

## 硅基光子集成宽带大色散延时芯片 (特邀)

陈宏伟<sup>1,2</sup>, 杜振民<sup>1,2</sup>, 符庭钊<sup>1,2</sup>, 杨四刚<sup>1,2</sup>, 陈明华<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学 电子工程系, 北京 100084;  
2. 北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084)

**摘要:** 集成、宽带、大色散延时的器件在微波光子滤波、真延时相控阵天线等领域有着重要的应用, 可以有效地降低系统尺寸和功耗。文中提出并实现了一种基于硅基光子集成的宽带大色散延时芯片, 通过采用超低损耗波导结构和侧壁法向量调制结构实现了片上集成大色散波导光栅, 色散值超过 250 ps/nm, 最大群延时达到 2440 ps, 带宽大于 9.4 nm, 该芯片有望用于微波光子学、高速光纤通信系统等领域。

**关键词:** 集成光子学; 啁啾布拉格光栅; 色散补偿

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20211045

## Wideband large dispersion group delay chip based on silicon photonics integration (*Invited*)

Chen Hongwei<sup>1,2</sup>, Du Zhenmin<sup>1,2</sup>, Fu Tingzhao<sup>1,2</sup>, Yang Sigang<sup>1,2</sup>, Chen Minghua<sup>1,2</sup>

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Content integrated, broadband, large group delay devices have important applications in microwave photonic filtering, true delay phased array antenna and other fields, which can effectively reduce the system size and power consumption. In this paper, a broadband large dispersion delay chip based on silicon-based photonic integration was proposed and implemented. By using ultra-low loss waveguide structure and side wall normal vector modulation structure, on-chip integration of large dispersion waveguide grating was realized. The dispersion was about 250 ps/nm, maximum group delay was 2440 ps and the bandwidth was more than 9.4 nm. The chip is expected to be used in microwave photonics, high-speed fiber communication system and other fields.

**Key words:** integrated photonics; chirped Bragg grating; dispersion compensation

收稿日期: 2021-04-06; 修订日期: 2021-05-22

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFB1803500); 国家自然科学基金 (61171284)

作者简介: 陈宏伟, 教授, 博士, 主要从事微波光子学、硅基光子学和光子智能系统等方面的研究。

色散,作为基本的物理现象广泛存在于各种光学介质当中,其在很多领域都有着广泛的应用。在高速光纤通信中,色散被用来抑制非线性,同时可以用不同符号的色散进行相互补偿,扩展传输距离<sup>[1]</sup>。在微波光子学中,由于光纤色散引入的频率选择性衰落效应是实现微波光子滤波器的基本原理<sup>[2]</sup>。另外,在微波相控阵天线阵列中,利用光载微波信号实现真时延能有效地对抗宽带波束展宽效应,可以大大扩展微波相控阵天线的工作带宽<sup>[3-4]</sup>。在光纤系统中,目前常用的色散介质主要是光纤。虽然光纤具有低损耗大带宽的特性,但是由于单位长度色散值很低,通常需要很长的光纤来实现大色散,这样就增加了系统尺寸、非线性和不稳定性<sup>[5]</sup>。为解决这个难题,啁啾布拉格光纤光栅的概念被提出,利用光纤光栅的连续频率反射特性获得色散和延迟效应,具有小体积、低非线性的特点,在大规模微波光子相控阵天线中作为真延时器件而广泛使用<sup>[6-7]</sup>。但是,啁啾光纤光栅的工作带宽通常较小 (<1 nm),而且容易受到外界干扰。近年来,随着集成光子学的蓬勃发展,集成平台上的波导布拉格光栅也随之成为研究的热点<sup>[8]</sup>。相比起传统的使用紫外曝光制作的光纤布拉格光栅,集成平台上的啁啾布拉格光栅具有稳定性更好,集成度更高的优点。而在集成布拉格光栅中,集成环绕型啁啾布拉格光栅在加工稳定性和器件尺寸上都显示出了得天独厚的优势<sup>[9]</sup>,它在芯片上的排布不再是一根直线,而是被卷曲为圆环状排布。这种排布可以使整个器件的结构更加紧凑。在啁啾布拉格光栅的大多数应用中,都需要其具有较大的群延迟,因此这需要啁啾布拉格光栅的长度尽量长。然而,到目前为止,片上集成啁啾布拉格光栅的长度仍然被局限在毫米量级,其群延迟大小最大也只在百 ps 量级。文中提出了一种新型的低损耗波导光栅制作方法,有效地增长了光栅长度,并实现了最大 2440 ps 的群时延,带宽达到 9.4 nm。

集成啁啾布拉格光栅的长度主要受限于光波导的损耗,而这其中由界面粗糙度带来的界面散射损耗和弯曲波导模式泄露带来的弯曲损耗是最重要的因素。笔者所在团队使用三维体积电流法<sup>[10]</sup>在特定粗糙度的情况下对集成平台上矩形波导的界面散射损耗做了分析,同时利用有效折射率法<sup>[11]</sup>将弯曲波导等

效成直波导,从而得到了在厚度为 90 nm 的氮化硅平台上矩形波导的损耗随宽度和弯曲半径的变化关系,结果如图 1(b) 所示。可以看出波导的损耗是随着波导宽高比以及弯曲半径的增大而降低的。为了维持波导中单模传输的条件文中将波导的宽度设置为 2.8  $\mu\text{m}$ ,最小弯曲半径设置为 800  $\mu\text{m}$ 。

除了波导的损耗之外,另一个对布拉格光栅的性能具有较大影响的参数是其折射率调制深度。设啁啾布拉格光栅中心波导的宽度为  $w_0$ ,有效折射率为  $n_{\text{eff}0}$ ,法向波导的宽度为  $w_1$ ,有效折射率为  $n_{\text{eff}1}$ 。那么折射率调制深度可以被表示为  $\Delta n_{\text{eff}} = (n_{\text{eff}1} - n_{\text{eff}0})/2$ 。图 1(c) 和图 1(d) 显示了布拉格光栅的各项性能随  $\Delta n_{\text{eff}}$  的变化。可以看到,当  $w_1$  增大时也即折射率调制深度增大时,啁啾布拉格光栅的损耗和群延迟振荡幅度会增加,所以折射率调制深度不宜过大。但在折射率调制深度太小的情况下,布拉格光栅的反射率可能会不足 100%,这会带来额外的功率损失。因此折射率调制深度的最佳取值是啁啾布拉格光栅反射率刚好达到 100% 时的值,此时  $\Delta n_{\text{eff}} = 5 \times 10^{-4}$ 。

通过对波导损耗的分析确定了波导最优的宽高比以及弯曲半径,通过对折射率调制深度的分析,确定了其 sidewall(城墙)型边缘的凸起程度。利用氮化硅加工平台和螺旋形光栅结构,实现了硅基集成的大色散啁啾布拉格光栅芯片,如图 2 所示,光栅最长达到了 23.4 cm。而后对其进行加工测试,测试结果如图 3(a) 所示。由图 3(a) 可以看到啁啾布拉格光栅的带宽达到了约 9.4 nm,色散值达到了 259.57 ps/nm,群延迟达到了 2.44 ns,群延迟振荡幅度 (GDR) 约为  $\pm 32$  ps。

虽然测试中得到的 GDR 的值相对于其整体群延迟大小来说已经比较优秀了,但是对绝大多数应用来说 GDR 的值越小越好。降低 GDR 主要是采用在啁啾布拉格光栅的频域周期性的加矩形窗切趾来实现,最终实现了 GDR 成功降低至约  $\pm 24$  ps,如图 2(b) 所示。另外,在实际加工过程中,加工误差会沿着光传播的方向不断累积,越靠近光栅末端则群延迟振荡会越大。这主要是因为光沿着光栅传播的越深入,那么它穿过的均匀布拉格光栅的个数就越多,在加工误差存在的情况下,被光栅不同位置误反射的概率就越大。如图 2(c) 所示,这是一个长度为 13.8 cm 的啁啾布拉格光栅的反射谱和群延迟曲线,除了长度之外,

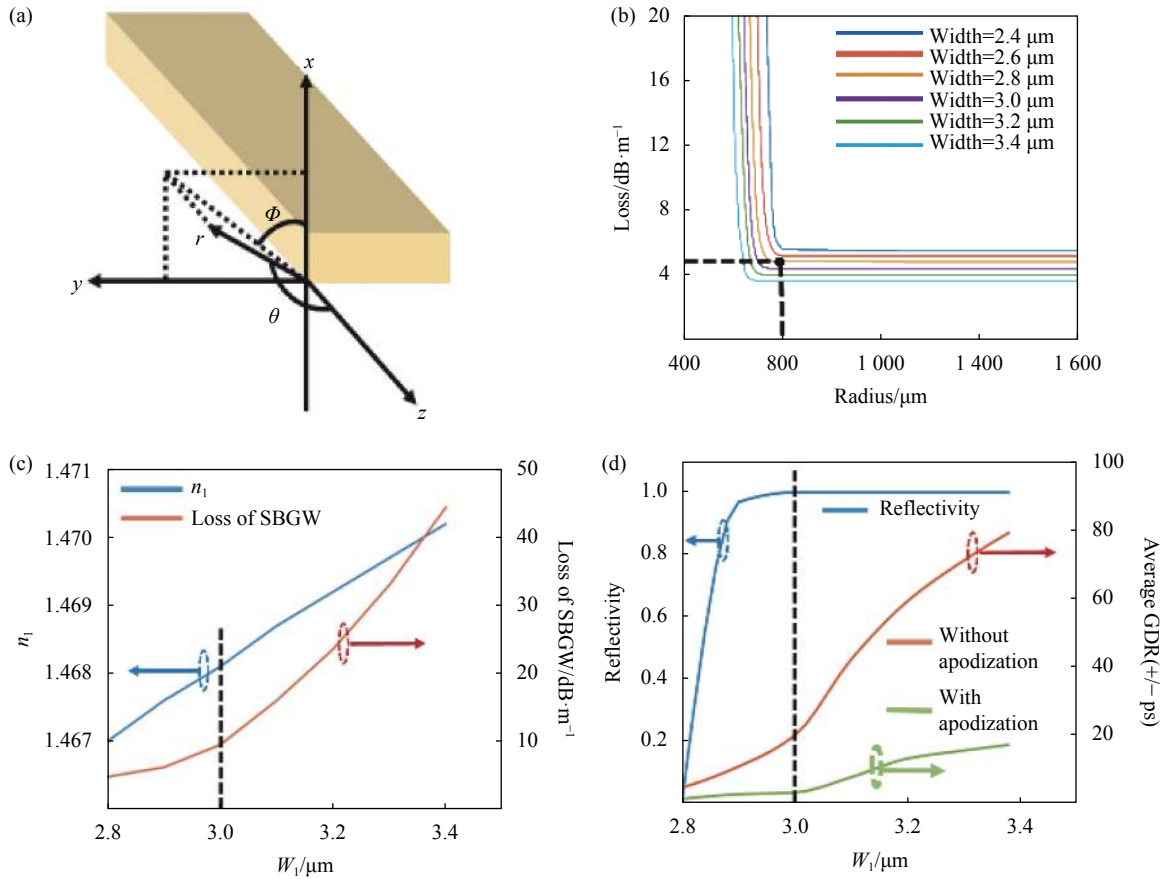


图 1 波导损耗分析与折射率调制深度对光栅性能的影响。(a) 波导损耗分析坐标系；(b) 波导损耗随宽高比以及弯曲半径的变化；(c) 光栅整体损耗以及波导有效折射率随  $w_1$  的变化；(d) 光栅反射率和 GDR 随  $w_1$  的变化

Fig.1 Loss analysis of waveguide and the influence of  $\Delta n_{eff}$  on grating performance. (a) Loss analysis coordinate system; (b) Loss changes with aspect ratio and bending radius of the waveguide; (c) Grating overall loss and  $n_{eff_1}$  change with  $w_1$ ; (d) Grating reflectivity and GDR change with  $w_1$

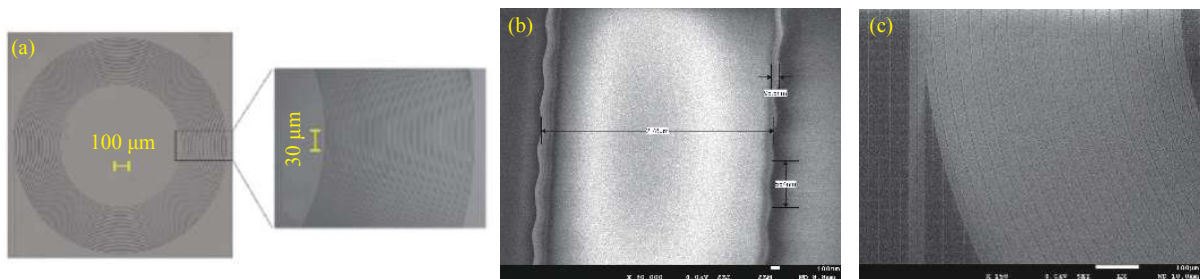


图 2 硅基集成啁啾布拉格光栅芯片。(a) 显微镜照片；(b) 波导局部电镜照片；(c) 螺旋形光栅局部结构电镜照片

Fig.2 Silicon integrated chirp Bragg grating chip. (a) Micrograph; (b) SEM of waveguide; (c) SEM of spiral grating

它的其他参数与前文中介绍的长度为 23.4 cm 的光栅基本相同,但是 GDR 却只有  $\pm 27$  ps,经过切趾之后其 GDR 甚至可以降低到大约  $\pm 8$  ps 的水平,如图 2(d) 所示。因此,对于啁啾布拉格光栅来说,除了损耗之外,加工误差引起的性能恶化也是在设计其长度时必须考虑的因素。

综上所述,文中通过对集成平台上波导形状的合

理设计以及折射率调制深度的深入分析实现了带宽 9.4 nm,群延迟 2.44 ns 的啁啾布拉格光栅,这是目前报道过的片上啁啾布拉格光栅中所能实现的最大的群延迟。如表 1 所示,与其他集成光延时方案相比,文中提出的芯片在最大延时量、延时带宽积、单位面积延时带宽积等方面具有明显优势,在微波光子学、高速光纤通信系统及光信号处理领域有着非常广阔的应用前景。

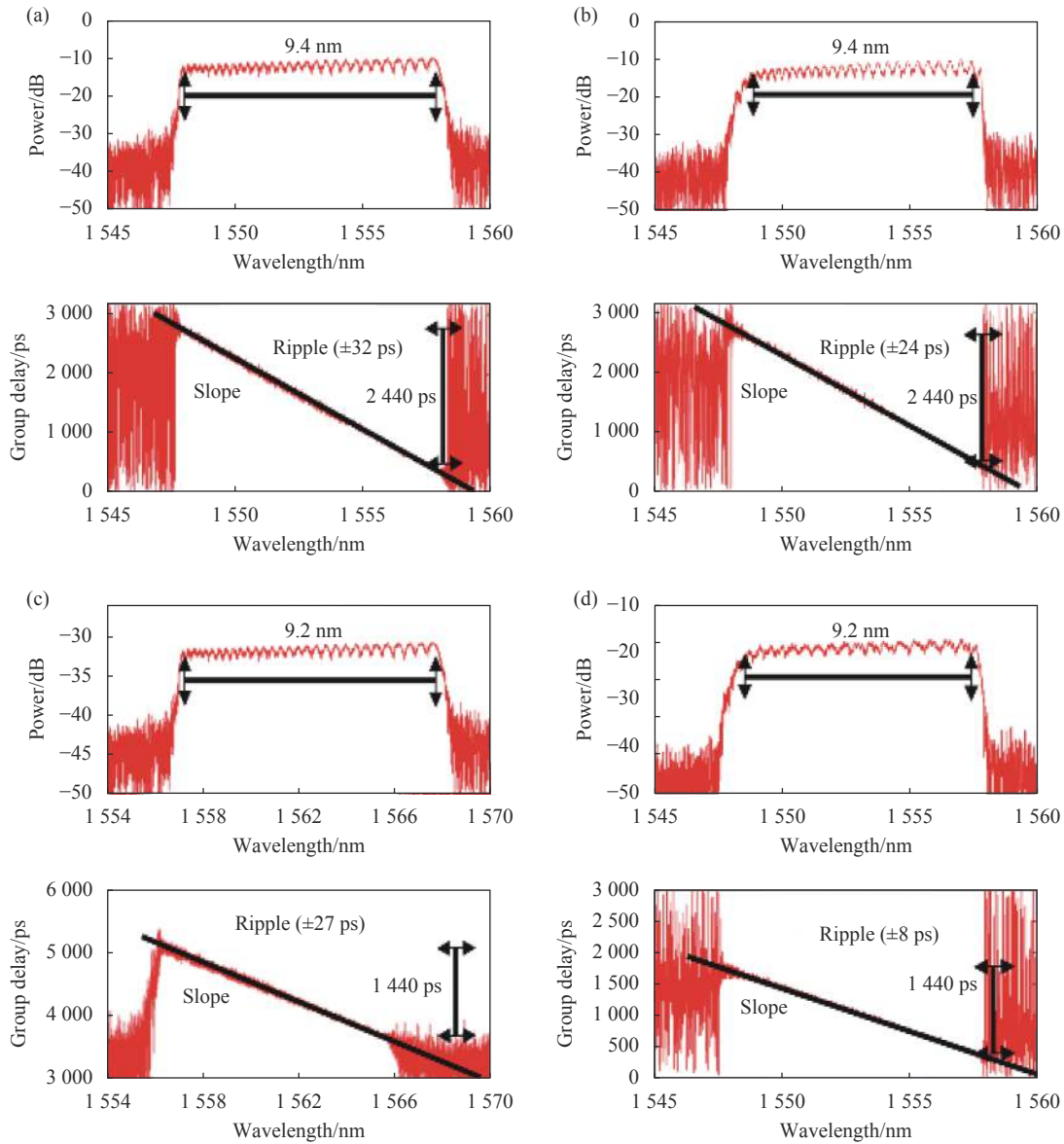


图 3 实验中得到的啁啾布拉格光栅响应与切趾啁啾布拉格光栅响应。(a) 长度为 23.4 cm 的啁啾布拉格光栅响应; (b) 长度为 23.4 cm 的切趾啁啾布拉格光栅响应; (c) 长度为 13.8 cm 的啁啾布拉格光栅响应; (d) 长度为 13.8 cm 的切趾啁啾布拉格光栅响应

Fig.3 Chirped Bragg grating response and the apodized chirped Bragg grating response obtained in the experiment. (a) Chirped Bragg grating response with length of 23.4 cm; (b) Apodized chirped Bragg grating response with length of 23.4 cm; (c) Chirped Bragg grating response with length of 13.8 cm; (d) Apodized chirped Bragg grating response with length of 13.8 cm

表 1 不同延时实现方案性能对比

Tab.1 Performance comparison of different schemes to realize group delay

Ref.	Group	Group delay /ps	Tunability /ps	Bandwidth /nm	Size /mm <sup>2</sup>	Delay bandwidth product/ps·nm	Delay bandwidth product per unit area /ps·nm·mm <sup>-2</sup>	Material	Technology
[12]	K.J.Vahala	68 000	N/A	Wideband	9 025	-	-	Silicon	
[13]	S.S.Patel	2 560	Tunable	0.2	1 200	512	0.43	SiO <sub>2</sub>	Path select
[14]	D.J.Blumenthal	12 350	850	>40	3 825	>494 000	129.15	Silicon Nitride	
[15]	T.Baba	54	Tunable	3	16.48	162	9.83	Silicon	Slow light
[16]	R.T.Chen	216.7	Tunable	25	0.18	5 417.5	30 097	Silicon	

续表 1

Continued Tab.1

Ref.	Group	Group delay /ps	Tunability /ps	Bandwidth /nm	Size /mm <sup>2</sup>	Delay bandwidth product/ps·nm	Delay bandwidth product per unit area /ps·nm·mm <sup>-2</sup>	Material	Technology
[17]	D.V.Plant	96	Tunable	8	0.015	768	61 200	Silicon	Bragg grating
[18]	K.petermann	450	Tunable	1.2	>100	540	<0.54	Silicon	
[19]	J.P.Chen	110	10	0.08	~1	8.8	~8.8	Silicon	Micro-ring
[20]	Andrea Melloni	800	100	0.08	~1	64	~64	Silicon Oxynitride	
-	H.W.Chen(this work)	2440	N/A	9.4	9.07	22936	2528	Silicon Nitride	Bragg grating

参考文献:

[1] Feng Xian, Poletti Francesco, Camerlingo Angela, et al. Optical fiber technology. Dispersion controlled highly nonlinear fibers for all-optical processing at telecoms wavelengths [J]. *Optical Fiber Technology*, 2010, 16(6): 378-391.

[2] Huang T X, Yi Xiaoke, Minasian Robert. Single passband microwave photonic filter using continuous-time impulse response [J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6231-6242.

[3] Chin Sanghoon, Thévenaz Luc, Sancho Juan, et al. Broadband true time delay for microwave signal processing, using slow light based on stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(21): 22599-22613.

[4] Cao Z, Lu R, Wang Q, et al. Cyclic additional optical true time delay for microwave beam steering with spectral filtering [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3402-3405.

[5] Thyagarajan K, Pal B P. Modeling dispersion in optical fibers: Applications to dispersion tailoring and dispersion compensation [J]. *Journal of Optical, Reports Fiber Communications*, 2007, 4(3): 173-213.

[6] Jung Byung Min, Yao Jianping. A two-dimensional optical true time-delay beamformer consisting of a fiber Bragg grating prism and switch-based fiber-optic delay lines [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(10): 627-629.

[7] Jiang Lingjun, Huang Zhaoran. Integrated cascaded bragg gratings for on-chip optical delay lines [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(5): 499-502.

[8] Maselli Valeria, Grenier Jason R, Ho Stephen, et al. Femtosecond laser written optofluidic sensor: Bragg grating waveguide evanescent probing of microfluidic channel [J]. *Optics Express*, 2009, 17(14): 11719-11729.

[9] Du Zhenmin, Xiang Chao, Fu Tingzhao, et al. Silicon nitride chirped spiral Bragg grating with large group delay [J]. *APL Photonics*, 2020, 5(10): 101302.

[10] Kuznetsov Mark, Haus H. Radiation loss in dielectric waveguide structures by the volume current method [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1983, 19(10): 1505-1514.

[11] Baets R, Lagasse P E. Loss calculation and design of arbitrarily curved integrated-optic waveguides [J]. *JOSA*, 1983, 73(2): 177-182.

[12] Chung C J, Xu X, Wang G, et al. On-chip optical true time delay lines featuring one-dimensional fishbone photonic crystal waveguide [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(7): 071104.

[13] Giuntioni I, Stolarek D, Kroushkov D I, et al. Continuously tunable delay line based on SOI tapered Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11241.

[14] Ishikura N, Hosoi R, Hayakawa R, et al. Photonic crystal tunable slow light device integrated with multi-heaters [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(22): 65.

[15] Lee H, Chen T, Li J, et al. Ultra-low-loss optical delay line on a silicon chip [J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1): 1-7.

[16] Moreira R L, Garcia J W, Bauters Barton J S, et al. Integrated ultra-low-loss 4-bit tunable delay for broadband phased array antenna applications [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2013, 25(12): 1165-1168.

[17] Morichetti F, Melloni A, Breda A, et al. A reconfigurable architecture for continuously variable optical slow-wave delay lines [J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 17273.

[18] Rasras M S, Madsen C K, Cappuzzo M A. Integrated resonance-enhanced variable optical delay lines [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(4): 834-836.

[19] Shi W, Veerasubramanian V, Patel D, et al. Tunable nanophotonic delay lines using linearly chirped contradiirectional couplers with uniform Bragg gratings [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 701-703.

[20] Xie J, Zhou L, Zhi Z, et al. Continuously tunable reflective-type optical delay lines using microring resonators [J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 817-823.