

环行染料激光器用于内腔吸收光谱的研究

雍华蓉* 匡一中 林 海 吕百达
(四川大学物理系)

提 要

本文报告了利用新型连续波环行染料激光器,即使行波工作于超过阈值两倍以上,仍在大气中获得了近 10^5 的内腔吸收灵敏放大;并首次利用单频扫描方法,在不降低灵敏放大的同时,得到了 10^{-2}\AA 的光谱分辨率。实验结果与经改进后的 Brunner-Paul 理论分析一致。

关键词: 环行染料激光器,内腔吸收光谱,内腔吸收灵敏放大。

一、引 言

激光内腔吸收光谱是将吸收样品置于激光腔内来得到吸收信号的高灵敏放大的激光光谱技术,主要利用激光器腔内损耗高度灵敏和三个基本效应(谐振腔效应、阈值效应和模式竞争效应)^[1]。驻波型染料激光器由于具有高的腔损耗以及增益的空间不均匀性,使其应用于内腔吸收光谱主要是利用阈值效应的贡献,然而阈值工作将受到许多不稳定和背景噪声等不利因素的影响,因而限制了内腔吸收光谱的研究和应用,但是,环行染料激光器在单向行波方式工作时,由于较完全的均匀加宽促使产生相当强烈的竞争效应,能大大提高吸收信号的灵敏放大本领。所以,环行染料激光器对于内腔吸收光谱的研究有可能是一种更为理想的器件。

本文利用环行染料激光器对大气的内腔吸收光谱进行研究,得到了比驻波激光器较好的结论,尤其是当工作于超过阈值三倍时,仍得到 10^5 的吸收灵敏放大,并且利用 Brunner-Paul 理论^[2],能较圆满地定性解释实验结果。同时,本文首次采用单频扫描方法,不但得到受限于吸收介质多普勒加宽的光谱分辨 10^{-2}\AA ,而且仍获得相当高的灵敏放大,成功地将单频环行染料激光器的高分辨与内腔吸收光谱技术的高灵敏特性结合起来,为进一步的研究及可能的应用打下了基础。

二、实 验 装 置

总体实验装置如图1所示。激光器为801-A型环行染料激光器及其泵浦源360型氩离子激光器构成。环行腔^[3]由四块反射镜构成,光路成“8”字形,腔长近1.5m,腔内有两个有用束腰,一个位于 M_1M_2 之间,用于插入染料喷流,另一个位于 M_3M_4 之间,作为辅助束

收稿日期: 1986年3月13日;收到修改稿日期: 1986年5月26日

* 现在地址: 成都电讯工程学院五系506教研室。

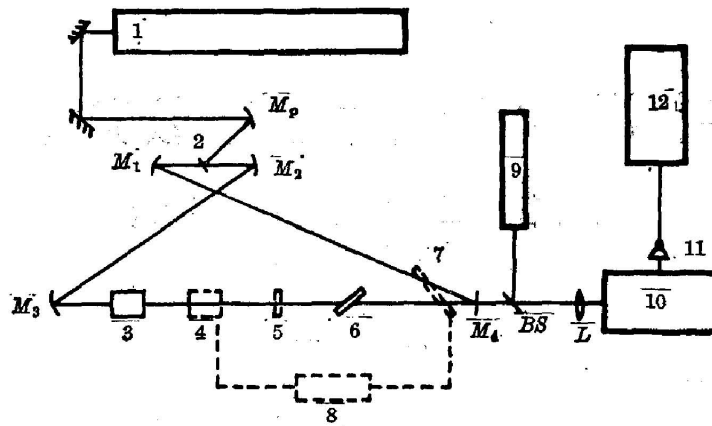


Fig. 1 Experimental set-up for broadband scanning (dashed-line represents the inserted parts in single-frequency scanning)

1—Mode 360 Argon laser, 2—Dye jet, 3—Unidirectional device, 4—Thick etalon, 5—Thin etalon, 6—Birefringent filter, 7—Galvanometer plate, 8—Lock circuit standard light resource, 10—Model CT-50 monochrometer, 11—Photodiode, 12—X-Y recorder

腰,用于其它可能的用途。 M_3M_4 之间为准直光束臂,以便在插入各种单频扫描器件如单向器、厚(扫描)和薄片标准具,双折射滤光片等时损耗最小。单向器由不可逆法拉第效应偏振器(法拉第旋转器)和石英偏振旋转器(自然旋光片)组成,利用二者分别对正反两个方向行波的旋转角相加或相消造成的损耗差异来抑制其中一个方向的行波振荡。801-A型激光器采用单片双折射滤光片作为调谐元件,并用一个空气隙厚标准具和一个石英薄片标准具进一步压窄激光线宽,最终得到单频激光输出。而要实现单频连续扫描,必须使腔模频率和选频元件透过峰同时改变,即用同样的频率变化速率扫描检流计板(改变有效腔长)和厚标准具间隔,并用电子学锁定环路来控制使其同步扫描,这样,在无跳模情况下,可重复扫描

30 GHz 以上,单频线宽约 20 MHz。

在宽带扫描时,探测系统是由 CT-50 型单色仪分光,通过输出狭缝处的光电管接受信号并放大后,输入到 LZ3-204 型二用记录仪上,调整单色仪的光栅自动扫描速度与记录仪走纸速度相对同步,从而得到输出强度随波长的变化曲线。

当采用单频扫描方法时,探测吸收信号方式如图 2 所示。同时用 1.5 GHz 扫描标准具监测单频扫描工作情况。

实验以腔内充满的天然大气作为吸收样品,并以 Curcio 等人^[4]在海平面上所作 16.25 km 长程大气和水吸收谱作为标准谱进行比较。

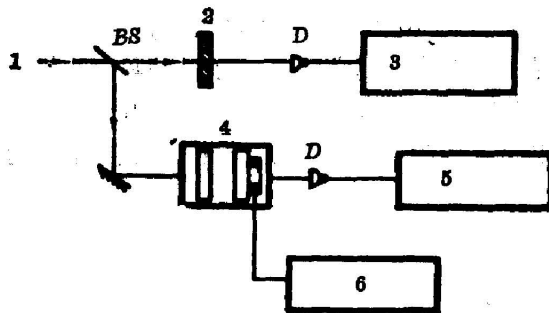


Fig. 2 Monitor and recorder for single-frequency scanning

1—Dye laser, 2—Attenuator, 3—X-Y recorder
4—1.5 GHz scanning etalon, 5—CS-2100 oscilloscope,
6—Model SMY generator

上所 16.25 km 长程大气和水吸收谱作为标准谱进行比较。

三、实验结果

对环行染料激光器在空腔下进行常规调整后,插入单向器,使其以单向行波方式运转,同时用单片双折射滤光片作为波长粗调谐元件(如图1所示),这时在宽带连续扫描下可记录到较未加单向器时更强的大气吸收灵敏放大。如图3所示为5848.9 Å附近且近阈值工作的大气吸收谱。尤其有意义的是在实验中观察到,当激光器即使运转于较高泵浦功率时,仍可以获得相当高的灵敏放大,接近于前人所报道的阈值工作时得到的结果。如图4为相对泵浦强度 $P^* = (P/P_{th}) = 3$ (P_{th} 为阈值泵浦功率)时行波运转所得到的大气吸收谱,其灵敏放大仍可高达 10^5 。而在驻波情形,相同泵浦条件下的灵敏放大可以下降到 $10^2 \sim 10^3$ 。

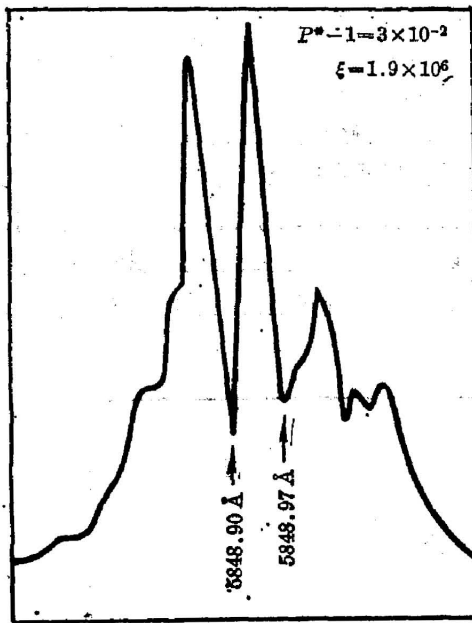


Fig. 3 Atmospheric absorption spectrum at the condition of traveling-wave and near threshold

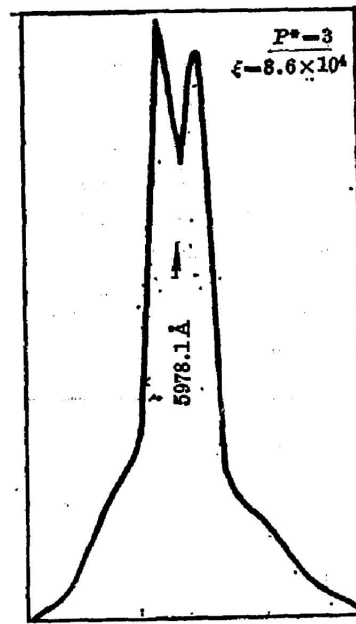


Fig. 4 Atmospheric absorption spectrum at the condition of traveling-wave and above threshold

图5即为我们实验所测得在单向行波运转情形,5978.1 Å处大气吸收的 $\xi \sim (P^* - 1)$ 关系曲线。其中 ξ 表示吸收灵敏放大, $\xi = \frac{\text{内腔吸收率}}{\text{外腔单程吸收率}}$ 。与驻波激光器的吸收灵敏放大随泵能增加迅速降低^[5]相反。由图5中可知,行波激光器的吸收灵敏放大随泵浦功率的提高变化很小。这一现象说明,利用行波激光器即使工作在高于阈值处,吸收灵敏放大并无显著降低这一特点,就可以有效地避免驻波激光器的阈值工作的问题,使内腔吸收光谱技术更加简易可行。

此外,在前人工作中,利用普通的宽带染料激光器进行窄吸收线的检测,尽管能获得较高的灵敏放大,但由于受到分光探测元件分辨本领的限制,使内腔吸收光谱不能得到足够的分辨率;而实验证明,驻波染料激光器的泵浦能量一定时,灵敏放大随线宽而线性增

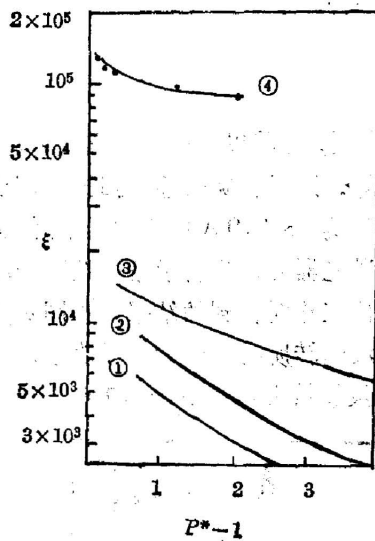


Fig. 5 $\xi-(P^*-1)$ curves. ①—result for traveling-wave; ②~④—result for standing-wave (from [5])

加^[5],即高的灵敏放大要求宽带的激光,这似乎与分辨的提高形成一对矛盾。而在本实验中,首次采用单频扫描方法进行了这方面的初步观察。如图1所示,在前面实验的激光器调试基础上,再插入厚、薄标准具,并调整好扫描电子学锁定环路,得到稳定的单频激光输出以及放大的吸收信号。如图6即为单频环行染料激光器从6005 Å起连续扫描35 GHz所得到的大气吸收谱。从图中可清楚地看出几个被展宽的吸收谱线包络,而且可分辨出两条位移仅约 2.8×10^{-2} Å的谱线。同时对吸收灵敏放大所作的估算表明,尽管在采用单频激光器去掉探测元件分辨本领的限制之后使分辨率有所提高,但吸收灵敏放大($\xi=6 \times 10^5$)并未有大的降低。由此可见,单频扫描方式以损失宽线宽对灵敏放大的贡献而获得分辨率的提高。同时行波工作时强烈的竞争效应以及谐振腔效应和阈值效应又使灵敏放大仍然维持在较高的水平,此时分辨率的限制由输出激光线宽以及物质吸收谱线加宽机制所决定。因此,

随着单频环行染料激光器的发展,将极有可能对实现高分辨和超高灵敏的激光吸收光谱起到巨大的作用。

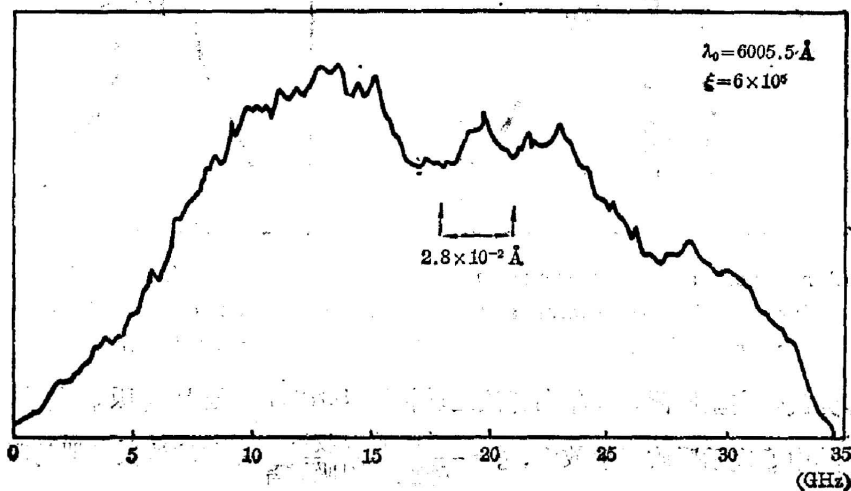


Fig. 6 Atmospheric absorption spectrum of single-frequency continuously scanning for 35 GHz.

四、理论分析

为了对上述实验结果进行正确的理论解释,我们利用内腔吸收的稳态速率方程解——

Brunner-Paul 理论^[2]作适当的修正后对激光行波工作情形进行了较详尽的讨论。由一般公式

$$\xi = \left(\frac{dI}{I} \right)_{\text{内腔}} / \left(\frac{dI}{I} \right)_{\text{外腔}} = \frac{dQ}{Q} / d\eta = \frac{(1+Q)^2}{v\alpha_0 Q}, \quad (1)$$

$$\frac{\eta}{\alpha_0} = \frac{1}{1+MQ} + \frac{v}{1+Q}, \quad (2)$$

或

$$Q^2 - \left[v \frac{\alpha_0}{\eta} - 1 + \frac{1}{M} \left(\frac{\alpha_0}{\eta} - 1 \right) \right] Q - \frac{1}{M} \left(\frac{\alpha_0}{\eta} - 1 \right) = 0, \quad (3)$$

其中 ξ 即为内腔吸收灵敏放大因子, Q 为单模归一化光子数, α_0 为共有的单模单程增益, $\alpha = (1+v)\alpha_0$ 为单模单程增益, η 为单模单程损耗, M 为激光振荡模式数(更严格地定义为激光线宽与总吸收线宽之比)。引入参量表征模式间的耦合及竞争程度, $v \rightarrow 0$ 对应于完全的均匀加宽, 此时具有强烈的竞争效应; $v \rightarrow \infty$ 对应于完全的非均匀加宽, 无竞争效应存在; 在一般情形, v 取 0 到 ∞ 之间的一有限值, 对应于有一定非均匀性存在时的情形, 并且 v 越大, 意味着这种非均匀性的影响越显著。考虑到这层意义, 我们可对(1)和(2)式进行一些讨论。

在阈值附近, $Q \ll 1$, $[(\alpha/\eta) - 1] \ll 1$, 有

$$Q = \frac{\alpha - \eta}{\alpha_0} \frac{1}{m+v}, \quad (4)$$

$$\xi = \frac{1}{\alpha_0 v Q} = \frac{1}{v\eta} \frac{M+v}{(\alpha/\eta) - 1}. \quad (5)$$

由(4)和(5)式可见, 当染料激光器以驻波方式运转时, 属于存在有一定非均匀性的加宽情形, v 为一有限值。此时除了谐振腔效应 $(1/\eta)$ 以及阈值效应 $[(\alpha/\eta) - 1]^{-1}$ 外, ξ 还将随 M 增加而增加, 因而多模宽带染料激光器将显示出其优越性; 而当以单向行波方式运转时, $v \rightarrow 0$, ξ 将变得非常大, 与 v 相比, M 的贡献可以忽略, 故仍可能得到较驻波运转时更强的灵敏放大。可见, 尽管由于 M 的相对减小, 单频环行染料激光器仍能得到高的灵敏放大, 这就解释了前图 6 中的实验结果。

另一方面, 高于阈值时, Brunner 和 Paul 作了 $M \gg 1$ 和 $Q \gg 1$ 的假设, 为了得出更一般且更符合我们实验情况的结论, 我们仅作假设: $Q \gg 1$ 有

$$Q = \frac{\alpha_0}{\eta} \left(\frac{1}{M} + v \right), \quad (6)$$

$$\xi = \frac{Q}{\alpha_0 v} = \frac{1}{v\eta} \left(\frac{1}{M} + v \right). \quad (7)$$

类似前讨论, 驻波情形时(v 为一有限值), 除了谐振腔效应的影响外, ξ 还随 M 的增加而降低(这与前人“泵浦增加使 ξ 降低”的实验结果相符), 最后达到饱和(即一定值), 此时由于缺少阈值效应的贡献, 灵敏放大将显著降低; 而在行波情形, $v \rightarrow 0$, 有

$$\xi = \frac{1}{v\eta M}. \quad (8)$$

此时 ξ 仍可以变得相当大。尽管没有了阈值效应对 ξ 的贡献, 但行波运转时完全的均匀加宽所带来的强烈的竞争效应, 使其可以补偿这种损失, 因此仍能得到高的灵敏放大, 这一结论已为实验结果所证实。

五、结 束 语

本文利用新型环形染料激光器对激光内腔吸收光谱学的研究, 不仅得到了环行激光器工作于行波状态, 即使在高于阈值处仍有高的吸收灵敏放大这一结论; 而且还由引入单频扫描方法得到了高的光谱分辨; 并由经过补充的前人理论应用于行波激光器情形所作的讨论, 圆满地解释了所观察到的实验现象。理论和实验都证明了环形染料激光器应用于激光内腔吸收光谱的研究, 无论是在推动激光内腔吸收光谱不断发展方面, 还是在使之成为一种较简单且行之有效的高灵敏、高分辨的检测手段方面都具有重要的研究价值。

参 考 文 献

- [1] W. Demtroder; *«Laser Spectroscopy»*, (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1981), 339~394.
- [2] W. Brunner, H. Paul; *Opt. Commun.*, 1974, **12**, No. 3 (Nov), 252~255.
- [3] 私人通讯。
- [4] J. A. Curcio *et al.*; *Appl. Opt.*, 1964, **3**, No. 12 (Dec), 1401~1409.
- [5] S. J. Harris *et al.*; *J. Chem. Phys.*, 1981, **74**, No. 7 (Apr), 3673~3679.

Intracavity absorption spectroscopy with a ring traveling-wave dye laser

YONG HUAYONG, KUANG YIZHONG, LIN HAI AND LÜ BAIDA
(Department of Physics, Sichuan University, Chengdu)

(Received 13 March 1986; revised 26 May 1986)

Abstract

By using a cw ring traveling-wave dye laser enhancement factor up to 10^5 of the intracavity absorption sensitivity was obtained in air even if the pump power was two times excess of threshold. Making use of singlefrequency scanning method for the first time, the resolution of 10^{-2} angstrom was measured without sensitivity reduction. The experimental results agree with the predictions of modified Brunner-Paul's theory.

Key Words: Ring travelling-wave dye laser, Intracavity absorption spectroscopy (ICAS), Sensitivity enhancement of intracavity absorption.