

金属脊-三角形半导体型混合表面等离子体波导

李志全¹, 岳中^{1*}, 白兰迪¹, 刘同磊¹, 冯丹丹¹, 顾而丹¹, 李文超²

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

2. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:提出了一种新颖的基于金属脊-三角形半导体的混合表面等离子体波导结构,基于有限元法对该波导结构进行了数值仿真和分析.主要研究了该结构的电场分布、传输长度、归一化模场面积和质量因数.结果表明:在工作波长为1550 nm时,通过优化参数,其有效模场面积达到 $0.00193 \lambda^2$,传输长度为 $37.7 \mu\text{m}$,质量因数为4853,该结构具有较低的损耗.与金属平板混合波导结构相比,具有更大的质量因数,更强的光场限制能力,波导的综合性能更好.这种波导结构在微纳米光子学、光电子通讯和光信息存储等领域具有广阔应用前景.

关键词:混合表面等离子体波导;传输特性;有限元法;表面等离子体

中图分类号:TN252 文献标识码:A

Metal ridge-triangular semiconductor of mixed surface plasma waveguide

LI Zhi-Quan¹, YUE Zhong^{1*}, BAI Lan-Di¹, LIU Tong-Lei¹, FENG Dan-Dan¹, GU Er-Dan¹, LI Wen-Chao²

(1. Institute of Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A novel hybrid surface plasmon waveguide structure based on metal ridge-triangular semiconductors is proposed. The numerical simulation and analysis of the waveguide structure are carried out based on the finite element method. Also, the electric field distribution, transmission length, normalized mode field area as well as quality factor of the structure are considered here. Finally, the results show that: at the operating wavelength of 1550 nm, by optimizing the parameters, its effective mode field area is up to $0.00193 \lambda^2$, the transmission length is $37.7 \mu\text{m}$, and the quality factor is 4853, besides, the structure has lower loss. Compared with the metal plate hybrid waveguide structure, the design of the structure has a greater quality factor and stronger light field limiting ability, what's more, the waveguide comprehensive performed better. This kind of waveguide structure has a wide application prospect in the fields of micro-nano photonics, optoelectronic communication and optical information storage.

Key words: hybrid plasmonic waveguide, transmission characteristics, finite-element method, surface plasmon

PACS: 52.40.Fd; 52.25.Fi; 87.10.Kn; 52.25.-b

引言

表面等离子体学是纳米光电子领域非常重要的一个方向^[1],基于表面等离子体激元(Surface plasmon polaritons, SPPs)原理的表面等离子体波导是近

年人们研究的热点^[2-3]. SPPs是一种电子疏密波,它是由外来光子与金属表面存在的自由电子相互作用引起的,该波沿着金属和介质的分界面进行传播.基于表面等离子体波导的光子器件旨在解决传统光通信中器件速度慢、体积大、集成度低等实际问题.在

收稿日期:2017-04-05,修回日期:2017-09-09

Received date: 2017-04-05, revised date: 2017-09-09

基金项目:河北省百人计划(4570018),河北省自然科学基金(F2014501150, F2017203316),东北大学秦皇岛分校科技支撑(XNK201405)

Foundation items: Supported by Hundred People Plan of Hebei Province (4570018), Natural Science Foundation of Hebei Province (F2014501150, F2017203316), Science and Technology Support of Northeastern University at Qinhuangdao (XNK201405)

作者简介(Biography):李志全(1954-),男,博士,教授,主要从事集成光学、光纤传感及非线性光电检测等方面的研究. E-mail: lzq54@ysu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: 120142311@qq.com

此基础上研究表面等离子体激元的新现象和新效应,为实现纳米光子器件的微型化、集成化、高速化奠定了基础^[4-5].

近十年,在光子集成领域的研究中,人们提出了众多将光场限制在纳米尺度的 SPPs 波导结构^[6-7],主要分为表面等离子体光波导、光子晶体光波导和硅纳米线光波导.其中表面等离子体光波导能够突破衍射极限且整体尺寸较小、制作方便而备受关注,例如金属-介质-金属(MIM)波导结构^[8-9]、介质-金属-介质(IMI)波导结构^[10]、长程表面等离子体波导结构^[11]、金属缝结构^[12]、沟槽型结构等^[13].但是,在表面等离子体波导中,光场的限制能力与传输损耗是一对永恒的矛盾,这严重影响了波导的性能.如何在传输损耗与光场的限制能力之间找到一个很好的平衡点,是表面等离子体波导需要重点考虑的问题.近年来,对于以上所述的表面等离子体波导的缺点,人们提出了一种混合型表面等离子体波导(Hybrid Plasmonic Waveguide, HPW)^[14-15],它能把两种传播机制有效地结合在一起,得到了广泛的研究.基于 HPW 以上优点,2008 年 Oulton 提出了一种基于圆柱形介质纳米线的混合表面等离子体波导结构^[16].在此基础上,Zhu 提出了一种由空气作为低折射率介质的混合纳米光波导结构^[17],并研究了该结构介质纳米线模式与表面等离子体模式的耦合机制.

结合上述波导结构的优点,为了提高 HPW 的模式限制,进一步降低波导的传输损耗,优化等离子体波导的整体性能,本文设计了一种新颖的基于金属脊-三角形半导体的混合表面等离子体波导结构,并研究了其几何参数变化对波导的模场分布和传输特性的影响.

1 物理模型与理论研究

1.1 结构设计

设计的基于金属脊和三角形半导体的混合表面等离子体波导结构如图 1 所示.该结构自下而上分别由半圆形金属脊(Ag),低折射率介质层 SiO₂ 和一个三角形半导体波导 Si 组成.由于银具有低吸收系数和低传输损耗的特性,所以金属材料选取银.在金属脊与三角形半导体之间是宽度为 t 的低折射率间隙区.金属脊的水平宽度为 w ,厚度 h_1 固定为 100 nm,中心半圆半径为 r .三角形半导体楔的顶角 $\alpha = 50^\circ$,高度 h_2 固定为 200 nm,考虑到实验中制作的波导总是具有非零半径的圆角,以及为了避免出现奇

点,对三角形半导体波导的尖端进行圆角处理,顶端圆角的曲率半径为 r_c .顶部宽度也等于 w ,大小由 h_2 、 α 和 r_c 共同决定, $w = 2[h_2 + r_c / \tan(\alpha/2)]$.该结构的工作波长设置为 1550 nm,材料 Ag, SiO₂, Si 的折射率分别为 0.1453 + 11.3587i, 1.445, 3.455^[18-19].

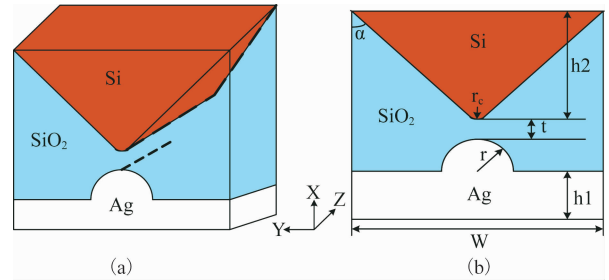


图 1 波导的结构图(a)波导的三维图,(b)波导的二维剖面图

Fig. 1 Geometry of the waveguide (a) three-dimensional geometry of the waveguide, (b) the two-dimensional profile of the waveguide

1.2 特性参数

反映混合表面等离子体波导特性优劣的重要指标是模式特性.我们研究的模式特性主要包括有效折射率(effective index, n_{eff})、归一化模场面积(The normalized mode scaling factor, SF)、能量限制因子(confinement factor, Γ)、传输长度(propagation length, L)和质量因数(The figure of merit, FOM)的概念.描述的是电场能量空间分布的集中性,归一化模场面积越小,则波导结构对光场的约束能力就越强. SF 定义为有效模场面积 A_{eff} 与衍射极限模式面积 A_0 的比值,表达式^[20]为

$$SF = A_{\text{eff}}/A_0 \quad (1)$$

$$A_{\text{eff}} = \frac{1}{\iint W(x,y)^2 dx dy} \left[\iint W(x,y)^2 dx dy \right]^2 \quad (2)$$

其中, $W(x,y)$ 是电磁能量密度,对于一般的表面等离子体波导来说,电磁场主要是以电场方式存在的,所以可以用电场模的平方来代替能量密度,则式(2)可以变为:

$$A_{\text{eff}} = \frac{1}{\iint |E|^4 dx dy} \left[\iint |E|^2 dx dy \right]^2 \quad (3)$$

$$A_0 = \lambda^2/4 \quad (4)$$

在上式中, E 为混合模式的电场强度, λ 为工作波长.

在波导设计中,人们希望获得较小的传输损耗

和归一化模场面积,不能凭直觉来判断传输特性,因此有必要引入 FOM 来综合衡量波导的传输特性.

FOM 定义为^[21] $FOM = \frac{L}{SF}$, FOM 的值越大,波导的综合性能越好. L 表示传输长度,描述的是光在波导结构中的传播距离. 在光场约束能力不变的情况下,传输长度越长越好. 其表达式为^[21]

$$L = \frac{1}{2\text{Im}(\beta)} \quad , \quad (5)$$

其中, β 为模式的传播常数, $\beta = k_0 \frac{\epsilon_{1i}}{2\epsilon_{1r}} \left(\frac{\epsilon_{1r}\epsilon_2}{\epsilon_{1r}\epsilon_2} \right)^{\frac{2}{3}}$, 可

从 COMSOL Multiphysics 中直接求得. 其中 $k_0 = 2\pi/\lambda$, 为真空中波数; ϵ_{1r} 和 ϵ_{1i} 分别为金属介电常数的实部和虚部; ϵ_2 为介质的介电常数, 与 ϵ_{1r} 符号相反.

能量限制因子是衡量波导中能量分布情况的物理量, 因为表面等离子体波导的组成材料不同, 所以各个部分所存储的能量也不相同. 它定义为波导横截面上某一区域中存储的能量 W_s 与模场总能量 W 之比, 其表达式为

$$\Gamma = \frac{W_s}{W} = \frac{\iint_s W(x,y)^2 dx dy}{\iint_{\text{all}} W(x,y)^2 dx dy} \quad . \quad (6)$$

设计波导的有效模式区域可以被降低到很小的值, 所以在金属脊的顶端附近状态的密度被强烈地修改, 这可以大大增强光与物质的相互作用. 当将原子或量子点放在低折射率间隙中时, 可以改变自发发射速率, 这被称之为 Purcell 效应. 发射增强的最大值^[22] 为

$$F_p = \frac{3N_g}{4\pi} \frac{(\lambda/n)^2}{A_{\text{eff}}} \quad , \quad (7)$$

其中 N_g 代表模式的有效折射率, n 代表材料的有效折射率. 可以利用基于有限元法的 COMSOL Multiphysics 软件得到 N_g .

2 波导的传输特性分析

2.1 波导的电场分布

基于有限元法, 利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件的模态分析模块模拟和研究设计波导结构的基模. 仿真过程中, 在二氧化硅层和金属脊的边缘附近设置极细网格以保证仿真结果的精确性. 去掉高阶模, 可以得到该结构基模的归一化电场分布图 ($r = 50 \text{ nm}$, $t = 2 \text{ nm}$, $r_c = 5 \text{ nm}$), 如图 2(a) 所示. 从图中可以明显地看出, 电场能量主要集中于金属脊和三角形半导体之间的低折射率间隙处, 且有一部分渗

入到间隙左右的 SiO_2 材料中. 图 2(b) 和 (c) 分别对应图 2(a) 中水平和垂直虚线处的归一化电场分布, 从图中可以看出, 水平和垂直两个方向上间隙处的电场得到了明显的增强, 这是由于 SPPs 模式与半导体波导模式在低折射率介质层相互耦合, 使低折射率介质层像电容器一样产生能量存储, 从而实现了能量约束和高度局域化增强效应. 这种混合表面等离子体波导能够保持较远的传播距离, 同时具有较强的光场限制能力.

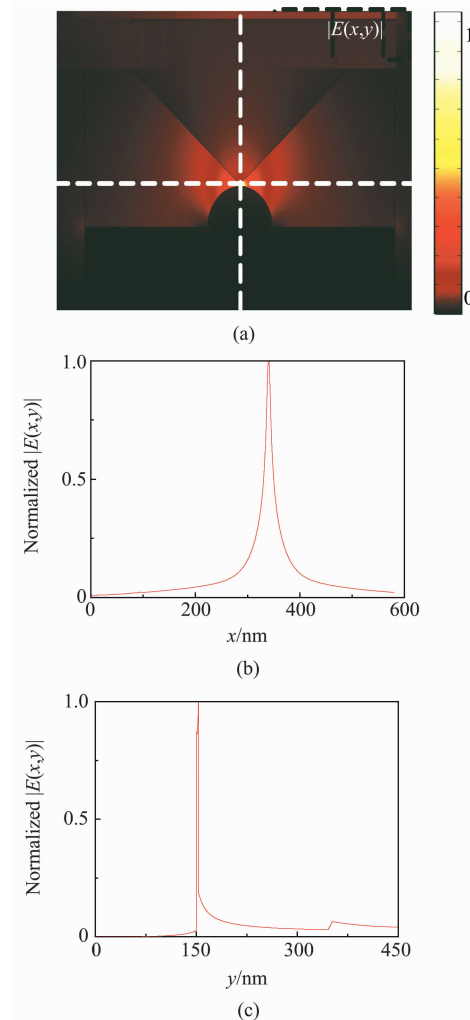


图2 电场分布 (a) 所设计波导基模的归一化电场分布图 ($r = 50 \text{ nm}$, $t = 2 \text{ nm}$, $r_c = 5 \text{ nm}$), (b)-(c) 分别表示 (a) 中沿着水平和竖直虚线处的归一化电场分布

Fig. 2 Electric field distribution (a) Normalized electric field distribution of base model of the proposed waveguide ($r = 50 \text{ nm}$, $t = 2 \text{ nm}$, $r_c = 5 \text{ nm}$), (b) and (c) show the normalized electric field distribution along the horizontal and vertical dashed lines in Fig. 2(a)

2.2 顶端半径和间隙宽度对波导特性的影响

几何参数的变化对混合表面等离子体波导的性

能有一定的影响. 首先讨论该结构的顶端曲率半径 r_c 和间隙宽度 t 对有效折射率、传输长度、归一化模场面积、限制因子、普塞尔因子和质量因数的影响. 这里, 假定金属脊半圆的半径 $r = 50$ nm, 分别选取间隙宽度 $t = 2$ nm, 4 nm, 6 nm, 8 nm, 10 nm, 分析在这些宽度下当顶端曲率半径 r_c 从 2 ~ 40 nm 范围内变化时该结构的特性, 仿真结果如图 3 和图 4 所示.

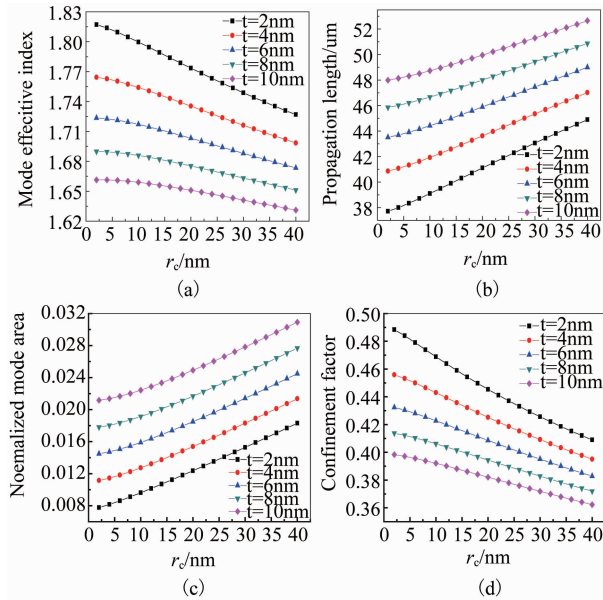


图 3 所设计波导结构的模式特性随 t 和 r_c 的变化 (a) 有效折射率, (b) 传输长度 L , (c) 归一化模场面积 SF (d) 限制因子

Fig. 3 The model features of the proposed with different t and r_c (a) effective index n_{eff} ; (b) propagation length L , (c) normalized mode area SF, (d) confinement factor

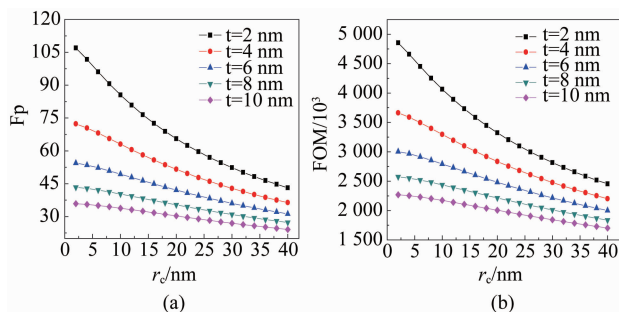


图 4 所设计波导结构的普塞尔因子和质量因数随 t 和 r_c 的变化 (a) 普塞尔因子 F_p , (b) 质量因数 FOM

Fig. 4 The Purcell Factor and quality factor of the proposed with different t and r_c (a) Purcell Factor F_p , (b) quality factor FOM

从图 3 (a-d) 可以看出, 随着低折射率间隙宽度的增加, 顶端曲率半径不同的波导结构的模式特性具有相同的变化趋势. 随着间隙宽度的增大, 三角形

半导体和金属脊的耦合作用逐渐减弱, 模式的有效折射率和限制因子都呈现减小的趋势, 如图 3 (a) 和 (d) 所示, 这是由于波导的能量主要分布在低折射率介质中, 减小了金属的欧姆损耗. 从图 3 (a) 和 (b) 可以看出, 当间隙宽度 t 增大时, 有效折射率在减小, 但是传输长度的变化趋势却与之相反, 其随着 t 的增大而逐渐增大. 这是由于当 t 减小时, 金属脊与三角形半导体介质的耦合程度增强, 从而使场的局域性增强; 当 t 增大时, 金属脊与半导体介质的耦合程度降低, 这使得场的局域性减弱, 能量分布分散, 传输长度增大. 由图 3 (c) 和 (d) 可知, 减小间隙宽度 t 可以使增益介质与混合模式的重叠区域增大, 从而可以减小归一化模场面积, 增大限制因子. 归一化模场面积表明了该波导结构对模场的限制能力, 从图 3 (c) 可以看出, 当顶端半径 r_c 从 2 ~ 40 nm 范围内变化时, 其归一化模场面积始终小于 0.032, 表明该结构可以很好

地实现深亚波长的模场限制. 当 $t = 2$ nm, $r_c = 2$ nm 时, 归一化模场面积达到最小值, 这时有有效模场面积为 0.00194.

图 4 (a) 显示了随着间隙宽度 t 的变化, 对于在二氧化硅中的 F_p 变化情况, 从图中可以看出, 当 t 增大时, 其逐渐减小. 当 $t = 2$ nm, $r_c = 2$ nm 时, F_p 可以取得最大值, 此时 $F_p = 106.95$. 图 4 (b) 显示了质量因数的变化情况, 从图中可以看出, 质量因数随着 t 的增大而逐渐减小; 当 t 固定时, 其随着 r_c 的增大也在逐渐降低. 当 $t = 2$ nm 时, 质量因数有最大值, 此时光场的限制能力最好.

2.3 金属脊半径对波导特性的影响

金属脊半径 r 对该结构特性的影响. 由于当 $t = 2$ nm 时, 归一化模场面积可以取得最小值, 而且普塞尔因子和质量因数有最大值, 所以固定间隙宽度 $t = 2$ nm 不变, 分别选取 $r_c = 2$ nm, 10 nm, 20 nm, 30 nm, 40 nm, 得到金属脊半径 r 从 20 ~ 80 nm 范围内变化时该结构的特性, 如图 5 和图 6 所示.

从图 5 (a) 和 (b) 可以看出, 随着顶端曲率半径 r_c 的增大, 模式的有效折射率不断减小, 传输长度却在不断的增大. 当 r_c 不变时, 随着金属脊半径 r 的增大, 传输长度减小, 但是当 r 很大时, 其传输长度减小的速率明显变慢, 这是由于此时三角形半导体介质与金属脊的耦合作用很弱, 半径 r 的改变对传输长度的影响也相应地减弱 (见图 5 (b)). 图 5 (c) 和 (d) 表明, 减小顶端圆角的曲率半径 r_c 可以减小归一化模场面积, 同时增大限制因子. 图 5 (c) 也显示

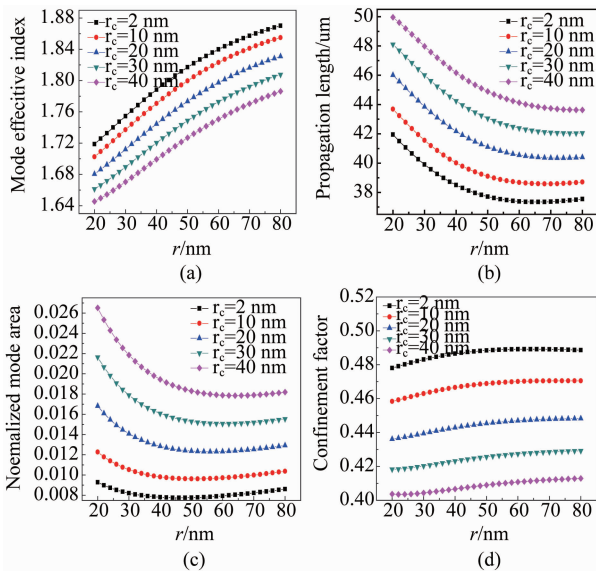


图5 所设计波导结构的模式特性随 r_c 和 r 的变化 (a) 有效折射率, (b) 传输长度 L , (c) 归一化模场面积 SF, (d) 限制因子

Fig. 5 The model features of the proposed with different r_c and r (a) effective index n_{eff} , (b) propagation length L , (c) normalized mode area SF, (d) confinement factor

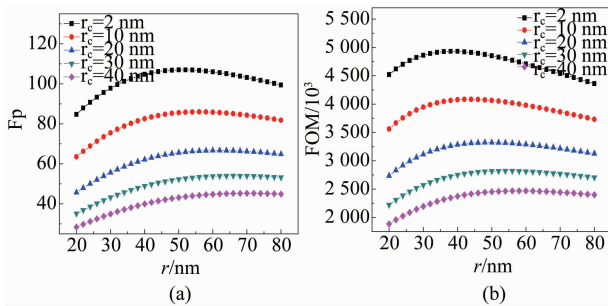


图6 所设计波导结构的普塞尔因子和质量因数随 r_c 和 r 的变化 (a) 普塞尔因子 F_p , (b) 质量因数 FOM Fig. 6 The Purcell Factor and quality factor of the proposed with different r_c and r (a) Purcell Factor F_p , (b) quality factor FOM

了当 r_c 不变时,随着 r 的增大,模式的归一化模场面积先减小再增大. 在所选的参数变化区间内,归一化模场面积始终小于 0.027, 表明了该波导结构可以实现对光场的深亚波长限制.

图6反映了金属脊半径的变化对普塞尔因子和质量因数的影响. 从图6(a)和(b)可以看出,随着 r_c 的增大, F_p 和质量因数都在逐渐的减小. 当固定 r_c 不变时, F_p 和质量因数也都是先增大再减小, 具有相同的变化趋势. 对于二氧化硅中的 F_p , 当 $r_c = 2$ nm, $r = 50$ nm 时, F_p 可以取得最大值, 这时 $F_p = 106.97$. 同时, 当 $r_c = 2$ nm 时, 质量因数的值最好.

综上所述,通过改变波导结构的几何参数 t, r_c, r 就能优化该结构的特性. 为了达到更好的光场限制能力, 在所选的几何参数范围内, 如果固定间隙宽度 t 为 2 nm, 当取 $r_c = 2$ nm, $r = 50$ nm 时, 就可以实现模场的超深亚波长约束, 并获得较高的质量因数、传输长度和最大的普塞尔因子. 此时归一化模场面积达到最小值, 有效模场面积为 0.001 93, 质量因数为 4 853, 传输长度为 37.7 μm , F_p 为 106.97, 波导的综合性能最佳.

2.4 波导特性比较

为突出所设计波导结构的优势, 将所设计的新波导结构的归一化模场面积和质量因数与之前提出的结构^[23] 进行比较, 如图7所示. 保持两者的间隙

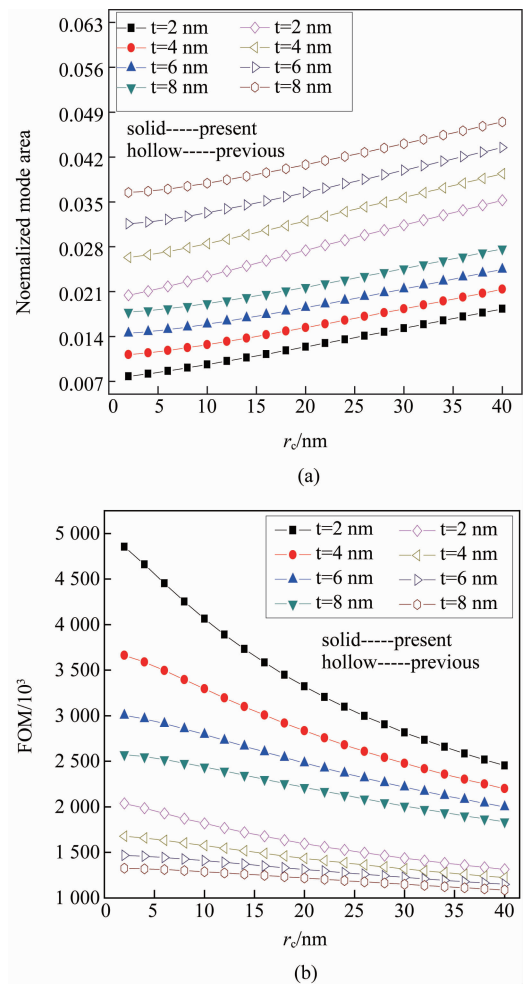


图7 (a) 本文设计波导与先前提出波导的归一化模场面积的比较, (b) 本文设计波导与先前提出波导的质量因数的比较

Fig. 7 (a) The comparison of normalized mode field between the design of the waveguide and the previously proposed waveguide, (b) the comparison of FOM between the design of the waveguide and the previously proposed waveguide

宽度和顶端半径相等,结构材料相同(图中实心 and 空心曲线分别表示本文设计的波导结构和之前金属平板波导结构),通过比较发现,我们提出的混合表面等离子体波导结构比先前结构具有更小的归一化模场面积和更大的质量因数,波导的综合性能更好.

3 结论

设计了一种新颖的基于金属脊-三角形半导体的混合表面等离子体波导结构,该结构实现了对输出光场的深亚波长约束和低损耗传输.研究了顶端曲率半径、间隙宽度和金属脊半径对该波导特性的影响,结果表明,适当的调整几何参数可以有效地提高其基模的传输长度和质量因数,同时保持对光场的超深亚波长限制能力.得到了该结构的最优几何参数: $t = 2 \text{ nm}$, $r_c = 2 \text{ nm}$, $r = 50 \text{ nm}$.在工作波长 1550 nm 下,有效模场面积达到 0.00193 ,可以有效地减小其模场面积.同时得到最优结构尺寸时的质量因数为 4853 ,传输长度为 $37.7 \mu\text{m}$, F_p 为 106.97 .将所设计的波导结构与金属平板混合波导结构相比,在相同几何参数下,设计的结构具有更好的波导特性.所提出的新颖结构为新一代纳米光子器件的发展提供了一定的理论依据和方法.随着微纳加工技术的发展,使得未来实现全光集成,进而发展尺寸小、功耗低、速度快的新型微纳光子器件成为可能.

References

- [1] Abbas F, Naqvi Q A, Faryad M. Multiplasmonic Optical Sensor Using Sculptured Nematic Thin Films[J]. *Plasmonics*, 2015, **10**(6):1269–1273.
- [2] Ozbay E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions. [J]. *Science*, 2006, **311**(5758): 189–93.
- [3] Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, et al. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators. [J]. *Nature*, 2006, **440**(7083):508–11.
- [4] Aporvari M S, Aporvari A S, Kheirandish F. Surface plasmon polariton scattering by subwavelength silicon wires[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(9):2375.
- [5] Barnes W L. REVIEW ARTICLE: Surface plasmon polariton length scales: a route to sub-wavelength optics [J]. *Journal of Optics A Pure & Applied Optics*, 2006, **8**(8): S87.
- [6] Lv H B, Liu Y M, Yu Z Y, et al. Hybrid plasmonic waveguides for low-threshold nanolaser applications [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, **12**(11): 112401.
- [7] Bian Y, Zheng Z, Zhao X, et al. Nanowire based hybrid plasmonic structures for low-threshold lasing at the subwavelength scale[J]. *Optics Communications*, 2013, **287**: 245–249.
- [8] Liu L, Han Z, He S. Novel surface plasmon waveguide for high integration[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(17):6645–50.
- [9] Veronis G, Fan S. Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(13):131102–131102–3.
- [10] Mu J W, Huang W P. A low-loss surface plasmonic Bragg grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(4):436–439.
- [11] Boltasseva A, Volkov V S, Nielsen R B, et al. Triangular metal wedges for subwavelength plasmon-polariton guiding at telecom wavelengths[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(8): 5252–60.
- [12] Pile D F, Gramotnev D K. Channel plasmon-polariton in a triangular groove on a metal surface [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(10):1069.
- [13] Pile D F, Gramotnev D K. Channel plasmon-polariton in a triangular groove on a metal surface [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(10):1069–71.
- [14] Sharma T, Kumar M. Hollow hybrid plasmonic waveguide for nanoscale optical confinement with long-range propagation[J]. *Applied optics*, 2014, **53**(9): 1954–1957.
- [15] Zheng K, Zheng X, Song Z X. Analysis of convex rib hybrid surface plasmon waveguide with ultra-long propagation distance and tight mode confinement[J]. *Journal of Nanophotonics*, 2016, **10**(1): 016005.
- [16] Oulton R F, Sorger V J, Genov D A, et al. A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation [J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(8): 496–500.
- [17] Zhu L. Modal properties of hybrid plasmonic waveguides for nanolaser applications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(8): 535–537.
- [18] Zhang J, Cai L, Bai W, et al. Hybrid plasmonic waveguide with gain medium for lossless propagation with nanoscale confinement[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(12): 2312–2314.
- [19] Palik E D. Handbook of optical constants of solids II[J]. *Academic Press Handbook*, 1985, **33**(1):189.
- [20] Sun R, Dong P, Feng N N, et al. Horizontal single and multiple slot waveguides; optical transmission at $\lambda = 1550 \text{ nm}$ [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(26): 17967–17972.
- [21] Mu J, Chen L, Li X, et al. Hybrid nano ridge plasmonic polaritons waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(13):131107–131107.
- [22] Zou C L, Sun F W, Dong C H, et al. Movable fiber-integrated hybrid plasmonic waveguide on metal film [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(6):434–436.
- [23] Lu Q, Zou C L, Chen D, et al. Extreme light confinement and low loss in triangle hybrid plasmonic waveguide [J]. *Optics Communications*, 2014, **319**(9):141–146.