

文章编号: 0258-7025(2003)07-0597-04

双包层光纤抽运光的微型棱镜侧面 耦合的耦合效率分析

张春伟, 向世清, 王常安

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 微型棱镜侧面耦合方法是目前双包层光纤抽运光耦合的新方向之一, 提出一种新型的棱镜耦合方法, 并从理论上计算了该方案的耦合效率。采用几何光学方法分析了影响耦合效率的最主要因素——抽运光束相对于微型棱镜入射端面倾斜角度对耦合效率的影响情况; 通过数值计算, 证实这种棱镜耦合技术的耦合效率理论上可达到 90%, 是一种具有优化结构的棱镜侧面耦合方法。

关键词 光电子学; 双包层光纤; 微型棱镜侧面耦合; 激光二极管; 耦合效率

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Coupling Efficiency Analysis for the Micro-prism Sided-coupling Method of Double-cladding Fiber

ZHANG Chun-wei, XIANG Shi-qing, WANG Chang-an

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In this paper, the coupling efficiency in the micro-prism sided-coupling method of double-cladding fiber was calculated and analyzed. The results show that this inclination of the pumping light to the incident facet of the micro-prism is the factor that affects the coupling efficiency mostly, the coupling efficiency can be larger than 90% in theory.

Key words optoelectronics; double-cladding fiber; micro-prism sided coupling; laser diode (LD); coupling efficiency

1 引 言

目前, 双包层光纤激光器的抽运输出功率已达到几十瓦甚至 100 W^[1], 其波长范围可覆盖整个近红外区域, 使其在通信、材料处理等多方面有广泛的潜在应用。此类激光装置的抽运源一般是大功率激光二极管(LD)阵列, 因此将 LD 抽运光高效地耦合进双包层光纤成为决定激光器水平的技术关键。

双包层光纤由传输单模信号光的纤芯、传输抽运光的内包层以及聚合物外包层构成。抽运光在内包层中传输并逐渐被纤芯吸收, 内包层的数值孔径 NA 一般较大, 以便于抽运光的耦合。目前, LD 抽

运光的耦合技术主要有两种: 端面耦合技术^[2~5]和侧面 V 形槽技术^[6~8]。前者技术简单而且耦合效率高(>50%)。但由于只有两个端面能将抽运光注入光纤, 因此限制了能入射到光纤中的最大抽运光功率。另外, 因为耦合占用端面, 需要块状的分光镜将单模信号光和多模抽运光复用人射到双包层光纤的端面, 这样双包层光纤不能同其他光纤直接熔接, 会增加插入损耗(相比较而言, 光纤间的熔接损耗可以小于 0.05 dB)。侧面 V 形槽耦合技术克服了端面耦合技术的缺点, 并将光纤的端面解放出来。但由于 V 形槽的槽深只能小于内包层宽度的一半, 限

收稿日期: 2002-03-22; 收到修改稿日期: 2002-05-14

基金项目: 中国科学院一期创新基金支持项目。

作者简介: 张春伟(1973—), 男, 辽宁沈阳人, 中国科学院上海光学精密机械研究所硕士, 主要从事光通信相关的物理与技术研究, 现工作于中国专利局北京总部。

* 通信联系人。E-mail: sqxiang@mail.shcnc.ac.cn

制受光面积。因此,对于象大功率 LD 阵列这样光束半径较大的光源,耦合效率就会受限。同时,这一技术需要在光纤内包层上刻一深槽,造成光纤损伤,导致其机械强度减弱;另外 V 形槽制备工艺较难。为了克服现有耦合技术的缺点,我们提出了一种新的微型棱镜耦合技术,这种技术能将抽运光高效率耦合进双包层光纤,同时具有简易性等多方面的优势。其更大的优点还在于它适用于特殊形式的大功率光纤激光器,如碟形光纤激光器^[9]等。本技术的耦合点可以放在沿光纤长度的任何位置,构成多点抽运法。

2 理论分析

2.1 效率计算

微型棱镜耦合方案如图 1 所示,通过折射率匹配液把一微型直角棱镜的斜面放置在某一剥去外包层的双包层光纤上。直角棱镜的尺寸如图 2 所示,LD 发出的抽运光垂直入射到直角棱镜的直角面 σ_1 。考虑到光束的发散性(发散性引起的耦合损耗将在后面计算并给出要求),所有光线分两路入射到内包层,一路经直角面 σ_2 反射后到达内包层,另一路经棱镜直接入射到达内包层,这样抽运光被耦合到光纤内包层中并沿轴向传播。

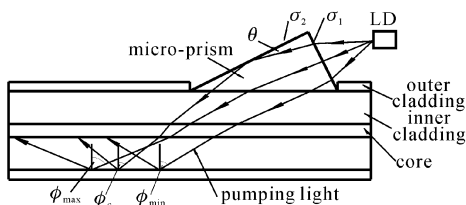


图 1 微型棱镜侧面耦合 LD 与双包层光纤的原理示意图
Fig. 1 Schematic for coupling LD pumping light into double-cladding fiber by micro-prism

我们选择正方形(通过匹配液也同样适用于圆形、梅花形)包层光纤,内包层横截面为 $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$,其折射率 $n_f = 1.45$,数值孔径 $\text{NA} = 0.6$,外包层折射率 1.32。因此,其临界全反射角

$$\phi_c = \cos^{-1} \left(\frac{0.6}{1.45} \right) = 65.5^\circ$$

为了实现棱镜/匹配液/内包层三者间折射率匹配,棱镜的材料选用科宁 7913 玻璃,其折射率正好为 1.45。对于直角三角形 π_1, π_2 中较小的锐角 α 选为 15° 。棱镜的抽运光入射端面 σ_1 为 $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ 。相应地,直角三角形斜边 L 的长度为 $960 \mu\text{m}$ 。

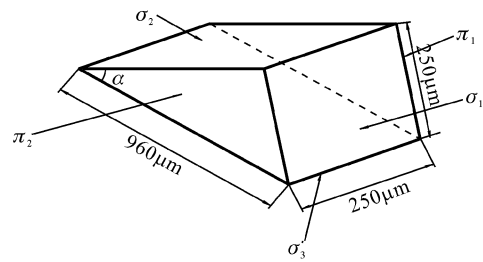


图 2 耦合棱镜几何示意图
(尺寸大小还可以根据具体情况稍做改变)

图中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为光学面

Fig. 2 Geometric of the micro-prism
(The scale may be changed in practice)

σ_1, σ_2 , and σ_3 are the optical facets

抽运光源为带尾纤的 LD 阵列,尾纤直径 $D = 250 \mu\text{m}$,数值孔径 $\text{NA} = 0.2$ 。将尾纤与 σ_1 面直接对准,当抽运光垂直入射到内外包层界面上,此时入射角 ϕ 最大, $\phi_{\max} = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 15^\circ = 75^\circ$ 。

当光束从尾纤中出射,以最大发散角 $\sin^{-1}(0.2)$ 入射到 σ_1 面上时,光束将直接入射到内外包层的界面上或者经过 σ_2 反射到内外包层的界面上,此时有最小入射角 ϕ_{\min} 。

当抽运光以 $\sin^{-1}(0.2)$ 的角度入射进棱镜后,其折射角就为 $\theta = 8^\circ$ 。因此由图 1 可以看出, $\phi_{\min} = 90^\circ - 15^\circ - \theta = 67^\circ$ 。

以上计算结果表明,当抽运光以 $0 \sim \sin^{-1}(0.2)$ 之间的角度入射时,光束在内外包层界面上的入射角 ϕ 在 $67^\circ \sim 75^\circ$ 之间,大于临界全反射角 ϕ_c 。因此,所有光束都能被限制在内包层中并沿光纤轴向传播。

由于棱镜/匹配液/内包层间的折射率差在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 之间,因此,三者间的界面反射率很小,可以忽略这些界面上的损耗。但在界面 σ_1 面上,由于空气和棱镜的折射率差较大,会产生一定的损耗,这可通过在 σ_1 表面镀 915 nm 波长的增透膜部分消除。另外,少部分光会被内外包层界面反射到 σ_2 面上,光线再次被反射到内外包层界面时,入射角 ϕ 已不再满足全反射条件而出射,这会形成大约为 3% 的损耗。考虑到以上所有损耗,总耦合效率可达 90% 以上。

2.2 入射光束相对于棱镜入射面倾斜对耦合效率的影响

2.2.1 入射光束在垂直于图 1 所在平面内发生倾斜
当入射光束在此方向上有倾斜时,由图 1 可看出,由于全反射临界角 $\phi_c = 65.5^\circ$,所以当入射角 θ_1

满足关系式 $\sin\theta_1 \leq 1.45\sin 24.5^\circ$, 即 $\theta_1 \leq 37^\circ$ 时, 入射的抽运光束全都被限制在内包层中, 所以可忽略光束在此方向上发生倾斜对耦合效率的影响。

2.2.2 入射光束在图 1 所在平面内发生倾斜

由图 1 易知, 当入射光线在图 1 所在面内相对于 σ_1 面的法线的倾斜角大于某角度 θ_c 时, 会有部分入射光束不能被限制在内包层中而形成出射光束, 从而降低了耦合效率。由于 $\phi_c = 65.5^\circ$, 所以 $\sin\theta_c = 1.45\sin(90^\circ - 15^\circ - 65.5^\circ)$, 即 $\theta_c = 13.9^\circ$ 。

同时, 由于 LD 阵列中的出射光束发散角为 $\sin^{-1}(0.2) = 11.5^\circ$, 所以当入射光束相对于 σ_1 面的法线的倾斜角 $\alpha = 13.9^\circ - 11.5^\circ = 2.4^\circ$ 时, 光束中会有部分光线不能被限制在内包层中, 形成损耗, 从而降低耦合效率。同时, 当入射光束相对于 σ_1 面的法线的倾斜角 $\alpha = 2.4^\circ + 2 \times 11.5^\circ = 25.4^\circ$ 时, 所有入射光束都不能被限制在内包层中, 此时耦合效率为零。

另外, 考虑到从 LD 尾纤中出射的光束随发散角的分布, 根据上面的讨论, 易得到光束相对于 σ_1 面的法线的倾斜对于耦合效率的影响。如图 3 中 A ~ D 曲线所示。

图 4 为 LD 尾纤输出光束光强相对于发散角的

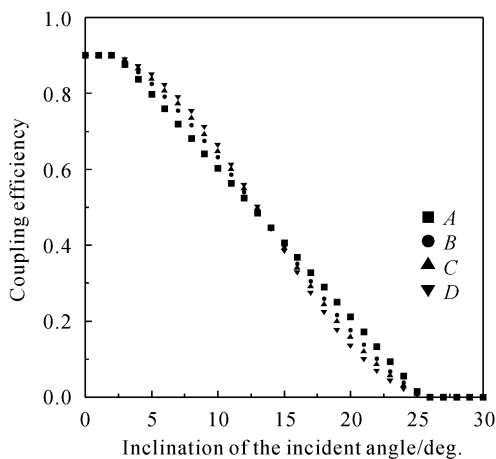


图 3 光束相对于 σ_1 面的法线的倾斜对于耦合效率的影响

其中曲线 A ~ D 分别为入射光束随发散角高斯分布 $y = \exp(-ax^2)$, $a = 0, a = 16, a = 25, a = 36$ 时光束倾斜角对耦合效率的影响

Fig. 3 Coupling efficiency vs inclination of the pumping beam

Curve A ~ D are the coupling efficiency affected by the inclination of the pumping beam when $a = 0, a = 16, a = 25, a = 36$, respectively

分布图。其中曲线 A ~ D 分别是高斯分布 $y = \exp(-ax^2)$ 中 $a = 0, a = 16, a = 25, a = 36$ 时的光强分布情况。

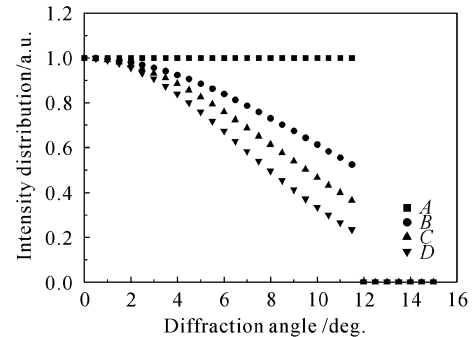


图 4 光强随光束发散角高斯分布 $y = \exp(-ax^2)$

其中曲线 A ~ D 分别是高斯分布 $y = \exp(-ax^2)$ 中 $a = 0, a = 16, a = 25, a = 36$ 时的光强分布情况

Fig. 4 Intensity vs Gaussian distribution of pumping beam [$y = \exp(-ax^2)$]

Curve A ~ D are the intensity distribution of the beam when $a = 0, a = 16, a = 25, a = 36$, respectively

从图 3 中不难看出, 在曲线 A ~ D 四种情况下, 当入射光束在垂直图 1 所在面内相对于 σ_1 面的法线的倾斜角小于 2.4° 时, 对耦合效率几乎不产生影响。当倾斜角增加到 5° 时, 耦合效率下降不到 10%。入射光束的高斯分布半宽越小, 在 $0^\circ \sim 13^\circ$ 范围内, 相同倾斜角对耦合效率的影响越小; 在 $13^\circ \sim 25.4^\circ$ 范围内, 相同倾斜角对耦合效率的影响越大。一般情况下, 由于入射光束相对于 σ_1 面的法线的倾斜角都小于 13° , 所以入射光束沿角度高斯分布的半宽度越小, 耦合效率越高。

3 结 论

通过上面的分析, 可得到以下结论: 微型棱镜耦合技术是一种耦合效率很高的光纤侧面耦合技术; 入射光束在垂直于图 1 所在平面内相对于 σ_1 面法线的倾斜角在很大范围内对耦合效率的影响为零, 因此在实际工作中可以不考虑它的影响; 在图 1 所在面内相对于 σ_1 面法线的倾斜角对耦合效率的影响随入射光束的角度分布改变而改变, 而且在 $0^\circ \sim 13^\circ$ 范围内, 入射光束的高斯分布半宽越小, 耦合效率越高; 另外, 在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 范围内光束倾斜对耦合效率的影响小于 10%。

参 考 文 献

- 1 V. Dominic, S. MacCormack, R. Waarts *et al.*. 110 W fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(14):1158~1160
- 2 T. Sandrock, H. Scheife, E. Heumann *et al.*. High-power continuous-wave upconversion fiber laser at room temperature [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11):808~810
- 3 H. Po, J. D. Cao, B. M. Laliberte *et al.*. High power neodymium-doped single transverse mode fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(17):1500~1501
- 4 H. M. Pask, J. L. Archambault, D. C. Hanna *et al.*. Operation of cladding-pumped Yb³⁺-doped silica fibre laser in 1 μm region [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(11):863~865
- 5 H. Zellmer, U. Willamowski, A. Tunnermann *et al.*. High-power cw neodymium-doped fiber laser operating at 9.2 W with high beam quality [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(6):578~580
- 6 D. J. Ripin, L. Goldberg. High efficiency side-coupling of light into optical fibres using imbedded v-grooves [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(25):2204~2205
- 7 L. Goldberg, J. P. Koplow, R. P. Moeller *et al.*. High-power superfluorescent source with a side-pumped Yb-doped double-cladding fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(13):1037~1039
- 8 L. Goldber, J. P. Koplow, Dahv A. V. Kliner. Highly efficient 4-W Yb-doped fiber amplifier pumped by a broad-stripe laser diode [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(10):673~675
- 9 Cheng Li, Jie Song, Nam Seong Kim *et al.*. Diode-pumped high-power fiber lasers and applications [C]. *SPIE*, 1999, **3862**:246~253

高功率激光物理国家实验室

由邓锡铭院士倡议建立的高功率激光物理国家实验室成立于1986年,是我国高功率激光技术与惯性约束聚变的实验基地。实验室拥有“神光-Ⅱ”高功率激光聚变实验装置,以及配套的测试诊断设备。现有固定科技人员120名,包括两院院士2名,研究员13名,副研究员和高级工程师25名,另有客座研究人员约80余名。

实验室主要从事高功率固体激光的研究和发展。早期建成的“神光-Ⅰ”装置,两路激光总输出为1.6 kJ(1 ns)。在“神光-Ⅰ”装置上进行的一系列激光打靶物理实验,取得了一批突出的科研成果。2002年12月,“神光-Ⅱ”装置通过了国家级验收,实现基频激光总输出6 kJ(1 ns)或10 TW(100 ps),并有3 kJ(1 ns)三倍频激光输出能力,成为我国激光聚变,X射线激光及激光等离子体相互作用等相关研究最重要的实验平台。“神光-Ⅱ”装置始建于20世纪90年代中期,由中国科学院、中国工程物理研究院、国家863高技术计划共同投资、共同建设、共同使用、共同管理。“神光-Ⅱ”装置是国内规模最大、国际上为数不多的高性能高功率钕玻璃激光装置,它是集中了当前国内最先进的光学、激光、精密机械以及计算机控制等系统为一体的综合性高科技工程项目。它的建成与投入运行,标志着我国在这一领域的综合研究能力上了一个新的台阶,对于解决人类未来能源及国家安全具有重要意义,对增强我国的综合国力必将产生重大影响。此外,实验室还进行包括超强超短脉冲激光在内的先进的高

功率激光单元技术的发展研究。

实验室在X射线激光、激光驱动强冲击波等领域,取得了国际一流的研究成果。在X射线激光中,发明了组合柱面镜均匀线聚焦技术,首创了双靶对接、多靶串接、空间限束等一系列实验方法,获得了近衍射极限类氪锆软X射线激光增益饱和输出;与日本大阪大学激光工程研究所合作,推广应用上述实验技术,成功获得世界上最高亮度短波长X射线激光,荣获国家科技进步奖。在材料状态方程研究中采用实验室独创的大光斑均匀照明技术,获得了平面性很好的强冲击波,并成功运用于物理实验中,取得了良好的实验结果。

实验室广泛地开展国内外交流合作。与客座研究人员合作进行的激光聚变实验中,聚变中子产额最高达到 4×10^9 ,为国际同类装置实验的先进水平;激光等离子体相互作用及X射线激光实验也都取得重要的研究成果。实验室与美、俄、英、德、法、加等国外同行广泛交流,并与日本大阪大学激光工程研究所建立了固定的合作关系。

多位党和国家领导人曾来实验室视察,并有诺贝尔奖获得者及众多国内外知名专家、学者来实验室参观访问。

十几年来,实验室荣获国家科技进步一、二、三等奖共4项,部委级特等奖1项,一、二等奖14项,以及首届陈嘉庚奖、胡刚复物理奖,并获专利30余项,发表论文700余篇。