

分布反馈激光特性的实验研究

王润文 赵继然 陈建文 潘成明
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

研究了以脉冲 YAG 倍频激光泵浦 Rh6G 染料, 产生分布反馈激光振荡的辐射光谱、转换效率、时间过程以及可调谐特性; 发现在大于泵浦阈值下的分布反馈激光输出的多谱线结构与双脉冲辐射现象, 以及分布反馈激光脉冲变窄的自开关效应。作为详细的实验观察和分析。

关键词: 分布反馈激光; 调 Q 倍频 Nd:YAG 激光。

一、引 言

分布反馈激光因不需附加反馈光学元件, 故具有结构简单、连续可调谐的特点。较适于难以安放反射镜的激光谐振腔结构中。象半导体 GaAs 激光器曾用这类结构产生稳定的单线激光振荡^[1, 2]。近年来有利用分布反馈方法于染料激光, 获得宽带可调谐和超短脉冲激光^[3, 4], 以及作为 X 射线激光的泵浦手级等^[5, 6], 已开始重新为人们所重视。

分布反馈的机制与通常的激光谐振腔的不同。它是在增益介质中形成周期性的增益结构, 共振光通过后出现同频率的增强放大效应。当周期光栅结构足够密集, 而增益系数又足够高时, 就可实现在很短的工作介质长度下的激光振荡。

两束波长为 λ_p 的相干辐射以 2θ 夹角交叠, 在垂直于其平分线的平面上就会出现周期为 d 的光栅结构:

$$d = \frac{\lambda_p}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

若沿周期 d 的坐标轴为 z , 则光场的分布是 z 的余弦函数

$$I = I_0 \left(1 + \cos \frac{\pi z}{d} \right) \quad (2)$$

由(2)式的光强分布来泵浦激发增益介质就会在介质中形成类似周期的增益分布

$$g(z) = g_0 \left(1 + \cos \frac{\pi z}{d} \right) \quad (3)$$

实验中, 以 YAG 调 Q 倍频的 $0.53 \mu\text{m}$ 激光, 分束后再相干叠合于 Rh6G 染料层上, 实现了分布反馈的激光辐射输出。当泵浦功率超过阈值足够高时, 分布反馈的激光谱线可由单线结构转变为等间距的多线结构。脉宽明显变陡, 同时谱宽也较泵浦光束的窄得多, 仅为 0.06 \AA 。表明了分布反馈激光可同时获得这两个优点, 这在一般谐振腔中, 是很难兼顾的。

收稿日期: 1987年6月5日; 收到修改稿日期: 1987年6月19日

• 国家自然科学基金资助的项目。

二、实验装置和工作点的选取

分布反馈染料激光器采用倍频 Nd:YAG 激光器的 $0.53 \mu\text{m}$ 激光的干涉场作为染料激光的泵浦源, 在染料池中, 激活具周期性的增益结构, 实验装置如图 1 所示。

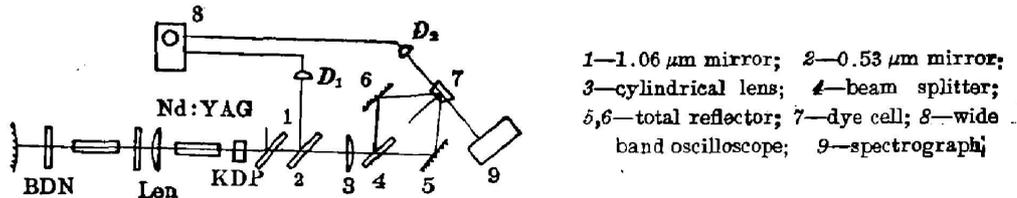


Fig. 1 Experimental arrangement of the Nd:YAG laser pumped distributed feedback laser

BDN 染料片调 Q 的 Nd:YAG 激光器输出 $1.06 \mu\text{m}$ 的脉冲激光, 重复频率为 $1 \sim 20$ pulses/sec, 经一级放大后, 由 KDP 晶体倍频成 $0.53 \mu\text{m}$ 的相干光, 残留的 $1.06 \mu\text{m}$ 激光经 45° 反射镜 1 反射离开光路。 $0.53 \mu\text{m}$ 激光经部分反射镜 2 取样, 进入 PIN 光电二极管 D_1 , 由宽带示波器进行能量和波形监测。泵浦激光经焦距为 300mm 的柱面镜 3 会聚 (焦线在染料池内适当位置), 经由 45° 分束镜 4 对光束作等振幅分割, 再分别用两块全反射镜 5、6 将两光束等光程地调整在石英染料池 7 处重叠。两相干泵浦光束的干涉场作为分布反馈激光的泵浦源。石英染料池做成劈形, 以消除端面反射对分布反馈激光的影响。分布反馈染料激光从染料池两侧端输出, 一边用 PIN 光电二极管 D_2 和宽带示波器测量其脉冲波形和能量; 或用 F-P 标准具测量分布反馈激光输出光谱宽度。染料池另一端输出的分布反馈激光, 进入 WPP-0.5 型平面光栅摄谱仪, 观测分布反馈激光光谱结构。

Rh6G 染料乙醇溶液的激发光谱如图 2(a) 所示, 激发峰值波长为 399.0nm 和 434.1nm 。相比之下, 采用波长 $0.532 \mu\text{m}$ 的激光激发, 其效率较低。用 $0.532 \mu\text{m}$ 光激发 Rh6G 染料溶液的荧光光谱如图 2(b) 所示, 峰值在 581.5nm 处, 发射谱半宽度为由 572.0nm 到 605.0nm 。

公式 (1) 给出两束相干的 $0.532 \mu\text{m}$ 泵浦光在染料池内叠加形成的干涉条纹宽度 d , 在这种周期增益结构中满足 Bragg 条件的波长 λ 形成分布反馈振荡。

$$d = k \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

其中 $k=1, 2, 3, \dots$, 为 Bragg 级数。为了使分布反馈腔中允许建立的激光振荡与 $0.532 \mu\text{m}$ 泵浦光激发的 Rh6G 染料溶液的荧光发射谱波长匹配, 实验中, 我们选取 $k=2$ 。Rh6G 染料溶液浓度为 $1 \times 10^{-3} \text{M}$, 溶液有效折射系数 $n=1.36$, 由 (1)、(4) 式得到的分布反馈腔中, 激光输出波长为

$$\lambda_s = \frac{\lambda_p n}{2 \sin \theta} \quad (5)$$

代入具体数值, 可算出对不同入射角 θ , 得到的分布反馈输出激光的波长。由于被激活的增益介质发射谱的宽度限制, 只能在一定范围内, 改变入射角 θ , 实现分布反馈激光的调谐。分布反馈激光输出随角度调谐的工作区如图 3 所示。

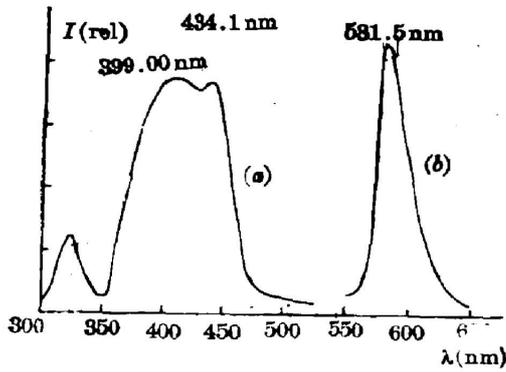


Fig. 2 Stimulated spectrum (a) and fluorescence spectrum (b) of Rh6G solution

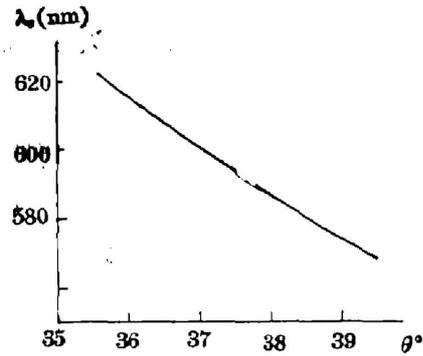


Fig. 3 Wavelength of the distributed feedback laser with different angles

三、实验结果与讨论

Nd:YAG 激光器倍频输出的 $0.53 \mu\text{m}$ 波长的泵浦光束的单脉冲能量约为 1 mJ ，脉宽约为 30 ns (FWHM)。被泵浦 Rh 6G 染料乙醇溶液，浓度为 $1 \times 10^{-3} \text{ M}$ 。用线色散为 15.585 \AA/mn ，狭缝宽度为 $30 \mu\text{m}$ 的 WPP-0.5 型平面光栅摄谱仪拍摄分布反馈激光输出光谱。当泵浦光束夹角之半 θ 为 38.85° 和 39.09° 时，分布反馈激光输出光谱如图 4 所示。图中右侧一条和左侧两条谱线为 Hg 灯标准谱线： 5460.7 \AA (Hg)， 5790.6 \AA (Hg) 和 5769.6 \AA (Hg)。对应 θ 角等于 39.09° 时，分布反馈激光光谱线为 5716 \AA ；若 $\theta = 38.85^\circ$ 时，分布反馈激光输出谱线为 5746 \AA 。仔细调整两个全反射镜 5、6，改变两相干泵浦激光束夹角，便可得到不同波长分布反馈激光输出。实验中两反射镜是分别调整的，若能精确同步调整两反射镜转角，即改变方程 (5) 的 θ 角，便可实现分布反馈激光器的连续调谐。换用不同浓度的染料溶液，可实现分布反馈激光输出随浓度的调谐。本实验分布反馈激光随角度 θ 调谐范围约 100 \AA 。

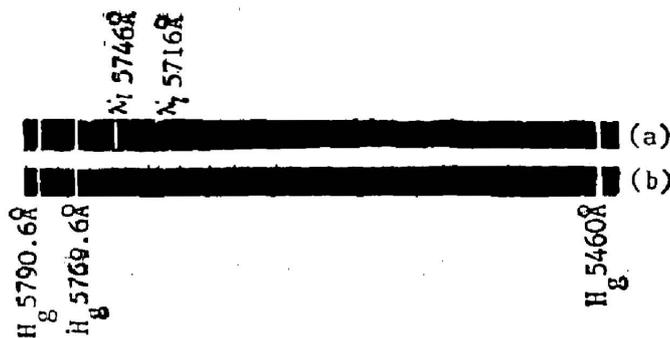


Fig. 4 Spectrum of the distributed feedback laser
(a) $\theta = 38.85^\circ$, (b) $\theta = 39.09^\circ$

测量分布反馈激光谱线宽度，采用厚度 D 为 4.15 mm ，材料折射系数 $n_f = 1.5$ 的 F-P

标准具, 测得分布反馈激光干涉花样如图 5 所示。如干涉环线半宽为 δ , 相邻条纹间距为 L , 对 $\lambda_i = 5746 \text{ \AA}$ 谱线宽度 $\Delta\lambda_i$ 为

$$\Delta\lambda_i = \frac{\lambda_i^2 \delta}{D n_F L} = 0.06 \text{ \AA}.$$

采用上升时间为 0.7 ns 的 PIN 光电二极管和宽带示波器, 显示分布反馈激光输出的时间特性, 图 6(a) 是在 KDP 倍频晶体后测得的泵浦激光脉冲波形 $\tau = 30 \text{ ns}$, 图 6(b) 为将两束泵浦激光中的一束挡掉, 另一束激发染料的荧光波形, 脉宽约 2.5 ns (FWHM), 图中细尖峰部分展宽显示于图 6(c), 与泵浦激光脉冲宽度相近, 图 6(d) 为分布反馈激光脉冲波形, 脉宽约为 7 ns (FWHM), 由于分布反馈激光辐射自开关效应^[3], 其宽度相对泵浦激光脉冲而言, 明显变窄。

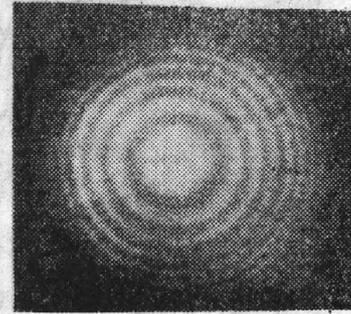


Fig. 5 Interference pattern of distributed feedback laser

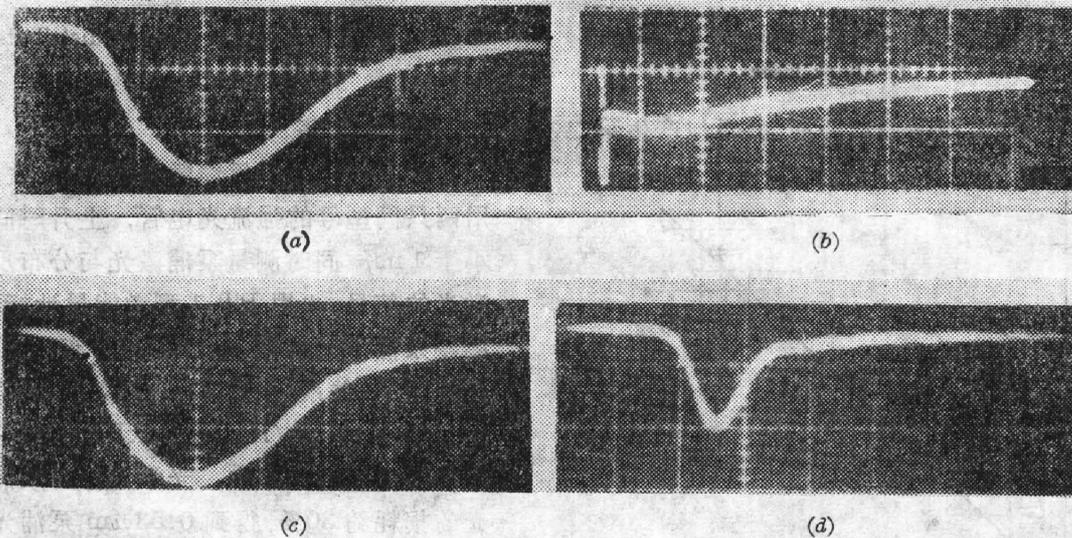


Fig. 6 Time characteristics of the pulses of distributed feedback laser

- (a) Temporary distribution of pumping laser pulses (5 V/div 10 ns/div)
- (b) Temporary distribution of the fluorescence pulses of Rh6G solution (10 mV/div 1 μ s/div)
- (c) Temporary distribution of the fluorescence pulses, same as (b) with different scales (50 mV/div 10 ns/div)
- (d) Temporary distribution of the output of the distributed feedback laser (1 V/div 10 ns/div)

有趣的是, 当其他条件不变, 泵浦激光在泵浦阈值以上足够强时, 我们发现, 分布反馈激光输出从单一谱线结构变为多线结构, 见图 7, 相邻谱线间隔 $4 \sim 5 \text{ \AA}$, 右侧为汞灯标准谱线 5460 \AA (Hg), 这一现象表明, 当泵浦激光能量在阈值附近时, 由于染料对泵浦光的吸收, 使干涉场在染料池内表面附近薄层处形成, 干涉条纹仍然近似于平面光栅结构。当泵浦激光增强时, 除在染料池近入射方向的内表层形成干涉场外, 又可深入到染料池内部形成体光栅。出现多个周期性结构, 分别满足各自 Bragg 条件的振荡模式, 都可形成分布反馈振荡, 这就形成了分布反馈激光的多谱线结构。

我们还发现泵浦激光在阈值以上足够强时, 分布反馈激光输出时间特性出现双峰结构 (见图 8)。这是因为当泵浦激光较强时, 在腔中分布反馈激光形成振荡, 激光输出后, 仍有泵

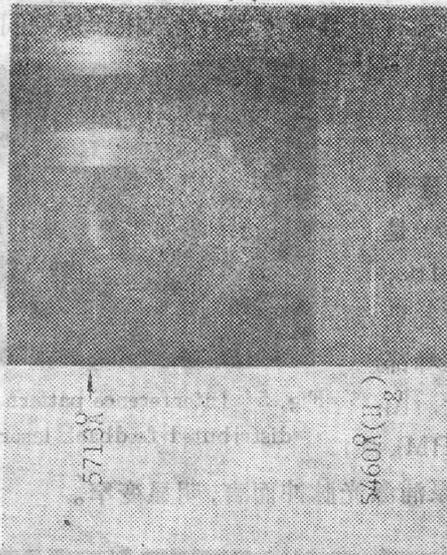


Fig. 7 Multi-line structure of distributed feedback laser

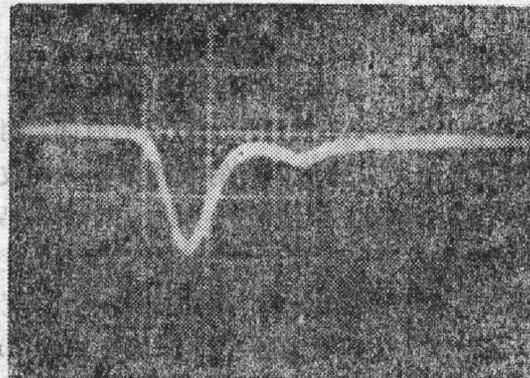


Fig. 8 Profile of double pulse of distributed feedback laser

浦激光继续激活染料介质,并足以产生第二次分布反馈激光振荡。

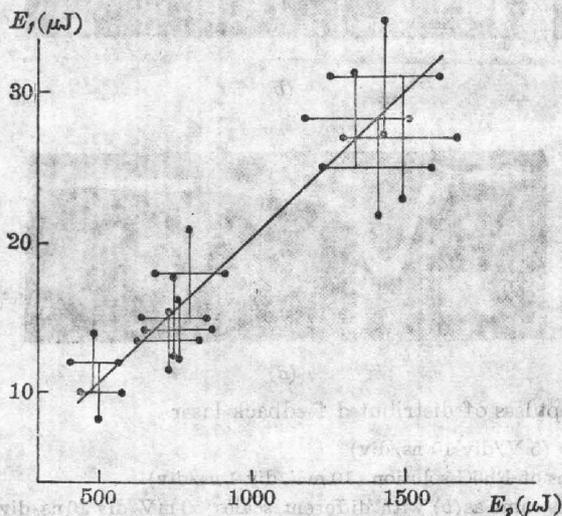


Fig. 9 Experimental curve of output energies E_f of distributed feedback laser versus different energies E_p of pumping laser light

为了测量分布反馈激光的转换效率,用两只同型号的强流光电管,上升时间均小于 1 ns,同时测量泵浦激光与分布反馈激光的信号,再用 PT-1 型微能量计标定,测得泵浦激光能量 E_p 和输出分布反馈激光能量 E_f 关系(见图 9)。曲线斜率即为转换效率 $\eta = E_f/E_p$,考虑 KDP 倍频晶体至染料池面的光路中,光学元件对泵浦激光的损耗约 30%,得到 $0.53 \mu m$ 泵浦光能换成分布反馈激光能量的效率为 2.5%。

参加本工作的还有朱大庆、陈仲裕、江敏华、柏建荣等同志。实验中,庄大奎、祁长宏两同志为我们测量了 Rh6G 染料溶液的光谱,舒菊坪、夏青生两同志为我们测量了染料溶液折射率,吴瑞昆同志和我们进行了有益的讨论,作者一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] M. Nakamura *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1974, 25, No. 9 (Nov), 487~488.
- [2] H. C. Casey *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1975, 27, No. 3 (Aug), 142~144.
- [3] Zsolt, Ber; *IEEE J. Q. E.*, 1980, QE-16, No. 5 (May), 517~524.
- [4] G. Szabo *et al.*; *Appl. Phys.*, 1984, B34, No. 3 (Jul), 145~147.
- [5] R. A. Fisher; *Appl. Phys. Lett.*, 1974, 24, No. 12 (Jun), 598~599
- [6] A. Yariv; *Appl. Phys. Lett.*, 1974, 25, No. 2 (Jul), 105~107

Experimental study on characteristics of distributed feedback laser

WANG RÜNWEI, ZHAO JIRAN, CHEN JIANWEN, PAN CHENGMING, ZHU DAQING,
CHEN ZHONGYU, JIANG MINHUA AND BO JIANRONG
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 5 June 1987; revised 19 June 1987)

Abstract

The radiation spectrum, temporary dynamic process and wavelength tunable characteristics of the distributed feedback laser pumped by a Q-switched and frequency doubled Nd:YAG laser have been studied. Two new effects including autoswitching which narrow the output pulsewidth of distributed feedback laser light, and double pulse generation with the pumping power being higher than the threshold, have been found. The experimental results and analysis are presented in detail.

Key words: the distribution feedback laser; a Q-switch with double frequency Nd:YAG laser.