

光子晶体纳米梁侧耦合孔径啁啾光子晶体纳米梁腔结构的 Fano 共振传感机理

陈颖^{1*}, 高新贝¹, 许扬眉¹, 曹景刚¹, 谢进朝¹, 朱奇光², 李少华³

¹燕山大学电气工程学院测试计量技术与仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

²燕山大学信息科学与工程学院河北省特种光纤与光纤传感器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

³河北先河环保科技股份有限公司, 河北 石家庄 050000

摘要 基于 Fano 共振原理, 提出光子晶体纳米梁侧耦合孔径啁啾光子晶体纳米梁腔结构。由光子晶体纳米梁所产生的宽的连续态与由光子晶体纳米梁腔所产生的窄的离散态干涉相消实现 Fano 共振。基于耦合模理论, 定性分析该结构中 Fano 共振的产生机制, 利用时域有限差分法对该结构进行模拟仿真, 定量分析结构参数对折射率传感特性的影响, 并对结构参数进行优化分析。结果表明, 优化后的结构品质因子值可高达 5.1×10^3 , 这将为集成光子晶体波导传感器件设计提供有效的理论参考和技术指导。

关键词 光学器件; 光子晶体; Fano 共振; 光子晶体纳米梁腔; 时域有限差分法; 品质因子

中图分类号 O539

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1123002

Fano Resonance-Sensing Mechanism of Photonic Crystal Nanobeam Side-Coupling Aperture Chirped Photonic Crystal Nanobeam Cavity Structure

Chen Ying^{1*}, Gao Xinbei¹, Xu Yangmei¹, Cao Jinggang¹, Xie Jinchao¹,
Zhu Qiguang², Li Shaohua³

¹Hebei Province Key Laboratory of Test/Measurement Technology and Instrument, School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

²Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

³He Bei Sailhero Environmental Protection High-Tech Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050000, China

Abstract This study proposes a photonic crystal nanobeam (PCN) side-coupling aperture chirped photonic crystal nanobeam cavity (PCNC) structure based on the Fano resonance principle. The Fano resonance can be realized by the destructive interference between the wide continuous state produced by the PCN structure and narrow discrete state generated by the PCNC structure. The generation mechanism of Fano resonance in the structure is qualitatively analyzed via the coupled mode theory, and the structure is simulated by using the finite-difference time-domain method. After quantitatively studying the influences of the structural parameters on the refractive-index sensing characteristics of the system, the structural parameters are optimized. Results show that the optimized figure of merit is as high as 5.1×10^3 , providing an effective theoretical reference and technical guidance for the design of integrated photonic-crystal waveguide sensors.

Key words optical devices; photonic crystal; Fano resonance; photonic crystal nanobeam cavity; finite difference time domain method; figure of merit

OCIS codes 230.5298; 280.4788; 310.6805

收稿日期: 2019-03-29; 修回日期: 2019-06-21; 录用日期: 2019-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61201112, 61475133)、中国博士后基金(2018M630279)、中国国家留学基金(201808130004)、河北省自然科学基金(F2016203188, F2016203245)、河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2018243)、河北省博士后择优资助(D2018003028)

* E-mail: chenying@ysu.edu.cn

1 引 言

光子晶体作为一种具有光子带隙的人工光学材料^[1],在器件集成领域得到广泛的研究和应用。因此,诸多研究人员提出了光子晶体微腔、光子晶体波导和光子晶体光纤类型的光学器件^[2-4]。光子晶体微腔是指在光传播方向上具有周期性晶格的光子晶体结构,相比于其他类型的光子晶体结构,具有 Q 值高、有效模式体积小、集成容易、制作工艺简单等优势,成为新兴热门的光学集成结构,在各种有源、无源光学器件领域都有着广泛的应用,并能在纳米尺度上实现对光子的调控。利用这些特性设计的光子集成结构已成为人们发展微纳光学与光子学产业不可缺少的器件和平台。

近年来,基于光子晶体微腔结构设计的光学器件引起了国内外研究人员的广泛关注,如滤波器^[5]、激光器^[6]、全光开关^[7]、传感器^[8]等。Yaseen 等^[9]研究了单个光子晶体纳米梁腔(PCNC)与两个 PCNC 侧向耦合的传感性能,结果表明两个侧向耦合的 PCNC 比单个 PCNC 具有较高的结构品质因子(FOM)值,分别为 145 和 372。Zhang 等^[10]提出基于 PCNC 的复折射率传感结构,其实部和虚部的灵敏度分别为 58 nm/RIU(RIU 为折射率单元)和 139 nm/RIU。Yang 等^[11]提出一种基于 PCNC 的集成传感器阵列结构,通过适当调节自由光谱范围,可实现多路复用无标记传感。这些结构都是基于对称型的洛伦兹谱线及其变化来实现传感,而非对称的 Fano 共振具有光谱线型窄、可产生较强局域场等特点,并且 Fano 共振的频率和线型易受待测物浓度的影响,所以基于 Fano 共振设计的传感结构具有较高的分辨率,可实现较好的传感性能^[12]。胡金凤等^[13]设计了光子晶体波导侧耦合非线性微腔的结构来产生 Fano 共振,实现光的快速、高效单向传输。Peng 等^[14]提出利用 PCNC 侧耦合微环回音壁腔来实现 Fano 共振结构,利用不对称的线型特性降低了检测限,为无标记生物传感提供更多可能性。本文提出一种基于 Fano 共振的一维光子晶体传感结构,相比于以金属材料构建的表面等离子共

振传感器^[15],该结构材料产生的损耗较小,透射率较高,且该结构 FOM 值较高,具有较高的分辨率;与二维光子晶体传感器^[16]和回音壁腔传感器^[14]相比,该结构大大降低了复杂度和制作难度,提高结构的可靠性和可重复性,传感性能较好,为纳米传感器设计提供一定的理论参考。

本文提出一种光子晶体纳米梁(PCN)侧耦合孔径啁啾 PCNC 结构,通过在硅介质波导上刻蚀一系列周期性排布的空气圆孔形成 PCN 结构,并通过耦合孔径啁啾的 PCNC 结构来产生 Fano 共振。当 TE 模态的光波从输入波导端输入,一部分光波直接通过 PCN 结构形成连续态,另一部分光波通过 PCN 和孔径啁啾 PCNC 结构形成离散态。两条路径上的光波在近场作用下相互干涉,产生 Fano 共振。基于耦合模理论分析该结构产生 Fano 现象的物理机制,采用时域有限差分(FDTD)法定量分析了结构参数对传感特性的影响,并通过优化结构参数使其获得更好的传感性能。

2 模型建立与理论分析

2.1 结构模型的建立

PCN 侧耦合孔径啁啾 PCNC 结构如图 1 所示。整个微腔是悬空的结构,上下包层均为空气,其中,波导材料为折射率为 3.476 的硅介质,在硅介质波导上均匀刻蚀一系列周期性空气圆孔,构成一维 PCN 结构,即图 1 中下侧光子晶体波导结构。当该结构中出现任意形式的缺陷使得周期性发生破缺时,则形成 PCNC 结构,即图 1 中上侧光子晶体微腔结构。该孔径啁啾 PCNC 结构中的圆孔半径从波导中心处向两侧以二次方的速率衰减,形成了高斯镜像,使得该结构具有较大镜像强度,这样将会增强光在谐振腔的局域能力,加强光与待测物质的接触,进而提高传感性能。其圆孔半径大小为

$$r_i = r_{\text{center}} + (r_{\text{out}} - r_{\text{center}}) \left(\frac{i-1}{i_{\text{max}}-1} \right)^2, \quad (1)$$

式中, r_i 为 PCNC 中圆孔半径大小, $i=0,1,2,3,\dots$, r_{center} 为中心位置处的圆孔半径, r_{out} 为最外侧的圆孔半径, i_{max} 为孔径啁啾型 PCNC 一侧的渐变圆孔数。

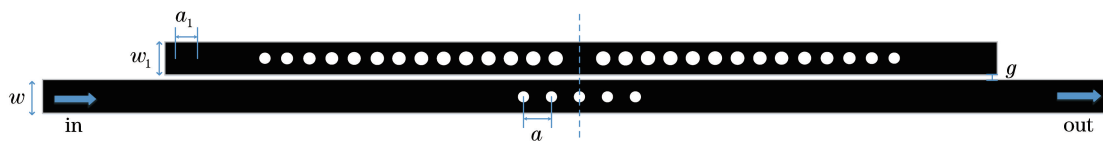


图 1 PCN 侧耦合孔径啁啾型 PCNC 结构图

Fig. 1 Structural diagram of PCN side-coupling aperture chirped PCNC

整个结构相对于中间虚线完全对称,且 PCN 与孔径啁啾型 PCNC 之间的间隔为 g , $g = 65 \text{ nm}$ 。在 PCN 结构设计中,取波导宽度为 $w = 0.47$,晶格常数为 $a = 0.4$,圆孔半径为 $r = 78 \text{ nm}$,圆孔数为 $N = 5$;在孔径啁啾型 PCNC 结构设计中,取其波导宽度为 $w_1 = 0.5$,晶格常数为 $a_1 = 0.335$,中心处圆孔半径为 $r_{\text{center}} = 102.5 \text{ nm}$,且中心处两圆孔距离为 $l = 67 \text{ nm}$,最外侧圆孔半径为 $r_{\text{out}} = 72.5 \text{ nm}$,孔径啁啾型 PCNC 结构中的一侧圆孔数设为 $i_{\text{max}} = 15$ 。另外,在渐变圆孔最外侧额外增加两个与之完全相同的空气孔。

2.2 理论分析

由于光子晶体在 TM 模式下的透射谱中不存在光子带隙,无法进行器件设计,所以本次设计采

用的光源为 TE 极化模式的光源,其入射方向如图 2(a)中的箭头所示。当 TE 模态的光波从输入波导端输入,光波的传输路径主要分为两部分,如图 2(a)中的两条带有箭头的长线段所示。一部分是光波直接通过 PCN 结构,产生一个连续态;另一部分是光波通过 PCN 和孔径啁啾型 PCNC 结构,产生一个离散态。两条入射光路的光波在近场作用下将会发生相长相消干涉,导致传输频谱的急剧变化,进而产生一个非对称的峰,即 Fano 共振峰。

为进一步了解 Fano 共振形成机理,利用耦合模理论^[17-19]分析传输特性。将图 1 中的 Fano 共振结构简化为如图 2(b)所示的耦合模理论模型。

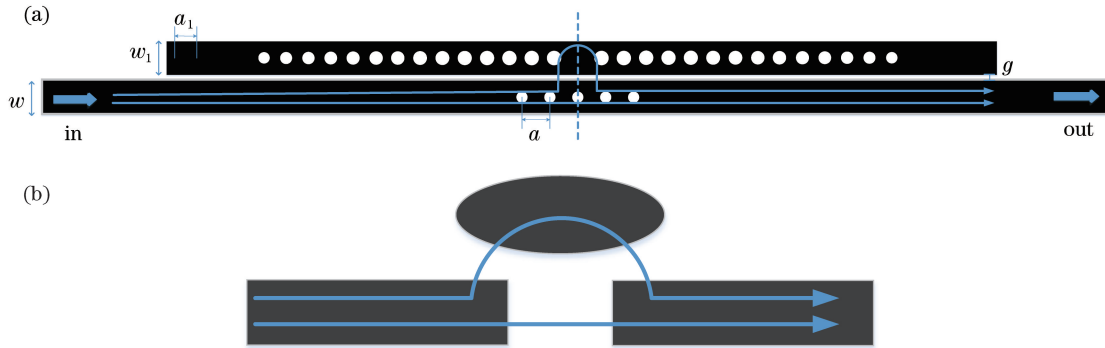


图 2 结构图及简化模型示意图。(a) Fano 共振结构示意图;(b) 理论模型简化图

Fig. 2 Diagrams of structure and simplified model. (a) Diagram of Fano resonance structure; (b) simplified diagram of theoretical model

谐振腔的归一化振幅用 A 表示,其随时间 t 的演化过程可表示为

$$\frac{dA}{dt} = \left(j\omega_0 - \frac{1}{\tau_{\text{int}}} - \frac{1}{\tau_{\text{abs}}} - \frac{1}{\tau_{\text{cpl}}} \right) A + k_1 S_{1+} = j\omega A, \quad (2)$$

$$S_{1-} = S_{1+} + k_1 A, \quad (3)$$

$$S_{2-} = S_{2+} + k_2 A, \quad (4)$$

式中: ω_0 表示孔径啁啾 PCNC 中谐振腔的共振频率; ω 表示入射光频率; $1/\tau_{\text{int}}$ 、 $1/\tau_{\text{abs}}$ 和 $1/\tau_{\text{cpl}}$ 分别表示谐振腔的固有损耗率、谐振腔的吸收损耗率、谐振腔与波导耦合时的衰减率; S_{i+} 和 S_{i-} ($i = 1, 2$) 分别表示两端口的输入和输出场振幅,只考虑光从端口 1 输入、端口 2 输出,即端口 2 没有输入光能量,故 $S_{2+} = 0$; k_1 和 k_2 分别表示谐振腔与输入波导、输出波导的耦合系数,由于该结构是完全对称结构,所以 $k_1 = k_2 = \sqrt{2/\tau_{\text{cpl}}}$ 。该 Fano 共振结构的透射率 T 可由(2)~(4)式联立解得,可表示为

$$T = \left| \frac{S_{2-}}{S_{1+}} \right|^2 =$$

$$\left| \frac{k_1 k_2}{[j(\omega - \omega_0) + 1/\tau_{\text{int}} + 1/\tau_{\text{abs}} + 1/\tau_{\text{cpl}}]} \right|^2. \quad (5)$$

由(5)式可以看出,当入射光频率 ω 和啁啾 PCNC 谐振腔共振频率 ω_0 相等或接近,透射率将达到较大值,即透射谱线中会出现一个尖锐的共振峰;而当入射光频率 ω 和啁啾 PCNC 谐振腔共振频率 ω_0 不等时,透射率为一个较小的值,即在透射谱线中会出现一个零传输的波谷。此外还可以看出 PCN 与 PCNC 的耦合间距 g 与透射率成负相关,因为耦合间距 g 越大,耦合系数 k_1 和 k_2 越小,进而使得整个系统的透射率越低。

基于理论分析及结构参数选定,利用 FDTD 软件对该结构进行模拟仿真,其透射谱线及磁场分布图如图 3 所示。当只有孔径啁啾 PCNC 结构时,该透射谱曲线在波长 $\lambda = 1807 \text{ nm}$ 处出现明显的损耗,产生一个尖锐的波谷,如图 3(a)中带正方形的

曲线所示;而当只有 PCN 结构时,将会形成一个比较宽的连续态,如图 3(a)中带圆形的曲线所示;当 PCN 侧耦合孔径啁啾 PCNC 结构时,会在较宽的连续态谱上产生一个非对称的 Fano 共振线型,如图 3(a)中带三角形的曲线所示。由 Fano 线型可以看出该结构可产生一个尖锐的波峰和波谷,通过 FDTD 仿真得到其电磁场分布,如图 3(b)所示,在 $\lambda = 1808 \text{ nm}$ 波谷处,只有很少的光波被耦合进孔径

啁啾 PCNC 结构,并且也有很少的光波透射出去,所以在透射光谱中会出现零传输现象,形成共振谷。由图 3(c)可以看出,在 $\lambda = 1813 \text{ nm}$ 波峰处,PCNC 谐振腔内存在着较强的磁场分布,并且光波透射率较高,即在此时入射光频率等于或接近谐振腔的共振频率,在透射光谱中出现了一个共振峰。这说明理论分析所得出的结论与 FDTD 模拟仿真得到的透射谱一致,进而可验证理论推导的正确性。

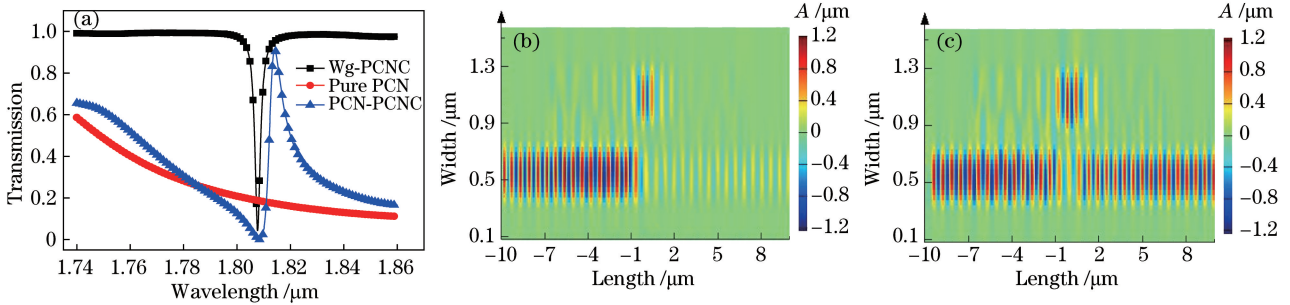


图 3 Fano 共振谱线图及场分布图。(a) Fano 共振谱线图;(b) 波谷处的电磁场分布图;(c) 波峰处的电磁场分布图
Fig. 3 Diagrams of Fano resonance line and field distribution. (a) Fano resonance line; (b) electromagnetic field distribution at the trough; (c) electromagnetic field distribution at the peak

3 结构的传感特性分析

FOM(F_{OM})值^[20]是衡量折射率传感器性能的一个重要指标,定义为在某一特定波长下,待测物折射率变化 dn 引起传感器透射光谱的相对强度变化 dT/dn ,用来测量波长漂移。 F_{OM} 可表示为

$$F_{OM} = \left(\frac{dT/dn}{T} \right)_{\max} = \left[\frac{S(dT/d\lambda)}{T} \right]_{\max}, \quad (6)$$

式中,灵敏度 $S = d\lambda/dn$ 为评估传感器性能的一个另一个重要指标。该结构在频率 ω 下的 F_{OM} 值可表示为

$$F_{OM} = \frac{\Delta T}{T \Delta n} = \frac{T(\omega, n) - T(\omega, n_0)}{T(\omega, n_0) \Delta n}, \quad (7)$$

式中, $T(\omega, n_0)$ 为结构初始状态下的透射率, $T(\omega, n)$ 为折射率变化后的透射率。折射率差 $\Delta n = n - n_0$, n 为待测物折射率值, n_0 为初始折射率。基于这些结构参数,通过数值模拟得到不同波长对应的 F_{OM} 值的曲线,如图 4 所示,该 Fano 共振峰具有较高的 F_{OM} 值。

3.1 结构参数 r 对传感器特性的影响

对参数 r 进行优化分析,将 r 对应的参数设置为 $75 \sim 83 \text{ nm}$,间隔 2 nm ,其他参数如上所述。如图 5(a)所示,随着 r 的增大,PCN 结构对光波的局域作用增强,导致了 Fano 共振峰的透射率减小,且发生蓝移。图 5(b)和(c)为 r 对传感 F_{OM} 值和

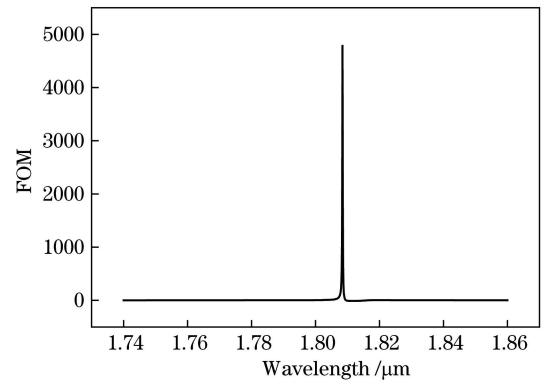


图 4 Fano 共振不同波长下对应的 F_{OM} 值
Fig. 4 F_{OM} values corresponding to Fano resonances at different wavelengths

传感灵敏度的影响,随着 r 的增加 F_{OM} 值呈先增大后减小的趋势,灵敏度数值变化不大,综合考虑,选取 $r = 79 \text{ nm}$,此时, F_{OM} 值达到最大,灵敏度为 34 nm/RIU 。

3.2 结构参数 a 对传感特性的影响

对 PCN 结构的晶格常数 a 进行优化分析,将 a 对应的参数设置为 $396 \sim 406 \text{ nm}$,间隔 2 nm 。如图 6(a)所示,随着 a 的增大,PCN 和孔径啁啾 PCNC 的耦合面积增加,光波在 PCN 和孔径啁啾 PCNC 处的耦合作用增强,所以 Fano 共振峰透射率增大。图 6(b)和(c)为 a 对传感 F_{OM} 值和灵敏度的影响,随着 a 的增加 F_{OM} 值呈先增加后减小

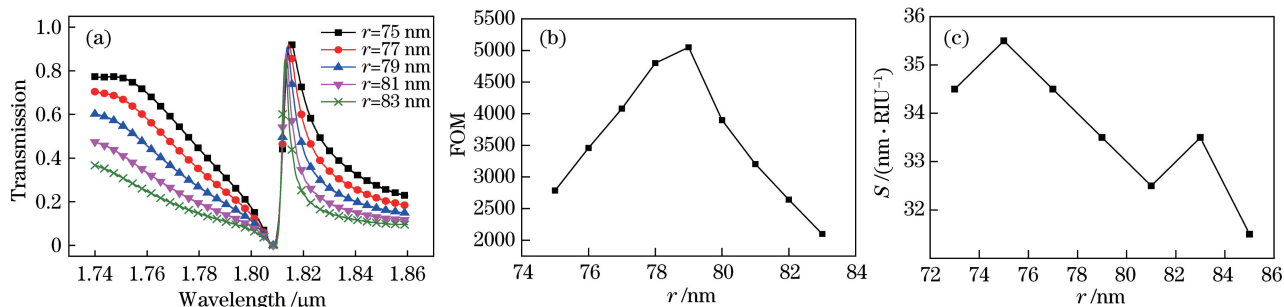


图 5 r 对传感性能的影响。(a) r 对 Fano 共振的影响;(b) r 对 F_{OM} 值的影响;(c) r 对灵敏度的影响
Fig. 5 Effect of r on sensor performance. (a) Effect of r on Fano resonance; (b) effect of r on F_{OM} value;
(c) effect of r on sensitivity

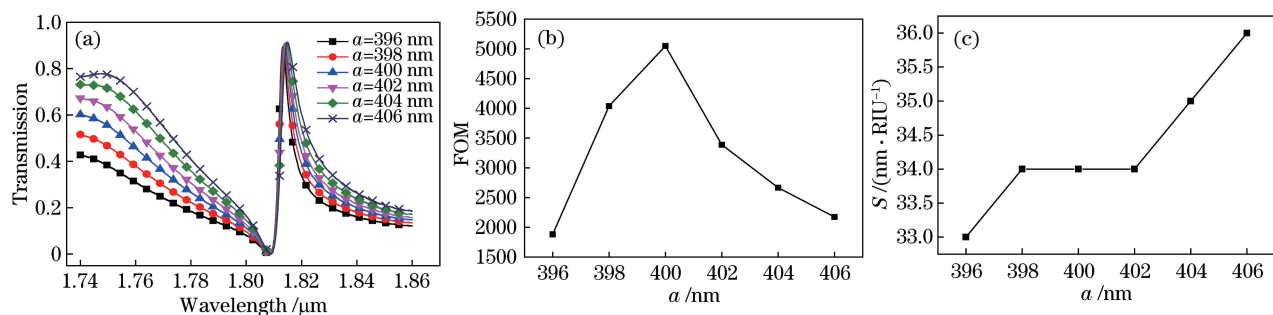


图 6 a 对传感性能的影响。(a) a 对 Fano 共振的影响;(b) a 对 F_{OM} 值的影响;(c) a 对灵敏度的影响
Fig. 6 Effect of a on sensor performance. (a) Effect of a on Fano resonance; (b) effect of a on F_{OM} value;
(c) effect of a on sensitivity

的趋势,在 $a = 400$ nm 处, F_{OM} 值达到最大,而参数 a 对传感灵敏度的影响较小。综合考虑,选取 $a = 400$ nm。

3.3 结构参数 g 对传感特性的影响

为实现更好的传感性能,选取参数 r 为 79 nm, a 为 400 nm。然后分析耦合间距 g 对传感性能的影响,将 g 对应的参数设置为 56~66 nm,间隔 2 nm。

如图 7(a)所示,随着 g 的增加,耦合系数减小,PCN 和孔径啁啾 PCNC 的耦合损耗增加,则 Fano 共振峰透射率降低,该现象与耦合模理论表述一致。图 7(b)和(c)为 g 对 Fano 共振的 F_{OM} 值和灵敏度的影响,在 $g = 62$ nm 处, F_{OM} 值达到最大,而灵敏度数值变化不大,整体呈下降趋势。考虑到 F_{OM} 值变化较为明显,所以取 $g = 62$ nm。

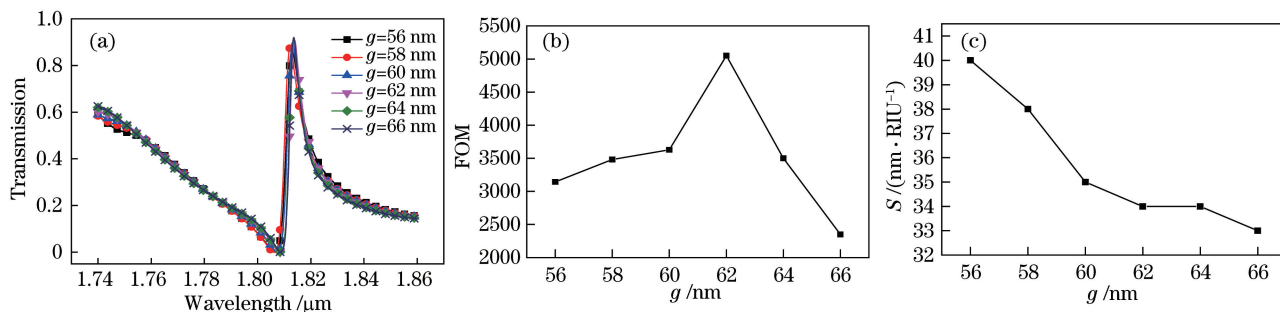


图 7 g 对传感性能的影响。(a) g 对 Fano 共振的影响;(b) g 对 F_{OM} 值的影响;(c) g 对灵敏度的影响
Fig. 7 Effect of g on sensor performance. (a) Effect of g on Fano resonance; (b) effect of g on F_{OM} value;
(c) effect of g on sensitivity

通过对参数 r 、 a 、 g 进行优化分析,发现在 $r = 79$ nm, $a = 400$ nm, $g = 62$ nm 时,该结构的 F_{OM} 值达到最大,而传感器的灵敏度变化不大。一般在传感器线性范围内,希望传感器的灵敏度尽可能高,但

传感器灵敏度越高,测量范围将越窄,稳定性也往往越差,因为在灵敏度较高时,微小的折射率改变将引起波峰的漂移,则在保证 Fano 线型的检测波段内,结构能测量的待测物折射率范围将越小。所以在优

化传感器灵敏度时,需兼顾该结构的测量范围及稳定性,且在保证一定 F_{OM} 值的情况下提高传感器灵敏度。

接下来,探究该结构与 PCN 侧耦合非啁啾 PCNC 结构、PCN 侧耦合晶格常数不变的啁啾型 PCNC 结构的传感性能,为能直观地看出其对传感性能的影响,对比分析这 3 个结构的 F_{OM} 值,如图 8 所示。由图可以看出,PCN 侧耦合孔径啁啾型 PCNC 结构的 F_{OM} 值最高,达 5.1×10^3 ,比 PCN 侧耦合非啁啾型 PCNC 结构的 F_{OM} 值高出 1 个数量级,进而说明本文结构可实现良好的传感性能。

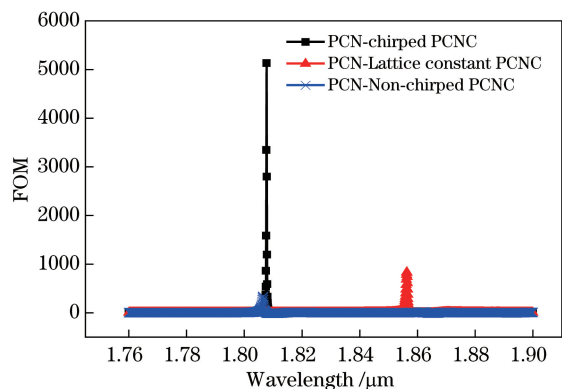


图 8 三种结构的 F_{OM} 值对比图

Fig. 8 Comparison of F_{OM} values of three structures

对优化后的结构进行传感特性分析,如图 9 所示,可以看出,随着环境折射率 n 的增加,Fano 共振峰发生红移,且共振波长与环境折射率具有很好的线性关系,可得传感器灵敏度约为 34 nm/RIU。另外,该结构的透射率高达 94.5%,说明其传输损耗较小,则由材料损耗引起透射率的变化更小,利用(7)式计算可得材料损耗对 F_{OM} 值影响不大,即对传感特性几乎不产生影响,因为该结构采用的电介质材料硅相比于金属材料,传输损耗较小,对透射峰的影响较小,这是选择电介质材料硅的优势所在。该结构具有良好的传感特性,并且透射率较高,易于对波形进行观察处理,所以可利用 Fano 共振峰的漂移来实现对待测环境折射率的检测。

4 结 论

提出一种 PCN 侧耦合孔径啁啾型 PCNC 的 Fano 共振结构。将 PCN 结构产生的一个较宽的传输峰视为连续态,将 PCNC 结构形成的一个较窄的传输峰视为孤立态,两者在近场作用下发生干涉相消,形成一种非对称的 Fano 共振峰。利用耦合模理论分析其传输机制,并利用 FDTD 软件对该结构

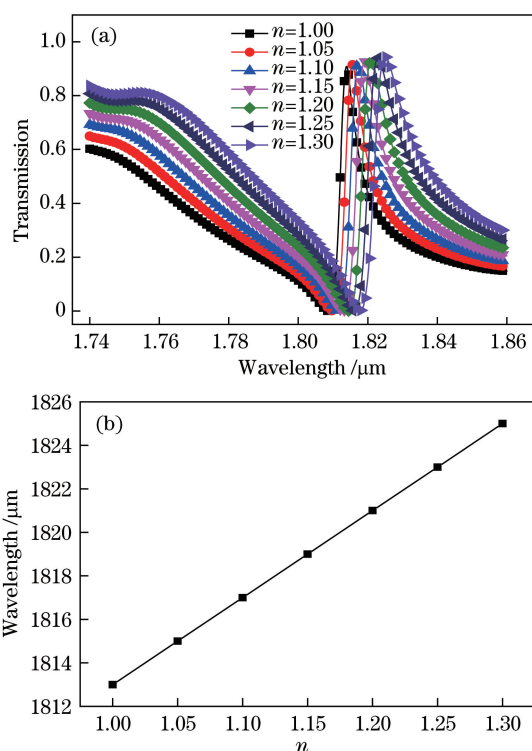


图 9 折射率 n 对传感特性的影响。(a) 折射率 n 对 Fano 共振峰的影响;(b) 共振波长随折射率 n 变化的拟合曲线

Fig. 9 Influence of refractive index n on sensing characteristics. (a) Influence of refractive index n on Fano resonance peak; (b) fitting curve of relationship between refractive index n and resonant wavelength

进行模拟仿真,得到其透射谱线图和波峰、波谷处的电磁场分布图,结果表明模拟现象与理论推导结果一致,并且对结构参数进行了优化分析,研究表明 PCN 侧耦合孔径啁啾型 PCNC 结构的 F_{OM} 值高达 5.1×10^3 。该结构灵敏度虽不算高,但是稳定性较好,且 F_{OM} 值较高,可为高分辨率折射率传感器的设计提供一定的理论参考,为纳米传感结构的构建提供新的思路与方法。将 Fano 共振与一维光子晶体结构结合用于传感,可为光子晶体在传感器领域的应用提供积极有益的尝试。

参 考 文 献

- [1] Qiao P F, Yang W J, Chang-Hasnain C J. Recent advances in high-contrast metastructures, metasurfaces, and photonic crystals[J]. Advances in Optics and Photonics, 2018, 10(1): 180-245.
- [2] Su K, Wang Z M, Liu J J. Three waveguides directional coupler based on two dimensional square lattice photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2016,

- 36(3): 0323002.
 苏康, 王梓名, 刘建军. 二维正方晶格光子晶体三光波导方向耦合器[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0323002.
- [3] Pourali E, Erfanian A. Fine tuning of the center frequency of the slow light regime in an infiltrated W09 photonic crystal waveguide[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 104: 1-7.
- [4] Chakma S, Khalek M A, Paul B K, *et al.* Gold-coated photonic crystal fiber biosensor based on surface plasmon resonance: design and analysis[J]. Sensing and Bio-Sensing Research, 2018, 18: 7-12.
- [5] Liang L X, Zhang X J, Wu X S, *et al.* Terahertz filter and optical switch based on magnetic-photonic crystals[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0513002.
 梁龙学, 张晓金, 吴小所, 等. 基于磁光子晶体的太赫兹滤波器和光开关[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0513002.
- [6] Ghadrani M, Mansouri-Birjandi M A. Implementation of all-optical switch based on nonlinear photonic crystal ring resonator with embedding metallic nanowires in the ring resonators[J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48(5): 299.
- [7] Li C W, Chen X, Cai Y Y, *et al.* Design of one-dimensional edge-emitting organic semiconductor photonic crystal lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0914001.
 李长伟, 陈笑, 蔡园园, 等. 一维边发射有机半导体光子晶体激光器设计[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0914001.
- [8] Fegadolli W S, Pavarelli N, O'Brien P, *et al.* Thermally controllable silicon photonic crystal nanobeam cavity without surface cladding for sensing applications[J]. ACS Photonics, 2015, 2(4): 470-474.
- [9] Yaseen M T, Yang Y C, Shih M H, *et al.* Optimization of high-Q coupled nanobeam cavity for label-free sensing[J]. Sensors, 2015, 15(10): 25868-25881.
- [10] Zhang X W, Zhou G Y, Shi P, *et al.* On-chip integrated optofluidic complex refractive index sensing using silicon photonic crystal nanobeam cavities[J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1197-1200.
- [11] Yang D Q, Wang B, Chen X, *et al.* Ultracompact on-chip multiplexed sensor array based on dense integration of flexible 1-D photonic crystal nanobeam cavity with large free spectral range and high Q-factor[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(4): 4900412.
- [12] Chen Y, Luo P, Liu X F, *et al.* Sensing performance analysis on Fano resonance of metallic double-baffle contained MDM waveguide coupled ring resonator[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 101: 273-278.
- [13] Hu J F, Liu B, Liang H Q, *et al.* Achieving nonreciprocal transmission by breaking symmetry of nonlinear Fano cavity structure in photonic crystals[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0323002.
 胡金凤, 刘彬, 梁红勤, 等. 打破光子晶体非线性 Fano 腔结构对称性实现单向传输[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0323002.
- [14] Peng F C, Wang Z R, Yuan G H, *et al.* High-sensitivity refractive index sensing based on Fano resonances in a photonic crystal cavity-coupled microring resonator[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 6600808.
- [15] Zhang Y J, Kuang Y Q, Zhang Z D, *et al.* High-sensitivity refractive index sensors based on Fano resonance in the plasmonic system of splitting ring cavity-coupled MIM waveguide with tooth cavity[J]. Applied Physics A, 2019, 125: 13.
- [16] Amoudache S, Moiseyenko R, Pennec Y, *et al.* Optical and acoustic sensing using Fano-like resonances in dual phononic and photonic crystal plate[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(11): 114502.
- [17] Fan S H, Suh W, Joannopoulos J D. Temporal coupled-mode theory for the Fano resonance in optical resonators[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2003, 20(3): 569-572.
- [18] Nozaki K, Shinya A, Matsuo S, *et al.* Ultralow-energy and high-contrast all-optical switch involving Fano resonance based on coupled photonic crystal nanocavities[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 11877-11888.
- [19] Li J H, Yu R, Wu Y. Actively tunable double-Fano and Ramsey-Fano resonances in photonic molecules and improved sensing performance[J]. Physical Review A, 2016, 94(6): 063822.
- [20] Zhou J, Tian H P, Huang L J, *et al.* Parabolic tapered coupled two photonic crystal nanobeam slot cavities for high-FOM biosensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(16): 1281-1284.