

纳米等离子体激光器研究进展

赵 青*, 黄小平, 林 恩, 焦 蛟, 梁高峰, 陈 涛

电子科技大学物理电子学院, 成都 610054

摘要: 半导体激光器在生物技术、信息存储、光子医学诊疗等方面得到了广泛应用。随着纳米技术和纳米光子学的发展, 紧凑微型化激光器应用前景引人关注。当激光器谐振腔尺寸减小到发射波长时, 电磁谐振腔中将产生更为有趣的物理效应。因此, 在发展低维、低泵浦阈值的超快相干光源, 以及纳米光电集成和等离激元光路时, 减小半导体激光器的三维尺寸至关重要。在本综述中, 首先介绍了纳米等离子体激光器中的谐振腔模式增益和限制因子的总体理论, 并综述了金属-绝缘材料-半导体纳米(MIS)结构或其它相关金属覆盖半导体结构的纳米等离子体激光器各方面的总体研究进展。特别地, 对基于 MIS 结构的等离子体谐振腔实现纳米等离子体激光器三维衍射极限的突破, 进行了详细的介绍。本文也介绍并展望了纳米等离子体激光器的技术挑战和发展趋势, 为纳米激光器进一步研究提供参考。

关键词: 等离子体激光器; 表面等离子体激元; 微纳加工

中图分类号: TN248

文献标志码: A

Advances of plasmonic nanolasers

Qing Zhao*, Xiaoping Huang, En Lin, Jiao Jiao, Gaofeng Liang and Tao Chen

School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China

Abstract: Semiconductor lasers are widely used for applications in biology, information storage, photonics and medical therapeutics. With the development of the emerging area of nano-optics and nanophotonics, more compact lasers attract significant interest. As the cavity size is reduced with respect to the emission wavelength, interesting physical effects in electromagnetic cavities arise. To scale down the semiconductor lasers in all three dimensions plays an important role in the development of low-dimension, low-threshold, and ultrafast coherent light sources, as well as integrated nano-optoelectronic and plasmonic circuits. In this review, the overall formalism of mode gain and confinement factor in the metal–semiconductor plasmonic lasers was introduced firstly. In addition, an updated overview of the latest developments, particularly in plasmonic nanolasers using the metal-insulator-semiconductor (MIS) configuration and another related metal-cladded semiconductor microlasers was presented. In particular, it has been experimentally demonstrated that the use of plasmonic cavities based on MIS nanostructures can indeed break the diffraction limit in three dimensions. We also present some perspectives on the challenges and development trend for the plasmonic nanolasers. This review can provide useful guide for the research of plasmonic nanolasers.

Keywords: plasmonic nanolaser; surface plasmon; micro/nanofabrication

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.02.002

Citation: Opto-Elec Eng, 2017, 44(2): 140–151

1 引言

自从上世纪 60 年代激光器发明以来, 激光器和人

收稿日期: 2016-11-18; 收到修改稿日期: 2017-01-05

*E-mail: zhaoq@uestc.edu.cn

类的其它发明一样, 对人类的各个方面都产生了巨大影响。20 世纪 90 年代起, 纳米技术迅速发展, 对信息、材料等领域产生了深远的影响。激光被美国军方视为自从原子弹出现以来, 兵器领域的最大突破, 有望实现历史上人们憧憬的导引能量束装置。而把纳米

技术与激光充分结合起来，最具有代表性的事件是，2001 年加州大学伯克利分校的一个小组展示了第一台半导体纳米线激光器^[1]。2009 年，加州大学伯克利分校的另外的一个小组发现了等离子体纳米激光器最吸引人的性质——利用表面等离子体的聚焦和局域场增强效应^[2]可以形成自由空间中的光波所不具有的功能。

纳米等离子体激光器利用纳米线实现工作物质和谐振腔的集成^[3]，而表面等离子体可以突破光学衍射极限^[4]，因此纳米等离子体激光器具有体积小、单色性、方向性好、工作效率高、能量阈值低、响应时间短的优点。这种超小型的激光器在一系列领域中有着非常广阔的应用前景。如应用与电路可以自动的调控开关；在化学和生物医学工程中可作为生物传感器、显微术、化学物质鉴别等；应用到芯片上可提高计算机磁盘信息存储量。然而，目前纳米等离子体激光器还存在着许多基本原理及关键技术方面的问题亟待解决。

过去数十年以来，研究人员不断努力探索光子器件的微型化技术，以期获得更小半导体芯片上更高密

度的器件集成。为了实现此目的，近年来发展了包括等离子体激光器在内的纳米激光器。纳米等离子体激光器，通常利用金属薄膜或者纳米颗粒产生表面等离子体^[5]，实现谐振腔内光能局域到亚波长尺度^[6-7]。纳米等离子体激光器的独特性能使得其在集成光学中的片内或者片间数据传输和超快数字信息处理方面具有重要应用^[8-9]。

2 纳米等离子体激光器基本原理

2.1 纳米等离子体激光器谐振腔原理

纳米等离子体激光器就是利用亚波长纳米结构增益介质与谐振腔集成器件，通过电、光泵浦实现激光发射并通过表面等离子体实现光场调控的纳米激光器^[10-13]。如图 1 所示，纳米等离子体激光器利用纳米线实现工作物质和谐振腔的集成^[14-15]，载流子在半导体纳米结构激活区复合产生激子发射，再经过振荡放大，实现激光输出；谐振腔表面-介质-金属膜处激发表面等离子体激元进一步调控压缩谐振腔内模场分布，可突破光学衍射极限激光模式调控，因此纳米等离子体激光器具备易于集成实现微型化的可能。

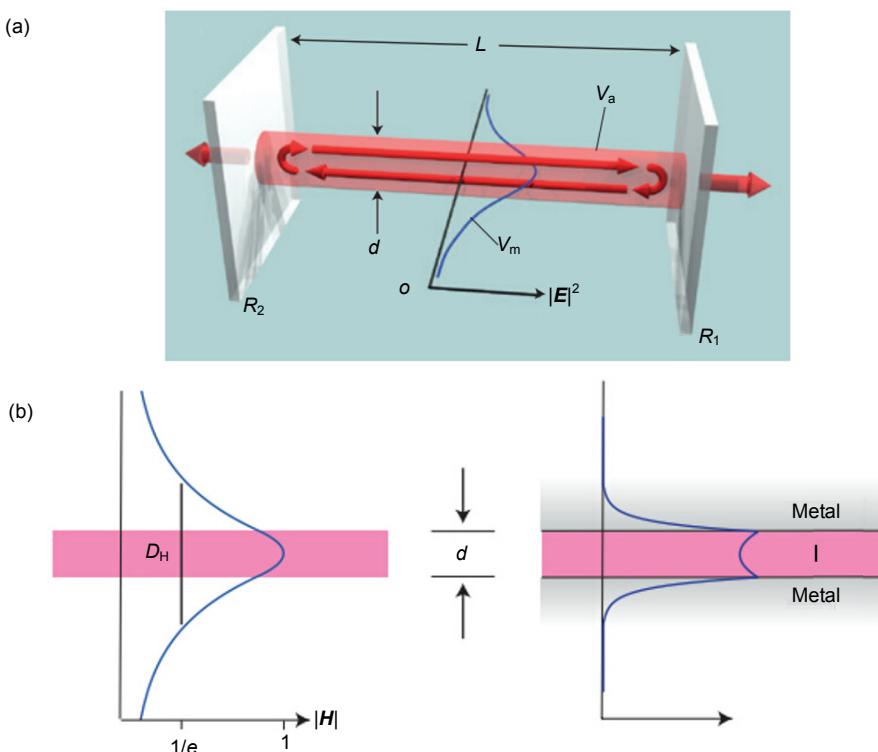


图 1 纳米线谐振腔工作原理。(a) 纳米 Fabry - Pérot 谐振腔工作原理示意图。(b) 纳米线介质波导激光器和纳米线腔-金属壳等离子体激光器模式分布结构原理图^[14]。

Fig. 1 The working principle of the nanowire cavity. (a) The diagram of the Fabry-Pérot nanocavity. (b) The distributions of the modes in nanowire dielectric waveguide laser and nanowire-metal coated cavity plasmonic laser^[14].

2.2 半导体芯-金属壳谐振腔的模式增益

在纳米结构增益介质谐振腔的表面镀金属薄膜^[16-18], 则纳米线增益介质内光子在纳米线增益介质和金属介质复合薄膜层交界面激发产生表面等离子体^[19-21]; 表面等离子体模场作用于纳米结构增益介质谐振腔内的光场模式, 起到约束、调控、耦合、增强光场模式的效果^[22-23]。

为了更好地理解金属-半导体结构的激光器^[24-25], 必须更仔细检验有关模式增益的问题。当前有关芯-壳结构的讨论中所示, 芯-壳结构的模式增益可远大于芯中的材料增益。显然, 对于波导的横截面包含介电质和金属的不同区域, 例如芯-壳结构, 或金属-半导体-金属(MSM)^[26-28]时, 必须对其光限制因子的概念进行重新定义。关键的一点是, 模式增益是一个给定的传播模式在新结构中所获得的增益。由于一般情况下, 模式的空间分布同时延伸到金属和半导体增益区中, 必须用与处理芯区模式增益相同的方法, 将金属损耗考虑进去。因此, 这种结构中的净模式增益是抵消了金属损耗所剩下的增益。

如果波的传播方向与波导的 z 方向相同, 但是波在横向(x, y)上受到波导限制^[29]。同时假设所有的准定态场的变量(E, D, B, H)可以分解为一个快变的指数部分和一个包括剩余与空间有关的缓变部分, 如下所示:

$$E = A(z)\bar{E}(x, y)e^{ik_z z - i\omega t} + c.c., \quad (1)$$

其中 $c.c$ 表示缓变部分, 通常可认为常数。那么在旋波近似下, 坡印廷矢量可以表示为

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} = |A(z)|^2 [\bar{\mathbf{E}} \times \bar{\mathbf{H}}^* + \bar{\mathbf{E}}^* \times \bar{\mathbf{H}}], \quad (2)$$

这里忽略了缓变包络函数中的时间依赖关系部分, 因为更让人关注的只是沿 z 方向的空间定态传播。当应用坡印廷定理时, 我们只关注与波导传播方向垂直的, 在 z 和 $z+\Delta z$ 处两个无限大平面所包围体积内的坡印廷矢量总通量。因为所包围体积沿横向是无限大的, 而在其它外方向没有通量。所以得到:

$$\frac{dI}{dz} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{I(z + \Delta z) - I(z)}{\Delta z} = -2|A|^2 \iint dxdy \sigma |\bar{\mathbf{E}}|^2, \quad (3)$$

这里, 可以将其写成简单的表达方式:

$$\frac{dI}{dz} = G_m I. \quad (4)$$

其中系数 G_m 是模式增益, 是描述模式功率的放大率。

2.3 纳米等离子体激光器的主要物理特征及技术特点

纳米等离子体激光器通过泵浦, 载流子在半导体

纳米结构激活区复合产生激子发射, 再经过振荡放大, 实现激光输出; 谐振腔表面-介质-金属膜处激发表面等离子体激元进一步调控谐振腔内模场分布, 实现超越光学衍射极限激光模式调控^[30]。纳米等离子体激光器的光束半径可小至 $\lambda/20$, 可大大增加光功率密度; 同时, 可增加光信息存储密度, 加快数据传输速率。

在纳米激光器等离子体调控发射原理与技术研究方面, 通过利用电流激发等离子体, 并依据增益介质波导内等离子体-光子相干耦合放大实现激光发射^[31], 进而利用等离子体调控光束模场面积和功率密度, 制备出具有重要应用前景的电泵浦等离子体纳米激光器^[32]。

其具体技术特点包括:

1) 表面等离子体光场调控突破光学衍射极限, 光束模式面积小于 $\lambda^2/400$, 远低于常规激光器模式面积(大于 λ^2)。

2) 器件整体体积小于 $0.056 \mu\text{m}^3$, 重量轻于 5 g, 远轻于常规最小二极管激光器;

3) 通过精确设计纳米尺度谐振腔, 考虑腔体的增益与损耗平衡, 实现超高 Q 值, 充分降低能量阈值。

亚波长纳米激光器的共性优点是, 相对传统激光器, 由于谐振腔为纳米结构, 通常 Q 值较高, 模式体积小, 泵浦阈值低; 另外, 等离子体模式可便于调控腔体光场模式, 响应速度相对较快, 且易于光电集成, 因此是现在纳米激光器的主要发展方向。其共性缺点是由于载流子复合产生激子发射容易受到外界干扰, 因此泵浦温度相对较低, 一般是液氮温度以下, 室温发射则单色性不是很好。而且谐振腔发射端面通常为纳米尺度, 数值孔径较低, 光束发散严重。单个器件输出功率较低, 需要功率合成。

3 纳米等离子体激光器的类别及发展历程

纳米等离子体激光器起源于纳米激光器, 纳米等离子体激光器主要包括纳米线阵列等离子体激光器、表面等离子体-光模混合纳米激光器以及金属介质腔体结构等离子体激光器几类。纳米等离子体激光器的典型代表以及激光器微纳技术应用发展现状如下。

3.1 表面等离子体-光模混合纳米激光器

2009 年, 张翔课题组对纳米线-表面等离子体杂化波导激光器中的亚波长模式压缩和长程传输进行了数

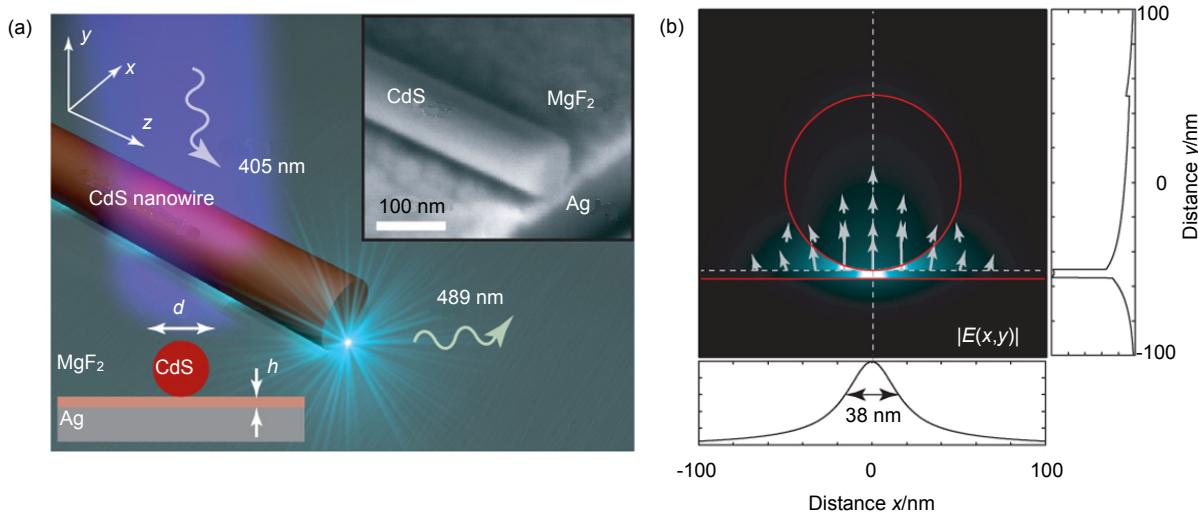


图 2 表面等离子体-光模混合纳米激光器. (a) 激光器原理图及微观结构的扫描电子显微镜照片. (b) 纳米线与金属膜之间模式分布^[33].

Fig. 2 Plasmonic-optical hybrid modes nanolaser. (a) Principle diagram and its scanning electron microscope (SEM) picture inserted. (b) Distribution of the mode between the nanowire and the metal layer^[33].

值仿真结果^[33], 得到了光学模式的亚波长尺度压缩限制和长程传输结果, 如图 2 所示, 表面等离子体-光模混合纳米激光器基于表面等离子体对光波导光场模式进行泵浦和调控从而实现激光发射^[34-35], 其优点是光束模式面积小于 $\lambda^2/400$, 可实现超衍射发射。其缺点是效率低, 且低温光泵浦小于 10 K, 泵浦光功率密度要求很高(约 100 MW/cm²)。

表面等离子体-光模混合纳米激光器工作原理主要是利用表面等离子体与光模杂化形成混合模式^[36], 从而实现模式压缩的目的。但是等离子体调控半导体微纳结构激光发射仍然存在增益阈值太高、量子效率低、发光效率低及光束质量调控困难等诸多问题, 这些问题的解决则取决于半导体激子与等离子体模式的共振耦合机制以及等离子体模式对谐振腔模式的能量限制调控机理等问题的最终解决。

3.2 金属纳米腔体半导体异质结等离子体激光器

单根纳米线形成的激光是目前最小的纳米激光器。如果继续减小纳米线的尺寸将会降低其导波性能, 从而会提高激光的阈值。这就会引出一个问题: 怎样改善尺寸更小的纳米线激光性能, 或着是其它半导体或介质增益结构的导波性能^[37]? 人们首先会想到金属镀膜具有潜在的可能性。因为在限制电磁波方面, 尤其是对表面等离子体激元^[38], 金属是最佳的选择。同时, 由于金属的传输损耗很大, 尤其是在表面等离子体激元附近, 其损耗达到最大值, 从而产生另一个问

题, 半导体芯区能否提供足够的增益从而可以补偿壳区中的金属损耗?

有研究人员提出一个简单的芯-壳二维结构, 对它的模拟计算回答了前面的问题^[39]。这个芯-壳结构的色散关系, 即传播波矢的实部随光子能量大小的变化关系如图 3 所示。图中的两条直线分别表示此结构在空气和均匀半导体中的色散关系, 它们一起构成纯介电材料的波导模式边界。由图 3 还可以看出, 金属镀膜的色散曲线在 $\text{Re}(k_z)$ 很小或者很大的时候都会延伸到两个介电边界以外, 与纯介电波导模式相比, 它的截止频率更低。这说明同一结构可以用来构成波长较长的器件, 而对同一给定的波长可以用来构成较小的器

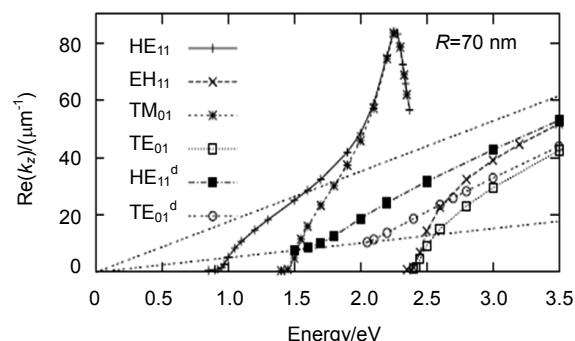


图 3 $R=70 \text{ nm}$ 的纯介质波导和银壳-半导体芯波导的色散关系^[39].

Fig. 3 The dispersion curves of the dielectric waveguide and Ag film coated-semiconductor waveguide with $R=70 \text{ nm}$ ^[39].

件。但是, 由于无法避免金属损耗, 其频率截止行为变得不够明显。在 $\text{Re}(k)$ 较大的部分, 色散曲线出现在均匀半导体情形下的细线以外且达到了极大值。这里的峰值就是熟知的等离子体共振峰。等离子体共振时, $\text{Re}(k)$ 达到了 $80 \mu\text{m}^{-1}$, 其等效共振波长约为 80 nm , 只有真空中波长的 $1/8$ 。这种等离子体共振耦合造成的波长压缩正是可见光可以在小至几个纳米的窄槽波导里传输的原因。

2007 年, Hill 等人设计并验证了电泵浦金属纳米腔体半导体异质结等离子体激光器件^[40-42], 其金膜包裹的半导体柱腔异质结激光器结构和三维方向的模场强度结果如图 4 所示。该类激光器优点是对称金属膜等离子体可以长程传输, 阈值低($\sim 6 \mu\text{A}$, 10 K), Q 值低, 响应速度快, 易于光电集成; 缺点是低温条件下($< 80 \text{ K}$)泵浦, 光束发散角较大。Hill 等人用直径约 250

nm 、高 $1 \mu\text{m}$ 、镀金膜的半导体纳米圆柱获得了可在低温下形成激射的纳米激光器。这是人们第一次实现对应波长电注入的金属镀膜激光器^[43], 也是当时尺寸最小的激光器。虽然该实验结果引人瞩目, 但是也留下不少问题。比如很关键的一点: 结构中的金属壳的作用是什么, 该器件的工作是否涉及到真正意义上的 SPP 激发。因为在这个波段范围, 其半导体介质对应的波长约为 400 nm 。结构中圆柱腔最低阶模式要求的直径约为 $(400/\pi) \text{ nm}$, 这个尺寸小于 Hill 等人所用的圆柱直径。所以, 即使是一个由理想金属(没有激发表面等离子体的情况下)所包围的半导体中, 同样可以有这样一个纯电介质材料的模式存在。

3.3 亚波长金属-介质-半导体等离子体激光器

2010 年, Nezhad 等设计了光泵浦亚波长金属-介质-半导体等离子体激光器件, 通过优化半导体-介质-

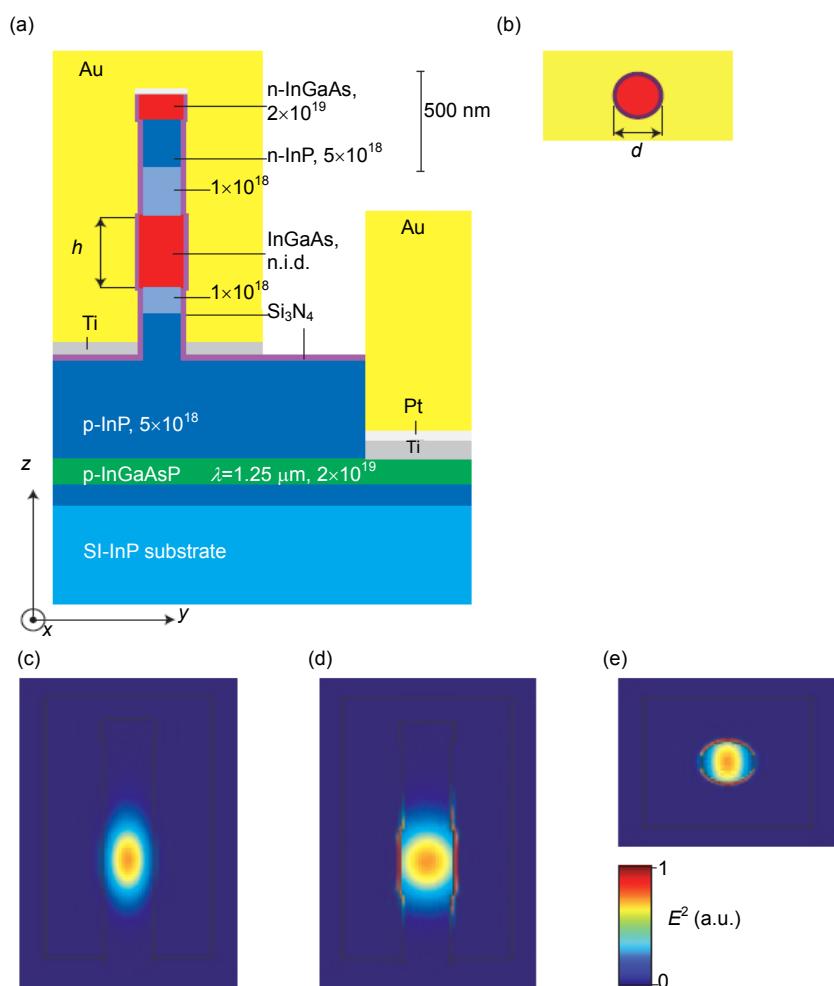


图 4 (a), (b) 金膜包裹的半导体柱腔异质结等离子体激光器件结构. (c)~(e) 模场强度的三维结构模拟^[42].

Fig. 4 (a), (b) Schematic of the metal coated semiconductor heterogeneous plasmonic laser. (c)~(e) The modes simulation with three-dimensional structure^[42].

金属腔体结构，可以减少模式损耗和模式耦合。该激光器工作原理图及其制备过程如图 5 所示。该类激光器优点是室温光泵浦，对称金属膜等离子体长程传输，阈值低，响应速度快， Q 值高(~ 1004)，缺点是不易于光电集成。

3.4 纳米线阵列等离子体激光器

电子科技大学开展了纳米等离子体激光器的设计，提出了一种新颖的基于半导体纳米线/空气间隙/金属薄膜复合结构的等离子体纳米激光器，并给出了

理论研究和仿真分析。这种结构利用金属界面的等离子体与高增益介质纳米线波导模式耦合，从而使场增强效应得到显著提高。同时通过数值仿真研究，得到该混合波导结构的模式特性和增益阈值随空气槽宽度、纳米线半径的变化规律，表明它可以实现对输出光场的深亚波长约束，同时保持低损耗传输和高场强限制能力。同时研究了 N 型掺杂的氧化锌纳米异质结光二极管阵列的光电特性^[44-45]。

电子科技大学设计并制作了纳米线阵列等离子体

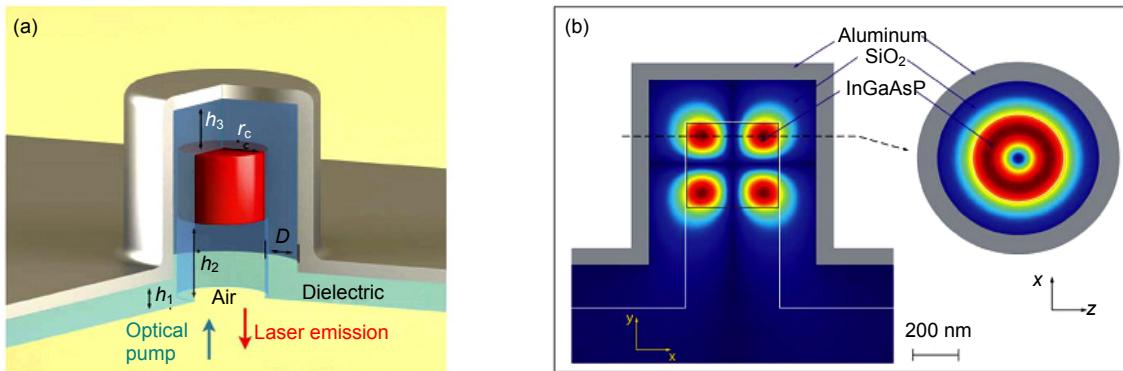


图 5 光泵浦亚波长金属-介质-半导体激光器原理图。(a) 结构图。(b) 模拟的模式分布^[24].

Fig. 5 Schematic of the light pumped metal-dielectric-metal subwavelength laser. (a) Diagram of the laser structure. (b) Numerical mode distribution^[24].

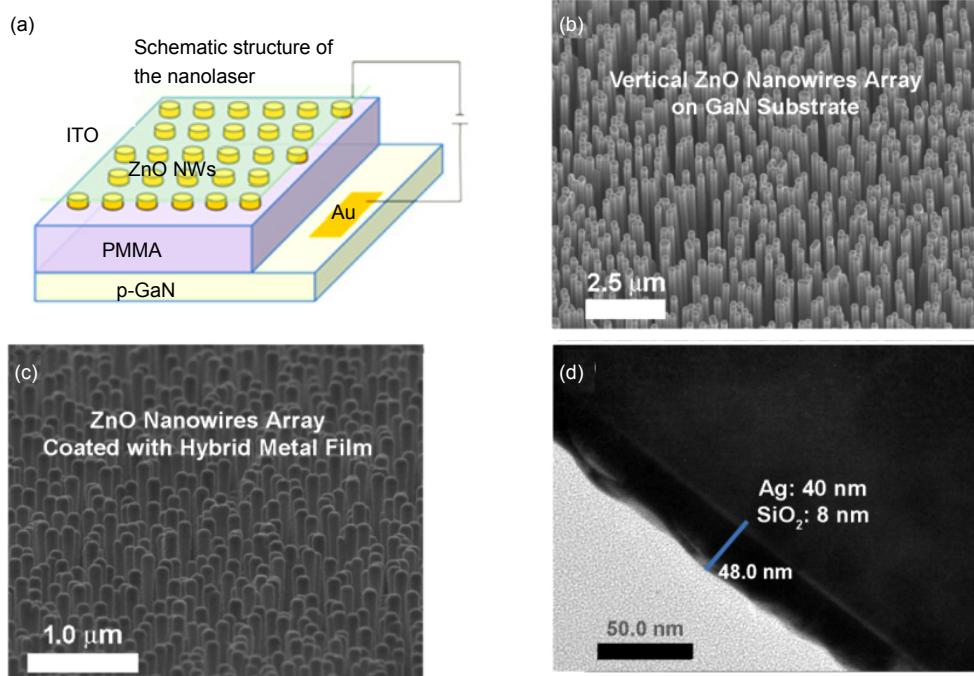


图 6 (a) 纳米线阵列等离子体激光器结构原理图。(b)~(d) 微结构图^[50].

Fig. 6 (a) Principle diagram of the arrayed nanowires plasmonic laser. (b)~(d) Its SEM pictures^[50].

激光器, 其结构原理图和微结构如图 6 所示, 主要是由半导体纳米线阵列与衬底构成 P-N 结阵列^[46-47], 纳米线兼具增益介质和谐振腔功能。通过测试激光器纳米线表面未镀膜和镀膜后的激光发射谱, 发现纳米线表面镀有金属-介质复合膜薄膜后, 谐振腔与复合膜界面产生的表面等离子体可对谐振腔模式产生影响^[48], 使激光光谱模式有了明显改善, 激光峰半高宽 0.6 nm, 光强有了明显增加。

关于表面等离子体对光波场的限制增强作用, 可以考察纳米激光器和纳米等离子体激光器的光泵浦激光发射谱。首先对未进行膜层包覆的半导体纳米激光

器进行光致发光光谱的测试, 结果如图 7(a1)~7(a4)所示, 然后对磁控溅射二氧化硅介质膜和金属银膜后的样品进行光致发光光谱的测试, 得到结果如图 7(b1)~7(b4)所示。两种器件样品分别进行了四组不同激发功率下的光致发光光谱测试, 从上往下泵浦光功率依次增加, 分别为 10 nW, 20 nW, 30 nW, 40 nW。从图中可以看出, 当泵浦光功率为 20 nW 时, 开始出现激光发射, 激射光波长集中在 380 nm~390 nm 之间; 泵浦光功率增加, 激射尖峰变强; 当角度为 0°时, 即光谱仪探测器正对纳米线时, 激光功率最强。

从图 7(b1)~7(b4)中可以看出, 当泵浦光功率为 20

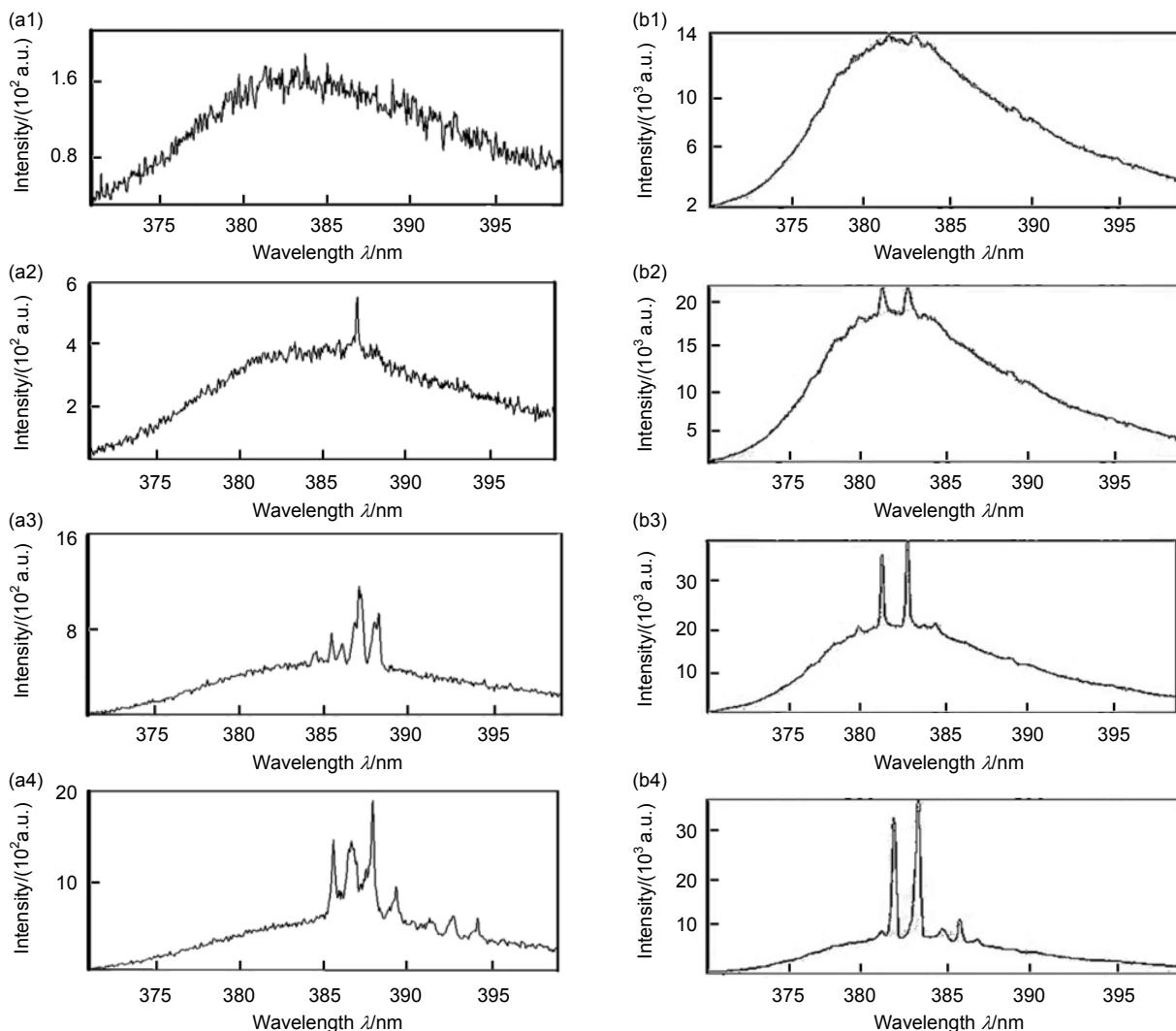


图 7 纳米等离子体激光器纳米线表面(a1)~(a4)未镀膜和(b1)~(b4)镀上金属-介质复合膜后的激光发射谱, $2 \text{ mW/cm}^2 \sim 10 \text{ mW/cm}^2$, 间隔 2.5 mW/cm^2 , 室温^[50]

Fig. 7 The emission spectra of the plasmonic nanolaser (a1)~(a4) with and (b1)~(b4) without metal-dielectric layers at room temperature. The pumping light intensity is from 2 mW/cm^2 to 10 mW/cm^2 with spacing of 2.5 mW/cm^2 ^[50].

nW时,两个发射光波长主峰位分别为382 nm和383.4 nm,在泵浦光功率为50 nW时,半高宽为0.4 nm和0.5 nm。且泵浦光能量越高,激光发射峰越明显。泵浦光源的激光光斑直径约为1 mm,计算可得该纳米等离子体激光器的阈值功率密度为2 W/cm²。该实验测试结果与理论值和模拟值很好地吻合,为以后研制出基于纳米线的纳米等离子体激光器,实现激光器的微型化奠定了基础。

为对比分析表面等离子体对纳米线谐振腔的作用,并得到纳米线内部的能量分布,建立如下模型,分别对单根氧化锌纳米线和氧化锌-二氧化硅-银结构进行仿真,如图8所示。

选用纳米线直径为100 nm,如图8(a)所示,图8(b)中纳米线尺寸不变,在纳米线外层包覆一层10 nm厚的二氧化硅薄膜层,再包覆一层50 nm银薄膜层。

对比两种结构的仿真结果可知,图8(a)中未包覆

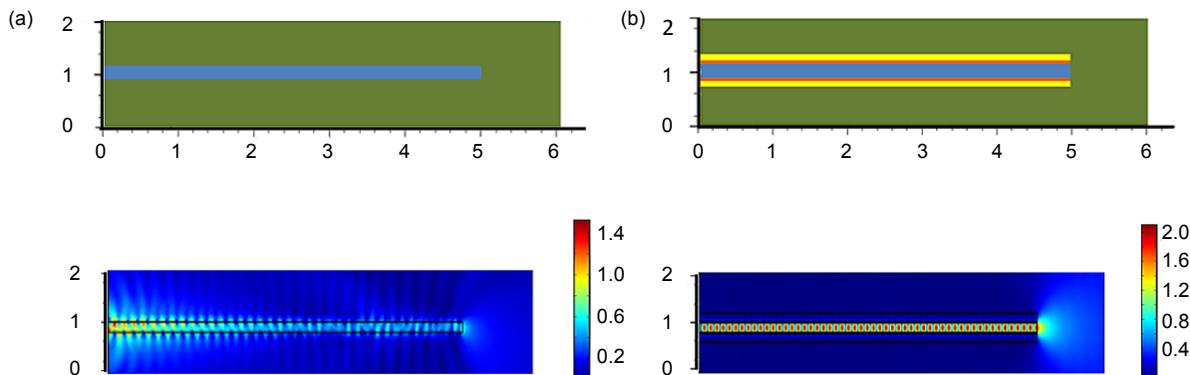


图8 纳米线谐振腔内场分布.(a) 单根氧化锌纳米线内场分布特性.(b) 氧化锌纳米线/二氧化硅/银结构内场分布特性^[50].

Fig. 8 The interior intensity distributions of the nanowire cavity. (a) Single ZnO nanowire; (b) Single ZnO nanowire with SiO₂ and Ag sandwiched structure^[50].

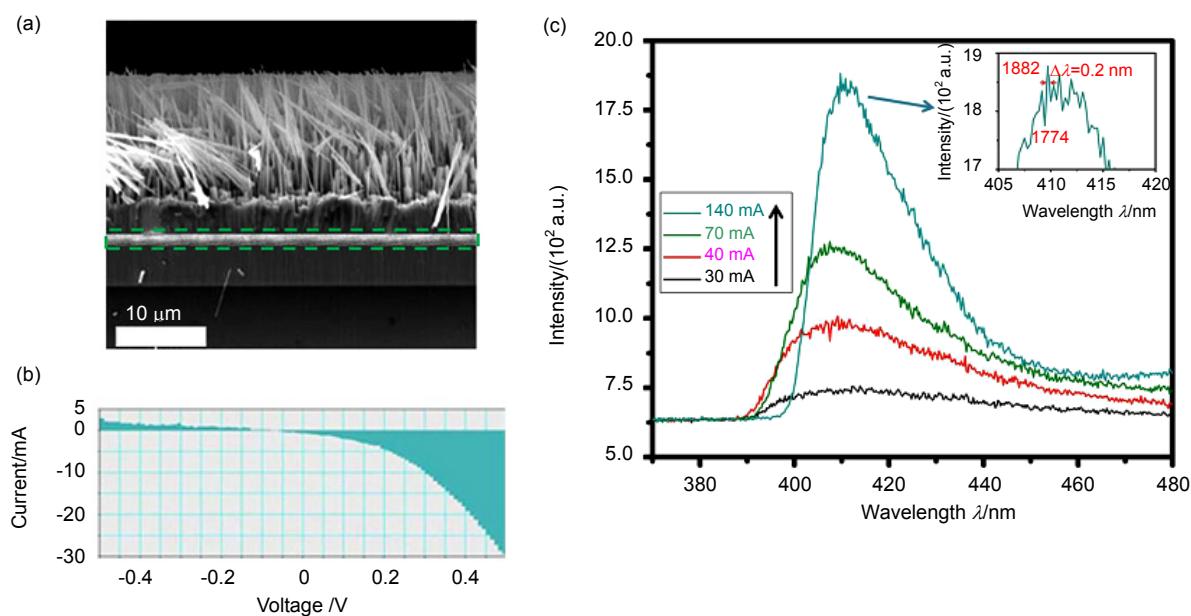


图9 半导体异质结激光器件的 (a) SEM 图片, (b) 泵浦电流和(c) 电致发光谱^[50].

Fig. 9 (a) SEM picture, (b) pumping current and (c) electroluminescence spectra of the semiconductor heterogeneous laser^[50].

二氧化硅薄膜层和金属银膜层的波导结构的光场模式较为发散，在波导侧壁上有很强的倏逝波，端面光场出射能量很弱；包覆二氧化硅薄膜层和金属银膜层的波导结构的光场模式较为集中，纵模为驻波场，且端面出射强度很高。因此证实镀覆二氧化硅薄膜层和银薄膜层后的结构对光波场具有明显的约束限制作用。

发光光谱测试结果显示发光光谱中出现了激光峰值，得到了较好的激光发射光谱，中心波长集中在 $380\text{ nm} \sim 400\text{ nm}$ 之间；激光峰半高宽约 0.6 nm ；研究并计算了样品光致发光谱的相干长度，相干长度为 0.3 mm 左右。分析激光器的性能，最重要的一个参数即为发光光谱，对半导体异质结纳米线阵列器件进行电泵浦发光光谱的测试，通上电流后，慢慢观察其发光过程，并记录下对应不同电流值时的电致发光光谱，结果如图9所示。

选取四张典型的光谱来进行电泵浦发光过程的光谱说明，泵浦电流分别为 25 mA 、 36 mA 、 52 mA 和 127 mA ，从图9可知，在泵浦电流小于 25 mA 时，只有中心约在 397 nm 处的自发辐射谱线存在。当电流超过 25 mA 时，光谱中出现尖峰，这说明此时纳米线中的增益已经大于损耗，泵浦功率足够使得光子在纳米

线谐振腔中起振。但由于每根纳米线之间有或多或少的差异，不管是在形貌上还是在掺杂浓度上，使得最后呈现的光谱为多根纳米线发射光叠加的效果，尖峰之间还没有很明显的分离。如果泵浦电流继续增加达到 36 mA ，线宽为 0.2 nm 的尖锐峰值开始出现，这些尖峰的中心波长均约在 398 nm 附近。随着电流的继续增加，更多的纳米线达到激射条件，使得更多的尖峰开始出现，这是由于纳米线之间的差异所造成的，开始时并不是所有的纳米线均达到了阈值条件。与此同时，电流的增加伴随而来的是激射尖峰的整体红移。这可能是由于电流的增加使得纳米线与衬底结间电阻发热造成的。

图10给出了半导体异质结纳米等离子体阵列激光器件的电致发光光斑图，可观察到该器件在暗室中发出的较强的紫外光。

根据微透镜聚焦准直特性，设计激光器透明电极、纳米结构阵列激光出射端面光束合成微透镜阵列结构及外壳等辅助功能结构^[49-50]。这些腔体及端面结构几何尺寸和物质参数，共同决定谐振腔腔体的品质因子。

根据微透镜结构图11，可推出式(5)~(7)：

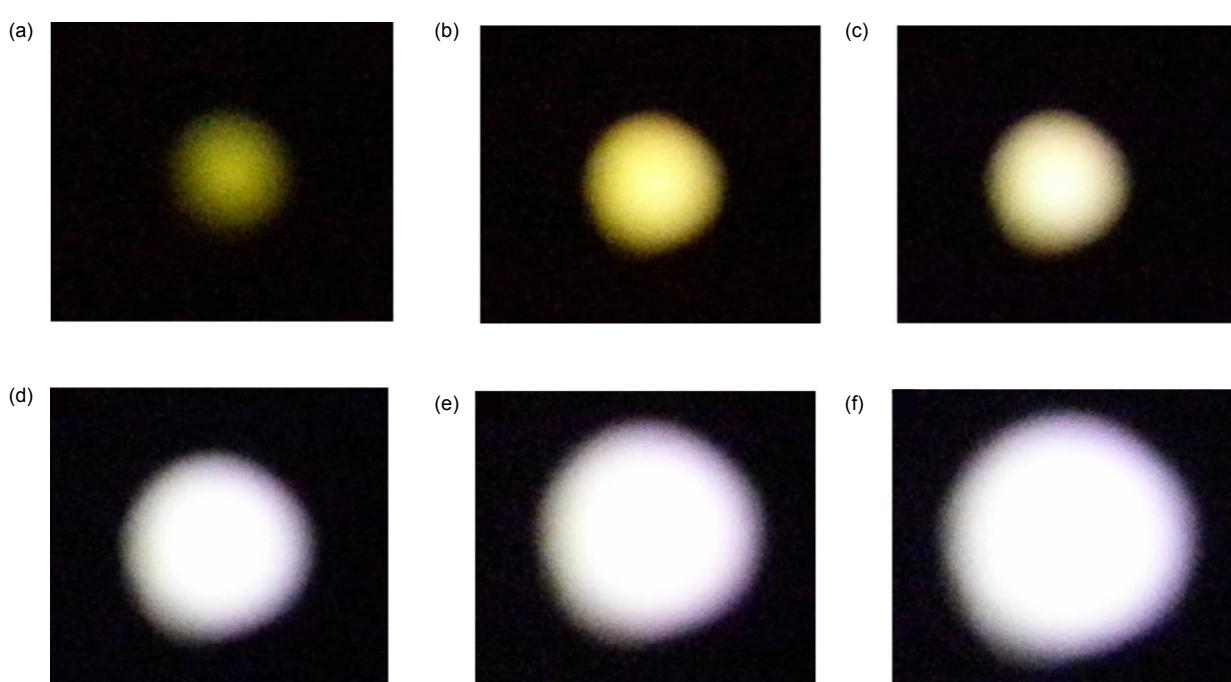


图10 半导体异质结纳米等离子体阵列激光器件的电致发光光斑图。所用电流分别为(a) 25 mA , (b) 30 mA , (c) 50 mA , (d) 80 mA , (e) 100 mA 和(f) 120 mA .

Fig. 10 Electroluminescence spots of the semiconductor heterogeneous laser. The pumping electric current is (a) 25 mA , (b) 30 mA , (c) 50 mA , (d) 80 mA , (e) 100 mA , and (f) 120 mA .

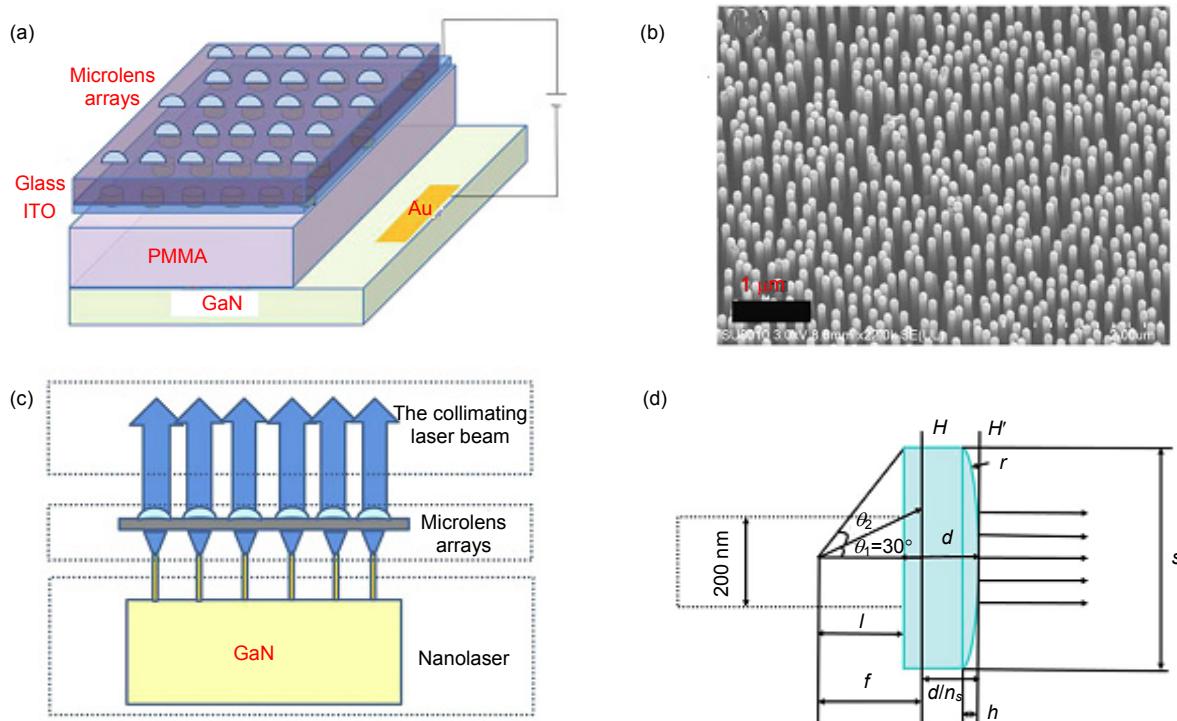
图 11 (a) 聚焦准直微透镜结构图. (b) 纳米线 SEM 图片. (c), (d) 工作原理图^[49].

Fig. 11 (a) The schematic of the focusing collimated microlens. (b) SEM picture of the nanowires. (c),(d) its working principle diagram^[49].

表 1 纳米等离子体激光器参数比较.

Table 1 Comparison of the parameters of the plasmonic lasers.

类别	泵浦条件及阈值	带宽/nm	单模宽度/nm	功率	激光发光机制
氧化锌纳米线激光器 (加州大学伯克利)	室温, Nd:YAG 脉冲激光, 266 nm, 3 ns 脉宽, 阈值 40 kW/cm ²	370~400	0.3	无数据	激子复合发光
亚波长金属-介质-半 导体激光器 (加州大学圣地亚哥)	室温, Nd:YAG 脉冲激光, 1064 nm, 12 ns 脉宽, 阈值 700 W/mm ²	~1430	0.9	无数据	电子-空穴等 离子体激发
硫化镉纳米线激光- 等离子体混合泵浦 (加州大学伯克利)	温度小于 10 K, 脉冲激光, $\lambda_{\text{pump}}=405 \text{ nm}$, 重复频率 80 MHz, 脉宽 100 fs, 阈值 80 MW/cm ²	480~500	0.5	10 nW	激子自发辐射 限制增强效应
金属纳米腔体半导 体 异质结激光器 (埃因霍芬理工大学, 荷兰)	10~77 K, 直流电源泵浦; 阈值: 6 μA (10 K 时)	1435~1450	0.3	无数据	电子-空穴等 离子体激发
纳米线阵列等离子 体 激光器 (电子科技大学)	室温, 直流电源或脉冲激光源, 阈值: 30 mA 或 2 mW/cm ²	380~420	0.6	~500 μW	电子-空穴等 离子体激发

$$r = \frac{1}{2h} \left(\frac{s^2}{4} + h^2 \right), \quad (5)$$

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{s}{2r}\right), \quad (6)$$

$$h = r(1 - \cos \theta_c). \quad (7)$$

进而, 根据纳米等离子体激光器实际结构, 考虑微透镜的聚焦和准直性能要求, 设计微透镜阵列的几何参数。其中 r 、 s 及 h 分别为透镜曲率半径、直径和高度。通过调整 h 、 s 参数获得需要的微透镜尺寸及焦距, 以实现对光束的准直。

另外, 电子科技大学提出了一种基于等离子体的相干电磁辐射的新型辐射源^[51]。浙江大学的童利民课题组采用半导体纳米线和氧化硅微纳光纤环形谐振腔复合结构激光器^[52], 充分利用了半导体纳米线的高增益和光纤环的优良谐振特性, 实现光的高效输入输出耦合, 但其集成性还需要考虑。综上所述, 得到目前国内外纳米等离子体激光器的参数特点如表 1 所示。

目前, 等离子体纳米激光器的基本原理、制备工艺、泵浦发光测试以及散热等方面国际上还存在许多问题, 亟待解决。发展面临的技术瓶颈主要表现在:

- 1) 室温模式调控选择, 改善单色性;
- 2) 数值孔径小, 远场发射角较大;
- 3) 输出功率较低;
- 4) 发光效率低及光束质量调控困难;
- 5) 片内集成工艺难。

4 结论与展望

随着对纳米等离子体激光器的新型化、小型化的要求, 综合纳米等离子体激光器的发展概况^[53], 可以看出纳米等离子体激光器的发展趋势主要表现在:

- 1) 泵浦方式方面, 从光泵浦向电泵浦发展;
- 2) 谐振腔的激活介质, 从结构简单的单一纳米线发展为复杂的纳米线阵列结构, 或者量子点;
- 3) 谐振腔类型方面, 从纳米线到金属腔再到金属介质外壳与纳米结构增益介质混合形式;
- 4) 工作温度方面, 从 300 K 提高到 1000 K, 并朝着更高的温度发展;
- 5) 存在形式方面, 从独立单体结构发展到集成阵列形式。

随着纳米加工技术和表征技术的进步, 我们认为接下来需要对纳米等离子体激光器进一步优化设计, 优化加工工艺, 完善激光泵浦发射特性参数测试关键

技术, 优化器件性能, 为光学、生物、医学等相关领域的应用提供性能可靠的激光源, 为相关信息技术的集成化发展提供技术支撑。

基金项目

国家 863 计划资助项目(2015AA8095044A)。

致 谢

感谢东南大学徐庆余教授为本工作提供技术支持, 感谢电子科技大学的黄洪和刘友亮在仿真和实验工作中的讨论。

参考文献

- 1 Maier S A. Plasmonics: fundamentals and applications[M]. New York: Springer, 2007.
- 2 Samuel I D W, Turnbull G A. Organic semiconductor lasers[J]. *Chemical Reviews*, 2007, **107**(4): 1272–1295.
- 3 张立德, 卞季美. 纳米材料和纳米结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 51–67.
- 4 Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(2): 83–91.
- 5 Zijlstra P, Chon J W M, Gu M. Five-dimensional optical recording mediated by surface plasmons in gold nanorods[J]. *Nature*, 2009, **459**(7245): 410–413.
- 6 Oulton R F, Sorger V J, Zentgraf T, et al. Plasmon lasers at deep subwavelength scale[J]. *Nature*, 2009, **461**(7264): 629–632.
- 7 Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824–830.
- 8 Zhao Qing, Liang Gaofeng, Wang Changtao, et al. High resolution photolithography with sub-wavelength grating[J]. *Applied Physics A*, 2014, **115**(1): 69–73.
- 9 Liang Gaofeng, Zhao Qing, Wang Changtao. Super-resolution imaging photolithography with subwavelength grating[C]. Proceedings of Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics, 2013.
- 10 Huang M H, Mao S, Feick H, et al. Room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers[J]. *Science*, 2001, **292**(5523): 1897–1899.
- 11 Chang S W, Chuang S L. Fundamental formulation for plasmonic nanolasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, **45**(8): 1014–1023.
- 12 Zia R, Selker M D, Catrysse P B, et al. Geometries and materials for subwavelength surface plasmon modes[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2004, **21**(12): 2442–2446.
- 13 Ding K, Hill M T, Liu Z C, et al. Record performance of electrical injection sub-wavelength metallic-cavity semiconductor lasers at room temperature[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(4): 4728–4733.
- 14 Duan X F, Huang Y, Agarwal R, et al. Single-nanowire electrically driven lasers[J]. *Nature*, 2003, **421**(6920): 241–245.
- 15 Zhou W, Dridi M, Suh J Y, et al. Lasing action in strongly coupled plasmonic nanocavity arrays[J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, **8**(7): 506–511.
- 16 Yu K, Lakhani A, Wu M C. Subwavelength metal-optic semiconductor nanopatch lasers[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(9): 8790–8799.
- 17 Lu C Y, Chang S W, Chuang S L, et al. Low thermal impedance of substrate-free metal cavity surface-emitting microlasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(15): 1031–1033.

- 18 Hill M T, Oei Y S, Smalbrugge B, et al. Lasing in metallic-coated nanocavities[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(10): 589–594.
- 19 Bian Y S, Zheng Z, Liu Y, et al. Hybrid wedge plasmon polariton waveguide with good fabrication-error-tolerance for ultra-deep-subwavelength mode confinement[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(23): 22417–22422.
- 20 Bian Yusheng, Zheng Zheng, Liu Ya, et al. Coplanar plasmonic nanolasers based on edge-coupled hybrid plasmonic waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(13): 884–886.
- 21 Lu C Y, Chang S W, Chuang S L, et al. Metal-cavity surface-emitting microlaser at room temperature[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(25): 251101.
- 22 Dong L F, Jiao J, Tuggle D W, et al. ZnO nanowires formed on tungsten substrates and their electron field emission properties[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(7): 1096–1098.
- 23 Yu W D, Li X M, Gao X D. Self-catalytic synthesis and photoluminescence of ZnO nanostructures on ZnO nanocrystal substrates[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(14): 2658–2660.
- 24 Nezhad M P, Simic A, Bondarenko O, et al. Room-temperature subwavelength metallo-dielectric lasers[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(6): 395–399.
- 25 Ding K, Ning C Z. Metallic subwavelength-cavity semiconductor nanolasers[J]. *Light: Science & Applications*, 2012, **1**(7): e20.
- 26 Hill M T, Marell M, Leong E S P, et al. Lasing in metal-insulator-metal sub-wavelength plasmonic waveguides[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(13): 11107–11112.
- 27 Hill M T. Metal-insulator-metal waveguides with self aligned and electrically contacted thin semiconductor cores exhibiting high optical confinement and low loss[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(15): 2540–2549.
- 28 Li D B, Ning C Z. Giant modal gain, amplified surface Plasmon-polariton propagation, and slowing down of energy velocity in a metal-semiconductor-metal structure[J]. *Physical Review B*, 2009, **80**(15): 153304.
- 29 Li Feng, Feng Yingxia. Research on propagation properties surface plasmons slow light waveguide[J]. *Information Technology*, 2013(5): 87–90.
李峰, 冯英霞. 表面等离子体慢光波导传输特性分析[J]. 信息技术, 2013(5): 87–90.
- 30 Khurjin J B, Sun G. Injection pumped single mode surface plasmon generators: threshold, linewidth, and coherence[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(14): 15309–15325.
- 31 Peng Xiaoyan, Yang Boqian, Chu Jin, et al. Effects of nitrogen pressure during pulsed laser deposition on morphology and optical properties of N-doped ZnO nanostructures[J]. *Surface Science*, 2013, **609**: 48–52.
- 32 Gwo S, Shih C K. Semiconductor plasmonic nanolasers: current status and perspectives[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, **79**(8): 086501.
- 33 Ning Cunzheng. Semiconductor nanolasers[J]. *Progress in Physics*, 2011, **31**(3): 145–160.
宁存政. 半导体纳米激光[J]. 物理学进展, 2011, **31**(3): 145–160.
- 34 Raether H. Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings[M]. New York: Springer-Verlag, 1988: 8.
- 35 Lee J H, Khajavikhan M, Simic A, et al. Electrically pumped sub-wavelength metallo-dielectric pedestal pillar lasers[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(22): 21524–21531.
- 36 吕宏博. 表面等离子体波导在低阈值纳米激光器中的应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- 37 Lü Hongbo. Hybrid Plasmonic waveguides for low threshold nanolasers[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- 38 Saxena D, Mokkapati S, Jagadish C. Semiconductor nanolasers [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, **4**(2): 582–585.
- 39 Liu Jing, Liu Juan, Wang Yongtian, et al. Resonant properties of sub-wavelength metallic gratings[J]. *Chinese Optics and Applied Optics Abstracts*, 2011, **4**(4): 363–368.
刘镜, 刘娟, 王涌天, 等. 亚波长金属光栅的表面等离子体激光共振特性[J]. 中国光学, 2011, **4**(4): 363–368.
- 40 Maslov A V, Ning C Z. Size reduction of a semiconductor nanowire laser by using metal coating[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6468**: 64680I.
- 41 Chu Sheng, Wang Guoping, Zhou Weihang, et al. Electrically pumped waveguide lasing from ZnO nanowires[J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, **6**(8): 506–510.
- 42 Milnes A G, Feucht D L. Heterojunctions and Metal-semiconductor Junctions[M]. New York: Academic Press, 1972.
- 43 Ma Xiangyang, Pan Jingwei, Chen Peiliang, et al. Room temperature electrically pumped ultraviolet random lasing from ZnO nanorod arrays on Si[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(16): 14426–14433.
- 44 Lu Y J, Kim J, Chen H Y, et al. Plasmonic nanolaser using epitaxially grown silver film[J]. *Science*, 2012, **337**(6093): 450–453.
- 45 Zhang Ye, Jia Hongbo, Wang Rongming, et al. Low-temperature growth and Raman scattering study of vertically aligned ZnO nanowires on Si substrate[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**(22): 4631–4633.
- 46 Gargas D J, Moore M C, Ni A, et al. Whispering gallery mode lasing from zinc oxide hexagonal nanodisks[J]. *ACS Nano*, 2010, **4**(6): 3270–3276.
- 47 Hwang D K, Kang S H, Lim J H, et al. p-ZnO/n-GaN heterostructure ZnO light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **86**(22): 222101.
- 48 Huang Hong, Zhao Qing, Hong Kunquan, et al. Optical and electrical properties of N-doped ZnO heterojunction photodiode[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2014, **57**: 113–117.
黄洪, 赵青, 焦蛟, 等. 深亚波长约束的表面等离子体纳米激光器研究[J]. 物理学报, 2013, **62**(13): 135201.
- 49 Huang Xiaoping, Wang Peng, Lin En, et al. Fabrication of the glass microlens arrays and the collimating property on nanolaser[J]. *Applied Physics A*, 2016, **122**(7): 649.
- 50 Huang Xiaoping, Liu Youliang, Wang Peng, et al. Optically pumped lasing and electroluminescence in ZnO/GaN nanoheterojunction array devices[J]. *Applied Physics A*, 2015, **121**(3): 1203–1209.
- 51 Liu Shenggang, Zhang Ping, Liu Weihao, et al. Surface polariton Cherenkov light radiation source [J]. *Physical Review Letters*, 2012, **109**(15): 153902.
- 52 杨青, 丁晔, 戴威, 等. 半导体纳米线和氧化硅微光纤环型结复合结构激光器[J]. 激光与光电子进展, 2010, **47**(3): 03SC08.
- 53 Wang De, Li Xueqian. New progress in semiconductor lasers and their applications[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(3): 279–283.
王德, 李学千. 半导体激光器的最新进展及其应用现状[J]. 光学精密工程, 2001, **9**(3): 279–283.