

基于光子晶体和纳米线波导的马赫-曾德尔型调制器*

胡宇宸¹, 陈鹤鸣^{2*}, 周昊天¹

(1. 南京邮电大学 光电工程学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京邮电大学 贝尔英才学院, 江苏 南京 210023)

摘要:提出了一种基于光子晶体和纳米线波导的马赫-曾德尔型调制器. 该调制器由硅基光子晶体平板波导、纳米线波导和光子晶体多模干涉耦合器(MMI)构成. 在光子晶体与纳米线波导连接处采用了锥型结构,用于减少模式失配造成的损耗. 利用时域有限差分法(3D-FDTD)进行仿真分析,结果表明,该调制器在工作波长 1550 nm 下的插入损耗为 0.3 dB,消光比为 15.1 dB,器件尺寸仅 46 μm \times 8 μm \times 0.22 μm ,调制带宽可以达到 68 GHz,且工作区域覆盖了以 1551 nm 为中心波长 20 nm 的通信波段. 该调制器结构紧凑,易于集成,可应用于高速光通信系统.

关键词:光子晶体;调制器;多模干涉耦合;马赫-曾德尔型

中图分类号:O43 **文献标识码:**A

Mach-Zehnder modulator based on photonic crystal and nanowire waveguide

HU Yu-Chen¹, CHEN He-Ming^{2*}, ZHOU Hao-Tian¹

(1. College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: A Mach-Zehnder modulator based on photonic crystal and nanowire waveguide is proposed. The modulator consists of silicon-based photonic crystal slab waveguides, nanowire waveguides, and two photonic crystal multimode interference couplers (MMI). Designed tapered structures are working at the junction of the photonic crystal and the nanowire waveguide to reduce the loss caused by the mode mismatch. The simulation analysis by time-domain finite difference method (3D-FDTD) shows that the insertion loss and extinction ratio of the modulator with a compact size of only 46 μm \times 8 μm \times 0.22 μm at the operating wavelength of 1550 nm are 0.3 dB, 15.1 dB, respectively. The operation with a wavelength range of 20 nm are obtained at a center wavelength of 1551 nm. The 3dB bandwidth can reach 68 GHz, which allows high speed optical communication systems.

Key words: photonic crystal, modulator, multimode interference coupling, Mach-Zehnder type

PACS: 42. 79. Hp, 42. 30. Lr, 42. 70. Qs, 42. 79. Gn

引言

光子晶体是一种人工周期性介电材料,基于光子晶体的光子晶体波导具有结构紧凑、易于集成、低损耗传输的特点. 目前,利用光子晶体波导已成功设计与制作出偏振分束器^[1-2]、全光逻辑

门^[3]、调制器^[4-6]、波分复用/解复用器^[7-8]、光开关^[9-10]等各种新型光子器件. 调制器在光通信中具有非常重要的地位,马赫-曾德尔型调制器是光通信中常见的调制器,目前,此类调制器大多数是由普通的条形波导组成,由于在普通条形波导中传播常数的变化 $\Delta\beta$ 太小,为了使光可以得到足够的

收稿日期:2018-12-23,修回日期:2019-05-28

Received date: 2018-12-23, revised date: 2019-05-28

基金项目:国家自然科学基金(61077084, 61571237),江苏省自然科学基金(BK20151509)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61077084, 61571237), and Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (BK2015150)

作者简介 (Biography): 胡宇宸(1994-),男,江苏南京人,博士研究生,主要研究领域为基于光子晶体的光通信器件. E-mail: hundeduwu@126.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: chhm@njupt.edu.cn

相移,波导的长度非常长.光子晶体波导具有慢光效应,可以降低光速,适合制作成慢光器件^[11].最早由 Soljagic^[12]提出的将硅基马赫-曾德尔调制器与光子晶体波导相结合的想法,增加了相位调制的效率,将整个器件长度减少了几数量级,其缺点是牺牲了光带宽.由 M. Nikoufard^[13]提出的光子晶体马赫-曾德尔型调制器,通过将光子晶体多模干涉耦合区中零阶模与二阶模之间的介质柱半径按 $5a$ 到 $3a$ 的规律减小,缩短了耦合区长度,但器件厚度达 $4.5 \mu\text{m}$,工作带宽仍然较窄.由 Terada Y^[14-15]等提出的光子晶体马赫-曾德尔调制器采用晶格平移光子晶体波导结构,获得较大的工作带宽,同时对交错型,锯齿形等 PN 结结构进行性能分析,然而器件尺寸偏大,达到 $200 \mu\text{m}$,不利于集成. Rao^[16]等人首次提出将非晶硅作为光子晶体马赫-曾德尔型调制器的制作材料,利用非晶硅优良的电光效应提升了调制效率,但工作带宽较窄,制造工艺要求严苛.最近, Hinakura^[17]等人提出将曲线电极引入光子晶体马赫-曾德尔调制器,用于减少 RF 信号与光子晶体波导中慢光之间的相位失配,同时引入通用接地结构,使电极两端具有相同的电位差,代价是较大的尺寸和更高的制造精度.以上文献所述均是基于光子晶体与纳米线波导级联的马赫-曾德尔型调制器,但是都没有提到纳米线波导与光子晶体波导级联时模式失配问题^[18].虽然直接耦合可以达到调制效果,但若要将调制器用在高度级联的集成系统中,必然会对整体系统的运作产生不可忽略的影响,因此设计一种用于解上述问题的优化结构十分重要.

文献[19]采用光子晶体与纳米线波导直接级联的马赫-曾德尔型调制器,结构简单且紧凑,但是性能有待提高.本文对调制器结构进行改进,增加了用于降低纳米线波导与光子晶体波导之间级联损耗的锥形结构,提高了调制器的性能指标.采用光子晶体多模干涉耦合器作为分波合波模块,尺寸小,分波效率高达 48%;整体尺寸只有 $46 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m} \times 0.22 \mu\text{m}$,易于集成.工作波段可覆盖以 1551 nm 为中心的 20 nm 的通信波段, 3 dB 带宽达到 68 GHz ,插入损耗为 0.3 dB ,消光比为 15.1 dB .该光调制器对于未来光网络中集成光子模块具有重要价值.

1 理论模型与分析

1.1 基于光子晶体和纳米线波导的马赫-曾德尔型调制器理论模型分析

本文提出的基于光子晶体和纳米线波导马赫-曾德尔型调制器理论模型如图 1 所示.其中 S_i ($i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$) 表示在光波的传输过程中,光所处不同位置时的波振幅.例如: S_{3-1} 为光在纳米线波导(图 1 灰色区域)中的波振幅; S_{4-1} 为光在光子晶体波导(图 1 白色区域)中的波振幅. δ 表示纳米线波导与光子晶体线缺陷波导级联时的等效耦合系数.根据功率守恒和精确步长理论(Exact-Step-Theory)^[20]对其传输特性进行分析.

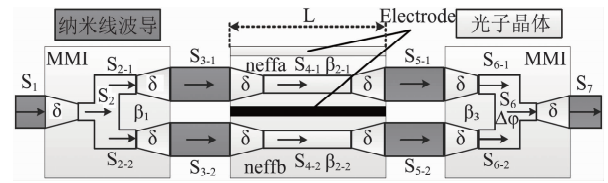


图 1 基于光子晶体和纳米线波导的马赫-曾德尔型调制器理论模型

Fig. 1 Theoretical model of the Mach-Zehnder modulator based on photonic crystal and nanowire waveguide

波振幅之间满足如下关系:

$$S_{i+1} = S_i \cdot \delta \quad (1)$$

振幅为 S_1 的光从左端输入, φ_1 为初始相位,输入光波 E_1 的表达式为:

$$E_1 = S_1 e^{-i\varphi_1} \quad (2)$$

图 1 中下标 -1 、 -2 分别代表上下两个调制臂.假设 3 dB 耦合器 MMI 分光比为 $1:1$,分波损耗为 β_1 .由于经过 MMI 分光后每路的光波 E_{2-1} 、 E_{2-2} 具有相同的相位 φ_2 ,两束光波可表示为:

$$E_{2-1} = \sqrt{\beta_1} \frac{1}{2} S_1 \cdot \delta \cdot e^{-i\varphi_2} \quad (3)$$

$$E_{2-2} = \sqrt{\beta_1} \frac{1}{2} S_1 \cdot \delta \cdot e^{-i\varphi_2} \quad (4)$$

图 1 上下两个调制臂的有效折射率分别为: $n_{\text{eff}a}$ 和 $n_{\text{eff}b}$,长度为 L ,传输损耗分别为: β_{2-1} 和 β_{2-2} .未施加电压时,两个调制臂的输出光波振幅、相位相等,施加电压后,由于调制臂的有效折射率发生变化,导致两个调制臂的输出光波相位不同,此时输出的光波可以表示为:

$$E_{5-1} = \sqrt{\beta_1} \frac{1}{2} S_1 \cdot \delta^4 \cdot e^{-i(\varphi_2 + k_0 n_{\text{eff}a} L)} - \beta_{2-1} L \quad (5)$$

$$E_{5-2} = \sqrt{\beta_1} \frac{1}{2} S_1 \cdot \delta^4 \cdot e^{-i(\varphi_2 + k_0 n_{\text{eff}b} L)} - \beta_{2-2} L \quad (6)$$

两束光经过 MMI 复合后,输出的两个光场相互干涉,设合波损耗为 β_3 ,联立式(1-6),透射率为:

$$T = \left| \frac{S_7}{S_1} \right|^2 = \beta_1 \beta_3 \delta^{12} \left(\frac{1}{2} e^{-2\beta_{2-1}L} + \frac{1}{2} e^{-2\beta_{2-2}L} + e^{-\beta_{2-1}L - \beta_{2-2}L} \cos(k_0 n_{\text{eff}a} L - k_0 n_{\text{eff}b} L) \right), \quad (7)$$

由式(7)可以看出, MMI 耦合损耗 β_1, β_3 , 调制臂传输损耗 β_{2-1} 和 β_{2-2} , 调制臂长度 L , 纳米线波导与光子晶体波导的耦合系数 δ^{12} 都会影响输出光的干涉效果. 文献[12-17]忽略了因素 δ^{12} , 而 δ^{12} 对于损耗有重要影响.

根据精确步长理论 (Exact-Step-Theory)^[20], 在光子晶体中的锥形区中以晶格常数为步长, 等效成若干个大小依次减小的矩形波导, 并通过计算每个矩形波导间的耦合系数, 等效矩形间的耦合系数 ϑ 可表示为^[19]:

$$\vartheta_{v\mu}^{(\alpha, \gamma)} = \frac{\omega \alpha |\psi_{\mu}^{*(\alpha)}|}{2P \psi_{\mu}^{*(\alpha)} (\psi_{\mu}^{*(\alpha)} - \psi_{v}^{*(\gamma)})} \iint E_v^{(\gamma)} \cdot E_{\mu}^{*(\alpha)} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} d_x d_y, \quad (8)$$

其中上标 α, γ 代表传输方向, 取值为 +1 表示与输入光波方向相同的正向传输, -1 则表示反向; 下标 v, μ 分别表示等效宽、窄矩形; ω 为角频率; ψ 为相位系数, 当考虑有损情况时, ψ 为传播常数; E 为电场; ϵ 为介电常数; P 为功率因子. 式(8)中的相位差 $\psi_{\mu}^{*(\alpha)} - \psi_{v}^{*(\gamma)}$ 越大, 耦合系数越低^[19], 意味着直接将两个传播常数不同的纳米线波导和光子晶体波导级联时, 耦合性能不理想. 令传输方向为正向传输, 以迭代的方式可以计算出整个锥形区的等效耦合系数:

$$\delta = \vartheta_{v_1 u_1}^{+1, +1} \vartheta_{v_2 u_2}^{(+1, +1)} \vartheta_{v_3 u_3}^{(+1, +1)} \dots; (v_{i+1} = u_i) \quad (9)$$

1.2 载流子色散效应

由式(7)可知, 理想条件下, 传输损耗 β_{2-1}, β_{2-2} 为 0, $k_0 n_{\text{eff}a} L - k_0 n_{\text{eff}b} L = \Delta\varphi$, 当 $\pi\varphi$ 为 π 时, 没有输出光强, 这是由于硅在施加了调制电压后, 发生载流子等离子色散效应导致调制臂有效折射率的变化所导致. 在马赫曾德尔调制器中, 大多采用硅材料, 而硅基材料的光电特性较弱, 为了获得高的调制速率, 采用等离子色散效应是一个合适的方法. 硅等离子体色散效应原理基于 Soref^[21] 等的研究成果, 包括硅体材料中自由载流子色散 (Free Carrier Dispersion, FCD) 效应和自由载流子吸收 (Free Carrier Absorption, FCA) 效应. 其中光波的相位变化受 FCD 效应的影响, 而 FCA 效应则改变光波的幅度, 当硅基材料处在工作波长为 1550 nm 附近时, 载流子浓度及相应参数 [空穴和电子浓度变化 $\Delta N_h, \Delta N_e$; 单位长度吸收系数的变化 $\Delta\alpha_c$; (单位: cm^{-1}); 材料中折

射率的变化 Δn_c 相应关系为^[21]:

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

$$\Delta n_c = -8.8 \times 10^{-22} \Delta N_e - 8.5 \times 10^{-18} (\Delta N_h)^{0.8}, \quad (11)$$

上式分别为硅基材料的吸收系数和折射率随着载流子浓度变化的对应关系式. 由式(10)和式(11)可知, 随着载流子浓度的增大, 吸收系数逐渐增大, 而折射率将逐渐减小. 考虑到硅材料廉价、可量产等优势, 本文设计的基于光子晶体和纳米线波导的马赫-曾德尔型调制器选择硅材料.

1.3 多模干涉耦合器分析

本文中光束的分波、合波均采用光子晶体多模干涉耦合器, 结构如图 2 中(1)所示, 同样采用了用于优化条形宽波导与光子晶体窄波导级联的锥形结构. 当输入端采用对称入射时, 零阶和二阶模式的传播常数分别记为: β_0 和 β_2 , 二重像位置 L_2 应满足下列条件^[22]:

$$L_2 = \frac{(2k-1)\pi}{(\beta_0 - \beta_2)}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

单重像和二重像的位置均是周期性地出现在传播方向上且交替出现, 此时需要关注的仅仅是第一个二重像位置 ($k=1$) 为:

$$L_2 = \frac{\pi}{(\beta_0 - \beta_2)} \quad (13)$$

本文中光子晶体多模干涉耦合器的第一个二重像位置在距离多模区域输入端约 3.31 μm 处, 即多模干涉耦合区长度 d 仅 3.31 μm , 器件大小为 7.1 $\mu\text{m} \times 5.8 \mu\text{m}$. 结构十分紧凑, 有利于集成.

2 结构设计与性能分析

2.1 结构设计

设计的光子晶体平板是一种由圆空气孔按三角晶格排列, 沿二维平面周期性分布的结构, 平板材料为硅 (折射率为 3.48). 晶格常数 $a = 0.42 \mu\text{m}$, 空气孔 (折射率为 1) 半径 $r = 0.12 \mu\text{m}$, 且贯穿整个平板 (空气孔高度为 0.22 μm). 经仿真计算得到该光子晶体的带隙分布如图 2 所示. 从图 2 中可以看出, 归一化频率 ($\omega a / 2\pi c$) 范围在 0.2398 ~ 0.39079, 对应的通带范围在 1.1 ~ 1.751 μm 之间.

设计的基于光子晶体和纳米线波导的马赫-曾德尔型调制器结构如图 3 所示. 由两个光子晶体多模干涉耦合器, 两个光子晶体平板波导, 通过纳米线波导相连组成, 电极加在调制臂的上下两侧. 它包括二维三角晶格光子晶体多模干涉耦合器(1)、多模干涉耦合区(2)、纳米线波导(3)、二维三角晶格光

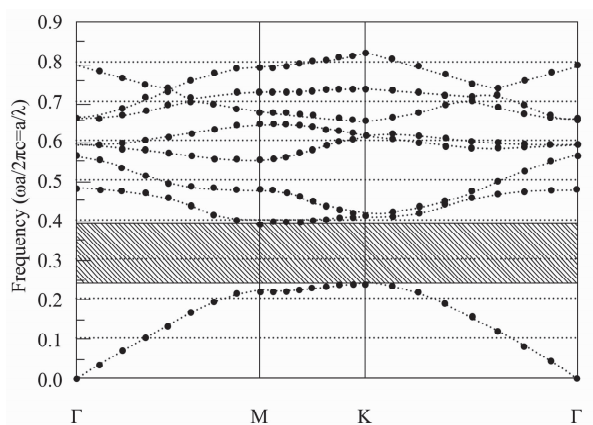


图2 光子晶体带隙结构图

Fig. 2 Photonic crystal band gap diagram

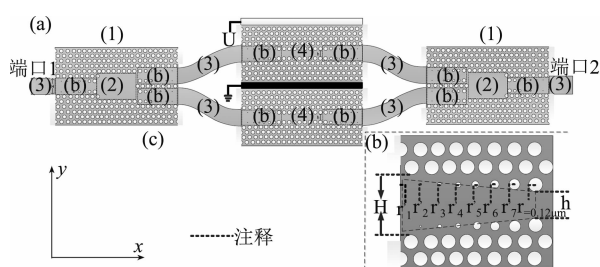


图3 基于光子晶体和纳米线波导的新型马赫-曾德尔型调制器结构

Fig. 3 Novel Mach-Zehnder modulator structure based on photonic crystal and nanowire waveguide

子晶体平板波导(4). 其中,二维三角晶格光子晶体多模干涉耦合器(1)和二维三角晶格光子晶体平板波导(4)是沿 X - Y 平面周期性分布的空气孔型光子晶体平板结构,其基质材料为硅,在光子晶体平板中移除一排空气孔形成线缺陷波导(波导宽度 $h = 0.46 \mu\text{m}$);多模干涉耦合区(2)是通过在一块二维三角晶格光子晶体平板中间移除 5×7 个空气孔构成;锥形区域(b)是通过在光子晶体与纳米线波导级联处依次将空气孔缩小而构成的锥形区域. 两电极之间的光子晶体平板波导为调相臂,未加电极的光子晶体平板波导为参考臂. 底部白色材料(SiO_2 、厚度 $2 \mu\text{m}$)为基底,纳米线波导(3)宽度为 $H = 1.21 \mu\text{m}$.

2.2 锥形结构对模式失配的影响

引入锥形结构可以减少模式失配的影响,改善纳米线宽波导与光子晶体窄波导级联的性能. 下面对锥形结构的优化设计进行分析,如图4所示,级联总体可分为以下三种情况:(a)、纳米线宽波导 $W1$ 与光子晶体窄波导 $W2$ 直接级联;(b)、纳米线窄波

导 $W1'$ 与光子晶体窄波导 $W2$ 直接级联;(c)、纳米线宽波导 $W1$ 与引入锥形优化结构的光子晶体窄波导 $W2$ 级联;上述三种结构如图4所示. 在实际分析计算中,三种结构分别独立设计并计算,而图4中仅为方便比较,将三种情况的结构图拼接在一起. 设光波传输方向由左水平向右,利用三维时域差分法(3D-FDTD)分别计算每种结构在输入光源波长为 $1.53 \mu\text{m}$ 至 $1.57 \mu\text{m}$ 时输出端的透射率,所得到的透射谱分别如图5(a)、(b)和(c)所示,可以明显看出,采用锥型优化结构(c)的输出效果最为理想,而结构(a)、(b)的输出端透射率偏低. 这是由于光子晶体线缺陷波导中的导光机制为禁带效应,而传统纳米线波导中的导光机制为全内反射效应,两种导光机制下的传播常数不同^[24],直接级联势必造成模式失配. 对于级联方式(a)而言,已有实验结果称^[25]宽波导 $W1$ 中的模态在突然过渡到窄波导 $W2$ 时,由于严重的模态失配将导致大量散射损耗.

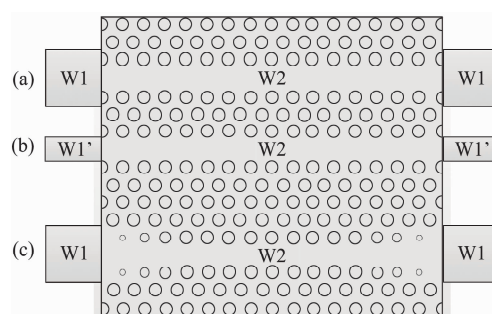


图4 纳米线波导与光子晶体波导级联的三种结构

Fig. 4 Three structures of the nanowire waveguides cascaded with photonic crystal waveguides

将光子晶体锥形区域的空气孔半径 r_n' 表示为 $r_n' = \frac{r}{c}(n-1)$ 且 $n \leq c+1$, 其中 r 为光子晶体空气孔半径, c 为锥形区域中一侧的光子晶体空气孔个数; n 为锥形区域中光子晶体空气孔的序号. 以图2(b)为例,此时 $c = 7$, $r = 0.12 \mu\text{m}$, 故第一个空气孔 ($n=1$) 的半径为 $r_1' = 0 \mu\text{m}$; 第二个空气孔 ($n=2$) 的半径为 $r_2' = 0.017 \mu\text{m}$; 直到 $n = c+1 = 7$ 时,即锥形区域的最后一个空气孔,与原光子晶体空气孔半径相等,另一侧的空气孔半径计算方法同理. 利用三维时域差分法(3D-FDTD)分别计算不同 c 的锥形结构在 $1.53 \mu\text{m}$ 至 $1.57 \mu\text{m}$ 光源下输出端的透射率. c 分别取 2 至 8, 透射率计算结果如图6所示.

当 $c = 7$ 时,该锥形级联结构透射效果最为理想,而 $c = 8$ 也同样具有较为理想的透射谱,但 c 的

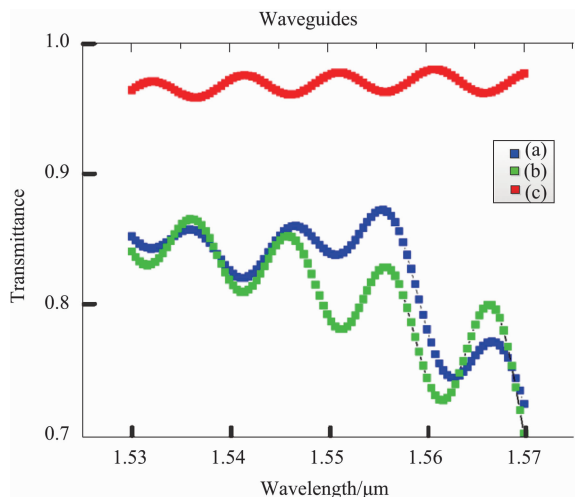


图5 纳米线波导与光子晶体波导三种级联结构(a)、(b)、(c)所对应的透射谱

Fig. 5 Transmission spectrum corresponding to three cascade structures (a), (b) and (c) of the nanowire waveguide and photonic crystal waveguide

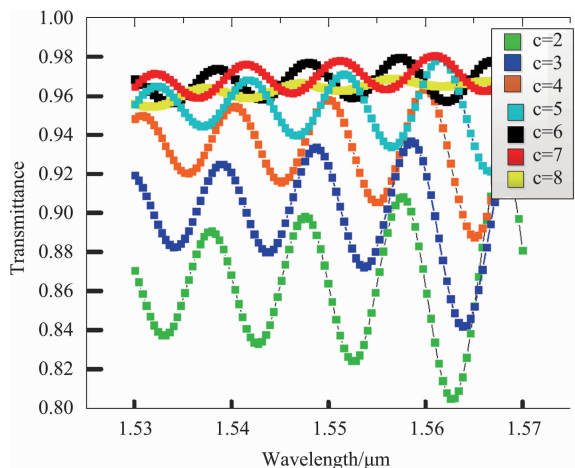


图6 c 分别取 2 到 8 时对应的级联结构透射谱

Fig. 6 Transmission spectrum of the cascade structure corresponding to c value (2~8)

增大会导致锥型结构长度变长,在本文基于纳米线波导与光子晶体波导的马赫曾德尔型调制器结构图 3 中,共有十处锥型结构(b),采用过高的 c 必然导致器件尺寸的增加,不利于集成,因此,本文选择 $c=7$ 的锥型结构。

2.3 性能分析

2.3.1 稳态场与动态调制分析

采用时域有限差分法(3D-FDTD)分析器件的性能。仿真计算时,如图 7(a),(c)所示,光源设置在左侧端口 1,探测器放置在输出端口 2,当干涉臂两端施加的电压为 0 时,一束波长为 1550 nm 的光波

从端口 1 入射后从端口 2 输出,其稳态场强分布如图 7(b)所示,从图 7(b)中可以看到,输出端可观察到明显的光强,此时调制器为“通”状态;当干涉臂两端施加调制电压时,在输出端口 2 得到的稳态场强分布如图 7(d)所示,从图 7(d)中可以看到,由于相位差为 π 的两光束在到达位于输出端的多模干涉耦合器时发生相消,输出端口的输出光强近似为 0,此时调制器为“断”状态。根据图 7(b)、图 7(d)可清晰的对比出调制器在“通”、“断”两个状态下的光强大小。

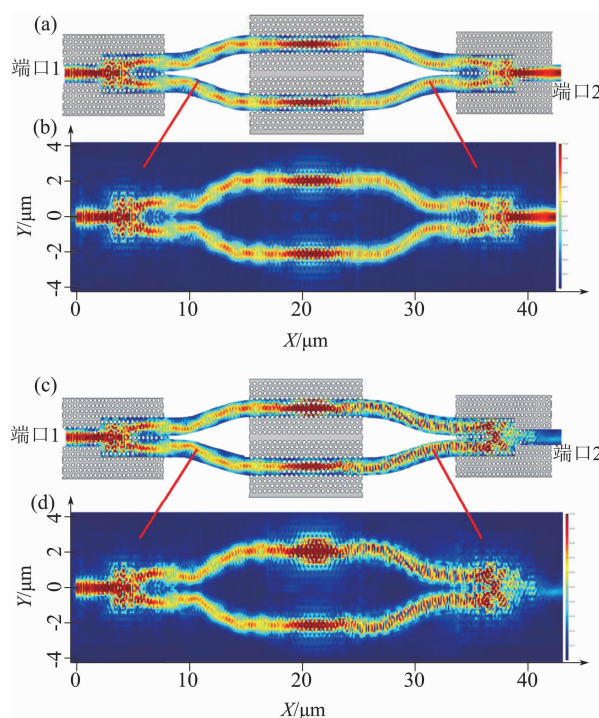


图7 (a)“通”状态时稳态场在器件结构中的分布示意图,(b)仿真模拟中检测到的“通”状态稳态场分布图,(c)“断”状态时稳态场在器件结构中的分布示意图,(d)仿真模拟中检测到的“断”状态稳态场分布图

Fig. 7 (a) Schematic diagram of the distribution of the steady-state field in the device structure in the "on" state, (b) steady-state field distribution of the "on" state detected in the simulation, (c) schematic diagram of the distribution of the steady-state field in the device structure in the "off" state, (d) steady-state field distribution of the "off" state detected in the simulation

在电极两端施加电压,观察输出端口透射率变化,由图 8 可以看出,随着电压上升,载流子色散效应逐渐产生,当达到半波电压 1.1 V 时,透射率越为 0.47,达到调制电压 1.6 V 时,折射率的改变导致两束光相位差达到 π ,透射率几乎为 0。

2.3.2 插入损耗与消光比分析

插入损耗和消光比是调制器的重要性能指标。

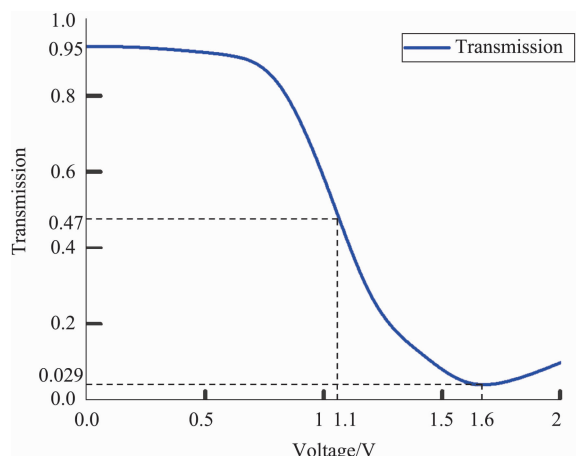


图8 电极两端施加的电压与输出端透射率的关系
Fig. 8 The relationship between the voltage applied across the electrode and the transmittance at the output

插入损耗定义为:

$$I(\text{dB}) = 10 \log \frac{I_{\text{in}}}{I_{\text{out}(\text{max})}} \quad , \quad (14)$$

其中 I_{in} 为输入光光强, $I_{\text{out}(\text{max})}$ 为最大输出光强.

消光比定义为:

$$C(\text{dB}) = 10 \log \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{min}}} \quad , \quad (15)$$

其中 I_{max} 为“通”状态下调制器的输出光强, I_{min} 为“断”状态下调制器的输出光强.

采用时域有限差分法(3D-FDTD)仿真分析器件的插入损耗与消光比,当调制器为“通”状态时,探测器在端口2检测到的透射谱如图9(a)所示,工作波长处于1550 nm时透射率达0.93.当调制器为“断”状态时,探测器在端口2检测到的透射谱如图9(b)所示,工作波长处于1550 nm时透射率为0.029.由式(14)、(15)可知,在特定工作波长1550 nm下,器件的插入损耗为0.3 dB、消光比为15.1 dB.根据图9(a)可知,最高透射率在1551 nm处达0.938,工作区域覆盖了以1551 nm为中心波长20 nm的通信波段,调制效果较理想.图9(a)中波形的两侧透射率逐渐降低,是由于光子晶体处于禁带边缘而造成的辐射损耗^[20],通过进一步的优化晶格常数,可缓解两侧透射率衰减的程度.

2.3.3 调制深度与调制灵敏度分析

(1) 调制深度

调制器的最大和最小输出功率分别为 P_{max} 和 P_{min} ,调制带宽为最大和最小输出功率之差与最大输出功率的比值,调制深度越大调制效果越好,其公式为:

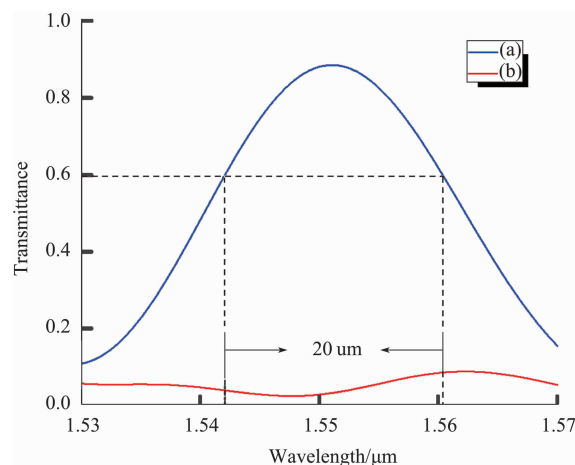


图9 探测器在端口2检测到的透射谱(a)调制器“通”状态,(b)调制器“断”状态

Fig. 9 Transmission spectrum detected at port 2, (a) modulator "on" state, (b) modulator "off" state

$$D = \frac{P_1 - P_0}{P_1} \quad . \quad (16)$$

本文的调制深度为 $D = \frac{0.93 - 0.029}{0.93} = 0.9688$.

(2) 调制灵敏度

调制灵敏度描述的是输出光强随电极电压(外界信号)变化而变化的能力.设调制信号为小信号, I_0 为输入光强,相位变化 $\Delta\phi$ 产生的输出光强变化为:

$$\Delta I = I_0 \left(\frac{dT}{d\phi} \right) \Delta\phi \quad , \quad (17)$$

外加电压 V 产生的相位延迟为:

$$\Delta\phi = -\frac{2\pi}{\lambda} n_e^3 r B V L \quad , \quad (18)$$

其中 n_e 为硅板折射率, r 为电光系数, B 是一个决定于电极间隙宽度的常数, L 为传输距离.

设半波电压为 V_π , 则:

$$\pi = -\frac{2\pi}{\lambda} n_e^3 r B V_\pi L \quad , \quad (19)$$

得 $V_\pi = -\frac{\lambda}{2n_e^3 r B L}$

$$\Delta\phi = \pi \frac{V}{V_\pi} \quad , \quad (20)$$

代入(1)式,得

$$\Delta I = I_0 \left(\frac{dT}{d\phi} \right) \cdot \pi \frac{V}{V_\pi} \quad . \quad (21)$$

相对调制灵敏度为:

$$S = \frac{1}{I_0} \left(\frac{d\Delta I}{dV} \right) = \left(\frac{dT}{d\phi} \right) \frac{\pi}{V_\pi} \quad . \quad (22)$$

令 $(k_0 n_{\text{eff}a} L - k_0 n_{\text{eff}b} L) = \phi$, 由式(7), 式(22) 可得

$$S = \pi\beta_1\beta_3\delta^{12} e^{-\beta_2-1L-\beta_2-2L} \cdot \sin(\phi)/V_\pi \quad (23)$$

由 S 的表达式可知, S 正比于损耗系数 β_1 、 β_2 、 δ^{12} 、 $e^{-\beta_2-1L-\beta_2-2L}$, 反比于半波电压 V_π . 所以降低各环节的损耗, 减小器件的半波电压, 会直接提高调制灵敏度, 提高调制效果. 代入 $V_\pi = 1.1 \text{ V}$, 由图 10 可知, 调制灵敏度极值为 0.52.

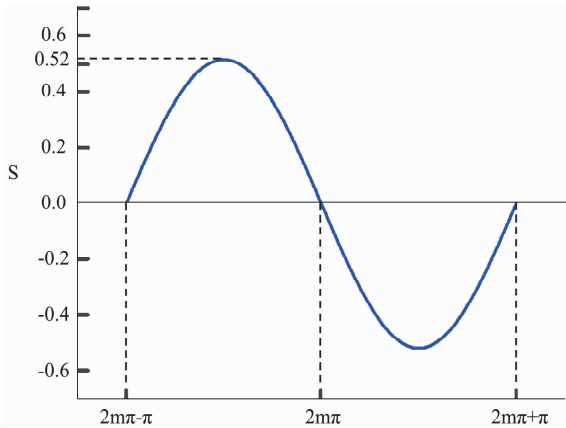


图 10 S - ϕ 关系曲线
Fig. 10 S - ϕ curve

2.3.4 调制带宽分析

设电极间电压差落在光子晶体平板波导两端, W 为光子晶体平板波导宽度, L 为光子晶体平板波导长度, h 为光子晶体平板波导厚度, ϵ_0 为真空中的介电常数, 基于等离子体色散效应的硅基光调制器的 3 dB 的截止频 f_c 可表示为^[26]:

$$f_c = \frac{1}{2\pi \times 2RC} \quad (24)$$

其中 R 是进入结点的电阻, C 是 PN 结小信号电容, 可表示如下:

$$R = \frac{1}{\sigma_{\text{FWL}}/h} \quad (25)$$

$$C = \epsilon_0 n_{\text{si}}^2 WL/h \quad (26)$$

采用 lumerical 中的 device 模块计算并得到调制器的 3 dB 带宽如图 11 所示, 掺杂浓度为 $n_{\text{doping}} = e^{+17} \text{ cm}^{-3}$ 、 $n_{\text{doping}}^+ = 3e^{+19} \text{ cm}^{-3}$ 、 $p_{\text{doping}} = 2e^{+17} \text{ cm}^{-3}$ 、 $p_{\text{doping}}^+ = 5e^{+19} \text{ cm}^{-3}$. 掺杂尺寸为 $9 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m} \times 0.22 \mu\text{m}$. 电压范围 $0 \sim 2 \text{ V}$, 响应时间 $3 \times 10^9 \text{ fs}$. 当频率逐渐升高时, 可得调制器的 3 dB 带宽为 68 GHz.

2.4 容差分析

仿真实验结果是通过 Lumerical 中的 FDTD 模块、Mode solution 模块以及 Device 模块仿真得出的,

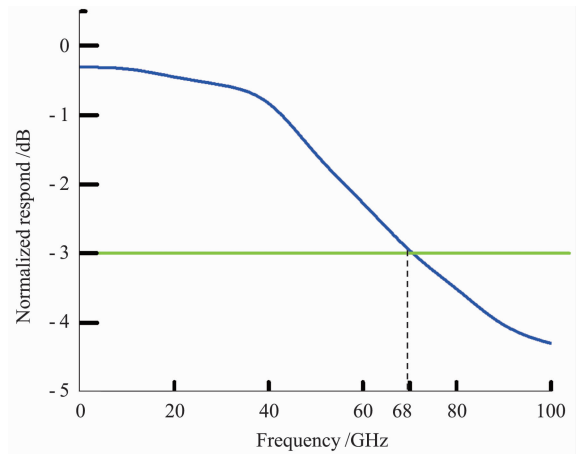


图 11 调制器 3dB 带宽仿真模拟计算
Fig. 11 Simulated 3dB bandwidth of the modulator

Lumerical 是一款成熟的商用软件, 很多学者都在使用^[27-31], 利用 Lumerical 仿真得出的仿真实验结果具有较高的可靠性, 并且仿真采用的参数是通过理论计算得出的, 因此结论是具有说服力和可信的. 但在实际制造时由于存在工艺误差, 影响调制性能. 为了分析工艺误差对调制性能的影响, 改变结构中一些重要的参数的取值, 仿真得出器件的性能指标, 观察器件性能的变化, 得到工艺误差的容差范围.

图 12(1) 为调制器工作时, 调制器的插入损耗与消光比随空气孔半径变化的关系. 本文选取的光子晶体平板波导中的空气孔半径为 120 nm, 首先改变空气孔半径, 观察器件性能的变化. 由图 12(1) 可以看出, 当空气孔半径在 118.5 nm 至 122.2 nm 的范围内变化时, 调制器仍然具有良好的性能(透射率 $> 90\%$). 否则将会对调制性能造成较大的影响, 原因是空气孔半径的变化导致光子晶体的禁带范围发生偏移, 从而使光子晶体线缺陷波导的通带范围发生变化、光束束缚能力减弱. 在实验制作器件时, 空气孔半径的精确度需在 nm 量级, 考虑透过率高于 90% 的情况下, 空气孔的半径在 120 nm 的基础上减小 1 nm 到增大 2 nm 的范围内均可.

图 12(2) 为调制工作时, 调制器的插入损耗与消光比随多模干涉耦合长度变化的关系. 本文选取的多模干涉耦合长度为 3390 nm, 用于实现马赫曾德尔型调制器的分束与合束. 改变耦合长度, 观察器件的性能变化. 由图 12(2) 可以看出, 当耦合长度在 3300 nm 到 3440 nm 范围内时, 调制性能几乎没有受到太大的影响(透射率均高于 89%). 在实验制作器件时, 耦合长度的容差率较大, 在 3390 nm 的基础上减小 90 nm 或增大 50 nm 的范围内均可.

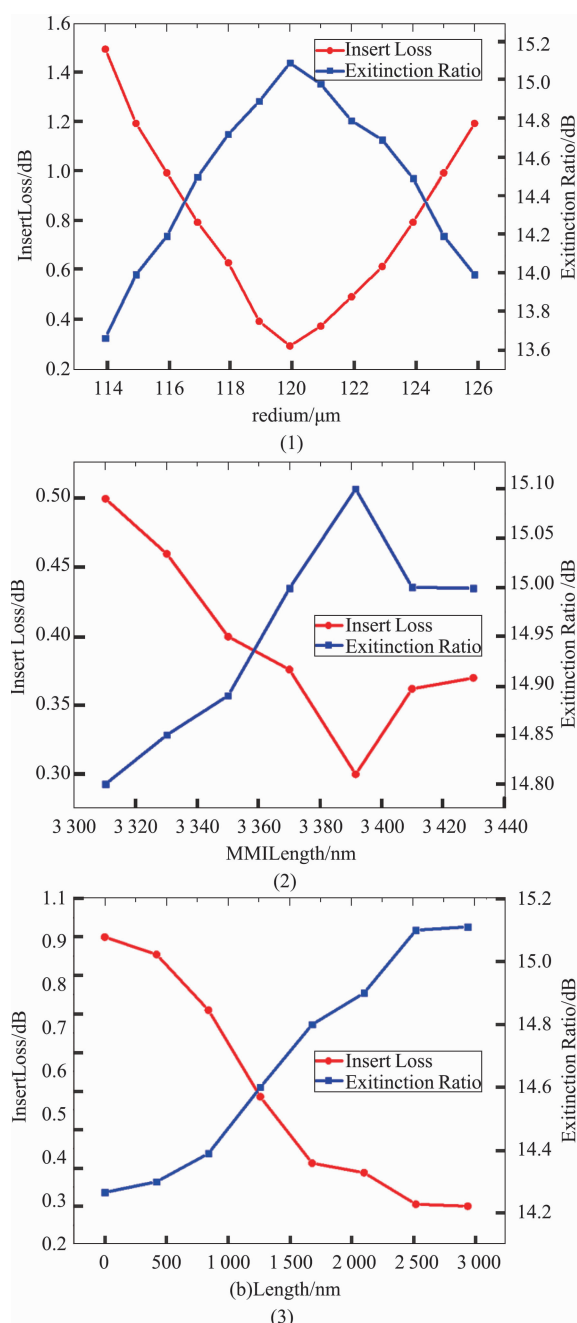


图 12 调制器插入损耗与消光比 (1) 随空气孔半径变化的关系, (2) 随多模干涉耦合长度变化的关系, (3) 随锥形区域 (b) 的长度变化关系

Fig. 12 Modulator insertion loss and extinction ratio (1) as a function of the air hole radius, (2) as a function of multi-mode interference coupling length, (3) as a function of the length of the tapered region (b)

图 12(3) 为调制器工作时, 调制器的插入损耗与消光比随锥形区域 (b) 的长度变化关系. 本文选取的锥形区域 (b) 长度为 2520 nm, 用于减小纳米线波导与光子晶体波导之间的级联损耗, 改变 (b) 的长度观察器件性能的变化. 由图 12(3) 可以看到随

着 (b) 的长度减小调制性能降低, 是因为纳米线波导与光子晶体波导中的光波传播常数不同, 而锥形区域 (b) 作为级联缓冲区, 其长度越长, 使两光波的传播常数越相近, 级联损耗越低. 在实验制作器件时, 锥形区域 (b) 的长度的容差率较大, 考虑透过率高于 90% 的情况下, 在 2520 nm 的基础上减小 920 nm 或增大 480 nm 的范围内均可.

3 结论

提出了一种基于光子晶体和纳米线波导的马赫-曾德尔型调制器. 采用光子晶体多模干涉耦合做为分波、合波器, 缩短了器件长度; 在光子晶体与纳米线波导连接处采用锥型结构, 减小了光子晶体与纳米线波导级联模式失配引起的损耗, 该调制器在工作波长 1550 nm 下的插入损耗为 0.3 dB, 消光比为 15.1 dB, 器件尺寸仅 $46 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m} \times 0.22 \mu\text{m}$, 调制带宽可以达到 68 GHz, 且工作区域覆盖了以 1551 nm 为中心波长 20 nm 的通信波段. 该调制器结构紧凑, 易于集成, 可应用于高速光通信系统.

References

- [1] Dou C, Jing X L, Li S G, et al. A compact and low-loss polarization splitter based on dual-core photonic crystal fiber [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2018, **50**(6):255.
- [2] Hagras E A A, Heikal A M, Hamed M F O, et al. Ultra compact soft glass liquid photonic crystal polarization splitter with As₂S₃ core [J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2017, **49**(2):55.
- [3] Ahmed R, Khan M M, Ahmmed R, et al. Design, Simulation & optimization of 2D photonic crystal power splitter [J]. *Optics & Photonics Journal*, 2013, **3**(2A):13-19.
- [4] Serafimovich P G, Kazanskiy N L. Optical modulator based on coupled photonic crystal cavities [J]. *Journal of Modern Optics*, 2016, **39**(13):147-151.
- [5] Ooka Y, Daud N A, Tetsumoto T, et al. Compact resonant electro-optic modulator using randomness of a photonic crystal waveguide [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(10):11199-11207.
- [6] Hinakura Y, Terada Y, Tamura T, et al. Wide spectral characteristics of Si photonic crystal Mach-Zehnder modulator fabricated by complementary metal-oxide-semiconductor process [J]. *Photonics*, 2016, **3**(2):17.
- [7] Balaji V R, Murugan M, Robinson S, et al. Design and optimization of photonic crystal based eight channel dense wavelength division multiplexing demultiplexer using conjugate radiant neural network [J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2017, **49**(5):198.
- [8] Zhuang Y, Ji K, Zhou W, et al. Design of a DWDM multi/demultiplexer based on 2-D photonic crystals [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(15):1669-1672.
- [9] Zhao Y, Qian C, Qiu K, et al. Ultrafast optical switching using photonic molecules in photonic crystal waveguides. [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(7):9211-20.

- [10] Chen H. Design of new photonic crystal all-optical switching based on dynamical shift of defect mode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3):0323006.
- [11] Notomi M, Yamada K, Shinya A, *et al.* Extremely large group-velocity dispersion of line-defect waveguides in photonic crystal slabs. [J]. *Physical Review Letters*, 2001, **87**(25):253902.
- [12] Soljacic M, Johnson S G, Fan S, *et al.* Photonic-crystal slow-light enhancement of nonlinear phase sensitivity[J]. *Journal of the Optical Society of America B Optical Physics*, 2002, **19**(9):2052 – 2059.
- [13] Nikoufard M, Amadeh S. InP-based photonic crystal electro-optic modulator [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, **126**(19):2219 – 2222.
- [14] Terada Y, Ito H, Nguyen H, *et al.* Theoretical and experimental investigation of low-voltage and low-loss 25-Gbps Si photonic crystal slow light Mach-Zehnder modulators with interleaved p/n junction [J]. *Frontiers in Physics*, 2014, **2**(12):61.
- [15] Terada Y, Kondo K, Abe R, *et al.* Full C-band Si photonic crystal waveguide modulator. [J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(24):5110.
- [16] Rao S, Casalino M, Coppola G, *et al.* Design of amorphous silicon photonic crystal-based M-Z modulator operating at 1.55 μm [C]// *International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology. IEEE*, 2017:162 – 168.
- [17] Hinakura Y, Terada Y, Arai H, *et al.* Electro-optic phase matching in a Si photonic crystal slow light modulator using meander-line electrodes [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(7):8443.
- [18] Lalanne P, Talneau A. Modal conversion with artificial materials for photonic-crystal waveguides [J]. *Optics Express*, 2002, **10**(8):354 – 9.
- [19] Yuchen H, Heming C, Haotian Z A novel M-Z modulator based on photonic crystal and nanowire waveguide [C]// *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, 2018: 2184 – 2186.
- [20] Khoo E H, Liu A Q, Zhang X M, *et al.* Exact step-coupling theory for mode-coupling behavior in geometrical variation photonic crystal waveguides[J]. *Physical Review B*, 2009, **80**(3):035101.
- [21] Soref R, Bennett B. Electrooptical effects in silicon [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, **23**(1):123 – 129.
- [22] YU Tian-Bao. Characteristics and application of multimode interference photonic crystal waveguide coupling system [D]. ZheJiang University (于天宝. 多模干涉型光子晶体波导耦合系统的特性及其应用研究. 浙江大学) 2007.
- [23] LI Guo-Zheng, LIU Yu-Liang. Plasma dispersion effect of silicon and its application [J]. *ACTA PHOTONICA SINICA* (李国正, 刘育梁. 硅的等离子体色散效应及其应用. 光子学报) 1996, **25**(5):413 – 416.
- [24] Krauss T F, De La Rue R M, Brand S. Two-dimensional photonic bandgap structures operating at near-infrared wavelengths [J]. *Nature*, 1996, **383**:699 – 702.
- [25] Talneau A, Agio M, Soukoulis C M, *et al.* High-bandwidth transmission of an efficient photonic-crystal mode converter [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(15):1745 – 1747.
- [26] QI Biao. Research on a novel silicon-based photonic crystal modulator [D]. ZheJiang University (祁彪. 新型硅基光子晶体调制器研究. 浙江大学) 2011.
- [27] Sorace-Agaskar C, Leu J, Watts M R, *et al.* Electro-optical co-simulation for integrated CMOS photonic circuits with VerilogA [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(21):27180.
- [28] Peter E, Thomas A, Dhawan A, *et al.* Active microring based tunable optical power splitters [J]. *Optics Communications*, 2016, **359**:311 – 315.
- [29] Hendrickson J, Soref R, Sweet J, *et al.* Ultrasensitive silicon photonic-crystal nanobeam electro-optical modulator: Design and simulation [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(3):3271.
- [30] McGuire D, Liu A. Modeling active silicon photonics components [C]// *Integrated Photonics Research, Silicon & Nanophotonics*. 2013.
- [31] Arjmand A, McGuire D. Complete optoelectronic simulation of patterned silicon solar cells [C]// *International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices. IEEE*, 2014.

(上接第 498 页)

- [13] Khiabani N. modelling, design and characterisation of terahertz photoconductive antennas [D]. University of Liverpool, 2013.
- [14] Balanis C A. *Antenna theory: analysis and design* [M]. Wiley-Interscience, 3rd Edition 1982: 989 – 990.
- [15] Nguyen T K, Han H, Park I. Numerical study of a full-wavelength Dipole antenna on a GaAs membrane structure at terahertz frequency [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2011, **32**(6): 763 – 777.
- [16] CUI Hai-Xia, YAO Jian-Quan, ZHONG Kai, *et al.* Atmospheric attenuation characteristics of THz layered propagation [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*. (崔海霞, 姚建铨, 钟凯, 等. 太赫兹波大气传输特性研究. 先进光学技术及其应用研讨) 2009.
- [17] XU Ying, CHEN Hai-Bing, HONG Zhi, *et al.* Modeling of the radiation impedance characteristics for photoconductive antenna [J]. *ACTA PHOTONICA SINICA*. (徐英, 陈海滨, 洪治. 光电导天线辐射阻抗特性模拟分析. 光子学报) 2010, **02**: 233 – 237.
- [18] Han K, Nguyen T K, Park I, *et al.* Terahertz Yagi-Uda antenna for high input resistance [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2009, **31**(4): 441 – 454.