动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024021703

基于硅基微环谐振器的Fano共振线型产生和调谐研究进展

徐　强，孙士博，李鑫雨，孔　梅，徐亚萌*

（长春理工大学 物理学院光电信息科学与技术系，长春 130022）

摘　要： Fano共振的线型具有明显不对称特征，在光学通信、调制和传感等领域中极具应用潜力。首先对微环谐振器的各种线型进行了介绍，强调了Fano共振线型的独特优势，其次依据结构分类梳理了国内外基于硅基微环谐振器产生Fano共振的研究现状，然后介绍了基于热光效应的Fano共振调谐的研究进展，最后展望了硅基微环谐振器的Fano共振的发展及应用。

关键词： 微环谐振器；Fano共振；热光效应

中图分类号： TN256　**文章编号：** 1001－5868(2024)03－0341－08

Advancements in Generating and Tuning Fano Resonances Using Silicon-Based Microring Resonators

XU Qiang, SUN Shibo, LI Xinyu, KONG Mei, XU Yameng

(School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, CHN)

Abstract: Fano resonances, known for their asymmetric line shapes, show great promise in optical communication, modulation, and sensing. This study explores different line shapes using microring resonators and highlights the distinct advantages of Fano resonance. Firstly, we review research progress on generating Fano resonance with silicon-based microring resonators, focusing on resonator structures. Secondly, we discuss advancements in tuning Fano resonance using the thermo-optic effect. Finally, we explore future developments and applications of Fano resonance with silicon-based microring resonators.

Key words: microring resonator; Fano resonance; thermo-optic effect

0　引言

硅基平台是一种利用硅材料制备器件的集成光学平台，与现有微电子CMOS工艺相兼容，具有高集成密度、高成品率和低成本等优势，持续推动了集成光学技术的创新与发展。硅基微环谐振器(Micro-Ring Resonator，MRR)作为硅基光子器件元件库组件之一，其结构简单，谐振性能优异，在光开关、传感器和光调制器等器件开发中发挥着至关重要的作用，同时在光通信[1]、传感技术[2]和信号处理[3]等领域展示出巨大的应用潜力。

MRR的谐振特性直接决定了器件的性能，其谐振谱线的线宽和陡峭程度对滤波器的线宽、传感器的检测极限、调制器的调制深度以及消光比等起着决定性作用。对于单环单总线波导构成的MRR来说，其传输谱线为周期性的Lorentz型谐振谷，该谱线对称且线宽较宽，尽管研究人员已经在优化其性能方面取得了许多进展，包括提高品质因子(*Q*值)[4-5]、增大陡峭程度[6-8]等，但对器件性能提升的作用有限。因此，越来越多的研究人员开始探索新

收稿日期：2024－02－17.

基金项目：国家自然科学基金项目(61905022)；吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20220725KJ).

* **通信作者：**徐亚萌

线型，例如电磁诱导透明（Electromagnetically Induced Transparency，EIT）、电磁诱导吸收（Electromagnetically Induced Absorption，EIA）和Fano。其中，Fano共振线型具有明显的不对称特征，该非对称性使其在光开关、光传感和光调制等方面具有独特的优势，其产生和调谐对于硅基集成光学器件的开发和系统的构建具有十分重要的意义。

本文首先对MRR的各种线型进行了介绍，强调了Fano共振线型的独特优势。随后依据结构不同，分类梳理了国内外基于硅基MRR的Fano共振产生的相关研究工作进展。然后介绍了基于硅基材料热光效应的Fano共振调谐的相关研究工作进展。最后给出了基于硅基MRR的Fano共振的研究热点和发展趋势。

1 基于MRR的共振线型

基于MRR的每种共振线型都有各自的特点，可以适应不同的应用需求。多种多样的共振线型丰富了集成光学器件开发及应用的多样性和灵活性。基于MRR的共振线型示意图如图1所示。Lorentz线型是MRR共振峰的典型线型之一，表现为对称的共振峰，其形状由Lorentz分布决定，其在传感器、滤波器和激光器等领域有广泛的应用。EIT线型表现为带阻中的透明窗口，其在共振峰两侧表现出明显的不透明度，可应用于光调制[7]、光开关[9]，以及超密集波分复用[10]等领域。另外，EIT线型还可以减缓光的传播，因此在量子信息处理和光学存储等方面具有重要潜力。EIA线型与EIT相反，表现为带通中的不透明窗口，其在量子计算和信息存储等领域具有独特的应用潜力[11]，还可以加快光的传播[12]，有助于实现高灵敏度的陀螺仪和重力波探测器[13]。

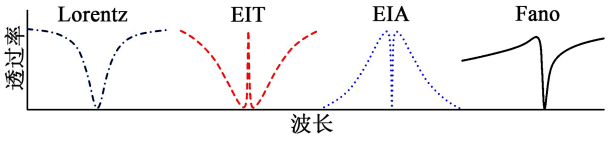


图1 Lorentz，EIT，EIA和Fano线型

不同于Lorentz，EIT和EIA线型，Fano共振线型具有明显的不对称特征，透射系数在很小波长范围内就可以从最大变为最小，满足诸多应用的特殊需求，比如能够显著地减少光开关所需的频率改变[14]，降低生化传感器的检测极限[15]，以及增大调制深度。

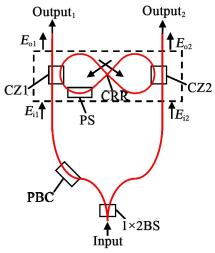
2 基于MRR的Fano共振产生

国内外研究人员基于多种MRR结构产生了Fano共振，如多个MRR耦合结构[14,16-20]，单个MRR与法布里珀罗（Fabry-Perot，FP）腔耦合结构[21-27]，以及单个MRR与相移单元耦合结构[28-33]。下文按照结构特点分类介绍Fano共振产生的相关工作研究进展。

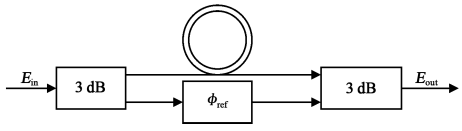
2.1 基于多MRR耦合结构的Fano共振

基于MRR的Fano共振产生结构中，多MRR耦合结构本质上是为光提供两条或多条不同传播路径，进而利用光的干涉产生Fano共振。

基于MRR双光路干涉产生Fano共振的工作起始于MRR与马赫-曾德尔干涉仪（Mach-Zehnder Interferometer，MZI）的耦合结构。2009年，王帆等[14]通过双波导耦合MRR形成了Fano共振，结构如图2(a)所示，输入光通过分束器分成两束光，经由两个耦合区被耦合进环形谐振腔，环形波导上有一个相移器用于控制两干涉臂的相位差，从而产生Fano共振。随后，李欣等[16]也利用MRR和MZI耦合产生了Fano共振，结构如图2(b)所示，光从左侧进入，经由3 dB耦合器后被分为两路，虽然MZI两臂长度保持相等，但仅有一臂的光通过MRR，当两路光在右侧3 dB耦合器中发生干涉，便产生Fano共振。



(a) MRR双光路干涉结构[14]

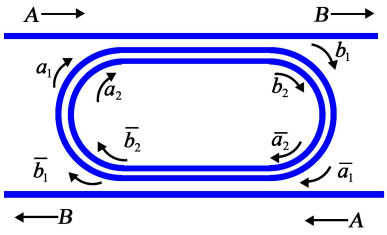


(b) MRR与MZI耦合结构[16]

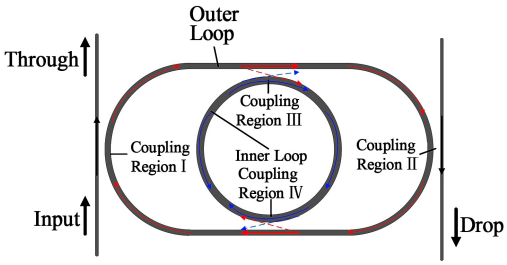
图2 产生Fano共振的MRR双光路干涉结构

受双光路干涉产生Fano共振的启发，嵌套式MRR耦合结构实现Fano共振的相关工作开始涌现。2012年，Dotan等[17]提出跑道MRR嵌套耦合结构，示意图如图3(a)所示，实现了Fano共振。同年，邱晨等[18]将两个MRR嵌套耦合，并且外环与上下路两条总线波导耦合，结构示意图如图3(b)所

示，实现了 Fano 共振。



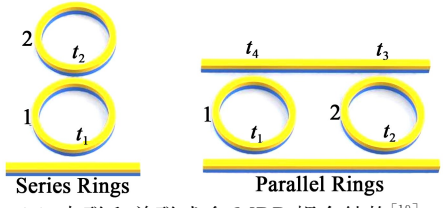
（a）同心 MRR 嵌套耦合结构[17]



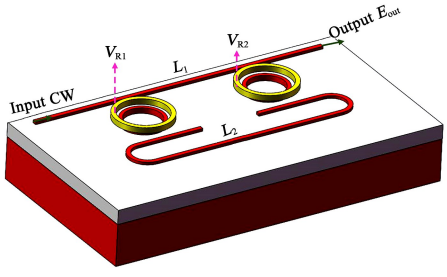
（b）眼型 MRR 嵌套耦合结构[18]

图 3　产生 Fano 共振的 MRR 嵌套耦合结构

随后，通过 MRR 级联耦合结构产生 Fano 共振的研究开始陆续出现。2016 年，周笑艳等[19]基于多 MRR 耦合结构实现了 Fano 线型并对它们的传感性能进行了分析比较，其结构示意图如图 4(a)所示，包括串联式双 MRR 耦合结构和并联式双 MRR 耦合结构。2017 年，吴小所等[20]提出两个 MRR 级联的耦合结构，其结构如图 4(b)所示，一个 MRR 将输入的连续宽谱光分成沿不同波导路径传输的光，再将它们耦合到另一个 MRR 中进行干涉，形成 Fano 共振。



（a）串联和并联式多 MRR 耦合结构[19]



（b）双 MRR 级联耦合结构[20]

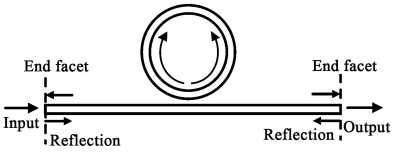
图 4　产生 Fano 共振的 MRR 级联耦合结构

以上这些方案均可产生 Fano 共振，但是结构都比较复杂，尺寸较大，对加工工艺要求较高。

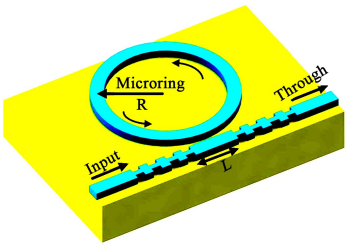
2.2　基于 MRR 耦合 FP 腔结构的 Fano 共振

通过在 MRR 的总线波导中引入两个部分反射单元构成 FP 腔，可实现 MRR 的离散谐振模式和 FP 腔的连续传播模式之间的耦合，从而形成 Fano 共振，该类器件仅基于单个 MRR，结构简单，尺寸小，对加工工艺要求较低。2009 年，周治平研究小组[21]提出了 MRR 和 FP 腔的耦合结构，实现了尖锐的 Fano 共振谱线，结构示意图如图 5(a)所示，利用直波导与空气的分界面构成 FP 腔，直波导中 FP 谐振模式与 MRR 的谐振模式相耦合，可产生 Fano 共振谱线。2017 年，Zhang 等[22]研究了引入布拉格光栅的 MRR，结构如图 5(b)所示，利用布拉格光栅构成 FP 腔，通过控制光在 FP 腔和 MRR 之间的相位改变，产生 Fano 共振谱线。涂正瑞等[23]提出了亚波长光栅 MRR，结构如图 5(c)所示，MRR 的总线波导由亚波长光栅波导构成，通过改变渐变耦合区的亚波长光栅结构参数构成部分反射单元，从而形成 FP 腔，使得连续态 FP 腔谐振模式与离散态 MRR 谐振模式耦合，实现了 Fano 共振。彭芳草等[24]利用光子晶体 FP 腔与 MRR 的耦合结构实现了 Fano 共振，结构如图 5(d)所示，由渐变空气孔半径的一维光子晶体构成 FP 腔，其带隙出现在 1 330 和 1 600 nm 之间，是一个 U 形的谱线，当 MRR 的谐振峰落在这个 U 形区内时，两种模式发生耦合，产生 Fano 谐振。2019 年，甘雪涛研究小组[25]提出在 MRR 总线波导中刻蚀两个空气孔以形成 FP 腔，其与 MRR 耦合实现 Fano 共振，结构如图 5(e)所示，但在该结构中忽略了反向传输的光，导致结果并不完全正确。2021 年，我们小组[26]建立了 FP 腔和 MRR 耦合结构的完整理论模型，考虑了 MRR 中反向传输的光，证明过耦合情况时反射光被大量耦合进 MRR 中，从而导致谐振分裂，形成带有侧峰的 Fano 共振线型。2023 年，祝连庆研究小组[27]提出了双 T 型波导构成的 FP 腔与上下载型跑道 MRR 的耦合结构，如图 5(f)所示，利用两个 T 型波导构成的 FP 腔与 MRR 耦合产生了 Fano 共振。

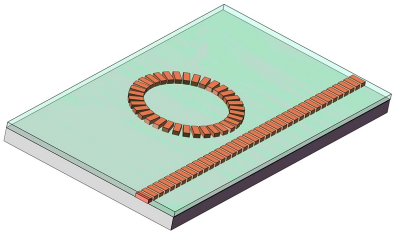
利用此类 MRR 与 FP 腔耦合结构可产生 Fano 共振，Fano 共振的波长位置取决于 MRR 的谐振峰位置，Fano 共振的消光比和斜率依赖于 MRR 谐振模式和 FP 腔谐振模式的耦合情况，当 MRR 谐振模式与 FP 腔不同模式耦合时，产生的 Fano 共振的消光比和斜率明显不同，整个传输谱线的包络也呈现出 FP 腔的传输谱线形状，不利于后续应用。



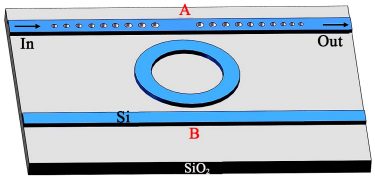
(a) 端面反射构成的 FP 腔与 MRR 耦合结构[21]



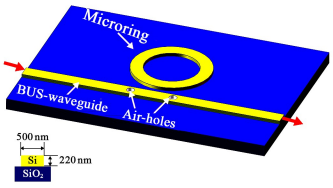
(b) 布拉格光栅构成的 FP 腔与 MRR 耦合结构[22]



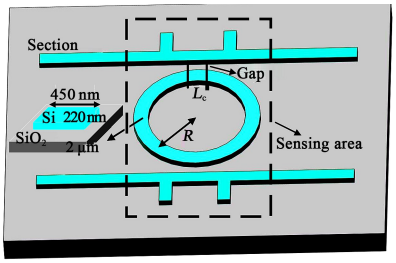
(c) 亚波长光栅构成的 FP 腔与 MRR 耦合结构[23]



(d) 光子晶体构成的 FP 腔与 MRR 耦合结构[24]



(e) 空气孔构成的 FP 腔与 MRR 耦合结构[25]



(f) T 型波导构成的 FP 腔与 MRR 耦合结构[27]

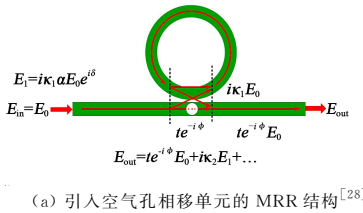
图 5 产生 Fano 共振的 MRR 与 FP 腔耦合结构

2.3 基于 MRR 耦合相移单元的 Fano 共振

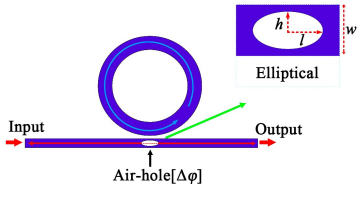
近年来，利用 MRR 耦合相移单元结构实现周期性 Fano 共振传输谱线的方案被提出，该类结构简单且紧凑，与 MRR 制作工艺完全相同。

空气孔首先被作为相移单元引入了 MRR 中以实现 Fano 共振。2020 年，甘雪涛研究小组将单个空气孔相移单元引入 MRR 结构实现了周期性 Fano 共振传输谱线[28]。如图 6(a)所示，MRR 的耦合区位置引入了一个空气孔，空气孔作为相移单元仅使 MRR 直通端的光发生相位变化，而经过 MRR 环内传输的光不发生相位变化，因此改变相位的连续态和未改变相位的离散态之间发生干涉产生了 Fano 共振线型，消光比可大于 20 dB，斜率可大于 400 dB/nm。同年，该课题组[29]又提出将圆形空气孔变为椭圆形空气孔作为相移单元与 MRR 耦合，结构如图 6(b)所示，通过改变椭圆形空气孔的尺寸可以控制两个模式之间的相位差，从而产生具有不同不对称因子的 Fano 线型。2023 年，周可雅研究小组[30]利用图 6(c)中的结构定量分析了单个相移单元对 Fano 线型的影响。

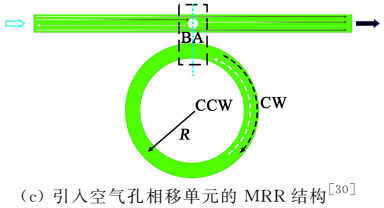
随后，T 型波导作为相移单元被引入了 MRR 中，相关研究开始不断出现。2021 年，祝连庆研究小组[31-32]利用 T 型波导作为相移单元与 MRR 耦合，在所有 MRR 谐振模式下产生了 Fano 共振线型，结构如图 6(d)，(e)所示，实现的 Fano 共振线型的消光比超过 15 dB，斜率比为 251.3 dB/nm。2022 年，该课题组[33]基于如图 6(f)所示的 T 型波导耦合上下载型 MRR 结构实现了 Fano 共振，研究发现 T 型波导的耦合间隙、宽度和长度对传输频谱有很大的影响。



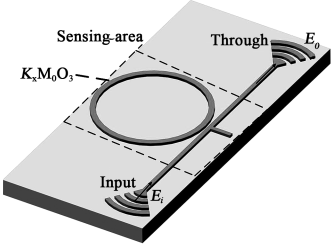
(a) 引入空气孔相移单元的 MRR 结构[28]



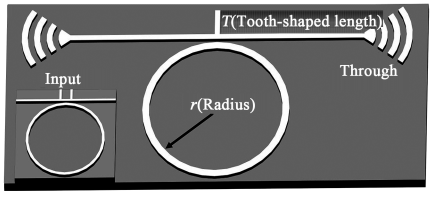
(b) 引入椭圆空气孔相移单元的 MRR 结构[29]



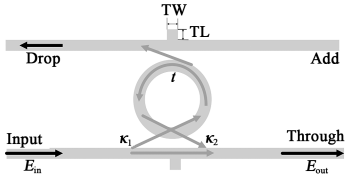
(c) 引入空气孔相移单元的 MRR 结构[30]



(d) 引入 T 型波导相移单元的 MRR 结构[31]



(e) 引入 T 型波导相移单元的 MRR 结构[32]



(f) 引入 T 型波导相移单元的上下载 MRR 结构[33]

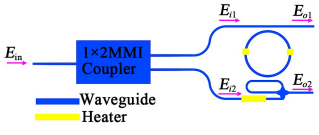
图 6 产生 Fano 共振的引入相移单元的 MRR 结构

对于多 MRR 耦合结构以及 FP 腔与 MRR 耦合结构来说，实现的 Fano 共振谱线的消光比和斜率不一致，仅在某些波长处可取得较好的数值，而这种引入相移单元的 MRR 结构可实现周期性的 Fano 共振传输谱线，每个 Fano 共振谱线的消光比和斜率一致，可任意选择，使 Fano 共振在光开关、光调制和光传感等方面的应用更加灵活，也更易于实现器件的性能提升。

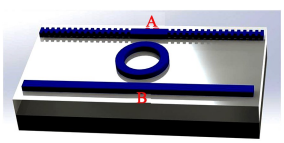
3　Fano 共振的热光调谐

硅基材料的热光效应不会引入额外的波导损耗，且硅的热光系数较大，能够实现较高的调谐效率。对于 MRR 来说，利用热光效应可改变 MRR 中环形波导的有效折射率，从而使 MRR 的谐振波长发生漂移。因此，在基于 MRR 产生 Fano 共振的工作中，利用热光效应调控 MRR 的环状波导区，即可实现 Fano 共振的调谐。

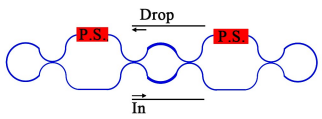
在硅基器件中，金属加热器常被用于微纳米尺度的局部加热，以实现对器件性能的精确调节，但是为了减小金属对光的吸收，需要在硅波导层和金属加热器间加一层隔离层，一般为二氧化硅材料，厚度为 1～2 μm。2013 年，胡挺等[34]提出了基于硅基 MRR 的双光束干涉结构，利用热光效应实现了 Fano 共振的调谐，其结构如图 7(a)所示，通过控制加热器可实现双光束相位差的调控，使得 Fano 共振谱线具有大斜率和高消光比，该工作实现了 Fano 共振在整个自由光谱范围中具有陡峭斜率和超过 20 dB 的消光比，这使得所制作的器件在高灵敏度传感和低功率光开关/调制方面具有应用潜力。2016 年，姚建平研究小组利用硅基 FP 腔与 MRR 耦合结构展示了可调谐的 Fano 共振[35]，结构如图 7(b)所示，该结构无需金属加热器，而是利用 MRR 和 FP 腔的强光限制能力，产生了强的双光子吸收诱导的非线性热光效应，随着泵浦光的功率从 0 增加到 14.5 dBm，Fano 共振发生红移，当泵浦光的功率增加到 14.5 dBm 时，测得最大调谐范围为 90 pm。2017 年，Li 等[36]提出了一种集成有两个可调相移单元的上下载 MRR 结构，如图 7(c)所示，通过集成加热装置来调节两个相移单元，以小于 3 mW 的功率实现了 Fano 共振谱线超过 40 dB 的消光比和大于 400 dB/nm 的陡峭斜率。同年，吴小所等[20]基于两个 MRR 级联耦合结构实现了 Fano 共振调谐，结构如图 7(d)所示，通过在每个 MRR 上方加微型加热器来改变两束光的相位差，从而实现 Fano 共振的调谐。杨建义研究小组[37]基于非对称的 MRR 嵌套耦合结构实现了 Fano 共振的调谐，结构如图 7(e)所示，两个微加热器位于两个 MRR 环状波导上，利用硅的热光效应来调节 Fano 共振的线型和波长，实现了 Fano 共振线型的斜率在 35～93 dB/nm 范围内可调。2017 年，王健小组[38]利用两个反射镜构成的 FP 腔与 MRR 的耦合结构实现了 Fano 共振线型调谐，结构如图 7(f)所示，通过调节 MRR 上加热器的功率调谐 Fano 的共振波长，实验结果显示 Fano 共振的最大消光比为 23.22 dB，最大斜率为 252 dB/nm，调谐效率为 0.233 5 nm/mW。2018 年，Zhang 等[39]提出了 MZI 辅助的布拉格光栅与 MRR 耦合结构，如图 7(g)所示，利用 MRR 上的加热器证明了热可调的 Fano 共振。2019 年，田永辉研究小组[40]使用两个 MRR 和反馈波导的耦合结构演示了周期性独立可调的双 Fano 共振，结构如图 7(h)所示，利用 MRR 上的微型加热器实现了 Fano 共振的调谐。同年，于源研究小组[41]利用双 MRR 耦合 MZI 结构



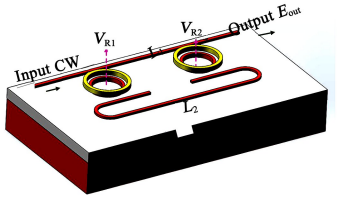
(a) MRR 双光路干涉结构[34]



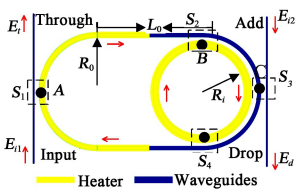
(b) 光栅构成的 FP 腔与 MRR 耦合结构[35]



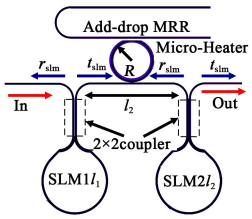
(c) 两个反射单元构成的嵌入式 FP 腔与 MRR 耦合结构[36]



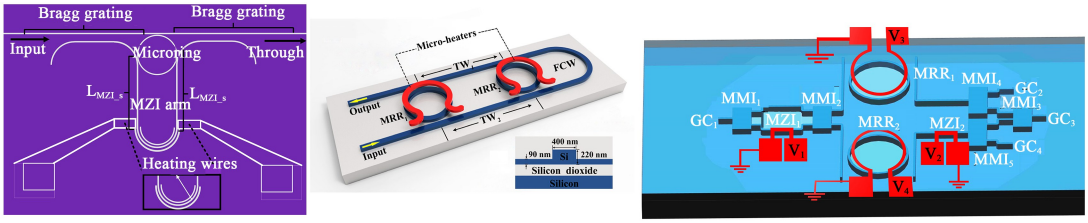
(d) 双 MRR 级联耦合结构[20]



(e) MRR 嵌套耦合结构[37]



(f) 两个反射镜构成的 FP 腔与 MRR 耦合结构[38]



(g) 布拉格光栅构成的 FP 腔与 MRR 耦合结构[39] (h) 反馈波导与 MRR 耦合结构[40] (i) 双 MRR 与 MZI 耦合结构[41]

图 7 基于热光效应实现 Fano 共振调谐的器件结构

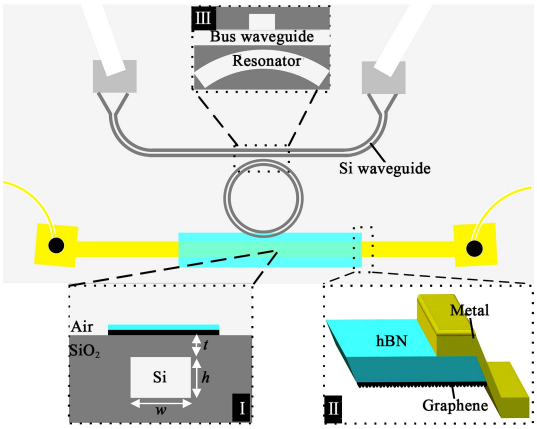


图 8 基于石墨烯的 Fano 共振调谐器件结构[42]

实现了 Fano 共振的调谐，其结构如图 7(i)所示，通过分别控制两个 MRR 和 MZI 臂上的加热器的电压，首次实现了 Fano 共振谱线的斜率和波长的独立调谐。

相比于金属加热器，石墨烯加热器具有更高的热导率(约为 5 300 W/(m·K))，并且对光的吸收损耗小，能够直接覆盖在待调器件的表面，有利于提高器件的切换速率和调谐效率。2023 年，朱志宏研究小组[42]提出并制作了一种基于石墨烯纳米加热器的 Fano 共振调谐器件，结构如图 8 所示，该工作基于 MRR 与单个相移单元耦合产生 Fano 共振，加载在 MRR 上的石墨烯纳米加热器通过调控 MRR 实现 Fano 共振的调谐。

除了热光效应外，电光效应和非线性效应也可应用于硅基 MRR 的 Fano 共振调谐。电光效应是在外加电场的作用下，使硅材料的折射率发生改变，引起 MRR 环状波导的有效折射率发生变化，从而改变 MRR 的谐振波长实现 Fano 共振的调谐，常用的是等离子色散效应，即利用电场改变硅材料中载流子浓度实现[33]。非线性效应是利用 MRR 中高功率的光引起硅材料折射率的变化，如克尔效应，从而引起 MRR 环状波导的有效折射率发生变化，改变 MRR 的谐振波长实现 Fano 共振的调谐。利用非线性效应实现的 Fano 共振调谐是一种全光调制过程，无需电极和电源，在应用中颇具潜力。

4 总结和展望

Fano 共振线型具有明显的不对称特征，利用硅基材料热光效应实现的可调谐 Fano 共振在集成光子芯片中的开关、调制、滤波和传感等应用中极具竞争力。基于 MRR 实现 Fano 共振的结构从多 MRR 耦合等复杂结构向引入相移单元的单个 MRR 结构演化，加热器也从金属材料的微型加热器向石墨烯材料的纳米加热器发展。随着光学技术的发展，2 μm 波段已经成为最有前途的光通信和传感光谱窗口之一，中红外波段也在如火如荼的发展中，新波段应用的蓬勃发展带来了与日俱增的器件需求，Fano 共振的产生和调谐，可为新波段硅光子器件的开发提供基本单元结构、理论基础和性能优化方案新思路，对于推动新波段的发展具有重要意义。

参考文献：

[1] Reed G T, Mashanovich G, Gardes F Y, et al. Silicon optical modulators[J]. Nature Photon., 2010, 4(8): 518-526.

[2] Fard S T, Donzella V, Schmidt S A, et al. Performance of ultra-thin SOI-based resonators for sensing applications[J]. Opt. Express, 2014, 22(12): 14166-14179.

[3] Borghi M, Trenti A, Pavesi L. Four-wave-mixing control in a photonic molecule made by silicon microring resonators[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 408.

[4] Zhang M, Wang C, Cheng R, et al. Monolithic ultra-high-Q lithium niobate microring resonator[J]. Optica, 2017, 4(12): 1536-1537.

[5] Cai D, Lu J, Chen C, et al. High Q-factor microring resonator wrapped by the curved waveguide[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 10078.

[6] Little 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.

[7] Melloni A. Synthesis of a parallel-coupled ring-resonator filter [J]. Opt. Lett., 2001, 26(12): 917-919.

[8] Little B E, Chu S T, Hryniewicz J V, et al. Filter synthesis for periodically coupled microring resonators[J]. Opt. Lett., 2000, 25(5): 344-346.

[9] Scheuer J, Sukhorukov A A, Kivshar Y S. All-optical switching of dark states in nonlinear coupled microring resonators[J]. Opt. Lett., 2010, 35(21): 3712-3714.

[10] Mancinelli M, Guider R, Bettotti P, et al. Coupled-resonator-induced-transparency concept for wavelength router applications[J]. Opt. Express, 2011, 19(13): 122227-122240.

[11] Xu Q, Dong P, Lipson M. Breaking the delay-bandwidth limit in a photonic structure[J]. Nature Phys., 2007, 3(6): 406-410.

[12] Manipatruni S, Dong P, Xu Q, et al. Tunable superluminal propagation on a silicon microchip[J]. Opt. Lett., 2008, 33(24): 2928-2930.

[13] Salit M, Pati G S, Salit K, et al. Fast-light for astrophysics: super-sensitive gyroscopes and gravitational wave detectors [J]. J. Modern Opt., 2007, 54(16/17): 2425-2440.

[14] Wang F, Wang X, Zhou H, et al. Fano-resonance-based Mach-Zehnder optical switch employing dual-bus coupled ring resonator as two-beam interferometer[J]. Opt. Express, 2009, 17(9): 7708-7716.

[15] Wang G, Shen A, Zhao C, et al. Fano-resonance-based ultra-high-resolution ratio-metric wavelength monitor on silicon[J]. Opt. Lett., 2016, 41(3): 544-547.

[16] 李　欣. 新型微环谐振器及其传感特性研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015：83-87.
Li Xin. Novel microring resonators and sensing properties[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 83-87.

[17] Dotan I E, Scheuer J. Fano resonances in vertically and horizontally coupled micro-resonators [J]. Opt. Communications, 2012, 285(16): 3475-3482.

[18] Qiu C, Yu P, Hu T, et al. Asymmetric Fano resonance in eye-like microring system[J]. Appl. Phys. Lett., 2012, 101(2): 228.

[19] Zhou X, Zhang L, Armani A M, et al. An integrated photonic gas sensor enhanced by optimized Fano effects in coupled microring resonators with an athermal waveguide[J]. J. Lightwave Technol., 2015, 33(22): 4521-4530.

[20] 吴小所. 硅基微环谐振器(MRR)的传输特性研究及应用[D]. 兰州：兰州大学，2017：58-79.
Wu Xiaosuo. Transmission characteristics of silicon-based microring resonator and its applications[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017: 58-79.

[21] Yi H, Citrin D S, Zhou Z. Highly sensitive silicon microring sensor with sharp asymmetrical resonance [J]. Opt. Express, 2010, 18(3): 2967-2972.

[22] Zhang Z, Ng G I, Hu T, et al. Conversion between EIT and Fano spectra in a microring-Bragg grating coupled-resonator system[J]. Appl. Phys. Lett., 2017, 111(8): 081105.

[23] Tu Z, Gao D, Zhang M, et al. High-sensitivity complex refractive index sensing based on Fano resonance in the subwavelength grating waveguide micro-ring resonator[J]. Opt. Express, 2017, 25(17): 20911-20922.

[24] Peng F, Wang Z, Yuan G, et al. High-sensitivity refractive index sensing based on Fano resonances in a photonic crystal cavity-coupled microring resonator[J]. IEEE Photon. J., 2018, 10(2): 1-8.

[25] Gu L, Fang H, Li J, et al. A compact structure for realizing Lorentzian, Fano, and electromagnetically induced transparency resonance lineshapes in a microring resonator [J]. Nanophoton., 2019, 8(5): 841-848.

[26] Xu Y, Li J, Kong M. Various resonance lineshapes available in a single microring resonator[J]. J. Opt., 2021, 23(4): 045801.

[27] Wang S, Lu W, Lai X, et al. Silicon waveguide-based single cavity Fano resonance temperature sensor [J]. Optoelectronics Lett., 2023, 19(3): 139-143.

[28] Gu L, Fang L, Fang H, et al. Fano resonance lineshapes in a waveguide-microring structure enabled by an air-hole[J]. APL Photon., 2020, 5(1): 016108.

[29] Fang L, Gu L, Zheng J, et al. Controlling resonance lineshapes of a side-coupled waveguide-microring resonator [J]. J. Lightwave Technol., 2020, 38(16): 4429-4434.

[30] Wang J, Lin J, Jin P, et al. Fano resonance in a microring resonator with a micro-reflective unit[J]. Opt. Express, 2023, 31(19): 31587-31596.

[31] Lu L, Zhu L, Zeng Z, et al. Fano resonance ion sensor enabled by 2D plasmonic sub-nanopores-material[J]. IEEE Sensors J., 2021, 21(13): 14776-14783.

[32] Lu L, Wang S, Zeng Z, et al. Single silicon waveguide MRR based Fano resonance in the whole spectral bands [J]. Optoelectronics Lett., 2022, 18(7): 398-403.

[33] Xu Y, Lu L, Chen G, et al. T-shaped silicon waveguide coupled with a micro-ring resonator-based Fano resonance modulator[J]. Appl. Opt., 2022, 61(31): 9217-9224.

[34] Hu T, Yu P, Qiu C, et al. Tunable Fano resonances based on two-beam interference in microring resonator[J]. Appl. Phys. Lett., 2013, 102(1): 1866.

[35] Zhang W, Li W, Yao J. Optically tunable Fano resonance in a grating-based Fabry-Perot cavity-coupled microring resonator on a silicon chip[J]. Opt. Lett., 2016, 41(11): 2474-2477.

[36] Li A, Bogaerts W. An actively controlled silicon ring resonator with a fully tunable Fano resonance [J]. APL Photon., 2017, 2(9): 096101.

[37] Wang G, Dai T, Jiang J, et al. Slope tunable Fano resonances in asymmetric embedded microring resonators[J]. J. Opt., 2017, 19(2): 025803.

[38] Zheng S, Ruan Z, Gao S, et al. Compact tunable electromagnetically induced transparency and Fano resonance

on silicon platform[J]. Opt. Express, 2017, 25(21): 25655-25662.

[39] Zhang Z, Ng G I, Hu T, et al. Experimental demonstration of thermally tunable Fano and EIT resonances in coupled resonant system on SOI platform[J]. IEEE Photon. J., 2018, 10(3): 1-8.

[40] Zhao T, Xiao H, Li Y, et al. Independently tunable double Fano resonances based on waveguide-coupled cavities[J]. Opt. Lett., 2019, 44(12): 3154-3157.

[41] Liu X, Yu Y, Zhang X. Tunable Fano resonance with a high slope rate in a microring-resonator-coupled Mach-Zehnder interferometer[J]. Opt. Lett., 2019, 44(2): 251-254.

[42] Hong Q, Jiang J, Zhou S, et al. Silicon-based on-chip tunable high-*Q*-factor and low-power Fano resonators with graphene nanoheaters[J]. Nanomater., 2023, 13(10): 1636.

作者简介：

徐　强(1999—)，男，江苏省人，硕士研究生，主要研究方向为基于微环谐振器的Fano线型产生及其调控技术；

徐亚萌(1987—)，女，吉林省人，博士，副教授，主要研究方向为硅基波导器件及其传感技术。