

基于氮氧化硅与聚合物混合集成低功耗 全内反射热光开关

张 燕¹ 陈开鑫¹ 郑军凯²

(¹ 电子科技大学通信与信息工程学院, 四川 成都 611731)
(² 电子科技大学机械电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘要 利用具有相反热光特性的氮氧化硅(SiON)与聚合物材料,采用混合集成技术设计了一种低功耗全内反射(TIR)热光波导开关。该光开关通过在两交叉的氮氧化硅波导芯的 X 结中心部分制作一个深度等于波导芯厚度的狭缝,并在其中填充与波导包层相同的聚合物材料,同时在狭缝聚合物上方制作加热电极来实现开关功能。理论分析表明,通过选择与氮氧化硅折射率相匹配的聚合物材料,并优化设计单模光波导尺寸,两交叉波导间的夹角、所开狭缝的宽度以及相应的加热电极结构,对于 1550 nm 的工作波长,开关的驱动功率在低至 2.3 mW 时仍可实现消光比均大于 36 dB,串扰均小于 -36 dB 的 TE 与 TM 模式。

关键词 光电子学;光开关;热光原理;氮氧化硅;全内反射;混合集成;聚合物

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1117001

Hybrid Integrated SiON/Polymer Low Power Thermo-Optic Switch with Total Internal Reflection Effect

Zhang Yan¹ Chen Kaixin¹ Zheng Junkai²

(¹ School of Communication and Information Engineering, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)
(² School of Mechatronics Engineering, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract By utilizing the opposite thermo-optical characteristics of silicon oxynitride (SiON) and polymer materials, a hybrid integrated SiON/polymer waveguide total internal reflection (TIR) thermo-optic (TO) switch has been designed. The operation of the suggested switch is using an electrode heater, which is fabricated on a trench that is located in the center part of SiON waveguide X-junction and filled with the same polymer material as the cladding used, to adjust the refractive index of the polymer filled in the trench so as to realize TIR effect. Theoretical results show that, the suggested switch can realize an extinction ratio more than 36 dB and a crosstalk lower than -36 dB with very low driving power of 2.3 mW for TE and TM polarization by choosing the suitable polymer material which index matches that of SiON, and then by optimizing the design parameters of the single waveguide, the cross angle between the two waveguide, the width of the trench, and the structure of the electrode heater, .

Key words optoelectronics; optical switch; thermo-optic effect; silicon oxynitride; total-internal-reflection; hybrid integrated; polymer

OCIS codes 130.4815; 230.3120; 260.6970; 130.2755; 160.6840

收稿日期: 2011-06-27; 收到修改稿日期: 2011-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(61177054)资助课题。

作者简介: 张 燕(1987—),女,硕士研究生,主要从事全内反射型热光开关的设计与模拟等方面的研究。

E-mail: zhangyan8723@126.com

导师简介: 陈开鑫(1972—),男,博士,副教授,主要从事集成光学方面的研究。E-mail: chenkaix@uestc.edu.cn

(通信联系人)

1 引 言

全内反射光开关具有结构紧凑、工作波长较宽、无过驱动(数字响应)和偏振不敏感等优点,十分适用于低成本的多端口光网络。它可利用载流子注入效应^[1]、光感应效应^[2]、电光效应^[3~5]和热光效应^[6~8],甚至是制作于 X 形波导交叉处的可调缝隙^[9]来实现。其中利用热光效应的全内反射型光波导开关最为简易。

聚合物材料具有偏振无关的负热光效应,其热光系数较大,即它的折射率随温度的升高而显著减小,因此,聚合物非常适用于全内反射热光开关的制作^[10,11]。此种光开关可通过在精心设计的 X 结形聚合物光波导的交叉部分制作一定形状的加热电极来实现^[6~8],但由于电极附近热能的梯度分布所导致的折射率梯度分布,使得光波在此区域的反射行为较为复杂,从而使开关的优化设计复杂化。此外,由于全内反射的实现需要较大的折射率差,因此这种光开关通常需要较大的驱动功率,例如文献^[6]中需要 20~30 mW,文献^[8]中需要 25~66 mW。

本文设计了一种氮氧化硅(SiON)与聚合物混合集成的低功耗全内反射热光开关(TO)。SiON 是一种优良的光波导材料,其最大的优点是它的折射率可通过控制掺入 SiO₂ 中 N 的多少来调整,从而得到折射率为 1.4500~2.0000 的 SiON 材料^[12,13]。另外它具有正的热光效应,即其折射率会随温度的升高而增大。本文所提出的热光开关的反射区域正是利用了聚合物与 SiON 这两种材料进行的混合集成。采用这种结构可以使光开关在相同的热作用下获得更大的折射率差,从而使开关所需的驱动功率更小。其原因是聚合物与 SiON 这两种材料具有相反的热光特性,即当加热电极有电流通过释放热量时,电极下方聚合物材料的折射率会因温度升高而降低,而与此同时, SiON 的折射率会因温度升高而增大,这样一增一减就使得相同热量下可产生更大的折射率差,因而更容易发生全内反射而实现开关效应。

2 原理与设计

2.1 光开关的结构与工作原理

SiON/聚合物混合集成的全内反射型热光波导开关的基本结构如图 1 所示。开关的核心部分包括 SiON 材料制作的 X 结形波导芯,在 X 结的中心所制作的一个深度等于波导厚度的嵌有与波导包层相同聚合物材料的狭缝以及置于狭缝聚合物上方的加

热电极。选择适当的 SiON 与聚合物材料的折射率及适当的入射角,可使得当加热电极没有电流时(电极 OFF 态),从端口 1 与端口 2 输入的光信号将分别从端口 1' 与 2' 输出,此时开关处于 Bar 态。而当有一定电流作用于加热电极时(电极 ON 态),加热区域聚合物的折射率下降,而 SiON 的折射率增加,入射光波在 SiON 与聚合物的分界面上发生全反射,将端口 1 与端口 2 入射的光波分别反射到端口 2' 与 1' 输出,从而实现开关的 Cross 态。

混合集成的结构一方面可以充分利用两种材料不同的热光特性,实现较低的驱动功率。另一方面使得当开关在 Cross 态时,由于反射区域的折射率分布特点,避免了光波在到达反射界面前因衍射而展宽^[14],而且光波的反射发生在折射率突变的 SiON 与聚合物的分界面上,因此光波在反射区域的传播特征可简单地用沿入射波导传播的平面波在分界面的反射与透射特征来分析^[15]。

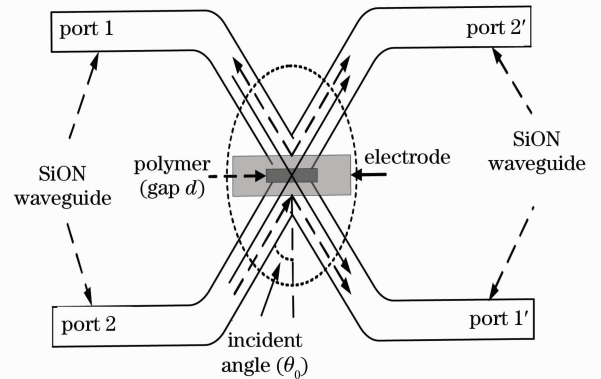


图 1 光开关的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical switch

2.2 光开关的基本结构设计

根据所提出的 SiON/聚合物混合集成全内反射型热光开关的工作原理及图 1 中所示的光开关的结构设计了光开关。首先,光开关由芯层为 SiON,包层为聚合物材料的两单模光波导构成,因此需要根据已知的 SiON 的折射率 n_0 ,选择具有合适折射率 n_1 的聚合物材料,并设计相应的 SiON 单模波导芯的厚度 h 及宽度 w 。其次,所设计的光开关于两波导交叉处开了一深度等于波导厚度的嵌有与波导包层相同聚合物材料的狭缝,即开关的全反射区域,因此需要进一步研究设计满足开关性能要求的入射角 θ_0 、狭缝宽度 d 及开关发生全反射时合适的折射率改变量。最后考虑到开关的应用领域,选择开关的中心工作波长为 1550 nm。根据 SiON 的折射率可调及其双折射特点,选择其折射率对 TE 模为

1.5100,对 TM 模式为 1.5150 的 SiON 材料。为避免 Bar 态时在 SiON 与聚合物分界面产生较大的菲涅耳反射而影响到开关性能,这里聚合物材料选用韩国 ChemOptics 公司的 ZP 系列材料,其折射率对 TE 模式为 1.5000,对 TM 模式为 1.4996。由此,SiON 单模光波导的几何尺寸可以利用有效折射率法^[16]得到,此处取厚度 $h=3.0\ \mu\text{m}$,宽度 $w=8.0\ \mu\text{m}$ 。这里取较大的宽度有利于安排、制作狭缝及保证光波在反射区域的传输。通常完全由聚合物制作的全内反射热光开关在反射区域的光波导结构往往需要经过特别设计(通常采用喇叭结构)以实现较好的开关特性,但本文所设计的光开关无需此特殊设计便可实现较好的开关效果。具体的开关设计过程如下。

根据图 2 所示的开关在反射区域的结构示意图可得,对于从端口 1 或 2 输入的光波其透射到端口 1'或端口 2'的透射率为^[17]

$$T_{\text{TE}}^{\text{tot}} = |t_{\text{TE}}^{\text{tot}}|^2 = \frac{n_{2,\text{TE}}}{n_{0,\text{TE}}} \times \frac{|t_{\text{TE}}^{0 \rightarrow 1}|^2 |t_{\text{TE}}^{1 \rightarrow 2}|^2}{|\exp(-i\beta_1) - r_{\text{TE}}^{1 \rightarrow 0} r_{\text{TE}}^{1 \rightarrow 2} \exp(i\beta_1)|^2}, \quad (1)$$

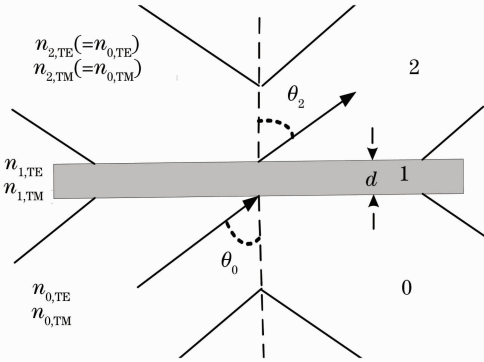


图 2 波导交叉处简单结构图

Fig. 2 Schematic diagram of cross point

式中 $\beta_1 = k_1 d \cos \theta_1$, k_1, β_1 分别为光波在区域 1 中的波数和传播常数,其中 $k_1 = 2\pi n_1/\lambda$, θ_1 为光波以入射角 θ_0 入射后的折射角,由菲涅耳定理得

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{n_{0,\text{TE}}}{n_{1,\text{TE}}} \sin \theta_0\right). \quad (2)$$

若取 θ_0 大于发生全内反射时的临界角,在这种情况下, θ_1 为复数,没有物理意义,故在图 2 中没有表示。

同理,对于 TM 模式,相应的透射率为

$$T_{\text{TM}}^{\text{tot}} = |t_{\text{TM}}^{\text{tot}}|^2 = \frac{n_{2,\text{TM}}}{n_{0,\text{TM}}} \times \frac{|t_{\text{TM}}^{0 \rightarrow 1}|^2 |t_{\text{TM}}^{1 \rightarrow 2}|^2}{|\exp(-i\beta_1) - r_{\text{TM}}^{1 \rightarrow 0} r_{\text{TM}}^{1 \rightarrow 2} \exp(i\beta_1)|^2}, \quad (3)$$

(1)与(3)式中的 r, t 分别为光波的反射系数与透射系数,其上方的数字与箭头组合代表光波的传播方向。

如果取入射光波到端口 1(或 2)的光功率为单位 1,并忽略其他损耗,那么对于 TE 模式与 TM 模式,透射到端口 1'(或 2')的光功率 $T_{\text{TE}}, T_{\text{TM}}$ 与反射到端口 2'(或 1')的光功率 $R_{\text{TE}}, R_{\text{TM}}$ 可分别表示为

$$R_{\text{TE}} = 1 - T_{\text{TE}}, \quad (4)$$

$$R_{\text{TM}} = 1 - T_{\text{TM}}. \quad (5)$$

由以上介绍的光开关原理可知,电极处于 OFF 态时, $T_{\text{TE}}, T_{\text{TM}}$ 的值越大,开关性能越好;电极处于 ON 态时, $R_{\text{TE}}, R_{\text{TM}}$ 的值越大,开关性能越好。

考虑到所设计的光开关的对称性,以下分析只针对光信号从端口 2 输入的情形。图 3 给出了针对不同缝宽 d ,当电极为 OFF 态时,开关的传输特性与入射角的关系。

由图 3 可见,在入射角相同时,缝宽对光开关的传输特性也有着明显的影响。即便当入射角大于全反射的临界角时,依然存在部分透射光,这是因为光

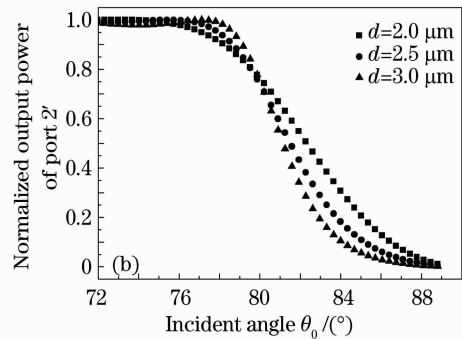
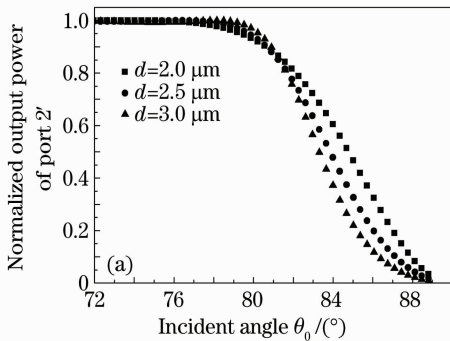


图 3 电极为 OFF 态时,不同的缝宽下开关传输特性与入射角的关系。(a) TE 模式;(b) TM 模式

Fig. 3 Transmission characteristics of the TIR TO switch as a function of incident angle for different gaps. (a) TE mode; (b) TM mode

波在反射时存在隧穿模(古斯-汉欣位移),而且缝宽小于光波波长时,隧穿模会耦合到波导 2' 中传输^[17]。因此为避免发生全内反射时隧穿模对开关性能的影响,选取缝宽最小为 2.5 μm 。

为分析方便,定义位于狭缝深度一半处的 SiON 与聚合物 ZP 材料分界面上的折射率之差变化量为 Δn ,这一差值在电极 ON 态时随施加于电极的功率而变化,它对开关的传输特性有直接的影响。为进一步确定狭缝宽度,针对 $d=2.5 \mu\text{m}$ 及 $d=$

3.0 μm 两种情形对开关传输特性进行了分析,其结果分别如图 4、5 所示。

由图 4 与图 5 可知,对于两种模式且对应 $\Delta n=0.0350$ 时,若缝宽 $d=2.5 \mu\text{m}$,则合适的入射角几乎被限制在 77.5°;若缝宽 $d=3.0 \mu\text{m}$,则合适的入射角范围将扩大到 77°~79°之间。可见缝宽取 $d=3.0 \mu\text{m}$ 比 $d=2.5 \mu\text{m}$ 的开关性能要好。因此,取缝宽 $d=3.0 \mu\text{m}$,相应入射角取 78°。

根据所选定的开关的各项设计参数,研究了开

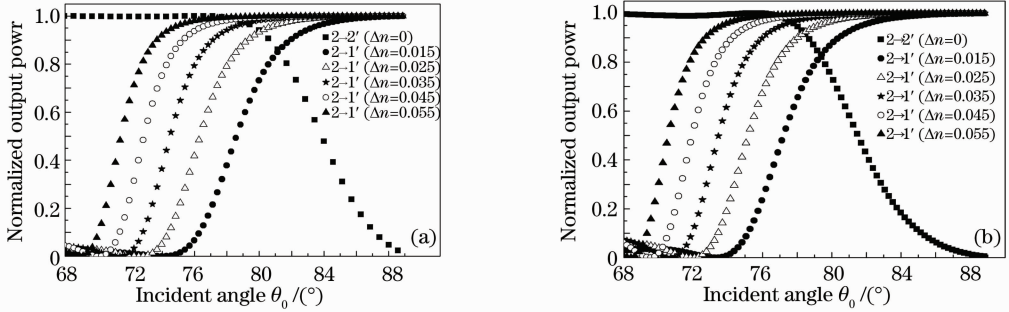


图 4 $d=2.5 \mu\text{m}$ 时,对于不同 Δn ,开关传输特性与入射角的关系。(a)TE 模式;(b) TM 模式

Fig. 4 Transmission characteristics of the TIR TO switch as a function of incident angle for different Δn when $d=2.5 \mu\text{m}$. (a) TE mode; (b) TM mode

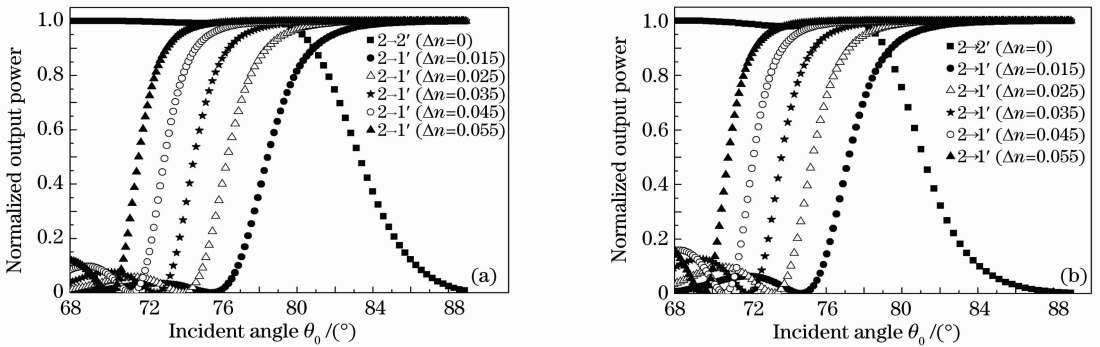


图 5 $d=3.0 \mu\text{m}$ 时,对不同的 Δn ,开关传输特性与入射角的关系。(a) TE 模式;(b) TM 模式

Fig. 5 Transmission characteristics of the TIR TO switch as a function of incident angle for different Δn when $d=3.0 \mu\text{m}$. (a) TE mode; (b) TM mode

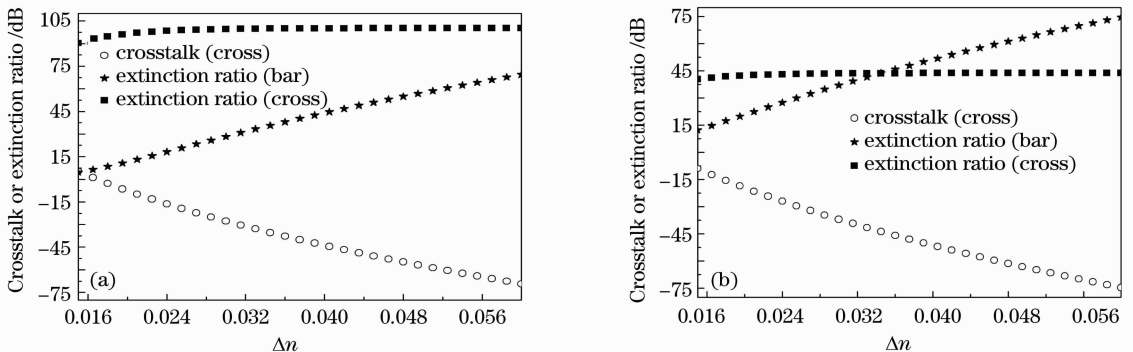


图 6 所设计的 TIR 热光开关的消光比及串扰与 Δn 的关系。(a)TE 模式;(b) TM 模式

Fig. 6 Extinction ratio and crosstalk of the designed TIR TO switch as a function of Δn . (a) TE mode; (b) TM mode

关的串扰及消光比与全反射界面处折射率变化的关系,如图 6 所示。由于入射角为 78° 时,TE 模式与 TM 模式在 Bar 态下串扰与 Δn 无关,其结果分别为 -100 dB 和 -43 dB,故未显示于图中。

根据图 6,对于设计的 SiON/聚合物全内反射热光开关,当反射区域 $\Delta n=0.0350$ 时开关就可实现 -36 dB 以下的串扰和 36 dB 以上的消光比。

3 光开关的电极设计与功耗分析

光开关波导交叉处纵切面结构如图 7 所示,这里聚合物包层的厚度选择为 $3.0 \mu\text{m}$ 。利用软件建立热传导模型^[18,19],模拟给定加热电极功率时这一横截面处的热分布特征,其结果如图 8 所示,此时电极所加功率为 2.8 mW ,其狭缝深一半处的 SiON 与聚合物分界面处的温度为 116°C ,每条等温线间隔 3°C 。根据模拟结果,可以将电极的结构参数取为 $40.0 \mu\text{m}$ 长, $5.0 \mu\text{m}$ 宽, $0.5 \mu\text{m}$ 厚。

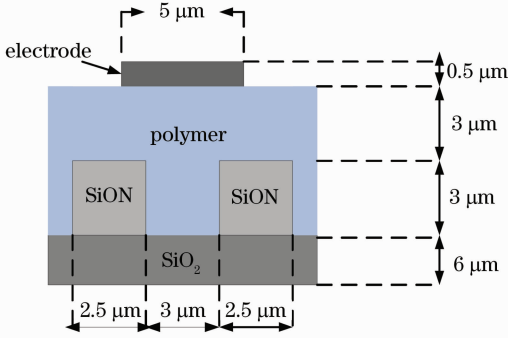


图 7 开关波导交叉处的纵切面图

Fig. 7 Longitudinal cross section of the switch at the waveguide cross point

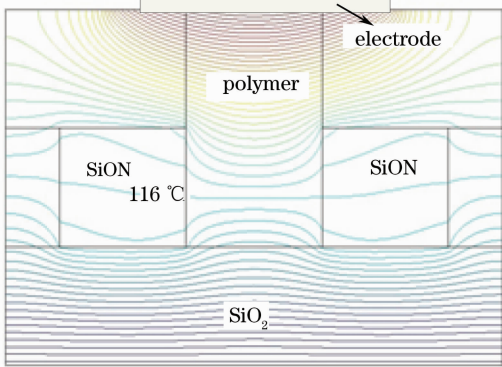


图 8 波导交叉处纵切面上的热分布特征

Fig. 8 Thermal profile of the longitudinal cross section at the waveguide cross point

进一步,根据 SiON 与聚合物 ZP 材料的热光系数,可以得到加热电功率与 Δn 的对应关系,其结果如图 9 所示。

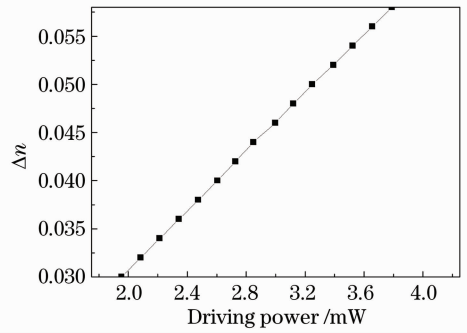


图 9 电功率与 Δn 的关系

Fig. 9 Relationship of Δn and the heater power

由图 9 可知, Δn 与所加驱动功率间成正比关系。尽管图 6 已表明随着 Δn 的增大,开关性能会更好,但根据图 9 可以看出其所需的驱动功率也会随之增加。因此综合图 6 与图 9,选取 $\Delta n=0.0350$,此时对应的驱动功率仅为 2.3 mW ,这既可满足开关性能要求,又能够减少功耗。可见,本文所设计的 SiON 与聚合物混合集成的全内反射热光开关在功耗方面有着很大优势。根据图 6 可知,当加热功率为 2.3 mW 时,对 TE 与 TM 两种模式的光波,开关串扰均在 -36 dB 以下,消光比均可达 36 dB。

4 结 论

利用聚合物与 SiON 相反的热光效应,采用混合集成的方法设计了一种新型结构的全内反射热光开关,该开关具有较低的驱动功率。理论分析表明,对 TE 与 TM 两种模式的光波,仅需 2.3 mW 的驱动功率便可实现大于 36 dB 的消光比及小于 -36 dB 的串扰。

参 考 文 献

- 1 B. J. Li, S. J. Chuan. 2×2 optical waveguide switch with bow-tie electrode based on carrier-injection total internal reflection in SiGe alloy [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(3): 206~208
- 2 X. Q. Jiang, J. Y. Yang, H. Z. Zhan *et al.*. Photon induced total internal reflection all optical switches [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2): 443~445
- 3 A. L. Zhang, K. T. Chan, M. S. Demokan *et al.*. Integrated liquid crystal optical switch based on total internal reflection [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(21): 211108
- 4 Ren Haixia, Liu Liren, Song Zhe *et al.*. Double refraction and reflection of sequential interfaces in a crystal and application to integration of $1 \times N$ optical switch [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 152~157
- 任海霞,刘立人,宋 哲等.晶体的连续双折射双反射及其集成应用: $1 \times N$ 电光开关 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 152~157
- 5 Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, Zhang Jun *et al.*. Research on repetition rate plasma Pockels cell with 20 mm aperture [J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1772~1775
- 张雄军, 吴登生, 张君等. 20 mm 孔径重复频率等离子体电光开关研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1772~1775
- 6 J. Y. Yang, Q. J. Zhou, Ray T. Chen. Polyimide-waveguide-based thermal optical switch using total-internal-reflection effect [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(16): 2947~2949
- 7 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui *et al.*. 2×2 total internal reflection optical switch using thermo-optic effect of polymer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2): 137~140
杨建义, 江晓清, 杨方辉等. 2×2 有机聚合物的全内反射型热光光开关 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 137~140
- 8 Xiaolong Wang, Brie Howley. Polarization independent all-wave polymer-based TIR thermo-optic switch [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(3): 1558~1565
- 9 T. Saito, Tatsuo Hatta. Polymeric waveguide optical switch with bascule structure using novel trench forming process [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(6): 791~798
- 10 L. Eldada, L. W. Shacklette. Advances in polymer integrated optics [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(1): 54~68
- 11 Wen Changli, Ji Jiarong, Dou Wenhua *et al.*. Polymer material for optical waveguide used in integrated circuit [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(7): 36~40
温昌礼, 季家镛, 窦文华等. 集成电路用聚合物光波导材料 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(7): 36~40
- 12 G. -L. Bona, R. Germann, B. J. Offrein. SiON high-refractive-index waveguide and planar lightwave circuits [J]. *IBM, J. Res. & Dev.*, 2003, **47**: 239~249
- 13 Meng Xiangsen, Yuang Jun, Ma Qingsong *et al.*. Study on the preparation methods of silicon oxynitride thin films [J]. *Materials Science & Engineering*, 1999, **17**(4): 10~13
孟祥森, 袁骏, 马青松等. 氮氧化硅薄膜制备方法的研究 [J]. *材料科学与工程*, 1999, **17**(4): 10~13
- 14 Yu Hui, Jiang Xiaoqing, Yang Jianyi *et al.*. Beam expansion law and its application in total internal reflection induced by thermo-optic effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 816~820
余辉, 江晓清, 杨建义等. 热光效应下的全内反射光束展宽规律以及应用 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 816~820
- 15 Chen S. Tsai, Bumman Kim, Fathirel-Akkari. Optical channel waveguide switch and coupler using total internal reflection [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1978, **QE-14**(7): 513~517
- 16 Liu Lijie, Yu Rongjin. Analysis of the mode propagation characteristics of dielectric waveguides by the effective index-finite element method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1994, **23**(1): 25~32
刘立杰, 于荣金. 介质光波导模式传播特性的有效折射率/有限元分析法 [J]. *光子学报*, 1994, **23**(1): 25~32
- 17 J. Peatross, M. Ware. Physics of light and optics. 2006 [DB/OL]. Available: <http://optics.byu.edu/>. pp: 79~88
- 18 Yang Jianyi, Jiang Xiaoqing, Yang Fanghui *et al.*. Thermal model of thermo-optical polymer devices [J]. *J. Optoelectronics & Laser*, 2000, **11**(4): 349~351
杨建义, 江晓清, 杨方辉等. 有机聚合物热光器件的热学模型 [J]. *光电子·激光*, 2000, **11**(4): 349~351
- 19 Yu Hui, Jiang Xiaoqing, Yang Jianyi *et al.*. Analysis of time response in the polymer thermo-optic devices [C]. The ICPR of Chinese Optical Society in 2004, Hangzhou, 2004: 145~148
余辉, 江晓清, 杨建义等. 有机聚合物热光器件的瞬态响应分析 [C]. 中国光学学会 2004 年学术大会, 杭州, 2004: 145~148

栏目编辑: 宋梅梅