



## 微纳光纤镀铂金膜锁模光纤激光器\*

张澍霖, 朱国利, 董光焰

(中国电子科技集团公司第二十七研究所 激光雷达与大功率应用技术重点实验室, 郑州 450047)

**摘 要:** 采用有限元法仿真了微纳光纤中模式在镀膜前后的能量、电场及有效折射率变化, 分析了  $HE_{11}$ 、 $TE_{01}$ 、 $HE_{21}$  和  $TM_{01}$  模式在微纳光纤中的传输特性以及与铂金膜的相互作用原理。采用缓冲氧化物刻蚀液制作了微纳光纤并用离子溅射法镀铂金膜, 得到直径为  $13.2\ \mu\text{m}$ 、铂金膜厚度为  $40\ \text{nm}$  的微纳光纤器件, 测试了其可饱和吸收特性, 调制深度和饱和强度分别为  $0.57\%$  和  $0.8\ \text{MW}/\text{cm}^2$ 。制作了全光纤锁模激光器, 锁模阈值为  $180\ \text{mW}$ 。锁模脉冲重复频率为  $17.93\ \text{MHz}$ , 脉冲宽度为  $103\ \text{ps}$ , 中心波长为  $1031.6\ \text{nm}$ , 半高宽约为  $3.5\ \text{nm}$ 。

**关键词:** 光纤激光器; 锁模; 可饱和吸收体; 微纳光纤; 铂金膜

中图分类号: O432.1\*2

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220263

## All-fiber mode-locked laser using platinum film-coated microfiber

Zhang Shulin, Zhu Guoli, Dong Guangyan

(The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

**Abstract:** In this paper, the finite element method is used to simulate the energy, electric field and effective refractive index changes of the modes in the microfiber before and after coating. The transmission characteristics of  $HE_{11}$ ,  $TE_{01}$ ,  $HE_{21}$  and  $TM_{01}$  modes in the microfiber and the interaction principle with the platinum film are analyzed. The microfiber was fabricated by etching the optical fiber with buffer oxide etchant, and the platinum film was coated by ion sputtering to obtain a microfiber device with a diameter of  $13.2\ \mu\text{m}$  and a platinum film thickness of  $40\ \text{nm}$ . Its saturable absorption properties were tested, the modulation depth and saturation intensity were  $0.57\%$  and  $0.8\ \text{MW}/\text{cm}^2$ , respectively. An all-fiber mode-locked laser was fabricated, its mode-locked threshold is  $180\ \text{mW}$ . The mode-locked pulse repetition rate is  $17.93\ \text{MHz}$ , the pulse width is  $103\ \text{ps}$ , the center wavelength is  $1031.6\ \text{nm}$ , and the full width at half maximum is  $3.5\ \text{nm}$ .

**Key words:** fiber laser, mode lock, saturable absorber, microfiber, platinum film-coated

光纤激光器具有结构紧凑、成本较低且稳定性高等特点, 广泛应用于军事、工业、科研和医疗等领域。被动锁模技术是一种有效的产生 ps 脉冲的方法, 在材料加工<sup>[1-2]</sup>、生物成像<sup>[3-4]</sup>和光学计量<sup>[5-6]</sup>等领域应用日益广泛。光纤激光锁模的方法主要有三种, 分别是可饱和吸收体、非线性偏振旋转技术和非线性环形镜技术, 其中, 可饱和吸收体产生的锁模脉冲具有启动容易、运转稳定、脉冲参数丰富等特点。

半导体可饱和吸收镜 (SESAMs) 自从 1991 年首次被研究人员发现以来, 迅速成为产生锁模脉冲的成熟技术。近年来, 除了 SESAMs, 二维材料如石墨烯<sup>[7]</sup>、过渡金属硫化物<sup>[8]</sup>、过渡金属氧化物<sup>[9]</sup>、拓扑绝缘体<sup>[10]</sup>和黑磷<sup>[11]</sup>也引起了研究人员的兴趣。二维材料可以集成到多种微纳光纤上用于被动锁模光纤激光器, 如 D 形光纤、锥形光纤、光子晶体光纤等<sup>[7]</sup>, 然而这些材料易氧化, 通常需要做密封处理。另一种产生锁模脉冲的途径是基于金属可饱和吸收体的表面等离子体效应, 如铂碳<sup>[12]</sup>、银或金纳米颗粒<sup>[13-14]</sup>、金纳米棒<sup>[15-16]</sup>、铂金纳米颗粒等。其中铂金纳米颗粒同时具有饱和吸收和反饱和吸收特性<sup>[17]</sup>, 已经应用于 Q 开关<sup>[18]</sup>和锁模激光器<sup>[19]</sup>。但是以上这些金属纳米颗粒的尺寸难以控制, 从而导致光谱吸收峰的位置有差异。在本文中, 将单模光纤腐蚀到直径为  $13.2\ \mu\text{m}$  并且镀上一层铂金膜, 放置在环形光纤激光器中作为可饱和吸收体, 实现了中心波长  $1031.6\ \text{nm}$ 、半高宽约  $3.5\ \text{nm}$ 、重复频率  $17.93\ \text{MHz}$ 、脉冲宽度从  $28\sim 212\ \text{ps}$  可调的锁模激光输出。

\* 收稿日期: 2022-08-26; 修订日期: 2022-11-02  
联系方式: 张澍霖, shulin\_laser@163.com。

## 1 仿真分析

设计的镀铂金膜微纳光纤(Pt-FCM)的横截面结构示意图如图1(a)所示,光纤采用标准通信单模光纤(SMF-28e)。

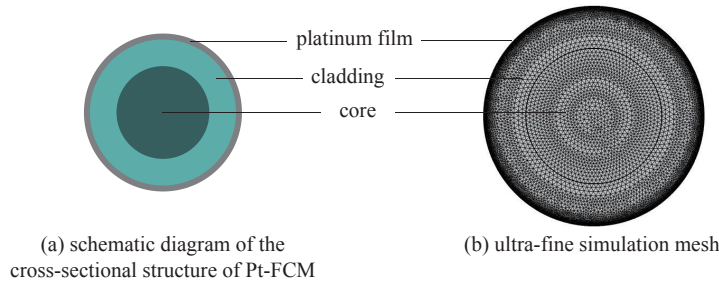


Fig. 1 Schematic diagram of the cross-sectional structure of Pt-FCM and ultra-fine simulation mesh

图1 Pt-FCM 的横截面结构示意图及超细化仿真网格

采用有限元法仿真了微纳光纤中这些模式在镀膜前后的能量、电场及有效折射率变化。在仿真中,设定光纤纤芯的半径为  $4.1 \mu\text{m}$ , 纤芯的折射率  $n_1=1.455$ , 包层的折射率  $n_2=1.45$ , 铂金的折射率为  $0.86 - i0.75$ , 传输波长为  $1.04 \mu\text{m}$ , 超细化仿真网格如图1(b)所示。

根据模式传输的物理状态, 设定了两个限制条件: 一方面, 对于光纤中某一确定的模式而言, 模式在光纤径向上不能有能量流动, 因此光纤中的模式必须在包层中以倏逝波的形式沿径向衰减, 当模式的有效折射率  $n_{\text{eff}} > n_2$  时, 该限制条件才得以满足; 另一方面, 模式在纤芯中传输, 因此在纤芯中不能有衰减, 当  $n_1 > n_{\text{eff}} > n_2$  时, 该限制条件得以满足。此外, 模式的  $n_{\text{eff}}$  越接近  $n_1$ , 越容易被限制在纤芯中, 能量占比也就越大。在使用有限元法计算光纤模式的时候, 软件会计算亥姆霍兹方程所有的解, 并不会判断它的解是否满足模式的条件。因此在软件计算后, 需要根据模式的有效折射率判断该模式是否可以在光纤中传输。

在计算结果中, 有些模式的有效折射率为复数, 其中实部  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  为寻常折射率, 决定了电磁波在介质中的传播速度, 而虚部  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  为消光系数, 决定了电磁波在介质中传播时的限制损耗。模式的限制损耗可以通过  $L_{\text{conf}}$  表示为

$$L_{\text{conf}} = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \text{dB/m} \quad (1)$$

Pt-FCM 中模式的有效折射率实部和限制损耗随包层半径的变化分别如图2(a)和(b)所示。从图中可以看出, 当 Pt-FCM 的包层半径小于  $5.6 \mu\text{m}$  时, 光纤中仅存在基模  $\text{HE}_{11}$  ( $\text{LP}_{01}$ ) 模, 当包层半径逐渐增加到  $5.6 \mu\text{m}$ 、 $6.3 \mu\text{m}$  和  $6.6 \mu\text{m}$  时, 光纤中会依次出现  $\text{TE}_{01}$ 、 $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TM}_{01}$  模。如果微纳光纤没有镀铂金膜, 那么这些模式将会在光纤中共存, 镀铂金膜之后,  $\text{TE}_{01}$  模的有效折射率仍为实数, 在光纤中的限制损耗为 0, 而  $\text{HE}_{11}$ 、 $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TM}_{01}$  模则因为虚部拥有非常大的限制损耗。当 Pt-FCM 的包层半径增加到  $6.9 \mu\text{m}$ 、 $7.7 \mu\text{m}$  和  $8.3 \mu\text{m}$  时,  $\text{HE}_{11}$ 、 $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TM}_{01}$  模的虚部依次消失, 限制损耗将为 0, 所以这些模式依然会在光纤中共存。最后可以得出, Pt-FCM 的半径在  $5.6 \sim 6.9 \mu\text{m}$  时, 光纤中只存在  $\text{TE}_{01}$  模, 此时它可以作为一个模式剥离器使用。

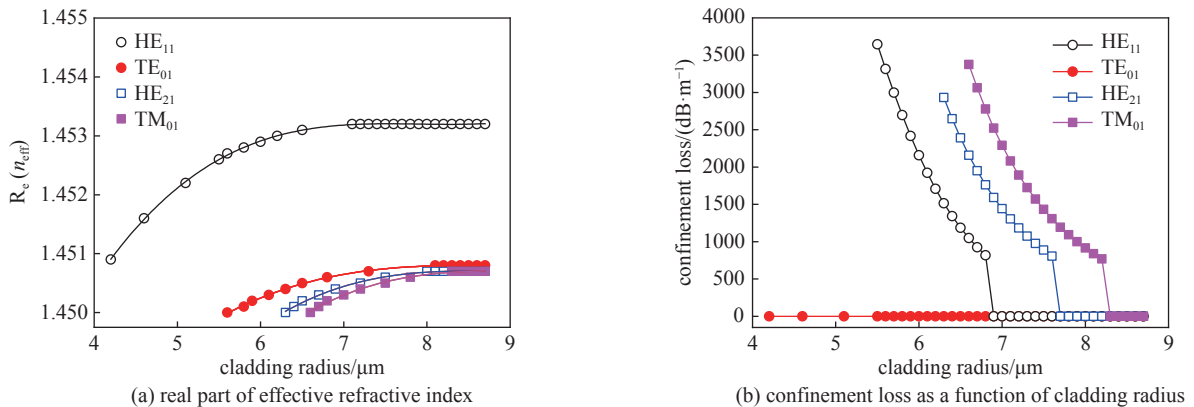


Fig. 2 Real part of effective refractive index and confinement loss as a function of cladding radius for modes in Pt-FCM

图2 Pt-FCM 中模式的有效折射率实部和限制损耗随包层半径的变化

假设包层直径为  $6.6 \mu\text{m}$ ，结合上文光纤参数，经计算可得光纤的  $V$  参数为 2.98，因此可以容纳四个模式，即  $\text{HE}_{11}$ 、 $\text{TE}_{01}$ 、 $\text{HE}_{21}$  和  $\text{TM}_{01}$  模，与模拟仿真结果图 2(a) 相符。镀铂金膜前后光纤中模式能量密度和电场分布情况如图 3 所示，可以看出，未镀膜时， $\text{TE}_{01}$ 、 $\text{HE}_{11}$ 、 $\text{TM}_{01}$  和  $\text{HE}_{21}$  模的有效折射率分别为 1.4505、1.4532、1.451 和 1.4507。基模  $\text{HE}_{11}$  模的有效折射率最大，最接近  $n_1$ ，所以光纤对基模的约束能力最强，其余三个次低阶模的有效折射率相近，可以简并为  $\text{LP}_{11}$  模。当微纳光纤镀上铂金膜后， $\text{TE}_{01}$  模的有效折射率不变， $\text{HE}_{11}$ 、 $\text{TM}_{01}$  和  $\text{HE}_{21}$  模的有效折射率变为复折射率，分别为  $1.4531 + i1.9973 \times 10^{-5}$ 、 $1.45 + i6.4337 \times 10^{-5}$  和  $1.4502 + i4.1145 \times 10^{-5}$ ，此时它们的限制损耗极大（如图 2(b)）。这说明  $\text{TE}_{01}$  模在 Pt-FCM 中传输时不受影响，而  $\text{HE}_{11}$ 、 $\text{TM}_{01}$  和  $\text{HE}_{21}$  模会沿传输方向迅速衰减。

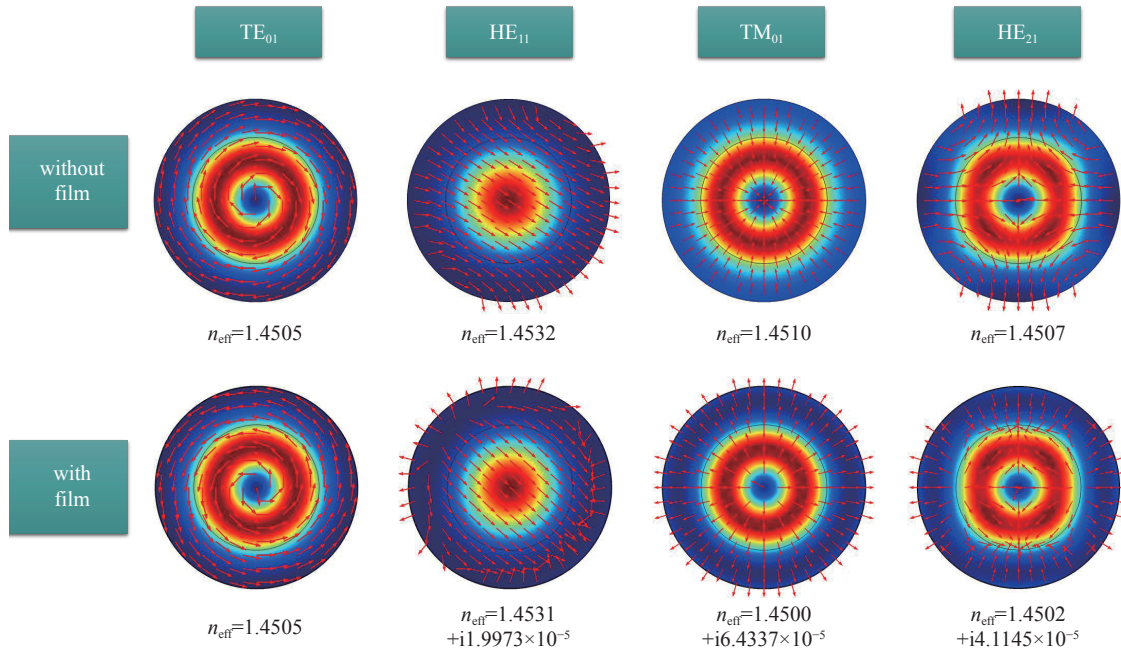


Fig. 3 Energy, electric field and effective refractive index changes of the modes in the microfiber before and after coating

图 3 微纳光纤镀膜前后模式功率密度、电场分布及有效折射率

在图 3 中，为了突出表现镀膜前后光纤包层附近模式电场线的变化情况，将描述电场线的箭头做了归一化处理，箭头只表示电场方向。镀膜前后光纤中不同模式横截面的能量密度一维分布曲线如图 4 所示。可以看出，镀膜前， $\text{TE}_{01}$ 、 $\text{HE}_{11}$ 、 $\text{TM}_{01}$  和  $\text{HE}_{21}$  模的能量在包层中呈指数形式逐渐衰减，在包层外边缘截断后消失；镀膜后， $\text{TE}_{01}$  模的能量密度分布没有变化，而  $\text{HE}_{11}$ 、 $\text{TM}_{01}$  和  $\text{HE}_{21}$  模均在铂金属膜边缘产生了新的电场，从而造成模式能量流失。

产生这种现象的原因如下，模式的电场可以分解为垂直于光纤表面的分量  $E_{\perp}$  和平行于光纤表面的分量  $E_{\parallel}$ ，当微纳光纤表面镀上铂金膜时， $E_{\perp}$  会与铂金膜中的自由电子相互作用，产生欧姆损耗。 $\text{HE}_{11}$ 、 $\text{TM}_{01}$  和  $\text{HE}_{21}$  模的电场均含有  $E_{\perp}$  成分，所以它们在铂金膜表面附近会产生新的电磁场，这不符合模式在光纤中传输的限制条件，因此不能在光纤中传输。由于  $\text{TE}_{01}$  模的电场分布为角向，在铂金膜表面只有  $E_{\parallel}$  分量而没有  $E_{\perp}$  分量，所以  $\text{TE}_{01}$  模不受铂金膜的影响，可以在光纤中传输。

由于金属普遍具有复折射率，微纳光纤外镀不同种类金属膜，都会在合适的包层半径下起到模式剥离器的效果，但是需要考虑金属的氧化性，若金属氧化性较强，则需要进一步对金属膜表面做抗氧化处理。此外，金属膜层厚度对模式有效折射率几乎没有影响，为数十 nm 即可，所以在本文没有进行讨论，也没有计算到包层半径中。

## 2 实验

Pt-FCM 锁模器件的制作步骤如下<sup>[20]</sup>：(1) 采用剥线钳剥除光纤的涂覆层并用酒精清洁光纤表面；(2) 将光纤放置在缓冲氧化物刻蚀液 (BOE, HF 质量分数为 6.5%) 腐蚀 9.5 h；(3) 取出光纤并用去离子水进行清洁；最后，采用离子喷溅法在光纤表面镀铂金膜。离子喷溅仪的真空度为 6 Pa，初始放电电流为 2 mA，喷溅时间为 880 s。最终制作完成的锁模器件长度为 10 mm，直径为  $13.2 \mu\text{m}$ ，两端尾纤的长度分别为 30 cm，铂金膜的厚度为 40 nm，用扫描电镜 (SEM, HITACHI SU8220) 观察如图 5(a) 所示，薄膜表面均匀且光滑。为了确定膜层的元素，使用能谱仪 (EDS) 对

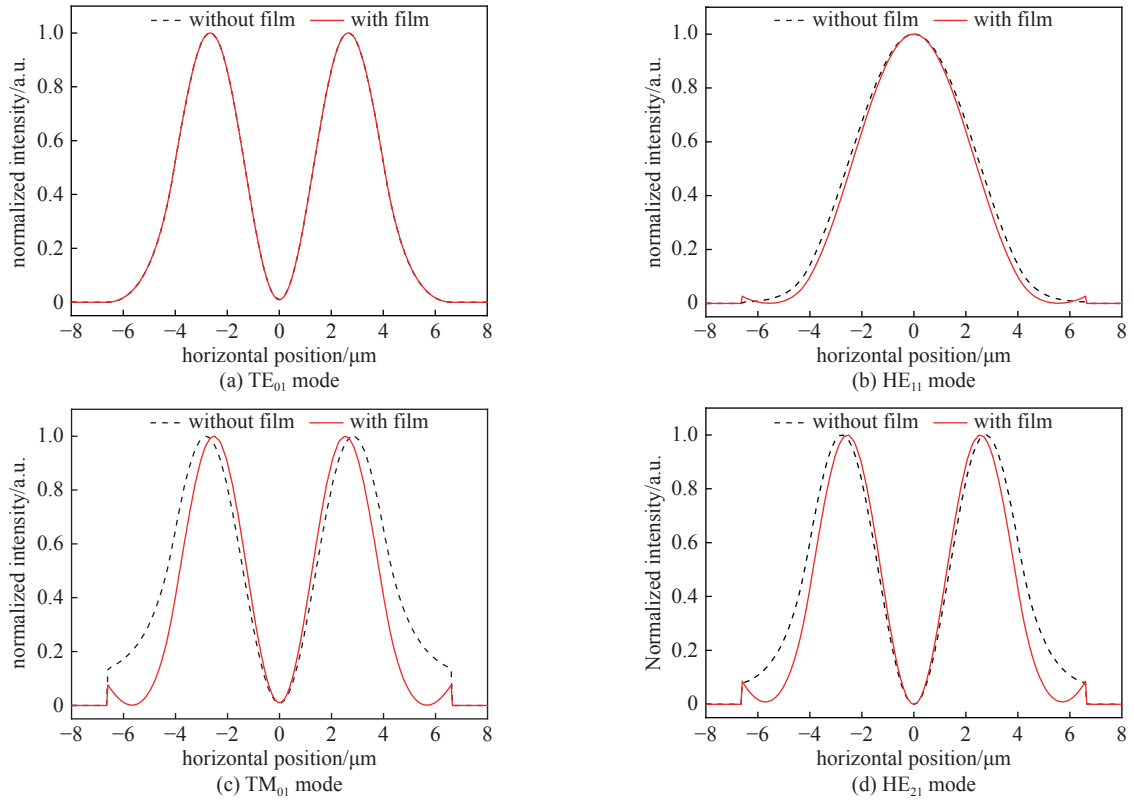


Fig. 4 Intensity distribution of TE<sub>01</sub>, HE<sub>11</sub>, TM<sub>01</sub> and HE<sub>21</sub> mode before and after coating of microfiber

图 4 半径为 6.6 μm 的微纳光纤镀膜前后 TE<sub>01</sub>、HE<sub>11</sub>、TM<sub>01</sub> 和 HE<sub>21</sub> 模的能量密度一维分布

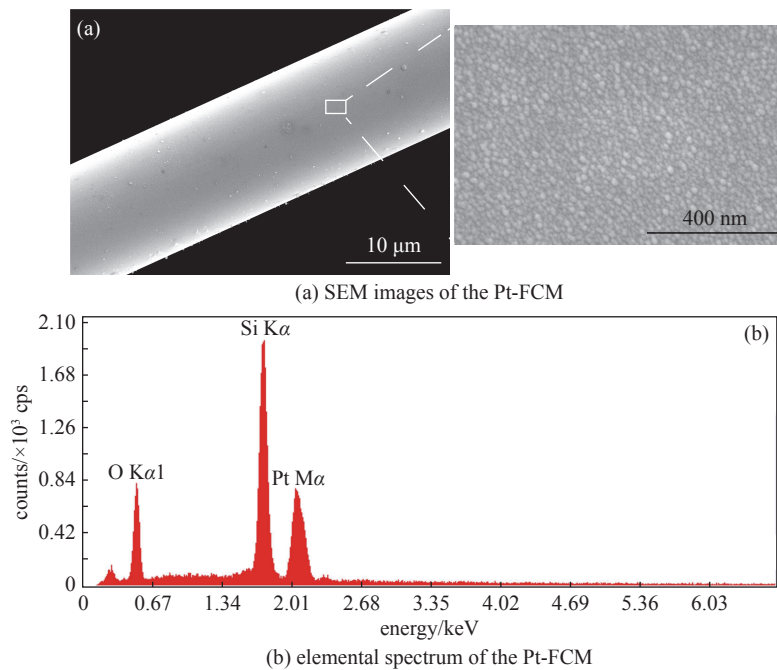


Fig. 5 SEM images of the Pt-FCM and elemental spectrum of the Pt-FCM

图 5 Pt-FCM 的扫描电镜图

锁模器件做了能谱分析,如图 5(b)所示,其中的 Si 元素和 O 元素来源于光纤本身的 SiO<sub>2</sub> 材料,因此可以表明微纳光纤表面为 Pt 元素。

由于 Pt-FCM 的微纳结构特性,铂金膜与微纳光纤之间存在表面等离子体(SP)效应。因此,当光纤波导表面激发 SP 时, TM 模(偏振方向垂直于光纤表面)会转化为表面波导模然后快速衰减, TE 模(偏振方向平行于光纤表面)几乎不受影响。由于 SP 的激发取决于入射光的偏振态,本文测量了 Pt-FCM 的偏振透过特性,实验装置如图 6

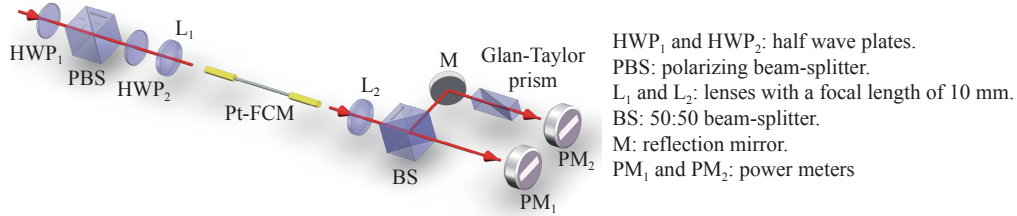
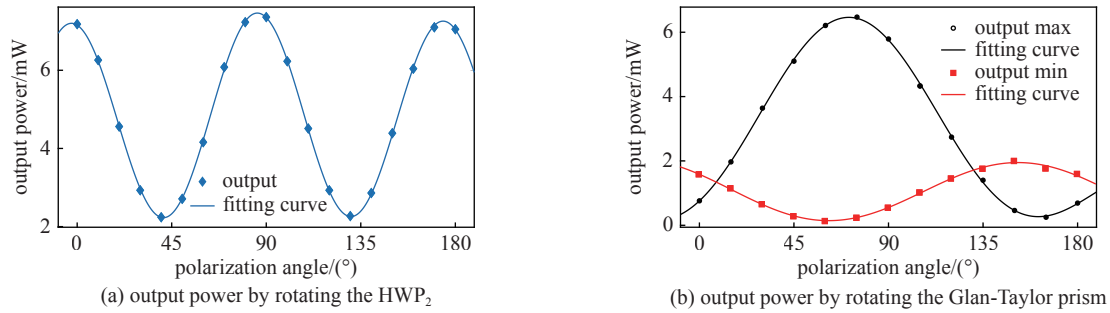


Fig. 6 Schematic of polarization measurement

图6 Pt-FCM的偏振特性测量装置

所示。光源为椭圆偏振的脉冲激光，半波片1(HWP<sub>1</sub>)和偏振分光棱镜(PBS)将入射光转化为线偏振光，半波片2(HWP<sub>2</sub>)用于连续改变入射光的偏振方向，经透镜L<sub>1</sub>耦合至Pt-FCM。出射光经透镜L<sub>2</sub>准直后，由50:50的分光棱镜(BS)分为两束，透射光直接由功率计1(PM<sub>1</sub>)测量，其功率随入射光的偏振态角度变化曲线如图7(a)所示。反射光经过一个格兰-泰勒棱镜后用功率计2(PM<sub>2</sub>)探测，当PM<sub>1</sub>测到的功率最大时，PM<sub>2</sub>测量到的功率随格兰-泰勒棱镜角度的变化如图7(b)中黑线所示；当PM<sub>1</sub>测到的功率最小时，PM<sub>2</sub>测量到的功率随格兰-泰勒棱镜角度的变化如图7(b)中红线所示。由于半波片与格兰-泰勒棱镜对偏振光的作用原理不同，所以当它们旋转 $\theta$ 时，半波片会使入射光的偏振方向旋转 $2\theta$ ，格兰-泰勒棱镜会使入射光的偏振方向旋转 $\theta$ 。

Fig. 7 Output power with different polarization angle incident to Pt-FCM by rotating the HWP<sub>2</sub> and rotating the Glan-Taylor prism图7 旋转HWP<sub>2</sub>后由PM<sub>1</sub>得到的出射光功率变化和旋转格兰-泰勒棱镜后由PM<sub>2</sub>得到的出射光功率变化

当入射光的偏振态接近TM模时，其能量损耗很大，输出光能量较弱。将HWP<sub>2</sub>旋转45°后，入射光的偏振态旋转了90°，变为TE模，由于TE模几乎不受Pt-FCM的影响，所以输出光能量较大。根据偏振消光比( $P_{ER}$ )定义<sup>[21]</sup>， $P_{ER} = P_{TE}/P_{TM}$ ，其中， $P_{TE}$ ( $P_{TM}$ )是当入射光为TE(TM)模时的出射光能量，计算后得到Pt-FCM的PER约为13 dB。因此，它也可以作为一个光纤偏振选择器使用。

Pt-FCM可以滤掉绝大多数的TM模能量，所以采用双通道法测量了其对TE模的可饱和吸收特性。测试所用光源中心波长1030 nm，脉冲宽度10 ps，重复频率43 MHz，采用95:5的光纤分束器对其分光。95%的能量入射到SA，用于检测吸收特性，另外5%的能量作为参考光。透射率随入射光功率变化的函数如图8所示，随着入射光功率的持续增加，铂金膜的透过率趋于常数，证明铂金膜具有可饱和吸收特性，其调制深度 $\Delta T$ 和饱和强度分别约为0.57%和0.8 MW/cm<sup>2</sup>。由于其可饱和吸收特性建立在倏逝光场与铂金膜在光纤外部的相互作用，因此，铂金膜可饱和吸收体的损伤阈值很高，在实验中没有观察到薄膜的损伤。

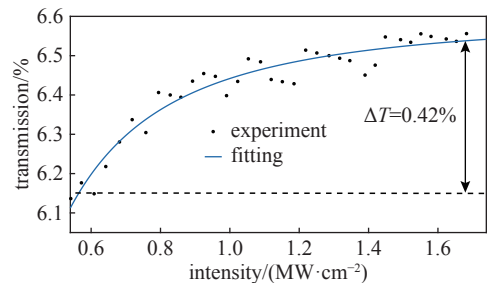


Fig. 8 Nonlinear optical transmittance of the Pt film

图8 铂膜的非线性透过率

搭建的包含Pt-FCM的单环全光纤锁模激光器，如图9所示。一段20 cm长的掺镱增益光纤(Lieki Yb1200-4/125)作为增益介质，中心波长976 nm的LD作为泵浦源，用波分复用器(WDM)将其接入光路。光路中的偏振无关光隔离器(PI-ISO)的作用是使光沿逆时针方向传输，光纤偏振控制器(PC)的作用是调节环路中的光偏振态。10/90的耦合器的10%端口作为激光输出口。激光器的总长度约为11.5 m，总色散量约为0.23 ps<sup>2</sup>，为典型的耗散孤子锁模。用型号为RTO 1024，2 GHz带宽的示波器(Rohde & Schwarz)和超快探测器检测输出光的脉冲序列，用型号为N9000B的频谱分析仪(Keysight)检测输出光的射频谱，用型号为FR-103WS的自相关仪(Femtochrome)检测输

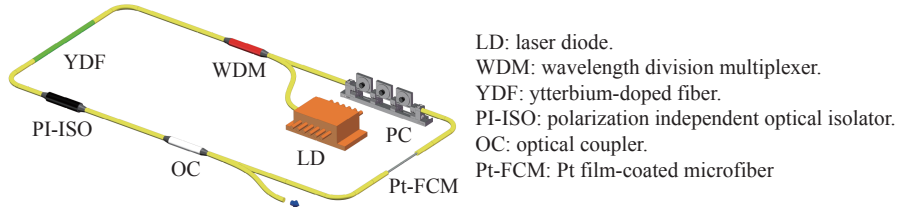


Fig. 9 Schematic of the all-fiber mode-locked laser

图 9 全光纤锁模激光器

出光的自相关曲线,用型号为AQ6370C的光谱分析仪(Yokogawa)测量光谱。

该光纤激光器的输入输出曲线如图10(a)所示,可以看出锁模阈值为180 mW。连续记录了激光器的输出功率在7.5 h内的变化情况,如图10(b)所示,结果表明平均功率的标准差为6.589  $\mu$ W,在此时间内,其光谱几乎没有变化,说明激光器具有长时间稳定性。随着泵浦功率的增加,脉冲宽度先降至28 ps然后增加至212 ps,如图11所示。由于铂金颗粒同时具有饱和吸收特性和反饱和吸收特性,我们猜测铂金膜具有同样的特性,但是在上文的非线性光学透过率测量实验中,泵浦功率不足以达到反饱和吸收的阈值,因此在本文中并没有观察到反饱和吸收现象。

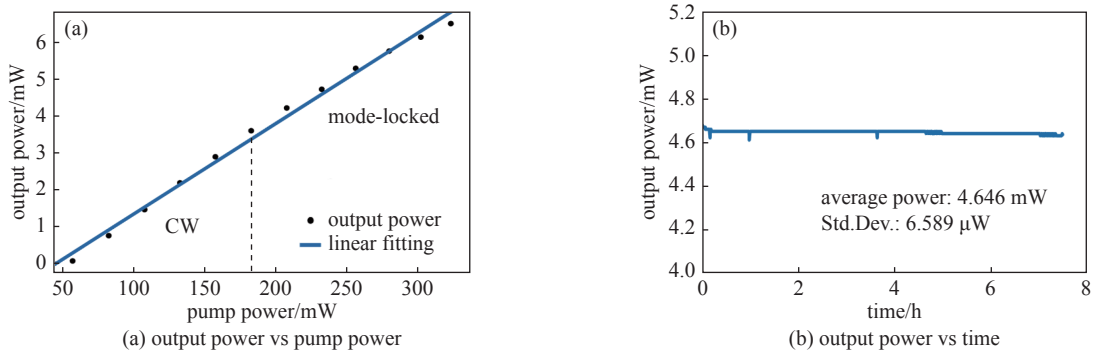


Fig. 10 Output power of the laser changes with pump power and time

图 10 光纤激光器的输出功率随泵浦功率和时间的变化

激光器在泵浦功率为310 mW时的锁模特性如图12所示。ns和 $\mu$ s范围内锁模脉冲序列分别如图12(a)和图12(b)所示,可以看出脉冲序列平坦,脉冲幅值稳定。图12(c)为测量范围为10 kHz,分辨率带宽为10 Hz的条件下的锁模脉冲的射频谱,测到的基频为17.93 MHz,信噪比约为68 dB,表明激光器的工作状态十分稳定。图12(d)为测量范围为850 MHz的锁模脉冲射频谱,可以看出频谱没有受到调制,说明激光器在连续锁模状态下运行稳定。图12(e)为锁模脉冲的光谱,中心波长为1031.6 nm,半高宽约为3.5 nm,陡峭的光谱边缘说明激光器输出的脉冲为耗散孤子。图12(f)为高斯函数拟合后的自相关曲线,其半高宽约为103 ps,实际脉冲约为73 ps。由于激光器的色散为正,因此可以在腔外将输出脉冲进一步压缩为飞秒脉冲。

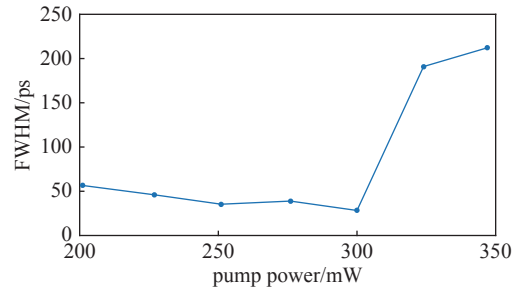
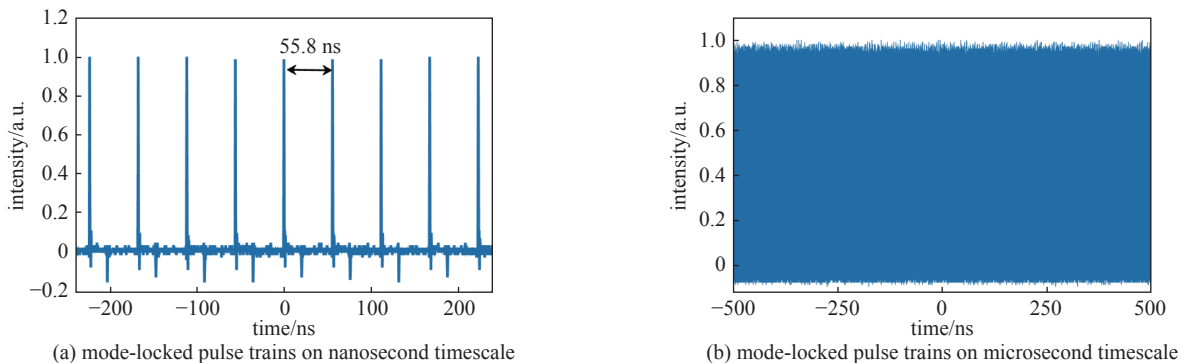


Fig. 11 Pulse width dependent on pump power

图 11 脉冲宽度随泵浦功率的变化



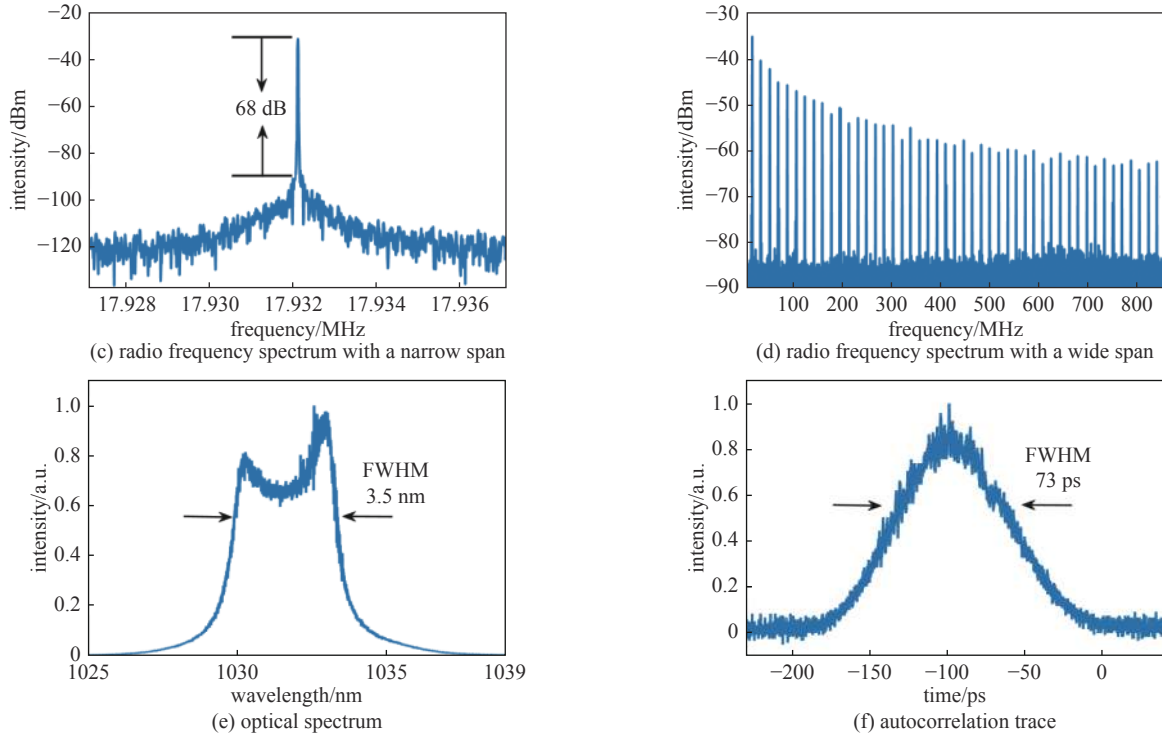


Fig. 12 Mode-locked characteristics of the fiber laser

图 12 光纤激光器的锁模特性

### 3 结论

本文采用离子喷溅法对微纳光纤进行镀膜,并将其作为可饱和吸收体,制作了全光纤锁模激光器,锁模器件的调制深度和饱和强度分别为 0.57% 和 0.8 MW/cm<sup>2</sup>。在泵浦阈值为 180 mW 时,实现了锁模脉冲输出,锁模脉冲重复频率为 17.93 MHz,脉冲宽度为 103 ps,中心波长为 1031.6 nm,半高宽约为 3.5 nm。综上所述,Pt-FCM 可以作为锁模器件实现光纤激光器的锁模脉冲输出,该器件制备流程简单、不需要昂贵的加工设备、制作成本较低,且工作状态稳定,具有十分广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] Phillips K C, Gandhi H H, Mazur E, et al. Ultrafast laser processing of materials: a review[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(4): 684-712.
- [2] Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, et al. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5: 16133.
- [3] Zipfel W R, Williams R M, Webb W W. Nonlinear magic: multiphoton microscopy in the biosciences[J]. *Nature Biotechnology*, 2003, 21(11): 1369-1377.
- [4] Lu Yu, Wong T T W, Chen Feng, et al. Compressed ultrafast spectral-temporal photography[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122: 193904.
- [5] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 233-237.
- [6] Yoshii K, Nomura J, Taguchi K, et al. Optical frequency metrology study on nonlinear processes in a waveguide device for ultrabroadband comb generation[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11: 054031.
- [7] Martinez A, Sun Zhipei. Nanotube and graphene saturable absorbers for fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 842-845.
- [8] Chen Bohua, Zhang Xiaoyan, Wu Kan, et al. Q-switched fiber laser based on transition metal dichalcogenides MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, and WSe<sub>2</sub>[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26723-26737.
- [9] Ahmad H, Reduan S A, Ali Z A, et al. C-band Q-switched fiber laser using titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) as saturable absorber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8: 1500107.
- [10] Luo Zhengqian, Huang Yizhong, Weng Jian, et al. 1.06 μm Q-switched ytterbium-doped fiber laser using few-layer topological insulator Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> as a saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29516-29522.
- [11] Chen Yu, Jiang Guobao, Chen Shuqing, et al. Mechanically exfoliated black phosphorus as a new saturable absorber for both Q-switching and mode-locking laser operation[J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 12823-12833.
- [12] Ahmad H, Hassan H, Safaei R, et al. Q-switched fiber laser using carbon platinum saturable absorber on side-polished fiber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15: 090601.
- [13] Guo Hao, Feng Ming, Song Feng, et al. Q-switched erbium-doped fiber laser based on silver nanoparticles as a saturable absorber[J]. *IEEE Photonics*

- Technology Letters, 2015, 28(2): 135-138.
- [14] Jiang Tao, Xu Yang, Tian Qijun, et al. Passively Q-switching induced by gold nanocrystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101: 151122.
- [15] Kang Zhe, Guo Xingyuan, Jia Zhixu, et al. Gold nanorods as saturable absorbers for all-fiber passively Q-switched erbium-doped fiber laser[J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(11): 1986-1991.
- [16] Kang Zhe, Li Q, Gao X J, et al. Gold nanorod saturable absorber for passive mode-locking at 1  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11: 035102.
- [17] Gao Yachen, Zhang Xueru, Li Yuliang, et al. Saturable absorption and reverse saturable absorption in platinum nanoparticles[J]. *Optics Communications*, 2005, 251(4/6): 429-433.
- [18] Yuzaile Y R, Awang N A, Zalkepali N U H H, et al. Pulse compression in Q-switched fiber laser by using platinum as saturable absorber[J]. *Optik*, 2019, 179: 977-985.
- [19] Ganeev R A, Tugushev R I, Usmanov T. Application of the nonlinear optical properties of platinum nanoparticles for the mode locking of Nd: glass laser[J]. *Applied Physics B*, 2009, 94(4): 647-651.
- [20] Zhang Yimin, Li Hongxun, Dai Chuansheng, et al. All-fiber high-order mode laser using a metal-clad transverse mode filter[J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 29679-29686.
- [21] Dong Chunhua, Zou Changling, Ren Xifeng, et al. In-line high efficient fiber polarizer based on surface plasmon[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100: 041104.