

# 表面等离子体激元纳米集成光子器件\*

汪 国 平<sup>†</sup>

( 武汉大学物理科学与技术学院 教育部声光材料与器件重点实验室 武汉 430072 )

**摘 要** 纳米集成光学的核心关键技术之一在于新型高效纳米光耦合器、纳米光波导等纳米光子器件的设计与制备. 表面等离子体激元( SPPs )是由外部电磁场与金属表面自由电子相互作用形成的一种相干共振, 除具有巨大的局部场增强效应外, 还具有将激发电磁场能量限制在纳米尺度范围的特点. 基于 SPPs 的各种纳米光子器件被誉为当今最有希望的纳米全光集成回路的基础, 成为目前国际上的一个研究热点. 文章对基于 SPPs 的纳米集成光子器件的最新研究进展和研究成果进行评述.

**关键词** 表面等离子体 纳米光子器件

## Surface plasmon polaritons-based integrated nanophotonic devices

WANG Guo-Ping<sup>†</sup>

( *Key Laboratory of Acoustic and Photonic Materials and Devices , Ministry of Education and School of Physics and Technology , Wuhan University , Wuhan 430072 , China* )

**Abstract** One of the crucial technologies for integrated nanophotonics is the design and implementation of novel and high efficiency nanocouplers , nanoguides and other related optical components. Surface plasmon polaritons ( SPPs ) are a coherent oscillation of free charges in the surface of metals in resonance with the incident light wave , which have the distinguishing capabilities of enhancing the local electric field intensity as well as of confining the optical energy within the nanoscale domain. As one of the most promising candidates for nanophotonic circuits SPP-based nanoscale optical devices have attracted enormous interest in recent years. In this article we present an overview of the progress in research on the fabrication of SPP-based integrated nanophotonic components.

**Keywords** surface plasmon polaritons , nanophotonic devices

## 1 引言

受衍射效应的影响, 传统的聚焦光斑大小或者传播光束直径一般只能限制在波长量级的线度范围. 随着微细加工技术和集成光学的不断发展, 光学元器件的不断小型化已经接近光的衍射极限. 如何获得突破衍射极限的各种高效光耦合器、光波导及光调制器, 是实现纳米全光集成的基础, 也是目前纳米光子学领域的一大研究热点.

表面等离子体激元( surface plasmon polaritons , SPPs )是由外部电磁场( 如光波 )诱导金属表面自由电子的集体振荡, 具有表面电磁场的传播性能, 即电

场强度在金属与介质的界面上具有最大值, 随着垂直于金属表面的距离增大, 场强呈指数衰减<sup>[1]</sup>. SPPs 的突出特点之一是巨大的局部场增强效应. 这种局部增强效应已经在高灵敏生物化学传感、新型光源、高效光学元器件等领域获得了广泛应用<sup>[2-5]</sup>. 另一方面, SPPs 还具有将电磁场能量聚集在很小的空间范围的特性, 因而在纳米光子学领域显示出巨大的应用潜力, 被喻为目前最有希望的纳米集成光子器件的信息载体, 并在纳米光学成像、纳米光刻等广泛

\* 教育部新世纪优秀人才支持计划( NCET - 04 - 0678 )和国家自然科学基金( 批准号 60278018 , 10574101 )资助项目  
2005 - 12 - 12 收到初稿, 2006 - 02 - 07 修回

<sup>†</sup> Email : kp\_wang@hotmail.com

领域获得了激动人心的成功<sup>[6]</sup>,以至于最近提出了表面等离子体激元学(plasmonics)的概念<sup>[7]</sup>.最近几年,几乎每一个大型国际光学会议都将与SPPs相关的领域作为一个甚至多个专门的专题.限于文章篇幅以及作者知识的局限性,本文主要对基于金属结构的SPPs纳米集成光子器件的发展及最新研究成果进行评述,同时对我们课题组在这方面的研究工作介绍.由于金属条形光波导器件以及金属结构表面波导器件在SPPs光子器件的发展过程中占有显著位置,加之该波导器件也可以在垂直于金属表面方向将电磁场能量局限在纳米尺度范围,因此,本文也对此类波导器件进行介绍.

## 2 光学激发的表面等离子体激元(SPPs)

由半无限厚的金属表面激发的SPPs色散关系<sup>[1]</sup>

$$k_{\text{SPP}} = k \left[ \frac{\epsilon_0 \epsilon_m}{\epsilon_0 + \epsilon_m} \right]^{1/2} \quad (1)$$

( $\epsilon_m$ ,  $\epsilon_0$  分别为金属及其相邻的电介质的介电常数)可以知道,SPPs的动量总是大于具有相同频率的空间传播光的动量,也就是说,SPPs的波矢大小 $k_{\text{SPP}}$ 总是大于同频率的空间传输光的波矢值 $k = 2\pi n/\lambda$ ( $n$ 为光在其中传输的介质的折射率, $\lambda$ 为光在真空中的波长).例如,在金属银和空气界面 $k_{\text{SPP}} \cong 1.03 k$ .这是由外界电磁场与金属表面电荷相互作用的结果,这种相互作用同时也是SPPs具有近场光学特性或非传播电磁场特性的原因.如果要让一束自由传播的光波激发SPPs,则必须保证激发光和SPPs在能量和动量上匹配相等.要实现这种匹配,可以降低SPPs的动量或 $k_{\text{SPP}}$ ,或者增大同频率的激发光波的动量或传播波矢.具体实现方法有棱镜全反射方式、光栅衍射方式以及使用线度大小比波长小得多的金属纳米小孔、颗粒、或探针.根据光路可逆性原理可以知道,上述三种方法既可用于增大激发光的波矢,产生与SPPs具有相同动量或波矢的非传播光场,同样也可以用于将非辐射的SPPs的动量降低而将其转换成可以在空间传播的辐射光场.例如,使用这些方法,既可以将辐射光场耦合进本文将要介绍的SPPs纳米波导器件中,也可以将SPPs从纳米波导器件中重新转换成可以在远场探测接收的传播光场.

## 3 纳米聚焦

通过传统的小孔光阑,可以得到直径在100nm以下的聚焦光斑,但这种小孔的光通量与 $(r/\lambda)^4$ 成正比( $r$ 为小孔的半径, $\lambda$ 为照明光波长),一般只在 $10^{-5}$ 到 $10^{-6}$ 的数量级,光能损耗巨大<sup>[8]</sup>.借助金属薄膜表面的周期性结构,可以将纳米小孔的光能透过率提高2个数量级以上<sup>[9]</sup>,其中SPPs起到了非常重要的作用<sup>[10-12]</sup>.如果通过金属结构直接控制SPPs传播,也可以得到纳米聚焦光斑.如具有不同几何宽度的三维金属狭缝(gap)波导结构<sup>[13]</sup>,以及三维空心金属锥结构<sup>[14]</sup>等都可以实现纳米聚焦.这种纳米聚焦原理是利用SPPs具有向传播相速度(以及群速度)较低的区间会聚的特点.因为金属结构的几何尺度越小,SPPs的传播速度越低,因此,可以实现高度会聚的纳米光斑.这和传统的波导光学原理类似.我们知道,电磁波总是趋向于在折射率较大、相速度较低的介质中传播,基于这个原理发展起来的通信光纤和集成光波导,构成了全球范围的现代光通信网络的基础.理论研究表明,利用三维金属空心锥结构,不仅可以控制SPPs的传播,还能有效抑制SPPs的辐射损耗,因此,金属锥端的局部电场强度可达到 $10^3$ 以上(如图1).

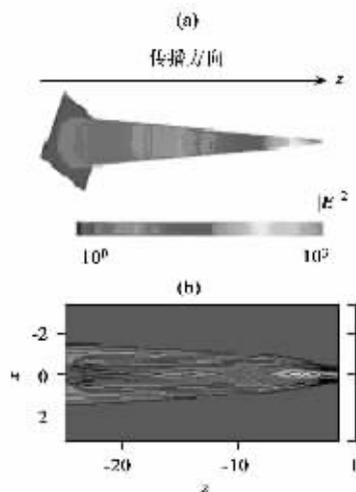


图1 SPPs在三维金属空心锥中传播的电场强度分布的数字模拟结果

以上都是通过改变金属结构在不同传输区域的几何尺度的大小来调制SPPs的传播相速度.但SPPs的传输特性不仅与金属结构的几何形状有关,更重要的是还与金属材料的种类及与之相邻的电介质的介电特性有关.例如,对于由两块相互平行的金

属平板形成的 SPPs 狭缝波导来说,当二者的间距相对较小,以至于两金属平板相对的表面激发的 SPPs 存在相互耦合作用时,这种波导中的 SPPs 的色散关系具有下列超越方程的形式:

$$\frac{\epsilon_0 p}{\epsilon_m k} = \frac{1 - \exp(kw)}{1 + \exp(kw)} \quad (2)$$

其中  $k = k_0 \sqrt{(\frac{\beta_{SPP}}{k_0})^2 - \epsilon_0}$ ;  $p = k_0 \sqrt{(\frac{\beta_{SPP}}{k_0})^2 - \epsilon_m}$  分别表示 SPPs 在电介质 ( $\epsilon_0$ ) 和金属 ( $\epsilon_m$ ) 中的传播波矢,  $w$  为波导宽度,  $k_0$  为光在真空中的波矢. 图 2 所示为分别用金属银和铝平板构成的狭缝波导中的 SPPs 的传播常数  $\beta_{SPP}$  ( $= \beta_R + i\beta_I$ ) 与波导宽度和金属平板间的电介质的介电常数之间的关系曲线. 其中实部  $\beta_R$  与相速度 ( $v_p$ ) 的大小有关 ( $v_p = \omega/\beta_R$ ), 虚部  $\beta_I$  与传输损耗有关. 由图 2 可见,如果同时改变金属波导材料的物理参数(如使用不同的金属和填充不同的电介质材料)和结构的几何特征(如改变波导的几何宽度等),必将更加有效地对 SPPs 在不同区间的传播相速度进行调制,获得性能更好的纳米光子器件,也就是既得到足够大的 SPPs 传播相速度差别,以更好地限制聚焦光斑的大小,同时也使 SPPs 的传播常数的虚部  $\beta_I$  尽可能地小,以获得更高的聚焦效率. 根据这种思想,我们设计并通过时域有限差分 (FDTD) 方法数字模拟了一种由金属银和铝构成的三维矩形金属异质波导结构的聚焦特性<sup>[15]</sup>, 结果表明,这种异质波导可以将一束入射光聚焦到

约  $0.002\lambda^2$  的范围,聚焦效率可达 15% 以上. 如果同时改变这种异质波导结构的几何参数(宽度和高度),则聚焦效率可以达到 95% 以上<sup>[16]</sup>.

### 3 纳米波导

常规电介质波导或光纤的截面直径如果小于波长量级,则光在其中是不能有效传播的. 由于 SPPs 可以局限在垂直于金属表面纳米厚度的空间范围内传播,因此,以 SPPs 作为信息载体的各种纳米波导结构的设计、模拟、制备和性能研究,成为一个非常引人注目的研究方向. 但金属固有的吸收特性会限制 SPPs 沿着金属表面的传输距离,因此,到目前为止,大部分有关 SPPs 波导的研究都是以在可见光波段具有最小吸收损耗的金属银作为载体材料. 实验证明,在半无限金属银和空气界面,由可见光激发的 SPPs 的传输距离可以达到 10—100  $\mu\text{m}$ ,而在近红外波段,其传输距离可达到数百微米到 1mm<sup>[2,3]</sup>. 引入长程 SPPs 结构方式<sup>[17]</sup>,则以  $\lambda > 1\mu\text{m}$  的近红外光激发的 SPPs 可以传播几个厘米. 这种长程结构的关键在于金属膜的上下表面电介质的介电常数必须相等,以及金属薄膜厚度相对较薄,以便上下表面激发的 SPPs 能够在动量和能量上相互匹配并能发生相互耦合作用,形成对称与反对称的两种 SPPs 模式,其反对称模式具有非常低的传输损耗和相对长的传输距离.

为限制 SPPs 的横向扩展空间, Krenn 等<sup>[18]</sup>系统研究了窄条形金属薄膜上 SPPs 的传输特性. 结果发现,当金属条的宽度大于 20  $\mu\text{m}$  时, SPPs 具有和无限宽的金属薄膜上的 SPPs 相同的传输特性. 当金属条的宽度在 20  $\mu\text{m}$  以下时, SPPs 的传输损耗随金属条宽度的减小而增大,传输距离逐渐减小. 尽管这种传输距离随金属条的宽度变窄而缩短的准确物理机制有待进一步探讨,但金属表面结构的不完备性以及边缘散射导致的 SPPs 的辐射损耗,可能是其中很重要的一个原因. 实验结果显示,由 633nm 的可见光在厚度为 70nm、宽度在 10  $\mu\text{m}$  以内的金属银膜和空气界面上激发的 SPPs 的传输距离可以达到几个微米到 40  $\mu\text{m}$  的范围. 为进一步提高 SPPs 在金属薄膜表面的传输距离,最近研究人员还提出使用活性增益介质的方法<sup>[19]</sup>.

利用光子晶体结构中电介质材料的周期性分布产生的光子带隙特性,可以制备新型高效光波导和光纤. 金属表面结构的周期性起伏也可以形成所谓

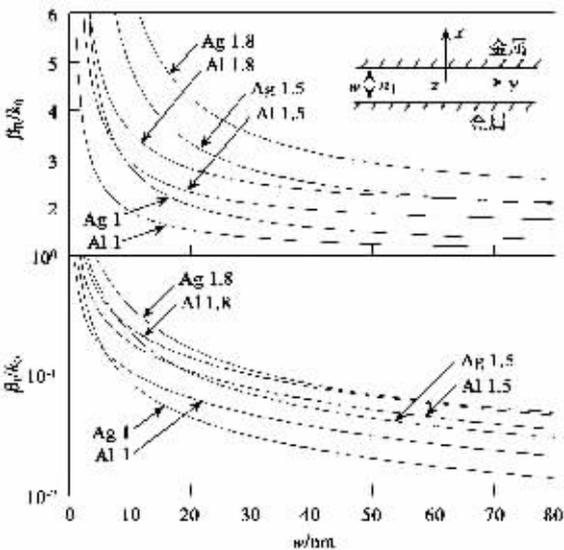


图 2 二维金属银和铝狭缝波导中的 SPPs 的传播常数与波导中电介质的折射率 ( $n_1$ ) 和波导宽度 ( $w$ ) 的关系曲线 (图中的数字 1、1.5、1.8 表示介质的折射率)

的光子结构表面,使 SPPs 在这种金属结构表面传播时产生光子能隙。例如,如果在金属表面制备二维周期性结构,如金属浮雕正交光栅,并保证结构的周期等于 SPPs 波长的一半,则该周期性结构对 SPPs 的 Bragg 散射将形成 SPPs 驻波和完全光子禁带<sup>[20]</sup>,频率范围在此禁带内的 SPPs 将不能传播。因此,利用这种周期结构光子表面的一维缺陷模式,实验得到了工作波长在近红外的各种 SPPs 波导器件<sup>[21]</sup>。结果表明,当这种波导宽度约为  $3.2\mu\text{m}$  时, SPPs 的传输距离达到  $18\mu\text{m}$  以后仍未见明显的能量衰减。

但是,上述波导都不能成为严格意义上的纳米波导器件,因为 SPPs 的横截面尺度只在垂直于金属表面的方向才被局限在纳米量级,而在平行于金属表面的方向往往都在几个微米以上,即光束直径仍在微米量级。为获得光束截面在纳米范围的真正意义上的纳米波导,研究人员提出了基于金属纳米线<sup>[22]</sup>或金属纳米颗粒阵列<sup>[23]</sup>的 SPPs 波导。例如,用直径为  $50\text{nm}$  的银颗粒排列的阵列,可以有效传输 SPPs(见图 3)。但上述波导在可见光波段范围的传播距离一般只有几百纳米。利用 SPPs 可以局域在低相速区的原理提出的 V 形金属波导,则具有相对低的能量发散和单模传输、无弯曲损耗、对结构制备缺陷不敏感等优点<sup>[24]</sup>。实验证明,由近红外波长( $1425\text{--}1620\text{nm}$ )激发的 SPPs 在这种 V 型通道波导中的传输距离可达到约  $100\mu\text{m}$ <sup>[25]</sup>。利用我们提出的金属异质结构,则可以做成类似于常规平面介质波导或光纤结构的 SPPs 波导:即 SPPs 限制在波导结构中心部分(等效折射率较高)的金属材料表面传播。FDTD 数字结果表明,以金属银和铝构成的异质



图 3 金属纳米颗粒阵列形成的 SPPs 波导结构

波导结构为例,由可见光激发的 SPPs 可以被限制在光束截面为  $55\text{nm} \times 65\text{nm}$  的范围内传播,传输损耗只有约  $2\text{dB}/\mu\text{m}$ <sup>[16]</sup>。

#### 4 SPPs Bragg 反射器与微腔

利用金属表面浮雕起伏、狭缝、小孔或金属纳米颗粒对 SPPs 的调制,可以得到各种二维 SPPs 光学元件<sup>[2,26,27]</sup>如反射镜、分束器、偏振超棱镜、透镜等。如通过在金属窄条表面刻槽形成一维周期性光栅结构,便可得到控制 SPPs 透射和反射光谱特性的 Bragg 反射器<sup>[2]</sup>。其基本原理与传统的多层电介质膜原理相似。当 SPPs 穿过这些金属表面的刻槽光栅时,刻槽内外表面的等效折射率差别使不同频率的 SPPs 产生不同的相位分布,当这些不同频率的 SPPs 重叠在一起时,某些频率范围的 SPPs 便因干涉相长

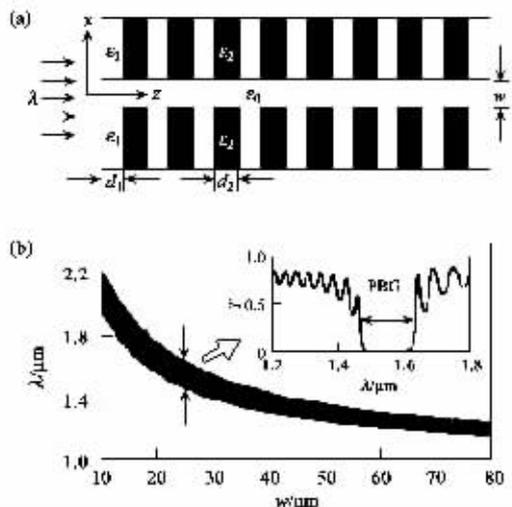


图 4 (a)金属异质结构 SPPs Bragg 反射器及其 (b)透射光谱与缝宽的依赖关系(插图透射曲线)

而全部反射,而另一些频率的 SPPs 则由于干涉相消而透射,透射或反射波长可由 Bragg 条件确定。但这种开放的金属结构会导致 SPPs 向传播模式的转变和光能辐射损耗的产生。利用两种不同的金属材料构成的金属异质结构,则可以利用光滑的金属表面对 SPPs 的传播进行调制,获得各种 SPPs 器件<sup>[28]</sup>。图 4(a)所示是由两种金属窄条交替叠放设计的 Bragg 反射器,当相对的两金属异质结构表面激发的 SPPs 相互耦合并向前传播时,不同金属表面对 SPPs 的等效折射率不同(如图 2)。由 Bragg 定理可知,在一定频率范围内的 SPPs 的传播因被禁止而全部反射,而在该频率范围外的 SPPs 则是完全透过的[如

图 4(b)]。改变中间一层金属膜的厚度,则在原来的周期性结构中可以形成一个缺陷层,这个缺陷层构成了所谓的 SPPs 微腔。类似于光子晶体中的缺陷模式在光子禁带内形成的透射峰一样,此时,当某一频率的 SPPs 与微腔的共振频率(缺陷模式)相同时,便形成共振输出<sup>[28]</sup>。和前面各种开放式结构器件相比较,这种金属异质结构的突出优点是,不同金属表面较大的等效折射率差别以及其封闭特征能对 SPPs 辐射损耗产生有效抑制。

## 5 SPPs 波导干涉与光束控制

光控微流传感结构具有无损、式样少、灵敏度高等特点,在药物研究、生物微流芯片等领域有重要应用价值。利用一维金属纳米阵列波导间 SPPs 的强烈耦合,可以获得用于纳米微流传感的 SPPs 干涉结构<sup>[29]</sup>。但具有三维结构特征的纳米光子显微传感技术才是实现纳米全光集成的基础。本课题组以两种金属材料为基础,设计了一种三维异质结构 SPPs Mach-Zehnder 干涉结构并获得较好的光能传输效率<sup>[30]</sup>。如果改变干涉结构中某一臂的样品材料的性质,便可调制出射光场的强度变化,由此可以分析获得样品的物理化学性质。如果在其中的一干涉臂中引入具有力、热、电、光效应的材料,通过附加外场,则可以调制其中 SPPs 的传播相位,实现对 SPPs 出射光束的控制和定向耦合。此外,通过调制相邻波导间 SPPs 的耦合作用强度,由这种三维 SPPs 波导形成的纳米阵列结构还可以实现阵列纳米聚焦或纳米成像<sup>[30-31]</sup>。

此外,光束准直在定向天线、光刻、数据存储等领域有巨大应用潜力。金属薄膜上的周期性小孔阵列不仅可以产生异常的透射增强<sup>[9]</sup>,还可以产生良好的光束准直效应<sup>[32]</sup>。前者主要在于入射面的周期结构将 SPPs 能量耦合到小孔中产生透射增强效应,后者则由于出射面的周期结构散射的表面波与小孔中的 SPPs 的同相位干涉相长。这就是传统的惠更斯-菲涅耳原理。根据这个原理,本课题组通过金属异质结构调制表面波相位和 SPPs 相位的关系,得到了方向性极好的准直光束<sup>[33]</sup>。图 5(a)和(b)所示为一束平面光波分别经过单一金属结构和金属异质结构中的狭缝后的透射光场分布的数字模拟结果。

## 6 结束语与展望

从目前的发展趋势来看,随着各种纳米加工技

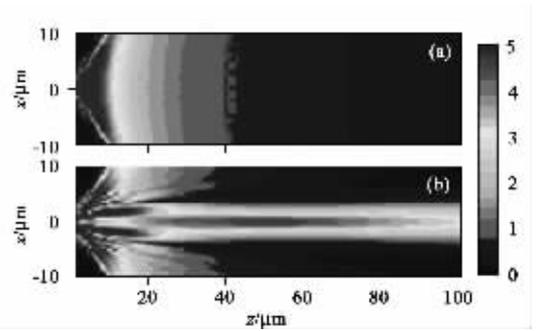


图 5 入射平面光波透过(a)同一种金属中的狭缝和(b)金属异质结构中的狭缝的透射光强分布

术(如电子束刻蚀技术、离子束加工技术、自组装技术)、纳米仿真技术以及纳米光学表征技术(如近场光学显微技术)的迅猛发展,光学元器件的不断小型化程度将会越来越高,以 SPPs 为基础的纳米集成光子器件的研究也将会越来越深入。但要使 SPPs 纳米光子器件具有真正的实用价值,一方面,要进一步弄清楚 SPPs 纳米波导传输损耗的相关物理机制,另一方面,还需要设计制备各种新型、简便、高效的功能纳米光学结构与器件,如非线性全光开关、低损耗 SPPs-光-SPPs 转换器及其各种分离光学元件等。只有两者的不断进步和发展,才能为以 SPPs 为基础的纳米全光集成网络的实现创造美好的前景。

致谢 对 C. T. Chan 教授,张道中研究员,刘正猷教授的帮助和指导表示衷心的感谢!

## 参 考 文 献

- [1] Raether H. Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings. Berlin: Springer, 1988
- [2] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Nature, 2003, 24: 824
- [3] Maier S A, Atwater H A. J. Appl. Phys., 2005, 98: 011101
- [4] Okamoto K, Niki I, Shvartser *et al.* Nature Mater., 2004, 3: 601
- [5] Wang G P, Sugiura T, Kawata S. Appl. Opt., 2001, 40: 3649
- [6] Fang N, Lee H, Sun C *et al.* Science, 2005, 308: 534; Liu Z-W, Wei Q-H, Zhang X. Nano Letters, 2005, 5: 957
- [7] Maier S A, Brongersma M L, Kik P G *et al.* Adv. Mater., 2001, 13: 1501
- [8] Bethe H A. Phys Rev, 1944, 66: 163
- [9] Ebbesen T W, Lezec H J, Gaemi H F *et al.* Nature, 1998, 391: 667
- [10] Wang G P, Yi Y, Wang B. J Phys: Condens Matter., 2003, 15: 8147
- [11] Garcia-Vidal F J, Lezec H J, Ebbesen T W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 90: 213901

