

文章编号: 1006-4710(2013)03-0314-05

# SiGe-OI 对称脊形定向耦合器的研究

冯松<sup>1,2</sup>, 高勇<sup>1,2</sup>

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安工程大学 理学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 基于 SiGe-OI 新型半导体材料, 分析了 SiGe-OI 对称脊形定向耦合器的横向和纵向耦合理论, 在 BPM 模拟软件平台上, 建立了 SiGe-OI 对称脊形定向耦合器结构, 分别模拟了其完全耦合和 3 dB 耦合的光场传输特性, 给出了脊形宽度、耦合间距、光波波长和 Ge 含量对耦合长度的影响; 重点分析了耦合系数、脊形宽度、耦合长度、耦合间距、光波波长以及 Ge 含量等物理量之间的关系, 得出了为了便于光电集成, 可以在本文模拟的参数值范围内, 选择较大的脊形宽度和较小的耦合间距和 Ge 含量的结论, 为 SiGe-OI 对称脊形定向耦合器的研制提供了技术参考。

**关键词:** 绝缘层上锗硅; 定向耦合器; 耦合长度; 耦合间距

中图分类号: TN252 文献标志码: A

## Research on SiGe-OI Symmetrical Ridge Directional Coupler

FENG Song<sup>1,2</sup>, GAO Yong<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Automation Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Department of Applied Physics, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In this paper, based on new SiGe-OI semiconductor materials, vertical and horizontal coupling theory of SiGe-OI symmetrical ridge directional coupler are analyzed. The structure of SiGe-OI symmetrical ridge directional coupler is built by BPM simulation software. Full coupling and 3dB coupling of coupler are respectively simulated, and ridge width, coupling gap, wavelength and the effects of Ge contents upon coupling length are given out. The main relationship among coupling coefficient, ridge width, coupling length, coupling gap, wavelength and Ge contents are analyzed in priority. With the range of simulation parameter values in this paper, larger ridge width, small coupling gap and small Ge contents are better for optoelectronic integration in conclusion, and this research provides a technical reference for the manufacturing of SiGe-OI symmetrical ridge directional coupler.

**Key words:** SiGe-OI; directional coupler; coupling length; coupling gap

SiGe-OI 材料是一种新型半导体材料, 它的结构与 SOI 相类似, 只是把绝缘层上的硅换成了锗硅, 利用了 SiGe-OI 材料制作的光电器件具有禁带宽度可调、折射率高、对光波限制能力强等优点, 因此 SiGe-OI 成为了一种制作光电器件的理想材料。定向耦合器是光电集成中一种重要的器件单元, 是一类可以实现光信号的分路、合路、插入和分配的光无源器件, 也是光纤通信中的基础器件, 可以用于制造滤波器、模式分离器、电光调制器等。根据定向耦合器结构中折射率分布和波导宽度选取的不同, 可以分为

对称型和非对称型; 根据端口数目的不同, 又可以分为  $2 \times 2$  型、 $2 \times 3$  型、 $4 \times 4$  型、 $8 \times 8$  型等。

本文研究的 SiGe-OI 对称脊形定向耦合器是在前期对 SiGe-OI 单模光波导分析<sup>[1-2]</sup>的基础上, 采用  $2 \times 2$  型对称脊形结构, 通过模拟软件建立 SiGe-OI 对称脊形定向耦合器模型, 并对其特性进行分析。

## 1 理论分析

SiGe-OI 对称脊形定向耦合器的耦合理论包括横向模式耦合和纵向模式耦合两种。对于横向模式

收稿日期: 2013-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61204080); 陕西省教育厅科研计划资助项目(2013JK1111); 西安工程大学博士科研启动基金资助项目(BS1128)。

作者简介: 冯松, 男, 博士, 讲师, 研究方向为新型半导体器件及其集成。E-mail: fengs@xaut.edu.cn。

耦合,可以将 SiGe-OI 对称脊形定向耦合器的耦合区等效为两个平行的波导,当这两个波导靠得很近时,由于消逝波的作用发生在两波导之间的能量耦合就称为横向耦合<sup>[3-5]</sup>,如图 1 所示。

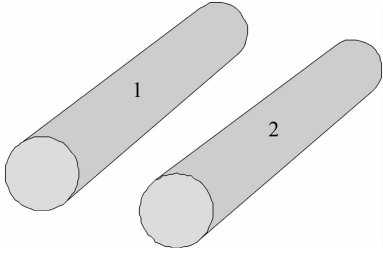


图 1 两个平行波导

Fig. 1 Two parallel waveguides

耦合波导系统的求解非常复杂,因此当两波导之间的耦合较弱时,可以把这个耦合波导系统假设为两波导单独存在时的场的组合,即:

$$\begin{cases} \mathbf{E} = A_1(z)\mathbf{E}_1 + A_2(z)\mathbf{E}_2 \\ \mathbf{H} = A_1(z)\mathbf{H}_1 + A_2(z)\mathbf{H}_2 \end{cases} \quad (1)$$

根据理想的单根光波导满足的正交性,以及麦克斯韦方程可以得到耦合波方程为:

$$\begin{cases} \frac{da_1(z)}{dz} = -j\beta_1 a_1(z) + jK_{21} a_2(z) \\ \frac{da_2(z)}{dz} = -j\beta_2 a_2(z) + jK_{12} a_1(z) \end{cases} \quad (2)$$

$K_{12}$  和  $K_{21}$  是耦合系数,描述了两波导之间相互作用的大小。一般情况下,耦合系数都是复数,并且根据 Lorentz 互易定理可知它们之间具有互易特性:

$$K_{12} = K_{21}^* \quad (3)$$

利用式(2)和耦合方程(3),可以得到波导 1 和波导 2 中传播的功率分别为:

$$\begin{cases} P_1(z) = a_1(z)a_1^*(z) = a_1^2 \cos^2 Kz \\ P_2(z) = a_2(z)a_2^*(z) = a_2^2 \sin^2 Kz \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,光波功率可以在波导 1 和波导 2 之间周期性交换,当  $\sin^2 Kz = 1$  时,光功率完全从波导 1 耦合到波导 2 中。对于纵向模式耦合,可以定义为当光波导的纵向分布不均匀时,将导致波导内传播模式正交性的破坏,在不同的传播模式之间产生的能量耦合就称为纵向耦合<sup>[6-8]</sup>。利用缓变条件,以及理想波导模式的正交、归一化关系,可以得到:

$$\begin{cases} \frac{\partial A_k^-}{\partial z} = \sum_i k_{ik}^{+-} A_i^+ \exp[-j(\beta_i + \beta_k)z] + \sum_i k_{ik}^{--} A_i^- \exp[j(\beta_i - \beta_k)z] \\ \frac{\partial A_k^+}{\partial z} = \sum_i k_{ik}^{++} A_i^+ \exp[-j(\beta_i - \beta_k)z] + \sum_i k_{ik}^{-+} A_i^- \exp[j(\beta_i + \beta_k)z] \end{cases} \quad (5)$$

式(5)是波导纵向不均匀性导致的传播模式之间的耦合方程,该式中的系数  $k_{ik}^{+-}$ ,  $k_{ik}^{--}$ ,  $k_{ik}^{++}$  和  $k_{ik}^{-+}$  是波导传播的模式间的耦合系数,形式如下:

$$\begin{cases} k_{ik}^{+-} = \frac{-k_0^2}{j2\beta_k} \int_s (n^2 - n_0^2) \psi_i^+ \psi_k^{-*} ds \\ k_{ik}^{--} = \frac{-k_0^2}{j2\beta_k} \int_s (n^2 - n_0^2) \psi_i^- \psi_k^{-*} ds \\ k_{ik}^{++} = \frac{k_0^2}{j2\beta_k} \int_s (n^2 - n_0^2) \psi_i^+ \psi_k^{+*} ds \\ k_{ik}^{-+} = \frac{k_0^2}{j2\beta_k} \int_s (n^2 - n_0^2) \psi_i^- \psi_k^{+*} ds \end{cases} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,各耦合系数还满足如下关系:

$$\begin{cases} k_{ik}^{--} = -k_{ik}^{++} \\ k_{ik}^{+-} = -k_{ik}^{-+} \end{cases} \quad (7)$$

该式表明同一波导中,无论传播的模式是什么方向的,他们之间的耦合量都是相等的。另外,由于传播方向的不同,正向模和负向模的耦合系数间有一个“-”号的差别。

## 2 结构设计及模拟分析

对称脊形 SiGe-OI 定向耦合器的结构如图 2 所示,它主要由输入波导、输出波导、连接波导和耦合区波导组成<sup>[9-14]</sup>。图中  $L_{in}$  和  $L_{out}$  分别为输入波导和输出波导的长度,  $L_{trans}$  为耦合区波导的长度,  $d$  为耦合间距。对于输入波导和输出波导来说,它们的主要目的是稳定输入光和输出光,因此只要其长度  $L_{in}$  和  $L_{out}$  能达到稳定光场的目的就可以,为了避免传输损耗较大,长度不应太大,本文选择  $L_{in} = L_{out} = 30 \mu\text{m}$ 。

定向耦合器的连接波导部分与 Y 分支功率分配器中 Y 分支的选择一样,选择 S 型的弯曲波导结构,根据参考文献[15]的分析,选取  $R = 9 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 10^\circ$  的结构参数。

耦合区波导的参数主要有耦合系数、耦合长度、耦合间距以及 Ge 含量等。当一束光从输入端 1 进入定向耦合器后,根据设计要求的不同,既可以将能量完全耦合到输出端 2,也可以像 Y 分支功率分配器那样,将能量均匀分配到输出端 1 和输出端 2 中,实现 3 dB 功分器的作用。

图 3(a) 为完全耦合的 SiGe-OI 定向耦合器光场传输图,图 3(b) 为 3 dB 耦合的 SiGe-OI 定向耦合器光场传输图。

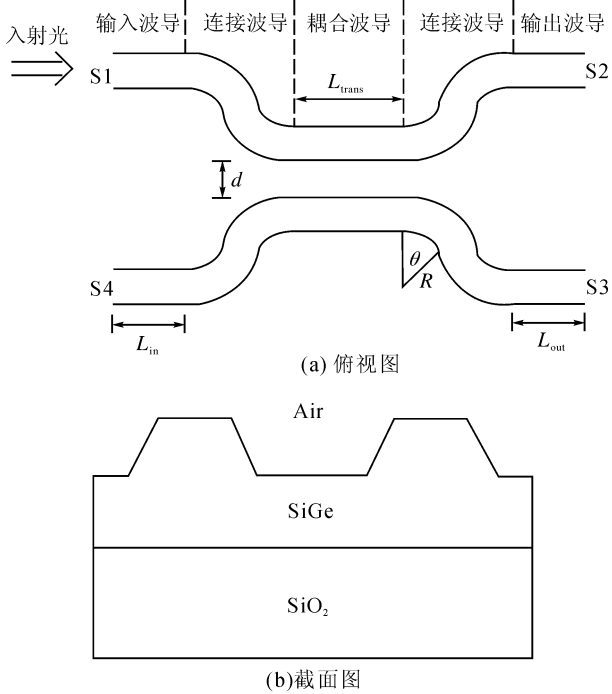
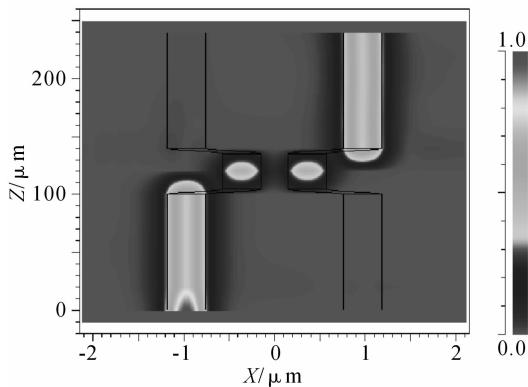
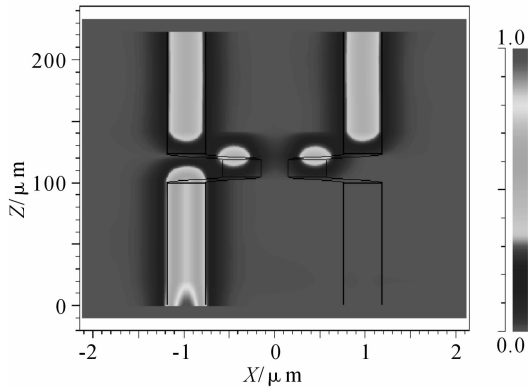


图2 定向耦合器结构

Fig. 2 The structure of directional coupler



(a) 完全耦合的定向耦合器光场传输图



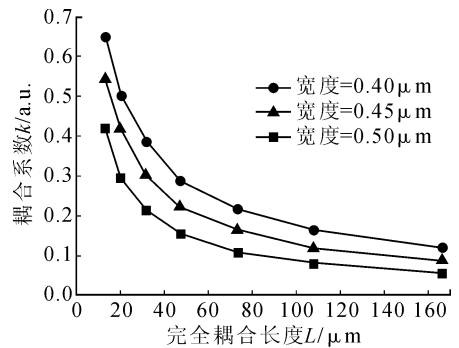
(b) 3 dB耦合的定向耦合器光场传输图

图3 定向耦合器光场传输图

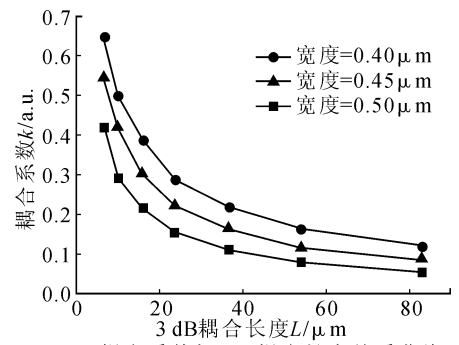
Fig. 3 The optical field transmission of directional coupler

根据耦合理论可知,耦合系数是模场的叠加积分,对图2中的输出功率做归一化处理,将模拟出的

耦合长度代入式(4)可以得到,当耦合间距一定时,不同波导宽度下的耦合系数与完全耦合长度和3 dB耦合长度关系曲线分别如图4(a)和图4(b)所示。从图4(a)中可以看出随着耦合长度的增加,耦合系数逐渐减小,当完全耦合距离  $L > 50 \mu\text{m}$  后,耦合系数下降缓慢。当耦合长度一定时,随着波导宽度的增加,耦合系数也随之降低。当耦合系数一定时,增大 SiGe-OI 定向耦合器的脊形宽度,也可以有效减小耦合长度,便于 SiGe-OI 定向耦合器的光电集成。从图4(b)中也可以得到与图4(a)中一致的结论,对比图4(a)和图4(b)可以发现,3 dB耦合长度刚好是完全耦合长度的一半。



(a) 耦合系数与完全耦合长度关系曲线



(b) 耦合系数与3 dB耦合长度关系曲线

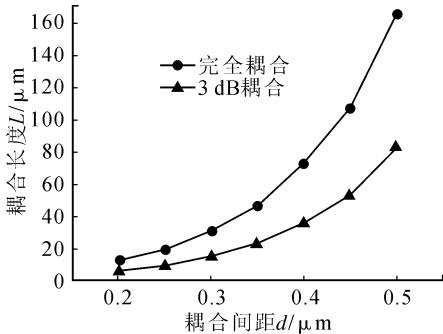
图4 不同波导宽度下的耦合系数与完全耦合长度、3dB耦合长度的关系

Fig. 4 The coupling coefficient as full coupling and 3dB coupling length with waveguide width

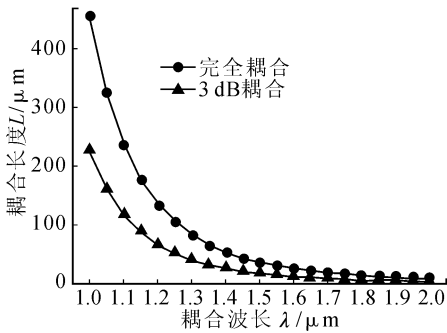
通过模拟得到的耦合间距与耦合长度的关系曲线如图5(a)所示,从图5(a)中可以发现,随着耦合间距的增加,耦合长度逐渐增大;当耦合间距  $d \leq 0.35 \mu\text{m}$  时,耦合长度随着耦合间距的增加而缓慢增加,耦合间距从  $0.2 \mu\text{m}$  变化到  $0.35 \mu\text{m}$ ,耦合长度从  $11.9 \mu\text{m}$  增加到了  $45.5 \mu\text{m}$ ,耦合间距增大了  $0.15 \mu\text{m}$ ,而耦合长度只增加了  $33.6 \mu\text{m}$ ;当耦合间距  $d > 0.35 \mu\text{m}$  后,耦合长度随着耦合间距的增加呈线性迅速增加,耦合间距从  $0.35 \mu\text{m}$  变化到  $0.5 \mu\text{m}$ ,耦合长度从  $45.5 \mu\text{m}$  增加到了  $163.5 \mu\text{m}$ ,耦合间距增大了  $0.15 \mu\text{m}$ ,耦合长度却迅速增大了 118

$\mu\text{m}$ ;因此,耦合间距设计的较小,也可以有效减小耦合长度,有利于 SiGe-OI 定向耦合器的光电集成。从此图中也可以得到与图 4 一样的结论:当耦合间距一定时,3dB 耦合长度刚好是完全耦合长度的一半。

当耦合间距一定时,耦合长度与波长的关系如图 5(b)所示。从图中可以看出,随着耦合波长的增大,耦合长度也逐渐减小;当波长  $\lambda < 1.3 \mu\text{m}$  时,随着耦合波长的增大,耦合长度呈线性减小趋势;当波长  $\lambda \geq 1.3 \mu\text{m}$  后,随着耦合波长的增大,耦合长度增加缓慢;当  $\lambda \geq 1.55 \mu\text{m}$  后,随着耦合波长的增大,耦合长度增加幅度很小,几乎不变。



(a) 耦合间距与耦合长度的关系曲线



(b) 耦合波长与耦合长度的关系曲线

图5 耦合间距、耦合波长与耦合长度的关系曲线

Fig.5 The relationship curve of coupling length as coupling gap and wavelength

不同耦合间距下,耦合长度与 Ge 含量的关系曲线如图 6 所示。从图中可以看出,随着 Ge 含量的增加,耦合长度随之增长,当耦合间距较小时,随着 Ge 含量的增加耦合长度增加幅度不大,耦合间距越大,耦合长度增加幅度越大。耦合长度过长不利于耦合器的集成,因此适当减小耦合间距可以有效控制由于 Ge 含量的增加而造成的耦合长度的增长。

本文中模拟的入射光频率与 S 参数的关系如图 7(a)所示,文献中实测的入射光频率与 S 参数的关系<sup>[16]</sup>如图 7(b)所示,通过模拟曲线和实测曲线二者的关系对比可以看出,模拟曲线与实测曲线相似,在某一频率下都具有很强的光场耦合,此时 S2 端口输

出光损耗很大,功率近似为 0,S3 端口输出光损耗很小,入射光从 S1 端口耦合到了 S3 端口。模拟数据与文献实测数据具有很大的相似性,从而验证了本文中定向耦合器所采用的模型和研究机理的正确性。

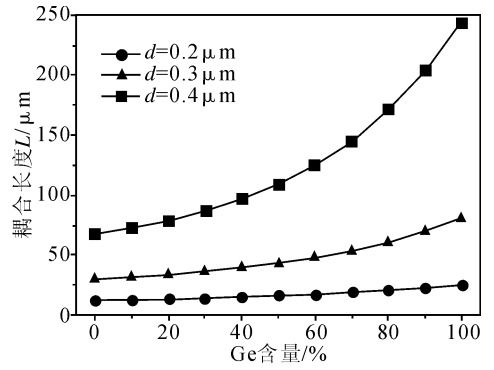
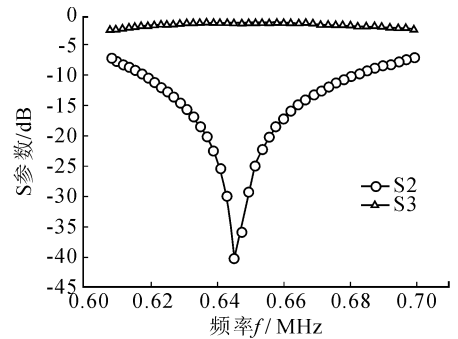
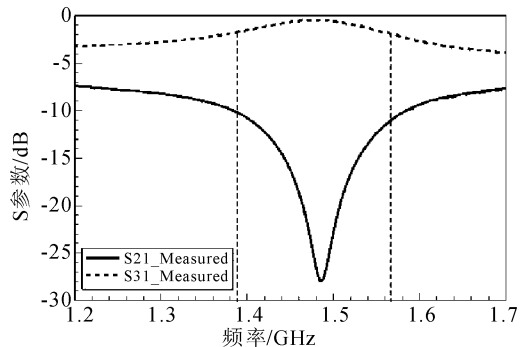


图6 Ge 含量与耦合长度的关系

Fig.6 The relationship between coupling length and Ge percentage



(a) S参数的模拟结果



(b) S参数的测试结果

图7 入射光频率与 S 参数的关系曲线

Fig.7 The relationship curve of S parameters as frequency

### 3 结论

本文在新型 SiGe-OI 单模光波导的基础上,分析了 SiGe-OI 对称脊形定向耦合器的横向和纵向耦合理论,利用 BPM 模拟软件,建立了 SiGe-OI 对称脊形定向耦合器结构,并选取了  $L_{\text{in}} = L_{\text{out}} = 30 \mu\text{m}$ ,  $R = 9 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 10^\circ$  的结构参数。在此定向耦合器结

构的基础上,得到了完全耦合和 3dB 耦合的光场传输特性,模拟了不同脊形宽度下,耦合长度对耦合系数的影响,以及耦合间距、光波波长和 Ge 含量对耦合长度的影响,重点分析了耦合系数、脊形宽度、耦合长度、耦合间距、光波波长以及 Ge 含量等物理量之间的关系,得出了为了便于光电集成,可以在本文模拟的参数值范围内,选择较大的脊形宽度和较小的耦合间距和 Ge 含量的结论,为 SiGe-OI 对称脊形定向耦合器的研制提供了技术参考。

### 参考文献:

- [1] 高勇, 冯松, 杨媛, 等. 基于 Optiwave 的脊形 SiGe-OI 光波导结构设计 [J]. 光子学报, 2009, 38(7): 1692-1696.  
Gao Yong, Feng Song, Yang Yuan, et al. The structure design of ridged SiGe-OI optical waveguide based on Optiwave[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(7): 1692-1696.
- [2] Feng Song, Gao Yong, Yang Yuan, et al. Mode analysis and structure parameter optimization of a novel SiGe-OI rib optical waveguide[J]. Journal of Semiconductors, 2009, 30(8): 084008.
- [3] 吴重庆. 光波导理论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [4] 王健. 导波光学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [5] Takagi A., Jinguji K., Kawachi M. Broadband silica-based optical waveguide coupler with asymmetric structure[J]. Electronics Letters, 1990, 26(2): 132-133.
- [6] Haus H A, Huang Weiping. Coupled-mode theory [J]. Proceedings of IEEE, 1991, 79(10): 1505-1518.
- [7] Chang Huangchun. Coupled-mode equations for directive waveguides based on projection and partition mode amplitude [J]. IEEE of Quantum Electronics, 1987, 23(11): 151-158.
- [8] 余守宪. 导波光学物理基础 [M]. 北京: 北方交通大学

出版社出版. 2002.

- [9] Edilson A C, Harold M H C, Richard M, et al. 2D photonic crystal four-port directional coupler [C]//2005 Conference on Lasers & Electro-Optics, 2005, 2: 1156-1158.
- [10] Dai Daoxin, Liu Yang, Zhen Sheng. Compact microring resonator with  $2 \times 2$  tapered multimode interference couplers [J]. Journal of Light Wave Technology, 2009, 27(21): 4878-4883.
- [11] Edilson A C, Harold M H C, Richard M, et al. Four-port coupled channel-guide device based on 2D photonic crystal structure [J]. Photonics and Nanostructures, 2004, 2(1): 207-213.
- [12] Cao G B, Dai L J, Wang Y J, et al. Compact integrated star coupler on silicon-on-insulator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(12): 2616-2618.
- [13] Kimmo S, Markku K, Mikko H. Adiabatic and multimode interference couplers on silicon-on-insulator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(21): 2287-2289.
- [14] Quan Yujun, Han Peide, Ran Qijiang, et al. A photonic wire-based directional coupler based on SOI [J]. Optics Communications, 2008, 281: 3105-3110.
- [15] 冯松, 高勇, 杨媛, 等. SiGe-OI 对称型 Y 分支光功率分配器的研究 [J]. 西安理工大学学报, 2010, 26(3): 292-296.  
Feng Song, Gao Yong, Yang Yuan, et al. Research on optical power splitter of SiGe-OI symmetrical Y-branch [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2010, 26(3): 292-296.
- [16] Hsu S K, Yen J C, Wu T L. A novel compact forward-wave directional coupler design using periodical patterned ground structure [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(5): 1249-1257.

(责任编辑 杨小丽)