

基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器

张祖兴 桑明煌 叶志清 况庆强 聂义友

(江西师范大学物理与通信电子学院 江西省光电子与通信重点实验室, 江西 南昌 330027)

摘要 多波长光纤激光器是未来波分复用光通信系统的理想光源, 提出和展示了一个基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器, 非线性偏振旋转诱导的强度相关非均匀损耗能有效地抑制均匀加宽增益介质掺铒光纤中的模式竞争, 从而使光纤激光器在室温下产生稳定的多波长输出, 实验实现了最多 18 个波长的多波长输出。另外, 此激光器没有使用传统的滤波器, 而是在激光腔内插入一段保偏光纤, 保偏光纤与偏振相关隔离器构成一等效 Lyot 双折射光纤周期性滤波器。利用这种在线型的双折射光纤滤波器简化了光纤激光器的结构, 使它更易于集成。还实验研究了多波长输出随抽运功率的演化, 发现抽运功率对多波长的均匀性影响很大。

关键词 导波与光纤光学; 多波长光纤激光器; 非线性偏振旋转; 掺铒光纤激光器

中图分类号 TN253 文献标识码 A

Multiwavelength Fiber Laser Based on Nonlinear Polarization Rotation

Zhang Zuxing Sang Minghuang Ye Zhiqing Kuang Qiqiang Nie Yiyou

(*Jiangxi Provincial Key Laboratory of Optoelectronics and Communications, College of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330027, China*)

Abstract Multiwavelength fiber laser is a perfect light source for future wavelength-division-multiplexing optical communication systems. A multiwavelength fiber laser based on nonlinear polarization rotation with up to 18 wavelengths has been proposed and demonstrated. The intensity- and wavelength-dependent loss induced by nonlinear polarization rotation effect is used to alleviate the mode competition in the homogeneous broadening gain medium of erbium-doped fiber. Instead of traditional filters, a polarization-maintaining fiber is inserted into the laser cavity, with which the polarization-dependent isolator composes an equivalent Lyot birefringent fiber filter. The in-line birefringence fiber filter is used to simplify the laser configuration, which benefits systematic integration. The effect of the 980 nm pump power on the multiwavelength generation is investigated. It is shown that the pump power contributes a lot to the evenness of the multiwavelength spectra due to the intensity dependence of nonlinear polarization rotation effect.

Key words guided-wave and fiber optics; multiwavelength fiber laser; nonlinear polarization rotation; erbium-doped fiber laser

1 引言

多波长光纤激光器是一类造价低、效率高的激光光源, 在诸如波分复用光通信系统、光纤传感、光器件性能测试和材料的色散测试等方面具有很大的应用潜力, 是近年来除锁模光纤激光器外的另一种引起人们极大关注的光纤激光器。将掺铒光纤浸泡在液氮(77 K)中来抑制其均匀加宽机理可以实现

多波长掺铒光纤激光器^[1,2], 但这种方法有很大局限性, 即不能工作在室温下。至今已经有多种方法使得光纤激光器能在室温下产生稳定多波长^[3~8]。

另一方面, 为了实现多波长输出通常需要在激光腔内插入周期性的多波长滤波器, 比如波长固定的法布里-珀罗(Fabry-Pérot)滤波器、波长可调谐的啁啾光纤光栅或取样光栅和双折射光纤环形镜

收稿日期: 2007-08-24; 收到修改稿日期: 2007-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(60644006)资助课题。

作者简介: 张祖兴(1975-), 男, 江西吉安人, 副教授, 博士, 主要从事光纤激光器和全光波长转换等方面的研究。

E-mail: jxnuzx@163.com

等^[9]。还有另外一种相对简单的滤波器,即 Lyot 双折射光纤滤波器,它结构简单,只由一个起偏器和一段高双折射光纤即可组成^[2]。而且它的波长间隔可以通过选择合适的双折射光纤长度来改变,它的波长可以通过改变偏振来精密调谐。

2 实验结构及原理

图 1 是基于非线性偏振旋转效应的多波长掺铒光纤激光器的实验示意图。环形激光腔中包括一段长 12 m、铒离子掺杂浓度为 $4.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$ 的掺铒光纤(EDF)作为增益介质,一个 980/1550 波分复用器(WDM)用来把 980 nm 抽运激光耦合进掺铒光纤,一个两端带尾纤的偏振相关隔离器(PDI)保证激光器单方向工作,同时还起到一个起偏器的作用,两个偏振控制器(PC)分别在偏振相关隔离器的两侧用来控制偏振态,还有一个 10 dB 耦合器,它的 10% 端口用于输出光信号,90% 光信号继续在腔内循环。如果没有了其他器件,这是一个典型的基于非线性偏振旋转的被动锁模光纤激光器结构。非线性偏振旋转被动锁模的基本原理是强度相关饱和吸收,即低强度光被吸收,而高强度光可以通过。但是,非线性偏振旋转效应本身是会饱和的,这就是说当光强大于某一临界值时,激光腔的传输率不是随着光强的增大而增大,而是随着光强的增大而减小,这里正是利用这种强度相关的损耗来实现稳定多波长产生的。不同于被动锁模光纤激光器,现在在激光腔内插入了一段较长的单模光纤(SMF),用来增大激光腔内非线性效应,另外还有一段保偏光纤(PMF),偏振相关隔离器和保偏光纤一起组成了一个在线型的周期性光纤滤波器。它的波长间隔由公式 $\Delta\lambda = \lambda^2 / (\Delta n L)$ 决定,其中 Δn 和 L 分别是保偏光

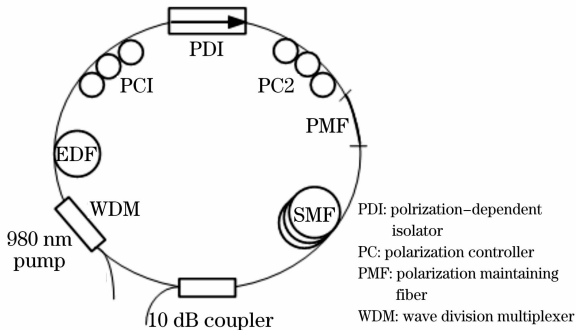


图 1 基于非线性偏振旋转多波长掺铒光纤激光器实验示意图

Fig. 1 Experimental setup of multiwavelength erbium-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation

纤的双折射和长度。此滤波器的结构示意图如图 2,它的传输为^[10]

$$|T|^2 = \cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 + \frac{1}{2} \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 \cos(\Delta\phi + \Delta\phi'), \quad (1)$$

式中 θ_1 是从偏振相关隔离器出来光的偏振方向 y 与保偏光纤竖直双折射轴 u 的夹角, θ_2 是偏振相关隔离器偏振取向与保偏光纤竖直双折射轴 u 的夹角。 $\Delta\phi$ 是由偏振控制器引入的沿保偏光纤两正交双折射轴 u 和 v 光分量的相位差。 $\Delta\phi'$ 是两正交偏振分量在保偏光纤中传输而产生的线性相移差,且 $\Delta\phi'$ 可表示为 $\Delta\phi' = 2\pi(1 - \Delta\lambda/\lambda)L/L_b$, 式中 λ 是光波长, $\Delta\lambda$ 是波长失谐, L_b 是双折射光纤拍长。从(1)式可以看出,双折射光纤滤波器传输是波长的周期性函数。

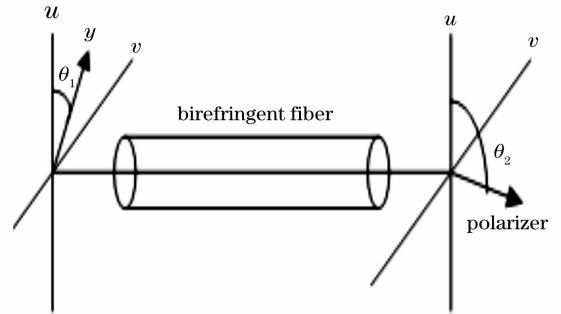


图 2 双折射光纤滤波器示意图

Fig. 2 Illustration of the equivalent Lyot birefringent fiber filter

基于非线性偏振旋转效应多波长光纤激光器的工作原理为:从偏振相关隔离器出来的线偏振光由于偏振控制器 PC2 的作用变为椭圆偏振光,椭圆偏振光可以看成是强度不等的左、右圆偏振光的叠加,通过单模光纤时由于光克尔效应强度不等的左、右圆偏振光会经历不等的非线性相移,因此合成的偏振态随着光的传播而旋转,并且旋转的角度与光强度有关。光再次到达偏振相关隔离器之前有另一个偏振控制器 PC1,调节 PC1 可以改变通过偏振相关隔离器的光强。故由偏振控制器、单模光纤、偏振控制器和起偏器构成的联合体能起到一个强度相关器件的作用。一般地,对于一个偏振控制器、单模光纤、偏振控制器和起偏器构成的联合体,其传输和光强的关系存在两个不同的区域。其一是传输随光强的增加而提高,被动锁模光纤激光器就是工作在这一区域。另外一个为传输随光强的增加而减小,即高强度光将经历更大损耗,这时联合体相当于一个功率均衡器。这种强度相关非均匀损耗可以用来克服均匀加宽介质中的模式竞争。所以,非线性偏振

旋转效应诱导的非均匀损耗和掺铒光纤模式竞争的平衡可以使得掺铒光纤激光器在室温下产生稳定的多波长输出。

3 实验结果与分析

实验中使用的保偏光纤长 11 m, 一卷单模光纤长 5 km, 抽运功率先固定在 170 mW。仔细调节激光腔内的两个偏振控制器, 可以观察到两类不同性质的输出光谱: 被动锁模和连续波多波长。当非线性偏振旋转效应诱导的传输随光强增大而增加时, 光纤激光器工作在被动锁模状态, 虽然此时输出光谱也呈现出多波长的特性, 但这种多波长与连续波多波长不同, 它是由于双折射光纤滤波器对锁模脉冲光谱的滤波而产生的^[11]。相反地, 当非线性偏振旋转效应诱导的传输随光强增大而减小时, 光纤激光器工作在连续多波长状态, 如图 3 所示是产生 14 个波长的输出光谱。环形激光腔内多波长的产生是非线性偏振旋转诱导的强度相关损耗对腔内模式竞争平衡的结果。按照激光振荡理论, 一个带有多个波长滤波器的环形激光器可以同时有多个波长满足振荡条件而起振, 但由于增益介质掺铒光纤的均匀加宽性质, 假如没有引入其他效应这多个波长激光间存在强烈的竞争, 因而很不稳定。现在此激光器内有非线性偏振旋转效应导致的强度相关损耗, 即如果自由振荡波长的激光功率大于非线性偏振旋转饱和功率, 它在激光腔内的损耗将随着功率的增大而加大, 这可以抑制腔内的自由模式竞争, 从而产生稳定多波长输出。

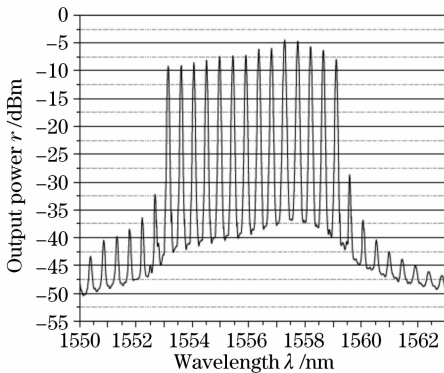


图 3 14 个波长输出

Fig. 3 Fourteen-line multiwavelength output

另外, 随着偏振控制器的不断调节产生的波长数不是固定的, 而是不断变化的。图 4 是 16 个波长产生的输出光谱, 图 5 是 18 个波长产生的输出光谱。比较图 3~5 可清楚看出, 它们产生多波长的波

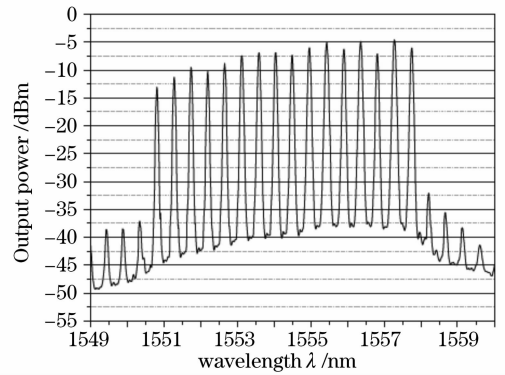


图 4 16 个波长输出

Fig. 4 Sixteen-line multiwavelength output

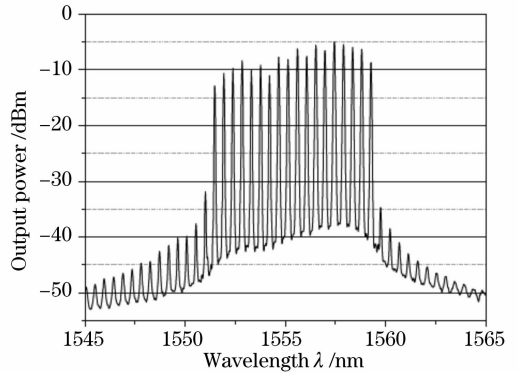


图 5 18 个波长输出

Fig. 5 Eighteen-line multiwavelength output

长位置也不同, 这说明产生不同数量多波长的可能原因是, 随着偏振控制器的调节, 激光腔总体损耗发生改变^[12], 以至于产生激光振荡的波长位置和波长个数都同时改变。多波长光谱波长间隔都是 0.45 nm, 这与根据公式 $\Delta\lambda = \lambda^2 / (\Delta n l)$ 计算的值一致(取 $l = 11$ m, $\Delta n = 4.8 \times 10^{-4}$)。多次扫描多波长输出光谱, 可以观察到基于非线性偏振旋转效应产生的多波长在波长和光功率上都有较好的稳定性。

为了验证非线性偏振旋转效应的光强度相关性, 和分析抽运功率对多波长输出光谱平坦性的影响, 在抽运功率为 170 mW 产生了 18 个波长后, 使偏振控制器保持不动, 逐步减小 980 nm 抽运功率并记录各抽运功率下相应输出光谱, 结果如图 6 所示。图 6(a) 为抽运功率为 145 mW 时的多波长光谱图, 和图 5 抽运功率是 170 mW 时的光谱比较, 光谱的平坦性变得更差。图 6(b)~图 6(d) 分别是抽运功率为 105 mW、65 mW、25 mW 时的多波长光谱图, 由此可见, 随着抽运功率的减小, 多波长光谱的平坦性变得越来越差, 各激光波长间的功率差越来越大。抽运功率越大, 激光腔内激光振荡功率就越大, 根据非线性偏振旋转效应诱导损耗的光功率

相关原理,它们受到的损耗也就越大,更能有效地平衡腔内自由模式竞争。特别是当抽运功率小于 25 mW 时,虽然输出光谱也有多波长样子,但此时的多波长激光输出功率极不均匀,且极不稳定。原因是此时激光腔内功率太小,非线性偏振旋转效应太弱,掺铒光纤均匀加宽导致的模式竞争仍占主导地位。将实验中测得的在不同抽运功率下输出多波长的最

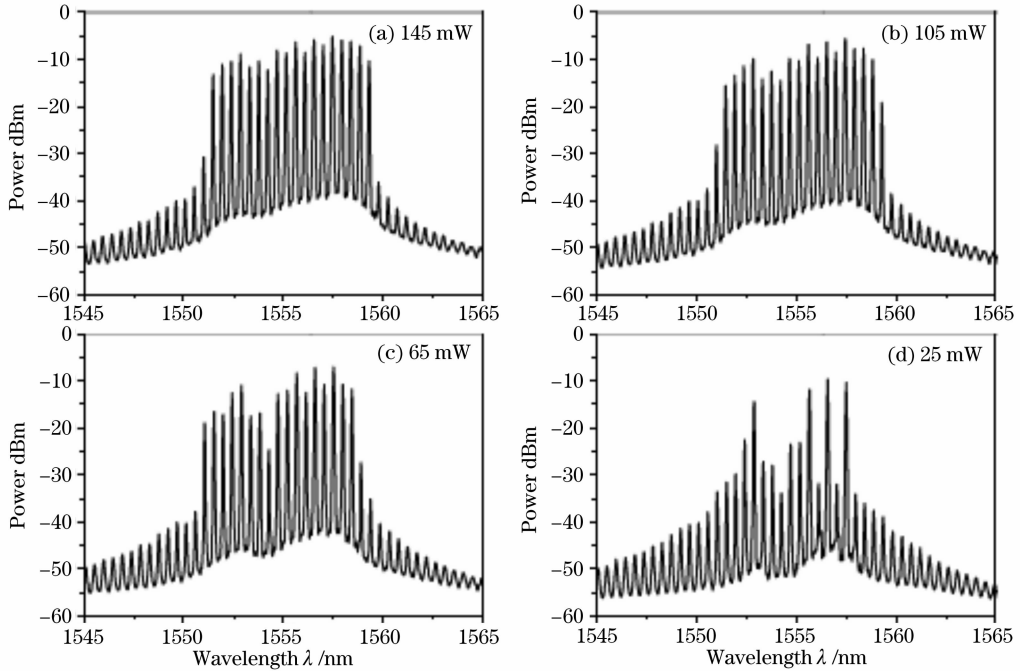


图 6 多波长输出光谱随抽运功率的变化

Fig. 6 Evolvement of multiwavelength spectra with the change of pump power

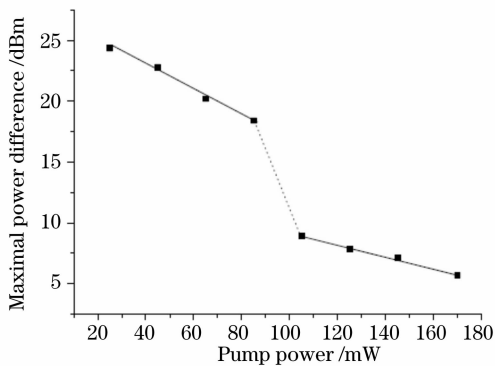


图 7 多波长谱最大功率差和抽运功率大小关系图

Fig. 7 Relation of the maximal power difference of multiwavelength spectra with pump power

4 结 论

提出和展示了一个基于非线性偏振旋转效应的多波长掺铒光纤激光器,实验研究表明非线性偏振旋转诱导的强度相关非均匀损耗能有效地抑制均匀加宽增益介质掺铒光纤中的模式竞争,在室温下实

大功率差绘制成与抽运功率大小的关系图,如图 7 所示。从图中可以看出,最大功率差在 100 mW 处有一个跳变,说明本实验中的激光器抽运功率大于 100 mW 时产生的多波长谱有较好的均匀性。需要指出的是这个值和激光器本身的结构有关,如激光腔内增益、损耗和所用单模光纤的长度等。

现了最多 18 个波长的多波长输出,同时还产生了 16、14 等不同数量的多波长。另外,本实验中使用的滤波器是在线型的双折射光纤周期性滤波器,简化了光纤激光器的结构,使光纤激光器更易于集成。还研究了抽运功率对多波长输出特性的影响,发现抽运功率对多波长的均匀性有很大影响。抽运功率越小,光强度相关非线性偏振旋转效应更弱,多波长光谱越不均匀。

参 考 文 献

- 1 J. Chow, G. Town, B. Eggleton *et al.*. Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(1): 60~62
- 2 N. Park, P. F. Wysocki. 24-line multiwavelength operation of erbium-doped fiber-ring laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(11): 1459~1461
- 3 Liu Yange, Feng Xinhuan, Dong Xiaoyi. Progress in room-temperature stable multi-wavelength fiber laser technologies[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(7): 883~894
- 刘艳格,冯新焕,董孝义. 室温稳定多波长光纤激光器技术的研究新进展[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 883~894
- 4 Sun Guoyong, Qu Ronghui, Yang Jing *et al.*. Study on stable

- multi-wavelength erbium-doped fiber laser at room temperature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 821~824
- 孙国勇, 瞿荣辉, 杨 敬 等. 室温下稳定的多波长掺铒光纤激光器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 821~824
- 5 Shan Qin, Yongbo Tang, Daru Chen. Multi-wavelength hybrid gain fiber ring laser based on Raman and erbium-doped fiber[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11): 652~654
- 6 Hu Song, Wei Shikang, Zhan Li *et al.*. 15-wavelength Brillouin erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 212~215
- 胡 松, 尉仕康, 詹 黎 等. 15 波长输出的布里渊掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 212~215
- 7 V. J. Matsas, T. P. Newson, D. J. Richardson *et al.*. Self starting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarization rotation [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15): 1391~1393
- 8 X. H. Feng, H. Y. Tam, P. K. A. Wai. Stable and uniform

- multiwavelength erbium-doped fiber laser using nonlinear polarization rotation[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(18): 8205~8210
- 9 Ying Gao, Daru Chen, Shiming Gao. Stable multi-wavelength erbium-doped fiber laser based on dispersion-shifted fiber and Sagnac loop filter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9): 519~521
- 10 W. S. Man, H. Y. Tam, M. S. Demokan *et al.*. Mechanism of intrinsic wavelength tuning and sideband asymmetry in a passively mode-locked soliton fiber ring laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(1): 28~33
- 11 Z. X. Zhang, L. Zhan, Y. X. Xia. Multiwavelength Comb generation in self-starting passively mode-locked fiber laser[J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2006, **48**(7): 1356~1358
- 12 He Hucheng, Yang Lingzhen, Wang Yuncai. C-band wavelength tunable erbium doped fiber laser with polarization control[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(7): 1597~1600
- 贺虎成, 杨玲珍, 王云才. 偏振控制 C 波段波长可调谐掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 1597~1600

《光学学报》、《中国激光》、*Chinese Optics Letters* 三刊联席编委会在沪召开

2008年3月20日,《光学学报》、《中国激光》、*Chinese Optics Letters* 三刊联席编委会在中科院上海光机所召开,三刊编委共72人参加了会议。

会议由上海光机所副所长邵建达研究员主持,朱健强所长致欢迎词,并向三刊编委们介绍了的上海光机所概况,并阐述了作为国内权威光学期刊主办单位对于如何办好期刊的一些思路和做法。中国光学学会理事长,《中国激光》主编周炳琨院士代表光学学会向与会编委介绍了中国光学学会近期的主要工作,并指出期刊工作一直是学会的一项重要工作,学会成立了专门的期刊管理机构,坚持严格的管理标准,培育了国内最优秀的几种光学期刊。周理事长对三刊编辑部的工作给予了很高的评价,并希望编委们的支持和帮助下,期刊坚持联合创新的方向,并开辟国际合作的天空。科技部副部长,《光学学报》主编曹健林用贺信形式对《光学学报》的工作加以肯定,并祝贺三刊联席编辑部成功召开。光学期刊联合编辑部主任杨蕾向编委们详细汇报了编辑部近几年来的工作情况,并介绍了三刊取得的成绩、提出了努力的方向。



周炳琨院士在三刊编委联席会议上发言



三刊编委集体合影

在分会场讨论议程中,编委们就期刊的现状和发展展开了热烈的讨论,纷纷提出自己的意见和建议,为刊物的发展出谋划策。编委们对上届编委会卓有成效的工作表示肯定和感谢。对三刊编辑部联合发展的做法给予了高度赞扬,希望三刊能保持自己的特色,重视品牌优势,在稿源和审稿方面多下功夫,并瞄准前沿学科,跟踪交叉专业,克服困难,加大国际合作的力度。

会议还对编委会章程进行了讨论和修改,并就光学期刊联合编辑部如何充分发挥编委的学术把关作用、各期刊如何更加明确定位,以及设置栏目、吸引稿源等议题进行了热烈地讨论,并形成一致的决议。编委们纷纷表示,将会一如既往地关心和支持期刊的发展,并相信在大家的共同努力下,中国的光学期刊一定会越办越好。