

# 激光与光电子学进展

## 主振荡功率放大光脉冲时域整形技术

张威<sup>1,2</sup>, 余锦<sup>2\*</sup>, 郑义<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京交通大学理学院激光研究所, 北京 100044;

<sup>2</sup>中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

**摘要** 在主振荡功率放大系统工作时,由于增益饱和和现象的出现,经常会使输出脉冲发生较大形变,偏离种子激光时域波形,导致输出脉冲波形不可控制。为了得到特定脉冲时域波形,研究者们提出了主振荡功率放大时域整形技术。本文介绍了不同时域整形理论模型的计算方法和实验研究进展,并且指出主振荡功率放大时域脉冲整形技术有望实现更灵活、更精细、更大脉宽范围的脉冲波形输出控制。

**关键词** 激光光学; 激光放大; 时域脉冲整形技术; 主振荡功率放大

中图分类号 TN241

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1700004

## Temporal Pulse Shaping in Master Oscillator Power Amplifiers

Zhang Wei<sup>1,2</sup>, Yu Jin<sup>2\*</sup>, Zheng Yi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Laser, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

<sup>2</sup>Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

**Abstract** Owing to the existence of gain saturation and depletion, the temporal pulse shape experiences large deformations in the master oscillator power amplifier systems, resulting in large deviation from that of the seed laser and thus an uncontrollable output shape. In order to obtain specific temporal shape in the output laser pulses, researchers have proposed the temporal pulse shaping technology in the master oscillator power amplifiers. Both the theoretical and the experimental studies are introduced to achieve proper temporal shaping in this paper. It is also pointed out that the pulse shaping can be useful in getting flexible, accurate, and extensive control over temporal features of laser pulses.

**Key words** laser optics; laser amplifiers; temporal pulse shaping technology; master oscillator power amplifier

**OCIS codes** 140.3280; 140.3538; 140.3430

## 1 引言

1960年,第一台激光器的诞生<sup>[1]</sup>预示着世界从此进入激光时代。高能量、高功率激光<sup>[2]</sup>在工业、军事和医学等领域都展现出广阔的应用前景<sup>[3-4]</sup>。然而由谐振腔、泵浦源、增益介质组成的常规激光器在高功率运行时光束质量急剧劣化,阻碍了大功率

激光器的进一步应用和发展。

为了进一步扩大激光器在高亮度光源获得方面的优势,人们将研究目光转向激光放大器并提出主振荡功率放大(MOPA)方案。该方案是同时获得高能量、高光束质量激光输出的最常用、最有效的方法<sup>[5-11]</sup>。MOPA方案具有独特的种子光加放大的结构,相较于其他放大方案(如调Q放大方

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-11-19; 录用日期: 2021-01-02

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407400)、中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20170035)

通信作者: \*jinyu@aoe.ac.cn

案<sup>[12-16]</sup>)更具灵活性,它可以通过调节激光的脉宽、波形、重复频率和峰值功率,从而适用不同的应用场景。

现今激光放大器一般可以分为三类:半导体激光放大器、非线性激光放大器<sup>[17]</sup>和掺杂稀土元素激光放大器<sup>[18-26]</sup>。其中,掺杂稀土元素激光放大器应用最广泛,本文着重对此类型激光放大器进行介绍。

但是,为获得更高的能量提取效率,目前商品化的 MOPA 激光器普遍工作在增益饱和区域,相应的增益饱和效应会导致输出脉冲产生严重畸变。在需要特定脉冲形状的场所,时域脉冲畸变导致输出脉冲波形不可控制,降低了工作效率。为解决这一问题,有研究人员提出时域脉冲整形技术,该技术是通过计算得到与目标脉冲波形相对应的输入种子脉冲波形,达到脉冲整形的目的<sup>[27-28]</sup>。

由输出波形逆向求解得到输入波形可通过两种方法实现:一类是数值算法,主要通过计算机迭代实现求解<sup>[29-32]</sup>;另一类是模型解析法,根据放大模型的动力学特性,列出相应的解析表达式进行求解。尽管数值算法准确、全面,但是难以找到相应的规律和趋势;然而,模型解析法却能够揭示关键参数与输出波形之间的关系,对实验参数的优化选择具有显著的指导作用。并且随着目标脉冲形状复杂度的增加,数值算法得到相应结果也更加困难。所以,模型解析法的研究具有重大意义。研究者们以 Frantz-Nodvik 模型<sup>[33]</sup>为基础,推导出预补偿脉冲公式,从而实现输入脉冲波形的计算,最

终利用实验进行验证。

本文将从理论研究和实验进展两方面对时域整形技术进行介绍。理论上介绍了在考虑损耗、非直通光路放大等情况下理论模型的计算方法,实验上介绍了该理论在光纤放大系统和固体放大系统中的应用。

## 2 MOPA 光脉冲时域整形原理

### 2.1 MOPA 系统

MOPA 系统由种子源和功率放大级两部分组成,其结构如图 1 所示。种子源输出的信号光与泵浦光经波分复用器(WDM)耦合后进入掺杂光纤,在掺杂光纤中实现预放大。预放大后的光束与多束泵浦光经连接器再次耦合进入双包层掺杂光纤,最后在双包层光纤中进行二级放大后输出。在每个放大级之间插入光隔离器,其作用是避免逆向传输的光束损坏光器件。在 MOPA 系统中,种子源部分为系统提供高光束质量的种子激光,因此需要种子源具有较窄的线宽和较高的稳定性,通常采用半导体激光器,但也可采用固体、光纤激光器等;放大级部分用来放大种子光能量、获得高功率激光输出,通常采用光纤增益介质、固体增益介质或混合放大等方式,并根据所需采取一级或多级放大结构。可以注意到,以半导体激光器作为种子源的 MOPA 系统,尽管种子激光输出功率低,但由于拥有灵活的调制空间,容易达到脉冲波形控制、波长调谐和多波长输出等目的,因而显现出来广阔的应用前景。

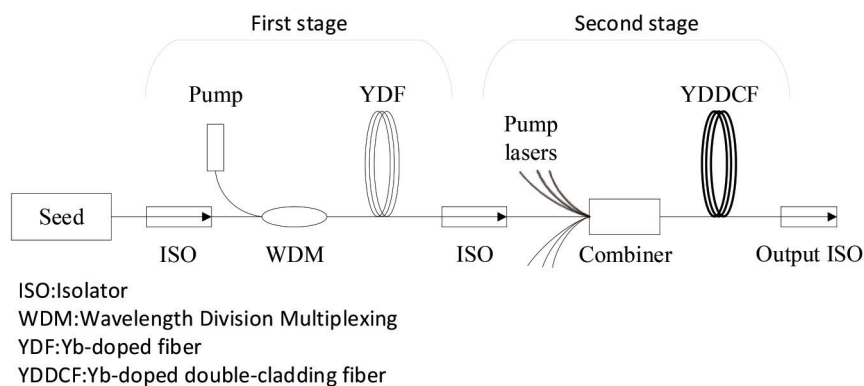


图 1 MOPA 结构示意图

Fig. 1 Structure of MOPA system

### 2.2 增益饱和效应导致脉冲失真

为了获得最高的能量提取效率, MOPA 系统的放大级需工作在增益饱和区域,使其尽可能地耗尽

增益介质中的反转粒子数。脉冲激光经过放大级的过程中,脉冲前沿率先进入增益介质,消耗反转粒子数,从而导致脉冲后沿进入时的反转粒子数减

少,最终脉冲前沿放大倍数大于后沿放大倍数,输出脉冲波形与输入脉冲波形产生较大形变。如图 2 所示,图 2(a)为输入方波脉冲,图 2(b)为放大后输出脉冲。

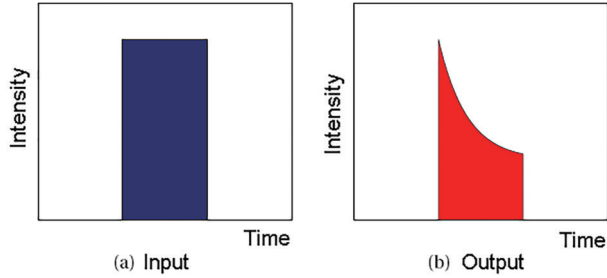


图 2 MOPA 时域脉冲波形图。(a)输入脉冲;(b)输出脉冲<sup>[34]</sup>  
Fig. 2 Temporal pulse shape of MOPA. (a) Input pulse shape; (b) output pulse shape<sup>[34]</sup>

在激光应用中,存在一些需要特定时域脉冲波形的情况。以激光加工为例,在激光刻蚀、划线、钻孔、清洗等工艺里,研究者们发现在主加工脉冲前引入预脉冲,或者在一个低能量的长脉冲上叠加一个高峰值功率短脉冲,可以大幅提升激光加工的性能和效率,降低对激光器平均功率的需求<sup>[35-36]</sup>。而在激光清洗领域,特定的输出脉冲波形也能够提高清洗的效率和效果,满足不同对象对激光光源的要求。图 2 中由于增益饱和效应的存在,脉冲在不同时间轴处所经历的瞬时增益之间存在较大差异,导致输出波形产生形变,难以实现脉冲形状的精确控

制,所以需要研究时域脉冲整形技术。

### 2.3 时域脉冲整形基本原理

在揭示 MOPA 系统具体参数的模型解析法中,1963 年,美国空间技术实验室的 Frantz 等<sup>[33]</sup>首次建立了激光放大的行波增益模型,并通过求解激光在直通光路激光放大器中传输行为的偏微分方程组,推导出了脉冲传输方程的解析解。该研究对激光放大增益模型的求解具有重大意义,为激光放大过程的增益分析奠定了基础。但是,Frantz-Nodvik 方程是一个“正向求解型”方程组,要想得到预补偿公式还需要对该公式进行逆向求解。

根据 Frantz-Nodvik 方程,发现预补偿公式的求解过程可以分解为以下三个步骤。

1) 列出速率方程组及其初始条件<sup>[33]</sup>。

速率方程组

$$\frac{\partial n}{\partial t} + c \left( \frac{\partial n}{\partial z} \right) = \sigma c n (N_2 - N_1), \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = \sigma c n (N_2 - N_1), \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -\sigma c n (N_2 - N_1). \quad (3)$$

初始条件

$$N_2(z, -\infty) - N_1(z, -\infty) = \Delta_0(z), 0 \leq z \leq L, \quad (4)$$

$$n(0, t) = n_0(t). \quad (5)$$

2) 求解速率方程组,得到光子数分布和反转粒子数分布公式<sup>[33]</sup>。

$$n(z, t) = \frac{n_0 \left( z - \frac{z}{c} \right)}{1 - \left\{ 1 - \exp \left[ -\sigma \int_0^z \Delta_0(z') dz' \right] \right\} \exp \left[ -2\sigma c \int_{-\infty}^{t-z/c} n_0(t') dt' \right]}, \quad (6)$$

$$\Delta(z, t) = \frac{\Delta_0(z) \exp \left[ -\sigma \int_0^z \Delta_0(z') dz' \right]}{\exp \left[ 2\sigma c \int_{-\infty}^{t-z/c} n_0(t') dt' \right] + \exp \left[ -\sigma \int_0^z \Delta_0(z') dz' \right] - 1}, \quad (7)$$

式中: $N_1$ 、 $N_2$ 分别为基态和激发态的粒子数密度; $n$ 为光子数密度; $n_0$ 为输入平面的光子数密度; $\sigma$ 为受激辐射截面; $c$ 为介质中的光速; $\Delta$ 为反转粒子数(且 $\Delta = N_2 - N_1$ ); $\Delta_0$ 为初始反转粒子数。

3) 对所得方程逆向求解,将输入输出调转,根据已知的输出脉冲波形计算求解输入脉冲波形。

2008 年,德国 Schimpf 等<sup>[37]</sup>首次推导得到脉冲预补偿公式的解析表达式,对脉冲预补偿公式的求解具有重要意义。该文提出小信号增益和脉冲通

量两个重要的参数概念,简化了 Frantz-Nodvik 方程。得到如下方程<sup>[37-38]</sup>

$$I_{out}(t) = \frac{I_{in}(t)}{1 - [1 - G_0^{-1}(z)] \exp[-J_{in}(t)/J_{sat}]}, \quad (8)$$

式中: $I_{in}$ 、 $I_{out}$ 分别为输入输出脉冲的光强; $G_0$ 为小信号增益; $J_{in}$ 为输入通量; $J_{sat}$ 为饱和通量。根据(8)式对应的系统增益 $G(t) = 1 - [1 - G_0(z)] \exp[-J_{out}(t)/J_{sat}]$ ,计算得到脉冲预补偿公式为<sup>[37-38]</sup>

$$I_{\text{in}}(t) = \frac{I_{\text{out}}(t)}{G(t)} = \frac{I_{\text{out}}(t)}{1 - [1 - G_0(z)] \exp[-J_{\text{out}}(t)/J_{\text{sat}}]}, \quad (9)$$

式中:  $G$  为增益系数;  $J_{\text{out}}$  为输出通量。

现今所推得的脉冲整形预补偿方程几乎都可以被看作是 Frantz-Nodvik 方程的一个逆过程。

### 3 基于 Frantz-Nodvik 方程的拓展研究

#### 3.1 脉冲激光 MOPA 放大的数学模型研究

研究者在 Frantz-Nodvik 方程的基础上, 分别研究了针对损耗、非直通放大路径和双包层光纤等情况的理论计算模型。

在脉冲的实际传输过程中, 不可避免地会产生损耗。将损耗因素考虑进 Frantz-Nodvik 方程中, 能够提高方程与实际情况的吻合度。在这一方面, 1995 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所刘仁红等<sup>[39]</sup>针对神光装置分析了一维 Nd:Glass 介质内激光放大问题, 得到加入损耗项方程的解析解, 提高了与实际放大情况的一致性。在考虑损耗的情况下, 激光放大方程为<sup>[39]</sup>

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + c \frac{\partial}{\partial x}\right)n = \sigma cn\Delta - \gamma n, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Delta}{\partial t} = -\sigma cn\Delta, \quad (11)$$

式中:  $\gamma$  为光子数在传输过程中的损耗。解析求解得到  $\eta$  与  $(R, \sigma_0, R_0)$  之间的函数关系为<sup>[39]</sup>

$$\eta = \frac{\int_{R_0}^R \frac{dR}{\sigma_0 [1 - \exp(-R)] - R}}{F(R, \sigma_0) - F(R_0, \sigma_0)}, \quad (12)$$

式中:  $R = \int_{-\infty}^{\tau} I(\tau') d\tau'$  是光脉冲在积分区间  $(-\infty, \tau)$  内的能量密度或光子数密度;  $\eta = \frac{x}{c} \gamma_0$ 。

并在此函数关系的基础上推导出了脉冲传输正逆问题的解, 把这一过程从一级放大推广到多级放大。与此类似, 1997 年, Hardy 等<sup>[40]</sup>将散射损耗和激发态吸收等因素引入方程, 针对强泵浦的光纤放大器进行研究, 并分别对三能级系统和四能级系统进行讨论, 将所得解析解与相应的数值解比较, 发现二者数据基本一致。

Frantz-Nodvik 方程是基于直通光路的计算方程, 而实际放大过程中还存在其他放大路径, 如多通放大、多级放大以及 Zig-Zag 形光路放大等。

为了得到更高的提取效率, 一些放大过程采用了多通放大的形式。1980 年, 美国劳伦斯利弗莫尔实验室的 Lowdermilk 等<sup>[41]</sup>, 针对多通放大的情况进行了研究, 给出了包含效率、峰值通量、稳定性和放大时间等参数的解析和数值表达式。同时该文在慢变振幅和慢变相位近似的前提下, 将麦克斯韦波动方程和薛定谔方程联立简化为麦克斯韦薛定谔方程组; 再在脉冲宽度远大于横向弛豫时间的条件下, 推导得到了多通放大的传输方程, 为多通放大技术的研究和应用奠定了基础。2004 年, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心王文义等<sup>[42]</sup>对多通放大的物理模型进行了进一步完善, 在 Lowdermilk 解析解的基础上, 解决了增益不完全恢复的问题。该文中提出的模型能够较准确地模拟介于三、四级之间的能量放大特性, 但该模型的模拟结果与实验数据存在一些差异, 里面的原因有待进一步分析整理。

在主振荡功率放大系统中, 一般会涉及到多级放大的情况, 每一级放大的具体参数情况可能不同, 研究人员针对两级至多级放大的情况进行了讨论和分析。2011 年, Sobon 等<sup>[43]</sup>对 1550 nm 两级放大脉冲光纤 MOPA 装置任意形状输出脉冲的产生进行了研究。在光纤放大器的脉冲整形理论中, 已知输入输出脉冲形状关系可以通过一个增益表达式表述为<sup>[43]</sup>

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} G(t), \quad (13)$$

$$G(t) = 1 + (G_0 - 1) \exp\left[-\frac{E_{\text{out}}(t)}{E_{\text{sat}}}\right], \quad (14)$$

式中:  $E_{\text{sat}}$  为饱和能量;  $E_{\text{out}}$  为输出能量。该文中实验装置包含两个放大级, 分别为 EDFA ( $\text{Er}^{3+}$  掺杂光纤放大) 预放大级和 EYDFA ( $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$  共掺双包层光纤放大) 主放大级, 对此, 该文给出了适用于两级放大的表达式

$$I_{\text{in}} = \frac{I_{\text{out}}}{G_{\text{EDFA}}(t) G_{\text{EYDFA}}(t)}, \quad (15)$$

式中:  $G_{\text{EDFA}}(t)$  和  $G_{\text{EYDFA}}(t)$  分别为预放大级和主放大级的增益表达式。理论与实验结果吻合良好, 此预补偿公式还可用于其他多级光纤 MOPA 系统。

板条激光器传输路径为 Zig-Zag 型路径, 针对此情况, 研究者们提出了 Zig-Zag 光路的放大方程。板条激光器作为现今功率水平最高的激光器, 具有能量转换效率高、系统稳定可靠、寿命长和热效应低等优点, 被广泛应用在需要大功率激光的领域。1989 年,

Eggleston 等<sup>[44]</sup>推导出了应用于板条激光放大器的 Zig-Zag 型光通路的 Frantz-Nodvik 方程。并对均匀

填充、部分填充两种情况进行分析。该文推得部分填充情况下的输入输出脉冲能量之间的关系式为<sup>[44]</sup>

$$E_{\text{out}} = \frac{AJ_{\text{sat}} \cos \theta}{\alpha} f(2-f) \ln \left\{ 1 + \left\{ \exp \left[ \frac{\alpha E_{\text{in}}}{AF_{\text{sat}} \cos \theta} \frac{1}{f(2-f)} \right] - 1 \right\} \exp \left( \frac{E_{\text{stored}}}{AF_{\text{sat}} \cos \theta} \right) \right\}, \quad (16)$$

式中： $\theta$ 为与板条的 $z$ 轴正半轴的夹角；三能级系统 $\alpha=2$ ，四能级系统 $\alpha=1$ ； $E_{\text{in}}$ 为输入能量； $E_{\text{stored}}$ 为增益介质储能； $A$ 为板条的横截面积； $f=L_s/L_b$ 。当 $f=1$ 时，该式可化简为均匀填充的放大方程。比较该解析解与数值解的结果可以看出，该方程可以准确地预测板条放大器的锯齿形光路的增益和提取。

考虑到在实际的应用过程中，放大系统常采用双包层光纤。针对这一情况，2003年，Wang 等<sup>[45]</sup>对用于高功率脉冲放大的双包层光纤放大器动态特性进行了研究。该文通过对时间相关的速率方程及其初始边界条件的分析，探索了高功率掺镱双包层光纤放大器的动力学特性。该文建立的理论模型和仿真结果对设计和改进高功率双包层光纤放大器有着重要的指导作用和意义。2007年，Chang 等<sup>[46]</sup>得出 Yb 掺杂双包层光纤放大器的动态特性，包括脉冲波形失真的演变、上能级粒子数分布、在前向泵浦和后向泵浦时的放大器的存储能量和脉冲能量等；并且讨论了输出脉冲能量与输入信号峰值功率或泵浦功率之间的关系，这些理论结果对于高功率双包层放大器的设计和优化具有重要意义。

另外，人们还对光放大过程中的其他理论特性

进行了研究。比如，2005年，刘仁红等<sup>[47]</sup>提出利用放大器的增益通量曲线来全面描述放大器增益特性的方法，并得到了无损耗时放大器瞬时功率增益的解析表达式<sup>[47]</sup>[(17)式]和有损耗时的数值解。并以 $G(L, t)$ 即放大器的瞬时功率增益为纵坐标，以 $E = \int_0^t I(t') dt'$ 即激光通量为横坐标得到增益通量曲线，如图3所示。该文作者经过分析得出，所有的放大器都可以视为运行在同一根增益通量曲线上的不同工作区间的结论。

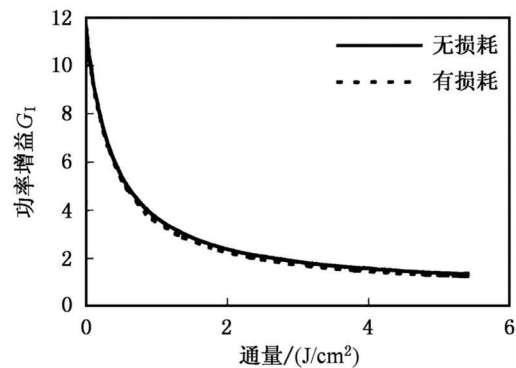


图3 放大器增益通量曲线<sup>[47]</sup>

Fig. 3 Gain fluence curve of amplifier<sup>[47]</sup>

$$G(L, t) = \frac{I(L, t)}{I(t)} = G_0 \frac{\exp \left[ \frac{\sigma}{h\nu} \int_0^t I(t') dt' \right]}{1 + \left\{ \exp \left[ \frac{\sigma}{h\nu} \int_0^t I(t') dt' \right] - 1 \right\} G_0}, \quad (17)$$

式中： $I$ 为脉冲光强； $L$ 为介质长度； $h$ 为普朗克常数； $\nu$ 为光子频率。

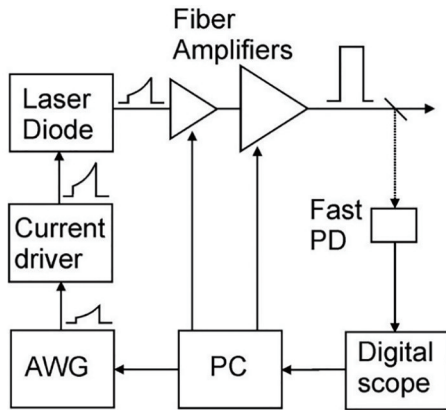
上述针对脉冲放大理论的探索涉及到了损耗、非直通光路、双包层光纤等各个方面，为时域脉冲放大整形实验与应用提供了良好的理论基础。

### 3.2 光纤 MOPA 系统的实验研究

光纤激光放大相较于传统激光放大具有体积小、重量轻、易于集成、成本较低等优点，越来越多地应用在工业加工与制造、军事、医疗等领域；并且光纤放大器输出的激光可以高效耦合进传输光纤，便于对远距离对象进行操作，从而适用于各种工作

环境。全光纤化的激光振荡器及功率放大器不仅是研究者们一直关注的对象，还是工业激光器的最佳方案之一，对光纤放大的研究意义深远。

2006年，Vu 等<sup>[32]</sup>利用计算迭代法模拟并通过实验证实了可用激光二极管作为种子的掺镱光纤放大器的脉冲预补偿方法，其脉冲整形方案如图4所示。该放大系统是由信号光中心波长为1077 nm (3 dB带宽)，泵浦光波长为915 nm的两级放大 Yb 掺杂全光纤链构成。该系统提供大于40 dB的增益，其中第一级增益最高可达30 dB。该脉冲整形方案的工作过程为：由计算机提供的 MATLAB 代

图 4 有源脉冲整形系统示意图<sup>[32]</sup>Fig. 4 Schematic of active pulse shaping system<sup>[32]</sup>

码控制任意波形发生器(AWG)的输出波形。利用AWG的输出电流,经电流驱动器,以20 kHz的重复频率驱动激光二极管,使其产生相应种子光。产生的种子光脉冲波形信号经过MOPA系统放大后,用快速InGaAs光电探测器测量输出脉冲形状。将测得的脉冲形状经数字示波器输出到计算机。计算机将输出脉冲时域波形与目标脉冲波形进行比对,调整输入脉冲波形后,再次写入AWG,不断重复这一过程,最终使输出脉冲波形与目标脉冲波形相一致。其使用的优化方法是模拟退火<sup>[29]</sup>。根据该方法,通过优化参数的小迭代步长变化,使系统移向 $F$ 值最低的状态。其中, $F$ 为适应性参数,它的计算过程为:在一个脉宽内,每隔4 ns取一个测量点,将目标脉冲瞬时功率和归一化实际脉冲瞬时功率作差并取绝对值后求和。它反映了实际脉冲波形和目标脉冲波形重合度的高低。

2008年,德国Schimpf等<sup>[37]</sup>利用模型解析法,通过使用任意波形发生器调控输入种子光波形的全光纤MOPA放大系统,对准三能级系统的脉冲预补偿公式进行实验验证。其中,该系统包含预放大级和主放大级,并用Yb掺杂光纤作为增益介质,用带尾纤的连续激光二极管采用包层泵浦的方式泵浦,波长为975 nm,输出光波长为1030 nm,重复频率为10 kHz。证明了这一解析法对高功率高能激光放大系统的适用性。并实验输出了矩形、M形和屋顶形状的脉冲。

结合脉冲形状的时间调制,研究者们对脉冲调制的研究还扩展到了空间领域,时域脉冲整形技术与空间整形技术的结合,为时域整形技术提供了更为广阔的发展空间。2016年,Lin等<sup>[48]</sup>提出了超发光二极管作为种子源的掺Yb光纤MOPA系统,产生了重复频率为25 kHz,脉冲能量为580  $\mu$ J的纳秒

脉冲,该脉冲具有用户定义的时间脉冲形状和径向极化的甜甜圈形空间模式。

研究人员对于实际操作中光纤放大系统出现的激光启动时的脉冲瞬变、受激布里渊散射(SBS)、放大自发辐射(ASE)引起的自激振荡等现象,进行了实验研究与分析。2009年,Malinowski等<sup>[49]</sup>演示了使用电光调制器的主动脉冲整形,它不同于直接调制二极管驱动电流来控制脉冲波形,这种整形方法能够消除由于激光启动而产生的瞬变。该文是基于对放大器性能的简单测量得出的整形方案,不需要对放大器动力学模型进行详细建模。2014年,Michalska等<sup>[4]</sup>研究了在饱和状态下工作的两级掺铒光纤放大器的纳秒激光脉冲形变,给出了适用于畸变脉冲的峰值功率缩放因子的计算,并用任意函数发生器对光脉冲进行整形。该文对脉冲时域整形中的受激布里渊散射现象进行了分析与讨论。作者发现窄线宽激光二极管作为种子源的光纤放大器在光脉冲整形中的主要限制为受激布里渊散射,因此可以通过提高受激布里渊散射的功率阈值来改善放大器性能。2018年,孟献国等<sup>[50]</sup>研究了ASE及其引起的自激振荡对激光器输出光特性的影响,并根据实验结果归纳出MOPA光纤激光器的输出特性曲线。该研究对提高MOPA系统的信噪比具有一定的参考价值。

另外,经过时域整形后输出的特定脉冲波形在一些领域具有重要的意义。如2019年,Su等<sup>[51]</sup>提出了一种通过时域整形脉冲种子光来生成变换受限激光脉冲的方法。作者数值模拟并实验研究了脉冲形状对自相位调制(SPM)引起的光谱展宽的影响。理论上发现,方形脉冲激光不受SPM引起的光谱展宽的影响。基于此原理,在主振荡器功率放大器系统中构建了一个高峰值功率、线性偏振、方形纳秒全光纤激光器。在8 ns、7 ns、6 ns和5 ns的脉冲宽度下获得了4.02 kW、5.06 kW、6.52 kW和9.30 kW的受激布里渊散射限制峰值功率。由于具有矩形脉冲种子,最大峰值功率的线宽分别保持在129.5 MHz、137.6 MHz、156.2 MHz和200.1 MHz,接近于110.8 MHz、126.6 MHz、147.7 MHz和177.3 MHz的变换极限值。

光纤MOPA系统虽具有结构紧凑、灵活性高、成本较低的优点,但光纤直径小,与固体MOPA系统相比,由于非线性效应和热效应等因素,使大功率激光输出受限。目前的超大功率激光器仍然是

用固体激光器进行放大。所以,在大功率系统的应用中,对固体 MOPA 的分析显得非常重要。

### 3.3 固体 MOPA 系统的实验研究

固体 MOPA 系统能将脉冲激光的能量和峰值功率放大到极高的数值,是目前高功率激光放大系统采用的主要功率放大形式。但是,影响固体激光器传输性能的参数非常多,相较于光纤放大具有一定的研究难度。针对这一点,研究者们也进行了分析与探索。

2000 年, Augé 等<sup>[52]</sup>介绍了二极管泵浦掺 Yb<sup>3+</sup>的 Ca<sub>4</sub>GdO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>(Yb:GdCOB)激光器的理论分析内容和实验方案,描述了二极管泵浦准三能级激光器的新模型。该文首次从饱和吸收、温度曲线、光束质量等方面分析对放大系统的影响,这一模型也适用于其他准三能级系统,可作为优化这类激光器的工具。

2016 年, Nie 等<sup>[53]</sup>设计了光纤耦合激光二极管泵浦高增益单级单通 Nd:YVO<sub>4</sub>放大器。分析了掺杂浓度、泵浦激光光束质量、泵浦激光焦半径、增益晶体温度等因素对高增益 Nd:YVO<sub>4</sub>放大器性能的影响,建立了包括泵浦吸收饱和效应、沿光束传播方向的重叠效率,以及由于高掺杂浓度引起的非辐射衰减的模型。图 5 为激光放大器的切片模型,其中为准确描述光束重叠的影响,考察了泵浦激光和种子激光器沿增益介质光轴的光束尺寸差别。为了排除泵浦激光器  $\omega_p(z)$  和种子激光器  $\omega_s(z)$  的光

束大小对增益系数的影响,将晶体分割成许多长度为  $dz$  的基本切片,其中  $dz$  尺寸非常微小,可以认为  $dz$  范围内的增益系数为定值。在实验验证中,作者获得了与理论模拟一致的实验结果。

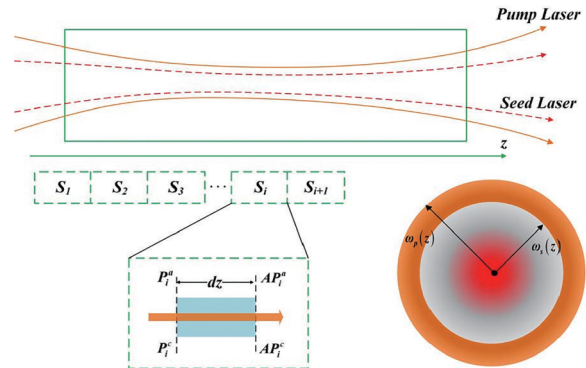
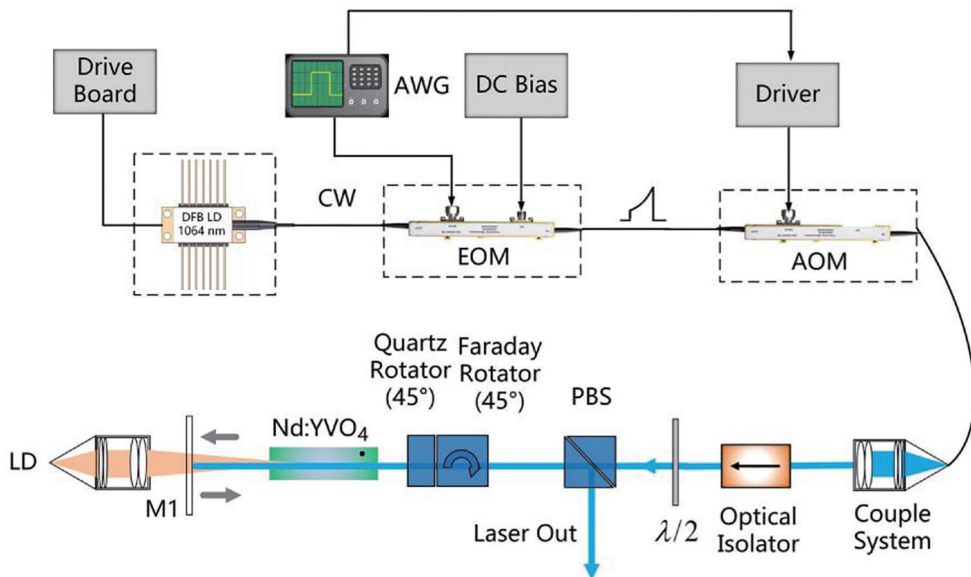


图 5 激光放大器的切片模型<sup>[53]</sup>  
Fig. 5 Slice model of a laser amplifier<sup>[53]</sup>

2017 年,同一课题组<sup>[54]</sup>研究了具有 39.2 dB 的高平均增益的固态 Nd:YVO<sub>4</sub>放大器的主动脉冲整形技术。提出一种无需进行 Nd:YVO<sub>4</sub>放大器的实验测试即可实现主动整形的数值方法。通过理论和实验方法验证了具有高增益的固态 Nd:YVO<sub>4</sub>放大器的任意波形的产生方法。

该文的实验装置如图 6 所示,种子源采用中心波长 1064 nm 的分布式反馈 (DFB) 激光器,峰值功率为 1000 mW、谱线宽为 2 MHz。输出连续光经光电调制器 (EOM) 和声光调制器 (AOM) 共同调



AWG: arbitrary waveform generator; EOM: electro-optic modulator; AOM: acousto-optic modulator; PBS: polarizing beam splitter;  $\lambda/2$ : half-wave plate

图 6 实验装置图<sup>[54]</sup>

Fig. 6 Schematic of the experimental setup<sup>[54]</sup>

制后,产生编入 AWG 的所需脉冲波形。将种子光经耦合系统和光隔离器耦合进 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,采用端泵浦放大后输出。实验生成了清华大学校门

等有趣脉冲形状,如图 7 所示。这有益于设计兼具高峰值功率 (> 100 kW) 和目标脉冲波形的激光器。

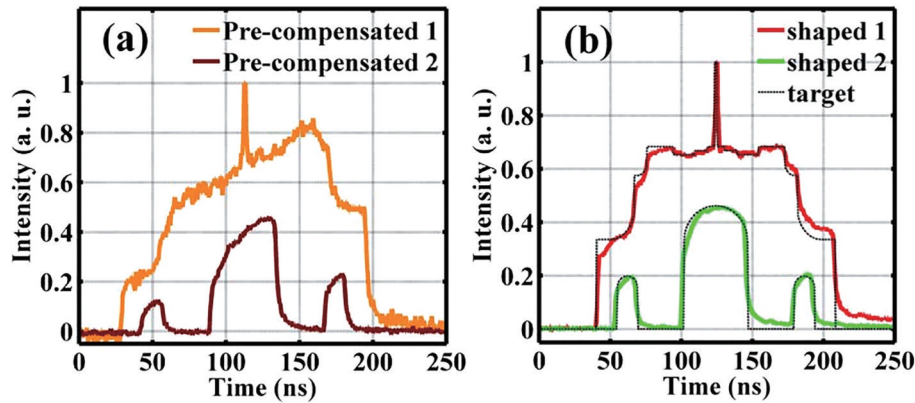


图7 输入输出波形图。(a)输入预补偿脉冲形状;(b)输出脉冲形状和目标脉冲形状的比较<sup>[54]</sup>

Fig. 7 Input and output pulse shapes. (a) Input pre-compensated pulse shapes; (b) comparison of the output pulse shape and the targeted one<sup>[54]</sup>

另外,研究者们还对固体 MOPA 系统进行了其他方面的实验研究。2017 年,Jeong 等<sup>[55]</sup>开发了一种新的数值模拟方法用于计算双通放大器中任意激光脉冲的放大,其中增益介质中的两个偏振正交脉冲重叠。该方法与这项工作中针对脉冲能量和时间形状的实验结果相一致。2018 年,Guo 等<sup>[56]</sup>将时域脉冲整形技术应用于高功率、焦耳级的钕玻璃固体激光放大系统。实验输出了 0.9 J 脉冲能量、1 Hz 重复频率的任意时域波形。该文的成果显示了时域脉冲整形技术应用于高功率激光放大系统中的巨大潜力。2020 年,Kawasaki 等<sup>[57]</sup>将时域脉冲整形技术运用在微芯片激光器领域,并用 Nd:YAG 作为放大器,实现了脉冲长度小于 100 ps 的脉冲整形。

以固体增益介质为放大级的 MOPA 系统,是现在在工业应用领域的常用方案,具有技术成熟、输出功率高等特点。针对该系统时域脉冲整形的研究具有实用性意义,有望在提升大功率激光加工、清洗等领域的工作效率、效果方面得到应用。针对固体激光器的时域脉冲整形技术的研究也将继续向着高能量、高功率的方向发展。

## 4 结束语

综上所述,MOPA 时域脉冲整形技术在考虑损耗、非直通放大路径和双包层光纤等因素的基础上,对 Frantz-Nodvik 方程进行了理论上的拓展,并应用于光纤 MOPA 系统和固体 MOPA 系统。光纤

MOPA 系统具有体积小、灵活性高和效率高等优点,但非线性效应和热效应限制了其放大功率的提升。未来光纤 MOPA 系统将朝着全光纤集成、非线性效应抑制以及输出功率提高等方向发展,而固体 MOPA 系统则将具备更高脉冲峰值功率和更大脉冲能量输出能力。MOPA 时域脉冲整形技术有望实现更灵活、更精细、更大范围的脉冲波形输出控制,并且结合激光空间整形技术最终实现激光光束的时间-空间全方位整形调控。

## 参 考 文 献

- [1] Xuan G X, Shen S X. Birth of laser and development of laser[J]. *Discovery of Nature*, 1988(2): 179-185.  
宣桂鑫,沈珊雄. 激光器的诞生及其发展[J]. *大自然探索*, 1988(2): 179-185.
- [2] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A, et al. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [3] Liu D M, Yan C L. Key technologies and applications for high power fibre laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S3): 105-109.  
刘德明,阎嫦玲. 高功率光纤激光器的关键技术及应用[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(S3): 105-109.
- [4] Michalska M, Swiderski J, Mamajek M, et al. Arbitrary pulse shaping in Er-doped fiber amplifiers: possibilities and limitations[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 60: 8-13.
- [5] Shi W, Fang Q, Tian X P, et al. 300 W-average-



- power monolithic actively Q-switched fiber laser at 1064 nm[J]. *Laser Physics*, 2014, 24(6): 065102.
- [6] Wang T Z. Optimization design of MOPA high power fiber amplifier[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.  
王同柱. MOPA 高功率光纤放大器优化设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [7] Dong X L, Xiao H, Xu S H, et al. 122 W high-power single-frequency MOPA fiber laser in all-fiber format[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(11): 111404.
- [8] Shi H X, Tan F Z, Cao Y, et al. W diode-seeded nanosecond thulium-doped fiber MOPA system incorporating active pulse shaping[C]//CLEO: Science and Innovations 2016, June 5-10, 2016, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2016: STu4M.8.
- [9] Feng T. Study on physical characteristics of amplifier stage gain fibers and key techniques of seed sources in MOPA fiber laser system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.  
冯亭. MOPA 光纤激光系统放大级增益光纤特性与高质量种子源关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [10] Li Z, Heidt A M, Teh P S, et al. High energy diode-seeded nanosecond 2  $\mu\text{m}$  fiber MOPA systems incorporating active pulse shaping[C]//2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) - Laser Science to Photonic Applications, June 8-13, 2014, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014: 1-2.
- [11] Wu T, Pang T, Tang Y Q, et al. Application of MOPA all-fiber pulsed laser in RDTS system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1101009.  
吴涛, 庞涛, 汤玉泉, 等. 应用于 RDTS 系统的 MOPA 全光纤脉冲激光器[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1101009.
- [12] Adel P, Auerbach M, Fallnich C, et al. Passive Q-switching by  $\text{Tm}^{3+}$  co-doping of a  $\text{Yb}^{3+}$ -fiber laser[J]. *Optics Express*, 2003, 11(21): 2730-2735.
- [13] Chang Y M, Lee J, Jhon Y M, et al. Active Q-switching in an erbium-doped fiber laser using an ultrafast silicon-based variable optical attenuator[J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26911-26916.
- [14] Delgado-Pinar M, Zalvidea D, Díez A, et al. Q-switching of an all-fiber laser by acousto-optic modulation of a fiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2006, 14(3): 1106-1112.
- [15] Zhang P P, Zhang P, Huang B C, et al. Research on a high stability all-fiber Q-switched pulse fiber laser[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(8): 902-906.  
张培培, 张鹏, 黄榜才, 等. 高稳定性的全光纤化调 Q 脉冲光纤激光器研究[J]. *激光与红外*, 2015, 45(8): 902-906.
- [16] Zhang J, Zhang D, Liu H W, et al. Actively Q-switched fiber laser with narrow linewidth, narrow pulse width, and high repetition rate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0101002.  
张骥, 张东, 刘昊炜, 等. 一种窄线宽的高重复频率窄脉宽主动调 Q 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0101002.
- [17] Yuan R. Optical fiber communications technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.  
原荣. 光纤通信技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [18] Wu Q, Fan Z W, Yu J, et al. Research progress of nanosecond regime pulsed fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060004.  
吴权, 樊仲维, 余锦, 等. 纳秒量级脉冲光纤激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060004.
- [19] Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, et al. Ytterbium-doped fiber amplifiers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(7): 1049-1056.
- [20] Jackson S D, King T A. Theoretical modeling of  $\text{Tm}$ -doped silica fiber lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(5): 948-956.
- [21] Fang Q, Shi W, Fan J L. 700-kW-peak-power monolithic nanosecond pulsed fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(16): 1676-1678.
- [22] Kong L F, Lou Q H, Zhou J, et al. Power amplifier for 1064 nm using  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-clad fiber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2(2): 98-99.
- [23] Bohling C, Zimmermann H, Hohmann K, et al. Synchronised pulsed pumped fiber amplifiers[C]//2007 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 6-11, 2007, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2007: 1-2.
- [24] Kong Y, Liu Q Z, Deng C, et al. Pulsed pumped  $\text{Yb}^{3+}$ -doped double-cladding fiber amplifier[J]. *Journal of Modern Optics*, 2009, 56(5): 597-600.
- [25] Yue C L, Sun J F, Liu L, et al. High-sensitivity homodyne coherent receiver using EDFA as preamplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1106001.

- 岳朝磊, 孙建锋, 刘磊, 等. 掺铒光纤放大器作为光学预放的高灵敏度零差相干接收机[J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1106001.
- [26] Chen X L, He Y, Xu Z W, et al. Theoretical and experimental investigation of a 10 kW high-efficiency 1070 nm fiber amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1006001.  
陈晓龙, 何宇, 徐中巍, 等. 10 kW 高效率 1070 nm 光纤放大器的理论与实验研究[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1006001.
- [27] Liu Q, Ye Q, Cai H W, et al. Progress of pulse shaping technology using optical fiber devices[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(12): 120603.  
刘琼, 叶青, 蔡海文, 等. 基于光纤器件的脉冲整形技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(12): 120603.
- [28] Dubois S E O. Pulse sharpening and gain saturation in traveling-wave masers[J]. The Bell System Technical Journal, 1964, 43(2): 625-658.
- [29] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P, et al. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220(4598): 671-680.
- [30] Shaw M J, Williams W H, House R K, et al. Laser performance operations model (LPOM) [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5341: 73-83.
- [31] Oliveira P, Addis S, Gay J, et al. Control of temporal shape of nanosecond long lasers using feedback loops[J]. Optics Express, 2019, 27(5): 6607-6617.
- [32] Vu K T, Malinowski A, Richardson D J, et al. Adaptive pulse shape control in a diode-seeded nanosecond fiber MOPA system[J]. Optics Express, 2006, 14(23): 10996-11001.
- [33] Frantz L M, Nodvik J S. Theory of pulse propagation in a laser amplifier[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(8): 2346-2349.
- [34] Schimpf D N, Ruchert C, Nodop D, et al. Compensation of pulse-shaping due to saturation in fiber amplifiers[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7195: 71951E.
- [35] Feng X P, Lu P X, Xu Z Z, et al. Efficiency of laser heating plasma with a prepulse[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1990, 7(4): 313-320.  
冯贤平, 陆培祥, 徐至展, 等. 有预脉冲条件的激光加热等离子体的效率[J]. 量子电子学, 1990, 7(4): 313-320.
- [36] Peng H M, Zhang G P, Sheng J T, et al. Using prepulsing: a useful way for increasing absorption efficiency of high intensity laser beam[J]. Chinese Journal of Computation Physics, 1990, 7(1): 101-107.  
彭惠民, 张国平, 盛家田, 等. 用预脉冲打靶提高强激光吸收效率的模拟计算: 激光与等离子体相互作用的理论模拟(III)[J]. 计算物理, 1990, 7(1): 101-107.
- [37] Schimpf D N, Ruchert C, Nodop D, et al. Compensation of pulse-distortion in saturated laser amplifiers[J]. Optics Express, 2008, 16(22): 17637-17646.
- [38] Jiang M, Su R T, Wang X L, et al. Time-domain characteristic regulation of pulse fiber amplifier based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 030604.  
蒋敏, 粟荣涛, 王小林, 等. 基于随机并行梯度下降算法的脉冲光纤放大器时域特性调控[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 030604.
- [39] Liu R H, Tan W H. An exact solution for laser amplification[J]. Acta Physica Sinica, 1995, 44(7): 1029-1034.  
刘仁红, 谭维翰. 激光放大一维问题的解[J]. 物理学报, 1995, 44(7): 1029-1034.
- [40] Hardy A, Oron R. Signal amplification in strongly pumped fiber amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(3): 307-313.
- [41] Lowdermilk W H, Murray J E. The multipass amplifier: theory and numerical analysis[J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(5): 2436.
- [42] Wang W Y, Su J Q, Jing F, et al. Study on the models of multi-pass amplification of nanosecond light pulse[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(s1): 424-426.  
王文义, 粟敬钦, 景峰, 等. 纳秒级光脉冲多程放大物理模型研究[J]. 中国激光, 2004, 31(s1): 424-426.
- [43] Sobon G, Kaczmarek P, Antonczak A, et al. Pulsed dual-stage fiber MOPA source operating at 1550 nm with arbitrarily shaped output pulses[J]. Applied Physics B, 2011, 105(4): 721-727.
- [44] Eggleston J M, Frantz L M, Injeyan H, et al. Deviation of the Frantz-Nodvik equation for zig-zag optical path, slab geometry laser amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(8): 1855-1862.
- [45] Wang Y, Po H. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(10): 2262-2270.

- [46] Chang L P, Fan W, Chen J L, et al. High power pulse amplification of ytterbium-doped double-clad fiber amplifier[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(11): 624-627.
- [47] Liu R H, Cai X J, Yang L, et al. Study on gain fluence curve of a laser pulse amplifier[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(7): 3140-3143.  
刘仁红, 蔡希洁, 杨琳, 等. 激光脉冲放大器的增益通量曲线研究[J]. 物理学报, 2005, 54(7): 3140-3143.
- [48] Lin D, Baktash N, Berendt M, et al. Radially polarized nanosecond Yb-doped fiber MOPA system incorporating temporal shaping[C]// CLEO: Science and Innovations 2016, June 5-10, 2016, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2016: STh4O.3.
- [49] Malinowski A, Vu K T, Chen K K, et al. High power pulsed fiber MOPA system incorporating electro-optic modulator based adaptive pulse shaping [J]. Optics Express, 2009, 17(23): 20927-20937.
- [50] Meng X G, Zha G S, Jia X D, et al. Experimental research on amplifier stage self-excited oscillation of MOPA fiber[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2018, 35(1): 31-36.  
孟献国, 查根胜, 贾先德, 等. MOPA 光纤激光器放大级自激振荡实验研究[J]. 量子电子学报, 2018, 35(1): 31-36.
- [51] Su R T, Ma P F, Zhou P, et al. High-peak-power temporally shaped nanosecond fiber laser immune to SPM-induced spectral broadening[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7: e27.
- [52] Auge F, Druon F, Balembois F, et al. Theoretical and experimental investigations of a diode-pumped quasi-three-level laser: the Yb<sup>3+</sup> doped Ca<sub>2</sub>GdO(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (Yb:GdCOB) laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(5): 598-606.
- [53] Nie M M, Liu Q, Ji E C, et al. Design of high-gain single-stage and single-pass Nd:YVO<sub>4</sub> amplifier pumped by fiber-coupled laser diodes: simulation and experiment[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2016, 52(8): 1-10.
- [54] Nie M, Liu Q, Ji E C, et al. Active pulse shaping for end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> amplifier with high gain [J]. Optics Letters, 2017, 42(6): 1051-1054.
- [55] Jeong J, Cho S, Yu T J, et al. Numerical extension of Frantz-Nodvik equation for double-pass amplifiers with pulse overlap[J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3946-3953.
- [56] Guo J T, Wang J F, Lu X H, et al. Performance of active pulse shaping of high power multi-pass ring laser amplifier[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10964: 1096403.
- [57] Kawasaki T, Yahia V, Taira T, et al. Sub-ns pulse shaping of microchip laser under amplification (Conference Presentation)[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11259: 1125900.