

反向保偏光纤耦合器偏振特性研究

龙润泽, 张昆, 张利明, 赵鸿

Research of polarization characteristics of reverse polarization-maintaining optical fiber coupler

引用本文:

龙润泽,张昆,张利明,赵鸿. 反向保偏光纤耦合器偏振特性研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 413–418.

LONG Runze,ZHANG Kun,ZHANG Liming,ZHAO Hong. Research of polarization characteristics of reverse polarization-maintaining optical fiber coupler[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(3): 413–418.

您可能感兴趣的其他文章

1. 单波长和双波长可调谐的掺镱锁模光纤激光器

引用本文: 林加强, 戴川生, 姚培军, 等. 单波长和双波长可调谐的掺镱锁模光纤激光器[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 301–304.

2. 熔锥型宽带光纤耦合器的研究

引用本文: 周梦薇, 任德源, 朱益清, 等. 熔锥型宽带光纤耦合器的研究[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 757–762.

3. 基于MOPA结构的1064nm单频光纤激光器

引用本文: 朱志坚, 薛峻文, 王玉珂, 等. 基于MOPA结构的1064nm单频光纤激光器[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 800–803.

4. 可调谐单纵模多波长光纤激光器的研究

引用本文: 陈龙辉, 谢芳, 郭晓蕾, 等. 可调谐单纵模多波长光纤激光器的研究[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 681–685.

5. 多段Lyot光纤消偏器研究

引用本文: 周柯江, 朱敬礼, 魏兵, 等. 多段Lyot光纤消偏器研究[J]. *激光技术*, 2015, 39(6): 741–744.

文章编号: 1001-3806(2023)03-0413-06

反向保偏光纤耦合器偏振特性研究

龙润泽, 张 昆, 张利明, 赵 鸿

(中国电子科技集团公司第十一研究所 固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要: 为了提升高能偏振光纤激光器输出激光偏振态稳定性, 通过阐述反向保偏光纤耦合器反向消光比基本原理, 采用信号光源与 $(6+1) \times 1$ 反向保偏光纤耦合器研制相结合, 取得了反向保偏光纤耦合器信号保偏光纤直径、信号保偏光纤应力区物理变化等因素和反向保偏光纤耦合器反向消光比的关系。结果表明, 信号保偏光纤直径越小, 输出偏振激光的偏振态越稳定, 反向消光比大于 49 dB, 同时促进反向保偏光纤耦合器抽运光纤臂耦合效率提升至 98% 以上; 正向偏振激光输出光纤应力区物理结构变化越明显, 经反向保偏光纤耦合器反向输出偏振激光的偏振态越不稳定。该研究可为制备高消光比、高能偏振光纤激光器提供参考。

关键词: 激光器; 反向保偏光纤耦合器; 反向消光比; 高能

中图分类号: TN256; O436.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.03.020

Research of polarization characteristics of reverse polarization-maintaining optical fiber coupler

LONG Runze, ZHANG Kun, ZHANG Liming, ZHAO Hong

(Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, No. 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: In order to improve the output laser polarization stability of high-energy polarization fiber lasers, the signal light source and $(6+1) \times 1$ reverse polarization-maintaining optical fiber coupler were combined by introducing the basic principle of reverse extinction ratio of reverse polarization-maintaining optical fiber coupler. The influence of signal polarization-maintaining optical fiber diameter and physical change of the stress area of the reverse polarization-maintaining optical fiber on the reverse extinction ratio of a reverse polarization-maintaining optical fiber coupler was studied. The results show that the smaller the diameter of the signal polarization-maintaining fiber, the more stable the polarization state of the output polarized laser, and the reverse extinction ratio is greater than 49 dB. At the same time, the coupling efficiency of the pumping fiber arm of the reverse polarization-maintaining fiber coupler is improved to more than 98%. The more serious the change of the physical structure of the stress region of the forward polarization laser output fiber, the less stable the polarization state of the output polarization laser. The research provides reference for the preparation of high extinction ratio high-energy polarization fiber lasers.

Key words: lasers; reverse polarization-maintaining optical fiber coupler; reverse extinction ratio; high-energy

引 言

大芯径保偏光纤的问世, 拓宽了高能偏振光纤激光器项目发展道路^[1-2]。随着高能偏振光纤激光器技术的发展, 也使耦合型光纤器件技术取得变革式进步。目前高能偏振光纤激光器研制方案多采用反向抽运激

光耦合技术^[3-12], 对方案中常用的光纤元器件反向保偏光纤耦合器 (reverse polarization-maintaining optical fiber coupler, RPM-OFC) 而言, 提出了更高的技术指标要求。

提高高能偏振光纤激光器偏振特性是当前面临攻关的技术难点。作为高能偏振光纤激光器重要偏振光纤器件, 目前国内关于反向保偏光纤耦合器的研究报道量非常少。本文作者结合实验室现有实验条件和工程项目, 以实现输出优良偏振激光为目的, 从概念和研制两个方向对高能反向保偏光纤耦合器进行报道。反向消光比是判断反向保偏光纤耦合器保持光偏振态稳定性能的指标参数。通过对反向保偏光纤耦合器反向

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目 (6142404200101; 6142404200102)

作者简介: 龙润泽 (1988-), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事光纤激光器及光纤器件的研究。

E-mail: long_runze@126.com

收稿日期: 2022-04-01; 收到修改稿日期: 2022-05-25

消光比概念定义及研制工作,由测试数据分析物理因素对反向消光比的影响,所得结论可直接用于反向保偏光纤耦合器制备;同时对研制偏振性能优良的高能偏振光纤激光器技术拓展意义非凡。

1 原理

1.1 反向保偏光纤耦合器

反向保偏光纤耦合器技术方案采用侧面熔融耦合技术^[13-17],反向保偏光纤耦合器输入端由 N 根多模光纤反向注入抽运激光,抽运激光通过高能偏振光纤激光器光路系统的种子源放大后,由输入端 N 根多模光纤熔融耦合端的中心信号光纤正向输出高能偏振激光,其结构如图 1 所示。研制过程中输入输出信号光纤均采用大芯径无源保偏光纤 (polarization-maintaining passive (Ge) double-clad fiber, PMGDF), 当光纤束熔融过程中,图 1 中光纤束由位置 2 过渡到位置 1,所形成的光纤束熔融过渡区域的大芯径保偏光纤应力区在熔融过程中很容易发生微变形,继而破坏光纤束中心信号保偏光纤应力区波导结构;当高能偏振光纤激光器输出偏振激光功率指标至 3 kW 以上,经反向保偏光纤耦合器输出的信号,其偏振态稳定性畸变得更加明显,高能偏振光纤激光器消光比变小,继而影响多路高能偏振激光合成效率^[18-19]。

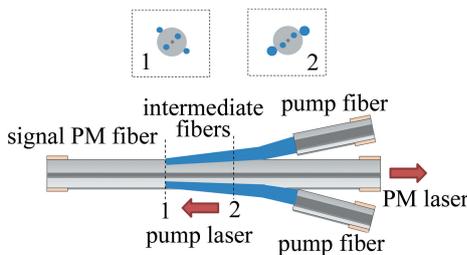


图 1 反向保偏光纤耦合器结构图

Fig. 1 RPM-OFC structure

1.2 反向消光比

反向保偏光纤耦合器的反向消光比是指信号光源 (signal light source, SLS) 顺次通过准直透镜 (collimation lens, CL)、 $\lambda/2$ 玻片、检偏镜 (polarization analyzer, PA) 和扩束镜 (beam expander, BE), 得到输出激光的最大值和最小值, 测试光路如图 2 所示。按 (1) 式计算出反向保偏光纤耦合器的反向消光比, 反向消光比是正值, 单位为 dB。计算公式定义如下:

$$\eta = \lg(P_{\max}/P_{\min}) \quad (1)$$

式中, P_{\max} 是反向保偏光纤耦合器输出端调整 $\lambda/2$ 玻片和检偏镜, 而扩束镜位置状态保持不动, 通过激光功

率计 (optical power meter, OPM) 获得的偏振激光最大值; P_{\min} 是反向保偏光纤耦合器输出端调整 $\lambda/2$ 玻片, 而检偏镜和扩束镜位置状态保持不动, 获得的偏振激光最小值^[20]。检偏镜反射输出的激光通过功率吸收体 (safty equipment, SE) 进行激光安全保护处理。反向保偏光纤耦合器的反向消光比越大, 其偏振特性就越好。由此在高能偏振光纤激光器产品方案设计时, 应采用反向消光比大的反向保偏光纤耦合器。目前光器件制造商针对反向保偏光纤耦合器的产品非常少, 同样产品偏振特性指标参数更为少见, 在高能偏振光纤激光器方案设计和研制时无法了解光耦合器件的偏振特性, 继而对反向保偏光纤耦合器的反向消光比概念定义研究意义重大。反向保偏光纤耦合器反向消光比的研制物理变量有: 光纤束信号保偏光纤直径、信号保偏光纤应力区物理结构变化。

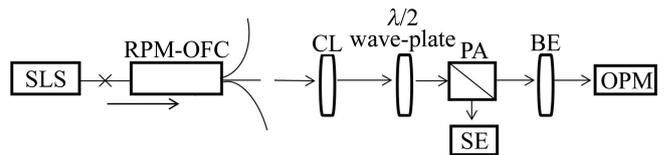


图 2 反向保偏光纤耦合器反向消光比测试系统

Fig. 2 RPM-OFC reverse extinction ratio test system

2 实验设计和分析

2.1 光纤束信号保偏光纤直径

研制 (6+1)×1 反向保偏光纤耦合器, 需要在保证反向输出偏振激光插入损耗等重要参数稳定的前提下, 反向单根输出大芯径保偏光纤选取均采用 (25/400) μm PMGDF, 正向偏振激光输出光纤分别采用 (25/250) μm PMGDF (型号 1) 与 (25/400) μm PMGDF (型号 2) 两种型号分析耦合器光纤束信号保偏光纤直径与反向消光比的影响; 实验环境温度: 23 $^{\circ}\text{C}$, 环境湿度: 30%。(6+1)×1 反向保偏光纤耦合器采用侧面熔融耦合技术, 研制过程中在保持两种型号正向偏振激光输出光纤应力区和纤芯不变的前提下, 应用刻蚀技术化学腐蚀正向偏振激光输出信号保偏光纤, 同时对两组 (每组 6 根) 抽运光纤 (220/242) μm 进行熔融拉锥, 对拉锥刻蚀组束后光纤束应用美国 Vytran-3000 系列拉锥熔接机熔融定型, 两组刻蚀和熔融拉锥组束形成光纤束横截面直径与反向保偏光纤耦合器反向单根输出大芯径保偏光纤直径相同; 应用 Vytran-LDC401 光纤切割刀对锥体腰束进行精准切割; 通过控制美国 Vytran-3000 系列大芯径光纤熔接机旋转熔接程序, 应用其侧向端面旋转功能, 轴向对准熔接机左右两端固

定的熔融光纤束应力区和反向输出大芯径保偏光纤,将熔融光纤束和反向输出大芯径保偏光纤的应力区和纤芯轴向对准端面精准熔接。

反向注入 20 W 信号光源的光纤尾纤与 $(6+1) \times 1$ 反向保偏光纤耦合器反向输出大芯径保偏光纤尾纤进行熔接, $(6+1) \times 1$ 反向保偏光纤耦合器除测试端光纤外, 剩余全部光纤均做遮光处理, 实验过程如图 2 所示。为了减少光纤端面回光反射, 将两种型号反向保偏光纤耦合器正向偏振激光输出光纤 $(25/250) \mu\text{m}$ PMGDF 与 $(25/400) \mu\text{m}$ PMGDF 输出端均切斜 8° , 提高测试数据的完整性。通过逐步调节 20 W 信号光源的供电电流, 测试反向保偏光纤耦合器通过高能反向消光比测试系统的最大和最小偏振激光功率, 并应用 (1) 式计算消光比。

另外, 应用 6 支 200 W、976 nm 抽运激光尾纤分别与 6 支研制完成的两种型号 $(6+1) \times 1$ 反向保偏光纤耦合器的抽运光纤臂相互熔接, 通过端帽 (end-cap, E-C) 输出测试抽运激光耦合效率。实验设计如图 3 所示, 逐步调节 6 支抽运激光的供电电流, 测试由 OPM 读取的抽运激光经过两种型号反向保偏光纤耦合器前后的抽运激光功率, 并计算抽运激光功率耦合效率 (单位为%)。

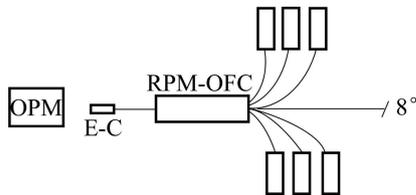


图 3 反向保偏光纤耦合器抽运激光耦合效率测试系统
Fig. 3 RPM-OFC pump laser coupling efficiency test system

在保证反向输出偏振激光插入损耗的前提下, 通过改变 $(6+1) \times 1$ 反向保偏光纤耦合器光纤束信号保偏光纤直径, 发现信号保偏光纤直径变大, 抽运端输出功率耦合效率变小, 反向消光比变小, 且变化趋势明显, 如图 4a 和图 4b 所示。

两种型号的反向保偏光纤耦合器制备前, 均需要先对每根抽运光纤进行预拉锥, 这两种型号的抽运光纤模场直径会变小, 随着抽运激光电流的增加, 抽运激光会激发出更多的高阶模, 由于抽运光纤拉锥导致的抽运光纤模场失配, 抽运激光高阶模通过抽运光纤锥区时必然成为泄露模, 由图 4a 所示, 由于泄露模的增多, 导致两种型号反向保偏光纤耦合器抽运光纤传输耦合效率逐渐地降低^[23-25]。

同时在反向输出大芯径保偏光纤一致的前提下,

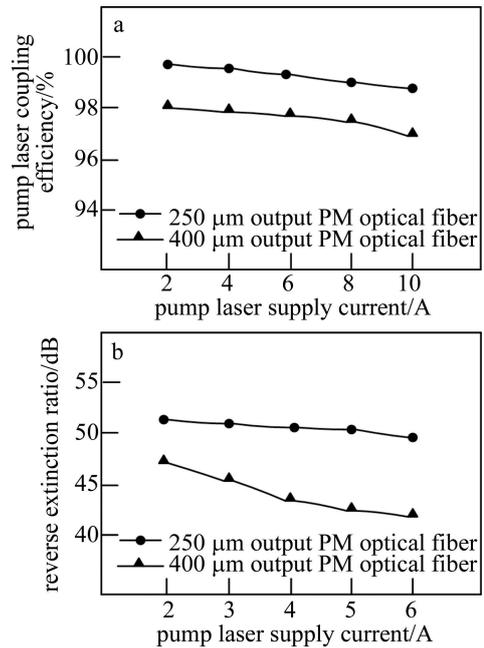


图 4 不同直径信号保偏光纤, $(6+1) \times 1$ 反向保偏光纤耦合器抽运激光耦合效率及反向消光比随抽运激光供电电流变化的测试结果

Fig. 4 $(6+1) \times 1$ RPM-OFC different PM fiber diameter and pump laser supply current change output pump coupling efficiency change and reverse extinction ratio

由于两种型号反向保偏光纤耦合器采用的 $(25/250) \mu\text{m}$ PMGDF (型号 1) 和 $(25/400) \mu\text{m}$ PMGDF (型号 2) 正向偏振激光输出光纤固有直径不同, 所以相对应预制拉锥的抽运光纤锥区束腰横截面直径不同。采用型号 1 抽运光纤锥区束腰横截面直径要大于采用型号 2 的, 型号 1 抽运光纤锥区斜率变化相对较小; 采用型号 1 抽运光纤拉锥后的模场直径大于采用型号 2 的, 抽运激光高阶模通过型号 1 抽运光纤会相对减少泄露模的产生。通过图 4a 可以看出, 采用型号 1 正向偏振激光输出光纤要比采用型号 2 反向保偏光纤耦合器抽运激光耦合效率高。

两种型号的反向保偏光纤耦合器制备前, 均需要先应用刻蚀技术对 $(25/250) \mu\text{m}$ PMGDF (型号 1) 和 $(25/400) \mu\text{m}$ PMGDF (型号 2) 正向偏振激光输出光纤进行化学腐蚀, 这两种正向偏振激光输出光纤因为内置应力区具有快轴和慢轴, 快慢轴折射率影响保偏光纤的偏振特性。光纤束耦合熔融过程中, 由于受外热应力分布不均匀的影响, 大芯径保偏光纤应力区快慢轴折射率会发生改变^[21-22]。由图 4b 可知, 在不均匀的外热应力作用下, 正向偏振激光输出光纤应力区快慢轴折射率发生变化, 随着激光供电电流的增加, 会提供更多的信号激光, 且在传输过程中应力区快轴传输光逐渐更多地转换成慢轴传输, 导致两种型号反向保

偏光纤耦合器的反向消光比逐渐地降低。

同时在反向输出大芯径保偏光纤一致的前提下,由于两种型号反向保偏光纤耦合器采用的正向偏振激光输出光纤固有直径不同,采用型号1正向偏振激光输出光纤刻蚀后锥区束腰直径小于采用型号2的。两种型号反向保偏光纤耦合器采用的正向偏振激光输出保偏光纤应力区与包层介质热膨胀系数不同,刻蚀破坏保偏光纤应力区与包层介质之间存在固有热应力^[21-23]。采用型号1正向偏振激光输出光纤熔融耦合过程中,其包层介质刻蚀量非常少,应力区与包层介质之间存在固有热应力破坏非常少,继而在受外热应力作用时,正向偏振激光输出保偏光纤快慢轴的折射率受外热应力影响较小。通过图4b发现,型号1比型号2反向保偏光纤耦合器的反向消光比要高。为了满足抽运激光传输耦合效率,型号2正向偏振激光输出光纤刻蚀量设计要求较大,相对较为严重地破坏了应力区和包层介质之间存在固有热应力,在外热应力作用时,型号2正向偏振激光输出光纤应力区快慢轴的折射率受影响较大,随着信号激光电流的增加,其反向消光比显著下降。

(6+1)×1反向保偏光纤耦合器光纤束输出信号保偏光纤是大芯径无源保偏光纤,在研制过程中既要保持反向保偏耦合器的反向消光比,又要保持抽运激光耦合效率,这是非常难的工艺水准,如果保持较高的反向保偏光纤耦合器的反向消光比,介于信号保偏光纤应力区区域的限制,刻蚀的信号保偏光纤工艺空间是有限的,信号保偏光纤直径越小,应力区极限刻蚀后越完整,输出偏振激光的偏振态更加稳定,同时信号保偏光纤直径较小,有利于反向保偏光纤耦合器抽运光纤在工艺上的空间功率耦合,促进反向保偏光纤耦合器抽运光纤臂耦合效率提升。

2.2 信号保偏光纤应力区物理变化

大芯径保偏光纤经电弧加热熔接,在受热区域附近产生光纤熔融区,随着保偏光纤对准情况和熔接电弧功率情况的不同,熔接后会破坏大芯径保偏光纤的应力区波导结构,导致信号保偏光纤插损和消光比性能的降低。对于反向保偏光纤耦合器而言,由于采用侧面熔融耦合技术制备,同样面临综合考虑熔接引起的信号保偏光纤应力区的微变形情况,分析过程异常复杂^[18-19]。

制备(6+1)×1反向保偏光纤耦合器过程中影响保偏光纤应力区变形的外界物理因素主要有熔接机熔接功率和熔接时间。在保证熔接机熔接功率相同的实

验条件下,通过设定不同的熔接时间制备(6+1)×1反向保偏光纤耦合器,并观察测试信号保偏光纤应力区变化对反向消光比影响;实验环境温度:25℃,环境湿度:26%。(6+1)×1反向保偏光纤耦合器光纤束信号光纤直径选取(25/250)μm PMGDF,制备参照第2.1节中所述研制工艺流程。本文作者在(6+1)×1反向保偏光纤耦合器制备熔接过程中,设定耦合器熔接时间分别为20s,30s,40s和50s,熔接后先对制备的(6+1)×1反向保偏光纤耦合器进行反向消光比测试,每组测试均调节20W信号光源的供电电流至最大,实验过程如图2所示。测试后采用大芯径光纤切割刀在反向保偏光纤耦合器熔接点附近±100μm区域内切割,以便观察相应情况下的信号保偏光纤应力区的变化情况。

对(6+1)×1反向保偏光纤耦合器进行测试,在保证熔接功率相同的条件下,随着制备熔接时间的增加,反向消光比变小;同时观察到切割光纤熔点附近信号保偏光纤应力区随着熔接时间的增加,应力区结构变形明显,如图5和图6所示。

由图5a可知,反向保偏光纤耦合器信号保偏光纤横截面结构图,含有纤芯和包裹应力棒的包层结构,应力棒为掺B的纯石英,掺B浓度越高,越能提高保偏

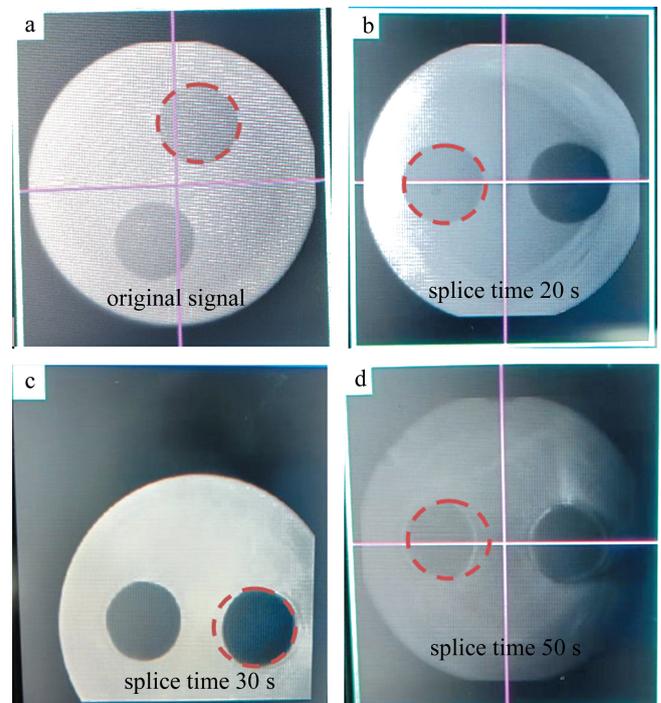


图5 反向保偏光纤耦合器信号保偏光纤端面随熔接时间的变化实验数据图

Fig. 5 RPM-OFC signal PM fiber end cross-section with splice time change experimental data graph

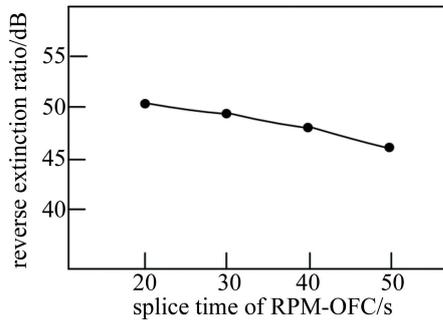


图 6 反向保偏光纤耦合器熔接时间与反向消光比关系

Fig. 6 RPM-OFC splice time and the reverse extinction ratio relationship

光纤的偏振保持特性。由于物质结构差异,导致保偏光纤应力棒与包层介质热膨胀系数不同,反向保偏光纤耦合器熔接过程中,在熔接功率一致的前提下,随着熔接时间的增加,熔接功率总量(熔接功率 \times 熔接时间)增加,导致熔接点附近区域内受外热应力分布的不均匀,保偏光纤应力棒与包层介质热膨胀系数发生改变,随着熔接功率总量的增加,破坏保偏光纤应力棒与包层介质之间固有热应力的程度随之增大,导致大芯径保偏光纤应力区相对于纤芯中心的对称结构失配越来越严重,如图 5b~图 5d 所示。因为内置应力棒具有快轴和慢轴,应力区相对于纤芯中心的对称结构失配对保偏光纤应力区快慢轴折射率发生改变,继而信号激光光纤内部传输过程中应力区由快轴传输转换成慢轴传输。熔接时间增加,引起应力区纤芯中心的对称结构失配,导致反向保偏光纤耦合器反向消光比下降^[21-24],如图 6 所示。结合图 6 可说明反向保偏光纤耦合器制备过程中熔接变量导致的信号保偏光纤应力区变形对(6+1) \times 1 反向保偏光纤耦合器的反向消光比有一定的影响;结合图 5 可说明反向保偏光纤耦合器信号保偏光纤应力区物理结构的变化越严重,反向消光比越小。所以在制备高消光比的反向保偏光纤耦合器时,要特别注意熔接变量对信号保偏光纤应力区的破坏,以及对器件反向消光比参数的影响,进而提升制备(6+1) \times 1 反向保偏光纤耦合器的偏振特性。

3 结 论

本文中定义了(6+1) \times 1 反向保偏光纤耦合器的反向消光比概念参数,分析了研制物理变量对反向保偏光纤耦合器反向消光比的影响,为高能偏振光纤激光器的研制提供光器件技术保障,为高能偏振光纤器件未来发展研究提供基本理论支持。

参 考 文 献

[1] YUAN Y Y, GONG M L. Analysis and design of refractive-index and

dopant distribution for large-mode-area fibers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(9): 1355-1359 (in Chinese).

袁艳阳, 巩马理. 大模面积光纤中折射率和掺杂分布的设计和分

析[J]. 中国激光, 2008, 35(9): 1355-1359.

[2] ZHENG Y, YANG Y F, ZHAO X, et al. Research progress on spectral beam combining technology of high-power fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 44(2): 0201002 (in Chinese).

郑也, 杨依枫, 赵翔, 等. 高功率光纤激光光谱合成技术的研究进

展[J]. 中国激光, 2020, 44(2): 0201002.

[3] ZHANG K, FANG Y T, YU Y, et al. 100 W-level single-frequency fiber amplifier with all-fiber linear polarization [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(3): 031001 (in Chinese).

张昆, 房一涛, 余洋, 等. 100 W 级全光纤化线偏振单频光纤放大

器[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(3): 031001.

[4] JEFFREY P K, SEAN W M. A new method for side-pumping of double-clad fiber sources [J]. Quantum Electronics, 2003, 39(4): 529-539.

[5] WU Zh L, LOU Q H, ZHOU J, et al. Reserch progress of pumping methods for fiber laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(4): 30-33 (in Chinese).

吴中林, 楼祺洪, 周军, 等. 光纤激光器的抽运方法研究进展

[J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(4): 30-33.

[6] OU P, YAN P, GONG M L, et al. Fused side-coupler for double-clad fiber lasers [J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 8-10 (in Chinese).

欧攀, 闫平, 巩马理, 等. 双包层光纤激光器的熔接型侧面耦合

器[J]. 激光技术, 2008, 32(1): 8-10.

[7] CHU Q H, GUO Ch, YAN D L, et al. Recent progress of high power narrow linewidth fiber laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(12): 121004 (in Chinese).

楚秋慧, 郭超, 颜冬林, 等. 高功率窄线宽光纤激光器的研究进展

[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 121004.

[8] DU W B, XIAO H, WANG X L, et al. Narrow-linewidth high power fiber laser with output power of 334 W in all-fiber MOPA format [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(8): 1996-1997 (in Chinese).

杜文博, 肖虎, 王小林, 等. 主振荡功率放大结构窄线宽全光纤激

光器 334 W 高功率输出 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(8): 1996-1997.

[9] LI J X, LI B, ZHU G Zh, et al. Study on cladding light strippers in high power fiber lasers [J]. Laser Technology, 2017, 41(6): 798-802 (in Chinese).

李杰雄, 李波, 朱广志, 等. 高功率光纤激光器的残留包层光滤除

研究[J]. 激光技术, 2017, 41(6): 798-802.

[10] WANF Y Sh, WANG J, CHANG Zh, et al. Output of 3.08 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber laser based on a simple MOPA structure [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(1): 011006 (in Chinese).

王岩山, 王珏, 常哲, 等. 基于简单 MOPA 结构实现 3.08 kW 全光

纤窄线宽线偏振激光输出 [J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(1): 011006.

[11] ZHANG L M, ZHOU Sh H, ZHAO H, et al. Output characteristics of kW master-oscillator power amplifier fiber laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(8): 1893-1896 (in Chinese).

张利明, 周寿恒, 赵鸿, 等. kW 级主振荡功率放大光纤激光器输

出特性 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(8): 1893-1896 (in Chinese).

- [12] ZHU Zh J, XUE J W, WANG Y K, *et al.* 1064 nm single-frequency fiber lasers based on MOPA structure [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(6):800-803 (in Chinese).
朱志坚, 薛竣文, 王玉珂, 等. 基于 MOPA 结构的 1064 nm 单频光纤激光器[J]. *激光技术*, 2019, 43(6):800-803.
- [13] ZHOU M W, REN S Y, ZHU Y Q, *et al.* Study on fused biconical taper broadband couplers [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(6):758-762 (in Chinese).
周梦薇, 任德源, 朱益清, 等. 熔锥型宽带光纤耦合器的研究[J]. *激光技术*, 2019, 43(6):758-762.
- [14] LI R Ch, ZHANG P, PANG L, *et al.* Fused biconical taper side-pumped fiber coupler [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(3):522-525 (in Chinese).
李瑞辰, 张鹏, 庞璐, 等. 熔锥型侧面泵浦耦合器的研究[J]. *应用光学*, 2011, 32(3):522-525.
- [15] YAO J Q, REN G J, ZHANG Q, *et al.* Yb doped double clad fiber laser and pump coupling technology [J]. *Laser Journal*, 2000, 27(5):17-19 (in Chinese).
姚建铨, 任广军, 张强, 等. 掺镱双包层光纤激光器及其泵浦耦合技术[J]. *激光杂志*, 2000, 27(5):17-19.
- [16] LONG R Z, ZHANG P, HUANG B C, *et al.* Research on large mode field high power pump coupler [J]. *Optical Communication Technology*, 2017, 41(5):42-44 (in Chinese).
龙润泽, 张鹏, 黄榜才, 等. 大模场高功率泵浦耦合器研究[J]. *光通信技术*, 2017, 41(5):42-44.
- [17] LONG R Z, ZHANG K, ZHANG L M. Research the reverse isolation of reverse optical fiber coupler [J]. *Laser Journal*, 2022, 43(1):70-73 (in Chinese).
龙润泽, 张昆, 张利明. 反向光纤耦合器反向隔离特性研究[J]. *激光杂志*, 2022, 43(1):70-73.
- [18] LI Zh G, SHI W J, HUANG Sh L. Analysis of connection loss and extinction ratio of polarization-maintaining fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(2):189-193 (in Chinese).
李志高, 石文江, 黄尚廉. 保偏光纤的连接损耗和消光比分析[J]. *光学学报*, 1996, 16(2):189-193.
- [19] ZHANG J Ch, FENG T S, JIN G F. Dependence of extinction ratio on birefringent axes rotation in polarization-maintaining fibers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, 10(3):286-288 (in Chinese).
张京城, 冯铁荪, 金国藩, 等. 保偏光纤双折射主轴的旋转对消光比的影响[J]. *光学学报*, 1990, 10(3):286-288.
- [20] XU H J, QIN B K, CHEN Sh F. Measurement for extinction ratio of fiber-optic polarizer [J]. *Optical Technique*, 2002, 28(5):419-426 (in Chinese).
徐宏杰, 秦秉坤, 陈淑芬. 光纤型偏振器消光比测试方法研究[J]. *光学技术*, 2002, 28(5):419-426.
- [21] TANG Z W, LOU Sh Q. Research on the dependence of coupling ratio for fused-tapered polarization maintaining fiber coupler [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3):759-764 (in Chinese).
唐尊伟, 娄淑琴. 熔融型保偏光纤耦合器分光比的依赖性研究[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3):759-764.
- [22] JIANG N, LI Zh Zh, YANG H Y, *et al.* Birefringence analysis of polarization maintaining fiber and research on characteristic of all-fiber beat-length experimental systems [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 32(7):0706003 (in Chinese).
姜暖, 李智忠, 杨华勇, 等. 保偏光纤双折射分析及全光纤拍长测试方法对比研究[J]. *物理学报*, 2012, 32(7):0706003.
- [23] YAN F P, WEI Y, FU Y J, *et al.* Study on the performance of stress area mismatched panda polarization-maintaining fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(1):321-327 (in Chinese).
延凤平, 卫延, 傅永军, 等. 熊猫型保偏光纤中应力区失配对光纤性能影响的研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(1):321-327.
- [24] LIAO S Y, GONG M L. New progress of large mode area fibers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3):455-462 (in Chinese).
廖素英, 巩马理. 大模场光纤研究的新进展[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(3):455-462.
- [25] ZHOU L, DUAN K L. Analyses of mode field propagation properties in fuse-tapered fibers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3):739-744 (in Chinese).
周良, 段开棕. 熔融光纤的模场传输特性分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3):739-744.