光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.04.005

基于混合锁模的铥钬共掺光纤激光器研究

王小发*，韩慧慧，段显奕，王 杰

（重庆邮电大学 光电工程学院，重庆 400065）

摘 要： 报道了一种基于非线性放大环镜和二硒化钼可饱和吸收体的混合锁模光纤激光器。该激光器采用双环形结构，以铥钬共掺光纤作为增益光纤。通过优化泵浦功率和偏振态，实验获得了调Q锁模脉冲、单脉冲、2～5多脉冲、脉冲束及脉冲束的2～4次谐波等5种输出状态。相比于单一锁模方式，混合锁模方式不但能使激光器实现自启动锁模，而且还能丰富其脉冲动力学状态。

关键词： 非线性放大环镜；二硒化钼；多周期脉冲；混合锁模；光纤激光器

中图分类号： TN248 **文章编号：** 1001－5868(2021)04－0474－05

Research on Hybrid Mode-locked Thulium-holmium Co-doped Fiber Laser

WANG Xiaofa, HAN Huihui, DUAN Xianyi, WANG Jie

(School of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecomm., Chongqing 400065, CHN)

Abstract: A hybrid mode-locked fiber laser based on nonlinear amplifying loop mirror and molybdenum diselenide saturable absorber is reported in this paper. By optimizing the pump power and polarization state, five types of different mode-locked states, such as Q-switched mode-locked pulse, basic mode-locked pulse, 2～5 multi-pulse, pulse beam, and 2～4 harmonic of pulse beam have been obtained in the experiment. Compared with the single mode-locked pattern, the hybrid mode locking pattern can not only realize the self-starting mode locking, but also enrich the pulse dynamic state.

Key words: nonlinear amplifying loop mirror; molybdenum diselenide; multi-period pulse; hybrid mode-locking; fiber laser

0 引言

被动锁模光纤激光器因其具有光束质量好、转换效率高、操作简单、使用寿命长且性价比高等优势[1-2]，目前已成为研究束缚态孤子[3]、高阶谐波锁模[4]、脉冲束[5]、孤子雨[6]等各种非线性动力学行为的理想平台，在医药、材料加工、激光雷达、超连续谱等领域得到广泛应用[7-8]。

作为被动锁模光纤激光器的关键器件，可饱和吸收体(Saturable Absorber，SA)可分为人造SA和真实SA。人造SA以非线性偏振旋转[9]和非线性放大环镜(Nonlinear Amplifying Loop Mirror，NALM)[10]为主；真实SA以半导体可饱和吸收镜[11]、石墨烯[12]、碳纳米管[13]和二硒化钼($MoSe_2$)[14-15]为主。目前对基于单一SA光纤激光器的研究较为广泛，其中，单一NALM激光器具有损伤阈值高、结构简单、易全光纤化、偏振敏感等优势[16]，可用于对多脉冲动力学特性的研究。但单一NALM激光器的自启动需要手动调节偏振控制器，还容易受到温度、振动以及应力等因素的影响，导致锁模状态易被破坏，本质上极不稳定。而$MoSe_2$具有不易受外界环境的干扰及稳定性好等优势，可以弥补单一NALM激光器的弊端。其次$MoSe_2$还具有窄带隙和较低的光吸收系数，使其比其他硫化物更适用于宽带饱和吸收和被动锁模激光器[17-18]。但基于$MoSe_2$-SA的激光器输出激光偏振不敏感，所

收稿日期：2021－03－15.

基金项目：重庆市自然科学基金项目(cstc2018jcyjAX0585，cstc2017zdzxX0011).

* 通信作者：王小发

以不能用于研究复杂的多脉冲产生机制。

通过上文分析，对于单一锁模机制光纤激光器存在的缺陷，可通过其他锁模机制进行互补，联合两种锁模机制，实现一种混合锁模光纤激光器。2012 年，Chernyshevad 等[19]报道了一种基于 NALM 和半导体可饱和吸收镜的混合锁模光纤激光器，能够结合两种锁模机制的优势，获得飞秒脉冲输出。2017 年，Jia 等[20]报道了一种非线性偏振旋转和半导体可饱和吸收镜的锁模掺铒光纤激光器。研究结果均表明，与单一锁模激光器相比，混合锁模激光器能够增强非线性效应，降低锁模阈值，提高稳定性。目前对基于 NALM 和 $MoSe_2$-SA 的混合锁模光纤激光器还未见报道。

本文结合 NALM 和 $MoSe_2$-SA 实现了一种混合锁模光纤激光器，该激光器不但可以用来研究稳定多周期脉冲的产生机制，而且能够实现自启动，具有一定的实际应用价值。

1　实验装置

基于混合锁模的光纤激光器装置如图 1 所示，该装置由 50∶50 的耦合器(OC1)分成两个部分：主环和次环，在主环中一个波长为 1 550 nm、最大抽运功率为 1 W 的激光二极管作为泵浦源与一个波长为 1 550 nm 的波分复用器(WDM)相连，用于将泵浦源的光耦合进激光腔内。偏振控制器(Polarization Controller，PC)用于调节腔内的偏振态。主环以与四端口 OC1 的两端相连作为结束。OC1 另外一端与另外一个耦合器(OC2)连接组成从回路，将大部分的功率反射给主回路[21]。在次环中加入 $MoSe_2$-SA 是实现自启动的关键，$MoSe_2$ 采用化学气相沉积法制备。次环中偏振无关隔离器用来控制腔内光循环方向。另外，整个腔长约 27 m，包括 2.5 m 的铒钬共掺光纤(Nufern SM-ESF-7/125)和约 24.5 m 的单模光纤(SMF-28e)。铒钬共掺的群速度色散值(GVD)约为 $-0.056\ ps^2/m$，SMF-28e 的 GVD 值约为 $-0.071\ ps^2/m$，整个腔的总色散值约为 $-1.87\ ps^2$。

此外，为了测量激光器的输出特性，利用光谱分析仪(AQ6375B，Yokogawa)对激光器 30% 的输出端口的光谱进行检测。频谱分析仪(FSL3，Ro-hde & Schwarz)和示波器(Wave Runner 610Zi，Leroy)配合光电探测器(ET-5000F，EOT)用来度量频谱和观察时域波形。

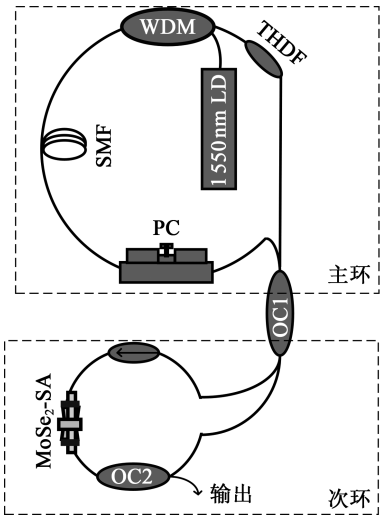


图 1　混合锁模光纤激光器的装置图

2　实验系统及测量结果

混合锁模光纤激光器的平均输出功率 P_{out} 随着泵功率 P_{pump} 的增加呈线性增加，图 2 所示为其变化曲线。在实验过程中，泵浦功率低于阈值功率 380 mW 时，激光器无法锁模。增加泵浦功率至 380 mW，激光器可以自启动进入锁模状态。当泵浦功率从 0.38 W 增加到 1 W 时，混合锁模激光器可以在 5 种不同的激光状态下工作，分别获得了调 Q 锁模、单脉冲锁模、多脉冲锁模、脉冲束、脉冲束谐波等实验现象。

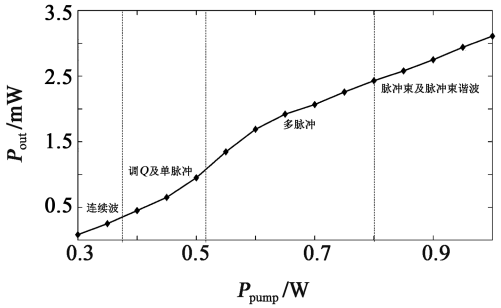
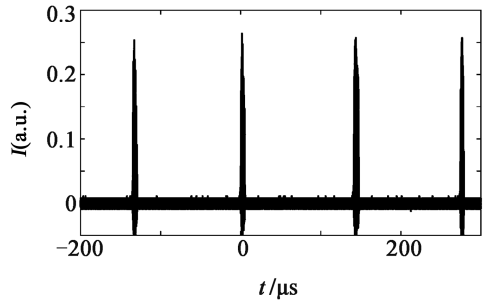


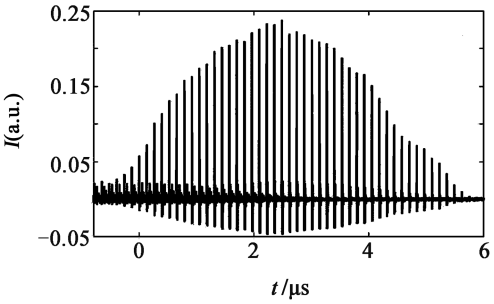
图 2　平均输出功率随泵浦功率的变化曲线

2.1　调 Q 锁模态

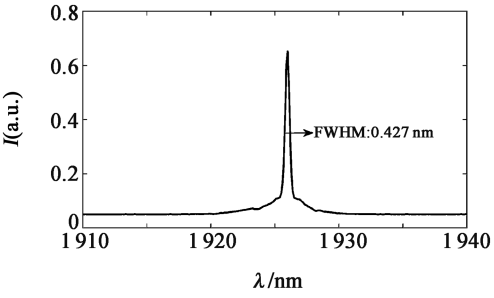
当泵浦功率达到 0.38 W 时，在示波器上观察到调 Q 锁模脉冲输出，调 Q 锁模脉冲的序列如图 3(a)所示，细节图如图 3(b)所示，从图中可以看出，该脉冲具有较大的调制性，是典型的调 Q 锁模脉冲现象。图 3(c)为光谱分析仪检测到的调 Q 锁模脉冲光谱，从图中可以看出，中心波长位于 1 926.5 nm 处，半高全宽(FWHM)为 0.427 nm。



(a) 调 Q 锁模脉冲序列



(b) 调 Q 锁模脉冲细节展开图



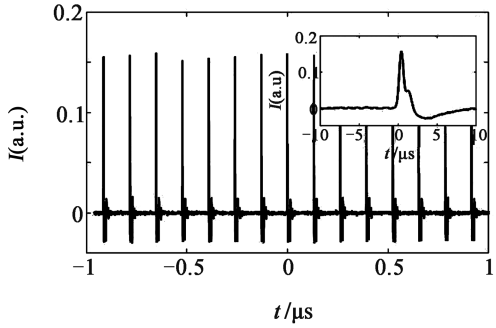
(c) 光谱图

图 3 调 Q 脉冲锁模输出特性

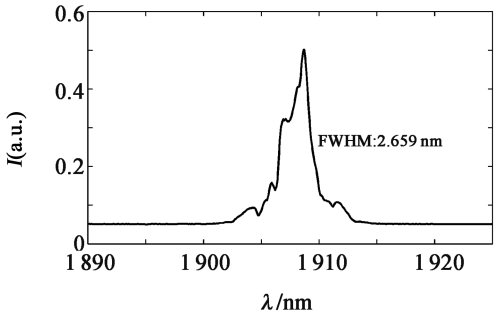
2.2 基础锁模态

继续增加泵浦功率到 0.42 W，发现调 Q 锁模态过渡到基础锁模态，基础锁模脉冲序列如图 4(a)所示，相邻脉冲间隔约为 131 ns，脉冲重复频率为 7.6 MHz，插图为单个脉冲的细节展开图。通过光谱仪对输出光谱进行检测，检测结果如图 4(b)所示。从图中可以看出，基础锁模脉冲的中心波长位于 1 909.3 nm 附近，FWHM 约为 2.659 nm。为了进一步分析该激光器运行稳定性，实验中通过频谱分析仪测量泵浦功率为 0.43 W 时脉冲的信噪比约为 48 dB，如图 4(c)所示，证明锁模脉冲稳定。

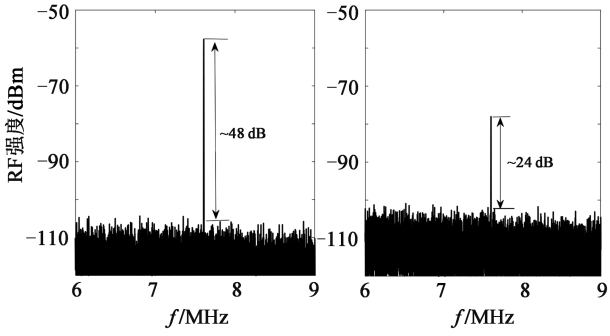
在混合锁模的基础上去掉 $MoSe_2$-SA 后，在腔长一致的情况下，单一 NALM 激光器输出的锁模脉冲变得不稳定且不能自启动，信噪比只有 24 dB，频谱图如图 4(d)所示。但加入 $MoSe_2$-SA 实现混合锁模后，信噪比提高了 24 dB，并且在不调节任何器件的情况下，激光器自动获得锁模脉冲，说明 $MoSe_2$-SA 对腔内稳定性和自启动性起到了很重要的作用。



(a) 基础锁模脉冲序列(插图为单脉冲细节展开图)



(b) 光谱图



(c) 混合锁模频谱 (d) 单一锁模频谱

图 4 基础锁模脉冲输出特性

2.3 多周期锁模态

继续增大泵浦功率，在泵浦功率为 0.53，0.62，0.75 和 0.8 W 下，分别观察到 2～5 脉冲的运行状态，如图 5 所示，从上至下分别为 2～5 脉冲的序列图。多脉冲的产生主要是新旧脉冲之间由于增益竞争而达到动态平衡。多脉冲与单脉冲相比，最明显的区别在于，在相同的周期范围内，单脉冲只包含一个脉冲序列，而多脉冲包含两个或多个脉冲序列。

保持泵浦功率 0.8 W 不变，随着 PC 的调节，观察到另外一种现象——脉冲束，相邻脉冲之间存在较小的间隔，占激光腔的很小一部分[22]。轻微地调节 PC，脉冲束的数量会增加或减少，这是因为调节

腔内偏振控制器会改变腔内增益，相当于改变了抽运功率[23]。不同数目的脉冲束如图 6(a)所示，插图为脉冲束的细节图。保持 PC 不变，调节泵浦功率，在泵浦功率为 0.84，0.9 和 0.96 W 下，还观察到脉冲束的 2 次，3 次，4 次谐波的运行状态，同时每个脉冲束由 5 个或者 6 个脉冲束组成，如图 6(b)所示。受限于该光纤激光器的最大泵浦抽运功率为 1 W，未能观察到更高次的谐波锁模。

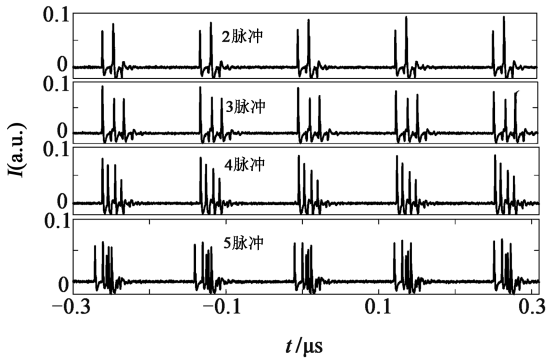
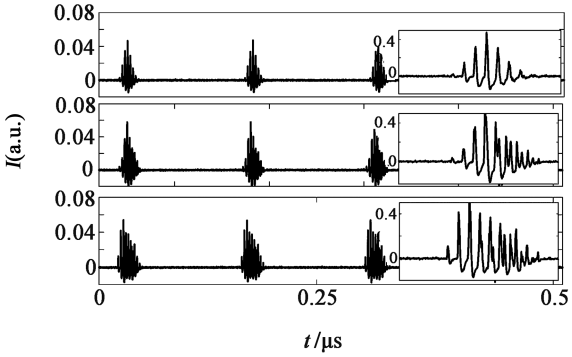
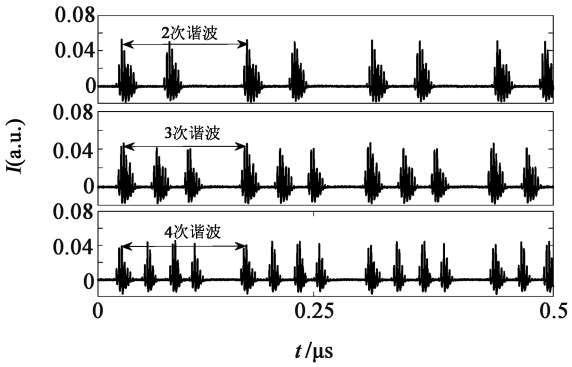


图 5　多脉冲输出特性



(a)　不同数目脉冲束(插图为脉冲束细节图)



(b)　脉冲束谐波锁模

图 6　脉冲束输出特性

研究发现，通过调节泵浦功率和 PC，在腔内可以获得不同种类的脉冲输出，产生 5 种锁模态的原因主要是腔内非线性效应、色散效应的相互作用，使得腔内弱的双折射相当于一个滤波器。根据 $\Delta\lambda = \lambda/LB$，其中 $\Delta\lambda$ 表示中心透过波长间隔，λ 表示中心波长，L 表示激光器腔长，B 表示激光腔内的双折射量[23]。在改变偏振态的过程中会导致双折射量也发生转变，在这个过程中增益带宽也会稍许增大或者减少，和调节泵浦功率的结果一致。因此，在实验过程中发现调节 PC，也可以获得不同种类的脉冲输出。

3　结论

本文通过将 $MoSe_2$-SA 置入非线性放大环镜腔内，构建了一种具有双 SA 的混合锁模光纤激光器。研究发现，混合锁模光纤激光器能够实现更多的锁模态。在不同的泵浦功率和偏振态下，实验获得了调 Q 锁模脉冲、单脉冲、2～5 多脉冲、脉冲束及脉冲束的 2～4 次谐波等现象。该混合锁模激光器的信噪比为 48 dB，较单一 NALM 锁模方式的信噪比提高了 24 dB，其中 $MoSe_2$-SA 主要用于提高系统稳定性，NALM 主要用于产生多周期脉冲，具有稳定性高、易自启动、输出灵活、锁模态更加丰富等优点。

参考文献：

[1] Majewski M R, Jackson S D. Highly efficient mid-infrared dysprosium fiber laser[J]. Opt. Lett., 2016, 41(10): 2173-2176.

[2] Poole S B, Payne D N, Fermann M E. Fabrication of low-loss optical fibers containing rare-earth ions[J]. Electron. Lett., 1985, 21(17): 737-738.

[3] Tang D Y, Zhang H, Zhao L M, et al. Observation of high-order polarization-locked vector solitons in a fiber laser[J]. Phys. Rev. Lett., 2008, 101(15): 153904(1)-153904(4).

[4] Lin G R, Lee C K, Kang J J. Rational harmonic mode-locking pulse quality of the dark-optical-comb injected semiconductor optical amplifier fiber ring laser[J]. Opt. Express, 2008, 16(12): 9213-9221.

[5] Lin Y H, Lin S F, Chi Y C, et al. Using n- and p-type Bi_2Te_3 topological insulator nanoparticles to enable controlled femtosecond mode-locking of fiber lasers[J]. ACS Photon., 2015, 2(4): 481-490.

[6] Song Yufeng, Li Lei, Zhang Han, et al. Vector multi-soliton operation and interaction in a graphene mode-locked fiber laser [J]. Opt. Express, 2013, 8(21): 10010-10018.

[7] Rudy C W, Digonnet M J F, Byer R L, et al. Advances in 2 μm Tm-doped mode-locked fiber laser[J]. Optical Fiber Technol., 2014, 20(6): 642-649.

[8] Hochrein T, Wilk R, Mei M, et al. Optical sampling by laser cavity tuning[J]. Opt. Express, 2010, 18(2): 1613-1617.

[9] 邓一鑫，涂成厚，吕福云. 非线性偏振旋转锁模自相似脉冲光

纤激光器的研究[J]. 物理学报，2009(5)：3173-3178.
Deng Yixin, Tu Chenghou, Lv Fuyun. Study of self-similar pulse nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser[J]. J. of Physics, 2009(5): 3173-3178.

[10] 王小发，刘经惠，靳增高. 基于非线性放大环镜和 Lyot 滤波器的多波长与耗散孤子锁模态开关型掺铥光纤激光器[J]. 光子学报，2020，49(4)：6-15.
Wang Xiaofa, Liu Jinghui, Jin Zenggao. State-switchable multi-wavelength and dissipative soliton mode-locked Tm-doped fiber laser based on a combination of nonlinear amplifying loop mirror and Lyot filter[J]. J. of Photon., 2020, 49(4): 6-15.

[11] Zhou Yi, Lin Wei, Cheng Huihui, et al. Composite filtering effect in a SESAM mode-locked fiber laser with a 32-GHz fundamental repetition rate: switchable states from single soliton to pulse bunch[J]. Opt. Express, 2018, 26(8): 17458.

[12] 杨 光，楼嘉昌，韩达明，等. 基于拉锥光纤石墨烯可饱和吸收体的被动调 Q 锁模掺铥光纤激光器[J]. 中国激光，2015，42(s1)：79-83.
Yang Guang, Lou Jiachang, Han Daming, et al. Passively Q-switched mode-locked thulium-doped fiber laser by using graphene saturable absorber on tapered fiber[J]. China Laser, 2015, 42(s1): 79-83.

[13] 张 玲，王勇刚，于海娟，等. 基于单壁碳纳米管的高功率被动锁模光纤放大器[J]. 中国激光，2012,39(4)：194.
Zhang Ling, Wang Yonggang, Yu Haijuan, et al. High power passive mode-locked fiber amplifier based on single-walled carbon nanotubes[J]. China Laser, 2012,39(4): 194.

[14] Zhang H, Lu S B, Zheng J, et al. Molybdenum disulfide (MoS_2) as a broadband saturable absorber for ultra-fast photonics[J]. Opt. Express, 2014, 22(6): 7249.

[15] Duan Lina, Su Yulong, Wang Yonggang, et al. Passively mode locked erbium doped fiber laser via a D shape fiber based MoS_2 saturable absorber with a very low nonsaturable loss[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(2): 190-194.

[16] Krzempek K, Sotor J, Abramski K, et al. Compact all-fiber figure-9 dissipative soliton resonance mode-locked double-clad Er∶Yb laser[J]. Opt. Lett., 2016, 41(21): 4995-4998.

[17] Dong Ningning, Li Yuanlin, Feng Yanyan, et al. Optical limiting and theoretical modelling of layered transition metal dichalcogenide nanosheets[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14646.

[18] Zhang Renli, Wang Jun, Zhang Xiaoyan, et al. Mode-locked fiber laser with $MoSe_2$ saturable absorber based on evanescent field[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(1): 406-410.

[19] Chernysheva M A, Krylov A A, Kryukov P G, et al. Nonlinear amplifying loop-mirror-based mode-locked thulium-doped fiber laser[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012, 24(14): 1254-1256.

[20] Jia Qingsong, Wang Tianshu, Ma Wanzhuo, et al. Mode-locking thulium-doped fiber laser with 1.78 GHz repetition rate based on combination of nonlinear polarization rotation and semiconductor saturable absorber mirror[J]. IEEE Photonics J., 2017, 9(3): 1-8.

[21] Wang Xiaofa, Xia Qing, Gu Bin. A 1.9 μm noise-like mode-locked fiber laser based on compact figure-9 resonator[J]. Opt. Commun., 2019, 434: 180-183.

[22] 黄诗盛，王勇刚，李会权，等. 氧化石墨烯被动锁模掺镱光纤激光器多脉冲现象的实验研究[J]. 物理学报，2014,63(8)：167-173.
Huang Shisheng, Wang Yonggang, Li Huiquan, et al. Experimental studies of multiple pulses in a passively ytterbium-doped fiber laser based on graphene-oxide saturable absorber[J]. J. of Phys., 2014,63(8): 167-173.

[23] Zhang Han, Tang Dingyuan, Knize R J, et al. Graphene mode locked, wavelength-tunable, dissipative soliton fiber laser[J]. Appl. Phys. Lett., 2010, 96(11): 51.

作者简介：

王小发(1978—)，男，湖南邵阳人，博士，副教授，研究方向为光纤激光器、固体激光器和非线性光学。

(上接第 463 页)

[42] Wernicke T, Krüger O, Herms M, et al. Analysis of materials modifications caused by UV laser micro drilling of via holes in AlGaN/GaN transistors on SiC[J]. Appl. Sur. Sci., 2007, 253: 8008-8014.

[43] Krüger O, Schöne G, Wernicke T, et al. UV laser drilling of SiC for semiconductor device fabrication[J]. J. Phys: Confer. Ser., 2007, 59: 740-744.

[44] Krüger O, Wernicke T, Würfl J, et al. Analysis of material modifications caused by nanosecond pulsed UV laser processing of SiC and GaN[J]. Appl. Phys. A, 2008, 93: 85-91.

[45] Min B G, Kim S I, Lee J M, et al. Fabrication and electrical properties of an AlGaN/GaN HEMT on SiC with a taper-shaped backside via hole[J]. J. Korean Phys. Soc., 2015, 67(4): 718-722.

作者简介：

王宏建(1989—)，男，湖南人，博士，工程师，主要研究方向为半导体材料的激光加工技术与装备。