

基于纳米天线的多通道高强度定向表面等离子体波激发

熊志成 朱丽霖 刘诚 高淑梅 朱健强

High-intensity directional surface plasmonic excitation based on the multi metallic slits with nano-antenna

Xiong Zhi-Cheng Zhu Li-Lin Liu Cheng Gao Shu-Mei Zhu Jian-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 247301 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.247301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.247301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纳米银六角阵列在掺氧氮化硅中的局域表面等离激元共振特性仿真

Simulation of localized surface plasmon resonance of hexagonal Ag nanoarrays and amorphous oxidized silicon nitride

物理学报.2015, 64(17): 177301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.177301>

Au 纳米颗粒和 CdTe 量子点复合体系发光增强和猝灭效应

Enhancement and quenching of photoluminescence from Au nanoparticles and CdTe quantum dot composite system

物理学报.2015, 64(16): 167301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.167301>

复合金属光栅模式分离与高性能气体传感器应用

Split modes of composite metal grating and its application for high performance gas sensor

物理学报.2015, 64(14): 147302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.147302>

径向偏振光下的长焦、紧聚焦表面等离子体激元透镜

Plasmonic lens with long focal length and tight focusing under illumination of a radially polarized light

物理学报.2015, 64(9): 097301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.097301>

十字结构银纳米线的表面等离极化激元分束特性

Surface plasmon polaritons splitting properties of silver cross nanowires

物理学报.2015, 64(9): 097303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.097303>

基于纳米天线的多通道高强度定向表面等离子体波激发^{*}

熊志成¹⁾ 朱丽霖¹⁾ 刘诚^{1)†} 高淑梅¹⁾ 朱健强²⁾

1)(江南大学理学院, 无锡 214122)

2)(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2015年7月19日收到; 2015年9月5日收到修改稿)

设计了一种带有纳米天线的金属微腔结构, 以实现高强度表面等离子体的定向激发. 在利用双狭缝结构实现表面等离子体波定向激发的基础上, 分别结合共振增强和干涉相长原理, 在传统结构的入射端面上添加纳米天线结构, 并增加狭缝通道数, 实现了定向激发的表面等离子体波的能量增强. 基于纳米天线的多通道高强度定向表面等离子体波激发装置结构简单, 系统紧凑, 并能够有效提高定向传播的表面等离子体波的能量密度和传播距离, 其对微纳光学传输和高密度光学集成领域等方面的研究具有重要意义.

关键词: 表面等离子体, 定向激发, 纳米天线

PACS: 73.20.Mf, 52.25.-b, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.64.247301

1 引言

表面等离子体波是一种满足麦克斯韦方程组的特殊电磁波, 本质是光和金属表面的自由电子相互作用时因电荷聚集密度快速变化而产生的电磁振荡. 表面等离子体波强度在垂直于金属表面的方向呈指数衰减, 仅局域在金属表面并沿金属表面进行传播^[1]. 近年来对金属等离子在亚波长尺寸的近场增强、表面受限、波长变短等系列特性进行了广泛研究^[2], 如异常透射、高密度数据存储、光学成像、太阳能电池、生物荧光探针、拉曼散射加强、生物传感、完美吸收体和完美透镜等^[3–9]. 由于表面等离子体波可以利用光栅耦合、全反射耦合或纳米狭缝进行激发^[10], 因此其有望实现基于金属微结构的全光集成, 从而可在微纳尺寸下实现光的调制和操控.

为了实现基于金属微结构的全光集成, 需要对表面等离子体波的传播方向进行调控, 从而实现其

在希望关联的微结构间发生耦合或共振, 而在另一些微结构之间彼此隔离. 使用光栅、透镜等常规方法所激发的表面等离子体波通常被对称激发, 并在多个方向上传播, 这不仅会造成能量的耗散, 而且容易在金属微结构之间引起不需要的耦合. 因此, 为了实现表面波的长程定向传播, 表面等离子体波的定向激发成为了研究热点之一^[11]. Lo'pez-Tejiera等^[12]在狭缝两侧刻蚀不对称的光栅, 并利用布拉格反射原理截断表面等离子体波在特定方向的传播. 文献^[13–15]使用偏振光调制, 实现了表面等离子体波的单向传播. Gong等^[16]设计了基于激发光源波长进行调控的非对称结构, 并实验验证了其单向激发特性. Xu等^[17,18]同样使用光栅结构, 设计了宽角度的单向表面等离子体波的定向激发模型. Wang等^[19]利用表面等离子体波的干涉效应, 使彼此靠近的两个表面等离子体源在一个方向干涉相消而在另外一个方向干涉相长, 从而激发单一方向传播的表面等离子体波. 由于基于干涉的表面等离子体波定向激发结构简单, 而且加工难

^{*} 江苏省自然科学基金(批准号: BK2012548, BK20130162)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: cheng.liu@hotmail.co.uk

度较低, 因此受到了更多的关注.

虽然表面等离子体波的定向激发可以解决集成器件之间的耦合问题, 然而表面等离子体波的传播距离决定了器件的集成度. 光在硅基材料中传播时, 能量衰减很小, 因此可以传播很长的距离. 但是因为金属存在不可忽略的电阻, 表面等离子体波在金属微结构中传播时衰减很快, 只能传播较短的距离, 这给实现基于金属微结构的集成光器件带来很大的困难. 基于干涉效应的等离子体定向激发方法中所用的两个狭缝都很窄, 而且仅有一个处在共振透射状态, 虽然其内部透过率可以高于 1, 但由于宽度很窄导致透过的总能量非常有限, 所激发的表面等离子体波的有效传播距离仅为几个微米.

由于目前还缺少有效的方法在传播过程中抑制表面等离子体的能量衰减, 因此, 为了提高表面等离子体的有效传播距离, 只能提高表面等离子体的激发强度. 据此, 本文设计了一种带有纳米天线结构的微腔, 实现表面离子体的高强度定向激发. 利用纳米天线和金属缝之间的共振效应增加光透过狭缝的透过率, 同时根据相位匹配原理将普通定向激发的双缝结构变为多缝结构, 从而将定向激发的等离子体的能量提高十倍以上. 该基于纳米天线的高强度定向等离子体激发方法有望为实现金属微结构的全光集成提供有益的参考.

2 基于干涉的表面等离子体波定向激发原理

为了实现表面等离子体波的定向激发, 一般需要两个表面等离子体波源, 并且其激发的表面等离子体波相位差为 $(\pm 1/2 \pm 2m)\pi$, 两者之间的距离必须为 $(1/4 + m)\lambda_{\text{spp}}$, 其中 m 为整数, λ_{spp} 为表面等离子体波长, 从而在特定方向实现干涉相长, 而在相对方向实现干涉相消^[20].

这里, 使用金属狭缝实现表面等离子体波源的设计, 如图 1(a) 所示. 表面等离子体波源的距离通过狭缝的空间结构进行调制, 而其激发的表面等离子体波的相位通过狭缝缝宽进行调制. 当入射波为 TM 模式时, 光在穿过狭缝后在金属上表面产生表面等离子体波. 当狭缝较窄时 ($w \sim 50$ nm), 狭缝中仅能够存在基模, 其表达式为^[21]

$$\tanh\left(\sqrt{\beta^2 - k_0^2} \varepsilon_d w / 2\right) = \frac{-\varepsilon_d \sqrt{\beta^2 - k_0^2} \varepsilon_m}{\varepsilon_m \sqrt{\beta^2 - k_0^2} \varepsilon_d}, \quad (1)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ 是真空中波矢, β 为狭缝间基模的传播常数, ε_d 与 ε_m 分别为狭缝间介质和金属的相对介电常数, w 表示缝宽.

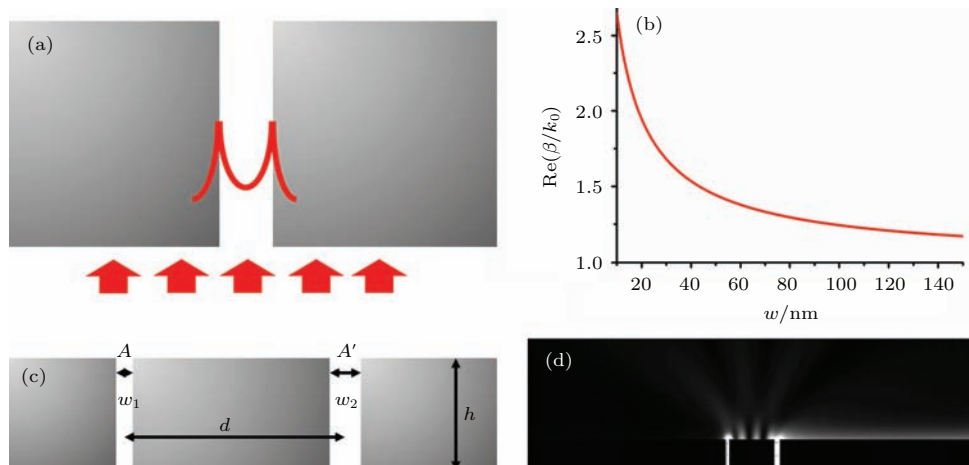


图 1 (网刊彩色) (a) 表面等离子体波源的结构示意图; (b) 金属狭缝等效折射率与缝宽的关系; (c) 基于干涉的表面等离子体波定向激发模型的结构示意图; (d) 基于有限时域差分法计算的表面等离子体波定向激发结果

Fig. 1. (color online) (a) The metal slit structure; (b) relation between equivalent refractive index and slit width; (c) surface plasmon wave directional exciter based on constructive interference; (d) excited surface plasmon wave distribution calculated by finite difference time domain method.

金属材料为银时, 在波长为 $\lambda = 632.8$ nm 的红光激发下, 银的相对介电常数 $\varepsilon_m = -16.24 + 0.66i$,

狭缝间介质的相对介电常数 $\varepsilon_d = 1$. 结合基模的模式方程, 光在狭缝中传播的有效折射率 $\text{Re}(\beta/k_0)$

随着缝宽呈现图 1(b) 所示的变化趋势, 这说明通过改变缝宽, 可以改变表面等离子体波传播的波前, 从而调控表面等离子体波源需要的相位延迟. 值得说明的是, 随着缝宽的增大, 狭缝有效折射率变化逐渐变缓, 在 $w > 100$ nm 的情况下, 有效折射率基本保持稳定. 因此, 为了有效地调节表面等离子体波源的相位, 狭缝宽度一般不应超过 100 nm.

在正入射的情况下, 金属上表面的表面等离子体相位可以表示为^[22]

$$\varphi_t = \varphi_0 + \text{Re}(\beta h), \quad (2)$$

其中, h 为金属狭缝的深度, φ_0 为激发光的相位.

使用干涉实现表面等离子体波的定向激发, 一般采用如图 1(c) 中的双缝结构. 为了产生沿着右边定向激发的表面等离子体波, 上表面两狭缝的相位应该满足^[19]:

$$\begin{aligned} \varphi_1 + d \frac{2\pi}{\lambda_{\text{spp}}} &= \varphi_2 + 2P\pi, \\ \varphi_2 + d \frac{2\pi}{\lambda_{\text{spp}}} &= \varphi_1 + (2Q + 1)\pi, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 φ_1 和 φ_2 分别表示两表面等离子体波源的相位; P, Q 均为正整数; d 为金属狭缝间的距离. 为了阻止光直接透过金属, 厚度 h 必须大于金属的穿透深度. 由 (3) 式可知, 为了形成向右激发的表面等离子体波, 图 1(c) 中两表面等离子体波源相位差与两缝间的间隔 d 需要分别满足 (4) 和 (5) 式的条件:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{(2Q + 1)\pi - 2P\pi}{2}, \quad (4)$$

$$d = \frac{2Q + 2P + 1}{4} \lambda_{\text{spp}}. \quad (5)$$

根据 (1)–(5) 式的结论, 在基于干涉的表面等离子体波定向激发结构中, 两缝宽 w_1 和 w_2 分别为 50 和 100 nm; 狭缝厚度 h 为 780 nm; 两狭缝间距离 d 为 $1.75\lambda_{\text{spp}}$, 即 1072 nm. 图 1(d) 展示了使用有限时域差分法计算的表面等离子体波的激发情况: 其激发的表面等离子体波几乎都向右传播, 其坡印亭矢量比 $P_{\text{right}}/P_{\text{left}}$ 为 50.8, 数值计算结果证明了该结构能够实现表面等离子体波的定向传播.

3 基于纳米天线的多通道高强度定向表面等离子体波激发结构的设计

根据以上分析, 基于干涉的表面等离子体波定向激发结构中的狭缝宽度较小, 只有很少部分的能

量可以透过狭缝, 而大多数的能量均被金属薄膜反射, 因此导致在表面产生的定向离子体波能量较低. 为了提高定向激发的表面等离子体强度, 这里结合基于纳米天线的增强透射技术, 并考虑增加狭缝的数量, 实现能量增强的表面等离子体波定向激发装置.

基于纳米天线的增强透射技术是在狭缝的入射端增加矩形结构的纳米天线, 如图 2(a) 所示. 光从下方垂直入射时, 将在纳米天线处激发表面等离子体波, 其沿着天线表面从左右两端进入横向波导, 而后沿着金属狭缝共同传播. 当入射端口处的入射光和出射端反射回来的光干涉相消时, 该基于纳米天线的狭缝结构可实现共振增强透射. 使用传统双狭缝产生定向激发的等离子体时, 两个狭缝不可能同时处于共振状态, 因此所激发的等离子体能量不高. 因此, 在入射端增加纳米天线从而增强共振透射. 研究发现, 纳米天线放置离金属表面的位置 t 和其厚度 H_p 对共振增强透射影响较小, 仅其宽度 W_p 对其透射强度有着重要影响. 图 2(b) 展示了在不同金属狭缝情况下, 透射强度比值与纳米天线宽度 W_p 的关系, 计算表明狭缝的透过率 T 随着天线宽度 W_p 具有周期性变化, 而且不同缝宽透过率 T 的峰值位置不同. 在结构设计中, 将 W_p 定为 108 nm, 该情况下, 缝宽为 50 和 100 nm 的狭缝均具有较大的增强透射率比值. 由于纳米天线形状完全一样, 两者对于入射光所引入的相位改变完全相同, 因此不会对等离子体的定向激发产生影响. 图 2(c) 为不含有纳米天线的表面等离子体波定向激发结构, 两缝宽 w_1 和 w_2 分别为 50 和 100 nm; 狭缝厚度 h 为 780 nm; 两狭缝间距离 d 为 1072 nm. 而图 2(d) 在图 2(c) 的结构中在入射端面添加了纳米天线结构. 该纳米天线均对称放置于狭缝入射面, 并且其离金属表面的位置 t 为 50 nm, 厚度 H_p 同样为 50 nm. 传播距离定义为能量下降至传统未添加纳米天线的 $1/e$ 时的长度, 根据有限时域差分法的计算, 添加了纳米天线并未影响双狭缝结构的表面等离子体波的定向激发特性, 并且增大了在金属上表面传输的表面等离子体波的能量和传播距离: 与传统未加纳米天线的结构相比, 表面等离子体波的能量提高至 2.64 倍, 传播距离从 42.3 μm 提升至 79.4 μm .

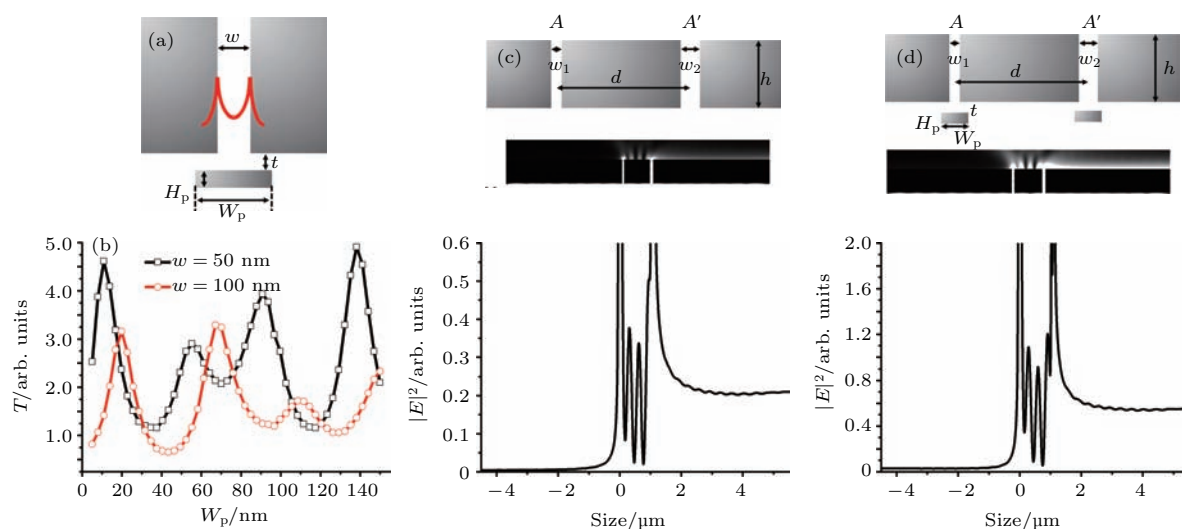


图2 (网刊彩色) (a) 带有纳米天线的金属结构示意图; (b) 在不同金属狭缝宽度情况下, 透射强度比值与纳米天线宽度 W_p 的关系; (c) 传统的表面等离子体波定向激发结构及其定向激发的表面等离子体波分布; (d) 含有纳米天线的表面等离子体波定向激发结构及其定向激发的表面等离子体波 $|E|^2$ 分布

Fig. 2. (color online) (a) The metal slit structure with nano antenna structure; (b) relation between the transmission and the width of nanoantenna W_p ; (c) surface plasmon wave $|E|^2$ distribution excited by traditional directional exciter without nano antenna calculated by finite difference time domain method; (d) surface plasmon wave $|E|^2$ distribution excited by traditional directional exciter with nano antenna calculated by finite difference time domain method.

增加狭缝的数量能够直接提高定向激发的表面等离子体波能量。如图3(a)所示, 狭缝A与A'为一组, 其同图2(c)的结构一致, 目的是形成向右定向传播的表面等离子体波。狭缝B与B'为一组, 该组合与狭缝A与A'结构一致, 并且满足其激发出的表面等离子体波与狭缝A与A'激发的表面等离子体波干涉相长。即狭缝A与A'和狭缝B与B'可分别看作向右定向激发的表面等离子体波源, 两者的相位差必须是 2π 的整数倍, 因此调整这两组结构的相对位置便可以满足该条件。图3(b)展示了四狭缝的表面等离子体波定向激发结构, 狭缝A和B的缝宽为50 nm, 而狭缝A'和B'的缝宽为100 nm; 另外, 狭缝A与A', B与B'的间距保持 1072 nm , 狭缝厚度同样为 780 nm , 而狭缝A与B的距离为 λ_{spp} , 即 613 nm 。计算结果表明, 该四狭缝结构定向激发表面等离子体波的能量提高至2.23倍, 传播距离提升至 $52.2 \mu\text{m}$ 。为了进一步提高该结构激发的表面等离子体波的能量, 这里同样设计了六狭缝结构。为了保证该结构的紧凑, 狭缝C和C'组合添加在狭缝A的左侧, 并且其缝宽分别为50 nm和100 nm; 另外, 由于交换两狭缝之间的相对位置, 两者之间的间距为 $1.25\lambda_{\text{spp}}$, 即 766 nm 。并且狭缝A和C的距离为 λ_{spp} , 即 613 nm 。该结构的示意图

见图3(c), 同样利用有限时域差分法计算其定向激发的表面等离子体波的能量, 其将能量提高至3.38倍, 传播距离提升至 $89.6 \mu\text{m}$ 。需要说明的是, 定向激发的表面等离子体波的能量与狭缝数量并不成正比关系, 而且六狭缝结构比四狭缝结构更为复杂, 因此, 四狭缝的表面等离子体波定向激发结构更适合应用于实际集成光学元件设计中。

最后, 结合基于纳米天线的增强透射技术并增加狭缝的数量, 对添加了纳米天线的四狭缝与六狭缝结构激发的定向表面等离子体波进行了数值计算, 如图4(a)和图4(b)所示。该基于纳米天线的多通道高强度定向表面等离子体波激发结构中狭缝部分与图3(a)与图3(b)的结构一致, 在其入射端面添加的纳米天线同图2(a)的结构一致, 其离金属表面的位置 t 为50 nm, 厚度 H_p 同样为50 nm, 并且宽度 W_p 为108 nm。根据图4(a)和图4(b)展示的有限时域差分法的计算结果表明, 相比于传统双狭缝结构, 带有纳米天线的四狭缝结构能够将定向激发的表面等离子体波能量提高至6.74倍, 传播距离提升至 $112.1 \mu\text{m}$ 。而带有纳米天线的六狭缝结构则能够将能量提高至9.3倍, 对应的传播距离提升至 $124.5 \mu\text{m}$ 。

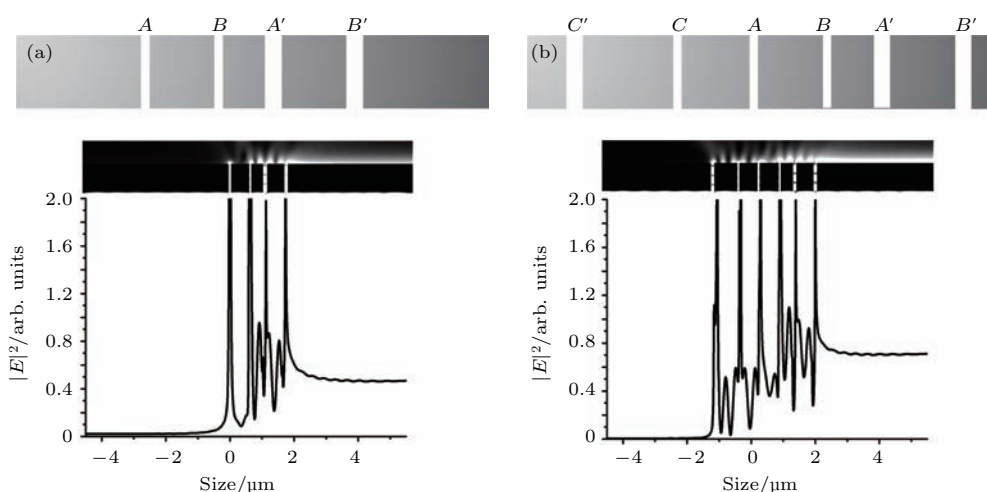


图3 (a) 四狭缝表面等离子体波定向激发结构及其定向激发的表面等离子体波 $|E|^2$ 分布; (b) 六狭缝表面等离子体波定向激发结构及其定向激发的表面等离子体波 $|E|^2$ 分布

Fig. 3. (a) Surface plasmon wave $|E|^2$ distribution excited by four channel directional exciter calculated by finite difference time domain method; (b) surface plasmon wave $|E|^2$ distribution excited by six channel directional exciter calculated by finite difference time domain method.

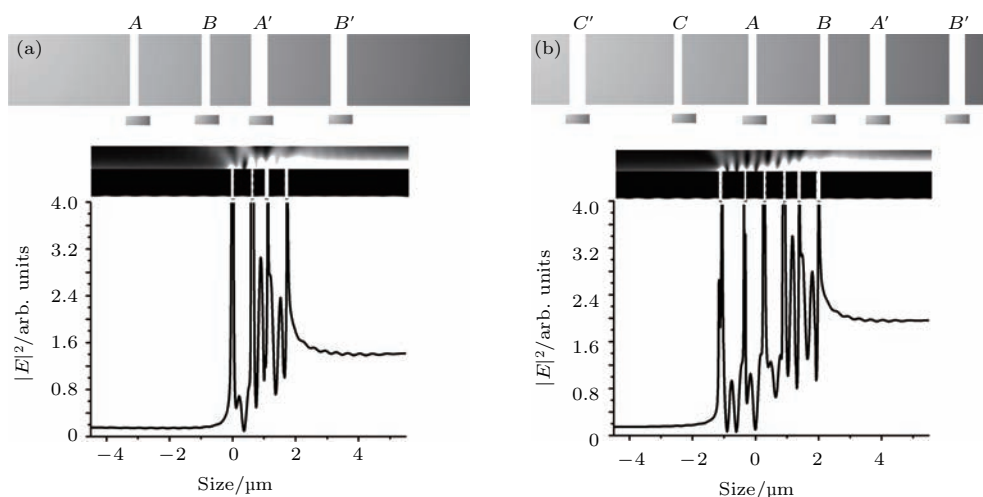


图4 (a) 含有纳米天线的四狭缝表面等离子体波定向激发结构及其定向激发的表面等离子体波 $|E|^2$ 分布; (b) 含有纳米天线的六狭缝表面等离子体波定向激发结构及其定向激发的表面等离子体波 $|E|^2$ 分布

Fig. 4. (a) Surface plasmon wave $|E|^2$ distribution excited by four channel directional exciter with nano antenna calculated by finite difference time domain method; (b) surface plasmon wave $|E|^2$ distribution excited by six channel directional exciter with nano antenna calculated by finite difference time domain method.

4 结 论

本文设计了一种基于纳米天线的多通道高强度定向表面等离子体波激发结构, 从而能够实现增强的表面等离子体波的定向传输. 本文首先详细介绍了该定向表面等离子体波激发结构的设计原理; 之后, 结合基于纳米天线的增强透射技术, 并增加狭缝的数量, 实现了表面等离子体波的能量增强.

数值计算表明, 相比于传统定向表面等离子体波激发结构, 本文设计的带有纳米天线的四狭缝结构能够将定向激发的表面等离子体波能量提高6.74倍, 传播距离提升至112.1 μm . 而带有纳米天线的六狭缝结构则能够将能量提高9.3倍, 传播距离提升至124.5 μm . 该基于纳米天线的多通道高强度定向表面等离子体波激发装置结构简单, 系统紧凑, 该工作在集成光学领域中具有参考价值和应用潜力.

参考文献

- [1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W 2003 *Nature* **424** 824
- [2] Chen J, Li Z, Zhang X, Xiao J, Gong Q 2013 *Sci. Rep.* **3** 1451
- [3] Goh X M, Lin L, Roberts A 2011 *Opt. Soc. Am. B* **28** 547
- [4] Shao W J, Li W M, Xu X L, Wang H J, Wu Y Z, Yu J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 117301
- [5] Wang C, Chen J J, Tang W H, Xiao J H 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 127304
- [6] Fang N, Lee H, Sun C, Zhang X 2005 *Science* **308** 534
- [7] Zhang Z, Liu Q, Qi Z M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 060703 (in Chinese) [张喆, 柳倩, 祁志美 2013 物理学报 **62** 060703]
- [8] O'Carroll D M, Hofmann C E, Atwater H A 2010 *Adv. Mater.* **22** 1223
- [9] Lu Y Q, Hu S L, Lu Y, Xu J, Wang J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 097301 (in Chinese) [陆云清, 呼斯楞, 陆懿, 许吉, 王瑾 2015 物理学报 **64** 097301]
- [10] Gan Q Q, Guo B S, Song G F, Chen L H, Fu Z, Ding Y J, Bartoli F J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 161130
- [11] Zhou Y J, Cui T J 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 221901
- [12] Lo'pez-Tejiera F, Rodrigo S G, Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F J, Devaux E, Ebbesen T W, Krenn J R, Radko I P, Bozhevolnyi S I, Gonzalez M U, Weeber J C, Dereux A 2007 *Nat. Phys.* **3** 324
- [13] Lin J, Mueller J P B, Wang Q, Yuan G H, Antoniou N, Yuan X C, Capasso F 2013 *Science* **340** 331
- [14] Mueller J P B, Leosson K, Capasso F 2014 *Nano Lett.* **14** 5530
- [15] Rodríguez-Fortuño F J, Marino G, Ginzburg P, O'Connor D, Martínez A, Wurtz G A, Zayats A V 2013 *Science* **340** 328
- [16] Zhang Y F, Wang H M, Liao H M, Li Z, Sun C W, Chen J J, Gong Q H 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 231101
- [17] Lu F, Sun L, Wang J, Li K, Xu A S 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 091112
- [18] Lu F, Li K, He Z J, Liu D L, Xu A S 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 1730
- [19] Wang Y K, Wang J C, Gao S M, Liu C 2013 *Appl. Phys. Express* **6** 022003
- [20] Gordon R, Brolo A G 2005 *Opt. Express* **13** 1933
- [21] Shi H F, Wang C T, Du C, Luo X G, Dong X C, Gao H T 2005 *Opt. Express* **13** 6815
- [22] Cui Y, He S 2009 *Opt. Lett.* **34** 16

High-intensity directional surface plasmonic excitation based on the multi metallic slits with nano-antenna^{*}

Xiong Zhi-Cheng¹⁾ Zhu Li-Lin¹⁾ Liu Cheng^{1)†} Gao Shu-Mei¹⁾ Zhu Jian-Qiang²⁾

1) (School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

2) (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

(Received 19 July 2015; revised manuscript received 5 September 2015)

Abstract

Micro-nano structure optical device based on surface plasmon polariton such as super lens, micro-nano resonators and waveguides, etc. owns great applications in different research fields, especially in integrated optics and nanophotonics, for it has extremely small size and can be integrated into a micro-nano optical system. Comparatively, the directional wave exciter attracts much attention since it breaks the symmetries of wave propagation and excitation and can be applied to a micro-nano optical logic modulation system in the future. In order to realize the high-efficiency directional excitation in ultra-small structure based on surface plasmon polariton, a newly designed metal insulator metal waveguide based surface plasmon directional exciter with multiple channels and nano antenna is presented in this paper. The basic structure of the surface plasmon directional exciter is a two-slit metal plate, and the directional propagation surface plasmon wave is generated according to wave interference. To obtain a single surface plasmon wave in the specific orientation, a phase difference of $\pi/2$ between the surface waves generated by slits is necessary. To achieve the different phase differences, both heights and widths of the channels are calculated according to the waveguide mode function. It is worth noting that the directional wave exciter with dual channels is able to generate unsymmetrical wave propagation, however, the excitation efficiency is rather low, which restricts its potential applications in micro-nano optical system. In the paper, in order to further raise the coupling efficiency of the excited surface plasmon wave, and increase its propagation, other additional channels are designed in the directional wave exciter structure. Compared with the traditional dual channel system, the additional channels with similar parameters, and the same interference features are introduced in the surface plasmon directional exciter to increase the light transmission and surface wave energy. In addition, a nano antenna structure based on resonance is presented on the structure surface to enhance the surface plasmon excitation as well. The design tactics of the directional surface plasmon wave exciter are analytically explained in the paper. With numerical calculation based on the finite difference time domain method, the simulation result proves that the proposed surface plasmon wave directional exciter is able to generate single orientation surface wave with extremely high coupling ratio. Moreover, with additional multiple channels and nano antenna, the energy of the directional coupled surface plasmon wave is improved obviously, which indicates that the propagation distance of the surface plasmon wave is increased. In the simulation, both the additional channels and nano antenna are able to increase the energy and propagation distance of the surface plasmon wave obviously: the energies of directional propagated surface plasmon waves of four and six channel directional wave exciters with nano antenna are 6.74 times and 9.30 times that of the traditional dual slit directional wave exciter without nano antenna, respectively. Moreover, it is worth noting that the newly designed nano antenna based multi-channel enhanced surface plasmon wave directional exciter owns compact structure and can be easily fabricated at low cost. It is believed that this work can be an important reference for designing micro and nano photonic and plasmonic elements in integrated optics.

Keywords: surface plasmon, directional excitation, nano antenna

PACS: 73.20.Mf, 52.25.-b, 42.25.Hz

DOI: 10.7498/aps.64.247301

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant Nos. BK2012548, BK20130162).

[†] Corresponding author. E-mail: cheng.liu@hotmail.co.uk