

表面等离子体激元纳米激光器技术及应用研究进展

陈泳屹^{1,2}, 佟存柱¹, 秦莉¹, 王立军¹, 张金龙^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:传统半导体激光器由于采用光学系统反馈而存在衍射极限,其腔长至少是其发射波长的一半,因此难以实现微小化。基于表面等离子体激元的纳米激光器可以实现深亚波长乃至纳米尺度的激光发射,而且现代微纳加工技术的逐步成熟,也为亚波长乃至纳米量级激光器的研制提供了成熟的技术条件。本文重点综述了国际上已成功实验验证的基于表面等离子体激元的纳米激光器的最新研究进展,综述了表面等离子体激元的基本原理,给出了若干种表面等离子体激元纳米激光器的结构和特点,指出该类激光器现存问题主要表现在激元损耗高及由此引起的制备工艺和电泵浦涉及的技术难题。文中最后展望了纳米激光器的应用和研究前景。

关键词:纳米激光器;表面等离子体激元;纳米腔

中图分类号:TN248.9;O439 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20120505.0453

Progress in surface plasmon polariton nano-laser technologies and applications

CHEN Yong-yi^{1,2}, TONG Cun-zhu¹, QIN Li¹, WANG Li-jun¹, ZHANG Jin-long^{1*}

(1. *State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail:pled3588@yahoo.com.cn*

Abstract: Conventional semiconductor lasers suffer from the scale of the diffraction limit due to the light to be confined by the optical feedback systems. Therefore, the scales of the lasers cannot be miniaturized because their cavities cannot be less than the half of the lasing wavelength. However, lasers based on the Surface Plasmon Polaritons (SPPs) can operate at a deep sub-wavelength, even nanometer scale. Moreover, the development of modern nanofabrication techniques provides the fabrication conditions for micro – or even nanometer scale lasers. This paper reviews the progress in nano-lasers based on SPPs that have been demonstrated re-

收稿日期:2012-06-12;修订日期:2012-08-13

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(No. 61076064, No. 61176046);吉林省科技厅资助项目(No. 201105026, No. 20116011)

cently. It describes the basic principles of the SPPs and gives structures and characteristics for several kinds of nanometer scale lasers. Then, it points out that the major defects of the nanometer scale lasers currently are focused on higher polariton losses and the difficulties in fabrication and electronic pumping technologies mentioned above. Finally, the paper considers the research and application prospects of the nanometer scale lasers based on the SPPs.

Key words: nano-laser; Surface Plasmon Polariton (SPP); nano-cavity

1 引言

1960年由Schawlow和Townes发明的第一台红宝石激光器,是20世纪最重要的发明之一^[1]。半个世纪以来,激光器正在朝着更小体积、更快调制速度、更大功率、更高效率等方向飞速发展。2003年以前,由于受制备工艺水平的限制,激光器尺寸难以超越衍射极限。随着微纳尺度加工工艺的成熟,激光器的空间尺度也不断缩小,已经进入了微米量级、甚至纳米量级的时代。然而由于采用传统光学反馈谐振腔的激光器无法超越半波长谐振腔极限,因此微纳米激光器在尺度上无法再继续缩小。

基于表面等离子体激元(Surface Plasmon Polariton, SPP)的纳米激光器与传统激光器不同,它利用导体中表面等离子体激元的激发来实现光场的三维限制和传输,从而将谐振腔的尺寸压缩到深亚波长甚至纳米量级。该纳米激光器在光互连、生物探测、医疗、纳米光刻、数据存储等领域有着广泛的应用前景^[2-12]。

在光互连方面,纳米激光器可用来实现自动调控开关,其速度比目前最快的晶体管快1000倍,这为制造速度超快的放大器、逻辑元件和微处理器提供了可能,因此可以制成超快纳光子大规模集成电路或大规模集成光路^[13-15]。在生物探测与医疗方面,表面等离子体激元早在1983年就已应用于抗体与抗原相互作用的测定^[16],近年来又提出利用纳米球激光器表面振荡的表面等离子体激元强近场效应来治疗癌症^[17]。在纳米光刻方面,相比于电子束曝光与聚焦离子束刻蚀等方法,表面等离子体激元激光光刻可以实现纳米精度刻蚀、直写而又不需使用高真空设备,速度快、步骤简单且成本低廉,特别适于未来大规模生产

纳米量级的结构与器件^[18]。在磁性数据存储业,纳米激光器可用于热辅助磁存储,在直径为纳米尺度的光斑上传输足够改变磁化方向的能量,突破超顺磁性极限,实现更大容量的磁盘信息存储。

本文着重介绍了近几年已经在实验上证实并且取得突破性进展的基于表面等离子体激元的纳米激光。最近研究结果表明,基于表面等离子体激元的纳米激光可以有效克服损耗大、小于衍射极限等问题,在技术上实现突破衍射极限的纳米量级激光发射。

2 表面等离子体激元的基本原理

在基于表面等离子体激元的纳米激光器中,表面等离子体激元替代光子,在纳米尺度的谐振腔中谐振,并在激辐射的作用下得到放大与激射^[19]。

表面等离子体激元^[20-21]是指光子与金属表面的自由电子相互作用而被俘获,外来光子电磁场激发引起金属中电荷密度涨落产生的电磁模式^[22],它沿着金属表面传播,是一种倏逝表面波,满足麦克斯韦方程。

如图1所示,在一个平坦的半无限金属表面,假定金属与介质的界面位于 yz 面, $x=0$,而法线方向为 x 轴。入射光的磁场沿 y 轴方向入射到界面上,表面等离子体激元沿 z 轴方向传播, $x>0$ 的区域是真空或者其他介电材料,其介电常数为 ϵ_1 ; $x<0$ 的区域为金属,其介电常数为 ϵ_2 ,金属的介电常数的实部是负值,即 $\text{Re}(\epsilon_2)<0$ 。介质(或真空)和金属中的电场分别为 E_1 和 E_2 ,磁场分别为 H_1 和 H_2 ,波矢分别为 k_1 和 k_2 ,表面等离子体激元波矢为 k_{spp} ,真空中的波矢为 k_0 ,根据麦克斯韦方程,设定电磁场的形式如下:

在 $x>0$ 区域:

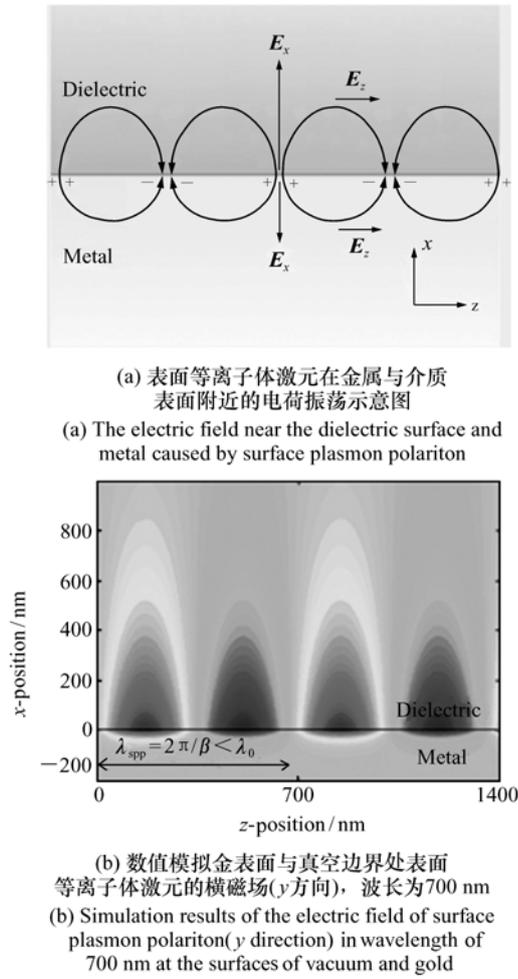


图1 表面等离子体激元在金属表面传输示意图

Fig.1 Surface plasmon polaritons travelling along metal surface

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_1 &= (0, \mathbf{H}_y, 0) e^{i(k_{1x}x+k_{1z}z)}, \\ \mathbf{E}_1 &= (\mathbf{E}_{1x}, 0, \mathbf{E}_{1z}) e^{i(k_{1x}x+k_{1z}z)}, \end{aligned} \quad (1)$$

由于:

$$k_{1z}^2 + k_{1x}^2 = k_1^2 = \varepsilon_1 k_0^2, \quad (2)$$

因此

$$k_{1x} = \sqrt{\varepsilon_1 k_0^2 - k_{1z}^2}. \quad (3)$$

同理,在 $x < 0$ 区域:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_2 &= (0, \mathbf{H}_y, 0) e^{i(k_{2x}x+k_{2z}z)}, \\ \mathbf{E}_2 &= (\mathbf{E}_{2x}, 0, \mathbf{E}_{2z}) e^{i(k_{2x}x+k_{2z}z)}, \end{aligned} \quad (4)$$

由于:

$$k_{2z}^2 + k_{2x}^2 = k_2^2 = \varepsilon_2 k_0^2, \quad (5)$$

因此

$$k_{2x} = -\sqrt{\varepsilon_2 k_0^2 - k_{2z}^2}. \quad (6)$$

利用电场的切向分量在边界上连续有:

$$k_{1z} = k_{2z} = k_{spp}, \quad (7)$$

电场由麦克斯韦方程确定:

$$\nabla \times \mathbf{H} = -ik_0 \varepsilon \mathbf{E}, \quad (8)$$

于是有,在 $x=0$ 处,

$$\frac{k_{1x}}{\varepsilon_1} + \frac{k_{2x}}{\varepsilon_2} = 0. \quad (9)$$

由式(3)、(6)、(7)、(9),消去 k_{1x} 和 k_{2x} 可得:

$$k_{spp} = k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}}. \quad (10)$$

注意到金属的 $\varepsilon_2 < 0, |\varepsilon_2 + \varepsilon_1| < |\varepsilon_2|$, 因此, $k_{spp} > k_0$ 。介电材料中, $k_{1x}^2 < 0, k_{1x}$ 为虚数;在金属中,因为 $\varepsilon_2 < 0$, 所以有 $k_{2x}^2 = \varepsilon_2 k_0^2 - k_{spp}^2 < 0$ 。由此可以推断出,表面等离子体激元在垂直金属表面 $+x$ 和 $-x$ 两个方向上无论是穿透介质(真空)还是金属,都是以指数衰减,只能沿着表面传播^[23-24]。

利用表面等离子体激元的这种特性,制作一些金属的纳米结构,可以使光子耦合成为表面等离子体激元,并限制在纳米尺度的金属表面,从而极大地压缩电磁场在空间上的分布尺度^[25-28],上述理论为实现纳米激光器提供了理论基础^[29-30]。

图2表示增益介质、激子与表面等离子体激元间的能量传递过程^[31]。在基于表面等离子体激元的纳米激光器中,增益介质的作用依然提供光增益和粒子数反转。电子空穴对(激子)被外界能量泵浦激发后,在激子能级跃迁的复合过程中,靠近金属表面的电子跃迁更多地耦合成为表面等离子体激元,从而沿着金属表面传播^[32],而不形成光子,这就是黑暗模式(dark mode)。黑暗模式沿着金属与介质的界面传输而没有辐射损耗,换言之,表面等离子体激元激光器产生相干强近场而不必辐射光子,不能通过远场方式观测。由于该模式耦合成为表面等离子体激元的自发辐射,没有向外界辐射光子,因此可以用来提供噪声很小的光学放大和较大的损耗补偿^[33]。通过打破纳米结构的对称性可以使得表面等离子体激元从黑暗模式转变为发光模式^[34]。表面等离子体激元在金属纳米结构附近共振可以导致自发辐射增强,因此在集成纳光子器件中有着重要的应用^[35-43]。

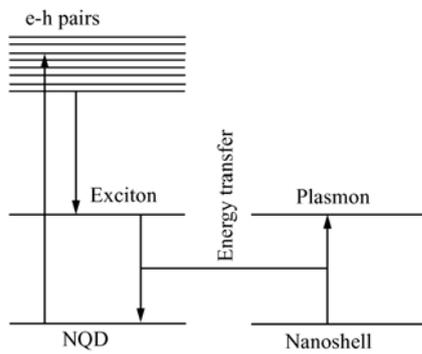


图 2 表面等离子体激元纳米激光器中的能级与跃迁^[31]

Fig. 2 Energy levels and transition process of a surface plasmon polariton nano-laser

3 表面等离子体激元纳米激光器

3.1 纳米粒子表面等离子体激元激光器

该类器件利用了表面等离子体激元受激辐射放大机制 (Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation), 最初由美国佐治亚州立大学的 Mark Stockman^[19] 在理论上提出并于 2009 年被诺福克州立大学 M. A. Noginov 利用实验成功验证^[44]。其基本模型是由金属纳米球提供表面等离子体激元, 在金属纳米球周围或者表面分布有增益介质^[45-46]。实验中, 当外来电磁场激发表面等离子体激元并在金属表面产生共振时^[47], 由于共振增强效应和小尺寸效应, 使得局域近场增强了 6 倍, 所获得的增益完全弥补了金属的吸收损耗^[48-49]。该实验使用的是金属核心外包染料分子的结构, 通过化学自组装的方法合成, 其中金属核直径为 14 nm (见图 3a, b), 整个纳米球尺寸为 44 nm。实验验证了表面等离子体激元模式耦合成为光子模式的受激辐射, 其激射波长为 531 nm。图 3(c) 给出了在不同泵浦能量下纳米粒子表面等离子体激元激光器样本的受激辐射光谱。当泵浦能量较低时, 原子跃迁的能量几乎没有传递给表面等离子体激元, 因此发光很弱。当泵浦能量提高到阈值以上时, 主要是表面等离子体激元振荡引起的激射发光。

3.2 纳米线表面等离子体激元激光器

此类激光器增益介质是纳米线, 纳米线产生

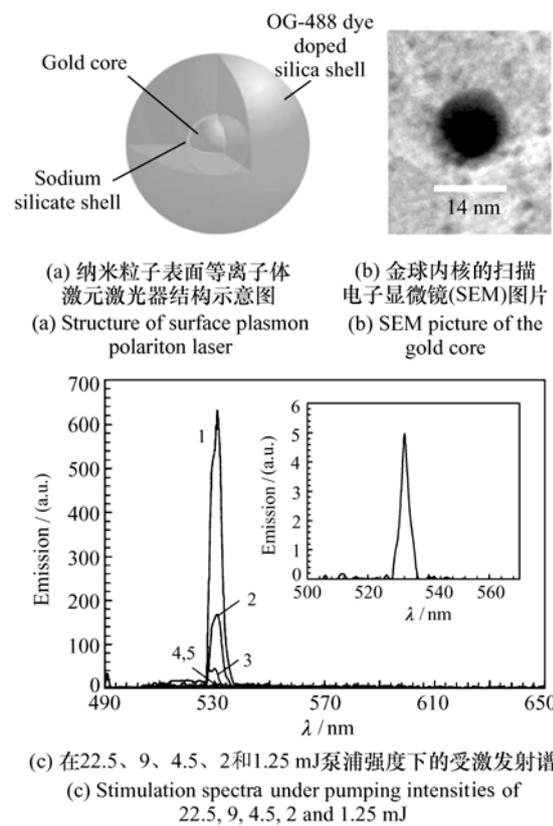


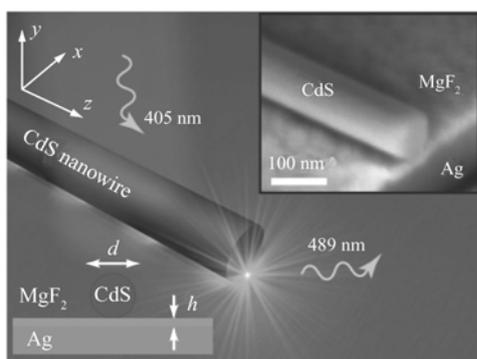
图 3 纳米粒子表面等离子体激元激光器

Fig. 3 Nanoparticle surface plasmon polariton laser

的光子与金属层耦合形成表面等离子体激元, 该激元沿纳米线方向传播, 在纳米线两端反射形成的 F-P 腔内传输振荡, 被增益介质放大并实现激射。

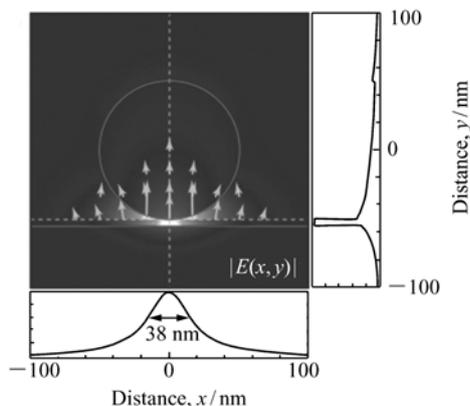
美国加州大学伯克利分校的张翔等人^[50-51] 于 2009 年报导了一种纳米线表面等离子体激元激光器, 其光学模式尺寸比衍射极限小近百倍, 被称为深亚波长表面等离子体激元激光器。该器件使用了一种混合型表面等离子体激元光波导, 如图 4 所示, 其组成自下而上可分为 3 个部分, 依次是一层金属银, 5 nm 的 MgF_2 间隙层和高增益 CdS 半导体纳米线, CdS 纳米线通过化学气相沉积和溶液旋涂等方法制备于 MgF_2 薄膜上。使用 405 nm 波长的激光器进行光泵浦, 激射波长为 489 nm。采用该结构实现了较强的模式限制, 激子自发辐射速率提高到原来的 6 倍, 自发辐射因子达到 0.8, 这使得阈值大幅降低, 几乎为零。

这类结构能够实现远程表面等离子体激元波传输, 原因在于实际传输的模式主要位于间隙层



(a) 纳米线表面等离子体激元激光器结构示意图^[50],内嵌图为SEM图片

(a) Structure of a nano-wire surface plasmon laser, inside figure is the SEM picture



(b) 表面等离子体激元模式受激发射电场的空间分布

(b) Electric field of stimulated surface plasmon polariton mode

图4 纳米线表面等离子体激元激光器

Fig.4 Nanowire surface plasmon polariton laser

形成的微腔中,这样金属中的能量损耗大大降低,再加上微腔增强效应使得表面等离子体激元波传播得更远^[52]。该器件制备难点在于如何实现纳米线和平板间隙层(MgF_2)间的良好接触。这要求极低的薄膜粗糙度($\approx 1 \text{ nm}$ 波长均方根)、低的纳米线表面粗糙度和准确的沉积厚度(厚度误差 $< 2 \text{ nm}$)。

该结构的出现将会在光电集成上带来巨大的潜在应用,因为该类激光的光场尺寸已经达到了微电子学中晶体管栅极的尺寸,使得光电子学和微电子学在可实现的尺度上达到一致。

3.3 圆柱形金属纳腔面发射纳米激光器

圆柱形金属纳腔面发射激光器是利用金属层包裹的纳米柱状体构成的谐振腔,增益介质位于纳米柱中。

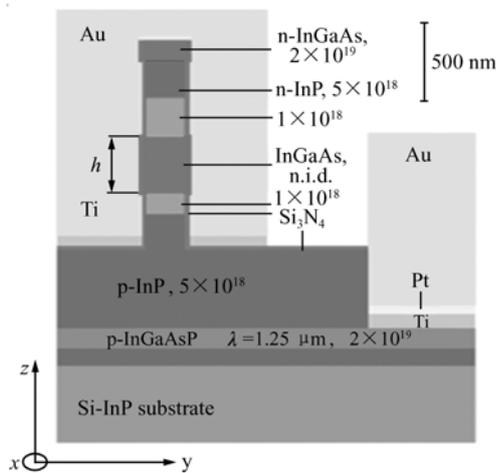
荷兰埃因霍芬理工大学的 M. T. Hill 等人于 2007 年报导了第一个圆柱形金属纳腔面发射纳米激光器^[53],其结构如图 5 所示,其中一个半导体圆柱被包裹在 Si_3N_4 绝缘层和金属腔中。增益介质为 InGaAs/InP 双异质结构,位于圆柱体的中间,上下为掺杂的低折射率 InP 波导层。光子在金属腔内震荡,被顶面的金属反射镜反射,在底面出光。由于微腔增强效应,器件的自发辐射因子达到 0.46,光限制因子约为 0.2,器件阈值最低达 $3.5 \mu\text{A}$ (10 K)。出光波长为 1418 nm ,纳米柱直径约为 $(260 \pm 25) \text{ nm}$,高度 $h = 300 \text{ nm}$, Si_3N_4 厚度约为 25 nm 。器件的半导体纳米柱结构采用金属-化学气相沉积(MOCVD)方法生长,然后采用自上而下的电子束曝光和反应离子刻蚀工艺制备而成,随后通过等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)制备 Si_3N_4 绝缘层并生长金层。

美国加州大学圣地亚哥分校的 M. P. Nezhad 等人于 2010 年采用类似结构实现了圆柱形金属纳腔面发射激光器室温光泵浦工作^[54],其结构如图 6 所示,器件在三个维度上的尺寸都小于光在真空中的波长。与前者^[53]不同的是, M. P. Nezhad 等人所采用的结构中的纳米柱先完全由绝缘介质层(SiO_2)包覆,然后再包有一层 70 nm 厚的 Al ,增益介质为 $\text{InGaAsP}/\text{InP}$ 多量子阱。柱状有源区由电子束曝光和干法刻蚀制成,直径在 $420 \sim 490 \text{ nm}$,绝缘介质为 200 nm 厚的 SiO_2 。整个样品在生长完铝金属层后,顶面用 SU-8 胶粘在玻璃上,再用选择性 HCl 溶液去掉柱状体底部的 InP 衬底,使有源区底部暴露在空气,用于直接光泵浦。纳腔 Q 值为 1030,阈值泵浦功率密度为 $700 \text{ W}/\text{mm}^2$,出光波长为 1430 nm ,阈值增益约为 130 cm^{-1} 。

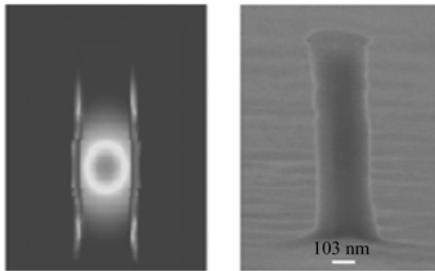
3.4 金属-介质-金属结构纳米激光器

金属-介质-金属(MIM)结构的特点是利用表面等离子体激元只能在金属表面传播的横波特性和,使得两层金属表面等离子体激元耦合在一起,在中间的介质层中传播,从而构造深亚波长光波导结构。

金属-介质-金属结构已经被用来实现多种表面等离子体激元发光器件^[55-56]。对于远红外波段,这个技术已经被成功应用于制作微腔激光器



(a) 低温电泵圆柱形金属纳米腔纳米激光器结构示意图
(a) Low temperature electric pumped metal cavity nano-pillar



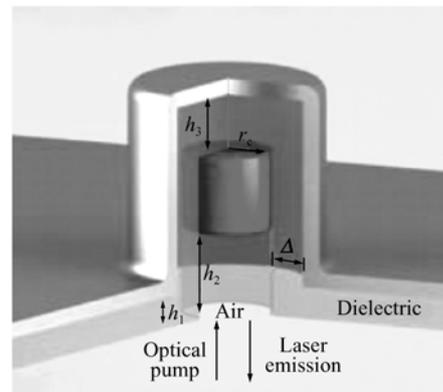
(b) 器件中光场强度分布 (c) 所制作的纳米柱的SEM图
(b) Electric field in the cavity (c) SEM picture of the element

图5 低温电泵圆柱形金属纳米腔纳米激光器

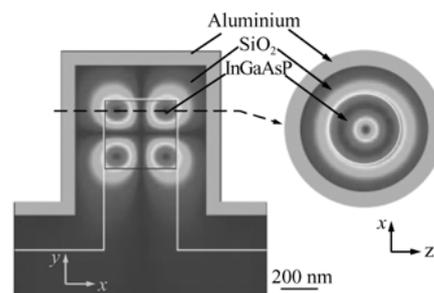
Fig.5 Low temperature electrical pumped metal cavity nano laser

件^[57]。

2009年荷兰埃因霍芬理工大学 M. T. Hill 等^[58]人采用金属-绝缘体-金属结构实现电泵浦表面等离子体激元激光器,该器件结构如图7(a)所示。器件的半导体脊状波导由电子束曝光和干法刻蚀等工艺制备而成,上表面有电流注入窗口,侧面为绝缘介质 Si_3N_4 ,厚度为 20 nm。器件外包覆金属银。增益介质为 InGaAs/InP 双异质结。侧壁的银层和光子相互作用,形成表面等离子体激元,沿着银侧壁在介质和半导体内传播,被一端的银反射镜反射,在另一端的端面实现边发射出光,图中的 $h = 300$ nm,半导体脊宽从 90 ~ 350 nm 不等。其中一个典型尺寸是 $d = 130$ nm (± 20 nm),腔长为 $3 \mu\text{m}$ 的器件,其阈值只有 $40 \mu\text{A}$,78 K 时 Q 值达到 370,在 $180 \mu\text{A}$ 的工作电流下激光光谱的半高宽为 0.7 nm;另外一个典型尺寸是 $d = 310$ nm,



(a) 器件的结构示意图
(a) Structure of the nano-laser



(b) 图中是 TE_{012} 电场模式 $|E|$ 的轴向剖面图。在这个激光器中, h_1 , h_2 和 h_3 分别为 200, 550 和 250 nm, 器件总的半径为 460 nm
(b) Simulation results of the electric field $|E|$ of TE_{012} mode at the cross section. In the nano-laser, h_1 , h_2 and h_3 are 200, 550 and 250 nm correspondingly. Total radius reaches 460 nm

图6 室温光泵圆柱形金属纳米腔纳米激光器

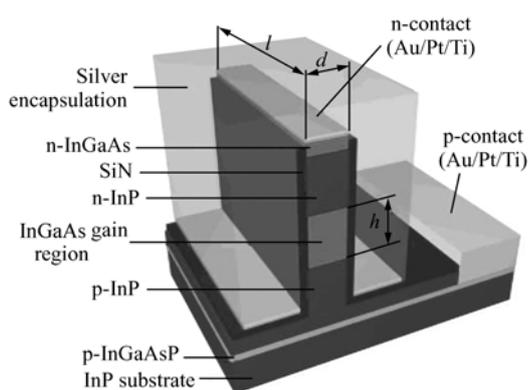
Fig.6 Room-temperature metal cavity nano-pillar laser

工作于室温(298 K),阈值约为 6 mA, TM 模 Q 值达到 340,激光光谱的半高宽是 0.5 nm,在这个宽度下已经能够支持一个室温激射的 TE 模式,其 Q 值达到 320。实验测量在电注入下工作,脉冲宽度为 28 ns,重复频率为 1 MHz。

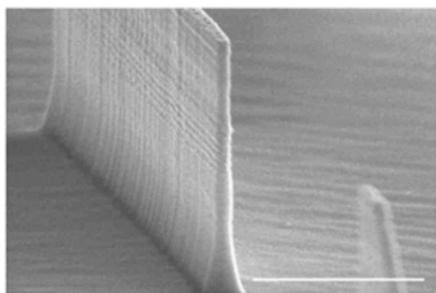
3.5 基于 Whisper-Gallery 效应的纳米激光器

Whisper-Gallery(W-G)效应常常被应用于光子晶体微腔^[59]和圆盘形微腔激光器^[60],近年来这一效应也用来配合金属提供的表面等离子体激元,制作纳米尺度的激光器件。

2011年加州大学伯克利分校张翔等人^[61]首次在实验上证明了基于 W-G 效应,可在室温下实现半导体表面等离子体激元激光,该器件可将光在垂直方向尺度压缩到波长的 1/20。其结构如图 8 所示,在一个 45 nm 厚的 CdS 纳米正方形上



(a) InP基金属-介质-金属脊型纳米激光器结构示意图
(a) Structure of InP substrated metal-insulator-metal ridge-like nano-laser



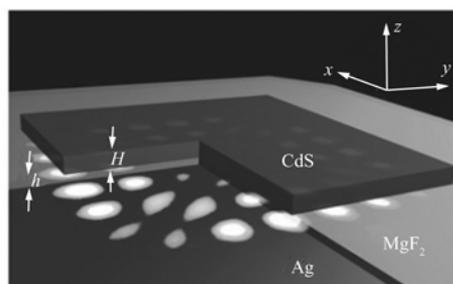
(b) 器件核心区的SEM图像, 图中比例尺是1 μm^[57]
(b) SEM picture of the semiconductor core, the scalar bar in the picture is 1 μm

图 7 金属-介质-金属结构纳米激光器

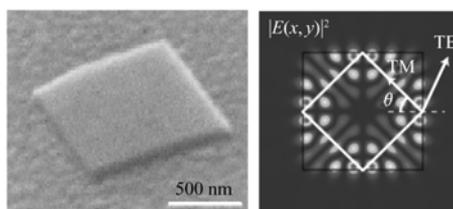
Fig. 7 Metal-dielectric-metal form nano laser

盖有 5 nm 厚的 MgF_2 , 其上面生长有银层。图 8 (a) 给出了室温表面等离子体激元激光的示意图以及 SEM 图(图 8 (b))。 MgF_2 层既可以减少金属的损耗又可以提供超过衍射极限的模式限制 (CdS 与 MgF_2 之间的折射率差使得该结构可以将光学模式主要限制在 MgF_2 层中, 这就提供了良好的模式限制); 同时, 由于将电场从金属表面耦合到 MgF_2 层中, 从而大大降低了金属的吸收损耗。这种耦合非常强, 使得正方形 CdS 腔中光学模式的动量大幅增加(即有效折射率大幅增加), 从而使 TM 模式可以得到充足内部反射。正方形的边长为 1 μm, 对于波长分别为 495.5 和 508.4 nm 的激光来说, Q 值分别为 97 和 38, 损耗较大, 阈值泵浦光功率密度为 3 074 MW/cm²。

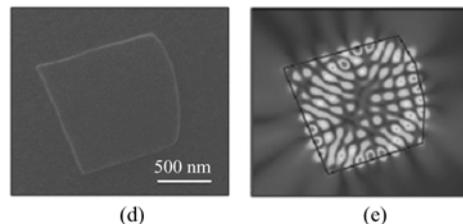
正方形结构的缺点较明显, 因为对称性高, 因而模式数量比较多, 故有多个激光峰。为此研究人员设计了如图 8 (d) 所示的非规则图形, 该图形



(a) 基于W-G效应的室温表面等离子体激元激光器原理示意图
(a) Room temperature surface plasmon polariton laser based on W-G effect



(b) 厚45 nm, 宽1 μm的CdS正方形表面等离子体激元激光器的SEM照片
(c) 正方形结构中TM模式电场强度分布
(b) SEM picture of the surface plasmon polariton laser, thickness 45 nm, width 11 μm
(c) Electric field of TM mode in the square



(d) 非对称结构的表面等离子体激元激光器SEM图
(e)非对称结构激光模式的电场分布模拟图
(d) SEM picture of the anti-symmetric surface plasmon polariton laser
(e) Simulation results of the electric field for the lasing mode in the anti-symmetric surface plasmon polariton laser

图 8 基于 W-G 效应的室温表面等离子体激元激光器

Fig. 8 Room temperature surface plasmon polariton laser based on W-G effect

只有一个光学模式, 因此有很好的模式特性, 表面等离子体激元纳米激光器损耗达到 6 323 cm⁻¹, 泵浦功率密度为 1 459 MW/cm²。

这种 W-G 效应的表面等离子体激元纳米激光器的制备方法是, 先使用化学气相沉积的方法制备 CdS 纳米带, 然后利用溶液基质的超声波清洗 CdS 纳米带, 接着沉积 5 nm 厚的 MgF_2 , 300 nm 厚的银。实验用一个钛蓝宝石激光器泵浦, 波长

为 405 nm, 重复频率为 10 kHz, 脉冲宽度为 100 fs, 用一个 20 倍的物镜把泵浦光源聚焦为直径只有 5 μm 的光斑。整个实验均在室温下操作。

4 现存问题

(1) 高损耗问题

由于引入了损耗很大的金属来提供表面等离子体激元, 因此必须考虑高损耗对光子激射的影响。金属引起的表面等离子体激元损耗主要机制是自由电子散射和短波长光子吸收。短波长光子吸收可以通过选择工作波长来避免, 然而对于自由电子散射, 即便可以通过改进加工工艺等方法减小, 却不可能根除。另外, 金属的粗糙表面、沟槽和褶皱还会导致表面等离子体激元的损耗由二维面损耗变为三维体损耗, 从而使得损耗大大增加。这种金属引入的损耗很大程度上限制了表面等离子体激元的应用^[5,62]。通常来说, 表面等离子体激元被限制的分布空间越小, 其金属损耗越高。为了降低损耗, 通常使用相对介电常数虚部较小的金属, 例如银、金等, 而且, 在低温下可以有效降低金属的电子散射损耗。文献[63-67]报导表明, 可以利用增益介质辅助的光波导来实现表面等离子体激元的长程传输和振荡, 增益介质的作用在于补偿金属损耗并增强光子激射。另外, 基于表面等离子体激元的激光器通常光限制因子(一般大于 20%)要远高于传统激光器(通常小于 5%), 因此可以提供更高的模式增益。

(2) 制备工艺问题

由于粗糙金属表面将会导致额外的表面等离

子体激元损耗, 因此通常要求表面平整度在几个纳米以下, 这就为制备工艺增加了难度。如何制备平整的表面用于传输表面等离子体激元是实验人员一直面临的技术难题。

(3) 电泵浦工作难题

由于表面等离子体激元激光器件体积小、损耗高, 难以在室温电泵浦下工作, 这些极大地限制了其实际应用, 因此在克服室温高损耗的基础上, 实现室温电泵浦工作一直是全世界科学家们的研究难点和热点。当然, 如何在小尺度上引入电极, 也是技术上的难点。

5 结束语

综上所述, 本文讨论了目前国际上现存的基于表面等离子体激元纳米激光器的工作原理和制作工艺, 并对其应用方向和现存问题进行了总结和归纳。基于表面等离子体激元的纳米激光器由于其广阔的应用前景, 目前是国际上的研究热点。可以预见, 在未来的几年中, 各种新结构的表面等离子体激元纳米激光器将会问世。尽管针对各个应用方向的不同, 工作条件与体积要求也不尽相同, 但是总体上必然会朝着更加小型化的方向前进。在此基础上, 如何做到尽量减小金属的损耗, 实现室温工作, 实现光子与电子技术在纳米尺度上的协同工作等问题将是纳米激光器进一步的研究重点。而如何将未来的表面等离子体激元纳米激光器具体应用于生物医疗、化学化工、纳米光刻加工工程、信息传输的光互连、数据存储等各个方面, 将是技术研究上的另一个热点和重点。

参考文献:

- [1] SCHAWLOW A L, TOWNES C H. Infrared and optical masers[J]. *Phy. Rev.*, 1958, 112:1940-1949.
- [2] WANG Z B, JOSEPH N, LI L, *et al.*. A review of optical near-fields in particle/tip-assisted laser nanofabrication[J]. *Mechanical Eng. Sci.*, 2010, 224:1113-1125.
- [3] GUO W, WANG Z B, LI L, *et al.*. Near-field laser parallel nanofabrication of arbitrary-shaped patterns[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90:243101.
- [4] SCHULLER J A, BARNARD E S, CAI W SH, *et al.*. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation[J]. *Nature Mater.*, 2010, 9:193-204.
- [5] BARNARD D K, BOZHEVOLNYI S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4:83-91.
- [6] ANKER J N, HALL W P, LYANDRES O, *et al.*. Biosensing with plasmonic nanosensors[J]. *Nature Mater.*, 2008, 7:

442-453.

- [7] DIONNE J A, DIEST K, SWEATLOCK L A, *et al.*. A metal-oxide-Si field effect plasmonic modulator[J]. *Nano Lett.*, 2009, 9:897-902.
- [8] ZIJLSTRA P, CHON J W M, GU M. Five-dimensional optical recording mediated by surface plasmons in gold nanorods[J]. *Nature*, 2009, 459:410-413.
- [9] CHALLENGER W A, PENG CH B, ITAGI A V, *et al.*. Heat-assisted magnetic recording by a near-field transducer with efficient optical energy transfer[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3:220-224.
- [10] 雷建国, 刘天航, 林景全, 等. 表面等离子体激光的若干新应用[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(5):432-439.
LEI J G, LIU T H, LIN J Q, *et al.*. New applications of surface plasmon polaritons[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3(5):432-439. (in Chinese)
- [11] LIU JUAN, WANG Y T, XU L W, *et al.*. Contribution of surface plasmon polaritons to extraordinary optical transmission through metallic nanoslit[J]. *Chinese J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, 3(1):33-37.
- [12] STIPE B C, STRAND T C, POON C C, *et al.*. Magnetic recording at 1:5 Pb m-2 using an integrated plasmonic antenna[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4:484-488.
- [13] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W S. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424:824-830.
- [14] BOZHEVOLNYI S I, VOLKOV V S, DEVAUX E, *et al.*. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators[J]. *Nature*, 2006, 440:508-511.
- [15] 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.
- [16] LIEBERG B, Nylander C, NYLANDER M I. Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing[J]. *Sensors and Actuators*, 1983, 4:299-304.
- [17] ATWATER A H. The promise of plasmonics[J]. *Sci. Am.*, 2007, 296(4):56-63.
- [18] PAN L, PARK Y, XIONG Y, *et al.*. Maskless plasmonic lithography at 22 nm resolution[J]. *Scientific Reports*, 2011, 1:175
- [19] BERGMAN D J, STOCKMAN M I. Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation: quantum generation of coherent surface plasmons in nanosystems[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90:027402
- [20] MAISER S A. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*[M]. Berlin: Springer-verlag, 2006.
- [21] BRONGERSMA M L, KIK P G. *Surface Plasmon Nanophotonics*[M]. Berlin: Springer-verlag, 2007.
- [22] RAETHER H. *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings*[M]. Berlin: Springer-verlag, 1988.
- [23] 顾本源. 表面等离子体激元亚波长光学原理和新型效应[J]. 物理, 2007, 36(4):280-287.
GU B Y. Surface plasmon subwavelength optics: principles and novel effects[J]. *Physics*, 2007, 36(4):280-287. (in Chinese)
- [24] OULTON R F, PILE D F P, LIU Y, *et al.*. Scattering of surface plasmon polaritons at abrupt surface interfaces: implications for nanoscale cavities[J]. *Phys. Rev. B*, 2007, 76:035408.
- [25] OZBAY E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[J]. *Science*, 2006, 311:189-193.
- [26] CONWAY J A, SAHNI S, SZKOPEK T. Plasmonic interconnects versus conventional interconnects: a comparison of latency, crosstalk and energy costs[J]. *Opt. Express*, 2007, 15(8):4474-4484.
- [27] JACOB Z, SHALAEV V M. Plasmonics goes quantum[J]. *Science*, 2011, 334:463-464.
- [28] KRASAVIN A V, ZAYATS A V. Silicon-based plasmonic waveguides[J]. *Opt. Express*, 2010, 18:11791-11799
- [29] CHANG S W, LIN T R, CHUANG S L. Theory of plasmonic fabry-perot nanolasers[J]. *Opt. Express*, 2010, 18(14):15039-15053.
- [30] CHANG S W, CHUANG S L. Fundamental formulation for plasmonic nanolasers[J]. *IEEE J. Quantum Elect.*, 2009, 45(8):1014-1023.
- [31] STOCKMAN M I. Spasers explained[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2:327-329.
- [32] FORD G W, WEBER W H. Electromagnetic interactions of molecules with metal surfaces[J]. *Physics Reports (Review*

- Section for Physics Letters*), 1984, 113(4):195-287.
- [33] LEON I D, BERINI P. Amplification of long-range surface plasmons by a dipolar gain medium[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4:382-387.
- [34] ZHELUDEV N I, PROSVIRNIN S L, PAPASIMAKIS N, *et al.*. Lasing spaser[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2:351-354.
- [35] ZHANG S, GENOV D A, WANG Y, *et al.*. Plasmon-induced transparency in metamaterials[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 101:047401.
- [36] LIU M Z, LEE T W, GRAY S K, *et al.*. Excitation of dark plasmons in metal nanoparticles by a localized emitter[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102:107401.
- [37] KOH A L, BAO K, KHAN I, *et al.*. Electron energy-loss spectroscopy (EELS) of surface plasmons in single silver nanoparticles and dimers; influence of beam damage and mapping of dark modes[J]. *ACS Nano*, 2009, 3:3015-3022.
- [38] CHU M W, MYROSHNYCHENKO V, CHEN C H, *et al.*. Probing bright and dark surface-plasmon modes in individual and coupled noble metal nanoparticles using an electron beam[J]. *Nano Lett.*, 2009, 9(1):399-404.
- [39] KLIMOV V, GUO G Y. Bright and dark plasmon modes in three nanocylinder cluster[J]. *J. Phys. Chem. C*, 2010, 114(51):22398-22405.
- [40] DONG Z G, LIU H, LI T, *et al.*. Plasmonically induced transparent magnetic resonance in a metallic metamaterial composed of asymmetric double bars[J]. *Opt. Express*, 2010, 18:18229-18234.
- [41] BIRIS C G, PANOIU N C. Excitation of dark plasmonic cavity modes via nonlinearly induced dipoles; applications to near-infrared plasmonic sensing[J]. *Nanotechnology*, 2011, 22:235502.
- [42] FEDOTOV V A, ROSE M, PROSVIRNIN S L, *et al.*. Sharp trapped-mode resonances in planar metamaterials with a broken structural symmetry[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 99:147401.
- [43] 杨欢, 李飞, 罗先刚, 等. 基于复合纳米结构的局域表面等离子体光学传感器[J]. *光学与光电技术*, 2010, 8(2):80-83.
- YANG H, LI F, LUO X G, *et al.*. Localized surface plasmonic biosensor based on composite nanostructures[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2010, 8(2):80-83. (in Chinese)
- [44] NOGINOV M A, ZHU G, BELGRAVE A M, *et al.*. Demonstration of a spaser-based nanolaser[J]. *Nature*, 2009, 460:1110-1112.
- [45] LAWANDY N M. Localized surface plasmon singularities in amplifying media[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85:5040.
- [46] LAWANDY N M. Interactions of charged particles on surfaces[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95:234101.
- [47] GHANNAM T. Dipole nano-laser: the effect of an external electric field[J]. *J. Phys. B:At. Mol. Opt. Phys.*, 2010, 43:155505-155510.
- [48] NOGINOV M A, ZHU G, BAHOURA M, *et al.*. Enhancement of surface plasmons in an Ag aggregate by optical gain in a dielectric medium[J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31:3022-3024.
- [49] NOGINOV M A, ZHU G, BAHOURA M, *et al.*. The effect of gain and absorption on surface plasmons in metal nanoparticles[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, 86:455-460.
- [50] OULTON R F, SORGER V J, ZENTGRAF T, *et al.*. Plasmon lasers at deep subwavelength scale[J]. *Nature*, 2009, 461:629-632.
- [51] OULTON R F, SORGER V J, GENOV D A, *et al.*. A hybrid plasmonic waveguide for sub-wavelength confinement and long-range propagation[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2:495-500.
- [52] LIN ZH. Modal properties of hybrid plasmonic waveguides for nanolaser applications[J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2010, 22(8):535-537.
- [53] HILL M T, OEI Y S, SMALBRUGGE B, *et al.*. Lasing in metallic-coated nanocavities[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1:589-594.
- [54] NEZHAD M P, SIMIC A, BONDAENKO O, *et al.*. Room-temperature subwavelength metallo-dielectric lasers[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4:395-399.
- [55] KOLLER D M, HOHENAU A, DITLBACHER H, *et al.*. Organic plasmon-emitting diode[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2:

- 684-687.
- [56] WALTERS R J, LOON R V A VAN, BRUNETS I, *et al.*. A silicon-based electrical source of surface plasmon polaritons [J]. *Nature Mater*, 2009, 9: 21-25.
- [57] WALTHER C, SCALARI G, AMANTI M I, *et al.*. Microcavity laser oscillating in a circuit-based resonator [J]. *Science*, 2010, 327(5972): 1495-1497.
- [58] HILL M T, MARELL M, LEONG E S P, *et al.*. Lasing in metal-insulator-metal sub-wavelength plasmonic waveguides [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(13): 11107-11112.
- [59] AKAHANE Y, ASANO T, SONG B S, *et al.*. High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal [J]. *Nature*, 2003, 425: 994.
- [60] SANVITTO D, DARAEI A, TAHRAOUI A, *et al.*. Observation of ultrahigh quality factor in a semiconductor microcavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86: 191109.
- [61] MA R M, RUPERT F, OULTON R F, *et al.*. Room-temperature sub-diffraction-limited plasmon laser by total internal reflection [J]. *Nature Materials*, 2010, 10: 110-113.
- [62] ARAKAWA E T, WILLIAMS M W, HAMM R N, *et al.*. Effect of damping on surface plasmon dispersion [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1973, 3: 1127-1129.
- [63] OKAMOTO T, H'DHILI F, KAWATA S. Towards plasmonic band gap laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 85: 3968.
- [64] WINTER G, WEDGE S, BARNES W L. Can lasing at visible wavelengths be achieved using the low-loss long-range surface plasmon-polariton mode? [J]. *New J. Phys.*, 2006, 8: 125.
- [65] ALAM M Z, MEIER J, AITCHISON J S, *et al.*. Gain assisted surface plasmon polariton in quantum wells structures [J]. *Opt. Express*, 2007, 15: 176-182.
- [66] de LEON I, BERINI P P. Theory of surface plasmon-polariton amplification in planar structures incorporating dipolar gain media [J]. *Phys. Rev. B*, 2008, 78: 161401.
- [67] GENOV D A, AMBATI M, ZHANG X. Plasmonic band gaps of structured metallic thin films evaluated for a surface plasmon laser using the coupled-wave approach [J]. *Phys. Rev. B*, 2008, 77: 115425.

作者简介:陈泳屹(1986—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事纳米光学与表面等离子体激光器等方面的研究。

E-mail: cyy2283@126.com

张金龙(1975—),男,吉林市人,副研究员,主要从事光电器件研制与开发等方面的研究。

E-mail: pled3588@yahoo.com.cn