高性能光纤激光器的材料选择与器件设计

张小龙

清华大学 北京 100084

摘要：高性能光纤激光器基于光纤放大技术，材料选择上，常见增益介质包括掺铒光纤、掺镱光纤等，不同介质适用于不同波长范围的激光输出。器件设计上，主要由泵浦源、光纤增益介质、输出端光纤和控制系统等组成。设计时要考虑泵浦功率的调节、波长选择等参数优化，确保高光束质量、高功率输出。制造工艺包括光纤拉制、端面处理和组装，最终应用于材料加工、通信等多个领域。

关键词：高性能光纤激光器；材料选择；器件设计

引言：光纤激光器作为一种高效的光源设备，在现代科技和工业领域扮演着至关重要的角色。本文深入探讨了高性能光纤激光器的材料选择与器件设计，旨在揭示不同增益介质材料的特性及其对激光器性能的影响，同时阐述器件设计的关键要素与优化策略。通过这些研究，期望能为光纤激光器的进一步性能提升与应用拓展提供有力的理论支撑和实践指导。

1 光纤激光器的基本原理

1.1 光纤激光器的构成与工作原理

光纤激光器是一种利用光纤作为增益介质的激光器，其基本构成包括增益介质（即掺杂稀土元素的光纤）、泵浦源（通常为半导体激光器）以及光学谐振腔（由两个反射镜组成）。泵浦源发出的光被光纤吸收，将光纤中的掺杂离子激发至高能级，形成粒子数反转。当这些高能态粒子向低能级跃迁时，会释放出与泵浦光频率相近的光子，这些光子在谐振腔内不断反射并放大，最终输出高强度的激光。

1.2 光纤增益介质的激光放大效应

光纤增益介质是光纤激光器的核心部分，其激光放大效应基于受激辐射原理。当光纤中的掺杂离子被泵浦光激发至高能级后，它们会在短时间内处于激发态。当入射光信号通过光纤时，会与这些激发态的离子发生相互作用，导致光信号的放大。这一过程是光信号的受激辐射放大，它使得光信号在光纤中传输的过程中不断得到增强。

1.3 泵浦源与能量输入机制

泵浦源是光纤激光器的能量输入部分，它提供了将掺杂离子激发至高能级所需的能量。常见的泵浦源有半导体激光器、闪光灯等。泵浦源发出的光被光纤吸收后，将能量传递给光纤中的掺杂离子，使其发生能级跃迁。泵浦源的功率和波长等参数对光纤激光器的性能和

输出特性有重要影响。

1.4 控制系统与参数控制

光纤激光器的控制系统负责调节激光器的各项参数，以确保其稳定、高效地工作。控制系统通常包括泵浦源控制器、反射镜调节器、温度控制器等部分。通过调节这些部分，可以控制激光器的输出功率、波长、光束质量等参数。此外，控制系统还可以根据实际需求对激光器进行远程控制和监控，以提高其应用灵活性和可靠性。

2 高性能光纤激光器的材料选择

2.1 增益介质

（1）掺铒光纤、掺镱光纤和掺铒镱光纤等材料的特性与比较。1）掺铒光纤是高性能光纤激光器中最常用的增益介质之一。掺铒光纤的发光波长主要集中在 $1.55\mu\text{m}$ 附近，这一波长的光在通信领域具有广泛的应用。掺铒光纤的优点包括：发光效率高、稳定性好、易于与现有通信系统兼容等。然而，其缺点是泵浦效率相对较低，需要较高的泵浦功率才能实现高效的激光输出。2）掺镱光纤则适用于波长较短的高功率光纤激光器。掺镱光纤具有较宽的吸收光谱和发射光谱，能够在较宽的波长范围内实现高效的激光输出。此外，掺镱光纤的泵浦效率较高，可以实现较高的能量转换效率。但是，掺镱光纤在较长波长（如 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.5\mu\text{m}$ ）下的发光效率较低，限制了其在某些应用领域的表现。3）掺铒镱光纤是一种结合了掺铒和掺镱光纤优点的增益介质。它能够在较宽的波长范围内实现高效的激光输出，同时具有较高的泵浦效率和发光效率。这种光纤激光器适用于需要高功率和宽波长范围的应用，如材料加工和激光雷达等。（2）光纤增益介质的选择原则。在选择光纤增益介质时，需要综合考虑多个因素，包括波长、泵浦效率、发光效率、稳定性等。首先，根据应用需求确定所需的波长范围。

然后,考虑泵浦效率和发光效率,以确定哪种增益介质能够实现最高的能量转换效率和最低的损耗。此外,稳定性也是选择增益介质时需要考虑的重要因素。具有优异稳定性的增益介质可以确保激光器的长期稳定运行^[1]。

2.2 泵浦源

(1) 闪光灯、激光二极管等泵浦源的优缺点。闪光灯泵浦源具有结构简单、成本低廉等优点,但其泵浦效率较低,需要大量的电能来实现高效的激光输出。此外,闪光灯泵浦源产生的光脉冲宽度较大,限制了激光器的重复频率和峰值功率。激光二极管泵浦源则具有较高的泵浦效率和较窄的光脉冲宽度,可以实现较高的能量转换效率和较短的激光脉冲。此外,激光二极管泵浦源还具有体积小、寿命长等优点。但是,其成本相对较高,且在某些波长范围内可能存在难以找到合适的泵浦源的问题。(2) 泵浦源的选择与匹配。在选择泵浦源时,需要考虑增益介质的吸收光谱和泵浦源的发射光谱是否匹配。只有匹配良好的泵浦源才能有效地将能量传递给增益介质,实现高效的激光输出。此外,还需要考虑泵浦源的功率稳定性、重复频率和峰值功率等参数,以确保激光器能够满足应用需求。

2.3 反射镜与透镜

(1) 高质量反射镜与透镜对光束聚焦与反射效率的影响。高质量反射镜和透镜在高性能光纤激光器中起着至关重要的作用。反射镜用于将泵浦光和激光在谐振腔内反射,以实现高效的能量转换和光束放大。透镜则用于对光束进行聚焦和准直,以提高激光器的光束质量和功率密度。高质量反射镜和透镜能够提高反射效率和透射效率,减少光损耗和散射,从而确保激光器的高效、稳定运行。(2) 材料选择与设计的要求。在选择反射镜和透镜的材料时,需要考虑其光学性能、热稳定性和机械强度等因素。常用的反射镜材料包括金属反射膜和介质反射膜等,它们具有优异的光学性能和热稳定性。透镜材料则包括玻璃、晶体等,它们需要具有高透光性、低散射损耗和优异的热稳定性^[2]。此外,在设计反射镜和透镜时,还需要考虑其形状、尺寸和表面质量等因素,以确保其能够满足激光器的性能要求。

3 高性能光纤激光器的器件设计

3.1 设计原则与优化方法

(1) 理论计算与仿真在设计中的作用。在高性能光纤激光器的设计过程中,理论计算与仿真发挥着至关重要的作用。通过精确的理论计算,可以预测激光器的性能,包括输出功率、波长稳定性、光束质量等关键指标。而仿真技术则能够模拟激光器的实际工作情况,帮

助设计者发现潜在的问题并进行优化。理论计算通常基于量子力学、光学和热力学等基本原理,通过建立数学模型来描述激光器的物理过程。这些模型可以预测不同参数对激光器性能的影响,为设计提供指导。而仿真技术则利用计算机模拟激光器的运行,通过调整参数来观察激光器的响应,从而找到最优的设计方案。(2) 设计优化与提高性能的途径。提高高性能光纤激光器的性能主要通过设计优化来实现。这包括优化光纤增益介质的掺杂浓度、长度和泵浦光的耦合效率等。通过调整这些参数,可以最大化激光器的输出功率和效率。此外,还可以采用先进的冷却技术和封装技术来提高激光器的稳定性和寿命。冷却技术可以有效地降低激光器在工作过程中产生的热量,从而保持激光器的温度稳定。而封装技术则可以保护激光器免受外界环境的干扰,提高其抗干扰能力。

3.2 结构设计

(1) 光泵浦源、光纤增益介质、输出端光纤和控制系统的布局。在高性能光纤激光器的结构设计中,光泵浦源、光纤增益介质、输出端光纤和控制系统的布局至关重要。泵浦源通常采用一个或多个光纤耦合激光二极管,其波长应与光纤增益介质的吸收特性相匹配,以实现高效的光对光转换。光纤增益介质一般为掺杂稀土元素(如钇、镱等)的光纤,通过选择合适的掺杂离子和浓度,可以优化激光器的输出功率和波长。输出端光纤用于将产生的激光引导至应用场合,其设计和材料选择需确保光束质量和传输效率。控制系统则负责监测和调整激光器的工作状态,确保其稳定运行^[3]。(2) 光纤激光器的整体结构设计。光纤激光器的整体结构设计应考虑到器件的紧凑性、可靠性、散热性和易用性。通常,光纤激光器采用全光纤结构,通过光纤熔接的方法将整个激光谐振腔形成一个整体,这样不仅可以简化结构、降低维护成本,还可以提高泵浦光的耦合效率和光束质量。同时,为了应对高功率激光产生的热量,需要设计有效的散热系统,如采用水冷或风冷等方式。

3.3 参数控制与调节

(1) 光泵浦功率的调节。光泵浦功率是影响激光器输出功率和效率的关键因素之一。通过调节泵浦电流或泵浦光的强度,可以控制泵浦功率的大小,从而优化激光器的性能。需要注意的是,过高的泵浦功率可能导致激光器的不稳定或过热,因此需要合理设定泵浦功率的上限。(2) 波长选择与优化。波长选择是光纤激光器设计中的另一个重要方面。通过选择具有特定发射波长的泵浦源和增益介质,可以实现激光器的波长输出与应

用需求相匹配。此外,还可以采用波长转换器或可调谐滤波器等设备,进一步优化激光器的波长稳定性和灵活性。(3) 光纤长度与掺杂离子浓度的调节。光纤长度和掺杂离子浓度是影响激光器增益和输出功率的重要因素。通过调节光纤的长度和掺杂离子的浓度,可以优化激光器的增益特性,从而实现更高的输出功率和更好的光束质量。然而,过长的光纤和过高的掺杂离子浓度可能导致光路中的损耗增加和激光器的热稳定性下降,因此需要在设计和调试过程中进行细致的权衡和优化。

4 高性能光纤激光器的制造工艺

4.1 光纤拉制

光纤拉制是制造高性能光纤激光器的起始步骤,也是奠定光纤性能基础的关键环节。(1) 控制速度与温度控制的重要性。在光纤拉制过程中,精确控制控制速度和温度至关重要。拉制速度不仅影响光纤的直径均匀性和内部结构,还直接关系到生产效率。若速度过快,光纤内部可能因应力过大而产生缺陷,影响光学性能;反之,速度过慢则可能降低生产效率,且光纤在长时间高温下易发生热变形。同时,温度控制也是确保光纤质量的关键。适宜的温度范围能保证光纤材料的可塑性,使其顺利拉制成所需直径。温度过高可能导致光纤材料熔化或产生气泡,影响光学传输;温度过低则可能增加拉制难度,甚至导致光纤断裂。(2) 光纤的光学质量与机械强度。光纤的光学质量是评价其性能优劣的重要指标,直接影响激光器的传输效率和光束质量。通过精确控制拉制速度和温度,可以确保光纤芯径、包层厚度等参数的均匀性和一致性,从而提高光纤的光学性能。此外,光纤的机械强度也是不可忽视的方面。良好的机械强度意味着光纤能承受更大的拉伸和弯曲,减少在实际应用中因外力作用导致的损坏。通过优化拉制工艺,可以提高光纤的抗拉强度和抗弯曲能力,延长激光器的使用寿命。

4.2 光纤端面处理

光纤端面处理对于减小反射损耗和提高光纤连接效果至关重要。在光纤端面处理过程中,首先需要对光纤进行剥覆,去除表面的保护层和涂层,露出光纤芯。随后,利用精密的清洁工具去除光纤端面上的杂质和污

染物,确保端面的清洁度。最后,通过高质量的切割设备和工艺对光纤端面进行切割,确保切割面平整、无毛刺和裂痕。优质的切割能够减少光在光纤端面的反射损耗,提高光信号的传输效率。同时,平整的切割面也有利于光纤之间的连接,确保连接处的稳定性和可靠性。

4.3 激光器组装

激光器组装是将各个组件精确安装在一起,形成完整高性能光纤激光器的过程。(1) 各组件的精确安装与调试。在激光器组装过程中,各组件的精确安装至关重要。泵浦源、光纤增益介质、反射镜、透镜等组件需要按照设计要求进行精确安装,确保它们之间的位置和角度符合要求。同时,还需要对各组件进行调试,以优化激光器的输出功率、波长和光束质量等性能指标。通过精确的调试,可以确保激光器在实际应用中能够稳定工作,达到预期的性能水平。(2) 封装与保护措施。封装是保护激光器免受外界环境干扰和损害的重要步骤。在封装过程中,需要采用专用的封装材料和工艺,将激光器的各个组件紧密地封装在一起。同时,还需要添加散热装置、防尘装置等保护措施,以提高激光器的使用寿命和性能稳定性。有效的封装和保护措施能够确保激光器在恶劣的工作环境中仍能稳定工作,为用户提供高质量的光源输出。

结束语

综上所述,高性能光纤激光器的材料选择与器件设计是确保其优异性能和广泛应用的关键。通过深入研究不同增益介质和泵浦源的特性,结合精细的器件设计,我们可以进一步优化光纤激光器的输出功率、波长稳定性和光束质量。未来,随着材料科学和激光技术的不断进步,高性能光纤激光器有望在更多领域展现出其独特优势和巨大潜力。

参考文献

- [1]朱玮,舒钱亚,王鹏,等.高性能光纤激光器的材料和制备[J].激光与光电子学进展,2019,(10):100-101.
- [2]刘晨,王健,张立国,等.高性能光纤激光器的器件设计与制备[J].中国激光,2019,(13):142-143.
- [3]王刚,蔡明,姜军,等.高性能光纤激光器的材料选择与器件设计研究[J].激光技术,2020,(06):57-58.