

## 亚微米硅基波导光学相位调制器的优化分析

董正芳<sup>1,2</sup> 周震<sup>1,2</sup> 王坤博<sup>1,2</sup> 冯丽爽<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191  
<sup>2</sup>北京航空航天大学微纳测控与低维物理教育部重点实验室, 北京 100191

**摘要** 建立了基于注入式 PIN 结构的亚微米硅基波导光学相位调制器模型, 对该调制器模型的光学特性和电学特性进行了理论分析和仿真, 确定了器件的单偏振单模条件。在此条件下, 重点分析并讨论了在不同结构参数与掺杂条件下器件调制效率的变化特性。结果表明, 通过减小外脊高、增大掺杂浓度、减小波导区到掺杂区的距离、增大掺杂深度等均可有效提高器件的调制效率。在此基础上确定了器件的最优结构参数, 结果表明其相位调制效率可达到  $19 \text{ rad} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 3 dB 带宽大于 1 GHz, 同时该调制器还具有结构紧凑、工作电压低、易于集成的优点。

**关键词** 光学器件; 光学相位调制器; 绝缘体上硅; 亚微米波导; PIN 结构

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.102301

## Optimization and Analysis for Submicrometer-Scale Silicon Waveguide Optical Phase Modulator

Dong Zhengfang<sup>1,2</sup> Zhou Zhen<sup>1,2</sup> Wang Kunbo<sup>1,2</sup> Feng Lishuang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University,  
Beijing 100191, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Micro-Nano Measurement-Manipulation and Physics, Ministry of Education,  
Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** The theoretical model of a carrier-injection-PIN-based submicrometer-scale silicon waveguide optical phase modulator is built. The optical and electrical properties of the modulator are analyzed theoretically, and the conditions of single-polarization and single-mode for the submicrometer-scale waveguide are determined based on the theoretical model. The effects of structure dimensions and doping conditions on modulation efficiency are discussed emphatically under the single-polarization and single-mode conditions. The analysis shows that modulation efficiency can be improved effectively by reducing slab height, increasing doping concentration, increasing doping depth and reducing distance between the doped regions and the rib edge. The optimized device scheme is presented based on the analysis results. The excellent optical mode overlap with the refractive index change region, together with the submicrometer-scale waveguide, enables the modulation efficiency of  $19 \text{ rad} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ , the modulation bandwidth beyond 1 GHz, and the advantages of compactness, low voltage and ease of integration.

**Key words** optical devices; optical phase modulator; silicon-on-insulator; submicrometer-scale waveguide; PIN structure

**OCIS codes** 230.4110; 130.4110; 250.7360; 250.4110

## 1 引言

光学调制器是用来对自由空间中或光波导中传播的光束的特性(包括幅度、相位、偏振)进行调制的器

**收稿日期**: 2012-06-20; **收到修改稿日期**: 2012-06-30; **网络出版日期**: 2012-07-20

**基金项目**: 国家自然科学基金(61171004)资助课题。

**作者简介**: 董正芳(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事硅基光学调制器方面的研究。

E-mail: woyaoziqiang@yahoo.com.cn

**导师简介**: 周震(1976—), 男, 副教授, 主要从事半导体光电子器件方面的研究。

E-mail: zhouzhen@buaa.edu.cn(通信联系人)

件。传统光学调制器多采用铌酸锂(利用电光效应)<sup>[1]</sup>或Ⅲ-V族半导体化合物材料(利用电吸收效应),目前已经能够利用它们制作出满足通信、传感、成像等多领域需求的光学调制器,并已形成产业化规模。然而这些器件的材料特性决定了其制作与微电子工艺不兼容,很难实现与电子器件及部分光子器件的单片集成。

作为电子器件最为成熟的一种半导体材料,硅具有成本低廉、分布广泛、易于实现小尺寸光波导、同CMOS工艺兼容等众多优势,是实现光学调制器小型化与集成化的一种理想材料<sup>[2]</sup>。近年来,硅基调制器已经引起了国内外研究者的广泛关注,取得了一系列研究成果<sup>[3,4]</sup>。硅材料是一种具有反演对称性的晶体,不具备线性电光效应,Kerr效应与Franz-Keldysh(F-K)效应也较弱,不足以实现电光调制。尽管可以利用Si材料较大的热光系数实现有效的热光调制,但调制速度相对较慢,不适合实现器件的高速调制。因此研究者多采用等离子体色散效应来实现折射率的调制,通过控制载流子浓度来改变材料折射率。目前已实现的高性能硅基光学调制器多基于该调制原理。基于等离子体色散效应的硅基调制器按电学结构主要分为耗尽式PN结构<sup>[5]</sup>、积累式MOS电容结构<sup>[6]</sup>以及注入式PIN结构<sup>[7,8]</sup>。其中注入式PIN结构是一种更易实现高调制效率的调制器结构,它不存在耗尽式PN结构波导区载流子密度小及积累式MOS电容结构光场限制因子较低的问题,具有结构简单、损耗小、调制深度高、易于集成等众多优点<sup>[9,10]</sup>。由于基于注入式PIN结构硅基调制器调制过程以少子扩散为主,且早期提出的该类型调制器的波导横截面多为微米量级,因此调制带宽仅能达到几十兆赫兹<sup>[11]</sup>,所以有必要寻求一种同时具有高调制效率以及高调制带宽的硅基相位调制器结构。采用亚微米波导是实现硅基相位调制器高调制效率及高调制带宽的一种有效方法,该类型硅基相位调制器仍采用注入式PIN结构,而光波导则采用亚微米结构,在利用注入式PIN结构高调制效率的同时,通过缩小器件尺寸以保证较高的调制带宽<sup>[12,13]</sup>。亚微米波导的引入将会给设计方法及器件性能带来一系列的“特殊性”,因此有必要对注入式PIN结构亚微米硅基波导相位调制器的光学、电学特性进行分析,确定该类型调制器的设计优化原则。本文以基于注入式PIN结构的亚微米硅基波导相位调制器作为研究对象,对该器件的光学特性和电学特性进行了理论分析和仿真,重点分析了调制器各参数对调制效率的影响。分析结果可为高调制效率硅基相位调制器的优化设计及加工制作提供理论参考。

## 2 理论模型及计算方法

注入式PIN结构硅基波导相位调制器基于等离子体色散效应,通过载流子注入的方式改变波导折射率,从而实现对波导中传输光波的相位调制。硅的折射率和吸收系数随硅中自由载流子浓度( $\Delta N$ )的变化规律可表示为<sup>[14]</sup>

$$\Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h = -(8.8 \times 10^{-22} \times \Delta N_e + 8.5 \times 10^{-18} \times \Delta N_h^{0.8}), \quad (1)$$

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_e + \Delta \alpha_h = 8.5 \times 10^{-18} \times \Delta N_e + 6.0 \times 10^{-18} \times \Delta N_h, \quad (2)$$

式中 $\Delta n_e$ 和 $\Delta n_h$ 是由电子和空穴浓度变化引起的硅的折射率变化量, $\Delta \alpha_e$ 和 $\Delta \alpha_h$ 是由电子和空穴浓度变化引起的硅的吸收系数变化量, $\Delta N_e$ 和 $\Delta N_h$ 是电子和空穴浓度变化量。

图1为注入式PIN结构硅基波导相位调制器的结构示意图,该器件采用绝缘体上硅(SOI)材料,在Si材料上利用微纳加工技术形成三维亚微米脊形波导结构,脊形波导两侧通过N型、P型掺杂与波导区构成横向PIN结构。 $W$ 、 $H$ 、 $h$ 分别为脊形波导的脊宽、内脊高和外脊高, $t$ 和 $d$ 分别为掺杂深度以及掺杂区到内脊边缘的距离。电极位于掺杂区上方,对PIN结构采用正向偏压的方式进行载流子注入。

调制效率是相位调制器的一项重要性能指标,高调制效率更易实现器件的低半波电压、低功耗、高调制深度,是实现高性能硅基相位调制器的关键。本文理论分析的重点是通过参数的优化实现波导相位调制器的高调制效率,即在小调制电压 $V$ 及短作用长度 $L$ 下获得较大的相移 $\Delta \varphi$ 。定义波导相位调制器的调制效率为

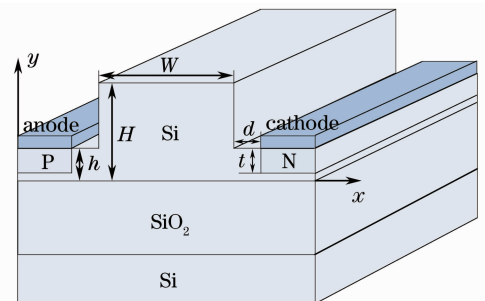


图1 注入式PIN结构硅基相位调制器的波导结构示意图

Fig.1 Geometry of the silicon waveguide phase modulator based on PIN diode structure

$$\eta = \frac{\Delta\varphi}{VL}, \quad (3)$$

即单位电压、单位作用长度下波导所能达到的相移量<sup>[15]</sup>。 $\eta$ 越高则意味着相位调制效率越高。其中 $\Delta\varphi$ 可表示为

$$\Delta\varphi = 2\pi\Delta n_{\text{eff}}L/\lambda. \quad (4)$$

根据一阶微扰理论,波导模式的有效折射率变化为<sup>[16]</sup>

$$\Delta n_{\text{eff}} = \frac{1}{n_{\text{eff}}^{(0)}} \cdot \frac{\iint \Delta n(x, y) \cdot n_0(x, y) |E^{(0)}(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E^{(0)}(x, y)|^2 dx dy}, \quad (5)$$

式中 $|E^{(0)}(x, y)|^2$ 为波导中的光场分布,可以通过有限差分光束传播法(FD-BPM)<sup>[17]</sup>求解麦克斯韦方程组获得。 $\Delta n(x, y)$ 为折射率变化空间分布,可以通过全耦合方法<sup>[18]</sup>求解连续性方程与泊松方程并结合(1),(2)式得到。 $n_{\text{eff}}^{(0)}$ 为无载流子注入时模式的有效折射率, $n_0(x, y)$ 为折射率分布,对于图1所示相位调制器理论分析模型, $n_0(x, y) = n_{\text{Si}}$ 。由(5)式可知,调制器的有效折射率变化量 $\Delta n_{\text{eff}}$ 主要由光场空间分布 $|E^{(0)}(x, y)|^2$ 与折射率变化空间分布 $\Delta n(x, y)$ 的重叠积分所决定,因此,为了获得高调制效率,应当尽量提高波导折射率变化量 $\Delta n(x, y)$ 并增大光场分布 $|E^{(0)}(x, y)|^2$ 同 $\Delta n(x, y)$ 分布的重叠面积以获得较大的有效折射率变化。本文将根据上述模型及计算方法,通过分析各结构参数对 $|E^{(0)}(x, y)|^2$ 和 $\Delta n(x, y)$ 的影响,确定最佳的参数设置,以实现相位调制器的高调制效率。

### 3 计算结果及讨论

#### 3.1 光学特性

利用Rsoft软件的BPM模块对麦克斯韦方程求解,通过对亚微米波导光场分布的仿真模拟确定波导的单模条件。该模块基于FD-BPM将波导横截面划分网格,通过求解每一格内的场用差分方程,并结合边界条件,得到整个横截面的场分布<sup>[19]</sup>。该方法中离散点的数量可以任意设定,在仿真计算亚微米波导时可以保证较高的计算精度及较低的计算误差。不同于微米光波导的单模设计,由于亚微米光波导具有很强的偏振相关性,因此亚微米单模光波导的设计首先要保证波导的单偏振性。表1给出了利用光束传播法得到的亚微米尺寸SOI脊形光波导的单偏振单模传输条件,其传输模式为TE模的基模。

表1 亚微米SOI光波导单模传输尺寸范围

Table 1 Single-mode condition for submicrometer-size rib waveguide

$H$ /nm	$h$ /nm	$W$ /nm
220~250	50~110	450~550

图2(a)~(c)分别给出了当 $H=220$  nm、 $h=70$  nm、 $W=550$  nm时,TE模和TM模的基模以及TE模的一阶模的光场分布。由图可知,TE模的基模可以在波导中稳定传输,而TM模以及TE模高阶模态的能量大部分泄漏到波导上下包层和平板波导区,因此该波导结构不允许TM模及TE模高阶模稳定传输,可以保证光场的单偏振单模特性。由图2(a)可以看出,传输模态的光场主要分布于波导的脊形区,即PIN结

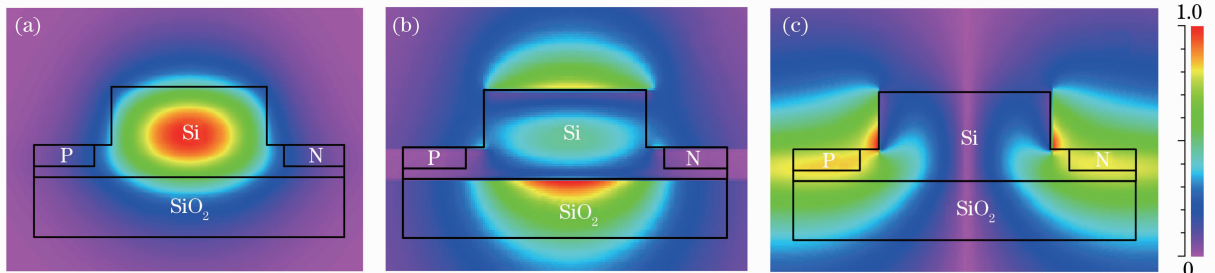


图2 亚微米SOI脊形波导光模场强度分布。(a) TE模基模;(b) TM模基模;(c) TE模一阶模

Fig. 2 Optical intensity distribution of submicrometer-size SOI rib waveguide. (a) Fundamental TE mode; (b) fundamental TM mode; (c) first order TE mode

构的本征区,远离PN掺杂区,这将有助于降低相位调制器的传输损耗。

### 3.2 相位调制特性

#### 3.2.1 参考模型分析

利用 Rsoft 软件的 LaserMOD 模块对泊松方程和载流子连续性方程进行求解,并结合硅的折射率和吸收系数随自由载流子浓度的变化规律,得到在一定参数和条件下 SOI 波导中的折射率分布  $n(x,y)$ ,并通过 FD-BPM 求解麦克斯韦方程,得到相应的波导有效折射率,并利用(4),(5)式得到相移量及调制效率等性能指标。

为了便于分析各参数对器件调制效率的影响,首先设定一参考模型,该参考模型的内脊高  $H$ 、外脊高  $h$  以及脊宽  $W$  分别为 220 nm、70 nm 和 550 nm,P 区和 N 区的掺杂浓度均为  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,掺杂区到内脊边缘距离  $d$  为 200 nm,掺杂深度  $t$  为 70 nm。图 3 所示为仿真计算得到的参考模型调制效率  $\eta$  与调制电压的关系曲线。从图 3 可以看出,该相位调制器不同于基于线性电光效应的相位调制器(如铌酸锂调制器),当器件结构确定后其波导的相位调制量随电压的变化呈现非线性关系(即调制效率非固定值),这是由该器件的工作原理所决定的,因为体现等离子体色散效应的一系列公式中的调制电压  $V$  同载流子浓度变化量  $\Delta N_c$  和  $\Delta N_h$  之间、以及  $\Delta N_c$  和  $\Delta N_h$  同折射率变化量  $\Delta n$  之间都存在着非线性关系。当调制电压超过 PIN 二极管的开启电压 0.7 V 后,该调制器的调制效率随电压的增大呈现先增大再减小的趋势。这是因为载流子寿命与载流子浓度相关,载流子浓度的提高将会在一定程度上减小载流子寿命  $\tau$ ,因而影响载流子在波导区的积累,从而使得载流子浓度无法通过驱动电压的进一步增大而得到持续提高<sup>[9]</sup>。因此,该类型相位调制器的调制效率存在一极值点,称为最佳工作点,当器件工作在对应的电压值附近时,可以有效减小调制电压信号的峰-峰值。

#### 3.2.2 波导结构对相位调制效率的影响

图 4 所示为在参考模型基础上改变波导各结构参数得到的调制效率  $\eta$  与调制电压的关系曲线,各结构参数的选取均满足脊形波导的单偏振单模条件。由图 4 可以看出,在保证器件单偏振单模传输的条件下,亚微米波导尺寸的变化对器件的调制效率有不同程度的影响,但影响都不大。其中外脊高  $h$  变化对调制效率的影响最大,内脊高其次,脊宽最小。波导结构变化对调制效率影响程度不大的主要原因是为了保证波导的单偏振单模特性,亚微米脊形光波导结构尺寸的可调范围较小,因此对光场分布以及载流子运动的影响程度有限。由图 4(a)可知,调制效率  $\eta$  随外脊高  $h$  的增大而减小,这是由于外脊高的增大使载流子更容易扩散出脊区进入平板区,减小了单位电压下载流子在波导区的积累浓度,从而降低了调制效率。另外,在掺杂深度  $t$  不变的条件,外脊高  $h$  的增大将使大部分载流子扩散到掺杂区以下的平板区域,导致光场同载流子浓

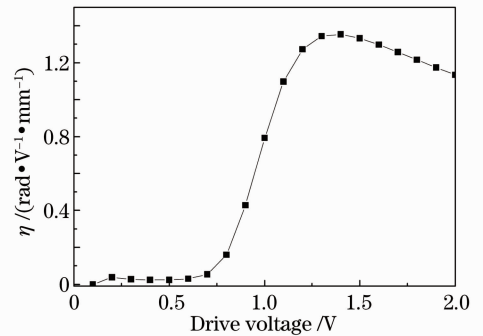


图 3 参考模型的调制效率  $\eta$  与调制电压的关系曲线  
Fig. 3 Modulation efficiency versus drive voltage in the reference modulator

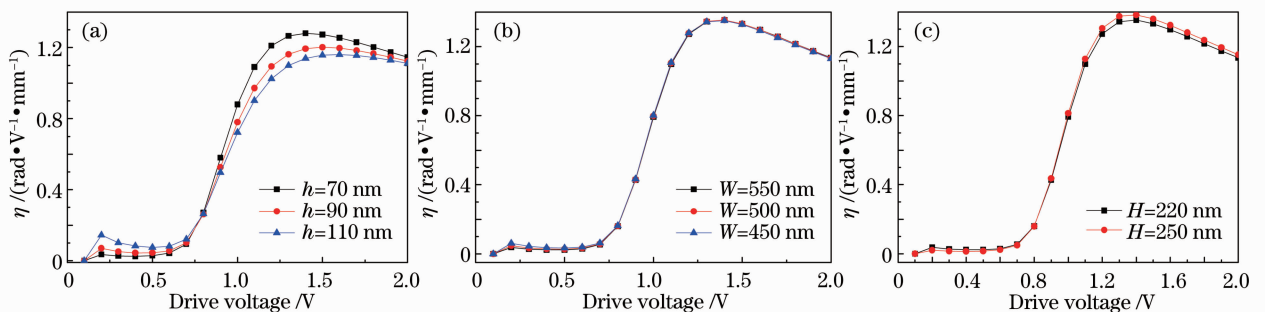


图 4 不同结构尺寸下  $\eta$  与调制电压的关系曲线。(a) 改变外脊高  $h$ ; (b) 改变脊宽  $W$ ; (c) 改变内脊高  $H$

Fig. 4 Modulation efficiency versus drive voltage for various structure dimension parameters. (a) Various slab height  $h$ ; (b) various ridge width  $W$ ; (c) various ridge height  $H$

度变化区的交叠积分变小,因而进一步降低了调制效率。因此,在保证波导单模传输的条件下,减小外脊高度  $h$  将有助于相位调制效率的提高。从图 4(b),(c)可知脊宽  $W$  和内脊高  $H$  的变化对调制效率影响较小,因此在制作过程中,可以在保证器件单模传输的条件下适当放宽对脊宽  $W$  和内脊高  $H$  的加工精度要求。

### 3.2.3 掺杂条件对相位调制效率的影响

掺杂条件是指 P 区和 N 区的掺杂浓度、掺杂位置以及掺杂深度。图 5 所示为不同掺杂浓度下的  $\eta$  与调制电压的关系曲线。由图 5 可知, $\eta$  随掺杂浓度的升高显著增大,当掺杂浓度为  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时,最佳工作点处的  $\eta$  达到  $5.8 \text{ rad} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,是掺杂浓度为  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  时的 29 倍,因此可以通过增加掺杂浓度提高器件的调制效率。但调制效率的提高同时也带来了最佳工作电压的增加,此时最佳工作电压将有  $0.5 \text{ V}$  的增加,这意味着器件将需要更高的偏置电压,不利于低功耗器件的实现,但较高的偏置电压也将有助于响应速度的提高。因此,在设计过程中应根据实际应用要求进行综合考虑。

图 6 所示为改变掺杂区到内脊边缘的距离  $d$  时对  $\eta$  与调制电压关系曲线的影响。由图 6 可知,随着  $d$  的减小,最佳工作电压基本不变,均在  $1.3 \sim 1.4 \text{ V}$  之间,而  $\eta$  值明显升高,当  $d$  由  $200 \text{ nm}$  减小到  $100 \text{ nm}$  时,最佳工作点处的  $\eta$  值增大了  $1 \text{ rad} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。这是由于在载流子注入结构的调制器中,载流子浓度会随着扩散距离的增大而减小,因此当掺杂区到波导区的距离  $d$  减小时,注入到波导区的载流子浓度将变大,调制效率  $\eta$  升高。因此,减小掺杂区到内脊边缘的距离  $d$  将有助于调制效率的提高。但掺杂区靠近波导同时可能会引起光模场同掺杂区的部分重叠,从而引入更多的传输损耗。因此,在实际设计过程中,在通过减小掺杂区到内脊边缘的距离来提高调制效率时,还要考虑掺杂对波导光学损耗的影响。

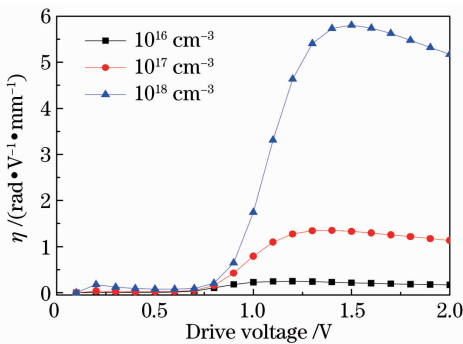


图 5 不同掺杂浓度下  $\eta$  与调制电压的关系曲线

Fig. 5 Modulation efficiency versus drive voltage for various doping concentration levels

### 3.2.4 掺杂深度对相位调制效率的影响

图 7 所示为掺杂深度  $t$  取不同值时调制效率  $\eta$  与调制电压的关系曲线。为了增大参数  $t$  的可调范围,将外脊高  $h$  由参考模型的  $70 \text{ nm}$  增大为  $110 \text{ nm}$ 。由图可知,增大掺杂深度  $t$  可以有效提高器件的调制效率。这是由于脊形波导的光场主要分布在波导内脊区,因此应保证掺杂区的载流子尽可能多地横向注入到波导区。增大掺杂深度可以增大掺杂区同波导区的横向接触面积,使更多的载流子注入到波导区同光场交叠,从而增大有效折射率改变量  $\Delta n_{\text{eff}}$ 。因此,在工艺条件允许的情况下,可尽量增加掺杂深度(与外脊高相等最理想)以获得高调制效率。

## 3.3 优化结果

综合以上分析可知,对基于等离子体色散效应的硅基相位调制器,掺杂条件是影响调制效率的主要因素,增大掺杂浓度、减小掺杂区到内脊边缘的距离以及增大掺杂深度都可以显著提高最佳工作点处的  $\eta$  值。

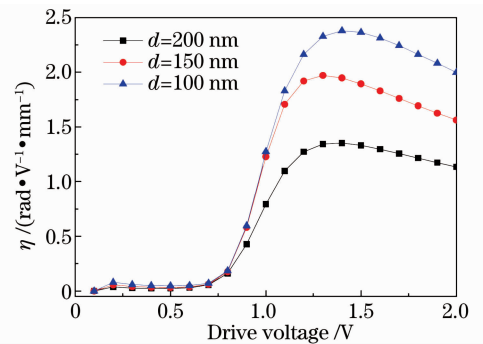


图 6  $d$  取不同值时  $\eta$  与调制电压的关系曲线

Fig. 6 Modulation efficiency versus drive voltage for various distances between the doping region and the rib edge

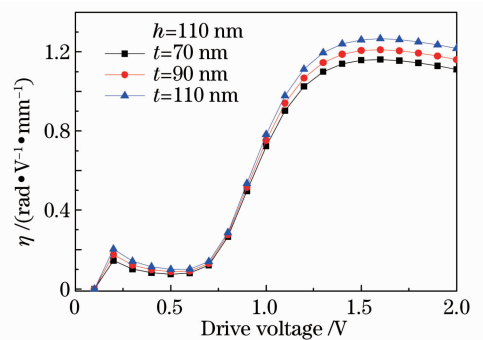


图 7  $t$  取不同值时  $\eta$  与调制电压的关系曲线

Fig. 7 Modulation efficiency versus drive voltage for various doping depths

另外,在保证光场单偏振单模传输的前提下,适当地减小  $h$  也可以对调制效率起到一定的提高作用。基于分析结果,提出了一组能够实现较高调制效率的参数优化方案,如表 2 所示。图 8 所示为仿真得到的在该优化方案下调制效率  $\eta$  与调制电压的关系曲线以及频率响应曲线。由图 8(a)可知,采用该组参数的调制器模型的最佳工作电压为 1.6 V,最佳工作点处的调制效率  $\eta$  可达  $19 \text{ rad} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。若将直流偏置电压选为 1.6 V,作用长度设为  $200 \mu\text{m}$ ,则实现  $\pi$  相移的调制电压峰-峰值约为 0.85 V,根据(2)式计算可得该条件下由载流子浓度变化引起的损耗约为 1.5 dB;由图 8(b)可知,该优化方案下的 3 dB 带宽可达 1.52 GHz,具有较高的调制带宽。

表 2 参数优化方案

Table 2 Parameters optimization scheme

$W / \text{nm}$	$H / \text{nm}$	$h / \text{nm}$	$d / \text{nm}$	$t / \text{nm}$	Doping concentration / $\text{cm}^{-3}$
550	250	70	200	70	$10^{19}$

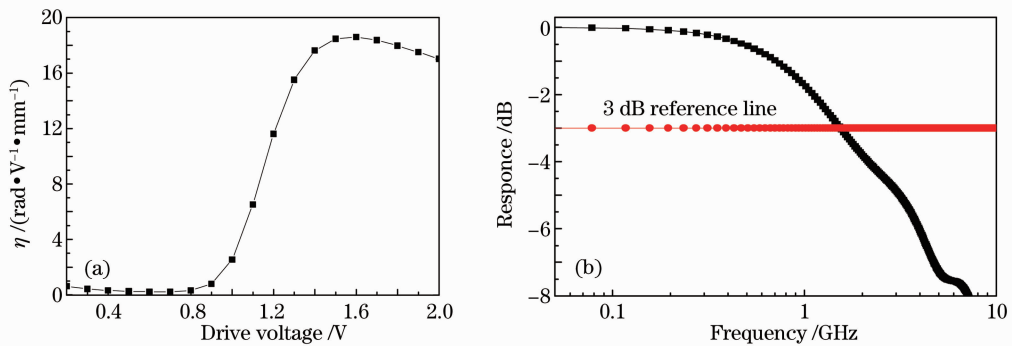
图 8 优化方案仿真结果。(a)  $\eta$  与调制电压的关系曲线;(b)频率响应曲线

Fig. 8 Simulation result of optimized scheme. (a) Modulation efficiency versus drive voltage; (b) frequency response

## 4 结 论

针对 PIN 注入结构的亚微米硅基波导相位调制器提出了相应的光学和电学的理论模型,并重点讨论了影响相位调制效率的主要因素。通过建模和仿真计算,得出了相位调制效率随调制电压变化的关系曲线,给出了最佳工作点,分析了调制器波导结构及掺杂相关参数对相位调制效率的影响。分析结果表明,通过减小外脊高  $h$ 、增大掺杂浓度、减小波导区到掺杂区的距离、增大掺杂深度均可有效提高载流子注入式硅基亚微米波导调制器的相位调制效率,但同时会引起调制速度降低、光学损耗增大等问题,因此在确定优化方案时需综合考虑各性能的应用需求来进行参数设置。基于理论分析结果,确定了一种硅基 PIN 注入式亚微米波导相位调制器的优化参数,仿真结果表明通过采用亚微米波导并结合注入式 PIN 结构,硅基相位调制器可同时获得高调制效率与高调制带宽,还具有工作电压小、结构简单、易于集成的特点。

## 参 考 文 献

- Su Shida, Wan Lingyu, Zhou Yu *et al.*. Transversal electro-optic effect of light propagating in arbitrary direction in  $\text{LiNbO}_3$  [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2972~2977  
苏世达, 万玲玉, 周煜等. 任意传播方向下铌酸锂晶体的横向电光效应研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2972~2977
- Qiu Yuanwu. Silicon photonics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(9): 36~41  
邱元武. 硅光子学[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(9): 36~41
- Graham T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes *et al.*. Silicon optical modulators[J]. *Nature Photon.*, 2010, **4**(8): 518~526
- Su Jian, Chen Heming. Terahertz wave modulator based on liquid-crystal-filled photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2710~2713  
苏坚, 陈鹤鸣. 基于液晶光子晶体的太赫兹波调制器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2710~2713
- L. Liao, A. Liu, D. Rubin *et al.*. 40 Gbit/s silicon optical modulator for highspeed applications[J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(22): 1196~1197

- 6 Junichi Fujikata, Jun Ushida. 25 GHz operation of silicon optical modulator with projection MOS structure[C]. OFC/NFOEC, 2010, OMI3
  - 7 William M. J. Green, Michael J. Rooks. Ultra-compact, low RF power, 10 Gb/s silicon, Mach-Zehnder modulator[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(25): 17106~17116
  - 8 S. Manipatruni, X. Qianfan, B. Schmidt *et al.*. High speed carrier injection 18 Gb/s silicon micro-ring electro-optic modulator[C]. LEOS, 2007. 537~538
  - 9 C. E. Png, S. P. Chan, S. T. Lim *et al.*. Optical phase modulators for MHz and GHz modulation in silicon-on-insulator (SOD)[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(6): 1573~1582
  - 10 Fuwan Gan, Franz X. Kärtner. Low insertion loss, high-speed silicon electro-optic modulator design[C]. IPRA, 2006, ITuB2
  - 11 P. D. Hewitt, G. T. Reed. Multi micron dimension optical p-i-n modulators in silicon-on-insulator[C]. *SPIE*, 1999, **3630**: 237~243
  - 12 C. A. Barrios, V. R. Almeida, R. Panepucci *et al.*. Electro-optic modulation of silicon-on-insulator submicrometer-size waveguide devices[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(10): 2332~2339
  - 13 L. Chen, K. Preston, S. Manipatruni *et al.*. Integrated GHz silicon photonic interconnect with micrometer-scale modulators and detectors[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(17): 15248~15256
  - 14 S. R. Giguere, L. Friedman, R. A. Soref *et al.*. Simulation studies of silicon electro-optic waveguide devices[J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(10): 4964~4970
  - 15 C. K. Tang, G. T. Reed. Highly efficient optical phase modulator in SOI waveguides[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(6): 451~452
  - 16 S. V. Burke, M. J. Adams, P. C. Kendall *et al.*. Design of ridge waveguide couplers with carrier injection using discrete spectral index method[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(9): 841~843
  - 17 W. P. Huang, C. L. Xu. Simulation of three-dimensional optical waveguides by a full-vector beam propagation method [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(10): 2639~3649
  - 18 Matthias Heil. An efficient solver for the fully coupled solution of large-displacement fluid-structure interaction problems [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004, **193**(1-2): 1~23
  - 19 Gao Yuan, Zhang Xiaoxia, Liao Jinkun. Analysis of single-mode condition for organic polymer asymmetric ridge waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0813001
- 高原, 张晓霞, 廖进昆. 有机聚合物非对称脊波导单模条件分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0813001