

电光成象系统动象的 MTF 衰减

向世明
(西安应用光学研究所)

提 要

根据时域线性系统理论, 讨论了电光成象系统在象作匀速运动和简谐振动两特定条件下之 MTF 衰减问题。结合一实验数据, 对常见的几种匀速动象 MTF 公式, 进行了对比分析。

关于电光成象系统的动象 MTF 问题, 已有不少文献介绍。但有些说法不一, 公式各异。在工作实践中, 对常见的几种匀速动象 MTF 公式^[1, 5, 6], 通过一实测数据^[7], 进行了对比分析。结果发现, 有些公式误差较大, 反常情况甚多。为此, 作者根据时域线性系统频谱分析理论, 探讨了惰性电光成象系统在象作匀速运动和简谐振动两特定情况下的线扩展函数及其频谱, 并通过简单的时-空转换关系, 推导出相应的空域动象 MTF 衰减因子公式。

一、匀速象动下, 系统的 MTF 衰减因子 $\sigma_u(N)$

1. 前提

本文主要涉及的是含氧化铅摄像管、硅靶摄像管、电子轰击硅靶摄像管以及增强器等器件的电光成象系统。根据这些系统的特点, 在应用线性系统理论时, 假定它们满足线性和时间、空间不变性要求。此外, 为便于讨论变速象动(如简谐振动)之 MTF 问题, 可假定它们还具有时-空交叉可变性。这一条件意味着变速象动下的等晕区可以缩小到一个很小的区域, 只需用加权平均法, 即可估计它们对整个区域的影响。

一般的电光成象系统通常都辅之以机械的、光学的或电气的补偿手段, 使其光电转换特性在一个很宽的动态范围($10^{-2} \sim 10^4$ Lux)内, 保持为线性; 而在象动条件下, 只要象动速度不是过份的大, 那么, 一般不会由于在某一瞬间动象在输入面的单位面积上掠过的时间过长或过短, 而使输入照度值超出线性动态范围之外。因而, 假定它们在动象下仍为线性系统, 自然是合理的。

2. 理论依据

和一般文献处理象动 MTF 问题的方法有所不同, 本文采用了如图 1 所示的另一种思路, 来推导动象 MTF 衰减因子 $\sigma(N)$ 。

惰性电光成象器件的时域光电响应一般近似服从指数衰减规律, 即

$$\left. \begin{aligned} I_{前沿}(t) &= I_0 [1 - \exp(-t/\tau_r)], \\ I_{后沿}(t) &= I_0 \exp(-t/\tau_f), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

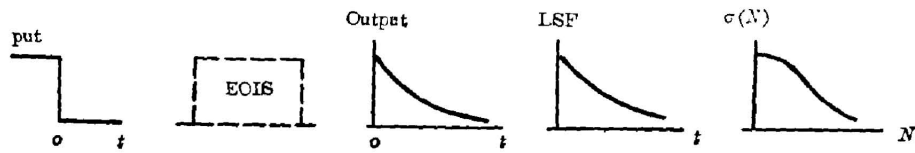


图 1 $\sigma(N)$ 推导过程示意图

Fig. 1 Illustration of derivation process of $\sigma(N)$

式中, I_0 为初始光电信号值; $I_{\text{前沿}}(t)$ 和 $I_{\text{后沿}}(t)$ 分别为光信号接通(对前沿)或切断(对后沿)后 t 时刻的光电信号残留值; τ_r 和 τ_f 分别为器件滞后之前沿和后沿时间常数。通常, $\tau_f \gg \tau_r$, 故以下只考虑 τ_f 。为简单计, 用 τ 表示之。

按照时域线性系统理论^[3], 系统的线扩展函数 (LSF) $h(t)$, 应是对点脉冲输入的脉冲响应函数。但从物理意义上讲, 这种时域理想几何点光脉冲无法使电光成象器件之光生载流子数目达到与该光脉冲强度相应的动态平衡值上。此外, 考虑到实际器件, 一般 $\tau_f \gg \tau_r$, 故在实际测量中, 总是用足够宽度 ($T \gg \tau_r$) 的光脉冲照射后, 研究其滞后响应。所以, 我们不妨把这种滞后响应理解为系统对一负阶跃光脉冲输入的时间响应函数 $R(t)$ 。即对输入之负阶跃光脉冲

$$U(t) = \begin{cases} 1 & (\text{对 } t < 0) \\ 0 & (\text{对 } t > 0) \end{cases}$$

系统之时间响应函数

$$R(t) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t-t_0)h(t_0) dt_0 = \int_t^{\infty} h(t_0) dt_0$$

由此, 得系统之时域线扩展函数(或脉冲响应函数)为

$$h(t) = -\frac{d}{dt} R(t) \tag{2}$$

于是, 其频谱或 MTF 衰减因子

$$\sigma(\nu) = \left| \frac{\int_{-\infty}^{\infty} h(t)\exp(-2\pi i\nu t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt} \right| \tag{3}$$

式中, ν 是时间频率(Hz)。

令象动速度为 v (mm/sec), 空间频率为 N (line pair/mm), 则有

$$\nu = v \cdot N \tag{4}$$

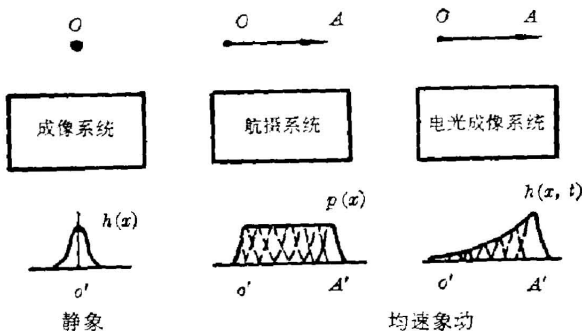


图 2 匀速象动示意图

Fig. 2 Illustration of $h(x, t)$ for $x=vt$

据此, 即可将时域 $\sigma(\nu)$ 转换为空域 $\sigma(N)$ 。

3. $\sigma_v(N)$ 表达式

匀速象动线扩展函数 $h(x, t)$ 形成过程如图 2 所示。设象点以匀速 v 沿象面 x 轴、经时间 t , 由 O 点运动到 A 点, 且令 v 不是太快, 使移动着的象点有足够时间掠过被考察区域 Δx , 以确保成象器件在该区域内之光电响应达到与输入光照度成比例的相应值上。

对于以照相底版为接收器的摄影系统, 动象线扩展函数有如图 2 $p(x)$ 所示的矩形脉冲形式, 其空间频谱为^[2]:

$$M_u(N) = \sin \pi N v t / \pi N v \tau. \quad (5)$$

但是, 对有惰性的电光成象系统, 随着象点匀速掠过象面, 相继在各 Δx 区域内产生恒定的初始光电信号 I_0 ; 象点过后, 又各自按同一指数规律随时间衰减。这样, 在 t 时刻的线扩展函数时-空分布不再是矩形脉冲 $p(x)$, 而是 $h(x, t)$ 。

设 $h(x, t)$ 为可预分离变量, 即 $h(x, t) = h(x) \cdot h(t)$, 式中, $h(x)$ 是仅由系统象差和孔径衍射效应决定的静象线扩展函数。

根据 (1)~(4) 式不难求得匀速象动下, 有惰性电光成象系统的时域线扩展函数 $h_u(t)$ 及其频谱 $\sigma_u(\nu)$, 以及反映在空间频率域上的 MTF 衰减因子 $\sigma_u(N)$ 分别为:

$$h_u(t) = \frac{I_0}{\tau} \exp(-t/\tau), \quad \sigma_u(\nu) = 1/\sqrt{1+(2\pi\nu\tau)^2}, \quad \sigma_u(N) = 1/\sqrt{1+(2\pi N v \tau)^2}. \quad (6)$$

考虑到静象 MTF 的 $H_0(N)$, 则系统总的 MTF 为:

$$H_s(N) = H_0(N) \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi v \tau N)^2}}. \quad (7)$$

4. 几种 $\sigma_u(N)$ 表达式的比较

关于有惰性电光成象系统匀速象动之 $\sigma_u(N)$, 包括本文 (6) 式在内, 常见有四种公式^[1,5,6]。我们利用一组实验数据^[7], 仔细比较分析了它们的有效性, 结果见表 1。

表 1 四种数理模型理论值的比较

Table 1 The comparison of theoretical data from four models

N	(TVL)	100	200	300	400	500	600	700	800	备 注
	(lp/mm)	5	10	15	20	25	30	35	40	
$H_s(N)$ 实测值		0.86	0.68	0.46	0.31	0.22	0.16	0.10	0.07	$v=0.33 \text{ mm/sec}, \tau=20 \text{ ms}$
本 文	理论值	0.89	0.70	0.49	0.32	0.20	0.13	0.08	0.04	理论计算式 $H_s(N) = H_0(N) \sigma_u(N)$
(9) 式	误差 (Δ)	+0.03	+0.02	+0.03	+0.01	-0.02	-0.03	-0.02	-0.03	平均 0.024, $\Delta = H_s(N)_{\text{理}} - H_s(N)_{\text{实}}$
文 献	理论值	0.80	0.44	0.12	-0.05	-0.06	-0.03	-0.01	+0.01	
[1]	误差 (Δ)	-0.09	-0.24	-0.34	×	×	×	×	-0.03	平均 0.167, × 代表反常值无意义
文 献	理论值	0.01	-0.92	-0.43	-0.31	-0.18	-0.15	-0.12	-0.05	
[5]	误差 (Δ)	-0.81	×	×	×	×	×	×	×	无意义
文 献	理论值	1.30	0.68	0.36	0.25	0.16	0.06	0.04	0.01	
[6]	误差 (Δ)	×	0	-0.13	-0.06	-0.06	-0.10	-0.06	-0.06	平均 0.087

由表可见: 本文中 (6) 式与实际符合较好, 且无 $\sigma_u(N) > 1$ 或 < 0 等反常情况。这说明本文推导 $\sigma_u(N)$ 所依据的前提、思路和方法基本上是可行的。

文献 [6] 的 $\sigma_u(N)$ 表达式之精度尚可, 但出现有 $\sigma_u(N) > 1$ 异常情况。这也许是由于该表达式中有周期函数 $\sin \pi N v T$ 所致。

文献 [1] 的 $\sigma_u(N)$ 表达式之误差甚大。原因是不能用照相底版的 $M_u(N)$ [本文 (5) 式] 来代替电光成象器件的 $\sigma_u(N)$ 。因为两者的时间响应机理是有差别的。

文献 [5] 的 $\sigma_v(N)$ 表达式之精度更差, 反常情况更多。其根源可能在于, 不能把一帧图象作为一个整体来分析其衰减特性及其影响。因为实际视频信号是逐行、逐点拾取和随时间衰减的。

另外, 对象速较快、滞后较大的实验数据的验证结果表明, 上述后三种公式的误差更大。

二、象简谐振动下, 系统的 MTF 衰减因子 $\sigma_v(N)$

分析象简谐振动下之系统象质模糊的物理过程, 不难想见, 其时-空域线扩展函数可预分离变量处理为三部分, 即 $h(x, t) = h_0(x) \cdot L(x) \cdot h_v(t)$, 其中, $h_0(x)$ 为系统静象下之线扩展函数; $L(x)$ 为谐振点象本身的线扩展函数; $h_v(t)$ 为由器件滞后特性引起的时域线扩展函数。 $h_v(t)$ 之物理意义是: 象点谐振过程中, 在电光成象器件输入面 x 轴各点上, 激发出与输入光照度成比例的光电信号; 振动象点暂时移开后, 又各自按同一指数式规律, 随时间衰减。这样, 在给定 x_1 位置处之总光电信号, 必然是该位置上若干个“新”、“老”光电信号线性叠加的结果。根据时域上的线性系统理论, 它必然有其特有的线扩展函数 $h_v(t)$ 及频谱 $\sigma_v(\nu)$ 。

设输入至 x_1 点之光照度为 $L(x_1)$, 器件光电转换比例系数为 α , 则 t 时刻、 x_1 位置处之“新”信号为 $\alpha L(x_1)$; 同一周期(T)内之“老”信号残留值为 $\alpha L(x_1) \exp\{-[\alpha(T/4) + t/\tau]\}$, 它是振动点象从 x_1 右侧途经 x_1 点时产生的光电信号, 经过 $2[(T/4) + t]$ 时间衰减后, 在 x_1 点残留下来的剩余信号。于是, 同一周期“新”、“老”信号的合成值为

$$I_m = \alpha L(x_1) \left\{ 1 + \exp\left[-\frac{2}{\tau}\left(\frac{T}{4} + t\right)\right] \right\}。$$

同理, 前一周期同类信号 I_m 在该处之剩余信号为 $I_{m-1} = I_m \exp(-T/\tau)$; 前 n 周期同类信号在该处之剩余信号为 $I_{m-n} = I_m \exp[-n(T/\tau)]$ 。所以, 总合成信号为

$$S(t) = \alpha L(x_1) \left\{ 1 + \exp\left[-\frac{2}{\tau}\left(\frac{T}{4} + t\right)\right] \right\} \sum_{n=1}^{\infty} \exp[-n(T/\tau)]。$$

令 $b = \exp(-T/2\tau)$, $c = \alpha L(x_1) \sum_{n=0}^{\infty} \exp[-n(T/\tau)]$ 。因为它们与 t 无关, 故均设为常数。于是上式简化为

$$S(t) = c + bc \exp(-2t/\tau)。 \quad (8)$$

这就是点象谐振条件下, 电光成象系统对负阶跃光脉冲输入的时间响应函数。由 (2) 式, 即可求得其时域线扩展函数

$$h_v(t) = (2bc/\tau) \exp(-2t/\tau) = A \exp(-2t/\tau), \quad (9)$$

对 (9) 式进行傅里叶变换, 归一化, 取模值, 并考虑到简谐振动下, $\nu = N\dot{x} = N 2\pi f a \cos \varphi$, $\varphi = 2\pi f t$, 则得

$$\sigma_v(N, \varphi) = \left| \frac{\int_{-\infty}^{\infty} h_v(t) \exp(-2\pi i \nu t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h_v(t) dt} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \pi^2 \tau^2 (2\pi f a N \cos \varphi)^2}}, \quad (10)$$

式中, a 为谐振振幅(mm); f 为谐振频率(Hz)。由 (10) 式可见, $\sigma_v(N, \varphi)$ 是空间频率 N 和谐振时点象偏离平衡位置位相角 φ 的函数。为求得 $\sigma_v(N)$, 可仿照求光学系统多色传递函数的处理方法。为此, 改写 (10) 式为

$$\sigma_v(N, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi^2 \tau a f)^2 N^2 (1 - \sin^2 \varphi)}} = \frac{1}{Q} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}, \quad (11)$$

式中

$$Q = \sqrt{1 + (2\pi^2 \tau a f N)^2}, \quad k = \frac{2\pi^2 \tau a f N}{\sqrt{1 + (2\pi^2 \tau a f N)^2}}. \quad (12)$$

于是, $\sigma_v(N, \varphi)$ 在 $0 \sim \pi/2$ 内之加权平均值

$$\sigma_v(N) = \frac{\int_0^{\pi/2} \sigma_v(N, \varphi) d\varphi}{\int_0^{\pi/2} d\varphi} = \frac{2}{\pi Q} \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} = \frac{2}{\pi Q} I_k, \quad (13)$$

其中, I_k 正好是完全椭圆积分^[3]。由 (12) 式可知, $k < 1$, 因而 I_k 收敛于级数

$$I_k = \frac{\pi}{2} \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right) k^4 + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right) k^6 + \dots \right] = \frac{\pi}{2} [1 + \Phi(k)], \quad (14)$$

在数学手册中, 均有 $I_k \sim k$ 数值表。为工程应用方便计, 我们据此绘制了 $\Phi(k)$ 曲线, 见图 3。

将 (12)、(14) 式代入 (13) 式, 得象谐振下, 电光成像系统的空域 MTF 衰减因子

$$\sigma_v(N) = \frac{1 + \Phi(k)}{\sqrt{1 + (2\pi^2 \tau a f)^2 N^2}}. \quad (15)$$

计算时, 根据给定条件 a 、 f 、 τ 和 N , 由 (12) 式先确定 k , 并从图 3 查得相应之 $\Phi(k)$; 最后代入 (15) 式, 即可求得 $\sigma_v(N)$ 。

考虑到系统静象 MTF 的 $H_0(N)$; 以及谐振点象本身的 MTF 衰减因子 $M_v(N) = 2 \int_0^\infty L(x) \cos 2\pi N x dx = J_0(2\pi N a)^{[3]}$, J_0 是零阶贝塞尔函数。于是, 得电光成像系统象谐振下之总 MTF 表达式为

$$H_s(N) = H_0(N) J_0(2\pi N a) \cdot \frac{1 + \Phi(k)}{\sqrt{1 + (2\pi^2 \tau a f)^2 N^2}}. \quad (16)$$

(16) 式之物理意义是很明确的:

(1) 若 $a=0$ (无振动), 则 $J_0(2\pi N \cdot 0) = 1$; $\sigma_v(N) = 1$, 所以, $H_s(N) = H_0(N)$, 即等于通常的静象 MTF。

(2) 若 $\tau=0$ (无情性或如照相底版那样能将输入光照度空间分布永久记录下来时),

$$H_s(N) = H_0(N) J_0(2\pi N a). \quad (17)$$

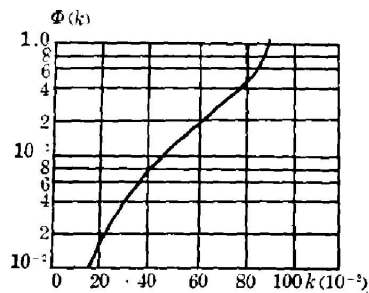


图 3 $\Phi(k)$ 函数曲线

Fig. 3 $\Phi(k)$ curve as a function of k

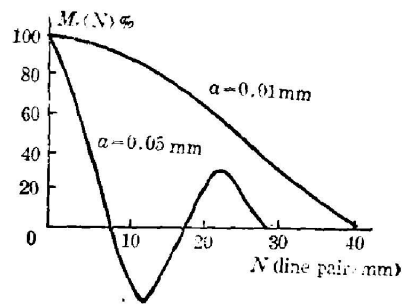


图 4 $M_v(N) = J_0(2\pi N a)$ 曲线

Fig. 4 $M_v(N) = J_0(2\pi N a)$ curves

这就是人们通常所用的象谱振下, 摄影系统的总 MTF 公式。

(3) 若 $a \neq 0$, $\tau \neq 0$, 即是电光成象系统象谱振下之总 MTF 公式。可见, 在一定条件下, a 或 f 或 τ 值愈大, 则象振动对系统 MTF 之衰减作用愈甚。正因为如此, 人们在进行电光成象系统总体结构设计时, 不得不对“稳象”或“减振”措施作认真考虑, 否则, 即使静象 OTF 设计得再好, 也将“毁于一振”之中。

为说明以上象谱振对最终象质的影响程度, 我们结合几组特定条件, 计算并绘制了 $M_r(N)$ 、 $\sigma_r(N)$ 及 $H_s(N)$ 曲线, 分别如图 4、图 5 和图 6 所示。

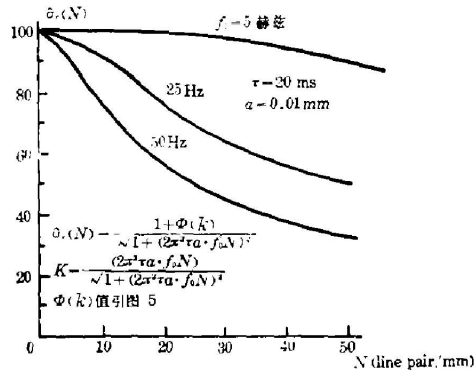


图 5 $\sigma_r(N)$ 函数曲线

Fig. 5 $\sigma_r(N)$ function curves

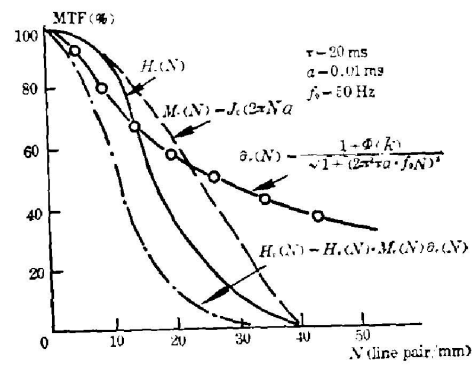


图 6 $M_r(N)$ 和 $\sigma_r(N)$ 及其对 $H_s(N)$ 之影响

Fig. 6 $M_r(N)$ and $\sigma_r(N)$ and their effect on $H_s(N)$

参 考 文 献

- [1] S. Nudelman: «Advances in Electronics and Electron Physics», Vol. 40B Academic Press, New York and London, 1976.
- [2] 麦伟麟: «光学传递函数及其数理基础», (国防工业出版社, 1979), 305~308.
- [3] D. C. Chanteny: «Fourier Transforms and Their Physical Applications», (Academic Press London & New York, 1973), 94~95.
- [4] 恒岗卓二, 桥爪义明: «昭和 45 年电气学会连合大会: 讲演论文集», (日)(电气学会; 电子通信学会, 照明学会 1970), 4986.
- [5] RCA Defense Electronic Products Department of the Navy/Naval Electronic systems command; «AD 859271», 1969, 95~97, §4.2.3.
- [6] L. Levi; «Applied Optics-A Guide To Optical System Design», (John Wiley and sons, New York 1980), Vol. 2 726~727.
- [7] M. Green, A.B. Laponsky et al.; «Electro-Optical Systems Design Conference-1972», (Industrial and Scientific Conference Management, Inc. New York, 1972), 205~206.
- [8] 四川矿业学院数学教研组增订; «数学手册», (煤炭工业出版社 1976), 461.

MTF deterioration by image motion in electro-optical imaging system

XIANG SHIMING

(Xian Institute of Applied Optics)

(Received 6 May 1982, revised 21 March 1983)

Abstract

According to the linear system theory in the time domain, this paper discusses some problems of MTF deterioration caused by image motion under two special conditions, constant velocity linear motion and harmonic vibration. Referring to a set of experimental data, some analyses have been made for the efficiency of the MTF deterioration coefficient relation and compared with the other ones in some literatures under the condition of the linear image motion.

'83 国际激光会议在广州圆满结束

由中国光学学会主办的 '83 国际激光会议于 1983 年 9 月 6 日至 9 日, 在我国广州白天鹅宾馆进行。会议由大会主席团主席、中国光学学会理事长王大珩教授主持, 中华人民共和国人大常委会副委员长、中国光学学会名誉理事长严济慈教授致函祝贺大会圆满成功。

这次会议的主席团成员有四名诺贝尔奖金获得者和世界上激光领域著名学者。会议的国外代表 112 名, 来自 17 个国家和地区。其中苏联、东欧和亚洲的一些国家, 还是首次有代表参加我国召开的国际性激光会议。美国“民间”(People to people)组织还专程派出 16 名代表团出席会议并作了报告。国外学者的投稿数和出席会议的人数, 都超过 1981 年和 1982 年在美国召开的国际激光会议。这反映了我国激光技术方面的国际地位的提高和影响的显著。这次会议邀请了国外四个地区(美洲、日本、西欧、东欧)组成节目委员会、评审该地区的论文(共录用 21 个国家 114 篇论文)。我国及除四个地区以外的其他地区和国家的论文, 由中国光学学会副理事长王之江教授任节目委员会主席, 由他邀请我国 14 位激光专家、教授组成节目委员会, 于 1983 年 4 月 18~20 日在杭州进行了评审(共录用文章 155 篇; 中外合作文章 37 篇; 港澳文章 3 篇)。

这次会议所交流的论文的质量普遍比 '80 国际激光会议的有所提高。不仅国外学者有不少较有水平的论文, 而且我国学者的论文水平也有相当数量是较高的。特别可喜的是我国有一批研究生作的论文水平不低, 这充分显示了我国激光事业方兴未艾, 后继有人。'80 国际激光会议时, 我国在激光化学、非线性光学、激光光谱学等一些领域, 还是空白或属薄弱环节。从这次会议上我国宣读的较高水平的论文来看, 这些领域已有相当程度的进展, 填补了空白, 减少了薄弱环节。

这次会议实际宣读和张贴的论文共 302 篇, 宣读的 232 篇, 张贴的 70 篇。内容大致可分为: 激光物理、激光化学、激光器件、激光等离子体物理, 激光材料、激光应用以及激光工艺和技术。由于激光医学领域发展较快, 这次会议没有组织录用这方面的论文, 而特邀了一篇中国激光医学方面的介绍报告。

(下转第 845 页)