

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

基于对称破缺的导模共振耦合超窄带滤波器设计

马宇赞, 和梦丽, 赵亚丽, 李旭峰

引用本文:

马宇赞, 和梦丽, 赵亚丽, 等. 基于对称破缺的导模共振耦合超窄带滤波器设计[J]. 光电工程, 2024, 51(7): 240065.

Ma Y Z, He M L, Zhao Y L, et al. A design of broken-symmetry-based ultra-narrowband filter assisted by coupled guided-mode resonance[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(7): 240065.

<https://doi.org/10.12086/oee.2024.240065>

收稿日期: 2024-03-20; 修改日期: 2024-05-14; 录用日期: 2024-05-16

相关论文

用于可见光波段切趾成像的宽带消色差超表面滤波器

李柱, 王长涛, 孔维杰, 王彦钦, 郭迎辉, 李雄, 马晓亮, 蒲明博, 罗先刚
光电工程 2021, 48(5): 200466 doi: [10.12086/oee.2021.200466](https://doi.org/10.12086/oee.2021.200466)

光纤集成化高分辨率无标记差分显微成像系统

罗昊, 侯梦蝶, 徐良, 杨臻垚, 匡翠方, 曾祥龙, 朱大钊
光电工程 2023, 50(12): 230181 doi: [10.12086/oee.2023.230181](https://doi.org/10.12086/oee.2023.230181)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.oejournal.org/oee>



OE_Journal



Website

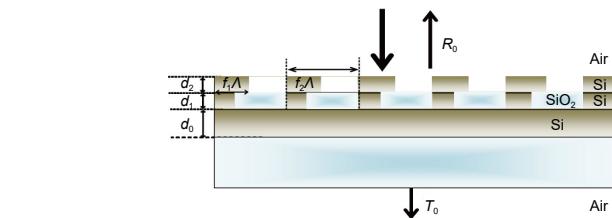


DOI: 10.12086/oee.2024.240065

基于对称破缺的导模共振耦合超窄带滤波器设计

马宇赞¹, 和梦丽¹, 赵亚丽², 李旭峰^{1,3*}¹太原科技大学应用科学学院, 山西 太原 030024;²晋中学院材料科学与工程系, 山西 晋中 030600;³朔州市平鲁区产业研究院, 山西 朔州 036800

摘要: 为实现超窄带滤波器在光通讯、光传感领域的应用需求, 本文提出了一种在非对称光栅波导结构中引入耦合导模共振, 来完成对特定波长进行高效传输滤波。该滤波结构由集成在硅基波导上的两个具有同周期但不同填充因子的堆叠亚波长光栅构成。光从堆叠光栅中的顶部垂直入射, 通过调节底部光栅的厚度和填充因子, 可激发多波导模式的非对称共振耦合。仿真结果表明, 利用该对称破缺导模共振耦合原理, 在满足高边带抑制比的前提下, 产生极强的电场增强, 不仅能实现 0.005 nm 的超窄带滤波效果, 而且还具有很高的传输效率, 可达到 99%。

关键词: 亚波长光栅; 导模共振; 超窄带滤波; 耦合**中图分类号:** TN713**文献标志码:** A

马宇赞, 和梦丽, 赵亚丽, 等. 基于对称破缺的导模共振耦合超窄带滤波器设计 [J]. 光电工程, 2024, 51(7): 240065

Ma Y Z, He M L, Zhao Y L, et al. A design of broken-symmetry-based ultra-narrowband filter assisted by coupled guided-mode resonance[J]. Opto-Electron Eng, 2024, 51(7): 240065

A design of broken-symmetry-based ultra-narrowband filter assisted by coupled guided-mode resonance

Ma Yuzan¹, He Mengli¹, Zhao Yali², Li Xufeng^{1,3*}¹College of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;²Department of Materials Science and Engineering, Jinzhong College, Jinzhong, Shanxi 030600, China;³Industrial Research Institute of Pinglu District, Shuzhou, Shanxi 036800, China

Abstract: In order to realize the application requirements of ultra-narrowband filters in the field of optical communication and optical sensing, this paper proposes a design concept of introducing a coupled guided mode resonance in an asymmetric grating waveguide structure to complete the efficient transmission filtering for specific wavelengths. The filtering structure consists of two added subwavelength gratings stacked on a silicon-based waveguide with the same period but different filling factors. Light waves are incident vertically from the top of the composite gratings, and the asymmetric resonant coupling of multiple waveguide modes can be excited by adjusting the thickness and filling factor of the bottom grating. Numerical simulations show that extremely strong

收稿日期: 2024-03-20; 修回日期: 2024-05-14; 录用日期: 2024-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62105131); 太原科技大学研究生联合培养示范基地项目 (JD2022007)

*通信作者: 李旭峰, xfl@tyust.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

electric field enhancement can be generated using this symmetry-broken guided-mode resonant coupling. Under the premise of satisfying the high sideband rejection ratio, the structure not only realizes the ultra-narrowband filtering effect of 0.005 nm, but also has a high transmission efficiency of 99%.

Keywords: subwavelength grating; guided mode resonance; ultra-narrow band filtering; coupling

1 引言

光波段窄带滤波器 (Optical narrowband filter, ONF) 在光通信、光传感和微纳光刻等众多领域发挥着重要作用^[1-5]。自上个世纪八九十年代起, 受益于微纳加工技术在集成光学领域的成功应用, 许多基于光子晶体、亚波长光栅以及光子晶体与亚波长光栅结合的光窄带滤波器件已被相继提出并得到了长足的发展^[6-10]。在实际应用中, 对于具有光子晶体结构的滤波器而言, 为了最大限度地降低滤波频谱的半高宽 (full width at half maximum, FWHM) 值, 就需要增加由不同材料和不同厚度组成的堆叠层数, 因此不可避免地增加了滤波结构的复杂性。反之, 对由亚波长光栅结构组成的滤波器, 当处于导模共振的工作状态时, 利用相对简单的结构, 便可获得较好的窄带滤波效果。

通常情况下, 在由亚波长光栅和平面波导层组成的介质结构中, 当入射光波进入到光栅中时, 其与光栅相互作用所产生的衍射波会在波导中形成导模。其中的部分导模是漏模, 能够沿着光栅传播并与外部电磁场发生耦合, 从而激发产生导模共振。导模共振对光栅周期、厚度、填充因子以及衬底材料等参数的变化非常敏感, 这在光窄带滤波器和光学传感器的设计应用领域得到了深入研究^[11-16]。除此漏模之外, 其中的非漏导模模式也非常值得关注。非漏模是一种束缚态, 具有较高的对称性, 其与对称破缺 (broken symmetry, BS) 的概念相关联。对称破缺起源于粒子物理学的研究, 用简洁的话来说, 就是该概念使数学形式保持对称, 而使物理结果保持不对称。系统表现的对称性减少, 通常与相变相关, 2020 年,

北京大学 Zhou 等人基于对称性破缺原理, 通过调控参数将一侧表面的成对半整数拓扑荷重新合并成整数拓扑荷, 形成不依赖镜面仅朝一个表面辐射能量的单向辐射导模共振态^[17]。2021 年 Mesli 等人报道了一种通过对称破缺的导模共振来实现高性能折射率传感器的设计研究^[18], 在该项研究中, 通过对称破缺导模共振设计的折射率传感器, 具有超窄带滤波特性, 其半高宽非常小并且与产生的场增强因子密切相关。

通过增加场增强因子来产生超窄半高宽, 除利用对称破缺导模共振之外, 也可采用混合模式耦合共振的办法实现。Li 等人早在 2018 年就利用等离子体和光子晶体导模模式之间的混合耦合共振实现了高灵敏度的 SPR 传感器设计^[19], 基于此原理, Ge 等人报道了场增强非线性导模共振光栅中低阈值光学双稳态开关的设计^[20], 此外, Mamun 等人还报道了用于 SWIR 多光谱图像传感器的双周期导模共振滤波器^[21]设计, 2023 年 Qian 等人报道了通过金属辅助层和对称破缺结构, 来实现高 Q 值 (表示为传感灵敏度与传感分辨率的比值) 导模共振传感器的设计研究^[22]。

基于上述研究, 本文提出了一种在对称破缺光栅波导中通过引入导模共振耦合, 来实现超窄带滤波器的设计。该设计通过在硅基波导层上集成两个同周期但不同填充因子的堆叠亚波长光栅来实现。仿真结果表明, 通过对结构参数进行优化, 在对称破缺导模共振耦合之下, 由于产生的极强电场增强, 不仅实现了 $FWHM=0.005\text{ nm}$ 的超窄带滤波效果, 同时还具备高效的传输效率, 这对于高 Q 值光学元器件的应用设计, 具有积极的借鉴参考意义。

2 仿真模型

图 1 展示了利用堆叠亚波长光栅设计的追求最小半高宽的透射滤波器。S 偏振光 (电场偏振方向垂直于入射面) 垂直入射到由硅材料 (Si, $n_c=3.48$) 制成的顶部光栅中。这些堆叠的光栅具有相同周期 Λ 但不同的填充因子 f_1 和 f_2 。堆叠光栅和硅平面波导层的厚度分别表示为 d_2 、 d_1 和 d_0 。基底玻璃 (SiO_2 , $n_s=1.45$) 位于硅波导层下方。对此由上下两层光栅堆叠构成的超窄带滤波结构, 在实际加工过程, 可采用自下而上的微纳加工手段而获得。具体流程简述为: 先在硅波导表面利用纳米压印光刻技术进行曝光、刻蚀、清洗处理; 而后在光刻处理后的硅光栅表面进行二氧化硅薄膜沉积并利用 CMP 工艺进行减薄抛光处理; 最后在经处理后的底层硅光栅表面, 重复利用纳米压印光刻技术进行顶层硅光栅结构的加工。为确保仿真计算结果的准确性, 本文采用了二维的严格耦合波

(rigorous coupled wave analysis, RCWA) 算法。计算过程中, 空间被划分为不同的区域, 包括覆盖层、光栅层和基底。在这些区域中, 采用空间谐波展开技术, 来求解麦克斯韦方程组并在光栅区域得到耦合波方程, 然后根据光栅顶部和底部界面的电磁场边界条件规则, 则可计算出最终的衍射效率。

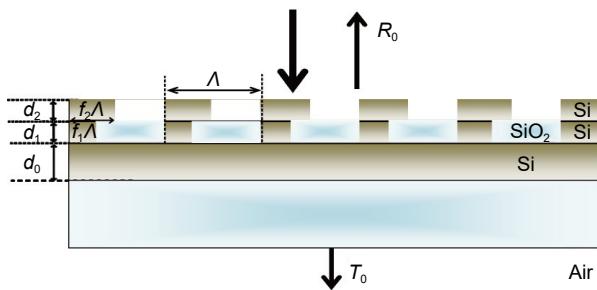


图 1 由顶部和底部光栅组成的超窄带透射滤波器示意图

Fig. 1 Schematic of the ultra-narrowband transmission filter consisting of the top and bottom gratings

3 结果讨论

亚波长光栅是周期远小于入射光波波长的光学结构, 其高阶衍射模式局限于光栅区内部, 无法与自由空间相耦合, 具有独特的衍射特征。其低阶衍射波能够在光栅以外的区域自由传输, 从而增强光栅的衍射效率。此时, 其光栅周期 Λ 应该满足:

$$\Lambda < \frac{\lambda_0}{n_c \sin \theta_0 + \max(n_c, n_s)}, \quad (1)$$

式中: λ_0 代表入射波长; n_c 代表覆盖层材料折射率; n_s 代表基底材料折射率; θ_0 代表光波的入射角。

根据等效介质理论, 当远离共振区域, 亚波长光栅层可视为一种均匀的介质波导层, 同时该光栅结构本身也是相位匹配的元件。波导层的折射率即光栅层

的等效折射率(n_{slit}), 必须同时大于入射空间和结构衬底层的折射率 n_c 、 n_s , 才能引发导模共振。产生导模共振的共振条件为

$$\begin{cases} \frac{\lambda_0}{\Lambda} - n_0 \sin \theta_0 = n_e, \\ k_0 n_e = \beta \end{cases}, \quad (2)$$

其中: k_0 代表真空中的波数, n_e 是指波导层的有效折射率, β 表示光栅波导的传播常数, 可用式(3)求解

$$\begin{cases} Ah_g k_0 = m\pi + \arctan\left(\frac{B}{A}\right) + \arctan\left(\frac{C}{A}\right), m = 0, 1, 2, \dots \\ A = \sqrt{n_{\text{slit}}^2 - n_e^2}, B = \sqrt{n_e^2 - n_c^2}, C = \sqrt{n_e^2 - n_s^2} \end{cases}, \quad (3)$$

其中, h_g 代表波导层厚度。

光栅的有效折射率为

$$n_{\text{slab}} = \left[f n_g^2 + (1-f) n^2 + \frac{\pi^2}{3} (1-f)^2 (n_g^2 - n^2)^2 \left(\frac{\Lambda}{\lambda_0} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (4)$$

根据式(2)给出的导模共振激励条件, 该超窄带滤波器的部分结构参数优化选择为 $\Lambda=1029$ nm、 $f_2=0.5$ 、 $d_2=300$ nm 和 $d_0=500$ nm, 底部光栅的其他参数 d_0 和 f_2 的优化结果如图 2、图 3 所示。在保持其他参量不变的前提下, 通过调节底部光栅的厚度和填充因子, 可实现在特定波长处(见图中 Mode 3)具备超窄带和高边带抑制比的滤波效果, 二者调节本质起因于改变结构参量导致的位相调节, 相比之下, Mode 3 的共振模式对于光栅膜厚度的改变更为敏感。同时, 利用此原理, 选择在特定的滤波波长处, 可开展基于光波位相干涉调制的超灵敏传感测量研究^[23]。

如图 2 所示, 先不考虑底部光栅的影响, 当 $d_1=0$ nm 时, 图中只出现共振模式 Mode 1, 其半高宽

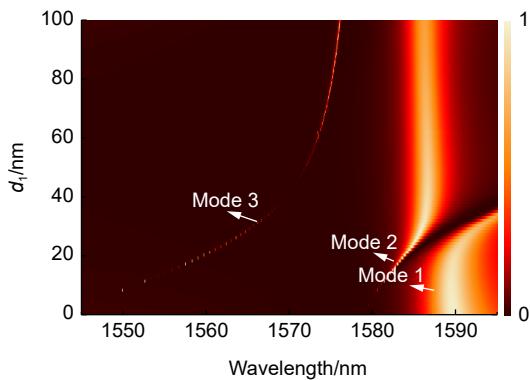


图 2 透射率与入射波长和光栅厚度 d_1 的函数关系

Fig. 2 Transmittance as function of the incident wavelength and the grating thickness d_1

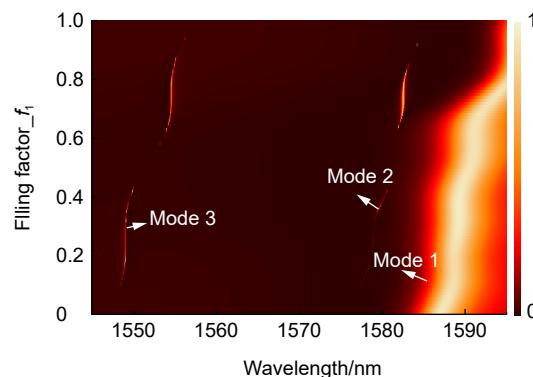


图 3 $d_1=8$ nm 时透射率与入射波长和 f_1 填充因子的函数关系

Fig. 3 Transmittance as function of the incident wavelength and the filling factor f_1 for $d_1=8$ nm

$FWHM=7.5\text{ nm}$ 。本质上, 它是由入射光波在经光栅衍射后耦合到平面波导层中形成的低级导模。该导模的形成满足驻波形条件, 其共振特性可通过改变 d_0 的厚度实现周期性调制, 见图 4。通过持续增加 d_1 的厚度激发产生 Mode 2 和 Mode 3 的共振模式。共振模式 Mode 3 远离共振模式 1 和 2, 二者之间相互作用弱, 但在 Mode 1 和 2 之间由于相互作用的缘故, 存在 Fano 共振。Fano 型共振源于两种不同共振模式的相互耦合, 这里是导模共振 Mode 2 与波导模 Mode 1 之间的相互耦合作用。随底层光栅膜厚的改变, 入射衍射波由于受膜厚改变导致传输相位调制的缘故, 产生共振峰位置发生改变, 并在导模共振与波导模式之间相互转化, 图 2 中具体表现为共振峰值半高宽的改变, Mode 1 与 Mode 2 均是如此, 二者严格归属于上述两种共振类型中的哪类, 要视具体的产生条件而定。

共振模式 Mode(1-3) 峰位、半高宽等因素除光栅参量膜厚 d_1 影响之外, 同时, 也受到光栅参量占空比的影响。图 3 表明, 随占空比 f_1 增加, 共振模 Mode 2 与 Mode 3 的共振峰位红移, 依照等效介质理论与式 (4), 占空比 f_1 增加, 该光栅结构的等效折射率增加, 同时依照式 (3), 该等效折射率参量增加, 会使得相应光栅波导或邻近介质波导的传播常数增加, 从而导致产生共振峰产生红移现象, 见式 (2); 此外, 根据准静态电磁场边界条件, 在不同非金属介质界面两侧电位移通量相等, 因此对于较低折射率的介质一侧, 产生的电场强度则较大, 大的电场强度使得场与相近物质的相互作用增强, 探测灵敏度增强, 从而产生共振峰的半高宽变窄, 反之, 则变宽, 如图 3 中 Mode 2、Mode 3 所示, 随占空比 f_1 的增加, 相应

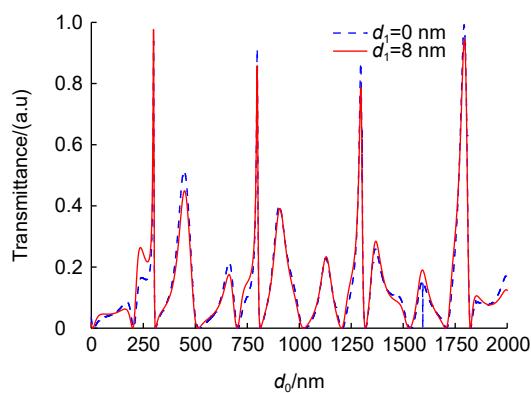


图 4 $\lambda_1=1589\text{ nm}$ 处 $d_1=0\text{ nm}$ 和 8 nm 波导层厚度 d_0 的透射率函数

Fig. 4 Transmittance as function of the waveguide laryer thickness d_0 at $\lambda_1=1589\text{ nm}$ for $d_1=0\text{ nm}$, 8 nm

光栅的等效折射率增加, 因此产生电场的强度降低, 最终导致产生共振峰的半高宽加宽。

图 5 显示了当 $d_1=8\text{ nm}$ 时不同共振模式 Mode 1、Mode 2 和 Mode 3 的滤波效果。综合比较来看, 对于 Mode 1, 从图 6 中对应共振波长 $\lambda_0=1589\text{ nm}$ 处的电场强度分布来看, Mode 1 是一种被完全限制在波导层内的导模。其半高宽值最大, 对应产生的场增强因子 (field enhancement factor, FEF) 为 $FEF=65$ 。受底层光栅厚度的调节, 其可在导模共振 ($FWHM$ 变小) 与限制性导模之间变化 ($FWHM$ 变大), 同样的调控也适用于 Mode 2。对于 Mode 2, 在共振波长 $\lambda_0=1580.4\text{ nm}$ 处, 其对应半高宽值极小。图 6 与图 7 相比, 二者均表现为主要的导波模式, 但却存在本质的不同。针对 Mode 2, 如图 7 所示虽有部分的漏模存在辐射到顶部光栅中去, 然则大部分仍被限制在波导层中, 表现出典型的导模共振特征, 其 $FEF=3800$, 比 Mode 1 的数值 $FEF=65$ 大 58 倍之多。

对于 Mode 3, 在共振波长 $\lambda_0=1550\text{ nm}$ 处, 图 8 给出的数值 $FEF=68000$, 分别是图 6、图 7 对应结果的 2 个和 1 个数量级之多, 因此也获得了超窄的半高宽。从波导层内来看, 图 8 不同于图 6、图 7 所示的波导基模, 其中有更高阶的波导模式被激发产生, 这意味着有更多的远场衍射光波转化为近场光, 变为非漏模式, 也因此获得更强的场增强因子, 此外, 导模也在顶部光栅中被激发产生, 如图 8 所示, 在这些不同的导模漏模与非漏模式之间存在强烈耦合作用。在这种耦合过程中, 底部光栅起到了微扰的作用, 具体分析, 从图 1 来看, 一方面, 在无底部光栅介入前提下, 当有入射电磁波从顶部垂直入射时, 在此情形

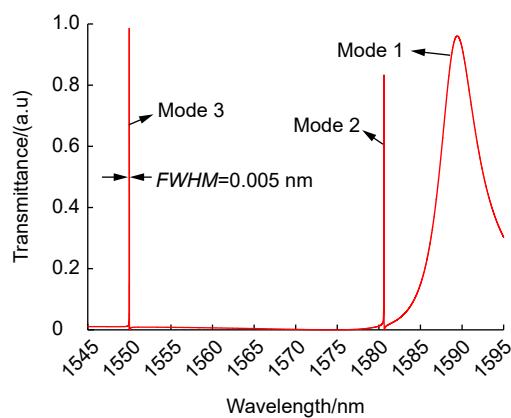


图 5 $d_1=8\text{ nm}$ 透射率与入射波长的函数关系

Fig. 5 Transmittance as function of the incident wavelength for $d_1=8\text{ nm}$

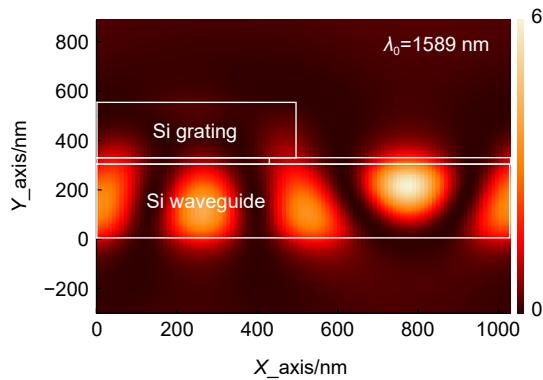
图 6 $\lambda_0=1589$ nm 处 $d_i=8$ nm 导模的电场强度

Fig. 6 Electric field intensity distribution of the guided mode for $d_i=8$ nm at $\lambda_0=1589$ nm

下, 相较整个亚波长光栅滤波系统而言, 无论自身结构外形或产生的衍射电磁场分布均具有左右分布对称的特点; 另一方面, 保持垂直入射波各项参数不变, 在当有底部薄介质光栅介入时, 由于上、下层光栅同材质、同周期但不同占空比的设置特点, 这使得原有结构的对称性遭到破坏, 也即引入对称破缺。该对称破缺, 亦可在保持系统结构左右对称性不变的前提下, 通过对入射波的入射角度细微调节实现, 二者具有等效下, 均使得整个滤波系统的对称性缺失, 最终产生了由对称破缺导致产生的多模式耦合共振, 获得极强的电场增强因子并由此给出超窄的滤波效果。对照图 5 的频谱分布图来看, 受益于该对称破缺导致的多模耦合共振, Mode 3 具有极佳的边带抑制比和高效的窄带传输效率。本论文结果与近年来发表文献^[24-27]结果比对, 见表 1。

进一步研究 Mode 3 的频谱特性, 如图 9 所示。图中显示了 Mode 3 在改变不同的光栅周期下对透射

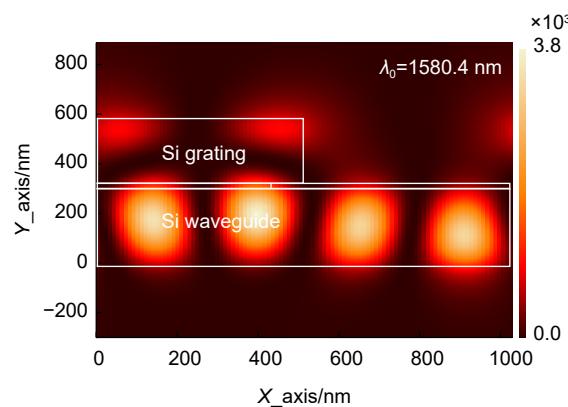
图 7 $\lambda_0=1580.4$ nm 处 $d_i=8$ nm 导模的电场强度

Fig. 7 Electric field intensity distribution of the guided mode for $d_i=8$ nm at $\lambda_0=1580.4$ nm

频谱滤波的影响。从图 9 中可以看出, 当光栅周期 Λ 分别为 1028 nm、1029 nm、1030 nm 时对波长 1549 nm~1551 nm 范围进行参数化扫描, 相应产生的透射光谱发生共振红移从 1549.34 nm 到 1550.65 nm, 其变化量为 1.31 nm。整个红移过程中对滤波特征参量如半高宽、边带抑制以及传输效率的影响很小, 类似的表现也发生在因减小光栅周期产生的共振峰蓝移中, 围绕滤波中心波长 1550 nm, 其工作波长范围界定为 $\lambda_0=(1550\pm 2)$ nm。

表 1 同类型工作结果对比图

Table 1 Comparative chart of results for the same type of work

	Wavelength/nm	FWHM/nm
Ref.1	1550	3.2
Ref.2	1550	0.28
Ref.3	1550	0.11
Ref.4	1550	0.023
Our work	1550	0.005

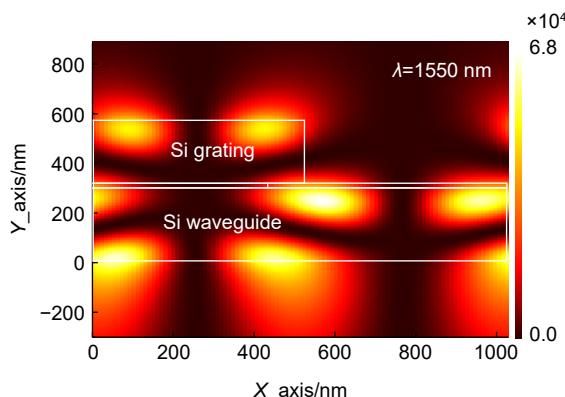
图 8 $\lambda_0=1550$ nm 处 $d_i=8$ nm 导模的电场强度

Fig. 8 Electric field intensity distribution of the guided mode for $d_i=8$ nm at $\lambda_0=1550$ nm

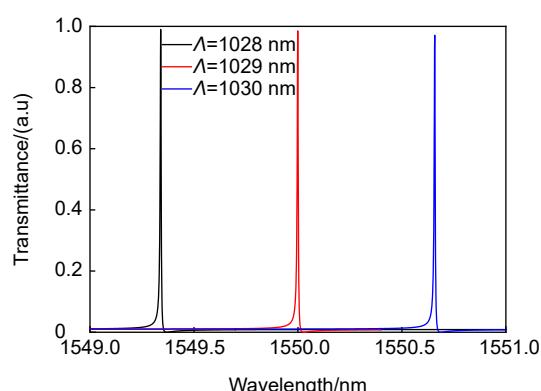


图 9 模式 3 的透射率与入射波长的函数关系

Fig. 9 Transmittance as function of the incident wavelength for Mode 3

4 结 论

本文采用二维的严格耦合波法, 对由非对称堆叠光栅结构产生的传输滤波进行了研究。研究表明, 对由入射光波经亚波长光栅衍射耦合产生的导模模式, 存在漏模与非漏模式的区别。基于导模共振原理, 通过优化结构参数, 在考虑对称破缺引入并调控导致导模共振漏模与非漏模混合耦合共振的情形下, 受到双重叠加效果的影响, 使得共振产生了极强的场增强现象(表现为更多的衍射波被转换为高级的近场模式), 并由此提供了极窄的滤波半高宽 $FWHM=0.005\text{ nm}$, 同时伴随有较好的边带抑制比和高效的传输效率。增强的电场能够增加光场与被检测物质的相互作用, 这对光学传感器而言, 设计如何在确保高传感分辨率的前提下, 进一步提高传感的灵敏度有一定的指导借鉴意义; 同时, 也由于激励外场是垂直入射到光栅表面的缘故, 故只有低阶衍射波分量参与其中耦合共振, 因此也限制了该传感器传感灵敏度的进一步提升。

利益冲突:所有作者声明无利益冲突

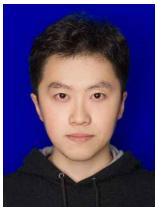
参 考 文 献

- [1] Abutoama M, Abdulhalim I. Self-referenced biosensor based on thin dielectric grating combined with thin metal film[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(22): 28667–28682.
- [2] Song M W, Wang C T, Zhao Z Y, et al. Nanofocusing beyond the near-field diffraction limit via plasmonic Fano resonance[J]. *Nanoscale*, 2016, **8**(3): 1635–1641.
- [3] Hei X W, Zhang L X, Liu J H, et al. Tunable narrowband filter based on guided mode resonance[J]. *Acta Photon Sin*, 2017, **46**(12): 1223001.
- [4] Pu M B, Hu C G, Huang C, et al. Investigation of Fano resonance in planar metamaterial with perturbed periodicity[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(1): 992–1001.
- [5] Luo X G. Subwavelength artificial structures: opening a new era for engineering optics[J]. *Adv Mater*, 2019, **31**(4): 1804680.
- [6] Zheng Z, Xu L, Huang L J, et al. Third-harmonic generation and imaging with resonant Si membrane metasurface[J]. *Opto-Electron Adv*, 2023, **6**(8): 220174.
- [7] Cai S J, Zong S, Liu X S, et al. Efficiently spatial field localization enabled second-harmonic and sum-frequency generation in an etchless LiNbO_3 layer by guided resonant quasi-bound states in the continuum[J]. *Appl Phys Lett*, 2023, **123**(11): 111701.
- [8] Li X F, Peng W, Zhao Y L, et al. A subwavelength metal-grating assisted sensor of kretschmann style for investigating the sample with high refractive index[J]. *Chin Phys B*, 2016, **25**(3): 037303.
- [9] Kita D M, Michon J, Johnson S G, et al. Are slot and sub-wavelength grating waveguides better than strip waveguides for sensing?[J]. *Optica*, 2018, **5**(9): 1046–1054.
- [10] Szeghalmi A, Kley E B, Knez M. Theoretical and experimental analysis of the sensitivity of guided mode resonance sensors[J]. *J Phys Chem C*, 2010, **114**(49): 21150–21157.
- [11] Wang X X, Chen H W, Zhu J K, et al. Research on surface Plasmon refractive index sensing of gold Nano cone array and gold film coupling structure[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(12): 220135.
- [12] Hemmati H, Ko Y H, Magnusson R. Fiber-facet-integrated guided-mode resonance filters and sensors: experimental realization[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(3): 358–361.
- [13] Kuo W K, Syu S H, Lin P Z, et al. Tunable sensitivity phase detection of transmitted-type dual-channel guided-mode resonance sensor based on phase-shift interferometry[J]. *Appl Opt*, 2016, **55**(4): 903–907.
- [14] Ding Z X, Chen Y, Xu F. Optical microfiber resonator: principle and applications[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(8): 220006. 丁梓轩, 陈烨, 徐飞. 微光纤光学谐振器的原理与应用[J]. 光电工程, 2022, **49**(8): 220006.
- [15] Yan H, Huang L J, Xu X C, et al. Unique surface sensing property and enhanced sensitivity in microring resonator biosensors based on Subwavelength grating waveguides[J]. *Opt Express*, 2016, **24**(26): 29724–29733.
- [16] Zhou W C, Li K W, Wei Y L, et al. Ultrasensitive label-free optical microfiber coupler biosensor for detection of cardiac troponin i based on interference turning point effect[J]. *Biosens Bioelectron*, 2018, **106**: 99–104.
- [17] Zhou H Y, Peng C, Yoon Y, et al. Observation of bulk Fermi arc and polarization half charge from paired exceptional points[J]. *Science*, 2018, **359**(6379): 1009–1012.
- [18] Mesli S, Yala H, Hamidi M, et al. High performance for refractive index sensors via symmetry-protected guided mode resonance[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(14): 21199–21211.
- [19] Li L, Huang T Y, Zhao X, et al. Highly sensitive SPR sensor based on hybrid coupling between Plasmon and photonic mode[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2018, **30**(15): 1364–1367.
- [20] Ge Z Q, Hei X, Wang L R, et al. Low-threshold optical bistability in field-enhanced nonlinear guided-mode resonance grating nanostructure[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(17): 4156–4159.
- [21] Mamun M A, Sayeed R M, Gigante M, et al. Dual-period guided-mode resonance filters for SWIR multi-spectral image sensors[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(9): 2240–2243.
- [22] Qian L Y, Gu T C, Xu S Z, et al. Guided-mode resonance sensors with ultrahigh bulk sensitivity and figure of merit assisted by a metallic layer and structural symmetry-breaking[J]. *Opt Express*, 2023, **31**(2): 1844–1857.
- [23] Sahoo P K, Sarkar S, Joseph J. High sensitivity guided-mode-resonance optical sensor employing phase detection[J]. *Sci Rep*, 2017, **7**(1): 7607.
- [24] Wang F, Cheng Y Z, Wang X, et al. Narrow band filter at 1550 nm based on quasi-one-dimensional photonic crystal with a mirror-symmetric heterostructure[J]. *Materials (Basel)*, 2018, **11**(7): 1099.
- [25] Sani M H, Ghanbari A, Saghaei H. An ultra-narrowband all-optical filter based on the resonant cavities in rod-based photonic crystal microstructure[J]. *Opt Quant Electron*, 2020, **52**(6): 295.
- [26] Hu T Z, Yang Z, Yang Z C, et al. Grating-based metasurfaces for ultra-narrow near-infrared bandpass filtering with wide out-of-band suppression[J]. *Opt Express*, 2024, **32**(8): 13309–13321.

- [27] Peng W, Zhang G J, Lv Y S, et al. Ultra-narrowband absorption filter based on a multilayer waveguide structure[J].

Opt Express, 2021, 29(10): 14582–14600.

作者简介



马宇赞(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向为微纳光学理论与器件应用设计。

E-mail: mayuzan111@163.com



【通信作者】李旭峰(1980-),男,博士,教授,主要研究方向为半导体装备与技术应用、近场光学理论与技术应用、太阳能电池。

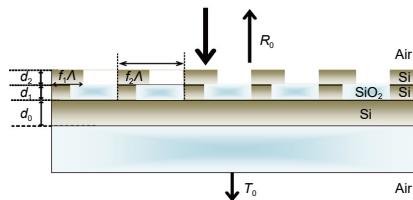
E-mail: xfli@tyust.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

A design of broken-symmetry-based ultra-narrowband filter assisted by coupled guided-mode resonance

Ma Yuzan¹, He Mengli¹, Zhao Yali², Li Xufeng^{1,3*}



Schematic of the ultra-narrowband transmission filter consisting of the top and bottom gratings

Overview: In the field of modern communication systems and signal processing, frequency selectivity is one of the keys to achieving efficient and reliable communication. With the continuous development of communication technology and growing application demands, the requirements for frequency selectivity in signal transmission are getting higher and higher. As an important frequency selective component with narrow bandwidth, high quality factor and good frequency selectivity, ultra-narrowband filters are widely used in the fields of radio frequency identification, radar systems, communication networks and astronomical observation. Conventional wideband filters cannot meet the frequency selectivity requirements in some specific application scenarios because they have large bandwidths and poor stopband attenuation characteristics. In contrast, ultra-narrowband filters with narrower bandwidth and better stopband characteristics can effectively suppress unwanted frequency components, thus improving the signal transmission quality and system performance. Therefore, the design, optimisation and performance analysis of ultra-narrowband filters are of great significance, which can promote the advancement of communication systems and signal processing technologies, and meet the needs of different application scenarios. However, the design and optimisation of ultra-narrowband filters face a number of challenges, such as the balance between frequency selectivity and bandwidth, the trade-off between stopband attenuation and passband loss, and the limitations of the manufacturing process. Therefore, an in-depth study of the design principles, optimisation methods, and performance analysis of ultra-narrowband filters is of great significance in overcoming these challenges and improving the performance and adaptability of the filters.

This study focuses on the design and analysis of ultra-narrow bandpass filters based on subwavelength gratings with a symmetric breaking structure. The objective is to investigate the potential of these filters and explore their performance characteristics. The research methodology involves numerical simulations and optimization techniques. The subwavelength gratings are designed and optimized by adjusting key parameters such as grating period, duty cycle, and thickness. The rigorous coupled-wave analysis (RCWA) method is employed to analyze the transmission characteristics of the filters, including transmittance and full width at half maximum(FWHM). The results demonstrate the successful realization of ultra-narrow bandpass filters based on subwavelength gratings with a symmetric breaking structure. These filters exhibit Very high transmittance, narrow bandwidth within a specific wavelength range. The filter structure is verified by numerical calculations and simulations to have an ultra-narrow band filtering effect of 0.005 nm and 99% transmittance. In conclusion, the proposed ultra-narrow bandpass filters based on subwavelength gratings with a symmetric breaking structure show great potential for applications in optical communication systems, spectral analysis, and laser technology. Future work can focus on further optimizing the filter design to enhance its performance characteristics and exploring wider application domains.

Ma Y Z, He M L, Zhao Y L, et al. A design of broken-symmetry-based ultra-narrowband filter assisted by coupled guided-mode resonance[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(7): 240065; DOI: 10.12086/oee.2024.240065

Foundation item: Project supported by National Natural Science Foundation of China (62105131), and Taiyuan University of Science and Technology Graduate Student Joint Training Demonstration Base Project (JD2022007)

¹College of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China; ²Department of Materials Science and Engineering, Jinzhong College, Jinzhong, Shanxi 030600, China; ³Industrial Research Institute of Pinglu District, Shuzhou, Shanxi 036800, China

* E-mail: xfli@tyust.edu.cn