

· 光电器件与材料 ·

半导体微环谐振器及在光学滤波中的应用

侯玉文^{1,3}, 谢 生²

(1. 天津城市建设学院电子信息工程系, 天津 300384; 2. 天津大学电子信息工程学院, 天津 300072;
3. 中国科学院软件研究所, 北京 100080)

摘要: 半导体微环谐振器结构紧凑、集成度高、功能丰富, 是构建超大规模集成光子回路最有潜力的代表之一。目前, 它已广泛用于通信滤波器、延迟线、传感器、微激光器和光存储等方面, 并成为集成光电子、光通信和光信息处理领域的研究热点。在研究介绍微环谐振器的工作原理基础上, 分析了侧向耦合和垂直耦合微环谐振器的优缺点, 总结了半导体微环谐振器在无源、有源和可调谐滤波器方面的应用和最新进展。

关键词: 半导体; 微环谐振器; 光学滤波器

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)01-0033-05

Semiconductor Microring Resonator and Its Application in Optical Filter

HOU Yu-wen^{1,3} XIE Sheng²

(1. *Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China;*
2. *School of Electronic and Information Engineer, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*
3. *Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: The semiconductor microring resonator is one of the most potential candidates to construct very large-scale integrated photonic circuits (VLSI-PCs) since it has compact structure, high-density integration and abundant function. Nowadays it has been widely used in highly selective communication filter, delay line, sensor, microlaser and optical storage, and becomes the hot topic in the fields of integrated optoelectronics, optical communication, and signal processing. Based on the introduced principle of microring resonator, the advantage and disadvantage of laterally and vertically coupled approach were analyzed. Recent advances and application of the semiconductor microring resonator in passive, active and tunable optical filters were discussed.

Key words: semiconductor; microring resonator; optical filter

全球信息化发展要求光纤传输系统具有更高的带宽和更快的处理速度, 解决这一问题的根本方法是采用全光网络实现光交换和光传输。与 Fabry-Perot 腔、Mach-Zehnder 干涉仪、阵列波导光栅 (AWG) 等光学器件相比, 半导体微环谐振器工艺简单、结构紧凑、功能丰富, 易与其他光电器件实现单片集成, 因而被公认为构建超大规模集成光路 (VLSI-PCs) 的基本单元^[1]。目前, 微环谐振器已被广泛

用于光学滤波器、延迟线、波长转换、调制器和光信号处理等方面, 成为集成光电子、光通信、光信息处理等领域的研究热点^[2]。

基于半导体微环谐振器的光学滤波器作为全光网络的关键器件, 不仅能实现波长分离, 而且还具有色散补偿^[3]和格式转换功能^[4], 因而对其研究具有重要意义。在简单介绍微环谐振器工作原理的基础上, 总结了半导体微环谐振器在无源、有源和可调谐

收稿日期: 2010-12-03

基金项目: 天津大学青年教师培养基金 (TJU-YFF-08B64); 教育部博士点新教师基金 (200800561121)

作者简介: 侯玉文 (1966-), 男, 北京市人, 副研究员, 主要从事综合信息系统方面的研究。

滤波器方面的应用和最新进展。

1 工作原理

微环谐振器的典型结构如图 1a 所示,它由输入/输出 Bus 波导、耦合器和环形谐振腔构成。Bus 波导的作用一方面是确保光纤和芯片的有效耦合,另一方面是提供光在芯片内的单模传输,环形谐振腔充当“光库”(optical reservoir),使满足谐振条件的光相干加强,而耦合器则为光在 Bus 波导和环形谐振腔之间的相互转移提供了通道。

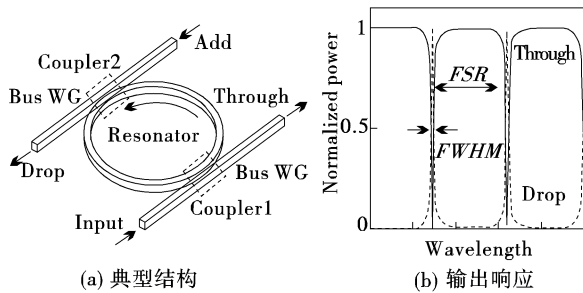


图 1 微环谐振器的典型结构和输出响应

微环谐振器的工作原理与 Fabry-Perot 腔类似,不同之处在于环形腔本身能够提供光反馈,不需要额外的光栅或镜面。对于图 1a 所示的典型结构,当输入 Bus 波导的光传输到耦合器 1 时,部分光功率耦合到环形谐振腔中,再经腔半周传输后到达耦合器 2,此时又有部分光功率耦合到输出 Bus 波导,而剩余的光继续在环内传输。若环形腔内的光满足谐振条件,则相干加强。如此往复多次,最终达到一个光稳态。

若耦合器处于临界耦合,且传输过程没有光损耗,则满足谐振条件的光全部从 Drop 端输出,其余光从 Through 端输出,如图 1b 所示。从图 1b 中可以看到,Drop 端输出为透射谱,Through 端输出为反射谱。Drop 端(或 Through 端)输出的相邻 2 个谐振峰之间的中心波长称为自由光谱范围(FSR),而谐振峰的半峰全宽(FWHM)称为谐振宽度($\Delta\lambda$)。此外,表征微环谐振器的关键参数还有精细度(F)和品质因子(Q)。精细度定义为 FSR 与 $\Delta\lambda$ 之比,它的物理意义是环内光功率衰减到初始值的 $1/e$ 时,经过的环路次数与 2π 的乘积。品质因子表示谐振锐度,定义为谐振波长 λ_0 与 $\Delta\lambda$ 之比。

2 耦合方式

目前,微环谐振器将光信号耦合进/出环形谐振

腔的耦合器有 2 种:一种是采用多模干涉(MMI)效应的 MMI 耦合器,另一种是如图 1a 所示的方向耦合器。MMI 耦合器可以提供精确的 3 dB 耦合,且制备工艺相对简单,不足之处是基于 MMI 耦合的器件尺寸大。由于微环谐振器对耦合系数非常敏感,因而基于 MMI 耦合的滤波性能难以最优化。与 MMI 耦合器不同,方向耦合器可以提供任意比例的耦合,且耦合长度较短,但波导间的耦合间距小,需要高性能的光刻、腐蚀设备。尽管工艺较复杂,但由于耦合系数可调,易实现器件性能的最优化,因而方向耦合器在半导体微环谐振器中得到广泛应用。

根据耦合器中 Bus 波导和环形谐振腔是否在同一平面内,微环谐振器也可分为如图 2 所示的侧向耦合(lateral coupling)和垂直耦合(vertical coupling) 2 种结构^[5]。在侧向耦合结构中,Bus 波导和环形谐振腔在同一平面内。为了实现临界耦合,通常需要设计、制备耦合间距小于 $0.5 \mu\text{m}$ 的方向耦合器。小的耦合间距不仅要求苛刻的工艺条件,而且制备器件的性能偏差大。

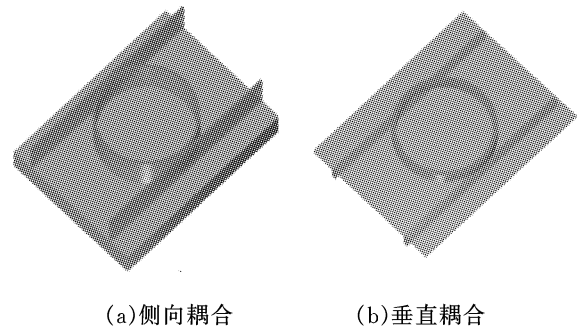


图 2 耦合方式示意图

与侧向耦合不同,垂直耦合结构中 Bus 波导和谐振腔间的耦合效率由外延生长或沉积材料的厚度决定,因而比侧向耦合具有更好的可控性。其次,由于垂直耦合结构中 Bus 波导和和谐振腔的材料结构分离,因而可以独立地优化设计。再次,垂直耦合结构中的波导是掩埋的,波导芯两边的包层具有内在的对称性,更利于与光纤耦合。虽然垂直耦合较侧向耦合有一系列的优点,但它需要晶片键合^[5]或再生长(regrowth)技术^[6],因而工艺更加复杂。

3 应用

如前所述,半导体微环谐振器在集成光源、光学滤波、信号调制、波长转换和光信号处理等方面已得到广泛应用,要讨论所有方面的应用是困难的。限于篇幅,这里仅讨论其在无源、有源和可调谐滤波器方

面的应用和最新进展.

3.1 无源滤波器

基于半导体微环谐振器最简单的结构是陷波滤波器^[4,7,8],只有 1 根 Bus 波导和环形谐振腔侧向耦合.若环形腔同时与 2 根 Bus 波导耦合,则构成如图 1a 所示的 Add-Drop 滤波器.侧向耦合结构的耦合间距小,工艺难度大,为了降低工艺难度,提高器件性能,研究人员提出了多种改进的器件结构,如基于侧向耦合的跑道形(racetrack)结构^[8-11]、基于 MMI 耦合器结构^[12,13]和垂直耦合结构^[14,15]等.

虽然单环滤波器的结构和制备工艺相对简单,但洛伦兹型响应曲线限制了其在波分复用(WDM)系统中的应用.WDM 系统要求光学滤波器具有盒状(box-shaped)传输函数和宽的 FSR.理论分析表明^[10,16,17],采用图 3 所示的串联或并联多环耦合的高阶滤波器具有通带平坦、滚降陡峭、带外抑制比高的特性,满足 WDM 的应用要求.

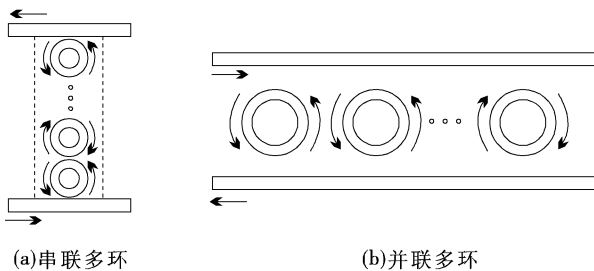


图 3 高阶谐振滤波器的结构简图

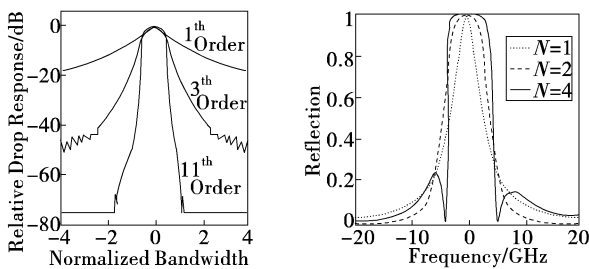


图 4 高阶滤波器的频率响应

图 3a 所示的串联耦合结构的 Drop 端输出响应如图 4a 所示,耦合环的数量越多,滤波器的特性越接近盒状响应^[18].2000 年,Hryniewicz 等人^[19]在 AlGaAs/GaAs 材料上实现的串联双环滤波器比单环滤波器的滚降快 2 倍,开关比达 30 dB.并联耦合结构 Drop 端的输出响应如图 4b 所示^[10],与串联耦合结构类似,随着耦合环级数的增加,输出响应的通带平坦度和滚降特性显著改善.当耦合环数 $N = 4$

时,输出响应曲线已完全接近盒状.2002 年,Grover 等人报道的 InP 基并联三环滤波器的 FSR 达 40 nm,是对应单环滤波器的 4 倍,滚降速度比单环滤波器快 2.8 倍^[15].

3.2 有源滤波器

虽然串联或并联多环耦合可以明显改善谐振滤波器的响应特性,但无源波导的内在损耗使得滤波器的性能恶化,如带宽扩展,精细度和 Q 因子降低等.采用有源滤波器不仅可以补偿光损耗,改善滤波特性,而且还可调谐滤波器的某些关键参数.目前,基于半导体微环谐振器的有源滤波器有集成半导体光放大器(SOA)^[11,13,16]和全有源 2 种形式^[20,21].集成 SOA 是在无源光波导中加入适当长度的 SOA 来补偿光损耗,全有源形式则完全用 SOA 替代无源波导.文献^[11]在 InP 基无源波导上集成 GaInAsP 量子阱 SOA 补偿光损耗,实现了 $FWHM = 12$ pm, $Q = 130\ 000$ 的有源滤波器,其性能指标远高于无源器件.

3.3 可调谐滤波器

由于制备误差和环境温度的波动,滤波器的谐振波长与设计值存在一定偏差,为了使传输特性符合信道间隔定义,同时扩展高阶滤波器的 FSR^[12],常用热光效应、电光效应和载流子注入来调谐谐振波长.

热光效应是通过温度升高改变波导的折射率,进而达到波长调谐的目的.如 Si 基 SiN 二阶微环滤波器获得了 30 pm/K 的热光系数,最大调谐波长达 1.4 nm^[22].由于 SiO₂ 低的热导率,SOI 基滤波器具有更高的热调谐,文献^[23]报道的单环滤波器的热光系数达 0.11 nm/°C,波长调谐范围大于 3 nm.

第二种调谐方法是用电压改变折射率的电光效应.虽然半导体材料的电光效应很弱,但电光调谐速度快(通常在纳秒量级),可用于高速调谐.2004 年,Grover 等人^[24]实现了电光调谐的单环滤波器.其中,电场和谐振波长的关系如图 5 所示,最大调谐范围达 0.8 nm,二次电光系数为 2.3×10^{-15} cm²/V².

对于带隙能高于入射光子能量的半导体材料来说,也可以通过注入载流子来调谐波长^[13,25].2005 年,Kim 等人^[13]实现了由 SOA,MMI 和全内反射镜组成的有源可调谐滤波器.在驱动电流较小(< 20 mA)时,随着驱动电流的增大,谐振波长发生蓝移,

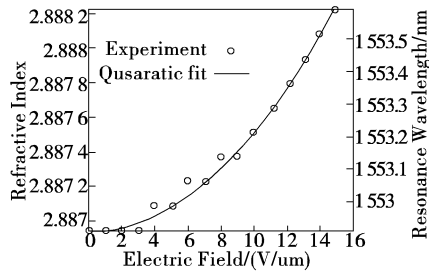


图 5 谐振波长和电场的关系

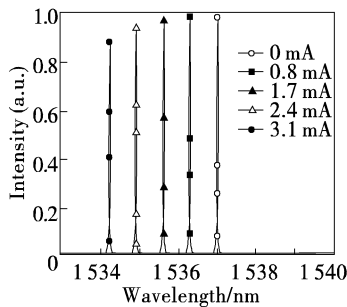


图 6 不同注入水平时的输出谱

且开关比增加,当驱动电流增大到 20 mA 时,开关比达 14 dB,调谐波长范围大于 1.2 nm. 同年,Choi S J 等人^[25]展示了 InP/InGaAsP 掩埋波导的可调谐谐振器. 由于掩埋波导大大降低了光损耗,因此,获得了 $FWHM = 0.017$ nm, $F = 600$ 的高性能滤波器,如图 6 所示. 注入电流在 0~3.1 mA 时,调谐波长达 2.72 nm,信道隔离度大于 15 dB.

此外,理论上也提出多种基于环形谐振器的全光可调谐滤波器^[26-28],但到目前为止,还未见相关的实验报道.

4 结 束 语

如上所述,已经简要介绍了半导体微环谐振器的工作原理、性能特征和耦合方式,特别重点总结了其在无源、有源和可调谐光学滤波方面的最新进展. 尽管仅就微环谐振器在光学滤波方面的应用进行了阐述,但伴随环形谐振腔器件技术的研发和现代制备工艺的不断改进,作为光电子器件与回路的基本单元模块,其在新型光学器件和二维集成回路方面的应用已经越来越得到国内外相关研究领域和产业界的重视,有望与其他半导体器件单片集成,实现超大规模集成光子回路;同时,微环谐振器在光学非线性效应、微腔电动力学等基础物理方面的研究也正日益受到业界关注. 随着环形谐振腔器件的深入研究和现代制备工艺水平的不断提高,可以预见的是

将会不断出现集成度更高、功能更丰富、结构更灵活的新型器件和光学回路. 当然,其应用领域也会随着业界认识的不断深入而扩展,诸如微环谐振器用做工业检测^[29]和生物传感器^[30]等就已经开启了新的应用领域.

参 考 文 献

- [1] Driessen A, Geuzebroek D H, Hoekstra H, et al. Microresonators as building blocks for VLSI photonics[C]// Microresonators as Building Blocks for VLSI Photonics: International School of Quantum Electronics, 39th Course, 2004, 709: 1-18.
- [2] Rabus D G. Integrated Ring Resonators - The Compendium[M]. Berlin: Springer, 2007.
- [3] Geuzebroek D H, Driessen A. Ring-resonator-based wavelength filter[C]// Wavelength Filters in Fiber Optics: Springer series I optical science. Berlin: Springer, 2006: 341-379.
- [4] Zhou L, Chen H, Poon A W. On-chip NRZ-to-PRZ format conversion using narrow-band silicon microring resonator-based notch filters[J]. J Lightwave Technol., 2008, 26(13):1950-1955.
- [5] Grover R, Absil P P, Ibrahim T A, et al. III-V Semiconductor Optical Micro - Ring Resonators[C]// Microresonators as Building Blocks for VLSI Photonics: International School of Quantum Electronics, 39th Course, 2004, 709: 110-129.
- [6] Choi S J, Peng Z, Yang Q, et al. Tunable narrow linewidth all-buried heterostructure ring resonator filters using vernier effects[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2005, 17(1): 106-108.
- [7] Absil P P, Hryniewicz J V, Litter B E, et al. Compact microring notch filters [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2000, 12(4):398-400.
- [8] Grover R, Ibrahim T A, Ding T N, et al. Laterally coupled InP-based single-mode microracetrack notch filter[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2003,15(8):1082-1084.
- [9] Hryniewicz J V, Absil P P, Litter B E, et al. Higher order filter response in coupled microring resonators[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2000, 12(3):320-322.
- [10] Griffel G. Synthesis of optical filters using ring resonator arrays[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2000, 12(7): 810-812.
- [11] Rabus D G, Hamacher M, Troppenz U, et al. High-Q channel-dropping filters using ring resonators with integrated SOAs [J]. IEEE Photon. Technol. Lett.,

- 2002, 14(10): 1442 – 1444.
- [12] Rabus D G, Hamacher M, Heidrich H. Resonance frequency tuning of a double ring resonator in GaInAsP/InP: Experiment and simulation [J]. *Jpn J Appl. Phys.*, 2002, 41(2B): 1186 – 1189.
- [13] Kim D G, Shin J H, Ozturk C, et al. Total internal reflection mirror-based InGaAsP ring resonators integrated with optical amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17(9): 1899 – 1901.
- [14] Absil P P, Hryniewicz J V, Litter B E, et al. Vertically coupled microring resonators using polymer wafer bonding[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, 13(1): 49 – 51.
- [15] Grover R, Van V, Ibrahim T A, et al. Parallel-cascaded semiconductor microring resonators for high-order and wide-FSR filters[J]. *IEEE J Lightwave Technol.*, 2002, 20(5): 900 – 905.
- [16] Schwelb O, Frigyes I. Series-coupled microring resonator filters with embedded semiconductor optical amplifiers[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2004, 42(5): 427 – 432.
- [17] Ma C, Yan X, Wang X, et al. Box-like spectral response of 2-D microring resonator arrays [J]. *Opt. Commun.*, 2007, 273: 105 – 113.
- [18] Litter B E, Chu S T, Absil P P, et al. Very High-Order Microring Resonator Filters for WDM Applications [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(10): 2263 – 2265.
- [19] Hryniewicz J V, Absil P P, Litter B E, et al. Higher order filter response in coupled microring resonators[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, 12(3): 320 – 322.
- [20] Troppenz U, Hamacher M, Rabus D G. All-active In-GaAsP/InP ring cavities for widespread functionalities in the wavelength domain[C]//Indium Phosphide and Related Materials Conference, 2002: 475 – 478.
- [21] Amarnath K, Grover R, Kanakaraju S, et al. Electrically pumped InGaAsP-InP microring optical amplifiers and lasers with surface passivation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17(11): 2280 – 2282.
- [22] Amatya R, Holzwarth C W, Smith H I, et al. Precision tunable silicon compatible microring filters[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, 20(20): 1739 – 1741.
- [23] Nawrocka M S, Liu T, Wang X, et al. Tunable silicon microring resonator with wide free spectra range[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(7):1107 – 1110.
- [24] Grover R, Ibrahim T A, Kanakaraju S, et al. A tunable GaInAsP-InP optical microring notch filter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(2): 467 – 469.
- [25] Choi S J, Peng Z, Yang Q, et al. Tunable narrow linewidth all-buried heterostructure ring resonator filters using vernier effects [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, 17(1):106 – 108.
- [26] Schwelb O, Frigyes I. All-optical tunable filters built with discontinuity-assisted ring resonators[J]. *J Lightwave Technol.*, 2001, 19(3): 380 – 386.
- [27] Rostami A, Rostami G. All-optical implementation of tunable low-pass, high-pass, and bandpass optical filters using ring resonators[J]. *J Lightwave Technol.*, 2005, 23(1): 446 – 460.
- [28] Rostami A, Abbasian K. All-optical filter design: Electromagnetically induced transparency and ring resonator [C]// IEEE International conference on telecommunications, ICT-MICC 2007: 51 – 56.
- [29] Robinson J T, Chen L, Lipson M. On-chip gas detection in silicon optical microcavities[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(6): 4296 – 4301.
- [30] Li X, Zhang Z, Qin S, et al. Sensitive label-free and compact biosensor based on concentric silicon-on-insulator microring resonators[J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(25): F90 – F94.

(上接第 25 页)

外封设计光学模型及数据处理方法,通过光学仿真能获得较好的设计效果,但实际 LED 器件设计要考虑许多非理想条件,如芯片尺寸、安放位置偏差、材料吸收率、界面散射、反射、外封表面质量等因素,故实际结果与理论设计有一定的差异.通常需要对设计作出适当调整后才能得到准确的实际数据.

参考文献

- [1] 李晓彤.几何光学和光学设计[M].浙江:浙江大学出版社,1997.
- [2] 赵振民.实用照明工程设计[M].天津:天津大学出版社,2003.
- [3] Wei Tai,Rudolf Schwarte.Design of an aspherical lens to generate a homogenous irradiance for three-dimensional sensors with a light-emitting-diode source [J]. *Applied Optics*,2000,39(31):5801-5805.
- [4] D wood.Optoelectronic semiconductor devices[M].UK: Prentice Hall International,1994.
- [1] 李晓彤.几何光学和光学设计[M].浙江:浙江大学出