

波状 PIN 电光调制结构

冯 松 薛 斌 李连碧 宋立勋 翟学军 朱长军

西安工程大学理学院, 陕西 西安 710048

摘要 PIN 是电光调制器中常见的一种调制结构, 该结构工作时产生的热光效应直接影响着电光调制器的性能。为了缓解这种热光效应对调制器的影响, 从 PIN 调制原理出发, 在绝缘体上硅薄膜(SOI)材料的基础上提出了一种波状 PIN 调制结构, 并将该结构与普通 PIN 调制结构进行对比, 定量分析了波状 PIN 结构对温度、折射率以及调制区载流子浓度的影响, 通过仿真得出 2 V 调制电压下, 波状 PIN 结构的温度降低了 11.6%, 抑制热光效应使得折射率漂移减小了 28%, 调制区注入载流子浓度提高了 26.7%。通过实验, 分别制作了波状 PIN 结构和普通 PIN 结构的微环电光调制器, 经过测试发现波状 PIN 结构具有更大的谐振峰蓝移值, 该结构有效抑制了热光效应的影响, 证明了该新型结构的优越性及理论分析的正确性。

关键词 物理光学; 光电子器件; 电光调制器; 波状; 热光效应

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1023002

Waving PIN Electro-Optic Modulation Structure

Feng Song Xue Bin Li Lianbi Song Lixun Zhai Xuejun Zhu Changjun

School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract PIN is a common modulation structure in the electro-optic modulator, and the thermo-optic effect in work directly affects the performance of electro-optic modulator. In order to alleviate the thermo-optic effect, the principle of PIN modulation is firstly researched. A novel structure of waving PIN modulation based on silicon on insulator (SOI) material is invented, and the new structure is compared with ordinary PIN modulation structure. The influence of the waving PIN structure on temperature, refractive index, carrier concentration of modulation area are quantitatively analyzed. At 2 V voltage modulation through simulation, the temperature of waving PIN structure is reduced by 11.6%, the refractive index drift is reduced by 28% through restraining the thermo-optic effect, and injection carrier concentration of modulation area is increased by 26.7%. Finally, the waving PIN micro-ring electro-optic modulator and ordinary PIN micro-ring electro-optic modulator are respectively fabricated and tested. The test results show that the waving PIN structure has greater shift values of resonance peak and can effectively restrain the thermo-optic effect. The advancement of the novel structure and the correctness of theoretical analysis are verified.

Key words physical optics; photoelectronic device; electro-optic modulator; waving; thermo-optic effect

OCIS codes 260.2160; 230.2090; 230.4110; 250.4110

1 引 言

电光调制器是一种非常重要的光电子器件, 它担负着光信号和电信号的转换^[1-2]。电光调制器根据制作材料的不同可以分为许多种, 传统的电光调制器是利用某些电光晶体, 如铌酸锂晶体、碲化镉晶体和钽酸锂晶体的电光效应制成调制器^[3-4], 但是这种电光调制器体积大、功耗高、不易于集成。硅基电光调制器由于其材料原因, 光电效应很弱, 因此通常采用加热(热光效应)或载流子注入(等离子色散效应)来进行光电调制^[5-6]。利用热光效应制成的调制器具有工艺简单, 成品率高, 成本低和易于集成等优点, 但是它的缺点也十

收稿日期: 2016-06-03; **收到修改稿日期:** 2016-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(61204080)、陕西省教育厅科研计划项目(15JK1292)、西安工程大学研究生教育“质量工程”项目(15yz110)、陕西省普通高校重点学科建设专项资金建设项目((2008)169)

作者简介: 冯 松(1982—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: vonfengs@163.com

分突出,如调制时间长、串扰大、功耗大、尺寸大、需要散热等。另一种利用等离子色散效应制成的调制器具有调制速率快,调制频率高等优点^[7-8],但是工艺较为复杂。随着工艺水平的提高,为了追求更高的调制速率,硅基调制器更偏向于利用等离子色散效应来进行调制,这种利用等离子色散效应进行调制的硅基调制器正在逐步取代传统的光电调制器,成为调制器市场的主导产品。

常见的硅基电光调制结构主要有 PIN 结构^[9]、反向 PN 结构^[10]和金属氧化物半导体(MOS)结构^[11]三种,由于 PIN 结构在较小的正向偏压下,载流子密度变化很大,而且本征区的载流子分布比较均匀,使得这种结构的电光调制器有很高的调制效率^[12]。但是,由于 PIN 结构调制器对折射率的变化非常敏感,器件中的注入载流子数目直接影响着折射率的变化,而注入载流子数目是通过升高调制电压来增加的,调制电压的升高必然会带来器件功耗的增大,更为关键的是调制电压的升高会使器件发热,而热光效应对折射率的改变效果与等离子色散效应正好相反,温度的升高会严重影响器件的电光调制效率,减小消光比,增大器件尺寸,不利于器件集成。这些问题不仅影响着 PIN 电光调制器,也阻碍了硅基电光调制器的开发和应用,因此需要对 PIN 电光调制器进行改进,降低热光效应的影响,提高电光调制器的器件特性。

针对此问题,本文提出了一种波状 PIN 电光调制结构,该结构可以有效降低热能的产生,减小热光效应对电光调制器的影响,提高调制效率。波状 PIN 调制结构,通过对重掺杂的 P⁺区和 N⁺区形状的改变,增大了结面积,不仅可以降低热能的产生,而且可以提高载流子注入浓度。将新型结构与普通 PIN 调制结构进行对比,定量分析了波状 PIN 结构对温度、载流子浓度以及折射率的影响,最后通过实验,分别制作了波状 PIN 结构和普通 PIN 结构的微环电光调制器,经过测试发现波状 PIN 结构有效抑制了热光效应的影响,说明了该新型结构的优越性,并且验证了理论分析的正确性。

2 调制机理

硅基调制器需要通过改变导光材料的折射率来实现调控,而改变硅材料的折射率主要有两种途径:一种是利用硅材料的电光效应(等离子色散效应),一种是利用硅材料的热光效应。

2.1 电光效应

电场引起的折射率改变可分为直接电光效应和间接电光效应。外加电场使介质中的电荷位移发生极化,而极化强度与材料的介电常数相关联,这种方式称为直接电光效应,包括泡克耳斯线性电光效应,克尔二阶非线性电光效应等。作为一种中心对称晶体,硅中不存在奇数阶电光效应,泡克耳斯线性电光系数为零,硅中的克尔效应也非常弱,因此硅基电光调制一般都是利用间接电光效应。不通过改变介质电极化强度,而是改变材料光吸收谱来实现折射率变化,这种方式是间接电光调制,包括 F-K 效应,等离子色散效应等。F-K 效应也称电吸收效应,实质是电子在导带和价带间的场隧穿效应,改变了材料的吸收谱,借助外加电场改变了材料的折射率。F-K 效应导致的折射率改变比较弱,外加电场为 10⁵ V/cm 时,产生的折射率的变化仅为 1.5×10⁻⁵。除了 F-K 效应,载流子浓度改变也能引起吸收系数变化,进一步导致折射率的改变,这就是等离子色散效应。当载流子浓度改变为 10¹⁸ cm⁻³时,所产生的折射率改变可达 10⁻³,比起克尔效应或 F-K 效应,折射率改变高出了两个数量级。因此,硅基高速调制器以及光开关都主要是通过等离子色散效应来实现。

Soref R 等^[13]利用克拉默斯-克勒尼希关系和光吸收谱的实验数据,得出了 1.55 μm 处的等离子色散效应的近似公式

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

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

从(1)~(2)式中可以看出硅的吸收系数随着载流子浓度增大而随之增大,而折射率随着载流子浓度增大而逐渐减小。硅的载流子浓度增大能使其折射率减小,而光的吸收却不断增加,因此改变自由载流子浓度不仅能调节光的相位,还可以直接改变输出光的强度。

利用等离子色散效应制成的调制器具有调制速率快和调制频率高的优点,虽然制作工艺较为复杂,但是为了追求更高的调制性能,大部分都会选择等离子色散效应来进行光波调制。

2.2 热光效应

热光效应一般是通过电流加热的方法,使波导材料的温度发生变化,从而导致波导的折射率和相位发生改变。

折射率与温度的关系可以表示为^[14]

$$n(T) = n_0 + \Delta n(T) = n_0 + \alpha \Delta T, \quad (3)$$

式中, n_0 为温度变化前的折射率, ΔT 为温度的变化量, α 为热光系数。从(3)式中可以看出,随着温度的升高,波导材料的折射率也随之增大。

利用热光效应制成的调制器具有工艺简单、成品率高、成本低和易于集成等优点,但是它的缺点也十分突出,如调制时间长、串扰大、功耗低、尺寸大、需要散热等。

3 仿真分析

当 PIN 调制结构外加电信号进行调制时,根据等离子色散效应可知,硅的折射率会随着载流子的注入而减小,在载流子注入的同时,电流经过 PIN 产生自热效应,器件的温度升高,根据热光效应可知,升温会导致材料折射率的增大,因此,电光调制器工作时引入的热光效应对电光调制起阻碍作用,在器件设计时应尽量降低器件温度,减小热光效应的负面影响。

波状 PIN 调制结构如图 1 所示,图 1(a)为三维波状 PIN 结构,图 1(b)为波状 PIN 俯视图,图 1(c)为波状 PIN 剖面图。其中脊型波导宽度 W 为 450 nm,脊型波导高度 H 为 220 nm,平板波导高度 h 为 50 nm, P^+ 有源区的掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, N^+ 有源区的掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, I 区的掺杂浓度为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。

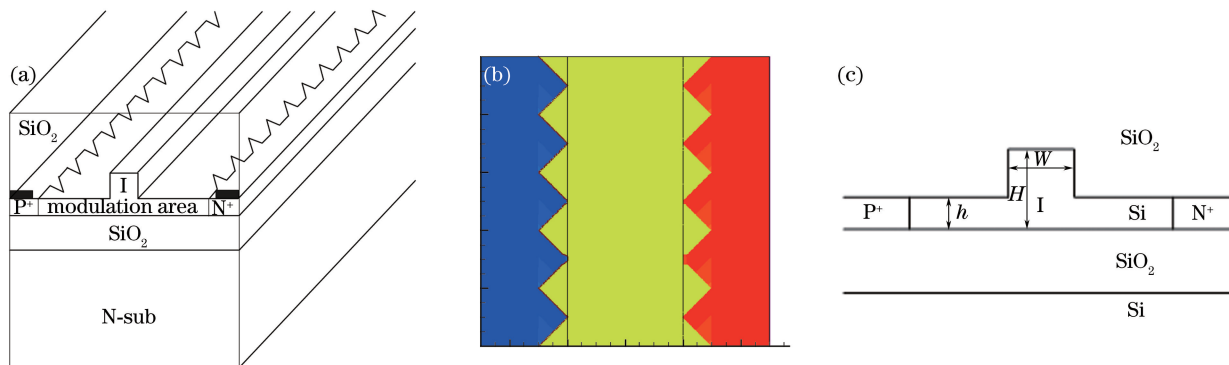


图 1 (a)三维波状 PIN 结构;(b)波状 PIN 俯视图;(c)波状 PIN 剖面图

Fig. 1 (a) 3D waving PIN structure; (b) top view of waving PIN; (c) cross-section diagram of waving PIN

两种 PIN 器件两端的正向偏置电压与 PIN 结构调制区的温度仿真关系如图 2 所示,图中蓝色线条和红色线条分别代表普通 PIN 结构和波状 PIN 结构的温度曲线,横轴为阳极偏置电压,纵轴为器件温度。从图 2 中可以看出,随着偏置电压的增大,两种 PIN 器件调制区的温度逐渐升高,当偏置电压超过 0.9 V 后,波状 PIN 结构的温度明显低于普通 PIN 结构,这是因为波状 PIN 结构具有更大的结面积,减少了注入载流子的

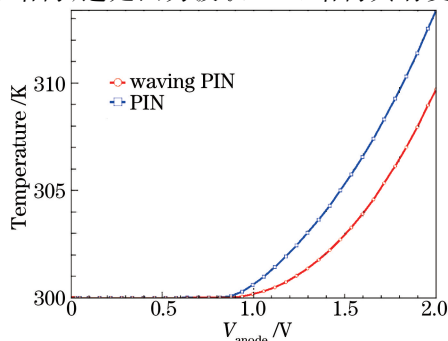


图 2 两种 PIN 电学调制结构的温度曲线

Fig. 2 Temperature curve of two types of PIN electrical modulation structure

碰撞几率,从而降低了器件内由于载流子碰撞而产生的热能,当偏置电压为 2 V 时,波状 PIN 结构的温度降低了 11.6%。

2 V 偏置电压下,波状 PIN 结构和普通 PIN 结构的热场仿真分布如图 3 所示,为了更清晰地对比两种结构的热分布,分别对其横向尺寸进行了剖分,如图 4 所示。图 4 中横轴为器件横向尺寸, $-0.25\sim 0.25\ \mu\text{m}$ 为脊型调制区,该区的温度大小直接影响着调制器的调制性能,纵轴为器件温度。从图 4 中可以看出相同偏置电压下,波状 PIN 结构的温度明显低于普通 PIN 结构的温度,越靠近中心位置温差越大,波状 PIN 结构的温度低说明热光效应对波状 PIN 结构的影响小。

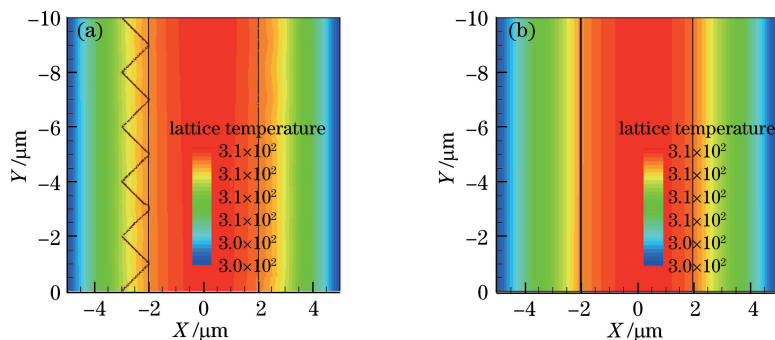


图 3 两种 PIN 电学调制结构的热场分布。(a)波状 PIN 结构;(b)普通 PIN 结构

Fig. 3 Thermal field distribution of two types of PIN electrical modulation structure.

(a) Waving PIN structure; (b) normal PIN structure

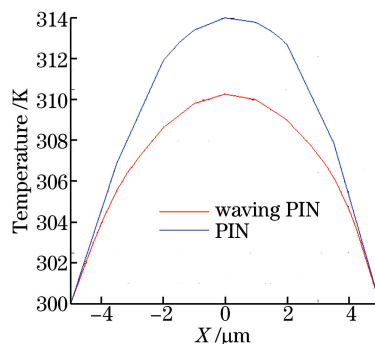


图 4 两种 PIN 电学调制结构的一维热场分布

Fig. 4 1D thermal field distribution of two types of PIN electrical modulation structure

当偏置电压为 2 V 时,将波状 PIN 结构和普通 PIN 结构的温度分别代入(3)式,可以得到 2 V 时波状 PIN 结构和普通 PIN 结构的有效折射率分别上升了 1.8×10^{-3} 和 2.5×10^{-3} ,与普通 PIN 结构相比,温度对波状 PIN 结构有效折射率的影响降低了 28%。由此可以看出波状 PIN 结构的温升更小(2 V 时,降低了 11.6%),更好地抑制了有效折射率的上升(2 V 时,降低了 28%),降低了热光效应对电光调制器的影响。

波状 PIN 结构除了减小热光效应对电光调制器的影响,还可以提高调制区注入载流子浓度。两种 PIN 器件两端的正向偏置电压与 PIN 结构调制区的载流子浓度仿真关系如图 5 所示,图 5 中蓝色线条和红色线条分别代表普通 PIN 结构和波状 PIN 结构的载流子浓度曲线,横轴为阳极偏置电压,纵轴为调制区的载流子浓度。从图 5 中可以看出,随着偏置电压的增大,两种 PIN 器件调制区的载流子浓度逐渐升高,当偏置电压超过 0.9 V 后,波状 PIN 结构的载流子浓度明显高于普通 PIN 结构,这是因为波状 PIN 结构具有更大的结面积,结面积的增大提高了调制区的载流子浓度,当偏置电压为 2 V 时,波状 PIN 结构调制区的载流子浓度提高了 26.7%。

2 V 偏置电压下,波状 PIN 结构和普通 PIN 结构的载流子仿真分布如图 6 所示,图 6(a)为波状 PIN 结构的电子分布,图 6(b)为普通 PIN 结构的电子分布,图 6(c)为波状 PIN 结构的空穴分布,图 6(d)为普通 PIN 结构的空穴分布。为了更清晰地对比两种结构的载流子分布,分别对其横向尺寸进行了剖分,如图 7 所示。图 7 中(a)和(b)分别为电子浓度分布和空穴浓度分布,图中蓝色线条和红色线条分别代表普通 PIN 结构和波状 PIN 结构的载流子浓度分布,横轴为 PIN 结构的横向尺寸, $-0.25\sim 0.25\ \mu\text{m}$ 为脊型调制区,该区

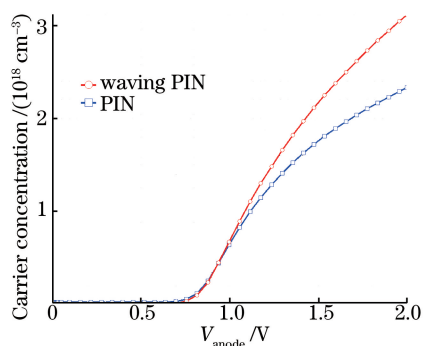


图 5 两种 PIN 电学调制结构的载流子浓度曲线

Fig. 5 Carrier concentration curve of two types of PIN electrical modulation structure

的载流子大小直接影响着调制器的调制性能,纵轴为调制区的载流子浓度。从图 7 中可以看出相同偏置电压下,波状 PIN 结构的调制区载流子浓度明显高于普通 PIN 结构的载流子浓度,调制时波状 PIN 结构具有更大的折射率差,因此波状 PIN 结构的调制性能更好。

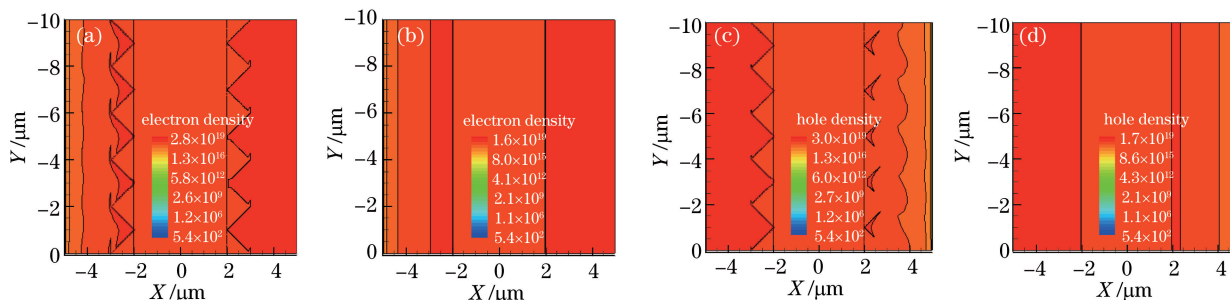


图 6 两种 PIN 电学调制结构的载流子分布。(a)波状 PIN 结构的电子分布;(b)普通 PIN 结构的电子分布;
(c)波状 PIN 结构的空穴分布;(d)普通 PIN 结构的空穴分布

Fig. 6 Carriers distribution of two types of PIN electrical modulation structure. (a) Electronic distribution of waving PIN structure; (b) electronic distribution of normal PIN structure; (c) hole distribution of waving PIN structure; (d) hole distribution of normal PIN structure

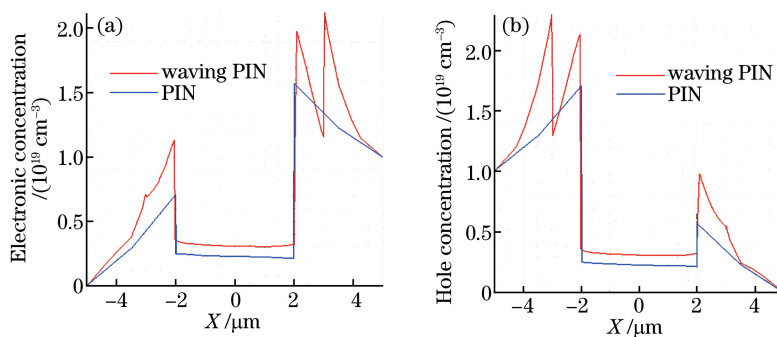


图 7 偏置电压为 2 V 时两种 PIN 电学调制结构的(a)电子和(b)空穴浓度曲线

Fig. 7 (a) Electron and (b) hole concentration curves of two types of PIN electrical modulation structure at 2 V bias voltage

波状 PIN 结构虽然增大了结面积和载流子注入水平,但是如果调制区的载流子浓度和折射率也出现了波状分布,势必会造成光场的散射作用,可能会导致插入损耗的增大。从图 7 中可以看出,波状 PIN 结构的 PI 结(-2 μm)和 NI(2 μm)结处(平板区域)载流子浓度变化较大,-0.25~0.25 μm 中心位置处(脊型调制区)的载流子浓度趋于平稳,由于光场主要集中在脊型调制区内,平板中的光场几乎可以忽略,因此波状掺杂结构对脊型调制区的光场散射影响很小。

在前面分析的基础上建立两种结构的数值仿真模型,并对其调制特性进行了模拟,两种 PIN 结构的微环调制器的静态调制仿真如图 8 所示。图 8 中横轴为调制波波长,纵轴为归一化功率。从图 8 中可以看出,当调制器两端加上偏置电压后谐振峰蓝移,2 V 偏置电压下,波状 PIN 结构的谐振峰蓝移值为 0.9 nm,普通

PIN 结构的谐振峰蓝移值为 0.7 nm。相同偏压电压下,波状 PIN 微环电光调制器的谐振峰蓝移值比普通 PIN 微环电光调制器增加了 28.6%,由此可以看出波状 PIN 结构可以有效抑制热光效应对电光调制器的影响,提高了调制效率。

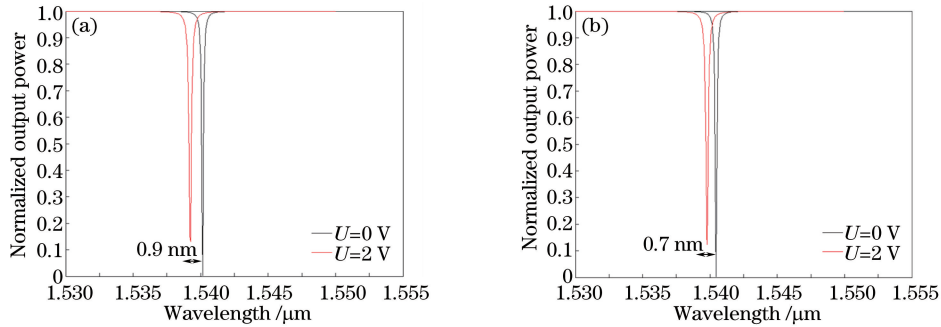


图 8 两种 PIN 电学调制结构的静态调制仿真。(a)波状 PIN 结构;(b)普通 PIN 结构

Fig. 8 Static modulation simulation of two types of PIN electrical modulation structure.

(a) Waving PIN structure; (b) normal PIN structure

4 实验分析

根据前面的理论分析以及前期光波导的研究,选取的波状 PIN 微环电光调制器的波导宽度是 450 nm,脊型波导高度是 220 nm,平板波导高度是 50 nm,波导与微环的间距是 200 nm,微环直径是 10 μm,P⁺有源区的掺杂浓度为 1×10¹⁹ cm⁻³,N⁺有源区的掺杂浓度为 1×10¹⁹ cm⁻³,I 区的掺杂浓度为 1×10¹⁵ cm⁻³,采用 248 nm 的深紫外光刻技术进行制作,制作的波状 PIN 微环电光调制器如图 9 所示。

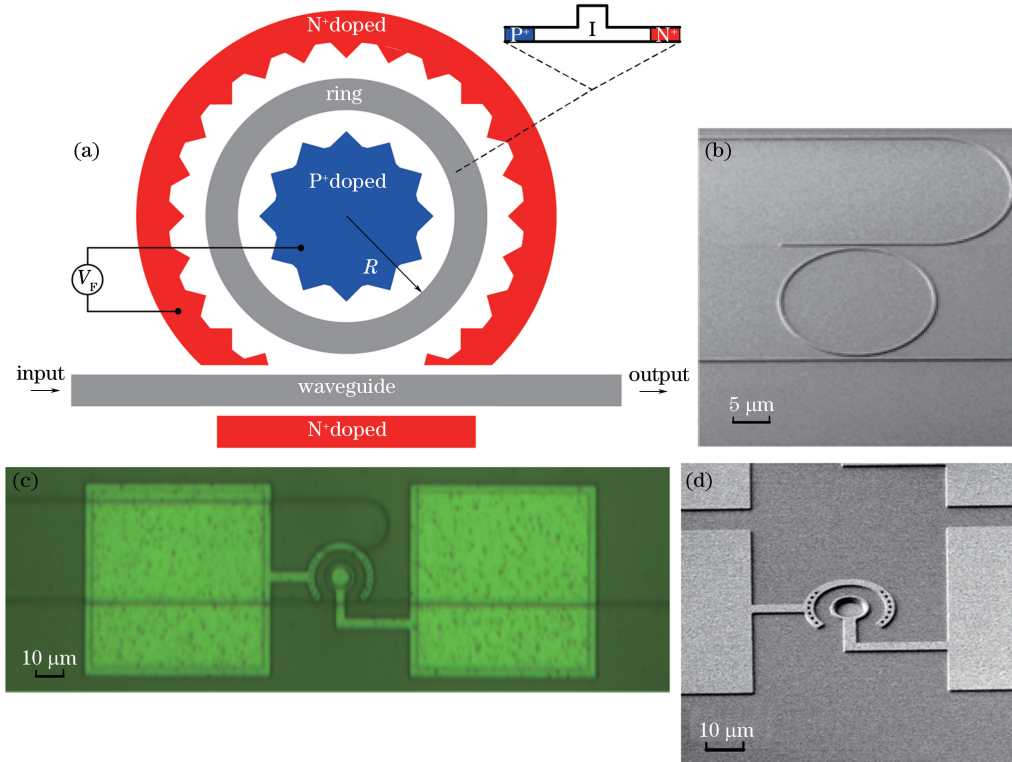


图 9 (a)波状 PIN 微环电光调制器的示意图;(b)微环结构扫描电子显微镜图;

(c)器件激光扫描共聚焦显微镜图;(d)器件扫描电镜图

Fig. 9 (a) Schematic diagram of waving PIN micro-ring electro-optic modulator; (b) diagram of scanning electron microscope of micro-ring structure; (c) diagram of laser scanning confocal microscopy of device; (d) diagram of scanning electron microscope of device

测试采用的是微纳米光波导测试系统,所用到的仪器主要有可调谐激光器、锥形单模光纤、偏振控制器、光谱仪、六维光学对准平台等,测试光信号的中心波长为 1550 nm。

在进行波状 PIN 微环电光调制器的调制特性测试前,需要检验微环谐振腔的特性。经测试,得到了波状 PIN 微环电光调制器的透射谱,如图 10 所示,横坐标为波长,纵坐标为归一化损耗。它的自由频谱宽度 (FSR) 为 9.45 nm,在 1548 nm 附近,谐振峰的 3 dB 带宽为 0.13 nm,谐振峰的消光比为 8.7 dB,对应的 Q 值为 15500。由此分析结果可知波状 PIN 微环电光调制器的微环谐振腔实现了高 Q 值,满足了电光调制的要求。

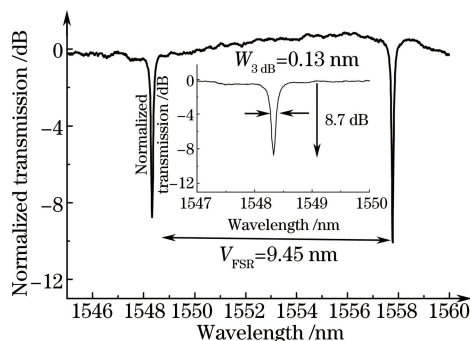


图 10 波状 PIN 微环电光调制器的透射谱测试

Fig. 10 Transmission spectrum test of waving PIN micro-ring electro-optic modulator

当器件两端加正向偏压时,测量出波状 PIN 微环电光调制器的透射谱,结果如图 11(a)所示,横坐标为波长,纵坐标为归一化损耗。从图中可以看出,施加正向偏压后,谐振峰发生了明显的蓝移,当偏压为 2 V 时,谐振峰蓝移了 0.7 nm。为了说明波状 PIN 结构的优越性,在相同工艺条件下制作了 PIN 微环电光调制器,测量出 PIN 微环电光调制器的透射谱如图 11(b)所示。从图中可以看出,施加正向偏压后,谐振峰也发生了明显的蓝移,当偏压为 2 V 时,谐振峰蓝移了 0.58 nm。相同正向偏压下,波状 PIN 微环电光调制器的谐振峰蓝移值比普通 PIN 微环电光调制器增加了 21%,这一数值略低于仿真结果,但是差别不大,验证了理论分析的正确性。

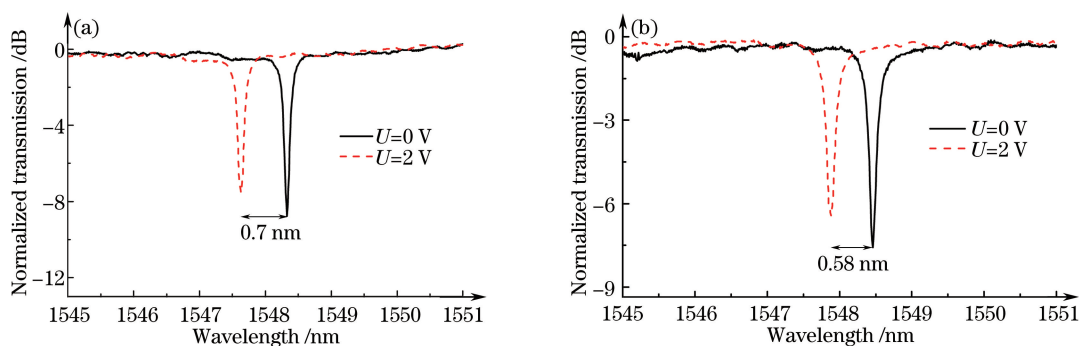


图 11 (a)波状 PIN 微环电光调制器和(b)PIN 微环电光调制器的静态调制测试

Fig. 11 Static modulation test of (a) waving PIN micro-ring electro-optic modulator and (b) PIN micro-ring electro-optic modulator

根据前面的分析可知,电光效应使得调制区折射率减小,谐振峰蓝移,热光效应使得调制区折射率增大,谐振峰红移。相同正向偏压下,波状 PIN 微环电光调制器比普通 PIN 微环电光调制器具有更大的蓝移值,由此可以看出波状 PIN 微环电光调制器中的波状 PIN 结构可以有效抑制热光效应对电光调制器的影响,提高了调制效率。

5 结 论

为了缓解热光效应对 PIN 电光调制器的影响,在绝缘体上硅薄膜(SOI)材料的基础上提出了一种波状 PIN 电光调制结构,定量分析了波状 PIN 结构对温度、折射率以及调制区载流子浓度的影响,通过仿真得出 2 V 调制电压下,波状 PIN 结构的温度降低了 11.6%,抑制热光效应使得折射率漂移减小了 28%,调制区注

入载流子浓度提高了 26.7%，最后通过实验，分别制作了波状 PIN 结构和普通 PIN 结构的微环电光调制器，经过测试发现相同正向偏压下，波状 PIN 微环电光调制器的谐振峰蓝移值比普通 PIN 微环电光调制器增加了 21%，验证了波状 PIN 结构可以有效抑制热光效应的影响，说明了该新型结构的优越性，并且验证了理论分析的正确性。波状 PIN 结构的制作只是在现有工艺的基础上，改变光刻版的版图设计，不需要改变工艺流程，不增加任何工艺步骤和工艺成本，是一种理想的电光调制结构。

参 考 文 献

- 1 Yang L, Ding J F. High-speed silicon Mach-Zehnder optical modulator with large optical bandwidth[J]. J Lightwave Technol, 2014, 32(5): 966-970.
- 2 Xu H, Li X Y, Xiao X, *et al.* Demonstration and characterization of high-speed silicon depletion-mode Mach-Zehnder modulators[J]. IEEE J Sel Top Quant, 2014, 20(4): 3400110.
- 3 Shiraishi T, Hasegawa T, Sugiyama M, *et al.* Suppression of thermal drift in an ultra-high-speed LiNbO₃ optical modulator[C]. IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting Conference Proceedings, 2007, 9858328: 169-170.
- 4 Nielsen M, Larsen T. A 2-GHz GaAs HBT RF pulsewidth modulator[J]. IEEE T Microw Theory, 2008, 56(2): 300-304.
- 5 Lauer mann M, Wolf S, Schindler P C, *et al.* 40 Gb/s 16QAM signaling at 160 Gb/s in a silicon-organic hybrid modulator [J]. J Lightwave Technol, 2015, 33(6): 1210-1216.
- 6 Streshinsky M, Ding R, Novack A, *et al.* 50 Gb/s silicon traveling wave Mach-Zehnder modulator near 1300 nm[C]. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2014: Th2A. 5.
- 7 Zheng Chuantao, Huang Xiaoliang, Li Cuiting, *et al.* Fourier modeling and characterization on a push-pull poled Y-type coupler electro-optic modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1113002.
郑传涛, 黄小亮, 李翠婷, 等. 推挽极化 Y 型耦合器电光调制器的傅里叶建模与表征 [J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1113002.
- 8 Li Minghui, Ma Kezhen, Luo Liang, *et al.* Influence of coupling gap on the performance of silicon-on-insulator microring resonator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0610001.
李明慧, 马可贞, 骆 亮, 等. 耦合间距对绝缘体上硅微环谐振腔的性能影响 [J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0610001.
- 9 Akiyama S, Imai M, Baba T, *et al.* Compact PIN-diode-based silicon modulator using side-wall-grating waveguide[J]. IEEE J Sel Top Quant, 2013, 19(6): 74-84.
- 10 Qiu C, Xiao S M, Yang B, *et al.* A novel electrode structure with a reverse-biased p/n diode for high speed polymer-infiltrated slot modulators[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(18): 3436-3438.
- 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, 2014, 427(6975): 615-618.
- 12 Dubray O, Abraham A, Hassan K, *et al.* Electro-optical ring modulator: an ultra-compact model for the comparison and optimization of PN, PIN, and capacitive junction[J]. IEEE J Sel Top Quant, 2016, 22(6): 1-10.
- 13 Soref R, Bennett B. Electrooptical effects in silicon[J]. IEEE J Quantum Elect, 1987, 23(1): 123-129.
- 14 Almeida V R, Panepucci R R, Lipson M. Nanotaper for compact mode conversion[J]. Opt Lett, 2003, 28(15): 1302-1304.