

激光与光电子学进展

掺铥光纤激光器及其碎石应用:进展与展望

阳优司¹, 李丹^{1*}, 吉恩才^{2**}, 纪孝峰^{3***}, 田兵⁴, 闫平¹, 巩马理¹, 肖起榕¹¹清华大学精密仪器系光子测控技术教育部重点实验室, 北京 100084;²密尔医疗科技(深圳)有限公司, 广东 深圳 518000;³福建医科大学附属三明第一医院, 福建 福州 365000;⁴莱凯医疗器械(北京)有限公司, 北京 101300

摘要 激光自诞生以来就在众多领域中有着广泛应用,激光碎石技术就是其中之一。相比目前激光碎石技术的“金标准”钬激光器,掺铥碎石光纤激光器在近些年不断发展,而且逐步被证明可实现更快的碎石速率与粉末化碎石、产生较小的碎石反推力、允许更高的液体灌溉速率等手术优点,同时整机系统支持免水冷工作、高光电效率运转、全光纤高效耦合以及大幅度体积缩减,因此受到了越来越多的关注。本文从连续性、准连续型和纳秒短脉冲型掺铥光纤激光器三个角度出发,详细总结了掺铥光纤激光器的部分重要研究进展及其在碎石领域的研究,介绍了掺铥光纤激光器用于碎石的优势与原理,并展望了未来研究的方向和挑战。

关键词 激光器; 掺铥光纤激光器; 掺铥连续光纤激光器; 掺铥准连续光纤激光器; 掺铥纳秒短脉冲激光器; 掺铥激光碎石

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221852

Thulium-Doped Fiber Laser and Its Applications in Laser Lithotripsy: Progress and Prospect

Yang Yousi¹, Li Dan^{1*}, Ji Encai^{2**}, Ji Xiaofeng^{3***}, Tian Bing⁴, Yan Ping¹,
Gong Mali¹, Xiao Qirong¹¹Ministry of Education Key Laboratory of Photonics Control Technology, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;²MIL Medical Technology (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China;³Sanming First Hospital Affiliated to Fujian Medical University, Fuzhou 365000, Fujian, China;⁴LAKH Medical Instruments (Beijing) Co., Ltd., Beijing 101300, China

Abstract Laser lithotripsy is one of the many fields in which laser has been used since its inception. The thulium-doped lithotripsy fiber laser has evolved in recent years and has gradually been proven to achieve faster lithotripsy rates with powdered lithotripsy, generate less lithotripsy counter-thrust, allow higher liquid irrigation rates, and other surgical advantages, while the whole system supports water-free operation, high electro-optical efficiency operation, efficient all-fiber coupling, and substantial volume reduction. Therefore the thulium-doped lithotripsy fiber laser has attracted increasing interest. In this paper, some important research progresses of thulium-doped fiber lasers are summarized in detail from three aspects: continuous-wave, quasi-continuous-wave, and nanosecond short-pulsed thulium-doped fiber lasers, and the applications in the field of lithotripsy are introduced. We present the advantages and principles of thulium-doped fiber laser for lithotripsy and look forward to the directions and challenges for future research.

Key words lasers; thulium-doped fiber laser; thulium-doped continuous-wave fiber laser; thulium-doped quasi-continuous-wave fiber laser; thulium-doped nanosecond short-pulsed laser; thulium-doped laser lithotripsy

收稿日期: 2022-06-10; 修回日期: 2022-06-25; 录用日期: 2022-07-05; 网络首发日期: 2022-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(62122040, 61875103, 61905150)

通信作者: *dli@mail.tsinghua.edu.cn; **jec12@tsinghua.org.cn; ***54jixiaofeng@163.com

1 引 言

激光碎石技术研究始于 20 世纪 60 年代,80 年代后获得迅速发展,重要原因之一是激光光源的飞速发展,使其能够非常方便地达到很好的治疗效果。相比其余的治疗手段,如利用内镜取石、超声波碎石、气压弹道碎石等技术,激光碎石可以治疗的结石种类更多、所需的镜径更小、造成的组织损伤也更低。激光碎石技术的发展受益于激光器的发展,变革性的激光碎石技术本质是发展了更适合的光源。起初的激光碎石采用的激光各有缺点,非脉冲式二氧化碳激光器热损伤大、脉冲染料激光器治疗的结石种类有限、钕激光器精确性较差。直至 20 世纪末,钬激光(增益介质为 Ho:YAG,称为 Ho:YAG 激光器)受到了人们的关注,它利用光热效应实现碎石,并且可以脉冲模式工作,这些优点使得钬激光可以用于治疗所有类型的结石,激光碎石技术因此得到迅速发展。之后,得益于工作波长与系统结构,掺铥光纤激光器(Thulium Fiber Laser,简称 TFL)具有高结石烧蚀速率、高灌注率、小碎石、小反推以及可风冷的优势,被认为是将取代 Ho:YAG 激光器的下一代激光碎石器。目前钬激光器依然是激光碎石的金标准,但掺铥碎石光纤激光器已逐步成为临床研究中的新兴光源。

激光碎石技术,与其采用的激光光源的输出中心波长、功率、线宽、结构等特性密切相关。与医疗用 Ho:YAG 激光器有连续模式和脉冲(百微秒级)模式类似,目前可以用于碎石的掺铥光纤激光器主要分为连续激光器和准连续激光器两类。连续激光器指输出连续光的激光器,激光器工作在连续稳定状态,这种情况下,如果不调节激光器输出功率,激光器输出的功率在每个时刻都不变。相应地,准连续激光器是一种脉冲激光器,输出的脉宽比一般的脉冲激光器大,是在连续激光器的基础上利用调制电路控制输出状态,实现 ms 级脉冲,峰值功率可以达到平均功率的数倍,通过

模拟控制或内部脉冲发生器进行调制,可以调整脉冲形状,也可以在脉冲激光器和连续激光器之间切换。连续激光器和准连续激光器不仅可以用于碎石,也可以用于软组织消融。

本文主要回顾连续掺铥激光器和准连续掺铥激光器的发展历史,介绍至今已发表的部分重要报道和研究结果。其中:连续掺铥激光器分为高功率激光器、可调谐激光器和窄线宽激光器三节,此外,由于放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission,简称 ASE)超连续谱光源的特性在医疗领域亦具有发展前景,因此纳入为第四节;准连续掺铥激光器单独一节;同时,对短脉冲掺铥光纤激光器的发展历史也进行了回顾,展望其用于碎石的应用前景。此外,在激光器的发展基础上,结合碎石技术需求,分析了掺铥光纤激光器相对 Ho:YAG 激光器的特点和优势,并展望了未来研究的方向和挑战。

2 连续掺铥光纤激光器发展概述

2.1 高功率掺铥连续光纤激光器发展总览

掺铥连续光纤激光器的输出功率一直是研究者关注的一个重点,近些年得到了飞速的提升,实际上高功率始终是各种激光器所追求的指标之一。1988 年,英国南安普敦大学 Hanna 等^[1]首次报道了掺铥单模光纤激光器,阈值为 21 mW,斜率效率为 13%,并且可以在 1880~1960 nm 范围内输出激光。随着光纤制作工艺的不断改善和光纤激光技术的不断发展,掺铥连续光纤激光器如今已实现几百瓦^[2]甚至上千瓦^[3]输出。

决定掺铥激光器输出功率的因素很多,比如泵浦功率,从最初的几十瓦,发展到如今的一千多瓦。此外,不同的激光器结构获得的转换效率不同,转换效率越高,一定泵浦功率下的输出功率也会越大。一些重要的高功率研究结果列在表 1 中。1998 年,曼彻斯特大学激光光子学课题组的 Jackson 等^[4]报道了一种二极管包层泵浦掺铥光纤激光器,在波长 2000 nm 处产生了功率为 5.4 W 的连续波输出,斜率效率为 31%,

表 1 近 20 年主要高功率掺铥连续光纤激光研究

Table 1 Main researches on high power thulium-doped continuous-wave fiber laser in recent 20 years

Year	Central wavelength /nm	Maximum output power /W	Pumped power /W	Slope efficiency /%	All-fiber structure
2002 ^[5]	1940	7	40	—	No
2006 ^[6]	1991	19.2	38.2	72	No
2006 ^[6]	1851	12.1	23.1	59	No
2007 ^[7]	2050	263	~511	59	No
2009 ^[2]	2040	608	>1100	54	No
2009 ^[8]	2040	309	500	61.8	No
2010 ^[3]	2045	1000	>1900	53.2	Yes
2014 ^[9]	1908	227	443	54.3	Yes
2015 ^[10]	2000.3	342	>600	56	Yes
2016 ^[11]	1930	327.5	570	57.4	Yes
2020 ^[12]	1980.89	530	>900	50	Yes

调整光纤长度,可以实现 1880~2033 nm 之间波长调谐功能。2002 年,南安普敦大学光电子研究中心的 Clarkson 等^[5]共同报道了一种 1860~2090 nm 波长调谐的包层泵浦掺铥光纤激光器。两者采用的泵浦结构有所不同:曼彻斯特大学激光光子学课题组报道的激光器所采用的是光学多路复用元件将 16 个二极管激光器泵浦合束,并由此提供最大 24.1 W 的泵浦功率,在 1940~2010 nm 之间可获得大于 4 W 的功率;南安普敦大学光电子研究中心采用的是两个波长为 787 nm 的偏振耦合二极管棒,实现了 40W 的泵浦功率,获得的掺铥光纤激光器在 1940 nm 处最大输出功

率为 7 W,在 1870~2040 nm 范围内输出功率大于 5 W。可以看到,在最初期,掺铥光纤激光器的输出功率均未达到 10 W,限制功率增长的主要因素是泵浦功率太低,只有几十瓦,而且转换效率也较低,但它仍然为医疗工作者提供了一项新技术,若能进一步提高泵浦功率,就可以获得更大的掺铥光纤激光输出,满足医疗领域的应用需求。

2006~2009 年,研究者们利用包层泵浦、多级泵浦等方式不断提升泵浦注入能力^[6-8]。图 1 为包层泵浦结构掺铥光纤激光器。图 2 为 2009 年 Moulton 等^[8]报道的一种掺铥光纤激光器,将掺铥光纤激光器的功率提

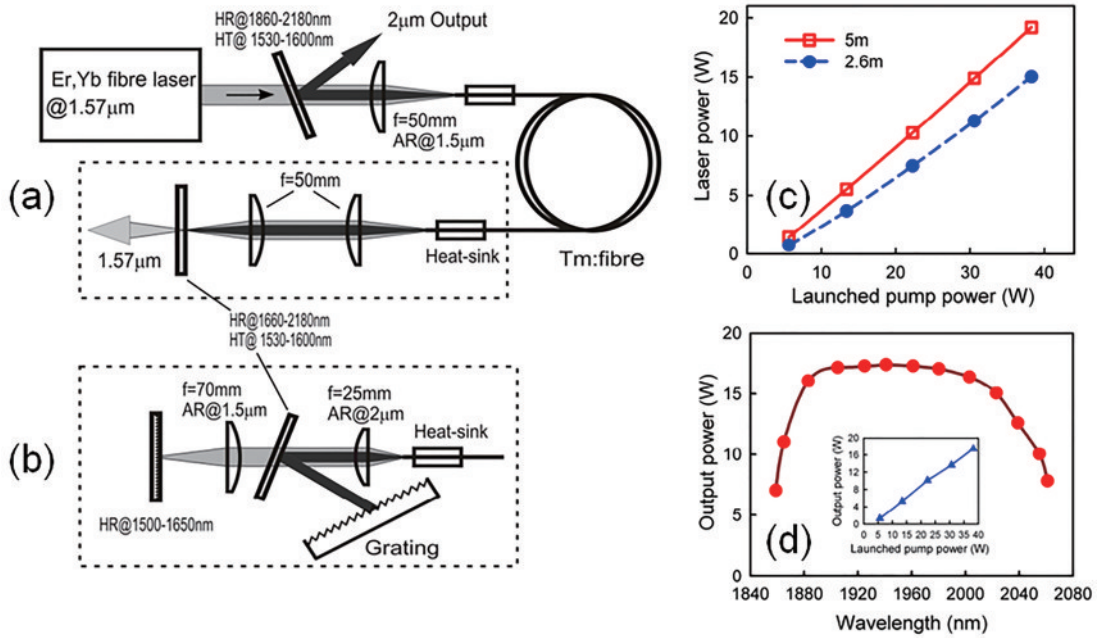


图 1 包层泵浦结构掺铥光纤激光器。(a)激光器结构;(b)用于调谐的外腔;(c)输出与泵浦功率曲线;(d)包层泵浦 2.6 m 光纤时输出功率与工作波长的关系(插图:1941 nm 输出与泵浦功率关系)^[6]

Fig. 1 Cladding pumped thulium-doped fiber laser. (a) Schematic of laser; (b) external cavity for tunable operation; (c) output power versus launched pump power; (d) output power versus operating wavelength for cladding pumped 2.6 m fiber (inset: output power at 1941 nm versus launched pump power)^[6]

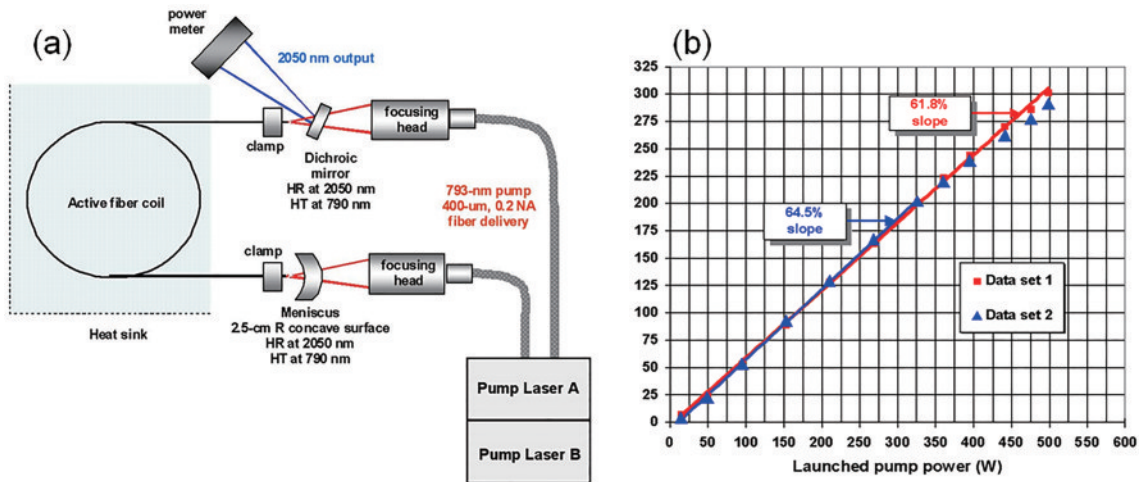


图 2 输出功率 300 W 的掺铥光纤激光放大器。(a)激光器结构;(b)输出功率与泵浦功率关系^[8]

Fig. 2 Thulium-doped fiber laser amplifier with output power of 300 W. (a) Schematic of laser; (b) output power versus pump power^[8]

升到数百瓦级。单一振荡器或谐振腔直接输出功率有限,采用种子源主振荡功率放大技术方案可以提高光纤激光器的输出功率,更容易获得数百瓦乃至上千瓦的高功率 2 μm 波段连续单频激光输出^[13]。2009 年, Goodno 等^[2]报道了一种单模单频掺铥光纤激光放大器(图 3),通过四级放大实现了 608 W 的单模激光,增益为 53 dB,斜率效率为 54%,光束质量 $M^2=1.05$ 。2010 年, Ehrenreich 等^[3]首次报道了一种输出功率达到 1000 W 以上的掺铥连续光纤激光器(图 4),采用二级放大结构,将泵浦功率提升到接近 2000 W,在 2045 nm 处实现了全光纤结构的千瓦输出。2014 年,本文作者团队报道了一种二极管泵浦的掺铥双包层石英光纤激光器^[9],在 1908 nm 处可提供 227 W 的功率,斜率效率为

54.3%,光-光效率为 51.2%,为当时该波长处的最高输出。2015 年,北京工业大学 Liu 等^[10]报道了一种全光纤主振荡功率放大器(MOPA)结构的高功率窄线宽掺铥光纤激光器,在中心波长 2000.3 nm 处输出功率为 342 W。2016 年,国防科技大学 Yin 等^[11]报道了一种基于 MOPA 结构的 2000 nm 波段高功率、波长可调谐的全光纤掺铥光纤激光器,在 1930 nm 处达到最大平均功率 327.5 W,斜率效率为 57.4%。2020 年,华中科技大学武汉光电国家研究中心团队报道了一种全光纤结构连续掺铥光纤激光器(图 5),窄线宽掺铥种子源经过一级放大后,最高输出功率达到 530 W,斜率效率为 50%^[12]。

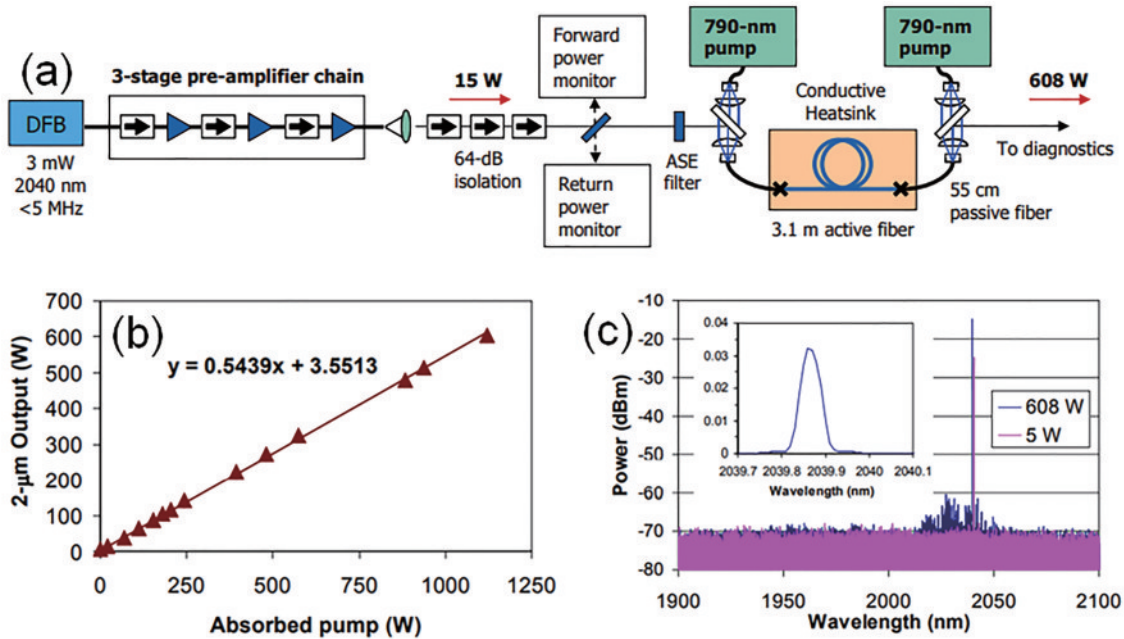


图 3 600 W 单模单频掺铥光纤激光放大器。(a)激光器放大器结构;(b)单频放大器输出功率曲线;(c) 608 W 输出时的光谱(插图: OSA 分辨率极限为 0.05 nm)^[2]

Fig. 3 600 W single mode single frequency thulium-doped fiber laser amplifier. (a) Schematic of laser amplifier; (b) output power curve of single frequency amplifier; (c) output spectrum at 608 W (inset: OSA resolution limit of 0.05 nm)^[2]

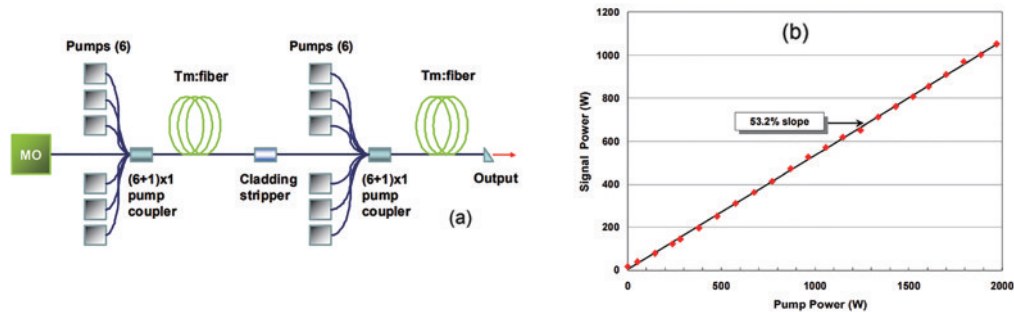


图 4 1000 W 掺铥全光纤激光器。(a)激光器结构;(b)输出功率与泵浦功率关系^[3]

Fig. 4 1000 W thulium-doped all-fiber laser. (a) Schematic of laser; (b) output power versus pump power^[3]

目前,高功率掺铥连续光纤激光器已经突破了千瓦级,为设计高功率准连续激光器,包括激光器结构、材料和参数等提供了丰富的经验和基础。但全球商用

产品输出功率基本都低于 200 W,价格昂贵、代表性批量应用较少,尚处于早期商用阶段。同时国内尚未有突破千瓦功率的正式报道,功率局限在数百瓦。因此,

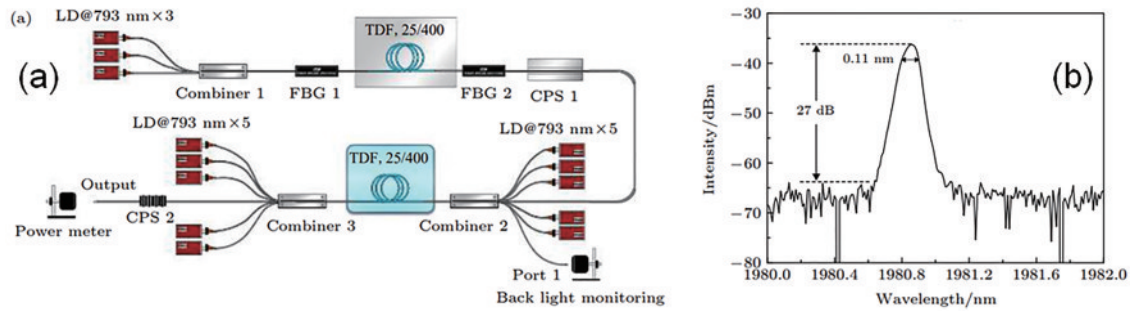


图 5 530 W 全光纤掺铥光纤激光器。(a)激光器结构;(b)输出 500 W 时的光谱^[12]

Fig. 5 530 W thulium-doped fiber laser with all-fiber structure. (a) Schematic of laser; (b) spectrum with the output power of 500 W^[12]

掺铥连续光纤激光器继续提升和发展的空间很大,有待进一步研发。

2.2 可调谐掺铥连续光纤激光器

可调谐激光器是指在一定范围内可以连续改变激光输出波长的激光器。实现激光波长调谐的原理大致有三种:1)通过某些元件(如光栅)改变谐振腔低损耗区所对应的波长来改变输出激光的波长;2)通过改变外界参数(磁场、温度等)使激光跃迁的能级移动;3)利用光的非线性效应实现波长的变换和调谐。在掺铥光纤激光器中,应用最广的是第一种调谐方法,应用元件以衍射光栅和可调谐滤波器为主。

上节高功率激光器部分涉及了很多可调谐激光器,实际激光器的设计既要求保证功率需求,也会要求满足调谐等需求。主要的研究结果如表 2 所示。1998-

2006 年,研究者们将掺铥光纤激光器的调谐范围拓展到 200 nm 以上^[4-6],但是输出功率均在 20 W 以下。2010 年,中佛罗里达大学团队报道的掺铥光纤激光器可以实现从 1927~2097 nm 范围内调谐^[14],由于采用功率放大结构,因此输出功率在 1967 nm 达到最大 218 W。2012-2019 年,研究者们陆续报道了多种掺铥可调谐光纤激光器(图 6^[15]为 2012 年报道的一种可调谐 2 μm 掺铥光纤激光器),其中 2017 年南安普敦大学光电研究中心团队实现了 1750 nm 以下的调谐输出^[16],所采用的方法是将 ASE 滤波引入铥放大器中,从而在 1750 nm 以上波段引入高损耗,避免寄生振荡。以上介绍的调谐掺铥光纤激光器都是应用衍射光栅实现波长调谐,此外,还可以利用可调谐滤波器实现调谐。

表 2 近 20 年主要的可调谐掺铥连续光纤激光器研究

Table 2 Main researches on tunable thulium-doped continuous-wave fiber laser in recent 20 years.

Year	Wavelength /nm	Tunable range /nm	Tuning method	All-fiber structure	Maximum output power /W
2002 ^[5]	1860-2090	230	Diffraction grating	No	7
2006 ^[6]	1859-2061	202	Diffraction grating	No	19.2
2006 ^[6]	1723-1973	250	Diffraction grating	No	12.1
2010 ^[14]	1927-2097	170	Diffraction grating	No	218
2012 ^[15]	1895-2109	214	Diffraction grating	No	62
2013 ^[17]	1820-2075	255	Tunable fiber grating filter	Yes	0.03
2015 ^[19]	1966-2001	35	Tunable bandpass filter	Yes	>250
2016 ^[12]	1910-2050	140	Tunable bandpass filter	Yes	327.5
2017 ^[16]	1679-1992	313	Diffraction grating	No	0.041
2019 ^[21]	2000-2172	172	Diffraction grating	No	0.53
2020 ^[20]	1930-2000	70	DMD + fixed grating	No	3.16×10^{-5}

2013 年,南安普敦大学团队利用光纤光栅滤波器实现了从 1820~2075 nm 的宽带调谐^[17],输出功率最大为 30 mW。2014 年,国防科技大学 Yin 等^[18]通过在种子源中加入可调谐滤波器,实现了 1940~2070 nm 的调谐范围,最大输出功率达到 115 W。2015 年,国防科技大学光电科学与工程学院团队报道了一种采用单片掺铥光纤放大器的近 2000 nm 宽可调谐窄带超荧光

源^[19],其输出功率超过 250 W,种子源的光谱可在 1930~2030 nm 的范围内调谐,被放大到 250 W 以上输出,调谐范围为 35 nm(1966~2001 nm)。2016 年,国防科技大学 Yin 等^[11]将可调谐种子功率提升至近 5 W,经过一级放大直接输出 327.5 W 的 1930 nm 激光,如图 7 所示,1910~2050 nm 范围内激光输出功率均能超过 270 W,各谱线的线宽均小于 0.3 nm。

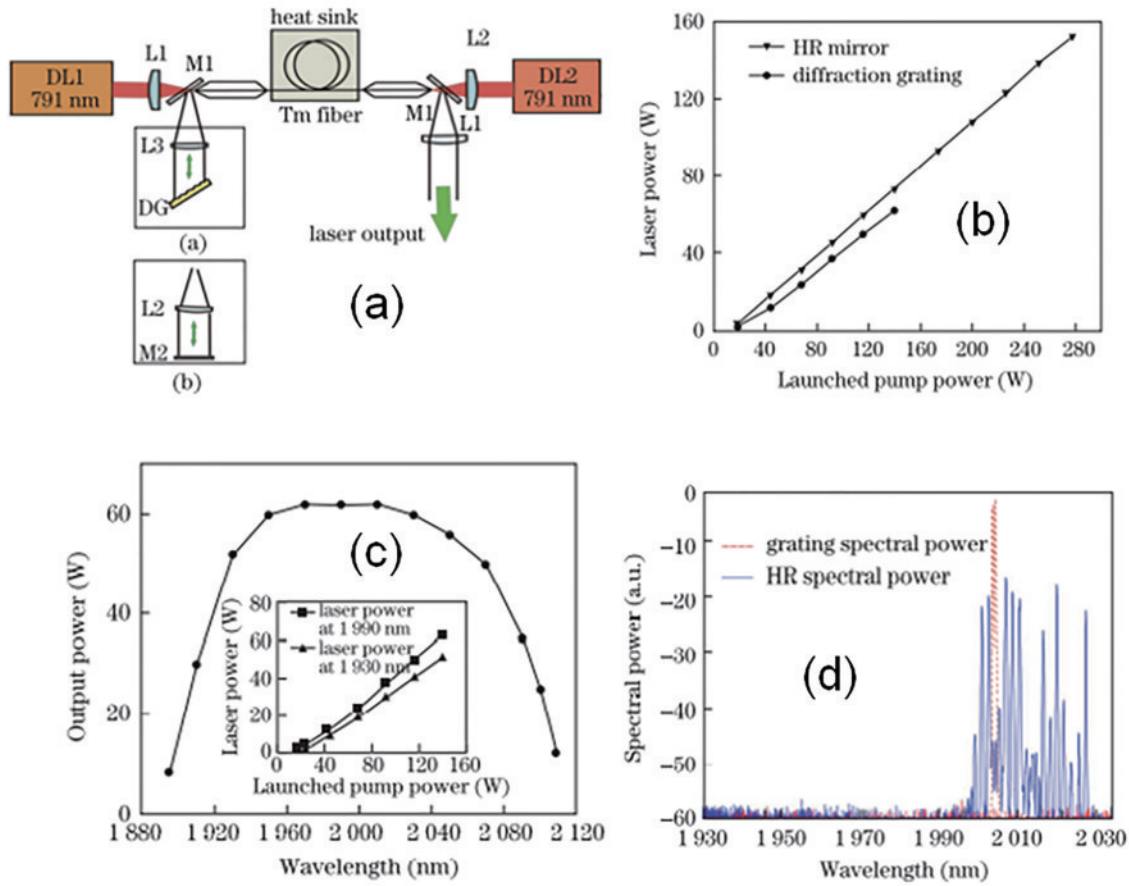


图 6 可调谐 2 μm 掺铥光纤激光器。(a)激光器结构(内部标出的 a 为调谐结构, b 为自由运行结构);(b)输出功率和泵浦功率的关系;(c)调谐波长下输出功率(插图:1930 nm 和 1990 nm 输出和泵浦功率的关系);(d)调谐结构和自由运行结构的输出光谱^[15]
 Fig. 6 Tunable thulium-doped fiber laser at 2 μm. (a) Schematic of laser (internally marked a is the tuning structure and b is the free-running structure); (b) output power versus pump power; (c) output power of the tunable laser versus operating wavelength (inset: output power at 1930 and 1990 nm versus launched pump power); (d) spectral output of the grating-based laser and the free-running structures^[15]

利用光学元件改变输出波长不只局限于以上两种手段,2020年,中央民族大学理学院团队报道了一种基于数字微镜阵列调谐的掺铥光纤激光器,通过空间调制数字微镜器件(DMD)上的反射图案实现了

1930~2000 nm 范围内稳定、快速和灵活的激光波长调谐,调谐精度为 0.1 nm^[20],1940 nm 处输出功率不低于 0.135 mW,这类低功率、高精度的调谐技术可应用于激光光谱和医疗。

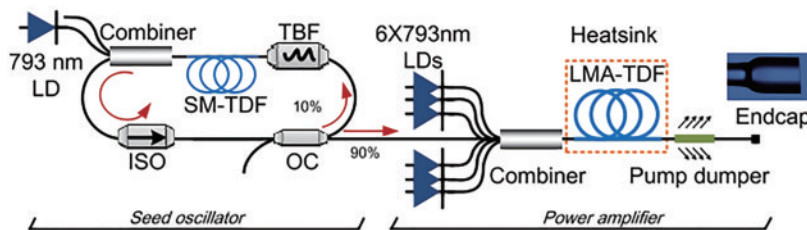


图 7 高功率可调谐铥光纤激光器研究方案^[11]
 Fig. 7 Research scheme of high power tunable thulium fiber laser^[11]

可调谐激光器可以实现只用一台激光器获得多种波长,有助于调节波长、选取最佳波长。目前国内外可调谐掺铥激光器都可以覆盖 1940 nm 波长,并且输出功率可以达到碎石要求,这意味着在碎石应用上,完全不会因此导致碎石效果受到影响。同时有研究通过肾结石激光碎石术对比证明了 1940 nm 激光(20 °C 水的

吸收峰)效能与 1908 nm 激光(70 °C 水的吸收峰)无显著差异^[22],因此在医械制造中完全可以考虑集成应用难度更低的 1940 nm 附近激光器。

2.3 窄线宽掺铥连续光纤激光器

激光器的线宽指的是激光器输出光在光谱上的宽度。窄线宽激光器晚于其他种类的光纤激光器的研

究,近 20 年开始迅速发展,1996 年,Chollet 等^[23]报道了一种掺铥光纤激光器,实现的线宽为 0.06 nm,为掺铥激光器的窄线宽研究提供了参考,目前掺铥光纤激光器亦可实现 pm 级线宽,结果整理在表 3 中。

2010 年,复旦大学光学科学与工程系微纳光子结构教育部重点实验室团队报道了一种使用布拉格光栅对的高功率掺铥光纤激光器,实现了在 1990 nm 输出波长下 2.2 pm 的线宽,输出功率为 113 W^[24]。2014 年,西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室团队报道了一种掺铥双包层光纤 MOPA 系统,输出光谱中心位于 1996.7 nm,线宽不大于 120 pm^[25]。2016 年,北京工业大学激光工程研究院的国家产学研

激光技术中心团队报道了一种 342 W 全光纤结构窄线宽连续掺铥光纤激光器(图 8),中心波长为 2000.3 nm,3 dB 光谱线宽为 90 pm^[26]。2019 年,北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室光波技术研究所团队报道了一种基于保偏掺铥光纤饱和吸收体的 2000 nm 波段超窄线宽光纤激光器,采用基于频率噪声的线宽测量方法,测得 0.01 s 测量时间下的线宽为 300 Hz,0.1 s 测量时间下的线宽约为 3 kHz,输出功率最大可达 6 W 以上^[27]。2022 年,Cook 等^[28]报道了一种窄线宽 80 W 可调谐掺铥光纤激光器,调谐范围是 1920~2010 nm,在输出单纵模的情况下,线宽为 0.00129 pm。

表 3 近 10 年主要的窄线宽掺铥连续光纤激光器研究

Table 3 Main researches on narrow-linewidth thulium-doped continuous-wave fiber laser in recent 10 years

Year	Central wavelength /nm	Linewidth /pm	Output power /W
2010 ^[24]	1990	2.2	113/279
2014 ^[25]	1996.7	<120	10.5
2016 ^[26]	2000.3	90	342
2019 ^[27]	1942.03	3.86×10^{-6} (single longitudinal mode)	>6
2021 ^[28]	1920~2010 (tunable laser)	1.29×10^{-3} (single longitudinal mode)	80

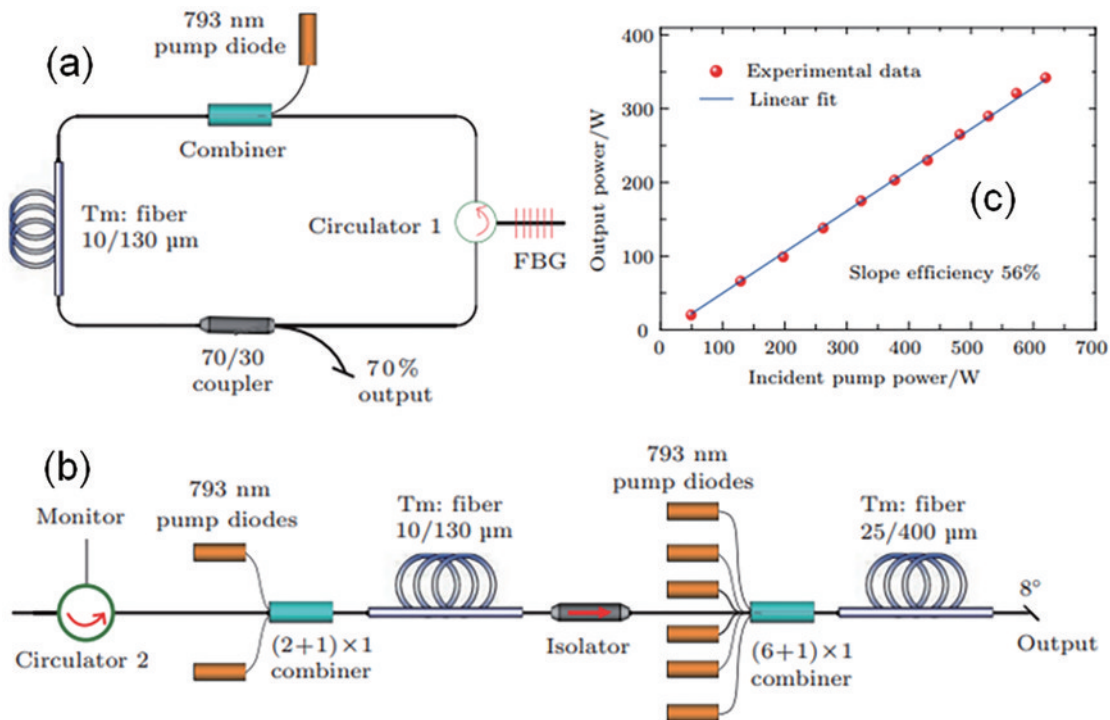


图 8 342 W 全光纤结构窄线宽连续掺铥光纤激光器。(a)种子源结构;(b)两级光纤放大结构;(c)输出功率随泵浦功率的变化^[26]
Fig. 8 342 W narrow linewidth continuous-wave thulium-doped fiber laser with all-fiber structure. (a) Schematic setup of the seeder; (b) schematic setup of the two-stage amplifiers; (c) output power versus incident pump power^[26]

目前的掺铥光纤激光器线宽达到的 pm 级,已经大大超过 nm 级的需求,激光线宽不再成为影响碎石效果的限制因素。通过结构设计,掺铥光纤激光器已完全可以满足医疗需求的功率、调谐范围以及线宽要

求,实现医械产品商用定制化研发及生产。

2.4 掺铥光纤 ASE 连续光源

自发辐射产生的某种频率下的光子,经过增益介质,引起了受激辐射而得到放大,获得了更大的输出,

这个过程就是 ASE。利用 ASE 制作的光源,与窄线宽激光器相反,具有比较宽的带宽,在一些领域有重要的应用。利用掺铥光纤制作的 ASE 连续光源,在近 15 年得到了快速发展。结果整理在表 4 中。

表 4 近 15 年主要的掺铥 ASE 连续光源研究

Table 4 Main researches on thulium-doped ASE continuous-wave source in recent 15 years

Year	Central wavelength /nm	Linewidth / nm	Maximum output power /W
2008 ^[29]	1960	>100	>11
2010 ^[30]	1890	80	0.06
2015 ^[31]	1960.7	45	20.7
2015 ^[31]	1948.2	50	25.2
2017 ^[32]	1860	170	>0.035
2020 ^[33]	1850	>155	0.09

2008 年,南安普敦大学光电子研究中心团队报道了一种单端输出的宽带掺铥超荧光光纤光源^[29],光谱范围为 1650~2100 nm,带宽超过 100 nm,

1930~1988 nm 波段的输出功率超过 11 W,随着输出功率变大,光谱出现变窄的趋势。2010 年,Yu 等^[30]报道了一种掺铥石英光纤 ASE 光源的理论模型,研究了 ASE 光谱功率与光纤长度和泵浦功率的关系,在研究所用的泵浦功率和纤芯参数下,得到了最佳的光纤长度和输出功率。2015 年,本文作者团队报道了一种大功率掺铥超荧光光纤光源^[31](图 9),前向传播的 ASE 在 1960.7 nm 的中心波长下得到最大的输出功率为 20.7 W,光谱带宽为 45 nm,反向传播的 ASE 在 1948.2 nm 的中心波长下得到的最大输出功率为 25.2 W,光谱带宽为 50 nm。2017 年,斯旺西大学工程学院团队报道了一种掺铥光纤 ASE 宽带光源^[32],将短波段(1800~1900 nm)和长波段(1900~1970 nm)的两种 ASE 光源耦合,得到了更宽光谱(1800~1970 nm)的 ASE 光源,输出功率超过 0.035 W。2020 年,Aubrecht 等^[33]报道了一种全光纤结构掺铥 ASE 宽带光源,输出波长在 1850 nm 附近,输出功率在 90 mW 以上,并且可以实现超过 155 nm 的带宽。

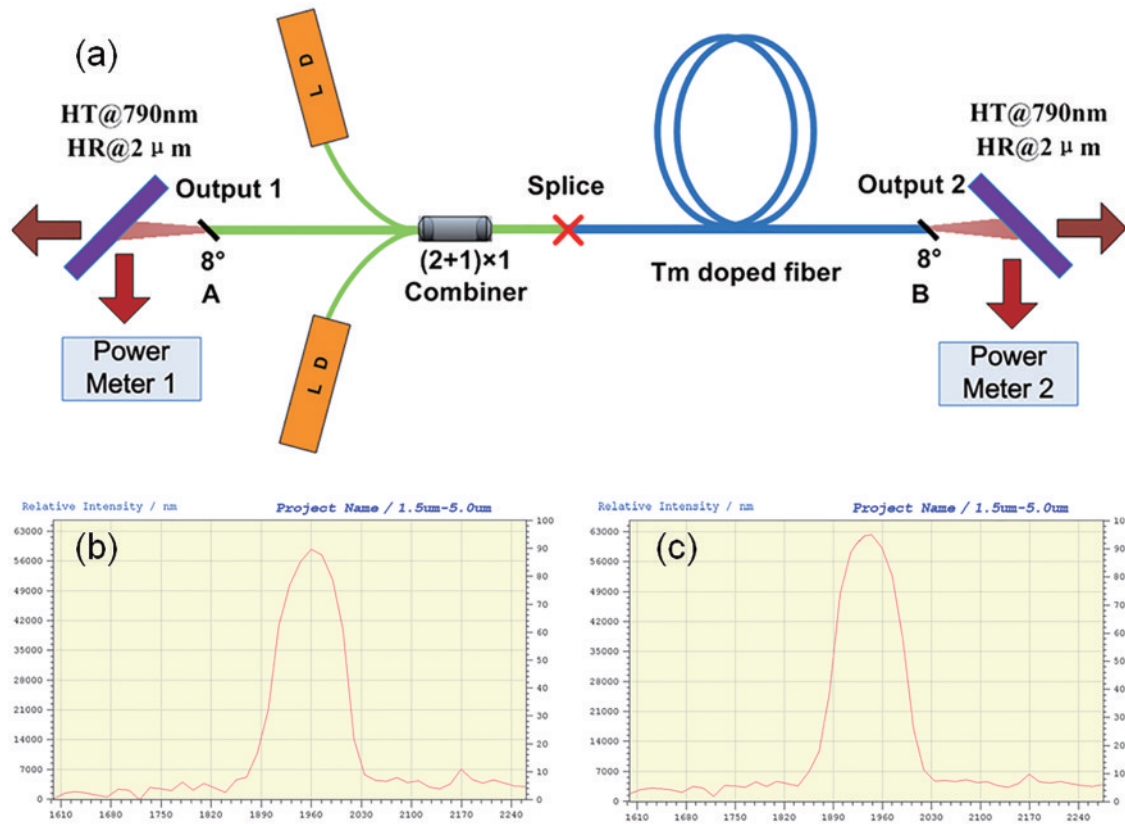


图 9 大功率掺铥超荧光光纤光源。(a)光源结构;(b)同向传播的 ASE 光谱;(c)反向传播的 ASE 光谱^[31]

Fig. 9 High-power thulium-doped superfluorescent fiber source. (a) Schematic of light source; (b) spectrum for the copropagating ASE; (c) spectrum for the counterpropagating ASE^[30]

掺铥光纤的 ASE 光源研究相对较少,波长集中在 1940 nm 附近,输出功率在百纳米范围内下降较缓,相比窄线宽激光器,ASE 光源的功率在频率上更分散,特性也更复杂。此外,ASE 光源具有宽谱特性,使其

可望结合扫频技术,获取层析图像^[34],在临床医疗诊断应用中发挥更大价值,促进诊疗一体化的铥光纤激光设备发展。

3 准连续掺铥光纤激光器发展概述

准连续激光器也是一种脉冲激光器,输出的脉宽通常为毫秒级,最低为几十微秒。和纳秒、皮秒、飞秒激光器等短脉冲激光器具有超短脉冲、较低平均功率和极高的峰值功率不同,准连续激光器的峰值功率通常只有其平均功率的几倍至几十倍。准连续激光器的性能与连续激光器密切相关,因为准连续激光器是在连续激光器的基础上利用调制方式实现,获得比连续功率更高的峰值功率,主要包括泵浦调制技术与外调制技术两种,其中泵浦调制技术更为常用。目前发展比较成熟的连续激光器为准连续激光器的研究奠定很好的基础,连续激光器的结构、功率、线宽、调谐范围、光束质量等特性都可以被准连续激光器继承。图 10 是激光器在连续模式和准连续模式下的输出信号对比图。

准连续激光器从 20 世纪末开始发展起来,准连续掺铥光纤激光器则从近 10 年开始被人们关注,很快凭借着峰值功率更高、对周围组织热影响更小,以及脉冲形状可调等优势,在医疗领域中得到了很多的研究和应用。特别是在泌尿外科结石治疗领域,准连续掺铥光纤激光器在激光波长、输出功率配置、时域特性、光纤传导、综合性价比等方面都是对传统设备技术的一次全面革新,得到国内外专家高度关注。

2015 年,Pal 等^[35]报道了一种用于软组织手术的

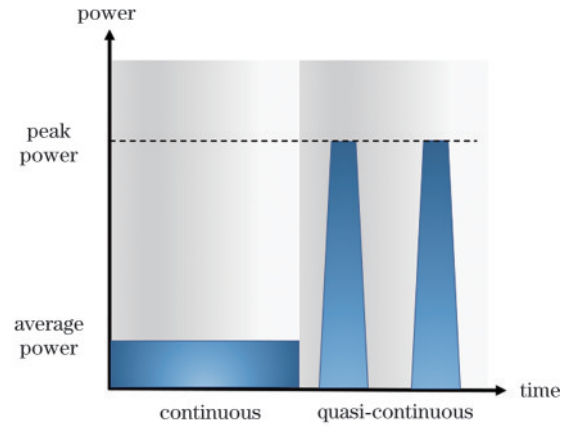


图 10 准连续模式和连续模式下的输出信号
Fig. 10 Output signal in quasi-continuous-wave mode and continuous-wave mode

1950 nm 全光纤激光器,针对准连续激光器的占空比和脉宽进行参数优化,得到了 4.91 W 的输出功率。2016 年,Sypin 等^[36]报道了一种新的紧凑型铥光纤激光器,以毫秒脉冲模式工作,峰值功率为 500 W,平均功率为 50 W,脉冲能量为 5 J。2017 年,Pal 等^[37]报道了医用连续和准连续全光纤铥激光器,在准连续波工作模式下,峰值功率为 16 W,脉冲能量范围达到 400 μ J~5 mJ。2018 年又报道了一种用于肾结石碎裂的 1940 nm 准连续掺铥光纤激光器^[38](图 11),以 400 Hz~1 kHz 的重复频率工作,脉宽为几十微秒到百

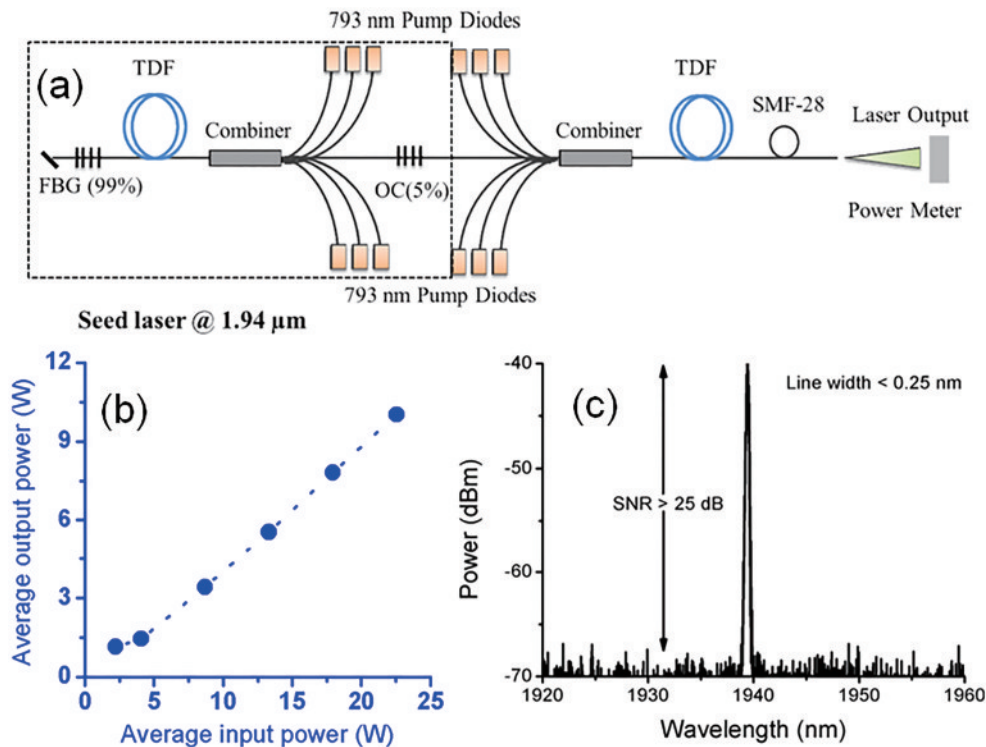


图 11 1940 nm 准连续掺铥光纤激光器。(a)激光器结构;(b)793 nm 泵浦时的输出功率;(c) 10 W 平均功率时的输出光谱^[38]
Fig. 11 1940 nm quasi-continuous-wave thulium-doped fiber laser. (a) Schematic of the laser; (b) output power versus pump power at 793 nm; (c) output spectrum at the average power of 10 W^[38]

微秒,峰值功率为 250 W,平均功率为 10 W,脉冲能量为 10~25 mJ,适用于肾结石清除。2020年,Limongelli 等^[39]报道了一种准连续掺铥光纤激光器(图 12),采用

7 个 793 nm 光纤耦合泵浦的二极管阵列作为泵浦源,输出功率为 564 W。

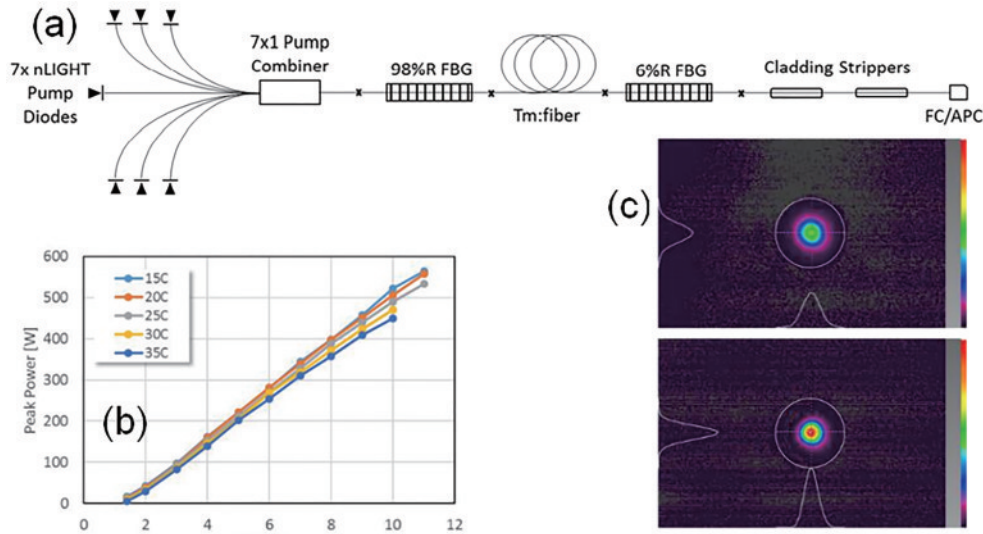


图 12 564 W 准连续掺铥光纤激光器。(a)激光器结构;(b)10 Hz、5% 占空比时的峰值输出功率;(c)近场(上)和远场(下)光束^[39]
 Fig. 12 564 W quasi-continuous-wave thulium-doped fiber laser. (a) Schematic of laser; (b) peak output power at 10 Hz and 5% duty cycle; (c) near-field (top) and far-field (bottom) beam profiles^[39]

目前国内外均已实现了准连续掺铥光纤激光器的产品化(图 13),本文比较了 IPG 公司、Futronics 公司、nLight 公司以及国内莱凯医疗的四种产品,具体参数整理在表 5 中。IPG 公司的 TLM-50/500-QCW 产品,输出波长为 1943 nm,调谐范围为 1880~2100 nm,平均功率为 50 W,峰值功率为 500 W,最大脉冲能量为 5 J,脉宽在 0.2~50 ms 可调,带宽控制在 2 nm 以内,重复频率最大 2.5 kHz。Futronics 公司的 IFL QCW 准

连续激光器模组,可以在脉冲和连续波模式下运行,准连续峰值功率为 650 W,最大平均功率为 150 W,脉冲能量为 0.05~18 J,脉宽为 0.1~50 ms,重复频率最大为 3 kHz,采用水冷模式。nLIGHT 公司的 TFL-60 产品,输出波长范围为 1930~1950 nm,最大输出功率达到 600 W,最大平均功率为 60 W,最大脉冲能量为 7 J,脉宽 0.05~20 ms 范围可调,带宽为 10 nm,重复频率最大为 10 kHz。国内密尔医疗于 2021 年开发出



图 13 三种准连续掺铥光纤激光器产品。(a) IPG 公司 TLM-50/500-QCW;(b)Futronics 公司 IFL QCW 650 准连续激光器模组;
 (c) MIL 科技公司的 MIRON150/750 激光器样机
 Fig. 13 Three quasi-continuous-wave thulium-doped fiber laser products. (a) TLM-50/500-QCW from IPG; (b) IFL QCW 650 from Futronics; (c) MIRON150/750 laser prototype from MIL MED TECH

表 5 准连续掺铥光纤激光器典型产品参数

Table 5 Parameters of several typical products for quasi-continuous-wave thulium-doped fiber laser

Index	IPG	Futronics	nLight	MIL MED TECH
Name of product	TLM-50/500-QCW	IFL QCW650	TFL-60	MIRON150/750
Central wavelength /nm	1943	1940±20	1940±10	1940±10
Maximum mean power /W	50	150	60	150
Maximum peak power /W	500	650	600	750
Maximum pulse energy /J	5	18	7	48
Pulse width /ms	0.2-50	0.1-50	0.05-20	0.1-400
Bandwidth /nm	<2	<1	10	<1
Repetition frequency /Hz	0-2500	1-3000	1-10000	1-5000
Cooling mode	Air cooling	Water cooling	Air cooling	Air cooling

MIRON 产品激光样机,输出波段为 1930~1950 nm,最大平均功率超过 150 W,峰值功率最大可以达到 750 W,脉宽 0.1~400 ms 范围可调,重复频率最大为 5 kHz。

准连续掺铥光纤激光器发展时间不长,但在连续掺铥光纤激光器迅速发展和研究的基础上,准连续掺铥光纤激光器获得了飞速发展,形成了成熟的商用产品,不同公司的技术指标各有优劣,综合性能上逐步满足目标应用的具体需求。

4 纳秒短脉冲掺铥光纤激光器发展概述

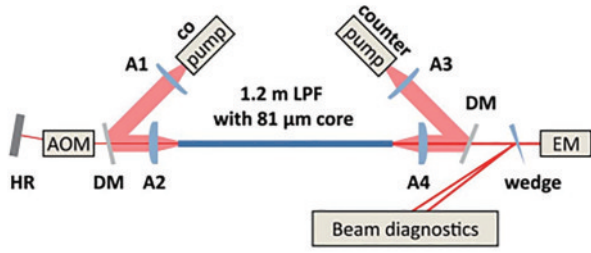
纳秒短脉冲掺铥光纤激光器输出脉冲具有更高的峰值功率,可达数千瓦甚至数十千瓦以上,可以超高传统的钕激光器峰值功率。本节重点介绍了纳秒短脉冲掺铥光纤激光器在近些年的部分重要报道或产品。2007年,Eichhorn等^[40]报道了输出中心波长在 1983 nm 处的短脉冲激光器,脉宽为 41 ns,峰值功率达到 6.6 kW,平均功率为 30 W,重复频率为 111 kHz,单脉冲能量达到 0.27 mJ。2010年,中佛罗里达大学团队报道的短脉冲掺铥光纤激光器^[41],平均输出功率为 6.5 W,重复频率为 20 kHz,中心波长 1992 nm,但脉冲

能量为 0.325 mJ,峰值功率为 2.6 kW。2013年,Stutzki等^[42]使用芯径 81 μm 的大间距光纤作为增益介质,如图 14 所示,采用双端泵浦结构,在重复频率为 13.9 kHz 下获得了脉宽 15 ns、峰值功率 150 kW、平均功率达到 33 W、单脉冲能量为 2.4 mJ、中心波长为 2013 nm 的激光输出,也是目前单模运转的掺铥光纤振荡器输出的最大脉冲能量。2015年,国防科技大学 Li 等^[43]也成功研发了短脉冲掺铥激光器,单脉冲能量接近 1 mJ,峰值功率达到 10 kW,脉冲宽度为 100 ns。2018年,美国 Cybel LLC 公司基于 iXblue 的单模铥光纤(5 μm 芯径)研发的短脉冲掺铥光纤激光器^[44]能够实现 100 kHz 高重复频率下 2.5 kW 峰值功率的 6 ns 激光输出,并推出了相关脉冲激光产品。表 6 中列出了更多相关研究情况。2018年,波兰军事科技大学 Grzes 等^[45]对种子单元进行优化设计,基于 150 ns 脉冲 1550 nm 激光纤芯泵浦铥光纤振荡器,增益开关获得线宽近 2 nm 的 2000.2 nm 激光输出,然后经过 25/250 μm 双包层铥光纤放大获得平均功率 16 W@25 kHz、单脉冲能量 0.64 mJ、峰值功率超过 35.6 kW@18 ns 的 2000.2 nm 脉冲激光输出。此外,采用光子晶体光纤也可增大模场直径,能更有效地提高峰值功率,但很难实现全光纤结构。2021年,国防科技大学研究

表 6 纳秒短脉冲掺铥光纤激光器典型研究参数

Table 6 Typical research parameters of nanosecond short-pulsed thulium-doped fiber laser

Year	Central wavelength /nm	Mean power /W @ repetition frequency /kHz	Monopulse energy /mJ	Peak power /kW@ pulse width /ns
2007 ^[40]	1983	30@111	0.27	6.6@41
2010 ^[41]	1992	6.5@20	0.325	2.6@125
2012 ^[47]	1998	4.35@10	0.435	8.9@49
2013 ^[42]	1850 & 1900	33@13.9	2.4	150@15
2015 ^[43]	2050	40.5@40	~1	10@100
2018 ^[45]	2000.2	16@25	0.64	35.6@18
2018 ^[44]	1952	1.5@100	0.015	2.5@6
2021 ^[46]	1940	2.44@631.5	0.00387	263@14.7
2021 ^[48]	1881	0.006@812	460 nJ	—@8.71
2021 ^[49]	~1891	0.395@980.6	40.3 nJ	—@(14.1-23.6)

图 14 单模运转铥光纤振荡器^[42]Fig. 14 Single mode thulium fiber oscillator^[42]

团队报道了基于类噪声脉冲泵浦的高重复频率增益开关掺铥光纤激光器^[46],作为泵浦脉冲,锁模光纤激光器产生的百纳秒量级的类噪声脉冲被铥镱共掺光纤放大器放大,产生 1940 nm 的增益开关脉冲,最小脉冲持续时间为 14.7 ns。最大输出功率达到 2.44 W,峰值功率接近 263 kW。

目前,基于全光纤结构的纳秒短脉冲掺铥激光器仍存在技术难点,例如高功率下的非线性效应、环境稳定性较差、难以实现自启动、锁模元件成本较高、激光器系统全光纤化程度不高等。增加纤芯尺寸、提高 Tm^{3+} 掺杂浓度、增加谱线宽度、减小脉冲宽度、减小增益光纤长度等方法对峰值功率提升是有益的,在医疗领域,目前尚未推出有关的商用产品,主要原因包括两方面:首先是传统泌尿碎石应用主要基于低频大能量钬激光技术体制,高频低能量的脉冲激光引入后还需要更多的性能验证与临床数据支撑;其次是可供更多医疗研究者尝试的商用纳秒短脉冲铥光纤激光器很少,特别是在中国,尚找不到任何一款纳秒短脉冲铥光纤激光器货架产品。

5 掺铥光纤激光器在医疗领域的研究与应用

5.1 掺铥光纤激光器用于碎石的研究总览

掺铥光纤激光器碎石的研究始于 2005 年,马里兰州巴尔的摩约翰霍普金斯医疗机构泌尿系 Fried^[50]使用掺铥光纤激光器输出 110 W 的 1940 nm 激光进行体外碎石分析,针对尿酸结石(UA)和一水草酸钙结石(COM)两种泌尿结石,分析了碎片率和粉碎时间,得出了高功率铥光纤激光器在脉冲模式下工作时,能够破碎 UA 和 COM 泌尿结石的结论。上述团队还报道了采用铥光纤激光器对犬前列腺进行高功率激光气化的研究^[51],采用一个波长为 1910 nm 的连续光纤激光器,纤芯直径为 600 μm ,输出功率为 (88.5 ± 2.3) W,能够快速气化和凝固犬前列腺。此外,Fried 等^[52]共同报道了使用 1940 nm 高功率掺铥光纤激光器消融泌尿组织的研究,采用了连续波模式和脉冲(10 ms)模式,发现激光能以 (0.21 ± 0.02) g/min 的速率气化前列腺组织,通过测量,发现热凝固区为 500~2000 μm ,验证掺铥光纤激光器甚至具有止血的潜力。2010 年,北卡

罗来纳大学物理与光学科学系的 Blackmon 等^[53]、北卡罗来纳州夏洛特市卡罗来纳医疗中心泌尿科的 Irby 和马里兰州巴尔的摩约翰霍普金斯医疗机构泌尿系的 Fried 共同报道了一种使用锥形光纤的掺铥光纤激光器碎石技术,论文中列出了锥形光纤的优势,与传统的小芯光纤相比,短锥形的光纤尖端允许激光光束扩束,从而以降低功率密度的方式减少光纤尖端的损坏,同时不影响光纤弯曲、结石气化效率或灌注率。2012 年,上述三人报道了一种微脉冲序列调制的增强型铥光纤激光碎石术^[54],并对结石消融率、光纤尖端降解、反推进行了研究,认为通过优化,铥光纤激光消融率在临床上可能接近 Ho:YAG 消融率的数值。2020 年 Traxer 等^[55]报道了关于使用掺铥光纤激光器进行肾结石碎石的优势的详细研究,全面说明了掺铥光纤激光器的优势,并通过具体的产品给出了数据的支撑。2021 年,Corrales 等^[56]研究了首批利用掺铥光纤激光器进行逆行肾内手术的 50 名患者的治疗情况,对结石大小、密度、激光器设置及开启时间进行了测量,并且评估了结石消融速率,由此得出结论:掺铥光纤激光器碎石是一种安全有效的碎石技术,并且引发并发症的概率很低。同年,Taratkin 等^[57]报道的关于超脉冲掺铥光纤激光器(“Super-pulsed”,是原文文献中的用法,可认为是准连续激光器)用于碎石的临床研究中,共有 153 名患者接受了逆行肾内手术治疗,研究样本中包含了不同的结石类型、密度、体积,研究者测量了手术时间及激光开启时间,对结石反推和术中可见性进行了评估,并在术后 90 天检测结石清除率,表明掺铥碎石激光器用于碎石是安全有效的。Enikeev 等^[58]对使用超脉冲掺铥光纤激光器和硬性输尿管镜针对输尿管结石碎石的技术进行了研究,通过激光开启时间、碎石所需能量和碎石功效进行分析,评估了术后效果及并发症。研究表明超脉冲掺铥光纤激光器可以对不同密度的结石都起到很好的碎石效果,并且光纤直径和激光重复频率不会对治疗效果产生较大影响。

在国内也开展了利用掺铥光纤激光器碎石的临床研究,虽然离体研究较少,但是早在 2008 年,武警重庆市总队医院的刘津念等率先报道将德国 Lisa Laser 公司生产的 Revolix 2 μm 激光手术系统应用于临床碎石手术,此后,掺铥激光被越来越多地应用于临床研究中,临床结果均表明,掺铥激光碎石效果好且安全性高。2022 年林宇等^[59]报道了基于掺铥光纤激光器的体外碎石技术研究,利用准连续掺铥光纤激光器在体外环境下开展结石消融量随激光脉宽与重复频率的变化规律的研究,研究结果表明,掺铥激光对结石具有较为显著的粉碎特性。

虽然现阶段掺铥光纤激光器在腔内泌尿学应用中的结果令人鼓舞,但还需要更多的研究来比较其临床和安全性相关结果,还需要考虑与患者相关的生活质量。此外,由于基于该激光器的取证治疗设备还很少、

激光器的量产规模较小、国产化替代过程缓慢等原因,在终端客户的采购成本上相比传统钬激光而言可能优势不明显^[60]。

5.2 掺铥光纤激光器用于碎石的优势

传统的碎石技术包括超声波碎石、气压弹道碎石、体外冲击波碎石和钬激光碎石等,掺铥光纤激光碎石术尚未在碎石方面得到普遍推广和应用,但是,众多研究指出,该新碎石技术有着独特的优势。人体的结石主要是晶体结构,由无机盐或有机物组成,这些物质层层包裹着核心,该核心往往是蛋白结构,可能是脱落的上皮细胞,也可能是异物、细菌团块等。晶体间的空隙被水填满,结石的烧蚀依赖水对激光的吸收从而膨胀、蒸发,这一机制可被称为“微爆”机制,指由局部高压导致结石脆弱部位破裂达到碎石效果,所以结石烧蚀速率与水吸收激光的剧烈程度密切相关。不同激光类型与水吸收程度可以通过水吸收系数(WAC)进行表征,图 15^[55]是 22 °C 下,2000 nm 附近激光的水吸收系数分布曲线,可以看到,常规掺铥光纤激光器输出的 1940 nm 波长与水吸收峰值非常接近,其 WAC 约为 14 mm^{-1} ,而常规 Ho:YAG 激光器输出的 2100 nm 波长下的 WAC 约为 3 mm^{-1} ,为前者的 1/5 左右。因此掺铥光纤激光碎石可以在更低的能量设置下实现与钬激光碎石相同的消融效果,或者在相同的能量设置下实现更优的消融效果。同时,激光在水中的吸收系数越大,意味着激光在水中能量衰减越快、穿透距离越短,Ho:YAG 激光器透射深度为 0.314 mm,掺铥光纤激光器有 0.077 mm^[61],因此掺铥光纤激光器在治疗中具有更好的安全性,治疗过程中对病灶周围组织损伤更小^[55]。

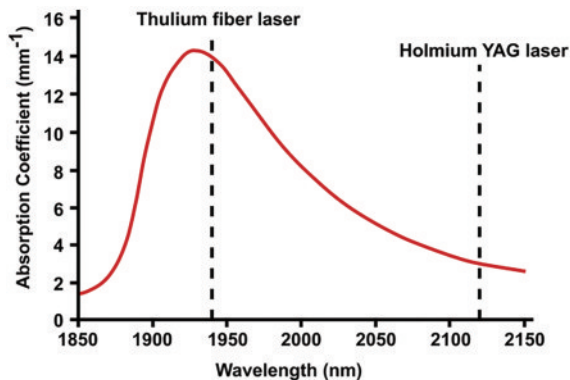


图 15 不同波长下的水吸收系数^[55]

Fig. 15 Water absorption coefficient at different wavelengths^[55]

激光碎石的过程会产生气泡,进而对结石产生反推作用,碎石过程中的反推力大小是临床非常关心的问题之一。激光从光纤输出端出射,接触到了外界流体,导致流体的蒸发、膨胀,形成气泡,如果采用的是非接触激光碎石方式,光纤和结石之间的流体会因为气泡的产生而在光纤与结石之间迅速形成一个能量传输

通道。气泡的快速膨胀和破裂一方面可为激光碎石提供机械作用,另一方面会对激光照射区附近的结石产生推动作用,称为“反推”^[62],它会造成内窥镜的视野中出现碎片风暴,需要快速移动窥镜以瞄准结石,增加了碎石难度。反推力的作用的强度可以通过碎石移动的距离评估得出,掺铥光纤激光器产生的微蒸气气泡直径约为钬激光的 1/4,脉冲瞬时压力也更小,因此碎石移动距离更小^[63]。碎石的另一个机理是结石本身吸收能量到一定程度后出现裂纹,进而碎裂。总体而言,得益于掺铥光纤激光器的结构和光学性能差异,使其相比传统 Ho:YAG 激光而言,可实现更快的碎石速率与粉末化碎石、产生较小的碎石反推力、允许更高的液体灌溉速率等手术优点,同时整机系统支持免水冷工作、高电光效率运转、全光纤高效耦合以及大幅度体积缩减,各项指标的对比整理在表 7 中。

1)烧蚀速率大。掺铥光纤激光器波长范围处于水的吸收曲线最高峰,比 Ho:YAG 烧蚀速率快数倍,从水吸收系数看,最快可接近 4 倍,因此实现碎石所需的能量可降低。2)光束质量好。掺铥光纤激光器采用的大模场增益光纤,可产生接近衍射极限的输出光束,因此可轻松通过 $150 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 甚至 $50 \mu\text{m}$ 超细光纤进行耦合传导^[64],小纤芯光纤输出激光对应产生的气泡和碎石的颗粒也越小,相比 Ho:YAG 激光器,产生的气泡缩小为 1/4^[65],伴随的碎石反推作用也更小。3)高灌注率。灌注率指的是在光纤探入人体之后单位时间所通入的液体流量,通入液体的目的是清除碎石颗粒,同时利用液体带走碎石过程中产生的废热,避免热量过度积累损伤周围组织,是碎石过程中一个重要的技术指标。一般而言,灌注率越大、散热越好,但过大的灌注率会对组织造成更大的水压和更大的反推力。掺铥光纤激光器由于更纤细的输出光纤、更小的反推力作用,从而允许术中更高的液体灌注率,同时也会提高手术中的光纤活动范围和可见度。4)高重复频率。铥光纤激光可运行超过 2000 Hz 的脉冲调制频率,比目前 Ho:YAG 激光所达到的最大频率(100 Hz 左右)高 20 倍以上^[65]。5)低机械噪声。与泵浦方式和激光器结构有关,掺铥光纤激光器的效率更高,泵浦能量高效转化为输出,可直接风冷散热,而 Ho:YAG 激光产热较多,需要水冷系统。6)高输出功率。二者都可达到较高功率,掺铥光纤激光器甚至可产生近 1000 W 的激光输出,高于 Ho:YAG 的百瓦量级,但是医疗上很少使用超过 100 W 的激光。7)脉宽范围大。掺铥光纤激光器可设置更宽的脉冲,实现均匀脉冲能量,降低尖峰功率。8)更高的安全性。掺铥光纤激光器自身的结构导致多种优势,更好的光束质量、更低的脉冲能量、更小的结石反推和颗粒,都是安全性的保证;此外,与 Ho:YAG 激光器使用高压电源或三相高电流供电不同,掺铥光纤激光器仅使用单相供电、最大电流不超过 10 A,因此理论上,掺铥光纤激光器是一种在电气相关

表 7 掺铥光纤激光器和 Ho:YAG 激光器对比^[55, 61, 65]

Table 7 Comparison between thulium-doped fiber laser and Ho:YAG laser^[55, 61, 65]

Index	Ho:YAG	Thulium-doped fiber laser
Typical central wavelength	2120 nm	1940 nm
Core diameter	>200 μm	Thinner, 50-150 μm is available
Bubble	Larger	Smaller
Pulse width	Adjustable	Larger adjustment range
Repetition frequency	Adjustable	Larger adjustment range
Cooling mode	Water cooling	Air cooling
Power	High	High, but with lower peak power
Ablation rate	Slower	Faster, up to four times that Ho:YAG
Retropulsion	Larger	Smaller
Irrigation rate	Lower	Higher
Security	High	Higher than Ho:YAG
Radiation and electrical hazards	Low	Low
Noise	Greater	Lower
Electro optic efficiency	Lower	Higher

Note: pulse, repetition frequency, and pulse width are all aimed at quasi-continuous-wave thulium-doped fiber laser.

危险上更安全的设备^[61]。9)更长使用寿命。半导体泵浦的掺铥光纤激光器峰值功率较低,降低了光纤尖端退化的概率,同时整机连续使用寿命、平均故障率以及零部件更新时间都远远超过灯泵浦的 Ho:YAG 激光系统,因此后期的维护成本更低。

5.3 准连续掺铥光纤激光医用治疗设备概述

掺铥光纤激光器用于治疗场景所积累的丰富研究数据已经证实了其安全性、有效性与质量可控,目前已经有家公司研制出准连续掺铥光纤激光治疗设备,并进行相关临床试验与注册取证。本文选取检索到的四种商用产品作为研究对象,具体参数对比整理在表 8 中。Olympus 公司推出的全球首款准连续掺铥光纤激光治疗设备于 2019 年 7 月获得 FDA 的 510k 许可,主要包括 SOLTIVE™ Premium(图 16)和 Pro 两个型号的设备(目前尚未在中国取证),最大平均功率分

别达到 60 W 和 35 W,峰值功率达到 500 W,均是基于风冷模式散热。EMS 公司于 2021 年定制开发的 LaserClast Thulium Power 系统(未在中国取证),输出波长为 1940 nm,平均功率为 60 W,峰值功率达到 500 W,最大脉冲能量为 6 J,重复频率可达 2500 Hz,采用风冷模式散热。Jena Surgical 公司开发的 MultiPulse Tm + 1470 系统(未在中国取证),是一种双波长激光器系统,可以在脉冲模式工作,1940 nm 激光最大平均输出功率达到 120 W,1470 nm 激光用于提高激光器的凝血效果,该设备基于水冷模式散热。据悉,国内 LAKH 医疗公司联合国内密尔医疗合作开发出风冷泌尿激光治疗设备(图 17),输出波段为 1930~1950 nm,最大平均功率超过 120 W,峰值功率最大可以达到 500 W,重复频率最大为 2500 Hz,同时支持脉冲、连续双模式自由切换运转。

表 8 主要的几种医用准连续掺铥光纤激光器系统参数

Table 8 System parameters of several main medical quasi-continuous-wave thulium-doped fiber lasers

Index	Olympus	EMS	Jena Surgical	LAKH
Name of product	SOLTIVE™ Premium	LaserClast Thulium Power	MultiPulse Tm + 1470	LKSP Tm120
Central wavelength /nm	1940±20	1940±20	1940,1470	1940±20
Maximum average power /W	60	60	120	120
Maximum peak power /W	500	500	120	500
Maximum pulse energy /J	6	6	—	—
Pulse width /ms	0.2-50	>0.1	>0.5	>0.1
Repetition frequency /Hz	1-2400	1-2500 & CW	1-1000 & CW	1-2500 & CW
Cooling mode	Air cooling	Air cooling	Water cooling	Air cooling

5.4 掺铥光纤激光治疗设备应用

5.4.1 与 SpyGlass 内镜直视系统实现诊疗一体化

掺铥光纤激光器作为一种全光纤激光光源,输出

激光光束质量远远优于传统钛固体激光或铥固体激光设备,因此可以轻松耦合至更纤细的传输光纤中,使其在与其他医疗设备联合应用的过程中更游刃有余。目



图 16 Olympus 公司 SOLTIVE™ Premium 医用准连续掺铥光纤激光器系统

Fig. 16 SOLTIVE™ Premium medical quasi-continuous-wave thulium-doped fiber laser system from Olympus



图 17 国内 LAKH 公司 LKSPTm120 泌尿激光治疗设备

Fig. 17 LKSPTm120 laser treatment equipment from LAKH of China

前国内引入了一种用于治疗胆结石的高效胆道镜医疗设备 SpyGlass™ DS, 其内镜直视系统由波士顿科学公司开发, 可通过操作通道进行治疗, 内置 2 个冲洗通道和一个 1.2 mm 操作通道, 并且在探头装有 CMOS 图像传感器和 LED 光源, 可直视内部组织, 尽管直径 4 mm 导致成像面积较小, 但是其拥有 120° 视场角。目前国内已经有很多针对 SpyGlass™ DS 系统在胆胰疾病诊断和治疗中的应用的^[66-69], 验证了 SpyGlass™ DS 用于诊断和治疗的安全有效性, 特别是在处理复杂结石和大结石的情况下可以有效碎石和清

除颗粒, 此外也有其与钬激光的配合使用。基于此应用, 如能将 SpyGlass™ DS 系统内置操作通道和掺铥光纤激光器结合, 将光纤插入操作通道, 可更好地实现直视化、实时化操作, 同时有望进一步提高诊断率, 减少治疗时间和辐射^[70]。

医疗上胆结石已实现通过 SpyGlass™ DS 系统进行诊断和治疗, 将此技术或类似技术和掺铥光纤激光器结合应用, 是一种极有潜力的研究方向。掺铥光纤激光器相比 Ho:YAG 激光器在碎石方面所具有的全面优势, 可以在结石治疗中与 SpyGlass™ DS 等可视内镜结合实现诊断、治疗一体化, 亦可以在其他更多的类似场景, 帮助更多患者摆脱疾病困扰。

5.4.2 短脉冲铥光纤激光的应用尝试

除了连续和准连续掺铥光纤激光器以外, 可尝试和验证使用短脉冲铥光纤激光进行碎石等医疗方面的应用。国际上已开展了有关于使用短脉冲掺铥光纤激光器碎石的初步研究, 2014 年, 俄罗斯科学家首次尝试使用 0.2 mJ、100 ns 铥光纤激光进行碎石(尿酸结石)研究, 结果表明, 铥激光对尿酸结石具有碎石效果, 但是对草酸钙结石没有明显作用。2019 年, 印度科学家利用平均功率为 9.5 W, 重复频率为 55~135 kHz, 脉宽为 350~750 ns, 峰值功率 < 500 W 的 1940 nm 掺铥光纤激光进行了草酸钙结石碎石和软组织切割研究^[71], 结果表明, 碎石的颗粒更小, 直径为 45~300 μm, 低于临床要求的 2 mm, 碎石速度约为 12.75 mg/min, 脉冲激光软组织切割效果也优于连续激光切割效果。由上述研究可见, 短脉冲铥光纤激光在医疗应用方面亦具有其自身的优势和独特的效果。

相比连续、准连续掺铥光纤激光器, 短脉冲掺铥光纤激光器碎石技术目前尚不成熟, 治疗效果目前未得到广泛验证, 仍需要更多临床研究作为参考。

6 结束语

创新的理念和技术正在不断推动掺铥碎石光纤激光器的迅猛发展, 虽然目前 Ho:YAG 激光器仍然是临床上的金标准, 占据主导地位, 但越来越多的研究表明, 掺铥光纤激光器具有相当可观的优势, 获得了人们越来越多的关注, 动物临床试验和初步的人体临床试验也验证了它的可实现性。研究者们前期关于掺铥光纤激光器, 无论是功率、线宽、调谐范围还是连续与准连续的研究, 都为它的碎石应用做出了重要贡献, 碎石各项指标的对比也为它的临床应用提供了指导。多项临床研究都表明掺铥光纤激光器完全可以满足泌尿系统的碎石治疗需求, 但是由于生物组织机理的复杂性, 掺铥光纤激光器是否可以应用于其他组织的碎石治疗, 还需要非常谨慎的研究。

生物组织可承受的功率为数十瓦, 目前的掺铥光纤激光器, 在功率指标上已经完全达标, 线宽的影响可以通过水吸收系数估计, nm 级的线宽即可满足要求,

调谐范围更不是问题,1940 nm 是水吸收系数峰值波长,完全处于大多数掺铥光纤激光器可调谐输出的范围内。但临床的应用非常复杂,需要确定各生物组织能够承受的功率大小,需要明确如何设置激光器参数才能达到最好的治疗效果,这些不只需要分析和研究,更需要临床上的实践验证,是推广应用掺铥光纤激光器碎石技术的必经之路。

随着掺铥光纤激光器技术的发展,将其应用于碎石成为一种必然趋势。可以预测,经过更多生物组织的临床研究和验证之后,掺铥光纤激光器碎石极其有望成为医疗碎石领域的主流和新的“金标准”。目前,掺铥光纤激光器已经在泌尿系统取得了很大的发展,未来将逐步应用于肝、胆结石,以及其他组织的治疗,新的研究和突破会不断涌现,推动和扩展掺铥光纤激光器碎石技术甚至医疗切除等技术的进一步发展。

参 考 文 献

- [1] Hanna D C, Jauncey I M, Percival R M, et al. Continuous-wave oscillation of a monomode thulium-doped fibre laser[J]. Electronics Letters, 1988, 24(19): 1222-1223.
- [2] Goodno G D, Book L D, Rothenberg J E. 600-W single-mode single-frequency thulium fiber laser amplifier[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7195: 71950Y.
- [3] Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, et al. 1-kW, all-glass Tm: fiber laser[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7580: 758016.
- [4] Jackson S D, King T A. High-power diode-cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser[J]. Optics letters, 1998, 23(18): 1462-1464.
- [5] Clarkson W A, Barnes N P, Turner P W, et al. High-power cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser with wavelength tuning from 1860 to 2090 nm[J]. Optics Letters, 2002, 27(22): 1989-1991.
- [6] Shen D Y, Sahu J K, Clarkson W A. High-power widely tunable Tm: fibre lasers pumped by an Er, Yb co-doped fibre laser at 1.6 μm [J]. Optics Express, 2006, 14(13): 6084-6090.
- [7] Slobodtchikov E, Moulton P F, EfficientFrith G., high-power, Tm-doped silica fiber laser[C]//Advanced Solid-State Photonics 2007, January 28-31, 2007, Vancouver, Canada. Washington, D. C: Optica Publishing Group, 2007: MF2.
- [8] Moulton P F, Rines G A, Slobodtchikov E V, et al. Tm-doped fiber lasers: fundamentals and power scaling [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(1): 85-92.
- [9] Hu Z Y, Yan P, Xiao Q R, et al. 227-W output all-fiberized Tm-doped fiber laser at 1908 nm[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(10): 104206.
- [10] Liu J, Shi H, Liu C, et al. High-power narrow-linewidth thulium-doped all-fiber MOPA[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim. Optical Society of America, 2015: 27A1_3.
- [11] Yin K, Zhu R Z, Zhang B, et al. 300 W-level, wavelength-widely-tunable, all-fiber integrated thulium-doped fiber laser[J]. Optics Express, 2016, 24(10): 11085-11090.
- [12] 刘茵紫, 邢颖滨, 廖雷, 等. 530 W 全光纤结构连续掺铥光纤激光器[J]. 物理学报, 2020, 69(18): 184209. Liu Y Z, Xing Y B, Liao L, et al. 530 W all-fiber continuous-wave Tm-doped fiber laser[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(18): 184209.
- [13] 杨昌盛, 陈丹, 赵齐来, 等. 2.0 μm 波段掺铥连续单频光纤激光器的研究进展[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201006. Yang C S, Chen D, Zhao Q L, et al. Research progress of 2.0 μm -band Tm-doped continuous wave single-frequency fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201006.
- [14] McComb T S, Sims R A, Willis C C C, et al. High-power widely tunable thulium fiber lasers[J]. Applied Optics, 2010, 49(32): 6236-6242.
- [15] Guo C Z, Shen D Y, Long J Y, et al. High-power and widely tunable Tm-doped fiber laser at 2 μm [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(9): 091406.
- [16] Chen S X, Jung Y, Alam S U, et al. Ultra-wideband operation of a tunable thulium fibre laser offering tunability from 1679—1992 nm[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2017.
- [17] Li Z, Alam S U, Jung Y, et al. All-fiber, ultra-wideband tunable laser at 2 μm [J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4739-4742.
- [18] Yin K, Zhang B, Xue G, et al. High-power all-fiber wavelength-tunable thulium doped fiber laser at 2 μm [J]. Optics Express, 2014, 22(17): 19947-19952.
- [19] Wang X, Jin X X, Zhou P, et al. High power, widely tunable, narrowband superfluorescent source at 2 μm based on a monolithic Tm-doped fiber amplifier[J]. Optics Express, 2015, 23(3): 3382-3389.
- [20] Chen X, Dai D Z, Zhang Y, et al. Wavelength-flexible thulium-doped fiber laser based on digital micromirror array[J]. Micromachines, 2020, 11(12): 1036.
- [21] Liu F, Liu P, Feng X, et al. Tandem-pumped, tunable thulium-doped fiber laser in 2.1 μm wavelength region[J]. Optics Express, 2019, 27(6): 8283-8290.
- [22] Hardy L A, Fried N M. Comparison of first-generation (1908 nm) and second-generation (1940 nm) thulium fiber lasers for ablation of kidney stones[J]. Optical Engineering, 2019, 58(9): 096101.
- [23] Chollet F, Goedgebuer J P, Porte H, et al. Electrooptic narrow linewidth wavelength tuning and intensity modulation of an erbium fiber ring laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(8): 1009-1011.
- [24] Wang F, Shen D Y, Fan D Y, et al. Spectral narrowing of cladding-pumped high-power Tm-doped fiber laser using a volume Bragg grating-pair[J]. Applied Physics Express, 2010, 3(11): 112701.
- [25] Tao M M, Huang Q J, Yang P L, et al. Narrow

- linewidth CW amplification of a Tm-doped double-clad fiber MOPA system[J]. *Optik*, 2014, 125(3): 1141-1143.
- [26] 刘江, 刘晨, 师红星, 等. 342 W 全光纤结构窄线宽连续掺铥光纤激光器[J]. *物理学报*, 2016, 65(19): 194209. Liu J, Liu C, Shi H X, et al. 342 W narrow-linewidth continuous-wave thulium-doped all-fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(19): 194209.
- [27] 白燕, 延凤平, 冯亭, 等. 基于保偏掺铥光纤饱和吸收体的 2 μm 波段超窄线宽光纤激光器[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0101003. Bai Y, Yan F P, Feng T, et al. Ultra-narrow-linewidth fiber laser in 2 μm band using saturable absorber based on PM-TDF[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0101003.
- [28] Cook J, Roumayah P, Shin D J, et al. Narrow linewidth 80 W tunable thulium-doped fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 146: 107568.
- [29] Shen D Y, Pearson L, Wang P, et al. Broadband Tm-doped superfluorescent fiber source with 11 W single-ended output power[J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 11021-11026.
- [30] Yu G Y, Chang J, Wang Q P, et al. A theoretical model of thulium-doped silica fiber's ASE in the 1900 nm waveband[J]. *Optoelectronics Letters*, 2010, 6(1): 45-47.
- [31] Hu Z Y, Yan P, Liu Q, et al. High-power single-stage thulium-doped superfluorescent fiber source[J]. *Applied Physics B*, 2015, 118(1): 101-107.
- [32] Khamis M A, Ennser K. Wide broadband ASE source based on thulium-doped fibre for 2 μm wavelength region [C]//5th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS), February, 2017, Porto, Portugal. [S.l.: s.n.], 2017: 141-146.
- [33] Aubrecht J, Peterka P, Honzátko P, et al. Broadband thulium-doped fiber ASE source[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2164-2167.
- [34] Michalewska Z, Michalewski J, Nawrocki J. Swept-source OCT[J]. *Retina Today*, 2013: 50-56.
- [35] Pal D, Sen R, Pal A. Design of all-fiber laser at 1.95 μm for soft tissue surgery[C]//National Laser Symposium (NLS-24), December 2-5, 2015, Post Cat, Indore. Indore: Raja Ramanna Centre for Advanced Technology (RRCAT), 2015.
- [36] Sypin V, Volkov A, Myasnikov D, et al. QCW thulium fiber laser for medical application[C]//2016 International Conference Laser Optics (LO), June 27-July 1, 2016, St. Petersburg, Russia. New York: IEEE Press, 2016: S1-10.
- [37] Pal D, Sen R, Pal A. Design of all-fiber thulium laser in CW and QCW mode of operation for medical use[J]. *Physica Status Solidi C*, 2017, 14(1/2): 1600127.
- [38] Pal D, Chowdhury S D, Sen R, et al. QCW thulium fiber laser at 1.94 μm for kidney stone fragmentation[C]//National Laser Symposium (NLS-27), December 3-6, 2018, Post Cat, Indore. Indore: Raja Ramanna Centre for Advanced Technology (RRCAT).
- [39] Limongelli J R, Allee E, Bieniek M, et al. A 564 W QCW thulium fiber oscillator pumped at 793 nm[C]//Advanced Solid State Lasers, October 13-16, 2020, Washington, D. C., United States. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2020: JTU5A.4.
- [40] Eichhorn M, Jackson S D. High-pulse-energy actively Q-switched Tm³⁺-doped silica 2 μm fiber laser pumped at 792 nm[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(19): 2780-2782.
- [41] Willis C C C, Shah L, Baudelet M, et al. High-energy Q-switched Tm³⁺-doped polarization maintaining silica fiber laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7580: 758003.
- [42] Stutzki F, Jansen F, Jauregui C, et al. 2.4 mJ, 33 W Q-switched Tm-doped fiber laser with near diffraction-limited beam quality[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 97-99.
- [43] Li L, Zhang B, Yin K, et al. 1 mJ nanosecond all-fiber thulium-doped fiber laser at 2.05 μm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18098-18105.
- [44] Romano C, Jaouën Y, Tench R E, et al. kW pulsed nanosecond TDFL with direct modulation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10897: 1089708.
- [45] Grzes P, Swiderski J. Gain-switched 2- μm fiber laser system providing kilowatt peak-power mode-locked resembling pulses and its application to supercontinuum generation in fluoride fibers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 1500408.
- [46] Liu S L, Dou Z Y, Zhang B, et al. High repetition rate gain-switched thulium-doped fiber laser pumped by 1.6 μm noise-like pulses[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 138: 106856.
- [47] Kadwani P, Modsching N, Sims R A, et al. Q-switched thulium-doped photonic crystal fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(10): 1664-1666.
- [48] López-Estopier R, Camarillo-Avilés A, Bello-Jiménez M, et al. Q-switched mode locking noise-like pulse generation from a thulium-doped all-fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. *Results in Optics*, 2021, 5: 100115.
- [49] Wang M, Liu M Q, Chen Y W, et al. Stable noise-like pulse generation in all-PM mode-locked Tm-doped fiber laser based on NOLM[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(9): 091402.
- [50] Fried N M. Thulium fiber laser lithotripsy: an *in vitro* analysis of stone fragmentation using a modulated 110-watt Thulium fiber laser at 1.94 μm [J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2005, 37(1): 53-58.
- [51] Fried N M. High-power laser vaporization of the canine prostate using a 110 W Thulium fiber laser at 1.91 μm [J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2005, 36(1): 52-56.
- [52] Fried N M, Murray K E. High-power thulium fiber laser ablation of urinary tissues at 1.94 μm [J]. *Journal of Endourology*, 2005, 19(1): 25-31.
- [53] Blackmon R L, Irby P B, Fried N M. Thulium fiber laser lithotripsy using tapered fibers[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2010, 42(1): 45-50.
- [54] Blackmon R L, Fried N M, Irby P B. Enhanced thulium fiber laser lithotripsy using micro-pulse train modulation [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2012, 17(2): 028002.
- [55] Traxer O, Keller E X. Thulium fiber laser: the new

- player for kidney stone treatment? A comparison with Holmium: YAG laser[J]. World Journal of Urology, 2020, 38(8): 1883-1894.
- [56] Corrales M, Traxer O. Initial clinical experience with the new thulium fiber laser: first 50 cases[J]. World Journal of Urology, 2021, 39(10): 3945-3950.
- [57] Taratkin M, Azilgareeva C, Korolev D, et al. Prospective single-center study of SuperPulsed thulium fiber laser in retrograde intrarenal surgery: initial clinical data[J]. Urologia Internationalis, 2022, 106(4): 404-410.
- [58] Enikeev D, Grigoryan V, Fokin I, et al. Endoscopic lithotripsy with a SuperPulsed thulium-fiber laser for ureteral stones: a single-center experience[J]. International Journal of Urology, 2021, 28(3): 261-265.
- [59] 林宇, 刘敏秋, 欧阳德钦, 等. 基于掺铥光纤激光器的体外碎石实验探究[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101015. Lin Y, Liu M Q, Ouyang D Q, et al. Exploration of thulium-doped fiber lasers in lithotripsy *in vitro*[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101015.
- [60] Rice P, Somani B K. A systematic review of thulium fiber laser: applications and advantages of laser technology in the field of urology[J]. Research and Reports in Urology, 2021, 13: 519-527.
- [61] Kronenberg P, Traxer O. The laser of the future: reality and expectations about the new thulium fiber laser—a systematic review[J]. Translational Andrology and Urology, 2019, 8(Suppl 4): S398-S417.
- [62] Hardy L A, Kennedy J D, Wilson C R, et al. Analysis of thulium fiber laser induced bubble dynamics for ablation of kidney stones[J]. Journal of Biophotonics, 2017, 10(10): 1240-1249.
- [63] 胡卫国, 李建兴. 泌尿系结石的激光治疗现状[J]. 临床外科杂志, 2020, 28(2): 183-185. Hu W G, Li J X. Advances in laser techniques for stone treatment[J]. Journal of Clinical Surgery, 2020, 28(2): 183-185.
- [64] 刘敏, 高小峰. 铥光纤激光碎石基础研究和临床应用进展[J]. 中华泌尿外科杂志, 2021, 42(1): 75-78. Liu M, Gao X F. Advances in fundamental research and clinical application of Thulium fiber laser lithotripsy[J]. Chinese Journal of Urology, 2021, 42(1): 75-78.
- [65] Schembri M, Sahu J, Aboumarzouk O, et al. Thulium fiber laser: the new kid on the block[J]. Turkish Journal of Urology, 2020, 46(Suppl. 1): S1-S10.
- [66] 张航, 肖乐, 邹洪, 等. SpyGlass 直视化系统在胆管疾病诊断和治疗中的应用[J]. 中国内镜杂志, 2019, 25(2): 1-5. Zhang H, Xiao L, Zou H, et al. Application of SpyGlass direct visualization system in diagnosis and treatment of biliary diseases[J]. China Journal of Endoscopy, 2019, 25(2): 1-5.
- [67] 孙明, 王宏光, 王曼彤, 等. SpyGlass DS 胆道镜在肝内胆管结石中的应用分析[J]. 中国内镜杂志, 2021, 27(5): 78-83. Sun M, Wang H G, Wang M T, et al. Application of SpyGlass DS choledochoscope in intrahepatic bile duct stones[J]. China Journal of Endoscopy, 2021, 27(5): 78-83.
- [68] 徐雯, 苗龙, 王正峰, 等. SpyGlass™ DS 直视化系统在胆道疾病诊疗中的应用[J]. 临床肝胆病杂志, 2020, 36(11): 2626-2629. Xu W, Miao L, Wang Z F, et al. Application of SpyGlass™ DS direct visualization system in the diagnosis and treatment of biliary tract diseases[J]. Journal of Clinical Hepatology, 2020, 36(11): 2626-2629.
- [69] 邹莹莹, 郭彦东, 顾红祥, 等. SpyGlass 在胆胰疾病中的应用[J]. 现代消化及介入诊疗, 2020, 25(6): 812-815. Zou Y Y, Guo Y D, Gu H X, et al. Application of SpyGlass in biliary and pancreatic diseases[J]. Modern Digestion & Intervention, 2020, 25(6): 812-815.
- [70] Mizrahi M, Khoury T, Wang Y, et al. “Apple Far from the Tree”: comparative effectiveness of fiberoptic single-operator cholangiopancreatography (FSOCP) and digital SOCP (DSOCP)[J]. HPB, 2018, 20(3): 285-288.
- [71] Pal D, Paul A, Shekhar N K, et al. COM stone dusting and soft tissue ablation with Q-switched thulium fiber laser[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(1): 7100808.