

利用 LiNbO₃ 电光调制器实现 宽频带激光输出*

谢兴龙 陈绍和 邓锡铭

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 利用 LiNbO₃ 电光调制器理论上可以获得宽度达 100 GHz 的宽频带激光输出, 并且其输出激光脉冲的宽度和形状都能够由一台电脉冲发生器很方便地进行控制。报道了宽频带激光器的实验结果, 利用 LD 泵浦的单纵模连续激光器作为光源, 可获得峰值功率为 4.2 mW, 带宽为 42 GHz 的激光脉冲输出。

关键词 宽频带激光器, LiNbO₃ 相位调制器, LD 泵浦

1 引言

在激光器发展的初期, 由于其自身的特点, 输出激光的频谱比较窄, 因而相干性好, 单色亮度高。但近年来, 随着用于 ICF(惯性约束核聚变) 的大功率固体激光驱动器的发展, 窄频带激光器暴露了自身所不能克服的缺点, 由于其频带窄, 激光脉冲的干涉、衍射以及受激散射效应都比较显著, ICF 打靶时, 瞬时功率达 $10^{12} \sim 10^{15}$ W 的激光脉冲经过光学元件时, 衍射和布里渊散射不可避免地造成激光能量的损失, 并且还会对光学元件造成损坏, 带来诸如靶面照明的非均匀性、波面畸变等问题^[1-3]。而宽带激光器在这方面可大大降低这种效应。本文讨论了利用 LiNbO₃ 电光相位调制器实现宽频带激光输出的方法和实验结果, 并证明这种激光器可作为 ICF 前级种子激光的原型结构。

2 宽频带激光器的基本原理

宽频带激光器的工作原理是利用 LiNbO₃ 相位调制器的频谱展宽效应, 通过对单纵模激光输出进行频谱展宽, 来获取宽频带激光脉冲输出的。如图 1 所示, 由激光器输出的单纵模连续激光经过耦合系统由单模保偏光纤输入到 LiNbO₃ 相位调制器, 当在相位调制器上加一正弦微波信号, 其折射率的变化为^[4,5]

$$n = n_e + n_m \cos(\omega_m t + \varphi_m)$$
$$n_m = - n_e^3 \gamma \frac{dV}{dz} / 2$$

式中 n_e 为未加微波信号时的折射率, n_m 为加微波信号时折射率变化的振幅, γ 为 LiNbO₃ 晶体

* 神光—精密化课题。

的电光系数, $-dV/dz$ 为正弦微波信号的电场振幅, φ_m 为附加相位, ω_m 为微波调制信号的频率。所以光场的角频率为

$$\begin{aligned}\omega(t) &= \frac{2\pi c}{\lambda} n = \\ &= \frac{2\pi c}{\lambda} n_e + \frac{2\pi c}{\lambda} n_m \cos(\omega_m t + \varphi_m) = \\ &= \omega + \frac{2\pi c}{\lambda} n_m \cos(\omega_m t + \varphi_m)\end{aligned}$$

故光场信号为

$$E(t) = A \exp[i\theta(t)] = A \exp\left[i \int_0^t \omega(t) dt\right] = A \exp[i\omega t + i\delta\theta \cos(\omega_m t + \varphi)]$$

取实部有

$$E(t) = A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\delta\theta) \cos(\omega + n\omega_m)t$$

式中 $J_n(\delta\theta)$ 为 n 阶贝塞尔函数, $\delta\theta = \frac{2\pi c}{\lambda\omega_m} n_m$ 为调制深度, $\varphi = \varphi_m + \frac{\pi}{2}$ 为附加相位。由此可以看出, 利用正弦微波对调制器进行调制, 可以获得频率为 $\omega + n\omega_m$ (n 为整数) 的旁带分量, 也就是说, 可以获得宽频带的激光输出。

3 宽频带激光器的实验结果及其分析

如图 1 所示, 宽频带激光器由 LD 泵浦的单纵模连续激光器和 LiNbO_3 波导相位调制器两部分组成。1 为 LD 泵浦源, 波长为 808 nm, 半宽度为 2 nm, 工作在 500 mW 左右, 2, 3 为耦合透镜, 激光介质为 Nd:YAG, 长度为 5 mm, 直径为 5 mm, 左端面对 808 nm 镀增透膜, 对 1.06 μm 镀全反膜; 5, 6 分别是布儒斯特薄片和 KDP 双折射选单纵模晶体, 7 为输出腔镜, 曲率半径 $R = 150$ mm, 对波长为 1.06 μm 的激光其透过率为 2%。旋转 KDP 选模晶体, 使其快、慢轴与布儒斯特平板的 P 偏振方向成 45° , 此时激光器有最大的选单纵模能力, 固定腔长为 55

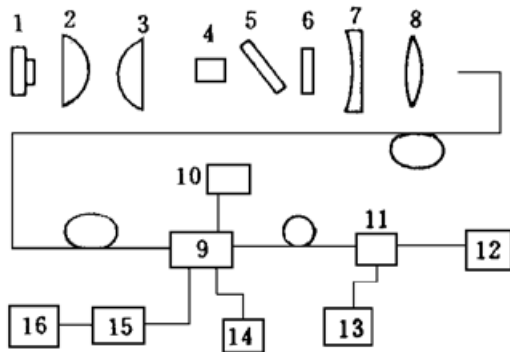


图 1 宽带激光器实验框图

Fig. 1 Diagram of the broadband laser

1: LD laser; 2, 3: coupling lens; 4: Nd:YAG rod; 5: Brewster slab; 6: KDP crystal; 7: output lens; 8: optical fiber coupling lens; 9: LiNbO_3 phase modulator; 10: bias voltage power; 11: scanning F-P etalon; 12: oscilloscope; 13: saw-wave generator; 14: electrical pulse generator; 15: micro-wave amplifier; 16: micro-wave power

mm, 我们获得了 40 mW 的单纵模输出。单纵模激光输出经过耦合系统 8 由单模保偏光纤输入到相位调制器 9, 相位调制器上升时间大约为 100 ps, 相位调制半波电压为 9.0 V, 微波调制频率为 6.14~6.40 GHz, 保偏消光比为 30 dB, 耦合损耗~10 dB。在图 1 中, 10 为直流稳压电源, 当加一特定电压, 可以使调制器后的激光输出为零, 14 为电脉冲发生器, 其电脉冲幅度与直流稳压器的输出相同, 从而可以通过电脉冲发生器的形状和幅度来控制宽频带激光器输出脉冲的幅度和形状。16 为微波发生器, 工作频率为 5~8 GHz 可调, 重复频率为 1 kHz, 输出脉宽为 1 μs ; 15 为微波放大器, 微波调制信号经过放大之后, 输入相位调制器的平均功率为 12.3 W, 11 为 F-P 扫描干涉仪, 13 为锯齿波发生器, 12 为示波器。从理论上讲, 带宽可以无限宽, 但实际上由于所产生的旁带数目及能量均受调制器上所加微波信号功率的大小所限制, 如图 2 所示, 给出了不同

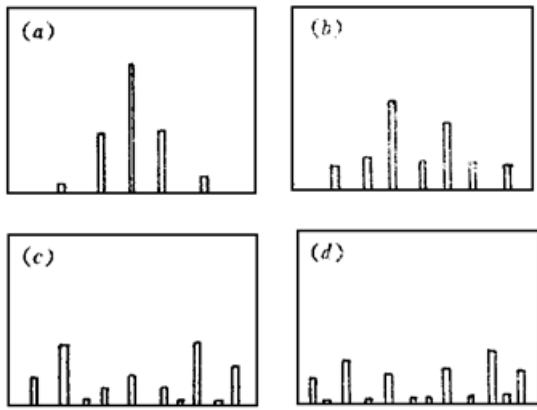


图 2 由相位调制器所产生的激光旁带
(a) $\delta\theta = 0.7$; (b) $\delta\theta = 1.8$; (c) $\delta\theta = 4.5$; (d) $\delta\theta = 5.6$
($\delta\theta$ 为调制频率为 6.84 GHz 时的相位调制深度)

Fig. 2 Laser sidebands produced by phase modulator
(a) $\delta\theta = 0.7$; (b) $\delta\theta = 1.8$; (c) $\delta\theta = 4.5$; (d) $\delta\theta = 5.6$
($\delta\theta$ is the depth of the phase modulation with the modulation frequency 6.84 GHz)

旁呈现对称的排列, 但通过改变微波调制信号的频率, 至少可以看到主带的一边有三条旁带, 也就是说, 输出激光脉冲的总带宽至少 6 倍于微波调制信号的频率(约 7 GHz), 即 42 GHz。换用高分辨率的示波器, 测得宽频带激光脉冲的峰值功率大约为 4.2 mW, 脉冲宽度为 1 μ s, 重复频率为 1 kHz。

4 结 论

利用 LiNbO₃ 相位调制器可以获得宽频带激光输出, 从而为 ICF 激光驱动器的发展提供了一种新途径, 同时, 由于采用了 LD 泵浦和集成光学技术, 使得系统更具有稳定性, 并且易于小型化和调试, 但是由于利用这种方法所获得的激光输出功率不会太高, 所以还必须发展相应的高增益、低噪声放大系统, 近年来已经发展得比较成熟的再生放大器, 其增益可达到足以满足宽频带激光器作为 ICF 前级种子激光的要求。故此, 这种方法具有较大的发展前途。

调制深度下激光旁带数目和能量分布情况。由此可以看出, 相邻的旁带间隔固定在微波调制频率上, 当微波功率增加时, 调制深度 $\delta\theta$ 增大, 将有更多的激光能量分布在旁带上, 从而旁带的数目增加, 激光总频带就变得越宽, 但由于微波信号功率过大会损坏调制器, 所以微波输入功率限制在 20 W 以内。

图 3 为示波器所显示的宽频带输出波形, 锯齿波为 F-P 上所加的扫描电压信号, a_1, a_2 对应于不同扫描周期内同一激光纵模, $b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2$ 则分别对应于相应的旁带输出, 只是由于所用的 F-P 扫描干涉仪自由光谱区较窄, 只有 4 GHz 左右, 所以分开的旁带激光的位置在扫描光谱上经过了多次折叠, 不能在主激光频带两

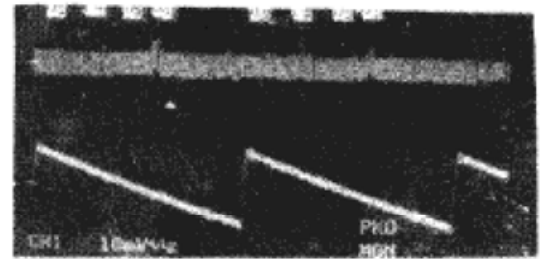


图 3 相位调制激光脉冲

Fig. 3 Photograph of the phase modulated laser pulse

参 考 文 献

- 1 R. B. Wilcox, D. F. Browning. Oscillator and pulse-forming system for the beamlet. LLNL Rep. UCRL-50021-95-Vol. 1, 115~ 122
- 2 R. B. Wilcox. Oscillator and pulse-forming system for the beam let. Conference on Lasers and Electro-optics. OSA, Washington, DC, CWI6, 1992, 451~ 457
- 3 S. C. Burkhart, F. A. Penko. Temporal pulse shaping of fiber-optic laser beams. LLNL Rep. UCRL-105821-96-2, p76~ 81
- 4 Ferrel. G. Strmlez. Introduction to communication system (—edition). Addison-wiley Publishing Company, 1982, Ch. —, Section =
- 5 Xie Xinglong, Chen Shaohe, Zhou Liangzhi *et al.*. Continuously tunable system for arbitrarily forming of laser pulses using an integrated LiNbO₃ waveguide modulator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, 17 (4): 393~ 398

LD Pumped Nd:YAG Broadband Laser with LiNbO₃ Electro-optic Phase Modulator

Xie Xinglong Chen Shaohe Deng Ximing

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract Broadband laser can be obtained using a LiNbO₃ electro-optic phase modulator, furthermore, the width and the shape of the broadband laser pulse can be easily controlled by an electrical pulse generator. It is reported in this paper that using a LD pumped single-longitudinal mode CW laser as the light source, the peak-power and the whole band width of the broadband laser pulse obtained reach 4.2 mW and at least 42 GHz respectively.

Key words broadband laser, LiNbO₃ phase modulator, LD pump

TEA CO₂ 序列带激光

序列带 CO₂ 激光属 $00^0n - [10^0(n-1), 02^0(n-1)]$, $n \geq 2$ 的跃迁。较易实现的是 $00^02 - [10^01, 02^01]$ 跃迁, 可使 CO₂ 激光谱线数增加一倍, 且不会被 CO₂ 气体吸收。在选择性光物理与光化学、激光光谱、光泵激光器、大气传输等领域有重要意义。工作于常规带和序列带、热带的 TEA CO₂ 激光器被国外列为光雷达系统的最佳光源之一, 并在大气污染物检测方面获得成功。

我们采用尺寸为 $85 \times 3 \times 3$ (cm) 的横向放电区, 紫外预电离, 单次注入能量为 80 J。腔内设置 2 m 长 CO₂ 热池, 加热区为 1 m, 内含 CO₂ 55900 Pa (~ 600 K)。谐振腔调谐元件为国产凹面闪耀光栅, 每毫米刻线 150 条, 输出镜采用 Ge 平行平面镜, 反射率为 65%, 80% 两种。在总压为 1 atm, CO₂·N₂·He = 0.10·0.15·0.75, 0.10·0.17·0.73, 0.11·0.14·0.75, 0.125·0.125·0.75 等配气条件均实现序列带激光输出。在 00^02-10^01 , 00^02-02^01 共实现 21 条谱线激光输出。大部分分布于 00^02-10^01 带。数条线达每脉冲 500 mJ, 最强线达每脉冲 902 mJ。

输出激光波长的测试由日本产 CT-50 型单色仪进行, 序列带和常规带谱线测试对照进行。实测表明所获序列带激光波长都与最邻近的常规带谱线位置明显分开, 一般移动 3 nm。当放电、混合气、热池状态未达正常时, 往往输出的均是常规谱线, 当放电、混合气、热池基本达到前述实验条件时, 输出各谱线一般均是序列带单线输出, 个别线含有较小能量相邻常规线输出。

四川大学光电科学技术系 李育德 周业为 张秀云 王大可 成都 610064

1997-08-17 收稿; 1997-11-20 收到修改稿