

无法拉第旋光器的驻波腔再生放大器

刘钊^{1,2,3}, 余洋^{1,2,3}, 王庆^{1,2,3*}¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;²信息光子技术工业和信息化部重点实验室, 北京 100081;³光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 介绍了一种无法拉第旋光器的驻波腔再生放大器, 通过利用偏振片的剩余反射率, 实现种子激光注入与再生腔输出激光输出的光路分离。最终, 在 10 kHz 重复频率下, 实现了平均功率为 4.87 W 的放大皮秒脉冲激光输出, 对应的脉冲宽度为 53 ps, 激光光束质量因子为 $M^2 < 1.19$ 。

关键词 激光光学; 再生放大器; 驻波腔; 法拉第旋光器; Nd:YVO₄

中图分类号 TN248 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2314001

Standing-Wave Cavity Regenerative Amplifier Without Faraday Rotator

Liu Zhao^{1,2,3}, Yu Yang^{1,2,3}, Wang Qing^{1,2,3*}¹School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;²Key Laboratory of Information Photonics Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China;³Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, Beijing 100081, China

Abstract A standing-wave cavity regenerative amplifier without Faraday rotator is demonstrated. In addition, according to the residual reflectivity of the thin film polarizer, the beams of injected seed laser and output regenerative amplified laser are separated. Finally, under a repetition frequency of 10 kHz, an amplified picosecond pulse laser output with an average power of 4.87 W is obtained, and the pulse width is 53 ps. Furthermore, the laser beam quality factor M^2 is smaller than 1.19.

Key words laser optics; regenerative amplifier; standing-wave cavity; Faraday rotator; Nd:YVO₄

1 引言

大能量超短脉冲激光被广泛应用于高质量、高精度的工业微加工^[1-5]中, 同时也为科研领域(如强场物理)提供了重要的工具^[6-8]。再生放大是一种用于产生大能量超短脉冲的成熟技术^[9]。在传统的再生放大器中, 种子光的脉冲被注入到包含粒子数反转增益介质的驻波腔中, 脉冲经过多次放大, 达到增益饱和后从驻波腔中倒出, 再生放大器的输出光通过由法拉第旋光器和偏振器件组成的光隔离器后可实现与注入种子光的空间分离^[10]。然而, 构成法拉第旋光器的铽镓石榴石(Tb₃Ga₅O₁₂, TGG)类磁光晶体的损伤阈值低于再生放大器中的其他元件^[11-14], 这限制了驻波腔再生放大

器在高功率超短脉冲激光放大中的应用。环形行波腔再生放大器解决了这一问题, 注入行波腔内的种子光的放大光路是单向的, 注入种子光和再生放大器输出光的光路是分离的, 输出光无需通过由法拉第旋光器和偏振器件组成的光隔离器来进行分离。然而, 受到环形行波腔设计的影响, 用于关断的 Pockels 盒(PC)工作在 $\lambda/2$ 电压处, 这会使得实现 Pockels 盒在中红外或大模式体积下工作的高电压电路变得更加复杂^[15-16], 进而限制了环形行波腔再生放大器在中红外与大本征模体积再生放大器中的应用。

对于再生放大器, 其输出光脉冲能量仅与再生放大器本身相关, 与注入种子光的单脉冲能量无关。当小信号种子光注入时, 控制脉冲在再生腔内的放大程

收稿日期: 2022-04-11; 修回日期: 2022-05-09; 录用日期: 2022-06-08

基金项目: 北京市自然科学基金(4222074)

通信作者: *qingwang@bit.edu.cn

数可以获得高脉冲对比度的放大脉冲输出^[17-18]。同时,对于薄膜偏振片(TFP),其对s偏振态光的反射率大于对p偏振态光的反射率^[19],这使得再生放大器可以以高透p偏振光情况下的较大剩余反射率进行种子光引入,腔内则以s偏振光的高反射率在低损耗下运行。据此,本文设计了一种利用两片薄膜偏振片实现种子光注入的驻波腔再生放大器,再生腔内Pockels盒工作在 $\lambda/4$ 电压。借助这种方法,无需加入由法拉第旋光器和偏振器件组成的光隔离器,即可实现驻波腔中再生放大器输出光与注入种子光的分离。通过实验对比了无法拉第旋光器的驻波腔再生放大器与使用法拉第旋光器和偏振器件进行光隔离的传统驻波腔再生放大器的实验结果,验证了所提方法的可行性,为实现大能量输出再生放大器提供了一种更简便的实验方案。

2 实验装置

无法拉第旋光器的驻波腔再生放大器(SCRAWFR)的实验装置如图1(a)所示。实验装置由一台皮秒激光种子源和一个再生放大器组成。种子源为一台基模运行的半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模激光器,输出平均功率为1.5 W,重复频率为76 MHz,脉冲宽度为50 ps。再生放大器为端泵型折叠驻波腔放大器。采用光纤耦合输出的880 nm半导体激光器(LD)作为泵浦源,芯径为200 μm ,数值孔径为0.22,最大输出功率为30 W,将激光以1:4的耦合比例注入激光晶体。激光晶体是大小为3 mm \times 3 mm \times 18 mm的Nd:YVO₄晶体,原子数分数为

0.3%,晶体的两个端面镀有880 nm和1064 nm的增透膜,晶体一端为2°楔形切割,以抑制晶体两个端面的法布里-珀罗标准具效应。晶体四周由铜箔包裹,并将其置于25 °C的通水铜热沉中进行冷却。平面镜M1、M4作为驻波腔放大器的腔镜,镀有1064 nm的0°高反膜和880 nm的0°增透膜。凹面反射镜M2(曲率半径为1000 mm)、M3(曲率半径为500 mm)的作用是补偿晶体在高功率泵浦下的热透镜效应,并获得合适的激光模式,M2、M3镀有1064 nm的0°高反膜和880 nm的0°增透膜。光束整形系统(BS)用于实现种子光与再生放大器的模式匹配。平面镜M5为种子光注入用反射镜,镀有1064 nm的45°高反膜。利用1064 nm的45°薄膜偏振片TFP1、TFP2实现种子光的剩余反射率注入,其对s偏振态光的反射率为 $R_s = 99.29\%$,对p偏振态光的透射率为 $T_p = 97.17\%$,使得注入再生腔内的种子光单脉冲能量达到数十皮焦量级,能够抑制再生腔以腔倒空模式振荡运行。同时,利用薄膜偏振片TFP1、 $\lambda/4$ 波片(QWP)和偏硼酸钡(BBO)晶体Pockels盒控制再生腔内脉冲的往返放大次数。其中,Pockels盒以 $\lambda/4$ 电压运行,放大后的脉冲由薄膜偏振片TFP1一侧输出。将使用法拉第旋光器和偏振器件进行光隔离的传统驻波腔再生放大器(TSCRA)作为对照实验,其实验装置如图1(b)所示。其中,种子源、再生放大器与无法拉第旋光器的驻波腔再生放大器的实验装置一致。 $\lambda/2$ 波片HWP1的作用是调节种子源的注入功率。薄膜偏振片TFP3、 $\lambda/2$ 波片HWP2和法拉第旋光器(FR)构成光隔离系统,实现注入种子光与再生放大器输出光的分离。

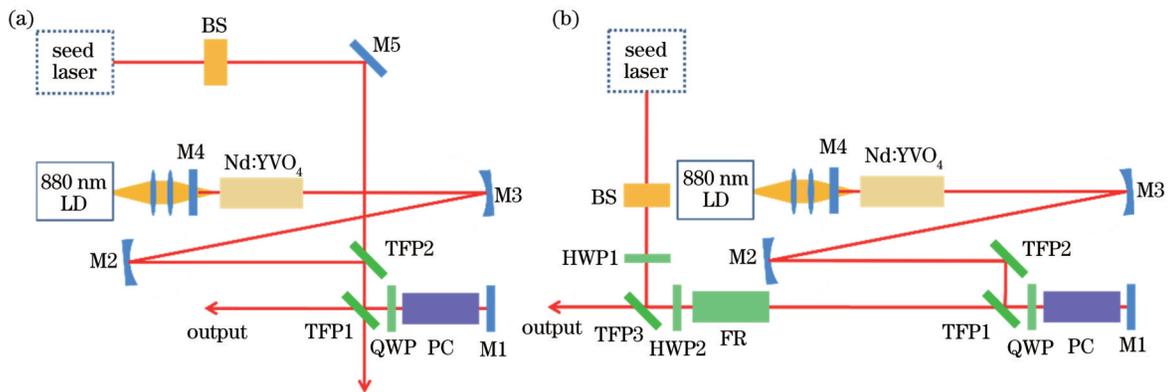


图1 实验装置图。(a) SCRAWFR;(b) TSCRA

Fig. 1 Experimental setup. (a) SCRAWFR; (b) TSCRA

3 实验结果与分析

种子光以p偏振态经由中心波长为1064 nm的45°薄膜偏振片TFP1、TFP2引入,主要功率透射而出,经由TFP1的剩余反射率注入到再生腔内的种子光的功率为3 mW。Pockels盒的高压(HV)驱动器通过光电探头与种子源输出的重复频率为76 MHz的锁模脉冲序列时序同步。Pockels盒上加载的 $\lambda/4$ 电压以10 kHz的重复频率运行。在高压持续时间内,种子光

在再生腔内进行放大。在高压关闭后,经过放大的脉冲由薄膜偏振片TFP1左侧输出。在10 kHz重复频率下,再生放大器在不同泵浦功率下的最大输出功率和Pockels盒的高压持续时间如图2所示。在泵浦功率不变的情况下,优化Pockels盒上加载高压的持续时间可使得再生放大脉冲能量达到最大。当泵浦光功率为23.1 W,Nd:YVO₄晶体吸收21.3 W时,实现最大平均功率为4.87 W的再生放大输出,对应的光-光效率为22.82%。

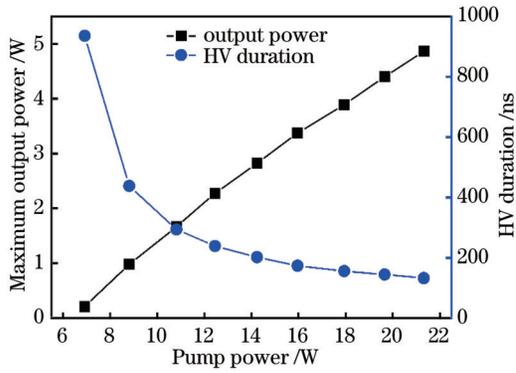


图 2 10 kHz 重复频率下 SCRAWFR 的最大输出功率与 Pockels 盒的 HV 持续时间

Fig. 2 Maximum output power of SCRAWFR and HV duration of Pockels cell under repetition rate of 10 kHz

使用法拉第旋光器和偏振器件进行光隔离的传统驻波腔再生放大器作为对照。当重复频率为 10 kHz 时,种子光注入功率分别为 150、50、4 mW,再生放大器在不同泵浦功率下的最大输出功率和 Pockels 盒上加载高压的持续时间如图 3 所示。可以发现,当注入功率为 4 mW 时,同样在泵浦光功率为 23.1 W、Nd:YVO₄ 晶体吸收 21.3 W 情况下获得最大平均输出功率(4.98 W),与无法拉第旋光器的驻波腔再生放大器的最大平均输出功率相当。在放大性能上,两种再生放大器的功率放大性能是相当的。

无法拉第旋光器驻波腔再生放大器输出光的脉冲波形由超快探头 (ALPHALAS GMBH, UPD-40-UVIR-P, 上升沿时间小于 40 ps) 和示波器 (Agilent,

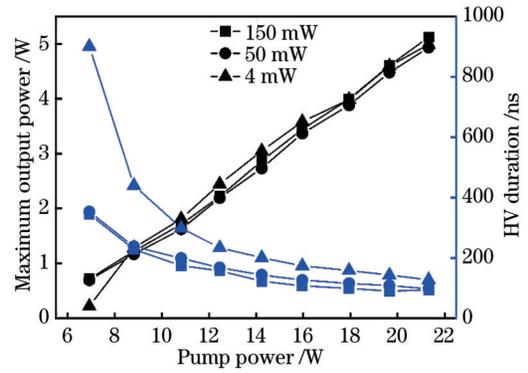


图 3 不同注入种子光功率下 TSCRA 的最大输出功率与 Pockels 盒的 HV 持续时间

Fig. 3 Maximum output power of TSCRA and HV pulse duration of Pockels cell under different injected seed powers

DSO 80804B, 带宽为 8 GHz) 采集得到。图 4 为最大平均输出功率为 4.87 W 情况下无法拉第旋光器驻波腔再生放大器的脉冲波形。脉冲间隔与高压驱动器的重复频率(10 kHz)一致。放大后脉冲对比度较高,不同脉冲间的振幅波动范围为 $-5\% \sim 5\%$ ($100 \mu\text{s}$)。图 5 为种子光注入功率为 4 mW 时,最大平均输出功率为 4.98 W 情况下传统驻波腔再生放大器的脉冲波形。同样地,脉冲间隔与高压驱动器的重复频率(10 kHz)一致。放大后脉冲对比度较高,不同脉冲间的振幅波动小。高脉冲对比度说明两种结构下,种子光脉冲能够在再生腔内实现高增益放大。同时,脉冲序列中不同脉冲间振幅波动小,说明两种结构下再生放大器的返回光均不会影响种子源激光器的稳定运行。

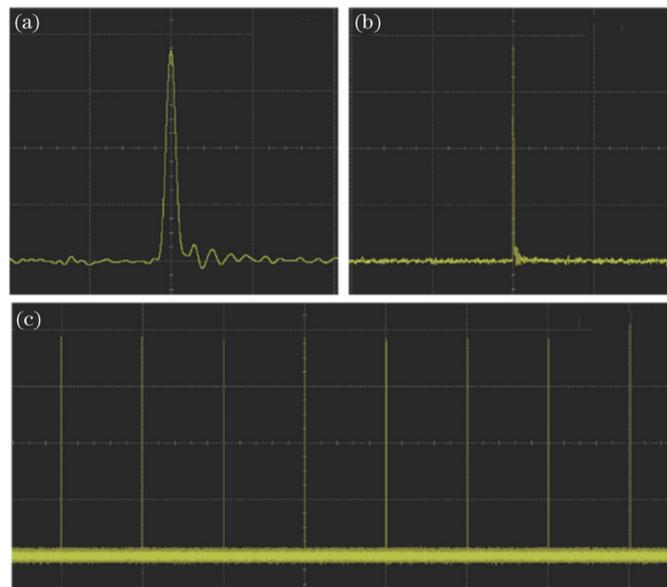


图 4 不同时间尺度下 SCRAWFR 的脉冲波形。(a) 1 ns/div; (b) 10 ns/div; (c) 100 μs /div

Fig. 4 Pulse waveform of SCRAWFR under different time scales. (a) 1 ns/div; (b) 10 ns/div; and (c) 100 μs /div

采用强度自相关法对放大器输出光的脉冲宽度进行测量。无法拉第旋光器驻波腔再生放大器在最大平均输出功率下的脉冲宽度的测量结果如图 6 所示,高

斯拟合后脉冲宽度(τ_p)约为 53 ps。受到再生放大过程中增益变窄效应的影响,再生放大后的脉冲宽度会略宽于种子光的脉冲宽度。作为对照,图 7 为种子光注

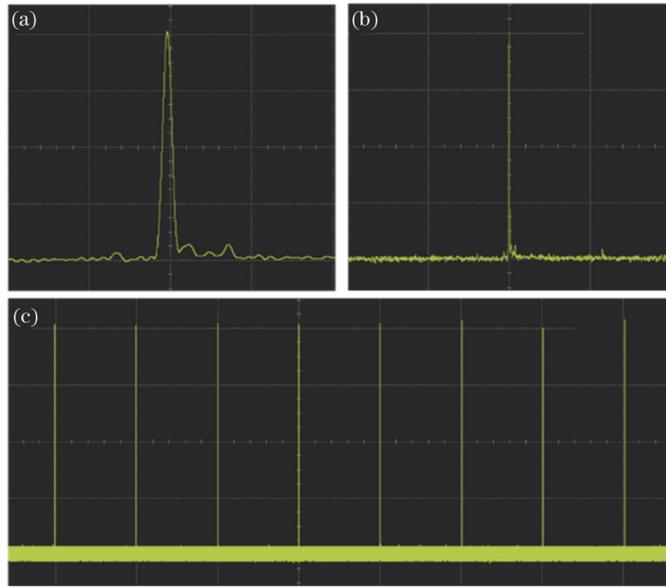


图 5 不同时间尺度下 TSCRA 的脉冲波形。(a) 1 ns/div; (b) 10 ns/div; (c) 100 μs/div

Fig. 5 Pulse waveform of TSCRA under different time scales. (a) 1 ns/div; (b) 10 ns/div; (c) 100 μs/div

入功率为 4 mW 时,最大平均输出功率为 4.98 W 情况下传统驻波腔再生放大器脉冲宽度的测量结果,高斯拟合后脉冲宽度约为 52.7 ps。可以发现,两种结构的再生放大器的输出光的脉冲宽度是相当的。

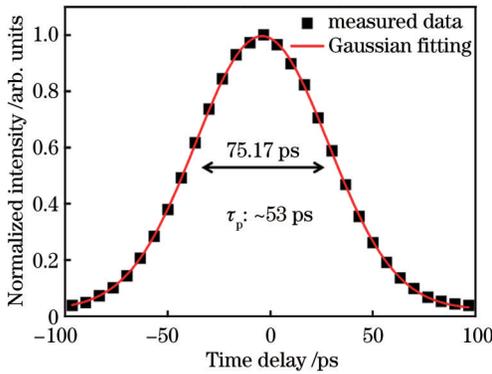


图 6 自相关法测得的 SCRAWFR 的脉冲宽度

Fig. 6 Pulse width of SCRAWFR measured by autocorrelation method

采用光束质量分析仪 (Spiricon M^2 -200s) 对无法拉第旋光器驻波腔再生放大器在最大平均输出功率下的光束质量因子进行了测量。光束半径随着距离的变化情况如图 8 所示,通过拟合得到其在水平方向上的光束质量因子为 $M_x^2 = 1.18$,在垂直方向上的光束质量因子为 $M_y^2 = 1.19$ 。插图为远场光斑的光束强度分布,可以看出光斑具有较好的光束质量。图 9 所示为传统驻波腔再生放大器在种子光注入功率为 4 mW 时,最大平均输出功率为 4.98 W 情况下的光束质量因子测量结果,通过拟合得到其在水平方向上的光束质量因子为 $M_x^2 = 1.23$,在垂直方向上的光束质量因子为 $M_y^2 = 1.28$ 。相较于传统驻波腔再生放大器,无法拉第旋光器驻波腔再生放大器的输出光拥有更好的光

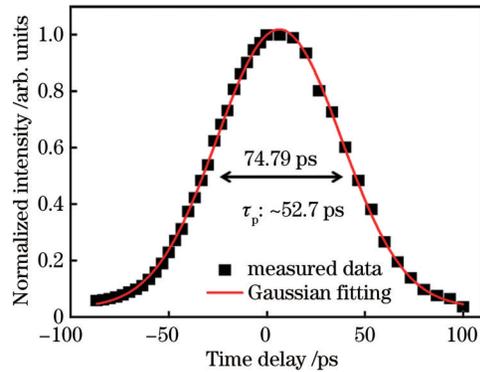


图 7 自相关法测得的 TSCRA 的脉冲宽度

Fig. 7 Pulse width of TSCRA measured by autocorrelation method

束质量,这可能得益于其更为简单的光路结构,此时在光束传输过程中引入的微扰更少。

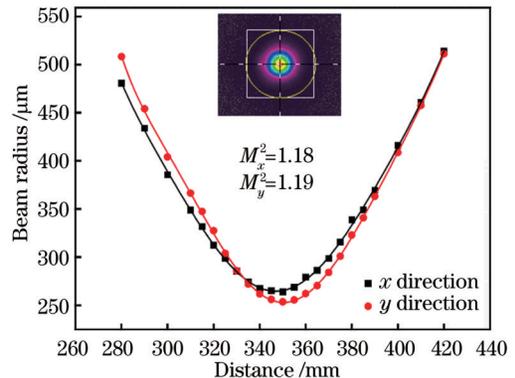


图 8 4.87 W 输出功率下 SCRAWFR 的光束质量与远场光斑强度分布

Fig. 8 Beam quality and far-field spot intensity distribution of SCRAWFR measured under output power of 4.87 W

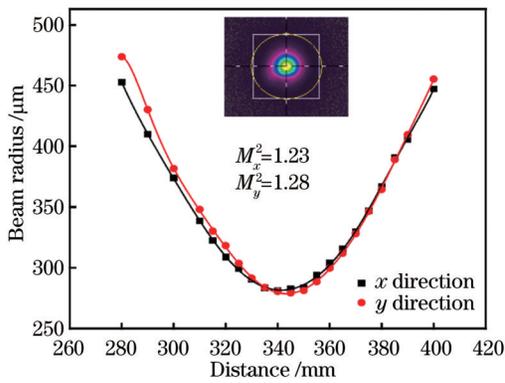


图9 4.98 W输出功率下 TSCRA 的光束质量与远场光斑强度分布

Fig. 9 Beam quality and far-field spot intensity distribution of TSCRA measured under output power of 4.98 W

使用功率计(Ophir Nova II Thermopile 30A-BB-18)对传统驻波腔再生放大器与无法拉第旋光器驻波腔再生放大器在最大平均输出功率下的功率稳定性进行了测量。如图10所示,在10 min连续运行时间内,传统驻波腔再生放大器的功率稳定性满足均方根(RMS, S_{RMS})不大于0.33%,无法拉第旋光器驻波腔再生放大器的功率稳定性满足 $S_{\text{RMS}} \leq 0.70\%$ 。可以发现,无法拉第旋光器运行的驻波腔再生放大器能够稳定运行,其功率稳定性与传统驻波腔再生放大器相当。

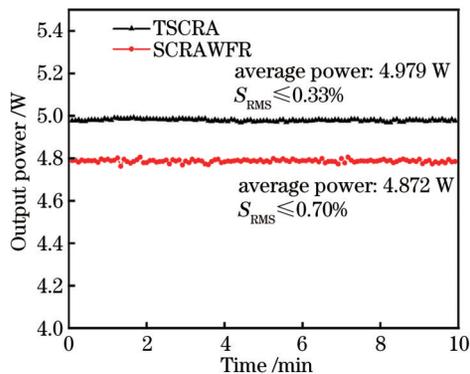


图10 TSCRA与SCRAWFR的输出功率稳定性

Fig. 10 Output power stability of TSCRA and SCRAWFR

4 结 论

针对大能量皮秒再生放大器中法拉第旋光器在高峰值功率密度下容易损伤的问题,提出了一种无法拉第旋光器驻波腔再生放大器,依靠偏振片的剩余反射率,实现种子光与再生放大输出光不同光路的注入与输出。最终在10 kHz重复频率下,获得了平均功率为4.87 W的稳定输出,对应的脉冲宽度为53 ps,光束质量因子为 $M^2 < 1.19$ 。所提无法拉第旋光器驻波腔再生放大器的功率放大性能、脉冲波形、脉冲对比度、脉冲序列稳定性、脉冲宽度和功率稳定性等性能与相同再生腔结构的传统驻波腔再生放大器相当,但其输出

光拥有更好的光束质量,这证明了其以更为简单、紧凑的结构实现了相同的功率放大,并降低了高功率输出的再生放大器对法拉第旋光器高损伤阈值的运行要求。为实现更大能量、更高峰值功率密度的再生放大脉冲输出提供了一种紧凑实用的解决方案。

参 考 文 献

- [1] Knappe R, Haloui H, Seifert A, et al. Scaling ablation rates for picosecond lasers using burst micromachining[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7585: 150-155.
- [2] 陈亮, 刘晓东, 刘静, 等. 飞秒激光在石英玻璃表面刻蚀微槽的研究[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2314001. Chen L, Liu X D, Liu J, et al. Microgroove etching with femtosecond laser on quartz glass surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2314001.
- [3] Clubley D A, Bell A S, Friel G. High average power Nd:YVO₄ based pico-second regenerative amplifier[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6871: 68711D.
- [4] 白雪, 陈烽. 飞秒激光制备超疏水表面的研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114003. Bai X, Chen F. Recent advances in femtosecond laser-induced superhydrophobic surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114003.
- [5] 乔玲玲, 汪旻, 伍荣波, 等. 超低损耗铌酸锂光子学[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823012. Qiao L L, Wang M, Wu R B, et al. Ultra-low loss lithium niobate photonics[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823012.
- [6] 戴晨, 汪洋, 缪志明, 等. 基于飞秒激光与物质相互作用的高次谐波产生及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0300001. Dai C, Wang Y, Miao Z M, et al. Generation and application of high-order harmonics based on interaction between femtosecond laser and matter[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0300001.
- [7] Bobrinetskiy I I, Emelianov A V, Otero N, et al. Patterned graphene ablation and two-photon functionalization by picosecond laser pulses in ambient conditions[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(4): 043104.
- [8] Sclafani M, Pullen M G, Wolter B, et al. Molecular structure from aligned polyatomic molecules using laser-induced electron diffraction[C]//2015 Photonics North, June 9-11, 2015, Ottawa, ON, Canada. New York: IEEE Press, 2015.
- [9] 白川, 田文龙, 王阁阳, 等. 高重频全固态掺镱飞秒激光放大器研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501005. Bai C, Tian W L, Wang G Y, et al. Progress on Yb-doped all-solid-state femtosecond laser amplifier with high repetition rate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501005.
- [10] Caracciolo E, Kemnitzer M, Guandalini A, et al. 28-W, 217 fs solid-state Yb:CaAlGdO₄ regenerative amplifiers[J]. Optics Letters, 2013, 38(20): 4131-4133.
- [11] Starke K, Gross T, Ristau D, et al. Laser-induced damage threshold of optical components for high-

- repetition-rate Nd: YAG lasers[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3578: 584-593.
- [12] Kamimura T, Kawaguchi Y, Arai T, et al. Investigation of bulk laser damage in transparent YAG ceramics controlled with microstructural refinement[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7132: 713215.
- [13] Chen Z, Yang L, Wang X Y, et al. Highly transparent terbium gallium garnet crystal fabricated by the floating zone method for visible-infrared optical isolators[J]. Optical Materials, 2015, 46: 12-15.
- [14] 郑大怀, 吴婧, 商继芳, 等. 电光调 Q 晶体研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, 47(11): 1139-1148.
Zheng D H, Wu J, Shang J F, et al. Progress on electro-optic crystals for Q-switches[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2017, 47(11): 1139-1148.
- [15] von Grafenstein L, Bock M, Ueberschaer D, et al. Picosecond 34 mJ pulses at kHz repetition rates from a Ho: YLF amplifier at 2 μm wavelength[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33142-33149.
- [16] Novák J, Green J T, Metzger T, et al. Thin disk amplifier-based 40 mJ, 1 kHz, picosecond laser at 515 nm[J]. Optics Express, 2016, 24(6): 5728-5733.
- [17] 黄玉涛, 樊仲维, 牛岗, 等. 高脉冲稳定性的 100 kHz 皮秒再生放大器[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502009.
Huang Y T, Fan Z W, Niu G, et al. 100 kHz repetition rate picosecond regenerative amplifier with high pulse stability[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(5): 0502009.
- [18] 王璐璐, 牛岗, 石朝辉, 等. 1.3 μm 高脉冲能量锁模皮秒再生放大器[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1102007.
Wang L L, Niu G, Shi Z H, et al. 1.3 μm picosecond regenerative amplifier with high pulse energy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(11): 1102007.
- [19] Sahraee M, Fallah H R, Moradi B, et al. Design and fabrication of thin-film polarizer at wavelength of 1540 nm and investigation of its laser-induced damage threshold[J]. The European Physical Journal Plus, 2014, 129(12): 277.