

双层半圆介质加载表面等离子激元波导的 传输特性研究

王琼 邵晓珍 张冠茂 胡南

兰州大学信息科学与工程学院现代通信技术研究所, 甘肃 兰州 730000

摘要 提出了一种双层半圆介质加载表面等离子激元波导新结构, 并利用有限元方法对该新型波导结构在工作波长 1550 nm 下的传输特性进行了数值仿真和优化分析, 得到了波导传播特性的主要参数。结果表明: 在波导总面积保持不变的情形下, 当双层半圆介质的折射率分别取为 $n_1=1.4$ 和 $n_2=1.473$ 时, 波导的传播特性最佳; 在此折射率参数基础上, 波导的内外介质半径比 r_1/r_2 为 0.5 时, 波导的传播长度最大、衰减系数最小并且模式面积和品质因数的取值都非常理想, 可以获得最优的波导传输效果。

关键词 集成光学; 表面等离子激元波导; 双层半圆介质加载波导; 传播长度; 品质因数

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.061302

Transmission Characteristics of the Double-Layer Semi-Circular Dielectric-Loaded Surface Plasmon Polariton Waveguides

Wang Qiong Shao Xiaozhen Zhang Guanmao Hu Nan

*Institute of Modern Communication Technology, School of Information Science and Engineering,
Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China*

Abstract A new structure of double-layer semi-circular dielectric-loaded surface plasmon polariton (SPP) waveguide is proposed. By using the finite element method (FEM) on the waveguide structure at the telecom wavelength of $\lambda = 1550$ nm, the transmission characteristics are simulated and analyzed to get the fundamental parameters of this kind of waveguide. The results show that the optimal transmission characteristics of the waveguide propagation can be achieved with the same total area for the waveguide and the refractive index of $n_1 = 1.4$ and $n_2 = 1.473$ for the double semi-circular dielectric layers. When the ratio of the inner and outer semi-circular dielectric radii is $r_1/r_2 = 0.5$, the maximum propagation length, minimum attenuation coefficient, ideal waveguide mode area and figure of merit can be achieved with the same refractive index parameters, so the optimal transmission results can be obtained.

Key words intergrated optics; surface plasmon polariton waveguides; double-layer semi-circular dielectric-loaded waveguides; propagation length; figure of merits

OCIS codes 130.5460; 190.4975; 350.5400

1 引言

表面等离子体(SPP)极化波是指沿着金属-介质交界面激发且场强沿着垂直于两种相邻介质交界面的方向衰减的电磁波^[1-4]。表面等离子体极化波在金属表面传播,它在金属中的衰减远大于在电介质中的衰

收稿日期: 2015-10-22; **收到修改稿日期:** 2016-01-11; **网络出版日期:** 2016-05-05

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(兰州大学)(lzujbky-2012-40, lzujbky-2015-K7)

作者简介: 王琼(1989—),女,硕士研究生,主要从事表面等离子激元共振理论与应用方面的研究。

E-mail: wangqiong_ok@126.com

导师简介: 张冠茂(1973—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光通信、光传感、微纳光子晶体以及光域表面等离子激元共振理论与应用方面的研究。E-mail: zhanggm@lzu.edu.cn(通信联系人)

减。当高能量的电子通过金属层时,会产生较大的能量损耗,损耗主要集中在金属-介质界面。表面等离子体极化波平行于表面,由于传播常数 β 大于介质中的波矢量 κ ,导致电磁波在垂直于界面的方向发生衰减^[5],因而显示出独特的亚波长局域效应^[6]。这一特点,使其具有突破亚波长衍射极限的能力,进而能够将电磁场的能量束缚在纳米范围,而且通过改变金属表面的几何结构就能对入射光进行约束和操控,基于表面等离子体激元的各种纳米光子器件也是迄今为止有希望实现纳米集成光网络的物质技术基础。

光子集成器件在信息传递的过程中具有更快的传输速率^[7],具有更少的能量损耗^[8]。近年来,如何使集成的光子器件代替传统的电子集成器件成为一个重要的研究方向。表面等离子体激元波导和光波导的组合结构吸引了越来越多科研工作者的关注^[9-11]。表面等离子体激元波导作为集成光子器件的一部分,可以减小器件的尺寸和增强其光学集成度。表面等离子体激元具有突破衍射极限的特性,而且可以在纳米结构下控制光的传播,所以表面等离子体激元在纳米集成光子器件中是较有前途的信息载体^[12-14]。为了达到降低损耗、提高传播长度的目的,研究者提出了各种类型介质加载的表面等离子体激元波导结构。表面等离子体激元波导能够提供真正意义上的亚波长级的光传输以及光场约束。如何将场强很好地控制在垂直于传播方向的横截面中,同时又能保持相对低的传输损耗是目前研究的首要任务。至今,已经有学者研究了几种不同的基于端射或者定向耦合的表面等离子体——光子波导^[15]。

众所周知,介质-金属-介质(IMI)型波导在两个介质-金属交界面上发生表面等离子体激元共振并相互耦合,这种表面波相对单个的介质-金属界面拥有较长的传输距离,但是该结构的模场限制能力较弱,导致品质因数也很小。为了增强波导的模场约束,并提升系统整体之品质因数,本文采用了半圆介质加载结构进行改善。在分析最基本的介质-金属-介质(IMI)型波导的理论基础上^[5],针对不同的半圆介质加载波导结构模型进行了参数对比分析,尤其是重点研究了双层半圆介质加载的表面等离子体激元波导的基本模型及其传输特性,包括结构参数、有效折射率、传播长度、模式面积、品质因数等,并对双层半圆介质加载的表面等离子体激元波导结构进行了参数优化分析处理。研究表明,该新型介质加载结构改进了传统介质-金属-介质波导模场限制弱、品质因数低的缺点,实现了在模场限制较强的情形下增大系统整体的品质因数。

2 介质-金属-介质模型及其特性参数分析

一个简单的介质-金属-介质的模型结构如图1所示。在这个结构中,表面等离子体激元存在于每一层界面处。金属层上下表面的电磁场相互作用,使金属板两界面出现共振模态。在该结构中,上下两层电介质使用同种二氧化硅材料,其折射率为1.45。中间的金属层为金,在1550 nm的波长下折射率为 $0.55 + i9.81$,金属层厚度设置为100 nm。

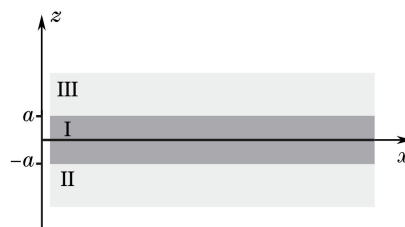


图1 IMI波导的基本结构

Fig. 1 Fundamental structure of IMI waveguide

利用有限元法对该结构进行数值仿真计算,其端面的模场分布如图2所示。有限元法是将连续的求解域离散为一组单元的组合体,用在每个单元内假设的近似函数来分片表示求解域上待求的未知场函数,近似函数通常由未知场函数及其导数在单元各节点的数值插值函数来表达,从而使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。有限元法是一种数值仿真求解的方法,可将复杂的偏微分方程问题简单化,本文就是利用基于有限元法的Comsol Multiphysics来解决所提波导结构的场传播问题。首先选取合适的物理场,设定基本参数,如入射波长、介质折射率等,然后利用边界方程、波动方程及内置函数对波导结构的能量场分布进行数值仿真计算。

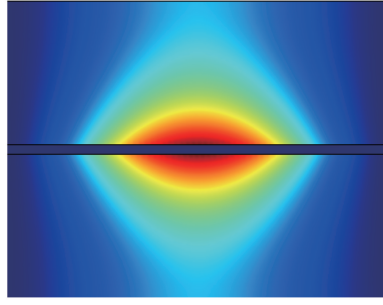


图2 IMI的模场分布

Fig. 2 Mode field distribution of IMI

运用 Comsol 可以直接求出等离子激元波导的归一化介电常数,即模式复折射率为^[16]

$$\overline{k}_{sp} = \frac{k'_{sp} + ik''_{sp}}{k_0} = \overline{k}'_{sp} + i \overline{k}''_{sp}, \quad (1)$$

式中 $k_0 = 2\pi/\lambda_0 = \omega/c_0$ 是真空中相移常数, λ_0 是真空中波长, c_0 则是真空中的波速。(1)式中实部为归一化相移常数,也就是模式有效折射率,它反映出电磁波在传播过程中相位落后的情况;而虚部则是归一化衰减常数,它反映出电磁波在传播单位距离上的衰减情况,决定了表面等离子体极化波在波导中的传播距离。

电磁波在进入金属时会快速衰减,因而传播距离会受到限制。显然,表面等离子体极化波是沿着金属介质交界面传播的,它的强度为电场的平方衰减。所以,在 x 方向,强度的衰减呈现为 $\exp(-2k''_x x)$ 因子的形式。传播距离即传播长度,可定义为表面等离子体极化波强度衰减为初始值的 $1/e$ 时所经过的传输距离,表达式为

$$L = \frac{1}{2k''_{sp}}. \quad (2)$$

表面等离子极化波的传播长度一定程度上决定了它的光学器件和光路的尺寸和大小,它是表面等离子激元波导十分重要的参量之一。为了衡量波导模型对场的限制能力的强弱,可以计算模型的模式面积。一般来说,模式面积越小,则该模型对场的束缚能力就越强。归一化模式面积定义为表面等离子体基模的总能量与能量密度最大值的比值,表达式为^[17-18]

$$A = \frac{\int_{S_\infty} W(\mathbf{r}) dS}{\max[W(\mathbf{r})]}, \quad (3)$$

式中 $W(\mathbf{r})$ 是能量密度。此外可以引入品质因数(FOM)来权衡分析表面等离子激元波导的整体传输质量^[19]。一般地,品质因数有三种计算方法,第1种品质因数 M_1 和第3种品质因数 M_3 的计算公式:

$$M_1 = 2\sqrt{\pi}L / \sqrt{A}, \quad (4)$$

$$M_3 = \text{Re}(N_{\text{eff}}) / 2\pi \text{Im}(N_{\text{eff}}), \quad (5)$$

式中 A 是归一化的模式面积, L 是传播长度。 M_1 主要是用来评估波导在高密度集成方面的应用^[20], M_3 主要用于衡量波导用在小尺寸导波器件的特性,例如纳米光栅耦合和谐振器^[19]。

3 半圆介质加载的表面等离子激元波导分析

3.1 单层半圆介质加载和双层半圆介质加载的表面等离子激元波导基本结构

单层半圆介质加载的表面等离子激元波导的基本结构如图3(a)所示。在该模型中,衬底选用紫外光固化的聚合物材料(Exguide LFR),其折射率 $n_s = 1.375$ 。半圆介质的材料采用二氧化硅(SiO_2),其折射率为 $n_d = 1.45$,半径为 $1 \mu\text{m}$ 。模型中金属层为金,其厚度为 $t_d = 100 \text{ nm}$ 。利用有限元法和上文提到的参数计算公式,得到该模型结构的归一化模式面积为 0.81,品质因数为 158.81,传播长度为 $40.33 \mu\text{m}$ 。仿真计算得到的结构端面的能量分布如图3(b)所示。

改变模型的结构,将单层半圆介质改变为双层的半圆介质。双层半圆介质的内外半径分别为 $0.9 \mu\text{m}$ 和

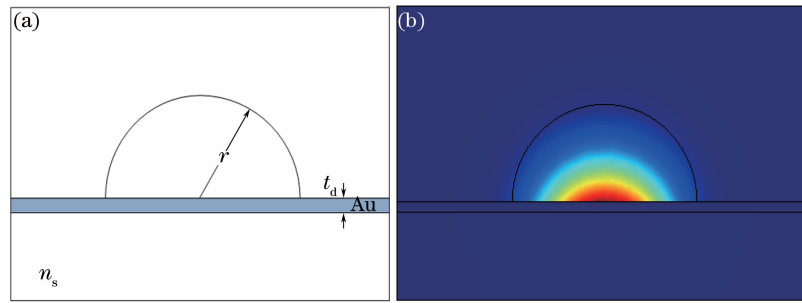


图3 单层半圆介质加载的表面等离子激元波导。(a) 基本结构；(b) 模场分布

Fig. 3 Single-layer semicircle dielectric-loaded SPP waveguide.

(a) Fundamental structure; (b) distribution of mode field

1 μm 。其折射率分别设置为 1.43 和 1.45。在工作波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 下,新模型的归一化模式面积为 0.8752,品质因数和传播长度分别为 193.66 和 51.12 μm 。此时,双层半圆介质加载的表面等离子激元波导的基本结构和端面的能量分布分别如图 4(a)和 4(b)所示。

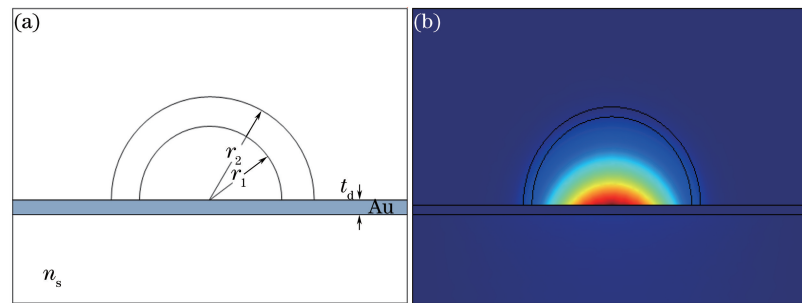


图4 双层半圆介质加载的表面等离子激元波导。(a) 基本结构；(b) 模场分布

Fig. 4 (a) Double-layer semi-circular dielectric-loaded SPP waveguide.

(a) Fundamental structure; (b) distribution of the mode field

利用有限元法研究了模型结构的传输特性,根据仿真计算结果绘制出主要参数的曲线。在 3 种结构总面积相等并固定的情况下,通过改变入射波长,观察在不同的波长下不同模型的几个主要参数的变化情况。其中,IMI 为对称结构,单层半圆介质加载的波导中半圆的半径为 1 μm ,双层半圆介质加载的波导中半圆外内半径分别为 1 μm 和 0.9 μm ,3 种结构的金属层厚度均为 $t_d = 100 \text{ nm}$,总面积均为 13.5 μm^2 。3 种不同类型的波导的传播长度 L 、归一化模式面积和品质因数在不同波长 λ 下的变化曲线如图 5 所示,其中 5(a)为传播长度,5(b)为归一化模式面积,5(c)为品质因数。如图 5 所示,双层半圆介质加载的表面等离子激元波导在性能上具有明显的优势。在不同的波长下,除了 IMI 模型的传播长度略微占优外,双层半圆介质加载结构对场的限制能力相对较强,而且传播长度和品质因数均优于单层半圆介质加载模型结构。对比以上 3 种不同的波导模型,可以看出双层半圆介质加载的表面等离子激元波导在品质因数这一整体性能上比其他模型结构更具有优势。由于该结构在对限制较强的场下还具有较大的品质因数和较长的传播长度,说明这种新的结构更适于实际的工程。

3.2 双层半圆介质加载表面等离子激元波导结构的性能优化分析

基于上述的分析,进一步优化双层半圆介质加载的表面等离子激元波导的结构。由于加载的介质为双层半圆,通过逐渐调整每一层半圆介质的折射率,得到一组最优的折射率分布。在衬底和金属材料参数固定不变的条件下,即 $n_s = 1.375$, $t_d = 100 \text{ nm}$, $n_d = 0.55 + i9.81$,分别改变双层半圆介质的折射率 n_1 、 n_2 ,其取值范围为 1.35 到 1.55,步进值为 0.01,在该结构条件下,得出一组计算数据。另外为了使计算结果更加精确,将数据在极值点附近的步进值缩小为 0.001。

在不同折射率情形下波导的各参数空间分布曲线如图 6 所示,仿真计算数据有力地证明了双层半圆介质加载的表面等离子激元波导的优势。数值计算结果得到在 $n_1 = 1.4$ 且 $n_2 = 1.473$ 时,该波导的模式面积、品质因数以及传播长度都达到最大值,而且传播长度达到 72.72 μm ,品质因数 M_3 为 130.4。

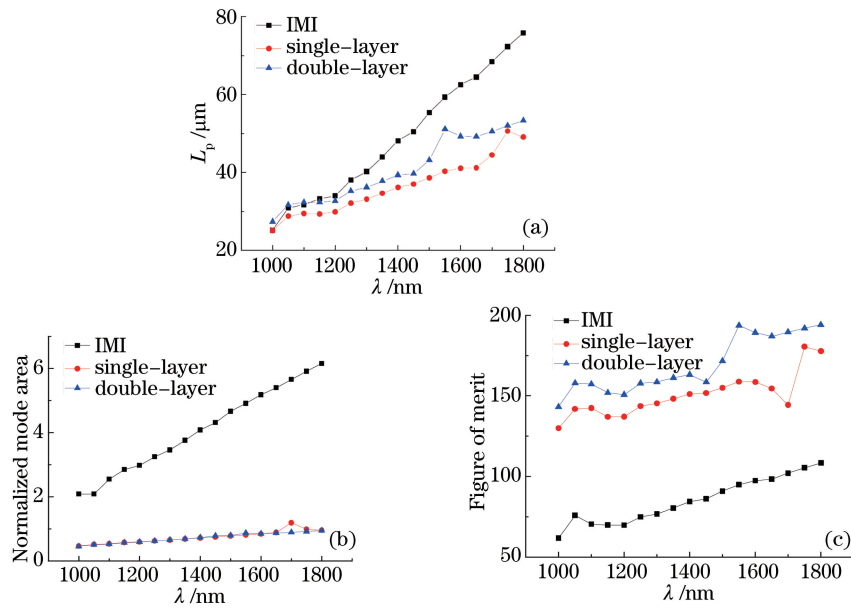


图 5 不同工作波长下 3 种波导结构的特性参数对比曲线。(a) 传播长度; (b) 归一化模式面积; (c) 品质因数

Fig. 5 Transmission characteristics of three kinds of waveguides at different wavelengths.

(a) Propagation length; (b) normalized mode area; (c) figure of merit

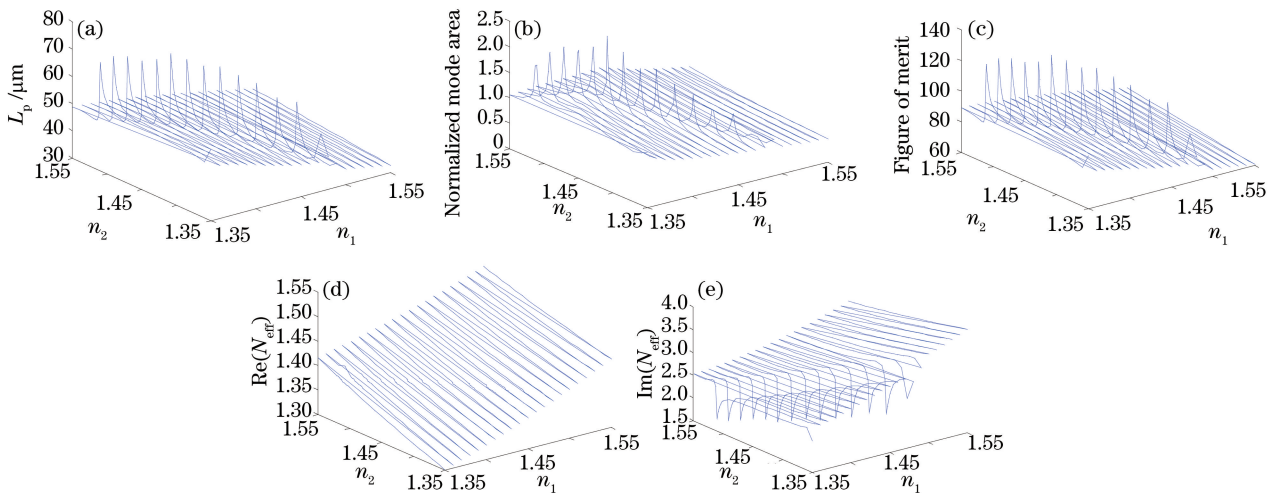


图 6 n_1, n_2 取不同值时双层半圆介质加载等离子激元波导的特性参数分布曲线。

(a) 传播长度; (b) 归一化模式面积; (c) 品质因数; (d) 模式有效折射率; (e) 衰减常数

Fig. 6 Transmission characteristics of double-layer semi-circular dielectric-loaded SPP waveguide at different n_1, n_2 .

(a) Propagation length; (b) normalized mode area; (c) figure of merit; (d) mode effective index; (e) attenuation constant

如图 6 所示,当折射率 n_1, n_2 取不同的组合值时,波导传播特性的几个相关参数的曲线取极值点时的情形具有一定的规律性,当模式面积为极大值时,品质因数和传播长度均为极大值且衰减常数为极小值。现将各极值点的取值列出,如表 1 所示。在 $n_1=1.4$ 且 $n_2=1.473$ 时,该波导结构的特性具有最佳的品质因数。

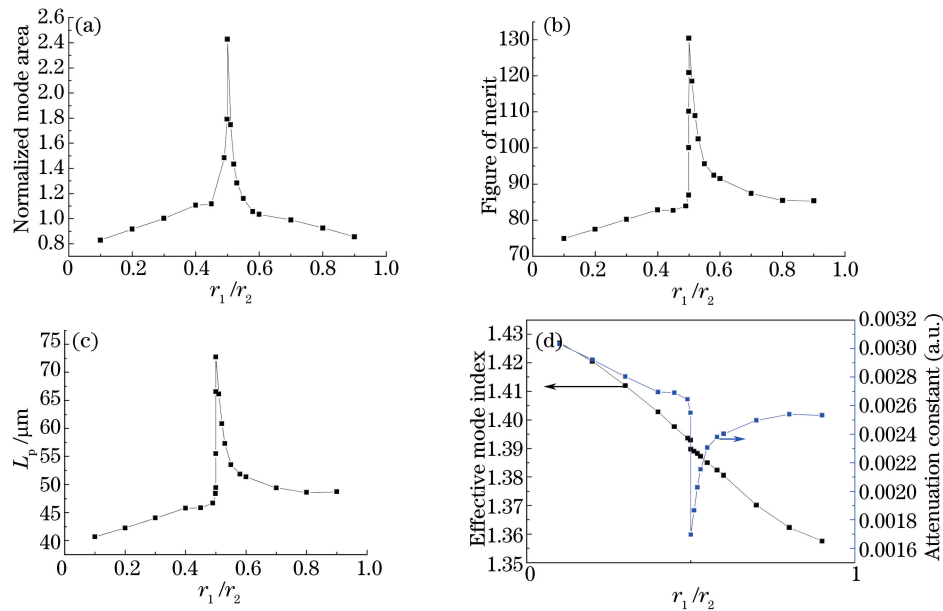
令 n_1, n_2 分别取 1.40 和 1.473,通过改变内外层半圆介质的半径比,就可以在取最优折射率的前提下得到一组最优的半径比,从而进一步地确定双层半圆加载的表面等离子激元波导的最优结构。在其他条件固定不变时,给定不同 r_1/r_2 的取值,给出双层半圆介质加载的表面等离子激元波导主要参数的分布曲线如图 7 所示。

图 7(a)~(c)为当 r_1/r_2 取不同值时归一化模式面积、品质因数和传输波长的变化曲线。该结构归一化模式面积的取值均相对较小,进一步说明该结构对场的限制能力较强;在改变 r_1/r_2 比值时,波导的模式面积、品质因数和传播长度的变化趋势基本保持一致,且均在 $r_1/r_2=0.5$ 时取得最大值。图 7(d)为 r_1/r_2 取不同值时,有效模式折射率和衰减常数的变化情况。显然,衰减常数的最小值在 $r_1/r_2=0.5$ 处。对比图 7

(d)和图 7(a),传播长度随着衰减常数的增加而减小,这与表面波的传播理论分析相一致,即衰减越小,波的传播距离越长。波导品质因数的大小则完全依赖于传播长度与模式面积开方之比,由于模式面积相对变化较小,故此波导的品质因数会随着传播长度的增加而增大。

表 1 n_1, n_2 取不同值时各参数极值点分布Table 1 Extreme points of the parameters at different n_1, n_2

n_1	n_2	Normalized mode area	Propagation length / μm	Figure of merit
1.35	1.51	1.87	69.64	124.83
1.36	1.504	2.11	71.54	128.26
1.37	1.497	2.2072	71.62	128.41
1.38	1.489	2.1468	70.12	125.7
1.39	1.481	2.2214	70.52	126.43
1.40	1.473	2.4288	72.72	130.4
1.41	1.463	2.1313	71.05	127.39
1.42	1.452	1.8329	68.79	123.33
1.43	1.441	1.827	69.1	123.9
1.44	1.428	1.5724	66.49	119.21
1.45	1.414	1.3943	64.17	115.04
1.46	1.398	1.1447	59.82	107.23
1.47	1.382	1.1153	59.36	106.41
1.48	1.36	0.7574	49.23	88.18

图 7 r_1/r_2 取不同值时双层半圆介质加载等离子激元波导的特性参数分布曲线。

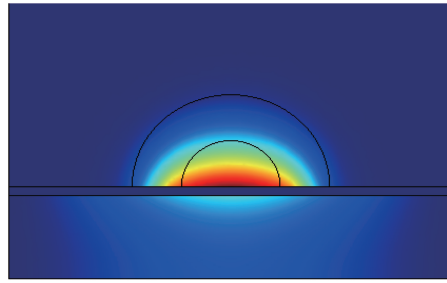
(a) 归一化模式面积; (b) 品质因数; (c) 传播长度; (d) 模式有效折射率和衰减常数

Fig. 7 Transmission characteristics of double-layer semi-circular dielectric-loaded SPP waveguide at different ratios r_1/r_2 .

(a) Normalized mode area; (b) figure of merit; (c) propagation length; (d) mode effective index and attenuation constant

据此,双层半圆介质加载的情况下, $r_1/r_2=0.5$ 即 $r_1=0.5\ \mu\text{m}$ 和 $r_2=1\ \mu\text{m}$ 时,波导的整体传输效果最优,其端面能量分布如图 8 所示。

上面讨论了双层半圆介质加载的表面等离子激元波导的主要参数,并对波导结构尺寸进行了优化。一

图8 $r_1/r_2=0.5$ 时波导端面能量分布Fig. 8 Mode field distribution at $r_1/r_2=0.5$

般说来,衡量波导性能优劣的角度是多重的,不能一味地追求传播长度。文中提出的新型波导结构的优势主要是该波导在模场限制较好的条件下,达到传播长度和品质因数也均较理想的目的。

最后,为了进一步确定上述结论的正确性,还对比了优化后的模型和原始模型的模式面积传播长度以及品质因数,结果如图9所示。如图9所示,这两种模型在模式面积相差不大的情况下,优化模型的传播长度和品质因数都较原始模型有所增长,而且在波长为1550 nm时最为突出。并且优化模型的传播长度和品质因数的平均增幅分别为8.3%和8.5%。

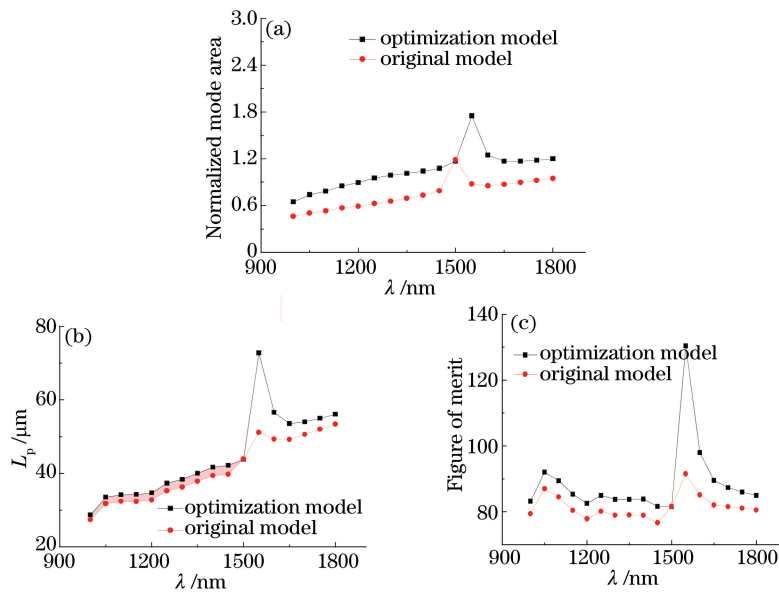


图9 波长取不同值时双层半圆介质加载等离激元波导优化模型和原始模型的特性参数分布曲线。

(a)归一化模式面积;(b)传播长度;(c)品质因数

Fig. 9 Transmission characteristics of optimized model and original model of double-layer semi-circular dielectric-loaded SPP waveguide at different wavelengths. (a) Normalized mode area; (b) propagation length; (c) figure of merit

4 结 论

依据表面等离激元的相关理论,采用有限元的分析方法在探讨介质加载的表面等离激元波导特性的基础上,提出了双层半圆介质加载的表面等离激元波导的新型结构,理论分析和数值模拟仿真表明这种新型结构克服了传统波导对光的束缚能力较差的缺点。对双层半圆介质加载的波导结构进行了优化处理,利用数值计算分析证明了双层半圆介质加载的表面等离激元波导的传输特性具有明显的优势,并且更有利于实际应用。在确保不同结构波导总面积不变的情形下,根据大量的数值仿真计算的结果证明了当双层半圆介质的折射率分别取为 $n_1=1.4$ 和 $n_2=1.473$ 时,波导的传播特性会达到最佳。在此基础上利用控制变量法分析得到了一组使波导传输效果达到最优的半径比 $r_1/r_2=0.5$,即 $r_1=0.5 \mu\text{m}$ 和 $r_2=1 \mu\text{m}$ 时,波导的传输效果最优。该波导结构在对光的约束能力较强的基础上能够实现较大的传播长度和最大的品质因

数, 此项研究结果对于设计高密度的光子集成回路具有一定的参考和应用价值。

参 考 文 献

- 1 Ozbay E. Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[J]. *Science*, 2006, 311(5758): 189-193.
- 2 Ritchie R H. Plasma losses by fast electrons in thin films[J]. *Phys Rev*, 1957, 106(5): 874-881.
- 3 Yao Bo, Liu Ye, Long Hu, *et al.*. Spontaneous emission properties of emitters in dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0824001.
姚波, 刘晔, 龙虎, 等. 介质加载型表面等离子体波导中发光粒子的自发辐射特性[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0824001.
- 4 Chen Jiajia, Sheng Pengchi, Yang Junfeng, *et al.*. Study on slow light of surface plasmon waveguide with low loss[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 112401.
陈佳佳, 盛朋驰, 杨俊风, 等. 低损耗表面等离子体波导慢光传输的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(11): 112401.
- 5 Stefan A Maier. *Plasmonics: Fundamentals and applications*[M]. New York: Springer, 2007.
- 6 Zhao Hai, Song Qing, Sun Haili, *et al.*. Study on transmission characteristics of a hybrid triangle wedge surface plasmonic polaritons waveguide with subwavelength mode confinement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 091301.
赵海, 宋卿, 孙海丽, 等. 一种具有亚波长模式限制的三角楔形混合表面等离子体波导传输特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 091301.
- 7 Raether H. *Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings*[M]. New York: Springer, 1998.
- 8 Boltasseva A, Nikolajsen T, Leosson K, *et al.*. Integrated optical components utilizing long-range surface plasmon polaritons[J]. *J Lightwave Technol*, 2005, 23(1): 413-422.
- 9 Bozhevolnyi S I. *Plasmonic nanoguides and circuits*[M]. Singapore: Pan Stanford Publishing, 2008.
- 10 Tsilipakos O, Ptilakis A, Traianos V, *et al.*. Interfacing dielectric-loaded plasmonic and silicon photonic waveguides: Theoretical analysis and experimental demonstration[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2012, 48(5): 678-687.
- 11 Dong Qiming, Guo Xiaowei. Numerical analysis of SPP maskless interference lithography system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(5): 558-564.
董启明, 郭小伟. 表面等离子体无掩膜干涉光刻系统的数值分析[J]. *光子学报*, 2012, 41(5): 558-564.
- 12 Chen Lin, Li Xun, Gao Dingshan. An efficient directional coupling from dielectric waveguide to hybrid long-range plasmonic waveguide on a silicon platform[J]. *Applied Physics B*, 2013, 111(1): 15-19.
- 13 Chen Yuegang, Liu Guangqun. Simulation investigation of optical wave enhanced transmission through a subwavelength hole on metal film by using nano-antenna[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(9): 091601.
陈跃刚, 刘广群. 纳米天线增强光波透过金属薄膜上亚波长小孔的模拟研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(9): 091601.
- 14 Liu Bingcan, Lu Zhixin, Yu Li. The dispersion relation for surface plasmon at a metal-Kerr nonlinear medium interface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(2): 1180-1184.
刘炳灿, 逯志欣, 于丽. 金属和 Kerr 非线性介质界面上表面等离子体激元的色散关系[J]. *物理学报*, 2010, 59(2): 1180-1184.
- 15 Maier S A. Plasmonics: Metal nanostructures for subwavelength photonic devices[J]. *IEEE J Quantum Electronics*, 2006, 12(6): 1214-1220.
- 16 Zhang Guanmao, Sun Haili, Li Jianming. Study on the transmission characteristics of symmetric hybrid long-range surface plasmon polariton waveguide[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(12): 121301.
张冠茂, 孙海丽, 李建明. 一种对称混合长程表面等离子体波导传输特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(12): 121301.
- 17 Oulton R F, Bartal G, Pile D F P, *et al.*. Novel dielectric-loaded plasmonic waveguide for tight-confined hybrid plasmon mode[J]. *Plasmonics*, 2013, 8(2): 1259-1263.
- 18 Oulton R F, Bartal G, Pile D F P, *et al.*. Confinement and propagation characteristics of subwavelength plasmonic modes[J]. *New Journal of Physics*, 2008, 10(10): 105018.
- 19 Berini P. Figures of merit for surface plasmon waveguides[J]. *Opt Express*, 2006, 14(26): 13030-13042.
- 20 Buckley R, Berini P. Figures of merit for 2D surface plasmon waveguides and application to metal stripes[J]. *Opt Express*, 2007, 15(19): 12174-12182.