

基于塔姆激元-表面等离极化激元混合模式的单缝加凹槽纳米结构的增强透射*

祁云平^{1)†} 周培阳¹⁾ 张雪伟¹⁾ 严春满¹⁾ 王向贤²⁾

1) (西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃省智能信息技术与应用工程研究中心, 兰州 730070)

2) (兰州理工大学理学院, 兰州 730050)

(2018年1月16日收到; 2018年3月6日收到修改稿)

金属单缝纳米结构因为结构简单、易于集成, 常用在基于表面等离极化激元 (surface plasmon polaritons, SPPs) 的纳米结构中构建光源. 但是, 金属亚波长单缝结构一直存在透射率低的问题, 如何提高其透射率一直是研究的重点. 为了更好地提高金属亚波长单缝的透射率, 本文对之前文献提出的分布式布拉格反射镜 (distributed bragg reflector, DBR) 和金属银薄膜纳米缝结构进行改进, 在金属银薄膜两侧设计凹槽. 当 TM 偏振光由 DBR 侧入射至 DBR-银纳米缝结构时, DBR-银膜界面上和银膜入射侧凹槽一起激发的塔姆激元 (Tamm plasmon polaritons, TPPs) 和 SPPs, 以及纳米缝和银膜出射侧凹槽对的 SPPs 同时激发, 利用凹槽激发的 SPPs 和银膜表面处的 TPPs-SPPs 混合模式的干涉相长耦合作用, 通过塔姆激元的局域场增强效应和两侧凹槽与单纳米缝的干涉相长耦合作用进一步提高了表面等离极化激元模式的激发效率, 再加上纳米缝中的类法布里-珀罗腔共振效应, 使纳米缝的透射率得到增强. 本文采用有限元方法研究了 DBR-银纳米缝结构上单纳米缝加凹槽的透射特性. 经过一系列参数优化, 使 DBR-银纳米缝凹槽结构的最大透射率增加到 0.22, 相对于 TiO₂-银纳米缝结构的透射率 (0.01) 提高了 22 倍, 比文献 [23] 得到的最大透射率 0.166 有所提高. 研究结果在纳米光源设计、光子集成电路和光学信号传输等相关领域具有一定的应用价值.

关键词: 光学异常透射, 塔姆激元, 表面等离极化激元, 类法布里-珀罗腔共振

PACS: 71.36.+c, 41.20.Jb, 42.25.Bs, 78.67.Pt

DOI: 10.7498/aps.67.20180117

1 引言

50 多年前, 人们对金属介质中的等离子体激元已有研究. 1957 年, Ritchie 发现当高能电子束穿过金属介质时, 能够激发出金属自由电子在正离子背景中的量子化振荡运动, 也就是等离子体激元^[1]. 后来人们发现用入射光照射金属薄膜时, 当满足一定条件的情况下能够激发出表面等离极化激元 (surface plasmon polaritons, SPPs), 这是一种光和自由电子紧密结合的局域化表面态电磁运动模式^[2,3]. 近几年来, 对亚波长金属微纳米结构中光的传播和激发已进行了广泛的研究, 其中

光学异常透射 (extraordinary optical transmission, EOT) 现象突破了传统孔径理论的限制, 并且基于 EOT 现象的纳米光子器件在纳米光子集成、纳米光刻、生物传感器等多个领域引起了广泛关注^[4-10]. 1998 年, Ebbesen 等^[4] 在研究金属薄膜亚波长孔阵列的光学透射特性时, 首次发现对于特定的入射光, 其透过率高于孔的面积与总面积的比值, 即 EOT 现象, 与之前知道的 Bethe-Bouwkamp 小孔透射理论相比^[11,12], 透射率高出 1—2 个数量级. 对于这种现象, 研究人员给出了两种解释: 一是金属 SPPs 被入射光有效激发^[13-16]; 二是 SPPs 在缝内形成法布里-珀罗 (Fabry-Perot, F-P) 共振的腔

* 国家自然科学基金 (批准号: 61367005, 61741119) 和甘肃省自然科学基金 - 创新基地和人才计划 (批准号: 17JR5RA078) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yunpq@126.com

模共振 [17,18].

单纳米金属缝结构由于其结构简单、易于集成, 常常用在基于 SPPs 的纳米结构中构建光源. 但是, 单纳米缝一直存在低透射率的问题, 为了提高狭缝的透射率, 之前文献提出了几种有效的方法: 文献 [19] 设计了一个亚波长单缝多凹槽结构, 在纳米缝的入射口和出射口两侧加凹槽, 这样能更好地激发 SPPs 发生耦合作用; 文献 [20] 提出在周期性纳米带两侧加上一对凸起的介质柱, 这样在表面传输的 SPPs 被介质柱反射回来, 有效地增加单纳米缝的透射率; 除此之外, 在很多纳米器件中可以采用高折射率的介质代替玻璃介质, 这样可以利用高折射率衬底的 F-P 腔共振效应来提高纳米缝的透射率 [21,22].

本文使用有限元方法, 对文献 [23] 的结构进行改变, 进一步增强单纳米缝异常透射. 该结构由分布式布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR) 和金属银薄膜纳米缝加凹槽结构构成, 当入射光由 DBR 侧入射时, 在 DBR 与银膜界面上激发出塔姆等离子体激元 (Tamm plasmon polaritons, TPPs) 模式 [24-28], TPPs 也是一种表面态模式, 而且具有局域场增强效应, 是由于 Bragg 反射在界面上形成的、强度沿界面向两边材料衰减的界面模式, 但是损耗并没有 SPPs 模式大, 横电 (TE) 和横磁 (TM) 偏振光都能够激发 TPPs, 其色散曲线位于光锥内侧, 因此在具有负介电常数的贵金属与介质 Bragg 反射镜界面上, TPPs 能够直接被激发 [24,29]. 当 TM 横磁波 (H_z , E_x , E_y 分量不为 0) 由 DBR 侧入射时, 在 DBR 与银膜界面上将激发出 TPPs 模式, 并在纳米缝入射端处与 SPPs 模式耦合形成 TPPs-SPPs 混合模式. 当 TPPs 模式与 SPPs 模式满足波矢匹配条件时, 利用 TPPs 模式的局域场增强效应显著提高了 SPPs 模式的激发效率, 结合纳米缝中的类 F-P 腔共振效应, 可有效增强单纳米缝的异常透射率 [24]. 本文在单缝左右两侧引入对称凹槽对, 利用凹槽激发的 SPPs 和银膜表面处的 TPPs-SPPs 混合模式的相互干涉相长或干涉相消作用, 通过优化的凹槽对位置实现干涉相长, 以及 TPPs 模式的局域场增强效应和两侧凹槽的干涉相长耦合作用进一步提高 SPPs 模式的激发效率, 可以更加有效地提高电磁波进入单缝波导并向外透射的效率, 再加上纳米缝中的类 F-P 腔共振效应, 从而有效地增强了单纳米缝的透射率.

2 模型结构和计算方法

本文在文献 [23] 的基础上, 在银膜入射侧和出射侧挖槽来增加透射率, 如图 1 所示. DBR 由高折射率的 A (TiO_2) 和低折射率的 B (Al_2O_3) 构成, 在 DBR 上镀上金属银膜, 在银膜中心设置了一个纳米缝, 银纳米缝两侧刻蚀凹槽构成 DBR-银纳米缝凹槽结构. TiO_2 层和 Al_2O_3 层的折射率分别为 $n_A = 2.34$, $n_B = 1.63$, 厚度分别为 $d_A = 81.5 \text{ nm}$, $d_B = 117 \text{ nm}$. 缝宽 $w = 130 \text{ nm}$, 银膜厚度 $d_m = 50 \text{ nm}$, DBR 里面的介质取 9.5 个周期.

应用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件数值分析了 DBR-银纳米缝凹槽结构的透射特性, 在 x 方向图 1 结构的左右两端添加 PML 完美匹配层; 在 y 方向的上下两端添加周期边界条件. 本文对 DBR-金属纳米缝结构和 DBR-金属纳米缝凹槽结构进行透射率对比. 将通过狭缝出射口的出射功率 P_{out} 与入射口的入射功率 P_{in} 之比当作透射率定义, 即 $T = P_{\text{out}}/P_{\text{in}} = |E_{\text{tran}}/E_{\text{in}}|^2$. 在模拟仿真中, 金属银膜的相对介电常数的值随波长变化, 采用 Drude 模型: $\epsilon_{\text{Ag}}(\omega) = \epsilon_{\infty} - \omega_p^2/(\omega^2 + j\gamma\omega)$, 其中 $\epsilon_{\infty} = 3.7$, $\omega_p = 1.3825 \times 10^{16} \text{ rad/s}$, $\gamma = 2.7347 \times 10^{13} \text{ rad/s}$. 当入射波的波长为 TPPs 激发波长 ($\lambda = 819 \text{ nm}$) 时, 银的介电常数取 $\epsilon_{\text{Ag}} = -32.429 - 0.42958i$. 当 TM 波 (H_z , E_x , E_y 分量不为 0) 由 DBR 侧入射时, 在 DBR 与银膜界面上将激发出 TPPs 模式. 与 SPPs 相似的是, 电磁波由于贵金属银的负介电常数 (在光学和近红外某波段内低于金属等离子体频率时), TPPs 被限制在金属表面; 在多层电介质结构中, 电磁波不是由于全内

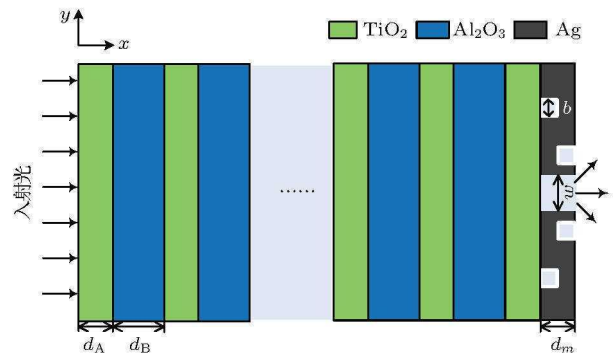


图 1 DBR-银纳米缝凹槽结构示意图

Fig. 1. Schematic of a single nano-slit surrounded by grooves in a silver film on a DBR.

反射被束缚在表面, 而是由于 Bragg 反射镜存在的光子禁带而被禁锢, TPPs 的磁场是高度束缚在金属薄膜与相邻电介质层的分界面处, 其强度以分界面为中心, 并向两边指数衰减^[23,24].

3 结果与分析

3.1 DBR-银纳米缝结构

对于 DBR-银纳米缝结构, 它的异常透射是因为 DBR 与银膜表面激发的 TPPs 和银纳米缝中激发的 SPPs 相互耦合所产生的. 图 2 (a) 是 DBR-银纳米缝结构透射率 (T) 随入射波波长的变化关系, 可以看出透射率随着波长的变化而变化, 当入射 TM 波为 TPPs 激发波长 ($\lambda = 819$ nm) 时, 其透射率达到最大值, 这就说明在 DBR-银膜界面激发出 TPPs 的同时, 银膜狭缝中的 SPPs 模式也得到了有效的激发, 两者同时激发并且相互耦合, 使得 DBR-银纳米缝结构具有异常的透射特性. 图 2 (b) 是 DBR-银纳米缝结构的场强模值分布图. TM 偏振光入射到 DBR 侧时, DBR 与银膜界面上激发

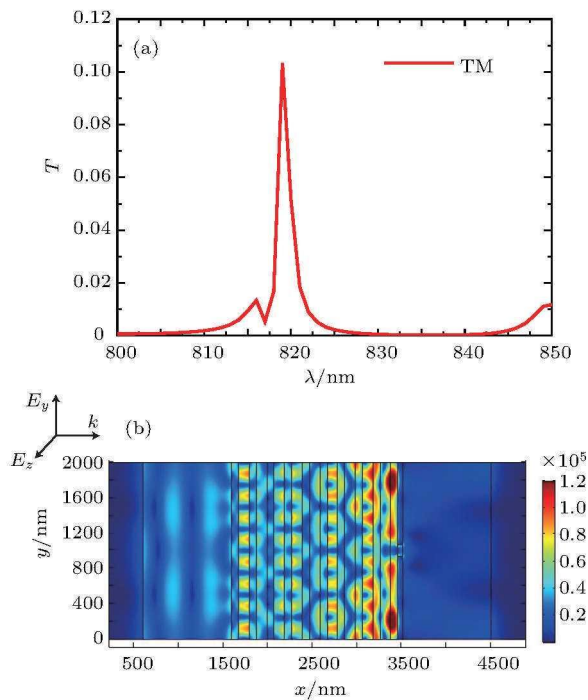


图 2 (a) DBR-银纳米缝波长与透射率的关系; (b) 入射波长为 TPPs 激发波长 ($\lambda = 819$ nm) 时, DBR-银纳米缝结构中的电场强度模值分布

Fig. 2. (a) Transmittance spectra for the structure DBR-silver with a nano-slit; (b) the electric field intensity distribution of the DBR-silver nano-silt at wavelength ($\lambda = 819$ nm) which is equal to TPPs excitation wavelength.

了 TPPs 模式, 加上耦合进银纳米缝激发的 SPPs, 以及银纳米缝中反射和折射出来的光与银膜界面上的 TPPs 相干叠加, 形成了周期性干涉相消和相长的场强分布.

3.2 DBR-银纳米缝出射侧加凹槽对结构

在银膜出射侧挖一对正方形凹槽, 凹槽边长 $a = 25$ nm, 并且这一对正方形凹槽离单缝中心轴线的距离相等, 图 3 (a) 表示缝槽距离与透射率的关系

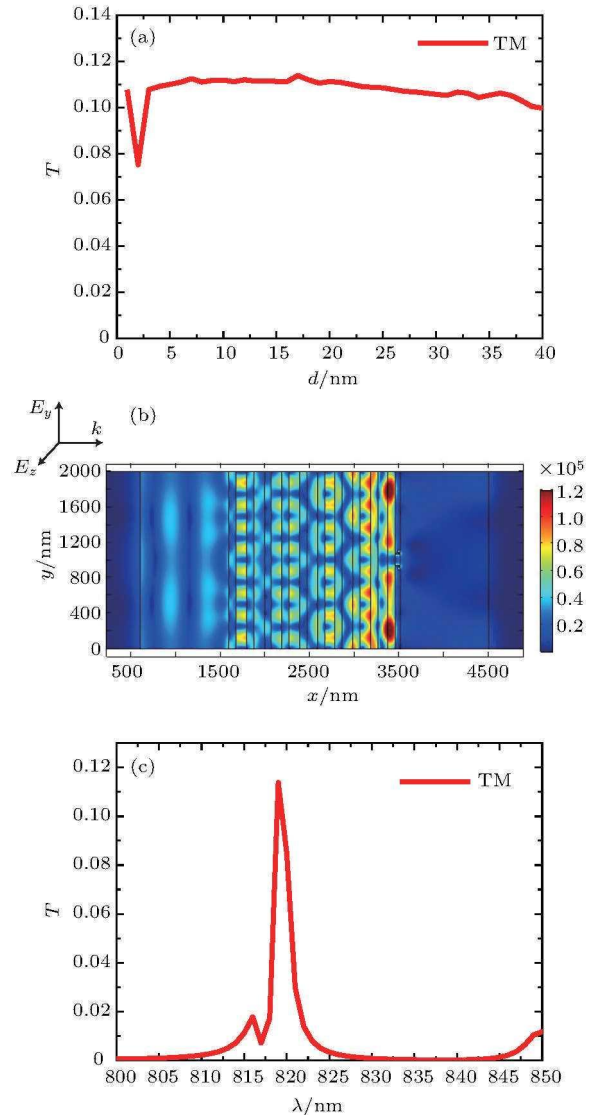


图 3 (a) 银膜透射率与出射侧缝槽间距的关系; (b) 银膜出射侧缝槽间距为 17 nm 时的电场强度模值分布; (c) 银膜出射侧缝槽间距为 17 nm 时透射率随波长的变化

Fig. 3. (a) The transmittance of silver film versus the distance of groove and slit d on the exit side; (b) the electric field intensity distribution when the distance of groove and slit d on the exit side of the silver film is 17 nm; (c) the transmission versus wavelength when the distance of groove and slit d on the exit side of the silver film is 17 nm.

系,可以看出当缝槽距离为 17 nm 时透射率达到最大值 0.11381,比之前不加凹槽的 0.10325 略有提高.图 3 (b) 和图 3 (c) 分别表示缝槽距离为 17 nm 时电场强度模值图和透射率随波长的变化关系.从两图可以看出当入射 TM 偏振光波长 $\lambda = 819$ nm,缝槽距离为 17 nm 时,经过 DBR 透射到金属表面的电磁波被分为三个部分:第一部分在 DBR 和银膜界面上形成 TPPs;第二部分耦合进入单缝,激发出单缝内的 SPPs, SPPs 和第一部分激发出的 TPPs 相互耦合,形成 TPPs-SPPs 混合模式, TPPs 模式具有局域增强特性,因此会更有效地激发出单缝内的 SPPs,并向外透射,因此本文提出的结构 DBR-银纳米缝中的 TPPs-SPPs 混合模式会比单纯银纳米缝中的 SPPs 透射率更高;最后一部分在银膜出射侧单缝两边对称的凹槽内激发出 SPPs,并和前面形成的 TPPs-SPPs 混合模式干涉相长或干涉相消,优化凹槽对的位置,如本文提出的缝槽距离为 17 nm 时,入射光透过银纳米缝与银膜出射侧凹槽激发出的 SPPs 与狭缝中形成的 TPPs-SPPs 混合

模式相互激发并且发生耦合作用,狭缝内的 SPPs 得到更加有效的激发,增强了纳米缝中的类 F-P 腔共振效应,使银纳米缝的透射率得到了提高,形成的干涉相长耦合作用使透射率比没有凹槽时的透射率更高.剩下的电磁波被反射或散射回 DBR,同 DBR-银膜界面上的 TPPs 相干叠加,形成了周期性的干涉相长或干涉相消的场强分布,如图 3 (b) 所示.

3.3 DBR-银纳米缝入射侧和出射侧加凹槽对结构

图 4 (a) 曲线表示在出射侧银膜缝槽间距固定(出射侧固定一对凹槽对)的情况下,银膜入射侧再挖一对正方形凹槽,凹槽边长为 $a = 25$ nm,并且这一对正方形凹槽离单缝中心轴线的距离也相等.图中曲线变化表示入射侧缝槽距离与透射率的关系,当入射侧缝槽距离为 434 nm 时,透射率达到最大值 0.051939.图 4 (b) 表示入射侧缝槽距离

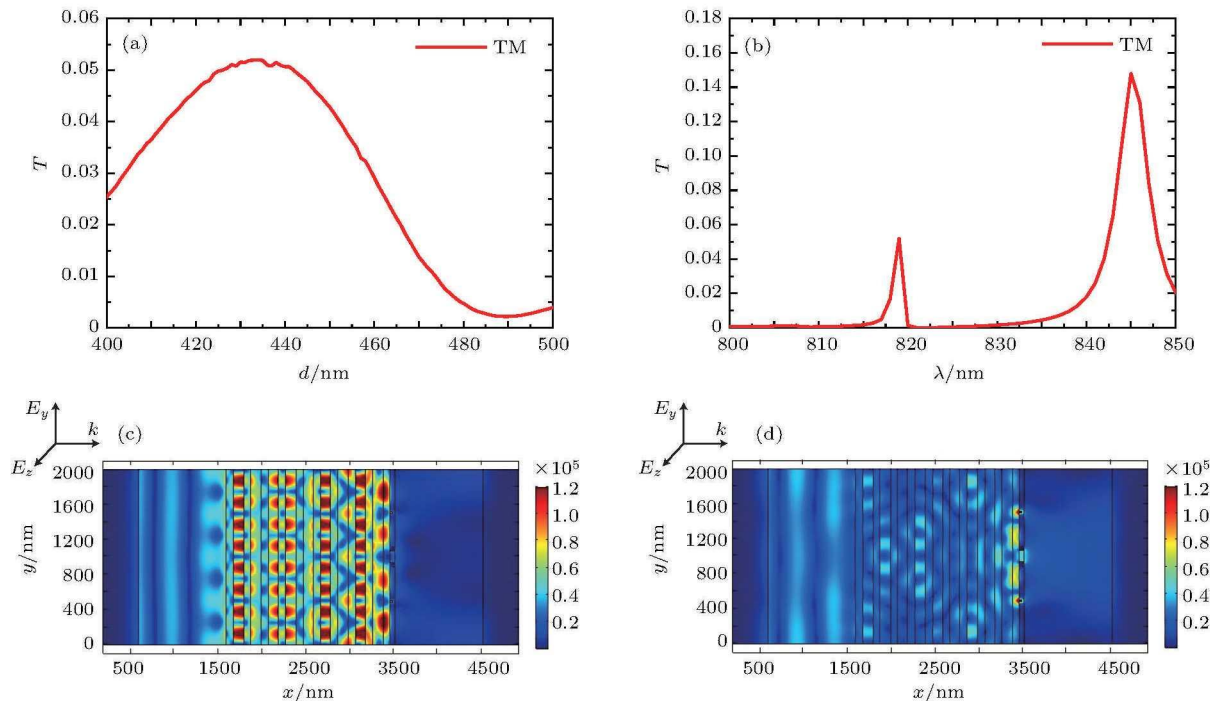


图 4 (a) 随银膜入射侧缝槽间距与透射率的关系; (b) 银膜入射侧缝槽间距为 434 nm 时透射率随波长的变化; (c) 银膜入射侧缝槽间距为 434 nm、波长为 819 nm 时的电场强度模值分布图; (d) 银膜入射侧缝槽间距为 434 nm、波长为 845 nm 时的电场强度模值分布

Fig. 4. (a) Transmission versus the distance of groove and slit on the entrance side of silver film; (b) transmission versus with wavelength at the fixed distance of groove and slit on the entrance side of silver film 434 nm; (c) the electric field intensity distribution of at the fixed distance of groove and slit on the silver film 434 nm and the wavelength is 819 nm; (d) the electric field intensity distribution of at the fixed distance of groove and slit on the silver film 434 nm and the wavelength is 845 nm.

为434 nm 时透射率随波长的变化关系,可以看出出现了两个峰值,分别在波长为819 nm和845 nm处,透射率分别为0.07368, 0.14905,透射率最高对应波长发生了红移,并且当波长为819 nm时,透射率比之前只加出射侧凹槽计算出的要低,说明入射侧设计的凹槽在波长为819 nm时不能使TPPs与SPPs发生有效的耦合和同波长激发.图4(c)和图4(d)表示缝槽距离为434 nm、波长分别为819 nm和845 nm时的电场强度模值图,从两图对比可以看出,经过DBR透射到金属表面的电磁波被分为三个部分:第一部分在DBR和银膜界面上形成TPPs;第二部分耦合进入单缝,激发出单缝内的SPPs, SPPs和第一部分激发出的TPPs相互耦合,形成TPPs-SPPs混合模式,TPPs模式具有局域增强特性,因此会更有效地激发出单缝内的SPPs,并向外透射;最后一部分在银膜左右两侧单缝两边对称的凹槽内激发出SPPs,并和前面形成的TPPs-SPPs混合模式干涉相长或干涉相消,优化凹槽对的位置,如本文提出的入射侧缝槽距离为

434 nm 的凹槽对、出射侧缝槽距离为17 nm的凹槽对固定时,入射光透过银纳米缝与银膜左右两侧凹槽激发出的SPPs与狭缝中形成的TPPs-SPPs混合模式相互激发并且发生耦合作用,狭缝内的SPPs得到更加有效的激发,增强了纳米缝中的类F-P腔共振效应,使银纳米缝的透射率得到了提高,形成的干涉相长耦合作用使透射率比没有入射侧凹槽时的透射率更高.剩下的电磁波被反射或散射回DBR,同DBR-银膜界面上的TPPs相干叠加,形成了周期性的干涉相长或干涉相消的场强分布,如图4(c)或图4(d)所示.并且波长为845 nm时,在DBR与银膜界面上激发的TPPs和银膜凹槽中激发的SPPs同时激发并且发生耦合作用的效果更加明显,加之纳米缝和银膜出射侧的SPPs同时激发并且干涉相长以及纳米缝中的类F-P腔共振效应,使纳米缝的透射率得到增强,比波长819 nm时发生的激发和耦合作用更加强烈,所以透射率更高.

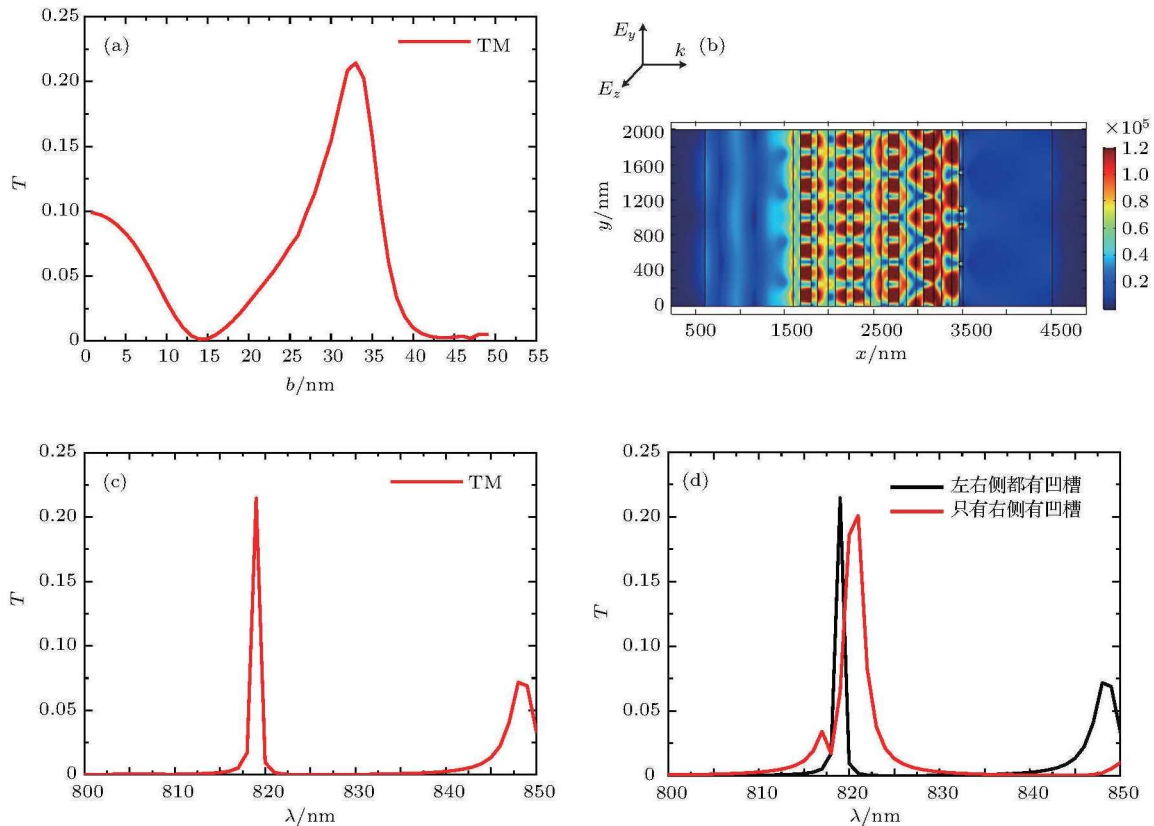


图5 (a) 凹槽边长与透射率的关系; (b) 银膜凹槽边长为33 nm、波长为819 nm时的电场强度模值分布; (c) 银膜凹槽边长为33 nm时透射率随波长的变化关系; (d) 银膜入射侧都有凹槽和只有出射侧有凹槽时的透射率比较
 Fig. 5. (a) Groove side length versus transmission rate; (b) electric field intensity distribution when the silver film groove side length is 33 nm and the wavelength is 819 nm; (c) transmittance versus wavelength when silver film groove side length is 33 nm; (d) the comparison of transmittance between grooves on the entrance side and the exit side of the silver film and grooves only on the exit side of the silver film.

3.4 改变DBR-银纳米缝入射侧和出射侧对称凹槽边长

如图5(a)所示,在入射侧和出射侧银膜凹槽位置固定的情况下,改变凹槽的边长,得到凹槽边长和透射率的关系,当凹槽边长为33 nm时透射率达到最大值0.21429,比之前的透射率有明显的增加;从图5(b)电场强度模值分布图可以看出,透射率的增加主要是因为银纳米缝与银膜出射侧凹槽激发出的SPPs,凹槽上激发的SPPs与狭缝中激发的SPPs同波长激发并且发生耦合作用,形成了干涉相长的场强分布,通过改变凹槽的边长,更加增强了耦合作用,再加上银膜入射侧凹槽形成的TPPs模式和SPPs模式的耦合,两种耦合作用加上银纳米缝中的类F-P腔的共振效应,使单纳米缝凹槽结构异常透射得到有效增强.图5(c)表示透射率随波长变化关系,可以看出通过改变凹槽边长使透射率最高点再次落到了波长为819 nm的波长处,对之后的应用有更好的理论价值.从图5(d)中可以看出入射侧和出射侧都有凹槽与仅出射侧有凹槽对比,双侧都有凹槽的情况下比仅出射侧有凹槽的结构透射率要高,并且透射率最高对应波长发生了蓝移,所以入射侧加凹槽会使DBR和银膜界面上激发的TPPs与SPPs更好地耦合,达到进一步增强透射率的效果.

3.5 DBR-银纳米缝左右凹槽边长不同的情况

如图6(a)所示,固定出射侧凹槽的缝槽间距17 nm和凹槽边长33 nm,改变入射侧凹槽的边长,可以看出当入射侧凹槽边长为38 nm时,透射率达到最大为0.22404,比之前透射率提高了0.01.从图6(b)可以看出,银纳米缝与银膜出射侧凹槽激发了SPPs,出射侧凹槽上激发的SPPs与狭缝中激发的SPPs同波长激发并且发生耦合作用.改变入射侧凹槽边长提高了DBR与银膜界面激发的TPPs模式和凹槽上激发的SPPs模式,经过DBR透射到金属表面的电磁波一部分耦合进银纳米缝,激发出银纳米缝内的SPPs,向外透射;还有一部分反射回DBR,银纳米缝的反射光和散射光与DBR界面上的TPPs和凹槽上激发的SPPs相干叠加,形成干涉相消和相长分布.图6(c)是加凹槽结构与不加凹槽结构透射率的对比,从图中可以明显

看出加凹槽的结构比无凹槽结构透射率增加了二倍多.

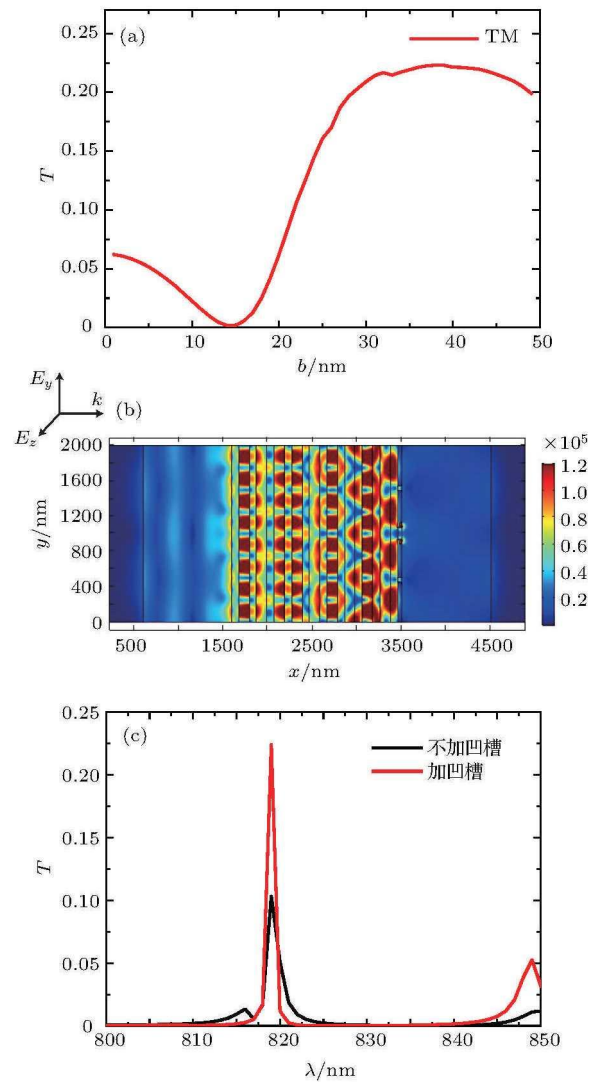


图6 (a) 出射侧凹槽边长确定透射率与入射侧凹槽边长的关系; (b) 入射侧凹槽边长38 nm,出射侧凹槽边长33 nm时电场强度的模值分布; (c) 银膜加凹槽优化边长后与不加凹槽的透射率进行对比

Fig. 6. (a) Transmittance versus the groove side length of the entrance side when the groove side length of the exit side is fixed; (b) electric field intensity distribution when the groove side length on the entrance side is 38 nm, the groove side length on the exit side is 33 nm; (c) transmittance comparison between the silver film with grooves by optimized edge length and the silver film with non-grooved.

4 结 论

对单纳米缝透射率低的问题进行研究优化,在之前文献提出的DBR-银纳米缝结构的基础上加上凹槽,并且对凹槽的位置和边长都做了研究,运用有限元仿真方法分析了DBR-银纳米缝加凹槽结

构的异常光学透射特性. 分析表明, 对于DBR-银纳米缝加凹槽结构, 当TM偏振光垂直入射时, 从DBR-银膜界面激发的TPPs与凹槽内激发的SPPs发生耦合作用, 同时还有银纳米缝与银膜出射侧凹槽激发出的SPPs, 并且出射侧凹槽上激发的SPPs与狭缝中激发的SPPs同波长被激发并发生耦合作用, 最后在纳米缝中发生类F-P腔共振效应, 实现了单纳米缝凹槽结构异常透射的有效增强, 得到最大透射率为0.22404, 这是TiO₂银纳米缝结构的透射率(0.01)的22倍, 比文献[23]的最大透射率0.166提高了0.06. 本文提出的新颖的单缝-凹槽纳米结构在纳米光刻、纳米光子学集成、极化激元激光器等相关领域都有潜在的应用价值.

参考文献

- [1] Ritchie R H 1957 *Phys. Rev.* **106** 874
- [2] Parsons J, Hendry E, Burrows C P, Auguie B, Sambles J R, Barnes W L 2009 *Phys. Rev. B* **79** 073412
- [3] Otto A 1968 *Z. Phys.* **216** 398
- [4] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, Thio T, Wolff P A 1998 *Nature* **391** 667
- [5] Lezec H J, Degiron A, Devaux E, Linke R A, Martinmoreno L, Garcia Vidal F J, Ebbesen T W 2002 *Science* **297** 820
- [6] Genet C, Ebbesen T W 2014 *Nature* **445** 39
- [7] Moreau A, Ciraci C, Mock J J, Hill R T, Wang Q, Wiley B J, Chilkoti A, Smith D R 2012 *Nature* **492** 86
- [8] Garcia Vidal F J, Martinmoreno L, Ebbesen T W, Kuipers L 2010 *Rev. Mod. Phys.* **82** 729
- [9] Mashooq K, Talukder M A 2016 *J. Appl. Phys.* **119** 193101
- [10] Farah A E, Davidson R, Malasi A, Pooser R C, Lawrie B, Kalyanaraman R 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 043101
- [11] Bethe H A 1944 *Phys. Rev.* **66** 163
- [12] Bouwkamp C J 1954 *Rep. Proy. Phys.* **17** 35
- [13] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W 2003 *Nature* **424** 824
- [14] Shao W J, Li W M, Xu X L, Wang H J, Wu Y Z, Yu J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 117301
- [15] Pang Y Q, Wang J F, Ma H, Feng M D, Xia S, Xu Z, Qu S B 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 194101
- [16] Martin-Moreno L, Garcia-Vidal F J, Lezec H J, Pellerin K M, Thio T, Pendry J B, Ebbesen T W 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 1114
- [17] Astilent S, Lalanne Ph, M Palamaru 2000 *Opt. Commun.* **175** 265
- [18] Takakura Y 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 245601
- [19] Qi Y P, Nan X H, Bai Y L, Wang X X 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 117102 (in Chinese) [祁云平, 南向红, 摆玉龙, 王向贤 2017 物理学报 **66** 117102]
- [20] Wang C M, Huang H I, Chao C C, Chang J Y, Sheng Y 2007 *Opt. Express* **15** 3496
- [21] Liu Y, Yu W 2012 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **24** 2214
- [22] Wu G, Chen J, Zhang R, Xiao J H, Gong Q H 2013 *Opt. Lett.* **38** 3776
- [23] Lu Y Q, Cheng X Y, Xu M, Xu J, Wang J 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 204207 (in Chinese) [陆云清, 成心怡, 许敏, 许吉, 王瑾 2016 物理学报 **65** 204207]
- [24] Kaliteevski M, Iorsh I, Brand S, Abram R A, Chamberlain J M, Kavokin A V, Shelykh I A 2007 *Phys. Rev. B* **76** 165415
- [25] Friedman P S, Wright D J 2014 *Opt. Lett.* **39** 6895
- [26] Dong H Y, Wang J, Cui T J 2013 *Phys. Rev. B* **87** 045406
- [27] Zhang Z Q, Lu H, Wang S H, Wei Z Y, Jiang H T, Li Y H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 114202 (in Chinese) [张振清, 陆海, 王少华, 魏泽勇, 江海涛, 李云辉 2015 物理学报 **64** 114202]
- [28] Chen Y, Fan H Q, Lu B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 244207 (in Chinese) [陈颖, 范卉青, 卢波 2014 物理学报 **63** 244207]
- [29] Kavokin A V, Shelykh I A, Malpuech G 2005 *Phys. Rev. B* **72** 233102

Enhanced optical transmission by exciting hybrid states of Tamm and surface plasmon polaritons in single slit with multi-pair groove nanostructure*

Qi Yun-Ping^{1)†} Zhou Pei-Yang¹⁾ Zhang Xue-Wei¹⁾ Yan Chun-Man¹⁾ Wang Xiang-Xian²⁾

1) (*Engineering Research Center of Gansu Province for Intelligent Information Technology and Application, College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China*)

2) (*School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China*)
(Received 16 January 2018; revised manuscript received 6 March 2018)

Abstract

In recent years, a metallic single slit nanostructure or slit array structure, due to simple structure and easy-to-integration, has been used to construct a light source in the nanostructures based on the surface plasmon polaritons (SPPs). However, the problem of low transmission through an isolated subwavelength single slit nanostructure is still existent. The main reason is that the excitation efficiency of SPPs in the single slit nanostructure is not too high. Therefore, how to effectively enhance the optical transmission has become a research focus. In order to further improve the transmittance of the metallic single slit nanostructure, in this paper, we improve the single slit nanostructure imbedded in the metal silver thin film on a distributed Bragg reflector (DBR) proposed in previous literature. As a result, a novel method of designing a single slit on a DBR is proposed to effectively enhance the optical transmission in a single slit by improving the excitation efficiency of SPPs. Our proposed novel structure is made up of a subwavelength single nano-slit surrounded symmetrically by a pair of grooves on both sides of metal silver film on a distributed Bragg reflector. When the TM polarized light is illuminated from the DBR side of our proposed structure to the DBR-silver slit-grooves nanostructure, the Tamm plasmon polaritons (TPPs) at the interface between the silver film and the DBR and the SPPs in the slit on the entrance side of the silver film are excited at the DBR-silver film interface, and the SPPs in the slit and grooves pair on the exit side of the silver film are excited simultaneously. In our proposed structure, coupling between the TPPs and the SPPs leads to the hybrid state of Tamm and surface plasmon polaritons in the slit and grooves. Finally, taking advantage of constructive interference between SPPs excited by the grooves and exciting hybrid states of TPPs-SPPs in the slit, due to the local field enhancement effect of the TPPs mode and the coupling effect of constructive interference between the pair grooves and the nano-slit, the excitation efficiency of the SPPs can be increased significantly. Furthermore, the quasi Fabry-Pérot resonance effect in the nano-slit is taken into consideration, and the transmittance of our proposed structure is enhanced greatly. In the present paper, the finite element method is used to study the transmission properties of the single nano-slit embedded with paired grooves on the DBR-silver nanostructure. After a series of parameters are optimized, the maximum transmittance through the single slit in DBR-silver slit-groove nanostructure can increase to 0.22, and this transmittance is expected to be about 22 times the transmittance (0.01) of the light through a single slit in a silver film on the TiO₂ substrate (without DBR and grooves), which is higher than the maximum light transmission 0.166 given in Ref. [23]. The research results of this study have a certain application value in the fields of nano-light source design, photonic integrated circuits and optical signal transmission and so on.

Keywords: optical anomaly transmission, Tamm plasmon polaritons, surface plasmon polaritons, quasi Fabry-Pérot resonance

PACS: 71.36.+c, 41.20.Jb, 42.25.Bs, 78.67.Pt

DOI: 10.7498/aps.67.20180117

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61367005, 61741119) and the Natural Science Foundation of Gansu Province, China (Grant No. 17JR5RA078).

† Corresponding author. E-mail: yunpqi@126.com