

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.06.02

GHz 重复频率飞秒激光器发展趋势

张志刚

(北京大学 电子学院, 北京 100871)

摘 要: 随着飞秒光梳光谱、飞秒测距等飞秒激光器相关应用领域的发展, 对于更高重复频率的飞秒激光器也产生了越来越迫切的需求。本文叙述了固体激光器和光纤激光器在产生 GHz 重复频率的飞秒脉冲输出上所使用的主要技术和技术进展, 总结了 GHz 激光器的最新发展趋势。为之后进行 GHz 重复频率飞秒激光器研究的相关人员提供了一定的参考。

关键词: 飞秒激光器; 吉赫兹重复频率; 非线性放大环形镜; 克尔透镜锁模; 非线性偏振旋转; SESAM

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2022)06-0011-06

Development trend of GHz repetition rate femtosecond laser

ZHANG Zhigang

(School of Electronics, Peking University, Beijing 100095, China)

Abstract: With the development of femtosecond laser applications such as femtosecond optical comb spectroscopy and femtosecond ranging, there is a growing demand for femtosecond lasers with higher repetition rates. In this paper, the main technologies and technical progress of solid-state lasers and fiber lasers used to generate femtosecond pulses with GHz repetition rate are reviewed. Finally, the latest development trend of GHz lasers is summarized. It provides a reference for the relevant personnel who carry out the research on GHz repetition rate femtosecond lasers later.

Key words: femtosecond laser; gigahertz repetition rate; nonlinear amplifying loop mirror; Kerr-lens mode-locked; nonlinear polarization rotation; SESAM

0 引言

GHz 重复频率激光器在应用上取得新进展, 引起广泛关注, 例如光学频率梳^[1]、高采样率光谱学^[2-3]、高速测距^[4-5]和成像^[6]等。就连飞秒微细加工, 也因为 GHz 重复频率而发生了“革命”^[7-8]。

常规的固体飞秒激光器和光纤飞秒激光器的重复频率大都是几十 MHz 到几百 MHz, 很少有 GHz 的。因为在只需要飞秒激光器就可以满足应用的场合, 较低的重复频率可以使单脉冲能量更高。

在需要放大的场合, 脉冲的间隔如果太小, 对选单脉冲用的开关速度要求就会很高, 增加了成本。其次, 在激光器的制作上, 几十 MHz 的激光器制作起来更容易, 特别是光纤激光器, 无论是哪种锁模机制, 长一点的光纤会使光纤器件容易制作。随着应用需求的增加, GHz 激光器逐渐受到重视。

本文从 GHz 重复频率的激光器应用需求出发, 阐明 GHz 激光器的重要性, 对 GHz 激光器研制的难点和主要技术进行介绍, 并展望了 GHz 激光器的发展趋势。

收稿日期: 2022-10-17; 修回日期: 2022-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(61575004); 自然基金国际合作项目(61761136002)

引用格式: 张志刚. GHz 重复频率飞秒激光器发展趋势[J]. 计测技术, 2022, 42(6): 11-16.

Citation: ZHANG Z G. Development trend of GHz repetition rate femtosecond laser[J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(6): 11-16.



1 GHz重复频率——双光梳光谱学的“金标”

光学频率梳本来不需要非得1 GHz的重复频率,几百MHz也不是不行。但是GHz光频梳的优势是,频率间隔大,单根梳齿的功率高;拍频的时候容易判断被测光频离哪根梳齿近,因此用分辨率不高的波长计就可以解决。

大于1 GHz是不是也可以?也是可以的,但是为了锁定频率梳而扩谱需要的平均功率会成倍增加,导致扩谱用光纤的压力。所以1 GHz是比较恰当的选择。

在吸收光谱学中,双光梳光谱学是一种可以不用光谱仪的吸收光谱学新方法。这种方法将在光谱吸收信号,变成射频信号。在不需要高采样率的情况下,脉冲重复频率在100 MHz就能胜任。但是在需要测量快速过程(例如燃烧过程的情况下),就需要更高的采样速率,这样就要求更高的脉冲重复频率。

但是采样速率的高低和吸收光谱的线宽有关。吸收光谱的线宽一般在3~5 GHz,梳齿间隔太小,采样速率上不去;梳齿间隔太大,会使采样点不足或错过了吸收谱线。所以,光谱的光频宽度 $\Delta\nu$ 与射频的关系定义为^[2]

$$\Delta\nu \leq \frac{mf_{\text{rep}}}{2} = \frac{f_{\text{rep}}^2}{2\Delta f_{\text{rep}}} \quad (1)$$

式中: m 为从射频到光频的放大倍数; f_{rep} 为脉冲的重复频率; Δf_{rep} 为双光梳之间的重复频率差,重复频率差代表采样速率,其倒数是采样间隔时间。

$$m = \frac{f_{\text{rep}}}{\Delta f_{\text{rep}}} \quad (2)$$

如图1所示,激光频率的梳齿间隔从200 MHz到30 GHz演变时,当光通过气体长度为5 mm,气压为1 bar,甲烷含量为0.5% mol时,模拟的不同光谱采样间隔的甲烷(CH_4)气体吸收谱。从图1可以看到,在200 MHz时,采样出来的光谱非常光滑,但是采样速率过低。当频率间隔为1 GHz时,采样点足够多而未发现畸变。超过2 GHz时,测得的吸收光谱发生了明显的畸变,显示频率间隔过大,采样点不足。

当激光器的光学频率梳为1 GHz、双光梳重复频率差为90 kHz时,采样点达到11 μm ^[3],采样速

率和采样点数都可满足需求,故称1 GHz为双光梳光谱学的“金标”。因此,选用重复频率几十GHz的微腔光梳对双光梳光谱学测量,对3~5 GHz线宽的吸收光谱是不合适的。

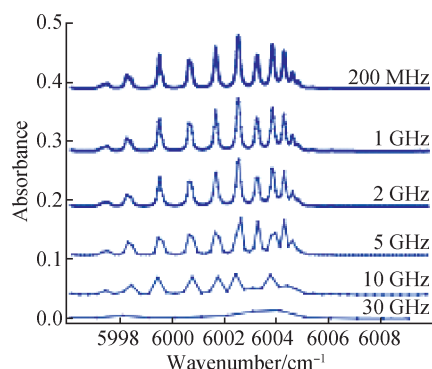


图1 模拟的对不同光谱采样间隔的甲烷(CH_4)气体吸收谱^[3]

Fig.1 Modeled spectra of methane (CH_4) plotted with different spectral point spacing (offset for clarity)^[3]

在天文光谱定标用的“天文光梳”中^[9],满足天文光谱仪分辨力需求的梳齿间隔,即脉冲的重复频率,往往需要几十GHz,并且光谱范围要覆盖到可见光。常规的激光器很难达到几十GHz,而且成熟的飞秒激光器工作波长也不在可见光。

事实上,如果有办法直接产生数十GHz重复频率的脉冲,也不一定是好事,如果激光器输出的光谱不能直接产生覆盖整个光谱仪感光区间,就需要扩谱和波长变换。而扩谱和波长变换需要较高脉冲能量(>200 pJ)。在数十GHz复频率下,平均功率可达数W。对于1 μm 左右芯径的扩谱用光子晶体光纤,这个功率会烧坏就会显得过高,容易烧坏扩谱用光纤。相对而言,1 GHz左右的频率间隔,可能是比较适合扩谱用频率。扩谱时平均功率不太高,扩谱后也比较容易通过法布里-珀罗腔把频率倍增上去。

2 GHz重复频率飞秒固体激光器技术

GHz重复频率首先要求腔短,例如1 GHz重复频率对应的光学长度是0.3 m。对于固体激光器来说,这不算短。而对于光纤激光器来说,就显得过短。因为光纤自身长度和倍频的耦合器件等都需要一定长度,而且锁模器件也需要有一定长度,这可能会超出0.3 m。

其次是锁模机制。固体激光器,无论是绿光

泵浦的钛宝石,还是半导体激光器直接泵浦的Yb晶体,锁模机制不外乎是克尔透镜锁模^[10]和半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorber Mirrors, SESAM)锁模^[11],另外还有应用较少的二阶非线性锁模^[12]。

2.1 克尔透镜锁模:启动锁模需要第一推动力

克尔透镜锁模因其脉冲短、效率高,在80~100 MHz重复频率的钛宝石激光器中广泛应用。

由于克尔透镜自聚焦效果对于长腔并不明显,为了获得克尔透镜锁模,首先要把腔调至稳区的边缘;其次需要一个外界推动力来启动锁模,外界推动力可以是腔内的扰动(例如相干公司的MIRA)以推动反射镜(例如Femto Lasers);此外,还需要有光阑辅助,光阑包括硬光阑和软光阑。硬光阑是在输出镜前,加一个可调谐光阑,腔内增加扰动的同时,逐渐缩小光阑,锁模就会在某一瞬间启动。软光阑是没有实际的光阑,而是光斑大小与泵浦光的匹配程度或与晶体的匹配程度,导致连续光与脉冲光获得增益的不同,克尔透镜锁模软光阑效果图如图2所示。

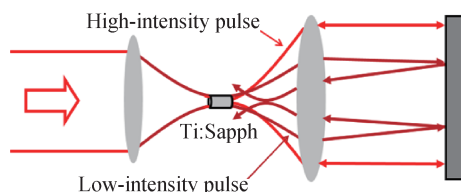


图2 克尔透镜锁模软光阑效果图

Fig.2 Schematic of "soft-aperture" effect in Kerr lens mode locking

启动锁模需要把激光器调到稳区的边缘,此时锁模变得比较敏感,容易在外界扰动下失锁。长期不稳定性还源于泵浦光和腔模的空间耦合结构。加强光具座和平台的机械强度,会使激光器变得越来越笨重。所以有人很早就提出了可饱和吸收体锁模的概念,代表性的器件是SESAM^[11]。

2.2 SESAM锁模

SESAM是把对激光波长有吸收的半导体薄膜生长在透明半导体材料的反射镜上而做成的器件。利用半导体薄膜的可饱和吸收效应,给腔内噪声中的高峰值脉冲较大的反射率,给连续光和弱脉冲以较小的反射率,帮助大脉冲占据整个腔。这种锁模方式不依赖于腔是否工作在稳区边缘,可长期锁模。

但是也正是这个原因,单从脉冲列上,永远无法分清腔内运转的到底是皮秒还是飞秒脉冲,尽管啁啾镜或棱镜对色散补偿就在腔内。因为非线性效应依赖于腔的准直程度,仅靠可饱和吸收和色散补偿,无法达到足够的光谱宽度,仍然需要腔的调节,使自相位调制发挥作用,因此钛宝石激光器很快就不用SESAM锁模了。

2.3 克尔透镜锁模:高重复频率下的自启动

当把固体激光器的重复频率增加到GHz时(图3),克尔透镜锁模不需要外力推动,而是自启动^[13-14]。在腔非常短特别是腔内的反射镜的曲率半径非常小时,等效的共焦腔的腰斑半径也变得非常小;当腰斑变小时,增益对克尔效应产生的光斑大小的变化就变得敏感,以至于不用外界扰动,也能让脉冲占据腔,即锁模启动。

不光是钛宝石激光器,掺镱的固体激光器也加入到GHz重复频率的激光器行列。

为了达到克尔透镜锁模中“软光阑”的效果,选用单模光纤耦合的半导体激光器泵浦。随着单模光纤耦合的泵浦功率越来越高,超过1 W,克尔透镜锁模的GHz重复频率的固体激光器变得容易。但是1 W半导体激光器泵浦的锁模激光器功率相对较低,选用高功率的光纤激光器泵浦^[15]固体激光器。因为是激光器,泵浦激光的模式好,克尔透镜锁模也相对容易。从成本角度看,用光纤激光器泵浦比用半导体激光器泵浦代价要高。

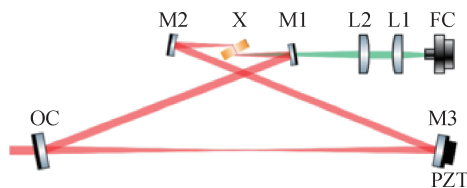


图3 GHz重复频率克尔透镜锁模的固体激光器腔型

Fig.3 Schematic of GHz repetition rate Kerr lens mode locked solid state laser

为了提高输出功率、降低成本,选用大模场面积输出的半导体激光器泵浦。此时,因入射到晶体中的光斑较大,软光阑很难起作用,所以选择使用硬光阑^[16],或SESAM^[17]。

图4为高功率多模半导体激光器泵浦的克尔透镜锁模的1 GHz固体激光器,其增益介质为Yb:CALGO晶体,在20 W泵浦功率下,输出功率可达6 W。为了锁模能自启动,腔内放了硬光阑(HA)^[16]。

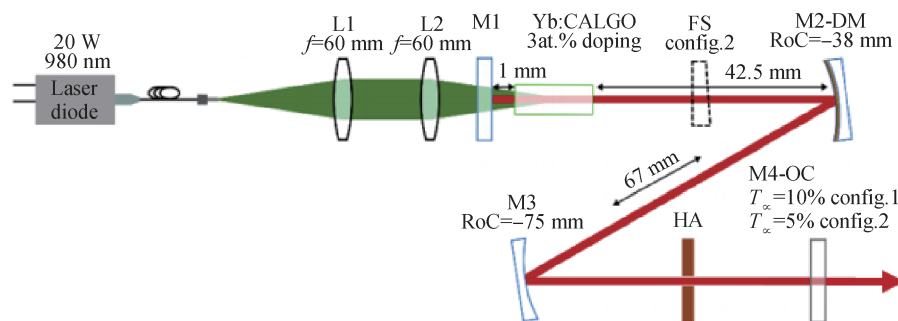
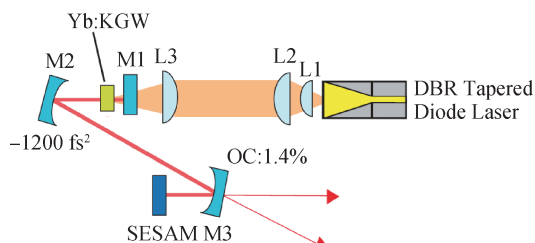
图4 1 GHz重复频率固体激光器硬光阑克尔透镜锁模^[16]Fig.4 Schematic of 1 GHz repetition rate Kerr lens mode locked solid state laser with a hard aperture^[16]

图5为高功率泵浦下SESAM锁模的高重复频率Yb: KGW激光器结构图^[17], 重复频率为1 GHz, 输出功率为1.1 W, 通过改变腔长, 激光器的重复频率可以提高到4 GHz。

图5 高重复频率Yb:KGW激光器结构图^[17]Fig.5 Structure diagram of Yb: KGW laser with high repetition rate^[17]

3 GHz光纤激光器

光纤激光器的锁模机制包括: SESAM锁模^[18-19]、非线性偏振旋转(NPE)锁模^[20]、非线性环路反射镜(NALM)锁模^[21]等, 都可以用于高重复频率光纤激光器上。

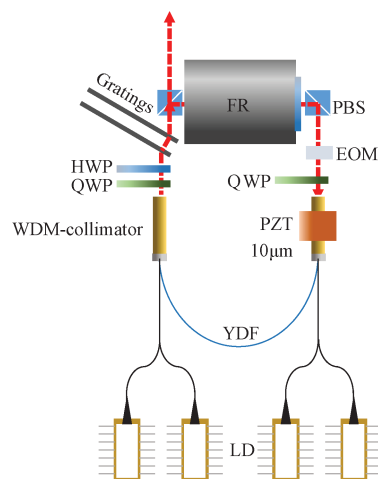
3.1 SESAM锁模

SESAM锁模是最简单的锁模机制, 也最易做短光纤腔, 但是真正用它做飞秒锁模的并不多, 主要是因为其脉冲相对较宽, 激光器输出功率太低, 仅有几十mW^[18-19]。

3.2 NPE锁模

NPE锁模是光纤激光器中最可靠的锁模机制。利用光纤中自然双折射和非线性偏振旋转, 结合偏振片和波片, 可以达到脉冲选出的作用。但是因为光纤是非保偏的, 容易受到温度和振动的影响。当重复频率增加到1 GHz时, 光纤长度只有10 cm, 而且弯曲会导致某种保偏效应。所以稳定性有一定保证^[22]。

北京大学在器件上做了大幅改进, 研制出NPE锁模的1 GHz掺镱光纤激光器(如图6), 输出功率在600 mW以上, 脉宽小于100 fs。

图6 北京大学研制的1 GHz重复频率飞秒光纤激光器^[22]Fig.6 Schematic of 1 GHz repetition rate femtosecond fiber laser developed by Peking University^[22]

3.3 NALM锁模

NALM锁模虽然可以保证自启动, 但是需要将泵浦光的功率先调到锁模阈值的数倍, 此时才会产生多脉冲, 然后再把泵浦功率降下来, 才能维持腔内单脉冲运转。但在泵浦功率降下来的过程中, 有约1%的几率一直无法产生单脉冲, 这时单脉冲锁模就失败了。

因为NALM中有一段线性腔部分使光路长度增加一倍, 而另一部分光纤不能过度弯曲, 所以很难有高重复频率的NALM锁模激光器出现。目前重复频率最高的NALM光纤激光器是北京大学研制的700 MHz重频的掺镱光纤激光器^[23]。

在高重复频率下, 不需要先将泵浦功率提高再降下来, 只要锁模就是单脉冲了^[24]。

4 GHz激光器:向“全固态”发展

光纤激光器,尤其是NPE锁模激光器,因为不能用保偏光纤,故对环境的敏感度高。GHz光纤激光器如何呢?为了解决长期稳定性问题,北京大学对NPE锁模的光纤激光器做了重要改进。首先,用全玻璃镜架代替原来的金属镜架,用玻璃底板代替原来的金属底板,用半球型底座和双楔角片提供在线调节机制,并将光纤用硅胶全部封闭,固态化GHz量级飞秒光纤激光器如图7所示。通过这样的措施,将激光器的噪声大幅降低,抖动低至130 as^[25],使长期稳定性也得到大大提高。



图7 北京大学研制的固态化GHz量级飞秒光纤激光器^[25]

Fig.7 GHz repetition rate solid-state femtosecond fiber laser developed by Peking University^[25]

不仅光纤激光器正在向固体激光器发展,而且固体激光器也在向“全固态”发展。星载情况下,光纤在宇宙射线的照射下损耗会大幅增加,出于安全性要求,固体激光器成为首选。但是如何提高固体激光器对环境的耐受力,是需要解决的关键问题。

Heriot Watt大学提出,将所有元件包括晶体和反射镜都直接贴在铝板上,使长期稳定度得到保障^[26]。固化在铝板上的2.18 GHz固体飞秒激光器如图8所示。这种将固体激光器“全固态化”的方式会成为提高固体激光器稳定性的趋势^[27]。

5 总结

GHz重复飞秒激光器越来越多地被用于高速精密测量、高速吸收光谱学、光频梳等。GHz重复频率的固体和光纤激光器也获得充分的发展。

目前,半导体激光器直接泵浦的1 GHz飞秒光纤激光器输出的脉冲平均功率最高,可达1 W,效

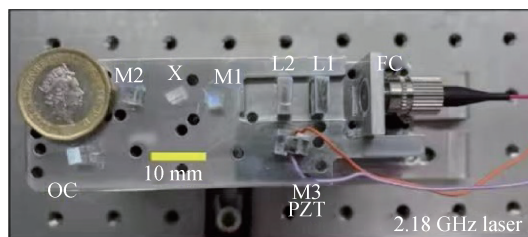


图8 固化在铝板上的2.18 GHz固体飞秒激光器^[27]

Fig.8 2.18 GHz repetition rate femtosecond solid-state laser with all components bonded on an aluminum board^[27]

率也最高;GHz重复频率的固体激光器中,半导体激光器直接泵浦的输出功率有可能比较低,只有数十mW。多模半导体激光泵浦或高功率激光器泵浦的固体激光器,输出功率可达数W。为了适用各种场合的应用,无论是固体激光器,还是光纤激光器,都有向全固态化发展的趋势,即甩掉金属调节架,直接将光学元件固定在低膨胀率材料制成的底板上,以抵御温度变化对激光器的影响。

随着材料科学和光子学技术的发展,光子集成的GHz重复频率激光器,有可能会异军突起,引领新一代超高重复频率飞秒激光器。

参考文献

- [1] HOGHOOGH N, XING I, CHANG P, et al. Broadband 1 GHz mid-infrared frequency comb[J]. Light: science & applications, 2022, 11: 264.
- [2] CODDINGTON, NEWBURY N, SWANN W. Dual-comb spectroscopy[J]. Optica, 2016, 3: 414.
- [3] HOGHOOGHI N, COLE GREGORY R K, RIEKER B. 11 μ s time-resolved, continuous dual-comb spectroscopy with spectrally filtered mode-locked frequency combs[J]. Applied physics B, 2021, 17: 127.
- [4] CODDINGTON I, SWANN W C, NENADOVIC L, et al. Rapid and precise absolute distance measurements at long range[J]. Nature photonics, 2009, 3(6): 351.
- [5] MARTIN B, FENEYROU P, DOLFI D, et al. Performance and limitations of dual-comb based ranging systems[J]. Optics express, 2022, 30: 4005-4016.
- [6] KANG J, FENG P, LI B, et al. Video-rate centimeter-range optical coherence tomography based on dual optical frequency combs by electro-optic modulators[J]. Optics express, 2018, 26: 24928-24939.
- [7] KERSE C, KALAYCIOĞLU H, ELAHI P. Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses[J]. Nature, 2016, 537: 84-88.

- [8] MISHCHIK K, BONAMIS G, QIAO J, LOPEZ J, et al. High efficiency femtosecond ablation of silicon with GHz repetition rate laser source[J]. Optics letters, 2019, 44(9): 2193–2196.
- [9] MURPHY M T, UDEM T, HOLZWARTH T, et al. High-precision wavelength calibration of astronomical spectrographs with laser frequency combs[J]. Mon. Not. R. Astron. Soc, 2007, 380(2): 839–847.
- [10] BRABEC T. Kerr lens mode locking[M]. Optics letters, 1992, 17(18): 1292.
- [11] KELLER U. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron, 1996, 2: 435.
- [12] ZAVELANI-ROSSI M, CERULLO G, MAGNI V. Mode locking by cascading of second-order nonlinearities[C]. IEEE journal of quantum electron, 1998.
- [13] ENDO M, OZAWA A, KOBAYASHI Y. Kerr-lens mode-locked Yb: KYW laser at 4.6 GHz repetition rate[J]. Optics express, 2012, 20(11): 12191–12197.
- [14] ENDO M, OZAWA A, KOBAYASHI Y. 6 GHz, Kerr-lens mode-locked Yb: Lu2O3 ceramic laser for comb resolved broadband spectroscopy[J]. Optics letters, 2013, 38(21): 4502–4505.
- [15] ZHENG L, TIAN W L, LIU H, et al. 2 GHz watt-level Kerr-lens mode-locked Yb: KGW laser[J]. Optics express, 2021, 29: 12950–12957.
- [16] HAMROUNI M, LABAYE F, MODSCHING N, et al. Efficient high-power sub-50 fs gigahertz repetition rate diode-pumped solid-state laser[J]. Optics express, 2022, 30: 30012–30019.
- [17] PEKAREK S, FIEBIG C, STUMPF M C, et al. Diode-pumped gigahertz femtosecond Yb: KGW laser with a peak power of 3.9 kW[J]. Optics express, 2010, 18: 16320–16326.
- [18] BYUN H, SANDER M Y, MOTAMEDI A, et al. Compact, stable 1 GHz femtosecond Er-doped fiber lasers[J]. Applied optics, 2010, 49: 5577–5582.
- [19] CHENG H H, WANG W L, ZHOU Y, et al. 5 GHz fundamental repetition rate, wavelength tunable, all-fiber passively mode-locked Yb: fiber laser[J]. Optics express, 2017, 25: 27646–27651.
- [20] FERMANN M E. Passive mode locking by using nonlinear polarization evolution in a polarization-maintaining erbium-doped fiber[J]. Optics letters, 1993, 18(11): 894.
- [21] FERMANNET M E. Nonlinear amplifying loop mirror[J]. Optics letters, 1990, 15(13): 752.
- [22] LI C, MA Y X, GAO X, et al. 1 GHz repetition rate femtosecond Yb: fiber laser for direct generation of carrier-envelope offset frequency[J]. Applied optics, 2015, 54: 8350–8353.
- [23] LIU G Y, JIANG X H, WANG A M, et al. Robust 700 MHz mode-locked Yb: fiber laser with a biased nonlinear amplifying loop mirror[J]. Optics letters, 2018, 26: 26003–26008.
- [24] GAO W L, LIU G Y, ZHANG Z G. 44.6 fs pulses from a 257 MHz Er: fiber laser mode-locked by biased NALM[J]. Chinese optics letters, 2018, 16: 111401.
- [25] YANG R A, ZHAO M H, JIN X G, et al. Attosecond timing jitter from high repetition rate femtosecond “solid-state fiber lasers”[J]. Optica, 2022: 874–877.
- [26] YE F, LAMOUR T P, OSTAPENKO H, et al. Towards a space-qualified Kerr-lens mode-locked laser[J]. Optics letters, 2021, 46: 5429–5432.
- [27] OSTAPENKO H, FENG Y, LAMOUR T, et al. Towards a Space-qualified Kerr-Lens-Modelocked Laser[C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2022), Paper SF4E. 1.

(本文编辑:朱俊真)



第一作者: 张志刚 (1955–), 教授, 主要研究领域为高重复频率光纤飞秒激光器的频率梳技术、光纤远距离频率传输和时间同步技术、时域脉冲相干合成技术等。1982年与1984年在北京工业大学分获理学学士和硕士学位, 1992年在澳大利亚 MONASH 大学获理学博士学位。教育部首批“长江学者奖励计划特聘教授”。历任北京工业大学讲师、日本国财团法人产业创造研究所客员研究员、日本国经济产业省新能源产业技术综合研究机构 NEDO Fellow、天津大学教授。曾在麻省理工学院、法国傅立叶大学、日本国北海道大学、电气通信大学做过访问教授。曾获教育部和国家科技进步奖。目前主持国家自然科学基金重点项目、联合基金重点支持项目及国际合作项目。