

## 超薄金属膜 V-型槽等离子波导的定向耦合研究

朱凝<sup>1,2</sup>, 李浩<sup>1,2</sup>, 张辉<sup>1,2</sup>

- (1. 华南师范大学 广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510631;
2. 华南师范大学 光电子材料与技术研究, 广东 广州 510631)

**摘要:** 分析了在 1550 nm 波长下超薄金属膜(金膜厚  $t=10$  nm)V-型槽等离子波导间长程沟道等离子波导的定向耦合。通过计算不同波导间距下的模式分布, 得出了定向耦合器中奇、偶模有效折射率实部和传播长度随波导间距的变化情况, 并进一步计算了相邻波导间的耦合长度、最大串扰与波导间距的关系曲线。计算结果表明: 在波导间距较小时, 耦合长度小于各模式的传播长度, 随着波导间距的增加, 耦合长度随之增加, 最大串扰随之减小。对超薄金属膜 V-型槽等离子波导的定向耦合研究在集成光路的实际应用中具有重要的价值。

**关键词:** 定向耦合; 金属膜 V-型槽; 等离子波导; 沟道等离子波导

**中图分类号:** TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1554-04

## Directional coupling in V-groove plasmonic waveguides with ultra thin metal film

Zhu Ning<sup>1,2</sup>, Li Hao<sup>1,2</sup>, Zhang Hui<sup>1,2</sup>

- (1. Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;
2. Institute of Optoelectronic Material and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

**Abstract:** The directional coupling of long-ranging channel plasmon polariton in the V-groove plasmonic waveguides covered with ultra thin metal film was studied. By calculating the modes' distributions, confinement factors and propagation lengths of the odd and even modes in different waveguide distances were acquired. The relationship between coupling length and maximum crosstalk with different waveguide distances were calculated. It is found that the coupling length is smaller than the propagation lengths of any mode in small waveguide distance, and the coupling length becomes larger and the maximum crosstalk becomes smaller as the waveguide distance increases. The investigation of the directional coupling in the V-groove plasmonic waveguides with ultra thin metal film is important to its applications in the photonic integrated circuits.

**Key words:** directional coupling; metal film V-groove; plasmonic waveguide; channel plasmon polariton

收稿日期: 2014-09-11; 修订日期: 2014-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(61308007); 高等学校博士学科点专项科研基金(20134407120012)

作者简介: 朱凝(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事集成光子器件方面的研究。Email: zhuning@sncu.edu.cn

## 0 引言

表面等离子极化激元 (Surface Plasmon Polaritons, SPPs) 是电磁场与金属表面电荷集体振荡形成的电磁激子,存在于金属与介质界面<sup>[1-3]</sup>,其场分布在垂直于界面方向上急剧衰减。由于 SPPs 能突破衍射极限的限制使其可应用于新一代的纳米光子器件与回路,以实现高密度的光路集成,为开辟亚波长光学提供了新的道路。通常对 SPPs 的束缚是通过减少 SPPs 在介质中的空间分布而增加金属对 SPPs 的吸收来获得,因此,可通过选择合适的 SPPs 波导结构来满足不同场束缚要求。V-型槽沟道等离子波导中的沟道等极化激元 (Channel Plasmon Polaritons, CPPs) 因具有较小的模式面积与较强的场束缚使其在实际应用上极有前景<sup>[4-7]</sup>。最近,参考文献[8]数值研究了金属膜 V-型槽沟道等离子波导中有限厚度金属膜情况下短程 SPP (Short-ranging Surface Plasmon Polariton, SR-SPP) 相互耦合形成的短程沟道等极化激元 (Short-ranging Channel Plasmon Polartion, SR-CPP) 模式的传播特性,发现当金属膜厚度减小时模式尺寸与传播长度都会减小。参考文献[9]则数值研究了超薄金属膜 V-型槽沟道等离子波导中长程 SPP (Long-ranging Surface Plasmon Polariton, LR-SPP) 相互耦合形成的长程沟道等极化激元 (Long-ranging Channel Plasmon Polartion, LR-CPP) 模式的传播特性,分析表明 LR-CPP 相比于 SR-CPP 具有更大的模式尺寸和更长的传播距离。

向耦合器 (Directional Couplers, DCs) 应用非常广泛,可应用于光开关、调制器、功率分束器与波长分束器等。其中基于 SPPs 的定向耦合器由于具有超紧凑、体积小等特点<sup>[10]</sup>,近年已成为一大研究热点。其中参考文献[11]中理论分析了基于 V-型槽等离子波导的定向耦合器,通过研究其耦合长度与波导间距的关系发现:即使波导间距为零时也不能够实现良好的定向耦合。参考文献[12]则制作了一种基于 V-型槽等离子波导的定向耦合器,通过近场光谱仪对定向耦合器进行表征,发现其所提出的结构在小波导间距时 (0.08~0.25  $\mu\text{m}$ ) 可以实现电磁能量的 50% 转移,而当间距达到 2  $\mu\text{m}$  时,波导间耦合截止。然而,以上参考文献中所研究的 V-型槽等离子波导中存在导模损耗较大的情况,这里笔者利用基于有限元法的 COMSOL Multiphysics 商业软件中的 RF

模块分析了在通信波长下超薄金属膜 V-型槽等离子波导间 LR-CPP 的定向耦合。与传统 V-型波导相比,超薄金属膜波导传输损耗较小,同时由于模场相对扩散,即使在波导间距较大情况下也可实现定向耦合,有利于光通信器件的设计。

## 1 超薄金属膜 V-型槽等离子波导

超薄金属膜 V-型槽等离子波导的结构如图 1(a) 所示。其结构参数如下:介质折射率 2.38,金属为金,其介电常数为  $\epsilon_{\text{Au}} = -131.95 + 12.65j$ ,工作波长为 1 550 nm,槽底角  $\theta = 30^\circ$ ,槽深  $h = 5 \mu\text{m}$ ,膜厚  $t = 10 \text{ nm}$ ,同时在棱角处做了圆化处理。通过模式分析得到其电场强度横向分量  $E_x$  分布如图 1(b) 所示,对应的有效折射率为  $n_{\text{cpp}} = 2.3821 + 1.522 \times 10^{-4}i$ ,结果与参考文献[9]一致,同时利用以下公式<sup>[9]</sup>:

$$l_{\text{cpp}} = 1 / (2 \text{Im}[n_{\text{cpp}}] k_0) = \lambda / (4 \pi \text{Im}[n_{\text{cpp}}]) \quad (1)$$

可计算出 LR-CPP 模式在此结构下的传播长度为  $L_{\text{cpp}} = 810.7 \mu\text{m}$ 。在以上结构参数下,等离子波导内所支持的 LR-CPP 模式具有最大的传播长度。

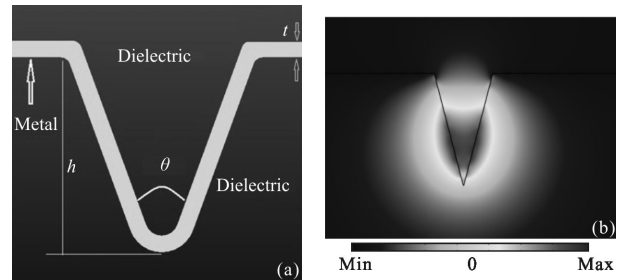


图 1 超薄金属膜 V-型槽波导结构和 LR-CPP 模式的横向电场  $E_x$  强度分布

Fig.1 V-groove Channel Plasmon Polariton (CPP) with ultra-thin metal film and electric field distribution of Long Range-CPP

## 2 超薄金属膜 V-型槽等离子波导间的 LR-CPP 定向耦合

图 2(a) 所示为定向耦合器的结构示意图,波导间距为  $D$ ,如图 2(b)、(c) 所示分别为波导间距为  $D = 1.23 \mu\text{m}$  时奇、偶模的电场  $E_x$  强度分布。从场分布图可知,相比于参考文献[10]中的沟道等离子模式,文中所采用结构中的 LR-CPP 模式的场束缚要弱,即使在波导间距比较大的情况下相邻波导间的电场仍有交叠,如偶模的电场强度分布图所示,两波导模式之间的电场交叠较为明显。通过提高金属膜厚以及改变 V 型槽底角可以提高波导结构对 CPP 模式的

束缚,但也会带来更大的传输损耗。

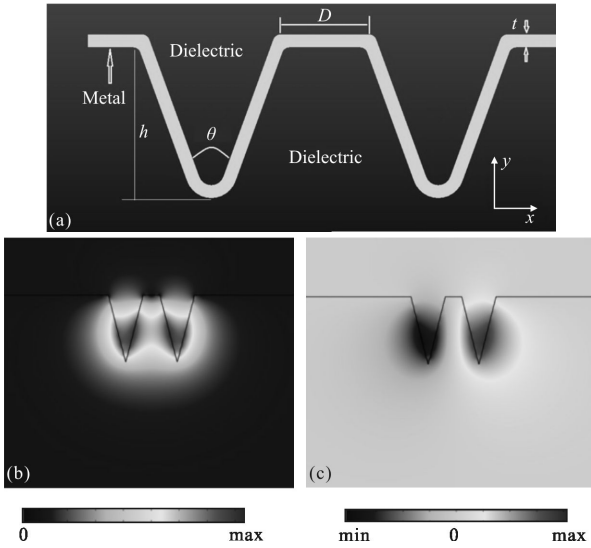


图 2 (a) 基于超薄金属膜 V-型槽等离子波导的定向耦合器结构;(b)  $D=1.23 \mu\text{m}$  奇模的横向电场  $E_x$  强度分布;(c)  $D=1.23 \mu\text{m}$  偶模的横向电场  $E_x$  强度分布

Fig.2 (a) Directional coupler based on LR-CPP and field distribution of (b) odd mode and (c) even mode when  $D=1.23 \mu\text{m}$

通过模式分析,得到不同间距  $D$  时奇、偶模有效折射率实部  $N_{\text{odd}}$  与  $N_{\text{even}}$  的变化情况,如图 3 所示。从图中可知, $N_{\text{odd}}$  始终大于  $N_{\text{even}}$  并在波导间距  $D$  较小

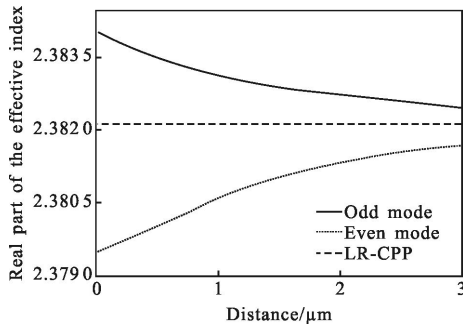


图 3 在 1550 nm 波长下,金属膜厚度  $t=10 \text{ nm}$  时,奇、偶模的有效折射率随间距的变化情况

Fig.3 Effective refractive indices of even and odd modes change with the distance at the wavelength of 1550 nm when the thickness of the metal film is 10 nm

时两者相差比较大,随着波导间距  $D$  的增大,两者逐渐趋近于 LR-CPP 模式的有效折射率实部。偶模有着更小的有效折射率实部,因此具有更弱的场束缚。

有效折射率的虚部可以通过传播长度来体现,利用公式(1)可求出各模式传播长度与间距  $D$  的关系。耦合长度(Coupling Length,  $L_{\text{coupling}}$ )定义为起始耦合区到最大串扰处的距离,而串扰为两波导中的电

场强度之比<sup>[12]</sup>,可由公式(2)计算出耦合长度。

$$L_{\text{coupling}} = \frac{\lambda}{2(N_{\text{odd}} - N_{\text{even}})} \quad (2)$$

图 4 比较了在不同波导间距  $D$  下各种模式传播长度与波导间的耦合长度。从图中可知,奇、偶模式场分布的微小变化会带来传播长度的差别,特别在波导间距  $D$  较小的情况下,偶模的传播长度大于奇模的传播长度,随着波导间距  $D$  的增加,奇、偶模式传播长度差别变小。不同于参考文献[12]中耦合长度大于奇、偶模传播长度的情况,这里耦合长度要比各模式传播长度小,尤其是偶模的传播长度可以比耦合长度大 4 倍,同时在波导间距  $D=1 \mu\text{m}$  时,奇、偶模、LRCPP 模式的传播长度相等,这一间距要比参考文献[12]中略小。这使两波导间可在传输能量没有大幅衰减之前实现能量的周期性转移,对基于定向耦合器的调制器实现开关功能尤为重要<sup>[12]</sup>。

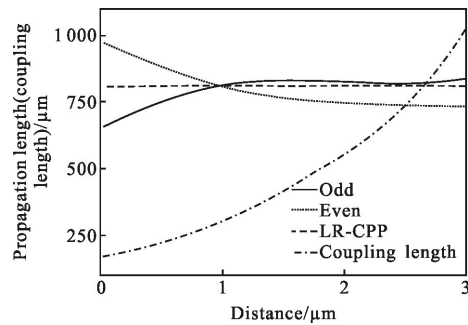


图 4 在 1550 nm 波长下,金属膜厚度  $t=10 \text{ nm}$  时,奇模、偶模、LR-CPP 模式传播长度和耦合长度随间距  $D$  的变化情况  
Fig.4 Propagation length and coupling length of even and odd, LR-CPP modes change with the distance at the wavelength of 1550 nm when the thickness of the metal film is 10 nm

为了进一步分析金属膜厚度  $t$  对定向耦合器特性的影响,计算了在波导间距  $D=1 \mu\text{m}$  时,奇、偶模传播长度与耦合长度随金属膜厚度的变化情况,如图 5 所示。从图中可知,在金属膜厚度为较小尺寸时(5~10 nm),传播长度随着金属膜厚度的增加而急剧减小,同时耦合长度的增加则较为缓慢。但当金属膜厚度大于 10 nm 时,情况与之相反,传播长度随金属膜厚度的增加而减小地较为缓慢,同时耦合长度则增加较快。在光子集成电路中,要避免两波导由于间距太近带来的信号干扰,需要对两波导间的最大串扰进行分析,由公式(3)可计算出两波导间的最大串扰<sup>[12]</sup>:

$$XT_{\text{max}} = XT(L_{\text{coupling}}) = \{ \tanh(\text{Im}[\Delta n] k_0 L_{\text{coupling}}) \}^{-2} \quad (3)$$

式中: $\Delta n = (n_{\text{even}} - n_{\text{odd}})/2$  为奇、偶模有效折射率虚部之差的一半。图 6 为金属膜厚度  $t=10 \text{ nm}$  时,波导间距

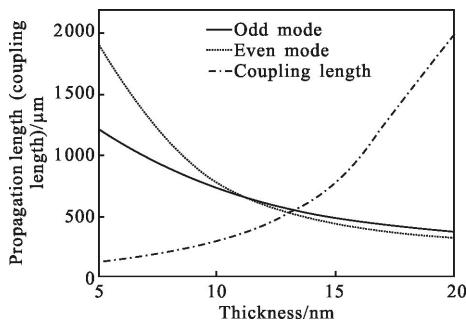


图5 在1500 nm波长下,波导间距 $D=1\ \mu\text{m}$ 时,奇模、偶模传播长度和耦合长度随金属膜厚度 $t$ 的变化情况

Fig.5 Propagation length and the coupling length of even and odd modes change with the film thickness at the wavelength of 1550 nm when the distance is fixed as  $D=1\ \mu\text{m}$

$D=1\sim 3\ \mu\text{m}$ 范围内最大串扰随间距 $D$ 的变化情况,从图中可知最大串扰的变化趋势是随着波导间距 $D$ 的增加而减小。从图4可以看出:随着波导间距的增

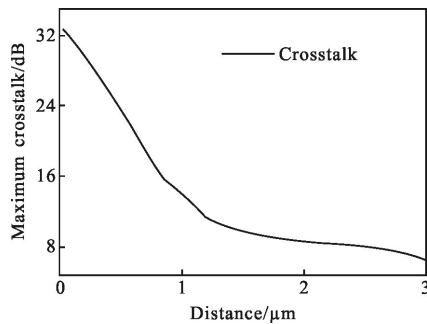


图6 在1550 nm波长下,金属膜厚度 $t=10\ \text{nm}$ 时,最大串扰随间距 $D$ 的变化情况

Fig.6 Maximum crosstalk as the distance increases at the wavelength of 1550 nm when the thickness of the metal film is 10 nm

加, $\Delta n$ 随之减小,直到 $D=1\ \mu\text{m}$ 附近达到最小值零。但是由于耦合逐渐减弱造成耦合长度增加得更为显著,从而导致最大串扰值整体趋势为随间距增加而下降,除在 $1\ \mu\text{m}$ 附近由于 $\Delta n$ 有最小值而使曲线有微弱的隆起部分。

## 4 结论

通过对基于超薄金属膜V-型槽等离子波导定向耦合器的数值计算,分析了器件中奇、偶模式电场强度的分布情况。由于文中所采用结构中等离子波导对LR-CPP的场束缚较弱,导致等离子波导间电场强度的交叠程度较大,这在实际应用中需要着重加以考虑。同时计算了奇、偶模式的传播长度、耦合长度随波导间距的变化情况,发现在小波导间距时

奇、偶模传播长度差别较大,但是耦合长度可小于各模式的传播长度,这要优于已有的关于V-型槽等离子波导定向耦合的报道。最后分析了波导间最大串扰和波导间距的变化曲线,分析表明随着波导间距的增加,由于波导间耦合的减弱导致最大串扰变小。此研究为超薄金属膜V-型槽等离子波导应用于实际光集成回路提供了理论依据。

## 参考文献:

- [1] Agranovich V M, Mills D L. Surface Polaritons: Electromagnetic Waves at Surfaces and Interfaces [M]. Amsterdam: North-Holland, 1982.
- [2] Li Zhiqian, Zhu Jun, Niu Liyong, et al. Analysis on SPP pulse rectifier producing THz electromotive force[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2346-2350. (in Chinese)
- [3] Jin Fengze, Du Chunlei, Shi Lifang, et al. Experiment on the surface plasma resonance imaging sensors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 275-278. (in Chinese)
- [4] Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, et al. Channel plasmon-polariton guiding by subwavelength metal grooves [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(4): 046802.
- [5] 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): 5252-5260.
- [6] Moreno E, Garcia-Vidal F J, Rodrigo S G, et al. Channel plasmon-polaritons: modal shape, dispersion, and losses [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(23): 3447-3449.
- [7] Moreno E, Rodrigo S G, Bozhevolnyi S I, et al. Guiding and focusing of electromagnetic fields with wedge plasmon polaritons[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(2): 023901.
- [8] Dintinger J, Martin O J F. Channel and wedge plasmon modes of metallic V-grooves with finite metal thickness[J]. *Optics Express*, 2009, 17(4): 2364-2374.
- [9] Lee S, Kim S. Long-range channel plasmon polaritons in thin metal film V-grooves [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9836-9847.
- [10] Zhao H, Guang X, Huang J. Novel optical directional coupler based on surface plasmon polaritons [J]. *Physica E*, 2008, 40(10): 3025-3029.
- [11] Li Y, Zhang X. Directional couplers using V-groove plasma waveguides [C]//IEEE Symposium on Photonics and Optoelectronics, 2009: 1-3.
- [12] Zenin V A, Volkov V S, Han Z, et al. Directional coupling in Channel Plasmon-Polariton Waveguides[J]. *Optics Express*, 2012, 20(6): 6124-6134.