

基于微环谐振腔产生光频梳的色散控制的研究进展

王元武^{1,2} 张敏明^{1,2*} 夏历^{1,2} 刘德明^{1,2}

¹下一代互联网接入系统国家工程实验室,湖北 武汉 430074

²华中科技大学光学与电子信息学院,湖北 武汉 430074

摘要 随着人们对通信容量的需求日益增大,基于微环谐振腔产生的光频梳,可以很好地满足通信系统的光源要求。光频梳具有光谱范围广、相干性高、集成化等特点,由于光频梳是基于四波混频效应产生的,因此对微环谐振腔的色散曲线要求比较严格。总结了目前几种控制微环谐振腔色散特性的最新研究,包括改变微环的宽度等,利用 slot 结构和微环结构相结合,采用光子晶体结构等方法,对这些结构的优缺点及性能作了比较分析。同时还对进一步优化微谐振腔的色散曲线提出了展望,利用微环和光子晶体结构的组合方法,有可能实现较小光谱范围内色散曲线的优化,提高四波混频的效率。

关键词 光通信;微环谐振腔;色散控制;光频梳;四波混频

中图分类号 TN256 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.060001

Progress in Dispersion Control of Micro-Ring Resonator-Based Optical Frequency Comb Generation

Wang Yuanwu^{1,2} Zhang Minming^{1,2} Xia Li^{1,2} Liu Deming^{1,2}

¹National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, Wuhan, Hubei 430074, China

²School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract With the increasing demand for the communication capacity, the optical frequency combs based on micro-ring resonator can satisfy the requirements of communication systems. The optical frequency comb has the features of wide spectrum, high coherence and integration. The optical frequency comb generation is based on the four-wave-mixing(FWM) effect in micro-ring resonator, so the requirement of dispersion curve about resonator is more stringent. This paper summarizes several latest researches about dispersion control of micro-ring resonator, including change the micro-ring width, the combination of slot structure and micro-ring structure, the use of photonic crystal structures. Up on these, we can make a comparative analysis of their strengths, weaknesses and performance. Also there is a prospect on the further optimization of micro-cavity dispersion curves. Utilizing the combination of micro-ring and photonic crystal structure, may realize an optimization of dispersion curves in small spectrum, and improve the efficiency of FWM.

Key words optical communications; micro-ring resonator; dispersion control; optical frequency comb; four-wave-mixing

OCIS codes 130.3120; 190.4380; 190.4390; 230.4320; 260.2030

1 引言

随着网络的高速发展,人们对信息的需求日益剧增,通信业务的容量不断增长,导致通信带宽的需求每三到四个月就增长一倍。而对于主干网来说,仍是传统的波分复用或者时分复用的方式。针对此情形,提

收稿日期:2013-12-26;收到修改稿日期:2014-02-11;网络出版日期:2014-05-15

基金项目:国家863计划(SS2012AA010407)、科技支撑计划(2012BAH06B03)

作者简介:王元武(1988—),男,博士研究生,主要从事光通信与光器件方面的研究。E-mail: ywwang@hust.edu.cn

导师简介:刘德明(1957—),男,教授,主要从事光通信与光网络方面的研究。E-mail: dmliu@mail.hust.edu.cn

*通信联系人。E-mail: mmz@mail.hust.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

出了3U通信系统,包括超高速率(Ultra-High Speed),单信道信息传输速率为100 Gbit/s或者更高;超大容量(Ultra-Large Capacity),信道数目达到160以上;超长距离(Ultra-Long Haul)。特别是对于波分复用方式,如果要增加通信容量来实现超大容量的传输,需要更多的波长数目。这对于传统的利用阵列式的分布式反馈激光器(DFB-LD)作为多波长光源是一个很大的挑战,同时随着人们对绿色网络的提出,不仅要求网络的通信容量很大,而且希望降低整个通信系统的功耗和成本。

而基于微环谐振腔产生的光频梳可以很好地解决这个问题。微环谐振器是一种近年来被广泛研究的光波导器件,第一次由Bell实验室的Marcatili在1969年提出^[1]。由于它与CMOS工艺兼容,因此可与其他光电器件实现单片集成,具有成本低、集成度高、损耗小,结构紧凑等特点。特别是利用微环谐振腔的非线性效应产生的光频梳,可以产生出超宽带的高相干的频率梳,对于大容量的波分复用系统来说,是一个不错的选择^[2-3]。

目前利用微环谐振腔的四波混频效应来实现光频梳,可以实现较大范围的光频梳输出,但是一般阈值或者抽运功率比较大。为了获得比较高的腔内光强,从而得到高的非线性系数,人们普遍把微环的Q值做的比较高。但是对于利用微环谐振腔中的四波混频效应实现光频梳输出,很重要的另一方面就是满足相位匹配条件,从而对色散曲线要求比较高,即色散须满足一定的关系。本文介绍了目前几种改变微环谐振腔色散的方法,并简单对比研究了各种特点。

2 基于微环谐振腔的光频梳产生的原理分析

微环谐振腔一般包括一根直波导和一个环形波导,直波导和环形波导之间存在微小的耦合间隙而发生相互耦合。如图1所示,抽运光[可调谐光源(TLS)通过掺铒光纤放大器(EDFA)放大]通过光栅(grating)耦合到直波导中,直波导再通过和环形波导间的缝隙耦合到微环中。如果抽运光的波长和微环的谐振波长比较接近,且功率超过阈值,会在微谐振腔中形成回音壁模式,如图2所示。由于回音壁模式的特殊性质,使得光强场相干叠加,形成高能量密度,激发介质的非线性效应,并与色散特性共同作用产生一些新的频率成分,从而使得入射光的频谱得到有效展宽,形成梳状频谱的现象。

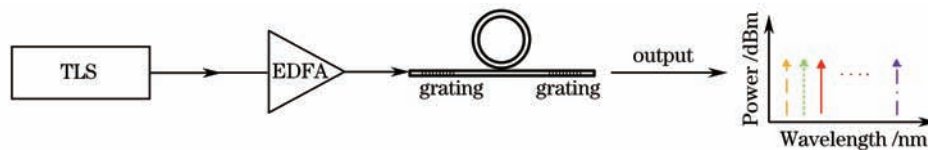


图1 基于微环谐振腔实现光频梳产生的结构示意图

Fig.1 Configuration of micro-ring resonator-based optical frequency combs generation

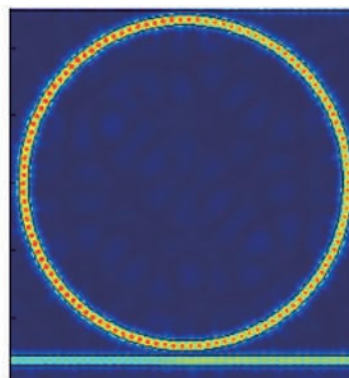


图2 微环中回音壁模式的场强分布图

Fig.2 Distribution of field intensity of the whispering gallery mode in micro-ring resonator

对于基于微谐振腔中形成的回音壁模式而产生的光频梳,其非线性效应主要是四波混频效应。

四波混频过程起源于介质的束缚电子对电磁场的非线性响应,而且这些非线性过程取决于二阶极化率 $\chi^{(2)}$ 或者三阶极化率 $\chi^{(3)}$ 的大小,由于硅的晶体结构导致了其二阶非线性极化系数 $\chi^{(2)}$ 为0,所以四波混频效应主要考虑到了三阶极化率。而一般三阶极化率和光强有关,由于微环谐振腔的Q值比较大,光强度高,所

以三阶极化率比较大。

对于四波混频来说,另一个关键因素就是相位匹配条件,只有当相位失配几乎为零时,才会发生显著的四波混频过程。而引起相位失配有三方面,分别是材料色散、波导色散和非线性效应。一般材料色散是由材料决定的,为固定值;而非线性效应引起的相位失配为正值,同时除了让抽运波长在靠近零值的反常色散区来补偿非线性效应引起的相位失配外,只能通过设计不同的波导结构来改变波导色散,最终降低整个相位失配的值,得到更好的色散曲线,使四波混频效应在所需要的范围内更好地发生,得到较好的光频梳输出。

3 几种微环谐振腔色散控制的方法

上面分析了基于微环谐振腔中四波混频效应实现光频梳输出,除了使微环谐振腔的 Q 值增大,来增强其光强,得到较高的非线性系数外,最重要的就是设计波导结构,使其相位失配达到最小值,有利于四波混频效应的产生。

以下就是几种常见且较新的方法,通过改变微谐振腔的波导结构得到比较好的色散曲线,从而更好地满足四波混频的条件,实现更好的光频梳输出。

3.1 改变微环截面的宽度

通过改变微环截面的宽度,可以调控其波导色散的分布。此种方法比较简单,也很容易实现。一般在工艺前期的仿真阶段,就可以设计不同宽度、高度的组合,使器件达到比较好的色散曲线。

在这个方面,康奈尔大学的学者做了比较详细的分析。2011年,Yoshitomo Okawachi等^[4]设计了基于氮化硅材料在相同高度下、不同宽度组合的微环谐振腔,同时仿真了TE模在对应波导结构中的色散曲线。如图3所示,图中的黑色虚线表示氮化硅的材料色散。

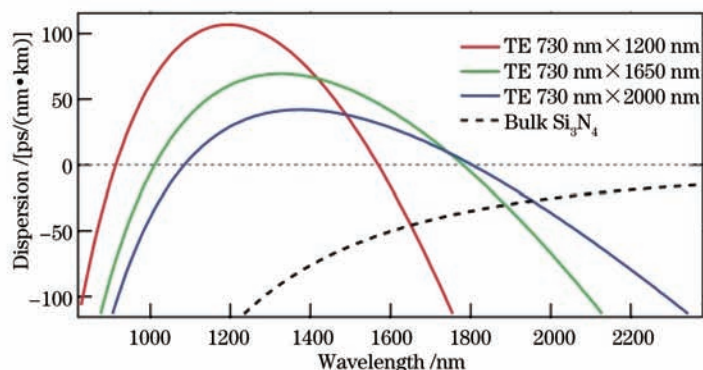


图3 相同高度、不同宽度的微环谐振腔的色散曲线

Fig.3 Dispersion simulations for the fundamental TE mode of a silicon nitride waveguide with a height of 730 nm and widths of 1200, 1650, and 2000 nm

可以发现,当微环截面的高度为730 nm时,适当增加其宽度,由1200 nm至2000 nm,可以使色散曲线更加平坦且靠近零色散点,这样有利于四波混频的相位匹配,增强四波混频效应,可以在更宽的范围内实现光频梳的产生。最终Yoshitomo Okawachi等选择了最优的高度、宽度组合为730 nm×2000 nm的微环截面尺寸,实现了谱宽为128 THz的光频梳输出。

2012年,Kasturi Saha等^[5]基于氮化硅材料作了相同的研究,同时也获得了类似的结论,如图4所示。高度一定,色散曲线随着宽度的增加越来越宽,且更加靠近零色散点。具体参数为高度600 nm,宽度由1000 nm增加到1200 nm。

2013年,Hojoong Jung等^[6]也做了类似的研究。他们是基于氮化铝材料,如图5所示。高度一定的情况下,增加微环截面宽度,从2500 nm至3500 nm,获得了更接近零色散点的色散曲线,而且色散曲线也逐渐变得更加平坦。此外,他们还基于最优的波导结构(微环波导截面高度为650 nm,宽度最宽3.5 μm),实现了频率间隔为370 GHz的平坦光频梳输出。

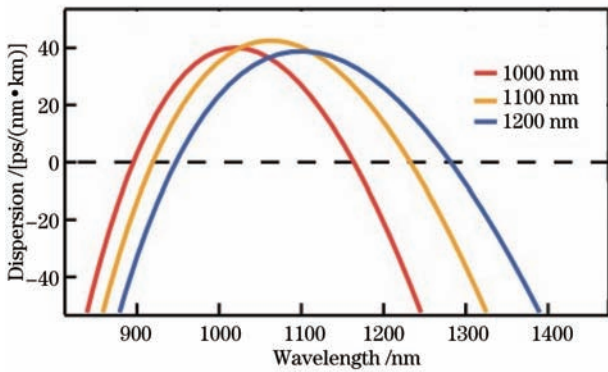


图4 相同高度,不同宽度的微环谐振腔的色散曲线

Fig. 4 Simulated dispersion curves for the fundamental TE- mode of a silicon- nitride waveguide with 600 nm height and with widths of 1000, 1100, and 1200 nm

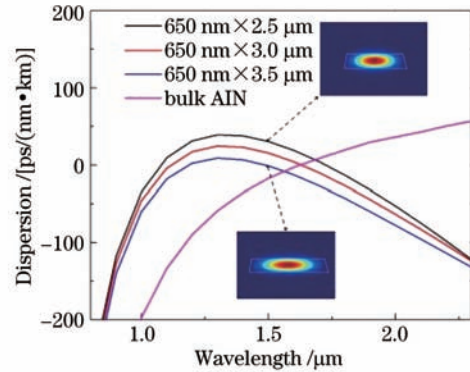


图5 相同高度,不同宽度的微环谐振腔的色散曲线

Fig.5 Simulated dispersion curves of AlN waveguide for the fundamental TE- like mode as a function of the different waveguide widths

3.2 利用 slot 结构

Slot波导由两侧高折射率材料及中间低折射率材料(或空气缝隙)组成,两侧高折射率材料的宽度、高度及低折射率材料的尺寸为几百到几十纳米。这种波导能使光场在低折射率的 slot 区得到很好的限制,如图6所示^[7],有较高的非线性系数,而且通过改变 slot 结构的尺寸及中间 slot 区的填充物可以有效地改变色散曲线的分布。根据 slot 区与衬底的相对位置,可以分为平行 slot 和垂直 slot 波导结构^[7],如图7所示,同时还分别描绘了在包层和 slot 区添加不同低折射率非线性材料。

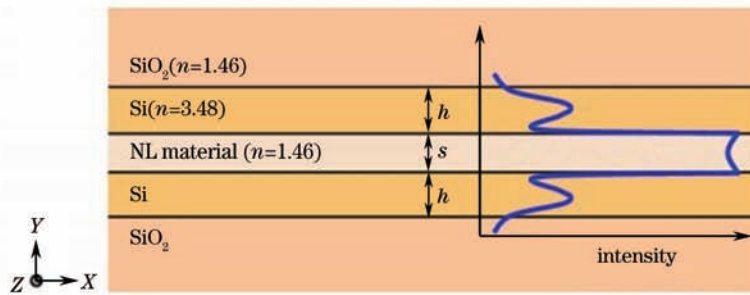


图6 水平 slot 结构截面图及其光场分布图

Fig.6 Cross section of a horizontal slot waveguide slab system and intensity profile of the TM mode

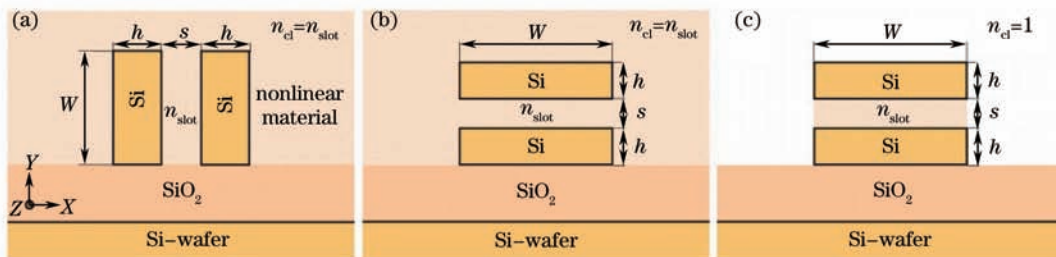


图7 (a)垂直 slot 结构和(b),(c)平行 slot 结构截面示意图

Fig.7 Schematic cross section of (a) vertical slot waveguide and (b), (c) horizontal slot waveguides

3.2.1 平行 slot 波导结构

对于平行 slot 波导结构,Zhang 等^[8]作了比较深入的研究,研究发现:在平行的 slot 结构,改变整个 slot 的宽度 W ,及 slot 区中间的高度 H_s 和上下两边的波导厚度 H_u 、 H_l 可以很好地调控波导的色散曲线。如图8和9所示^[8]。在整个 slot 波导长度为 10 cm 时,其 slot 的高度 H_s 由 105 nm 增加到 120 nm 时,整个色散曲线包络更加接近零点;改变波导宽度 W ,由 200 nm 增加到 310 nm 时,整个色散曲线包络变大,但是更加偏离零色散点;slot 上层波导的高度 H_u 逐渐增加时,整个色散包络向长波长漂移,且更加接近零点。

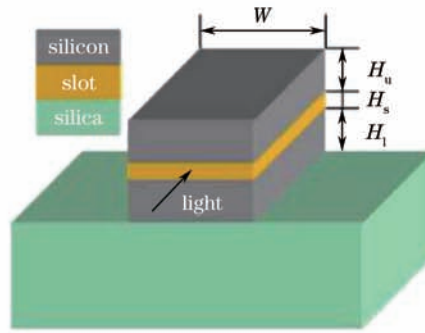


图8 平行 slot 波导结构示意图

Fig.8 Configuration of horizontal slot waveguides

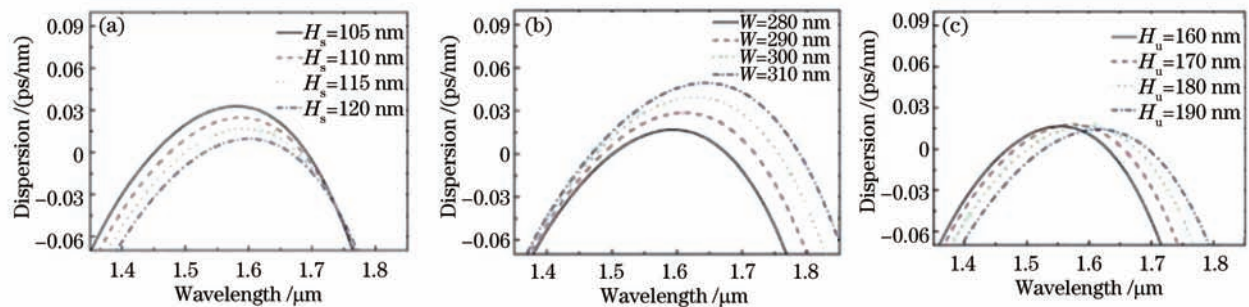


图9 平行 slot 波导结构的色散随 slot 区高度、宽度, 及上层波导高度变化时的曲线

Fig.9 Dispersion profiles in 10-cm-long chalcogenide slot waveguides with (a) different slot heights; (b) different waveguide widths; (c) different upper silicon heights

此外,对于 slot 上下波导高度不一致的非对称 slot 结构,如图 10 所示^[9],Zhang 等^[9]也做了研究,发现在这种非对称的 slot 波导结构中,存在对称和非对称模式。这两种模式对应的色散分布完全相反,可以利用这种特性来有效地补偿整个色散曲线^[10]。如图 10 中波导结构所示,slot 波导宽度为 500 nm,slot 上层波导高度为 265 nm,中间 slot 区高度为 50 nm,slot 下层波导高度为 510 nm。利用这种结构的 strip 模式向 slot 模式的耦合作用,得到了在 1.6~2.1 μm 波段范围内很平坦的色散曲线,而且整体比较靠近零色散点。

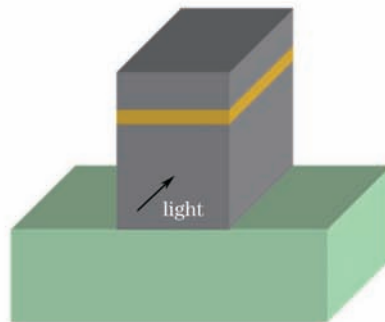


图 10 非对称平行 slot 波导结构示意图

Fig.10 Configuration of asymmetric horizontal slot waveguides.

3.2.2 垂直 slot 波导结构

对于垂直 slot 结构,根据 slot 区的个数,还可以分为单 slot 波导和双 slot 波导,如图 11 所示^[11]。

2012 年,Zhu 等^[11]对此结构进行了相关的理论研究,特别对于双 slot 波导结构,由于 strip 模式向 slot 模式的耦合,使得这种双 slot 波导结构的色散曲线在 1098 nm 范围内四次经过零色散点,而且整个色散曲线也比较平坦。

3.2.3 slot 微环结构

前面,简单地介绍了 slot 波导在改变整个器件色散特性方面的研究。由于其出色的色散特性,及其易改变的维度(slot 区的高度,两边波导的高度,及整个波导的宽度),使得其能够很好地用于微环谐振腔的色散

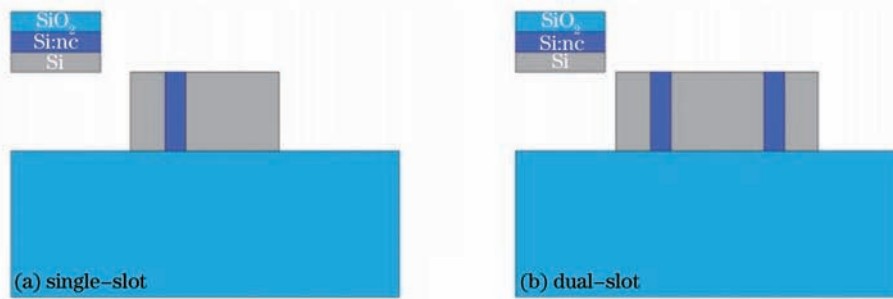


图 11 波导结构示意图

Fig. 11 Structures of silicon waveguide

曲线的优化。

2013年, Zhang等^[12]和 Yan等^[13]设计出了 slot的微环结构,波导结构图及其色散曲线分别如图12、13所示,在图中,还给出了群速度色散参数 β_2 的曲线。图12结构参数具体为:微环宽度为1300 nm, slot中间为SiO₂,高度156 nm;两侧为Si₃N₄,上侧高度为480 nm,下侧高度为920 nm,可以看到, β_2 和 D 都比较平坦且接近零点。图13结构参数具体为:微环宽度为1000 nm, slot中间为SiO₂,高度100 nm,两侧为Si₃N₄,上侧为840 nm,下侧为360 nm。

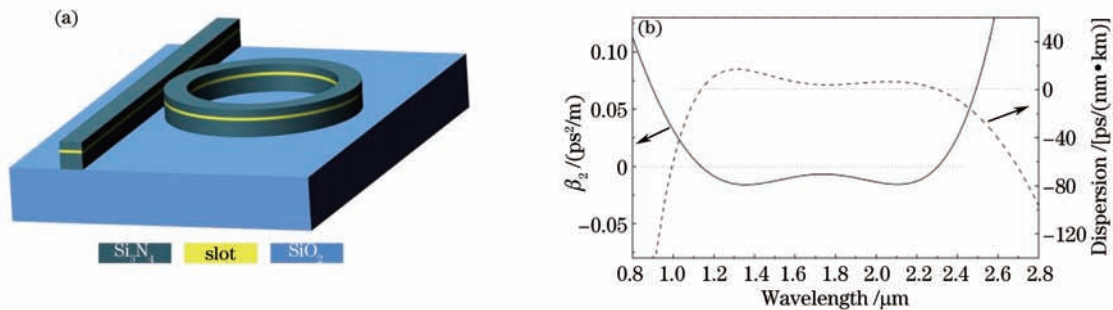


图 12 (a) slot微环的结构示意图(b)及其色散曲线

Fig.12 (a) Structure of micro-ring resonator; (b) flattened dispersion profile

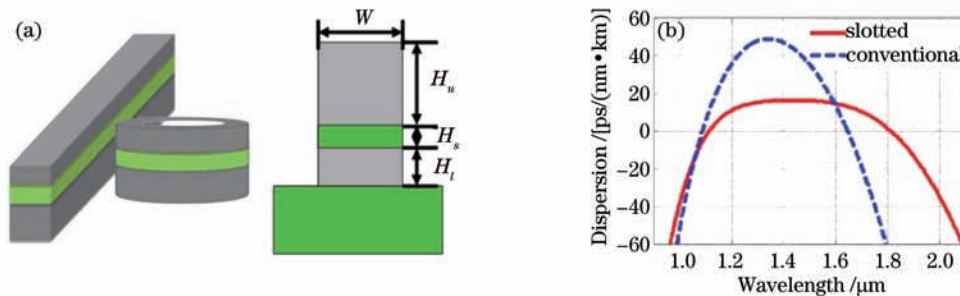


图 13 (a) slot微环的结构示意图(b)及其色散曲线

Fig.13 (a) Structure of micro-ring resonator; (b) chromatic dispersion profile

从图中可以看出, slot结构和微环相结合,其色散曲线很平坦,同时,在微环截面的 slot结构可以更好地控制光强,使非线性系数增大。这些对于基于微环谐振腔的光频梳的产生是非常有利的。

3.3 光子晶体结构

对于光子晶体结构,特别是光子晶体光纤,王丹等^[14-16]做了很多的研究,也得到了较好的仿真及实验结果,在很宽的光谱范围内实现了平坦的色散曲线分布。

而对于光子晶体平板结构,在2013年, Willinger等^[17]利用光子晶体结构,得到了1540~1570 nm范围内色散基本为零的色散曲线,如图14所示^[17],其中 n_g 为群折射率,可以看到 n_g 比较平坦时,对应的 β_2 比较靠近零点。通过改变光子晶体结构的相对排列方式,可以获得更理想的色散分布曲线。虽然这种波导结构的色散曲线只能在很小一段光谱范围内靠近零色散点,但是其结构对于优化整个微环谐振腔还是很有指导意义的。

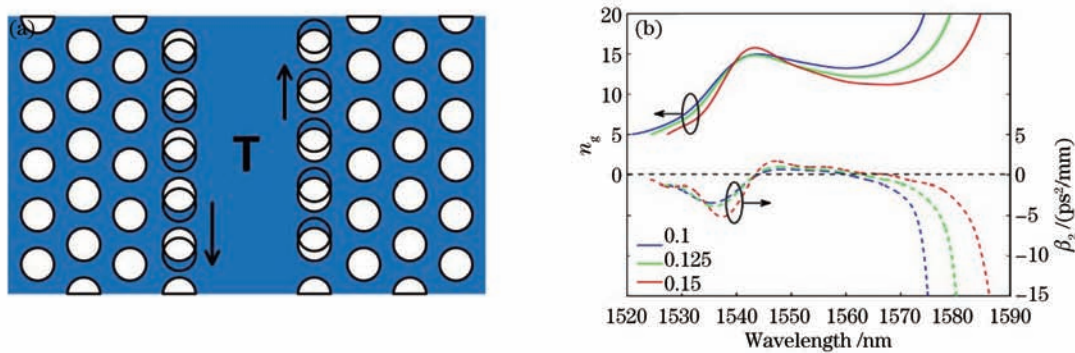


图 14 光子晶体(a)结构示意图及其(b)色散曲线

Fig.14 (a) Schematics of the photonic crystal waveguide structure; (b) dispersion profile

4 不同色散控制方法的比较

直接改变微环波导结构大小,如微环截面的宽度,此方法比较简单,而且在设计波导的过程中就可以有效控制,易操作实现。但是这种方法只能使整个色散曲线随着宽度的增大而整体向长波长漂移,且整个色散曲线变得相对平坦,不能使大范围的光谱波段都靠近零色散点。

利用 slot 结构和微环结构相结合,可以有效改变整个波导结构的色散特性。由于 slot 结构的维度多,可以灵活地改变其参数来获得所需要的色散曲线。通过改变微环截面 slot 结构的各种参数,可以有效地使色散曲线在很宽的光谱范围内靠近零色散点,使得整个波导结构更加有利于四波混频的发生,产生更多的光频梳。但是这个波导结构设计比较复杂,工艺相对复杂。

对于光子晶体结构来说,可以通过改变其排列分布的方式,很容易改变色散曲线的分布,且色散曲线只能在较小范围内(几十纳米)靠近零色散。利用这个特性,设计特殊结构的微环谐振腔,使其只在较窄光谱范围内满足四波混频效应,实现光频梳输出,大大提高效率。

5 结束语

随着光集成器件的发展,低功耗,低成本必然是一个趋势。对于基于微环谐振腔的四波混频效应实现光频梳输出,其色散控制必定是一个关键的问题,只有很好控制了微环谐振腔色散分布,才能在所需要的波段范围内实现光频梳的输出,大大提高效率,降低阈值。本文总结了目前几种最新的色散控制的方法,对这些实现方法与特点作了相应的分析和比较。结果表明,对于利用 slot 结构和微环组合的波导结构,可以在更宽的光谱范围内满足四波混频的条件,实现更宽的光频梳输出。对于光子晶体和微环结构相结合,利用改变光子晶体结构来实现色散曲线在较窄范围(如 C 波段)内靠近零色散点,可以在较小范围内实现光频梳输出,效率也可大大提高,这种方法值得人们深入研究。

参考文献

- 1 Marcatili E A J. Bends in optical dielectric guides [J]. Bell Labs Technical Journal, 1969, 48(7): 2103-2132.
- 2 P Del'Haye, A Schliesser, O Arcizet, *et al.*. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator [J]. Nature, 2007, 450(7173): 1214-1217.
- 3 T J Kippenberg, R Holzwarth, S A Diddams. Microresonator-based optical frequency combs [J]. Science, 2011, 332(6029): 555-559.
- 4 Yoshitomo Okawachi, Kasturi Saha, Jacob S Levy, *et al.*. Octave-spanning frequency comb generation in a silicon nitride chip [J]. Opt Lett, 2011, 36(17): 3398-3400.
- 5 Kasturi Saha, Yoshitomo Okawachi, Jacob S Levy, *et al.*. Broadband parametric frequency comb generation with a 1- μ m pump source [J]. Opt Express, 2012, 10(24): 26935-26941.
- 6 Hojoong Jung, Chi Xiong, King Y Fong, *et al.*. Optical frequency comb generation from aluminum nitride microring resonator [J]. Opt Lett, 2011, 38(15): 2810-2813.
- 7 Paul Muellner, Markus Wellenzohn, Rainer Hainberger. Nonlinearity of optimized silicon photonic slot waveguides [J].

- Opt Express, 2012, 17(11): 9282–9287.
- 8 Lin Zhang, Yang Yue, Yinying Xiaoli, *et al.*. Flat and low dispersion in highly nonlinear slot waveguides [J]. Opt Express, 2010, 18(12): 13187–13193.
- 9 Lin Zhang, Yang Yue, Yinying Xiao-Li, *et al.*. Highly dispersive slot waveguides [J]. Opt Express, 2009, 17(19): 7095–7101.
- 10 Alan E Willner, Lin Zhang, Yang Yue. Tailoring of dispersion and nonlinear properties of integrated silicon waveguides for signal processing applications [J]. Semicond Sci Technol, 2011, 26(1): 014044.
- 11 Ming Zhu, Hongjun Liu, Xuefeng Li, *et al.*. Ultrabroadband flat dispersion tailoring of dual-slot silicon waveguides [J]. Opt Express, 2012, 20(14): 15899–15907.
- 12 Lin Zhang, Chengying Bao, Vivek Singh, *et al.*. Generation of two-cycle pulses and octave-spanning frequency combs in a dispersion-flattened micro-resonator [J]. Opt Lett, 2013, 38(23): 5122–5125.
- 13 Yan Yan, Andrey Matsko, Changjing Bao, *et al.*. Increasing the spectral bandwidth of optical frequency comb generation in a microring resonator using dispersion tailoring slotted waveguide [C]. Photonics Conference (IPC), IEEE, 2013. 230Z31.
- 14 Wang Dan, Zheng Yi. Numerical investigation of a ultra-broadband low-dispersion holey fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0806005.
王丹, 郑义. 一种超宽带低色散多孔光纤的数值研究[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0806005.
- 15 Dai Nengli, Li Yang, Peng Jinggang, *et al.*. Development of dispersion flattened photonic crystal fibers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(1): 010602.
戴能利, 李洋, 彭景刚, 等. 色散平坦光子晶体光纤的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(1): 010602.
- 16 Li Shuguang, Zhu Xingping, Xue Jianrong. Supercontinuum generation in all-normal dispersion photonic crystal fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(20): 204206.
李曙光, 朱星平, 薛建荣. 全波段正常色散光子晶体光纤中超连续谱的产生[J]. 物理学报, 2013, 62(20): 204206.
- 17 A Willinger, G Eisenstein. Dual-pump parametric gain in dispersion engineered photonic crystal waveguides [C]. Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics, 2013. IM2A.6.