

# 基于自相位调制效应的硅基中红外全光二极管\*

张学智 冯鸣† 张心正

(南开大学物理科学学院弱光非线性光子学教育部重点实验室, 天津 300071)

(2012年6月8日收到; 2012年7月10日收到修改稿)

信号单向导通器件是集成光学中一种重要的基本元件, 而中红外波段在空间遥感, 光谱分析等领域都有极其重要的应用. 本文提出了一种由两个硅基微环谐振腔构成, 基于自相位调制效应的硅基中红外全光二极管, 并利用数值模拟的方法进行了分析. 结果表明, 在输入光强为 0.5 mW 到 20 mW 之间时, 其非互易导通率可以大于 20 dB, 且正向透过时损耗小于 10 dB. 此外, 本文还讨论了环形谐振腔中的线性吸收率, 以及双稳态效应对结果的影响.

**关键词:** 全光二极管, 中红外, 硅基光子学

**PACS:** 42.15.Eq, 42.30.Lr, 42.60.Da, 42.65.Jx

**DOI:** 10.7498/aps.62.024201

## 1 引言

为了实现高速, 大容量的光信号处理, 十年来人们在集成硅基光电子学方面进行了大量的研究<sup>[1-3]</sup>. 其中一个基本的问题是如何实现光信号的非互易导通 (nonreciprocal transmission)<sup>[4-16]</sup>, 即二极管效应. 最近, 人们利用硅基环形谐振腔实现了可与 CMOS 兼容的近红外全光二极管<sup>[17]</sup>. 这种方案是基于由双光子吸收而导致的热光现象来实现单向导通效应的<sup>[18]</sup>, 而硅中的双光子吸收效应只能发生在 1.1  $\mu\text{m}$  到 2.2  $\mu\text{m}$  的波段<sup>[19]</sup>, 所以在中红外波段无法使用该方案实现二极管效应. 但是由于生物、化学中很多重要有机大分子的特征光谱都在 2.5  $\mu\text{m}$  到 5  $\mu\text{m}$  的中红外波段, 因而此波段在光谱分析, 空间遥感等方面有着极其重要的应用<sup>[20,21]</sup>, 所以如何在中红外波段中实现全光二极管也是值得人们去研究的.

在中红外波段, 硅材料具有得天独厚的优势<sup>[22]</sup>: 首先, 硅的折射率高, 对光场有很好的限制作用, 有利于在波导中实现较高的光功率密度; 其次, 硅有较大的三阶非线性系数, 可以产生较强

的自相位调制效应; 第三, 在中红外波段, 硅材料可以不受双光子吸收效应及其产生的自由载流子吸收效应的限制<sup>[23]</sup>, 有效地降低了光在波导中的传输损耗, 通过优化可减小至 1—2 dB/cm<sup>[24]</sup>; 第四, 硅在地壳中储量丰富, 成本低廉, 且加工工艺成熟. 由于硅材料的上述优势, 因而可以利用波导结构在较弱的输入信号作用下实现较强的非线性效应<sup>[25]</sup>.

本文提出了一种基于自相位调制效应的中红外硅基全光二极管设计方案. 此方案包含了两个硅基微环谐振腔和一根硅基直波导. 由于自相位调制效应的作用, 环形谐振腔的谐振波长由  $\lambda$  变为  $\lambda'$ , 进而可以实现光信号的单向导通. 经过数值模拟和优化, 此种类型的光二极管的最大非互易导通率 (nonreciprocal transmission ratio, NTR) 大于 40 dB.

## 2 器件的设计

本文所提出的中红外全光二极管的核心是两个硅基微环谐振腔, 并利用谐振腔的自相位调制效应实现光信号的单向导通, 下面分波导和器件两个方面介绍.

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB934101)、国家自然科学基金 (批准号: 60708001)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20070055082)、天津市国际科技合作项目 (批准号: 11ZCGHHZ01000) 和高等学校学科创新引智计划 (批准号: B07013) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: nkfm@mail.nankai.edu.cn

## 2.1 中红外硅基光波导的设计

能够在中红外波段低损耗传输光信号,并高效激发非线性效应的硅基环形波导的设计是构建整个器件的基础.一般的硅波导主要是基于绝缘体上硅 (silicon on insulator, SOI) 制成的,其基底为二氧化硅.但是在大部分中红外波段,二氧化硅是不透明的,所以人们采用蓝宝石做基底,来实现低损耗的中红外波导<sup>[24]</sup>.此处采用了一种以 SOI 为基底

的悬空硅波导,如图 1(a) 所示.在硅材料上用电子束刻蚀的方法制作若干小孔,然后向小孔中注入氢氟酸腐蚀掉基底中的二氧化硅,最终形成悬空硅波导.小孔与波导的间距和光场分布相比足够远,不会影响光在波导中的传播.和蓝宝石上硅 (silicon on sapphire) 波导相比,图 1(a) 所示悬空硅波导与周围介质折射率差更大,对光场分布有更好的局域效果,有利于实现较强的光功率密度进而高效的激发非线性效应,且成本较低.

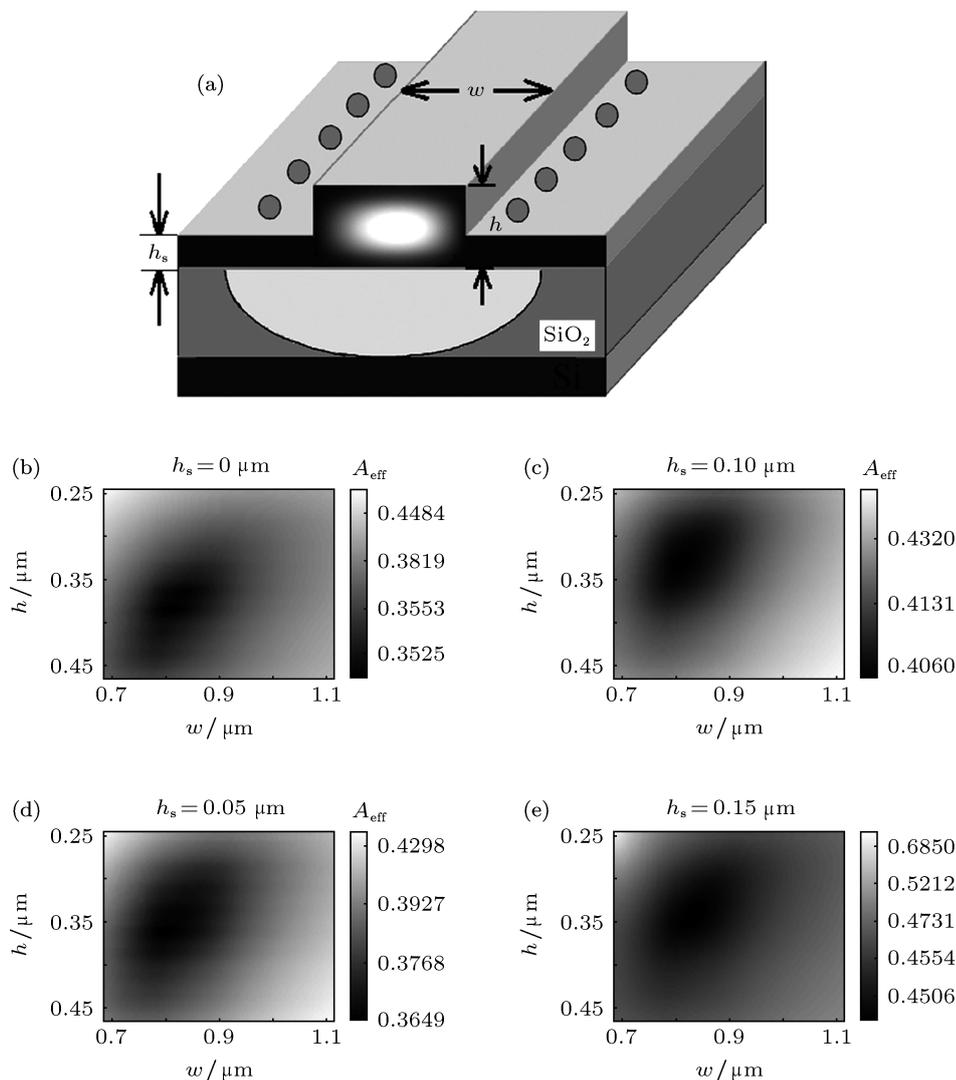


图 1 (a) 环形腔波导结构示意图; (b)—(e) 波导有效截面积与波导尺寸之间的关系

在此基础之上,还需要通过降低波导的有效截面积继续提高硅基环形波导的非线性效应.通过保角变换,可利用有限元法对环形硅波导的有效截面积进行计算<sup>[26]</sup>,此模型对于硅基波导在  $1.1\text{--}7 \mu\text{m}$  都适用,本文以  $2.5 \mu\text{m}$  波长为例进行研究.当微环

半径为  $5 \mu\text{m}$  时,不同  $h_s$  下硅波导有效截面积与  $w$  和  $h$  的关系如图 1(b)—(e) 所示,图中的色标为非线性色标.可以看出,  $h_s$  越小,波导的有效截面积越小.但是对于悬空波导,  $h_s$  最小约为  $50 \text{ nm}$ ,所以由图 1(c),在  $2.5 \mu\text{m}$  波段,波导最小有效截面积大约为

$0.37 \mu\text{m}^2$ , 相应波导的有效折射率约为 2.5.

## 2.2 全光二极管的设计

基于前述悬空硅波导, 本文所提出的全光二极

管, 由一根直线波导和两个环形谐振腔构成, 如图 2(a) 所示, 两个环形谐振腔拥有相似的参数, 但相互之间没有耦合. 谐振腔周围是微加热器, 能够细微调节谐振腔中波导的有效折射率, 以精细调节其谐振波长.

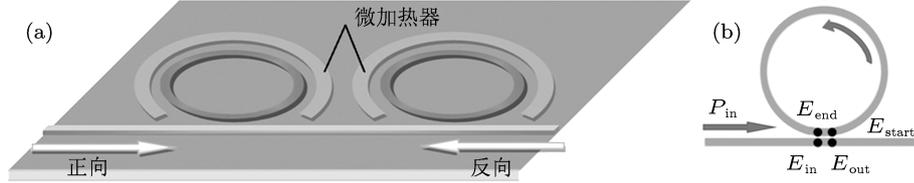


图 2 (a) 硅基环形腔中红外全光二极管结构示意图; (b) 直线波导与环形谐振腔耦合示意图

对于单个微环谐振腔, 当一束强度为  $P_{in}$  的连续激光通过直线波导与谐振腔耦合时, 电场满足以下方程:

$$E_{start} = tE_{end} + i\kappa E_{in}, \quad (1)$$

$$E_{out} = tE_{in} + i\kappa E_{end}, \quad (2)$$

其中  $E_{in}$ ,  $E_{out}$ ,  $E_{start}$ ,  $E_{end}$  代表了光信号在图 2(b) 中定向耦合器两侧相应位置处的电场,  $E_{in} = \sqrt{P_{in}}$ ,  $\kappa$  是直线波导和圆环间的电场耦合系数,  $t = \sqrt{1 - \kappa^2}$ .

而电场在环形谐振腔中传播的过程, 则可用如下方程描述:

$$\frac{\partial A(z)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A(z) + i\frac{n_2\omega}{cA_{eff}}|A(z)|^2A(z), \quad (3)$$

$$A(0) = E_{start}, \quad (4)$$

其中,  $A(z)$  是光信号在方位角位置  $z$  ( $0 < z < 2\pi R$ ) 的电场包络,  $n_2$  是 Kerr 系数,  $A_{eff}$  是谐振腔波导的有效截面积,  $\omega$  是电场的角频率,  $\alpha$  是线性吸收系数,  $c$  是真空中光速. 可以看到, 电场在谐振腔中传播时, 相位变化包括线性相移和非线性相移两部分, 其中线性相移由传播常数  $\beta$  决定. 非线性相移由自相位调制效应所导致. 因此, 当一定强度的光信号进入微环谐振腔时, 由于非线性相移的影响, 谐振腔的谐振频率将发生红移. 考虑到谐振腔长度很短, 线性吸收系数可以忽略, 并且非线性相移与线性相移相比为小量, 只保留其一阶量, 可由 (3) 式导出红移量与入射光强近似满足如下关系:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda \approx \frac{R \cdot n_{neff}}{M^2} \frac{n_2\omega}{cA_{eff}\alpha} P_{in}, \quad (5)$$

其中  $M$  为谐振腔中的波长数. 由此可见, 谐振波长的红移量正比于  $P_{in}$ .

因此, 图 2(a) 中左侧谐振腔被设计为在  $P_{in} = 0$  时, 谐振波长等于信号光波长, 即工作波长; 而右侧谐振腔在  $P_{in} = P_{signal}$  时, 谐振波长等于工作波长. 这样, 当信号光从左侧入射时, 由于  $P_{in} = P_{signal}$ , 左侧环的谐振波长不等于信号光波长, 因而信号光会损失小部分能量穿过左侧环而不发生谐振; 当到达右侧环时,  $P_{in} < P_{signal}$ , 因而也会穿过右侧环而不发生谐振. 当信号光从右侧入射时, 由于  $P_{in} = P_{signal}$ , 右侧环的谐振波长等于信号光波长, 因而信号光将在右侧环中谐振而损失绝大部分能量; 剩余的信号光到达左侧环时, 能量很低,  $P_{in} \approx 0$ , 左侧环的谐振波长近似等于信号光波长, 因而信号光又将发生

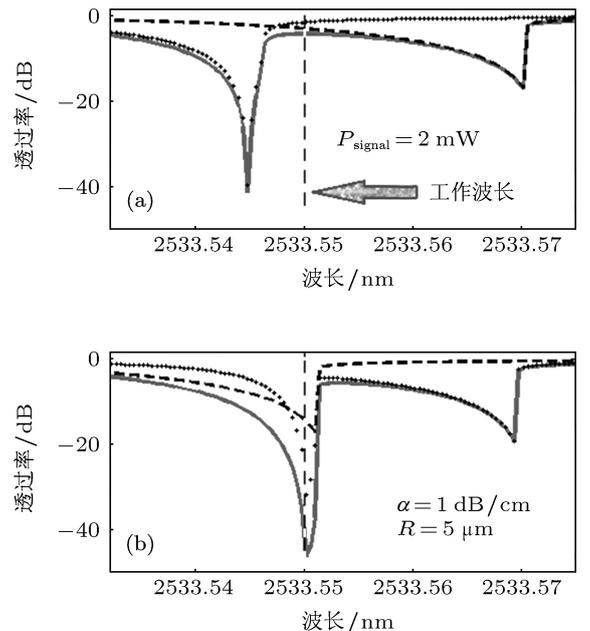


图 3 在 2 mW 信号功率下, 线性吸收系数为 1 dB/cm 的环形腔全光二极管透过谱 (a) 正向入射时左环透过谱 (虚线)、右环透射谱 (点线)、总透射谱 (实线); (b) 反向入射时左环透过谱 (点线)、右环透射谱 (虚线)、总透射谱 (实线)

谐振而使剩余能量进一步消耗. 这样, 就实现了光信号的单向导通. 并且, 通过微加热器对微环的折射率进行调节, 可以方便地改变二极管的工作波长, 同时保持最大的非互易导通率.

### 3 器件的性能

利用转移矩阵法<sup>[27]</sup>和四阶龙格库塔法可对直波导与两个环形谐振腔间的耦合以及光在谐振腔中的传播过程进行数值模拟, 深入了解全光二极管的工作特性. 此过程中, 对于每一个波长, 以随机噪

声作为初始状态, 反复依次计算方程(1)—(4), 当电场在谐振腔传播 100 圈的变化小于  $10^{-12}$  时, 即认为波导中的电场达到了稳定状态, 从而获得全光二极管的透过率曲线.

在模拟过程中, 两个谐振腔的半径同设为  $5 \mu\text{m}$ , 线性吸收系数为  $1 \text{ dB/cm}$ , 且两个环都处在临界耦合的状态 (critical coupling). 谐振腔波导的有效截面积为  $0.37 \mu\text{m}^2$ , 有效折射率为 2.5, 并通过加热的方法进行微调以实现最佳的工作状态, 工作波长为  $2533.55 \text{ nm}$ , 非线性 Kerr 系数  $n_2 = 3 \times 10^{14} \text{ cm}^2/\text{W}^{[28]}$ .

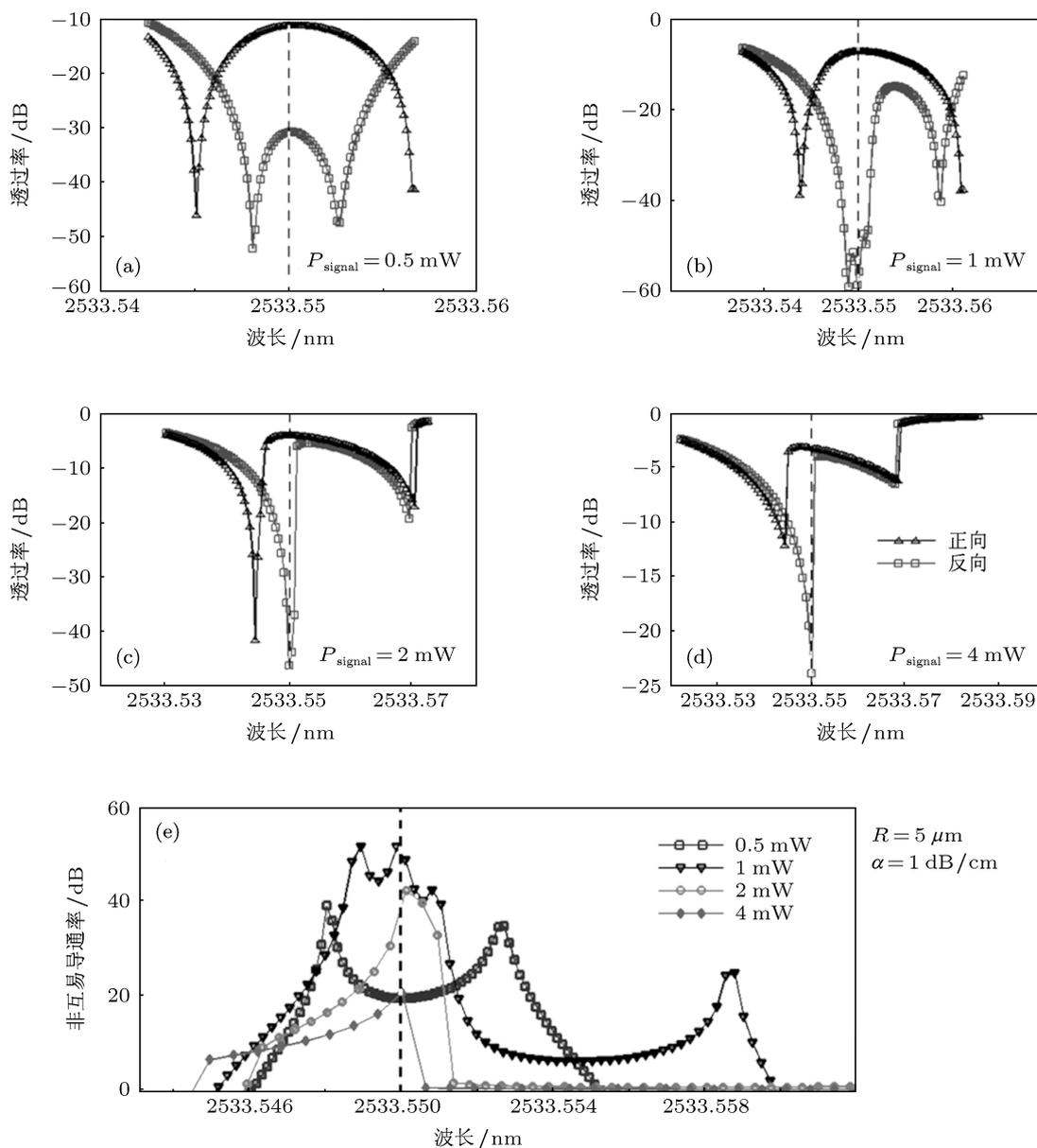


图 4 (a)—(d) 谐振腔波导的线性损耗为  $1 \text{ dB/cm}$  时二极管在不同输入功率下工作在最佳状态时的透过谱, 其中三角为正向透射谱, 方块为反向透射谱; (e) 为不同输入功率下非互易导通率与波长的关系

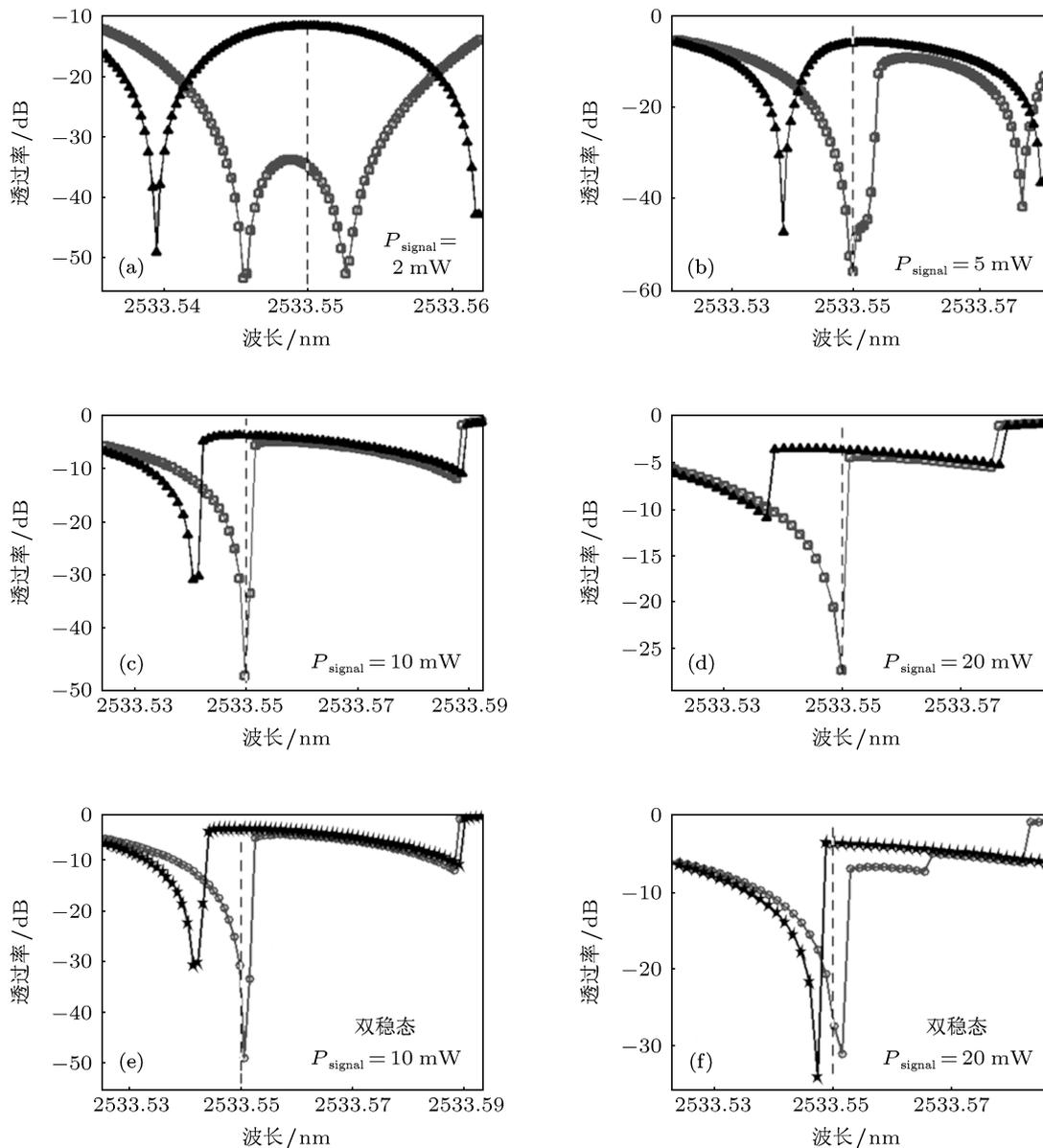


图5 谐振腔波导的线性损耗为 2 dB/cm 时二极管在不同输入功率下工作在最佳状态时的透过谱 (a)—(d) 代表以随机噪声为起始状态的稳态结果, 其中三角代表正向透过率, 方块代表反向透过率; (e), (f) 代表以  $P_m/\kappa^2$  为腔中初始光强所得到的稳态结果, 五星代表正向透过率, 圆点代表反向透过率

### 3.1 二极管的基本工作性能

首先取输入信号功率为 2 mW, 对光信号在全光二极管中的正向 (由左向右) 和反向 (由右向左) 的传输特性进行模拟, 其各项光谱透射性能如图 3 所示.

可以看到, 当信号光正向传输时, 左侧微环的谐振波长移到了 2533.57 nm, 对应信号光波长处的损耗为 2.75 dB, 而信号光进入右侧微环时, 其谐振波长只移动到了 2533.544 nm, 对应信号光处的损耗为 1.2 dB; 当信号光反向传输时, 右侧微环的谐振波长即为信号光波长, 信号光的损耗为 17 dB, 而

在左侧微环中, 工作波长仍处于谐振状态, 信号光的损耗为 30 dB. 这样, 信号光的正向传输损耗为 3.95 dB, 而反向传输损耗大于 45 dB, 很好的实现了单向导通.

### 3.2 二极管的功率响应性能

全光二极管工作的功率范围也是二极管的重要性能参数. 不同入射功率下二极管的透过谱如图 4 所示. 可以看到, 当入射信号光功率过低时, 由于不能产生足够的非线性效应, 谐振波长红移量较小, 从而使信号光正向入射时在左环损耗过大, 导致正

向透过率下降,而在反向入射时未能在右环充分谐振,导致反向透过率上升.而当入射信号光功率过高时,自相位调制效应会使得微环的谐振波长偏离过远,最终导致能量在任何波长下都不能有效地耦合进谐振腔中.在这些能量范围内,正向透过率和反向透过率几乎相等,因而光二极管只能工作在某个特定的能量范围内.图 4(e) 是不同输入光强下非互易导通率与波长的关系,可以看到,本文中所提出的结构,在 500  $\mu\text{W}$  到 4 mW 的功率范围内,都可以保持正向传输损耗小于 10 dB,同时非互易导通率  $> 20$  dB.

### 3.3 线性吸收系数对二极管性能的影响

线性吸收系数  $\alpha$  是硅波导的重要性能参数.在全光二极管中,  $\alpha$  增大到 2 dB/cm,同时保持其他参数不变的模拟结果如图 5 所示.可以看到,较大的线性吸收系数导致谐振腔中的光强不能像以前一样有效的积累到很高的水平而激发显著的非线性效应;另一方面,每一个谐振腔透射谱的半高宽度也会随之增大,所以需要更强的入射光强来激发自相位调制效应而引起谐振频率足够的红移.如图 5 所示,线性损耗较大时光二极管工作在高功率区域,范围约从 2 mW 到 20 mW.因而光二极管的工作能量区间还可以通过级联谐振腔对的方法予以拓展.

### 3.4 全光二极管中的双稳态

当器件内的初始光强不同时,器件最终达到的

稳定状态不同,即为双稳态现象,这会对器件的工作性能造成一定的影响,本文对此同样进行了研究.当微环谐振时,腔内光强最大,为  $P_{\text{in}}/\kappa^2$ ;而当微环远离谐振时,腔内光强最小.可以用噪声代替,因此本文分别以噪声和  $P_{\text{in}}/\kappa^2$  为初始光强,对二极管的正反向透射性能进行了计算,其结果也表示在图 5(a)—(d) 为初始光强为噪声得到的透射谱,图 5(e)—(f) 为初始光强为  $P_{\text{in}}/\kappa^2$  时得到的透射谱.可以看出,光学双稳态效应并不会对全光二极管的单向导通特性造成大的影响.当输入光强小于 10 mW 时,如图 5(c) 和 (e),输入光强较弱,尚未达到产生光学双稳态效应的阈值;而当输入光强大于 10 mW 时,如图 5(d) 和 (f),尽管会产生双稳态效应,使得谐振波长有少量红移,但是这种效应很弱,不会影响到工作波长.

## 4 结论

本文设计了一种由硅基双环谐振腔构成的中红外全光二极管.因为没有了双光子吸收效应的影响,谐振腔中的能量可以积累到一个较高的水平,并通过自相位调制效应使得谐振腔的谐振频率红移,进而实现信号的单向导通.此方案可以在输入能量变化范围为 10 dB 的区间内实现较好的工作特性,非互易导通率大于 20 dB,同时全光二极管的工作能量范围可以通过调节线性吸收系数的方法进行调整.

- [1] Alduino A, Paniccia M 2007 *Nat. Photonics* **1** 153
- [2] Miller D A B 2000 *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* **6** 1312
- [3] Lee B G, Chen X G, Biberman A, Liu X P, Hsieh I W, Chou C Y, Dadap J I, Xia F N, Green W M J, Sekaric L, Vlasov Y A, Osgood R M Jr., Bergman K 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 398
- [4] Espinola R L, Izuhara T, Tsai M C, Osgood R M Jr., Dötsch H 2004 *Opt. Lett.* **29** 941
- [5] Zaman T R, Guo X, Ram R J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 023514
- [6] Bi L, Hu J J, Jiang P, Kim D H, Dionne G F, Kimerling L C, Ross C A 2011 *Nat. Photonics* **7** 58
- [7] Mingaleev S F, Kivshar Y S 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2241
- [8] Gallo K, Assanto G, Parameswaran K R, Fejer M M 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 314
- [9] Soljačić M, Luo C Y, Joannopoulos J D, Fan S H 2003 *Opt. Lett.* **28** 637
- [10] Hwang J, Song M H, Park B, Nishiura S, Toyooka T, Wu J W, Takanishi Y, Ishikawa K, Takezoe H 2005 *Nat. Materials* **4** 383
- [11] Manipatruni S, Robinson J T, Lipson M 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 213903
- [12] Yu Z F, Fan S H 2009 *Nat. Photonics* **3** 91
- [13] Kang M S, Butsch A, Russell P S J 2011 *Nat. Photonics* **5** 549
- [14] Alberucci A, Assanto G 2008 *Opt. Lett.* **33** 1641
- [15] Zhu H B, Jiang C 2011 *J. Lightwave Technol.* **29** 1647
- [16] Tien M, Mizumoto T, Pintus P, Kromer H, Bowers J E 2011 *Opt. Express* **19** 11740
- [17] Fan L, Wang J, Varghese L T, Shen H, Niu B, Xuan Y, Weiner A M, Qi M H 2012 *Science* **335** 447
- [18] Xu Q F, Lipson M 2006 *Opt. Lett.* **31** 341
- [19] Raghunathan V, Shori R, Stafsudd O M, Jalali B 2006 *Phys. Stat. Sol. (a)* **203** R38
- [20] Krier A 2005 *Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics* (Berlin: Springer)
- [21] Sorokina I T, Vodopyanov K L 2003 *Solid-State Mid-Infrared Laser Sources* (Berlin: Springer)

- [22] Jalali B 2010 *Nat. Photonics*. **4** 506
- [23] Leuthold J, Koos C, Freude W 2010 *Nat. Photonics*. **4** 535
- [24] Li F X, Jackson S D, Grillet C, Magi E, Hudson D, Madden S J, Moghe Y, O'Brien C, Read A, Duvall S G, Atanackovic P, Eggleton B J, Moss D J 2011 *Opt. Express* **19** 15212
- [25] Agrawal G P 2007 *Nonlinear Fiber Optics 4th edition* (New York: Elsevier)
- [26] Heiblum M, Harris J H 1975 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **QE-11** 75
- [27] Peng Z 2007 *Coupled multiple micro-resonators design and active semiconductor micro-resonator fabrication* (Ann Arbor: ProQuest)
- [28] Tien E K, Huang Y W, Gao S M, Song Q, Qian F, Kalyoncu S K, Boyraz O 2010 *Opt. Express* **18** 21981
- [29] Qiu C Y, Shu J, Li Z, Zhang X Z, Xu Q F 2011 *Opt. Express* **19** 5143

# All-optical diode in mid-infrared waveband based on self-phase modulation effect in silicon ring resonator\*

Zhang Xue-Zhi Feng Ming<sup>†</sup> Zhang Xin-Zheng

(The MOE Key Laboratory of Weak-Light Nonlinear Photonics, School of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

(Received 8 June 2012; revised manuscript received 10 July 2012)

## Abstract

Nonreciprocal transmission device is one of the fundamental elements in integrated optics, and mid-infrared is a widely used waveband in many areas, such as remote sensing or spectrum analysis. An all-optical diode based on self-phase modulation (SPM) effect is numerically demonstrated in mid-infrared waveband. The diode consists of a linear waveguide and double silicon ring resonators. The nonreciprocal transmission ratio can be more than 20 dB in a power range between 0.5 mW and 20 mW, while the transmission loss in forward direction is less than 10 dB. Moreover, the influences of linear absorption coefficient of ring resonators and the bi-stability effect on the performance of the diode are discussed.

**Keywords:** optical diode, mid-infrared, silicon photonics

**PACS:** 42.15.Eq, 42.30.Lr, 42.60.Da, 42.65.Jx

**DOI:** 10.7498/aps.62.024201

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60708001), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (Grant No. 20070055082), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB934101), International cooperation program of Tianjin (Grant No. 11ZCGHHZ01000), and the 111 Project (Grant No. B07013).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: nkfm@mail.nankai.edu.cn