

高限制等离子体表面波槽形结构*

陈献, 郝寅雷, 王明华, 杨建义, 江晓清[†]

(浙江大学 信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要:基于等离子体表面波的物理机理,提出一种具有高限制因子的二维亚波长槽形结构.该结构能在二维上都限制在亚波长尺寸,其能量主要限制在芯区中,当芯区横截面尺寸为 $200\text{ nm}\times 800\text{ nm}$,能量限制因子高达 98.5% ,横向模式尺寸近似于芯区宽度;当金属墙厚度大于截止厚度,横向模式尺寸能够达到到深亚波长尺寸.该结构的基模分量 E_x 限制在芯区中,而分量 E_y 只在矩形介质芯区四个与金属接触的直角处被激励,并且关于 x 轴、 y 轴具有反对称性.

关键词:集成光学;等离子体表面波;限制因子;高限制

中图分类号: TN252

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)08-1986-5

0 引言

自从 2000 年, Pirre Berini 报道了嵌入式有限宽度金属薄膜传导等离子体表面波以来^[1],人们看到了突破传统介质波导衍射极限瓶颈的希望,把等离子体表面波看作是未来集成光学小型化、高度集成化的潜在载体,国内外也有大量利用该结构的器件理论和实验报道.利用等离子体表面波对光束的强限制特性,将光束限制在纳米尺寸的研究为其研究热点之一.如嵌入式有限宽度金属薄膜结构(见图 1(a))具有高度限制性的显著特点,但其限制性仅仅限于纵向(y 轴方向),金属厚度一般为 $10\sim 25\text{ nm}$,但横向(x 轴方向)一般达到了 $4\text{ }\mu\text{m}$ 以上,并没有出色地利用等离子体表面波的高度限制性.另外该结构的劣势是其传导的长程等离子体表面波 ss_b^0 强烈依赖于周围介质的对称性,要求折射率差匹配达到 10^{-3} 量级,这对工艺要求太苛刻^[1-2].本文基于等离子体表面波的激励物理原理,并结合介质光波导的特性,提出了一种能克服了上述两大缺陷的新型槽形结构,能将光场在二维上都限制在亚波长尺寸.

1 基本原理

当金属与介质接触,按照麦克斯韦方程组,在一定条件下,可以出现沿着金属与介质分界面上传播的电磁波,其振幅随离开分界面的距离按指数衰减,这种表面波叫做等离子体表面波^[5].分析单个金属介质界面情况,取金属介质分界面为 xz 平面,设电磁波传播方向为 z 轴正方向,如图 1(b),根据麦克

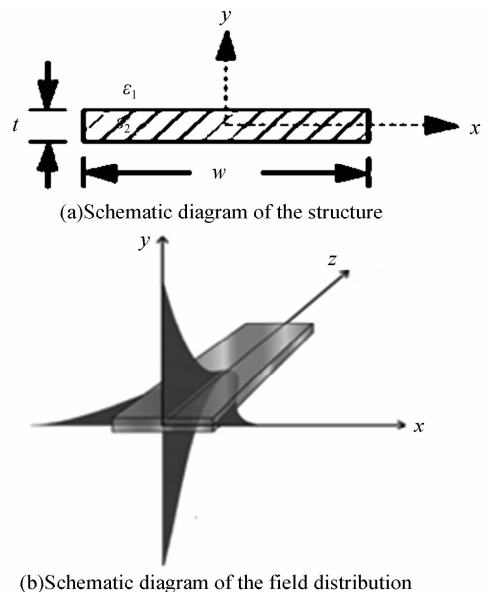


图 1 嵌入式有限宽度金属薄膜
Fig. 1 Embedded thin metal film

斯韦方程组及边界条件得到

$$E_{1y}^0 = E_{2y}^0, \alpha_1 E_{1y}^0 = -\alpha_2 E_{2y}^0, E_{1x}^0 = E_{2x}^0, (\epsilon_1/\alpha_1) E_{1x}^0 = -(\epsilon_2/\alpha_2) E_{2x}^0 \quad (1)$$

$$\rho(z, y=0) = \frac{1}{4\pi} [E_{1y}(0^+) - E_{2y}(0^-)] = \frac{1}{4\pi} \frac{k_{spp}}{k_0} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - \frac{1}{\epsilon_1} \right) H_0 e^{ik_{spp}z} \quad (2)$$

振幅衰减系数 α_1, α_2 为正数, ϵ_1, ϵ_2 分别为介质和金属的介电常量.等离子体表面波实质是束缚电荷密度波,是外来电磁场激发引起的金属中电荷密度涨落,产生集体振荡,辐射出电磁波模,可以说是光子与等离激元耦合,从而被束缚在金属表面传播^[5-7].

对于嵌入式有限宽度金属薄膜结构(图 1(a)),存在四种模式,根据对称性分别定义为 $ss_b^m, sa_b^m, aa_b^m, as_b^m$ ^[1],其中 s 代表关于坐标轴对称, a 代表关于坐标轴反对称, b 表示束缚模式,第一个、第二个字

* 国家重大基础研究计划项目(2007CB613405)和国家自然科学基金项目(60777015)资助

[†] Tel: 13819135586 Email: iseejq@zju.edu.cn
收稿日期: 2008-03-18 修回日期: 2008-05-15

母对应的坐标轴分别是 y 轴、 x 轴(见图 2). 对于金属薄膜,自由电子与电磁波发生耦合共振,发生移动,在边界处形成局部的电荷聚集,形成各种不同对称性的电荷分布,不同对称性的电荷分布对应着不同对称性属性的模式. 因此,本文把矩形金属薄膜在 x - y 平面内用四种不同对称性的电荷分布,分别对

应着上述四种模式,图 2 中只给出了金属四个边角的电荷分布,在整体保持电中性;电荷随电磁波传播而振动,在传输方向上电荷分布会引起变化,对于给定模式,其在 x - y 平面内的电荷分布对称性是恒定不变的.

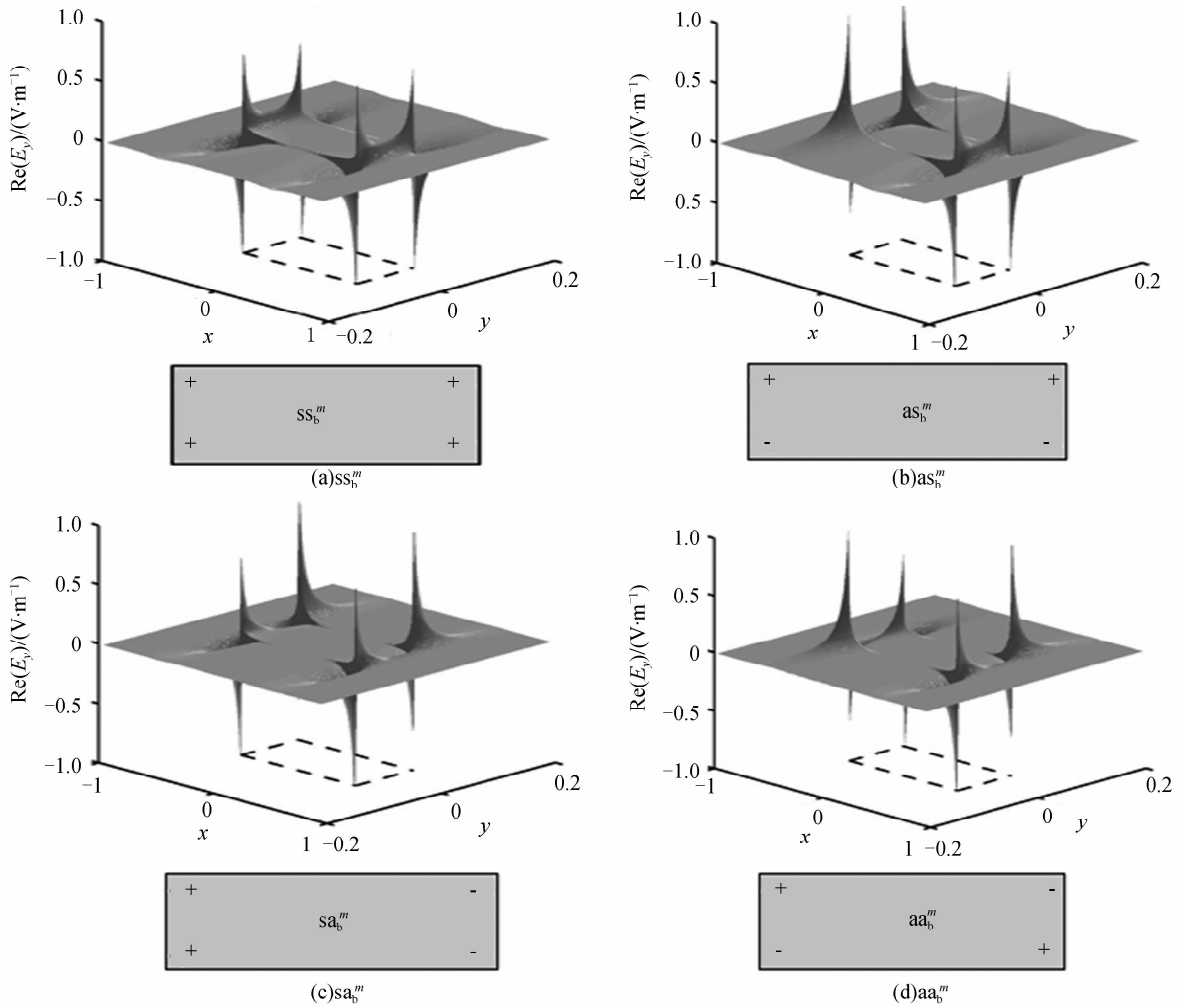


图 2 四种模式 E_y 和对应电荷分布
Fig. 2 E_y of the four mode families and their corresponding charge distribution

2 槽形结构与限制性分析

结合介质波导限制的特性,本文提出了传输反对称模式的改进型槽形结构(图 3),图中芯区填充介质,上覆盖层的折射率小于芯区折射率. 该结构可

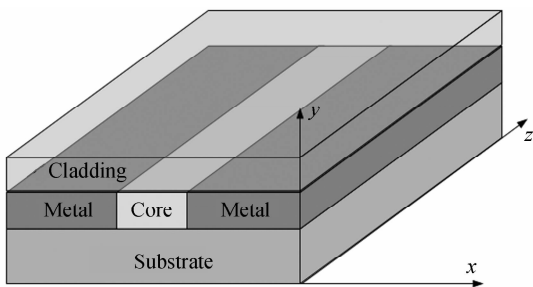


图 3 槽形结构
Fig. 3 Schematic diagram of the channel structure

看成由两个等同嵌入式有限宽度金属薄膜结构横向拉近得到,横向依靠激励出等离子体波来限制光场在芯区,而纵向机理是利用全内反射^[8-9].

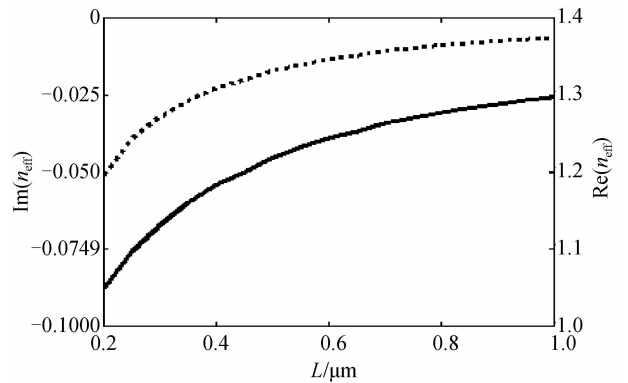
两个金属介质边界形成的等离子体表面波会在金属介质直角处发生耦合形成边角模式,由于芯区尺寸小,四个金属-介质直角边界形成的边角模式在芯区内发生耦合,形成近高斯分布,从而把能量限制在介质芯区里. 对于纵向(y 方向)介质-金属-介质结构,由于等离子体表面波只能是 TM 波,电场分量是 E_y ;对于横向(x 方向)介质-金属-介质结构,电场分量是 E_x . 嵌入式有限宽度金属薄膜结构,当金属薄膜宽高比 $w/t > 1$, E_y 是占支配地位的电场分量; $w/t < 1$, E_x 是占支配地位的电场分量^[1]. 为把光场能量主要限制在介质芯区中, E_x 必须是主要分

量,才能在芯区形成耦合限制住能量. 槽形结构芯区高宽比 h/L 要取合适值, 厚度太小, 使得芯区两边金属-介质界面形成的 E_x 分量不够, 无法有效耦合.

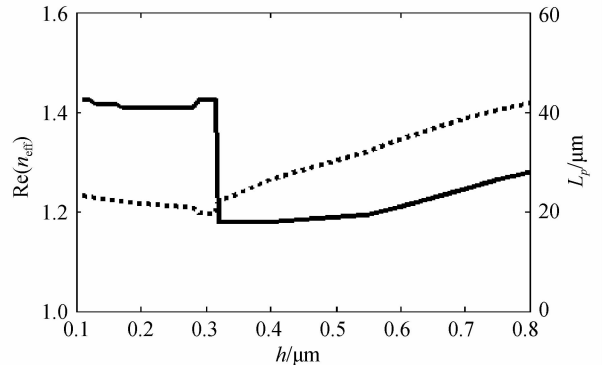
根据上述分析, 采用全矢量有限差分法对槽形结构进行数值计算. 金在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 时的介电常数是 $\epsilon_m = -96.9004 - 10.9677i$, 覆盖层折射率 $N_{\text{clad}} = 1.43$, 衬底折射率 $N_{\text{sub}} = 1.43$, 芯区折射率 $N_{\text{core}} = 1.46$. 本文主要讨论的是基模, 因为基模具有最好的能量区域限制, 另外, 其特性在高阶模式中同样很典型.

首先分析几何参量色散关系(图 4). 芯区宽度 L 增加导致有效折射率 N_{eff} 实部增大, 这意味着传播常数实部 β' 也随着增大, 自然地, 也可能导致支持更高阶模式. N_{eff} 虚部 N_{eff}'' 与损耗联系在一起, L 的增加可以减少损耗, 这是由于等离子体表面波在界面处达到最大值, 向两边指数衰减, 横向金属-金属结构中的 L 增加, 场在介质中的分布比重增大, 损耗减少(图 4(a)).

L 一定, 而金属墙厚度 h 比较大时, 模式是场束缚的, 即场主要被限制在芯区中, 损耗比较小, 见图 4(b) 区域 III. 随着金属墙厚度 h 减小, 场逐渐向覆盖层与衬底渗透, 损耗也随之增大, 传播长度 L_p (电场强度衰减到 $1/e$ 的长度) 变小, 这是区域 II, 场分布如图 5(a). 当金属墙厚度 h 进一步减小, 进入图 4(b) 区域 I, 场进一步向覆盖层与衬底渗透, 无法再被限制住芯区中, 演变成嵌入式有限宽度金属薄膜结构, 限制性变差, 场分布如图 5(b). 对于被束缚在芯区的基模而言, 金属墙存在一个截止厚度 h_{cutoff} , 即给定芯区宽度 L , 金属墙厚度 h 只有大于截止厚度 h_{cutoff} , 才能支持导模, 太薄的金属墙形成表面模, 无法在横向上很好的限制场分布.



(a) N_{eff} real part (solid line) and imaginary part L_p (dashed) versus the h



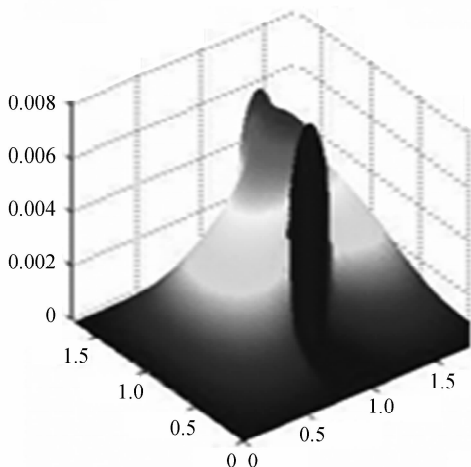
(b) N_{eff} real part (solid line) and the L_p (dashed) versus the h

图 4 几何参量色散

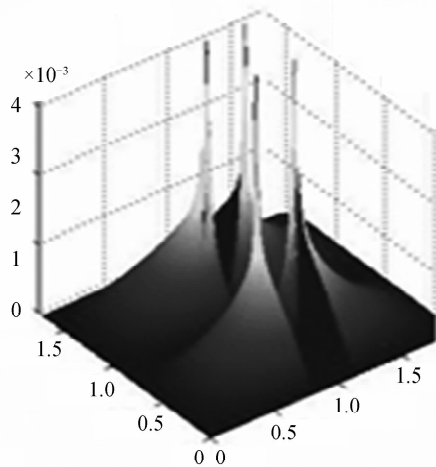
Fig. 4 Geometry parameters dispersion

选定参量 $L = 200 \text{ nm}$, $h = 800 \text{ nm}$, 计算场分布(见图 6). E_x 是占支配地位的电场分量, 主要被限制在介质芯区中, 其关于 x 轴、 y 轴对称. E_y 是其中的小量, 其关于 x 轴、 y 轴都是反对称的.

E_x 在芯区两边与金属的分界面很陡直, 说明其在金属中渗透的场衰减非常快, 这是由等离子体表面波的本质所决定的, 场在金属中按指数衰减. 横向模式尺寸基本等同于芯区宽度 L , 在横向很好的利用了等离子体表面波高限制性的特点. 定义限制性因子为芯层横截面区域内模式所带的复功率与整个



(a) E_x , core section is $500\text{nm} \times 320\text{nm}$



(b) E_y , core section is $500\text{nm} \times 320\text{nm}$

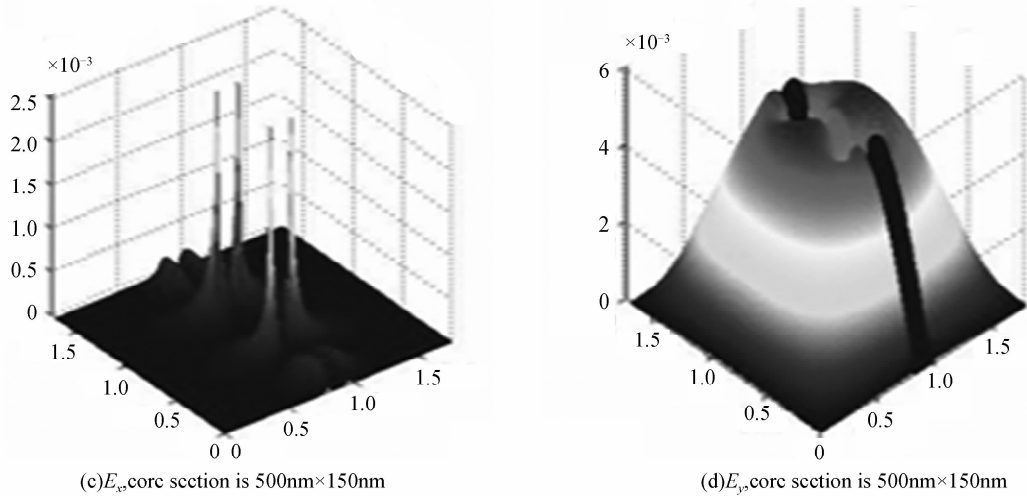


图 5 区域 II、III 对应模式的 $|E_x|$ 和 $|E_y|$
 Fig. 5 Profile of $|E_x|$ and $|E_y|$ in region II、III

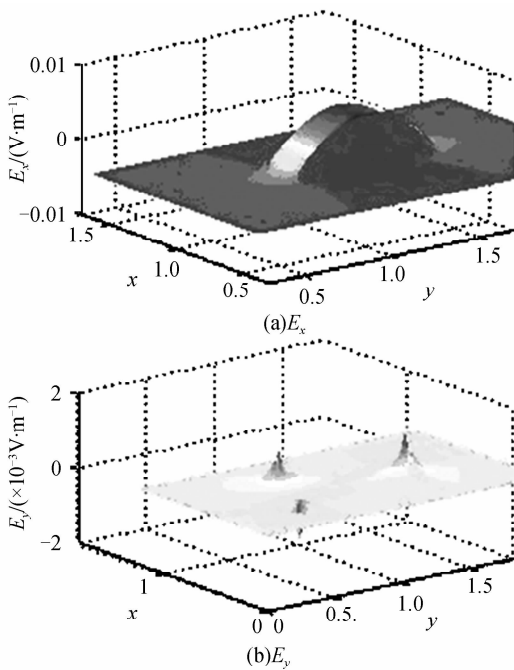


图 6 电场分量分布
 Fig. 6 Profile of the field components

横截面模式所带的复功率的比值,其表达式为

$$cf = \frac{|\iint_{A_c} S_z ds|}{|\iint_{A_\infty} S_z ds|} \quad (3)$$

A_c 代表结构芯区面积, A_∞ 表示在整个结构横截面上进行积分, $S_z = \frac{1}{2}(E_x H_y^* - E_y H_x^*)$,代表玻印亭矢量的 z 分量, $H_{x,y}^*$ 表示 $H_{x,y}$ 的共轭复数.玻印亭矢量的 z 分量空间分布可以由相应的空间电场、磁场分布计算得到^[1].芯区尺寸 $200 \text{ nm} \times 800 \text{ nm}$,其限制因子 cf 为 98.5% .对比几种结构的限制性,嵌入式有限宽度金属薄条的限制因子 cf 一般为 $\sim 14\%$ ^[1].被空气包围的嵌入式介质结构,介质折射率依然为 1.46 ,相同尺寸其芯区限制因子 cf 仅为 9.9% .而对于空气覆盖层的金属膜沟道结构^[7],相

同尺寸的芯区限制因子为 81.36% .新型槽形结构提高了限制因子,更好的利用了等离子体表面波高限制性的特点.这是由于芯区填入了高折射率的介质,使得在芯区内的能量比重增加,从而凸显等离子体表面波的优势,其横向模式尺寸几乎等于芯区宽度 L .计算所选用的介质折射率参量分别为 $N_{\text{clad}} = 1.43, N_{\text{core}} = 1.46$,说明槽形结构对周围介质折射率匹配的要求比嵌入式有限宽度金属薄膜结构低,后者的折射率差匹配要达到 10^{-3} 量级.

集成光学小型化、高度集成的趋势要求结构横向模式尺寸越来越小,嵌入式金属薄膜没有很好的解决该问题.新型槽形结构存在截止厚度 h_{cutoff} ,为了确保模式不截止,一般金属墙厚度为 100 nm 量级.通过计算,当 h 为几百纳米时,即使 L 为 10 nm ,能量依然主要被限制在芯区中,限制因子接近 1 .图 7 是芯区尺寸为 $10 \text{ nm} \times 800 \text{ nm}$,主要电场分量 E_x 的等高线分布图,此时能量主要被限制在芯区中.本结构在减小横向模式尺寸具有非常优越的潜力,是高限制的亚波长等离子体表面波结构.

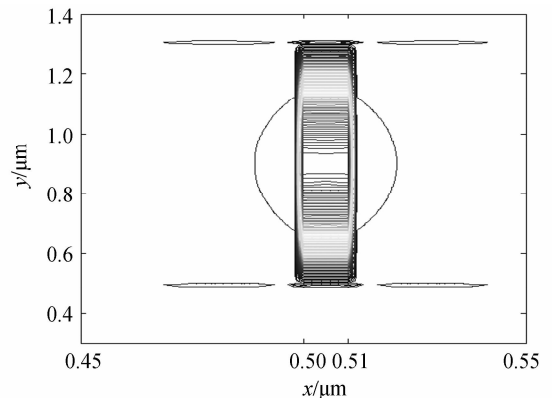


图 7 E_x 等高线分布
 Fig. 7 Contour figure of E_x

3 结论

以嵌入式有限宽度金属薄膜结构为模型,并结合介质波导特性,提出一种具有高限制因子的二维亚波长槽形结构. 该结构的基模占支配地位的 E_x 电场分量被高度限制在芯区内,而 E_y 电场分量只在矩形芯区四个与金属接触的直角处存在,其关于 x 轴、 y 轴都是反对称的. 分析了芯区尺寸参量的色散关系,金属墙存在截止厚度 h_{cutoff} ,当 $h < h_{\text{cutoff}}$,无法限制场在芯区. 具有很好的限制性,限制因子一般接近于 1,能量高度集中在芯区. 相比其他结构,新型槽形结构在横向限制性上具有明显优势,在模式截止前,横向模式尺寸可以达到深亚波长,甚至小到 10 nm. 横向模式尺寸几乎等于芯区宽度 L ,这对结构设计很有意义. 也降低了对周围折射率的匹配要求.

参考文献

- [1] PIERRE B. Plasmon-polariton waves guided by thin lossy metal films of finite width Bound modes of symmetric structures[J]. *Physical Review B*, 2000, **61**:10484-10503.
- [2] EYAL G, MEIR O. Modeling of complementary (void) plasmon waveguiding[J]. *Lightwave Technology*, 2007, **25**:2547-2562.
- [3] LIU Liu, HAN Zhang-hua, HE Sai-ling. Novel surface plasmon waveguide for high integration[J]. *Optics Express*, 2005, **13**: 6645-6650.
- [4] GEORGIOS V, FAN Shan-hui. Guided subwavelength plasmonic mode supported by a slot in a thin metal film[J]. *Opt Lett*, 2005, **30**:3359-3362.
- [5] SHE Shou-xian. Physical basis of guided optics[M]. Northern Jiaotong University Press, 2002:99-116.
余守宪. 导波光学物理基础[M]. 北方交通大学出版社, 2002: 99-116.
- [6] LÜ Qiang, HUANG De-xiu, YUAN Xiu-hua. Stability research of water quality analysis system based on surface plasmon resonance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7):1268-1272.
吕强, 黄德修, 元秀华. 基于表面等离子体共振的水质分析系统稳定性研究. [J]光子学报, 2007, **36**(7):1268-1272.
- [7] GU Ben-yuan. Surface plasmon optical principle and novel effect in subwavelength[J]. *Physics*, 2007, **36**(4).
顾本源. 表面等离子体亚波长光学原理和新型效应[J]. 物理, 2007, **36**(4).
- [8] PILE D F P, GRAMOTNEV D K, HARAGUCHI M, *et al.* Numerical analysis of coupled wedge plasmons in a structure of two metal wedges separated by a gap[J]. *Applied Physics*, 2006, **100**:1-8.
- [9] GEORGIOS V, FAN Shan-hui. Guided subwavelength plasmonic mode supported by a slot in a thin metal film[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**:3359-3361.

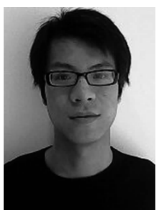
Highly Confined Channel Structure of the Surface Plasmon

CHEN Xian, HAO Yin-lei, WANG Ming-hua, YANG Jian-yi, JIANG Xiao-qing

(Dept. of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on the surface plasmon physical mechanism, a 2-dimension sub-wavelength channel structure with high confinement factor was presented, Whose size was both sub-wavelength in 2-dimension, and the power was mainly confined in the core section. Power confinement factor was as high as 98.5 percent when the core cross section was $200 \text{ nm} \times 800 \text{ nm}$, and the lateral mode size was almost equal to the width of the core section. If the height of the metal wall was larger than the cut-off height, the lateral mode size could be deep subwavelength. The E_x field component of the fundamental mode was confined in the core section, the E_y field component only exists at the four angles formed by the metal and dielectric, being antisymmetric with respect to x and y axes.

Key words: Integrated optics; Surface plasmon; Confinement factor; Highly confined



CHEN Xian was born in 1983. Now he is a M. S. degree candidate in Zhejiang University. His research interests focus on surface Plasmon.