

激光与光电子学进展

热光效应对绝缘层上的硅微腔光梳产生和演化的影响分析

熊科宇^{**}, 文进^{*}, 何晨瑶, 梁伯植, 孙伟, 张辉, 王倩, 武政委, 于慧敏

西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065

摘要 微腔光频梳具有功耗低、可集成、梳齿间隔可调的特点, 在各个领域都有广泛的应用。绝缘层上的硅(SOI)材料加工工艺与现有的互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容, 使其成为最具前景的光子平台之一。本文设计了一种截面为脊形的硅基微环谐振腔, 研究了各个几何参数对微环谐振腔色散的影响; 数值求解了微环谐振腔热动态方程, 并分析了不同参数对微环谐振腔热动态效应的影响。数值求解了LLE(Lugiato-Lefever Equation)模型, 由于SOI微腔光频梳理论研究大多忽略了热光效应, 因此本文分析了在模型中引入热光效应项后对光频梳产生和演化的影响。数值结果表明, 在温度变化范围为0~0.16 °C条件下, 时域上光场最大功率值增加了22%, 频域上光频梳展宽了221 nm。最后对两种热光效应条件下光频梳输出频谱进行分析, 结果表明, 光频梳在热光效应温度变化范围为0~0.32 °C的情况下, 相较于0~0.16 °C的情况, 带宽展宽了353 nm。

关键词 非线性光学; 硅基波导; 微环谐振腔; Lugiato-Lefever方程模型; 热光效应; 光频梳

中图分类号 O437

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222343

Influence Analysis of Thermo-Optic Effect on Generation and Evolution of Silicon-on-Insulator Microcavity Optical Comb

Xiong Keyu^{**}, Wen Jin^{*}, He Chenyao, Liang Bozhi, Sun Wei, Zhang Hui, Wang Qian, Wu Zhengwei, Yu Huimin

School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China

Abstract Microcavity optical frequency combs exhibit low power consumption, integration, and tunable comb spacing, and they have been widely used in many fields. The technology for processing silicon-on-insulator (SOI) materials is compatible with the existing complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) process, making it one of the most promising photonic platforms. In this study, a silicon-based micro-ring resonator with a ridge section was designed, and the effects of various geometric parameters on the dispersion of the micro-ring resonator were investigated. The thermal dynamic equation of the micro-ring resonator was numerically solved, and the effects of different parameters on the thermal dynamic influence of the micro-ring resonator were analyzed. The Lugiato-Lefever equation (LLE) model was solved numerically. Because the thermo-optic effect was ignored in the theoretical research on SOI microcavity optical frequency comb, the influence of the thermo-optic effect on the generation and evolution of the optical frequency comb was analyzed. The numerical results show that at 0–0.16 °C, the maximum power of the light field increases by 22% in the time domain, and the optical frequency comb broadens by 221 nm in the frequency domain. Finally, the output spectrum of the optical frequency comb under two kinds of thermo-optic effects was analyzed. The results show that the bandwidth of the optical frequency comb is expanded by 353 nm compared with that at 0–0.16 °C when the temperature range of the thermo-optic effect is 0–0.32 °C.

Key words nonlinear optics; silicon waveguide; micro-ring resonator; Lugiato-Lefever equation model; thermo-optic effect; optical frequency comb

1 引言

光学频率梳, 简称光频梳, 在时域上为具有一定时

间间隔的超短脉冲序列; 在频域上为由一系列离散的、等间隔的频率成分组成的光谱结构。2005年, 由于 John L Hall 等在光频梳领域做出了开拓性的贡献, 获

收稿日期: 2022-08-19; 修回日期: 2022-09-29; 录用日期: 2022-10-09; 网络首发日期: 2022-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(61505160)、陕西省创新能力支持项目(2018KJXX-042)、陕西省自然科学基金项目(2019JM-084)、陕西省科学基金(2018KJ-042)、瞬态光学与光子学国家重点实验室项目(SKLST202108)、石油大学研究生创新与实践能力培养项目(YCS20211077)

通信作者: *wenjin@xsyu.edu.cn; **20212080933@stumail.xsyu.edu.cn

得了同年的诺贝尔物理学奖。截至目前,微腔光学频率梳在激光光源^[1]、光谱分析^[2-4]、测距成像^[5]、精密测量^[6-7]和天文学^[8-9]等领域展现出了前所未有的优势。研究人员已经在多种材料平台上实现了微腔光频梳的产生,包含氟化钙(CaF_2)^[10]、氟化镁(MgF_2)^[11]、氮化硅(Si_3N_4)^[12-13]和氮化铝(AlN)^[14-15]等。绝缘层上的硅(SOI)材料中的Si和 SiO_2 之间存在较大的折射率差,对光场能起到限制作用,更重要的是,其加工工艺与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容,是大规模集成光子芯片的理想平台。因此,SOI微腔光频梳的产生方法^[16]及其应用已成为近年来的研究热点。

研究发现,热光效应与微环谐振腔尺寸成反比,由于微腔尺寸大多是微米甚至纳米量级,热光效应会对光频梳的产生及演化带来影响^[17]。2004年,Carmon等^[18]建立了微腔内的热动力学模型,理论上分析了热光效应对微腔固有性质的影响,并从实验上得出由热光效应引起的温度变化会改变微腔固有谐振频率的结论。2016年,Wang等^[19]利用高Q值铌酸锂微盘谐振腔分析了热光效应带来的影响,用快速和慢速两种方式调谐激光波长,着重分析了谐振腔的透射谱,从实验上验证了热光效应对谐振腔参数的影响。2018年,He等^[20]利用完善后的Lugiato-Lefever方程(LLE)模型,采用固定初失谐量和调节初失谐量两种方式,仿真分析了热光效应对光频梳产生和演化的影响,研究发现,热光效应作用下采用调节初失谐量获得的光频梳带宽更大、平坦度更好。

基于以上研究,本文在现有LLE模型的基础上,引入热光效应项,利用完善后的LLE模型仿真分析热光效应对SOI微腔光频梳产生和演化的影响。利用脊形结构设计了SOI微环谐振腔截面。采用Runge-Kutta法对微腔热动态方程进行求解,分析了品质因素和泵浦功率对热光效应的影响。在时域和频域上仿真分析了热光效应对光频梳产生和演化的影响,仿真结果表明,引入热光效应后,在温度变化范围为 $0\sim 0.16\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,光场在时域上的最大功率增加了22%,光频梳在频域上带宽展宽了221 nm;在温度变化范围为 $0\sim 0.32\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,相较于 $0\sim 0.16\text{ }^\circ\text{C}$ 的情况,光频梳频谱展宽了353 nm。

2 微环谐振腔的设计

SOI微环谐振腔由一个直波导和一个环形波导组成,直波导和环形波导之间存在耦合关系。微环谐振腔截面为脊形结构,各部分的尺寸根据实际需要从小米量级到微米量级不等。在SOI加工工艺方面,一般通过光滑工艺来降低SOI波导的粗糙度,以达到提高SOI谐振腔的Q值和降低损耗的目的, Lee等^[21]利用化学刻蚀法,获得了Q值高达 8.75×10^6 的硅基楔形盘腔;对于脊形结构,三个几何参数可以调整,即脊宽 W 、内脊高 H 和外脊高 h ,其为色散管理提供了更多的自由度。图1给出了微环谐振腔的截面图和三维图,图2为微环谐振腔截面在1550 nm处的TE基模光场分布图。

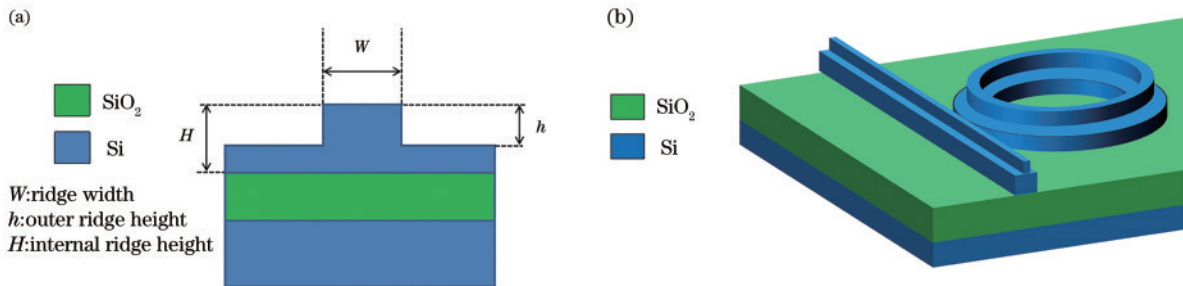


图1 脊形微环谐振腔示意图。(a)截面示意图,其中 W 为脊宽, h 为外脊高, H 为内脊高;(b)三维示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ridge-shaped micro-ring resonator. (a) Section diagram, where W is ridge width, h is outer ridge height, and H is inner ridge height; (b) three-dimensional schematic diagram

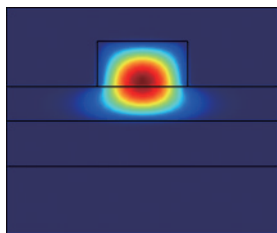


图2 脊形微环谐振腔截面在1550 nm处的TE基模光场分布图
Fig. 2 Distribution of TE mode light field at 1550 nm in cross section of ridge-shaped micro-ring resonator

研究表明,二阶色散值为负,且在宽带范围内接近零时满足相位匹配条件,所以需要微环谐振腔的色散曲线进行优化研究,各个参数的初值为 $H=3.5\text{ }\mu\text{m}$, $h=2\text{ }\mu\text{m}$, $W=4\text{ }\mu\text{m}$ 。研究方法采用控制变量法,保持 H 和 h 不变,脊宽 W 从 $2.8\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $4\text{ }\mu\text{m}$,二阶色散曲线如图3(a)所示,脊宽 W 越宽,色散曲线越平坦且能很好地分布在零色散点附近。图3(b)展现了 $H=3.5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $W=4\text{ }\mu\text{m}$ 保持不变的情况下外脊高 h 从 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $3\text{ }\mu\text{m}$ 时对应的二阶色散曲线,随着

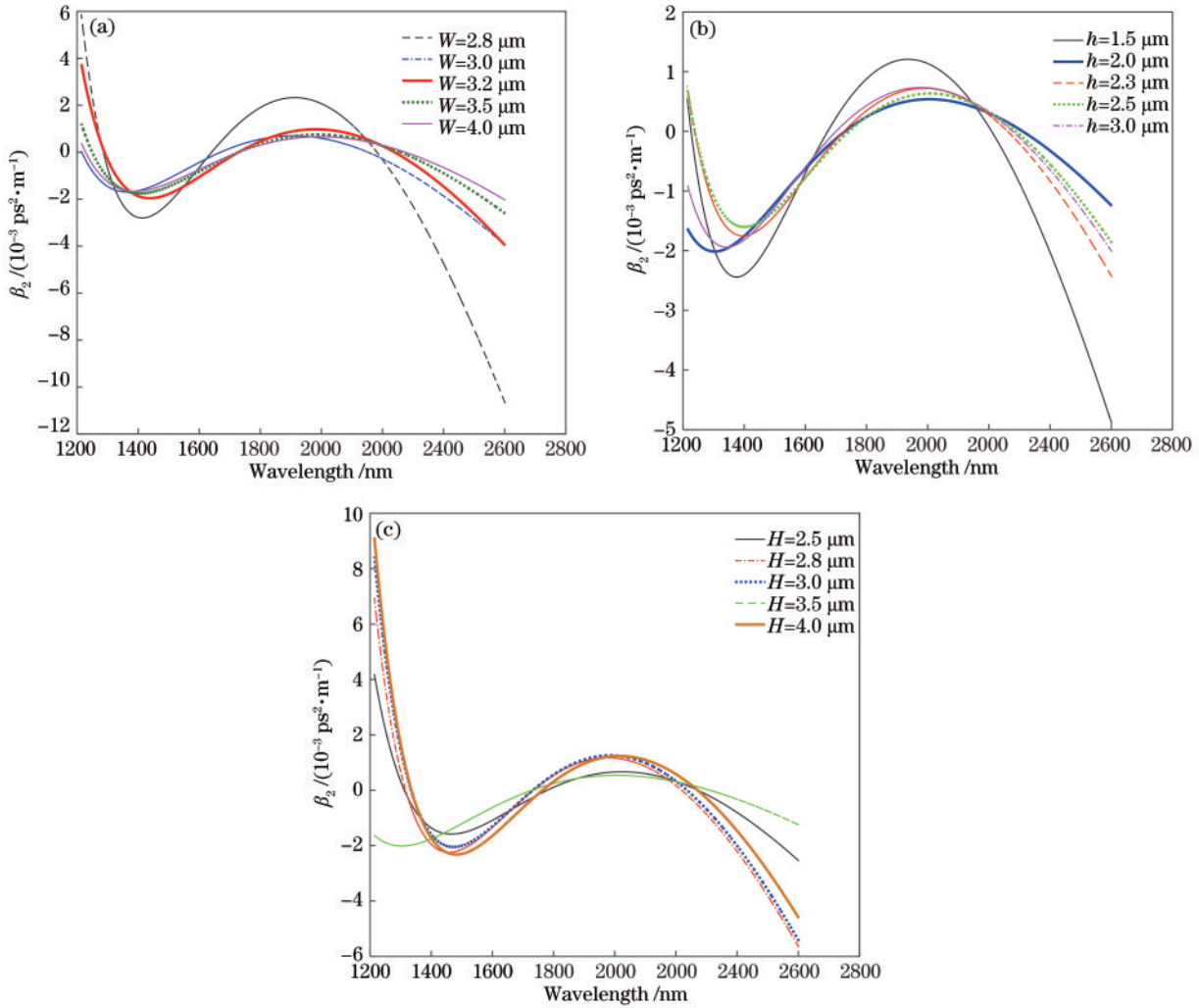


图3 各参数对脊形谐振腔二阶色散的影响。(a)外脊高为 $2 \mu\text{m}$ 、内脊高为 $3.5 \mu\text{m}$ 的情况下不同脊宽 W 对二阶色散的影响;(b)脊宽为 $4 \mu\text{m}$ 、内脊高为 $3.5 \mu\text{m}$ 的情况下不同外脊高 h 对二阶色散的影响;(c)外脊高为 $2 \mu\text{m}$ 、脊宽为 $4 \mu\text{m}$ 的情况下不同内脊高 H 对二阶色散的影响

Fig. 3 Influence of various parameters on second-order dispersion of ridge-shaped micro-ring resonator. (a) Influence of different ridge widths W on second-order dispersion when outer ridge height is $2 \mu\text{m}$ and inner ridge height is $3.5 \mu\text{m}$; (b) influence of different outer ridge heights h on second-order dispersion when ridge width is $4 \mu\text{m}$ and inner ridge height is $3.5 \mu\text{m}$; (c) influence of different inner ridge heights H on second-order dispersion when outer ridge height is $2 \mu\text{m}$ and ridge width is $4 \mu\text{m}$

外脊高的增加,二阶色散曲线整体趋势从陡峭变平坦, h 超过 $2 \mu\text{m}$ 后,二阶色散曲线又变陡峭。图 3(c) 是 $h=2 \mu\text{m}$ 、 $W=4 \mu\text{m}$ 保持不变的情况下内脊高度 H 从 $2.5 \mu\text{m}$ 增加到 $4 \mu\text{m}$ 时的二阶色散曲线,二阶色散曲线整体趋势是从正色散区向负色散区移动,在 H 取 $3.5 \mu\text{m}$ 时,得到一条平坦且分布在零色散点附近的二阶色散曲线。

3 基于 SOI 微环谐振腔光频梳产生模型的建立

微腔光频梳的产生,通常需要在微腔中注入激光放大器放大后的连续泵浦光,使其达到光参量振荡阈值,通过环形腔内的光参量振荡带来的频率转换,在泵浦波长附近出现新的频率成分,并通过级联四波混频

作用演化为宽带的光频梳。

3.1 LLE 理论模型的建立

目前 SOI 微环谐振腔产生光频梳的理论研究有两种模型被广泛使用。第一种是非线性耦合模理论 (NCME),该模型最早由 Chembo^[22] 在 2010 年提出,他以麦克斯韦波动方程为基础,推导出一个包含腔的非线性效应、损耗和色散的微分方程,该方程可以完整地描述腔内各个模式的动态行为。计算该方程的耗时正比于模式数,因此,NCME 模型不适合求解超宽带的微腔光频梳。第二种是非线性 LLE 模型,2013 年,Coen 等^[23] 首次利用 LLE 模型仿真了光频梳,仿真结果与实验结果基本一致。LLE 模型结果丰富、求解耗时短,备受研究人员青睐。光学微环谐振腔中连续光的传输用非线性薛定谔方程表述为

$$\frac{\partial E(z, \tau)}{\partial z} = \left[-\frac{\alpha_0}{2} + i \sum_{k \geq 2} \frac{\beta_k}{k!} \left(i \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^k + i\gamma |E|^2 \right] E(z, \tau), \quad (1)$$

式中: $E(z, \tau)$ 为光场; z 为传输距离; τ 为传输所用时间; α_0 为损耗; β_k 为色散系数, 本文仅考虑二阶色散; γ 为非线性系数。光在微环谐振腔内循环, 满足边界条件:

$$E^{(q+1)}(0, \tau) = \sqrt{\theta} E_m + \sqrt{1-\theta} E^{(q)}(L, \tau) e^{-i\delta_0}, \quad (2)$$

式中: q 为光在微环谐振腔内的循环圈数; θ 为功率耦合系数; E_m 为泵浦光场; L 为微环谐振腔的周长; δ_0 为失谐量。对式(1)两边从 0 到 L 进行积分, 由慢变振幅近似得到:

$$E^{(q)}(L, \tau) - E^{(q)}(0, \tau) = \left[-\frac{\alpha_0 L}{2} + iL \sum_{k \geq 2} \frac{\beta_k}{k!} \left(i \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^k + iL\gamma |E|^2 \right] E. \quad (3)$$

根据平均场近似, 腔内光场的变化为

$$E^{(q+1)}(0, \tau) - E^{(q)}(0, \tau) = t_R \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial t}, \quad (4)$$

式中, t 为光场传输的慢时间。联立式(2)和式(4), 并将式(3)代入, 最终得到 LLE 的表达式为

$$t_R \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial t} = \left[-\alpha - i\delta_0 + iL \sum_{k \geq 2} \frac{\beta_k}{k!} \left(i \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^k + iL\gamma |E|^2 \right] E + \sqrt{\theta} E_m, \quad (5)$$

式中, t_R 为光循环一圈的耗时。

3.2 热光效应下 LLE 的修正

强光与微环谐振腔的材料作用会发生热光效应, 研究表明, 热光效应与微腔尺寸成反比, 通常微腔的尺寸为微米量级, 这种情况下热光效应不可忽略。热光效应对微环谐振腔特性的影响体现在两个方面: 一方面热光效应会改变微环谐振腔的固有谐振波长; 另一方面热光效应带来的热膨胀会改变微环谐振腔的尺寸^[24]。温度对微环谐振腔谐振波长的影响用下式表示:

$$\lambda(\Delta T) = \lambda_0 [1 + a \cdot \Delta T], \quad (6)$$

式中: $\lambda(\Delta T)$ 为受热光效应影响后的谐振频率; λ_0 为固有谐振频率; a 为谐振波长对温度的依赖系数; ΔT 为微环谐振腔的温度变化量。

进入微腔的热量可以用以时间为自变量的微分方程表示为

$$\frac{dq_{in}(t)}{dt} = I_h \frac{1}{\left[\frac{\lambda_p - \lambda_0(1 + a \cdot \Delta T)}{\Delta\lambda/2} \right]^2 + 1}, \quad (7)$$

同时, 从微腔中散出的热量为

$$\frac{dq_{out}(t)}{dt} = K \cdot \Delta T. \quad (8)$$

由能量守恒可知, 微环谐振腔净热量的流入等于总的流入减去从微腔表面散发的能量^[18]:

$$C_p \frac{d\Delta T(t)}{dt} = \frac{dq_{in}(t)}{dt} - \frac{dq_{out}(t)}{dt} = \frac{I_h}{\left[\frac{\lambda_p - \lambda_0(1 + a \cdot \Delta T)}{\Delta\lambda/2} \right]^2 + 1} - K \cdot \Delta T, \quad (9)$$

式中: I_h 为热腔内实际的光功率; C_p 为微环谐振腔的热容; K 为微环谐振腔与周围环境的热导; $\Delta\lambda$ 为微环谐振腔的共振带宽; λ_p 为泵浦波长。

从物理意义上来说, 光在微环谐振腔中循环, 包裹中每一个频率分量都会受到各种因素影响而产生相移, 这些因素包括非线性效应、色散、衰减、损耗等等, 本文提出的热光效应也会改变微环谐振腔的共振波长^[25], 在仿真分析中, 将这种影响等效于光场的相位漂移。光场相移变化量可用下式表示:

$$\Delta\varphi_t = k_0 \Delta n = k_0 K_{\text{THO}} \Delta T(t), \quad (10)$$

式中: k_0 为光在真空条件下的波数; K_{THO} 为微环谐振腔材料的热光系数, 参数值为 6.4×10^{-6} ; Δn 为微环谐振腔有效折射率的变化量, 热光效应下其变化量可用温度变化量进行表征; $\Delta T(t)$ 为光传播单位长度后温度变化量。

LLE 模型引入热光效应项, 完善后的 LLE 为

$$t_R \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial t} = \left[-\alpha - i\delta_0 + iL \sum_{k \geq 2} \frac{\beta_k}{k!} \left(i \frac{\partial}{\partial \tau} \right)^k + iL\gamma |E|^2 + iLk_0 K_{\text{THO}} \Delta T(t) \right] E + \sqrt{\theta} E_m. \quad (11)$$

将温度增量随时间的变化与光在微腔中循环耗时进行统一, 在每一圈循环中都加入温度的影响, 这样可以定量地分析说明热光效应对光频梳的产生和演化的影响。本文仿真所选取的参数是实际可能的实验参数, 例如 Q 值的选取、谐振腔的半径、自由光谱范围(FSR)、有效模场面积等。

4 仿真结果及分析

4.1 微环谐振腔热动态方程的求解

微腔热动态方程为一阶常微分方程, 在泵浦功率为 13 mW、微环谐振腔的初始温度为 0 °C 的条件下, 采用四阶 Runge-Kutta 法求解该方程。微环谐振腔相关参数见表 1, 求解得到的微环谐振腔温度随时间变化规律如图 4 所示。

如图 4 所示, 微环谐振腔的温度变化趋势是先快速上升, 再趋于平缓, 最后基本不变, 即处于热动态平衡状态。从时间上来看, 从开始到热动态平衡的整个过程在 0.1 s 之内完成, 总的温度变化量为 3.65 °C。

为了找到热光效应的规律, 考察了品质因素 Q 和泵浦功率 P 两个参数。在泵浦功率为 35 mW, 其他条件不变的情况下, 微腔的品质因素 Q 从 1×10^6 增加到

表 1 微环谐振腔相关参数

Table 1 Relevant parameters of micro-ring resonator

Parameter	Value
Heat capacity of micro-ring resonator C_p	$8.81 \times 10^{-10} \text{ J/}^\circ\text{C}$
Inherent resonant wavelength of micro-ring resonator λ_0	1550 nm
Temperature dependence coefficient of resonant wavelength a	6×10^{-6}
Thermal conductivity of micro-ring resonator and surrounding environment K	$2.78 \times 10^{-8} \text{ J/(s}\cdot^\circ\text{C)}$
Quality factor of micro-ring resonator Q	1.451×10^6

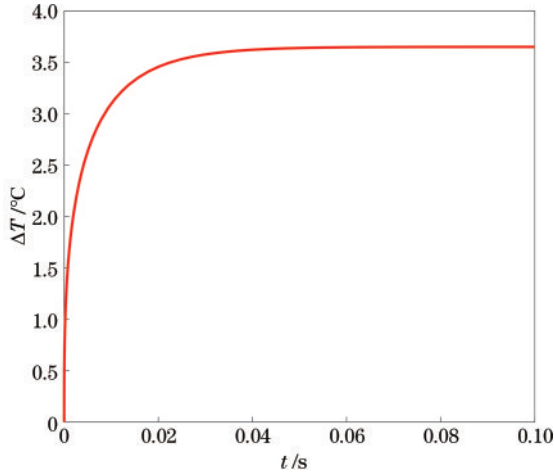


图 4 微环谐振腔温度随时间变化图

Fig. 4 Temperature variation diagram of micro-ring resonator with time

2×10^6 。如图 5(a)所示,温度变化范围从 $0 \sim 5.74 \text{ }^\circ\text{C}$ 减小为 $0 \sim 4.56 \text{ }^\circ\text{C}$,即微环谐振腔品质因素越大,温度增量越小。从品质因素的物理意义分析, Q 值反映了微腔存储能量的能力, Q 值越大,存储能量的能力越强,即吸收的热量越多,从而散出的热量越少,温度的增量

也越小。图 5(b)是在品质因素 Q 为 1.451×10^6 的条件下,泵浦功率从 8 mW 增加到 35 mW 时,微环谐振腔温度增量随时间变化图,温度变化范围从 $0 \sim 3.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 增加到 $0 \sim 5.07 \text{ }^\circ\text{C}$,即泵浦功率越大,温度增量越大。

4.2 热光效应下光频梳的产生和演化分析

LLE 模型仅包含色散、损耗、失谐、非线性效应项,没有引入热光效应项。本节利用上述求解微腔热动态方程得到的温度变化量 $\Delta T(t)$,将温度这一变量与光场相移相结合,将热光效应项引入 LLE 模型,统一时域上的时间和光场包络变化的慢时间,在每一圈循环当中都加入温度这一变量。在泵浦功率为 13 mW,温度变化范围分别为 $0 \sim 0.07 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $0 \sim 0.16 \text{ }^\circ\text{C}$ 的两种不同的热光效应条件下,分别仿真分析了时域、频域下光频梳的产生和演化过程,并与不考虑热光效应条件下的演化过程进行对比。最后分别在 $0 \sim 0.16 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $0 \sim 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 两种条件下输出了光频梳的频谱,分析对比了两种条件下光频梳的带宽。

图 6 为两种热光效应条件下光场的演化过程,图中 t_R 是光在微腔中循环一圈所用的时间,单位为 s。图 6(a) 和 6(c) 为不考虑热光效应的情况,图 6(b) 和

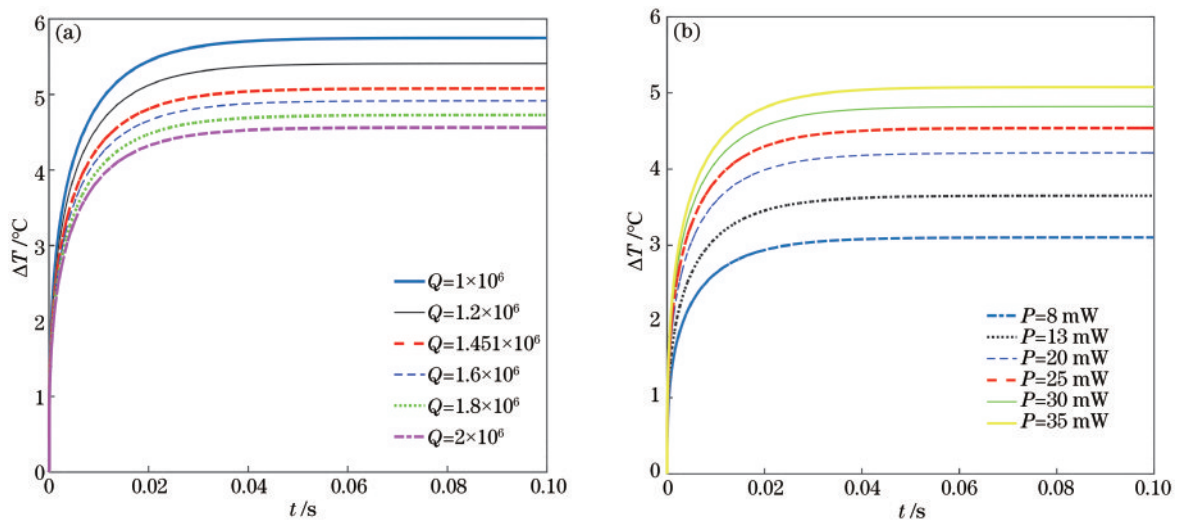


图 5 不同参数对微环谐振腔热动态效应的影响。(a) 不同品质因素 Q 对微环谐振腔热动态效应的影响;(b) 不同泵浦功率 P 对微环谐振腔热动态效应的影响

Fig. 5 Influence of different parameters on thermal dynamic effect of micro-ring resonator. (a) Influence of different quality factors Q on thermal dynamic effect of micro-ring resonator; (b) influence of different pump power P on thermal dynamic effect of micro-ring resonator

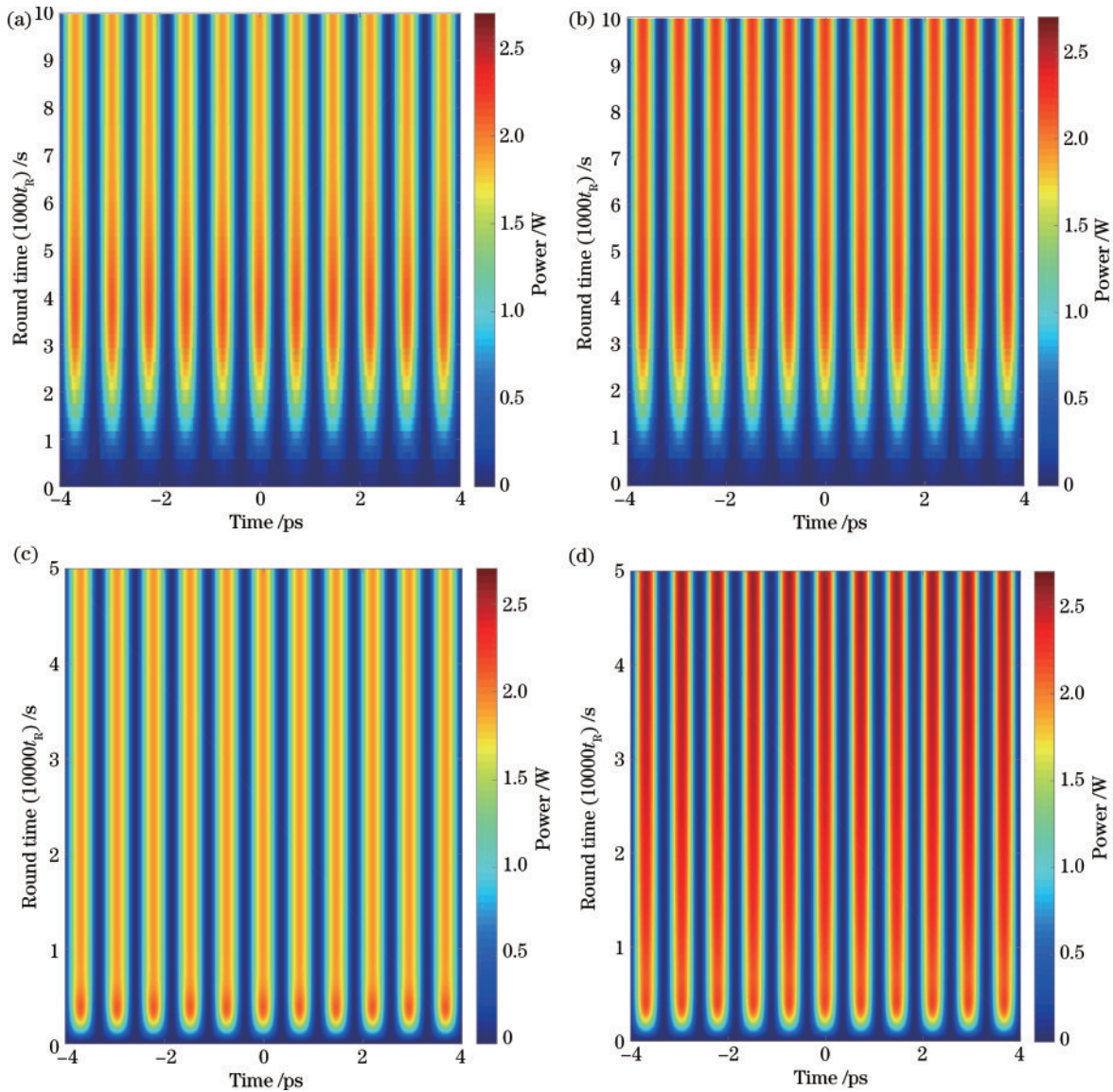


图6 考虑热光效应和不考虑热光效应光场的时域演化图。(a)仿真中不考虑热光效应光场循环10000圈的时域演化;(b)热光效应下光场循环10000圈的时域演化;(c)不考虑热光效应光场循环50000圈的时域演化;(d)热光效应下光场循环50000圈的时域演化

Fig. 6 Time-domain evolution diagrams of optical field with and without considering thermo-optic effect. (a) Time-domain evolution of optical field cycling 10000 times without considering thermo-optic effect in simulation; (b) time-domain evolution of optical field cycling 10000 times with considering thermo-optic effect; (c) time-domain evolution of optical field cycling 50000 times without considering thermo-optic effect; (d) time-domain evolution of optical field cycling 50000 times with considering thermo-optic effect

6(d)为考虑热光效应的情况,其中图6(b)的温度变化范围为 $0\sim 0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$,图6(d)的温度变化范围为 $0\sim 0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对比图6(a)和6(b)可知,连续泵浦光进入微环谐振腔内分裂成一系列脉冲,光场功率迅速升高,热光效应作用下腔内光场功率相较于不考虑热光效应的情况下在相同的循环圈数下更大。分析可知,由能量守恒,光能因热光效应转换为热能进入腔内,腔内功率相较于一般情况得以迅速升高。由图6(c)可知,一般情况下,最后腔内形成稳定的孤子,光场功率保持不变。综合分析图6(b)和6(d),引入热光效应后,光场功率随着温度变化量的增加不断变大,即腔内功率不

会在短时间内稳定。分别计算图6(c)和6(d)光场功率的最大值,结果表明,引入热光效应后的光场功率最大值相较于没有引入热光效应的情况下增加了22%。

图7展现了两种热光效应条件下光频梳频谱演化过程,图中 t_R 是光在微腔中循环一圈所用的时间,单位为s。图7(b)对应的温度变化范围为 $0\sim 0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$,图7(d)的温度变化范围为 $0\sim 0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$,图中梳齿功率的范围为 $-140\sim 11\text{ dBm}$ 。通过对比分析,引入热光效应后,在其他条件不变的情况下光频梳在相同时间内会产生更多的梳齿,即非线性效应产生的

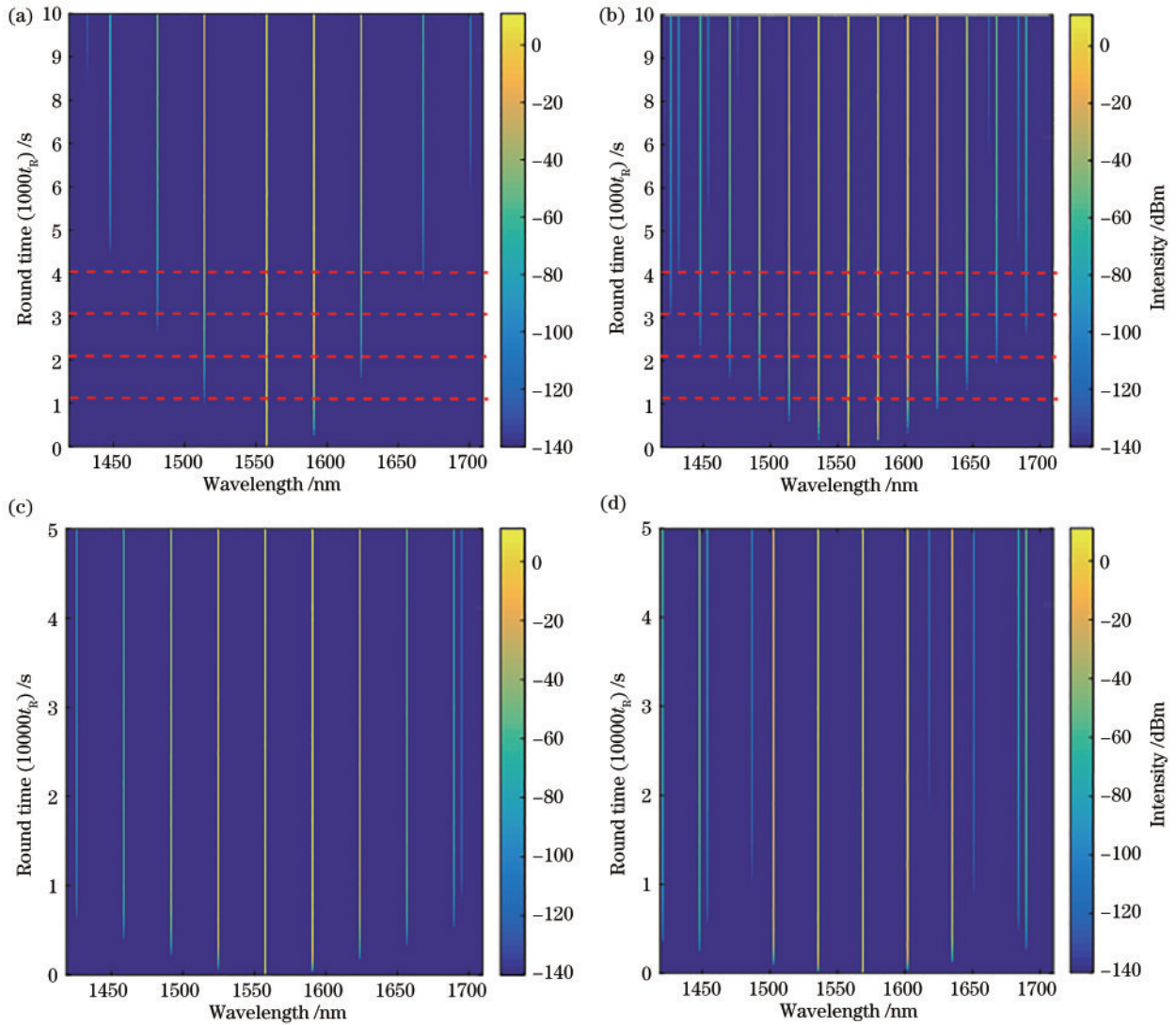


图7 考虑热光效应和不考虑热光效应光频梳的频域演化图。(a)不考虑热光效应光场循环10000圈光频梳频域演化;(b)热光效应下光场循环10000圈光频梳频域演化;(c)不考虑热光效应光场循环50000圈光频梳频域演化;(d)热光效应下光场循环50000圈光频梳频域演化

Fig. 7 Frequency-domain evolution diagrams of optical frequency comb with and without considering thermo-optic effect. (a) Frequency-domain evolution of optical frequency comb with 10000 cycles without considering thermo-optic effect; (b) Frequency-domain evolution of optical frequency comb with 10000 cycles with considering thermo-optic effect; (c) Frequency-domain evolution of optical frequency comb with 50000 cycles without considering thermo-optic effect; (d) Frequency-domain evolution of optical frequency comb with 50000 cycles with considering thermo-optic effect

时间大大缩减。对比图7(a)和7(b),以循环圈数为参照,热光效应下光频梳在相同时间内相较于不考虑热光效应的情况下会产生更多的梳齿,证明非线性效应增强,参量转换率增加。对比图7(c)和7(d),随着循环圈数的进一步增加,相同的循环圈数下,热光效应作用下的光频梳相较于不考虑热光效应的情况下主梳附近能量状态不稳定,激发了部分临近模式。

图8给出了两种条件下光频梳频谱对比图。其中粗线条为不考虑热光效应的情况,细线条为考虑热光效应的情况,其温度变化范围为0~0.16℃。在考虑噪声且其他条件相同的情况下,热光效应作用下的光频梳展宽了约221nm;相同波长对应下的梳齿有更大

的功率,这是由于热光效应的引入不仅激发了更强的非线性效应,而且由热光效应带来的热能补偿了腔内功率的损失。

为进一步考察热光效应对光频梳输出的影响,给出了两种不同的热光效应条件下光频梳在频域上的输出。如图9所示,其中细线条表示温度变化范围为0~0.32℃,粗线条表示温度变化范围为0~0.16℃,结果为考虑噪声的情况。通过对比,随着温度变化范围的增大,即热光效应越强,每根梳齿的功率增加,并且光谱宽度在一定程度上展宽,相较于之前展宽了约353nm。

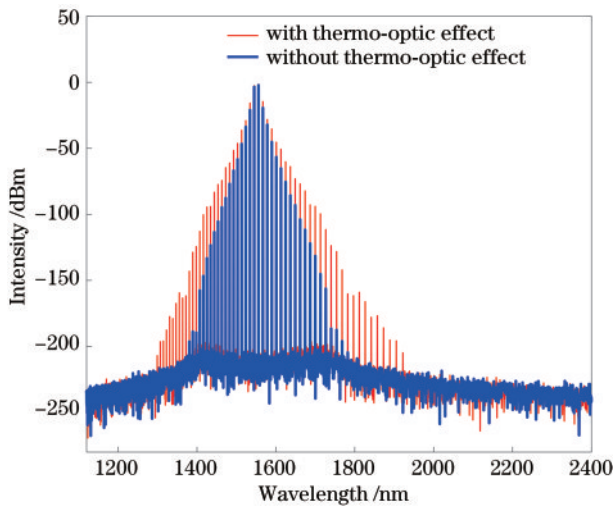


图 8 光场循环 50000 圈后两种情况下光频梳频谱对比图,其中粗线为不考虑热光效应,细线为考虑热光效应

Fig. 8 Spectrum comparison diagram of optical frequency comb after 50000 cycles of light field in two cases. Thick line is case without considering thermo-optic effect, and thin line is case with considering thermo-optic effect

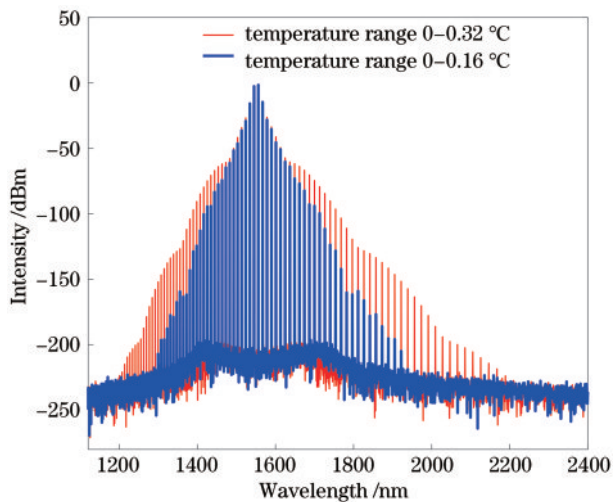


图 9 两种热光效应条件下光频梳的频谱图,其中细线条表示温度变化范围为 0~0.32 °C,粗线条表示温度变化范围为 0~0.16 °C

Fig. 9 Spectrum of optical frequency comb under two kinds of thermo-optic effect. Thin line indicates temperature range is 0~0.32 °C, and thick line indicates temperature range is 0~0.16 °C

5 结 论

本文设计了一种截面为脊形的微环谐振腔,该微环谐振腔脊宽为 $4\ \mu\text{m}$,内脊高为 $3.5\ \mu\text{m}$,外脊高为 $2\ \mu\text{m}$ 。求解了微腔热动态方程,给出微腔温度随时间变化曲线,研究了微腔品质因素 Q 值和泵浦功率 P 对微环谐振腔热光效应的影响。最后利用热光效应项修正后的 LLE 模型,对受热光效应影响后的光频梳的产

生和演化进行仿真分析。数值结果表明,温度变化范围与品质因素 Q 成反比,品质因素从 1×10^6 增加到 2×10^6 ,对应温度变化范围减小了 20.56%;温度变化范围与泵浦功率 P 成正比,泵浦功率从 8 mW 增加到 35 mW 时,对应温度变化范围增加了 63.55%。仿真结果表明,在热光效应作用下,微环谐振腔内非线性效应发生的时间将缩短,在温度变化范围为 $0 \sim 0.16\ ^\circ\text{C}$ 的条件下,相较于不考虑热光效应的情况,时域上光场功率最大值增加了 22%;频域上光频梳展宽了 221 nm。最后对比了温度变化范围分别为 $0 \sim 0.16\ ^\circ\text{C}$ 和 $0 \sim 0.32\ ^\circ\text{C}$ 两种热光效应条件下光频梳频谱输出,后者的光频梳相较于前者展宽了 353 nm。由于本文设计的 SOI 脊形谐振腔为微米量级,后续的加工工艺可以选择微机电系统 (MEMS) 进行加工,而后续加工需要尽可能保证波导表面光滑以降低波导损耗,从而在实验上证明仿真的正确性和准确性。

参 考 文 献

- [1] 张馨,殷科,张江华,等.高平坦大带宽 25GHz 双光频梳源[J].中国激光,2021,48(11):1116002.
Zhang X, Yin K, Zhang J H, et al. High bandwidth 25 GHz dual optical frequency comb source[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1116002.
- [2] Schiller S. Spectrometry with frequency combs[J]. Optics Letters, 2002, 27(9): 766-768.
- [3] Coddington I, Swann W C, Newbury N R. Coherent multiheterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(1): 013902.
- [4] Thorpe M J, Ye J. Cavity-enhanced direct frequency comb spectroscopy[J]. Applied Physics B, 2008, 91(3): 397-414.
- [5] 韩冰,葛锦蔓,任心仪,等.基于光频梳的太赫兹器件面形测量技术研究[J].中国激光,2022,49(17):1704001.
Han B, Ge J M, Ren X Y, et al. Research on surface shape measurement technology of terahertz devices based on optical frequency comb[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(17): 1704001.
- [6] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. Nature Photonics, 2009, 3(6): 351-356.
- [7] Lee J, Han S, Lee K, et al. Absolute distance measurement by dual-comb interferometry with adjustable synthetic wavelength[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(4): 045201.
- [8] Li C H, Benedick A J, Fendel P, et al. A laser frequency comb that enables radial velocity measurements with a precision of $1\ \text{cm s}^{-1}$ [J]. Nature, 2008, 452(7187): 610-612.
- [9] Steinmetz T, Wilken T, Araujo-Hauck C, et al. Laser frequency combs for astronomical observations[J]. Science, 2008, 321(5894): 1335-1337.
- [10] Savchenkov A A, Matsko A B, Ilchenko V S, et al. Tunable optical frequency comb with a crystalline

- whispering gallery mode resonator[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(9): 093902.
- [11] Liang W, Savchenkov A A, Matsko A B, et al. Generation of near-infrared frequency combs from a MgF_2 whispering gallery mode resonator[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(12): 2290-2292.
- [12] Okawachi Y, Saha K, Levy J S, et al. Octave-spanning frequency comb generation in a silicon nitride chip[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3398-3400.
- [13] Johnson A R, Okawachi Y, Lamont M R E, et al. Microresonator-based comb generation without an external laser source[J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1394-1401.
- [14] Jung H, Xiong C, Fong K Y, et al. Optical frequency comb generation from aluminum nitride microring resonator[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(15): 2810-2813.
- [15] Jung H, Fong K Y, Xiong C, et al. Electrical tuning and switching of an optical frequency comb generated in aluminum nitride microring resonators[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 84-87.
- [16] 张新亮, 赵延菁. 微腔光频梳研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823014.
Zhang X L, Zhao Y J. Research progress of microresonator-based optical frequency combs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823014.
- [17] Cocorullo G, Rendina I. Thermo-optical modulation at $1.5 \mu\text{m}$ in silicon etalon[J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(1): 83-85.
- [18] Carmon T, Yang L, Vahala K J. Dynamical thermal behavior and thermal self-stability of microcavities[J]. *Optics Express*, 2004, 12(20): 4742-4750.
- [19] Wang J, Zhu B W, Hao Z Z, et al. Thermo-optic effects in on-chip lithium niobate microdisk resonators[J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 21869-21879.
- [20] 何明芳, 陈开鑫, 胡哲峰. 热效应作用下的微环克尔光频梳[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 091901.
He M F, Chen K X, Hu Z F. Kerr optical frequency comb based on micro-ring resonator with thermal effect [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 091901.
- [21] Lee H, Chen T, Li J, et al. Chemically etched ultra-high-Q resonators[C]//CLEO: 2013, June 9-14, 2013, San Jose, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2013: CF2I.1.
- [22] Chembo Y K, Yu N. Modal expansion approach to optical-frequency-comb generation with monolithic whispering-gallery-mode resonators[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033801.
- [23] Coen S, Randle H G, Sylvestre T, et al. Modeling of octave-spanning Kerr frequency combs using a generalized mean-field Lugiato-Lefever model[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(1): 37-39.
- [24] Del'Haye P, Herr T, Gavartin E, et al. Octave spanning tunable frequency comb from a microresonator[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(6): 063901.
- [25] Choi H S, Armani A M. Thermal nonlinear effects in hybrid optical microresonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(22): 223306.