

文章编号 1674-2915(2010)05-0432-08

# 表面等离子体激元的若干新应用

雷建国, 刘天航, 林景全, 高 勋, 厉宝增

(长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 表面等离子体激元(SPPs)是在金属和介质界面传播的一种波动模式。本文首先叙述了SPPs的相关特性和激发方式,给出了一种基于表面等离子体激元共振(SPR)场增强原理产生相干极紫外辐射的方法,利用该方法可极大地提高光源的光子流量。分析了SPPs在生物及医疗领域的新应用,并对其在治疗癌症方面的技术原理进行了讨论。介绍了SPPs在新型光源和能源领域的发展和应用情况,综述了SPPs在太阳能电池、光子芯片以及集成电路方面的新工艺和新技术,包括最近几年来所取得的一些重要成果。最后讨论了SPPs在光存储方面的快速发展和巨大贡献。

**关键词:** 表面等离子体激元;表面等离子体共振;纳米光子学

中图分类号: O431.1; O439 文献标识码: A

## New applications of surface plasmon polaritons

LEI Jian-guo, LIU Tian-hang, LIN Jing-quan, GAO Xun, LI Bao-zeng

*(School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)*

**Abstract:** Surface plasmon polaritons(SPPs) are the wave modes propagating at the interface between a metal and a dielectric. Firstly, the basic characteristics and the excitation modes of SPPs are introduced briefly in this paper. Then, a new method to produce coherent extreme ultraviolet radiation based on the light field enhancement of Surface Plasmon Resonance(SPR) is described, which can greatly improve the photon flux of a light source. The new application of SPPs in the fields of biology and medical treatment is analyzed, and the major technologies and principles of curing cancer are discussed. Moreover, the development and application of several kinds of new light sources and energy sources are introduced, meanwhile, the new processes and technologies of solar cells, photonic chips and integrated circuits are summarized, including some of the most important achievements made in recent years. Finally, the rapid development and enormous contribution of SPPs to the field of optical storage is discussed.

**Key words:** Surface Plasmon Polariton(SPP); Surface Plasmon Resonance(SPR); nanophotonics

## 1 引言

表面等离子体激元 (Surface Plasmon Polaritons, SPPs) 是光和金属表面的自由电子相互作用所引起的一种电磁波模式, 或者说是局域金属表面的一种自由电子和光子相互作用形成的混合激发态<sup>[1]</sup>。在这种相互作用中, 自由电子在与其共振频率相同的光波照射下发生集体振荡。它局限于金属与介质界面附近, 沿表面传播, 并能在特定纳米结构条件下形成光场增强, 这种表面电荷振荡与光波电磁场之间的相互作用就构成了具有独特性质的 SPPs<sup>[2,3]</sup>。

导体中 SPPs 的激发, 使利用金属等导体材料来控制光的传播成为现实, 但受电子元件工艺制作水平的限制, 在微米、纳米尺寸的元件和回路成功运用之前, SPPs 并没有显露出它的特性, 亦不为人们所关注。随着工艺技术的长足进步, 制作特征尺寸为微米和纳米级的电子元件和回路已逐渐成熟, 人们又重新点燃对 SPPs 的极大热情并开展重点研究。目前, SPPs 已经被应用于生物、化学、传感、光电子集成器件等多个领域。实际应用中, 只有当结构尺寸可以与 SPPs 传播距离相比拟时, SPPs 特性和效应才显露出来, 有时候也用表面等离子体共振 (Surface Plasmon Resonance, SPR) 技术来描述其相关特性。

## 2 SPPs 的特性和激发

通过表面电荷和电磁波的相互作用可以得到 SPPs, 而这种表面电荷密度和电磁波的相互作用导致 SPPs 的动量  $k_{sp}$  大于同频率时自由空间内的动量  $k_0$  ( $k_0 = \omega/c$  为自由空间波矢, 式中  $\omega$  为频率,  $c$  为光速), 表现出 SPPs 的“慢波”特性。通过求解近似边界条件下的 Maxwell 方程, 可以得到 SPPs 的色散关系<sup>[4]</sup>:

$$k_{sp} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m}}, \quad (1)$$

其中,  $\epsilon_d$ 、 $\epsilon_m$  分别为电介质和金属的介电常数, 而且  $\epsilon_m$  的虚部还能表征因媒质的吸收而产生的电磁波衰减。将  $\epsilon_m = \epsilon_m + i \epsilon_m''$  代入到式(1)中, 计算

可得  $k_{sp}$  的实部和虚部分别为:

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \left( \frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \left( \frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m} \right)^{3/2} \frac{\epsilon_m''}{2(\epsilon_m')^2}. \quad (3)$$

进而可以得到穿透深度  $\delta_{sp}$  的表达式为:

$$\delta_{sp} = \frac{1}{2k_{sp}} = \frac{c}{\omega} \left( \frac{\epsilon_d + \epsilon_m}{\epsilon_d \epsilon_m} \right)^{3/2} \frac{(\epsilon_m')^2}{\epsilon_m''}. \quad (4)$$

SPPs 在垂直于金属表面的方向电场强度是呈指数衰减的, 这对应于 SPPs 的表面局域特性。SPPs 另一个独特的性质是近场增强, 场增强的程度取决于金属的介电常数、表面粗糙程度引起的辐射损耗以及金属薄膜厚度等。图 1 为表面等离子体激元的色散关系曲线。

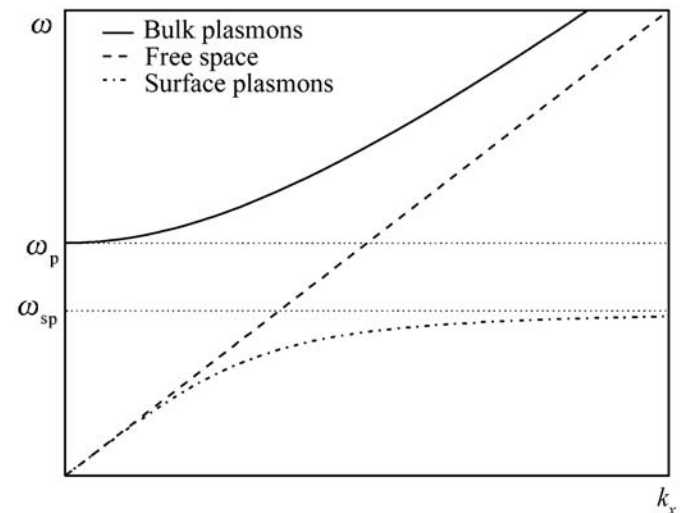


图 1 SPPs 的色散关系

Fig. 1 Dispersion relation of SPPs

由于 SPPs 的波矢量大于光波的波矢量, 或者说 SPPs 的动量与入射光子的动量不匹配, 所以不可能直接用光波激发出表面等离子体波。为了激励表面等离子体波, 需要引入一些特殊的结构达到波矢匹配, 常用的结构有以下几种<sup>[5]</sup>: (1) 采用棱镜耦合, 比较常用的有 Otto 方式和 Kretschmann 方式; (2) 采用波导结构; (3) 采用衍射光栅结构; (4) 采用强聚焦光束; (5) 采用近场激发。

## 3 代表性的新应用

通过改变金属表面结构, SPPs 的特性就能不断得到体现, 这为发展各种新型的光学设备提供了机遇。SPPs 技术正在亚波长光学、数据存储、发光技术、显微镜和生物光子学等领域发挥着重

要的作用<sup>[6]</sup>。本文从以下几个方面重点阐述近年来 SPPs 的新的应用。

### 3.1 产生相干极紫外辐射

随着纳米制作技术的发展以及 fs 激光脉冲与纳米尺度金属结构的相互作用研究的深入,近年来研究人员发现了一个有趣的物理现象:在一定的条件下,用 fs 激光照射金属纳米结构时,会引起自由电子的集体振荡,在金属表面附近的区域会形成表面等离子体激元波。在一定的频率条件下,可发生等离子体激元共振,这时纳米结构附近的局域光场强度较入射 fs 激光的光场强度会有大幅度的提高。纳米尺度局域光场的提高幅度由等离子体激元共振特性决定,即取决于材料的性质、几何形状及尺寸大小等因素。研究结果表明,纳米尺度等离子体激元共振可使局域光场强度提高 3 ~5 个数量级<sup>[7]</sup>。2008 年 6 月,国外首次报

道了 S. Kim 等人利用 SPPs 增强光场效应,直接使用普通的 fs 激光振荡器与 Ar 原子相互作用获得了极紫外波段高次谐波实验结果<sup>[8]</sup>。实验中采用三角形纳米天线结构阵列,得到的光场增益因子超过 20 dB,并获得了波长为 800 nm, fs 激光的级次为 17 次的高次谐波,该技术可能成为新型光刻和高清图像应用方面的极紫外光源的基础。

借助于这种光场增强效应,可使许多场强物理过程的研究一下变得简单起来,以往只有利用飞秒放大器才能实现的某些场强物理现象的研究现在使用 fs 激光振荡器就可以完成了,从而打破了以往极紫外波段高次谐波的产生必须使用复杂、昂贵的 fs 激光放大器这一科学禁锢,使高次谐波产生的设备变得简单、紧凑。

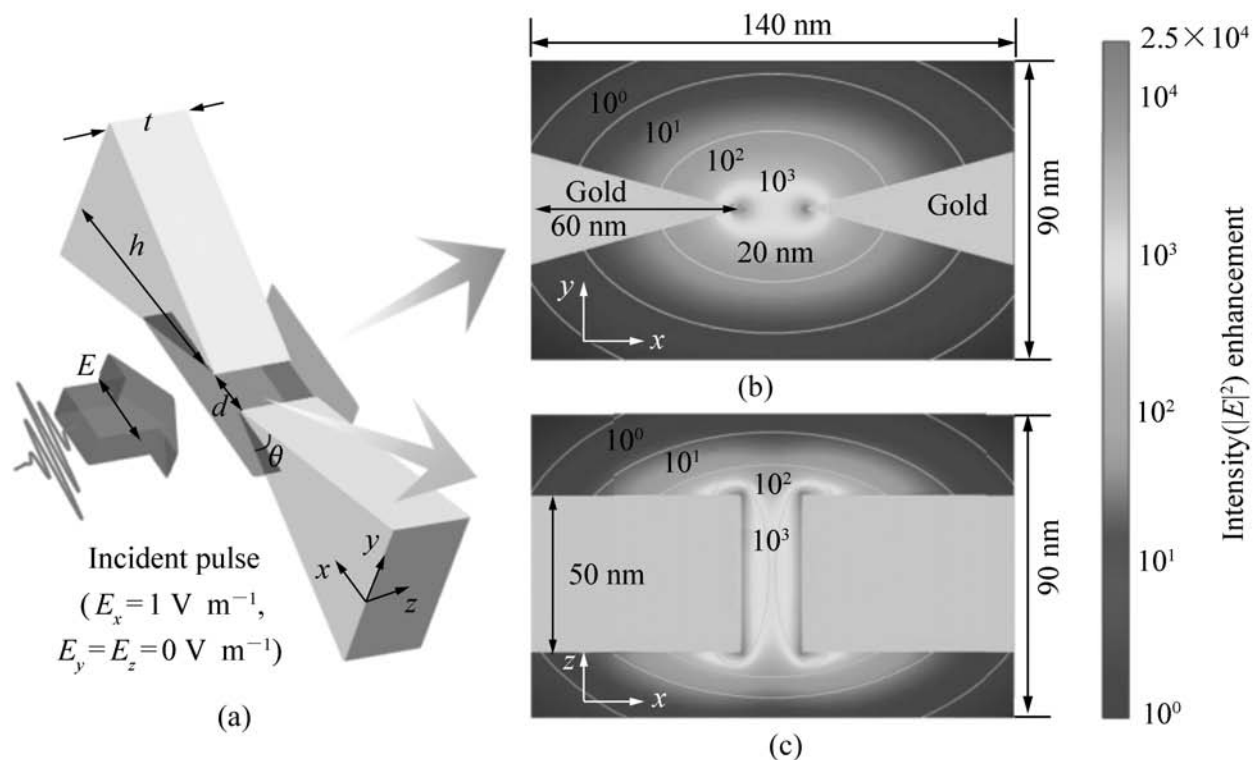


图 2 局域场增强的 FDTD 模拟图<sup>[8]</sup>

Fig. 2 Simulated diagram of enhanced local field using FDTD<sup>[8]</sup>

除此之外,还有很多种结构可以用来产生提高光场强度,比如#形<sup>[9]</sup>、盈月形<sup>[10]</sup>、球形、环形<sup>[11]</sup>等。有关这些结构对入射光场的增强,可以使用有限差分时间域方法(Finite Difference Time Domain, FDTD)进行模拟计算(见图2),常用分析软件有 Lumerical, CST, OptiFDTD 等。

### 3.2 生物和医疗

表面等离子体共振(SPR)技术由瑞典科学家

Liedberg 于 1983 年首次用于 IgG 抗体与其抗原相互作用的测定<sup>[12]</sup>。随后,该技术被引入生物传感器领域并迅速渗透到基础生命科学研究中<sup>[13]</sup>。SPR 的优点在于能够实时检测生物分子结合反应的全过程,不需要对分子进行标记,而且耗样最少。因此,SPR 技术发展非常迅速,已经成为一种成熟的检测生物分子间相互作用的方法,并发展出 SPR 生物传感器检测方法。另外,表面等离子

体激元共振还可以用于药物/蛋白相互作用和DNA放大检测, 该技术以其快速、高灵敏度的特性被广泛地应用到生物分子机制的研究中, 包括蛋白相互作用、抗原/抗体作用、配体/受体相互作用等等。此外, 药物筛选及鉴定也是近来 SPR 技术应用的另外一个热点。

当发生共振时反射光能量急剧下降, 在反射光谱上出现共振峰, 即反射率出现最小值。SPR 对附着在金属薄膜表面的介质折射率非常敏感, 当表面介质的属性改变或者附着量改变等引起折射率变化时, 共振角将不同, 在光谱上表现出红移和蓝移现象。因此, SPR 谱(共振角对时间的变化)能够反映与金属膜表面接触的体系的变化, 其对物质的检测精度甚至达到了纳克( $10^{-9}$  g)水平。影响 SPR 的因素包括: 金属膜表面介质的光学特性、厚度、入射光的入射角、波长和偏振状态等。

光在纳米尺度的特殊能力能应用到小生物分子精密探测、高分辨率显微镜以及更加有效的癌症治疗方案<sup>[14]</sup>。最近已提出了这一新的癌症治疗方案, 利用等离子体激元的共振效应来摧毁癌细胞<sup>[15]</sup>, 如图 3 所示。Rice 大学的 Naomi Halas

液, 纳米球会自动嵌入到快速生长的肿瘤内, 如果用近红外激光束照射癌细胞区域, 那么激光能够穿透皮肤并诱导电子在纳米球内共振。由于壳内表面和外表面场的耦合相互作用, 微粒吸收能量, 使得局域温度得到大幅度升高, 最终加热并杀死癌细胞, 而且不损害周围的健康组织。目前, 美国食品及药物管理局已批准位于休斯顿的纳米光谱生物科学公司(Nanospectra Biosciences Inc.)利用这种方法开始临床治疗试验。如果这种方案最终被证实对人体可行的话, 将给广大的癌症患者带来福音, 同时有效地保障世人的身体健康。

### 3.3 新型光源和能源

SPPs 所引发的电磁场不仅仅能够限制光波在亚波长尺寸结构中传播, 而且能够产生和操控不同波段的电磁辐射<sup>[16]</sup>。K. Okamoto 等人<sup>[17]</sup>利用时间分辨光致发光光谱法(Time-resolved Photoluminescence Spectroscopy)在 440 nm 处得到了增强了 32 倍的自发辐射率, 这将催生出新型的超亮度和高速运作的 LEDs。2008 年, Koller 等人介绍了一种源于 SPPs 的有机发光二极管的电开关表面等离子体源<sup>[18]</sup>, 这种电源可提供自由传播的表面等离子体波, 并对有机集成光子回路和光电传感有着潜在的应用价值, 他们的实验证实了表面等离子体的受控耦合和有机原料中的激子能对改良的有机发光二极管和有机光电装置的制作提供帮助。Walters 等人也展示了一种利用 SPPs 的硅基电源<sup>[19]</sup>, 这种电源是利用和后端 CMOS 技术相兼容的低温微观技术制成的。

表面等离子体波在太阳能电池和 LED 等新型能源相关器件方面也有重要应用。人们已经意识到基于纳米技术的太阳能光电转换器件及其材料与传统的光电转换器件和材料相比具有独特的优势。纳米材料的光电性质、机械性能均可通过改变颗粒的尺寸来实现。目前已实现在太阳能电池上利用表面等离子体效应来提高太阳能电池的光电转换效率, 同样也可以在 LED 上应用表面等离子体效应提高其出光效率。2004 年, P. Andrew 等人利用金属膜与介质表面产生的表面等离子体共振效应实现了分子间的长距离能量传输, 证实了在亚波长结构尺度范围内操控光能传输的可行性<sup>[20]</sup>。这一想法于 2007 年被 T. D. Heidel 等人

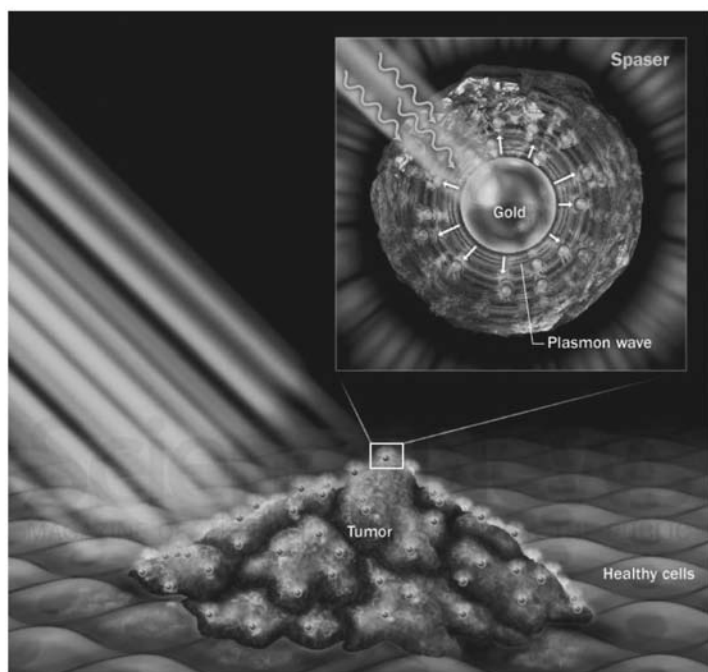


图 3 利用金纳米球新技术治疗癌症<sup>[14]</sup>

Fig. 3 New technology of cancer treatment using gold nano-sphere<sup>[14]</sup>

和 Peter Nordlander 等人正在研究这项新技术。首先将直径大约 100 nm 的硅纳米球的表面包裹 10 nm 厚的金薄膜, 并将这种纳米小球注射入血

进一步证实并用于提高光伏电池的转换效率<sup>[21]</sup>。

太阳能电池与金纳米粒子薄膜结合, 能比传统太阳能电池更有效地吸收太阳能, 因此, 能在不降低光电转换效率的基础上将太阳能电池能做得更薄、更加便宜。2008年, K. R. Catchpole 等人<sup>[22]</sup>展示了将表面等离子体用于光伏电池的实验, 其光电流强度有了较大增强, 实验揭示了金属纳米颗粒的使用可使射入的阳光更加分散, 从而使更多的光线进入光伏电池; 其次, 不同大小和种

类的微粒可以用来改进陷光效果。更值得一提的是表面等离子体在任何类型的光伏电池都能应用, 包括标准的硅或薄膜电池, 而且均会明显地提高转换效率。他们的实验表明, 如果相应的产品能够商品化, 那么对解决人类的能源问题将起到相当重要的作用。图4是 H. A. Atwater 等改良的光电设备示意图<sup>[23]</sup>, 该方法也是基于用表面等离子体来提高光电转换效率。

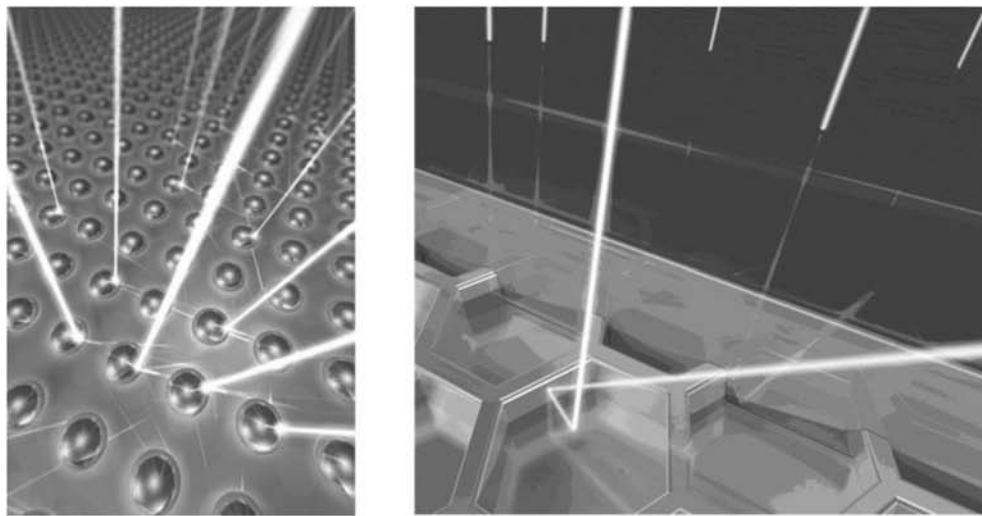


图4 金纳米粒子散射入射光, 然后将之捕获入太阳能电池<sup>[23]</sup>

Fig. 4 Gold nanoparticles scatter incident light, and then the light is captured in solar cell<sup>[23]</sup>

### 3.4 光子芯片和集成器件

芯片尺度下电子学和光子学的发展, 极大地促进了数据处理和传输能力, 并很快地影响到了人们生活的方方面面<sup>[24]</sup>。近年来出现的等离子体光子学(plasmonics)是一项令人关注的新技术, 该技术能探索出金属纳米结构的独特光学属性, 能够控制和操作光在纳米尺度下的传输。在同一芯片里如果结合等离子体、电子学和传统的电介质光子设备, 并充分利用各自技术力量的优点, 会显现出巨大的合作优势。

传统光学器件受到衍射极限的制约, 其尺度的微小化和集成度受到限制, 但是, SPPs的特征可以很好地突破衍射极限, 为制造基于SPPs的集成光路应用于高速光通讯提供了可能。SPPs在金属银内的穿透深度比入射波长大约要小2个数量级, 这一特性提供了在亚波长尺度的金属结构中实现光场局域化和导波的可能性, 可应用于构筑亚波长尺度的光子元件和回路<sup>[25]</sup>, 而这些光子电路、元件或者等离子体芯片由诸如波导、开

关、调制器和耦合器等元件组成, 用于将光信号传送到电路的不同环节<sup>[26]</sup>。

2009年, M. A. Noginov 等人报导了一种世界上最小的激光器<sup>[27]</sup>, 取名为 SPASER (Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of

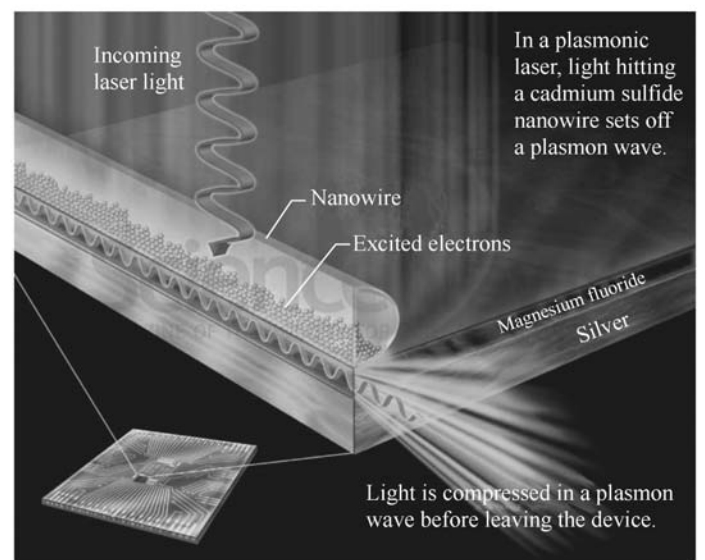


图5 最小的新型激光器<sup>[14]</sup>

Fig. 5 The smallest new laser

Radiation), 它由染料-硅组成, 并被直径仅 44 nm 的金小球所覆盖, 如图 5 所示。这种技术还可以应用到新型高速计算机中去, 此时晶体管中的电子将由光来代替。

通过改变金属表面结构, 表面等离子体激元的性质, 特别是与光的相互作用机制也将随之变化。表面等离子体激元为发展新型光子器件、宽带通讯系统、尺度极小的微小光子回路、新型光学传感器和测量技术提供了可能<sup>[28, 29]</sup>。2009 年, Rupert F. Oulton 等人报导了纳米尺度等离子体激光器的实验验证工作<sup>[30]</sup>, 获得了比衍射极限小 100 × 的光学模式。这种等离子体激光器为探索光与物质极限相互作用提供了可能, 开创了光子电路<sup>[31]</sup>和量子信息技术<sup>[32]</sup>等领域研究的新途径。

### 3.5 光存储

随着信息产业的不断进步, 对数据存储和传输能力的需求也越来越高。传统技术在这方面逐渐表现出其局限性, 而 SPR 技术却崭露头角。2009 年, Peter Zijlstra 等人利用金纳米棒独特的

纵向 SPR 性质介绍了五维光学存储技术<sup>[33]</sup>, 如图 6 所示。他们采用该方案在同一个物理地址利用 3 种颜色和 2 个偏振方向来刻写数据, 其光盘存储容量能达到 7.2 TB, 如果使用高重复频率激光源的话, 存储速度能高达 1 Gbit/s。纵向 SPR 表现出了良好的波长和偏振灵敏度, 然而其能量阈值却需要光热存储机制来保证其轴向选择性。利用双光子发光结合纵向 SPR 可以检测到存储信息, 对比于传统的线性检测机制, 这种检测方法拥有增强的波长和角度选择性, 能够做到无损坏、无串话读取。该技术成功地突破了光学衍射极限, 将光盘数据存储量提升了几个数量级, 对光存储领域意义重大。研究表明, 利用金纳米粒子技术能将 1 张光盘的数据存储增加 10 000 ×。如果成功商业化的话, 该技术能允许 1 张光盘容纳超过 300 部电影或 25 万首歌曲。这种技术能够马上应用到光学图像、加密技术和数据存储等高数据密度相关领域。

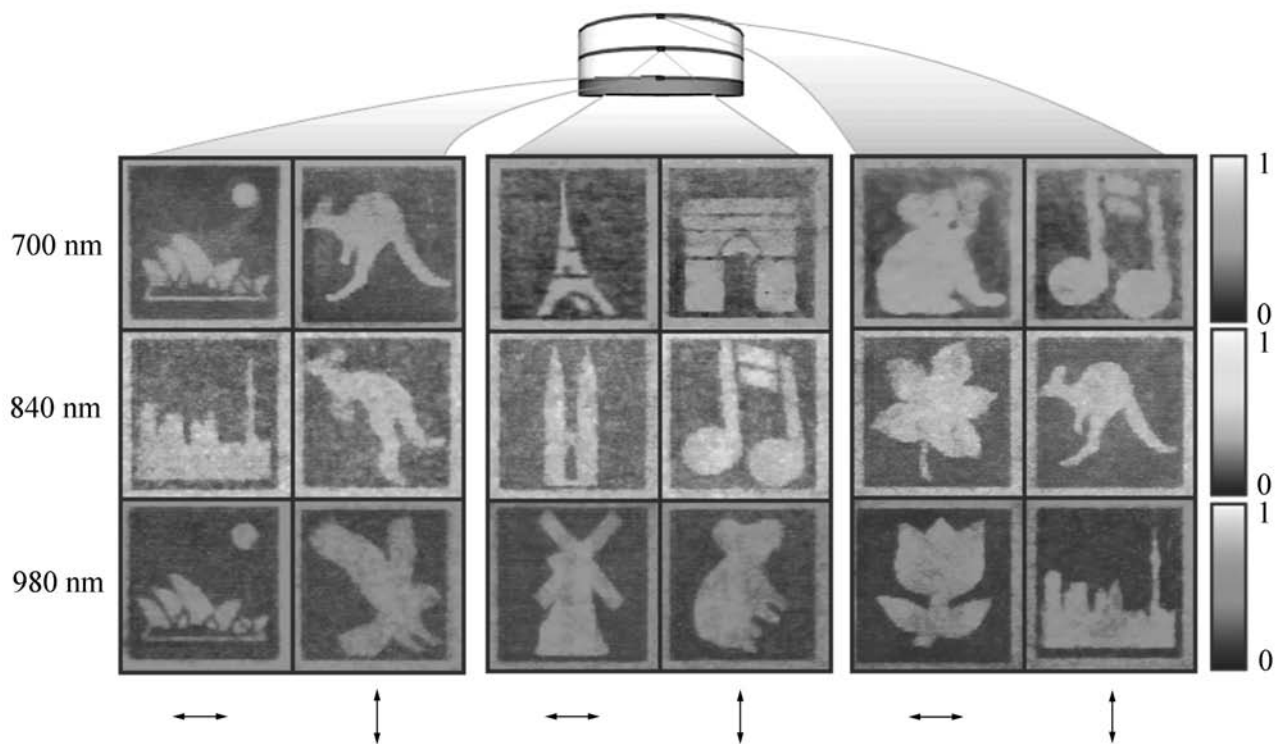


图 6 五维等离子体存储技术示意图, 利用光的不同颜色和偏振来标记数据单元<sup>[33]</sup>

Fig. 6 Five-dimensional optical recording stored by surface plasmons and data elements marked by different color and polarization lights

2009 年 7 月, M. Mansuripur 等人也介绍了一种利用纳米粒子和纳米结构来实现高密度数据存储的新方法<sup>[34]</sup>, 初步实验证实这种等离子体纳米结构在高密度光学数据存储方面具有潜在应用价

值。

另外, 2010 年 5 月, TG Daily 报导日本一个研究小组研发出了一种可用来制造容量为 25 TB 低价超级硬盘的物质。这种钛氧化物可以随着光的

变化而改变颜色,能够在存储设备中得以应用。

## 4 结束语

表面等离子体激元是一个很有趣的现象,目前有许多值得研究的方向,也有许多激动人心的结果。不难看出,随着纳米技术的发展,将会有越来越多的表面等离子体激元器件进入市场。负折射率介质是当前国际研究的热点问题,研究发现,

这种特殊物质的一些奇特性质可以利用金属材料来实现,并且和 SPPs 密切相关,这也为 SPPs 研究和应用指明了新的方向<sup>[35]</sup>。总之,表面等离子体光子学为科学研究和实际应用提供了难得的机遇,它涉及物理、材料、化学、生物、医学、能源等众多的学科和前沿,且有交叉和融合,这将为科学研究和人类科技进步开辟新的道路和天地。为了实现这些目标,有必要在这个崭新的学科领域中,开展更加广泛和深入的研究。

### 参考文献:

- [1] RAETHER H. Surface Plasmons. Springer Tracts in Modern Physics[ M] . Berlin: Springer, 1988.
- [2] FAINMAN Y, TETZ K, ROKITISKI R, *et al.* . Surface plasmonic fields in nanophotonics[ J] . *Opt. Photonics News*, 2006, 17( 7) : 24-29.
- [3] KIK P G, BRONGERSMA M L. *Surface Plasmon Nanophotonics*[ M] . Berlin: Springer, 2007.
- [4] SAMBLES J R, BRADBURY G W, YANG F Z. Optical-excitation of surface-plasmons: an introduction[ J] . *Contemp. Phys.* , 1991, 32( 3) : 173-183.
- [5] ZAYATS A V, SMOLYANINOV I I. Near-field photonics: surface plasmon polaritons and localized surface plasmons[ J] . *J. Opt. A*, 2003, 5: S16-S50.
- [6] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics[ J] . *Nature*, 2003, 424: 824-830.
- [7] STOCKMAN M I, KLING M, KLEINEBERG U, *et al.* . Attosecond nanoplasmonic-field microscope[ J] . *Nature Photonics* 2007, 1: 539-543.
- [8] KIM S, JIN J, KIM Y, *et al.* . High harmonic generation by resonant plasmon field enhancement[ J] . *Nature*, 2008, 453: 757-760.
- [9] HU W Q, LIANG E J, DING P, *et al.* . Surface plasmon resonance and field enhancement in # - shaped gold wires metamaterial[ J] . *Opt. Express* 2009, 17( 24) : 21843-21849.
- [10] LIU G L, LU Y, KIM J, *et al.* . Nanophotonic crescent moon structures with sharp edge for ultrasensitive biomolecular detection by local electromagnetic field enhancement effect[ J] . *Nano Lett.* , 2005, 5( 1) : 119-124.
- [11] KNEIPP K, WANG Y, KNEIPP H, *et al.* . Single molecule detection using surface-enhanced Raman scattering( SERS) [ J] . *Phys. Rev. Lett.* , 1997, 78( 9) : 1667-1670.
- [12] LIEBERG B, NYLANDER C, LUNDSTR M I. Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing[ J] . *Sensors and Actuators*, 1983, 4: 299-304.
- [13] WILSON W D. Analyzing biomolecular interactions[ J] . *Science*, 2002, 295( 5562) : 2103-2105.
- [14] LEE J L. Better living through plasmonics[ J] . *Science*, 2009, 176#10: 26.
- [15] ATWATER H A. The promise of plasmonics[ J] . *Scientific American Magazine*, 2007: 56-63.
- [16] OZBAY E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[ J] . *Science*, 2006, 311: 189-193.
- [17] OKAMOTO K, NIKI I, *et al.* . Surface plasmon enhanced spontaneous emission rate of InGaN/GaN quantum wells probed by time-resolved photoluminescence spectroscopy[ J] . *Appl. Phys. Lett.* , 2005, 87: 071102.
- [18] KOLLER D M, HOHENAU A, *et al.* . Organic plasmon-emitting diode[ J] . *Nature Photon*, 2008, 2: 684-687.
- [19] WALTERS R J, van LOON R V A, BRUNETTS I, *et al.* . A silicon-based electrical source of surface plasmon polaritons [ J] . *Nature Materials*, 2009, 9: 21-25
- [20] ANDREW P, BARNES W L. Energy transfer across a metal film mediated by surface plasmon polaritons[ J] . *Science*, 2004, 306: 1002-1005.
- [21] HEIDEL T D, MAPEL J K, CELEBI K, *et al.* . Surface plasmon polariton mediated energy transfer in organic photovoltaic

- devices[ J ] . *Appl. Phys. Lett.* , 2007, 91: 093506/1-093506/3.
- [ 22 ] CATCHPOLE K R, POLMAN A. Plasmonic solar cells[ J ] . *Optics Express*, 2008, 16( 26 ) : 21793-21800.
- [ 23 ] ATWATER H A, POLMAN A. Plasmonics for improved photovoltaic devices[ J ] . *Nature Materials*, 2010, 9: 205-213.
- [ 24 ] ZIA R, SCHULLER J A, CHANDRAN A, *et al.* . Plasmonics: the next chip-scale technology[ J ] . *Materials Today*, 2006, 9( 7-8 ) : 20-27.
- [ 25 ] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics[ J ] . *Nature*, 2003, 424: 824-830.
- [ 26 ] STEFAN A M, HARRY A A. Plasmonics: localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures [ J ] . *J. Appl. Phys.* , 2005, 98: 011101-011110.
- [ 27 ] NOGINOV M A, ZHU G, BELGRAVE A M, *et al.* . Demonstration of a spaser-based nanolaser[ J ] . *Nature*, 2009, 460: 1110-1112.
- [ 28 ] HECHT B, BIELEFELDT H, NOVOTNY L, *et al.* . Local excitation, scattering, and interference of surface plasmons[ J ] . *Phys. Rev. Lett.* , 1996, 77( 9 ) : 1889-1892.
- [ 29 ] PENDRY J. Enhanced: playing tricks with light[ J ] . *Science*, 1999, 285: 1687-1688.
- [ 30 ] OULTON R F, SORGER V J, ZENTGRAF T, *et al.* . Plasmon lasers at deep subwavelength scale[ J ] . *Nature*, 2009, 461: 629-632.
- [ 31 ] BOZHEVOLNYI S I, VOLKOV V S, DEVAUX W, *et al.* . Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators[ J ] . *Nature*, 2006, 440: 508-511.
- [ 32 ] AKIMOV A V, MUKHERJEE A, YU C L, *et al.* . Generation of single optical plasmons in metallic nanowires coupled to quantum dots[ J ] . *Nature*, 2007, 450: 402-406.
- [ 33 ] ZIJLSTRA P, CHON J W M, GU M, *et al.* . Five-dimensional optical recording mediated by surface plasmons in gold nanorods[ J ] . *Nature*, 2009, 459: 410-413.
- [ 34 ] MANSURIPUR M, ZAKHARIAN A R, LESUFFLEUR A, *et al.* . Plasmonic nano-structures for optical data storage[ J ] . *Opt. Express*, 2009, 17( 16 ) : 14001-14014.
- [ 35 ] KIK P G, MAIER S A, ATWATER H A, *et al.* . Image resolution of surface plasmon - mediated near-field focusing with planar metal films in three dimensions using finite-linewidth dipole sources[ J ] . *Phys. Rev. B*, 2004, 69( 4 ) : 045418-045422.

作者简介: 雷建国(1979—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事飞秒激光、表面等离子体等相关领域的研究。

E-mail: lei303@163.com