

低重复频率激光脉冲放大的时域理论研究

刘丰年, 张文平, 果鑫, 文鸿, 徐勇, 唐伟
(湖南工业大学计算机与通信学院, 湖南 株洲 412007)

摘要:分析低重复频率激光脉冲放大的时域特征, 得出激光脉冲放大的时域理论。采用时域理论研究了不同低重复频率的激光脉冲放大, 提出获得最佳转换效率时采用的放大方案; 并在已有研究中充分验证时域理论, 对部分实验提出改进方案。

关键词:多程脉冲放大; 时域理论; 增益; 转换效率

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.06.008

Theory research of time domain on pulse amplification of low-repetition-rate

LIU Feng-nian, ZHANG Wen-ping, GUO Xin, WEN Hong, XU Yong, TANG Wei
(School of Computer and Communications, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Characteristics of time domain on low-repetition-rate pulse amplification was analyzed, the time domain theory of laser pulse amplification was obtained. The different low-repetition-rate pulse amplification was studied by using the time domain theory, and the amplification project was presented when the optimum conversion efficiency was gained, the time domain theory has been tested in reported experiments adequately, the improved project is proposed for the part of experiments.

Key words: multi-pass amplification; theory of time domain; gain; conversion efficiency

1 引言

低重复频率高能量脉冲激光在工业加工、生物医疗、军事等领域具有广泛的应用价值。从放大器结构分析, 获得高能量低重复频率的激光脉冲途径主要有两种方案: ①基于主振荡功率放大系统(master oscillator power amplifier, MOPA)的级联多级单程放大器^[1-8]; ②多程脉冲放大器^[9-15]。

基于MOPA系统的级联单程脉冲放大技术中, 低重复频率的脉冲种子光经过各级单程放大, 输入脉冲信号仅一次通过有源区, 在脉冲间隔的时间里, 有源区引起了大量的自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE), ASE不仅消耗了泵浦能量, 且被后面的多级放大系统继续放大, 降低输出信号的信噪比和放大系统的光-光转换效率。为了克服上述方案对低重复频率激光脉冲放大的不足, 人们对多程放大结构开展了广泛研究。

多程激光放大是基于偏振控制理论、环形腔行

波放大以及耦合模理论等而产生的一种激光放大技术。其技术难点在于采用特殊措施对放大器的输入信号和输出信号进行有效隔离, 使信号光两次(或更多次)通过有源区放大。多程放大的实质是人为控制下一个脉冲进入增益介质之前, 将前一个脉冲信号在增益介质内循环多次。研究目的在于: 提高脉冲放大的转换效率和单脉冲输出能量; 抑制自发辐射及自激振荡噪声^[9-15]。但已有的多程脉冲放大研究只从各自的实验条件出发, 针对某一种重复频率和脉冲宽度的脉冲采用多程放大。对多程放大的理论研究集中在输出的脉冲能量增益和频域(光谱范围)增益方面, 没有针对任一重复频率的多程放大进行系统时域理论分析和研究^[11-12]。

基金项目:湖南省自然科学基金项目(No. 11JJ3002); 湖南省研究生科研创新项目(No. CX2011B393)资助。

作者简介:刘丰年(1974-)女, 博士, 副教授, 研究方向为光子技术与现代光通信。E-mail: lfnjx@yahoo.com.cn

收稿日期:2012-11-19

针对上文所述脉冲放大的研究现状——时域理论研究的不足,本文将分析连续泵浦低重复频率脉冲放大的时域特征,并得出激光脉冲放大的时域理论。采用时域理论研究不同低重复频率的激光脉冲放大,提出获得最佳转换效率时采用的放大方案。并在已有研究中充分验证时域理论,对部分实验提出改进方案。该理论成果不仅在提高脉冲放大的转换效率上具有重要意义,还将在放大方案的选择上具有指导意义。

2 时域理论提出

首先对低重复频率脉冲进行界定。考虑某一重复频率脉冲进入单程放大器时刻开始计时,经过放大输出,离开增益介质时计时结束,确定脉冲在增益介质里行进所需要的时间 t 。将单程行进时间 t 与脉冲重复周期 T 比较,如果 $T > nt (n \geq 2)$,则可以认为该脉冲为低重复频率脉冲。

在图 1 所示的单程放大器理论模型中,假定增益介质的长度为 L ,其有效折射率为 n_{eff} ,信号脉冲的重复频率为 f ,放大器工作在连续泵浦状态。

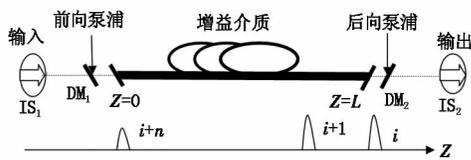


图 1 单程脉冲放大器的理论模型, $IS_{1,2}$: 隔离器; $DM_{1,2}$: 二向色镜

Fig. 1 model of pulse amplifier, $IS_{1,2}$: isolator_{1,2}, $DM_{1,2}$: Dichroic-mirror_{1,2}

首先考虑输入脉冲序列中某个脉冲 i ,它在增益介质中单程传输时间可以写为:

$$t = \frac{n_{\text{eff}}L}{c} \quad (1)$$

其中, c 为真空中的光速。

其次考虑输入脉冲的周期 T ,可以写为:

$$T = \frac{1}{f} \quad (2)$$

从图 1 分析进行如下讨论:

(1) 如果 $T \leq t$,则第 i 个脉冲未从增益介质输出,第 $(i+1)$ 个脉冲已进入(或正进入)增益介质。

(2) 如果 $T > nt (n \geq 2)$,即为本文所提的低重复频率脉冲。当第 i 个脉冲已从增益介质输出,第 $(i+1)$ 个脉冲还未进入增益介质。

现在引入一个系数 F ,并将 F 写成:

$$F = \frac{T}{t}$$

根据以上的分析,化简,可以得到:

$$F = \frac{c}{n_{\text{eff}}fL} \quad (3)$$

引入一个系数后,以上的讨论等价于 $F \geq 2$ 或者 $F \leq 1$ 而分析。当 $F \leq 1$ 时,对应于前面分析的第一种情况:即第 i 个脉冲未从增益介质输出,第 $(i+1)$ 个脉冲已进入增益介质。采用单程放大结构,转换效率就能达到脉冲放大需要的水平。 $F \geq 2$ 时,则对应前面的第二种情况:第 i 个脉冲已从增益介质输出,第 $(i+1)$ 个脉冲还未进入增益介质。宜采用多程放大结构,从而提高转换效率。以上分析将为低重复频率脉冲放大的实验研究提供理论指导。特别是在重复频率为千赫兹以下,如数百赫兹数量级范围,采用多程放大是首选方案。

从以上分析可以看出,对任意重复频率的激光脉冲放大时,可以根据输入脉冲的强度、泵浦水平计算出最佳光纤长度,然后利用上文中的式(3)计算因子 F 的值,并判断 F 的取值范围,最终决定采用单程放大还是多程放大。下面分析在 $F \geq 2$ 的情况下,采用多程放大的程数(用 N 表示)选择依据。为简便起见,设 $F \geq 2$ 且为整数 k ,由式(3)可得: $T = kt$,则采用的放大程数可以是小于(或等于) k 的任意正整数($N \leq k$)。在 $N = k$ 时,则表示前一个脉冲刚离开放大器,次后的脉冲正好进入。在 $N < k$ 时,表示前一个脉冲离开放大器的一段时间后,次后脉冲进入。但是由于放大器的增益饱和和效应,随着放大脉冲的能量越来越高,消耗上能级粒子数的速率越来越大,经过一定程数放大后,上能级粒子数来不及达到相应阈值,致使放大脉冲能量从极大值逐渐下降。因此,在连续泵浦的情况下, N 通常小于 k 。

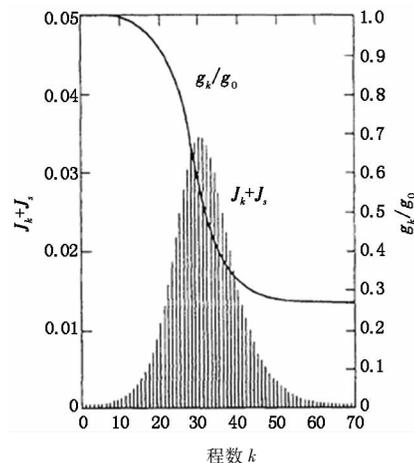


图 2 归一化能量密度 J_k/J_s 以及增益系数 g_k/g_0 随放大程数 k 的变化关系
Fig. 2 normalized fluence J_k/J_s and gain coefficient g_k/g_0 vs pass number k

多程放大的最佳程数 N 可以通过速率方程组计算得到^[16]。文献[16]中在特定参数下计算结果如图2所示,通过计算得出单脉冲能量增益饱和时放大程数为30程。

3 对现有工作的研究

在文献[4]~[8]中,对应于 $F \leq 1$ 的情况。文献[4]中放大脉冲的重复频率为478 MHz,因此脉冲在放大器增益介质中传输时间远远大于脉冲的周期, $F \approx 0.042$,仅采用单程放大,转换效率达60%以上。文献[5]中放大脉冲的重复频率为2.5 MHz,放大器增益介质长度为5 m, $F \approx 0.16$,采用单程放大,转换效率为22.9%,文献[6]中放大脉冲的重复频率为11.2 MHz,放大器增益介质长度为~1 m, $F \approx 0.357$,采用单程放大,转换效率约为9%。文献[7]、[8]中放大脉冲的重复频率分别为1 GHz和1.1 GHz,放大器长度约30 m, $F \approx 0.0067$, $F \approx 0.0060$,采用单程放大,转换效率分别为78%和76%。将文献中的系数 F 值与对应的转换效率之间关系如图3所示。

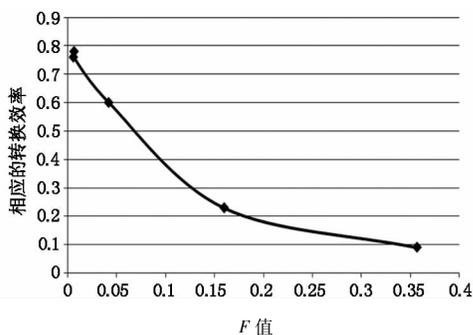


图3 已有研究文献[4]~[8]中转换效率与 F 值的关系曲线
Fig.3 relationship between the conversion efficiency and the factor F

以上的分析结果是在不同的实验条件下得出的,实验条件不同包含:增益介质的掺杂浓度及其吸收和转换效率的差异;各自的实验熔接损耗和器件的损耗特性差异等。但还是能从图中离散点的分布特征可以看出: F 的值越小,采用单程放大转换效率会越高。在 $F = 0.0067$ 和 $F = 0.0060$ 情况下出现微小偏差,归结于实验条件的差异造成。

在文献[9]~[15]中,对应于 $F \geq 2$ 的情况。因脉冲间隔时间里没有脉冲经过增益介质,处于泵浦阈值之上的增益介质因自发辐射,消耗大量的泵浦能量。导致放大器的转换效率降低。在这种情况下,采用双程和多程放大,将显著提高放大器的转换效率。在文献[9]中采用双程放大结构,对230 fs的脉冲直接进行放大,获得了330 fs,平均功率12 W的脉冲输出。转换效率由单程放大的2.3%提高到了7%。文献[10]中 M. Siebold 等人采用多程结构,相对单程,双程和四程技术转换效率分别提高了1倍和1.6倍。文献[13]中 Y. Zaouter 等人利用利用双程放大结构对脉冲进行啁啾放大,转换效率从单程的2%提高到42%。文献[14]中 Dimitrios N. Papadopoulos 等采用 Yb: KYW 双增益十程放大,获得宽带(~5.5 nm)27 mJ, 100 Hz的脉冲输出。文献[15]采用五程放大,获得平均功率50 W的飞秒脉冲。重复频率53 MHz。转换效率11.4%。以上各研究中的脉冲重复频率及周期、脉冲在放大器行进单程时间与 F 的值等列如表1所示。

表1 已有研究中 F 值、放大程数及转换效率的统计(“ Θ ”表示文献中未提供)

Tab.1 the value of F , number of pass and the conversion efficiency in reports

重复频率 T	单程行进时间 t/ns	F 值	转换效率 $\eta/\%$		出处
			单程	双程或多程	
30 MHz(33 ns)	0.8	41.5	2.3	7(双程)	[9]
1 Hz(1 s)	0.08		Θ	20(四程)	[10]
100 kHz(10 μs)	5	2×10^3	2	42(双程)	[13]
100 Hz(10 ms)	3.8	2.63×10^6	Θ	Θ (十程)	[14]
53 MHz(20 ns)	0.04	500	Θ	11.4(五程)	[15]

以上分析可以用图4所示环形腔多程放大的结构模型进行图解。在连续泵浦下,如果 $T > nt$ ($n \geq 2$),则采取一定措施(如偏振控制,光开关等)使得

输入的某个脉冲 i 在增益介质内多程放大,在次后的第 $(i+1)$ 个脉冲进入放大器时第 i 个脉冲已被耦合输出,从而降低脉冲间隔时间内增益介质的自发

辐射积累,抑制自发辐射噪声。

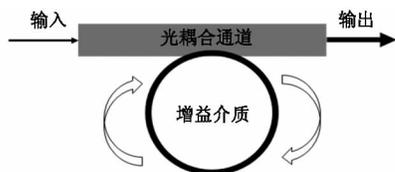


图4 环形腔多程脉冲放大器的结构模型

Fig.4 model of ring cavity pulse amplifier

4 对现有工作的改进

利用该时域分析方法对已有工作进行讨论。西安光机所在2010年的工作中^[17],采用两级单程对脉宽20 ns、重复频率为395 kHz的脉冲进行放大,基于以上时域理论分析, $T = 2.53 \mu\text{s}$, $t = 6 \text{ ns}$, $T > 2t$, $F \approx 422$,在对该脉冲源进一步放大时,宜采用多程放大方案,初步设想如图5所示,脉冲从种子源注入光耦合与控制的系统,同时耦合进增益介质(如掺铒光纤)内,通过对光程的控制,使脉冲达到能量饱和时即输出,增益介质的泵浦光可以通过波分复用耦合进增益光纤。为简单起见,图中未标出波分复用器。

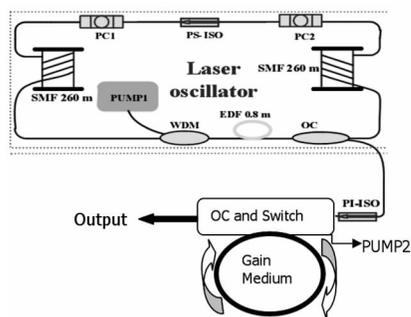


图5 对文献[17]中的放大方案进行改进

Fig.5 optimizational method for pulse amplifier

5 总结

分析了低重复频率激光脉冲放大的时域特征,得出激光脉冲放大的时域理论。采用时域理论研究了不同低重复频率的激光脉冲放大,通过分析系数 F 的值,提出获得最佳转换效率时采用的放大方案;并在已有研究中充分验证时域理论,对部分实验提出改进方案。

参考文献:

- [1] W Torruellas, et al. High peak power ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. Proc. SPIE 6102, 61020N, 2006.
- [2] C D Brooks, F Di Teodoro. 1 mJ energy, 1 MW peak-power, 10 W average-power, spectrally narrow, diffraction-limited pulses from a photonic-crystal fiber amplifier[J]. Optics Express, 2005, 13(22): 8999.
- [3] C D Brooks, F Di Teodoro. Multimegawatt peak-power, single-transverse-mode operation of a 100 μm core diameter, Yb-doped rodlike photonic crystal fiber amplifier[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89(11): 111119.
- [4] Shengping Chen, et al. 100 W all fiber picosecond MOPA laser[J]. Opt. Express, 2009, 17(26): 24008.
- [5] Lihmei Yang, Peng Wan, Vladimir Protopopov, et al. 2 μm femtosecond fiber laser at low repetition rate and high pulse energy[J]. Opt. Express, 2012, 20: 5683 - 5688.
- [6] William Renard, Guillaume Canat, Pierre Bourdon. 26 nJ picosecond solitons from thulium-doped single-mode master oscillator power fiber amplifier[J]. Opt. Lett., 2012, 37: 377 - 379.
- [7] P Dupriez, A Piper, et al. High average power, high repetition rate, picosecond pulsed fiber master oscillator power amplifier source seeded by a gain-switched laser diode at 1060 nm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(9): 1013 - 1015.
- [8] P Dupriez, et al. High-power, high repetition rate picosecond and femtosecond sources based on Yb-doped fiber amplification of VECSELs[J]. Optics Express, 2006, 14(21): 9611.
- [9] Yoann Zaouter, Igor Martial, et al. Direct amplification of ultra-short pulses in μ -pulling-down Yb:YAG single crystal fibers[J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 748 - 750.
- [10] M Siebold, M Loeser, U Schramm, et al. Er:Te high-efficiency, room-temperature nanosecond Yb:YAG laser[J]. Optics Express, 2009, 17(22): 19887 - 19893.
- [11] Eun Seong Lee, Jae Won Hahn. Four-pass amplifier for the pulsed amplification of a narrow-bandwidth continuous-wave dye laser[J]. Optics Letters, 1996, 21(22): 1836.
- [12] Yiyuh Hwang, Chau Hwang Lee, Jyhpyng Wang. Dynamic model of multipass ultrashort-pulse laser amplifiers and its application[J]. Applied Optics, 1997, 36(30): 7802.
- [13] Y Zaouter, A Courjaud, C H nninger, et al. Double-pass single stage short length Yb-doped rod type fibre chirped pulse amplifier system[J]. OSA/CLEO/QELS, 2010.
- [14] Papadopoulos D N, Pellegrina A, Ramirez L P, et al. Broadband high-energy diode-pumped Yb:KYW multipass amplifier[J]. Opt. Lett., 2011, 36(19): 3816.
- [15] C Y Ramirez-Corral, I J Thomson, C G Leburn, et al. Amplification of femtosecond pulses from an Yb:KYW oscillator in a high-power Yb:YAG planar waveguide amplifier, in lasers, sources, and related photonic devices[J]. OSA Technical Digest(CD) (Optical Society of America, 2012), Paper AT3A. 5.
- [16] W H Lowdermilk, J E Murray. Nd:YAG regenerative amplifier[J]. J. Appl. Phys., 1980, 51: 2436.
- [17] Dong Mao, Xueming Liu, Leiran Wang, et al. Generation and amplification of high-energy nanosecond pulses in a compact all-fiber laser[J]. Optics Express, 2010, 18(22): 23024 - 23029.