

用涨落模型解释有关主被动锁模 Nd:YAG 激光器的若干问题

何学东

(北京工业大学应用物理系, 北京 100022)

张世文

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

提 要

应用锁模理论的涨落模型分析研究了已报道的若干主被动锁模 Nd:YAG 激光器的实验现象。对锁模的阈值行为, 锁模几率随调制器调制功率的变化规律和系统的稳定性随可饱和吸收染料的相对浓度的变化规律等实验结果从理论上进行了比较成功的解释。

关键词 主被动锁模, 涨落模型。

1 引 言

纯被动及主被动锁模固体激光器早已被广泛地研究和应用。实现这种激光器(特别是在纯被动的情况下)的稳定输出一直是十分重要的课题。系统的不稳定性表现在当工作参数完全确定之后, 激光输出的各种参数仍是不确定的。New^[1]指出: 这种非稳定性的原因之一是在阈值附近由自发辐射产生的初始噪声尖峰的强度随机变化与分布, 是激光系统的本征非稳定性。

Letokhov^[2]首先提出了锁模的涨落模型以研究这种本征非稳定性。New 用这种方法较全面地处理了被动锁模 Nd:YAG 激光器的一些问题从而使人们大大加深了对被动锁模本征不稳定性的认识。Y. C. Yao 和 Z. G. Zhang^[3]在 New 的基础上研究主被动锁模的情况。在腔内对光场引入了调制器的作用, 提出调制器对初始噪声尖峰的随机分布具有重整化的效应。此结果从理论上阐明了调制器使得激光输出的稳定性得到极大改善的原因。Kortz^[4]从实验上对主被动锁模 YAG 激光器的一些问题进行了研究并较详细地报道了结果。

本文的目的在于应用文献[1, 3]的涨落模型解释文献[4]中的具体实验并处理了一些[1, 3]中未涉及的问题。文中给出的关于阈值行为的解析式使得其物理机制更加明了, 涨落模型也得到了实验验证。

2 应用涨落理论对实验结果的分析

2.1 锁模几率和阈值锐度

图1([4]中的图6(a))显示了当调制器的调制功率取不同值时, 锁模几率随泵浦能量变

化的实验结果 对于非常低的调制功率, 锁模阈值就变得十分尖锐(曲线变陡). 随着调制功率的增加, 此阈值要经过一个极小值.

New 把锁模与否的阈值行为定义为 ([1] 的 (19)式)

$$X = \frac{G_u B_u R U}{\Lambda + G_u} > X_0. \quad (1)$$

其中 B_u 是染料的小信号吸收系数, $G_u = A_u - B_u - \Gamma$, A_u 为增益介质的小信号增益系数, Γ 为腔内线性损耗, $\Lambda = \Gamma + B_u$, U 是系统特性常数, R 是一随机变量

$$R = \frac{\mu_1}{\mu}, \quad (2)$$

其中 μ_1 表示线性阶段初始噪声尖峰中最强尖峰

的归一化峰值, $\bar{\mu}$ 是所有尖峰的平均归一化峰值. X_0 是通过计算机模拟而确定的一个常数. New 从上千次计算机模拟中确定对于 YAG 激光器, X_0 的取值在 0.65~0.7 之间. 由 (1) 式可把锁模成功定义为 $X \geq X_0$, 把锁模失败定义为 $X < X_0$. 设 $P(X \geq X_0)$ 为锁模成功的几率, 下面首先推导 $P(X \geq X_0)$ 的表达式.

设 R 的变化区间的上限为 R_u , 则

$$\text{事件}(X \geq X_0) = \text{事件}(R_0 \leq R \leq R_u). \quad (3)$$

其中

$$R_0 = \frac{X_0}{B_u U f(G_u)} \quad (4)$$

$$f(G_u) = \frac{G_u}{\lambda + G_u}. \quad (5)$$

设 R 的分布密度函数为 $g(R)$, 则由 $P(X \geq X_0)$ 的定义和 (3) 式可得:

$$P(X \geq X_0) = \int_{R_0}^{R_u} g(R) dR. \quad (6)$$

由 (1) 和 (5) 可得:

$$X(G_u + \Delta G_u) \approx B_u U R \left[f(G_u) + \frac{\partial f}{\partial G_u} \Delta G_u \right]. \quad (7)$$

于是得

$$P[X(G_u + \Delta G_u) > X_0] = \int_{R'_0}^{R_u} g(R) dR \quad (8)$$

其中

$$R'_0 \approx \frac{X_0}{B_u U [f(G_u) + \Delta f(G_u)]}. \quad (9)$$

由 (5), (6), (8) 和 (9) 可得:

$$\begin{aligned} \Delta P(X \geq X_0) &= P[X(G_u + \Delta G_u) \geq X_0] - P[X(G_u) \geq X_0] \\ &\approx \bar{g}(R_0) \frac{X_0}{B_u U} \cdot \frac{\partial f}{\partial G_u} \cdot \frac{\Delta G_u}{f(G_u) \left[f(G_u) + \frac{\partial f}{\partial G_u} \Delta G_u \right]} \end{aligned} \quad (10)$$

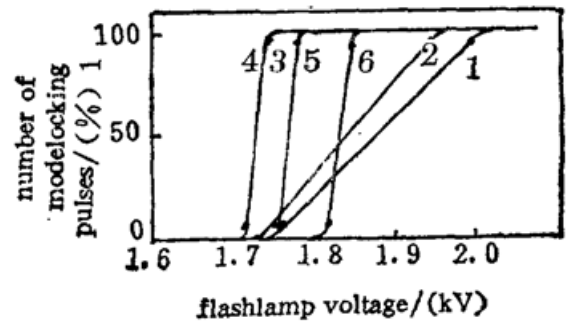


Fig. 1 Probability of mode-locking versus pumping voltage for different modulation powers (increasing from 1-6: 0, 0.4, 2.7, 8.4, 18.7, 22.2W) (After [4])

由(10)式立即可得:

$$\frac{\partial P(X \geq X_0)}{\partial G_u} = \bar{g}(R_0) \frac{X_0}{B_u U} \cdot \frac{1}{f(G_u)^2} \cdot \frac{\partial f}{\partial G_u} \tag{11}$$

将(5)式代入(11)式则可得

$$\frac{\partial P(X \geq X_0)}{\partial G_u} = \bar{g}(R_0) \frac{X_0}{B_u U} \cdot \frac{\Lambda}{G_u^2} \tag{12}$$

其中 $\bar{g}(R_0)$ 表示满足条件 $X \geq X_0$ 在 R_0 点邻域的 R 的平均分布密度函数.

设 δ 为调制器产生的峰值损耗, 显然 δ 正比于调制功率. 设 Γ 中不包含 δ 的效应, 则 $\frac{X_0 \Lambda}{B_u U G_u^2}$ 与 δ 无关. $\frac{\partial P(X \geq X_0)}{\partial G_u}$ 随 δ 的变化情况主要决定于 $\bar{g}(R_0)$. 为了研究 $\bar{g}(R_0)$ 随 R 及 δ 的变化情况, 按照如下方法进行计算机模拟.

首先根据([1]中的(47)式)

$$y = \frac{1}{b} [-\ln(1 - X_{01})]^{1/a}$$

产生 N 个随机数作为 N 个初始噪声尖峰的峰值强度. 其中 $a=1.21$, $b=0.60$, X_{01} 是 $(0, 1)$ 区间上均匀分布的随机数. 令这 N 个随机数为 $\mu_n(0)$ ($1 \leq n \leq N$), 再由文献 [3] 的(9)式*

$$\mu_n(k_{lin}) = \mu_n(0) \exp(G_u k_{lin}) \exp(-k_{lin} \delta \sin^2 \omega t_n), \tag{13}$$

可得线性阶段末的噪声尖峰强度分布. 选其中最大者令其为 μ_1 , $\bar{\mu} = \sigma^{1/2} \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n \tau}{\alpha T_{cav}}$ ([1]中(8)式), 再由(2)式可得到 R . τ , α 和 T_{cav} 的意义可见[1]. 选择一组 G_u , B_u 和 δ 进行 100 (或更多) 次模拟, 每一次模拟都得到一个 R , 若 $R \geq R_0$, 就将锁模成功的次数加一. 用 N_s 表示模拟中满足 $R \geq R_0$ 的次数, 令 R_l 表示其中最小的 R , R_r 表示其中最大的 R , 则可近似取 $\bar{g}(R_0)$ 为

$$\bar{g}(R_0) \approx \frac{N_s}{R_r - R_l} \tag{14}$$

图 2 给出了 G_u 取不同值时 $\bar{g}(R_0)$ 随 δ 的变化情况. 由图可知, 在 $\delta \geq 0$ 附近, $\bar{g}(R_0)$ 上升较快, 随着 δ 的增加, $\bar{g}(R_0)$ 的上升趋势逐渐停止, 然后缓慢地下降. 由(12)式可知这是图 1

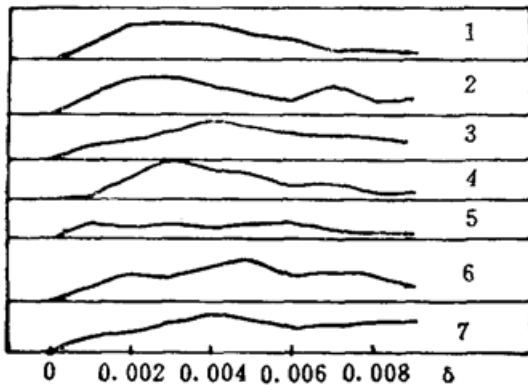


Fig. 2 $\bar{g}(R_0)$ versus modulation depth δ for different G_u (increasing from 1~7: $G_u \times 10^2 = 3.16, 3.38, 3.56, 3.72, 3.86, 4.0, 4.1$)

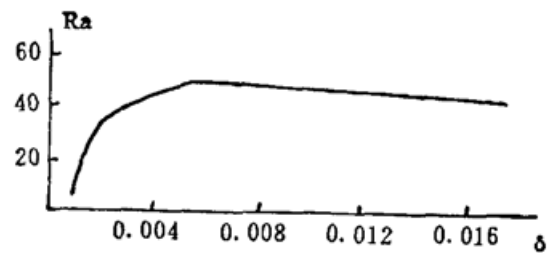


Fig. 3 R_a versus modulation depth δ

* 为了符号统一, 将原文中的 u_n 改写为 μ_n .

中现象的原因之一。

另外,文献[3]模拟的结果表明,在主被动的情况下 R 比纯被动情况下大. 设主被动情况下得到的 R 为 R_a , 纯被动情况下的为 R_p , 则可取 $R_a=30, R_p=5$. 设主被动情况下满足条件 $X \geq X_0$ 的 G_u 为 G_u^a , 被动情况下的为 G_u^p , 通常 $G_u \ll \Lambda$, 设主被动及被动情况下(1)式中 X 取相同值, 则有 $G_u^a R_a = G_u^p R_p$. 可得 $G_u^a = \frac{R_p}{R_a} G_u^p \ll G_u^p$. 由图 2 可知 $\bar{g}(R_0)$ 与 G_u 基本无关, 所以由(12)式可知 $\frac{\partial P(X \geq X_0)}{\partial G_u} \propto \frac{1}{G_u^2}$. 另外, 模拟的结果表明 R_a 随 δ 的变化规律类似于 $\bar{g}(R_0)$ (见图 3). 即可知 $R_a \gg R_p$ 和 R_a 随 δ 的变化规律是图 1 中现象的原因之二. 图 4 给出了 δ 取不同值时, N_s 随 G_u 的变化情况. N_s 可认为是(12)式对 G_u 的积分. 对比图 1 和图 4, 可知二者在一定范围内吻合较好. 其差别可能是由于调制器实际上对最强的尖峰也略有损耗, 而在理论模型中未考虑此因素.

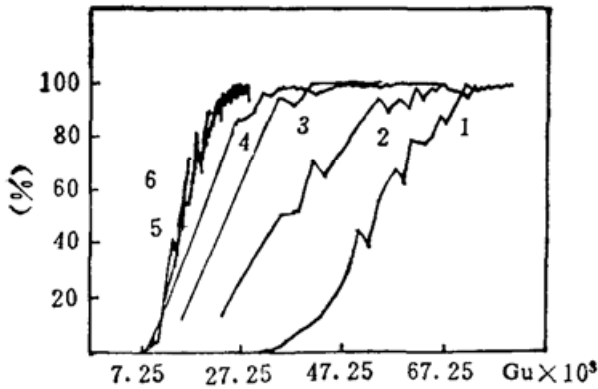


Fig. 4 Probability of mode-locking versus G_u for different modulation depth δ (increasing from 1~6: 0, 0.002, 0.004, 0.006, 0.01, 0.012)

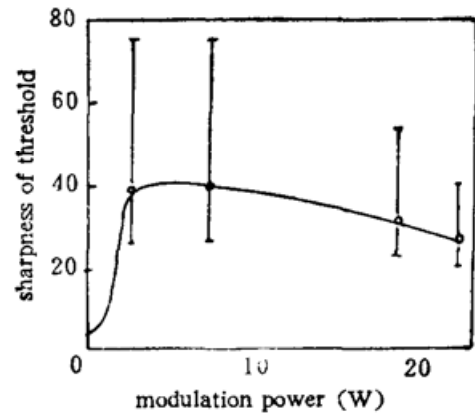


Fig. 5 Sharpness of the threshold versus modulation power. (After [4])

Kortz 定义了锁模阈值的锐度(Sharpness of the threshold)为([4]中(5)式)

$$S = \frac{dN(E_{50\%})}{dE} E_{50\%}. \tag{15}$$

图 5([4]的图 6(b))给出了 S 随调制功率变化情况的实验结果. (15)式中 N 表示锁模成功次数, $E_{50\%}$ 表示锁模几率为 50% 时的泵浦能量. 仿照(15)式, 本文把 S 定义为

$$S = \frac{\partial P(X \geq X_0)}{\partial G_u} \Big|_{G_u=G_u(50\%)} G_u(50\%) = \bar{g}(R_0) \frac{X_0}{B_u U} \frac{\Lambda}{G_u(50\%)}. \tag{16}$$

其中 $G_u(50\%)$ 表示锁模几率为 50% 时的小信号净增益系数.

略去(16)式中 G_u 的脚标(50%), 注意到几率保持为 50% 意味着 $\bar{g}(R_0)$ 为常数, 则可得

$$\frac{\partial S}{\partial \delta} = - \frac{X_0}{B_u U} \bar{g}(R_0) \frac{\Lambda}{G_u^2} \cdot \frac{\partial G_u}{\partial \delta} \tag{17}$$

图 3 表明, 当 δ 较小时主动调制器的“选择”作用随 δ 增加迅速变强. 增加 G_u 和 δ 都显著地增加锁模几率, 因此保持几率不变而增加 δ 意味着 G_u 减少. 因此 $\frac{\partial G_u}{\partial \delta} < 0$ 即 $\frac{\partial S}{\partial \delta} > 0$. 且这时 $\left| \frac{\partial G_u}{\partial \delta} \right|$ 也较大. 而当 δ 较大时, 随着 δ 的增加, “选择”作用趋于饱和, 甚至稍微有些变弱, 因此在几率不变的情况下, G_u 也基本保持不变或稍微增加, 即这时 $\frac{\partial G_u}{\partial \delta} \geq 0$ 或 $\frac{\partial S}{\partial \delta} \leq 0$. 图

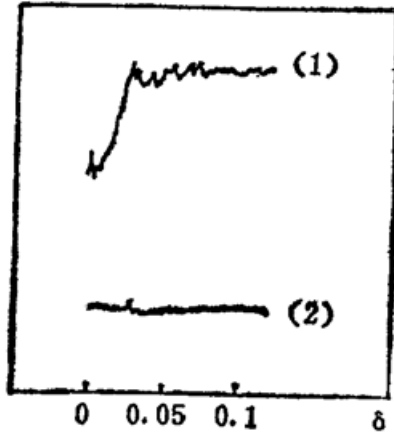


Fig. 6 (1) Sharpness of threshold and (2) probability of mode-locking versus modulation depth. Probability of mode-locking is about 50% in the figure

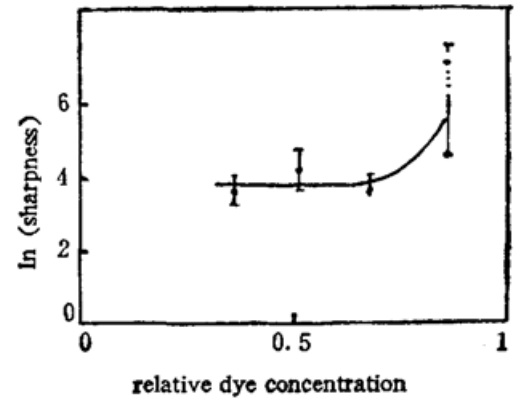


Fig. 7 Sharpness of threshold versus relative dye concentration (After [4])

6 中给出了根据(16)式用计算机模拟所得到的锐度随 δ 的变化曲线. 曲线(2)给出的锁模几率约为 50%. 对比图 5 和图 6. 二者在较大范围内吻合较好. 后部的差别可能还是由于理论模型中未考虑调制器对最大尖峰的损耗.

图 7([4]的图 7)给出了锐度随染料浓度的变化规律.

因为 R 与 B_u , G_u 无关. 所以若要 $X \geq X_0$ 的几率为 50% 恒为常数, 由(1)式可知应有 $\frac{B_u G_u}{\Delta + G_u} = \frac{1}{c}$, 其中 c 为常数. 由(16)式可知有

$$S = \bar{g}(R_0) \frac{X_0}{U} \left(c - \frac{1}{B_u} \right) \quad (18)$$

因为 B_u 变化时, $\bar{g}(R_0)$ 不变, 所以(18)式所表示的变化规律与图 7 显然不符. 若令 $G_u = A_u - B_u - I$ 代入(16)式, 即假设几率和 $\bar{g}(R_0)$ 不再是常数, 则可得 S 随 B_u 的变化如图 8 所示. 图中还给出了锁模几率. 图 7 和图 8 吻合较好.

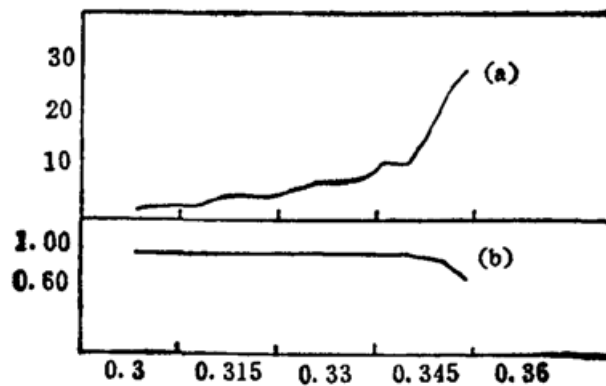


Fig. 8 (a) Sharpness of threshold and (b) probability of mode-locking versus dye concentration

2.2 稳定性

Kortz 提出了一个重要的现象“令人惊奇的是, 对于有无调制器的情况, 脉冲列能量的最佳稳定性在同一染料浓度上达到”. 对此问题可做如下分析. New 指出, 当系统的参数给

定之后, 随机量 R 和 r ($= \frac{\mu_1}{\mu_2}$, μ_2 是次大峰高度) 基本决定输出结果. New 提出用 X ($= \frac{G_u B_u U R}{G_u + A}$) 和 Y ($= \frac{G_u}{B_u}$) 来构成一个二维平面并认为此平面上存在实现锁模的最佳工作区. 根据 New 的结果可以认为: 既然所要考虑的不稳定性是由初始分布的随机性造成的, 而且 X 又是确定系统最佳工作点的座标之一, 则 R 对 X 的影响就应成为考虑的重点. 若 R 对 X 的影响最小, 则系统的稳定性应该最佳. 以上问题可归结为在约束条件 $X \geq X_0$ 上求 $\frac{\partial X}{\partial R}$ 关于 B_u 的极小值. 因

$$\frac{\partial}{\partial B_u} \left(\frac{\partial X}{\partial R} \right) = \frac{1}{A_u} (G_u - B_u) \quad (19)$$

且在最佳工作点附近总有 $G_u \ll B_u$. 所以 $\frac{\partial}{\partial B_u} \left(\frac{\partial X}{\partial R} \right) < 0$. 即 $\frac{\partial X}{\partial R}$ 关于 B_u 不存在极小值. 故只能由约束条件求 $\frac{\partial X}{\partial R}$ 取最小值时的 B_u . 在(1)式中代入 $G_u = A_u - B_u - \Gamma$, 并设主被动情况下 R 为 R_a , B_u 为 $B_{u,a}$, 被动情况下 R 为 R_p , B_u 为 $B_{u,p}$. 在(1)式中取右边部分并将大于号换为等号可得

$$\frac{B_{u,a} - B_{u,p}}{B_{u,a}} = \frac{\sqrt{1 - \frac{4A_u X_0}{UR_a(A_u - \Gamma)^2}} - \sqrt{1 - \frac{4A_u X_0}{UR_p(A_u - \Gamma)^2}}}{1 + \sqrt{1 - \frac{4A_u X_0}{UR_a(A_u - \Gamma)^2}}} \quad (20)$$

其中 $U = \frac{\rho_{ab} \sigma_b' T_{1b}}{\sigma_a' T_{cav}}$. 选一组对于 Nd:YAG 激光器较为典型的参数: $A_u = 0.82$, $\Gamma = 0.5$, $\sigma_b' = 8 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$, $\sigma_a' = 2.13 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, $T_{1b} = 10 \text{ ps}$, $T_{cav} = 6 \text{ ns}$, $R_a = 30$, $R_p = 5$, $X_0 = 0.65$, $\rho_{ab} = 1$. 则由(20)式可得 $\frac{B_{u,a} - B_{u,p}}{B_{u,a}} \approx 3.59\%$. 可见对于被动和主被动两种情况, 吸收染料的最佳浓度的相对变化是很小的. (比较[4]中图 11(a)所示现象).

3 结 论

以往的涨落理论对 Nd:YAG 主被动锁模激光器的统计特性进行了一般的概括性的描述. 而通过与实验结果相对比, 发现即使采用较一般的模型(环形腔), 涨落理论也能够很好地解释一些很重要的有关统计特性的实验现象. 理论分析和实验结果一致表明, 增加调制器功率对改善锁模的不稳定性仅在一定范围内有效, 超出一定范围后其作用趋于饱和. 用模耦合理论难以对此给出较直观的解释.

参 考 文 献

- [1] Geoffrey H. C. New, Theory of Passive Mode-Locking in Giant Pulse Lasers. *Proc. IEEE*, 1979, **67** (3): 380~396
- [2] V. S. Letokhov, Generation of ultrashort light pulses in a laser with a nonlinear absorber. *Sov. Phys. -JETP*, 1969, **28** (3): 562~568
- [3] Y. C. Yao, Z. G. Zhang, Fluctuation Mechanism and Statistical Characteristics of Active-Passive Mode-Locking in Giant Pulse Solid-State lasers, *Applied Physics B*, 1986, **40** (3): 157~164
- [4] H. Peter Korts, Characterization of Pulsed Nd:YAG Active/Passive Mode-Locked Laser, *IEEE J: Quantum Electron*, 1983, **QE-19** (4): 578~584

Application of fluctuation mechanism to some statistic problems of active-passive mode locking Nd:YAG laser

HE XUEDONG

(Department of Applied Physics, Beijing Polytechnic University Beijing 100022)

ZHANG SHIWEN

(North China Research Institute of Electro-Optics Beijing 100015)

(Received 15 July 1991; revised 28 October 1991)

Abstract

Some reported experimented results of the active-passive mode locking Nd:YAG laser are analysed with fluctuation model. The observed threshold performance and mode locking probability versus the driving power of modulator are explained. The relationship between the stability of the system and the dye concentration obtained experimentally is discussed. Theoretical study is in good agreement with the experiment.

Key words Active-passive mode locking, fluctuation mode of mode locking theory.

《光学学报》等三家光学期刊编委会联合召开工作会议

1992年9月27日~29日,《光学学报》等三本由中国科学院上海光学精密机械研究所主持承办的光学期刊联合在山东省曲阜师范大学召开工作会议。《光学学报》主编王润文研究员,副主编陈星旦研究员、郑家骝教授、汤星里研究员及编委成员和其它两刊的主编、副主编及编委成员,以及三本刊物的编辑部成员,科学出版社人员,共41人出席了会议。

会议由陈星旦研究员主持,分两段会程进行:1)三本刊物的编委会联席会,主要听取三本刊物编辑部负责人作编辑部的工作汇报和经验交流;2)各家编辑部分头进行工作研讨。

《光学学报》责任编辑李逸峰向会议作了题为“继续办好《光学学报》而努力”的工作汇报,全面总结了编辑部执行1990年在上海嘉定宾馆举行“《光学学报》《中国激光》主编、副主编工作会议”时拟定的工作计划情况。他说,《光学学报》编辑部在主编王润文研究员主持和编委成员大力支持下,历经两年多,已达到预期主要目标:1)坚持、认真收取论文出版版面费,同时从1992起申请到中国科学院出版基金部份资助,目前基本上做到收支平衡;2)实施微机排版(从1993年第一期起执行);3)缩短了论文的出版周期,一般为11个月左右。

与会的《光学学报》编委成员,就《光学学报》的栏目设置,学术研究论文与技术应用论文所占篇幅的比例关系,投稿与组稿出专辑等问题展开热烈讨论。此外,还就中国留英访问学者要求《光学学报》出专辑所投的稿件,编委们按各自专业选择、组织论文的评审。

与会的《光学学报》编委们认为,应每二年在适当时候召开一次类似内容的工作研讨会,以进一步提高《光学学报》的学术水平和刊物的印制质量。

(黎 风)