

增益导引-折射率反导引大模场光纤激光器抽运技术研究进展

沈晓 邹辉 郑锐林 郑加金 韦玮

Progress in gain-guided and index-antiguide large mode area fiber laser pump technology

Shen Xiao Zou Hui Zheng Rui-Lin Zheng Jia-Jin Wei Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 024210 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.024210

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024210>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

780W 全光纤窄线宽光纤激光器

780 W narrow linewidth all fiber laser

物理学报.2014, 63(13): 134205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134205>

掺铒光纤环形激光器中饱和吸收光栅瞬态特性引发跳模的实验研究

Experimental study on mode hopping triggered by transient characteristics of saturable absorber gratings in Er-doped fiber ring lasers

物理学报.2014, 63(13): 134206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134206>

氧化石墨烯被动锁模掺镱光纤激光器多脉冲现象的实验研究

Experimental studies of multiple pulses in a passively ytterbium-doped fiber laser based on graphene-oxide saturable absorber

物理学报.2014, 63(8): 084202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084202>

147 fs 碳纳米管倏逝场锁模全光纤掺铒光纤激光器

A 147 fs mode-locked erbium-doped fiber laser with a carbon nanotubes saturable absorber in evanescent field

物理学报.2014, 63(3): 034202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034202>

脉冲光纤激光修整青铜金刚石砂轮等离子体特性研究

Plasma characterization studies of laser dressing for bronze-bonded diamond wheel by a pulsed fiber laser

物理学报.2013, 62(14): 144204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144204>

增益导引-折射率反导引大模场光纤激光器 抽运技术研究进展*

沈骁 邹辉 郑锐林 郑加金 韦玮†

(南京邮电大学光电工程学院, 南京 210023)

(2014年4月9日收到; 2014年7月28日收到修改稿)

介绍了一种新型增益导引-折射率反导引大模场光纤的结构、基本理论以及其在光纤激光器领域的重要应用. 在综合分析了不同抽运条件下的激光输出特性以及光纤的热效应特征后, 得出侧面抽运是增益导引-折射率反导引大模场光纤的最佳抽运方案的结论; 重点介绍了增益导引-折射率反导引大模场光纤侧面抽运的理论模拟以及基于V形槽技术的侧面抽运实验研究过程, 为相关领域的实验研究提供了参考; 最后分析了实验结果与理论差距较大的原因, 并提出了改进的方向.

关键词: 高功率光纤激光器, 增益导引-折射率反导引光纤, 侧面抽运, 抽运效率

PACS: 42.55.Wd, 42.55.Xi, 42.60.Lh, 42.60.By

DOI: 10.7498/aps.64.024210

1 引言

高功率光纤激光器和放大器在商业和军事上具有很多潜在的应用^[1-3], 但在传统的单模光纤中, 由于高功率所引起的非线性光学效应和光纤端面的光学损伤成为限制激光器和放大器功率进一步提高的主要障碍^[4,5], 而解决这一问题最直接的途径是通过增加模场面积来降低光功率密度^[6,7]. 目前传统单模光纤激光器的纤芯直径可达40 μm ^[8], 通过设计光子晶体光纤可使芯径达到100 μm ^[9], 其他的增加模场面积的设计方法主要包括: 模式转换法^[10,11]、相干组束^[12]、手征耦合芯光纤法^[13]、弯曲损耗管理法^[14]以及锥型光纤法等^[15]. 但所有这些光纤结构复杂, 工艺要求高, 生产成本较高, 且不能使纤芯足够大($< 100 \mu\text{m}$), 以至于不能满足高能量单模激光输出和放大的需要.

2003年, Siegman^[16,17]提出了一种实现大模场光纤的新方法, 即增益导引-折射率反导引(GG-IAG)大模场光纤. 该光纤结构与普通光纤类似, 仅

由纤芯和包层组成, 但纤芯折射率小于包层, 存在模式泄漏损耗因子; 纤芯由稀土掺杂材料组成, 为光信号提供了功率增益因子. 目前已经实现了芯径在100—400 μm 范围内的单模激光输出^[18-21]. 该类型光纤对信号光的增益系数要求较大, 且光纤不适合弯曲使用^[22], 因此一般采用离子掺杂浓度较高的多组分玻璃材料制成. 而该类型材料对抽运光吸收系数较大且易产生热效应^[19,23], 因此对于抽运方式要求苛刻, 将直接影响激光输出特性. 本文通过总结单端抽运、双端抽运、侧面抽运三种不同抽运条件下的激光输出特性和热效应特征, 认为侧面抽运是GG-IAG光纤的最优选择方案, 并详细阐述了侧面抽运方案的实施细节, 为新型大模场光纤在激光领域的相关研究提供了参考.

2 GG-IAG光纤的结构与设计理论

2.1 GG-IAG光纤的结构

GG-IAG光纤的结构如图1所示^[24]. 设光纤包层的折射率 $n_2 = n_0$, 纤芯/包层折射率差为

* 国家自然科学基金(批准号: 61077070, 61177086)和江苏省高校研究生科研创新计划(批准号: CXZZ13_0467)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: weiwei@njupt.edu.cn

$\Delta n (\Delta n < 0)$, 功率增益系数为 g , 则纤芯的折射率可表示为: $n_1 = (n_0 + \Delta n) + ig\lambda/4\pi$. 光在纤芯与包层界面上不再发生全反射, 而是有一部分光会泄漏到包层中, 即折射率反导引. 但同时该光纤的纤芯含有增益介质, 可将信号光功率放大, 从而补偿从芯层到包层的泄漏损耗并导引基模传输, 即增益导引.

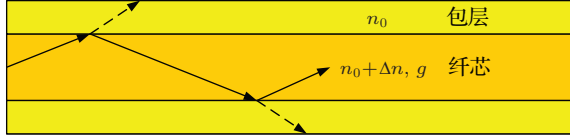


图1 GG-IAG 光纤的结构

该光纤的 \tilde{V}^2 参数可表示为 [24]

$$\begin{aligned} \tilde{V}^2 &= \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 (n_1^2 - n_0^2) \\ &= \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 \left(\left(n_0 + \Delta n + i\frac{g\lambda}{4\pi} \right)^2 - n_0^2 \right) \\ &\approx \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 \left(2n_0\Delta n + i2n_0\left(\frac{g\lambda}{4\pi}\right) \right), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 λ 为光的波长, a 为纤芯半径. 由于 GG-IAG 光纤并不能够满足常规单模光纤的传输条件, 因此, 常规光纤的设计参数 V^2 并不适用于 GG-IAG 光纤, 所以, 引入两个无量纲参数 ΔN 和 G , 分别表示为

$$\Delta N = \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 (2n_0\Delta n), \quad (2)$$

$$G = \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{n_0\lambda}{2\pi}\right) g, \quad (3)$$

式中, ΔN 相当于传统光纤 V 平方参数的实部, G 则相当于虚部. 因此, \tilde{V}^2 参数可表示为

$$\tilde{V}^2 = \Delta N + jG. \quad (4)$$

\tilde{V}^2 参数构成一个复平面如图 2 所示, ΔN 为横轴、 G 为纵轴 [17]. 由图 2 可见, ΔN 正半轴代表纯折射率导引光纤, G 正半轴代表纯增益导引光纤; 第一象限区域是折射率导引加增益导引型, 而第二象限则是增益导引-折射率反导引光纤横模模式存在的区域. 如果纤芯增益系数 g 较小, 以至于无量纲参数 G 小于 LP_{01} 模式存在的阈值条件, 那么该模式的光“泄漏”传输, 即所有模式为传导辐射模, 随着传输距离的增加, 模场能量减小, 满足折射率反导引条件; 当纤芯增益系数 g 较大时, 以至于无量

纲参数 G 大于 LP_{01} 模式阈值条件, 那么增益导引效应对传输模式进行再塑形, 使纤芯/包层界面具有精确的边界本征解, LP_{01} 模式的大部分能量束缚在纤芯中传输, 如图 2 中红色虚线部分所示. 在纤芯-包层界面光不再“泄漏”, 满足增益导引条件, 即纤芯增益不仅用来补偿泄漏模传输, 并将基模由无边界传输变为有边界传输, 对外输出单横模; 当增益系数足够大, 以至于无量纲参数 G 大于高阶模 (如 LP_{11}) 阈值条件, 高阶模也会由无边界传输变为有边界传输, 光纤输出为多模. 因此, 要使光纤对外输出单模, 需要控制参数 ΔN 和 G , 使之满足只有 LP_{01} 模式存在条件.

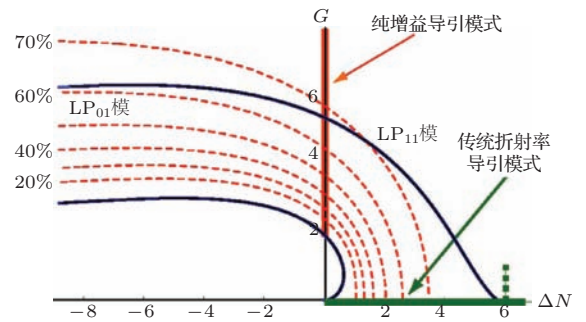


图2 \tilde{V}^2 参数复平面中 LP_{01} 和 LP_{11} 模式分布

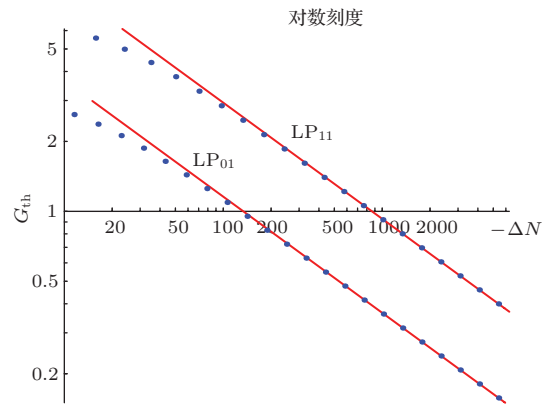


图3 不同模式 G 阈值随 ΔN 的变化关系

2.2 GG-IAG 光纤设计理论

在光纤的模式传播理论中, 主要研究基模和第一高阶模的存在情况. 图 3 给出了在 GG-IAG 光纤中基模 (即 LP_{01}) 和第一高阶模 (即 LP_{11}) 模式存在的 G 阈值与 ΔN 的关系 [18], 由图 3 可见, ΔN 越大, G 阈值越低. 当 $-\Delta N \geq 50$ 时, LP_{01} 和 LP_{11} 模式的阈值条件可由 (5) 和 (6) 式来表述 [17]:

$$G_{th}^{01} \cong \sqrt{\frac{4j_{01}^4}{-\Delta N}} = \sqrt{\frac{133.8}{-\Delta N}},$$

[LP₀₁ mode], (5)

$$G_{th}^{11} \cong \sqrt{\frac{4j_{11}^4}{-\Delta N}} = \sqrt{\frac{862.2}{-\Delta N}},$$

[LP₁₁ mode]. (6)

从 (5), (6) 式可以推导出 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模对应的纤芯功率增益系数 g 阈值:

$$g_{gg}^{01} = \sqrt{\frac{133.8}{2n_0^3(-\Delta n)}} \frac{\lambda^2}{(2\pi)^2 a^3},$$
 (7)

$$g_{gg}^{11} = \sqrt{\frac{862.2}{2n_0^3(-\Delta n)}} \frac{\lambda^2}{(2\pi)^2 a^3}.$$
 (8)

由 (7) 和 (8) 式可以看出, 纤芯半径 a 越大、折射率差 ΔN 越大, 相应的增益系数 g 阈值要求越低.

激光振荡阈值可表示为

$$g_{osc}^{th} = -\frac{1}{2l_g} \ln(R_1 R_2) + \alpha,$$
 (9)

其中 α 为谐振腔损耗系数; R_1, R_2 分别为谐振腔两反射镜反射率; l_g 光纤长度, 要实现 GG-IAG 光纤单模激光振荡, 必须满足条件 [25]:

$$g_{gg}^{01} < g_{th}^{osc} < g_{gg}^{11} - g_{gg}^{01}.$$
 (10)

通过 (10) 式, 可以对光纤长度和谐振腔进行设计. 而对于光纤的增益要求来说, 应满足:

$$g_{gg}^{01} + g_{th}^{osc} < g < g_{gg}^{11} + g_{th}^{osc}.$$
 (11)

3 不同抽运方式下 GG-IAG 光纤激光器输出特性分析

韦玮课题组在国际上率先对单端面抽运、双端面抽运和侧面抽运方式下的 GG-IAG 光纤激光器的激光输出特性展开了研究 [26–28], 获得了有价值的结论, 如图 4 所示, 为光纤激光器的设计提供了理论支撑.

研究显示, 当单端抽运时, 光纤内抽运光随着光纤长度 L 的增加迅速衰减, 增益系数也随之迅速衰减; 随着光纤长度的增长, 正向信号光功率增加, 而反向信号光功率减小; 同时, 随着输入抽运光功率 P_p 的增加, 输出激光功率 P_s 线性增加; 由于存在泄漏损耗, GG-IAG 光纤激光器的增益阈值大于普通光纤; 光纤存在一个最佳长度, 此时输出信号光功率最大; 另外, 光纤长度也影响激光模式的输

出特性, 在一定长度范围内的光纤才可以获得单模激光输出.

双端抽运比单端抽运具有激光阈值功率更低、斜率效率更高的特点; 抽运光、增益系数以及正(反)向信号光在光纤轴向上的分布更加均匀, 最大输出功率所对应的光纤最佳长度有所扩大.

侧面抽运比双端面抽运的激光阈值功率更小、斜率效率更高; 正向信号光功率在光纤中随光纤长度的增加呈 e 指数形式增加, 而反向信号光功率呈 e 指数形式减小; 增益系数在光纤轴向上的分布更加均匀.

可见, 对于 GG-IAG 光纤来说, 由于高掺杂带来的抽运光的高吸收系数, 使得侧面抽运成为更好的选择.

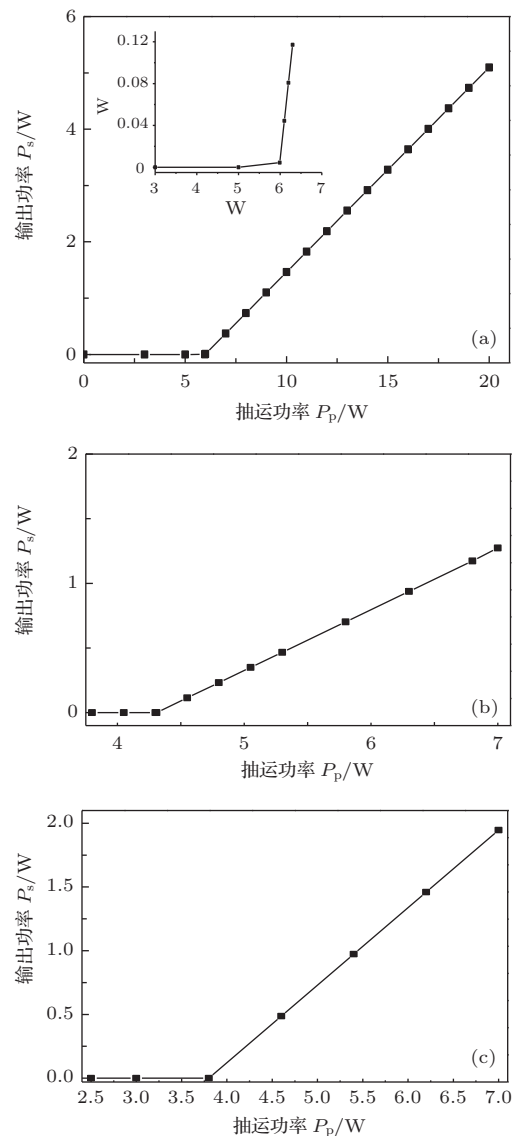


图 4 输出激光功率与抽运光功率的关系 (a) 单端面抽运; (b) 双端面抽运; (c) 侧面抽运

4 不同抽运方式下 GG-IAG 光纤激光器热效应分析

由于 GG-IAG 光纤一般采用高稀土掺杂 (~10% wt) 的多组分玻璃材料制备, 因此对于抽运光的吸收系数较大, 从而产生了严重的热效应, 影响了激光的输出特性 [29]. 韦玮课题组在国际上首先对 GG-IAG 光纤放大器和激光器展开了三维热效应理论研究 [30–32]. 建立了 GG-IAG 光纤放大器和激光器三维热效应理论模型并进行了解析求解, 分析了纵向热传导对光纤温度 T 分布的影响. 分析了不同抽运方式下光纤的热效应特征, 以及光纤的热效应与光纤长度、芯径、冷却条件、包层半径、折射率差等因素的关系.

研究结果显示: 在考虑和不考虑纵向热传导的情况下, 得到的光纤最高温度相差大约 29.43%, 纵向热传导对工作光纤的温度分布有很大的影响 [30].

在单端面抽运的条件下, 抽运光注入端温度最高. 温度沿纵向迅速减小, 沿径向缓慢减小, 且随着抽运光功率沿着纵向减小, 径向的温差也越来越小. 在距离注入端小于 1.0 cm 的范围内, 温度快速下降, 单端抽运时光纤的温度分布如图 5 (a) 所示.

双端抽运比单端抽运温度分布更加均匀, 可以有效地降低光纤温度, 温度在纵向基本成指数规律下降, 这是由于它受热功率密度影响的结果. 强制水冷方式 (热对流系数最大: $500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) 下光纤的温度大大低于其他的冷却方式, 最高温度约是自然冷却的 1/6, 而强制风冷效果次低. 随着光纤包层半径的增大, 工作光纤的最高温度不断下降; 在抽运光入射端面, 温度随包层半径增大而下降的速率大约是 $1.01 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\mu\text{m}^{-1}$, 所以增大光纤包层半径是减弱光纤热效应的有效途径. 随着负折射率差的增加, 光纤的有效吸收系数开始下降, 随之引起光纤温度的降低. 双端抽运时光纤的温度分布如图 5 (b) 所示.

空间多点抽运可在一定程度上代表侧面抽运, 此时 GG-IAG 光纤的温度比双端面抽运更低, 并且纵向温度分布更加均匀. 在抽运点处, 光纤温度有跳跃, 但比端面抽运时的纵向温度分布更加均匀. 光纤输出激光功率比单端抽运时输出的激光功率高, 进一步的增加抽运点数量, 可以使光纤的最高温度进一步降低, 且分布更加平坦. 空间 6 点抽运

时光纤的温度分布如图 5 (c) 所示.

可见, 侧面抽运比端面抽运有更均匀的温度分布, 更适用于 GG-IAG 光纤.

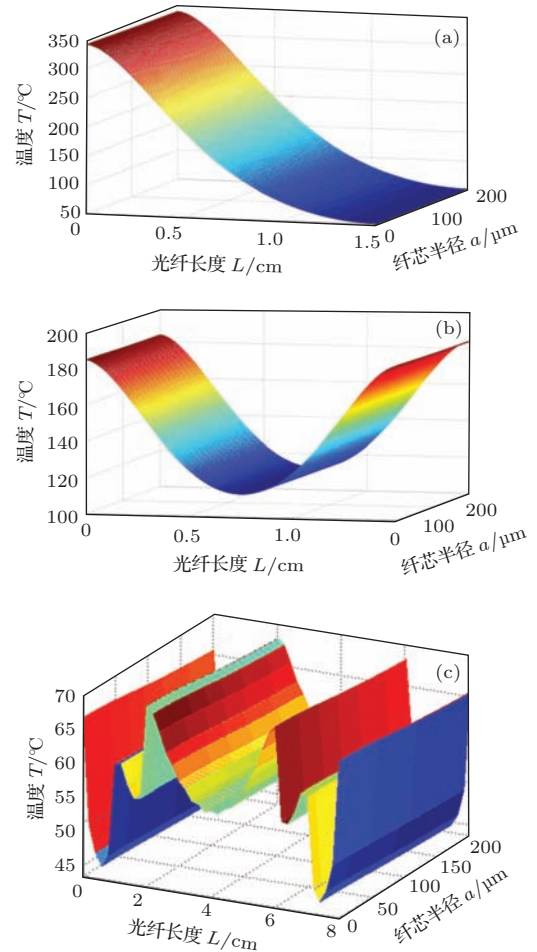


图5 (网刊彩色) 不同抽运方式下的光纤温度分布特性 (a) 单端抽运; (b) 双端抽运; (c) 空间六点抽运

5 GG-IAG 大模场光纤激光器侧面抽运理论研究

在理论分析上, 从激光阈值、斜效率、热管理等方面而言, 侧面抽运具有端面抽运难以相比的优点; 同时, Hageman 等 [23] 对 GG-IAG 大模场光纤的抽运效率进行了细致的理论研究, 指出要使 GG-IAG 光纤能够高效地工作, 抽运技术必须满足三个条件: 1) 抽运效率应该大于 50%; 2) 抽运光在纤芯中的分布必须均匀, 在单模条件下, 抽运功率变化范围不得超过 21%; 3) 抽运光分布必须能覆盖整个光纤长度, 由于纤芯半径的增加可降低增益阈值, 而最佳光纤长度随着光纤半径的增加而增加, 如图 6 所示. 因此要求在光纤长度增加时, 抽运光

能够覆盖整个光纤长度。

在实验上, Siegman 课题组研究了两种抽运方案, 一是闪光灯侧面抽运^[19], 抽运光分布均匀但是抽运效率太低; 二是 LD 端面抽运^[20], 实验结果显示斜效率也较低, 这是由于高掺杂带来的抽运光高吸收系数, 使得抽运光功率下降较快, 对于 21% 的均匀性要求, 只有前几毫米的光纤可以满足; 另外, 由于 GG-IAG 光纤纤芯折射率小于包层, 包层中的抽运光也无法进入纤芯而浪费。图 7 是 Kigre 公司 Q100 型号掺铒磷酸盐玻璃光纤归一化的抽运光吸收与光纤长度的关系^[25]。由图可见, 即使掺杂浓度只有 1%, 在抽运光功率下降 21% 时对应的光纤长度只有 0.85 mm, 不符合光纤激光器的设计需要, 因此对于 GG-IAG 光纤而言有待开发新的抽运技术。

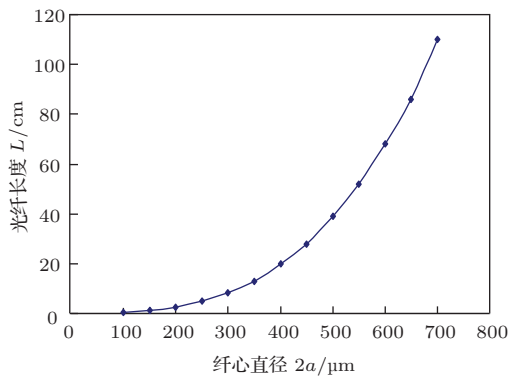


图 6 最佳光纤长度与光纤半径的关系

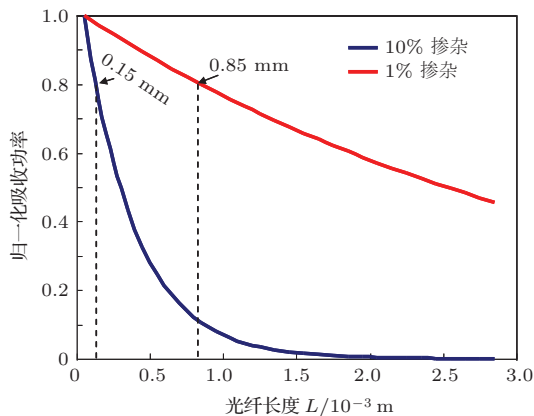


图 7 (网刊彩色) 归一化抽运光吸收与光纤长度的关系

5.1 折射率交叉抽运技术

Siegman 课题组^[33]提出了两个抽运发展方向, 第一种方法是采用折射率交叉抽运技术, 即通过设

计材料的色散特性, 使得在抽运光波长下, 纤芯折射率大于包层, 从而使得抽运光满足折射率导引; 而在信号光波长下, 纤芯折射率小于包层, 从而使得信号光满足折射率反导引。这要求包层材料低色散, 芯层材料高色散; 两者色散曲线的交点在抽运光和信号光中间某处, 如两者的色散相近则更有利于实现。但目前还没有现成的材料可以满足, 要使用这一技术, 必须对光纤材料进行专门的设计制备, 因此这一技术虽然具有发展潜力, 但至少目前还难以实现。2012 年, 台湾国立联合大学 Chen 和 Jian^[34]使用长度为 22 cm, 纤芯直径 3.2 μm , 包层之间 125 μm 的 Er^{3+} 掺杂石英光纤, 将包层用 HF 酸腐蚀至 24.7 μm 后放入折射率匹配且色散平坦的光学液体中, 验证了该方法的可行性。

5.2 LD bar 条侧面抽运技术

第二种方法是采用 LD bar 条作为抽运源进行侧面抽运。Hageman 等^[23]分别从理论和实验上展开了详细的研究, 提出高效的侧面抽运技术必须解决三个问题。1) 将 bar 条的抽运光高效的聚焦到纤芯上。对于 100 μm 的纤芯来说, 要使抽运光偏离半径在 25 μm 范围以内的话, 对于 4 cm 长的光纤, 光纤纵向和抽运条形光斑的平行度需在 600 μrad 范围以内; 光纤与抽运条形光斑横向对准要求严格, 如要求 100 μm 宽的光斑入射进芯径为 100 μm 的纤芯内, 则光斑与光纤横向偏移误差要小于几微米; 光线追迹模拟显示, 6 mm 直径的柱透镜焦深是 100 μm , 因此光纤在整个长度上离柱透镜的距离偏差最大不超过 100 μm ; 为了使抽运光主要被纤芯吸收, 应该在光纤包层上镀反射膜加强反射, 使抽运光多次通过纤芯。2) 要求抽运光在光纤轴向和截面上均匀分布。一个标准 bar 条长度是 1 cm, 每个 bar 条之间总有一定距离, 势必造成 bar 条之间有无光区, 但由于二极管在慢轴方向发散角是 10°, 角度发散方向沿光纤纵向, 因此当 bar 条距光纤一段距离时, 光线就会填充无光区, 这决定了 bar 条与光纤之间的最小距离。3) bar 条必须能够抽运整个光纤长度, Northrop Grumman's Cutting Edge Optonics 公司已经生产出了 12 cm 长的二极管组合 bar, 几个这样的 bar 条即可满足 0.5 m 长的 GG-IAG 光纤侧面抽运, 达到抽运光在长度上的需要。

5.3 GG-IAG 光纤侧面抽运光学参数模拟

Hageman^[25]对GG-IAG光纤的侧面抽运技术展开了详细的研究,包括理论模拟和实验研究.在理论方面,使用ASAP光学设计软件,通过光线追迹法对抽运方案进行了模拟,包括抽运源离光纤的最佳距离、聚焦柱透镜的直径、光纤抽运窗口尺寸、抽运光在光纤横截面上分布的均匀性、光纤包层界面反射率对抽运效率的影响五方面.所用参数如表1所示.

仿真获得最佳结果如下:1)抽运源离光纤的最佳距离 $D = 40\text{ mm}$ 时,抽运光在纵向上的分布接近均匀;2)聚焦柱透镜的直径为6 mm时,聚焦

的光斑尺寸最小;3)抽运窗口太小会阻止抽运光进入,太大会使反射光容易逸出,不能在光纤中多次反射进入纤芯,模拟结果显示最佳的抽运窗口为深度 $15\text{ }\mu\text{m}$,对应的窗口宽度 $120\text{ }\mu\text{m}$,比纤芯稍大;4)抽运光分布的不均匀性将会使基模变形和分解,因此对于高质量的光束要求来说,纤芯内抽运光分布的均匀性至关重要;图8(a)表示包层界面是镜面反射,图8(b)是漫反射,图8(c)是随机散射;可见,漫反射条件下抽运光分布比较均匀;5)包层界面反射率对抽运效率的影响,发现随着反射率的升高,抽运效率不断增加;6)抽运效率随包层界面反射率增加而增加,最大抽运效率为56%左右,如图9所示.

表1 ASAP 软件模拟所用参数

光纤参数		抽运源参数	
纤芯直径	100 μm	光束发散角(快轴方向聚焦后)	3°
包层直径	250 μm	光束发散角(慢轴)	10°
纤芯折射率	1.5689	发光面尺寸	$90\text{ }\mu\text{m} \times 1\text{ }\mu\text{m}$
包层折射率	1.5734	每个bar条二极管个数	69
芯包层折射率差 n	-0.0045	二极管间距	133.3 μm
掺杂浓度 wt%(Nd ³⁺)	10%	bar条长度	1 cm
离子数浓度	$1.14 \times 10^{21}\text{ cm}^{-3}$	bar条间隙	1.5 mm
吸收系数	2.8 mm^{-1}	bar条个数	3个

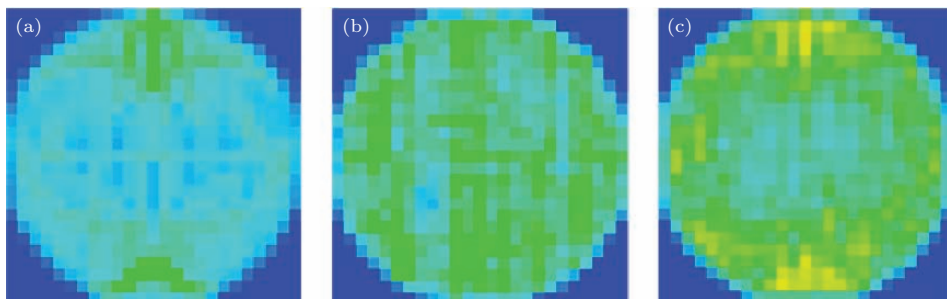


图8 (网刊彩色) 包层界面不同反射模型与抽运光均匀性关系 (a) 镜面反射; (b) 漫反射; (c) 随机散射

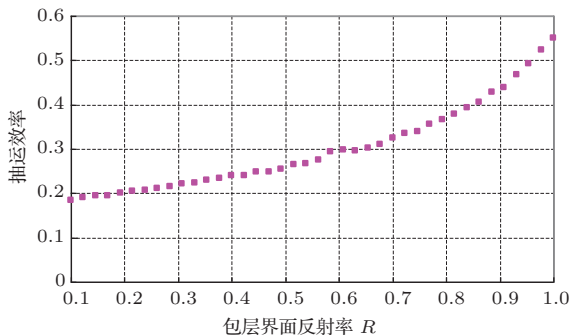


图9 抽运效率与包层-金属界面反射率之间的关系

5.4 GG-IAG 光纤侧面抽运热效应模拟

采用COMSOL软件的有限元分析方法,对光纤中的热量分布进行了分析^[25],材料的物理和热学特性如表2所示.与空气接触的部分设定为绝热,没有空气对流和空气传导冷却,铜块用水冷却,设定水的温度为 $10\text{ }^\circ\text{C}$.根据Kigre Q100的量子效率和抽运效率,计算了纤芯的热密度,设纤芯直径 $100\text{ }\mu\text{m}$,长度1 cm,输入的抽运功率设为每厘米50 W连续功率,则纤芯功率密度为 $91\text{ GW}\cdot\text{m}^{-3}$.得

到光纤热分布如图 10 所示: 纤芯最高温度 219 °C, 在光纤芯径方向上最大温差 70 °C, 纤芯产生的折射率变化为 -0.00032, 是芯/包层折射率差的 7%. 仿真结果表明, 温度效应所产生的各种变化在可接受范围以内.

表 2 热效应模拟所用参数

	导热系数 /W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	杨氏模量 /GPa	泊松比	密度 /kg·m ⁻³
铜	400	110	0.35	8700
钢	86	11	0.33	7290
玻璃	0.82	71.5	0.24	3204

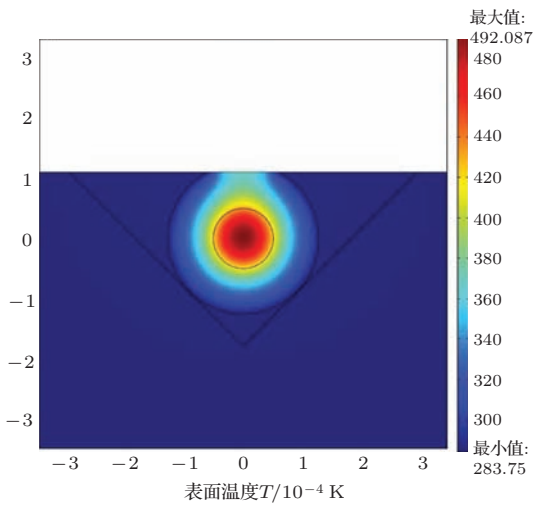


图 10 (网刊彩色) 抽运功率为 50 W·cm⁻¹ 时光纤的温度分布

6 GG-IAG 光纤侧面抽运实验研究^[25]

6.1 实验制备过程

1) GG-IAG 光纤表面的处理: 由于光纤包层表面粗糙化可以使得光发生漫反射, 从而提高纤芯抽运光的均匀性, 因此 Hageman 等希望对光纤表面进行粗糙化处理. 他们首先采用酸碱腐蚀的方法对光纤表面进行了处理, 发现采用浓度较高的 HF 酸溶液时, 对磷酸盐光纤表面几乎没有影响. 其后, 又采用强碱溶液 (浓度 10 M 的 KOH 溶液), 温度 75 °C, 发现强碱溶液的腐蚀速率为 11 μm·M⁻¹, 腐蚀后的光纤表面部分有裂纹并脱落, 剩下的光纤表面仍然光滑; 而由于光纤较脆, 没有采用物理方法处理. 因此他们没有找到合适的光纤表面粗糙化处理办法, 最后使用的光纤表面没有进行粗糙化处理.

2) 光纤置入 V 形槽制备方法: 实验选取一块

厚度约 3 mm 的铜板, 在铜板上精确制作一个深度为 0.279 mm、长度为 3 cm 的 V 形槽; 把钢丝放入 V 形槽中, 将该铜板加热直至钢丝熔化, 将长度为 3.1 cm 的光纤放入 V 形槽中, 两头分别露出 V 形槽少许, 防止光纤端面被钢覆盖, 再用重物将光纤压紧, 然后冷却至室温. 将 V 形槽外侧的光纤侧面先后用粗细不同的砂纸进行打磨抛光, 得到一个光纤侧面抽运窗口; 选择一个尺寸为 7.62 cm × 2.54 cm × 3 cm 的铜块, 在它中间纵向开通水道用于水冷却; 将 V 形槽铜板放在铜块上, 中间用导热硅胶黏结以使能够充分散热. 过程如图 11 所示.

3) GG-IAG 光纤激光器侧面抽运实验: 实验分别采用三个和四个 LD Bar 条作为抽运源, 聚焦柱透镜直径为 5 mm, 光纤长度 3 cm, 一个反射镜在 1064 nm 处反射率为 100%, 紧贴光纤一端, 输出镜反射率分别为 43%(3 个 bar) 和 33%(4 个 bar), 谐振腔用 HE-NE 激光束进行准直, 抽运光频率为 1 Hz, 脉宽为 3 ms. 实验装置如图 12 所示.

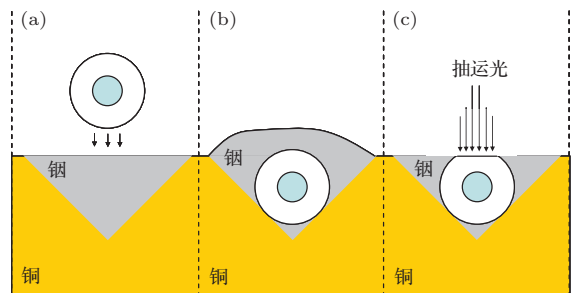


图 11 (网刊彩色) 光纤置入 V 形槽制作过程

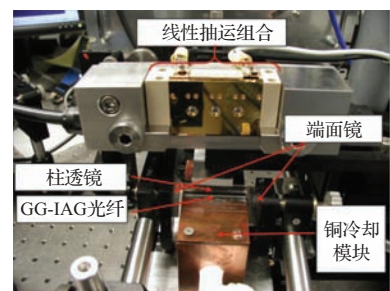


图 12 GG-IAG 光纤激光器侧面抽运实验

6.2 实验结果分析

三个 LD Bar 条抽运时, 斜效率为 2.4%, 最大输出功率为 2.2 W, 光束发散角 840 mrad, 得到的光束为多模. Hageman 分析了产生多模激光的原因是三个 bar 条的准直性不好, 且每个 bar 条产生

的抽运光的均匀性差别较大, 导致增益分布也很不均匀; 一部分光纤的增益低于阈值, 使得整个光纤不能保持单模运转; 另外, 柱透镜不能三维调节更加剧了抽运光的不均匀性.

当采用4个线性组合的bar条抽运时, 光纤长度4 cm, 输出镜反射率33%. 斜效率为4.3%, 最大输出功率为6 W. 光束发散角20 mrad, 光束质量因子 $M^2 = 1.4$, 接近单模. 但斜效率仍然比理论模拟低很多, Hageman认为主要原因是抽运源和柱透镜之间调节不够精确, 柱透镜没有增透膜会损失8%的抽运效率, 抽运窗口的光学质量和均匀性较差, 光纤端面的损耗等. 提出解决这些问题的方法是增大光纤的直径, 纤芯直径越大, 抽运效率越高, 且纤芯增加容易制作; 如光纤直径增加引起热量沉积增加, 则可以减小包层直径解决.

7 总 结

本文总结了GG-IAG大模场光纤及其激光器模型的基本理论, 通过速率方程理论及光纤的热效应理论分析得出, 侧面抽运是最适合的抽运选择方案. 从理论模拟和实验制作两方面详细介绍了GG-IAG大模场光纤侧面抽运技术; 虽然侧面抽运在激光阈值、斜效率、温度特性等多方面优于端面抽运, 但其斜效率仍然远低于理论值, 输出功率不高. 因此还需要进一步优化设计, 比如增加光纤长度和纤芯直径、在光纤包层上镀金膜以提高反射率、在柱透镜上镀增透膜、积极开发新的材料, 开展折射率交叉导引技术等. 相信随着各种制备工艺的提高, GG-IAG大模场光纤将在高功率光纤放大器和激光器领域展现重要的应用前景.

参考文献

- [1] Her T H 2008 *Opt. Express* **16** 7197
- [2] Lou S Q, Lu W L, Wang X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044201 (in Chinese) [娄淑琴, 鹿文亮, 王鑫 2013 物理学报 **62** 044201]
- [3] Zhou R L, Ju Y L, Zhao J, Yang C, Wang Y Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 064208
- [4] Hao J P, Yan P, Xiao Q R 2014 *Chin. Phys. B* **23** 014203
- [5] Wang X, Lou S Q, Lu W L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 184215 (in Chinese) [王鑫, 娄淑琴, 鹿文亮 2013 物理学报 **62** 184215]
- [6] Liao W Y, Fan W D, Li Y, Chen J, Bu F H, Li H P, Wang X Y, Huang D M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 034206 (in Chinese) [廖文英, 范万德, 李园, 陈君, 卜凡华, 李海鹏, 王新亚, 黄鼎铭 2014 物理学报 **63** 034206]
- [7] Kim H S, McComb T, Sudesh V, Richardson M C 2008 *Conference on Lasers and Electro-Optics/ Quantum Electronics and Laser Science Conference* San Jose, America, May 4–9, 2008 p2581
- [8] Jeong Y, Sahu J K, Payne D N, Nilsson J 2004 *Opt. Express* **12** 6088
- [9] Limpert J, Schmidt O, Rothhardt J, Röser F, Schreiber T, Tünnermann A 2006 *Opt. Express* **14** 2715
- [10] Ramachandran S 2007 *Laser Focus World* **43** 119
- [11] Ramachandran S, Nicholson J W, Ghalmi S, Yan M F, Wisk P, Monberg E, Dimarcello F V 2006 *Opt. Lett.* **31** 1797
- [12] Han K, Xu X J, Liu Z J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 054205
- [13] Liu C H, Chang G Q, Litchinitser N, Guertin D, Jacobsen N, Tankala K, Galvanauskas A 2007 *Conference on Lasers & Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference* Baltimore, America, May 6–11, 2007 p765
- [14] Koplou J P, Kliner D A V, Goldberg L 2000 *Opt. Lett.* **25** 442
- [15] Li L B, Lou Q H, Zhou J, Dong J X, Wei Y R, Du S T, He B 2008 *Opt. Commun.* **281** 655
- [16] Siegman A E 2003 *J. Opt. Soc. Am. A* **20** 1617
- [17] Siegman A E 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1677
- [18] Sudesh V, McComb T, Chen Y, Bass M, Richardson M C, Ballato J, Siegman A E 2008 *Appl. Phys. B* **90** 369
- [19] Chen Y, Sudesh V, McComb T, Richardson M C, Bass M, Ballato J 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1683
- [20] Sims R, Sudesh V, McComb T, Chen Y, Bass M, Richardson M, James A G, Ballato J, Siegman A E 2009 *Optics InfoBase Conference: Advanced Solid-State Photonics* Denver, America, February 1–4, 2009 pWB3
- [21] Chen Y, McComb T, Sudesh V, Richardson M, Bass M 2007 *Opt. Lett.* **32** 2505
- [22] Wang X R, Xiong C D, Xie W 2008 *Opt. Commun.* **281** 4626
- [23] Hageman W, Chen Y, Wang X R, Gao L L, Kim G U, Richardson M C, Bass M 2010 *Opt. Soc. Am. B* **27** 2451
- [24] Yarandi P G 2013 *Ph. D. Dissertation* (Milwaukee: University of Wisconsin-Milwaukee)
- [25] Hageman W 2010 *Ph. D. Dissertation* (Orlando: University of Central Florida)
- [26] Zhou E Y, Zhao B Y, Wang X R, Wang Y S, Wei W, Peng B 2009 *Appl. Phys. B* **99** 747
- [27] Qu Y B, Zhu Y G, Zhou E Y, Wei W, Peng B 2012 *Opt. Laser Technol.* **44** 646
- [28] Zhou E Y 2011 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Fudan University) (in Chinese) [周恩宇 2011 博士学位论文(上海: 复旦大学)]
- [29] Kim H S 2010 *J. Korean Phys. Soc.* **56** 209
- [30] Yan K L, Zhou E Y, Wei W, Peng B 2011 *Opt. Commun.* **284** 626
- [31] Yan K L 2012 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS) (in Chinese) [严昆仑 2012 博士学位论文(西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所)]

- [32] Wu J W 2011 *M. S. Thesis* (Shanghai: Fudan University) (in Chinese) [伍经纬 2011 硕士学位论文(上海: 复旦大学)]
[33] Sudesh V, McComb T, Richardson M C, Hgeman W,

- Bass M, Ballato J, Siegman A E 2010 *US Patent* 7668211B1[2010-02-23]
[34] Chen N K, Jian L J 2012 *Opt. Express* **37** 3057

Progress in gain-guided and index-antiguided large mode area fiber laser pump technology*

Shen Xiao Zou Hui Zheng Rui-Lin Zheng Jia-Jin Wei Wei[†]

(College of opto-electronic engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

(Received 9 April 2014; revised manuscript received 28 July 2014)

Abstract

In this paper, we introduce a new type of gain guided and index antiguided (GG-IAG) large mode area (LMA) fiber structure, basic theory and its important applications in fiber laser fields. We draw a conclusion that the side pump technology is the most appropriate scheme for GG-IAG LMA fiber after comprehensively analyzing the laser output characteristics and the thermal effect of the fiber under different pump conditions. The theoretical simulations of GG-IAG fiber side pump technology and the side pump experiment process are performed by the V groove technology, which is conducive to the experiment research in relevant fields. Finally, the suggestion of how to reduce the difference between the experimental results and the theoretical results is made and its relevant reason is also discussed.

Keywords: high power fiber laser, gain guided and index antiguided fiber, side pump, pump efficiency

PACS: 42.55.Wd, 42.55.Xi, 42.60.Lh, 42.60.By

DOI: 10.7498/aps.64.024210

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61077070, 61177086), and the University Graduate Research and Innovation Program of Jiangsu Province, China (Grant No. CXZZ13_0467).

[†] Corresponding author. E-mail: weiwei@njupt.edu.cn