

基于光子晶体狭缝纳米梁腔法诺共振的传感特性

马娇¹, 李锦屏¹, 吴小所^{1,2*}, 周冬梅¹¹兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070;²兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070

摘要 为了提高光子晶体谐振腔的传感性能, 提出了一种光子晶体纳米梁耦合光子晶体狭缝纳米梁腔的法诺谐振结构。在包含锥形孔的纳米梁腔中引入狭缝结构, 获得了高局域化光场, 进而产生了较强的光与物质相互作用, 实现了灵敏度的提高。利用三维有限差分法进行模拟仿真, 发现该结构的折射率传感器灵敏度高达 897 nm/RIU, 结构大小仅为 $21.4 \mu\text{m} \times 1.55 \mu\text{m}$ 。同时, 根据耦合模理论, 阐述了法诺共振产生的机制, 并定性分析了该结构的传输特性随结构参数的变化。

关键词 集成光学; 光子晶体; 谐振腔; 折射率传感

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2413002

Sensing Characteristics Based on Fano Resonance of Photonic Crystal Slot Nanobeam Cavity

Ma Jiao¹, Li Jinping¹, Wu Xiaosuo^{1,2*}, Zhou Dongmei¹¹School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;²Key Lab of Opt-Electronic Technology and Intelligent Control of Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract A Fano resonant structure based on the coupling of the photonic crystal nanobeam with the photonic crystal slot nanobeam cavity is proposed to improve the sensing performance of the photonic crystal resonant cavity. A slot structure is designed in the nanobeam cavity with conical holes to obtain a highly localized light field that produces strong light-matter interaction and ultimately to improve the sensitivity. The model is simulated by the three-dimensional finite-difference time-domain method, and it is found that the sensitivity of the refractive index sensor with the proposed structure reaches up to 897 nm/RIU, and the size of the proposed structure is only $21.4 \mu\text{m} \times 1.55 \mu\text{m}$. In light of the coupled-mode theory, the mechanism of Fano resonance is discussed and the variation of the transmission characteristics of the proposed structure with the structural parameters is analyzed qualitatively.

Key words integrated optics; photonic crystal; resonant cavity; index sensor

OCIS codes 130.3120; 130.3990; 140.4780

1 引言

由于光学谐振腔在控制光传播方面具有显著优势, 故其已在传感领域中得到了广泛应用, 如无标签折射率传感^[1-2]、温度传感^[3-4]、单纳米粒子检测^[5]等。一维光子晶体纳米梁腔(PCNC)在具有结构紧凑、方便与波导集成、光场局域性较强、光子寿命较长的优点的同时, 具有对周围介质变化高度敏感的光学模式^[6], 故其成为了一种具有优势的传感平台, 并得到了广泛的研究。

随着光子晶体谐振腔传感器设计的发展, 许多研究者致力于设计具有高品质因子的谐振腔。然而, 此时模态电场大多被限制在具有高折射率的介电区域中, 在低折射率包层中的检测分析物只能与谐振模态的衰减场相互作用, 故传感器的灵敏度较低。Yaseen 等^[7]发现横向耦合的 PCNC 传感器比单个 PCNC 传感器具有更高的灵敏度。同时, 横向耦合的 PCNC 传感器是对称的 Lorenz 型谐振传感器, 与常用的 Lorenz 型传感器相比, 非对称法诺共振透射谱或反射谱的突变, 使其具有较窄

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-04-30; 录用日期: 2021-06-21

基金项目: 甘肃省重点研发计划项目(20YF8GA035)、甘肃省科技厅规划项目(18JR3RA123)、甘肃省科学院应用研究与开发计划(2018JK-02)、兰州市城关区科技计划项目(2019RCCX0007)、甘肃省教育厅资助项目(2018B-029)、甘肃省住建厅计划项目(JK2017-24)

通信作者: *wuxs_laser@mail.lzjtu.cn

的光谱线型,因此其可以提高感知分辨率^[8]并产生较强的光场局域性^[2]。此外,结构参数和环境折射率的微小扰动均会使法诺共振结构的传输强度和频谱发生明显变化^[9-10],这样更有利于获得高敏感性折射率传感器。Peng 等^[11]利用光子晶体腔耦合微盘谐振腔产生法诺谐振,将硅基微环谐振器的探测极限降低为原探测极限的 1/5。Dong 等^[12]提出了基于 PCNC 横向耦合法布里-珀罗谐振腔的法诺谐振系统,其消光比达到了一 40 dB,峰值损耗低至 0.6 dB。此外,与同类型的二维光子晶体微腔相比,其体积减小了两个数量级。

虽然有关基于谐振理论的折射率传感器的研究很多,但是大部分研究者致力于设计具有高品质因子的 Lorenz 型光子晶体谐振腔折射率传感器,对灵敏度的考虑略少,尤其是对光子晶体法诺谐振型传感器的研究相对较少。因此,本文提出了一维光子晶体纳米梁(PCN)侧向耦合光子晶体狭缝纳米梁腔(PCSNC)的设计,通过调节光子带隙的位置来控制法诺透射光谱的形状。与基于 PCN 耦合啁啾型 PCNC 法诺结构的折射率传感器相比,基于所提结构的折射率传感器具有较高的灵敏度(S),其值为 897 nm/RIU,品质因子(F_{om})为 553。同时,当分析物折射率发生微小变化时,谐振谷会显著漂移^[13]。此外,与亚波长光栅^[14]和回音壁模式^[15]的传感器相比,基于所提结构的传感器具有体积较小、便于集成的优点,为实现片上集成的谐振类传感器的设计提供了一定的参考。

2 模型设计与理论分析

2.1 PCN-PCSNC 模型

图 1 为 PCN-PCSNC 结构示意图。该结构为空气悬浮型结构,关于虚线对称,波导是厚度为 $0.22 \mu\text{m}$ 的硅材料。PCN 与 PCSNC 的晶格常数分别为 a_1 和 a_2 。PCN 是在宽度(ω_1)为 $0.4 \mu\text{m}$ 的硅波导上刻蚀半径差为 $0.010 \mu\text{m}$ 的 5 个周期性空气孔径形成的。中心孔半径 r_1 为 $0.112 \mu\text{m}$,以中心孔径为基准,两侧孔径以 $0.010 \mu\text{m}$ 的差值依次减小, a_1 取 $0.43 \mu\text{m}$ 。在距离 PCN $0.06 \mu\text{m}$ 处级联耦合 PCSNC,PCSNC 是在宽度(ω_2)为 $0.595 \mu\text{m}$ 的硅波导上刻蚀镜像的高斯型空气锥形孔而成的。在腔体两侧各设置 10 个空气孔,这些空气孔是锥形孔,其半径大小变化趋势呈抛物线形。将空气孔设计为锥形有利于实现狭窄线宽的共振,锥形孔的半径大小^[16]为

$$r(j) = r_{\text{center}} + (r_{\text{end}} - r_{\text{center}}) \left(\frac{j-1}{j_{\text{max}}-1} \right)^2, \quad (1)$$

式中: r_{center} 、 r_{end} 分别为 PCSNC 镜像锥形孔中的中心孔径和最小孔径,大小分别为 $0.42a_2$ 和 $0.36a_2$; j 为镜像孔数目,依次从 1 增至 j_{max} , j_{max} 为最大单向镜像孔数目;在末端设置 3 个半径均为 r_{end} 的镜像孔用来提高品质因子。为了加强分析物与空气模式间的作用,在锥形孔波导中刻蚀宽度(w_{slot})为 $0.05 \mu\text{m}$ 的槽形缝隙,整体结构的大小为 $21.4 \mu\text{m} \times 1.55 \mu\text{m}$ 。

在三维有限差分域(3D-FDTD)模拟中,将结构的 X 和 Y 方向上的边界条件设置为完美匹配层。由于当入射光源为横磁(TM)模式时,光子晶体中不存在光子带隙,因此在波导的一端发射横电(TE)模式的光源。如图 1 中的粗箭头所示,光源脉冲穿过结构后,由波导另一端的功率探测器采集脉冲的时间变化信息,并通过傅里叶变换将其转换到频域。

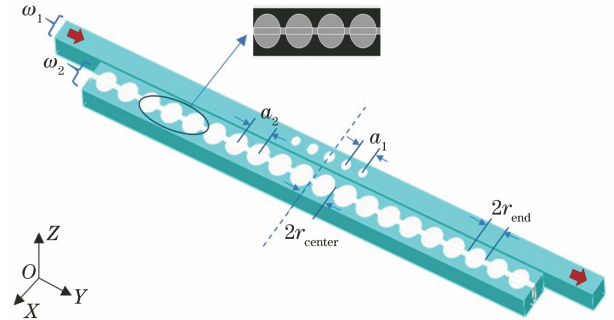


图 1 PCN-PCSNC 的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of PCN-PCSNC

2.2 法诺模型理论分析

在光学响应中,当离散共振态与宽带连续态发生破坏性干涉时,会产生非对称性的法诺共振^[17-18]。为了更清晰地理解 PCSNC 与 PCN 间的耦合情况,分别对直波导耦合光子晶体狭缝纳米梁腔(Wg-PCSNC)和 PCN 的透射谱进行了仿真分析,如图 2(a)所示。一部分光进入 PCN 后形成了 U 型的宽带连续态传播模式,另外一部分光通过 Wg-PCSNC 结构产生了对称 Lorenz 型的离散共振态模式,两路径产生的光波模式间发生了干涉,最终可得到非对称线型的法诺共振,其透射光谱可由标准法诺公式描述^[19],其表达式为

$$F(\omega) = A_0 + F_0 \frac{[q + 2(\omega - \omega_0)/\Gamma]^2}{1 + [2(\omega - \omega_0)/\Gamma]^2}, \quad (2)$$

式中: Γ 为共振半峰全宽; ω_0 为共振频率; q 为法诺不对称参数(共振和非共振跃迁振幅的比值); A_0 和 F_0 为常数; ω 为透射光频率。将仿真模拟得到的透射谱与标准法诺线型进行了拟合,如图 2(a)中插图所示,其中 λ 表示透射波波长。可以看出,PCN-PCSNC 结构与(2)式的拟合结果能较好地吻合,但在高低频段处出现了微小的差异,这是 PCN 的色散造成的。同时,可以看出,Wg-PCSNC 结构的消光比(R_{ER})为一 10.50 dB,PCN-PCSNC 结构的消光比为一 29.24 dB,PCN-PCSNC 结构的消光比约是 Wg-PCSNC 结构的消光比的 2.78 倍。PCN-PCSNC 在谐振波长处的电场分布如图 2(b)所示。可以看出,光模式主要分布在狭缝区域中,故其可与变化的环境折射率相互作用,从而达到高灵敏度传感的作用。

为了建立器件参数与法诺共振透射谱的解析关系,根据耦合模理论,将 PCN-PCSNC 共振系统模型进行了简化,如图 3 所示,对应图 1 中的 XOY 平面。在双谐振腔耦合系统中,低 Q 谐振腔 B_1 在连接输入输出波导的同时,耦合了高 Q 谐振腔 B_2 。低 Q 谐振腔 B_1 和高 Q 谐振腔 B_2 的模式振幅和谐振频率分别为 A_1 、 A_2 和 ω_1 、 ω_2 ,

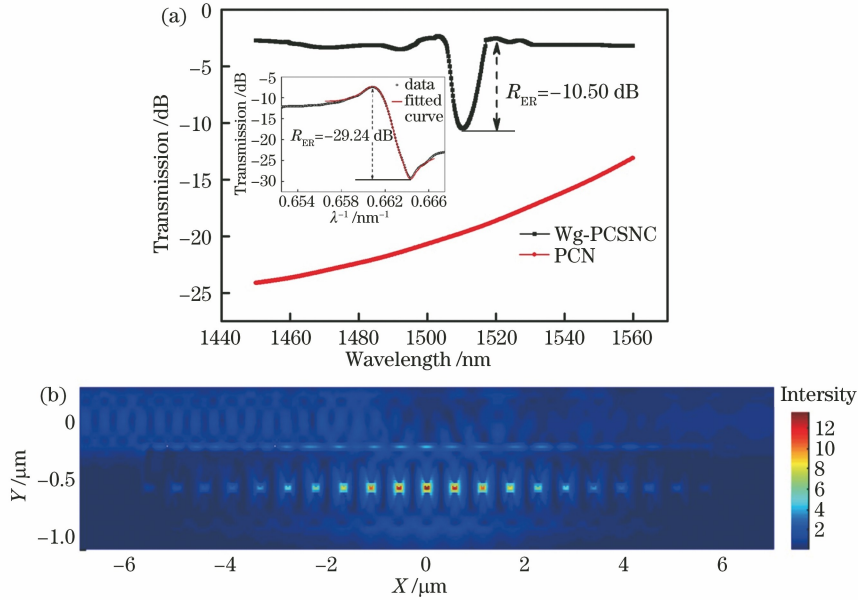


图 2 法诺共振的透射谱与电场分布。(a) Wg-PCSNC 与 PCN 的透射谱, 插图是 PCN-PCSNC 的透射谱与法诺公式的拟合图; (b) PCN-PCSNC 在谐振波长处的电场分布

Fig. 2 Transmission spectrum and electric field distribution of Fano resonance. (a) Transmission spectra of Wg-PCSNC and PCN, illustration is fitted diagram of transmission spectrum of PCN-PCSNC and Fano formula; (b) electric field distribution of PCN-PCSNC at resonant wavelength

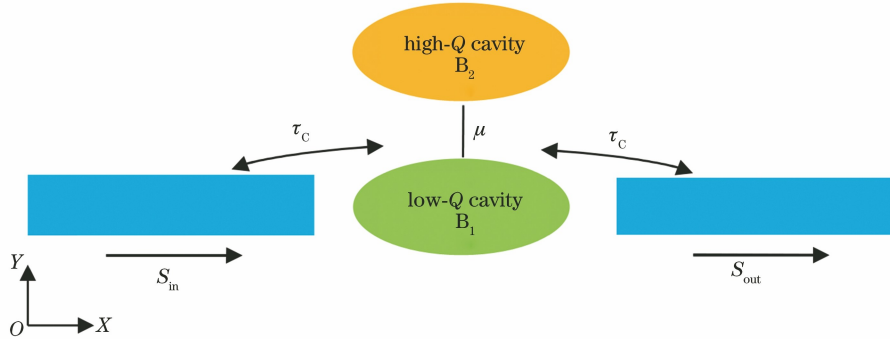


图 3 PCN-PCSNC 模型的简化图

Fig. 3 Simplified diagram of PCN-PCSNC model

谐振腔 B_1 和 B_2 的总损耗分别为 $1/\tau_1$ 和 $1/\tau_2$, μ 为谐振腔 B_1 与 B_2 的耦合系数。由耦合模理论^[20]可得

$$\frac{dA_1}{dt} = \left(i\omega_1 - \frac{1}{\tau_1} \right) A_1 + \mu A_2, \quad (3)$$

$$\frac{dA_2}{dt} = \left(i\omega_2 - \frac{1}{\tau_2} \right) A_2 + \mu A_1, \quad (4)$$

结合(3)、(4)式, 可得本征解

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} + \frac{i}{2} \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left[(\omega_1 - \omega_2)^2 - i \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right)^2 \right] + \mu^2}, \quad (5)$$

式中: ω 为光源频率。令 $\Delta = \frac{1}{4} \left[(\omega_1 - \omega_2)^2 - i \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right)^2 \right]$, 当 $\Delta \geq \mu^2$ 时, 双谐振腔处于弱耦合状态。

输入、输出波导模式的振幅分别为 S_{in} 、 S_{out} , 其中 $S_{in} = s_{in} \cdot \exp(i\omega t)$, s_{in} 为 S_{in} 的模。结合耦合模方程, 可得透射

$$T(\omega) = \frac{S_{out}}{S_{in}} = \frac{\omega}{2Q_C} \cdot \frac{i\omega - \left(i\omega_2 + \frac{\omega_2}{2Q_2} \right)}{\left[i\omega - \left(i\omega_1 - \frac{\omega}{2Q_C} \right) \right] \left[i\omega - \left(i\omega_2 - \frac{\omega_2}{2Q_2} \right) \right] + \mu^2}, \quad (6)$$

式中: Q_C 为低 Q 腔总品质因子, $Q_C = \omega\tau_c/2$, $1/\tau_c$ 是由低 Q 腔耦合波导造成的衰减率; Q_2 为高 Q 腔总品质因子, $Q_2 = \omega\tau_2/2$ 。由(6)式可知, 当增大 μ 和 Q_1 时, 会产生较大的光谱斜率和消光比。当 $\omega_1 > \omega_2$ 时, 谐振谷相对于谐振峰红移。当 $\omega_2 > \omega_1$ 时, 谐振谷相对于谐振峰蓝移^[21]。上述理论推算及讨论对于法诺共振型器件的设计具有指导意义。

3 折射率传感特性分析

光子晶体谐振腔传感器的传感机制是分析物在空腔

表面吸附引起局部扰动或背景折射率全局扰动引起共振波长发生线性移动^[22]。品质因子和灵敏度是评价基于法诺谐振的折射率传感器性能的关键指标,二者的表达式^[23-24]为

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}, \quad (7)$$

$$F_{\text{om}} = \left| \frac{\Delta T}{T \Delta n} \right| = \left| \frac{T(\omega, n) - T(\omega, n_0)}{\Delta n T(\omega, n_0)} \right|, \quad (8)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为谐振波长偏移量; $T(\omega, n)$ 和 $T(\omega, n_0)$ 分别为加入和未加入待测物时的透射率; n 为待测物折射率; n_0 为初始状态折射率; Δn 是待测物折射率与初始状态

折射率的差值;本文设定 $\Delta n = 0.01$ 来计算传感结构的 F_{om} 。

在仿真分析过程中,通过参数扫描的方式,改变仿真域的背景折射率,使其在 $1 \sim 1.04$ 范围内变化。空气折射率的变化会使得气体传感器狭缝结构中的光模式与待测环境相互作用,引起有效折射率发生改变,进而导致谐振波长发生漂移。图 4(a)为不同折射率下 PCN-PCSNC 的透射光谱。可以发现,随着折射率的增大,法诺谐振波长发生红移。图 4(b)为不同折射率下的共振波长。可以发现,谐振谷波长与待测物折射率之间呈现良好的线性关系,灵敏度 S 为 897 nm/RIU 。

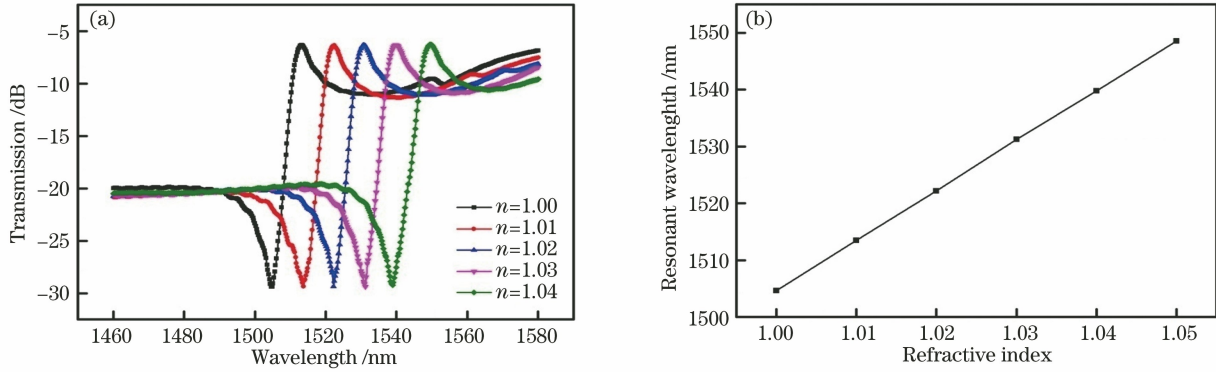


图 4 在不同 n 下,PCN-PCSNC 的透射光谱和共振波长。(a)透射光谱;(b)共振波长

Fig. 4 Transmission spectra and resonant wavelengths of PCN-PCSNC under different n . (a) Transmission spectra; (b) resonant wavelengths

图 5 展示了 PCN-PCSNC 的 F_{om} 与波长的关系。可以发现, F_{om} 最大值为 553。通过上述分析可以得出,该折射率传感器在灵敏度方面具有一定优势。此外,该设计可用于化学和环境监测等领域。

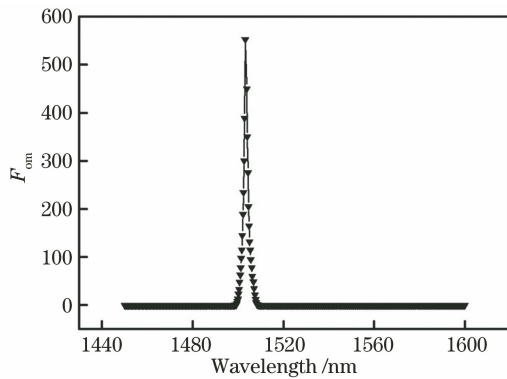


图 5 PCN-PCSNC 的 F_{om} 与波长的关系

Fig 5 Relationship between F_{om} of PCN-PCSNC and wavelength

3.1 PCN 晶格常数和中心孔径对传感性能的影响

为了分析传感器的性能与结构参数之间的关系,在保持其余器件参数不变的条件下,选取了不同的 PCN 晶格常数 a_1 。 a_1 的变化范围为 $410 \sim 450 \text{ nm}$,每间隔 10 nm 进行一次扫描。PCN 晶格常数的大小会影响光子晶体的带隙特性,随着 a_1 的增大,PCN 的禁带边缘模式红移,通过改变 PCN 的光子带隙可控制法诺剖面。图 6 (a)为不同 a_1 下 PCN-PCSNC 的透射光谱。可以发现,随着 a_1 的增大,PCN 与 PCSNC 耦合产生的法诺共振的

透射峰发生了微小红移,透射谷发生了蓝移,光谱斜率减小,光场局域性变弱。同时,消光比明显减小,从 -22.5 dB 减小至 -32.3 dB 。图 6 (b)展示了 PCN-PCSNC 的 S 和 F_{om} 随 a_1 的变化。可以发现,灵敏度 S 和品质因子 F_{om} 随着 a_1 的增大先呈现缓慢递增的趋势(F_{om} 的变化较为明显),之后衰减,并且两者同时在 $a_1 = 430 \text{ nm}$ 处达到最大值。

接着,在保持其余参数不变的情况下,对 PCN 的中心孔径 r_1 进行优化扫描, r_1 的变化范围为 $106 \sim 118 \text{ nm}$,每间隔 3 nm 进行一次扫描。图 7(a)为不同 r_1 下 PCN-PCSNC 的透射光谱。可以发现,当 PCN 中心孔径逐渐增大时,谐振波长发生了蓝移。此外, r_1 增大会导致 PCN 的带隙边缘模式蓝移,故透射峰和透射谷也会向高频段移动,但谐振强度大小基本保持不变。图 7(b)展示了 PCN-PCSNC 的 S 和 F_{om} 随 r_1 的变化。可以发现,灵敏度 S 随着 r_1 的增大而增大,并且在 $r_1 = 115 \text{ nm}$ 处达到最大,而 F_{om} 始终在减小。综合考虑 S 与 F_{om} 后,选择 r_1 为 112 nm 。

3.2 PCSNC 狭缝宽度和耦合间隙对传感特性的影响

在保持其余器件参数不变的条件下,对 PCSNC 的狭缝宽度 ω_{slot} 进行了优化处理。 ω_{slot} 的变化范围为 $40 \sim 60 \text{ nm}$,每间隔 5 nm 进行一次扫描。由于在 PCSNC 中加入狭缝结构时,光场会被局限在空气槽中,因此在一定程度上增加了光场与待测物之间的相互作用,进而实现了灵敏度的提高。图 8(a)为不同 ω_{slot} 下 PCN-PCSNC

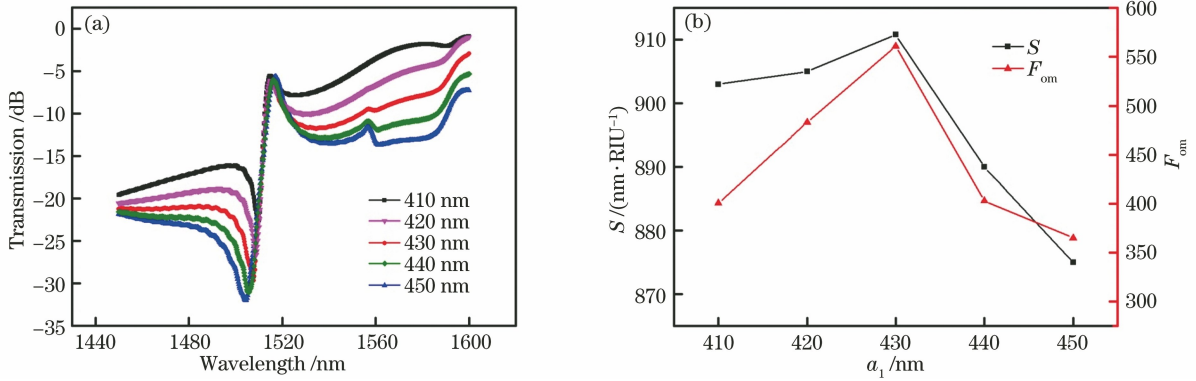


图 6 a_1 对传感特性的影响。(a)不同 a_1 下 PCN-PCSNC 的透射光谱;(b) PCN-PCSNC 的 S 和 F_{om} 随 a_1 的变化
Fig. 6 Influence of a_1 on sensing characteristics. (a) Transmission spectra of PCN-PCSNC under different a_1 ;
(b) S and F_{om} of PCN-PCSNC varying with a_1

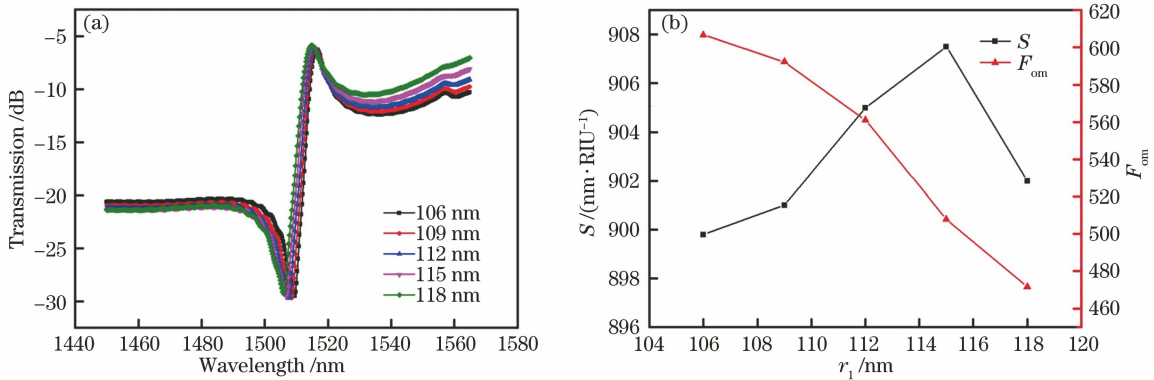


图 7 r_1 对传感特性的影响。(a)不同 r_1 下 PCN-PCSNC 的透射光谱;(b) PCN-PCSNC 的 S 和 F_{om} 随 r_1 的变化
Fig. 7 Influence of r_1 on sensing characteristics. (a) Transmission spectra of PCN-PCSNC under different r_1 ;
(b) S and F_{om} of PCN-PCSNC varying with r_1

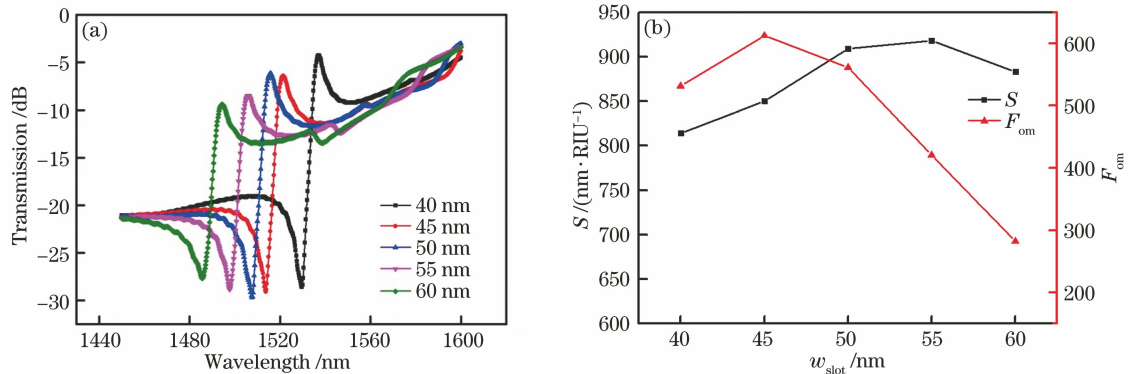


图 8 w_{slot} 对传感特性的影响。(a)不同 w_{slot} 下 PCN-PCSNC 的透射光谱;(b) PCN-PCSNC 的 S 和 F_{om} 随 w_{slot} 的变化
Fig. 8 Influence of w_{slot} on sensing characteristics. (a) Transmission spectra of PCN-PCSNC under different w_{slot} ;
(b) S and F_{om} of PCN-PCSNC varying with w_{slot}

的透射光谱。可以发现,随着狭缝宽度的增加,谐振谱线蓝移,且透射率和消光比同时减小。图 8(b)展示了 PCN-PCSNC 的 S 和 F_{om} 随 w_{slot} 的变化。可以发现,当狭缝宽度超过一定值时,耦合传感器的 F_{om} 将大幅度减小。因此,在设计器件时,需结合工艺制作的难易程度,合理选取狭缝的宽度。综合考虑 F_{om} 和灵敏度 S 后,选择 w_{slot} 为 50 nm。

接着,分析 PCN 与 PCSNC 的耦合间距 g 对传感特性的影响, g 的变化范围为 40~80 nm,以 10 nm 为步长进

行扫描。图 9(a)为不同 g 下 PCN-PCSNC 的透射光谱。可以发现,随着耦合间距的增大,耦合损耗增加,透射率与消光比减小,光谱斜率增大,此现象符合耦合模理论。图 9(b)展示了 PCN-PCSNC 的 S 和 F_{om} 随 g 的变化。可以发现,在 $g = 70$ nm 处灵敏度达到最大。综合考虑 F_{om} 和灵敏度 S 后,选择 g 为 60 nm。

对已有文献中关于法诺共振以及含有狭缝耦合结构的折射率传感器进行了汇总,并对其性能进行了比较,如表 1 所示。同时,考虑到实际制作工艺,采用控制变量的

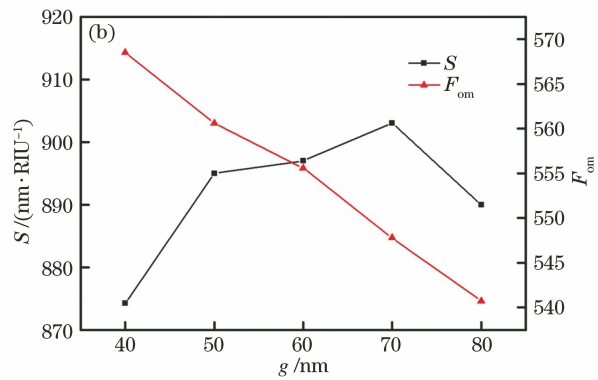
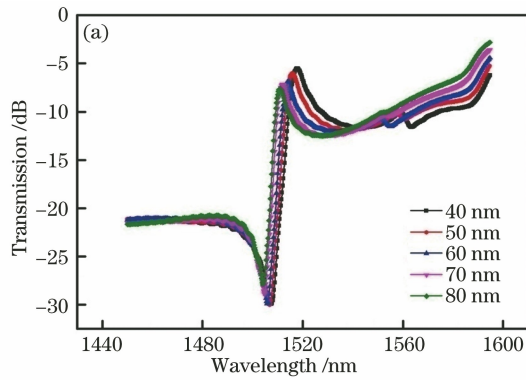


图 9 g 对传感特性的影响。(a)不同 g 下 PCN-PCSNC 的透射光谱;(b) PCN-PCSNC 的 S 和 F_{om} 随 g 的变化

Fig. 9 Influence of g on sensing characteristics. (a) Transmission spectra of PCN-PCSNC under different g ; (b) S and F_{om} of PCN-PCSNC varying with g

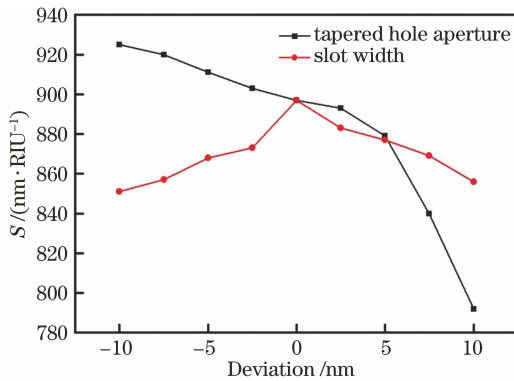


图 10 锥形孔孔径和狭缝宽度偏差在 10 nm 内灵敏度的变化
Fig. 10 Sensitivity variation for deviations of tapered hole aperture and slot width within 10 nm

表 1 基于法诺共振及狭缝耦合结构的折射率传感器性能比较
Table 1 Performance comparison of refractive index sensors based on Fano resonance and slot coupling structure

Refractive index sensor	F_{om}	$S /$ ($\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$)	Extinction ratio /dB
Ref. [2]		344	29.08
Ref. [27]		508	
Ref. [13]	5100	34	21.53
Ref. [28]	2000	500	
Proposed	553	897	29.24

方法,取微纳器件偏差为 10 nm^[25-26],依次对锥形孔孔径和狭缝宽度进行容差分析,如图 10 所示。可以发现,在容差范围内,器件的灵敏度始终大于 780 nm/RIU。当器件的锥形孔孔径和狭缝宽度增加时,离散态共振(PCSNC 产生的共振)波长发生变化。然而,该结构中的法诺共振由 PCSNC 共振离散态耦合 PCN 带隙边缘模式形成,法诺共振透射谱的减小,不利于监测共振波长的漂移,同时也会影响灵敏度,故该器件的制造工艺成本较高。

4 结 论

仿真并分析了 PCN 侧耦合 PCSNC 结构中法诺共振的传感特性。通过调节 PCN 的带隙边缘模式,可控制

法诺谐振系统的透射谱。利用狭缝几何结构实现强光限制,进而形成小模态体积,提高了 PCN-PCSNC 结构的灵敏度。当环境折射率增加时,透射谱红移,进而实现传感的功能。仿真结果表明,所提结构的灵敏度为 897 nm/RIU,消光比为 -29.24 dB,但 F_{om} 较低。最后,对该模型中存在的微小结构进行容差分析,为实现片上集成的折射率传感器设计提供了理论参考。

参 考 文 献

- Niehusmann J, Vörckel A, Bolivar P H, et al. Ultrahigh-quality-factor silicon-on-insulator microring resonator[J]. Optics Letters, 2004, 29(24): 2861-2863.
- Liu C J, Sang C L, Wu X S, et al. One-dimensional photonic crystal groove microring resonators and its sensing characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2413002. 刘春娟, 桑常林, 吴小所, 等. 一维光子晶体槽型微环谐振器及其传感特性[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2413002.
- Liu H, Bai B B, Zhang Y Z, et al. High-sensitivity temperature measurement based on SPR in gold-PDMS-coated photonic crystal fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0404003. 刘海, 白冰冰, 张砚曾, 等. 基于 SPR 效应的金-PDMS 涂覆光子晶体光纤高灵敏度温度测量[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0404003.
- Wang C C, Fan R H, Wu G Z, et al. Characteristics of all-optical-fiber magnetic field sensor based on magnetic fluid coating and cooling tapering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 010602. 汪成程, 范荣华, 吴根柱, 等. 基于磁流包覆冷却拉锥全光纤磁场传感器特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 010602.
- Shopova S I, Rajmangal R, Holler S, et al. Plasmonic enhancement of a whispering-gallery-mode biosensor for single nanoparticle detection[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(24): 243104.
- Goyal A K, Dutta H S, Pal S. Recent advances and progress in photonic crystal-based gas sensors[J]. Journal of Physics D, 2017, 50(20): 203001.
- 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.
- Wang G C, Shen A, Zhao C Y, et al. Fano-resonance-based ultra-high-resolution ratio-metric wavelength monitor on silicon[J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 544-547.
- Miroshnichenko A E, Flach S, Kivshar Y S. Fano resonances in nanoscale structures[J]. Reviews of Modern Physics, 2010, 82(3): 2257-2298.
- Liang Y Z, Lu M D, Chu S W, et al. Tunable plasmonic resonances in the hexagonal nanoarrays of annular aperture for biosensing[J]. Plasmonics, 2016, 11(1): 205-212.
- 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.
- [12] Dong G N, Wang Y L, Zhang X L. High-contrast and low-power all-optical switch using Fano resonance based on a silicon nanobeam cavity[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 5977-5980.
- [13] Chen Y, Gao X B, Xu Y M, et al. Fano resonance-sensing mechanism of photonic crystal nanobeam side-coupling aperture chirped photonic crystal nanobeam cavity structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1123002.
陈颖, 高新贝, 许扬眉, 等. 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[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1123002.
- [14] Chen Y, Zhou X D, Zhou J, et al. Fano-resonance sensing mechanism of sub-wavelength dielectric grating-metal Ag thin film-periodic photonic crystal hybrid structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0413001.
陈颖, 周鑫德, 周健, 等. 亚波长介质光栅-金属 Ag 薄膜-周期性光子晶体混合结构的 Fano 共振传感机理[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0413001.
- [15] Wang Y P, Wang X H, Wang P. Identifying single cell types via whispering gallery mode optical microcavities[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(2): 0207028.
王亚平, 王秀翊, 王璞. 回音壁模式光学微腔识别细胞类型[J]. *中国激光*, 2020, 47(2): 0207028.
- [16] Saha P, Sen M. A slotted photonic crystal nanobeam cavity for simultaneous attainment of ultra-high Q-factor and sensitivity[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(9): 3602-3609.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Maksymov I S, Miroshnichenko A E. Active control over nanofocusing with nanorod plasmonic antennas[J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 5888-5894.
- [20] 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.
- [21] Du H, Zhang W, Littlejohns C G, et al. Ultra-sharp asymmetric Fano-like resonance spectrum on Si photonic platform[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 7365-7372.
- [22] Lee C. Nanophotonic biosensors using hexagonal nanoring resonators: computational study [J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2011, 10(1): 013001.
- [23] Yun B F, Zhang R H, Hu G H, et al. Ultra sharp Fano resonances induced by coupling between plasmonic stub and circular cavity resonators[J]. *Plasmonics*, 2016, 11(4): 1157-1162.
- [24] Gao Y Y, Zhan S P, Liu Q, et al. Controllable plasmonic sensing based on Fano resonance in a cavity coupled defective MDM waveguide[J]. *Journal of Physics D*, 2016, 49(26): 265109.
- [25] Li T Y, Gao D S, Zhang D M, et al. High-Q and high-sensitivity one-dimensional photonic crystal slot nanobeam cavity sensors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(6): 689-692.
- [26] Seidler P, Lister K, Drechsler U, et al. Slotted photonic crystal nanobeam cavity with an ultrahigh quality factor-to-mode volume ratio[J]. *Optics Express*, 2013, 21(26): 32468-32483.
- [27] Fu Y L, Deng C S, Ma S S. Design and analysis of refractive index sensors based on slotted photonic crystal nanobeam cavities with sidewall gratings[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(4): 896-903.
- [28] Wen Y J, Sun Y, Deng C Y, et al. High sensitivity and FOM refractive index sensing based on Fano resonance in all-grating racetrack resonators[J]. *Optics Communications*, 2019, 446: 141-146.