

DOI:10.16136/j.joel.2022.08.0757

一种表面等离激元干涉型窄带梳状滤波器优化设计研究

陈露, 赵洪霞*, 程培红, 丁志群, 王敬蕊, 王卓远

(宁波工程学院 电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315016)

摘要:为了压窄梳状滤波器单信道带宽,提高有限频带资源利用率,本文提出一种表面等离激元(surface plasmon polaritons, SPPs)干涉型梳状滤波器。在单信道带宽被压窄的同时,伴随通带透射率和信道数大幅提升。利用时域有限差分(finite difference time domain, FDTD)法数值模拟了梳状滤波器设计参数对透射光谱的影响,探究了产生机理,优化了设计结构。研究结果证明,梳状透射光谱单信道超窄带宽是SPPs和石墨烯微腔双重干涉的结果。梳状透射光谱主要集中在1—1.24 μm 近红外波段,单信道带宽最优值可达4.2 nm,信道数高达18个。同时可通过调控顶层二氧化硅(SiO_2)的宽度实现相邻信道间距、单信道带宽和信道数的需求选择,尤其梳状光谱是由滤波器结构材料自身耦合共振激发的,结构简单,更易于片上集成。

关键词:梳状滤波器;单信道带宽;表面等离激元(surface plasmon polaritons, SPPs);石墨烯微腔

中图分类号: O436.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)08-0792-07

Optimal design of a narrow-band surface plasmon polaritons interference comb filter

CHEN Lu, ZHAO Hongxia*, CHENG Peihong, DING Zhiqun, WANG Jingrui, WANG Zhuoyuan

(School of Electronic and Information Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315016, China)

Abstract: To narrow the single-channel bandwidth of the comb filter and increase the utilization rate of limited frequency band resources, a surface plasmon polaritons (SPPs) interference comb filter was proposed in this paper. A significant increase in pass band transmittance, narrowing of the single-channel bandwidth and channel numbers was achieved by this filter. To explore the physical mechanism and optimize the filter structure, the effect of the structural parameters of the comb filter on the transmission spectrum was numerically simulated by finite difference time domain (FDTD) method. Experiment result shows that the single-channel ultra-narrow bandwidth of the comb transmission spectra results from dual interference of SPPs and graphene microcavity. As a result, the comb transmission spectra are mainly concentrated in the near-infrared bands (1—1.24 μm). By optimizing the structure parameters, the single-channel bandwidth can reach 4.2 nm, and the number of channels is 18. Additionally, the adjacent channel spacing, single-channel bandwidth and channel numbers can be selected by adjusting the width of the silica top layer. Particularly the comb channel is excited by its material coupling resonance in the filter, which means that it is simple and more suitable for on-chip integration.

Key words: comb filter; single-channel bandwidth; surface plasmon polaritons (SPPs); graphene microcavity

* E-mail: zhxl228@163.com

收稿日期:2021-11-09 修订日期:2021-12-20

基金项目:浙江省基础公益研究计划项目(LGC19F050001, LGC20F050001)和国家级创新训练项目资助项目

1 引言

表面等离子元 (surface plasmon polaritons, SPPs) 是局域在金属-电介质界面的一种特殊电磁场形式。由于其独特的金属表面传输特性, SPPs 功能器件可以突破传统的光学衍射极限, 成为研究的热点。目前, 基于等离子元的功能结构主要集中在吸收器^[1,2]、探测器^[3]、调制器^[4]和滤波器^[5]。其中红外滤波器具有更为广泛的应用, 但大多数研究侧重于单信道滤波^[6-8], 有关多信道梳状滤波的研究和报道较少。主要有 GONG 等^[9]设计了一种基于金属-半导体-金属波导单元的准周期序列光栅结构多信道滤波器, 在 1.2—1.8 μm 频段内获得 10 个反射信道, 但单信道带宽均在 30 nm 以上; 罗昕等将折射率不同的两种绝缘介质交叉排列置于两层金属薄膜中间, 获得 1—2 μm 波长范围内 14 个信道, 虽然信道数和均衡度均有所提升, 但单信道带宽仍达到 7 nm 以上, 要满足实用化需求且充分利用有限带宽资源, 还需进一步改进和优化设计。

本文提出一种 SPPs 干涉型窄带梳状滤波器。通过在金属单缝结构表面引入石墨烯, 激发表面等离子元, 实现表面模态的局域增强, 进而由单缝边沿两侧集中的光场在石墨烯与金膜界面再次激发 SPPs, 两次激发的 SPPs 干涉产生梳状透射光谱。另外在单缝内设置有石墨烯填充层, 与上层石墨烯构成通带微腔, 产生二次干涉效应, 大幅压窄透射光谱中单信道带宽, 尤其在上层石墨烯与单缝对应区域的上下表面均设置有二氧化硅 (SiO_2) 介质层, 强烈抑制入射光波的反射增强透射率和均衡度。该干涉型梳状滤波器设计结构简单、体积小、易于片上集成, 且单信道带宽和信道数等特性参数方便可调, 在多信道数据采集和超声检测等领域均具有较好的应用前景。

2 结构模型与材料参数

2.1 结构模型

本文设计的超窄带梳状滤波器结构如图 1 所示, 该滤波器共 3 层, 最下层为金膜 (Au) 单缝, 单缝两侧金膜的宽度和厚度 (分别对应 x 轴方向和 y 轴方向的结构尺寸) 相等均为 w_1 和 d_1 ; 单缝上表面覆盖石墨烯层, 宽度和厚度分别设为 w_2 和 d_2 ; 最上层为 SiO_2 材料, 用于减弱光波反射, 增大透射率, 其宽度和厚度分别用 w_3 和 d_3 表示; 另单缝内自上而下设置 SiO_2 和石墨烯层, 用于形成通带微腔, 压窄单信道带宽和提高多信道均衡度。

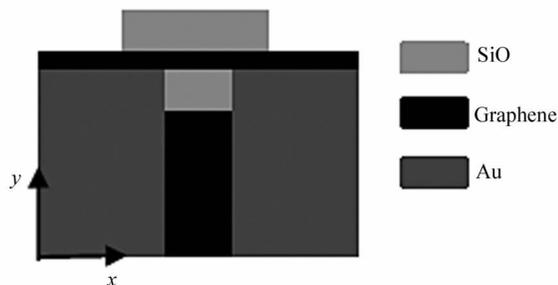


图 1 梳状滤波器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the comb filter

2.2 材料参数

本设计采用时域有限差分 (finite difference time domain, FDTD) 法仿真软件进行梳状透射光谱特性分析。模拟计算中贵金属 Au 材料的介电常数采用德鲁德 (Drude) 模型表达为^[10]:

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (1)$$

式中, ω_p 为等离子体频率, γ 为阻尼系数, ω 为入射光角频率。在近红外波段^[11], $\omega_p = 4.264 \times 10^{16}$ rad/s, $\gamma = 1.274 \times 10^{12}$ /s。

上层石墨烯的介电常数为^[12]:

$$\epsilon_c = 1 + i\sigma_g / \omega\epsilon_0\zeta, \quad (2)$$

式中, ζ 为石墨烯的厚度, σ_g 为石墨烯的电导率, ϵ_0 为真空介电常数。因单缝内填充石墨烯达上百层, 所以数值模拟中采用石墨在近红外波段的折射率值 2.39。

3 数值模拟与机理分析

本文利用 FDTD 软件研究了横磁 (transverse magnetic, TM) 偏振光场入射下, 即光波沿 y 轴反方向垂直入射滤波器结构时, 入射平面电磁波与滤波器结构相互作用的光谱特性。获得图 2 所示的梳状透射光谱, 其中 $d_1 = 90$ nm, $w_1 = 214.5$ nm; $d_2 = 1.7$ nm, $w_2 = 450$ nm; $d_3 = 11.4$ nm, $w_3 = 40$ nm, 单缝内填充的 SiO_2 和石墨烯层厚度分别为 4.444 nm 和 85.556 nm, 宽度均为 21 nm。根据文献^[13], 单层石墨烯的厚度设为 0.34 nm。

由图 2 可知, 梳状滤波通带集中在 1—1.24 μm 范围内, 处于近红外波段; 信道数高达 18 个, 相邻信道间距几乎均为 11.5 nm, 单信道带宽为 4.2 nm, 同时各信道透射率最低是 50.8%, 最高达 59.6%, 是单缝透射率的 8.57—12.8 倍。

为了明确梳状滤波器多信道、超窄带宽和高透

射率光谱特性产生的物理机理,图3给出了任选3个波长 $\lambda_1=1.07 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2=1.15 \mu\text{m}$ 和 $\lambda_3=1.23 \mu\text{m}$ 下的 X-Y 平面内电场稳定分布。

由图3可见,3个波长下电场均局域在石墨烯层,并延伸至单缝所在金膜层上表面的一定区域内,同时展现相长干涉的特性。经分步模拟和光场分析获悉多信道、超窄带输出是两次干涉的结果。首次干涉源于入射平面波在石墨烯下表面产生的 SPPs 与局域在单缝左右两端的光场在石墨烯下表面二次激发的 SPPs,在满足相位匹配条件下的相长干涉,如图4(a)所示,结构尺寸与图2相同。由图可知,干涉谱各信道透射率较低,最大只有 2.16%,且各信道透射率沿 x 轴正方向线性衰减,如虚线所示,进一步佐证了单缝端侧局域光场二次激发 SPPs 的正确性。同时由图4(b)任一波长 $1.06 \mu\text{m}$ 处的电场分布明显可见上层石墨烯处的干涉场和透射场(见局域放大图)。

二次干涉源于单缝内填充的石墨烯与上层石墨烯层间形成的微腔结构。图5(a)给出单缝内填充石墨烯后的透射光谱,结构尺寸与图2相同。对比图5(a)和图4(a)可知,各透射信道峰位波长略有偏移,伴随透射率明显提升,尤其长波一侧,最大透射率可达 85%;单信道带宽明显压窄,可达 4.2 nm。任选波长 $\lambda_3=1.05 \mu\text{m}$,透射场强分布如图5(b)所示,由图可知,干涉场明显强于图4(b)单次干涉的结果,不足是各信道透射率仍存在阶跃,均衡度不高。

梳状滤波器实用化的前提之一是具有较好的信道均衡度,本文根据等效介质理论在单缝所在石墨烯的上下表面同时设置 SiO_2 介质层,强烈抑制入射光波的反射增强透射率,同时提升信道均衡度。模拟结果如图2所示,对比图2和图5(a)可知,滤波器信道数由 13 个增加到 18 个,同时最低透射率由 31%

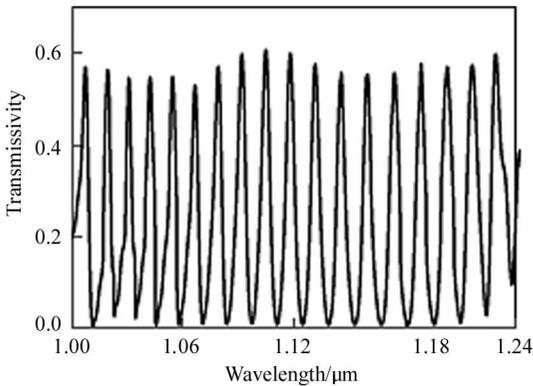


图2 梳状滤波器透射光谱 Fig. 2 Transmission spectrum of the comb filter

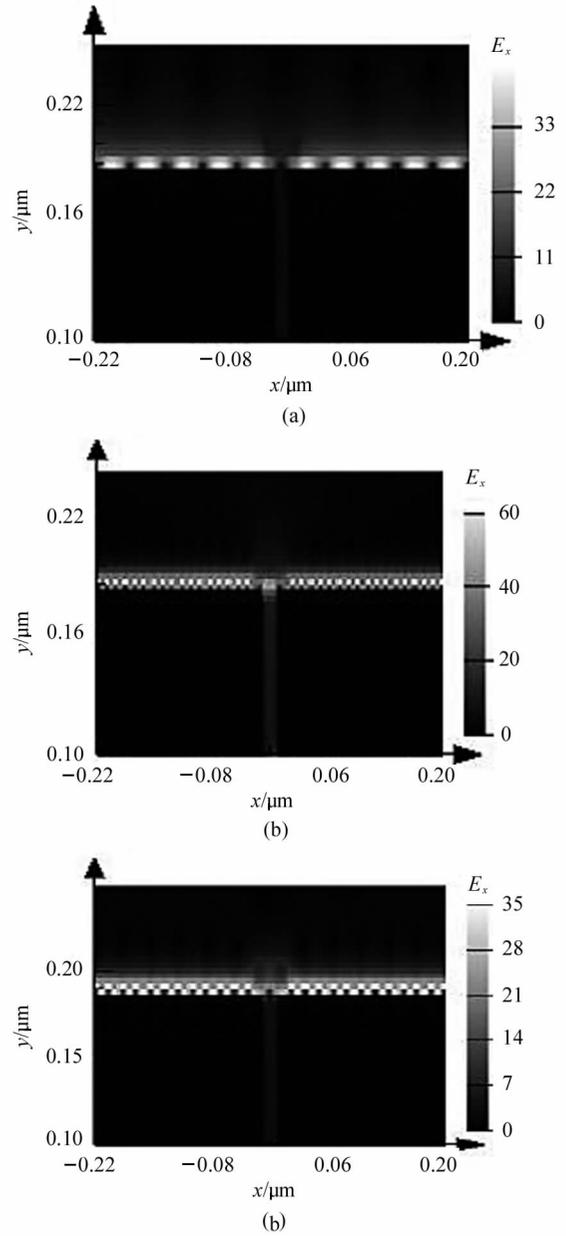
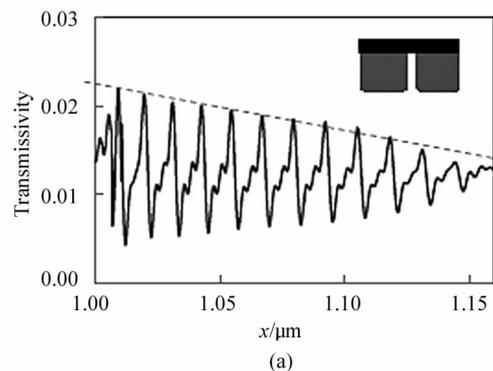


图3 不同透射波长下的电场分布:(a) $\lambda_1=1.07 \mu\text{m}$; (b) $\lambda_2=1.15 \mu\text{m}$; (c) $\lambda_3=1.23 \mu\text{m}$ Fig. 3 Distributions of electric field with different transmission wavelengths:(a) $\lambda_1=1.07 \mu\text{m}$; (b) $\lambda_2=1.15 \mu\text{m}$; (c) $\lambda_3=1.23 \mu\text{m}$



(a)

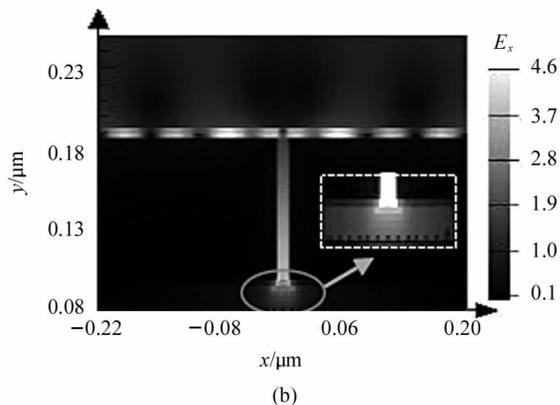


图 4 单缝覆盖石墨烯结构特性:(a) 透射光谱;
(b) $\lambda_4 = 1.06 \mu\text{m}$ 波长下的电场分布
Fig. 4 Structural properties of the single-slit covered grapheme: (a) Transmission spectrum;
(b) Electric field distribution with $\lambda_4 = 1.06 \mu\text{m}$

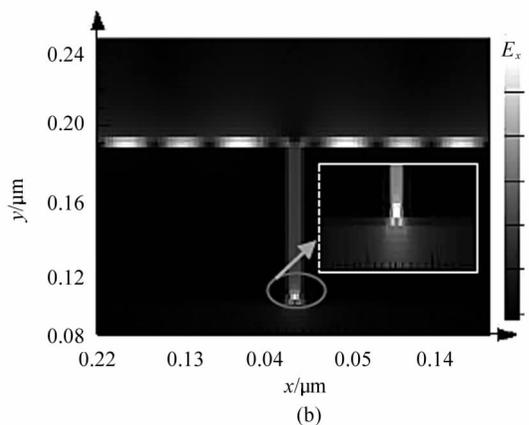
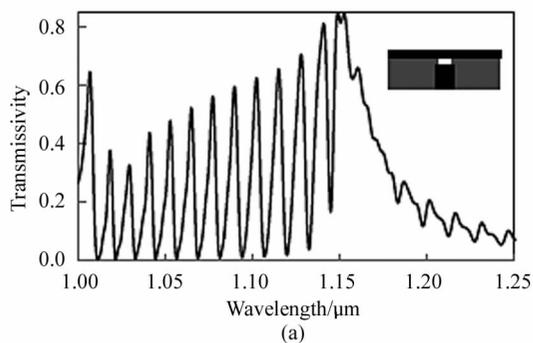


图 5 单缝内填充石墨烯后的滤波特性:
(a) 透射光谱; (b) $\lambda_5 = 1.05 \mu\text{m}$ 波长下的电场分布
Fig. 5 Filter characteristics of the single slit filled with grapheme: (a) Transmission spectrum;
(b) Electric field distribution with $\lambda_5 = 1.05 \mu\text{m}$

激发的 SPPs 和石墨烯微腔两次相长干涉,且于石墨烯上下表面同时设置 SiO_2 介质层所致。

4 优化设计

为了获得最佳梳状滤波器结构,本文详细分析了不同结构设计参数对滤波器梳状透射光谱的影响。

4.1 顶层 SiO_2 尺寸变化对梳状透射光谱的影响规律

由图 6(a)可知,当其他结构参数与图 2 相同时,随着顶层 SiO_2 介质层宽度从 $0.04 \mu\text{m}$ 增大到 $0.45 \mu\text{m}$,滤波通带内信道数变化明显,由 19 个减为 11 个;伴随透射率、相邻信道间距和单信道带宽均增大。以左边频为例,透射率增大 10.9%,相邻信道间距由 14.1 nm 增大到 25.4 nm,单信道带宽由 4.23 nm 增为 6.99 nm。原因是随着顶层 SiO_2 宽度的增大,更好地抑制反射光,导致表面等离子光波增强,致使石墨烯微腔表面反射率降低,由式^[14] $\Delta\lambda = 2(1-R)n_{\text{eff}}L/m^2\pi R^{1/2}$ (式中: R 为腔面反射率, n_{eff} 为腔内

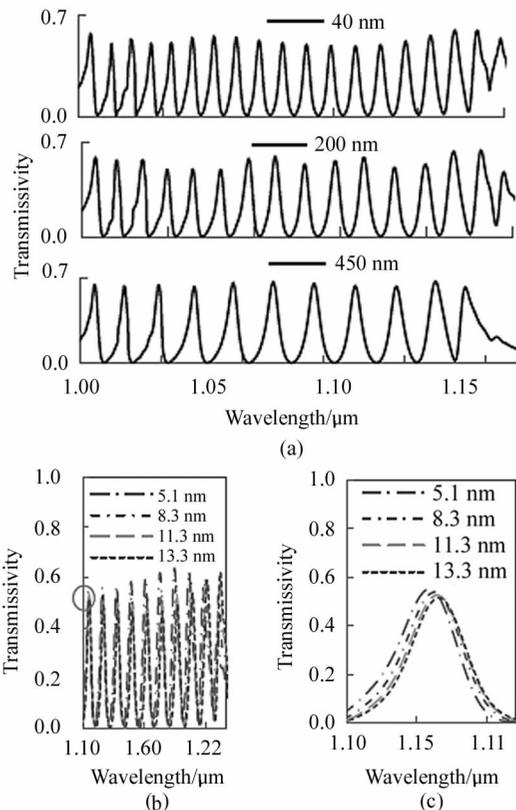


图 6 不同顶层 SiO_2 尺寸下梳状透射光谱:
(a) 宽度; (b) 厚度; (c) 局部放大图

Fig. 6 Comb transmission spectra with different top layer silicon dioxide parameters: (a) Width; (b) Thickness; (c) Local enlarged image

增大到 50%,均衡度提升显著。至此可知,梳状滤波器多信道、超窄带宽和高透射率光谱特性是由二次

有效折射率, L 为腔长)可知,随着 R 的减小,单信道带宽增大。

而由图 6(b)可知,当顶层 SiO_2 宽度恒定为 450 nm 时,随着其厚度的增大,各滤波信道峰值波长和透射率变化微小,如图 6(c)局部放大图所示。所以可通过调控顶层二氧化硅层的宽度实现相邻信道间距、单信道带宽和信道数的需求选择。

4.2 上层石墨烯尺寸对梳状透射光谱的影响规律

图 7 是不同上层石墨烯宽度和层数下的梳状透射光谱,其他结构参数与图 2 相同。由图 7(a)可知,随着上层石墨烯宽度的增大,滤波通带内信道个数由 13 个增大到 19 个,伴随透射率略有下降,单信道带宽由 6.91 nm 降到 4.4 nm。

图 7(b)是石墨烯宽度选择 450 nm,其他结构参数与图 2 相同的情况下,不同石墨烯层数下的梳状透射光谱。由图可知,在石墨烯厚度小于 6 层时,梳状透射光谱完全保持不变。但大于等于 6 层后,梳状透射光谱明显消失,因随着石墨烯层数的增加,单缝侧端局域光场变弱,激发的二次 SPPs 强烈衰减所致。

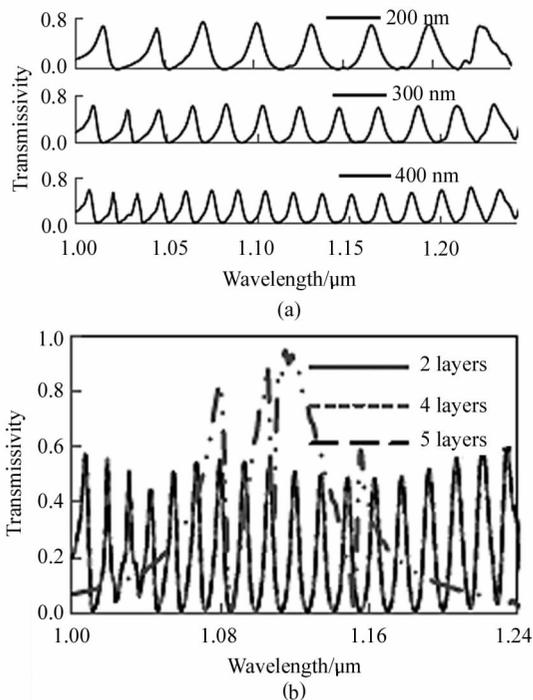


图 7 不同上层石墨烯的梳状透射光谱:(a) 宽度;(b) 层数
Fig. 7 Comb transmission spectra with different upper graphene dimensions:(a) Width;(b) Layers

4.3 不同单缝材料对滤波器透射光谱的影响规律

图 8(a)是不同单缝材料下滤波器的透射光谱,

其他结构尺寸与图 2 相同。由图可知:不同单缝材料的滤波器透射率变化明显,锗(Ge)单缝透射率最大,达 70%;而铟(In)单缝最小,只有 40%。原因是锗材料在近红外波段透射率最大,铟材料的透射率最小,如图 8(b)所示。虽然金材料的透射率处于锗和铟之间,但信道数和单信道带宽均优于锗,所以本文选择贵金属金作为单缝材料。

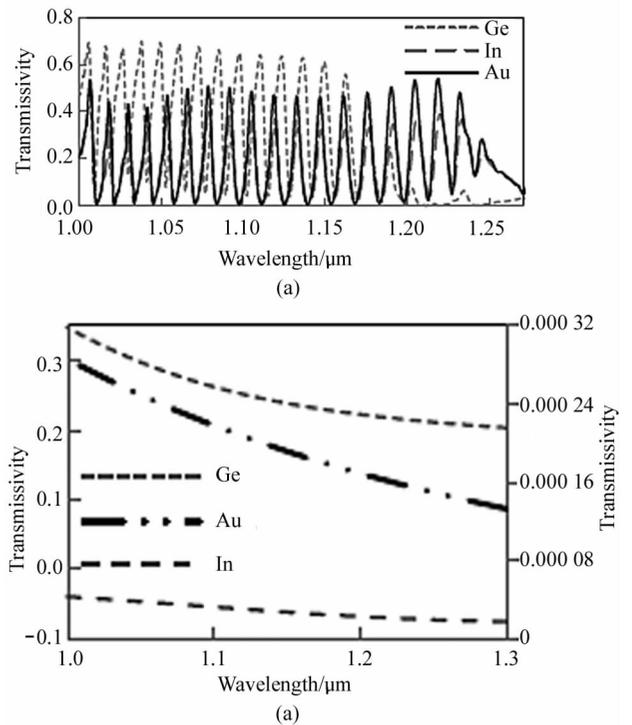


图 8 不同单缝材料及滤波器结构透射光谱:
(a) 透射光谱;(b) 单缝材料透射率

Fig. 8 Transmissivity spectra of different single-slit materials and filter structures:
(a) Transmission spectra;
(b) Transmissivity of the single slit material

4.4 单缝内填充的石墨烯与 SiO_2 厚度比变化对梳状透射光谱的影响规律

图 9 是单缝内填充的石墨烯与 SiO_2 厚度比不同获得的梳状透射光谱,其他结构参数与图 2 相同。由图 9(a)可知,随着石墨烯与 SiO_2 比例的减小,即 SiO_2 填充层厚度的增大,梳状透射光谱右移(见图 9(b)局部放大图)。光谱右移源于单缝内填充的 SiO_2 层增厚,使石墨烯微腔有效腔长增大,导致由式^[15] $2n_{\text{eff}}L + \lambda/2 = \lambda N$ 估算的微腔共振波长右移所致, N 为正整数。而根据文献[14]可知,对于某一固定干涉级,单信道带宽与腔长成正比,当石墨烯与 SiO_2 厚度比为 89 : 1 时,腔长最小,同时该腔长下微腔吸收

率低,导致透射率增强,所以优选该比例下的梳状光谱较佳。

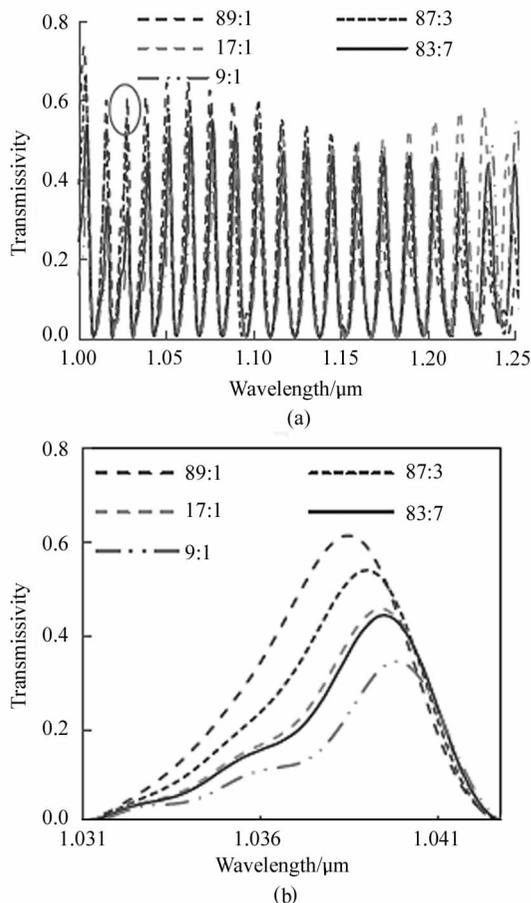


图 9 单缝内填充石墨烯与 SiO₂ 厚度比不同下的梳状透射光谱:
(a) 透射光谱; (b) 局部放大图

Fig. 9 Comb transmission spectra with different thickness ratios of graphene and silicon dioxide in the single slit:
(a) Transmission spectrum; (b) Local enlarged image

5 结 论

利用 Au 单缝-石墨烯-SiO₂ 介质层构建近红外波段 1—1.24 μm 范围内的梳状透射光谱。根据分步结构分析,证明梳状透射光谱是由 SPPs 和石墨烯微腔双重干涉产生,为了提升信道均衡度,在石墨烯的上下表面同时设置 SiO₂ 介质层,强烈抑制入射光波的反射,增强透射率,两次干涉实现了单信道带宽大幅压窄,更具实用性。通过模拟计算获知,单缝宽度为 21 nm、上层石墨烯层数为 1—5 层、顶层 SiO₂ 的宽度选择 40 nm、单缝内填充石墨烯与 SiO₂ 的厚度比为 89 : 1 时,有最佳的梳状滤波效果。尤其可通过调控顶层 SiO₂ 的宽度实现相邻信道间距、单信

道带宽和信道数的需求选择。

参考文献:

[1] LI Y Y, CHEN Q Q, WU B, et al. Broadband perfect metamaterial absorber based on the gallium arsenide grating complex structure[J]. Results in Physics, 2019, 15(1):102760.

[2] YANG L, JIANG S L, SUN G B, et al. Plasmonic enhanced near-infrared absorption of metal-silicon composite microstructure [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40 (21): 2124003.

杨柳,蒋世磊,孙国斌,等. 等离子元增强金属-硅组合微结构近红外吸收[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2124003.

[3] TANG J, LI J X, CHEN Q, et al. Surface plasmon enhanced silicon-based near-infrared photoconductive detector[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11):1113002.

唐恕,李家祥,陈沁,等. 表面等离子元增强硅基近红外光电探测器[J]. 中国激光, 2020, 47(11):1113002.

[4] KINDNESS S J, ALMOND N W, MICHAILOW W, et al. A Terahertz chiral metamaterial modulator [J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(21):200581.

[5] WANG S L, YIE Z W, PENG X L, et al. Study of highly-efficient composite waveguide modulator based on graphene[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5):0513003.

王少亮,叶子威,彭希亮,等. 基于石墨烯的高效复合波导调制器研究[J]. 光学学报, 2018, 38(5):0513003.

[6] WANG Y, XIONG H B, WANG G, et al. A SSPPs microwave band pass filter based on trapezoidal slot array [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2020, 42(1):8-11.

王远,熊厚博,王耿,等. 基于梯形槽阵列的 SPPs 型带通微波滤波器[J]. 压电与声光, 2020, 42(1):8-11.

[7] XIAO G L, DOU W Y, YANG H Y. Band-stop filter based on metal-insulator metal waveguide with asymmetric circular resonant cavities[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (5):0513001.

肖功利,窦婉滢,杨宏艳. 基于非对称圆形谐振腔金属-介质-金属波导结构的带阻滤波器[J]. 光学学报, 2019, 39(5):0513001.

[8] ZHENG M F, LI H J, CHEN Z Q, et al. Compact and multiple plasmonic nano-filter based on ultra-broad stopband in partitioned semicircle or semiring stub waveguide[J]. Optical Communications, 2017, 402(5):47-51.

[9] GONG Y K, LIU X M, WANG L R. High-channel-count plasmonic filter with the metal-insulator-metal Fibonacci-sequence gratings[J]. Optics Letters, 2016, 35 (3): 285-287.

[10] KUMAR M P, BHARAD S, HJHAM R A. Simplified high figure-of-merit prism-free surface plasmon resonance re-

- fractive index sensor based on self-adaptive angular interrogation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 114(19):014304.
- [11] XIN C, LI X, CHEN L. Surface plasmon resonance sensor based on a novel d-shaped photonic crystal fiber for low refractive index detection[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1):6800709.
- [12] MIN Y L, ZHAO H X, ZHENG Z, et al. Research on optimal design of a four-channel absorber[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2021, 32(5):451-456.
闵雨龙, 赵洪霞, 郑邹, 等. 一种四通道吸收器优化设计研究[J]. *光电子·激光*, 2021, 32(5):451-456.
- [13] SANGJUN L, HYUNJUN H, SANGIN K. Graphene perfect absorber of ultra-wide bandwidth based on wavelength-insensitive phase matching in prism coupling[J]. *Scientific Reports*, 2019, 19(8):11967.
- [14] SHI S X, ZHANG H X, LIU J S, et al. *Physical optics and applied optics*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2020: 92.
石顺祥, 张海兴, 刘劲松, 等. *物理光学与应用光学*[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2020: 92.
- [15] GAO J, SANG T, LI J L, et al. Double-channel absorption enhancement of graphene using narrow groove metal grating[J]. *Acta Physics Sinica*, 2018, 67(18):184210.
高健, 桑田, 李俊浪, 等. 利用窄刻槽金属光栅实现石墨烯双通道吸收增强[J]. *物理学报*, 2018, 67(18):184210.

作者简介:

赵洪霞 (1970—), 女, 硕士, 副教授, 主要从事光纤传感和微纳光器件方面的研究。