

## 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。提出了一种基于硅绝缘体(silicon-on-insulator, SOI)材料的光子晶体纳米梁腔(photonic crystal nanowire cavity, PCNC)反射壁下载型电光调制器。入射光经过主线波导后耦合进入一维光子晶体纳米梁腔,随后再次耦合进入下载波导输出。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,施加较低偏压以调节纳米梁腔的谐振波长,从而实现对工作波长光信号“通”和“断”状态的调制。应用三维时域有限差分(3D-finite difference time domain, 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/CJL202249.1706003

## 1 引言

随着信息技术的发展,光子作为一种新的信息载体,被用来开发出越来越多的新的互联技术和集成方法。光子学的发展目标是实现集成光路,集成光路是将各个光器件,例如激光器<sup>[1-2]</sup>、光波导<sup>[3]</sup>、光调制器<sup>[4]</sup>、光开关<sup>[5]</sup>以及光探测器<sup>[6]</sup>等集成在一块芯片上,使芯片具有收发处理信息的功能。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。硅绝缘体(silicon-on-insulator, SOI)材料具有与互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semi-conductor, CMOS)工艺相兼容、集成度高、功耗低和耐高温等优点<sup>[7]</sup>,以其作为光子学材料<sup>[8]</sup>的纳米结构发展迅速<sup>[9-10]</sup>,目前已出现了许多基于硅材料的电光调制器。如2004年,研究者报道了基于硅材料的马赫-曾德尔干涉仪型电光调制器<sup>[11]</sup>,并且在2007年采用反向PN结将其传输速度提升至40 Gbit/s<sup>[12]</sup>。

一维光子晶体纳米梁腔(photonic crystal nanowire cavity, PCNC)具有品质因子高、模体积小、易于与光波导耦合集成等优点<sup>[13]</sup>。目前,利用一维光子晶体纳米梁腔实现调制器的方式主要有两种。一种

是光波直接耦合进入纳米梁腔。如2007年Schmidt等<sup>[14]</sup>首次在硅基一维光子晶体微腔上实现了超紧凑电光调制器,2014年Shakor等<sup>[15]</sup>在厚度为220 nm的SOI平台上实验制备得到了硅基纳米梁腔电光调制器。另一种是采用主线波导与纳米梁腔侧耦合的方法设计调制器。如2015年Pan等<sup>[16]</sup>提出了一种基于石墨烯-硅混合一维光子晶体纳米梁腔的电光调制器,2018年Liu等<sup>[17]</sup>提出了基于石墨烯/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ 多层堆叠(GAMS)的光子晶体纳米梁腔侧耦合电光调制器,但都有消光比不高、功耗较大的不足。2021年,徐文凯等<sup>[18]</sup>提出了一种基于SOI一维光子晶体纳米梁腔的侧耦合型电光调制器。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光子晶体纳米梁腔的反射壁下载型电光调制器。利用主线波导、一维光子晶体纳米梁腔及下载波导制备反射壁下载型结构,使纳米梁腔的占空比从波导的中央向两端线性减小,并

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2021-12-24; 录用日期: 2022-01-05

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

在调制器两侧掺杂以形成 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,具有易于集成、功耗低、损耗小的特点。

## 2 结构模型与理论分析

本文设计的电光调制器的三维结构如图 1 所示。衬底为硅,包层为二氧化硅。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、下载波导、纳米梁腔、Si 薄层以及两侧的 Al 电极。

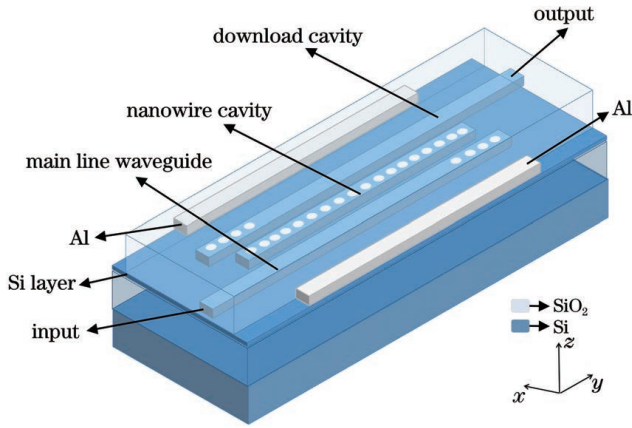


图 1 反射壁下载型电光调制器的三维结构

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

电光调制器的在  $xz$  上的截面如图 2 所示。Si 衬底层厚度为  $2\ \mu\text{m}$ ,  $\text{SiO}_2$  包层厚度为  $4\ \mu\text{m}$ ; 主线波导、下载波导和纳米梁腔的厚度 ( $h$ ) 为  $200\ \text{nm}$ , 宽度为  $W=550\ \text{nm}$ , 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  $0.2\ \text{nm}$ , 两金属之间的距离为  $3.9\ \text{nm}$ 。

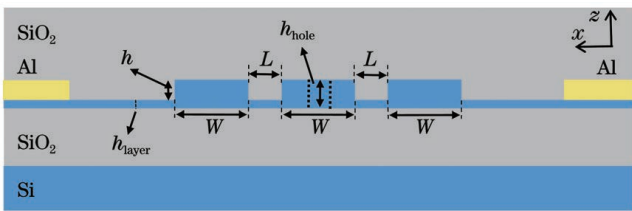


图 2 电光调制器剖面图

Fig. 2 Sectional drawing of electro-optic modulator

调制器中光子晶体纳米梁腔和反射圆孔的结构与参数分别如图 3、4 所示,所有圆孔高度均为  $h_{\text{hole}}=220\ \text{nm}$ , 当选定工作波长为  $1550\ \text{nm}$  时,经过仿真优化,周期常数固定为  $a=330\ \text{nm}$ 。

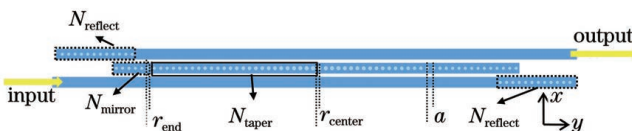


图 3 光子晶体纳米梁腔结构图

Fig. 3 Structural schematic of photonic crystal nanowire cavity

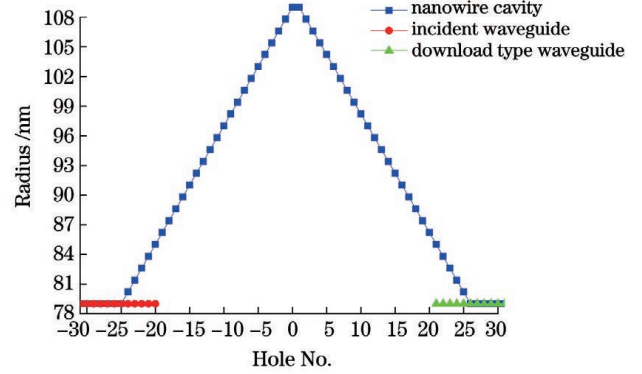


图 4 圆孔参数图

Fig. 4 Circular hole parameter diagram

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  $r_{\text{reflect}}=79\ \text{nm}$ ; 纳米梁腔的渐变周期数  $N_{\text{taper}}=26$ , 镜面周期数  $N_{\text{mirror}}=6$ ; 圆孔半径由中心处的  $r_{\text{center}}=109\ \text{nm}$  经过一次渐变减至  $r_{\text{end}}=79\ \text{nm}$ 。

本文设计的电光调制器属于带反射壁的下载型结构<sup>[19]</sup>, 建立的侧耦合结构理论模型如图 5 所示, 其中  $\tau_i, \tau_r, \tau_d, \tau_t$  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:  $a$  表示纳米梁腔谐振模式的振幅;  $t$  表示时间;  $S_{i+}$  和  $S_{i-}$  (端口编号  $i=1, 2, 3, 4$ ) 分别代表输入、输出振幅;  $\omega_0$  表示谐振频率;  $\varphi_1$  表示微腔与主波导反射

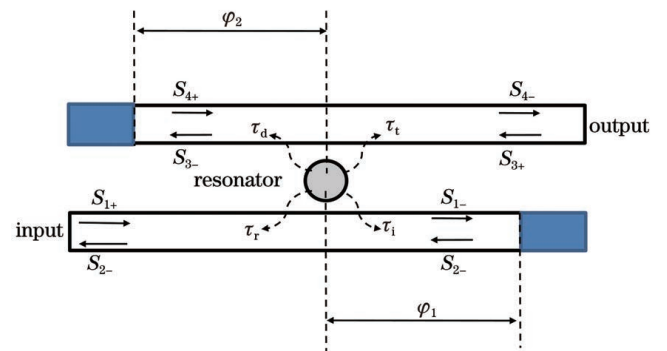


图 5 侧耦合结构理论模型图

Fig. 5 Theoretical model of side coupling structure

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

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

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。

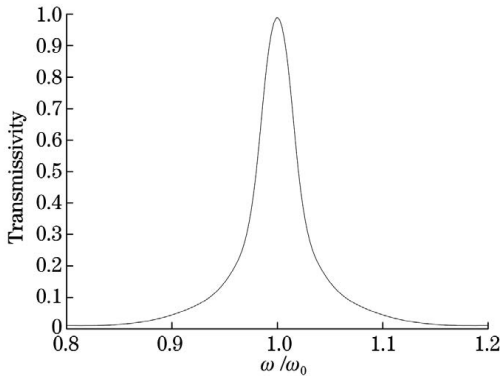


图 6 侧耦合结构理论透射率谱线图

Fig. 6 Theoretical transmittance spectrum of side coupling structure

通过掺杂在纳米梁腔及左右两侧的 Si 薄层上制备 PN 结, 如图 7 所示。同时在 Si 薄膜两端加载 Al 电极, P 型掺杂侧接正极, N 型掺杂侧接负极。

按照硅材料中自由载流子色散 (free carrier dispersion, 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, 材料的有效折射率也会

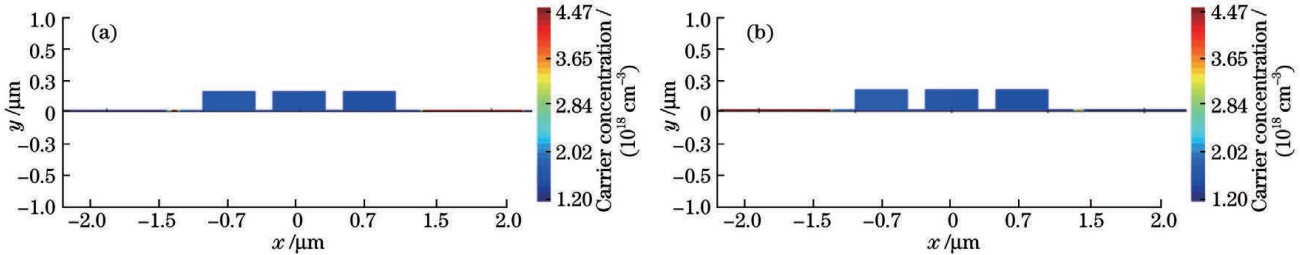


图 8 调制电压为 1.2 V 时的载流子浓度分布。(a) N 型载流子浓度; (b) P 型载流子浓度

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

由式(10)可知, 在所设计的光电调制器中, 纳米梁腔处的载流子浓度发生变化, 引起纳米梁腔处硅介质的介电常数发生变化, 此时纳米梁腔的折射率变化量可以达到 0.004, 最终导致谐振腔的中心谐振频率发生变化。

本文所设计的光电调制器属于缺陷模迁移型, 当光电调制器两端所加调制电压发生变化时, 纳米梁腔材料的介电常数将发生改变, 纳米梁腔的折射率产生

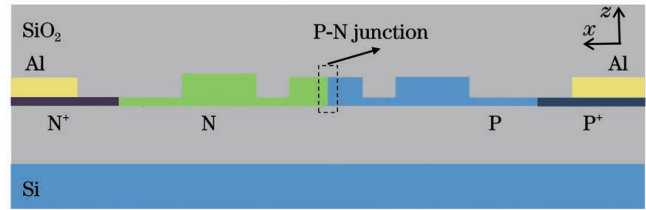


图 7 光电调制器的掺杂示意图

Fig. 7 Doping diagram of electro-optic modulator

发生变化<sup>[22]</sup>。当硅材料的工作波长为 1550 nm 时, 载流子浓度与相关参数的关系<sup>[21]</sup>为

$$\alpha_c = 8.5 \times 10^{-18} N_e + 6.0 \times 10^{-18} N_h, \quad (9)$$

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

式中:  $\alpha_c$  为吸收系数;  $n_c$  为材料折射率;  $N_e$  为单位体积内电子浓度;  $N_h$  为单位体积内空穴浓度。随着载流子浓度的增大, 吸收系数逐渐增大, 而折射率逐渐减小, 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  $-3 \times 10^{-3}$ <sup>[23]</sup>。

利用 Lumerical 仿真软件中的 Device 模块对调制器进行电学设计, 利用 P<sup>+</sup> 型重掺杂 (掺杂载流子浓度  $p_{\text{doping}}^+ = 6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )、P 型轻掺杂 (掺杂载流子浓度  $p_{\text{doping}} = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ )、N<sup>+</sup> 型重掺杂 (掺杂载流子浓度  $n_{\text{doping}}^+ = 5.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) 和 N 型轻掺杂 (掺杂载流子浓度  $n_{\text{doping}} = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ), 在纳米梁腔中心位置处制备 PN 结。利用仿真软件, 以 0.025 V 为步长, 调制电压从 0 V 变化到 1.5 V。仿真最优结果为调制电压达到 1.2 V 时, 纳米梁腔处 P 型载流子浓度和 N 型载流子浓度都达到了  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上。计算 0 V 和 1.2 V 两种情况下的载流子浓度可知, 电子浓度变化量  $\Delta N_e$  达到  $1.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 空穴浓度变化量  $\Delta N_h$  达到  $1.35 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。调制电压为 1.2 V 时的载流子浓度分布如图 8 所示。

微小的变化, 从而腔的谐振频率发生变化, 光电调制器的中心波长发生偏移。即对应于原中心波长处, 调制电压的加与不加相当于调制器的“断”和“通”状态。

### 3 结构参数优化和性能分析

#### 3.1 光电调制器的结构参数优化

在本文提出的光电调制器中, 影响性能的主要参数包括纳米梁腔中渐变圆孔半径  $r_{\text{center}}$  与  $r_{\text{end}}$ 、主线波

导与下载波导中反射圆孔周期数  $N_{\text{reflect}}$ 、主线波导和纳米梁腔之间的耦合间距  $L$  及下载波导和纳米梁腔之间的耦合间距  $L$ 。根据程式化的一维光子晶体微腔设计法<sup>[24-25]</sup>, 纳米梁腔的占空比从波导的中心向两端线性减少, 光在腔中心形成高斯镜像, 并通过在圆孔最外侧额外增加数个相同大小的镜像圆孔, 可以进一步增强光的局域能力, 提高  $Q$  值与透射率。同时, 在设计谐振腔型电光调制器时, 一般会限制其品质因数最多略大于  $10^4$ <sup>[26]</sup>。

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<sup>[23]</sup>为

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

式中:  $f$  为占空比;  $r$  为圆孔的半径。从波导中央开始算起, 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:  $j_{\text{max}}$  为渐变圆孔个数最大值。

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  $r_{\text{center}} = 109 \text{ nm}$ ,  $r_{\text{end}} = 79 \text{ nm}$ 。

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, 以降低纳米梁腔耦合到两侧波导的耦合损耗。纳米梁腔耦合到两侧波导的耦合损耗与结构对谐振光波在传输方向上的限制作用有关, 限制作用越强, 耦合损耗就越低。本文所设计的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  $N_{\text{reflect}} = 12$ 。

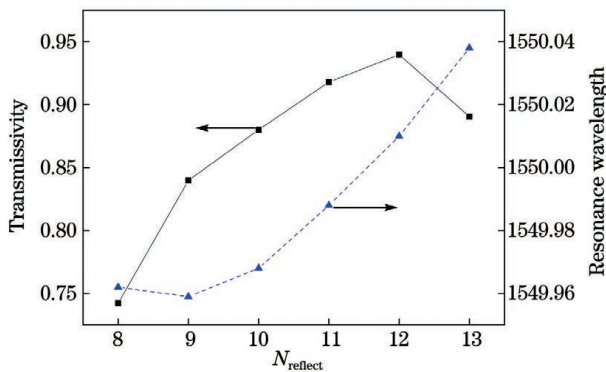


图 9 透射率与谐振波长随  $N_{\text{reflect}}$  的变化

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  $\varphi = 4785 \text{ nm}$  附近进行优化。在  $\varphi = 4785 \text{ nm}$  两侧, 透射率先增大后减小, 在  $\varphi = 4785 \text{ nm}$  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

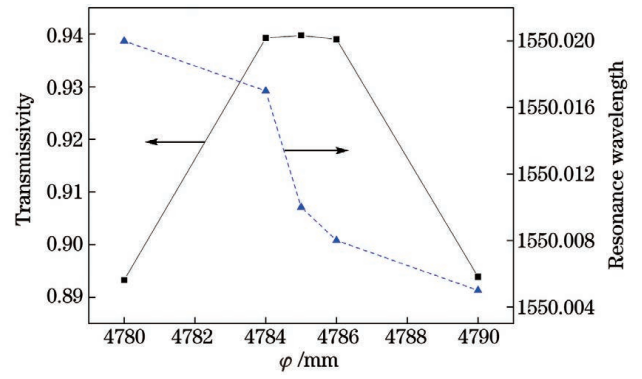


图 10 透射率与谐振波长值随  $\varphi$  的变化

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

此本文选择  $\varphi = 4785 \text{ nm}$ 。

最后, 对主线波导与纳米梁腔之间的耦合间距  $L$  及下载波导和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 减小至 160 nm 时, 调制器的透射率与  $Q$  值随耦合间距  $L$  的变化如图 11 所示, 随着耦合间距  $L$  的减小, 透过率减小, 同时  $Q$  值减小。因此综合考虑吸收率和  $Q$  值, 选择耦合间距  $L$  为 180 nm, 此时透射率为 0.939749,  $Q$  值约为 7110。

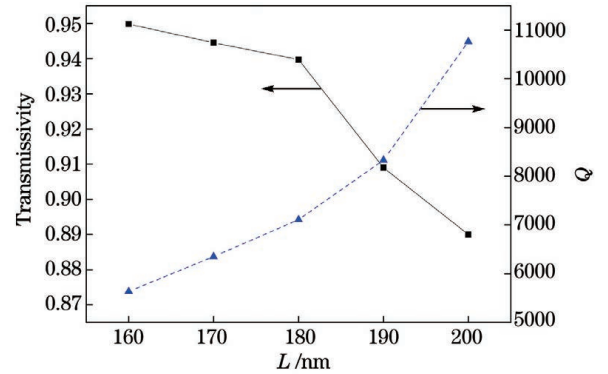


图 11 透射率和  $Q$  值随耦合间距  $L$  的变化

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

### 3.2 电光调制器的性能分析

经过优化, 主线波导、下载波导和纳米梁腔的宽度  $W = 550 \text{ nm}$ , 主线波导与纳米梁腔之间的耦合间距以及下载波导与纳米梁腔之间的耦合间距均为  $L = 180 \text{ nm}$ 。圆孔之间的周期常数  $a = 330 \text{ nm}$ 。纳米梁腔的渐变周期数  $N_{\text{taper}} = 26$ , 镜面周期数  $N_{\text{mirror}} = 6$ ; 圆孔半径由中心  $r_{\text{center}} = 109 \text{ nm}$  经过一次渐变减至  $r_{\text{end}} = 79 \text{ nm}$ 。反射圆孔周期数  $N_{\text{reflect}} = 12$ , 半径  $r_{\text{reflect}} = 79 \text{ nm}$ 。

利用 Lumerical 仿真软件中的 3D-FDTD Solution 模块仿真所得的光强分布如图 12 所示。纳米梁腔的谐振波长为  $\lambda = 1550.01 \text{ nm}$ , 在仿真中输入波长范围为  $1545 \sim 1555 \text{ nm}$  的横电 (transverse electric, TE) 模式波。当入射波长与谐振波长一致时, 入射波长为  $1550.01 \text{ nm}$  的 TE 模式光波进入纳米梁腔后再次耦合进入下载波导输出, 对应调制器的“通”状态。而当硅基材料纳米梁腔的折射率发生改变

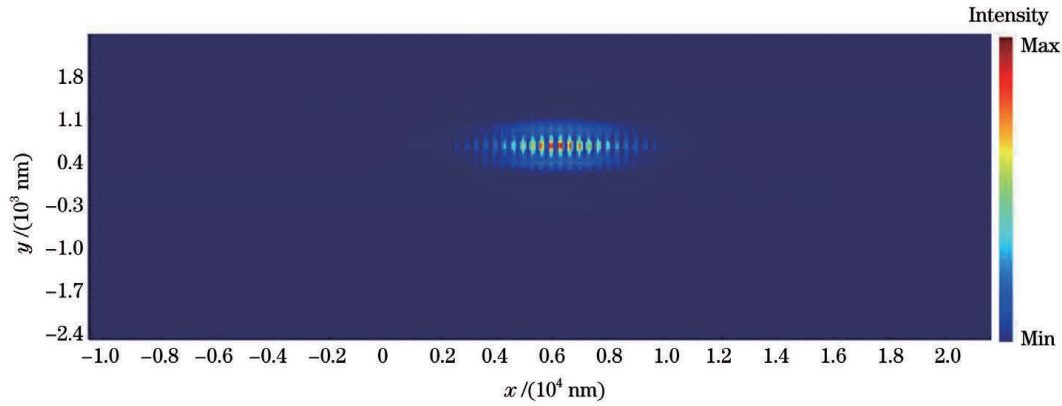


图 12 入射波长与谐振波长一致时稳定的光强分布

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

时,纳米梁腔的谐振波长也会改变,此时 1550.01 nm 波长与谐振波长不一致,光波不能耦合进入纳米梁腔,因此,由于光场限制耦合作用,光波不能进入下载波导输出,对应调制器的“断”状态。

图 13 为仿真计算所得到的调制器透射谱。可以看出,当器件两端不加载偏置电压时,中心波长  $\lambda = 1550.01$  nm 处的调制器透射率最大,为 0.936;当器件两端加载的调制电压引起纳米梁腔折射率变化  $\Delta n = 0.004$  时,中心波长移至  $\lambda = 1548.48$  nm 处,此时原中心波长  $\lambda = 1550.01$  nm 处的透射率为 0.0037。

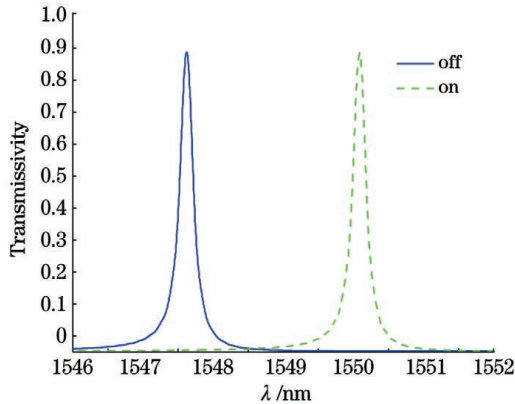


图 13 调制器在“通”、“断”状态下的透射谱

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

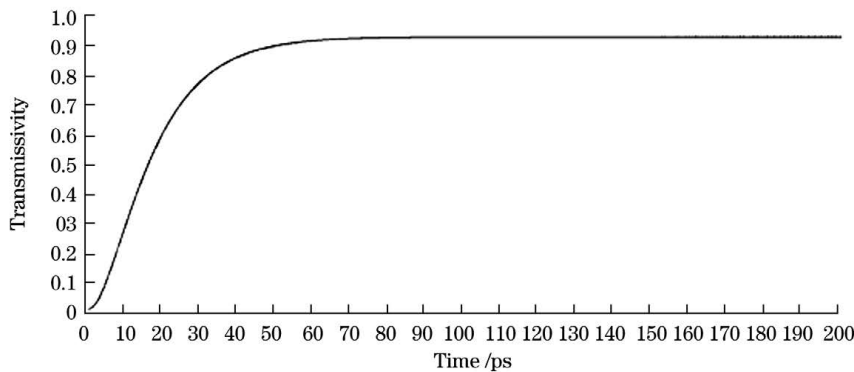


图 14 模拟计算得到的调制器“通”状态的稳定时间

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

此时,该结构的消光比  $E = 10\lg\left(\frac{P_1}{P_0}\right) = 24$  dB ( $P_1$  为通状态下的信号光强,  $P_0$  为断状态下的信号光强,消光比的单位为 dB);插入损耗  $L_s = 10\lg\left(\frac{I_{in}}{I_{out}}\right) = 0.2$  dB ( $I_{in}$  是输入光强,  $I_{out}$  是输出光强);调制深度为  $D = \frac{P_1 - P_0}{P_1} = 0.99$  (调制深度越大,调制效果越好)。

调制速率  $V$  是指调制设备单位时间内可调制的码元速率,单位为 GHz,反映的是硅基电光调制器“通”、“断”状态的转换速度,与调制器的系统总响应时间  $t'$  有关,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  $t_{re}$  及调制器的稳定时间  $t_s$ 。可表示为

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

利用 Lumerical 仿真软件中的 FDTD 模块仿真得到的调制器“通”、“断”状态的稳定时间分别如图 14、15 所示,“通”状态的稳定时间约为 85 ps,“断”状态的稳定时间约为 65 ps。当电压为 0~1.5 V 时,Si 在电场控制下的响应时间为 30 ps<sup>[27]</sup>。因此,调制器的系统总响应时间为 115 ps,根据式(13)计算可得,调制器调制速率为 8.7 GHz。

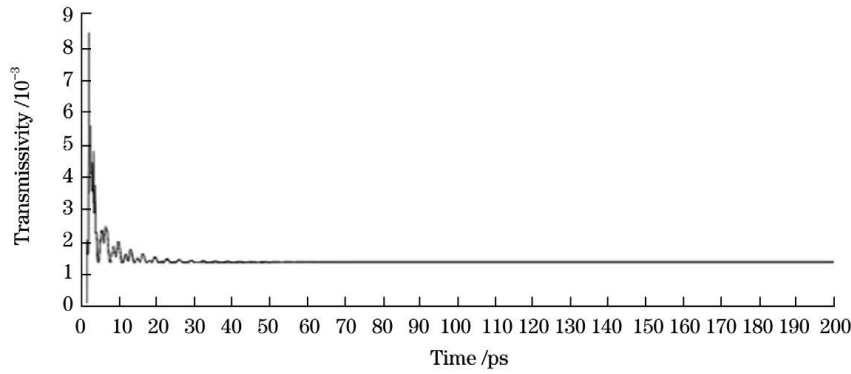


图 15 模拟计算得到的调制器“断”状态的稳定时间

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

利用 Lumerical 仿真软件中的 Device 模块仿真得到的调制器 3 dB 带宽如图 16 所示, 掺杂浓度分别为  $n_{\text{doping}} = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $n_{\text{doping}}^+ = 5.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_{\text{doping}} = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_{\text{doping}}^+ = 6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。仿真电压为 1.2 V, 仿真时间为  $0 \sim 1.5 \times 10^6 \text{ fs}$ 。当频率逐渐升高时, 可得调制器的 3 dB 带宽为 122 GHz。

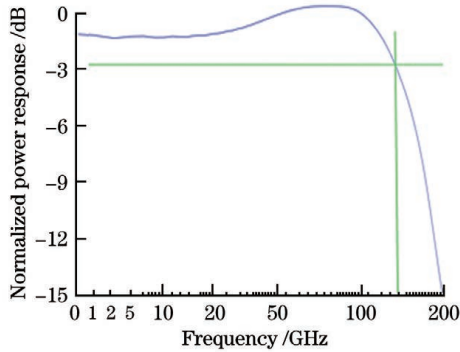


图 16 模拟计算得到的调制器 3 dB 带宽

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

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>:

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

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。

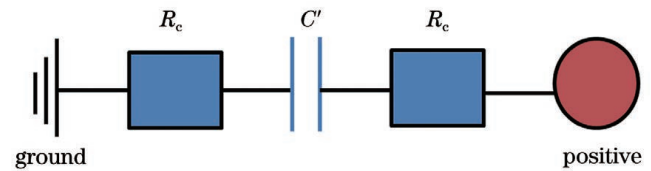


图 17 调制器的等效电路

Fig. 17 Equivalent circuit of modulator

将本文所设计的调制器性能与近年来其他纳米梁腔电光调制器的相关性能作对比, 结果如表 1 所示。从表 1 可以看出, 本文所设计的电光调制器尺寸并非最小, 但仍具有微米级的尺寸, 整体性能优良, 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]中调制器消光比和调制带宽的两倍, 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, 具有良好的应用前景。

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 光子晶体纳米梁腔的反射壁下载型电光调制器,利用主线波导、下载波导与一维光子晶体纳米梁腔制备了反射壁下载型结构,利用掺杂的方式在调制器两侧制备了 PN 结。在调制电压的作用下,纳米梁腔处硅折射率的变化引起纳米梁腔内缺陷模的迁移,从而实现了电光调制器的“通”和“断”状态的调制。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,消光比高,调制带宽及调制速率大,结构紧凑且简单,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子体调制器[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 radio frequency 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 (Weinheim an Der Bergstrasse, Germany)*, 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: 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, 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, Basak J, et al. 40 Gbit/s silicon optical modulator for high-speed applications [J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(22): 51-52.
- [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分-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, Shakya 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]. *光子学报*, 2021, 50(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.

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

Zhu Wening<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 many electro-optical modulators based on silicon materials. Electro-optic modulators with high modulation rate, small size and easy integration have been studied. The study about electro-optic modulators is of great significance. Therefore, we design a electro-optic modulator with reflective wall based on one-dimensional photonic crystal nanowire cavity. It has a high extinction ratio, large modulation bandwidth and modulation rate. The device has a compact and simple structure and is easy to cascade other silicon photonic devices. The cascade of silicon photonic devices has huge application prospects in the development of integrated optical devices and high-speed and large-capacity communication systems.

**Methods** This paper proposes a download type electro-optic modulator with reflective wall based on silicon-on-insulator (SOI) one-dimensional photonic crystal nanowire cavity. The main line waveguide, one-dimensional photonic crystal nanowire cavity and download type waveguide are used to form a download type structure with reflective wall. The duty cycle of the nanowire cavity decreases linearly from the center of the waveguide to the two ends, and the doping at both sides of the modulator is introduced 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 of the nanowire cavity produces a slight difference, so that the resonant frequency of the cavity changes, that is, the central wavelength of the electro-optic modulator shifts. That is, corresponding to the wavelength of 1550.01 nm, the addition or non-addition of the modulation voltage is equivalent to the “off” state or “on” state of the modulator.

**Results and Discussions** Based on the SOI one-dimensional photonic crystal nanowire cavity (PCNC), an electro-optic modulator with reflective wall is proposed. The incident light is coupled into the one-dimensional photonic crystal nanowire cavity 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 the download type waveguide are beneficial to improve the overall transmittance of the device. The nanowire cavity adopts a cylindrical tapered aperture, which makes the beam better confined in the cavity. At the same time, doping is introduced on both sides of the nanowire cavity to form a PN junction, and a low bias voltage is applied to adjust the resonant wavelength of the nanowire cavity, so as to realize the “on” and “off” modulation of the optical signal at the working wavelength. The 3D-FDTD is used to analyze the optical characteristics and electrical performance of the modulator. The results show that the electro-optic modulator can modulate the optical signal with the wavelength of 1550.01 nm, and the transmittance 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 show that the proposed device can be applied in integrated photonic devices and high-speed optical communications field. In addition, after comparing the performances of the photonic crystal electro-optic modulators (Table 1), one knows that the device proposed here has excellent performances.

**Conclusions** This paper proposes a download type electro-optic modulator with reflective wall based on SOI one-dimensional photonic crystal nanowire cavity. The main line waveguide, download type waveguide and one-dimensional photonic crystal nanowire cavity are used to form a download type structure with reflective wall. 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 causes the migration of defect modes in the nanowire cavity,



and the “on” and “off” state modulations of the electro-optic modulator are realized. The electro-optical modulation is simulated and analyzed by the 3D-FDTD model in the Lumerical commercial simulation software. The simulation results show that compared with other electro-optical modulators based on nanowire cavity, the proposed electro-optical modulator has higher extinction ratio, higher modulation bandwidth, higher modulation rate, compact and simple structure, and being easy to cascade other silicon photonic devices. The proposed electro-optical modulator has huge application potential in the development of integrated optical devices and high-speed and large-capacity communication systems.

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