

文章编号 1000-5013(2004)02-0137-03

利用抗共振环实现稳定的 BDN 被动锁模

姚关清 吴逢铁

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362011)

摘要 在理论上,通过对 BDN 能级结构的分析并结合速率方程组,指出基态弛豫时间为 ns 量级的 BDN 染料片实现被动锁模的可能性.实验上,在凸 ARR(抗共振环)非稳腔结构的脉冲式 Nd:YAG 激光器中,用 BDN 作为可饱和吸收体实现被动锁模运转,得到平均能量为 22.1 mJ,能量起伏为 1.6% 稳定的锁模单脉冲序列.

关键词 BDN 染料片, 抗共振环, 激发态吸收, 被动锁模, 饱和光强

中图分类号 TN 248.3⁺5; TS 193.2⁺1

文献标识码 A

BDN 染料[双-(4-二甲氨基二硫代二苯乙二酮)-镍]是一种应用广泛的染料,随溶剂的不同,它的基态恢复时间可在 ns 至 ps 之间变化.在普通溶剂中,它的基态恢复时间在 ns 量级;在特殊溶剂如三苯甲烷溶剂中,最小可以达到 10 ps^[1].以往的实验中,BDN 染料片主要用作调 Q 材料^[2~3],作为被动锁模元件报道很少.本文从理论上对 BDN 能级结构进行分析,指出基态恢复时间为 ns 量级的 BDN 染料,在合适的实验条件下可实现稳定的被动锁模.

1 BDN 锁模的理论分析

若 BDN 染料的基态恢复时间 $\tau_{21} \ll \tau_p$ (τ_p 为理论上可获得的锁模激光最小脉宽, $\tau_p = \frac{1}{\Delta \nu} \Delta \nu$ 为激光器的增益线宽),则可以用 BDN 直接实现被动锁模^[4].若 BDN 染料的基态恢复时间 $\tau_{21} > \tau_p$, 为 ns 量级.通过对 BDN 染料的能级结构的分析,我们认为只要激光腔内光强足够大,也可以实现被动锁模. BDN 与 1.06 μm 波长激光吸收有关的能级及主要跃迁过程,如图 1 所示.可以用四能级模型描述其饱和性能.对于 1.06 μm 波长的激光入射不仅存在着 $3A_3$ 到 $3T_2$ 的基态吸收,而且还存在着从 $3A_2$ 到 $3T_1$ 的很强的激发态吸收,其基态和激发态吸收(ESA)的吸收截面分别为 $\sigma_g = 7.6 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 和 $\sigma_e = 2.5 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ ^[5].图中, N_1, N_2 和 N_3 为各能级粒子数, τ_{21} 和 τ_{42} 分别为从 $3T_2$ 到 $3A_2$ 和 $3T_1$ 到 $3T_2$ 到的弛豫时间.对于四能级系统来说,一般 τ_{42} 比 τ_{21} 小几个数量级.例如,对同为四能级系统的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体,其 τ_{42} 为 550 ps, τ_{21} 约为 3.4 μs ^[7],相差可达 3~4 个数量级.

当腔内光强不够大时,激光器运转在调 Q 状态,主要产生基态吸收,可忽略 $3T_1$ 上的粒子数分布,即 $N_3 = 0$.此时,其机制可用二能级的跃迁及弛豫来表述,如图 2 所示. $3T_2$ 和 $3A_2$ 能级的粒子密度速率方程及腔内光强的变化为

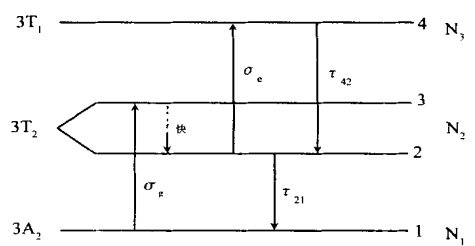


图 1 BDN 有关能级简图

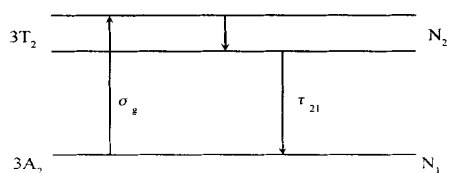


图 2 调 Q 运转时的 BDN 简化能级图

收稿日期 2003-11-04

作者简介 姚关清(1977-),男,硕士研究生,主要从事非线性光学研究. E-mail: gq_yao@sina.com

基金项目 国务院侨务办公室科研基金资助项目(01QZR03)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\begin{aligned}\frac{\partial N_1}{\partial t} &= -N_1\left(\frac{\sigma_g}{h\nu}\right)I + \frac{N_2}{\tau_{21}}, \\ \frac{\partial N_2}{\partial t} &= N_1\left(\frac{\sigma_g}{h\nu}\right)I - \frac{N_2}{\tau_{21}}, \\ \frac{\partial I}{\partial z} &= -I(\sigma_g N_1 + \sigma_e N_2).\end{aligned}$$

由此, 可得基态吸收的饱和光强为 $I_{s1} = \frac{h\nu}{\sigma_g \tau_{21}}$. 只要腔内光强大于 I_{s1} , BDN 就可作为很好的 Nd: YAG 激光器的被动调 Q 元件.

当腔内光强远大于 I_{s1} 时, 由于 BDN 存在着很强的激发态吸收^[5], 可近似地认为在一段时间内, 基态粒子被完全抽空($N_1 = 0$), 粒子只在 $3T_1$ 和 $3T_2$ 之间跃迁. 与以上的讨论类似, 仍用二能级的跃迁及弛豫来表述此机制. 由此得出另一组粒子密度速率方程为

$$\begin{aligned}\frac{\partial N_2}{\partial t} &= -N_2\left(\frac{\sigma_e}{h\nu}\right)I + \frac{N_3}{\tau_{42}}, \\ \frac{\partial N_3}{\partial t} &= N_2\left(\frac{\sigma_e}{h\nu}\right)I - \frac{N_3}{\tau_{42}}.\end{aligned}$$

解得激发态吸收饱和光强 $I_{s2} = \frac{h\nu}{\sigma_e \tau_{42}}$. 虽然, BDN 随溶剂的不同, 其基态恢复时间各不相同, 但我们仍然可以对 I_{s1} 和 I_{s2} 之间的差别做个大概估计. 取 $\tau_{21} = 10^{-9}$ s, $\tau_{42} = 10^{-12}$ s, 由此可得 $I_{s1} = 2.467 \times 10^6$ W \cdot cm $^{-2}$, $I_{s2} = 7.501 \times 10^9$ W \cdot cm $^{-2}$. 可以看出, 两者相差 3 个数量级. 在一般光强下, 基态的饱和吸收只能实现调 Q, 而不能实现被动锁模. 但是, 如果腔内光强足够大, 使得激发态吸收达到饱和, 则可以实现被动锁模.

2 实验装置及结果

2.1 实验装置

通过以上的理论分析可知, 要实现 BDN 的锁模运转, 必须有足够大的腔内光强. 鉴于此, 我们设计如图 3 所示的实验装置, 它采用凸 ARR 非稳腔结构. M_1 是曲率半径为 3 m 的凸面全反镜. 平面镜 M_2 , M_3 和 M_4 构成 ARR. 激光有效腔长为 154 cm, 由双脉冲氙灯泵浦尺寸为 $\varnothing 4.5$ mm \times 99.0 mm 的 Nd: YAG 激光工作物质. 实验中, 尽可能将 BDN 置于 ARR 中心, 以获得最强的光栅效应^[3]. 所用 BDN 染料均匀混和在醋酸纤维素酯内, 并经特种工艺成型加工为固态的薄膜元件, 其尺寸为 10.0 mm \times 10.0 mm \times 0.1 mm. 对于 1.06 μ m 小信号, 其透过率 $T_0 = 43\%$, 激光输出采用腔内侧面耦合输出, 输出镜 M_0 的反射与透射的比为 50/50. 采用 PT-1 型激光能量计测量输出能量; 采用 PIN 管探测器接收激光, 并由 Tektronix 公司的 TDS3032B 型数字式存储示波器观察脉冲波形.

2.2 实验结果与分析

实验过程中, 控制泵浦电压使激光器逐渐变化到稳定的锁模运转. 图 4 是示波器观测到的波形. 当锁模几率比较高(大于 60%)时, 测定输出能量(为 10 次以上测定的平均值), 得到平均能量 \bar{E} 为 22.09 mJ, 能量起伏 $\Delta E/\bar{E}$ 为 1.6% 稳定的锁模

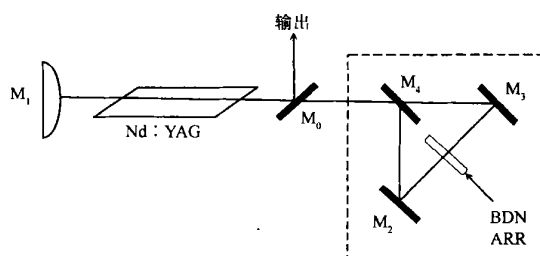


图 3 实验装置简图

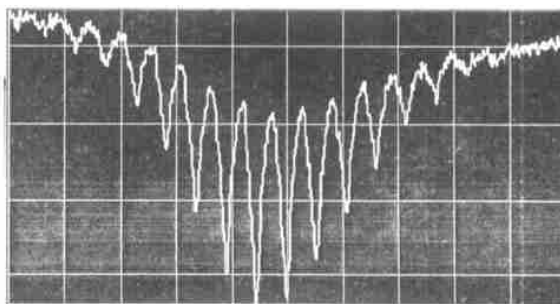


图 4 锁模脉冲串(20 ns \cdot 格 $^{-1}$)

单脉冲序列. 其中, $\Delta E/\bar{E} = \sum_{i=1}^n |E_i - \bar{E}|/n\bar{E}$. 由图 4 可粗略估计, 锁模脉冲序列中两相邻的脉冲的时间间隔均为 10 ns, 恰好为腔内来回一周的渡越时间 $2L/c$. 采用凸 ARR 非稳腔结构, 把 BDN 置于 ARR 中间, 相向传播的两列脉冲在晶体中形成的瞬态光栅效应, 使晶体内的光强出现明显的强弱空间分布, 而在强度最大处容易导致激发态吸收饱和^[3]. 由于非稳腔结构有大的可控模体积, 可充分和有效地利用激光介质中的反转粒子数, 可获得强的激光输出. 这对 BDN 的锁模运转也是有利的. 实验得到的锁模激光输出的能量起伏仅为 1.6%, 比相关文献报道的 5%~8%^[7]要稳定很多. 输出稳定性的提高, 主要得益于 ARR 的引入. 激光的稳定性可由稳定参数 S 表征, $S = k(\sigma_a/\sigma_g)$, S 越大, 稳定性越好. 其中, k 为光束在增益介质处和吸收介质处的光束面积之比, σ_a 为饱和吸收体的吸收横截面, σ_g 为增益介质的放大横截面. 与脉冲单向通过可饱和吸收体相比, ARR 结构中两脉冲在可饱和吸收体处精确对撞等效于 σ_a 增大 3 倍. 因此, S 得到很大提高^[3].

3 结束语

本文从理论和实验两个方面, 探讨了基态恢复时间为 ns 量级的 BDN 染料的被动锁模特性. 采用凸-ARR(抗共振环)非稳腔结构进行了实验验证, 理论结果和实验结果基本吻合, 且所得到的锁模激光输出的能量稳定性比相关文献报道的要好很多. 将 BDN 用作被动锁模元件, 以及 ARR 的引入, 具有一定的创新性和实用性, 对此类激光器的研究与应用有一定的参考价值.

参 考 文 献

- 1 Magde D, Bushaw B A, Windso M M. Q switching and mode locking the Nd³⁺-glass laser with the nickel dithienes[J]. IEEE. Journal of Quantum Electronics, 1974, QE-10(3):394~ 395
- 2 Chen Youming, Zhou Fuzheng, Hu Wentao, et al. Transverse diode pumped passively Q-switched Nd:YAG slab laser[J]. Laser and Infrared, 1994, 24(6): 45~ 47
- 3 吴逢铁, 张文珍, 姚关清. 高稳定高能量被动调 Q 激光[J]. 光电子·激光, 2003, 14(3):232~ 234
- 4 徐荣甫, 刘敬海. 激光器件与技术教程[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1986. 388~ 389
- 5 Eason R W, Greenhow R C, Goodall D M, et al. Ground state repopulation time and saturation behaviour of BDNII in tetrahydrothiophene 1,1-dioxide[J]. Optics Communications, 1980, 32(1): 113~ 118
- 6 Leng Yuxin, Lu haihe, Lin Lihuang, et al. Active passive mode locking using Cr⁴⁺:YAG crystal as saturable absorber[J]. Optics & Laser Technology, 2001, 33:403~ 407
- 7 张行愚, 王青圃. BDN 染料的锁模特性和基态恢复时间[J]. 激光杂志, 1992, 13(3): 135~ 137

Realization of Stable Passive Mode-locking in BDN

by Using Anti-Resonant Ring

Yao Guanqing Wu Fengtie

(College of Info. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou, China)

Abstract By analysing energy level structure of BDN dye in combination with rate equations, the authors point out the possibility of realizing passive mode locking by using BDN dye film with relaxation time of ground state in nanosecond magnitude. In pulsed Nd:YAG laser of convex anti resonant ring (ARR) unstable resonator structure, passive mode locked operation was realized by using BDN as saturable absorber. The stable mode locked single pulse train with average energy of 22.1 mJ and energy fluctuation of 1.6% were obtained.

Keywords BDN dye film, anti resonant ring, excited state absorption, passive mode locking, optical intensity of saturation