

# 验收测程的简便定量法——消光法

方启万

(武汉海军工程学院, 武汉)

**摘要:** 本文论述了消光法的基本原理, 分析了消光参数的选取, 阐释了消光法的测试步骤, 说明了用消光法测定大气能见度的方法。

The simple and convenient quantitative method of acceptance  
range—the extinction test way

Fang Qiwan

(Naval Academy of Engineering, Wuhan China)

**Abstract:** This article has discussed the basic principle of the extinction method, has analysed the selection of the extinction parameters, has expounded the test steps of the extinction method, and has put forward a method of using the extinction test to determine the meteorological visibility.

## 一、前 言

如何确切定量地检验激光测距机最重要的战术硬指标——测程, 是研制、生产和验收军用激光测距机的最大难题。十多年来, 人们一直在寻求不受天候变化影响、地理环境限制和目标特性制约且简便有效的定量考核激光测距机整机系统本身具有的灵敏度, 即综合测距能力的方法。消光法就是基本符合这些要求的较理想的简便定量法。

所谓消光法就是将激光测距机对500m处、反射率0.85的大目标靶保持额定测率测距时在接收(或发射)光路中所能插入衰减片的最大分贝数以得出该机的消光比和灵敏度的方法。

事正电子淹没测试研究工作。

俞贤椿, 男, 1938年12月出生。工程师, 现从事晶体生长研究工作。

郑桂英, 女, 1935年10月出生, 工人, 长期从事晶体生长工作。

收稿日期: 1989年12月1日。

关于消光法的基本理论，作者在有关文献〔1〕、〔2〕中进行了讨论，文献〔3〕也作过描述。不过都是从大目标测距方程的特殊情况出发加以推广的。本文试图从一般的小目标方程开始，直接简要地得出一般化的灵敏度和消光比的概念，并对消光法中消光参数的选取、对天候的适应能力、测试步骤和消光能见度的测定等问题进行深入系统地讨论。

## 二、消光法的基本原理

众所周知，小目标激光测距方程为

$$P_{r_{min}} = \frac{P_t K_t K_r A_r \rho \epsilon r}{\pi R_{max}^2} e^{-2\alpha R_{max}} \quad (1)$$

式中，

$$\epsilon = \frac{\text{目标面积}}{\text{光束截面积}} = \begin{cases} \frac{4\sigma}{\pi\theta^2 R_{max}^2} & \sigma < \frac{\pi}{4}\theta^2 R_{max}^2 \\ 1 & \sigma \geq \frac{\pi}{4}\theta^2 R_{max}^2 \end{cases} \quad (2)$$

$$r = \left( \frac{\text{接收视场角}}{\text{束散角}} \right)^2 = \begin{cases} \beta^2 / \theta^2 & \beta < \theta \\ 1 & \beta \geq \theta \end{cases} \quad (3)$$

由(1)式，并利用 $\alpha v = 2.7$ 可得

$$\frac{P_t K_t}{P_{r_{min}} / (K_r A_r r)} = \frac{\pi R_{max}^2}{\rho \epsilon} e^{5.4 R_{max} / v} \quad (4)$$

此式左边比值中的各因子均为激光测距机的内部参数，其分子是发射光学系统输出的激光脉冲峰值功率，分母为接收视场内能进入接收光学系统单位面积上的最小可探测功率，如图1所示。比值越大，测程越远，该机就越灵敏，故此比值反映了测距机系统所具有的总的测距能力。为了简化计算，我们定义这个比值的常用对数值为该激光测距机的灵敏度 $S$ ：

$$S = 10 \lg \frac{P_t K_t}{P_{r_{min}} / (K_r A_r r)} \quad (5)$$

$$\text{或} \quad S = 10 (\lg P_t + \lg K_t + \lg K_r + \lg A_r + \lg r - \lg P_{r_{min}}) \quad (6)$$

式中， $P_t$ 、 $K_t$ 、 $K_r$ 、 $A_r$ 、 $r$ 越大， $P_{r_{min}}$ 越小，则该测距机的测距能力越强，它的灵敏度就越高。

(4)式右边比值中的所有因子皆与测距机的外部参数有关，其分子为激光往返传输的大气衰减和回波漫射范围损耗因子，分母的倒数为目标反射损耗。此比值反映了目标、大气和作用距离等机外条件要求测距机所应具有的综合测距能力。比值越大，需要的测距能力越强，要求的灵敏度越高。由(4)、(5)两式可得：

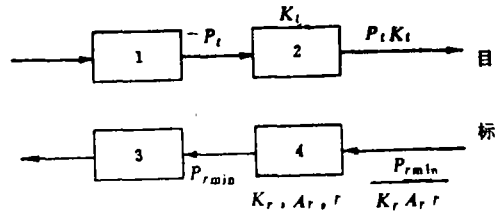


图1 灵敏度与内部参数的关系的示意图

1—激光器 2—发射光学系统

3—探测器 4—接收光学系统

$$S = 10 \lg \frac{\pi R_{\max}^2}{\rho \varepsilon} e^{5.4 R_{\max} / v} \quad (7)$$

显然，只有(5)式中由机内参数确定的该机具有的灵敏度，不小于(7)式中由指定目标、能见度与指标测程额定距离 $R_{\max}$ 等机外参数所要求的灵敏度时，该机的测程指标就可合格。因此，可以定量考核测距机的灵敏度来验收测程指标。为此，并不需要繁琐地检测(5)式中的各个机内参数，而用简便定量的整机考核法——消光法<sup>[4]</sup>。其作法是在消光靶距 $R_0 = 500\text{m}$ 处，树立一块反射率 $\rho_0 = 0.85$ 的大目标靶板（可称为消光靶板），将验收产品对其测距，同时在产品的接收（或发射）光路中不断插入定标的衰减片，当刚好达到产品的额定测率而将要下降为止。此时，插入衰减片的最大分贝数 $N$ ，我们称为该产品的消光比。故消光比是激光测距机对 $R_0$ 处的消光靶板保持额定测率测距时，能使接收面积范围内的回波功率减少的最大分贝数。故由机内参数综合确定的该机灵敏度便分为两部分：一部分 $\Delta N_0$ 作为对消光靶板保持额定测率测距时的消光测距损耗，另一部分则为被插入衰减片损耗的消光比 $N$ 。当消光测距能见度为 $v_0$ 时，则

$$\Delta N_0 = 10 \lg \frac{\pi R_0^2}{\rho_0 \varepsilon} e^{5.4 R_0 / v_0}$$

$$S = N + \Delta N_0 \quad (8)$$

$$N = S - \Delta N_0 = 10 \lg \frac{P_t K_t K_r A_r r \rho_0}{P_{r_{\min}} \pi R_0^2} e^{-5.4 R_0 / v_0}$$

(8)式中，第一式利用了(7)式；第三式则利用了(5)式和(7)式，它就是消光比的定义式，其物理意义如上所述，也可以说：由插入衰减片所得的消光比是该机的系统灵敏度与消光测距损耗之差，它取决于机内参数，还依赖于消光参数 $R_0$ 、 $\rho_0$ 、 $v_0$ 。而消光测距损耗与消光参数的关系又可写为

$$\Delta N_0 = 10 \lg e^{5.4 R_0 / v_0} + 10 \lg 1/\rho_0 + 10 \lg \pi R_0^2 \quad (9)$$

式中，第一项是消光测距时的往返大气衰减；第二项是消光靶标的反射损耗；而第三项是消光测距时的漫射范围损耗

$$10 \lg \pi R_0^2 / A_r = 10 \lg \pi R_0^2 - 10 \lg A_r \quad (10)$$

中的第一项。因此消光测距损耗 $\Delta N_0$ 完全由消光参数 $R_0$ 、 $\rho_0$ 和 $v_0$ 确定，而后者是人为选定的。

### 三、消光参数的选取

#### 1. 消光靶距 $R_0$

由(9)式可知， $R_0$ 与两项损耗有关，要使这两项损耗小， $R_0$ 应尽量小。但 $R_0$ 又必须大于激光测距机的盲区，不然就无法进行消光测距。一般盲区为200~400m。休斯飞机公司开始选用 $R_0 = 5\text{km}$ ，美空军后改为500m。现在美、法、瑞典等国皆用500m。此时发、收光学系统不同轴的影响也较小，若收、发轴距50mm，当 $\theta_H = 1\text{mrad}$ 时，则在消光靶板上只占光束直径的十分之一。

#### 2. 消光靶板面积 $\sigma_0$

产品输出激光束散角必须不大于其额定值，即 $\theta \leq \theta_H$ ，但各机的具体数值往往互不相

同。为了减少外部条件的影响因素，消光法都用大目标靶板，即 $\sigma_0 \geq \frac{\pi}{4} \theta_H^2 R_0^2$ 。若 $R_0 = 500\text{m}$ ， $\theta_H = 1\text{mrad}$ ，则 $\sigma_0 \geq 0.45^2 \text{m}^2$ 。然而为了降低瞄准要求，同时考虑在激光束散角以外还有少量的能量分布（对基模则有13.5%的能量分布），一般 $\sigma_0$ 均留有较大的余量。对于 $\theta_H = 1\text{mrad}$ ，通常可取 $\sigma_0 = 1 \times 1\text{m}^2$ 。

### 3. 消光靶反射率 $\rho_0$

消光靶反射面应垂直于入射光束的轴线，其上的反射率 $\rho_0$ 的分布应该均匀，且要严格标定。为减少靶面反射损耗，加大回波能量， $\rho_0$ 的取值应该大，以提高消光比测量的相对精度。美国原取 $\rho_0 = 0.7$ ，后改为0.85，外军现多用0.85。

### 4. 标准消光能见度 $v_0$

激光的传输衰减主要决定于大气能见度，而能见度的变化范围很大，可达三个量级。为了验收方便，标准消光能见度 $v_0$ 应选在一般天候范围内；同时考虑验收简单、准确，应设定为某一特定值。为此，可令消光测距损耗 $\Delta N_0 = 60\text{dB}$ ，其相应的消光比 $N = N(v_0)$ 。将 $R_0 = 500\text{m}$ ， $\rho_0 = 0.85$ 代入(8)式或(9)式，进行简单的对数运算可得

$$\Delta N_0 = \frac{11.7}{v_0} + 60 - 0.343 \quad (11)$$

从而解得 $v_0 = 34\text{km}$ 。由(8)式还可看出

$$N = N(v_0) = S - 60 \quad (12)$$

$$\Delta N_0 = 60$$

为了进一步简化，可将(7)式和(8)式中 $R_{\max}$ 和 $R_0$ 的单位均由m改为km，这样就使相应对数真数因子 $R_{\max}^2$ 和 $R_0^2$ 的数值都减小6个量级，它们所对应的对数均减少60dB，此时所得的灵敏度和消光测距损耗我们分别称为相对灵敏度 $S'$ 和消光测距相对损耗 $\Delta N_0'$ ，再由(11)式，并利用 $v_0 = 34\text{km}$ 得

$$S' = 10 \lg \frac{\pi R_{\max}^2 (\text{km})}{\rho_0 \epsilon} e^{5.4 R_{\max} / v_0} = S - 60 \quad (13)$$

$$\Delta N_0' = \Delta N' (v_0) = 10 \lg \frac{\pi R_0^2 (\text{km})}{\rho_0} e^{5.4 R_0 / v_0} = 0 \quad (14)$$

$$N = N(v_0) = S' = 10 \lg \frac{P_t K_t K_r A_r (m^2) r \rho_0}{P_{r_{\min}} \pi R_0^2 (\text{km})} e^{-5.4 R_0 / v_0}$$

## 四、消光法对天候的适应能力

由(14)式可知，消光测距相对损耗为零，消光比就是测距机的相对灵敏度。而(14)式成立的前提是 $v_0 = 34\text{km}$ ，但这并不意味着验收产品的消光能见度只能为此一个标准值，而情况正好相反，消光法对天候的适应能力极强：只要是能用产品瞄准 $R_0$ 处的消光白靶的能见度皆可验收。在 $v \neq v_0$ 时，若测得消光比为 $N(v)$ ，显然 $N(v) \neq N(v_0)$ ，现设定两者之间差值为 $\Delta N'$ ，则

$$N = N(v_0) = N(v) + \Delta N' \quad (15)$$

利用 $R_0 = 0.5\text{km}$ ， $\rho_0 = 0.85$ ，并由 $v = v_0$ 时的(14)式类推可得

$$\Delta N' = 10 \lg \frac{\pi R_0^2 (km)}{\rho_0} e^{5.4R_0/v} = \frac{11.7}{v} - 0.343 \quad (16)$$

故在 $v=20\sim 40\text{km}$ 时,  $|\Delta N'| \leq 0.05\text{dB}$ ,可忽略; 而 $v=15\sim 60\text{km}$ 时,  $|\Delta N'| \leq 0.44\text{dB}$ ,也可忽略; 即使 $v=10\text{km}$ 时,  $\Delta N' = 0.83\text{dB}$ 。因此一般天候变化对消光比验收的影响可忽略不计。能见度很低时也可验收, 只须用(16)式、(15)式稍加修正。如 $v=5\text{km}$ 时测得 $N(5) = 50\text{dB}$ , 再利用(15)和(16)式可得 $N = S' = 52\text{dB}$ 。能见度 $v$ 与 $\Delta N'$ 的关系如表1所示。

表1 能见度与消光测距相对损耗的关系

$v(\text{km})$	0.5	1	3	5	8	10	15	20	30	34	40	50	60
$\alpha(\text{km}^{-1})$	5.4	2.7	0.9	0.54	0.338	0.27	0.18	0.135	0.09	0.079	0.068	0.054	0.045
$10 \lg e^{5.4R_0/v}$ (dB)	23.4	11.7	3.9	2.34	1.46	1.17	0.78	0.59	0.39	0.34	0.29	0.23	0.20
$\Delta N'$ (dB)	23.06	11.36	3.56	2.00	1.12	0.83	0.44	0.24	0.05	0.00	-0.05	-0.11	-0.15

总之, 消光法几乎不受天候条件的限制: 一般天候测出的消光比 $N(v)$ 不必修正, 根据不同精度要求, 可认为 $N = N(v=20\sim 40\text{km})$ 或 $N = N(v=10\sim 60\text{km})$ ; 能见度很差时, 只要能用产品光学观察系统瞄准 $0.5\text{km}$ 处的大目标白靶就可验收, 测得的消光比 $N(v)$ 只须用(16)式和(15)式稍加修正便可。

## 五、消光法的测试步骤

### 1. 测定消光能见度 $v$ 的具体数值

可用能见度测量仪测试, 或询问气象台, 或用后述的消光法测定消光试验时的大气能见度 $v$ 值。

### 2. 确定额定准测率的准测频率

若产品的准测率指标 $P_{r_0} = 90\%$ , 则10次测距, 9次测准就合格, 测准少于9次就不合格。实际上这种准测率指标的可信程度是很低的, 因为此时的置信水平仅为 $0.5$  ( $P_c = 1 - \alpha = 0.5$ ,  $\alpha$ 称为置信度)。若不明确提出置信水平的要求时, 就可认为置信水平 $P_c = 0.5$ 。这就意味着: 若进行两列测距(每列 $n$ 次)就可能仅一列合格, 一列不合格, 置信概率只有 $50\%$ 。但美军通常取 $P_c = 0.9$  ( $\alpha = 0.1$ ), 即美军要求十列测距, 必须九列合格, 可信程度为 $90\%$ 。对比之下, 我军的置信水平就太低了, 应该提高。今后我军拟定准测率指标时, 也应明确提出相应的置信水平 $P_c$ 值的具体要求。

验收时, 因为准确测距的公算不知, 可先选定测距 $n$ 次, 并假定测准合格次数为 $m$ , 就能根据军方给定的 $P_c$ 、选定的 $n$ 和假定的 $m$ , 求出其二项分布的置信区间的下限, 并令此下限等于准测率指标 $P_{r_0}$ 来解算出 $m$ 值, 从而得出额定准测频率 $(m/n)_H$ 。这里仅列出这种计算的一例结果: 若给定 $P_{r_0} = 0.95$ ,  $P_c = 0.90$ ,  $n = 100$ , 则解得 $m \geq 98$ , 故额定准测频率 $(m/n)_H = 0.98$ , 即100次测距, 98次测准, 才满足置信概率 $90\%$ 的 $95\%$ 准测率的指标。

### 3. 使产品处于最大测距能力的状态

因为消光比是对应于该产品的最大测距能力的量化值。军方实际使用中, 最大测距能力

只是在对最大测程进行测距时才能发挥出来。为了排除近距离后向散射的假目标干扰,产品的接收机通常装有时间程序增益控制电路(TPG),使放大器的增益随着测程的增加而加大。而消光法验收则是要在很近的消光靶距 $R_0$ 时,测定产品的最大测距能力的量化值;同时又由于各台产品在 $R_0$ 处的小增益的具体数值不尽相同,难以准确地作统一修正。因此,消光验收时应使时间程序增益控制电路TPG不起作用,一种十分简便的办法是用产品面板上距离选通电位器的闲置开关来控制TPG电路的通断。消光测距时,将该电位器置于“关”的位置,使TPG电路断开,此时接收放大器就处于最大增益状态。

#### 4. 进行消光测距 确定消光比

将产品瞄准消光靶板,在接收(或发射)光路中插入已定标的衰减片,测距 $n$ 次,若 $n$ 次测准,则再增加插入衰减片的衰减量,重复上述过程,直至准测率将要从额定值 $(m/n)_H$ 下降而还未下降时为止。若此时的天气能见度属于一般情况,则插入衰减的分贝数之和就是该验收产品的消光比 $N$ ;若此时的能见度很低,那么该产品的消光比 $N$ 则为插入衰减的总分贝数 $N(v)$ 与其修正量 $\Delta N'$ 之和,即

$$N = N(v) + \frac{11.7}{v} - 0.343。$$

#### 5. 批量验收可执行更简便的办法

对于批量验收,可用更简便的办法;就是先测出该产品 $n$ 次测距 $n$ 次测准至 $n$ 次都测不准的过渡区之中的准测频率 $m/n$ 与其对应的消光比 $N(m/n)$ 之间的关系,并将此关系罗列成表或绘成曲线,如表2或图2所示。图、表中国外的数据取自Stitch和Johnson的报告,国内的数值来自某单位的实测报告。由图2可以看出:消光比 $N(m/n)$ 与准测频率的关系曲线分为三段,其中两段没有实际意义:先看 $m/n=1$ 的 $AB_1$ 或 $AB_2$ 段,显然,插入衰减量从0至 $N(B_1)$ 或 $N(B_2)$ 都能次次测准( $m/n=1$ ),但只有准测频率将要从1下降的 $B_1$ 或 $B_2$ 点的消光比 $N(B_1)$ 或 $N(B_2)$ 才有实际意义;同样,对于 $C_1D$ 或 $C_2D$ 段,插入衰减量从 $N(C_1)$ 或 $N(C_2)$ 至无穷大,都是每次不能测准,而只有测准频率将到0的 $C_1$ 或 $C_2$ 点的消光

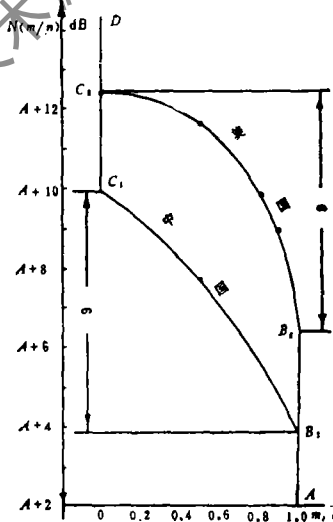


图2 准测频率与对应消光比的关系

表2 准测频率 $m/n$ 与相应的消光比 $N(m/n)$ 的关系

准测频率 $m/n$		1	0.9	0.8	0.5	0
消光比 $N(m/n)$	美国	$A+6.4$	$A+9$	$A+9.8$	$A+11.6$	$A+12.4$
	中国	$A+3.9$	$A+4.8$	$A+5.6$	$A+7.7$	$A+9.9$

比 $N(C_1)$ 或 $N(C_2)$ 才有用；故对消光法有实用价值的只有上两段的过渡区 $B_1C_1$ 或 $B_2C_2$ 段。

由图、表还可看出，国内外的实测数据均表明：在整个过渡区 $B_1C_1$ 或 $B_2C_2$ 段之中，消光比的差值均为6dB，即 $N(C_1) - N(B_1) = N(C_2) - N(B_2) = 6\text{dB}$ 。这样，军方验收时，就可不必非要直接测出该产品与额定准测频率所对应的消光比 $N$ 不可，因为这必将进行反复多列的 $n$ 次测距试验，而只须在过渡区的区间之内进行一系列 $n$ 次测距，得出此列测距的准测频率 $m/n$ 及其对应的消光比 $N(m/n)$ ，就可用该产品的类似于图2或表2的图或表，直接换算成该产品与额定准测频率 $(m/n)_H$ 所对应的消光比 $N$ 。例如，若国内的这一组实测数据适用于验收产品，且该产品的 $(m/n)_H = 0.98$ 。如果在过渡区中的一系列 $n$ 次测距中得知 $m/n = 0.5$ 时， $N(0.5) = 46.4\text{dB}$ ，由图2或表2(用内插法)可得 $N(0.5) - N(0.98) = 3.6\text{dB}$ ，故该产品满足 $(m/n)_H = 0.98$ 的消光比 $N = 50\text{dB}$ ，若不小于该产品的额定消光比，即 $N \geq N_H$ ，则验收合格。

## 6. 用消光法测定消光能见度

气象台所告知的能见度往往不是作消光试验时的数值，而国内生产激光测距机的单位，目前皆无能能见度测试仪，因此，用消光法及时测定消光能见度非常必要，也相当简便，且无需添置任何仪器，只要将一台验收产品后移至 $R_1$ 处( $R_1 > R_0$ )，但仍须保持消光靶板为大目标，或者在大于 $R_0$ 的 $R_1$ 处另树一块相同的大目标消光靶板。在 $R_0$ 和 $R_1$ 的两个距离上分别测定同一台产品的消光比，若测得其值分别为 $N_0(v)$ 和 $N_1(v)$ ，由于消光测距相对损耗 $\Delta N'(v)$ 一般不等于其标准值( $v_0 = 34\text{km}$ 时) $\Delta N' = 0$ ，故该产品的消光比 $N$ 或相对灵敏度 $S'$ 应为同一数值，且为插入消光比 $N(v)$ 与 $\Delta N'(v)$ 之和：

$$S' = N = N_0(v) + 10 \lg \frac{\pi R_0^2}{\rho_0} e^{5.4R_0/v} \quad (17)$$

$$S' = N = N_1(v) + 10 \lg \frac{\pi R_1^2}{\rho_0} e^{5.4R_1/v} \quad (18)$$

由上两式解得消光试验时的能见度为

$$v = \frac{23.4(R_1 - R_0)}{N_0(v) - N_1(v) + 10 \lg R_0^2 - 10 \lg R_1^2} \quad (19)$$

当 $R_0 = 0.5\text{km}$ 时，(19)式则为

$$v = \frac{23.4(R_1 - 0.5)}{N_0(v) - N_1(v) - 10 \lg R_1^2 - 6} \quad (20)$$

例如，若 $R_0 = 0.5\text{km}$ ， $R_1 = 1\text{km}$ ，测得 $N_0(v) = 49.4\text{dB}$ ， $N_1(v) = 40.5\text{dB}$ ，则从(20)式可以算出 $v = 4\text{km}$ 。

## 7. 消光比的高低温测试

在高低温条件下测试消光比的方法和步骤与上述常温情况相同，差别仅在于须分别将测试点置于高和低温室保温额定时间后再进行。消光法能量化高、低温下产品的测距能力，还可考核测距能力下降的起始温度和额定高、低温时的下降量，作到定量验收，可解决一直长期存在的高、低温定量验收重要硬指标测程的技术难题。

# 关于平行分束激光偏光镜的几种设计

李国华 李继仲 宋连科

(曲阜师范大学激光研究所, 曲阜)

**摘要:** 利用双折射晶体的反射和折射特性提出四种两元复合式平行分束偏光棱镜设计, 其特点是分束距大, 消光比和透射比高, 分离角小, 非常适宜于大间隔光束调制和光开关系统, 以冰州石晶体为例给出了各器件的工作参数。

## Designs of the parallel beam-splitting polarizers

Li Guohua, Li Jizhong, Song Lianke

(Qufu Normal University)

**Abstract:** Four types of parallel beam-splitting polarizer are provided using a birefringent crystal. The features of the devices are large displacement, high extinction ratio, high transmittance and small splitting angle. They are especially designed for the usage of optical switch and modulating systems, and with calcite as an example, the properties of several different designs are compared.

### 一、引言

平行分束偏光镜是进行光束偏振变换处理的重要器件, 常用于多道传输系统和多光束偏

---

### 参 考 文 献

- [1] 方启万, 《兵器激光》, 1986年, 第2期, 第51页。
- [2] 方启万, 《激光与红外》, 1989年, 第19卷, 第2期, 第35页。
- [3] 胡继先, 《激光技术》, 1989年, 第13卷, 第2期, 第16页。
- [4] Laser Handbook, 1972, Vol.2, P.1787.

收稿日期: 1989年11月11日。