

氙灯泵浦新型晶体 Nd: S-VAP 调 Q 激光器腔内倍频研究*

赵圣之 王青圃 张行愚 王松涛 赵 路

(山东大学光学系, 济南 250100)

孙连科 张少军

(山东大学晶体所, 济南 25100)

摘 要 采用氙灯泵浦晶体 Nd: S-VAP, KTP 晶体腔内倍频, 实现了 Nd: S-VAP 晶体 $0.5325\ \mu\text{m}$ 绿光激光 BDN 染料片调 Q 运转。测量了输出绿光激光的特性及不同腔长和染料片小信号透过率情况下的输出能量及脉冲宽度, 给出了染料片调 Q 腔内倍频的耦合波方程组, 数值求解方程组, 所得的理论数据与实验结果很好地相符。

关键词 Nd: S-VAP 晶体, 腔内倍频, 染料片调 Q 运转。

1 引 言

近年来, 用激光二极管(LD)和微型氙灯泵浦的低阈值、高效率小型激光器, 经倍频实现绿光输出的器件受到人们的特别关注, 因为这种小型、高效、稳定的绿光相干光源可广泛应用于光学存储、光学测量、动态摄影、光纤通讯、生物工程等研究领域^[1]。由于这种激光器的实现要求激活介质具有较大的发射截面、长的辐射寿命、低的被动损耗及有效的吸收带, 所以众多的研究人员致力于研制高掺钕浓度、短吸收深度、低阈值、高效率的优质晶体, 如 Nd: YVO₄^[2]、Nd: Ca₅(PO₄)₃F^[3]、Nd: Sr₅(PO₄)₃F^[4]、Nd: Sr₅(VO₄)₃F^[5]等。其中 Nd: Sr₅(PO₄)₃F 和 Nd: Sr₅(VO₄)₃F 晶体以其阈值低、效率高、物化性能稳定、生长容易、价格低廉等优点, 被认为是小型激光器理想的工作物质。掺钕氟钒酸锶, 即 Nd: Sr₅(VO₄)₃F, 简称 Nd: S-VAP, 是一种用提拉法研究成功的单轴晶体, 其折射率为 1.809 和 1.810。它具有宽的有效的吸收带, 适用于氙灯做泵浦源。在 583.0 nm 和 809.0 nm 处有两个强吸收峰, 其 809 nm 处的吸收峰适用于激光二极管泵浦。Nd: S-VAP 晶体的发射截面为 $5 \times 10^{-19}\ \text{cm}^2$, 辐射寿命为 230 μs 。通过对 Nd: S-VAP 晶体进行调谐染料激光泵浦^[6]、氙灯泵浦^[7]、激光二极管泵浦^[8] $1.065\ \mu\text{m}$ 激光性能研究, 表明 Nd: S-VAP 是一种高效优质的激光工作物质。

本文用氙灯泵浦、KTP 晶体腔内倍频, 实现了 Nd: S-VAP 晶体 $0.5325\ \mu\text{m}$ 绿光激光 BDN 染料片调 Q 运转。同时, 从理论上给出了腔内倍频、染料片调 Q 工作原理的耦合波方程组, 对该方程组数值求解所得的理论结果与实验结果较好地相符。

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1995 年 11 月 26 日; 收到修改稿日期: 1996 年 3 月 8 日

2 理 论

设腔内基频光和倍频光均为理想平面波, 且仅是时间的函数。当激活介质的长度为 l_1 , 腔内倍频晶体长度 l_2 , 光学谐振腔长为 L , 激光器工作在理想共线匹配条件时, 基频光和倍频光在腔内往返一周的时间为 $t_r = [2l_1n_1 + 2l_2n_2 + 2(L - l_1 - l_2)]/c$, n_1, n_2 为激活晶体及倍频晶体的折射率, c 为光速。如果用 I_1, I_2 分别表示腔内基频波和倍频波的光强, n 表示反转粒子数密度, 忽略基频波和倍频波群速度的差别, 由激光理论^[9]和耦合波方程^[10], 可以导出 BDN 染料片调 Q 时的激光器工作原理的方程组:

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{I_1}{t_r} \{ 2\sigma n_1 l_1 - [2\alpha_1 l_1 + 2\alpha_2 l_2 + \delta_1 + \ln(1/T_1^2) + 2l_2 B d_{eff} I_2^{\frac{1}{2}}] \} \quad (1)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = \left[\frac{I_1}{t_r} \right] 2l_2 B d_{eff} I_2^{\frac{1}{2}} - \frac{I_2}{t_r} [2\alpha_1' l_1 + 2\alpha_2' l_2 + \delta_2 + \ln(1/T_2^2)] \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = - \frac{4\sigma_n I_1}{h\nu_1} \quad (3)$$

式中 σ 为受激发射截面, α_1, α_1' 为激活介质对基频光和倍频光的吸收系数, α_2, α_2' 为倍频晶体对基频光和倍频光的吸收系, δ_1, δ_2 对应于其它损耗, d_{eff} 为有效非线性极化系数, B 为常数, $B = 16\pi^2 \nu_1 (2\pi/cn_2)^{\frac{1}{2}}/cn_1$, ν_1 为基频光频率, h 为普朗克常数, T_1, T_2 为 BDN 染料片对基频光和倍频光的透过率:

$$\ln(T_1/T_0) = (1/0.24 - 1) \ln \{ [1/0.24 + (I_1/I_s)] / [1/0.24 + (I_1 T_1/I_s)] \} \quad (4)$$

T_0 为染料片小信号透过率, I_s 为染料片的饱和光强。对一定的 T_0, T_2 近似为一常数。对我们的实验条件, $T_2 \approx 0.8$ 。

利用计算机数值求解联立方程(1)、(2)、(3)、(4), 可得出 Nd: S-VAP 晶体、KTP 腔内倍频、染料片调 Q 绿光脉冲的理论结果, 方程中各参量列表 1。

Table 1 Related parameters in equations (1), (2), (3) and (4)

$n(t=0)$	$[2\alpha_1 l_1 + 2\alpha_2 l_2 + \delta_1 + \ln(1/T_1^2)]/2\sigma l_1$	δ_1	0.584
σ	$5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$	δ_2	1.179
d_{eff}	7.4 pm/V	α_1	0.65 cm^{-1}
I_s	1.58 MW/cm^2	α_1'	0.80 cm^{-1}
n_1	1.810	α_2	1.54 cm^{-1}
n_2	1.788	α_2'	0.68 cm^{-1}

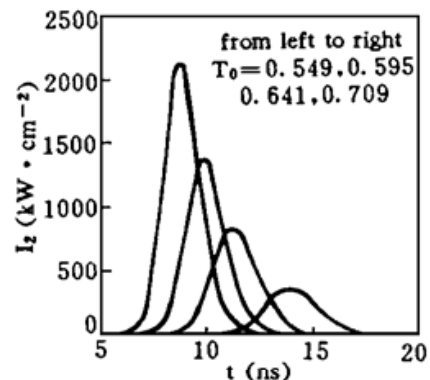
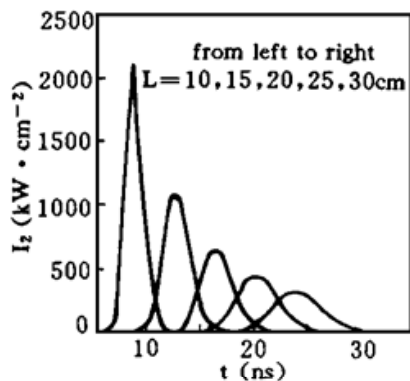


Fig. 1 Relation between $0.5325 \mu\text{m}$ pulse shape and cavity length L when $T_0 = 0.549$

Fig. 2 Relation between $0.5325 \mu\text{m}$ pulse shape and T_0 when $L = 10 \text{ cm}$

图 1 给出了 $T_0 = 0.549$ 时 $0.5325 \mu\text{m}$ 绿光脉冲形状与腔长 L 的关系, 图 2 给出了 $L = 10 \text{ cm}$ 时 $0.5325 \mu\text{m}$ 绿光脉冲形状与 T_0 的关系

3 实验与结果

3.1 实验装置

实验装置如图 3 所示。反射镜 R_1 、 R_2 构成平-平腔, R_1 对基频光和倍频光均为高反, R_2 对

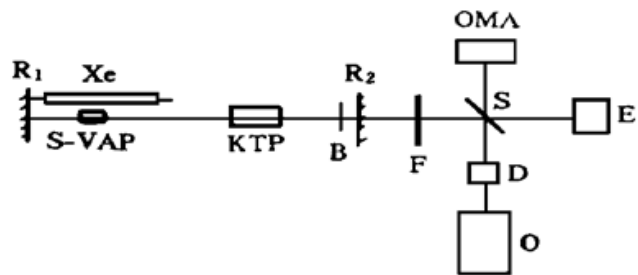


Fig. 3 Experiment setup

R_1, R_2 : reflector; Nd: S-VAP: Nd: S-VAP crystal; B: BDN dye film; Xe: Xenon flash lamp; KTP: KTP crystal; F: filter; S: splitter; OMA: optical multichannel analyzer; E: energy meter; D: detector; O: oscilloscope

基频光高反, 倍频光高透。Nd: S-VAP 晶体的尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 用尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的氙灯泵浦, 采用单椭圆聚光腔。尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的 KTP 晶体作为腔内倍频晶体, 采用 II 型相位匹配 ($\theta_m = 23.5^\circ$)。用于调 Q 的 BDN 染料片放在靠近 R_2 的地方。用 M1460 光学多道分析仪 (OMA-III R) 测量输出绿光的发射光谱, 用 NJ-J1 型激光能量计测量 $0.5325 \mu\text{m}$ 光脉冲的能量, 用 TEK-466 存储示波器测量脉冲的宽度。当所测脉宽太窄时, 对所观察信号进行解卷积处理, 以获得真实脉冲宽度。

3.2 实验结果

图 4 是光学多道分析仪测得的绿光谱线特性。绿光的中心波长为 $0.5325 \mu\text{m}$, 其峰值半宽度约 1.2 nm 。

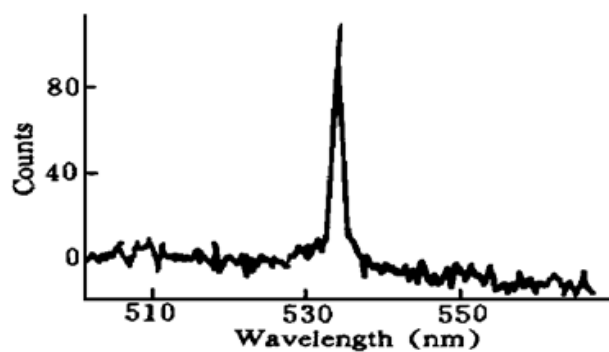


Fig. 4 Emission spectrum of green laser

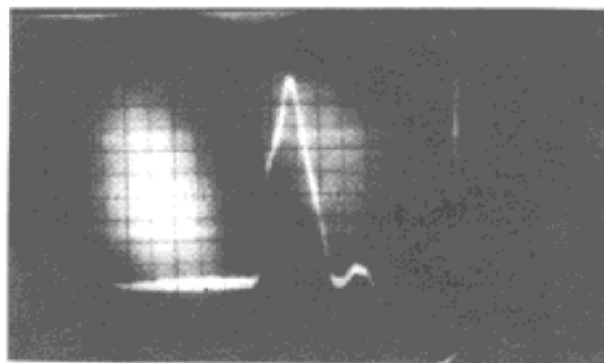


Fig. 5 Pulse shape of $0.5325 \mu\text{m}$ laser when $L = 10 \text{ cm}$, $T_0 = 0.549$

图 5 是 $0.5325 \mu\text{m}$ 绿光脉冲的示波器波型。图 6 和图 7 分别给出了在不同的谐振腔长度 L 和不同的染料片小信号透过率 T_0 情况下绿光能量和脉冲宽度。图示表明, 绿光脉冲的能量随腔长的增加而减小, 随所用染料片小信号透过率的减小而增大, 其脉冲宽度随腔长的增加而增大, 随所用染料片小信号透过率的减小而减小。当 $l = 10 \text{ cm}$, $T_0 = 0.549$ 时, 实验测得输出能量为 0.34 mJ , 脉冲宽度为 2 ns , 相当于峰值功率密度为 2.1 MW/cm^2 。实验表明, 缩短腔长和减小染料片小信号透过率是提高峰值功率的有效途径。但是, 腔长的缩短使得氙灯的长度减小, 较小的氙灯长度具有较小的泵浦能量, 而染料片小信号透过率的减小使得泵浦

的阈值能量增加。因此,在氙灯长度一定的情况下,染料片小信号透过率太小可能导致激光不能起振。所以,在一定的条件下,应合理选择腔长、氙灯长度、染料片小信号透过率,以期获得最佳的输出。

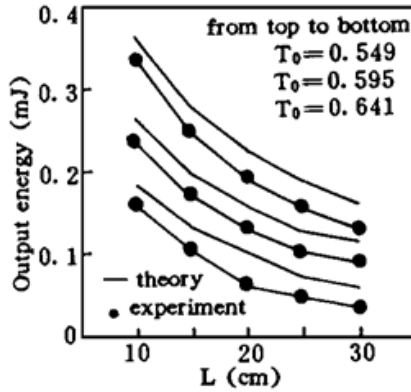


Fig. 6 Relations between laser energy and L in different T_0

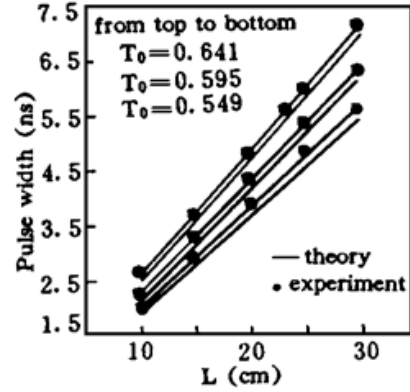


Fig. 7 Relations between laser energy and L in different T_0

从图 6 和图 7 中可以看出,理论数据与实验结果相符,但也有一定的差别。引起理论与实验差别的原因可能是由于假设 KTP 晶体是理想共线相位匹配的,实际上调整时不一定达到完全相位匹配,而不完全相位匹配致使有效非线性极化系数减小,因而绿光的脉冲能量下降。另外,表 1 中有些参量未必完全合乎实际,这也导致计算结果出现误差。

结 论 采用氙灯泵浦晶体 Nd: S-VAP, KTP 作为腔内倍频晶体,实现了 Nd: S-VAP 晶体 $0.5325 \mu\text{m}$ 绿光激光的 BDN 染料片调 Q 运转。数值求解其耦合波方程组,所得的理论数据与实验结果较好地相符。作者相信,这种阈值低、效率高、运转可靠的小型绿光相干光源,一定有着广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] J. T. Lin, Doubled jeopardy: the blue-green race's new plates. *Laser and Optonics*, 1990, **9**(12): 34 ~ 40
- [2] R. A. Field, M. Birnbaum, C. L. Fincher, Highly efficient Nd: YVO₄ diode-laser end-pumped laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(23): 1855~ 1857
- [3] X. X. Zhang, G. B. Loutts, M. Bass *et al.*, Growth of laser-quality single crystals of Nd³⁺-doped calcium fluorapatite and their efficient lasing performance. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(1): 10~ 12
- [4] X. X. Zhang, P. Hong, G. B. Loutts *et al.*, Efficient laser performance of Nd³⁺: Sr₅(PO₄)₃F at 1.059 and 1.328 μm . *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(24): 3205~ 3207
- [5] Layra D. Deloach, Stephen A. Payne, Bruce H. T. Chai *et al.*, Laser demonstration of neodymium-doped strontium chlorovanadate. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(10): 1208~ 1210
- [6] Zhao Shengzhi, Wang Qingpu, Zhang Xingyu, Low threshold and high efficiency Nd: S-VAP laser. *Chinese Phys. Lett.*, 1995, **12**(6): 355~ 357
- [7] Wang Qingpu, Zhao Shengzhi, Zhang Xingyu, Laser characteristics of low-threshold high-efficiency Nd: Sr₅(VO₄)₃F crystal. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(11): 1262~ 1264
- [8] 孙连科, 张少军, 程瑞平等, LD 纵向泵浦 Nd: S-VAP 晶体激光特性研究. *中国激光*, 1995, **A22**(12): 891~ 893
- [9] 徐荣甫, 刘敬海, 激光器件与技术教程. 北京, 北京工业学院出版社, 1986: 172~ 185
- [10] 沈元壤编, 顾世杰译, 非线性光学原理(上册), 北京, 北京科学出版社, 1987: 55~ 56

Intracavity-Doubling of a Q -Switched Nd: S-VAP Laser Pumped by Xenon Flash Lamp

Zhao Shengzhi Wang Qingpu Zhang Xingyu

Wang Songtao Zhao Lu

(*Optical Department, Shandong University, Jinan 250100*)

Sun Lianke Zhang Shaojun

(*Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100*)

(Received 26 November 1995; revised 8 March 1996)

Abstract By using xenon flash lamp as pump source, KTP as frequency-doubling crystal and BDN dye film as passive Q -switch, Nd: S-VAP green laser generation at $0.5325\ \mu\text{m}$ has been realized. The green laser output energy and pulse width were measured under the conditions of different resonator lengths and small-signal transmission of dye film. The Q -switching coupling wave rate equations for intracavity-doubling are given and the experiment results are in agreement with the numerical solutions of the equations.

Key words Nd: S-VAP crystal, intracavity-doubling, dye film Q -switch.