

多频染料激光器的相关调谐原理*

张 国 威

(北京理工大学 工程光学系)

提 要

本文将染料激光系统模式耦合理论应用于三频或多频运转的染料激光器,得到了用“增益-损耗比”和振荡频率所含模数等参量表示的振荡条件关系式,讨论了三频染料激光的振荡状态图及其相关调谐问题。

关键词: 多频激光器, 染料激光器, 相关调谐, 调谐原理。

一、引 言

由于高增益介质(染料)模式竞争激烈,一般染料激光器都难以实现共激活区的多频调谐运转。通常在实践中为了获得多频的可调谐激光,往往采用多个激光器组合的方法,如铀³⁵激光同位素分离,需用四台染料激光系统进行光合束^[1],不仅设备多、费用高,而且光合束调整困难,脉冲之间时间同步难,以及光能损失(合束后仅为总光能的四分之一)等问题。

作者曾从染料激光系统模式耦合理论出发,导出了双频染料激光的振荡条件,提出了一种双频染料激光器的相关调谐原理^[2]。根据这一原理设计、研制的双频脉冲染料激光器,已获得了宽调谐范围。功率(强度)比可调,共线输出,窄线宽,时间同步的双频可调谐输出。并实现了宽调谐范围双频染料激光的放大,获得了大于15 mJ的双频可调谐输出^[3]。本文将这一原理推广到多频振荡的激光器中,以作为设计,研制多频可调谐脉冲染料激光器的理论依据。文中着重讨论三频振荡问题。

二、三频染料激光器的振荡条件

设染料激光系统以窄线宽、多模运转,其振荡频率为 ν_i ($i=1, 2, \dots, N$)模的电场强度为 E_i ,对脉冲染料激光系统,可忽略三重态的作用,则染料激光系统的耦合方程可简写成^[4]:

$$\frac{dE_i}{dt} = E_i [g_i - \xi_i - b_i E_i^2 - \sum_n' c_{in} E_n^2], \quad (1)$$

式中 g_i 为染料在频率 ν_i 处的线性增益系数, ξ_i 为 ν_i 在腔内的损耗系数, b_i 为自饱和系数, c_{in} 为交叉饱和系数, \sum_n' 表示不包括 $n=i$ 的求和。

对三频染料激光系统,若频率 ν_i 包含有个模,其中之一记为 i 模,其余 (m_1-1) 个记为 i' 模。频率 ν_j 含有 m_2 个模,其中之一为 j 模,其余 (m_2-1) 个为 j' 模,对含有 m_3 个模的频率 ν_k ,其中之一记为 k 模,其余 (m_3-1) 个为 k' 模。则可得三频的模式耦合方程组:

收稿日期: 1989年12月22日; 收到修改稿日期: 1990年5月2日

* 国家自然科学基金(高技术)资助的项目。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dE_i}{dt} &= E_i [g_i - \xi_i - b_i E_i^2 - \sum_{i'} C_{ii'} E_i^2 - \sum_j C_{ij} E_j^2 - \sum_k C_{ik} E_k^2], \\ \frac{dE_j}{dt} &= E_j [g_j - \xi_j - b_j E_j^2 - \sum_{j'} C_{jj'} E_j^2 - \sum_i C_{ji} E_i^2 - \sum_k C_{jk} E_k^2], \\ \frac{dE_k}{dt} &= E_k [g_k - \xi_k - b_k E_k^2 - \sum_{k'} C_{kk'} E_k^2 - \sum_j C_{kj} E_j^2 - \sum_i C_{ki} E_i^2], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对窄线宽的情况,可认为每个频率中的 E , g , ξ 值极相近,即可假设

$$\left. \begin{aligned} E_n &= E_{n'}, \quad g_n = g_{n'}, \quad \xi_n = \xi_{n'}, \quad (n = \hat{i}, j, k) \\ C_{ii'} &= C_{ii}, \quad C_{jj'} = C_{jj}, \quad C_{kk'} = C_{kk}, \\ C_{ij} &= C_{ji}, \quad C_{jk} = C_{kj}, \quad C_{ik} = C_{ki}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

且有关系^[5]

$$\frac{C_{in}}{g_i} = F(\nu_n), \quad (4)$$

若忽略非线性效应项,可得^[4]

$$b_n = \frac{3}{2} C_{nn}, \quad (n = \hat{i}, j, k) \quad (5)$$

则可由(2)式得到用强度表示的近似表达式,(为方便起见,用 1, 2, 3 代替 \hat{i}, j, k)

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_1}{dt} &= I_1 \left[g_1 - \xi_1 - \left(m_1 + \frac{1}{2} \right) g_1 F(\nu_1) I_1 - m_2 g_2 F(\nu_2) I_2 - m_3 g_3 F(\nu_3) I_3 \right], \\ \frac{dI_2}{dt} &= I_2 \left[g_2 - \xi_2 - \left(m_2 + \frac{1}{2} \right) g_2 F(\nu_2) I_2 - m_3 g_3 F(\nu_3) I_3 - m_1 g_1 F(\nu_1) I_1 \right], \\ \frac{dI_3}{dt} &= I_3 \left[g_3 - \xi_3 - \left(m_3 + \frac{1}{2} \right) g_3 F(\nu_3) I_3 - m_1 g_1 F(\nu_1) I_1 - m_2 g_2 F(\nu_2) I_2 \right], \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 $a_n = g_n - \xi_n$ ($n=1, 2, 3$) 为线性净增益系数。显然, $a_n < 0$ 时, 无激光振荡。因此只须讨论 $a_n > 0$, 即 $\varepsilon_n = (g_n/\xi_n) > 1$ 的情况。称 ε_n 为频率 ν_n 的“增益-损耗比系数”(简称“增损比”)。

以稳态解作为近似,则可由 $(dI_n/dt) = 0$ 得到八组可能的解,但其中 $I_1 = I_2 = I_3 = 0$ 的解没有意义,其余为三个单频振荡,三个双频振荡和一个三频振荡解。采用微振动分析法,在 $\varepsilon_n > 1$ 的条件下,可得到三频振荡的条件如下:

$$\varepsilon_1 > 1, \quad (7)$$

$$\varepsilon_1 < \frac{2m_1}{\left[\frac{1}{2} (2m_1 + 1) \left(\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_3} \right) - 1 \right]}, \quad (8)$$

$$\frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3} < \left(m_1 + \frac{1}{2} \right) \quad (9)$$

$$\varepsilon_2 > 1 \quad (10)$$

$$\varepsilon_2 < \frac{2m_2}{\left[\frac{1}{2} (2m_2 + 1) \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_3} \right) \right] - 1}, \quad (11)$$

$$\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_3}{\varepsilon_1 + \varepsilon_3} < \left(m_2 + \frac{1}{2} \right), \quad (12)$$

$$\varepsilon_3 > 1, \quad (13)$$

$$\varepsilon_3 < \frac{2m_1}{\left[\frac{1}{2}(2m_3+1)\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2}\right) \right] - 1}, \quad (14)$$

$$\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} < \left(m_3 + \frac{1}{2} \right), \quad (15)$$

可见,为实现三频振荡,首先必须满足 $\varepsilon_n > 1 (n=1, 2, 3)$, 即 $g_n > \xi_n$, 但它们只是必要条件,三频振荡的充分条件是其余六个条件也必须同时满足。(9)式、(12)式、(15)式表明,为实现稳定的三频振荡,其中两个频率的增益大小不仅相互有关,而且受第三个频率模数的限制。如果其中某一或两个频率的增益过高,而使其中一式或二式不能满足。这种处于高增益状态的激光系统极不稳定,系统中任一因素的扰动,由于激烈的模竞争作用,都势必迅速发展成一个频率对另一频率振荡的抑制。激光系统的工作状态即变为双频振荡,或单频振荡。

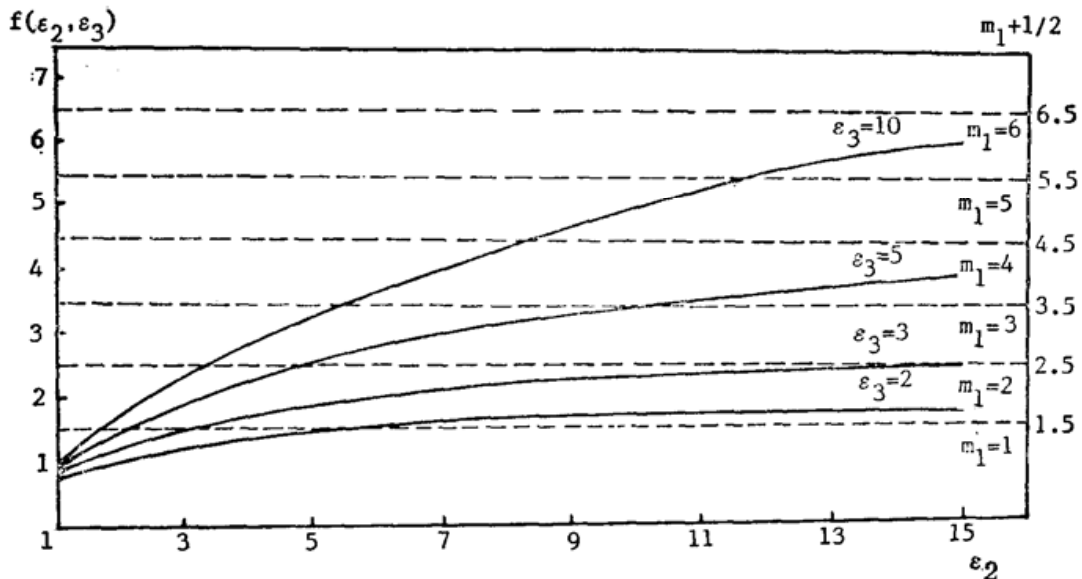


Fig. 1 The dependence on mode numbers for tri-frequency oscillation condition

图1给出了以 $\varepsilon_3=2, 3, 5, 10$ 为参量的 $f(\varepsilon_2, \varepsilon_3) = [\varepsilon_2 \varepsilon_3 / (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)]$ 曲线(实线)。图中虚线表示了频率 ν_1 具有不同模数 m_1 时的 $[m_1 + (1/2)]$ 值。因此,实线与虚线不相交的对应值即表示满足关系(9)式对(12)式和(15)式有完全相同的关系。

由图1中看出,当相关频率 ν_1 含有模数较少时,如 $m_1=2$, 只有 $\varepsilon_3 \leq 5$, $\varepsilon_1 \leq 5$ 才能满足三频振荡,但若 ν_1 的模数增加,如 $m_1=5$, 则使 $\varepsilon_3=10$, $\varepsilon_2=10$ 仍可能获得三频稳定运转。通常情况下,这个条件是可以满足的,如对一线宽为 2 GHz, 腔长为 37.5 cm 的激光器,就有 5 个模左右。即使对单模激光器,虽其条件要求较严,如 $\varepsilon_3 = \varepsilon_2$, 则要求 $\varepsilon_3 = \varepsilon_2 < 3$, 这一般也能实现。

而由(8)式、(11)式和(14)式可进一步看出三频振荡时频率间增益的相关性,即一个频率的振荡必受其余两相关频率的制约与影响。调谐过程中,任一频率增益的改变,将引起其余两频率增益的变化。如果相互间制约控制不住,达不到新的平衡就可能出现其中一个频率的增益被“夺”走,而转变成双频振荡;或其中一频率“夺”得大部分增益,而转变为单频振荡。因此在调谐过程中要实现稳定的三频振荡就必须控制频率间的增益关系,利用增益相关性,保持增益竞争的动态平衡。

三、三频率染料激光器的振荡状态图

由(7)~(15)式可直观地用一个三维直角坐标的振荡状态图来表示,如图2所示, x, y, z 轴分别代表 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 和 ε_3 的值。三轴相交于 $\theta(\varepsilon_1=\varepsilon_2=\varepsilon_3=1)$ 点,它相当于起振点。因此, $\varepsilon_n < 1$ 的象限为无振荡区。 $AIQI'A'$ 锥形曲面由(8)式确定;同样曲面 $FGQG'F'$ 和 $CDQD'O'$ 则由(11)式和(14)式所确定。点 C, G 的坐标由(9)式和相应锥形曲面相交而定,类似地, D, I 点和 A, F 点则由(12)式和(15)式与锥形曲面相交而定。由上述各点作平行于轴的线而分好相交于 B, E, H 点。然后,通过 $\overline{DF}, \overline{EF}$ 等六条直线作对应坐标面的平行平面,如果 $m_1=m_2=m_3$,且 $\varepsilon_1=\varepsilon_2=\varepsilon_3$,则六平面将相交于点 P 。图中在各锥形曲面内的区域为各单频振荡区,各坐标平面上的 $GHIQ$ 区、 $DFEQ$ 区和 $ABCQ$ 区分别为 $\nu_1+\nu_2, \nu_2+\nu_3$ 和 $\nu_1+\nu_3$ 的双频振荡区(实际上应包括这些平面后边或下边的空间区域,即对应的 $-\varepsilon_3, -\varepsilon_1$ 或 $-\varepsilon_2$ 区)。由三坐标平面和三锥形曲面为底与由 $AB...IP$ 多平面锥为顶盖所构成的多面形锥体的内部才为三频振荡区。而多平面锥以上和三个锥形曲面以外的区域则为不稳定区。

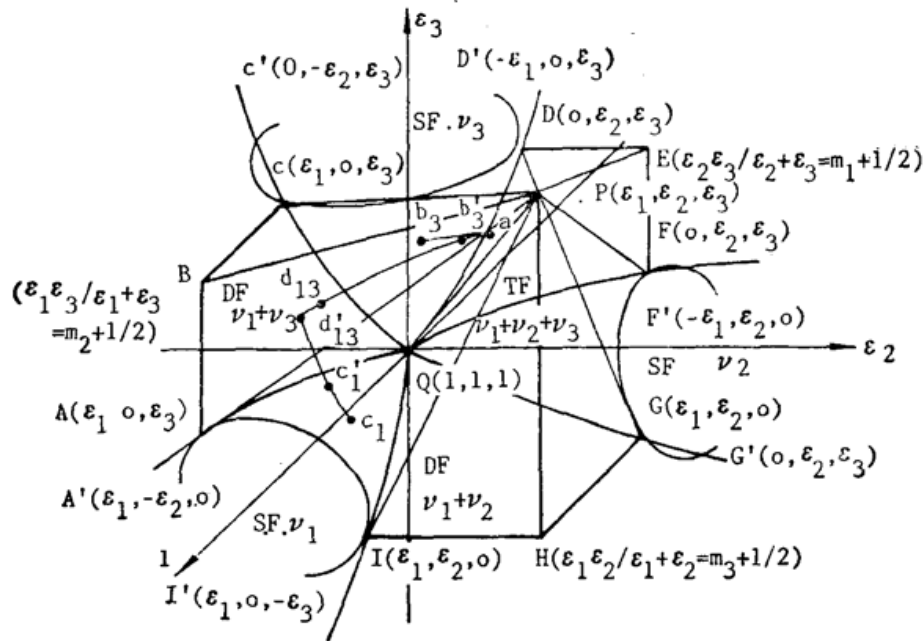


Fig. 2 The oscillation state diagram for tri-frequency dye laser
(SF: single frequency, DF: dual-frequency, TF: tri-frequency)

调谐时,各频率的增益都将相关地发生变化,其中一频率的增益升高,则必伴随另两频率增益的下降。假设开始时为三频振荡(工作点 a 在三频区内),如果一个频率升得很快(如迅速调到谱的峰值附近),则可能几乎同时抑止另两频率振荡,如状态图上工作点画出由三频区 a 点到单频率区(例如 ν_3 频区) b_3 点的轨迹, b'_1 点为两个频区的分界点。但在一般情况下,则是先抑止其中一个频率,变为双频振荡,增益的进一步竞争,又变成单频振荡。其工作点轨迹如图中 $ad'_{13}d_{31}$ 与 $d_{13}c'_1c_1$ 所示, d'_{13} 为三频区与 $\nu_1+\nu_3$ 双频区的分界点, c'_1 则为该双频区与 ν_1 单频区的分界点。三频振荡与其它双频振荡或单频振荡的转变过程也相同。调谐时,也会出现逆过程,即当频率间增益逐渐趋近时,会产生由单频振荡转变为双频振荡和

(或)三频振荡。由于实现三频自然振荡的条件很苛刻,若不采取一定技术措施,其连续调谐的范围十分有限。

四、三频染料激光器的相关调谐原理

由上述分析可以看出,如果能在调谐过程中始终保持 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$, 即该工作点沿 \overline{QP} 移动,则可始终满足(7)~(15)式的条件,而实现三频调谐的稳定运转。

对一台共激活区的三频染料激光器来说,可近似认为腔的损耗相等,即有 $\xi_1 = \xi_2 = \xi_3$ 。而增益不相等($g_1 \neq g_2 \neq g_3$),各频率的增益大小不仅与染料的光谱增益分布有关,而且是相关的。设 $g_1 > g_2 > g_3$, 即有 $\epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_3$, 如果在 ν_1, ν_2 的支腔中加入可变的附加损耗 $\Delta\xi_1, \Delta\xi_2$, 且有 $\Delta\xi_1 > \Delta\xi_2$, 并使

$$\frac{g_1}{\xi_1 + \Delta\xi_1} \doteq \frac{g_2}{\xi_2 + \Delta\xi_2} \doteq \frac{g_3}{\xi_3} \tag{16}$$

始终满足。即调谐时使 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 的值或同步增高,或同步下降。就可实现三频染料激光的稳定振荡,称此为三频染料激光的对称相关调谐。

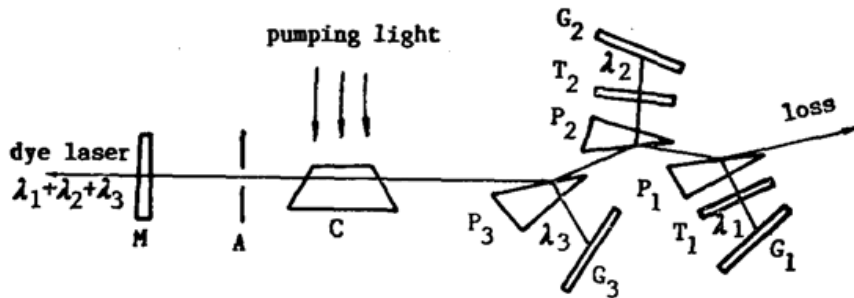


Fig. 3 A experimental system for correlated tuning tri-frequency dye laser

实际上,激光器在进行相关调谐时不一定必须按完全对称方式调谐,而只要保证工作点在曲面体内即可。这时由于 $\epsilon_1 \neq \epsilon_2 \neq \epsilon_3$, 各点的坐标也将随着 $\epsilon_1/\epsilon_2/\epsilon_3$ 不同而有所变化。但只要相差不大,实验证明,仍可实现相关调谐,并可使强度比按一定的要求输出。图3即为一由复合迈克尔逊腔构成的三频染料激光实验系统,三选频支腔由棱镜 P_3, P_2 入射面上的反射与折射进行分束耦合。调谐时,如果对支腔相应波长的增益,选择 $\epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_3$, 图中 T_1, T_2 是透过率连续可变的衰减器,以改变 $\Delta\xi_1$ 和 $\Delta\xi_2$ 的值,使之实现 $\epsilon_1 \simeq \epsilon_2 \simeq \epsilon_3$ 的对称相关调谐。作者以此实验装置,在 YAG 的倍频光 532 nm 泵浦下,用若丹明 6G 染料的乙醇溶液,在染料的荧光范围内,实现 $I(\lambda_1) \approx I(\lambda_2) \approx I(\lambda_3)$ 的激光输出。染料浓度为 2×10^{-8} M 时,用 3~5 mJ 的泵浦能量(脉宽约 10 ns),其调谐范围约为 34 nm(563~597 nm,比双频 $\Delta\lambda = 35$ nm,单频 $\Delta\lambda = 36$ nm 稍窄,但短波端基本保持不变)。

五、多频染料激光器的振荡条件

对多频振荡的染料激光系统(如 N 频),可近似地导出其振荡条件关系式为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_i &> 1, \\ \varepsilon_i &< \frac{2m_i}{\left[(2m_i+1) \left(\frac{1}{N-1} \sum_n \frac{1}{\varepsilon_n} \right) \right] - 1}, \\ \sum_n \frac{1}{\varepsilon_n} &> (N-1)(2m_i+1), \quad i=1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

显然, N 频染料激光振荡条件, 将对应应有 $3N$ 个条件式。其振荡工作状态已无法直观地用图来表示。但由上述分析表明, 相关调谐的原理同样可用于 N 频。

六、讨 论

(1) 分析表明, 三频或多频染料激光系统具有与双频振荡相类似的振荡条件。每增加一频率, 则相应增加三个条件关系式。

(2) 调谐时, 可通过调节各频率间的“增益-损耗比”关系, 用相关的方法来控制模竞争状态的平衡, 以实现稳定的三频振荡。

(3) 调谐时, 如果控制不住“增损比”关系, 或增益过低(接近于 Q 点)或过高都可能造成工作点“跳”入双频区, 甚至“跳”入单频区。

(4) 本原理只适用于单元染料的激光系统, 对多元染料系统, 则必须同时考虑给体染料对受体染料的能量转移作用。

参 考 文 献

- [1] B. E. Warner; *SPIE*, **737**, 2~6.
- [2] 张国威;《中国激光》, 1988, **15**, No. 5 (May), 272~274, 294.
- [3] 张国威, 刘宏发; 科研报告“相关调谐双频染料激光振荡-放大系统”(1988)。
- [4] 潘少华;《物理学报》, 1981, **30**, No. 8 (Aug), 1067~1076.
- [5] 许祖彦等;《物理学报》, 1981, **30**, No. 6 (Jun), 820~824.

A correlated tuning theory for multi-frequency dye laser

ZHANG GUOWEI

(Department of Engineering Optics, Beijing Institute of Polytechnlogy)

(Received 22 December 1989; revised 2 May 1990)

Abstract

The theory of mode coupling in dye laser system is applied to tri- or multi-frequency dye laser (TFDL or MFDL). Oscillation condition related to the parameters—gain to loss ratio number of modes at one frequency—is deduced. An oscillation dynamic equilibrium diagram for TFDL and its correlated tuning

heory are presented and discussed.

Key words: multi-frequency laser; dye laser; correlated tuning; tuning theory.

JYM-1 型时间分辨激光荧光免疫分析仪技术鉴定会在合肥举行

由安徽省医药管理局、中科院合肥分院联合召开的“JYM-1 型时间分辨激光荧光免疫分析仪技术鉴定会”，于 1990 年 6 月 18 日在安徽省合肥市举行。参加会议的代表 22 名。

时间分辨荧光免疫分析 (TrFIA) 是利用微量稀土元素 Eu 的螯合物与抗体结合形成共轭体作为发光记物，与体液中的抗原结合形成复合物，经增强液解高作用，Eu 可从复合物中解高出来，形成一种新的螯合物，在紫外光 (340 nm) 激发下，发出高强荧光 (613 nm)，这种荧光衰变时间很长 (10~1000 μ s)。采用时间分辨光谱技术，使蛋白质等所发的短寿命荧光 (1~10 ns)，完全衰变后再测螯合物的荧光，可完全排除背景光。提高分析灵敏度，测量 Eu 的荧光，可判断抗原抗体的结合程度，确定生物体液中抗原或抗体的量。TrFIA 是八十年代崛起的新型超微量的免疫分析方法，它被广泛用于医学、生物活性物质 (如蛋白质、肿瘤标志物、药物和细胞、激素等) 的定量检测。

目前国外已物以氙灯作为光源的商品供应，如瑞典的 LKB1230 型 Arcuo TrFIA 仪。

中科院安徽光机所，采用脉冲 N_2 -激光器作激励光源 (其波长为 337 nm、脉宽 10 ns、能量 0.1 mJ~0.3 mJ)，延时选通重复积分电子线路接收荧光信号，并以换档方式满足测试范围宽的要求等，研制成 JYM-1 型 TrFIA 仪样机。

该分析仪与瑞典的 LKB1230 型 TrFIA 仪的主要技术指标对比如下：

	JYM-1 型	LRB1230 型
灵敏度	10^{-16} mole(Eu)/l	10^{-17} mole(Eu)/l
测试范围	10^{-12} ~ 10^{-16} mole/l	10^{-13} ~ 10^{-17} mole/l
测量精度	$\leq 7\%$	$< 5\%$
测量时间	≤ 30 sec/sample	1 sec/sample
记录方式	三位半数字显示激光相对功率，微机数据处理、打印显示结果	微电脑控制和数据处理，并配有显示器和打印机
变异系数	$< 6\%$	$< 2\%$
新生儿 hTSH 标准曲线的线性关系	0.988	0.999

从上述指标可以看出 JYM-1 型 TrFIA 仪的技术指标已达到国外同类产品的指标，它是我国第一台研制成功的样机，填补了我国该项测试仪器的空白。

(乙 民供稿)