

文章编号: 0253-2239(2010)02-0537-05

一种基于 Spice 的硅基微环光学谐振器模型 及其在光学滤波器中的应用

张 彬 毛陆虹 谢 生 张世林 郭维廉 陈 燕 于 欣

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要 对硅基微环光学谐振器建立了一种基于 Spice 的器件模型, 该模型可以作为集成光路的基本元件应用于集成光路的计算机模拟。应用该模型分析了双环以及多环光学滤波器光路。计算得到双环光学滤波器耦合系数与系统增益以及 3 dB 带宽的关系, 结果表明, 微环数目越大, 谐振特性越陡峭, 具有更好的滤波特性。

关键词 集成光学; 环形谐振器; 等效模型; 传输特性

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0537

A New Spice Model of Silicon-Based Micro-Ring Resonator and Application for Optical Filter

Zhang Bin Mao Luhong Xie Sheng Zhang Shilin Guo Weilian Chen Yan Yu Xin

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 30072, China)

Abstract A novel Spice model of silicon-based micro-ring resonator is introduced, which can serve as a basic component of integrated optical path. Some basic applications of series-coupled structure, such as double-ring and multiple-ring filter, are analyzed. In addition, the tradeoff between optical gain and 3 dB bandwidth characteristics are investigated. Results show that the larger number of rings, more precipitous resonant peak will produce the better device filtering characteristic.

Key words integrated optics; ring resonator; equivalent model; transmission characteristic

1 引 言

高密度平面光集成是光波导技术发展的一个重要方向。1969 年 Marcatili^[1,2]就提出光学微环谐振器的概念和结构, 但是直到近年来由于平面工艺水平的不断提高, 基于平面波导技术的光学微环谐振器才受到人们的关注。硅基微环谐振器具有成本低、结构紧密、集成度高、插入损耗低、串扰小的优点。作为基本元件, 可用于构成半导体激光器、光波导滤波器以及光波导调制器等。正如集成电路中的 MOS 管的基础性作用一样, 微型光学谐振器被认为是未来集成光路技术的基本功能单元^[3]。同时注意到现有大规模集成电路的兼容性使得基于硅基微环

谐振器的集成光路成为很有前途的发展方向。

微环谐振器特性的理论分析方法包括转移矩阵方法和耦合模式理论以及时域有限差分方法。文献 [3~5] 对光滤波器系统进行了分析, 但由于公式繁杂, 且不容易进行扩展, 对这些理论的应用造成了很大的不便。在当今大规模集成电路中, 电路模拟技术, 尤其是 Spice 技术已经成为现代集成电路技术的一个重要的组成部分。由于采用模块化的封装形式, 使用者不需了解过多的理论知识就可以对器件功能进行精确的模拟。建立一些光器件模型对集成光路的计算机模拟具有重要的意义。本文在转移矩阵法的基础上, 应用 Z 变换技术, 建立微环谐振器

收稿日期: 2009-02-17; 收到修改稿日期: 2009-04-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60536030、60736035)资助课题。

作者简介: 张 彬(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事半导体集成光学方面的研究。E-mail: zhangbin5700@sohu.com

导师简介: 毛陆虹(1955—), 博士, 教授, 主要从事半导体集成光学方面的研究。E-mail: lhmao@tju.edu.cn

的 Spice 模型,该模型可以给出完整的光学微环谐振器的特性,不仅反映光波在谐振点附近的传输特性,也可反映非谐振点的情况。

2 环形光学谐振器 Spice 模型的建立

2.1 耦合模块的等效模型

文献[6]提出了硅基微环谐振器的基本功能单元的划分方法,其信号流程图如图 1(a)所示,其中 $\{T_0, T_1, \dots, T_n\}$ 表示正向信号节点, $\{R_0, R_1, \dots, R_n\}$ 表示反向信号节点。图中

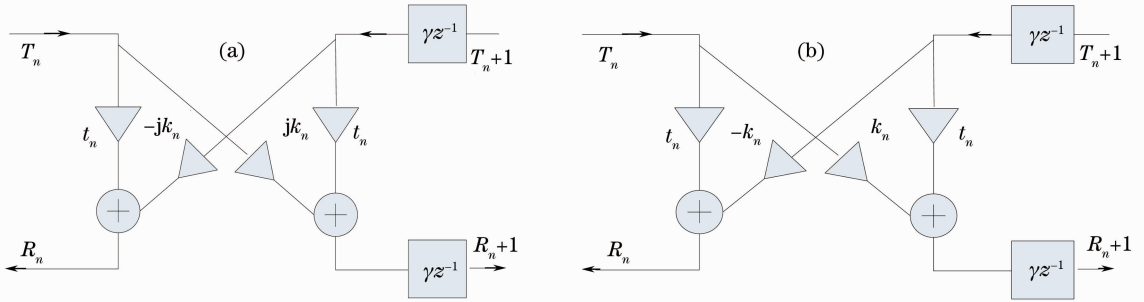


图 1 微环谐振器的耦合部分模型。(a)原始模型;(b)改进模型

Fig. 1 Coupling part model of micro-ring resonator. (a) original model; (b) modified model

无论是原始结构还是等效结构,用散射矩阵^[7]表示如下:

$$\begin{bmatrix} R_n \\ T_{n+1} \end{bmatrix} = \mathbf{S}_n \times \begin{bmatrix} T_n \\ R_{n+1} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

对于原始结构和改进结构,其散射矩阵分别为

$$\mathbf{S}_n = \begin{bmatrix} t_n & -jk_n \gamma z^{-1} \\ -jk_n \gamma z^{-1} & t_n \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{S}_n = \begin{bmatrix} t_n & k_n \gamma z^{-1} \\ -k_n \gamma z^{-1} & t_n \end{bmatrix}. \quad (4)$$

可将散射矩阵变换成为转移矩阵的形式^[7]:

$$\begin{bmatrix} T_{n+1} \\ R_{n+1} \end{bmatrix} = \boldsymbol{\phi}_{1,0} \times \boldsymbol{\phi}_{2,1} \cdots \boldsymbol{\phi}_{n+1,n} \begin{bmatrix} T_0 \\ R_0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\boldsymbol{\phi}_{n+1,n}$ 为第 $n+1$ 级到第 n 级的转移矩阵。通过计算得到原始结构和等效结构具有相同的转移矩阵:

$$\boldsymbol{\phi}_{1,0} = \frac{1}{t_0} \times \begin{bmatrix} 1 & -k_0 \\ k_0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\phi}_{n+1,n} = \frac{z^{(1/2)}}{t_n} \begin{bmatrix} \gamma z^{-1} & -k_n \\ k_n \gamma z^{-1} & -1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由于改进结构和原始结构具有相同的转移矩阵,因此两者在拓扑上是等效的,可以使用改进结构作为耦合部分的等效 Z 域模型。

2.2 环形谐振器 Spice 模型的基本模块

该环形谐振器由于采用 Z 域的表达方法,引入

$$z^{-1} = \exp(-j\Omega T), T = n_g \frac{R}{c} = \frac{1}{f_{\text{FSR}}}, \quad (1)$$

其中 R 为环半径, n_g 为等效折射率,半环形损耗用 γ 表示。 f_{FSR} 为两临近谐振峰之间的频率差,称为有效自由光谱区^[6]。 k_n 为耦合系数, t_n 为串通系数,满足 $k_n^2 + t_n^2 = 1$ 的能量守恒关系式。在该结构中由于存在 90° 相移部分,因此不能用 Spice 直接实现,为了克服这一困难,本文提出了如图 1(b)所示的改进结构。下面使用转移矩阵方法证明两结构的拓扑等效性。

采样时钟,如果其周期和环形谐振器的光在环中传输时间相同,可以使用时钟采样电路的等效模型来仿真环形谐振器的光学特性。为了简化,对于半径 $10 \mu\text{m}$ 以上的环形谐振器,可以忽略其弯曲损耗^[7]。

对于直波导和环形波导的耦合部分对应耦合矩阵(6)式,其 Spice 模型的原理如图 2 所示,耦合部分使用若干 Z 域相乘和相加的模块组成,以实现和(6)式所等效的逻辑功能。环形波导间的耦合部分如图 3 所示,对应于耦合矩阵(7)式,除了如图 2 相同的耦合模块以外,还包括 Z 域单位延时模块(z^{-1})和 Z 域增益模块,分别表示光在半环中的延时特性和传输损耗特性。右边的符号表示该原理图在上层原理图中的表示方法。由于采用了分层的设计方式,可以把该 Spice 模型作为集成光路的基础元件,

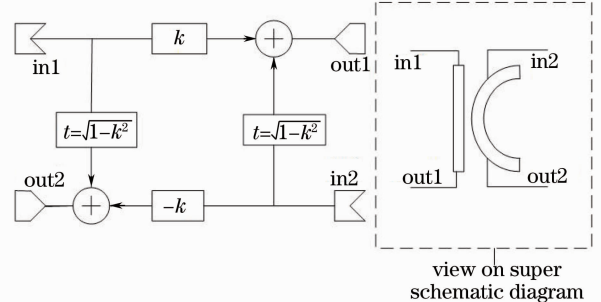


图 2 输入模块光路原理图

Fig. 2 Optical path sketch of input port

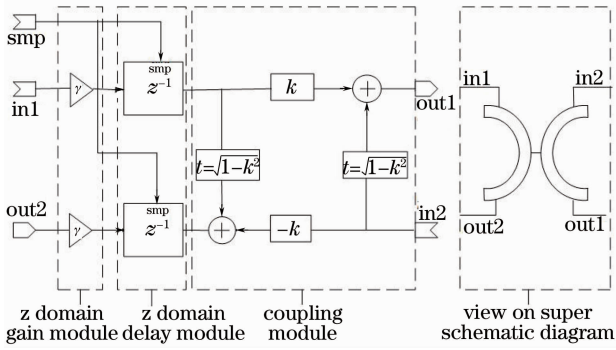


图 3 环间耦合模块原理图

Fig. 3 Optical path sketch of coupling part between double rings

便于仿真各种集成光路的特性。

在 Saber 仿真软件中,把这两个模块作为基本模型放入模型库中,可以进一步组成例如光逻辑、光调制器、3R 光脉冲整形等更高层次的集成光路模型。从而建立基于微环谐振器的集成光路仿真模型。

3 模型的应用举例

3.1 双环光学滤波器的设计

使用图 2 和图 3 基本模块的 Spice 模型,可以构建硅基双环光学滤波器的光路模型,用图 4 和图 5 表示。为了在器件中实现单模传输并获得良好的传输特性,必须对相关的结构参数进行优化,即优化直波导和弯曲波导的耦合系数 k_1 , 环间的耦合系数 k_2 以及环半径 R , 其中的环半径参数由系统 f_{FSR} 参数决定[(1)式],同时 f_{FSR} 也确定了仿真使用的时钟频率。

图 4 中“logic_4_clock”为 Saber 软件器件库中的时钟模块,可以设定采样频率为 1 kHz,即为 f_{FSR} 的数值,计算完成后,对频率再进行归一化处理。“clock to sample”模块则完成从模拟时钟信号到采样时钟信号的转换。Saber 是一款优秀的混合信号仿真器,由于该光路模型跨越了模拟和数字采样两个不同的仿真域,需要“clock to sample”这样一个接口部分进行转换。双环器件模型则是一个双输入双输出的模块,由三层模型组成的,顶层是如图 4 中的符号模型,中间层映射为第二部分描述的直波导和弯曲波导间耦合模块以及弯曲波导间耦合模块两部分,如图 5 所示。底层是这两部分的功能实现,如图 2 和图 3 所示。

使用电路模拟器 Saber 得到器件的时域响应如图 6 所示,对时域波形进行快速傅里叶变换(FFT),得到相关的频谱特性,对于快速傅里叶变换,其仿真

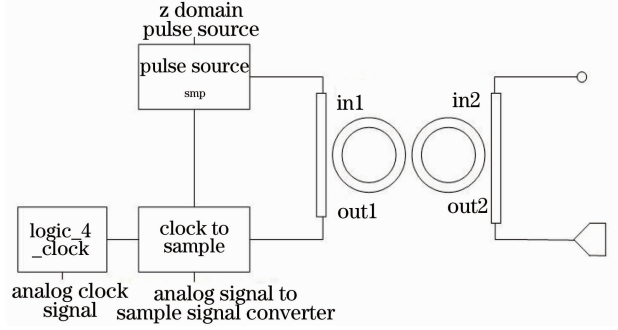


图 4 双环光学滤波器的顶层光路原理图

Fig. 4 Top layer optical path sketch of double rings optical filter

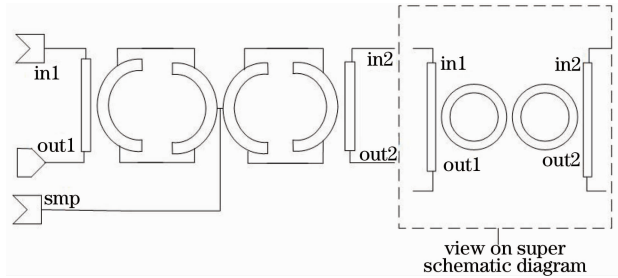


图 5 中间层光路原理图

Fig. 5 Middle-layer optical path sketch of double rings system

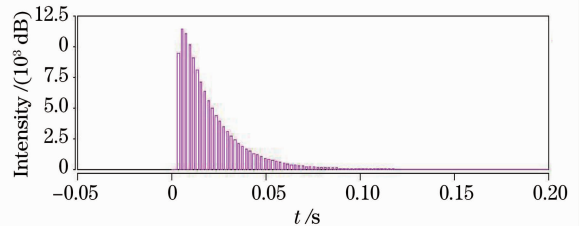


图 6 输出端的时域波形

Fig. 6 Time evolution of output wave

时间窗口对应于频域的分辨率,采样点数则对应于频域的范围,要恰当地选择仿真的时间长度和采样点数以满足频域的相关要求。同时对频率进行归一化处理,将整个 f_{FSR} 的频率范围归一化为 π 。

使用电路模拟器 Saber 的参数扫描功能,扫描损耗系数 L ,可以得到耦合系数对系统性能的影响如图 7 所示。从图 7 中可以看出随着损耗系数的增加,光滤波器的谐振峰值变缓,在损耗系数为 0.9 时,峰值响应强度为 -15 dB, 3 dB 带宽为 0.15, 谐振峰值峰谷响应强度差为 20 dB; 而损耗系数降低为 0.5 时,即有一半的光损耗的情形下,响应强度降低为 -35 dB, 3 dB 带宽为 1.5, 峰谷响应强度差降低为 5 dB。同时注意到响应强度和峰谷响应强度差对损耗系数是随着损耗系数的降低而加速下降的,因此实现低的光损耗是制造微环半导体环形激光器的关键。

对于耦合系数大于 0.5 的情形,系统将失掉原有的滤波特性。影响耦合系数的因素有材料的固有损耗,以及波导的弯曲损耗和模式耦合损耗。总之,随着耦合系数的增加,带宽增加,峰谷谐振强度比例增加。但是在光损耗很小的时候,带宽的变化较小,谐振峰比较尖锐。随着损耗系数的增加,谐振带宽增加,同时谐振峰逐渐变宽,谐振特性变差。

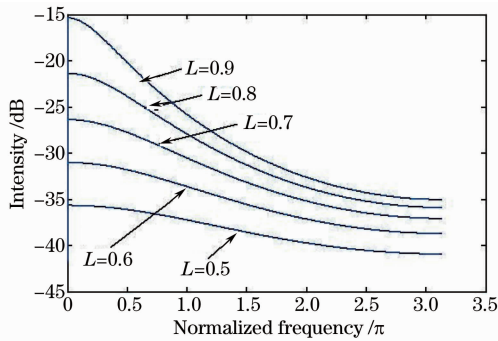


图 7 不同损耗系数下响应强度随频率变化

Fig. 7 Relation between response intensity and frequency under different loss coefficient

图 8 给出了输入和输出端直波导和弯曲波导的耦合系数 k_1 以及环间耦合系数 k_2 和输出强度响应带宽之间的关系。从中可以观察到带宽和耦合系数 k_1, k_2 近似成正比例关系。对于给定的设计要求,可以有多种不同的 k_1, k_2 组合已达到要求的 3 dB 带宽。同时注意到,带宽越窄,频率选择性越强,要求 k_1, k_2 的数值越小,对应耦合间距越大,尽管这样会造成响应强度的下降,设计光学滤波器一般选择耦合系数小于 10% 的松耦合的设计,这与文献[8]中使用 FDTD 软件得到的仿真结果一致。

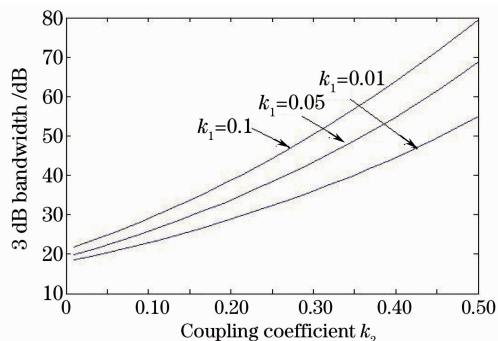


图 8 耦合系数 k_1, k_2 对系统带宽的影响

Fig. 8 Relation between system bandwidth and coupling coefficient k_1 and k_2

图 9 为耦合系数 k_1, k_2 和响应强度的关系,可知在某个特定的 k_1 ,响应强度具有最大的数值,小于该值,响应强度随着耦合系数 k_2 的增加而迅速增加,而大于该值,响应强度随着耦合系数 k_2 的增加

而缓慢的减少。而随着 k_1 的增加,响应强度明显减少。综合图 8 和图 9 可以选择合理的 k_1 和 k_2 以便达到所需的带宽增益。

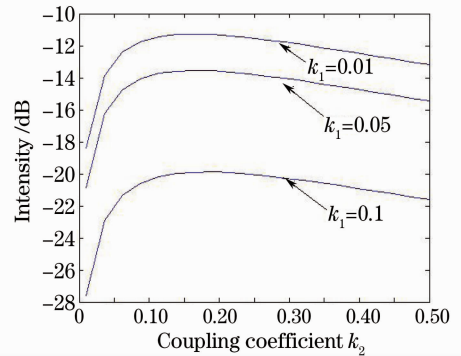


图 9 耦合系数 k_1, k_2 对系统增益的影响

Fig. 9 Relation between system gain and coupling coefficient k_1 and k_2

3.2 多环光学滤波器的设计

Litter 和 Hryniewicz 等^[10,11]最早提出串行微环谐振器的结构,并指出环数增加可以有效的降低非谐振光的强度。为了考察滤波器环数对滤波特性的影响,分别对环数为 2, 3, 4 的不同情形进行了模拟,相关特性如图 10 所示,可以观察到随着环数的增加,微环非谐振光的强度迅速减少,其最小值由 -40 dB ($N=2$) 降低到 -100 dB ($N=4$), 因此增加环数可以有效的提高滤波特性,降低器件的串扰。同时注意到随着环数的增加,谐振峰的旁瓣增多。

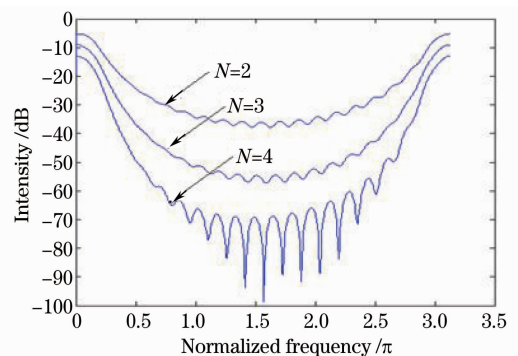


图 10 串行微环系统的环数目对响应强度的影响

Fig. 10 Relation between ring number and response intensity

串行多环谐振特性和环间耦合系数之间的关系如图 11 所示,从图中可以看出,当相邻环耦合系数增加时,非谐振光变强,如果耦合系数过小,虽然非谐振光较弱,但谐振峰变窄;相反的如果耦合系数过大,虽然谐振峰变宽,但是其峰谷谐振强度比例会有所下降,表现为器件频率特性的滚降变缓慢,因此需要恰当的选择耦合系数来满足设计要求。

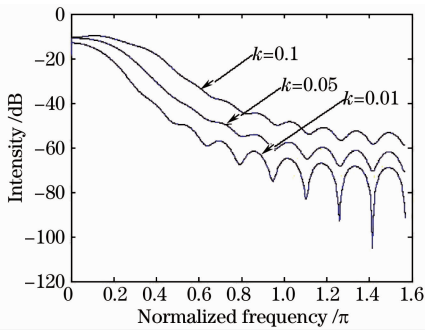


图 11 环间耦合系数对多环串联系统的影响

Fig. 11 Influence of coupling coefficient on multiple rings series system

4 结 论

基于转移矩阵模型得到了修正模型,修正后的模型可以直接建立基于时钟采样的 Spice 模型进行计算机仿真模拟。分析了双环以及多环光学滤波器的谐振特性,得到了耦合系数、损耗系数和系统带宽、增益之间的关系,比较了多环谐振器的谐振特性,并指出双环光滤波器直波导和弯曲波导之间的耦合系数的最佳选择方式,多环谐振器的环数的选择对滤波特性的影响,从而对工艺实现具有一定的指导意义。

参 考 文 献

1 L. Caruso, I. Montrosset. Analysis of a racetrack microring resonator with MMI coupler[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(1): 206

2 J. Y. Yang, Q. J. Zhou, F. Zhao. Characteristics of optical bandpass filters employing series-cascaded double-ring resonator [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **228**(1-3): 91~98

3 J. Heebner, R. Grover, T. Ibrahim. Optical Microresonators Theory, Fabrication and Applications[M]. New York: Springer, 2003

4 Xu Ou, Lu Shaohua, Dong Xiaowei *et al.*. Properties analysis for reflection-type filter composed of microring resonator array and mach-zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1443~1448

许 鸥,鲁绍华,董小伟 等. 基于微环谐振器阵列与马赫-曾德尔干涉仪的反射型滤波器性能分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1443~1448

5 Gao Zhensheng, Li Chunfei. Optical properties of the series-coupled microring resonators [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 675~679

高震森,李淳飞. 串联微环谐振器的光学特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 675~679

6 C. K. Mandson, J. H. Zhao. Optical Filter Desing and Analysis: A Signal Processing Approach[M]. Wiley, 1999

7 Zhang Ruikan, Yan Xiaohong *et al.*. Micromechanical tunable optical filter [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2003, **24**(4): 347~350

张瑞康,杨晓红 等. 微机械可调谐滤波器的研制[J]. *半导体学报*, 2003, **24**(4): 347~350

8 S. C. Hagness, D. Rafizadeh, S. T. Ho *et al.*. FDTD microcavity simulations: design and experimental realization of waveguide-coupled single-mode ring and whispering-gallery-mode disk resonators [J]. *J. Lightwave Technol.*, **15** (11): 2154~2165

9 B. E. Litter, S. T. Chu, P. P. Absil *et al.*. Very high-order microring resonator filter for WDM application [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(10): 2263~2265

10 J. V. Hryniewicz, P. P. Absil, B. E. Little *et al.*. Higher order filter response in coupled microring resonators[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(3): 320~322