

槽型腔表面等离子体滤波器特性研究

商科峰

(西南交通大学 信息科学与技术学院 信息光子与通信研究中心, 四川 成都 610031)

摘要:为了降低槽型腔滤波器透射频谱的 FWHM(半高全宽), 采用 FDTD(时域有限差分法)对基于 MIM(金属—介质—金属)波导的单槽型腔滤波器和级联槽型腔滤波器结构进行了数值模拟, 并用耦合模理论对其透射频谱进行了分析。仿真结果表明, 级联槽型腔滤波器能够有效抑制透射频谱的 FWHM, 其透射频谱的 FWHM 仅为单槽型腔结构的 30%~40%。

关键词:表面等离子体激元; 耦合谐振; 波长滤波; 集成光学

中图分类号: TN252 文献标志码: A 文章编号: 1005-8788(2012)05-0050-02

Study of slot cavity surface plasmonic filter characteristics

Shang Kefeng

(Center for Information Photonics & Communications, School of Information Science & Technology,
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to reduce the Full Width at Half Maximum (FWHM) of slot-type cavity filters, we numerically simulate the structures of the Metal-Insulator-Metal (MIM) waveguide-based single slot- and cascaded slot-type cavity filters by using the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method and analyze their transmission spectra by using the coupled mode theory. The simulation results show that the FWHM of the transmission spectrum of the cascaded slot-type cavity filters can be effectively suppressed to be only about 30%~40% of that of the single slot-type cavity filters.

Key words: SPPs; coupled resonance; wavelength filtering; integrated optics

0 引言

SPPs(表面等离子体激元)是存在于金属和介质界面上的倏逝波, 其强度在垂直于金属和介质界面方向上呈指数衰减^[1]。因此能量被束缚在金属和介质的界面上, 此特性使其能够突破衍射极限。近年来, 由于纳米加工技术的日益成熟, 纳米结构的加工相对容易, SPPs 得以展现出在纳米领域中的优势, 从而成为研究者关注的热点。MIM(金属—介质—金属)波导能够将能量局限其内, 并且对光有良好的导向作用。因此各种基于 MIM 波导的微纳结构的光器件得到了广泛研究。

本文主要研究基于 MIM 波导槽型腔结构的表面等离子体滤波器。采用 FDTD(时域有限差分法), 结合 PML(完全匹配层)边界对基于 MIM 波导结构的单槽型腔滤波器和级联槽型腔滤波器进行数值仿真。通过对比发现: 级联槽型腔滤波器可以有效抑制输出频谱的 FWHM(半高全宽), 其输出频谱的 FWHM 可低至 23 nm, 约为单槽型腔滤波器透射频谱 FWHM 的 30%~40%。

1 理论分析与结构模型

文中的 MIM 波导结构主要由金属(银)和介质

(空气)组成。银的介电常数采用 Drude 模型描述: $\epsilon_m = \epsilon_\infty - \omega_p^2 / \omega(\omega + i\gamma)$, 其中, ϵ_m 为金属的介电常数, ϵ_∞ 为能带跃迁的介电常数, ω_p 为金属的等离子共振频率, γ 和 ω 分别为电子震荡频率和入射电磁波角频率。Drude 模型中的参数选择如下: $\epsilon_\infty = 3.7$, $\omega_p = 9.1$ eV, $\gamma = 0.018$ eV。这些参数模拟出的银的介电常数和文献[2] 中的实验数据相吻合。当入射波长远远大于波导的宽度 w 时, 只有 TM₀ 模式存在于 MIM 波导结构中, 其传播常数可由下式计算^[3]:

$$\epsilon_d k_m + \epsilon_m k_d \tanh(k_d w/2) = 0, \quad (1)$$

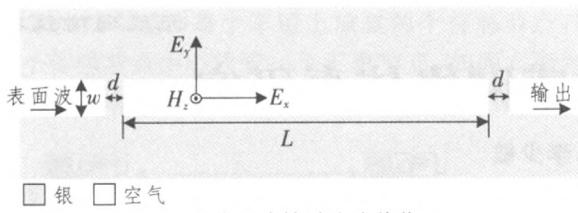
式中, $k_m = (\beta^2 - \epsilon_m k_0^2)^{1/2}$, $k_d = (\beta^2 - \epsilon_d k_0^2)^{1/2}$, ϵ_d 为介质的介电常数, β 为表面等离子体波的传播常数, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 是光波在真空中的波矢。

基于单槽型腔的滤波器结构如图 1(a)所示, 由输入波导、槽型腔和输出波导组成。而级联槽型腔结构在此基础上增加了一个相同长度的槽型腔, 如图 1(b)所示。

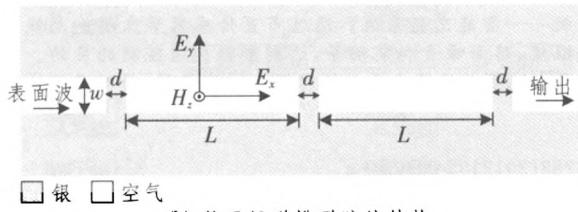
在单槽型腔结构中, 腔内产生驻波的共振波长满足公式^[3]:

$$\lambda_m = 2n_{\text{eff}} L / [m - \phi_r / (2\pi)]. \quad (2)$$

式中, ϕ_r 为光波在槽型腔两端反射所产生的



(a) 基于单槽型腔的结构



(b) 基于级联槽型腔的结构

图 1 基于单槽型腔和级联槽型腔的滤波器结构
相位延迟。根据耦合模理论, 基于单槽型腔滤波器的传输函数 t_1 和级联槽型腔滤波器传输函数 t_2 分别为^[4]:

$$t_1 = \frac{1/Q_w}{j2\delta + 1/Q_i + 1/Q_w}, \quad (3)$$

$$t_2 = \frac{1}{Q_w} \left[\frac{1}{j(2\delta + 1/Q_c) + 1/Q_i + 1/Q_w} - \frac{1}{j(2\delta - 1/Q_c) + 1/Q_i + 1/Q_w} \right], \quad (4)$$

式中, $\delta = (\omega - \omega_0)/\omega_0$, $Q_i = \omega_0 \tau_i / 2$, $Q_w = \omega_0 \tau_w / 2$, Q_c 和 τ_i 分别为与本征损耗相关的腔品质因子和衰减速率, Q_w 和 τ_w 分别为与波导耦合损耗相关的腔品质因子和衰减速率, Q_c 为级联腔之间的耦合品质因子。由式(3)可知, 单槽型腔结构透射频谱为洛伦兹型曲线, 带宽较宽。根据式(4)可得, 级联腔结构中, 原单腔下的简并模式被破坏, 频率 ω_0 处的共振峰值消失, 而在 ω_0 对称的两侧, 即 $\omega_0 - \omega_0/2Q_c$ 和 $\omega_0 + \omega_0/2Q_c$ 处产生频率共振, 透射频谱在这两个频率点出现共振峰。

2 仿真结果与分析

采用 FDTD 对结构进行了仿真分析, 边界条件为 PML。为了保证仿真的精确度, 取 x 方向和 y 方向上的仿真步长分别为 $\Delta x = \Delta y = 5 \text{ nm}$ 。

2.1 单槽型腔滤波器

基于图 1(a)所示的单槽型腔的滤波器结构, 耦合距离 $d = 10 \text{ nm}$, 槽型腔宽度 $w = 50 \text{ nm}$, 当槽型腔长度 L 分别为 270 和 390 nm 时, 透射谱如图 2 所示。腔长改变时, 透射峰值波长与腔长的关系如图 3 所示。

图 2 所示的仿真结果显示, 当腔长 L 分别为 270 和 390 nm 时, 透射峰值分别位于 915 和

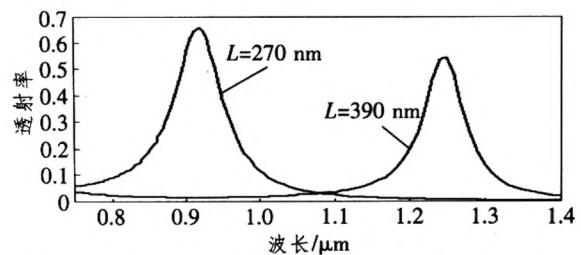
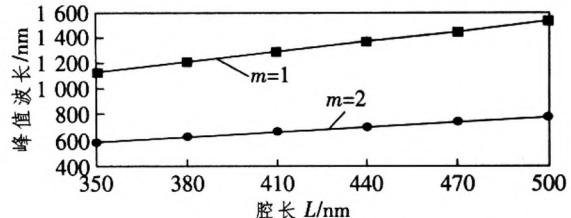


图 2 腔长度分别为 270 和 390 nm 时的透射谱

图 3 透射峰值波长和腔长 L 的关系

1 245 nm 处。根据式(1), 当入射波长为 915 和 1 245 nm 时, 有效折射率 n_{eff} 分别为 1.387 和 1.374, 取一阶($m = 1$), 将 $\lambda_m = 915 \text{ nm}$, $L = 270 \text{ nm}$ 代入式(2)中, 得到 $\phi_r = 1.14$; 当槽型腔的腔长为 390 nm 时, 将 $\phi_r = 1.14$, $n_{\text{eff}} = 1.374$ 代入式(2)中, 得到共振波长 λ_m 为 1 309 nm, 这与图 2 所示的仿真结果吻合。本文中, 只考虑槽型腔中一阶共振波长 λ_1 ($m = 1$) 和二阶共振波长 λ_2 ($m = 2$) 与腔长 L 的关系, 图 3 所示的仿真结果验证了式(2)中共振波长 λ_m 和槽型腔的长度 L 之间的线性关系。

2.2 级联槽型腔滤波器

基于图 1(b)所示的级联槽型腔的滤波器结构, 固定耦合距离 $d = 10 \text{ nm}$, 槽型腔宽度 $w = 50 \text{ nm}$, 当腔长度 $L = 270 \text{ nm}$ 时, 透射谱如图 4 中级联腔曲线所示。仿真结果显示, 透射频谱中出现了两个明显的透射峰(分别记为通道 1 和通道 2), 同前面的理论分析相吻合。图中的单腔曲线所示为单槽型腔结构的透射谱($L = 270 \text{ nm}$, $d = 10 \text{ nm}$, $w = 50 \text{ nm}$), 对应的 FWHM 为 82 nm。

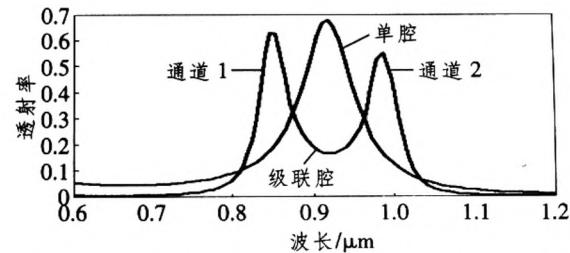


图 4 单槽型腔和级联槽型腔结构滤波器的透射谱

图 4 表明双腔级联的滤波器结构能够改善输出频谱的 FWHM, 同时增加了滤波通道。为了将通

(下转第 67 页)

表 2 4 种调度算法性能比较

算法	公平性	吞吐量	代码复杂度	有无 QoS
RR	最好	低	低	无
MAX C/I	差	最高	较复杂	无
PF	较好	较好	较复杂	无
QoS PF	较好	较好	最复杂	满足 LTE 业务的 QoS

4 结束语

对于现在宝贵的频段资源,如何有效地进行调度是目前需要关注的。常用的3种调度算法已经远远满足不了要求。本文所提出的基于QoS的PF调度算法,不但保证了用户公平性和可观的吞吐量,调度的用户数和所有用户的QoS业务也得到了保证,可以更好地适应LTE业务的多样性。

(上接第51页)

道1和通道2分离,根据文献[5]对结构进行了改进。第2个槽型腔水平位置上存在两个共振模式的波腹点,分别在这两个波腹点处设置输出波导,可分离两个共振模式。如图5所示,在第2个槽型腔上合适的位置处设置输出端口1和输出端口2,能够将通道1和通道2分离,端口1和端口2的透射谱如图6所示。其关键参数设置如下: $L = 270 \text{ nm}$, $d = 10 \text{ nm}$, $w = 50 \text{ nm}$, $\Delta L = 5 \text{ nm}$ 。分离后的单通道与单槽型腔的滤波通道相比较,滤波带宽更窄,通道1和通道2的FWHM分别为23和32 nm,分别为单槽型腔结构透射谱FWHM的28%和38%。

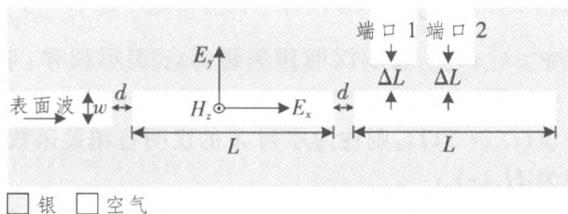


图5 改进后的结构模型

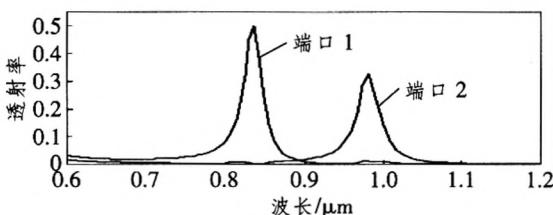


图6 端口1和端口2的透射谱

参考文献:

- [1] 时慕华. 3G+LTE 系统调度技术的研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2009.
- [2] 3GPP TS 36.321 V8.8.0-2009, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Medium Access Control (MAC) protocol specification [S].
- [3] 王枫. 3GPP+LTE 中上行链路 MAC 层调度的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [4] 张艳. LTE 系统调度技术 [J]. 移动通信, 2008, 32(23): 39-41.
- [5] 沈嘉, 索士强, 全海洋, 等. 3GPP 长期演进(LTE)技术原理与系统设计 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- [6] 3GPP TS 23.107 V9.0.0-2009, QoS Concept and Architecture [S].

3 结束语

利用FDTD结合PML边界,对单槽型腔结构和级联槽型腔结构的表面等离子体滤波器进行仿真分析,仿真结果表明,相对于单槽型腔,级联槽型腔结构能有效抑制透射频谱的FWHM,最小FWHM可达23 nm。该滤波器结构将在高集成化的纳米光器件领域具有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] Raether H. Surface Plasmon on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings [M]. Berlin, New York: Springer-Verlag, 1988.
- [2] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals [J]. Phys Rev B, 1972, 6(12): 4370-4379.
- [3] Guo Yinghui, Yan Lianshan, Pan Wei, et al. A plasmonic splitter based on slot cavity [J]. Opt Express, 2011, 19(15): 13831-13838.
- [4] Li Qiang, Wang Tao, Su Yikai, et al. Coupled mode theory analysis of mode-splitting in coupled cavity system [J]. Opt Express, 2010, 18(8): 8367-8382.
- [5] Hu Feifei, Yi Huaxiang, Zhou Zhiping. Band-pass plasmonic slot filter with band selection and spectrally splitting capabilities [J]. Opt Express, 2011, 19(6): 4848-4855.

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

微波滤波器设计培训专题视频课程



高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>