

增益导引折射率反导引光纤激光器研究进展

王文亮 曹涧秋 郭少锋* 姜宗福 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 增益导引折射率反导引(GG IAG)光纤的特点是纤芯的折射率比包层的折射率小,增益效应保证了模式在此波导中的传输,从而使得该光纤在单模传输的同时,模场尺寸较传统光纤大幅增加。总结了增益导引折射率反导引光纤激光器的研究进展。分别综述了国内外增益导引折射率反导引光纤的理论分析,包括弯曲特性、模式耦合特性、增益饱和特性和温度特性,以及掺钕、掺镱增益导引折射率反导引光纤激光器的实验进展情况。讨论了增益导引折射率反导引光纤激光器在高功率光纤激光中的现状及现阶段急需解决的问题。

关键词 光纤光学;大模场光纤;增益导引;折射率反导引;高功率光纤激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.040004

Research Progress of Gain-Guided Index-Anti-Guided Fiber Lasers

Wang Wenliang Cao Jianqiu Guo Shaofeng Jiang Zongfu Xu Xiaojun

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Gain-guided index-antiguided (GG IAG) fiber has a negative index step from cladding to core, and the gain effect plays a crucial role in guiding mode. It has attractive performance on large mode area of the high-power single-mode fiber lasers. The research progress at home and abroad of GG IAG fiber laser is summarized. At first, the theoretical details of GG IAG fiber laser including bending, mode coupling, gain saturation and thermal characteristics are summarized. Then the experiments of Nd-doped, Yb-doped fiber lasers are presented. At last, the advantages and problems of the GG IAG fiber laser in high power fiber lasers are discussed.

Key words fiber optics; large mode field fiber; gain guided; index antiguided; high power fiber lasers

OCIS codes 060.2310; 060.2320; 060.2430; 060.3510; 140.3510

1 引言

光纤激光器具有抽运阈值功率低、散热性好、易实现单模运转、结构简单、成本低等特点,广泛应用于光通信、光传感、先进加工、生物医学、国防军事等领域,已成为固体激光器的一个重要发展方向。虽然光纤激光器有诸多优点,但光纤的热效应以及非线性效应制约着其功率的提升。增大纤芯直径的方法可以增大光纤的模场面积,降低纤芯中的高功率密度,进而抑制非线性效应和避免光纤损坏。但是增大芯径会导致光束质量下降、宏弯损耗增大等问题,因此设计新型结构的大模场光纤成为研究热点。近年来,大模场光纤的研究取得很大突破,芯径从 $30\ \mu\text{m}$ 上升到了 $100\ \mu\text{m}$ 。大模场单模光纤的实现主要有三种方法:复合导引方法、光子晶体方法和模式转换法^[1]。

复合导引方法采用传统的多模光纤,通过改变光纤激光谐振腔的一些参数,或者在谐振腔内采用一些手段来增加高阶模的损耗或抑制高阶模起振,获得基模输出^[1]。2003年,美国斯坦福大学的 Siegman^[2]提出了一种新的概念——增益导引折射率反导引(GG IAG)光纤,与传统阶跃折射率光纤不同,这种光纤纤芯的折

收稿日期: 2011-09-27; 收到修改稿日期: 2011-11-09; 网络出版日期: 2012-03-02

作者简介: 王文亮(1986—),男,博士研究生,主要从事大功率光纤激光器方面的研究。E-mail: wwnnudt@gmail.com

导师简介: 姜宗福(1963—),男,博士,教授,主要从事高能激光技术与应用、光束控制与气动光学、物理光学等方面的研究。E-mail: jiangzongfu@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: sfguo@nudt.edu.cn

射率比包层的折射率小,传统的全内反射理论在这种光纤中不再适用。采用增益导引效应,可以使单模运转的单根大模场光纤的芯径达到百微米量级^[2~4]。本文综述了国内外 GG IAG 光纤激光器的理论和实验研究进展,并分析了其在高功率激光器方面的特点以及面临的问题。

2 理论研究进展

2.1 GG IAG 光纤模式相关理论

2003年,Siegman^[2]首次提出了 GG IAG 光纤的理论模型,并分析了此光纤的导模特性,为 GG IAG 光纤激光器的发展奠定了基础。

GG IAG 光纤结构如图 1 所示,增益因子 g 具有和折射率 n 相同的阶跃变化。与普通光纤不同,由于纤芯的折射率比包层的折射率小,每次反射都有能量损耗,如果模式的增益足够大,反射造成的损失将会得到弥补,模式将被很好地限制在纤芯中。此光纤中的模式特征决定于复数归一化频率 \tilde{V} ,其表达式为

$$\tilde{V} = \Delta N + i\Delta G, \quad (1)$$

式中 $\Delta N = \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 \times 2n_0 \times \Delta n$, $\Delta G = \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 \times \frac{n_0 \lambda}{2\pi} \times \Delta g$, a 和 λ 分别为纤芯半径和光波在真空中的波长。

当 $\Delta N < -50$ 时, LP_{01} 模与 LP_{11} 模的增益阈值分别为^[5,6]

$$G_{01}^{\text{th}} = \sqrt{\frac{4j_{01}^4}{-\Delta N}} \approx \sqrt{\frac{133.8}{-\Delta N}}, G_{11}^{\text{th}} = \sqrt{\frac{4j_{11}^4}{-\Delta N}} \approx \sqrt{\frac{862.2}{-\Delta N}}, \quad (2)$$

式中 $j_{01} = 2.405$, $j_{11} = 3.8317$ 分别为二阶第一类贝塞尔函数的第一个非零根。

Siegman 的分析表明,只要通过合理的设计,使得激光器增益大于 LP_{01} 模的增益阈值,同时小于 LP_{11} 模的增益阈值,就可以利用 GG IAG 光纤激光器实现大模场单模输出。

本课题组利用 COMSOL Multiphysics 对 GG IAG 光纤中的模式进行了模拟仿真,结果表明,纤芯直径为 $100 \mu\text{m}$ 时,有 LP_{01} 模存在,且此模式的传输损耗最小,通过在纤芯中加入一定量的增益,可以使得 LP_{01} 模最先无损传输,即可保证 GG IAG 光纤实现大模场单模传输,此增益值与 Siegman 给定的 LP_{01} 模增益阈值相符。对 GG IAG 光纤激光器进行速率方程求解,通过优化设计腔镜反射率和光纤长度,采用较短的 GG IAG 光纤可获得一定效率的基模输出。

为了深入了解大模场 GG IAG 光纤的单模传输特性,Gundu 等^[7]分析了单模 GG IAG 光纤中的光束质量 M^2 因子。由于 GG IAG 光纤中 LP_{01} 模的轮廓严重偏离高斯型,且向包层中辐射,使得 M^2 值远大于 1。但实际中,由于包层外存在折射率较包层小的涂覆层或空气,可以使光反射入包层中,起到截短光束轮廓外沿的作用,从而减小 M^2 的值。减小包层与纤芯半径比可以减小 M^2 的值,因此实验所得 GG IAG 光纤激光器的 M^2 因子值接近 1。

2.2 弯曲特性与模式耦合

由于光纤在实际应用中难免会发生弯曲,且光纤芯径增大会使光场的宏弯损耗增大,Wang 等^[8]利用拓展的复数傅里叶-贝塞尔级数模拟仿真了 GG IAG 光纤弯曲造成的光场变形与损耗。与传统光纤相比,在相同弯曲条件下,GG IAG 光纤中基模的光强中心偏离几何中心比较小,认为其具有较好的抗弯曲特性。随着弯曲半径的增大,光场损耗迅速减小。但从该文献中所给出的场分布图可以看出,在相同弯曲条件下,GG IAG 光纤中基模的损耗较传统光纤大。

GG IAG 光纤可以实现大模场单模传输,为光纤器件的制造提供了一种途径。Wang 等^[9]结合 Siegman 的复数分析理论与耦合模理论,研究了 GG IAG 光纤定向耦合器的互耦合与自耦合特性。传统的光纤耦合器的耦合系数是实数且为指数式递减形式,但 GG IAG 光纤耦合器的耦合系数是复数且为空间振荡衰减形式,从而使得耦合器两路光纤中光功率为此涨彼落的振荡转换^[9,10]。

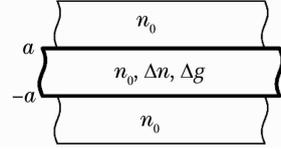


图 1 GG IAG 光纤结构图
Fig. 1 Profile of GG IAG fiber

2.3 增益饱和

由于光纤增益饱和效应,使得光纤放大器与激光器的输出功率受限。Kim 等^[11]利用数值法分析了在增益饱和状态下 GG IAG 光纤放大器的输出特性。由于增益饱和效应,当增益系数在低阶模增益阈值附近时,放大器只能获得较低的功率输出;当增益系数在高阶模增益阈值附近时,放大器可以获得较高的功率且输出光束形状类似高斯光束。

Wang 等^[12]基于侧面抽运的 GG IAG 光纤激光器的速率方程理论模型,提出了变化的增益饱和因子,分析了影响输出功率的因素。变化的增益饱和因子受纤芯与包层折射率差的影响较大,而受增益系数的影响较小;抽运效率仍是影响激光器输出功率的主要因素。

2.4 温度特性

随着光纤激光器功率的提升,光纤热效应的制约作用变得尤为突出,因此,光纤热学特性及散热方式的研究对进一步提升光纤激光器的功率具有重要意义。Kim^[13]通过分析光纤中的温度分布探讨了 GG IAG 光纤的热学特性。如果光纤没有充分地冷却,光纤的中心温度就会超过光纤变形温度点,使激光器不出光或造成光纤损坏。由光纤中的热传导方程可知,满足冷却条件时,最小的热传导系数取决于光纤纤芯与包层的半径。为使包层半径小于 $240\ \mu\text{m}$ 的光纤激光器出光,至少需使用强空气对流来制冷。

为了实现增益导引,GG IAG 光纤的增益阈值较大,且吸收系数也比较大,这都会导致纤芯中产生较多的热。如果热量不能及时有效地处理,就会造成激光器不出光甚至光纤损坏。Yan 等^[14]基于速率方程,利用三维热传导模型,分析了掺镱 GG IAG 光纤放大器的热学特性。仿真结果表明,制冷装置的存在可以使 GG IAG 光纤放大器的温度大幅降低;双向抽运激光器的光纤温度要低于前向抽运,且温度分布更均匀;增大包层半径可以降低光纤温度。

3 实验进展

3.1 掺钕 GG IAG 激光器

2006 年开始,美国中佛罗里达大学光学与激光研究教育中心(CREOL)的研究人员最先构建了 GG IAG 光纤激光器,并进行了实验研究^[5,5-23]。实验获得了良好的大模场单模激光输出,验证了 GG IAG 光纤理论。该小组实验中所用光纤芯径为 $100\sim 400\ \mu\text{m}$ 。光纤均由 Kigre 公司拉制。纤芯材料为掺原子数分数为 $10\%\text{Nd}^{3+}$ 的 Q100 玻璃,在波长为 $590\ \text{nm}$ 处测得纤芯的折射率为 1.5689 ,包层的折射率为 1.5734 。纤芯材料折射率随温度的增长而减小,其折射率温度系数 dn/dT 的值为 $-4.0\times 10^{-6}\ \text{°C}^{-1}$ ^[15]。由于 GG IAG 光纤折射率分布特性使得抽运光不能够充分吸收,采用何种抽运技术成为提升 GG IAG 光纤激光器功率的关键和瓶颈。该小组先后研究了闪光灯抽运、LD 端面抽运及 LD 侧面抽运等不同的抽运方式。

3.1.1 闪光灯抽运

2006 年,Chen 等^[16]利用 Kigre 公司拉制的掺钕 GG IAG 光纤搭建闪光灯抽运激光器,其实验示意图如图 2 所示。

实验中利用脉冲重复频率为 $1\ \text{Hz}$ 的闪光灯抽运芯径为 $100\ \mu\text{m}$ 的 GG IAG 光纤,输出光的中心波长为

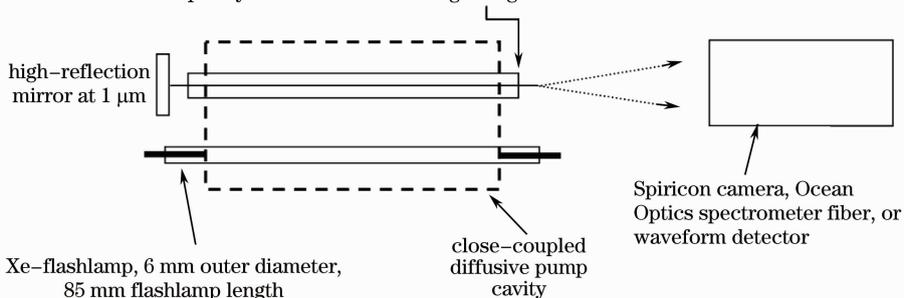


图 2 闪光灯抽运 GG IAG 光纤激光器实验示意图

Fig. 2 Sketch of the flashlamp pumped GG IAG fiber laser experiment

1052 nm, 线宽小于 1 nm, M^2 因子为 1.5 ± 0.15 。此抽运方式的最大光光转换效率仅为 0.09%, 而且产生的热负荷较大, 可见其不是一种实用的结构^[15~17]。为了提高抽运效率, 减小热负荷, 该小组研究了 LD 的抽运方式。

3.1.2 LD 端面抽运

2008 年开始, 该小组先后利用此光纤搭建 LD 端面抽运 GG IAG 光纤激光器^[18], 实验示意图如图 3 所示。功率为 30 W, 波长为 803 nm 的 LD 输出光经斩波器调制为抽运脉冲光, 脉冲宽度为 4 ms, 重复频率为 14 Hz, 然后经透镜聚焦为 $400 \mu\text{m}$ 的光斑通过双色镜 (1064 nm 处的反射率为 99%, 808 nm 处的反射率小于 5%) 耦合入纤芯为 $200 \mu\text{m}$ 的光纤。增益介质为长 26 mm 的掺钕 GG IAG 光纤。

实验输出光的中心波长为 1055 nm, 线宽小于 2 nm, 随着抽运光的增加, 激光器光束 M^2 因子在 1.2 ~ 1.5 之间变化^[18]。

该课题组还利用 LD 端面抽运芯径为 $300 \mu\text{m}$ 的掺钕 GG IAG 光纤激光器, 单模输出斜率效率为 4.5%, 随着抽运光的增加, 激光器光束 M^2 因子在 1.05 ~ 1.50 之间变化, 且斜率效率为 4%^[21]。

LD 端面抽运虽然可以使激光器结构紧凑, 但由于 GG IAG 光纤的折射率分布特点, 大多数抽运光在入射端浪费转化为热, 增大光纤端面的热承, 阻碍抽运光功率的提高, 所以 LD 端面抽运不是一种有效的抽运结构, 有待寻找更有效的抽运方式。

3.1.3 LD 侧面抽运

2010 年, Hageman 等^[22]从实验出发分析 LD 侧面抽运 GG IAG 光纤激光器的特点。为了最大化抽运效率, 提高散热效率, 维持结构稳定, 光纤放于铜热导平面上 V 形槽中并用铜固化, 磨光铜表面在光纤包层出现一个窗口, 使侧面抽运光通过此窗口进入光纤, 如图 4(a) 所示。实验中使用 3 个功率为 50 W、波长为 808 nm 的准连续 LD 激光器, 实验示意图如图 4(b) 所示。

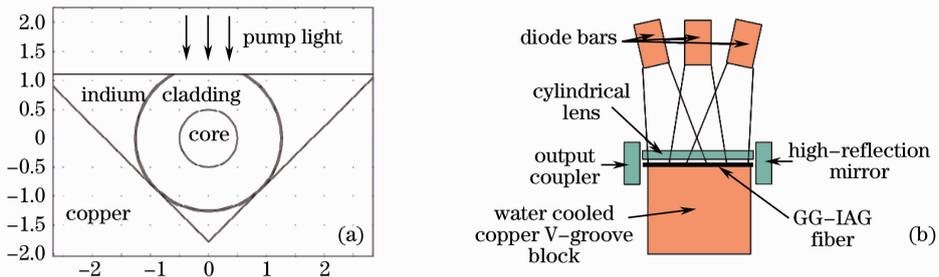


图 4 (a) 实验中光纤放置的横截面图; (b) LD 侧面抽运 GG IAG 光纤激光器示意图

Fig. 4 (a) Cross section of the fiber in experiment ; (b) sketch of the LD side pumped GG IAG fiber laser experiment

此实验的斜率效率为 2.4%, 最大光光转换效率仅为 1.6%。但利用 ASAP 软件的光线模型仿真抽运装置可得斜率效率达 27%, 最大光光转换效率达 26%^[24]。此实验与理论的偏差是由于实验中三个独立的抽运 LD 排列偏差所致。

Hageman 等^[23]还从理论与实验两方面分析了此抽运技术的特点。相对于闪光灯抽运与 LD 端面抽运, LD 侧面抽运方法可以通过加长光纤长度来提高激光器输出功率, 且实验得到了斜率效率 4.3%, 最大脉冲能量为 18 mJ, 对应脉冲功率为 6 W, 光束 M^2 因子为 1.4 的激光输出。该小组进一步的工作是提高抽运效率与优化光纤长度以提供更高效率的激光器。

3.2 掺镱 GG IAG 放大器

掺 Yb^{3+} 光纤中 Yb 离子的吸收截面很高; Stark 谱裂使其在 970 ~ 1200 nm 范围内有连续的荧光发射; 没有激发态吸收, 转换效率高。目前研究最多, 功率最高的光纤激光器均使用掺 Yb^{3+} 光纤。中国科学院西

安光学精密机械研究所已经成功制备了芯径 $200\ \mu\text{m}$ 、 $630\ \mu\text{m}/480\ \mu\text{m}$ 的 D 形内包层, $760\ \mu\text{m}$ 外包层的 GG IAG 大芯径光纤。光纤纤芯为掺镱硅酸盐玻璃光纤, 折射率比内包层小约 0.019% 。Zhou 等^[24] 利用速率方程分析了掺 Yb^{3+} 的 GG IAG 光纤激光器。较传统光纤激光器, 掺 Yb^{3+} 的 GG IAG 光纤激光器的出光阈值大, 工作光纤长度较短; 选择适当的长度可以获得大模场单模激光输出。

Li 等^[25] 搭建了 LD 端面抽运掺 Yb^{3+} 的 GG IAG 光纤放大器, 实验示意图如图 5 所示。功率为 $8\ \text{W}$, 波长为 $976\ \text{nm}$ 的 LD 抽运源经双透镜 (lens 1 和 lens 2) 聚焦为直径为 $360\ \mu\text{m}$ 的光斑投射到 $6.5\ \text{cm}$ 长掺 Yb^{3+} 的 GG IAG 光纤端面。其中有 30% 的抽运光耦合入光纤。 $1040\ \text{nm}$ 的信号光经双透镜 (lens 3 和 lens 4) 聚焦为 $160\ \mu\text{m}$ 的光斑耦合入 GG IAG 光纤的另一端。

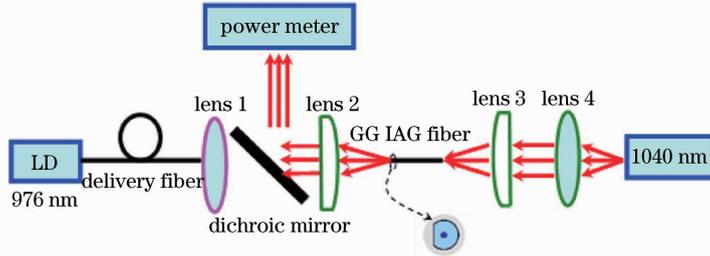


图 5 LD 端面抽运 GG IAG 光纤放大器实验示意图

Fig. 5 Sketch of the LD end pumped GG IAG fiber laser experiment

实验中利用 $8\ \text{W}$ 的抽运光将波长为 $1040\ \text{nm}$ 、功率为 $11.45\ \text{mW}$ 的信号光放大至 $22\ \text{mW}$, 且输出功率随抽运光的增大而增大。由于采用效率不高的 LD 端面抽运, 此放大器的效率较低, 如果采用效率较高的 LD 侧面抽运, 会提高放大器的效率。随后该小组利用此实验装置得到输出光的光束 M^2 因子水平方向为 2.8 , 竖直方向为 2.9 的放大器^[26]。

4 结 论

综述了国内外对 GG IAG 光纤激光器的理论与实验研究进展情况。理论研究均基于 Siegman 的理论模型, 从不同角度分析了 GG IAG 光纤激光器的特性; 实验研究还处于探索阶段, 激光器的出光效率及功率水平较低, 目前的研究重点是探寻更有效的抽运方式, 提高激光输出功率。

GG IAG 光纤激光器面临的问题主要是抽运技术及功率的提升。折射率反导引效应造成的最大问题是其抽运光的吸收很小。对于这个问题, 目前主要有两种解决方式: 1) 可以通过选择更好的 LD 排列方式以及在增益光纤侧面增加抽运窗口, 从而对侧向抽运进行优化, 使抽运光更高效地耦合入 GG IAG 光纤中; 2) 对于端面抽运技术, 寻找合适的纤芯与包层材料, 使得对于抽运光波长, 纤芯的折射率较包层的折射率大, 对于信号光波长, 纤芯的折射率较包层的折射率小, 光纤对抽运光折射率导引, 对激光增益则折射率反导引, 从而提高抽运效率。此外, 加长 GG IAG 光纤也是提升功率的重要手段。我们相信, 研究的不断深入和相关技术的不断改进必将促进 GG IAG 光纤激光器的发展, 相关研究也将推动光纤激光技术的发展。

参 考 文 献

- Liao Suying, Gong Mali. New development of nonlinearity management in high power fiber lasers and amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(6): 27~33
- 廖素英, 巩马理. 高功率光纤激光器和放大器的非线性效应管理新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(6): 27~33
- A. E. Siegman. Propagating modes in gain-guided optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(8): 1617~1628
- A. E. Siegman. Gain-guided, index-antiguide fiber lasers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1677~1682
- Xie Wen, Xiong Caidong, Wang Xiangru *et al.*. Single-mode parabolic gain-guiding optical fiber[J]. *Int. J. Infrared Millim. Waves*, 2008, **29**(4): 406~415
- Y. Chen, T. McComb, V. Sudesh *et al.*. Very large-core, single-mode, gain-guided, index-antiguide fiber lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2505~2507
- Wang Weineng, Tan Xiaoling, Tian Zhen. Research on laser characteristics of gain-guided and index-antiguide fibers[J].

- Laser Technology.*, 2009, **30**(5): 503~505
- 王伟能, 谭晓玲, 田 振. 增益导引折射率反导引光纤激光特性的研究[J]. *激光技术*, 2009, **30**(5): 503~505
- 7 Krishna Mohan Gundu, Parisa Gandomkar Yarandi, Arash Mafi. Beam-quality factor of single-mode gain-guided fiber lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(24): 4124~4126
- 8 Wang Xiangru, Xiong Caidong, Xie Wen. Field deformation and loss by curvature in gain guided and index anti-guided fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(18): 4626~4630
- 9 Wang Xiangru, Xiong Caidong, Luo Juanyan. Coupling coefficients evaluation of a directional coupler using gain guided and index antiguided fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(3): 382~386
- 10 Zhou Enyu, Yan Kunlun, Zhao Baoyin *et al.*. General coupled-mode analysis for gain-guided, index-antiguided fibers, and index-guided fibers[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(4): 1034~1037
- 11 Hyun Su Kim, Martin C. Richardson. Output characteristic of a gain guided, index anti-guided fiber amplifier under the condition of gain saturation[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(18): 15969~15974
- 12 X. Wang, C. Xiong, J. Luo. Theoretical discussion on gain guided and index antiguided fiber laser by variational gain saturation factor[J]. *Appl. Phys. B*, 2011, **102**(3): 621~628
- 13 Hyun Su Kim. Investigation of the thermal characteristics of a gain-guided, index-anti-guided fiber[J]. *J. Korean Phys. Soc.*, 2010, **56**(1): 209~213
- 14 Yan Kunlun, Zhou Enyu, Wei Wei *et al.*. 3-dimensional thermal analysis of Yb³⁺-doped gain guided and index-antiguided fiber amplifier[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(6): 1626~1630
- 15 A. E. Siegman, Y. Chen, V. Sudesh *et al.*. Confined propagation and near single mode laser oscillation in a gain guided, index antiguided optical fiber[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(25): 251101
- 16 Y. Chen, V. Sudesh, M. C. Richardson *et al.*. Experimental Demonstration of Gain Guided Lasing in an Index Antiguiding Fiber[R]. Presented at the Advanced Solid State Photonics Conference, Vancouver, 2007
- 17 Y. Chen, V. Sudesh, T. McComb *et al.*. Lasing in a gain-guided index antiguided fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1683~1688
- 18 V. Sudesh, T. McComb, Y. Chen *et al.*. Diode-pumped 200 μm diameter core gain-guided, index-antiguided single mode fiber laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **90**(3): 369~372
- 19 Timothy McComb, Vikas Sudesh, Y. Chen *et al.*. Single mode lasing in a gain-guided index anti-guided diode end pumped fiber[C]. CLED, 2008, CThL5
- 20 Timothy McComb, Vikas Sudesh, Ying Chen *et al.*. Single mode lasing in a 200 μm diameter core gain-guided index anti-guided diode end pumped fiber[C]. The 20th Annual Meeting of the IEEE, 2007. 242~243
- 21 Robert Sims, Vikas Sudesh, Timothy McComb *et al.*. Diode-pumped very large core, gain guided, index antiguided single mode fiber laser[C]. ASSP, 2009. W33
- 22 W. Hageman, Y. Chen, M. Bass *et al.*. Diode side pumping of a gain guided, index anti-guided large mode area neodymium fiber laser[C]. ASSP, 2010. AMB5
- 23 William Hageman, Ying Chen, Xiangru Wang *et al.*. Scalable side-pumped, gain-guided index-antiguided fiber laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(12): 2451~2459
- 24 E. Zhou, B. Zhao, X. Wang *et al.*. Analysis of one-end-pumped Yb³⁺-doped gain guided and index antiguided fiber laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **99**(4): 747~751
- 25 Li Weinan, Lu Min, Yang Zhi *et al.*. Fabrication and characterization of Yb³⁺-doped gain-guided index-antiguided fiber with D-shaped inner cladding[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **28**(6): 1498~1501
- 26 M. Lu, W. Li, K. Zou *et al.*. Yb³⁺-doped 200 μm diameter core, gain guided index-antiguided fiber[J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **98**(2-3): 301~304