

高功率光纤激光的发展现状与应用

孙国玉, 杨君婷, 包明冉, 袁毅, 李再金*, 赵志斌, 曾丽娜, 李林, 乔忠良, 陈浩, 曲轶

海南师范大学物理与电子工程学院, 海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南 海口
Email: *lizaijin@126.com

收稿日期: 2020年10月12日; 录用日期: 2020年10月27日; 发布日期: 2020年11月3日

摘要

首先阐述了光纤激光器的定义、结构及分类, 通过与传统的激光进行对比, 总结了光纤激光的优点和缺点, 其次对国内和国外的高功率光纤激光的发展进程进行了介绍。另外, 研究了高功率光纤激光的关键技术, 尤其是光纤激光的增益介质和泵浦耦合技术, 其中光纤激光的增益介质包括双包层掺杂光纤和光子晶体光纤。泵浦耦合技术包括端面泵浦耦合技术和侧面泵浦耦合技术。最后对高功率光纤激光在工业、医疗和军事等领域的应用进行了阐述, 以及对目前的高功率光纤激光技术进行总结, 提出高功率光纤激光的发展趋势。

关键词

高功率, 光纤激光, 增益光纤, 泵浦耦合

Development Status and Application of High Power Fiber Laser

Guoyu Sun, Junting Yang, Mingran Bao, Yi Yuan, Zaijin Li*, Zhibin Zhao, Lina Zeng, Lin Li, Zhongliang Qiao, Hao Chen, Yi Qu

School of Physics and Electronic Engineering of Hainan Normal University, Hainan Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials, Haikou Hainan
Email: *lizaijin@126.com

Received: Oct. 12th, 2020; accepted: Oct. 27th, 2020; published: Nov. 3rd, 2020

Abstract

Firstly, the definition, structure and classification of fiber laser are described. Compared with traditional laser, the advantages and disadvantages of fiber laser are summarized. Secondly, the de-

*通讯作者。

文章引用: 孙国玉, 杨君婷, 包明冉, 袁毅, 李再金, 赵志斌, 曾丽娜, 李林, 乔忠良, 陈浩, 曲轶. 高功率光纤激光的发展现状与应用[J]. 现代物理, 2020, 10(6): 103-112. DOI: 10.12677/mp.2020.106012

velopment process of high-power fiber laser at home and abroad is introduced. In addition, the key technologies of high power fiber laser, especially the gain medium and pump coupling technology of fiber laser are studied. The gain medium of fiber laser includes double cladding doped fiber and photonic crystal fiber. Pump coupling technology includes end pump coupling technology and side pump coupling technology. Finally, the applications of high-power fiber laser in industry, medical and military fields are described, and the current high-power fiber laser technology is summarized, the development trend of high-power fiber laser is proposed.

Keywords

High Power, Fiber Laser, Gain Fiber, Pump Coupling

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

光纤激光器是指以光纤为基质掺杂不同的稀土离子(Yb、Nd 等)的一类激光器[1]。光纤激光器和其他类型的激光器一样,由泵浦源、耦合光学系统、工作物质(增益光纤)、谐振腔和准直光学系统组成,如图 1 所示。光纤激光器的增益光纤为产生光子的增益介质,泵浦源的作用是作为外部能量使增益介质达到粒子数反转,光学谐振腔由两个反射镜组成,作用是使光子得到反馈并在工作介质中得到放大。泵浦源进入增益光纤后被吸收,进而使增益介质中能级粒子数发生反转,当谐振腔内的增益高于损耗时在两个反射镜之间便会形成激光振荡,产生激光输出。

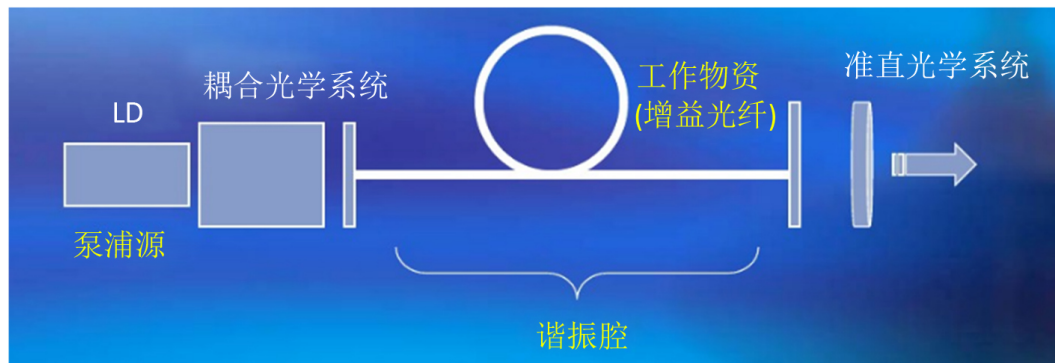


Figure 1. Structure of fiber laser

图 1. 光纤激光器的结构

光纤激光器的种类有很多种,本文从光纤的结构、谐振腔的结构、功率的大小、增益介质和输出激光的特性这五个方面对光纤激光器进行分类,如图 2 所示。从光纤结构上可分为单包层光纤激光器、光子晶体光纤激光器、双包层光纤激光器和特种光纤激光器。从谐振腔结构上可分为 F-P 腔、环形腔、8 字形腔、DFB 光纤激光器和 DBR 光纤激光器。从功率大小上可分为大功率、中功率和小功率光纤激光器。从增益介质上可分为塑料光纤激光器、稀土类掺杂光纤激光器、非线性光学型光纤激光器和晶体光纤激光器。从输出激光特性上可分为连续光纤激光器和脉冲光纤激光器。

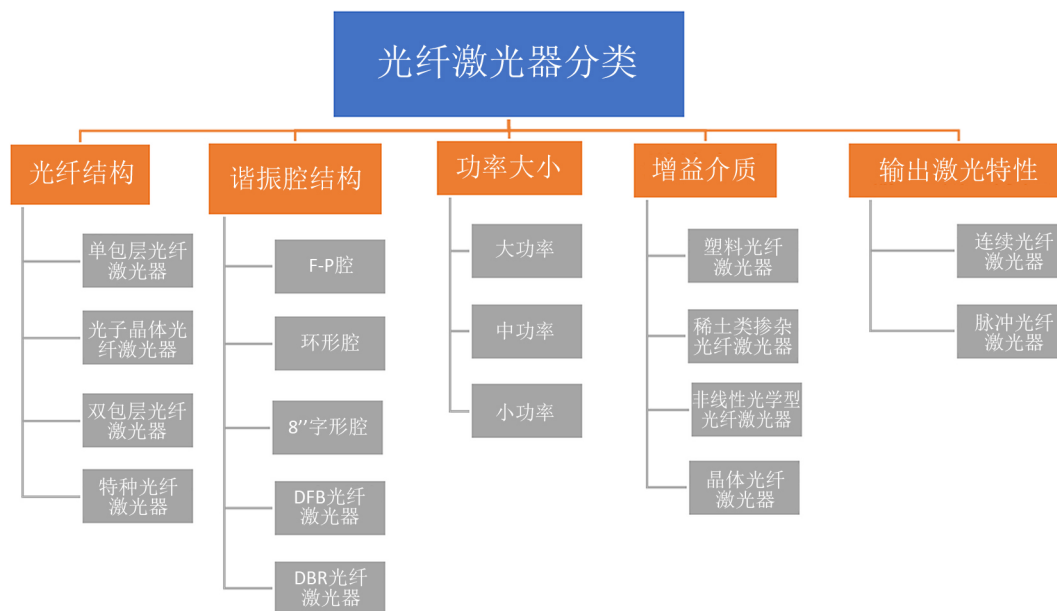


Figure 2. Classification of fiber lasers

图 2. 光纤激光器的分类

光纤激光器和传统的激光器在特性对比上如表 1 所示。从表 1 上可以看出，光纤激光器在很多方面都显示出独特的优点。容易获得较高的光束质量、寿命长、光电转换效率高、输出功率大、体积小以及重量轻等[2] [3] [4]，但是高功率光纤激光器的也存在着一些缺点：一是受到非线性效应的影响，二是作为增益介质的光纤容易折断。

Table 1. Comparison of fiber lasers and other lasers

表 1. 光纤激光器和其他激光器的比较

参数	YAG 固体激光器	光纤激光器	CO ₂ 激光器
光电转换效率	3%	30%	10%
最大输出功率/KW	6	50	20
光束质量参数 BPP	25	2.5	6
体积/m ³	6	1	3
寿命/h	1000	100,000	5000

2. 高功率光纤激光器的发展历程

2.1. 国外发展情况

激光始于 20 世纪 50 年代，是人类历史上的一项重要科技发明。1960 世界上的第一台红宝石激光器[5]的诞生激起了众多科学家的科研热情。美国的 Snitzer 等人 1961 年在掺杂 Nd³⁺的玻璃光纤中观察到受激辐射的现象[6]，由此开启了了光纤激光技术的研究。

20 世纪 80 年代末提出双包层增益光纤结构[7] [8] [9]，这种结构能使泵浦光的耦合效率提高，从而使得激光输出强度变大，极大的提高了激光器的输出功率，为高功率光纤激光器的发展有着很大的帮助。1993 年报道了一种高功率掺 Nd³⁺双包层光纤激光器，单模输出功率为 5 W [10]。1994 年，HM.PASK 等人报道了第一个掺 Yb³⁺双包层光纤激光器，在 1040 nm 波长处的激光输出为 0.5 W [11]。

进入 21 世纪以后, 高功率光纤激光器进入了一个全新的时期。2000 年 IPG 公司率先实现百瓦级的连续光纤激光器的全光纤化。2002 年 J. Limpert 等人报道了一种双包层光纤激光器, 能够获得百瓦级的激光输出[12]。Y. Jeong 在 2004 年实现了光纤激光器的千瓦级激光功率输出[13]。V. Gapontsev 在 2005 年研制出一种掺 Yb^{3+} 的大模场双包层光纤激光器, 得到单模输出为 2000 W 的激光[14]。

2006 年 IPG 公司实现 3 kW 的单纤单模连续输出。又在 2009 年实现世界上第一个万瓦级单模光纤激光输出。IPG 公司从此成为全球高功率光纤激光器的行业的领头羊, 把其他生产激光器的企业甩在身后。随后在 2012 年和 2013 年分别报道了单纤单模功率达到了 20 kW 和多模输出功率为 100 kW 的实验结果; 截止到 2019 年, IPG 公司生产的光纤激光器的最高输出水平是多模 500 kW, 单模为 20 kW。其已经研发了多种光纤激光器, 在高功率光纤激光器的市场上占据很大的比例。早期光纤激光器的输出功率的提升不是很快, 2002 年以后光纤激光器输出功率显著提升[15]。国外有多家对光纤激光器的研究机构为高功率光纤激光器的发展做出了贡献, 例如英国的南阿普顿大学(University of Southampton)和 SPI 公司、德国的 IPG 公司和美国的贝尔实验室等。

2.2. 国内发展情况

国内是 20 世纪 80 年代末开始对高功率光纤激光器展开大规模的研究。截止到现在国内对多家光纤激光器研究的机构有上海光学精密机械研究所、清华大学等等, 国内对光纤激光器的研究的企业有武汉锐科、烽火通信和中航光电等。

1989 年, 清华大学报道了一种可调谐掺 Nd^{3+} 的光纤激光器, 调谐范围是 1077~1138.6 nm, 斜率效率为 9.2% [16]。1990 年, 台湾的 C. Y. Chen 等报道一种可调谐掺 Er^{3+} 光纤激光器, 调谐范围是 1522~1567 nm [17]。

2003 年, 中国科学院上海光机所报道了采用掺 Yb^{3+} 离子的双包层光纤搭建的激光器, 成功实现 107 W 连续激光输出。在 2005 年, 中国科学院上海光机所和武汉的烽火通信公司合作, 研制出一种掺杂 Yb^{3+} 双包层光纤激光器, 实现单纤 440 W 的连续激光输出[18]。

2006 年清华大学采用国产掺镜双包层光纤的光纤激光器连续输出功率为 714 W [19]。同年 8 月, 中国电子科技集团公司第十一研究所成功研制的大功率光纤激光器, 其平均输出功率达 1207 W [20]。

2010 年上海光机所报道了一种输出功率为 1750 W 的包层泵浦掺 Yb^{3+} 光纤激光器[21]。2012 年武汉锐科和华工激光公司合作, 研制出输出功率为 4 KW 的全光纤激光器。2015 年中国工程物理研究院采用进口分别实现了单纤 5 kW 连续激光输出。2017 年, 国防科技大学的刘泽金等人得到了 5.02 kW 的合成激光[22]。2018 年, 中国工程物理研究院实现万瓦级全光纤激光输出[23] [24]。2020 年, 国防科技大学的杨保来等人得到了全光纤激光振荡器输出功率突破 6 KW [25]。

3. 高功率光纤激光器的关键技术

高功率光纤激光器的工作物质增益光纤作为光纤激光器中的增益介质, 能减小高数值孔径的泵浦光, 对激光器的输出光束的质量有着重要的影响。随着光纤技术的发展, 增益光纤从早期的单包层结构变为现在的双包层结构, 而且纤芯直径也从早期的小纤芯变为大纤芯。本节主要介绍了双包层光纤和光子晶体光纤。

3.1. 双包层光纤

20 世纪 80 年代末 Snitzer 等人提出双包层增益光纤结构对高功率光纤激光器[26]。双包层光纤的结构与常规的光纤有所不同[27] [28], 其结构组成有四个部分, 即纤芯、保护层、内包层和外包层, 具体结构如图 3 所示。

后来研究人员发现内包层的形状对泵浦效率产生影响, 因此不同形状的内包层被制作出来[29] [30]

[31] [32], 具体形状如图 4 所示。

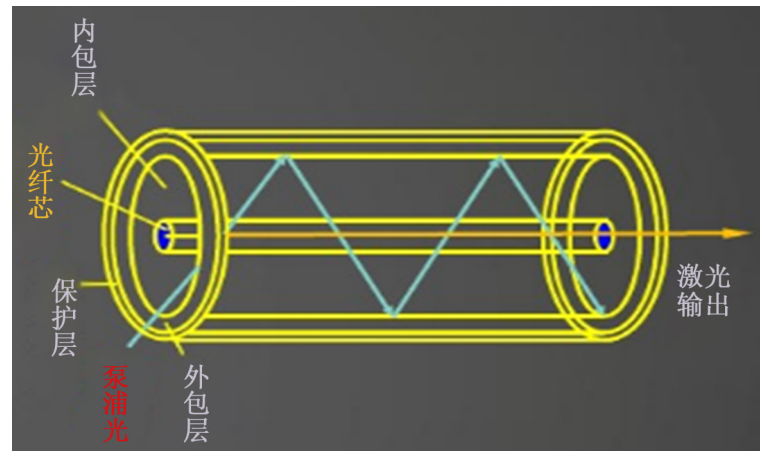


Figure 3. Structure of double clad fiber

图 3. 双包层光纤的结构图

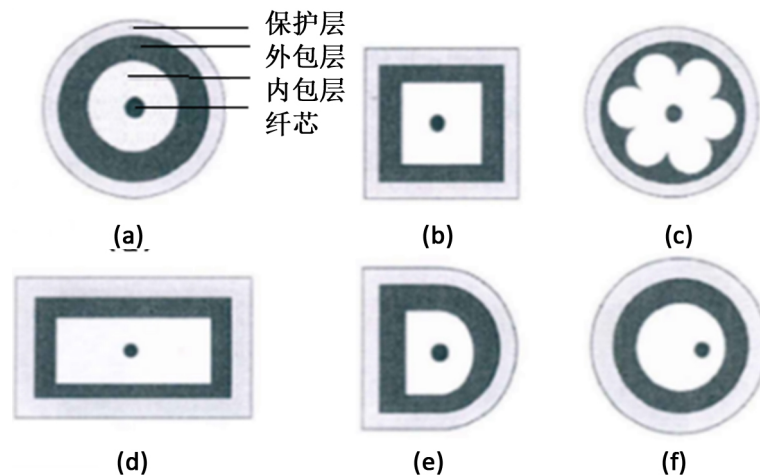


Figure 4. Shapes of different inner cladding layers (a) Circular, (b) Square, (c) Plum blossom, (d) Rectangle, (E) D-type, (f) Eccentric

图 4. 不同内包层的形状(a)圆形, (b)正方形, (c)梅花形, (d)长方形, (e) D形, (f)偏心病

3.2. 光子晶体光纤

1987 年亚布罗诺维奇(E. Yablonovitch)提出光子晶体的概念[33], 随后不就光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)便出现在人们的视野之中[34] [35] [36]。即在石英光纤中周期排列着波长量级的空气孔。按照导光的机制可以把光子晶体光纤分为两类: 折射率导引型和光子带隙导引型[37]。

PCF 在外观上和传统的单模光纤没什么区别, 但是在微观上有着天差地别, 因此 PCF 所有的特性是普通的单模光纤所不具备的, 例如无截止单模传输特性、极好的非线性效应和优良的双折射效应[38], 所以 PCF 在高功率光纤激光器的发展中扮演着重要的角色。

3.3. 泵浦耦合技术

光纤泵浦耦合技术是光纤激光器的关键技术之一, 能够把泵浦光耦合进入增益光纤中, 从而提高光

纤激光器的输出功率。下面主要介绍了端面泵浦耦合技术和侧面泵浦耦合技术。

3.3.1. 端面泵浦耦合

端面泵浦耦合技术[39]结构和操作都比较简单，大多数的光纤激光器都采用这种耦合方式，端面泵浦耦合主要有以下两种。

1) 透镜直接耦合泵浦

目前实验室较为常见的泵浦方法就是透镜直接耦合泵浦[40]，图 5 是它的结构图。如果要想获得较高的耦合效率，就要把透镜组的数值孔径和聚焦光斑大小与双包层光纤相匹配。采用这种方法，可获得高功率的激光输出，但稳定性较差，商用的光纤激光器很少采用这种方法。

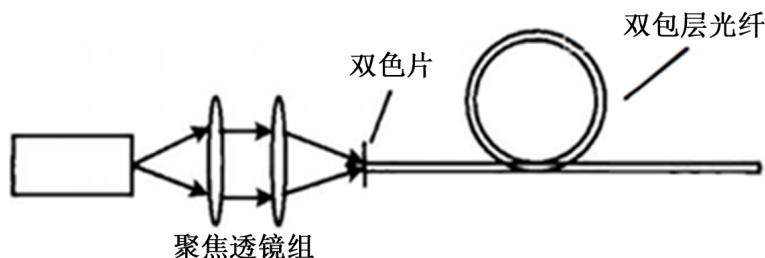


Figure 5. Lens direct coupled pump
图 5. 透镜直接耦合泵浦

2) 光纤端面熔接泵浦

当采用带尾纤输出的 LD (半导体泵浦源)作为光纤激光器的泵浦源时，可以将 LD 尾纤与双包层光纤一端直接熔接起来，它和光纤光栅共同构成一种全光纤结构的激光器[41] [42]。这种方法结构既牢固，又能够实现高功率的激光输出，然而作为泵浦源大功率的 LD 列阵须用半导体制冷，所发出的激光需要经过光束整形、准直、非球面镜聚焦耦合到直径为几百微米的光纤中，因此整机体积较大，构造复杂，成本较高，如图 6 所示。

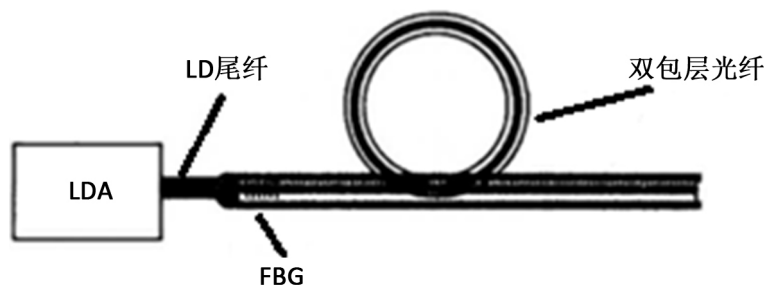


Figure 6. Fiber end fusion pump
图 6. 光纤端面熔接泵浦

3.3.2. 侧面泵浦耦合

侧面耦合技术是剥除双包层光纤的外包层和保护层，从内包层的一个侧面，把泵浦光耦合进双包层光纤内包层的方法[43] [44] [45] [46]。本节主要介绍了 V 槽侧面泵浦耦合、嵌入反射镜式泵浦耦合这两种耦合方式。

1) V 形槽侧面泵浦耦合

V 形槽侧面泵浦耦合技术是在一根双包层光纤上先剥除外包层，然后在内包层上研磨出一个 V 形状的凹槽，如图 7 所示。目前报道的最高耦合效率达 76%。这种耦合方式原理简单，能得到较高的输出功

率,但是存在着一些不足之处,例如在双包层光纤上很难制作 V 形槽,若制作不好会影响光纤的性能;V 形槽只能在两端刻蚀。因此,这种技术在国内仍处于发展过程中。

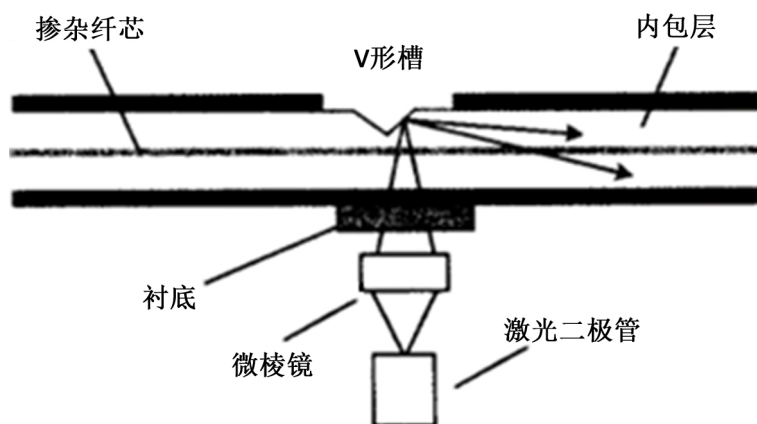


Figure 7. Structure of V-groove side pump coupling technology
图 7. V 形槽侧面泵浦耦合技术结构图

2) 嵌入反射镜式泵浦耦合

这项技术是对 V 形槽侧面泵浦耦合技术的改进,在双包层光纤内包层表面上磨出一个方形槽(注意槽的深度,不能破坏纤芯),然后用光学胶把反射镜粘在方形槽上。具体结构如图 8 所示。这种方法具有高耦合效率、低成本等优点,但是和 V 形槽侧面泵浦耦合技术类似,内包层内的槽刻蚀结果会对光纤的性能和传输产生影响。

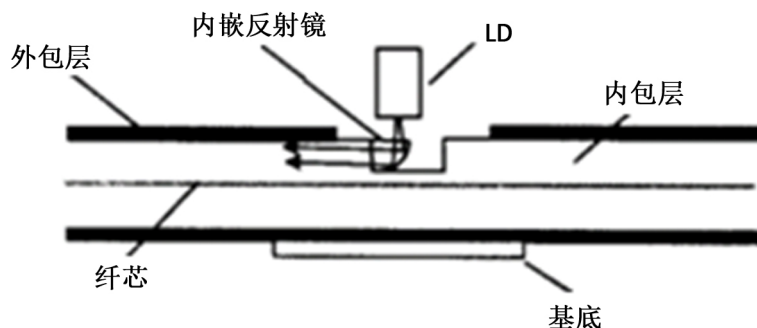


Figure 8. Structure diagram of pump coupling with embedded mirror
图 8. 嵌入反射镜式泵浦耦合结构图

4. 高功率光纤激光的应用

目前由于工业和科学技术的进步,高功率的激光器开始被广泛的用在许多行业中,尤其是大功率的光纤激光器,再加上高功率光纤激光器有上述的优点,光纤激光器制定会被大规模的应用。

4.1. 光纤激光打标

激光打标技术就是利用激光照射需要加工的物体表面,使其表面被雕刻出有一定深度和颜色的图形或数字等,从而留下永久标记的打标方法。激光打标的应用十分广泛,例如电脑配件、汽车零部件等领域。光纤激光打标机与传统的 CO₂ 激光打标机和 YAG 激光打标机相比,输出的光束质量好,光电转换效率高,因此光纤激光打标机会慢慢地取代传统打标机。

4.2. 激光切割

如今光学激光器的研究不断深入, 各种高功率的光纤激光器的功率被研发出来, 使得光纤激光切割机的应用越来越广泛, 例如汽车、广告、钣金加工、机柜等行业。

4.3. 在医疗领域的应用

目前, 医疗上临床所用的激光器多数都是二氧化碳激光器和 YAG 激光器, 但是这些激光器的体积很大, 且输出的光束质量低, 使用时需要巨大的水冷体系和难以安装等缺点。随着光纤技术的发展, 光纤激光器的产生完美的解决了这些问题。因此光纤激光器被广泛的利用在医疗上。例如软组织外科手术、近视眼校正手术、换肤手术等等。光纤激光器较为便携, 将逐渐替代医疗应用中的大部分已有光源。光纤激光器的作用面积很小, 手术变得更加精准。

4.4. 在军事领域的应用

因为高功率光纤器有着亮度非常高、照射面积非常小且操作方便敏捷的优质特征, 所以在军事领域中开发激光武器一直是世界各国长久以来的重点研究工作。若把高功率的光纤激光器应用在攻击武器上, 完全可以摧毁异常坚固的对象。激光武器的研制方面美国表现的异常突出, 例如在前几年开始, 美国空军研究职员就开始致力于对光纤激光器系统创新技术的研究。由此可见, 在未来军事领域中, 激光武器将会呈现尤为明显的发展态势, 并且为提高军事作战能力提供了充分有效的保障。

5. 展望

光纤激光器被称为第三代激光器, 其拥有高光束质量、高光电转化率、低维护成本等优点, 因此光纤激光器注定会在工业、医疗和军事等行业被大规模地应用。从利润和销售额来看光纤激光器目前的现状, 高功率光纤激光器的应用在未来可能会在激光器的市场上占据主导地位。因此国内外的激光器厂家都对高功率光纤激光器的发展产生了极大兴趣。但是目前我国对高功率光纤激光器和生产方面的研究, 相对国外那些企业来说, 仍存在一些差距, 希望我国的科研队伍在光纤激光器技术上能有更好的突破, 缩小与世界的差距。现在光纤激光器的发展已经十分迅速, 从早期小功率的输出到现千瓦级的激光输出。随着工业和科学技术的进步, 光纤激光器注定会被广泛地应用在许多行业中, 尤其是高功率的光纤激光器, 再加上光纤激光器所具有的优点, 未来几年内, 高功率光纤激光器的发展将会出现以下几个趋势:

- 1) 向更高功率、高光束质量、高平均功率和高峰值功率方向的光纤激光器发展, 从而满足在航海、航天和军事等领域的需求。
- 2) 研制出各种新型的特种光纤激光。
- 3) 高功率光纤激光的智能工业化。

基金项目

海南省重大科技计划项目(ZDKJ2019005)、海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目(2019RC190, 2019RC192)、海南省自然科学基金(2018CXTD336, 618QN241)资助、海南省高等学校科学研究项目(Hnky2020ZD-12, Hnky2020-24)、海南省科协青年科技英才学术创新计划项目(QCXM201810)、国家自然科学基金项目(61864002, 61964007)和中国工程科技发展战略项目(19-HN-XZ-07)。

参考文献

- [1] 陈苗海. 高功率光纤激光器的研究进展[J]. 激光与红外, 2007, 37(7): 589-592.

- [2] 张军, 潘玉寨, 胡贵军, 张亮, 王立军. 高功率光纤激光器的应用与展望[J]. 半导体光电, 2003, 24(4): 222-226.
- [3] 侯蓝田, 韩颖. 光纤激光器的发展与应用[J]. 燕山大学学报, 2011, 35(2): 95-101+114.
- [4] 张利明, 周寿桓, 赵鸿, 张昆, 郝金坪, 张大勇, 朱辰, 李尧, 王雄飞, 张浩彬. 780W 全光纤窄线宽光纤激光器[J]. 物理学报, 2014, 63(13): 170-175.
- [5] Maiman, T.H. (1960) Stimulated Optical Radiation in Ruby. *Nature*, **187**, 493-494. <https://doi.org/10.1038/187493a0>
- [6] Snitzer, E. (1961) In a Barium Crown Glass. *Physical Review Letters*, **7**, 444-446. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.7.444>
- [7] 姜涛. 大功率光纤激光器的理论与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [8] Snitzer, E., Po, H., Hakimi, F., *et al.* (1988) Double-Clad, Offset Core Nd Fiber Laser. *Optical Fiber Sensors*, New Orleans, 27 January 1988, PD5. <https://doi.org/10.1364/OFS.1988.PD5>
- [9] Po, H., Snitzer, E., Tummelini, R., *et al.* (1989) Double Clad High Brightness Nd Fiber Laser Pumped by GaAlAs Phased Array. *Optical Fiber Communication Conference*, Houston, 6 February 1989, PD7. <https://doi.org/10.1364/OFC.1989.PD7>
- [10] Po, H., Cao, J.D., Laliberte, B.M., *et al.* (1993) High Power Neodymium-Doped Single Transverse Mode Fiber Laser. *Electronics Letters*, **29**, 1500. <https://doi.org/10.1049/el:19931000>
- [11] Pask, H.M., Archambauh, J.L. and Hanna, D.C. (1994) Operation of Cladding-Pumped Yb³⁺ Doped Silica Fiber Lasers in 1m Region. *Electronics Letters*, **30**, 863-865. <https://doi.org/10.1049/el:19940594>
- [12] Limpert, J., Liem, A., Hofer, S., *et al.* (2002) 150 W Nd/Yb Codoped Fiber Laser at 1.1/spl mu/m. *Summaries of Papers Presented at the Lasers and Electro-Optics, Technical Diges*, Long Beach, 24 May 2002, 590-591.
- [13] Jeong, Y., Sahu, J.K., Payne, D.N., *et al.* (2004) Ytterbium-Doped Large-Core Fiber Laser with 1.36 kW Continuous-Wave Output Power. *Optics Express*, **12**, 6088-6092. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.006088>
- [14] Gapontsev, V., Gapontsev, D., Platonov, N., *et al.* (2005) 2 kW CW Ytterbium Fiber Laser with Record Diffraction-Limited Brightness. *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe*, Munich, 12-17 June 2005, 508.
- [15] 王建明. 高功率单模光纤激光器关键技术及输出稳定性研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [16] Yue, C., Peng, J. and Zhou, B. (1989) Tunable Nd³⁺ Doped Fiber Ring Laser. *Electronics Letters*, **25**, 101-102. <https://doi.org/10.1049/el:19890075>
- [17] Chen, C.Y., Choy, M.M., Andrejco, M.J., *et al.* (1990) A Widely Tunable Erbium-Doped Fiber Laser Pumped at 532 nm. *IEEE Photonics Technology Letters*, **2**, 18-20. <https://doi.org/10.1109/68.47028>
- [18] 楼祺洪, 周军, 朱健强, 薛冬, 孔令峰, 李进延, 李诗愈, 董景星, 魏运荣, 吴中林, 叶震寰, 凌磊, 王之江. 国产双包层掺镱光纤实现 440W 的连续高功率激光输出[J]. 中国激光, 2005(1): 20.
- [19] 李晨, 闫平, 陈刚, 巩马理. 采用国产掺镱双包层光纤的光纤激光器连续输出功率突破 700W[J]. 中国激光, 2006(6): 738.
- [20] 赵鸿, 周寿桓, 朱辰, 李尧, 吴健. 大功率光纤激光器输出功率超过 1.2kW[J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1359.
- [21] He, B., Zhou, J., Lou, Q., *et al.* (2010) 1.75-Kilowatt Continuous-Wave Output Fiber Laser Using Homemade Ytterbium-Doped Large-Core Fiber. *Microwave & Optical Technology Letters*, **52**, 1668-1671. <https://doi.org/10.1002/mop.25226>
- [22] 刘泽金, 周朴, 马鹏飞, 王小林, 粟荣涛, 马阎星, 陶汝茂, 张汉伟. 路高功率窄线宽、线偏振光纤放大器相干偏振合成实现 5kW 级高亮度激光输出[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 272.
- [23] 林宏奂, 唐选, 李成钰, 郭超, 刘琦, 赵鹏飞, 王波鹏, 王建军, 景峰. 全国产单纤激光系统获得 10.6kW 激光输出[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 335.
- [24] 林傲祥, 湛欢, 彭昆, 王小龙, 倪力, 王瑜英, 李雨薇, 刘爽, 孙仕豪, 姜佳丽, 唐选, 刘琦, 姜蕾, 俞娟, 王建军, 景峰. 国产复合功能光纤实现万瓦激光输出[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(6): 7.
- [25] 杨保来, 王小林, 叶云, 等. 全光纤激光振荡器输出功率突破 6kW[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0116001-1.
- [26] 任国光, 伊炜伟, 屈长虹. 高功率光纤激光器及其在战术激光武器中的应用[J]. 激光与红外, 2015, 45(10): 1145-1151.
- [27] 李学文, 漆云凤, 何兵, 等. 国产 25/400 μ m 掺镱双包层光纤实现 2.2kW 窄线宽单模激光输出[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 415-418.
- [28] 冯高锋, 杨军勇, 王建明, 等. 高功率光纤激光器用 20/400 双包层掺镱光纤[J]. 激光与红外, 2019, 49(4): 438-441.

- [29] 周军, 赵宏明, 王之江, 等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714W 连续光纤激光器[J]. 光学学报, 2006, 26(7): 1119-1120.
- [30] 楼祺洪, 周军, 朱健强, 等. 单端抽运国产 D 形双包层光纤激光器实现输出功率 200W[J]. 中国激光, 2004, 31(9): 1029-1029.
- [31] 阮双琛, 冯鸣, 文华胡, 等. 8.6W 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的研究[J]. 光子学报, 2003, 32(8): 911-913.
- [32] 楼祺洪, 周军, 孔令峰, 等. 高功率脉冲双包层光纤激光器的新进展[J]. 量子电子学报, 2005, 22(4): 510-515.
- [33] Yablonovitch, E. (1987) Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Physical Review Letters*, **58**, 2059-2062. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2059>
- [34] 池灏, 章献民, 沈林放. 基于光子晶体光纤的布里渊光纤激光器[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(12): 2126-2129.
- [35] 郭春雨, 欧阳德钦, 阮双琛, 等. 高功率纳秒光纤激光器抽运锥形光子晶体光纤产生超连续谱[J]. 中国激光, 2013(4): 123-128.
- [36] 牛静霞, 周桂耀, 侯蓝田, 等. 光子晶体光纤在光纤激光器中的应用[J]. 光通信技术, 2009, 33(1): 44-47.
- [37] 柴路, 胡明列, 方晓惠, 刘博文, 宋有建, 栗岩锋, 王清月. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 7-20.
- [38] 王伟, 侯蓝田. 光子晶体光纤的现状和发展[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(2): 43-58.
- [39] 姚建铨, 任广军, 张强, 王鹏. 掺镱双包层光纤激光器及其泵浦耦合技术[J]. 激光杂志, 2006, 27(5): 1-4.
- [40] 邓元龙, 姚建铨, 阮双琛, 等. 光纤激光器透镜耦合系统的优化设计[J]. 激光杂志, 2005, 26(5): 42-43.
- [41] 陈吉欣, 隋展, 陈福深, 等. 端面泵浦掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 315-318.
- [42] 黄枢. 光纤端面处理与熔接质量对光纤激光器输出功率的影响[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2007, 6(z1): 14-18.
- [43] 韦文楼, 欧攀, 闫平, 巩马理, 肖力敏. 双包层光纤的侧面泵浦耦合技术[J]. 激光技术, 2004, 28(2): 116-120.
- [44] 阮义, 宁提纲, 裴丽, 胡旭东. 高功率双包层光纤激光器的泵浦技术[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2009(1): 22-24+40.
- [45] 王大拯, 王勇刚, 刘素平, 等. 双包层光纤激光器微棱镜反射式侧面耦合的新技术[J]. 光学学报, 2009(4): 128-133.
- [46] 黄值河, 曹润秋, 郭少锋, 等. 分布式侧面耦合包层抽运光纤激光器数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 63-67.