量光通信系统和集成硅光子技术等领域。

**关键词** 光通信; 载流子色散效应; 时域有限差分法; 光子晶体纳米梁腔; 硅基波导; 电光调制器

中图分类号 TN761

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221312

## 1 引言

随着信息技术的发展,光子作为一种新的信息载体,被用来开发越来越多的新的互联技术和集成方法。光子技术发展的远期目标是实现集成光路。所谓集成光路,即将各个光器件,例如半导体激光器<sup>[1-2]</sup>、集成光波导<sup>[3]</sup>、片上光调制器<sup>[4]</sup>、光开关<sup>[5]</sup>以及光探测器<sup>[6]</sup>等集成在同一块芯片上,使芯片能够对携带信息的光信号进行处理、发送以及接受。在集成光子学中,电光调制器作为一种重要的光通信器件,随着光互联和高速光通信的发展而成为研究热点,性能好、尺寸小以及集成度高成为调制器的重要发展方向。随着硅基光学技术的发展,硅绝缘体(SOI)材料凭借其优异的特性而得到广泛应用。SOI材料能够与互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容,并且具有耐高温、损耗低和集成高等优点<sup>[7]</sup>,以其作为光子学材料<sup>[8]</sup>的纳米结构已经成为研究热点<sup>[9-10]</sup>。已有大量基于硅材料的电光调制器研究,Liu等<sup>[11]</sup>报道了基于硅材料的马赫-曾德尔干涉仪型电光调制器,随后作者采用反向PN结对原调制器进行改进,将其传输速度提升至40 Gbit/s<sup>[12]</sup>。

光调制器除了采用干涉原理实现光调制外,谐振腔是另一种常用方法。一维光子晶体纳米梁腔

(PCNC)作为谐振腔,性能较为独特,它的模体积小,品质因子(Q)较高,与光波导易耦合集成<sup>[13]</sup>。目前,采用一维PCNC实现调制器的方式主要有两种。一种是将光波直接耦合到纳米梁腔中。2007年Schmidt等<sup>[14]</sup>首次在硅基一维PCNC上实现了超紧凑电光调制器,2014年Shakoor等<sup>[15]</sup>利用厚度为220 nm的SOI平台,制作了硅基纳米梁腔电光调制器。另一种设计调制器的方法是利用侧耦合结构,增添条形波导与纳米梁腔进行侧耦合,从而实现光调制。如2015年Pan等<sup>[16]</sup>提出了一种基于硅与石墨烯混合的一维PCNC电光调制器,2018年Liu等<sup>[17]</sup>提出了一种石墨烯/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 多层堆叠(GAMS)的PCNC侧耦合电光调制器,这些器件存在功耗较大、消光比不高等缺点。2021年,徐文凯等<sup>[18]</sup>提出了一种基于硅绝缘体的侧耦合型一维PCNC电光调制器。该器件可实现1550.55 nm波长的光信号调制,调制电压仅为1.175 V,消光比为18.2 dB,调制速率为8.3 GHz,调制带宽可以达到90 GHz,其中消光比和调制带宽较低。可以看出,目前光子晶体纳米梁腔电光调制器仍存在消光比低以及调制带宽较小等不足,可以通过优化结构、增加反射壁来提高光子晶体纳米梁腔调制器的性能。

本文提出了一种基于SOI PCNC的改进型电光调制器,基于文献[18]的结构,在一维PCNC两侧增加空

收稿日期: 2022-10-10; 修回日期: 2022-10-25; 录用日期: 2022-10-27; 网络首发日期: 2022-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61571237)、江苏省自然科学基金(BK20151509)

通信作者: \*chhm@njupt.edu.cn

气孔,形成反射壁下载型结构,并在谐振腔两侧掺杂形成 PN 结。利用 Lumerical 仿真软件进行分析,结果表明,该器件的消光比与调制带宽高,性能优良,具有损耗小、功耗低、易于集成的优点。

## 2 结构模型与原理分析

本文设计的改进型电光调制器的三维结构如图 1 所示。以硅作为衬底,以二氧化硅材料作为包层。电光调制器位于包层中间,其结构包括由硅材料构成的

主线波导、纳米梁腔、下载波导、反射壁、Si 薄层以及两侧的 Al 电极。

电光调制器在  $xz$  方向上的截面图如图 2 所示。衬底层的厚度取  $2\ \mu\text{m}$ ,  $\text{SiO}_2$  包层厚度是衬底层厚度的 2 倍,为  $4\ \mu\text{m}$ ; 纳米梁腔、主线波导和下载波导的厚度 ( $h$ ) 均为  $200\ \text{nm}$ , 宽度 ( $W$ ) 均为  $550\ \text{nm}$ , 下载波导和纳米梁腔之间的耦合距离为  $L=180\ \text{nm}$ ; Si 薄层厚度 ( $h_{\text{layer}}$ ) 为  $20\ \text{nm}$ ; 金属 Al 宽度为  $0.55\ \mu\text{m}$ , 长度为  $19.8\ \mu\text{m}$ , 厚度为  $0.2\ \mu\text{m}$ , 两金属之间的距离为  $3.9\ \mu\text{m}$ 。

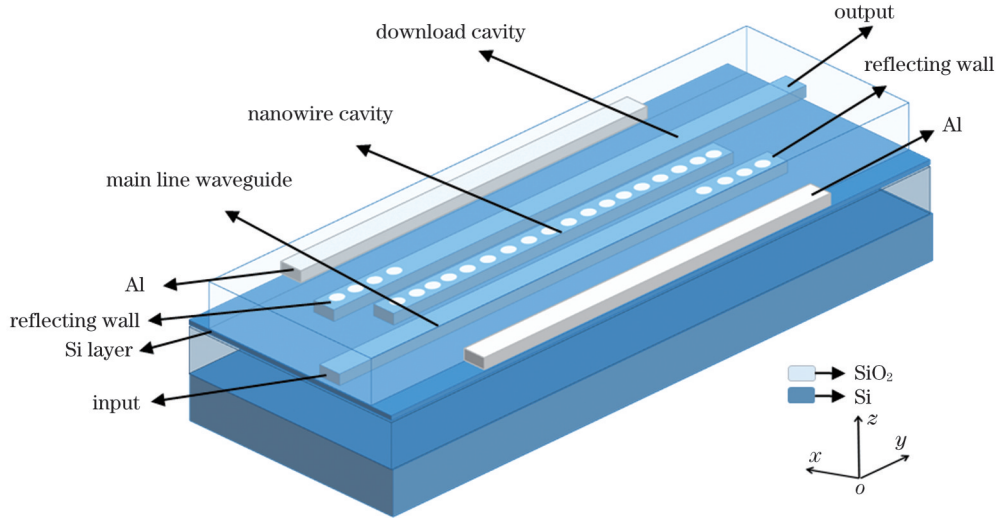


图 1 反射壁下载型电光调制器的三维结构

Fig. 1 Three-dimensional structure of download type electro-optic modulator with reflection wall

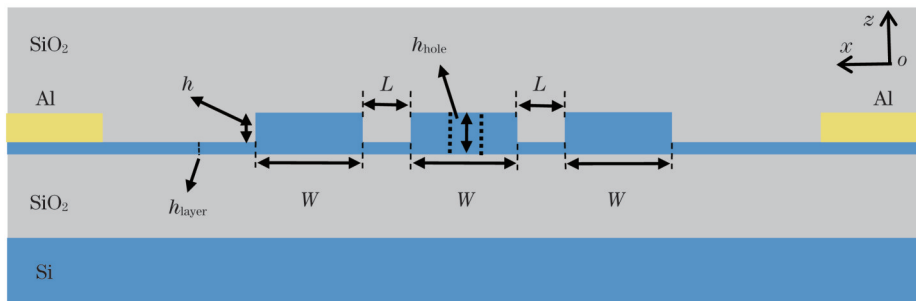


图 2 电光调制器剖面图

Fig. 2 Sectional drawing of electro-optic modulator

调制器中反射圆孔和光子晶体纳米梁腔的结构与参数分别如图 3、4 所示,所有圆孔高度均为  $h_{\text{hole}}=$

$220\ \text{nm}$ , 当工作波长为  $1550\ \text{nm}$  时, 经过仿真和优化, 周期常数固定为  $a=330\ \text{nm}$ 。

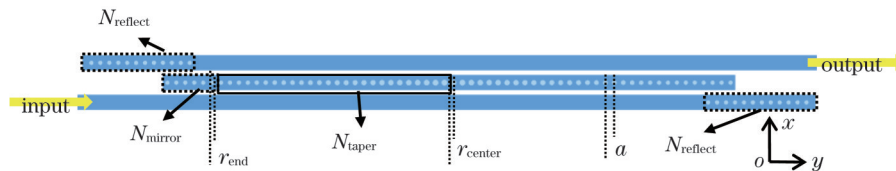


图 3 光子晶体纳米梁腔结构图

Fig. 3 Structural diagram of photonic crystal nanowire cavity

主线波导和下载波导中的反射圆孔周期数均为  $N_{\text{reflect}}=12$ , 半径为  $r_{\text{reflect}}=79\ \text{nm}$ ; 纳米梁腔的镜面周期数  $N_{\text{mirror}}=6$ , 渐变周期数  $N_{\text{taper}}=26$ ; 圆孔半径由两端的

$r_{\text{end}}=79\ \text{nm}$  渐变增加到中心处的  $r_{\text{center}}=109\ \text{nm}$ 。

本文设计的电光调制器属于带反射壁的下型结构<sup>[19]</sup>, 建立的侧耦合结构理论模型如图 5 所示, 其中,

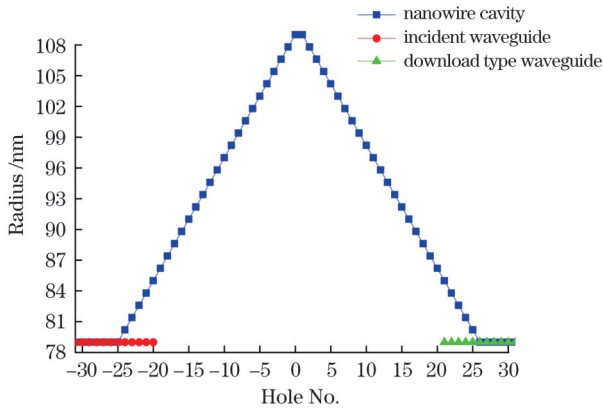


图 4 圆孔参数图

Fig. 4 Circular hole parameter diagram

$\tau_i, \tau_d, \tau_r, \tau_t$  表示纳米梁腔与主线波导耦合产生损耗时的幅值耦合衰减系数。假设微腔与波导间的幅值衰减系数满足模型简化条件 ( $\tau/\tau_{\text{int}} \geq 100$ ,  $\tau$  为微腔幅值衰减系数,  $\tau_{\text{int}}$  为波导幅值衰减系数), 则建立的侧耦合结构

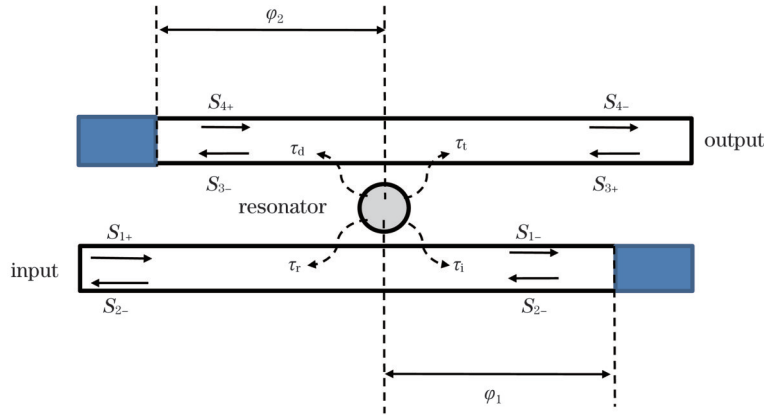


图 5 主线波导与谐振腔侧耦合结构的理论模型

Fig. 5 Theoretical model of side coupling structure between mainline waveguide and resonant cavity

$$T(\omega) = \left| \frac{S_{4-}}{S_{1+}} \right|^2 = \frac{4\tau^2 [1 + \exp(i2\varphi_1)]^2 [1 + \exp(i2\varphi_2)]^2}{(\omega - \omega_0)^2 + 4\tau^2 [2 + \exp(i2\varphi_1) + \exp(i2\varphi_2)]^2}, \quad (8)$$

式中:  $\omega$  为谐振频率。

当  $\omega = \omega_0$  且  $\varphi_1 = \varphi_2 = m\pi = \varphi$  ( $\varphi$  为反射圆孔到渐变圆孔的距离,  $m$  为整数) 时,  $T(\omega_0)$  可以取得最大值 1, 此时带反射壁的下型结构的理论谱线如图 6 所示。

通过在纳米梁腔上及其左右两侧掺杂 Si 薄层来制备 PN 结, 如图 7 所示。同时在 Si 薄膜两端加载 Al 电极, N 型掺杂侧接负极, P 型掺杂侧接正极。

按照硅材料中自由载流子色散 (FCD) 效应, 即 P 型和 N 型载流子浓度 (即空穴和电子浓度) 发生变化时, 基底硅的有效折射率也会发生变化<sup>[22]</sup>。当工作波长为 1550 nm 时, 硅基材料的载流子浓度与相关参数

理论模型可等效为无本征损耗模型进行讨论。利用时域耦合模理论<sup>[20-21]</sup>对其传输特性进行分析:

$$\frac{da}{dt} = i\omega_0 a - 4\tau a + \sqrt{2\tau} (S_{1+} + S_{2+} + S_{3+} + S_{4+}), \quad (1)$$

$$S_{1-} = S_{1+} - \sqrt{2\tau} a, \quad (2)$$

$$S_{2-} = S_{2+} - \sqrt{2\tau} a, \quad (3)$$

$$S_{3-} = S_{3+} + \sqrt{2\tau} a, \quad (4)$$

$$S_{4-} = S_{4+} - \sqrt{2\tau} a, \quad (5)$$

$$S_{2+} = S_{4-} \cdot \exp(i\varphi_1), \quad (6)$$

$$S_{4+} = S_{1-} \cdot \exp(i\varphi_2), \quad (7)$$

式中:  $t$  表示时间;  $a$  表示纳米梁腔谐振模式的振幅;  $S_{1+}, S_{2+}, S_{3+}, S_{4+}$  和  $S_{1-}, S_{2-}, S_{3-}, S_{4-}$  分别代表不同端口处的输入和输出振幅;  $\omega_0$  表示谐振腔的谐振频率;  $\varphi_1$  表示微腔与主波导反射臂之间的距离;  $\varphi_2$  表示微腔与下载波导反射臂之间的距离。对于任意频率, 透射率与反射率之和等于 1。当入射光只有  $S_{1+}$  时, 通过求解式 (1)~(7) 可以得到透射率  $T(\omega)$  的表达式为

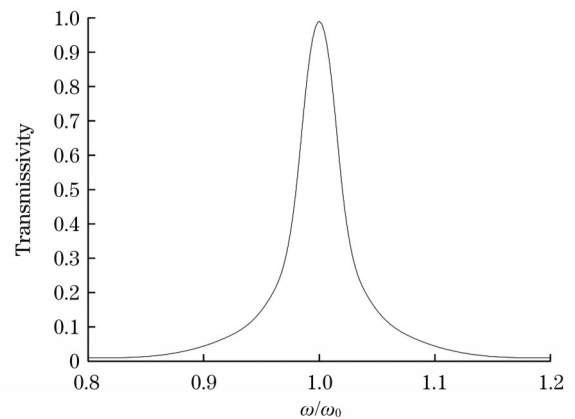


图 6 主线波导与谐振腔侧耦合结构理论透射谱

Fig. 6 Theoretical transmittance spectrum of side coupling structure between mainline waveguide and resonant cavity

之间的关系<sup>[21]</sup>为

$$n_c = -8.8 \times 10^{-22} N_e - 8.5 \times 10^{-18} N_h^{0.8}, \quad (9)$$

$$\alpha_c = 8.5 \times 10^{-18} N_e + 6.0 \times 10^{-18} N_h, \quad (10)$$

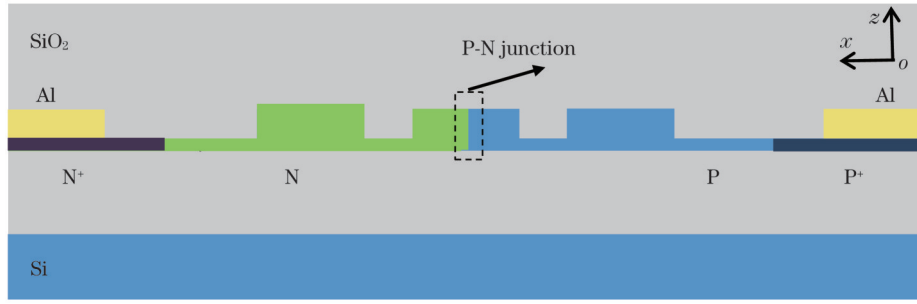


图 7 电光调制器硅基材料的掺杂示意图

Fig. 7 Doping diagram of electro-optic modulator silicon-based materials

式中： $n_c$ 为材料折射率； $\alpha_c$ 为吸收系数； $N_h$ 为单位体积内空穴浓度； $N_e$ 为单位体积内电子浓度。当载流子浓度达到  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时，硅材料的折射率变化可以达到  $-3 \times 10^{-3}$  [23]。

接下来利用商业光学软件 Lumerical 的 Device 模块对器件进行电学设计，利用 P<sup>+</sup>型重掺杂（掺杂载流子浓度  $p_{\text{doping}}^+ = 6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ）、N<sup>+</sup>型重掺杂（掺杂载流子浓度  $n_{\text{doping}}^+ = 5.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ）、P型轻掺杂（掺杂载流子浓度  $p_{\text{doping}} = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ）和 N型轻掺杂（掺杂载流子浓度  $n_{\text{doping}} = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ），在纳米梁腔的中心位置

处制备 PN 结。利用仿真软件进行仿真计算，调制电压从 0 V 增加到 1.5 V，每次增加的步长为 0.025 V。当调制电压达到 1.2 V 时，可以得到最佳值，此时纳米梁腔处 N 型载流子浓度和 P 型载流子浓度都达到了  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上，空穴浓度变化量  $\Delta N_h$  达到  $1.35 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，电子浓度变化量  $\Delta N_e$  达到  $1.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。调制电压为 1.2 V 时的载流子浓度分布如图 8 所示。

通过施加驱动电压，改变载流子浓度及谐振腔内材料的折射率。由式(9)可知，此时纳米梁腔的折射率变化量可以达到 0.004，谐振腔的谐振波长发生迁移。

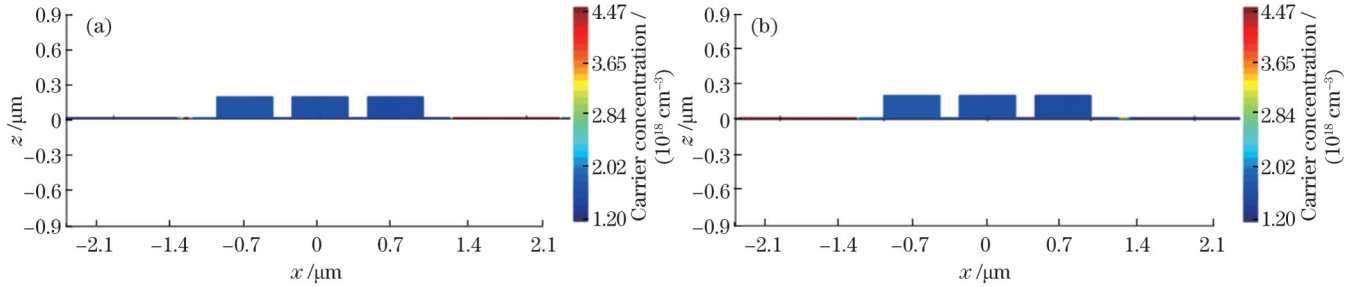


图 8 调制电压为 1.2 V 时的载流子浓度分布。(a) N 型载流子浓度；(b) P 型载流子浓度

Fig. 8 Carrier concentration distributions when modulation voltage is 1.2 V. (a) N type carrier concentration; (b) P type carrier concentration

本文所设计的电光调制器调制原理为缺陷模迁移，当加在电光调制器两端的调制电压发生变化时，纳米梁腔的折射率将产生微小的变化，从而导致该腔的谐振波长发生变化，电光调制器的中心波长发生迁移。即对应于原中心波长，调制电压的加与不加可以使调制器实现光信号“断”和“通”调制。

### 3 参数优化和性能分析

#### 3.1 电光调制器的结构参数优化

在本文提出的电光调制器中，纳米梁腔的中心渐变圆孔半径  $r_{\text{center}}$ 、最外侧圆孔半径  $r_{\text{end}}$ 、两侧反射圆孔周期数  $N_{\text{reflect}}$  以及光子晶体与两侧反射壁波导之间的距离间隔  $L$  对性能的影响最为明显。根据文献 [24-25] 中一维光子晶体微腔程式化设计方法，可以选取纳米梁腔的占空比，使其从波导的两端向中心线性增加，这样光在纳米梁腔中心处形成高斯镜像；并在圆孔最外

侧额外增加数个相同大小的镜像圆孔，利用所形成的反射壁增强光的局域能力，从而提高透射率与  $Q$  值。同时，在设计谐振腔型电光调制器时，一般会对品质因子进行限制，使其最多略大于  $10^4$  [26]。

一般情况下，中心圆孔的占空比为 0.2，最外侧圆孔的占空比为 0.1，占空比计算公式 [23] 为

$$f = \frac{\pi r^2}{a W_c}, \quad (11)$$

式中： $f$  为占空比； $W_c$  为纳米梁腔宽度； $r$  为圆孔的半径。从波导中心处开始计算，第  $j$  个圆孔的半径可表示为

$$r(j) = r_{\text{center}} - \frac{(j-1)(r_{\text{center}} - r_{\text{end}})}{j_{\text{max}} - 1}, \quad (12)$$

式中： $j_{\text{max}}$  为渐变圆孔最大个数。

根据式(11)~(12)， $r_{\text{center}}$  与  $r_{\text{end}}$  分别为 106 nm 和 76 nm。当工作波长为 1550 nm 时，优化为  $r_{\text{center}} =$

109 nm,  $r_{\text{end}}=79$  nm。

为了提高器件的性能,在纳米梁腔结构之外,添加反射壁纳米线波导结构以形成异质结结构,此时需要研究反射壁结构参数对谐振波长的限制作用,以降低纳米梁腔与两侧波导的耦合损耗。纳米梁腔和两侧波导之间的耦合损耗与结构在传输方向上对谐振光波的限制作用有关,限制作用越弱,耦合损耗就越大。调制器的透射率与谐振波长随反射圆孔周期数  $N_{\text{reflect}}$  的变化曲线如图 9 所示,随着  $N_{\text{reflect}}$  的增大,透射率先增大后减小,谐振波长增大。当  $N_{\text{reflect}}$  为 12 时,透射率最大,为 0.94,因此本文选择  $N_{\text{reflect}}=12$ 。

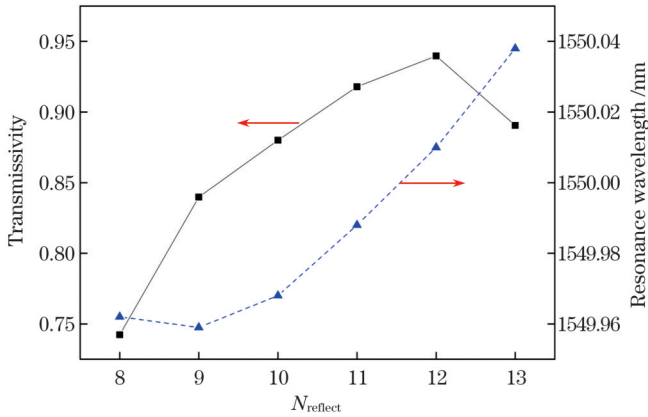


图 9 透射率与谐振波长随  $N_{\text{reflect}}$  的变化

Fig. 9 Transmissivity and resonance wavelength versus  $N_{\text{reflect}}$

图 10 为透射率与谐振波长随反射圆孔到渐变圆孔的距离  $\varphi$  的变化曲线,保持  $\varphi_1 = \varphi_2 = m\pi = \varphi$ , 在  $\varphi=4785$  nm 附近进行优化。在  $\varphi=4785$  nm 两侧,透射率先增大后减小,在  $\varphi=4785$  nm 处透射率取得最大,为 0.939749,谐振波长随着  $\varphi$  的增加而减小。因此本文选择  $\varphi=4785$  nm。

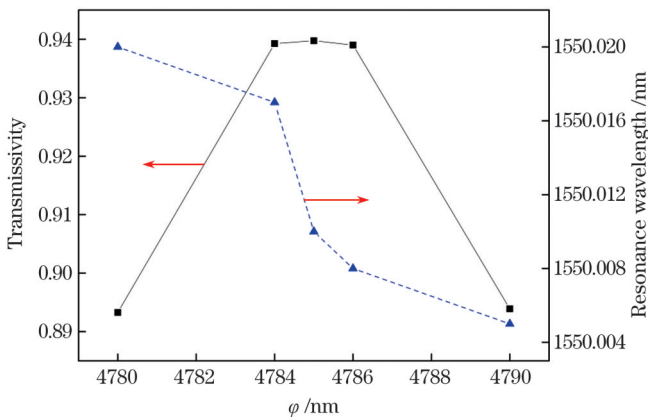


图 10 透射率与谐振波长值随  $\varphi$  的变化

Fig. 10 Transmissivity and resonance wavelength versus  $\varphi$

最后,对主线波导与纳米梁腔之间的耦合间距  $L$  进行优化。当耦合间距  $L$  由 200 nm 减小到 160 nm 时,调制器的透射率和  $Q$  值随耦合间距  $L$  的变化曲线如图 11 所示,随着耦合间距  $L$  的减小,透过率减小,同时

$Q$  值也减小。因此综合考虑品质因子  $Q$  和透射率,选择耦合间距  $L$  为 180 nm,此时  $Q$  值约为 7110,透射率为 0.939749。

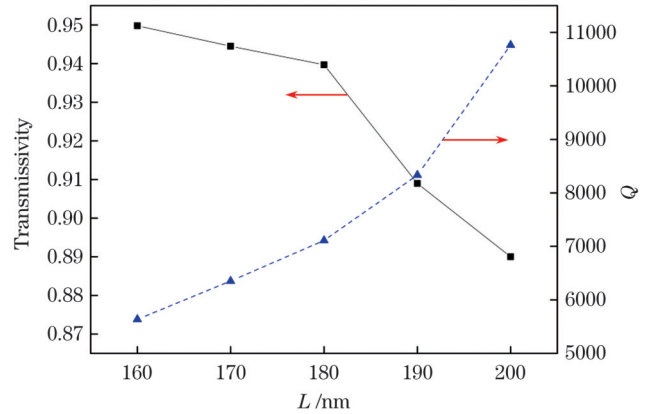


图 11 透射率和  $Q$  值随耦合间距  $L$  的变化

Fig. 11 Transmissivity and  $Q$  value versus coupling distance  $L$

### 3.2 电光调制器的性能分析

优化结构参数后,光子晶体反射壁下载型电光调制器的主线波导、PCNC 波导以及下载波导的宽度均为 550 nm,PCNC 与两侧波导之间的耦合距离为 180 nm。一维光子晶体纳米梁腔圆孔周期数为 26,镜面反射周期数为 6,中心圆孔半径为 109 nm,最外侧圆孔半径为 79 nm,主线波导与下载波导的圆孔周期数为 12,圆孔半径为 79 nm。圆孔周期常数为  $a=330$  nm。

仿真所得的调制器的光强分布如图 12 所示。横电 (TE) 模入射光从主波导入射,当其波长 (1550.01 nm) 与纳米梁腔谐振腔谐振波长一致时,光波耦合进入纳米梁腔,然后耦合进下载波导输出,此时调制器为“通”状态;当外加电压使得硅基材料纳米梁腔的折射率发生变化时,纳米梁腔的谐振波长发生变化,1550.01 nm 的入射波长与谐振波长不一致,光波不能进入纳米梁腔,因此,光波不能从下载波导输出,此时调制器为“断”状态。

光子晶体调制器的透射谱如图 13 所示,可以看出:当器件两侧金属电极不加电压时,谐振波长  $\lambda=1550.01$  nm,透射率达到最大 ( $T=0.936$ ),调制器处于“通”状态;在器件两侧金属电极上施加外加电压,使得光子晶体谐振腔的材料折射率发生变化,此时谐振腔的谐振波长迁移到 1548.48 nm,1550.01 nm 光波的透射率仅为 0.0037,调制器处于“断”状态。

此时,该结构的消光比  $E = 10 \lg \left( \frac{P_1}{P_0} \right) = 24$  dB ( $P_1$

和  $P_0$  分别为“通”和“断”状态下的信号光强),插入损

耗  $L_s = 10 \lg \left( \frac{I_{\text{in}}}{I_{\text{out}}} \right) = 0.2$  dB ( $I_{\text{in}}$  和  $I_{\text{out}}$  分别为输入和输出

光强),调制深度  $D = \frac{P_1 - P_0}{P_1} = 0.99$  (调制深度是表征调制器调制效果的性能参数)。

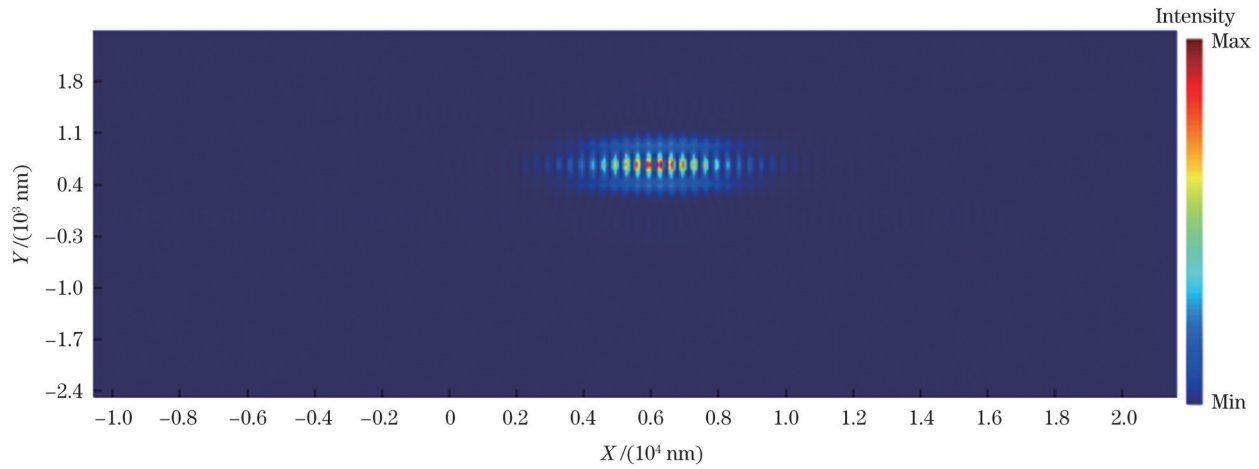


图 12 入射波长与谐振波长一致时稳定的光强分布

Fig. 12 Stable light intensity distribution when incident wavelength is consistent with resonant wavelength

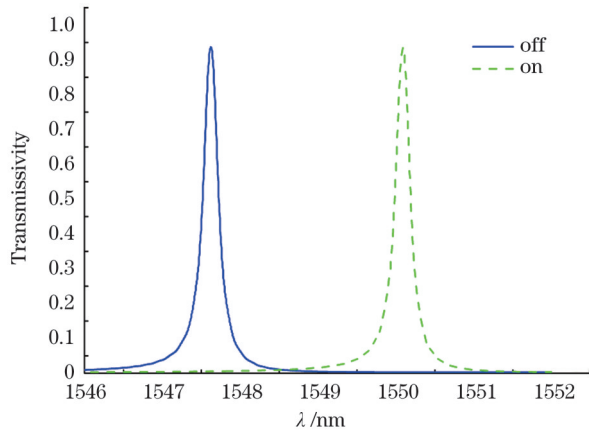


图 13 调制器在“通”“断”状态下的透射谱

Fig. 13 Transmission spectra of modulator at “on” and “off” states

调制速率  $V$  是指调制器单位时间内可调制的码元速率, 单位为 GHz, 表征电光调制器“通”“断”状态的转换速度, 与总响应时间  $t'$  有关, 它们之间的关系可以表示为

$$V = \frac{1}{t'} \quad (13)$$

而系统总响应时间  $t'$  主要受以下两方面影响: 材料的响应时间  $t_{re}$  和调制器的稳定时间  $t_s$ 。可表示为

$$t' = t_s + t_{re} \quad (14)$$

仿真计算得到调制器“通”“断”状态的稳定时间, 分别如图 14、15 所示, “通”和“断”状态的稳定时间分别为 85 ps 和 65 ps。当电压为 0~1.5 V 时, Si 材料的响应时间为 30 ps<sup>[27]</sup>。调制器的总响应时间为 115 ps, 计算可得调制器的调制速率为 8.7 GHz。

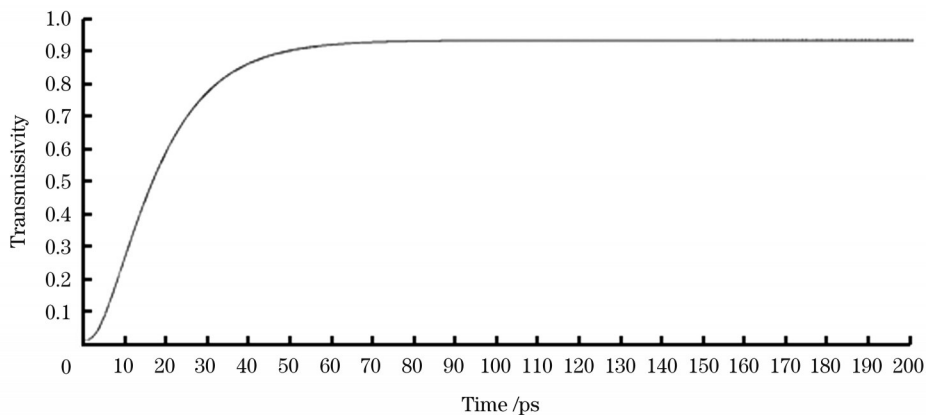


图 14 模拟计算得到的调制器“通”状态的稳定时间

Fig. 14 Stable time at “on” state of modulator obtained by simulation calculation

仿真计算得到的调制器 3 dB 带宽如图 16 所示, 此时掺杂浓度分别为  $n_{doping} = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $n_{doping}^+ = 5.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_{doping} = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_{doping}^+ = 6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。取驱动电压为 1.2 V, 仿真所用时间为  $0 \sim 1.5 \times 10^6 \text{ fs}$ 。当频率逐渐升高时, 可得调制器的 3 dB 带宽为

122 GHz。

图 17 为该调制器所对应的等效电路, 其中  $R_c$  为硅-金属的接触电阻,  $C'$  是由金属-硅-金属异质结构组成的平板电容<sup>[28]</sup>:

$$C' = \frac{\epsilon S}{d}, \quad (15)$$

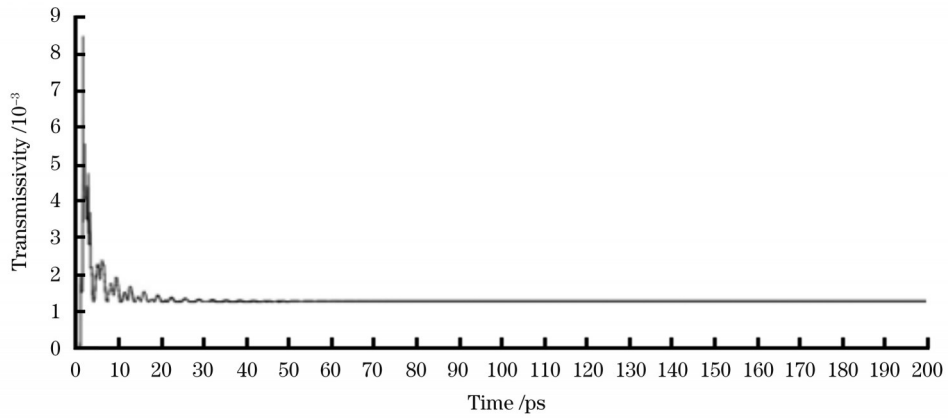


图 15 模拟计算得到的调制器“断”状态的稳定时间

Fig. 15 Stable time at “off” state of modulator obtained by simulation calculation

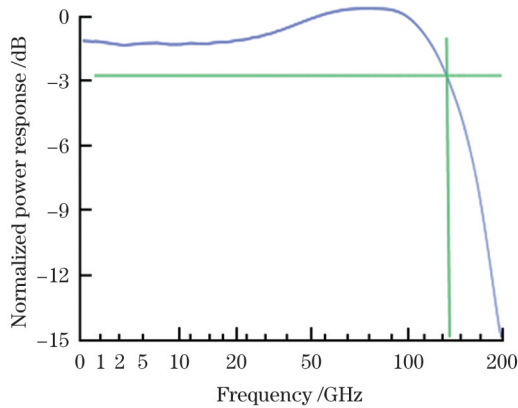


图 16 模拟计算得到的调制器 3 dB 带宽

Fig. 16 3 dB bandwidth of modulator obtained by simulation calculation

式中： $\epsilon$ 为绝缘介质层硅的介电常数； $S$ 为金属相对面积； $d$ 为绝缘介质层的相对长度。计算得到该电容器的电容为 11.6 pF，则调制器的驱动功耗为 4.17 pJ/bit。

将本文所设计的调制器性能与文献[14-18]的调制器性能进行比较，结果如表1所示。可以看出：本文所设计的电光调制器性能优良，调制电压均小于文献[14, 16-17]中调制器的电压，且能耗低；在低驱动电压下，本文所设计的电光调制器的消光比、调制带宽均是文献[15]中调制器的2倍，也比文献[18]中的高；调制速率高于以往的纳米梁腔电光调制器，尺寸也在微米量级，能够更好地应用在集成光子回路中，应用前景更加宽广。

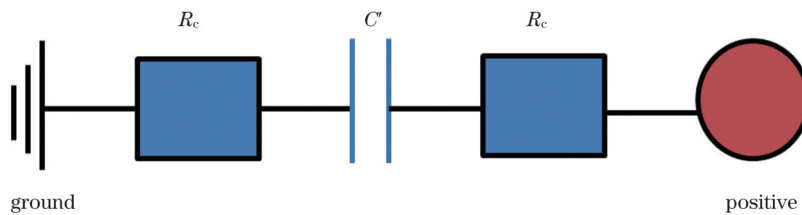


图 17 调制器的等效电路

Fig. 17 Equivalent circuit of modulator

表 1 纳米梁腔电光调制器的性能对比

Table 1 Performance comparison of nanowire cavity electro-optic modulators

| Device                      | Device area / $\mu\text{m}^2$ | Extinction ratio / dB | Insertion loss / dB | Bias voltage / V | Q factor | Modulation bandwidth / GHz | Modulation frequency / GHz | Ref. |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------|------------------|----------|----------------------------|----------------------------|------|
| 1D Fabry-Perot resonator    | >6                            | 5.87                  | 5.1                 | 4.8              | 780      | <10                        | -                          | [14] |
| 1D silicon photonic crystal | >10                           | 11                    | -                   | >1.1             | 20000    | 59                         | -                          | [15] |
| Graphene-silicon hybrid     | 20                            | 12.5                  | -                   | 6.4              | 5000     | ~133                       | -                          | [16] |
| 1D silicon photonic crystal | 25                            | 18.2                  | 0.04                | 1.175            | 11000    | 90                         | 8.3                        | [18] |
| Multilayer stack            | -                             | <10                   | -                   | >5               | ~600     | -                          | -                          | [17] |
| Our device                  | 54                            | 24                    | 0.2                 | 1.2              | 7110     | 122                        | 8.7                        | -    |

## 4 结 论

提出了一种基于 SOI PCNC 的反射壁下载型电光调制器,在一维 PCNC 两侧增加空气孔,形成反射壁下载型结构。根据缺陷模迁移理论,在谐振腔两侧通过掺杂形成 PN 结,通过施加驱动电压改变谐振腔内材料的折射率,从而谐振波长发生迁移,实现调制器对光信号的“通”与“断”调制。仿真结果表明,该电光调制器与其他纳米梁腔电光调制器相比,具有调制带宽及调制速率大、消光比高、结构简单、尺寸较小等优点,可以应用在双层光刻胶电子束曝光工艺中[29],而且易与其他硅光子器件级联,在高速大容量光通信系统和集成硅光子技术等领域中具有重要的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Huang W C, Ma C Y, Li C, et al. Highly stable MXene ( $V_2CT_x$ )-based harmonic pulse generation[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(8): 2577-2585.
- [2] Wang C, Xu J W, Wang Y Z, et al. MXene ( $Ti_2NT_x$ ): synthesis, characteristics and application as a thermo-optical switcher for all-optical wavelength tuning laser[J]. *Science China Materials*, 2021, 64(1): 259-265.
- [3] 周恒超, 王春阳, 王子硕, 等. 硅基光波导光学相控阵多光束形成方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(11): 1123001.  
Zhou H C, Wang C Y, Wang Z S, et al. Multibeam formation method for silicon-based optical waveguide phased array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(11): 1123001.
- [4] 孔祥壮, 李金花, 罗晓曼, 等. 基于偏置纳米线的石墨烯表面等离激元调制器[J]. *光学学报*, 2021, 41(19): 1923001.  
Kong X Z, Li J H, Luo X M, et al. Graphene surface plasmon polariton modulator based on biased nanowires[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 1923001.
- [5] Xie Y W, Zhuang L M, Jiao P C, et al. Sub-nanosecond-speed frequency-reconfigurable photonic RF switch using a silicon modulator[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(6): 852-857.
- [6] Huang W C, Zhang Y, You Q, et al. Enhanced photodetection properties of tellurium@selenium roll-to-roll nanotube heterojunctions[J]. *Small*, 2019, 15(23): e1900902.
- [7] Bruel M. Silicon on insulator material technology[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(14): 1201-1202.
- [8] Jalali B, Yegnanarayanan S, Yoon T, et al. Advances in silicon-on-insulator optoelectronics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1998, 4(6): 938-947.
- [9] Wang M K, Zhu J, Zi Y, et al. Functional two-dimensional black phosphorus nanostructures towards next-generation devices[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(21): 12433-12473.
- [10] Huang W C, Wang M M, Hu L P, et al. Recent advances in semiconducting mono-elemental selenium nanostructures for device applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(42): 2003301.
- [11] Liu A S, 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.
- [12] Liao L, Liu A, Rubin D, et al. 40 Gbit/s silicon optical modulator for high-speed applications[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(22): 1196.
- [13] 潘万乐, 陈鹤鸣, 庄煜阳, 等. 基于纳米线波导和一维光子晶体纳米梁腔的模式-波分混合解复用器[J]. *光学学报*, 2021, 41(4): 0413001  
Pan W L, Chen H M, Zhuang Y Y, et al. Hybrid demultiplexer for mode-wavelength division based on nanowire waveguides and one-dimensional photonic crystal nanobeam cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0413001.
- [14] Schmidt B, Xu Q F, Shakyia J, et al. Compact electro-optic modulator on silicon-on-insulator substrates using cavities with ultra-small modal volumes[J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 3140-3148.
- [15] Shakoor A, Nozaki K, Kuramochi E, et al. Compact 1D-silicon photonic crystal electro-optic modulator operating with ultra-low switching voltage and energy[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28623-28634.
- [16] Pan T, Qiu C Y, Wu J Y, et al. Analysis of an electro-optic modulator based on a graphene-silicon hybrid 1D photonic crystal nanobeam cavity[J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23357-23364.
- [17] Liu H Q, Liu P G, Bian L A, et al. Electro-optic modulator side-coupled with a photonic crystal nanobeam loaded graphene/ $Al_2O_3$  multilayer stack[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(4): 761-774.
- [18] 徐文凯, 陈鹤鸣, 胡宇宸. 基于 SOI 的一维光子晶体纳米梁腔电光调制器[J]. *光电子·激光*, 2021, 32(7): 791-798.  
Xu W K, Chen H M, Hu Y C. Design of SOI-based one-dimensional photonic crystal nanobeam cavity electro-optic modulator[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2021, 32(7): 791-798.
- [19] Takano H, Song B S, Asano T, et al. Highly efficient multi channel drop filter in a two-dimensional hetero photonic crystal[J]. *Optics Express*, 2006, 14(8): 3491-3496.
- [20] Xu W, Zhu Z H, Liu K, et al. Chip-integrated nearly perfect absorber at telecom wavelengths by graphene coupled with nanobeam cavity[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(14): 3256-3259.
- [21] Piper J R, Fan S H. Total absorption in a graphene monolayer in the optical regime by critical coupling with a photonic crystal guided resonance[J]. *ACS Photonics*, 2014, 1(4): 347-353.
- [22] Soref R A, Bennett B R. Electrooptical effects in silicon[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, 23(1): 123-129.
- [23] 王帆. 硅基的环形谐振腔光调制器和光开关的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.  
Wang F. The study of the Si-based ring-resonator optical modulator and switch[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [24] Quan Q M, Loncar M. Deterministic design of wavelength scale, ultra-high Q photonic crystal nanobeam cavities[J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18529-18542.
- [25] Quan Q M, Deotare P B, Loncar M. Photonic crystal nanobeam cavity strongly coupled to the feeding waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(20): 203102.
- [26] 祁彪. 新型硅基光子晶体调制器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.  
Qi B. Study of silicon photonic crystal modulator[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [27] Terada Y, Miyasaka K, Kondo K, et al. Optimized optical coupling to silica-clad photonic crystal waveguides[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(22): 4695-4698.
- [28] Lian T H, Yang K D, Wang X B, et al. Electro-absorption optical modulator based on graphene-buried polymer waveguides[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(4): 20049364.
- [29] 湛洽强, 阎大伟, 熊政伟, 等. 亚微米尺寸金属电极的制备工艺[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2015, 13(4): 646-648, 658.  
Zhan Z Q, Yan D W, Xiong Z W, et al. Preparation of submicron-sized metal electrodes[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2015, 13(4): 646-648, 658.



# Download Type Electro-Optic Modulator with Reflective Wall Based on Photonic Crystal Nanowire Cavity

Zhu Wenling<sup>1</sup>, Chen Heming<sup>2\*</sup>, Xu Wenkai<sup>1</sup>, Hu Yuchen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Flexible Electronics (Future Technology) & College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China

## Abstract

**Objective** With the development of optical interconnection and high-speed optical communication, electro-optic modulators have become a research hotspot. Silicon insulator materials have the advantages of compatibility with the complementary metal oxide semiconductor process, high integration, low power consumption, and high temperature resistance. There are several electro-optic modulators based on silicon materials. Electro-optic modulators with high modulation rate, compact size, and easy integration have been investigated previously, and the study on electro-optic modulators is crucial. Therefore, we design an electro-optic modulator with a reflective wall based on a one-dimensional photonic crystal nanowire cavity (PCNC). The modulator exhibits a high extinction ratio, large modulation bandwidth, and high modulation rate. Furthermore, it has a compact and simple structure and can easily cascade other silicon photonic devices. With the development of integrated photonics in communication systems, the cascade of silicon photonic devices has a wider application prospect.

**Methods** This study proposes a download-type electro-optic modulator with a reflective wall based on a silicon-on-insulator (SOI) one-dimensional PCNC. The main line waveguide, one-dimensional PCNC and download-type waveguide are used to form a download-type structure with a reflective wall. The duty cycle of the nanowire cavity decreases linearly from the center of the waveguide to the two ends, and doping is introduced at both sides of the modulator to form PN junctions. The finite difference time domain (FDTD) model in the optical simulation software Lumerical is used for simulation analysis. According to the free carrier dispersion effect in the silicon material, when the modulation voltage applied at both ends of the electro-optic modulator changes, the dielectric constant of the nanowire cavity material also changes. The refractive index change in the nanowire cavity produces a slight difference; hence, the resonant frequency of the cavity changes, i. e., the central wavelength of the electro-optic modulator shifts. Specifically, corresponding to the wavelength of 1550.01 nm, the addition or non-addition of the modulation voltage is equivalent to the “off” or “on” state of the modulator.

**Results and Discussions** An electro-optic modulator with a reflective wall based on the SOI PCNC is proposed. The incident light is coupled into the one-dimensional PCNC after passing through the main line waveguide, and then coupled again to output through the download-type waveguide. The adjustments of the position and number of reflective circular holes in the main line waveguide and download-type waveguide are beneficial to improve the overall transmittance of the device. The nanowire cavity uses a gradual circular hole to confine the beam in the cavity. PN junction is generated by doping on both sides of the nanowire cavity, and a low bias voltage is applied to adjust the resonant wavelength of the nanowire cavity, to realize the “on” and “off” modulation of the optical signal at the working wavelength. 3D-FDTD is used to analyze the optical characteristics and electrical performance of the modulator. The results indicate that the electro-optic modulator can modulate the optical signal with the wavelength of 1550.01 nm, and the transmittances under the “off” and “on” states are 0.0037 and 96.34%, respectively (Fig. 14). The modulation voltage is only 1.2 V, the insertion loss is 0.2 dB, the extinction ratio is 24 dB, and the size is only 54  $\mu\text{m}^2$ . The modulation frequency is 8.7 GHz, and the modulation bandwidth can reach 122 GHz, which implies that the proposed device has applications in optical communication and integrated photonics. In addition, after comparing the performances of the photonic crystal electro-optic modulators (Table 1), it is inferred that the proposed device exhibits excellent performance.

**Conclusions** This study proposes a download-type electro-optic modulator with a reflective wall based on SOI one-dimensional PCNC. The downloadable structure of the reflection wall comprises a main line waveguide, one-dimensional PCNC, and downloadable waveguide. The doping method is introduced to form PN junctions at both sides of the modulator. Under the action of the modulation voltage, the refractive index of the silicon in the nanowire cavity changes, which triggers the migration of defect modes in the nanowire cavity; in addition, the “on” and “off” state modulations of the electro-optic modulator are realized. The electro-optical modulation is simulated and analyzed via the 3D-FDTD model in the Lumerical commercial simulation software. The simulation results demonstrate that compared with other electro-optical modulators based on nanowire cavity, the proposed electro-optical modulator has a higher extinction ratio, higher modulation bandwidth, higher modulation rate, compact and simple structure, and can easily be cascaded to other silicon photonic devices. The proposed electro-optic modulator exhibits a significant development and application value in the integrated photonics of optical communication.

**Key words** optical communications; carrier dispersion effect; finite difference time domain method; photonic crystal nanowire cavity; silicon-based waveguide; electro-optic modulator