

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学号: 22220051302375

UDC \_\_\_\_\_

厦门大学

硕士学位论文

掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器的理论与实验研究

Theoretical and experimental studies of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped  
double-clad fiber lasers

戴贤哲

指导教师姓名: 叶陈春 教授

专业名称: 无线电物理

论文提交日期: 2008年5月

论文答辩时间: 2008年5月

学位授予日期: 2008年7月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2008年5月

掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器的理论与实验研究

戴贤哲

指导教师: 叶陈春教授

厦门大学

厦门大学博士论文摘要库

# 厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。  
本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士



## 摘 要

双包层光纤激光器作为一种新型的高功率激光器件,由于光束质量好、效率高、寿命长等特点,成为新一代固体激光器的代表,在许多领域都有巨大的应用前景,如光通信、工业加工、军事、医疗等领域。本文对掺镱( $\text{Yb}^{3+}$ )双包层光纤激光器进行了较为深入的理论与实验研究,主要包括以下内容:

第一章,对双包层光纤激光器的发展历史、优点以及其应用进行了详细的概括和总结,使我们对双包层光纤激光器有一个总体的了解。

第二章,从镱离子的能级结构和光谱特性出发,对掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤的结构、双包层光纤激光器的工作原理、泵浦耦合技术以及谐振腔结构等进行了详细的论述。

第三章,基于稳态速率方程,在考虑散射损耗的情况下,分别推导出前向泵浦、后向泵浦和双端泵浦掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器的简化型解析解,并将推导的简化型解析解与标准数值模拟结果相比较,两者基本一致。

第四章,在实验室现有的条件下,利用 975nm 大功率半导体激光器作为泵浦源,采用单端泵浦技术,分别搭建了前向泵浦掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器和后向泵浦掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器的实验平台。并将实验结果与推导的简化型解析解进行比较,两者基本一致,证明了简化型解析解的正确性。最后,采用后向泵浦技术,利用平面反射光栅作为后腔镜,对连续输出的激光波长进行调谐,实现输出激光的波长从 1047nm~1118nm 连续可调谐,最大输出功率 23.7W。

第五章,对全文进行了总结,并对未来的工作提出了建议和展望。

**关键词:** 光纤激光器; 双包层光纤; 解析解

## ABSTRACT

Double-clad fiber lasers are promising high-power lasers, due to their excellent characteristics, including high beam quality, high efficiency and long service time. They have great potential for many applications, such as, communication systems, industrial, military and medical applications. This thesis is composed of five chapters, reporting theoretical and experimental studies of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fiber lasers.

Firstly, the development history, advantages and applications of double-clad fiber laser are briefly introduced.

The principles and structure of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fibers and different techniques of pump beam coupling are discussed in Chapter 2, based on the energy levels and spectral characteristics of the doped  $\text{Yb}^{3+}$  ions.

Based on the steady-state rate equations when the scattering loss is considered, the simplified analytic solutions of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fiber lasers with forward pumping configuration, backward pumping configuration and two-end pumping configuration are deduced, respectively. The results of simplified analytic solutions are in good agreement with those of the numerical simulations.

$\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fiber laser with forward pumping configuration and backward pumping configuration have been constructed and demonstrated, by making good use of the facilities available in our lab. A 975nm laser diode was used as the pump source using the single-end pumping technique. The experimental results and theoretical ones from our analytic solutions match very well, and our simplified analytic solutions have been validated. Using backward pumping configuration and a reflection grating, a tunable  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fiber laser has been successfully demonstrated. The wavelength tuning range from 1047nm to 1118nm is achieved with output power greater than 23.7W.

Finally, the thesis is summarized, with suggestions for the future work.

**Key words:** fiber laser;  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fiber; analytic solution

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 双包层光纤激光器的发展 .....	1
1.2 双包层光纤激光器的优点 .....	4
1.3 双包层光纤激光器的应用 .....	5
1.3.1 双包层光纤激光器在通讯领域的应用 .....	5
1.3.2 双包层光纤激光器在工业领域的应用 .....	6
1.3.3 双包层光纤激光器在军事上的应用 .....	7
1.3.4 双包层光纤激光器在医疗领域的应用 .....	8
1.3.5 光纤激光器在激光电视的应用 .....	8
1.4 论文的主要研究内容 .....	9
<b>第二章 掺 Yb<sup>3+</sup>双包层光纤激光器的原理与结构</b> .....	<b>11</b>
2.1 镱离子能级结构和光谱特性 .....	11
2.1.1 镱离子的能级结构 .....	11
2.1.2 镱离子的吸收和发射截面 .....	13
2.2 掺 Yb <sup>3+</sup> 双包层光纤结构及工作原理 .....	14
2.3 双包层光纤激光器耦合方式 .....	15
2.3.1 端面泵浦耦合 .....	16
2.3.2 侧面泵浦耦合 .....	17
2.4 双包层光纤激光器的基本谐振腔结构 .....	21
2.4.1 F-P 腔结构 .....	21
2.4.2 环形腔结构 .....	23
<b>第三章 掺 Yb<sup>3+</sup>双包层光纤激光器的理论研究</b> .....	<b>25</b>
3.1 单端泵浦掺 Yb <sup>3+</sup> 双包层光纤激光器 .....	25
3.1.1 前向泵浦掺 Yb <sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的解析解 .....	26
3.1.2 后向泵浦掺 Yb <sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的解析解 .....	29
3.2 双端泵浦掺 Yb <sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的解析解 .....	31
3.3 数值模拟结果与分析 .....	33

3.4 总结 .....	37
<b>第四章 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的实验研究 .....</b>	<b>39</b>
4.1 实验泵浦方案的选择 .....	39
4.1.1 双包层光纤激光器的泵浦耦合方式 .....	39
4.1.2 泵浦源波长的选择 .....	39
4.1.3 泵浦源的性能测试 .....	40
4.2 前向泵浦掺 Yb <sup>3+</sup> 双包层光纤激光器 .....	42
4.2.1 二向色镜的选择 .....	43
4.2.2 掺 Yb <sup>3+</sup> 双包层光纤端面的处理 .....	43
4.2.3 掺 Yb <sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的光路调节 .....	45
4.2.4 实验结果与讨论 .....	46
4.3 后向泵浦掺 Yb <sup>3+</sup> 双包层光纤激光器 .....	48
4.4 可调谐掺 Yb <sup>3+</sup> 双包层光纤激光器 .....	51
4.5 总结 .....	53
<b>第五章 总结和展望 .....</b>	<b>55</b>
5.1 全文总结 .....	55
5.2 展望 .....	56
参考文献 .....	57
攻读硕士期间发表的文章及获奖情况 .....	63
致谢信 .....	64

# Contents

<b>1.Introduction</b> .....	1
<b>1.1The development of double-clad fiber lasers</b> .....	1
<b>1.2Advantages of double-clad fiber lasers</b> .....	4
<b>1.3Application of double-clad fiber lasers</b> .....	5
1.3.1Ccommunications .....	5
1.3.2Industrial applications.....	6
1.3.3Military applications .....	7
1.3.4Medical applications .....	8
1.3.5Laser television .....	8
<b>1.4The primary contents of the thesis</b> .....	9
<b>2.The principles and structures of Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber lasers</b> .....	11
<b>2.1 The energy levels and spectral characteristics of Yb<sup>3+</sup></b> .....	11
2.1.1 The energy levels of Yb <sup>3+</sup> .....	11
2.1.2 The absorption and emission crosssections of Yb <sup>3+</sup> .....	13
<b>2.2 The structure and principle of Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber lasers</b> .....	14
<b>2.3 The pump light coupling inYb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber lasers</b> .....	15
2.3.1End-pumping.....	16
2.3.2Side-pumping.....	17
<b>2.4 Resonant cavity of double-clad fiber lasers</b> .....	21
2.4.1 F-P cavity .....	21
2.4.2 Ring cavity.....	23
<b>3.Theoretical studies of Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber lasers</b> .....	25
<b>3.1 Single-end pumped Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber lasers</b> .....	25
3.1.1 The analytic solutions of Yb <sup>3+</sup> -doped double-clad fiber lasers with forward-pumping configuration.....	26
3.1.2 The analytic solutions of Yb <sup>3+</sup> -doped double-clad fiber laser with backward-pumping configuration.....	29

<b>3.2 Analytic solutions of Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber lasers with two-end pumping configuration</b> .....	31
<b>3.3 Results and analysis of the numerical simulation</b> .....	33
<b>3.4 Summary</b> .....	37
<b>4. Experimental investigation of Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber lasers</b> .....	39
<b>4.1 The pump source and coupling techniques</b> .....	39
4.1.1 Coupling techniques of pump light.....	39
4.1.2 Selection of pump Wavelength .....	39
4.1.3 Characterisation of the pump source .....	40
<b>4.2 Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber laser with forward pumping</b> .....	42
4.2.1 Dichroic filters .....	43
4.2.2 End face of the Yb <sup>3+</sup> -doped double-clad fiber .....	43
4.2.3 Optical alignment of Yb <sup>3+</sup> -doped double-clad fiber lasers .....	45
4.2.4 Experimental results and discussions.....	46
<b>4.3 Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber lasers with backward pumping</b> .....	48
<b>4.4 Tunable Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad fiber lasers</b> .....	51
<b>4.5 Summary</b> .....	53
<b>5. Conclusion and Prospect</b> .....	55
<b>5.1 Conclusion</b> .....	55
<b>5.2 Prospect</b> .....	56
<b>References</b> .....	57
<b>Publications and rewards during the period of my studies for a master degree</b> ..	63
<b>Acknowledgement</b> .....	64



## 第一章 绪论

自从1960年世界第一台激光器问世以来,激光技术得到了快速的发展。由于激光具有很好的单色性、相干性、方向性等优点,四十多年来,各种各样的激光器层出不穷,形成了激光物理及技术等专门的新兴学科。激光在加工、医疗、军事、通信、检测等各个领域得到了广泛的应用,若干已形成巨大的产业体系。随着制造工艺的完善,激光器正在向小型化、全固化的方向发展,其中光纤激光器以其效率高、阈值低、窄线宽、可调谐、体积小和高功率等优点成为国内外研究重点,尤其是对高功率双包层光纤激光器的研究。

### 1.1 双包层光纤激光器的发展

人们对光纤激光器的研究历史几乎和激光器本身的发展史一样长,上世纪六十年代初, Koester和Snitzer将长度1m的掺杂 $\text{Nd}^{3+}$ 的硅酸盐玻璃光纤缠绕在闪光灯上,在波长 $1.06\mu\text{m}$ 处观察到了47dB的增益放大<sup>[1]</sup>,但由于受当时光纤的制造工艺、稀土离子的掺杂工艺以及泵浦源的制约,光纤激光器的发展一直比较缓慢。1966年,华裔科学家高锟在他的著名论文中解决了石英光纤损耗的理论问题,认为通过制造工艺的改进,完全有可能制作出低损耗的光纤。1970年,美国康宁公司研制了第一根损耗为20dB/km的光纤<sup>[2]</sup>,这一技术的突破使光电子信息技术以异乎寻常的速度发展,而且为光纤激光器中特种光纤的开发提供了先进的技术基础。八十年代中期,英国Southampton大学的S.B.Polle等用MCVD法制成了低损耗的掺铒光纤<sup>[3]</sup>,率先开发出气相掺杂与液相掺杂的技术,使稀土元素掺杂光纤的制造工艺日益完善,并且先后报导了光纤激光器调Q、锁模、单纵模输出以及光纤放大器方面的研究工作,1987年推出了第一个实用的掺铒光纤放大器(EDFA),成功地应用在光通讯领域的中继放大光路上。此后光纤激光器得到了真正的发展,在激光领域中占据重要的地位。

此后,人们的研究目标开始转移到研制高增益、高输出功率和高稳定性的有源稀土掺杂光纤激光器及放大器。并且开始考虑利用半导体激光二极管来泵浦光纤激光器。由于传统单模光纤的直径只有几个微米,激光二极管与有源光纤的耦

合效率非常的低，常规光纤激光器的输出功率被限制在瓦级。因此，长期以来，光纤激光器在高功率激光领域的应用受到极大的限制。直到20世纪80年代后期，包层泵浦技术的出现成为解决这个问题的途径。双包层光纤独特的包层结构使高功率的多模激光能有效地耦合进入光纤，对纤芯进行泵浦，从而可以得到高功率的激光输出。双包层光纤激光器不仅具有光纤激光器的基本优点，而且其输出功率达到了非常高的水平，完全可以跟普通的高功率固体激光器相媲美，在高功率激光应用领域成为普通固体激光器的有力竞争者。

在光纤激光器的有源光纤的研究方面，掺杂稀土离子的光纤成为研究热点，比如我们熟知的掺铒(Er)，钕(Nd)，镱(Yb)，铥(Ho)，铥(Tm)等离子的光纤已经在各个领域广泛地应用。其中掺铒光纤激光器和放大器的发展最为迅速，因为铒离子的发射波长为1.55 $\mu\text{m}$ ，刚好是光纤通信中最低的损耗窗口，光通信的迅速发展刺激并推动了以铒离子为激光介质实现的激光器和放大器的发展。近几年来光通信系统容量越来越大，出现的WDM及DWDM技术均要用到大功率的激光器及放大器。

以掺Nd<sup>3+</sup>光纤作为增益介质的激光器的发展也非常迅速，如目前在工业加工、医疗等大功率激光应用领域中Nd:YAG激光器占了相当大的比重，最大输出功率为数百瓦。掺杂钕离子的光纤似乎有着更优越的性能，但是由于普通单模光纤与半导体泵浦源的耦合效率低，因此刚开始发展也比较缓慢。直到1988年，美国宝丽来公司Snitzer等人发明了具有内包层结构的掺Nd<sup>3+</sup>双包层光纤<sup>[4]</sup>，并从理论上证明了这种双包层光纤具有90%以上的吸收效率，这是国际上第一次提出双包层光纤的概念，大大提高了掺杂光纤的吸收效率和双包层光纤激光器的输出激光功率；1992年，J.D.Minelly等人报道了输出功率大于1W的掺Nd<sup>3+</sup>双包层光纤激光器<sup>[5]</sup>；1993年，美国宝丽来公司的H.Po及其合作者从掺Nd<sup>3+</sup>矩形内包层多模光纤激光器中获得5W单模激光输出<sup>[6]</sup>；1995年，德国H.Zellmer用激光二极管泵浦圆形内包层多模光纤<sup>[7]</sup>，得到9.2W激光输出，从此人们看到了稀土掺杂双包层光纤激光器的前景。

然而，钕离子的吸收带宽非常窄，对泵浦源的波长稳定性及精度要求较高。这时人们将研究焦点转到了具有优良性能的镱离子，从此高功率双包层光纤激光器进入了飞速发展的时期。1988年，英国Southampton大学的D.C.Hanna等人在掺

$\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器中得到  $1.01\mu\text{m} \sim 1.162\mu\text{m}$  波长的可调谐激光输出<sup>[8]</sup>，同时在  $1.12\mu\text{m}$  实现激光连续输出；1994年，H.M.Pask等人首先在掺  $\text{Yb}^{3+}$  石英光纤中实现半导体激光器泵浦双包层光纤激光器<sup>[9]</sup>，在  $1.04\mu\text{m}$  波长处得到最大  $0.5\text{W}$  的激光输出，光光转换效率达到  $80\%$ ；1997年，美国科学家 M.Muedel 等人报道的掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器在  $1.1\mu\text{m}$  波长处得到  $33.5\text{W}$  的连续激光输出<sup>[10]</sup>；1998年，Boggavarapu D 等人报道了高达  $55\text{W}$  的连续激光输出<sup>[11]</sup>；1999年，V.Dominic 等人用四个  $45\text{W}$  半导体激光器双端泵浦单根掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器，获得了  $110\text{W}$  的单模连续激光输出<sup>[12]</sup>。近几年来，掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器已经发展成为较成熟的高功率光纤激光器的代表。

由于连续输出大功率双包层光纤激光器在工业加工等方面的广泛应用使得研究人员不断改进方案来提高输出功率水平。2002年，在 CLEO 会议上德国 J.Limpert 报告采用双波长 ( $808\text{nm}$ 、 $975\text{nm}$ ) 的半导体激光器泵浦  $45\text{m}$  长的 Nd/Yb 共掺的双包层光纤，获得  $150\text{W}$  激光输出；2003年，Southampton Photonics, Inc.(SPI) 宣布掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤和掺  $\text{Er}^{3+}$  双包层光纤分别实现了  $270\text{W}$  ( $1080\text{nm}$ ) 和  $100\text{W}$  ( $1565\text{nm}$ ) 的单模激光输出<sup>[13]</sup>；同年7月，SPI 公司跟英国南安普顿大学的光电子研究中心合作实现了  $600\text{W}$  的激光输出<sup>[14]</sup>；2004年，Jeong 等人研制成功输出功率达  $1.36\text{kW}$  波长为  $1.1\mu\text{m}$  的大模场掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器<sup>[15]</sup>；2005年，Gaponstev 通过整合多个百瓦级的双包层光纤激光源获得了高达  $2\text{kW}$  的激光输出<sup>[16]</sup>；同年，IPG 公司利用种子光振荡放大技术实现了单根光纤高达近  $2\text{kW}$  的准单模激光输出<sup>[17]</sup>。

国内关于掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器的研究起步较晚。2002年，上海光机所采用中心波长为  $915\text{nm}$  的 LD 泵浦  $50\text{m}$  矩形光纤的光纤激光器，得到  $4.9\text{W}$  的激光输出<sup>[18]</sup>；同年，南开大学报道的一种高斜率效率的双包层掺  $\text{Yb}^{3+}$  光纤激光器，采用大功率多模 LD 泵浦 D 形双包层光纤 ( $340\mu\text{m}/400\mu\text{m}$ )，以端面反射作为后腔镜，获得  $6.5\text{W}$  的激光输出<sup>[19]</sup>；2003年，清华大学精密仪器系光子与电子技术研究中心采用端面泵浦掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤，获得  $137\text{W}$  激光输出<sup>[20]</sup>；2005年，北京光电技术研究所研制的  $33\text{W}$  单模连续全光纤激光器代表了我国全光纤激光器的最高水平，该全光纤激光器的研制成功是我国光纤激光器向实用化和产业化迈出的重要一步；2006年，中科院上海光机所报道了采用双端泵浦国产掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤实

现了714W的高功率输出<sup>[21]</sup>；同年，清华大学也获得了超过700W的输出功率<sup>[22]</sup>。

总之，我国在双包层光纤激光器方面的研究取得了一定成果，但是受到相关器件和核心技术的制约，距实用化、国产化、商品化还有较大的距离。我国的科研工作者只有努力创新并积极相互合作，才能早日缩小与国际先进水平的差距，提高我国的国际竞争力。

## 1.2 双包层光纤激光器的优点

随着高功率半导体激光二极管的研究成熟，以及包层泵浦技术的快速发展，作为新一代的光纤激光器—双包层光纤激光器，与普通激光器相比所具有的各种优势明显的显现出来。双包层光纤激光器具有以下优点：

- 1、光束质量好，具有良好的单色性、方向性和温度稳定性。双包层光纤激光器的输出光束质量由光纤纤芯的波导结构(纤芯直径和数值孔径)决定，不会因热变形而变化，因此易于实现高光束质量的激光输出。
- 2、输出功率极高。由于内包层的横截面尺寸和数值孔径都较大，采用多模大功率半导体激光器作为泵浦源，通过包层泵浦技术，耦合效率较普通单模光纤有很大的提高，易于实现高功率激光输出。
- 3、宽范围内波长可调谐。由于使用掺稀土离子光纤作为激光工作物质，其掺杂稀土离子、掺杂浓度和掺杂光纤长度等具有相当多的可调参数，因而双包层光纤激光器可以在很宽光谱范围内设计运行，可实现对输出激光的波长调谐。
- 4、能量转化效率高，成本低。光纤激光器以掺稀土离子的光纤作为激光介质能很方便地延长增益介质的长度，使泵浦光被充分吸收。这一特性使双包层光纤激光器具有较高的能量转换效率，总的光光转换效率可达60%以上。同时双包层光纤激光器的电光效率也很高，这样可以大幅度节约耗电，降低运行成本。
- 5、使用掺稀土离子的光纤，其制作工艺已经非常成熟，目前可制作出高精度、低损耗的光纤，因而大大降低了光纤激光器的成本。可采用光纤光栅，耦合器等光纤元件，通过光纤熔接来实现双包层光纤激光器的全光纤化，因此整个系统免调节、免维护，具有结构紧凑、体积小、重量轻、稳定性高等特点。全光纤结构的光纤激光器具有很强的抗干扰性，对灰尘、震荡、冲击、湿度、

温度具有很高的容忍度，可以在各种恶劣工业环境下使用。同时能满足各种多维任意空间加工应用，使机械系统的设计变得非常简单。

- 6、散热特性非常好。普通固体激光器实现高功率激光输出的主要困难在于激光介质热效应引起光束质量及效率的下降，而双包层光纤激光器的激光介质是具有很大表面积体积比的掺杂光纤，因而散热性能非常好，一般不需要冷却系统，即使在很大的输出激光功率时也只需简单的风冷却。

总之，双包层光纤激光器在效率、散热、光束质量等方面与普通固体激光器相比具有明显优势，已经引起人们的广泛关注，成为目前国际上激光技术领域研究的热点之一。

### 1.3 双包层光纤激光器的应用

目前，以包层泵浦为核心技术的高功率双包层光纤激光器已经走向实用化，并以其高功率、高效率、宽波段、结构紧凑、运转可靠、性价比高、全固化等优点，在光通信、工业加工、军事、激光医疗、激光电视等领域得到广泛的应用。

#### 1.3.1 双包层光纤激光器在通讯领域的应用

光纤拉曼放大器由于其突出的优点在最近几年受到广泛关注，目前普遍认为光纤拉曼放大器是实现光纤低损波段的理想的光放大器。但是拉曼放大技术对泵源要求很高，因此高功率、波长合适的泵浦光源是实现拉曼激光器与放大器的关键。而掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层激光器具有的优点使它非常适合做拉曼放大器和激光器的泵浦源：1、高输出功率，目前已有功率上百瓦的产品，完全可以满足拉曼放大器对泵浦源功率的要求。2、合适的输出波长，利用掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤激光器输出  $1.06\mu\text{m}$  的激光泵浦掺锗石英光纤，可通过三级拉曼频移和六级拉曼频移分别得到波长为  $1.24\mu\text{m}$  和  $1.48\mu\text{m}$  的激光输出，因此可以作为  $1.30\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  通信窗口光纤拉曼放大器的泵浦源<sup>[64]</sup>。3、单模输出，可保证输出激光方便、高效地耦合进入光纤，对于拉曼光纤激光器的实用化具有特殊的意义。高功率光纤激光器另一个发展方向是应用到光孤子通讯和空间通讯领域，实现远距离、无差错通信。

### 1.3.2 双包层光纤激光器在工业领域的应用

双包层光纤激光器因其高的输出功率，近几年在工业加工领域也备受瞩目。双包层光纤激光器有替代传统 YAG、CO<sub>2</sub> 激光器的趋势<sup>[65]</sup>。光纤激光器在激光加工领域的应用范围和所需性能具体如下：软焊和烧结：50~500W；聚合物和复合材料切割：200W~1kW；快速印刷和打印：20W~1kW；金属淬火和涂敷：2~20kW；玻璃和硅的切割：500W~2kW 等等。利用双包层光纤激光器都能满足上述要求。

#### 一、双包层光纤激光器在汽车制造、船舶制造业中的应用

近几年来，国际上对双包层光纤激光焊接技术在造船、汽车制造业中的应用越来越重视。在欧美发达国家中，大约有超过半数的汽车零部件都用到了以光纤激光焊接和光纤激光切割为主的激光加工技术。欧美及日本主要的大型船厂已大量使用激光加工技术。我国的上海大众等汽车制造厂也采用激光加工技术焊接车身与箱体等部件。目前，美国、欧洲等地区正在进行 2kW、6kW 大功率双包层光纤激光器加工设备的研发。我国已开发出小功率系列工业光纤激光产品和中小功率激光加工设备，如激光打标机、雕刻机、切割机、焊接机等，已广泛应用于工业领域的各个行业，但大功率双包层光纤激光器在工业加工应用方面仍是空白，在我国造船工业中甚至还没有使用过激光加工技术。

#### 二、双包层光纤激光器在激光打标和激光雕刻行业的应用

光纤激光器出现后，以其光束质量好、效率高、成本低、无光学污染、寿命长、易维护以及一体化整体结构等优点很快地被应用于激光打标系统上。近年来，光纤激光打标机在欧洲、北美和日本市场上已经大量采用。虽然目前光纤激光器成本比 CO<sub>2</sub> 激光器和闪光灯泵浦激光器高，但光纤激光器的功率消耗和直接维护费用较低，从长远效益来看，光纤激光器有较大优势。

因为光纤激光器的光束质量好，所以用光纤激光器雕刻的图像具有更高的清晰度。与目前已有的 CO<sub>2</sub> 激光雕刻机和闪光灯泵浦激光雕刻机相比，光纤激光器的雕刻线宽度最小可达 15 $\mu$ m，且整个系统电光转换效率要比传统激光雕刻机高一个数量级。双包层光纤激光器作为光纤激光器家族中的佼佼者，在打标和雕刻行业大展身手更是无需质疑的。

#### 三、双包层光纤激光器在激光焊接加工领域的应用

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

廈門大學博碩