

· 光学设计 ·

产生波长 793 nm 中空光束的双包层光纤的优化设计

孟令轩, 延凤平, 白 燕, 谭思宇, 刘 硕

(北京交通大学 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘 要:随着大功率掺铥光纤激光器(TDFL)的广泛应用及其相关技术的迅速发展,多芯TDFL受到了广大研究者的广泛关注,其中有效的包层泵浦技术是实现多芯TDFL高功率输出的决定因素。TDFL通常采用波长为793 nm的激光进行泵浦,通过不断优化工作在793 nm波长的双包层光纤的结构,对其中传输的高斯光束进行整形,当纤芯尺寸为6 μm ,环尺寸为6.5 μm 且内包层折射率为1.462 4时,最终获得了合适暗斑尺寸和环状光束宽度的中空光束。利用所设计的双包层光纤泵浦多芯TDFL,可使多芯光纤内掺杂的铥离子更好的吸收泵浦光,提高工作于2 μm 波段多芯TDFL的输出激光功率和泵浦效率。

关键词:双包层光纤;石英基;中空光束;多芯;掺铥光纤激光器

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-01-0001-05

Optimal Design of Double Clad Fiber for Hollow Beam Generation at 793 nm Wavelength

MENG Ling-xuan, YAN Feng-ping, BAI Yan, TAN Si-yu, LIU Shuo

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With the wide application of high power Thulium-doped fiber laser (TDFL) and the rapid development of related technologies, multi-core TDFL has received extensive attention from many researchers, and the effective clad pump technology is the decisive factor to realize the multi-core TDFL high power output. TDFL is usually pumped by 793 nm laser. By continuously optimizing the double clad fiber structure at 793 nm operation wavelength, the transmitted Gaussian beam is shaped. When the core size is 6 μm , the ring size is 6.5 μm and the inner clad refractive index is 1.462 4, the hollow beam with suitable dark spot size and circular beam width is obtained finally. Using the double clad fiber pumped multi-core TDFL design, the pump light can be better absorbed by the thulium ions doping within multi-core fiber and the output laser power and pumping efficient of the multi-core TDFL at 2 μm are improved.

Key words: double clad fiber; quartz base; hollow beam; multi-core; Thulium-doped fiber laser

近年来,大功率输出的掺铥光纤激光器^[1](TDFL)引起了研究人员极大的关注,已经成为光纤激光技术领域的研究热点。TDFL在医学成像^[2]、材料加工^[3]、环境探测^[4]等诸领域具有广阔的应用前景^[5]。2015年RD Mead等人通过两级放大技术和波长转换,成功使得输出功率达到上千瓦水平^[6]。随着研究的不断深入,TDFL输出功率越来越高,且对掺铥

光纤(TDF)特性和泵浦光吸收效率提出了更高的要求。采用多芯光纤结构,并通过对多个掺杂芯及光纤结构的合理设计,是获得高光束质量、高功率激光的一种简便方法。但是如何合理设计这种光纤,特别是如何有效泵浦其中的掺杂纤芯,成为大功率多芯光纤激光器的制约因素。2014年Sakaguchi等人报道了包含19芯光纤和19芯掺铥光纤放大器空

收稿日期:2016-12-05

基金项目:国家自然科学基金(61275091,61327006,61620106014)

作者简介:孟令轩(1992-),男,河北邢台人,硕士研究生,主要研究方向为特种光纤设计及光纤激光器等。

分复用传输系统,提出一种新的具有改进芯布局的19芯光纤来达到较低的聚合芯间串扰^[7]。双包层光纤(DCF)是一种特殊结构的光纤,它具有双层的波导结构^[8]。中空光束(HB)是指在传播方向上中心区域光强为零的环状光束^[9]。这种光束展现了一系列优越的物理性质,例如较小的暗斑尺寸(DSS)、空间传播不变性等^[10]。2015年,曾祥梅等人基于惠更斯菲涅耳广义衍射积分,通过薄透镜获得了相干可控的HB^[11]。张羽等人研究了单芯单模光纤与多芯光纤纤芯对准熔接后,再在对多芯光纤进行热熔融拉锥,实现多芯光纤光功率的高效耦合注入^[12-13]。对于多芯光纤激光器来说,有效地将泵浦光功率耦合到掺杂纤芯里面是决定激光器输出功率和泵浦效率的关键因素。文中通过合理的设计,得到一种适合793 nm泵浦光的DCF结构。采用一定长度的这种光纤将波长为793 nm的泵浦光转换成HB形泵浦光,并将其耦合进入多芯TDF,可有效提高泵浦效率,从而增加多芯TDFL的输出功率。

1 光纤结构设计

用于产生HB的DCF结构如图1所示。

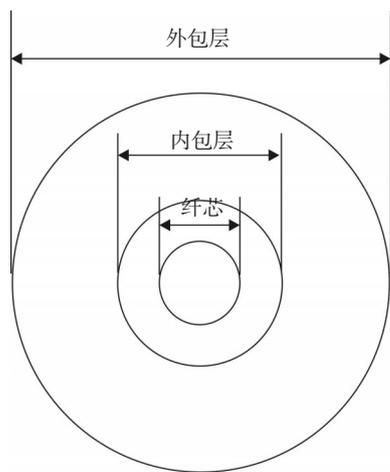


图1 DCF的基本结构

其中,内、外包层和纤芯均为圆形结构,它有以下优点:第一,可以产生应用最广泛的环形HB;第二,不需要对光纤预制棒做机械加工,工艺简单,稳定性和可靠性好;第三,从模式场分布看,易于与泵浦光纤和掺杂光纤熔接,并可使接续损耗最小化。

在设计中,纤芯半径的初始尺寸为1 μm,内

包层半径为2 μm,即环尺寸为1 μm,外包层半径为尺寸为62.5 μm,且在仿真过程中保持外包层尺寸不变。外包层和纤芯的折射率可以通过Sellmeier定律求出,有下式

$$n^2 = 1 + \sum_{j=1}^N \frac{\lambda^2 B_j}{\lambda^2 - \lambda_j^2} = 1 + \sum_{j=1}^N \frac{\omega_j^2 B_j}{\omega_j^2 - \omega^2} \quad (1)$$

式中, B_j 和 λ_j (或 ω_j)为与材料组成有关的常数,即材料的Sellmeier常数。

由此可得DCF的限制损耗 α 为

$$\alpha = \frac{40\pi \text{Im}(n_{\text{eff}})}{\lambda \ln(10)} \quad (2)$$

其中, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 表示有效折射率的虚部。从波动光学的角度来看,由于传输常数中出现了虚部,所以光在传播过程中产生了纵向的损耗。

2 仿真结果及分析

在DCF初始结构参数的基础上,通过改变纤芯半径、内包层折射率以及环尺寸,采用有限元方法进行分析,获得HB的模式特性以及限制损耗等参数,直到获得最佳的光束形状为止。图2所示为 TM_{01} 模式的的归一化能量分布。

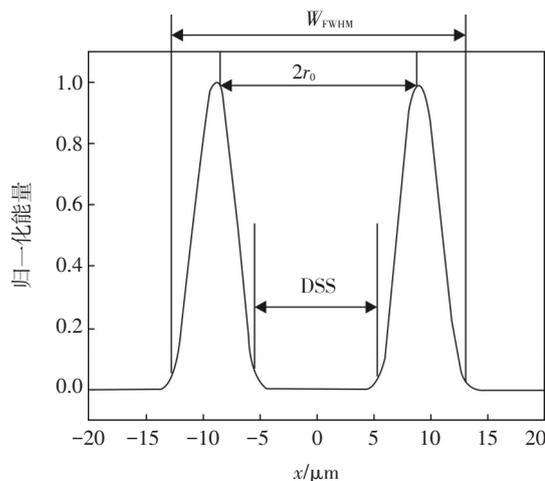


图2 TM_{01} 归一化能量分布图

其中,光束宽度(FWHM)为光束外侧能量强度达到最高能量强度一半时的光谱宽度。DSS为光束内侧能量强度达到最高能量强度一半时的光谱宽度。环状光束宽度 W_r 由下式获得

$$W_r = W_{\text{FWHM}} - 2r_0 \quad (3)$$

式中, r_0 表示从最大光束能量到光斑中心的距离。

2.1 改变纤芯半径

在双包层光纤初始结构参数的基础上,分别取纤芯半径 $1\ \mu\text{m}$ 、 $3\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$ 和 $6\ \mu\text{m}$ 的光纤,即光纤 1、光纤 2、光纤 3 和光纤 4,利用有限元方法对其进行仿真,得到各自在 $793\ \text{nm}$ 的光源入射时的模场分

布。图 3 所示为纤芯半径 $3\ \mu\text{m}$ 时引导模式的功率流分布。从图 3 可知,除了激发基模(HE_{11})以外,光纤中还包含横向偏振(TM_{01})和角向偏振(TE_{01})的第一高阶导模,以及混合模态(HE_{21}),且横向偏振(TM_{01})和角向偏振(TE_{01})的光能量分布要比其他高次模均匀。

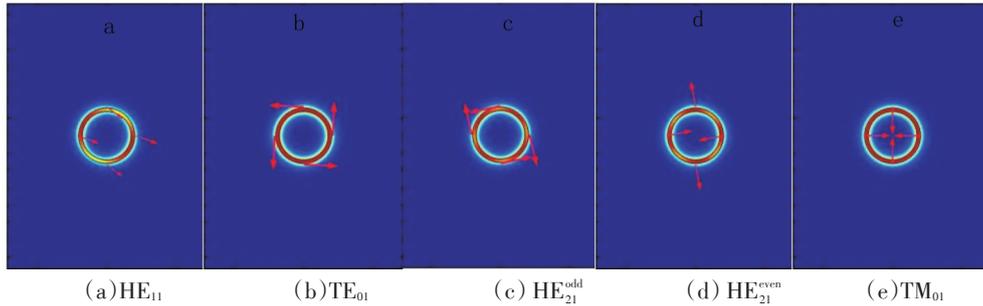


图 3 纤芯半径为 $3\ \mu\text{m}$ 时引导模式的功率流分布

图 4 所示为四根不同纤芯半径 DCF 光纤的归一化能量分布。从图中可以清晰地看出,对于不同的纤芯半径,HB 的 DSS 是明显不同的。光纤 1 对应的 DSS 最小,约为 $5.57\ \mu\text{m}$ 。光纤 4 对应的 DSS 最大,约为

$11.61\ \mu\text{m}$ 。而光纤 2 和光纤 3 的 DSS 介于中间,分别为 $7.43\ \mu\text{m}$ 和 $9.52\ \mu\text{m}$ 。从图 4 还可以看出,由于只增加纤芯半径,并没有改变环的宽度,所以四根光纤的环状光束宽度基本保持不变,大约为 $1.30\ \mu\text{m}$ 。

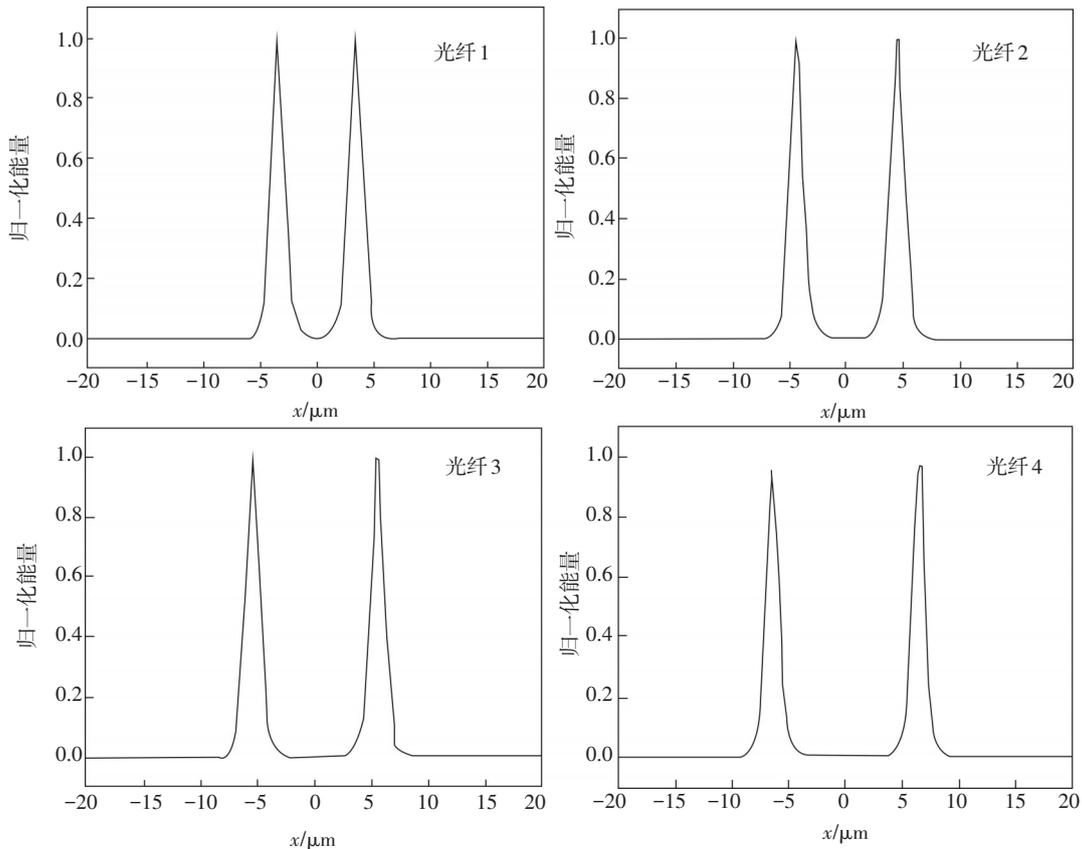


图 4 在波长为 $793\ \text{nm}$ 处,四根光纤 TM_{01} 的归一化能量分布图

图5给出了DSS宽度随纤芯半径变化的示意图。随着纤芯半径的不断增大,DCF的DSS也随之线性增长。

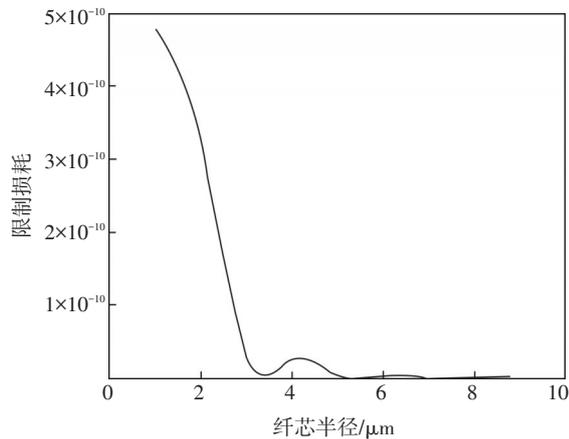


图5 DSS随纤芯半径的变化

图6所示为光纤限制损耗随纤芯半径的变化。

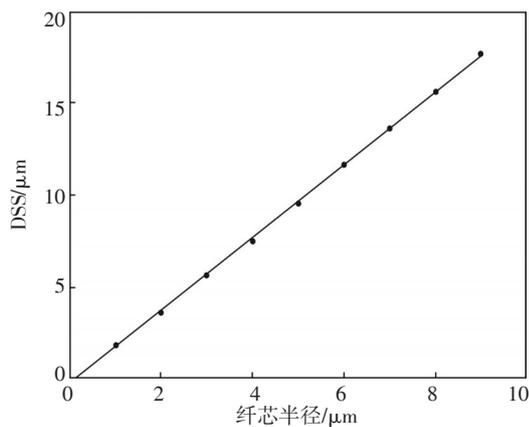


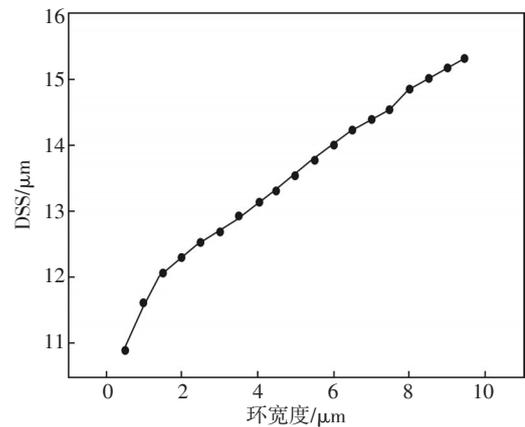
图6 限制损耗随纤芯半径的变化

从图中可以看出,随着纤芯半径的逐渐增长,光纤的限制损耗呈指数下降。当纤芯半径增加到 $6\ \mu\text{m}$ 后,限制损耗的量级已经接近 10^{-12} ,比前三根光纤的损耗小了接近两个量级。此后,随着纤芯半径的增加,光纤的限制损耗基本不发生变化。

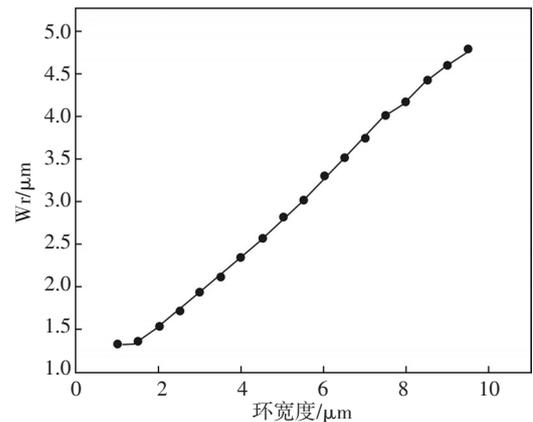
2.2 改变环尺寸

保持纤芯半径为 $6\ \mu\text{m}$,进一步研究增加环尺寸对于HB的影响。当环的宽度小于 $1\ \mu\text{m}$ 时,环对光线的束缚能力会变得很弱,导致光场能量分布变得极不均匀,且能量逐渐向外发生逸散,增大了限制损耗。

图7a、图7b分别给出了DSS和环状光束宽度随环宽度的变化特性。



(a)DSS随环尺寸的变化



(b)环状光束宽度随环尺寸的变化

图7 (a)DSS随环尺寸的变化

(b)环状光束宽度随环尺寸的变化

从图中可以看出,DSS和环状光束宽度都随着环宽度的增加近似呈线性增长。当环宽度小于 $1.5\ \mu\text{m}$ 时,HB的DSS和环状光束宽度随着环宽度的增加呈现不规则增长,表明此时环束缚光线的能力较弱,导致能量分布不均匀。

图8给出了光纤限制损耗随环宽度的变化。从图中可以看出,随着环宽度从 $1\ \mu\text{m}$ 增加到 $1.5\ \mu\text{m}$,光纤的限制损耗显著下降。当环宽度从 $1.5\ \mu\text{m}$ 不断增大时,光纤的限制损耗变化较小。当环宽度超过 $5\ \mu\text{m}$ 以后,光纤的限制损耗下降到 10^{-12} 。而且随着环宽度的增大,光纤的限制损耗将不发生变化。

考虑上述因素以及光纤制备的合理性,最终选定环尺寸为 $6.5\ \mu\text{m}$ 。对于匹配的TDF,更大的尺

寸会具有更多的 Tm^{3+} 离子,当光束进入 TDF 时,其吸收效率会大大增加。

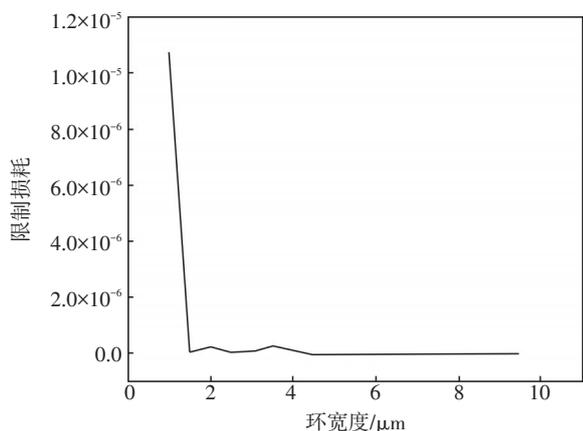


图8 光纤的限制损耗随环宽度的变化

2.3 改变内包层折射率

结合光纤的工艺条件和各参数特征,设定 DCF 的纤芯半径为 $6 \mu m$,环宽度为 $6.5 \mu m$,且认为其内包层的折射率取常数,也就是说,采用阶跃折射率分布。在此条件下进一步分析 HB 光束参数随内包层折射率的变化特性。

根据 Sellmeier 公式可得,纯石英在波长为 793 nm 时的折射率为 1.4534 。图9给出内包层折射率分别为 1.4544 、 1.4584 和 1.4624 时 TM_{01} 的归一化能量分布。

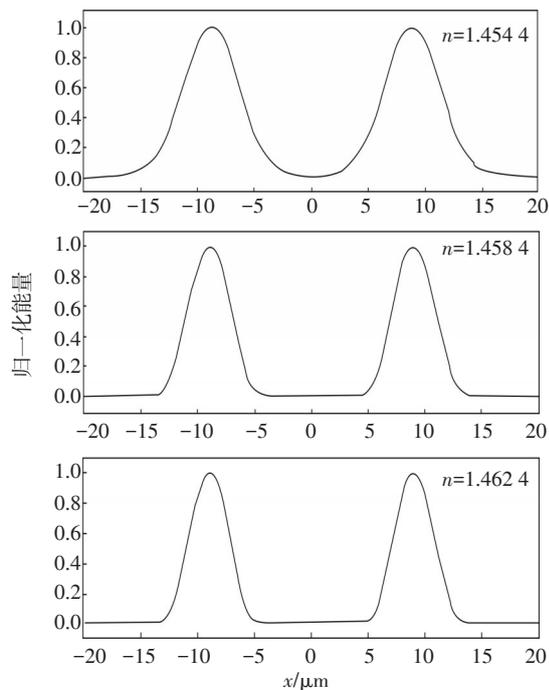
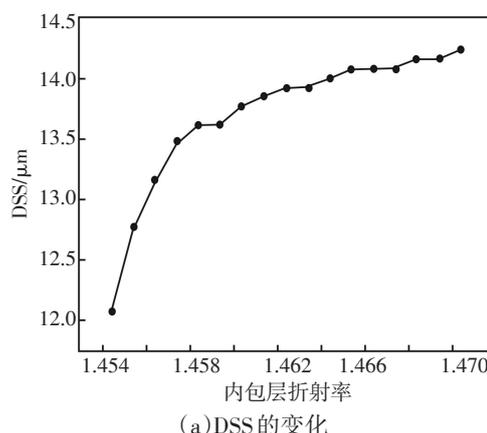
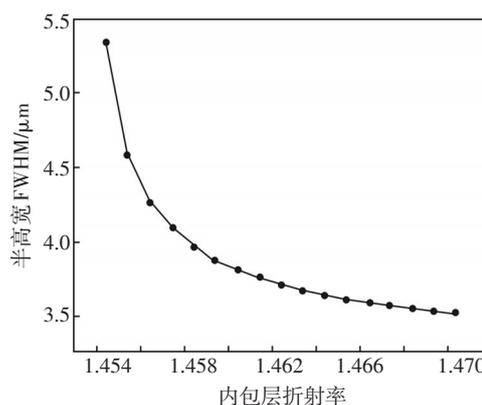


图9 TM_{01} 归一化能量分布随内包层折射率的变化

图10给出 HB 的 DSS 和环状光束宽度随 DCF 内包层折射率增加的变化趋势。



(a) DSS 的变化



(b) 环状光束宽度的变化

图10 内包层折射率的变化

从图9和图10中可以清楚地看出,随着内包层折射率的不断增大,环状光束宽度在不断下降,而 DSS 却在不断增加。因为内包层折射率的不断增大,数值孔径也不断增大,意味着环形结构对光束的束缚能力会更强。当折射率 $n=1.4624$ 时,此时光束具有最大的 DSS 尺寸及分布均匀的光束能量。

3 结论

采用有限元法分析了 DCF 结构参数对其所产生的 HB 模场特性的影响。结果表明,DCF 的纤芯半径、环宽度及内包层折射率对其所产生的 HB 模场特性参数影响较大,且存在一组优化的 DCF 参数,即当纤芯半径为 $6 \mu m$ 、环宽度为 $6.5 \mu m$ 、内包层折射率为 1.4624 时,波长为 793 nm 的泵浦光通过

(下转第39页)

探测设备的图像采集中都得到了应用,证明该设计达到了预期设计,满足了当前条件下,红外探测设备图像采集的应用要求。

参考文献

- [1] 左景睿,张启衡,徐勇,等.基于DSP的千兆以太网接口设计[J].通信技术,2010,43(8):1-3.
- [2] 何宇,郭建明.基于TMS320DM642单芯片的网络接入系统研究与实现[J].武汉理工大学学报,2005,29(5):770-773.
- [3] 赵金保,徐枫.基于TMS320C6455的千兆以太网设计[J].微计算机信息,2009,25(1-2):137-138.
- [4] 刘鑫,宋光磊,温靖,等.用于星载图像高速传输的千兆以太网接口设计[J].电视技术,2013,37(10):67-69.
- [5] 徐贵州,庄东曙,韩叶冰.TMS320C6455中NDK应用研究[J].无线互联科技,2015(10):42-43.
- [6] 王聪.基于NDK的网络开发研究[J].舰船电子对抗,2012,35(4):86-88.
- [7] 刘向宇.DSP嵌入式常用模块与综合系统设计[M].北京:电子工业出版社,2009:155.
- [8] 鲍超,王丽华,张磊,等.基于HPI互联的双DSP高速信息处理系统的设计[J].科学技术与工程,2010,10(33):8287-8391.
- [9] 邓伟,王文菊.基于TMS320C6455的以太网通信程序设计[J].电子设计工程,2013,21(7):165-168.

(上接第5页)

该光纤的波束整形,输出的HB光束参数可达到最佳化。将这种HB光束注入纤芯环状分布的多芯TDF时,可使多个掺杂纤芯中的铥离子有效吸收泵浦光,提高泵浦效率和多芯TDFL的输出激光功率。

参考文献

- [1] Gutty F, Grisard A, Joly A, et al. Multi-k W peak power acousto-optically tunable thulium-doped fiber laser system [J]. Optics Express, 2015, 23(5):6754-62.
- [2] 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 microm[J]. Lasers in Surgery and Medicine, 2005, 37(1):53-58.
- [3] Simakov N, Hemming A, Bennetts S, et al. Efficient, polarised, gain-switched operation of a Tm-doped fibre laser[J]. Optics Express, 2011, 19(16):14949-54.
- [4] Creeden D, Budni P A, Ketteridge P A. Pulsed Tm-doped fiber lasers for mid-IR frequency conversion[C]// SPIE LASE: Lasers and Applications in Science and Engineering. International Society for Optics and Photonics, 2009.
- [5] 王飞.高功率掺铥光纤激光器及其在共振泵浦激光技术中的应用[D].湖南:国防科学技术大学,2010.
- [6] Mead R D, Minelly J D, Honea E C. High-power laser using thulium-doped fiber amplifier and frequency quadrupling for blue output: US, US 8953647 B1[P]. 2015.
- [7] Sakaguchi J, Klaus W, Puttnam B J, et al. 19-core MCF transmission system using EDFA with shared core pumping coupled via free-space optics [J]. Optics Express, 2014, 22(1): 90-95.
- [8] Mohammed Z, Saghafifar H, Soltanolkotabi M. An approximate analytical model for temperature and power distribution in high-power Yb-doped double-clad fiber lasers[J]. Laser Physics, 2014, 24(11): 115107.
- [9] Yan X, Zhang P F, Zhang J H. et al. Quantum polarization fluctuations of partially coherent dark hollow beams in non-Kolmogorov turbulence atmosphere[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(8): 084204
- [10] Dai Z P, Yang Z J, Zhang S M, et al. Transversal reverse transformation of anomalous hollow beams in strongly isotropic nonlocal media[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(7): 452-458.
- [11] Zeng X M. Focusing properties of partially coherent controllable dark-Hollow beams through a thin lens[J]. Chinese Physics Letters, 2015, 32(7):71-75.
- [12] Zhang Y, Liu Z H, Yang J, et al. An optical power coupling ratio control approach among multi cores in a multi-core fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38 (12): 1205002.
- [13] 李丽君.双包层光纤激光器及放大器研究[D].天津:南开大学,2005.