

自注入式固体 $Ce^{3+} : LuLiF_4$ 激光器中 紫外亚纳秒脉冲序列的产生

刘振林^{a, b, c} 猿仓信彦^b 濑川勇三郎^a

a, 理化学研究所光动力研究中心, 980 日本国宫城县仙台市

b, 岗崎国立共同研究机械分子科学研究所, 444 日本国爱知县岗崎市

摘 要 提出一个注入式结构, 它可以用于各种脉冲激光器中产生短脉冲序列。在这个结构中, 从短腔种子激光器产生单一的亚纳秒脉冲, 这个种子脉冲在同一增益介质中被再生放大, 直到增益衰减到最小。用一个 10 ns 脉冲激光器泵浦固体激光介质 $Ce^{3+} : LuLiF_4$, 直接地, 被动地产生了紫外亚纳秒脉冲序列。

关键词 自注入种子, 短脉冲序列, 紫外。

1 引 言

自从十数年前 $Ce : YLiF_4$ ^[1], LaF_3 ^[2] 被报道之后, 最近又出现了一些新的固体可调谐紫外激光材料。这些材料都是掺 Ce^{3+} 离子的氟化晶体, 如 $LiCaAlF_6$ ^[3], $LiSrAlF_6$ ^[4, 5] 和 $LuLiF_4$ ^[6~8]。它们在紫外区域有较宽的增益带宽, 这对超短脉冲的产生与放大很重要。 $Ce^{3+} : LuLiF_4$ 出现于 1992 年, 潜在的可调谐范围为 305~ 340 nm^[6], 荧光寿命约为 40 ns, 辐射截面积约为 $10^{-17}/cm^2$; 与 $Ce^{3+} : YLiF_4$, LaF_3 相比, $Ce^{3+} : LuLiF_4$ 的一个很重要的优点在于它的光敏化效应减小^[7]; 与 $Ce^{3+} : LiCaAlF_6$, $LiSrAlF_6$ 相比的优点在于 $Ce^{3+} : LuLiF_4$ 晶体生长较容易。利用 $Ce^{3+} : LuLiF_4$, 作者曾做了皮秒脉冲放大实验^[8]。然而在紫外区域, 还没有象近红外可调谐激光材料(以掺钛宝石晶体为代表)那样直接产生短脉冲。这是因为实现 $Ce^{3+} : LuLiF_4$ 激光连续运转有困难, 而连续运转是利用克尔(Kerr)透镜非线性的锁模结构所必须的^[9]。

本文将提出一个新的结构: 自注入式结构。利用此结构, $Ce^{3+} : LuLiF_4$ 激光器可直接产生亚纳秒脉冲序列。

2 低 Q 值, 短腔激光器结构

实验中所用的柱状 $Ce^{3+} : LuLiF_4$ 晶体样品长为 2.5 cm, 直径为 5 mm, 在侧面有一个抛

c, 国内单位: 中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022。

收稿日期: 1995 年 11 月 28 日; 收到修改稿日期: 1996 年 5 月 6 日

光的平面窗口,它平行于样品的纵轴。样品两个抛光的端面及侧窗平面均没有镀膜。

为了研究短脉冲产生过程,实验采用 3 cm 长的激光谐振腔,它由一个平面高反射镜和一个透过率为 70% 的平面耦合输出镜构成。泵浦光源为 KrF 准分子激光器,激光波长为 248 nm,脉冲宽度为 10 ns。用焦距为 20 cm 的柱透镜将 50 mJ 的 KrF 准分子脉冲激光聚焦在 $\text{Ce}^{3+}:\text{LuLiF}_4$ 晶体的侧面窗口上,得到了 2 mJ 的脉冲激光输出,波长为 325 nm。从阈值开始逐渐增大泵浦激光能量,产生的脉冲激光也由单一脉冲变成多脉冲,脉冲宽度均为数纳秒。

用晶体的一个端面的一个透过率为 30% 的平面耦合输出镜构成低 Q 值谐振腔。在 40 mJ 的 KrF 准分子脉冲激光泵浦下,从平面耦合输出镜一侧得到 $3 \mu\text{J}$ 的单一脉冲激光输出。用条纹相机测得的最短的激光脉冲宽度为 750 ps。由此可以看出,在常用的 10 ns KrF 准分子脉冲激光泵浦下,从低 Q 值,短腔 $\text{Ce}^{3+}:\text{LuLiF}_4$ 激光器可以很容易地获得单一短脉冲输出。

3 自注入种子脉冲序列激光器结构

为了得到较高的能量耦合输出,采用自注入种子脉冲序列激光器结构以产生短脉冲序列。与以前报道的自注入式结构^[10]相比,自注入种子脉冲序列激光器结构的优点在于它不需要普克耳(Pockels)盒或者时间同步控制。自注入种子脉冲序列激光器由一个脉冲种子激光腔和一个反馈激光腔构成。在种子激光腔中,增益衰减很小的情况下产生单一短脉冲。这个短脉冲将被注入到反馈激光腔内,再生放大过程将持续到增益变得最小。

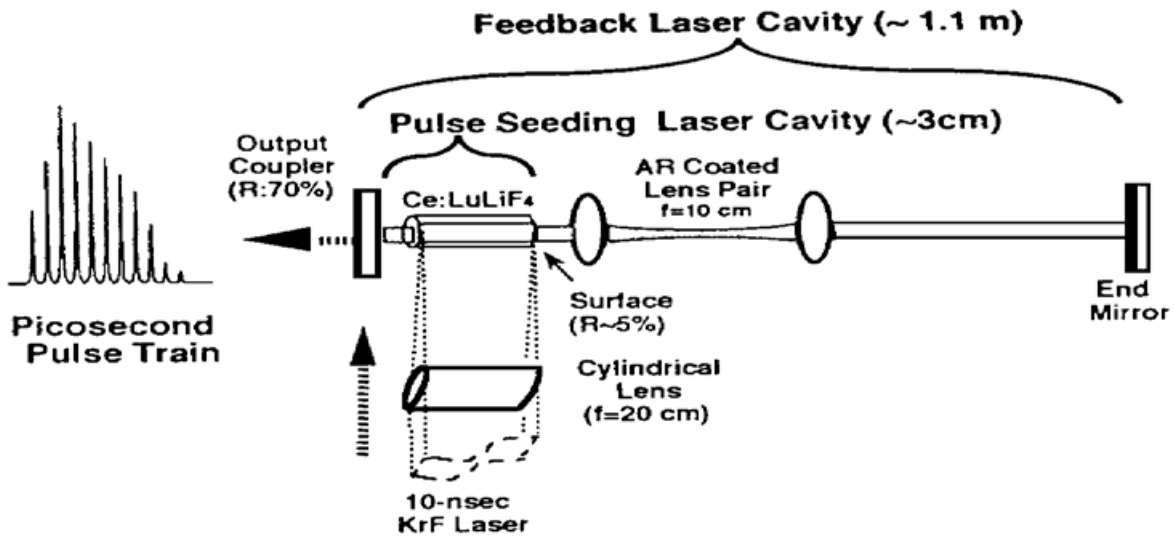


Fig. 1 Experimental setup for the self-injection seeded pulse train (SSPT) ultraviolet sub-nanosecond $\text{Ce}^{3+}:\text{LuLiF}_4$ laser oscillator

自注入种子脉冲序列 $\text{Ce}^{3+}:\text{LuLiF}_4$ 激光器的实验装置示于图 1。脉冲种子激光腔与前面所述一样(长 3 cm, 由一个透过率为 30% 的平面耦合输出镜和 $\text{Ce}^{3+}:\text{LuLiF}_4$ 晶体的表面反射构成)。从单一种子脉冲(图 2(a))和亚纳秒脉冲序列(图 2(b))的示波器显示照片可以看出,自注入种子脉冲序列激光器结构在 $\text{Ce}^{3+}:\text{LuLiF}_4$ 激光器中工作得很好。为了使反馈激光腔和种子激光腔模式适当匹配,在反馈激光腔中插入一对镀有减反射膜的共焦透镜,焦距为 10 cm。调节两个透镜之间的距离,使亚纳秒脉冲序列(图 2(b))中有更多的脉冲,即可得到更大的脉冲序列能量输出。在泵浦脉冲能量为 40 mJ 的情况下, $3 \mu\text{J}$ 、325 nm、750 ps 的种子脉冲被放大到 $60 \mu\text{J}$ (整个脉冲序列)。在这个自注入种子放大过程中,通过条纹相机的观测(图 3)表明:脉冲宽度和光谱宽度都没有变化。这说明这种激光器的输出特性完全决定于脉冲种子

激光。实验中的参数如下: $T_{r,ps} (200 \text{ ps}) \ll T_p (750 \text{ ps}) \ll T_{r,FB} (7.7 \text{ ns}) \ll T_{G,eff} (\sim 50 \text{ ns})$, $F_{sp} (\sim 1 \text{ mJ/cm}^2) \ll F_{sat} (\sim 50 \text{ mJ/cm}^2)$ [$T_{r,ps}$ 为光在种子激光腔内往复传播一次所需时间; T_p 为种子脉冲宽度; $T_{r,FB}$ 为光在反馈激光腔内往复传播一次所需时间; $T_{G,eff}$ 为增益介质的有效寿命(考虑了受激时间和弛豫时间); F_{sp} 为腔内的种子脉冲光通量; F_{sat} : 增益介质的饱和光通量]。作者相信, 通过优化这些参数, 可以改进自注入种子脉冲序列 $\text{Ce}^{3+} : \text{LuLiF}_4$ 激光器的运转性能。

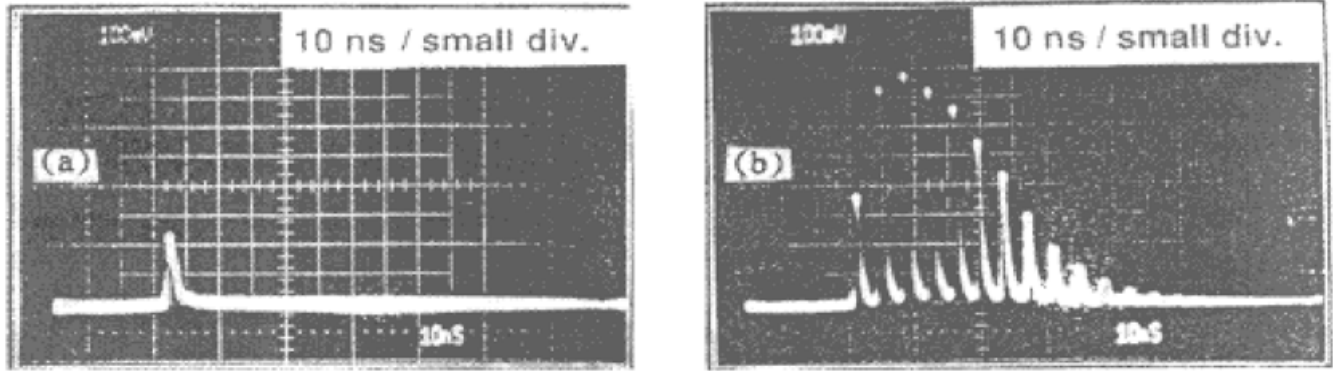


Fig. 2 (a) Oscilloscope photograph of the seeding pulse. (b) oscilloscope photograph of the pulse train

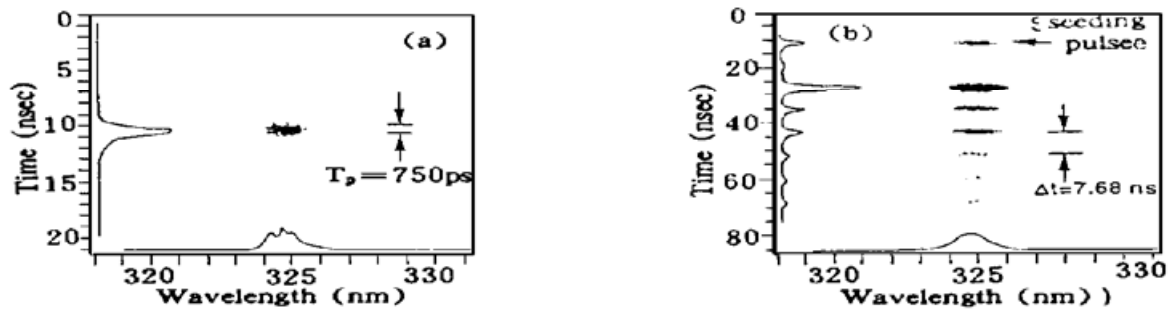


Fig. 3 (a) Spectral and temporal resolved streak camera image of the injection seeding pulse. (b) Spectral and temporal resolved streak camera image of the pulse train

4 讨 论

虽然反馈激光腔具有较高的 Q 值, 但是光在反馈激光腔内往复传播一次所需时间 $T_{r,FB}$ 较长, 致使反馈激光腔在单位时间内的增益小于种子激光腔在单位时间内的增益。在本实验中, $\text{Ce}^{3+} : \text{LuLiF}_4$ 晶体的单程小信号增益 $G = 4^{[8]}$, $T_{r,FB} = 7.7 \text{ ns}$, $T_{r,ps} = 200 \text{ ps}$ 。在 7.7 ns 的时间里, 反馈激光腔的增益 $G_{FB} = 8$; 在此时间内光在种子激光腔内往复传播 38 次, 增益 $G_{FB} = [4 \times (1 - T)]^{72} = 27225$ 。因此, 种子激光腔会优先振荡产生激光。另外, 由文献[5]可知, 腔内激光振荡建立时间 τ_{cav} 可表示为:

$$\tau_{cav} = [\tau_r \ln(E/h\nu)] / [2 \ln(G) + \ln(1 - T)]$$

式中 τ_r 为光在激光腔内往复传播一次所需时间, E 为一个特征能量, $h\nu$ 为光子能量, G 为单程小信号增益系数, T 为输出耦合系数。 $E/h\nu$ 的典型值为 $\exp(20)$ 。可以求得种子激光腔和反馈激光腔的腔内激光振荡建立时间分别为 2.6 ns 和 55.5 ns 。这也说明种子激光腔会优先振荡产生激光。

总之, 本文采用了自注入种子脉冲序列激光器结构以产生短脉冲。这种结构可广泛地应用于不同的脉冲激光器。应用此结构, 在常用的 10 ns KrF 准分子脉冲激光泵浦下, $\text{Ce}^{3+} : \text{LuLiF}_4$ 激光器可直接产生紫外亚纳脉冲序列。

参 考 文 献

- [1] D. J. Ehrlich, P. F. Moulton, R. M. Osgood, Jr., Ultraviolet solid-state Ce : YLF laser at 325 nm. *Opt. Lett.*, 1979, **4**(6) : 184~ 186
- [2] D. J. Ehrlich, P. F. Moulton, R. M. Osgood Jr., Optically pumped Ce : LaF₃ laser at 286 nm. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(8) : 339~ 341
- [3] M. A. Dubinskii, V. V. Semashko, A. K. Naumov *et al.*, Active medium for all-solid-state tunable UV laser, in *Advanced Solid-State Lasers*, A. A. Pinto and T. F. Fan, eds., *OSA Proceedings Series* (Optical Society of America, Washington, D. C.), 1993, **15** : 195
- [4] J. F. Pinto, G. H. Rosenblatt, L. Esterowitz *et al.*, Tunable solid-state laser action in Ce³⁺ : LiSrAlF₆. *Electron. Lett.*, **30**(3) : 240~ 241
- [5] C. D. Marshall, J. A. Speth, S. A. Payne *et al.*, Ultraviolet laser emission properties of Ce³⁺ doped LiSrAlF₆ and LiCaAlF₆. *J. Opt. Soc. Am. (B)* 1994, **11**(10) : 2054~ 2065
- [6] M. A. Dubinskii, R. Y. Abdulsabirov, S. L. Korableva *et al.*, New solid-state active medium for tunable ultraviolet lasers, in *International Quantum Electronics Conference* (Optical Society of America, Washington, D. C.), 1992, Paper FrL2.
- [7] M. A. Dubinskii, R. Y. Abdulsabirov, S. L. Korableva *et al.*, A new active medium for a tunable solid-state UV laser with an excimer pump. *Laser Physics*, 1994, **4**(3) : 480~ 484
- [8] N. Sarukura, Z. Liu, Y. Segawa *et al.*, Ce³⁺ : LuLiF₄ as a broadband ultraviolet amplification medium. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(3) : 294~ 296
- [9] N. Sarukura, Y. Ishida, Ultrashort pulse generation from a passively mode-locked Ti : sapphire laser based system. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(10) : 2134~ 2141
- [10] Y. S. Liu, Nanosecond pulse generation from a self-injected laser-pumped dye laser using a novel cavity-flipping technique. *Opt. Lett.*, 1978, **3**(5) : 167~ 169;
Y. S. Liu, Generation of high-power nanosecond pulses from a Q-switched Nd : YAG oscillator using intracavity-injecting technique. *Opt. Lett.*, 1979, **4**(11) : 372~ 374
- [11] M. J. LaGasse, R. W. Schoenlein, J. G. Fujimoto *et al.*, Amplification of femtosecond pulses in Ti : Al₂O₃ using an injection-seeded laser. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(24) : 1347~ 1349

Ultraviolet Subnanosecond Pulse Train Generation From a Self-Injected Solid-State Ce³⁺ : LuLiF₄ Laser

Liu Zhenlin* # Sarukura Nobuhiko# Segawa Yusaburo

(*Photodynamics Research Center, The Institute of Physical and Chemical Research, Nagamachi Koeji 19~ 1399, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980, Japan*)

(**New Address: Institute for Molecular Science, Okazaki National Research Institutes, Myodaiji, Okazaki 444, Japan*)

(Received 28 November 1995; revised 6 May 1996)

Abstract We propose a passive self-injected scheme for the generation of short-pulse trains from various pulsed lasers. In this scheme a single subnanosecond pulse is generated from a short-cavity seeding laser. The pulse is then returned to the same gain medium and amplified regeneratively until the gain is quenched completely. An ultraviolet subnanosecond pulse train is directly and passively generated from a solid-state laser medium (Ce³⁺ : LuLiF₄) pumped by a standard 10 nsec laser.

Key words self-injection-seeding, short-pulse train, ultraviolet.

* Permanent address: *The Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130022, China*