



· 惯性约束聚变物理与技术 ·

大能量全固态再生放大器研究进展*

伍圆军, 高妍琦, 华怡林, 谢庆南, 郑 权, 马伟新, 隋 展

(中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘 要: 在固体激光脉冲放大器中, 再生放大器具有增益高、光束质量好以及结构简单等优点, 得到了广泛的关注和应用。经过几十年的不断发展, 再生放大器已经能够实现数百 mJ 脉冲能量以及数 kW 均值功率的稳定输出。增益材料特性、腔型结构、泵浦能力、热效应、元器件性能等诸多方面都会影响再生放大器的输出特性, 其中增益材料特性是最根本的因素。由于特性不同, 基于不同增益材料体系的再生放大器在结构和功能上都会有较大的差异。基于不同的材料体系, 介绍了各类体系下的再生放大器在发展过程中遇到的关键共性问题, 以及几类典型的再生放大器及其特点。讨论了再生放大器未来的发展趋势。

关键词: 激光; 激光放大器; 再生放大器; 激光谐振腔; 薄片激光器

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.200089

Progress in high energy all-solid-state regenerative amplifier

Wu Yuanjun, Gao Yanqi, Hua Yilin, Xie Qingnan, Zheng Quan, Ma Weixin, Sui Zhan

(Shanghai Institute of Laser Plasma, CAEP, Shanghai 201800, China)

Abstract: Among solid-state laser amplifiers, regenerative amplifiers which have the advantages of high gain, good beam quality and simple structure, have been widely concerned and applied. After decades of development, regenerative amplifiers are able to realize pulse energy of several hundred millijoules and average power of several kilowatts in stable operation. The output performance of regenerative amplifiers is determined by properties of gain media, structure of cavity, pump condition, thermal effect and qualities of components. The properties of gain media are the most essential factors. Because of different properties of materials, regenerative amplifiers based on different kinds of materials present different structure and performance. Based on different material systems, the key common problems encountered in the development process of regenerative amplifiers under various systems, as well as several typical types of regenerative amplifiers and their characteristics are introduced. The future development trend of regenerative amplifiers is discussed.

Key words: laser; laser amplifier; regenerative amplifier; laser cavity; thin-disk laser

自 1960 年第一台红宝石激光器诞生以来, 人们就开始探索激光器, 尤其是固体激光器, 在关系国防安全和国计民生的众多领域(如激光武器^[1-2]、基础研究^[3-4]、设备制造等^[5-6])的应用潜力。目前, 激光已经在上述领域发挥了巨大的、不可替代的作用, 并且其应用场景和规模正在快速大幅拓展。随之而来的是人们对激光器特性(包括输出能量、输出功率、光束质量、输出稳定性、环境适应性等众多方面)的要求不断提升。再生放大器作为一种具备高增益、高光束质量、高稳定性等诸多优势的激光放大器, 一直以来都是人们实现高增益激光脉冲放大的首选方式, 受到广泛关注和深入研究。近几十年来, 再生放大器不断朝着更高的单脉冲能量和更高的平均功率发展。现如今, 再生放大器已经能够实现数百 mJ 的单脉冲能量以及数 kW 的平均功率。本文基于不同的材料体系, 介绍了各类体系下的再生放大器在发展过程中遇到的关键共性问题, 以及几类典型的再生放大器及其特点。讨论了再生放大器未来的发展趋势。

* 收稿日期: 2020-04-11; 修订日期: 2020-07-01

基金项目: 科学挑战计划项目(TZ2016005); 国家自然科学基金项目(11604317, 11604318, 11804321)

作者简介: 伍圆军(1996—), 男, 硕士研究生, 从事高功率激光技术研究; 1509136122@qq.com。

通信作者: 高妍琦(1983—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事高功率激光技术研究; liufenggyq@siom.ac.cn。

1 再生放大器

再生放大器本质上是一个独立的激光谐振腔,在模式匹配的情况下将种子光注入再生腔就能够实现脉冲的不断放大。通过改变偏振态,可以控制激光脉冲在再生腔的注入和导出。再生放大器中激光脉冲放大的程数任意可控,即使很低的单程增益也能够实现足够大的增益倍数。

再生放大器基本原理如图1所示。最开始,普克尔盒不加电压,处于非工作状态,不改变经过光束的偏振状态。P偏振的种子光通过法拉第旋光器和半波片后变为S偏振,能够通过薄膜偏振镜反射进入再生腔。进入再生腔后,经过四分之一波片后变为圆偏光,之后经腔反射镜M1反射,再次经过四分之一波片后变为P偏振线偏光。之后,光束可以通过薄膜偏振镜,进入激光放大介质。经来回两次放大以后,在其到达普克尔盒之前,普克尔盒加电(等效为四分之一波片),与四分之一波片效果抵消或组合成半波片,使得光束来回两次经过普克尔盒和四分之一波片后偏振状态保持不变,激光脉冲便能够在再生腔内来回振荡放大。当脉冲放大到足够能量的时候,关闭普克尔盒,当光束在此来回两次通过普克尔盒和四分之一波片后,光束偏振态变为S偏振并由薄膜偏振镜反射导出再生腔。光束导出后经过法拉第旋光器和半波片后偏振态仍保持S偏振,通过增加一个薄膜偏振镜就能够实现S偏振的输出光与P偏振的种子光分离,避免因放大后光束的原路返回导致的元器件损坏。

再生放大器同时具备激光放大器以及激光谐振腔的属性,放大器和谐振腔中涉及到的各种问题都能够在再生放大器中得到体现。首先,再生放大器作为激光放大器,其输出的脉冲能量一方面受增益材料的增益和储能能力所限制,这一方面的突破主要依靠激光材料的开发以及泵浦技术的改进,另一方面受限于各元件对于激光脉冲的承受能力,这方面的技术突破除元器件本身的技术进步外,主要依靠激光脉冲在时间和空间上的延展,以降低脉冲的峰值功率密度,包括使用大光束口径以及啁啾放大技术^[7]。再生放大器作为一种特殊的激光谐振腔,激光在放大过程中能够实现稳定的自再现模式,光束质量不会随着程数的增加而下降。此外普通谐振腔所涉及到的稳定性、像差等问题也都会在再生放大器中体现。其中热透镜效应导致的不稳定性是高功率再生放大器必须要考虑的问题,具体体现在能量提取效率和光束质量的下降,所以就需要通过合理的腔型设计使得再生腔对热透镜不敏感。

根据再生腔的腔型结构,再生放大器可以分为线性再生放大器和环形再生放大器两种基本构型,两种构型都有其各自的优点。线性腔也被称为驻波腔,具有结构简单易于调节的优点,在过去的几十年中使用最为广泛。而环形腔虽然结构更为复杂而且不易于调节,但其具有提升放大器输出能力的更多优势:实现更大的光束口径往往需要更长的腔长,而环形腔在同等腔长的条件下可以实现更大的光斑尺寸,在元器件损伤阈值不变的情况下可以获得更高的单脉冲输出能力。同时由于环形腔单向传输的特点,放大自发辐射可以一定程度上被抑制,进而可以提高输出脉冲的信噪比。环形腔还可以使注入光和输出光完全分离,从根本上防止了种子源受放大后反向激光的损害^[8]。

2 基于掺Nd激光材料的再生放大器研究进展

掺钕(Nd)的各类激光材料作为典型的四能级系统,由于其较低的泵浦阈值,在早期难以实现高功率稳定泵浦的条件下,成为了再生放大器首选的激光材料。掺Nd材料普遍具有较大的受激发射截面,有利于实现高增益放大,在再生放大器中体现出巨大优势,其中常见的主要有Nd:YLF, Nd:YAG和钕玻璃等。三种材料的基本参数如表1所示^[9-12]。

表1 掺Nd激光材料基本参数
Table 1 Basic parameters of Nd doped laser materials

	emitting wavelength/nm	emitting bandwidth/nm	emitting cross section/(10^{-20} cm ²)	fluorescent lifetime/ μ s
Nd:YAG	1064	0.45	88.0	230
Nd:YLF	1053	1.35	32.0	480
N31 Nd:glass	1053	25.8	3.8	351

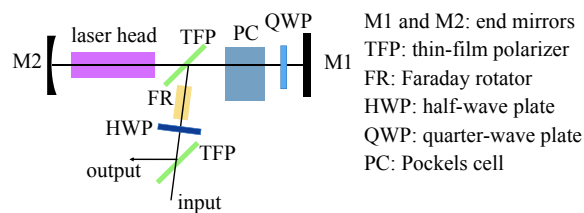


Fig. 1 Basic schematic diagram of regenerative amplifier

图1 再生放大器基本原理图

1980年, J. E. Murray 等人基于 Nd:YAG 棒状放大器, 搭建了线性腔再生放大器, 基于主动锁模的种子源, 在氙灯泵浦的条件下, 最终输出脉冲能量为 0.23 mJ, 净增益达到 10^{14} 量级。输出脉宽与注入种子光的脉宽基本一致, 最短可达 100 ps。再生腔基本结构如图 2 所示^[13]。为防止再生腔在种子光注入之前起振, 其中一个普克尔盒在种子光注入之前加上四分之一波长的电压, 阻断腔内的自激光循环。

1987年 P. Bado 等人基于自动锁模种子源, 利用 Nd:YLF 再生放大器实现了 500 Hz 重复频率条件下 2.5 mJ 的单脉冲能量输出, 输出的脉冲宽度为 37 ps^[14]。Nd:YLF 相比于 Nd:YAG 拥有更长的荧光寿命, 因而采用了连续泵浦的泵浦方式。此外, Nd:YLF 属于单轴晶体, 进而可以抑制热致双折射效应, 有利于实现更高功率的运转。同时 Nd:YLF 的发射光谱比 Nd:YAG 更宽, 可以实现更短的脉冲宽度。

再生腔内各元件的损伤阈值限制了单脉冲输出能量的进一步提升。为提升再生放大器的输出能力, 1990年 M. Saeed 等人提出并设计了凸-凹再生腔。基于连续泵浦的 Nd:YLF 晶体, 在重复频率为 700 Hz 的条件下, 实现了 5 mJ 的单脉冲能量输出, 脉冲宽度为 40 ps^[15]。凸-凹腔的设计能够显著增加基模的光束口径, 在腔内各元件损伤阈值不变的条件下即可有效提高所能承载的单脉冲输出能量。

20世纪90年代初, 随着半导体激光器成本的大幅度降低, 传统的氙灯泵浦方式开始逐渐被半导体激光器所取代。许多基于掺 Nd 材料的再生放大器也都开始采用半导体激光器泵浦^[16-18]。相较于氙灯泵浦, 半导体激光器泵浦具有体积小、泵浦效率高的优势。激光二极管具有远小于灯泵的发散角, 结合阵列透镜及柱透镜等元件组成的耦合光学系统, 可以实现棒状激光材料的端面均匀泵浦。端面泵浦有助于泵浦光和激光模式实现更好的耦合, 提升能量的利用效率, 也能够提升光束质量。典型的半导体激光器泵浦的再生放大器结构如图 3 所示^[19]。激光二极管在两个方向上的发散角不相等, 阵列透镜和柱透镜的组合可以将二极管阵列的发散光整形为近似平行光, 然后使用普通透镜就能够将泵浦光高效地耦合进激光晶体。在半导体激光器泵浦的使用之初, 由于成本较高且泵浦技术尚不完善, 其并没有能够立刻提升再生放大器的输出能力, 但由于其效率高、亮度高、便于集成的优势, 为固体激光器性能的提升创造了条件, 迅速成为再生放大器研究的热点。

随着激光二极管泵浦功率的不断提升, 再生放大器的单脉冲输出能力也得到了快速提升。2001年, V. Bagnoud 等人使用钹玻璃再生放大器实现了 100 mJ 的单脉冲能量输出, 脉冲宽度为 9 ns^[20]。为提升泵浦的总能量, 装置采用 8 个激光二极管阵列进行侧面泵浦, 每个阵列包含 6 个巴 (bar) 条, 总泵浦功率达到 2.9 kW。为提高放大器的提取效率, 再生腔内加入模式整形模块, 使得腔内光束近场呈现方形超高斯分布。由于热效应的限制, 重复频率仅能达到 1 Hz。2010年, T. Sekine 等人使用 Nd:YLF 环形再生放大器实现了 0.46 J, 重复频率 10 Hz 的输出, 脉宽为 10 ns, 环形腔结构如图 4 所示^[21]。环形腔内置有两个口径 1 cm 的棒状放大器, 由于光束口径较大, 晶体加工导致的波前畸变会严重影响光束质量。通过测量

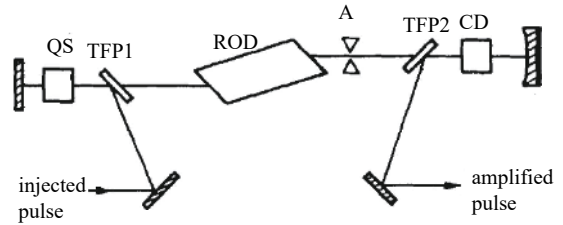


Fig. 2 Diagram of regenerative cavity (QS and CD are Pockels cells for Q switch and cavity dump; A is aperture)

图 2 再生腔示意图 (QS 和 CD 分别为用于调 Q 和导出的普克尔盒, A 为孔径光阑)

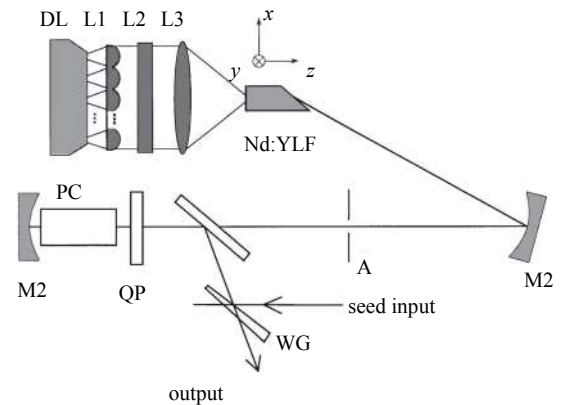


Fig. 3 Schematic of diode-pumped regenerative amplifier (DL, diode-laser array; L1, microlens array; L2, cylindrical lens; L3, spherical lens; WG, wedged glass plate)

图 3 激光二极管端面泵浦再生放大器示意图 (DL 为激光二极管阵列, L1 为阵列透镜, L2 为柱透镜, L3 为球面透镜, WG 为光楔板)

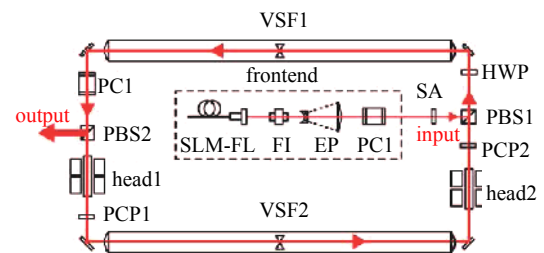


Fig. 4 Schematic diagram of Nd:YLF ring amplifier (SLM-FL, single longitudinal mode fiber laser; EP, beam expander; SA, serrated aperture; PBS, polarization beam splitter; VSF, vacuum spatial filter; PCP, phase conjugate plate)

图 4 Nd:YLF 环形再生放大器示意图 (SLM-FL 为单纵模光纤激光器, EP 为扩束镜, SA 为锯齿光阑, PBS 为偏振分光棱镜, VSF 为真空空间滤波器, PCP 为相位共轭板)

Nd:YLF 的相位畸变, 设计了对应的熔融石英相位共轭板, 加入再生腔后输出光束的近远场质量都得到了显著的改善。此外, 由于增益介质的增益和储能较大, 该再生腔存在严重的放大自发辐射(ASE)风险, 而真空空间滤波器中的针孔起到了很好的抑制 ASE 的隔离作用。

啁啾脉冲放大技术是实现超短脉冲放大中的关键技术, 而由于大多数掺 Nd 激光材料而言增益带宽较小, 在再生放大这种高增益放大器中, 增益窄化效应非常严重, 可获得输出脉冲带宽较窄, 因此, 基于此类介质的啁啾脉冲再生放大器研究相对较少。钽玻璃具有较宽的增益谱线, 所以啁啾脉冲放大技术在基于钽玻璃的再生放大器中使用较为普遍。1997 年, A. Braun 等人在二极管泵浦钽玻璃再生放大器中实现了 1 kHz 重复频率条件下脉冲能量 24 μJ 的啁啾脉冲放大, 压缩后脉冲宽度为 850 fs^[22]。2003 年, X. Ribeyre 等人使用二极管泵浦的钽玻璃再生放大器, 实现了 20 mJ 的啁啾脉冲放大输出, 压缩后脉冲时长为 470 fs^[23]。为抑制增益窄化效应, 其在再生腔内加入了双折射滤波片进行光谱整形, 最终获得了 5 nm 的光谱宽度。

因掺 Nd 激光材料具有泵浦阈值低、发射截面高以及生产加工技术成熟的优势, 基于 Nd 材料的再生放大器在 20 世纪八九十年代的中低功率 ns 和 ps 激光器领域发挥了巨大的作用。在其发展过程中, 泵浦技术发展迅速, 大模场的再生腔设计以及啁啾脉冲放大技术也被提出, 这为再生放大器输出的均值功率、单脉冲能量和脉冲峰值功率的提升创造了条件。然而掺 Nd 材料由于热性能、增益带宽以及储能能力的限制, 在再生放大器输出不断提升的背景下, 其劣势越来越显著, 在再生放大器领域开始逐渐被更具优势的掺 Yb 激光材料所取代。

3 基于钛宝石的再生放大器研究进展

钛宝石凭借着极宽的发射带宽, 一直都是飞秒激光器领域首选的增益介质。钛宝石的发射中心波长在 800 nm 附近, 且其在 680~1100 nm 波段都能够实现有效的发射, 可以用于波长可调谐激光器。钛宝石基本参数如表 2 所示^[24-26]。钛宝石具有极好的热性能, 导热率远超 YAG 等其他常用的基质材料, 在高重复频率激光器领域有较大优势。钛宝石也拥有很高的发射截面, 易于作为放大器进行能量提取。由于荧光寿命特别短, 传统的氙灯和激光二极管不容易实现足够的泵浦能量, 低重复频率工作模式下多采用脉冲固体激光器作为泵浦。钛宝石的吸收光谱峰值位于 490 nm, 但考虑到 400~600 nm 带宽范围内都能够实现有效的泵浦吸收, 实际上多采用倍频的微米波段激光器作为泵浦源, 最常见如 Nd:YAG 激光器倍频后的 532 nm 波段。荧光寿命太短还会导致放大自发辐射相对严重, 所以基于钛宝石的再生放大器更多采用环形腔结构来抑制放大自发辐射、提高信噪比。

表 2 钛宝石基本参数

Table 2 Basic parameters of Ti:Sapphire

pump wavelength/nm	emitting wavelength/nm	emitting cross section/(10^{-20} cm^2)	fluorescent lifetime/ μs	thermal conductivity/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
532	800	38(800 nm)	3.2	33(300 K)

20 世纪 90 年代初, 随着啁啾脉冲放大技术的推广, 基于钛宝石的飞秒再生放大器受到了广泛的关注。1991 年, F. Salin 等人使用调 Q 的 Nd:YLF 激光器作为泵浦源, 有效泵浦能量 4 mJ, 获得了 1 mJ 的输出, 重复频率 1 kHz, 压缩后脉冲宽度 150 fs^[27]。1992 年, T. B. Norris 等人使用 12 W 的连续氙激光器作为钛宝石再生放大器的泵浦源, 在 250 kHz 的重复频率下获得了 1.7 μJ 的能量输出, 压缩后脉宽 130 fs^[28]。1993 年, J. V. Rudd 等人在 1 kHz 的重复频率下获得了 0.7 mJ 的能量输出, 压缩后脉冲宽度为 55 fs^[29]。

对于飞秒激光放大器, 放大过程中对光谱性能的保持能力是放大器的重要评价指标。放大过程导致的增益窄化和非线性色散, 都会导致输出的脉冲不能压缩至初始的脉冲宽度。尤其是对于再生放大器这种甚多程放大方式, 影响光谱性能的因素会不断累加, 因此光谱性能的保持一直以来都是基于钛宝石的再生放大器发展过程中的核心问题。1994 年, K. Wynne 等人为补偿法拉第旋光器等元器件导致的高阶色散, 在再生腔中加入了布儒斯特棱镜对, 最终实现了 30 fs 的压缩后脉冲时长^[30]。1998 年, K. Yamakawa 等人使用再生放大器实现了 10 Hz 重复频率下约 8 mJ 的脉冲能量输出, 作为后续多程放大器前级高增益放大器^[31]。为实现更短的压缩脉宽, 有效抑制增益窄化效应, 再生腔内加入了角度可调的标准具进行光谱补偿, 输出的光谱宽度由 28 nm 扩展到了 82 nm。2002 年, Y. Nabekawa 等人使用环形再生放大器实现了 13 mJ 的脉冲能量输出, 重复频率 10 Hz^[32]。为保证更宽的输出谱线, 再生腔使用佩林勃洛卡棱镜代替常用的镀膜反射镜作为腔镜, 用来弥补镀膜反射镜透过带宽有限的问题。此外腔内还加入了两个布儒斯特棱镜对, 以补偿佩林勃洛卡棱镜引入的色散。2004 年, D. M. Gaudiosi 等人提出了下啁啾脉冲放大的方法^[33], 之后也被应用到钛宝石再生放大器中^[34]。所谓下啁啾脉冲放大就是脉冲展宽器提供负色散, 放

大后脉冲经过正色散材料得到压缩。下啁啾的优势在于色散材料作为压缩器能量损失远低于光栅压缩器,而且这种压缩器对于失配不敏感,有利于保持光束质量。然而这种方法只适用于低能量高重复频率的系统,因为瞬时功率过高会导致严重的非线性效应。2006年, H. Takada 等人采用棱镜与空间光调制器相结合的色散补偿方式,成功补偿了光栅压缩器无法处理的剩余色散。此外该再生腔还运用了多层介质膜来实现对增益窄化的充分补偿,使得输出脉冲的光谱宽度达到 200 nm, 最终压缩后的脉冲宽度仅为 12 fs^[35]。

21 世纪初,随着钛宝石再生放大器的均值功率逐渐提升,热效应问题成了其输出能力进一步提高的主要阻碍。对于再生放大器来说,产热导致的热透镜和热致双折射都会严重影响输出功率和光束质量。钛宝石本身为双折射晶体,因而对热致双折射不敏感,热透镜效应是高均值功率钛宝石再生放大器设计中重点要关注的问题。热透镜主要由激光晶体内部的温度梯度分布导致,由于材料的折射率会随温度发生变化,激光晶体可以等效为一个透镜。热透镜会导致再生腔的模式发生改变,甚至进入不稳定区。抑制热透镜效应大体有两种途径,一种是主动降温来直接减少热透镜的产生,二是通过合理的再生腔设计使之对热透镜不敏感。2001年, J. Z. H. Yang 等人设计了环形热不敏感再生腔,使得钛宝石热透镜焦距在 30 m 到 0.3 m 之间变化时,钛宝石处的 TEM₀₀ 模的模式大小基本不发生变化。设计的特色在于将两块钛宝石放置在腔内模式最小处并置于真空腔内,因为热透镜处的光束口径越大,再生腔对热透镜越敏感。泵浦功率在 30 W 内变化时,再生放大器在不调节的情况下都能够正常工作,该再生放大器最高可以实现 9 W 的均值功率输出^[36]。2004年, N. Zhavoronkov 等人通过 ABCD 矩阵计算了不同温度下的热不敏感条件,并利用热电冷却,将温度降到 210 K,实现了均值功率 16 W 的输出。虽然理论上更低的温度还可以略微提升热不稳定性,但使用液氮冷却会大大增加装置的体积和成本^[37]。2006年, I. Matsushima 等人将钛宝石晶体用铜热沉固定并用钢焊接,同时使用液氮冷却至 100 K,以提高散热性能。通过对再生腔的参数优化,使得泵浦功率从零到最大的过程中光束尺寸波动最小,最终在 180 W 泵浦功率下实现了 40 W 的均值功率输出^[38]。2012年, X. Zhang 等人提出了循环氮冷的散热方法,可以将晶体温度维持在 50 K 以下,能够大大提升钛宝石激光器的热承载能力^[39]。

钛宝石再生放大器进一步发展面临的又一难点在于泵浦源的限制。使用固体激光器作为泵浦源中间增加了一次能量转换过程,一方面增加了装置的复杂度和成本,另一方面也难以实现更高的泵浦功率。近几年随着 GaN 系的激光二极管的发展,使用二极管直接泵浦钛宝石成为了可能。2017年, S. Backus 等人首次实现了二极管直接泵浦的钛宝石激光器。在 50 W 光纤耦合 450 nm 激光二极管连续泵浦条件下,输出的均值功率约 1 W^[40]。虽然目前二极管泵浦的钛宝石再生放大器还没有实现高功率的输出,但相比于固体激光器泵浦,二极管直接泵浦方式优势巨大,更有利于实现 100 W 级甚至更高的均值功率输出。然而由于钛宝石荧光寿命太短,二极管泵浦暂时只适用于 100 kHz 以上的高重复频率工作模式。

直至今日,钛宝石激光器仍然是产生飞秒激光最为常用的方式,基于钛宝石的再生放大器凭借着其高增益、高光束质量的优势,依然是产生 mJ 级飞秒脉冲的重要手段。钛宝石再生放大器的发展过程中,光谱控制技术和热管理技术都取得了重要进展,这些技术进步也给基于掺 Yb 材料的再生放大器的发展创造了有利条件。

4 基于掺 Yb 激光材料的再生放大器研究进展

和掺 Nd 的激光材料相比,掺 Yb 材料具备量子效率更高、荧光寿命更长、增益谱更宽的特点。高量子效率可以减少产热,有利于实现高均值功率输出,更长的荧光寿命有助于储能,更宽的增益谱可以实现更短的脉冲。这些性质都对实现大能量的超短脉冲极为有利。然而掺 Yb 材料作为典型的准三能级系统,具有较高的泵浦阈值,而且其受激发射截面远不及掺 Nd 材料,因此在稳定高功率的泵浦源尚未实现的时期难以发挥其优势。从 20 世纪 90 年代开始,随着二极管泵浦技术的迅速发展,基于掺 Yb 材料的再生放大器逐渐成为了高功率固体激光领域的研究热点,再生放大器的高增益特性能够有效弥补材料增益能力不足的问题。掺 Yb 材料多采用较薄的板条和薄片结构,一方面更薄的激光材料可以避免重吸收效应对增益的影响,另一方面,由于高均值功率运行的散热需要,更高的表面积体积比具有更高的散热效率。

掺 Yb 的激光材料种类繁多,目前有十几大类上百种的材料被应用于固体激光器。不同种类的材料激光特性有较大的差异,因而基于该类材料的激光器种类繁多、覆盖面较广。掺 Yb 激光材料的发射截面相对较低,更适合再生放大器这种甚多程放大方式。目前在再生放大器中应用较为广泛的有 Yb:YAG, Yb:KYW, Yb:Lu₂O₃ 和 Yb:CaF₂ 等几种,其材料的主要参数如表 3 所示^[41-47]。

表 3 掺 Yb 激光材料基本参数
Table 3 Basic parameters of Yb doped laser materials

	emitting wavelength/nm	emitting bandwidth/nm	emitting cross section/(10^{-20} cm ²)	fluorescent lifetime/ μ s
Yb:YAG	1030	6.3	2.30	951
Yb:KYW	1025	16.0	3.00	600
Yb:Lu ₂ O ₃	1032	12.0	1.07	820
Yb:CaF ₂	1030	70.0	0.20	2400

Yb:YAG 凭借着优异的热性能和机械性能, 成为了十几年来高功率激光器优先考虑的材料之一。1997 年, C. Hönninger 等人首次实现了基于 Yb:YAG 的薄片再生放大器, 在 750 Hz 的重复频率下获得了 180 μ J 的脉冲能量, 脉冲宽度为 2.3 ps^[48]。因薄片增益介质的厚度仅为 300 μ m, 以往的泵浦方式不能实现有效的泵浦吸收, 所以该装置使用多个球面镜和平面镜, 实现了四程的泵浦吸收^[49]。因更均匀的泵浦以及高的吸收效率, 多程泵浦在薄片激光器中应用极为普遍。2007 年, C. Stolzenburg 等人使用 Yb:YAG 再生放大器实现了最高 62 W 的均值功率输出, 最大脉冲能量为 2 mJ, 装置基本结构如图 5 所示。由于装置未采用啁啾放大方式, 放大脉冲脉宽较短, 腔内普克尔盒处的光束口径被增大到 3 mm 以抑制非线性效应, 同时普克尔盒采用了非线性系数更低的偏硼酸钡 (BBO) 材料。此外, 该装置还在再生腔内加入了多程放大结构, 进而每个循环周期能够获得更高的增益^[50]。

2009 年, T. Metzger 等人使用 TRUMPF 公司提供的薄片激光头搭建再生放大器, 实现了 3 kHz 重复频率下 25 mJ 的能量输出, 整个系统的结构如图 6 所示^[51]。为实现更好的热性能激光头增益介质的厚度仅 100 μ m, 为了提高泵浦吸收效率, 泵浦模块采用了 20 程泵浦的结构。由于脉冲的重复周期小于材料的荧光寿命, 每次放大未提取的能量会影响下一次的放大, 运行过程中容易出现分叉和混沌现象^[52], 严重影响输出脉冲能量的稳定性。通过加入光纤放大器作为预放大器, 以及对循环次数和泵浦功率的调节, 使得再生放大器能够在稳定区工作, 脉冲能量的波动低于 0.7%。

再生放大器均值的进一步提高会受热效应严重制约, 而提高量子效率可以直接减少热的产生。Yb:YAG 主要有 940 nm 和 969 nm 两条吸收谱线, 使用 969 nm 泵浦可以直接将激活离子直接泵浦到激光发射的上能级, 不再因上能级弛豫产生声子, 因而也被称为零声子线泵浦, 可减少约 1/3 的产热。然而 Yb:YAG 在 969 nm 处的吸收线宽太窄, 直接使用二极管泵浦不能实现高效稳定的吸收。随着体布拉格光栅 (VBG) 在半导体激光器上的应用, 线宽小于 1 nm 且波长随温度稳定的泵浦源得以实现^[53]。2012 年, M. Chyla 等人在 Yb:YAG 再生放大器中采用了 969 nm 的稳频泵浦, 并在再生腔内放置两个相同的激光头以提升能量存储能力, 最终实现了单脉冲能量 100 mJ 的输出, 重复频率为 1 kHz^[54]。

为进一步提升放大器的热负载能力, TRUMPF 公司在原有集成激光头的基础上, 将热沉材料由传统的 Cu-W 合金材料改为导热能力和机械性能更为优异的金金刚石材料。结合较为成熟的零声子线泵浦技术, 2013 年, TRUMPF 公司使用再生放大器实现了 10 kHz 重复频率下 34 mJ 的能量输出, 均值功率首次突破 300 W^[55]。此后, 基于 Yb:YAG 的薄片激光器成为了高均值功率再生放大器领域最具优势的发展方向。

再生放大器的单脉冲能量主要由增益介质的储能能力所限制, 而随着增益介质内储能的增加放大自发辐射 (ASE) 效应会迅速消耗所存储的能量, 这样会造成能量转换效率的降低以及额外的热量产生。为抑制 ASE 效应对储能的影响, 2014 年, M. Chyla 等人提出了脉冲泵浦的方法, 采用脉冲泵浦方式可以有效减少泵浦期间的储能消耗。基于脉冲泵浦的再生放大器实现了 1 kHz 重复频率下 50 mJ 的能量输出, 光-光转换效率高达 19%^[56]。随后 2015 年, S. Klingebiel 等人使用 TRUMPF 公司提供的激光头并采用脉冲泵浦方式, 将再生放大器的输出脉冲能量提高到了 220 mJ^[57]。

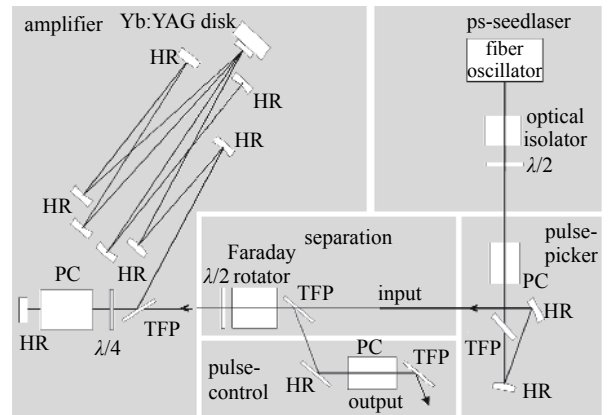


Fig. 5 Diagram of experimental setup (HR, high reflectivity mirror)

图 5 实验装置示意图 (HR 为高反镜)

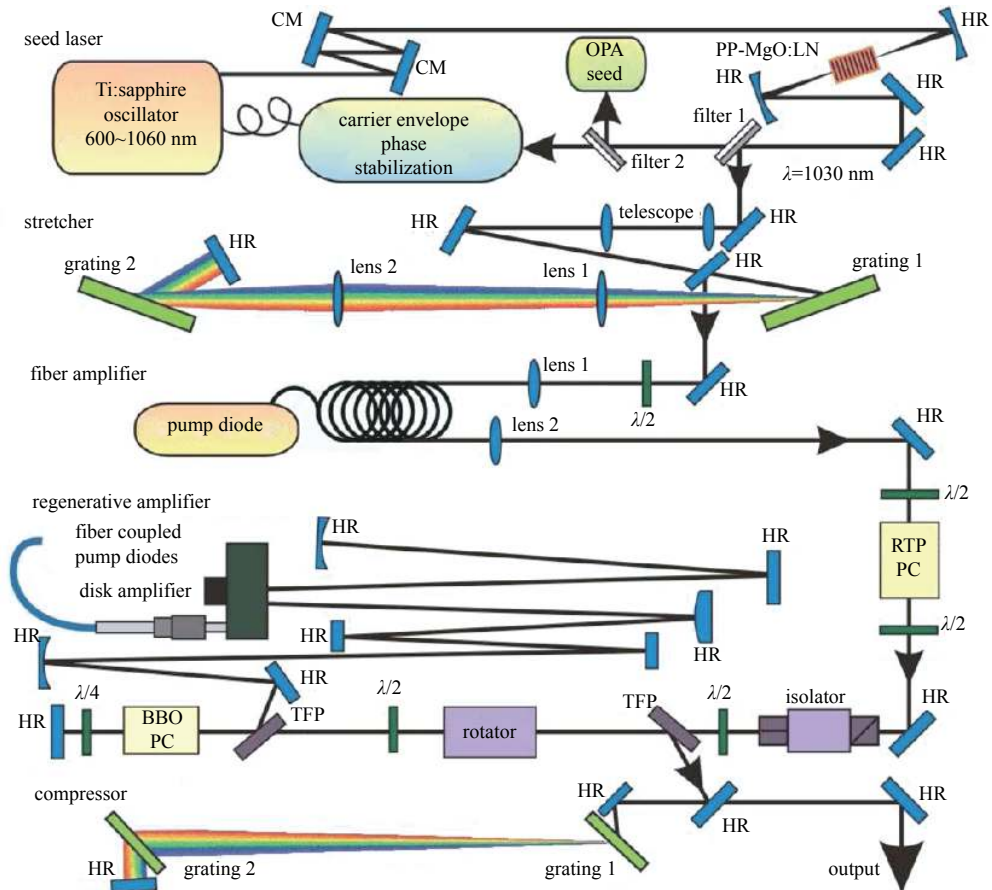


Fig. 6 Diagram of laser system(CM, chirped mirror; PP-MgO:LN, MgO-doped periodically poled LiNbO₃ crystal; RTP, rubidium titanyl phosphate)

图6 激光装置整体示意图(CM为啁啾镜, PP-MgO:LN为周期性极化掺氧化镁铌酸锂, RTP为磷酸氧钛铷)

随着再生放大器的输出脉冲能量快速提升,元器件的损伤阈值也成为了限制放大器输出能力的重要因素。在元器件损伤阈值不变的情况下,增加光束口径是最为有效的提升脉冲能量的方式。2016年, R. Jung 等人在再生腔内加入额外的凸面镜和凹面镜组合,形成类似望远镜腔的结构,同时增加再生腔的腔长,使得激光头处的基模直径增大到4 mm,输出的脉冲能量达到了300 mJ,重复频率100 Hz。由于大模场的腔对失配更加敏感,为保证再生腔的稳定,再生腔的一个端镜由马达控制以防止模式的失配^[58]。随后, R. Jung 等人又采用两级再生放大的方式,将输出的脉冲能量提高到了600 mJ。该方案中,首先使用较为成熟的线性再生腔将种子光放大到80 mJ,然后使用特殊的环形再生放大器,对脉冲能量进一步放大,环形腔结构如图7所示^[59]。环形腔呈对称结构并置有两个相同的激光头。为保证腔内元器件不损伤,腔内的光束直径高达10 mm。为了不让光束质量发生退化,腔内还加入了真空空间滤波器,每个循环周期内都能够对光束质量进行控制。

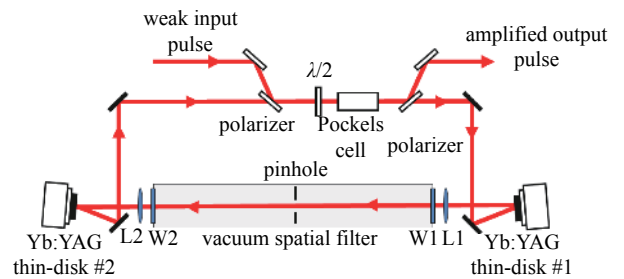


Fig. 7 Diagram of ring cavity(L1 and L2, adjustable lenses; W1 and W2, windows of vacuum spatial filter)

图7 环形腔装置示意图(L1和L2为可自由调节的透镜, W1和W2为真空空间滤波器的窗口)

2017年, T. Nubbemeyer 等人结合了零声子线泵浦及金刚石热沉等技术,使用双激光头环形再生放大器,实现了5 kHz重复频率下200 mJ的能量输出,均值功率达到了1 kW,装置的光路图如图8所示^[60]。5 kHz重复频率下,过高的增益极易产生分叉和混沌现象,所以在注入之前种子光先经过预放大器放大到mJ量级。元器件的损伤阈值仍然是能量输出的主要瓶颈,因此使用了长达15 m的腔长并加入望远镜结构,使得光束保持一个较大的模场,激光头处的光束口径大小为5.5 mm。2019年,通过对上述装置的改进,在20 kHz重复频率下实现了1.9 kW的均值功率输出,是目前为止再生放大器输出均值功率的最高纪录^[61]。

尽管基于Yb:YAG的再生放大器在高均值功率和高脉冲能量上具有绝对的领先地位,但相比于其他的掺

Yb 材料, 其增益谱线相对较窄, 只能实现 ps 或亚 ps 级的脉冲输出。一些其他种类的掺 Yb 激光材料具有更宽的光谱, 在飞秒激光放大器领域也有较多的应用。

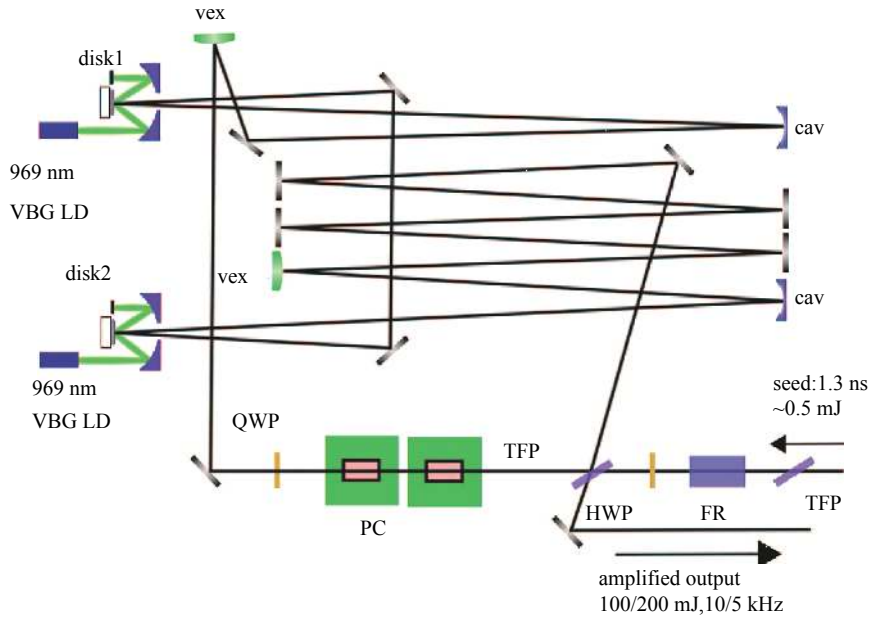


Fig. 8 Optical setup of regenerative amplifier
(vex, convex mirror; cav, concave mirror)

图 8 再生放大器光路图 (vex 为凸面反射镜, cav 为凹面反射镜)

以 Yb:KYW 为带表的双钨酸盐有着更宽的增益谱, 是一种在短脉冲领域使用较多的激光材料。由于其热性能相对不足, 目前主要用于高重复频率中低功率的再生放大器。2005 年, A. Beyertt 等人使用 Yb:KYW 再生放大器实现了 45 kHz 重复频率下 200 μ J 的能量输出, 压缩后的脉冲宽度仅 300 fs^[62]。由于双钨酸盐为各向异性的晶体, 不同偏振方向上的光谱性质有所不同, 因此也可以将不同偏振方向的光谱进行综合利用, 达到拓展光谱宽度的目的。2009 年, U. Bunting 等人设计了如图 9 所示的再生放大器, 得到了脉冲宽度仅 200 fs 的压缩后脉冲^[63]。采用在腔内加入半波片的方式, 使得光束在腔内可以呈现两种偏振态, 进而可以同时利用增益介质两种偏振态下的增益谱, 得到更大的输出谱宽。随着再生放大器朝着高均值功率的方向不断发展, KYW 等双钨酸盐热性能不足的问题变得尤为突出, 这一类材料在激光放大领域的发展趋于停滞。

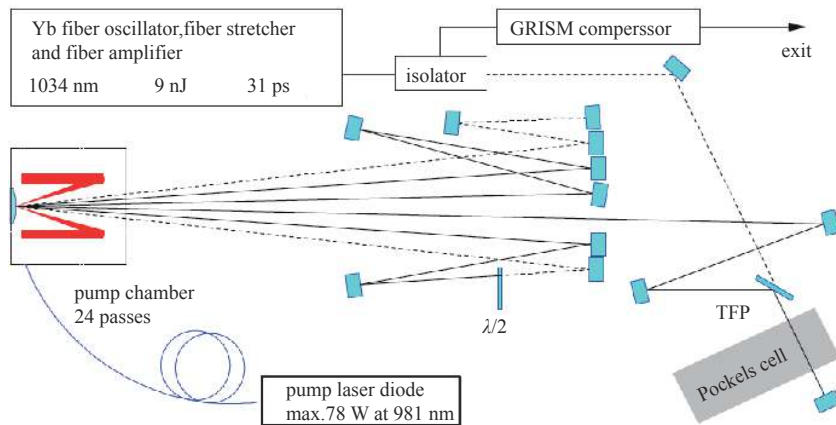


Fig. 9 Diagram of detailed setup of the regenerative amplifier

图 9 再生放大器光路示意图

Yb:CaF₂ 材料虽然热性能和机械性能有明显的不足, 但其凭借着极宽的光谱和极长的荧光寿命, 在再生放大器领域也有着较多的应用。2017 年, P. Sevillano 等人使用 Yb:CaF₂ 再生放大器获得了 32 mJ 的能量输出, 压缩后脉冲宽度仅 300 fs^[64]。虽然热性能的不足限制了高均值功率方向上的发展潜力, 但在中低均值功率、大能量飞秒激光放大领域具有一定的应用前景。

以 Yb:Lu₂O₃ 为代表的倍半氧化物材料近年来也在激光放大领域有着很大的发展。倍半氧化物材料有着接近甚至领先于 YAG 的热性能和机械性能,而且拥有更宽的发射谱线,因而也具备高均值功率方向上发展的巨大潜力。2016 年, E. Caracciolo 等人使用 Yb:Lu₂O₃ 再生放大器实现了 42 W 的均值功率输出,压缩后脉冲宽度为 780 fs^[65]。虽然理论上倍半氧化物材料具有极好的高均值功率发展潜力,但由于生长和加工相对困难,所以目前发展较为缓慢。

基于掺 Yb 激光材料整体发射截面较低的特性,再生放大器凭借着易于实现甚多程放大的特性,与之很好地互补,获得了迅速的发展。随着单脉冲能量和均值功率的不断提升,再生放大器必将在激光加工、光电对抗、激光武器、OPCPA 等众多领域发挥越来越重要的作用。

5 结 论

再生放大器具备着高增益和高光束质量、高稳定性等优势,自激光诞生以来,一直是实现高增益高光束质量激光放大的首选方案。近年来随着泵浦技术、元器件和激光材料等相关领域的不断突破,再生放大器已经能够实现百 mJ 级脉冲能量和 kW 级均值功率的输出。

掺 Nd 材料和钛宝石体系的再生放大器,由于材料特性的限制,近年来在高均值功率方向的研究进展较为有限。但由于再生放大器固有的优势,这两种体系的再生放大器常作为预放大器,在主控震荡器的功率放大器(MOPA)类激光装置中发挥着重要作用。掺 Yb 材料体系的再生放大器至今仍在不断的发展当中,是目前高功率激光领域的重点研究方向之一。

未来再生放大器输出性能的进一步提升可以从以下几个方面取得突破:

首先,激光材料的发展。虽然 Yb:YAG 材料如今处于绝对领先的低位,但在光谱等方面缺陷明显,不足以实现更短的脉冲宽度。倍半氧化物等多种新兴的材料虽然理论上拥有很好的应用前景,但由于材料制备等方面的问题,暂时未能发挥出很好的效果。如果激光材料的制备取得重大突破,飞秒激光再生放大器的性能将会出现很大的提升。

其次,通过增大再生腔内的光束口径来提升装置的脉冲能量阈值是近年普遍采用的方式。然而大模场的谐振腔对于热透镜效应、元器件面型质量以及元器件失配更为敏感,光束质量会受到较大的影响。近年来,变形镜等技术开始越来越多地应用到激光谐振腔和多程放大器中,结合计算机控制可以有效地对光束质量进行实时改善。这类技术在实现大模场再生放大上具有很好的应用前景。

可以预见,随着相关工程技术以及理论研究的不断突破,再生放大器的输出性能有望在接下来的几年内得到进一步的提升。

参考文献:

- [1] She H, Tan S. Development and application prospects of high-energy laser weapon[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 267-271.
- [2] Abramov P I, Kuznetsov E V, Skvortsov L A. Prospects of using quantum-cascade lasers in optoelectronic countermeasure systems[J]. *Journal of Optical Technology*, 2017, 84(5): 331-341.
- [3] Gibbon P, Förster E. Short-pulse laser-plasma interactions[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 1996, 38(6): 769.
- [4] Faure J, Glinec Y, Pukhov A, et al. A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams[J]. *Nature*, 2004, 431(7008): 541-544.
- [5] Sugioka K, Cheng Y. Ultrafast lasers—reliable tools for advanced materials processing[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(4): e149-e149.
- [6] Delaigue M, Hönninger C, Torres R, et al. Comparative ultrafast laser source study for advanced materials processing[C]//IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics. 2012: 1-2.
- [7] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 1985, 55(6): 447-449.
- [8] Yanovsky V, Felix C, Mourou G. Why ring regenerative amplification(regen)?[J]. *Applied Physics B*, 2002, 74(1): s181-s183.
- [9] Singh S, Smith R G, Ufert L G V. Stimulated-emission cross section and fluorescent quantum efficiency of Nd³⁺ in yttrium aluminum garnet at room temperature[J]. *Physical Review B, Condensed Matter*, 1974, 10(6): 2566-2572.
- [10] Harmer A L, Linz A A, Gabbe D R. Fluorescence of Nd³⁺ in lithium yttrium fluoride[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1969, 90(6): 1483-1491.
- [11] Sharp E J. High-efficiency Nd³⁺: LiYF₄ laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 1973, 44(12): 5399.
- [12] 胡丽丽, 陈树彬, 孟涛, 等. 大口径高性能激光钕玻璃研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 32(10): 2560-2564. (Hu Lili, Chen Shubin, Meng Tao, et al. Advances in high performance large aperture neodymium laser glasses[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 32(10): 2560-2564)
- [13] Murray J E, Lowdermilk W H. Nd: YAG regenerative amplifier[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(7): 3548-3556.
- [14] Bado P, Bouvier M, Coe J S. Nd: YLF mode-locked oscillator and regenerative amplifier[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(5): 319-321.

- [15] Saeed M, Kim D, Dimauro L F. Optimization and characterization of a high repetition rate, high intensity Nd: YLF regenerative amplifier[J]. *Applied Optics*, 1991, 30(18): 2527.
- [16] Dimmick T E. Semiconductor-laser-pumped, CW mode-locked Nd: phosphate glass laser oscillator and regenerative amplifier[J]. *Optics Letters*, 1990, 15(3): 177-179.
- [17] Gifford M, Weingarten K J. Diode-pumped Nd: YLF regenerative amplifier[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(24): 1788-1790.
- [18] Naito K, Ohmi M, Ishikawa K, et al. Demonstration of high energy extraction efficiency in a laser-diode pumped high gain Nd: YAG regenerative amplifier[J]. *Applied Physics Letters*, 1994, 64(10): 1186.
- [19] Turi L, Juhasz T. High-power longitudinally end-diode-pumped Nd: YLF regenerative amplifier[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(2): 154-156.
- [20] Bagnoud V, Luce J, Videau L, et al. Diode-pumped regenerative amplifier delivering 100-mJ single-mode laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(6): 337-339.
- [21] Sekine T, Matsuoka S I, Yasuhara R, et al. 84 dB amplification, 0.46 J in a 10 Hz output diode-pumped Nd: YLF ring amplifier with phase-conjugated wavefront corrector[J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13927-13934.
- [22] Braun A, Liu X, Kopf D, et al. Diode-pumped Nd: glass regenerative amplifier for subpicosecond microjoule-level pulses[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(18): 4163-4167.
- [23] Ribeyre X, Videau L, Migus A, et al. Nd: glass diode-pumped regenerative amplifier, multimillijoule short-pulse chirped-pulse-amplifier laser[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(15): 1374-1376.
- [24] Rapoport W R, Khattak C P. Titanium sapphire laser characteristics[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(13): 2677-2684.
- [25] Moulton P F. Spectroscopic and laser characteristics of Ti_2O_3 [J]. *J Opt Soc Am B*, 1986, 3(1): 125-133.
- [26] Xu M, Si J L, Zhang X C, et al. Study on thermal properties of titanium-doped sapphire crystal[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2014, 43(5): 1043-1049.
- [27] Salin F, Squier J, Mourou G, et al. Multikilohertz Ti: Al_2O_3 amplifier for high-power femtosecond pulses[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(24): 1964-1966.
- [28] Norris T B. Femtosecond pulse amplification at 250 kHz with a Ti: sapphire regenerative amplifier and application to continuum generation[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(14): 1009-1011.
- [29] Rudd J V, Korn G, Kane S, et al. Chirped-pulse amplification of 55-fs pulses at a 1-kHz repetition rate in a Ti: Al_2O_3 regenerative amplifier[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(23): 2044-2046.
- [30] Wynne K, Reid G D, Hochstrasser R M. Regenerative amplification of 30-fs pulses in Ti: sapphire at 5 kHz[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(12): 895-897.
- [31] Yamakawa K, Aoyama M, Matsuoka S, et al. Generation of 16-fs, 10-TW pulses at a 10-Hz repetition rate with efficient Ti: sapphire amplifiers[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(7): 525-527.
- [32] Nabekawa Y, Shimizu Y, Midorikawa K. Sub-20-fs terawatt-class laser system with a mirrorless regenerative amplifier and an adaptive phase controller[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(14): 1265-1267.
- [33] Gaudiosi D M, Lytle A L, Kohl P, et al. 11-W average power Ti: sapphire amplifier system using downchirped pulse amplification[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(22): 2665-2667.
- [34] Hong K H, Kostrotsa S, Yu T J, et al. 100-kHz high-power femtosecond Ti: sapphire laser based on downchirped regenerative amplification[J]. *Optics Express*, 2006, 14(2): 970-978.
- [35] Takada H, Kakehata M, Torizuka K. High-repetition-rate 12 fs pulse amplification by a Ti: sapphire regenerative amplifier system[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(8): 1145-1147.
- [36] Yang J Z H, Walker B C. 0.09-terawatt pulses with a 31% efficient, kilohertz repetition-rate Ti: sapphire regenerative amplifier[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(7): 453-455.
- [37] Zhavoronkov N, Korn G. Regenerative amplification of femtosecond laser pulses in Ti: sapphire at multikilohertz repetition rates[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(2): 198-200.
- [38] Matsushima I, Yashiro H, Tomie T. 10 kHz 40 W Ti: sapphire regenerative ring amplifier[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(13): 2066-2068.
- [39] Zhang X, Schneider E, Taft G, et al. Multi-microjoule, MHz repetition rate Ti: sapphire ultrafast regenerative amplifier system[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7015-7021.
- [40] Backus S, Kirchner M, Lemons R, et al. Direct diode pumped Ti: sapphire ultrafast regenerative amplifier system[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3666-3674.
- [41] Sumida D S, Fan T Y. Effect of radiation trapping on fluorescence lifetime and emission cross section measurements in solid-state laser media[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(17): 1343-1345.
- [42] Hönninger C, Paschotta R, Graf M, et al. Ultrafast ytterbium-doped bulk lasers and laser amplifiers[J]. *Applied Physics B*, 1999, 69(1): 3-17.
- [43] Kuleshov N V, Lagatsky A A, Podlipensky A V, et al. Pulsed laser operation of Yb-doped $KY(WO_4)_2$ and $KGd(WO_4)_2$ [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(17): 1317-1319.
- [44] Brenier A, Boulon G. Overview of the best Yb^{3+} -doped laser crystals[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2001, 323(1): 210-213.
- [45] Paradis C, Modsching N, Wittwer V J, et al. Generation of 35-fs pulses from a Kerr lens mode-locked Yb: Lu_2O_3 thin-disk laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14918-14925.
- [46] Druon F, Ricaud S, Papadopoulos D N, et al. On Yb: CaF_2 and Yb: SrF_2 : review of spectroscopic and thermal properties and their impact on femtosecond and high power laser performance[J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(3): 489-502.
- [47] Petit V, Doualan J L, Camy P, et al. CW and tunable laser operation of Yb^{3+} doped CaF_2 [J]. *Applied Physics B*, 2004, 78(6): 681-684.

- [48] Hönninger C, Johannsen I, Moser M, et al. Diode-pumped thin-disk Yb: YAG regenerative amplifier[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 1997, 65(3): 423-426.
- [49] Höiminger C, Zhang G, Moser M, et al. Diode-pumped thin disc Yb: YAG regenerative amplifier[C]//Advanced Solid State Lasers. 1998: TS3.
- [50] Stolzenburg C, Giesen A. Picosecond regenerative Yb: YAG thin disk amplifier at 200 kHz repetition rate and 62 W output power[C]//Advanced Solid-State Photonics. 2007: MA6.
- [51] Metzger T, Schwarz A, Teisset C Y, et al. High-repetition-rate picosecond pump laser based on a Yb: YAG disk amplifier for optical parametric amplification[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(14): 2123-2125.
- [52] Döring J, Killi A, Morgner U, et al. Period doubling and deterministic chaos in continuously pumped regenerative amplifiers[J]. *Optics Express*, 2004, 12(8): 1759-1768.
- [53] Volodin B L, Dolgy S V, Melnik E D, et al. Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(16): 1891-1893.
- [54] Chyla M, Smrz M, Mocek T. High-energy, picosecond regenerative thin-disk amplifier at 1 kHz[C]//Proc of SPIE. 2012: 82351W.
- [55] Teisset C, Schultze M, Bessing R, et al. 300 W picosecond thin-disk regenerative amplifier at 10 kHz repetition rate[C]//Advanced Solid State Lasers. 2013.
- [56] Chyla M, Miura T, Smrz M, et al. 50-mJ, 1-kHz Yb: YAG thin-disk regenerative amplifier with 969-nm pulsed pumping[C]//Proc of SPIE. 2014:89590S.
- [57] Klingebiel S, Schultze M, Teisset C Y, et al. 220mJ, 1 kHz picosecond regenerative thin-disk amplifier[C]//The European Conference on Lasers and Electro-Optics. 2015.
- [58] Jung R, Tümmler J, Will I. Regenerative thin-disk amplifier for 300 mJ pulse energy[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 883.
- [59] Jung R, Tümmler J, Nubbemeyer T, et al. Thin-disk ring amplifier for high pulse energy[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 4375.
- [60] Nubbemeyer T, Kaumanns M, Ueffing M, et al. 1 kW, 200 mJ picosecond thin-disk laser system[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1381-1384.
- [61] Krötz P, Wandt C, Grebing C, et al. Towards 2 kW, 20 kHz ultrafast thin-disk based regenerative amplifiers[C]//Advanced Solid State Lasers. 2019: ATh1A.
- [62] Beyertt A, Nickel D, Giesen A. Femtosecond thin-disk Yb: KYW regenerative amplifier[J]. *Applied Physics B*, 2005, 80(6): 655-660.
- [63] Buenting U, Sayinc H, Wandt D, et al. Regenerative thin disk amplifier with combined gain spectra producing 500 μ J sub 200 fs pulses[J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8046-8050.
- [64] Se villano P, Brisset J G, Trophème B, et al. High energy regenerative amplifier based on Yb: CaF₂[C]//Proc of SPIE. 2017: 1008223.
- [65] Caracciolo E, Pirzio F, Kemnitzer M, et al. 42 W femtosecond Yb: Lu₂O₃ regenerative amplifier[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(15): 3395-3398.