

激光与光电子学进展

CO₂激光放大器增益与种子光光强匹配特性分析沈辉^{1,2}, 潘其坤^{1*}, 张冉冉¹, 赵崇霄¹, 张鲁薇¹, 陈飞¹, 郭劲¹¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家实验室; 吉林 长春 130033;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了提升激光等离子体极紫外光刻机光源中高重复频率、短脉冲 CO₂ 主振荡功率放大系统能量提取效率, 需开展种子光光强截面分布与激光放大器增益分布的耦合匹配特性研究。基于欧拉-拉格朗日公式与 Frantz-Nodvik 方程, 采用变分法求解了特定增益分布下最优种子光光强分布函数, 研究了种子光半径、种子光光强分布与放大器增益分布对功率提取效率的影响。数值模拟表明: 当脉冲种子光功率为 500 W 时, 基模高斯光束的最优光束半径为 0.54 cm, 低功率种子光的最优光束半径与放大器增益宽度不相等; 当脉冲种子光功率为 2000 W 时, 高阶超高斯光束的最优光束半径接近增益区域半径, 8 阶超高斯光束对应的最佳光束半径为 0.9 cm, 功率提取值为 3409 W, 采用高阶的增益分布和与之匹配的超高斯光束能够极大提升放大器的能量提取值。该研究结果将为脉冲 CO₂ 主振荡功率放大系统的设计提供理论指导。

关键词 极紫外光源; CO₂ 激光; 脉冲放大; 增益-光强匹配; 变分法

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230449

Analysis of Matching Characteristics of CO₂ Laser Amplifier Gain and Seed Beam Intensity

Shen Hui^{1,2}, Pan Qikun^{1*}, Zhang Ranran¹, Zhao Chongxiao¹, Zhang Luwei¹,
Chen Fei¹, Guo Jin¹¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, Jilin, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To improve the energy extraction efficiency of the high repetition rate and short pulse CO₂ master-oscillator power-amplification system in the light source of laser plasma extreme ultraviolet lithography, it is necessary to study the coupling matching characteristics between the beam intensity cross-section distribution of the seed beam and the gain distribution of the laser amplifier. Based on the Euler-Lagrange formula and Frantz-Nodvik equation, the optimal intensity distribution function of the seed beam under a specific gain distribution is solved by variational method. The effects of the seed beam width, intensity distribution, and gain distribution of the laser amplifier on the power extraction are examined. The results of numerical simulation show that for the laser amplifier with a gain radius of 1 cm, the optimal beam radius of the fundamental mode Gaussian beam with a pulsed seed light power of 500 W is 0.67 cm, and the optimal beam width of the low-power seed light is not equal to the gain width of the amplifier. The optimal beam radius of the higher-order super-Gaussian beam with a pulsed seed power of 2000 W is close to the gain region radius. The optimal beam radius corresponding to the 8-order super-Gaussian beam is 0.9 cm, and the power extraction value is 3409 W. The higher-order gain distribution and the matched super-Gaussian beam can significantly enhance the energy extraction value of the amplifier. The results of this study will provide theoretical guidance for designing pulsed CO₂ main-oscillation power amplifier systems.

Key words extreme ultraviolet source; CO₂ laser; pulse amplification; gain-intensity matching; variational method

收稿日期: 2023-01-05; 修回日期: 2023-01-30; 录用日期: 2023-02-08; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0203200)、吉林省自然科学基金(20220101207JC)、吉林省与中国科学院科技合作项目(2021SYHZ0028)、激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM2209)、中国科学院青年创新促进会(2021216)

通信作者: *panqikun2005@163.com

1 引言

极紫外(EUV)光刻技术推动高端半导体产业的蓬勃发展,是摩尔定律得以延续的关键技术。目前,采用高重复频率、短脉冲、高功率的CO₂驱动激光轰击液滴锡靶,产生等离子体辐射是获取高功率极紫外光的主流方法,该激光诱导等离子体极紫外(LPP-EUV)光源也是唯一应用于产业化光刻机的曝光光源^[1-3]。

LPP-EUV光源中,CO₂激光转换为EUV光的效率(CE)在6%左右,为满足光刻工艺对EUV光功率要求,需要高达数十千瓦的短脉冲、高重复频率的CO₂驱动激光,目前单一激光器无法满足上述要求。采用高光束质量的种子光与多级功率放大器的主振荡功率放大(MOPA)结构相结合的方法,既能保证驱动激光具有种子光的高重复频率、短脉冲的特性,又能获得极高的功率输出^[4-5]。激光功率放大器是短脉冲CO₂激光放大的核心器件。荷兰ASML公司产业化的LPP-EUV光刻机光源中的CO₂驱动激光功率放大系统为德国TRUMPF公司的高功率激光放大器(HPAC),其采用了四台级联的射频快轴流(RF-FAF)CO₂激光功率放大器^[6]。

RF-FAF CO₂激光放大器具有传输特性好、增益高的优势,其快速轴向流动的气流方式能保证工作气体形成稳定均匀、快速的流场可以高效散热,且射频放电能确保在较大的电激励功率下可以稳定辉光放电^[7]。然而,RF-FAF CO₂激光放大器的放电管口径限制了种子光光斑尺寸,因此激光放大器增益分布与种子光光强分布的匹配程度决定了放电管能量提取效率,在有限的管径下优化种子光光强与放大器增益分布参数对提升MOPA CO₂激光输出效率意义重大。在增益-光强匹配方面,Paré^[8]对四能级连续饱和激光行波放大的叠加积分问题进行数值解析研究,并基于Fox-Li迭代法分析了谐振腔内增益分布与激光模式的最优耦合问题,通过数值模拟得出增益分布下最优光强分布解不唯一的结论。Sanchez等^[9]在前者工作基础上对三能级系统下泵浦光与种子光的叠加积分问题进行研究,总结出三能级系统下种子光整形为高阶超 Gauss 光束比基模高斯光束具有更高的能量提取效率。以上工作均是基于连续饱和激光放大的理论研究,LPP-EUV光源采用的是短脉冲CO₂激光,仍需开展脉冲激光放大方面的增益-光强匹配技术研究。

为解决射频FAF CO₂放电管内种子激光与放大器增益分布最优耦合问题,本文基于欧拉-拉格朗日公式与Frantz-Nodvik方程,利用变分法,对增益与脉冲种子光分布函数叠加积分问题进行数值分析。利用光学软件GLAD仿真了主振荡功率放大器内光束放大过程,分析了种子光参数对能量提取效率的影响。

2 理论模型

2.1 变分法求解最优种子光光强分布

较大孔径的RF-FAF放电区域内小信号增益系数径向分布受激励电极结构与工作气体强湍流特性等因素影响,在放大器横截面上呈现中心高于边缘的超高斯分布,增益均匀性越好,中心平坦的增益区域越大。种子光是有一定发散角的非平行光束,它无法完全填充放大器,导致边缘部分增益利用率低,即激光放大系统能量提取效率降低。为实现激光功率放大器的能量提取效率最大化,需要使种子光光强分布与激光放大器增益系数分布达到最优耦合。

求解能量提取效率最大时的种子光强度分布可以归纳为求解泛函数的条件极值问题——等周问题^[10],设定种子光功率恒定且有边界,即满足 $\int_0^b I_{(r)} \cdot 2\pi r dr = \text{constant}$,此为等周条件。在确定放大器小信号增益分布函数、增益区域总能量和种子光能量的情况下,还需要合理设置边界条件,即确定最佳光强分布的上下区间。在规定柱坐标系下,设定种子光光强分布在区间 $[0, b]$ 内,泛函数方程解满足边界条件 $I_{(r=b)} = 0.135I_0$ 与 $I_{(r=0)} = I_0$ 。

根据Frantz-Nodvik脉冲放大理论,脉冲激光单次通过增益介质的能量提取值为

$$E_{\text{extra}} = \int E_s \cdot \ln \left\{ 1 + \exp(G_{(r)}) \left[\exp\left(\frac{I_{(r)}}{E_s}\right) - 1 \right] \right\} dS - \int I_{(r)} dS, \quad (1)$$

式中: $G_{(r)} = g_{(r)} \cdot l$ 为径向增益分布函数; E_s 为饱和光强; $I_{(r)}$ 为种子光光强分布; l 为增益区域长。对满足边界条件与等周条件的一切曲线,确定 $I_{(r)}$ 的分布使得泛函数 E_{extra} 取极值。构造辅助函数 F ,表示为

$$F = E_s \cdot \ln \left\{ 1 + \exp(G_{(r)}) \left[\exp\left(\frac{I_{(r)}}{E_s}\right) - 1 \right] \right\} - (1 + \lambda) I_{(r)}, \quad (2)$$

式中: λ 为待定拉格朗日乘子。上述泛函数条件极值问题可归结为求泛函数 $\int_0^b F \cdot 2\pi r dr$ 的无条件极值问题。结合欧拉-拉格朗日方程,求解出最优光强分布为

$$I_{(r)} = E_s \cdot \left\{ \ln \left[\exp(-G_{(r)}) - 1 \right] + \ln \left[-1 - \frac{1}{\lambda} \right] \right\}. \quad (3)$$

引入边界条件,可以将 $I_{(r)}$ 表示为轴上光强 I_0 与轴上增益系数 G_0 的函数。

$$I_{(r)} = \begin{cases} E_s \cdot \ln \left\{ \frac{\exp(-G_{(r)}) - 1}{\exp(-G_0) - 1} \right\} + I_0, & r \leq b \\ 0 & r > b \end{cases}. \quad (4)$$

确定径向增益分布函数 $G_{(r)}$ 与等周条件(入射光功率恒定)之后,光强分布边界 b 也随之确定。

2.2 放电管单元增益模型

RF-FAF CO₂ 激光功率放大器内部布局与放电管单元结构如图 1 所示。

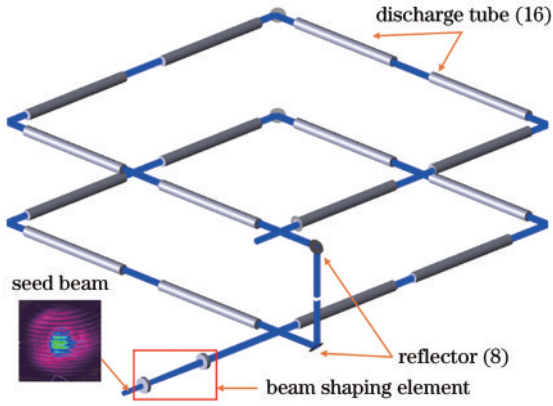


图 1 放大器折叠光路与放电管单元结构

Fig. 1 Folding optical path of amplifier and structure of discharge tube

RF-FAF CO₂ 激光功率放大器采用双层折叠串联布局,脉冲种子光单程通过 16 根侧端射频放电管。种子光在增益区域内有效利用的受激粒子总数受模体积、种子光光强分布和增益区域内增益系数分布的影响,在放大器参数与种子光参数间存在最优匹配关系。RF-FAF CO₂ 激光放大器的增益产生和维持机制非常复杂,实验研究表明,在 RF-FAF CO₂ 放大器增益区域横截面上增益系数分布符合超高斯函数,但具体的超高斯阶数受电极形状、气体温度、气体流速、气体配比、气压和电子密度等因素的影响较大^[11-13]。

本文模型仿真采用的放电管参数如表 1 所示。

表 1 放电管增益区参数

Table 1 Parameters of gain region in charge tube

Parameter	Value
Gain on axial $g_0 / (\% \cdot \text{cm}^{-1})$	1-0.8856
Saturation parameter $E_s / (\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$	1600
Super-Gaussian order n_x, n_y	2-8
Radius of gain region w_g / cm	1
Length of gain region l in single tube / cm	15

增益区域能有效提取的功率是衡量激光放大器性能的重要参数,本文模型仿真采用的放电管有效提取的功率恒定,增益系数的超高斯阶数分别取 2、4、6、8 阶,对应的轴上小信号增益系数 g_0 分别为 $1 \% \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 $0.965 \% \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 $0.9126 \% \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 $0.8856 \% \cdot \text{cm}^{-1}$ 。由表 1 参数计算单根放电管内部增益区域存储功率为

$$P_{\text{store}} = \iint G_{(r)} \cdot E_s \cdot \gamma \cdot dS = 754 \text{ W}, \quad (5)$$

式中: γ 为与能级退化有关的物理量,在四能级系统中取 1。实际激光放大系统无法达到理论上的最大功率,原因包括种子光束无法完全覆盖增益区域、种子光光强分布与增益分布存在差异等,因此研究增益径向分布与入射光光强分布的耦合关系对 RF-FAF 放电管的能量提取效率的影响至关重要。

本文使用激光与物理光学仿真软件 GLAD 对参数表 1 中的 RF-FAF 放电管单元结构进行数值仿真。软件内置算法采用 Frantz-Nodvik 脉冲激光动力学理论与薄片增益模型,表示为

$$I_{\text{out}} = E_s \cdot \ln \left\{ 1 + \exp(G_{(r)}) \cdot \left[\exp\left(\frac{I_{(r)}}{E_s}\right) - 1 \right] \right\}, \quad (6)$$

$$G_{(r)} = g_0 \cdot l \cdot \exp \left[- \left(\frac{x - x_{\text{dec}}}{\omega_{\text{rad}}} \right)^{2n_x} - \left(\frac{y - y_{\text{dec}}}{\omega_{\text{rad}}} \right)^{2n_y} \right], \quad (7)$$

式中: n_x 和 n_y 为增益分布的超高斯阶数; ω_{rad} 为增益区域超高斯半径; I_{out} 为出射光光强分布。

3 仿真结果分析

3.1 种子光强分布最优解

为分析小信号增益阶数分布对放大功率提取的影响,在射频电极激励功率不变的前提下,模拟了增益的径向分布超高斯阶数 $m=2, 4, 6, 8$ 时,增益的分布情况,并由式(4)求解出功率为 500 W 的种子光对应的功率提取值最大的光强分布,如图 2(a)、(b)所示。超高斯阶数 $m=2, 4, 6, 8$ 时,增益分布中心平坦区域增大,放电能量均匀分布到整个管径内部。由式(4)可知,光强分布最优解与增益径向分布函数 $G_{(r)}$ 相关。

对比图 2(a)与图 2(b)可知,放大器增益分布超高斯阶数 $m=2, 4, 6, 8$ 时,功率提取效率最高的种子光强分布解具有与 $G_{(r)}$ 相同的分布形式,说明种子光截面光强分布与增益分布保持一致对功率提取更有利。增益径向分布随超高斯阶数增加而变得平坦,与之匹配的最优种子光强分布的阶数 n 也随之上升,其光强分布也趋向于高阶超高斯分布形式。对于沿径向增益分布均匀的放电管,高阶超高斯光束的功率提取效率更高;对于增益主要集中在轴上的高斯型增益分布,高斯基模光束的功率提取效率更高。

由式(4)计算得到的光强边界 b 代表泛函数方程解所满足的边界条件 $I_{(r=b)} = 0.135I_0$, 物理意义上代表功率提取值最大的光强分布解的光束半径,即最优光束半径,其值与种子光功率、增益分布超高斯阶数相关。图 3 为根据式(5)数值求解的 b 值随种子光功率变化关系,可以看出:入射光功率为 500 W,增益分布超高斯阶数 $m=2, 4, 6, 8$ 时,最优光束半径 b 值分别为 0.54 cm、0.58 cm、0.62 cm、0.65 cm;入射光功率为 1000 W 时,最优光束半径 b 值分别为 0.64 cm、0.66 cm、0.68 cm、0.70 cm;入射光功率为 2000 W 时,最优光束半径 b 值分别为 0.74 cm、0.74 cm、0.74 cm、

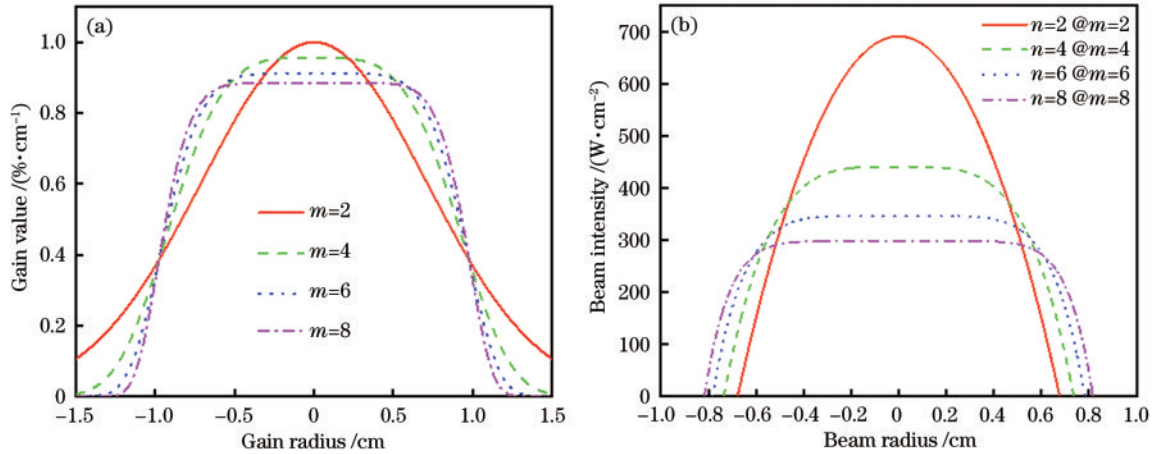


图2 不同增益分布情况下最优光强分布的数值模拟。(a) 不同超高斯阶数的小信号增益分布;(b) 不同增益分布下的最优种子光强分布

Fig. 2 Numerical simulation of optimal beam distribution under different gain distributions. (a) Small signal gain distribution with different super-Gaussian orders; (b) optimal beam intensity distribution with different gain distributions

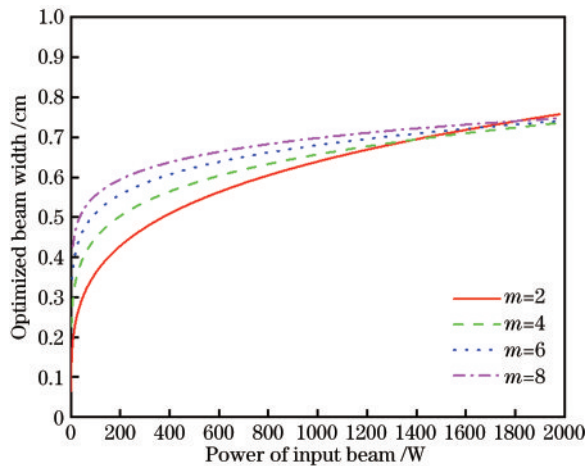


图3 种子光功率、增益分布超高斯阶数对最优光束半径影响
Fig. 3 Influence of seed power and super-Gaussian orders of gain distribution on optimal beam radius

0.75 cm。对于射频电极激励功率集中在轴上,阶数为2的高斯型增益分布,其在同等种子光功率下的最优光束半径均低于系数更高的增益分布。

低功率种子光进行单程脉冲放大时,功率提取值最大的光束半径并不等于增益分布半径,存在小于增益分布半径的最优光束尺寸使功率提取值达到最大;高功率种子光单程放大时,功率提取值最大的光束半径接近增益分布半径,对种子光进行扩束使其充满增益区域能够降低光斑截面的光强,提高功率提取效率。

3.2 放电管功率提取特性仿真

由式(4)可知,影响放电管内增益与种子光耦合的因素包括增益与种子光强分布的分布匹配程度、种子光相对于增益分布半径的束宽与种子光功率。对16管折叠式射频FAF放大器进行数值仿真,研究种子光束半径、功率与光强分布对单通放大器功率提取值的影响。本文模拟了在增益功率相同、增益超高斯分布

阶数分别为2阶与8阶情况下,光束半径取0.3~1.0 cm时,基模高斯分布、8阶超高斯分布的种子光的功率提取值。根据计算拟合出功率提取值随光束半径的变化关系如图4所示。

图4数值仿真结果显示,功率提取值随光束半径变化均出现先上升后下降的趋势,如图4(a)中基模高斯种子光的最优束宽分别为0.6 cm、0.7 cm、0.8 cm,8阶超高斯种子光的最优半径分别为0.5 cm、0.7 cm、0.8 cm,均小于增益区域半径。随种子光功率升高,曲线的下降趋势减弱,功率提取峰值处的半径逼近增益分布半径。高功率种子光完全覆盖增益区域能够充分利用增益介质,增大光束模体积也有利于降低饱和效应,使种子光强度处于正常放大阶段;低功率种子光的光强远小于饱和光强 E_s ,将光束能量集中于小信号增益系数较高的轴上区域能提升种子光放大效率,因此高斯型增益分布的最优束宽小于8阶超高斯增益分布。

如图4(b)中,增益分布为8阶超高斯形式下,最优光束半径接近增益分布半径,与图1(a)展示的最优光束光强分布解与增益分布函数形式相近的结论相符。500 W、1000 W、2000 W的注入功率条件下,8阶超高斯光束比基模高斯光束的功率提取峰值分别高41.5 W、100.0 W、329.7 W,高阶超高斯光束的增益相较于基模高斯光更平坦,与8阶超高斯增益分布更为接近,因此其功率提取峰值更大。同样,在图4(a)中,当光束半径等于增益分布半径(1 cm),种子光束完全覆盖增益介质时,2阶基模光束比8阶超高斯光束的功率提取值分别高54.9 W、83.2 W、89.0 W,与2阶高斯增益分布更接近的基模光束的功率提取值大于8阶超高斯光束。

仿真结果表明:功率低于放大器存储功率的脉冲种子单程通过时,光束半径对功率提取值的影响大于

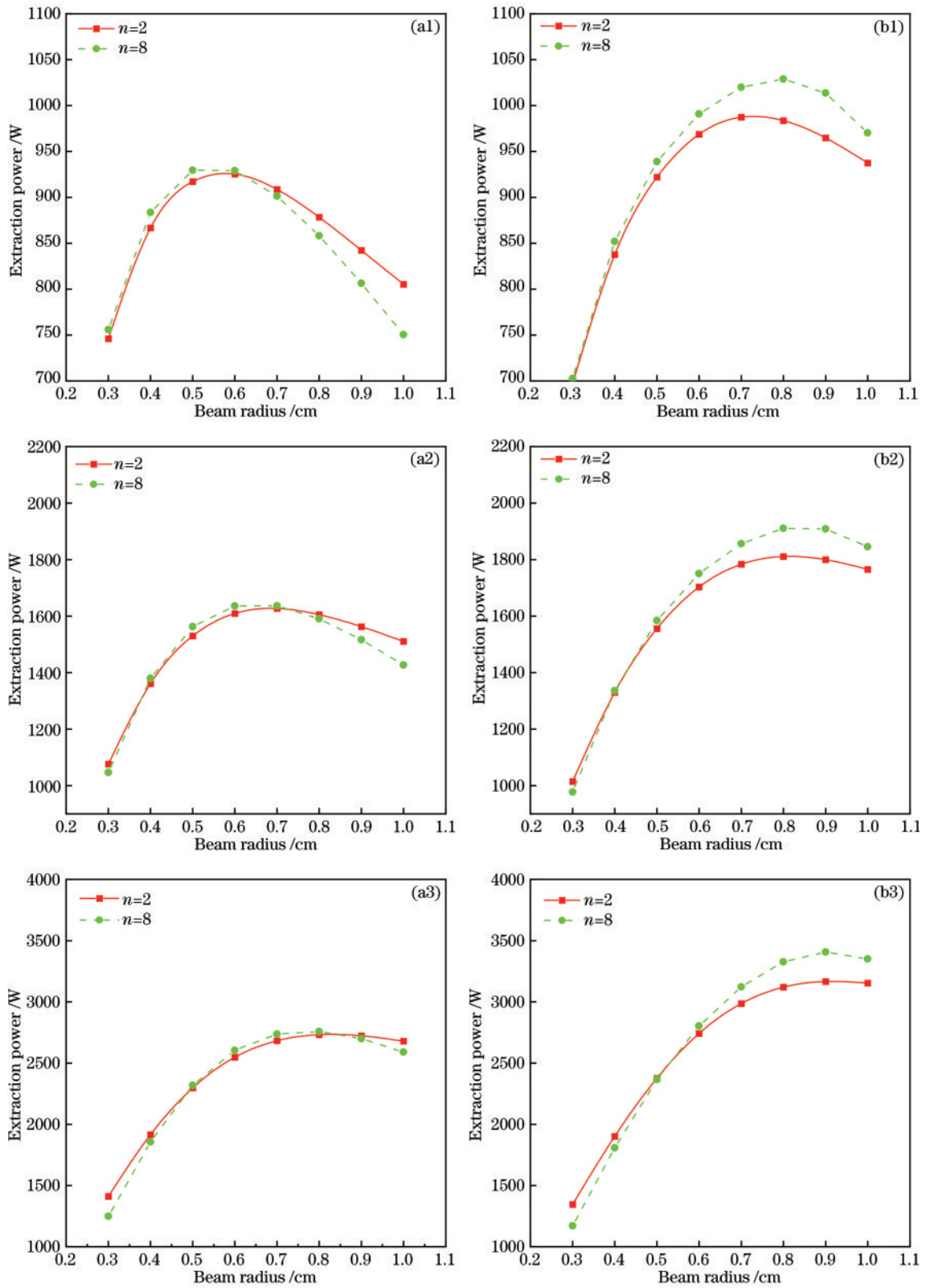


图 4 增益分布超高斯阶数为 2、8 时种子光的功率提取值。(a1)~(a3) 2 阶高斯分布下, 入射光功率分别为 500 W、1000 W、2000 W 时, 不同种子光强分布下的功率提取值; (b1)~(b3) 8 阶高斯分布下, 入射光功率分别为 500 W、1000 W、2000 W 时, 不同种子光强分布下的功率提取值

Fig. 4 Power extraction value of seed light when the super-Gaussian order of gain distribution is 2 and 8. (a1)~(a3) Power extraction values of different seed light intensity distributions under the 2-order Gaussian gain distribution when the incident light power is 500 W, 1000 W, and 2000 W, respectively; (b1)~(b3) power extraction values of different seed light intensity distributions under the 8-order Gaussian gain distribution when the incident light power is 500 W, 1000 W, and 2000 W, respectively

光束光强分布与增益分布的超高斯阶数匹配的影响,且存在小于增益区域半径的最优光束半径使能量提取值最大;增加脉冲种子光功率,最优光束半径随之增加,接近增益区域半径,此时光束光强分布与增益分布的超高斯阶数匹配对放大器功率提取值影响较大,且平坦的增益分布对功率提取更加有利。图 4 中功率提取最大值受种子光功率、半径、增益分布与种子光分布超高斯系数的影响,且与图 3 结论吻合,证实该模型可应用于脉冲种子激光与放大器增益匹配特性仿真分析。

4 结 论

本文建立了可描述脉冲种子激光放大的增益-光强匹配理论模型,定量分析了影响种子光与增益分布耦合程度的因素,包括种子光功率、光强分布、半径与增益分布对放大器功率提取。

基于变分法对放电管单元增益模型进行数值计算,结果显示:脉冲种子光功率较低时,存在小于增益分布半径的最优光束半径,使得功率提取值最大;种子光功率升高,最优光束半径随之增加至接近增益分布半径,此时种子光光强分布与增益分布的超高斯阶数匹配对功率提取影响最大,采用高阶的增益分布和与之匹配的超高斯光束能够极大提升放大器的能量提取值。

本文建立的理论模型将放大器功率提取值同放大器增益分布与种子光半径、光强分布等参数联系起来,对提升射频 FAF CO₂ 行波放大的功率提取效率具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] 林楠, 杨文河, 陈韞懿, 等. 极紫外光刻光源的研究进展及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922002.
Lin N, Yang W H, Chen Y Y, et al. Research progress and development trend of extreme ultraviolet lithography source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922002.
- [2] 李艳丽, 刘显和, 伍强. 先进光刻技术的发展历程与最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922006.

- Li Y L, Liu X H, Wu Q. Evolution and updates of advanced photolithography technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922006.
- [3] 文洲, 陆健, 张宏超, 等. 脉冲激光冲击液滴变形和破裂的数值仿真[J]. 中国激光, 2022, 49(22): 2202008.
Wen Z, Lu J, Zhang H C, et al. Numerical simulation on droplet deformation and rupture by laser-pulse impact [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(22): 2202008.
- [4] 李鑫鹏, 于德洋, 潘其坤, 等. 极紫外光刻光源系统光束指向稳定性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1714004.
Li X P, Yu D Y, Pan Q K, et al. Beam pointing stability of extreme ultraviolet lithography light source system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1714004.
- [5] Lü X L, Peng Y J, Wang W Y, et al. High-energy, high-repetition-rate ultraviolet pulses from an efficiency-enhanced, frequency-tripled laser[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9(3): e38.
- [6] Komori H, Ueno Y, Hoshino H, et al. EUV radiation characteristics of a CO₂ laser produced Xe plasma[J]. Applied Physics B, 2006, 83(2): 213-218.
- [7] Ariga T, Hoshino H, Endo A. High average power CO₂ laser MOPA system for Tin target LPP EUV light source [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6454: 645403.
- [8] Paré C. Optimum laser beam profile for maximum energy extraction from a saturable amplifier[J]. Optics Communications, 1996, 123(4/5/6): 762-776.
- [9] Sanchez F, Brunel M, Özkul C, et al. Optimum signal profile in longitudinally pumped three-level amplifiers[J]. Journal of Modern Optics, 1998, 45(12): 2533-2539.
- [10] 吕显瑞, 黄庆道. 最优控制理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Lü X R, Huang Q D. Theoretical basis of optimal control [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [11] Galushkin M G, Golubev V S, Dembovetsky V V, et al. Influence of a radial inhomogeneity of the active medium on the output radiation power from a cw CO₂ laser with fast axial flow[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 3052: 147-150.
- [12] Takahashi N, Tsuchida E, Sato H. Spatial variation of gain and saturation in a fast axial flow CO₂ laser amplifier [J]. Applied Optics, 1989, 28(17): 3725-3736.
- [13] Siemsen K J. Axial gain distribution in a cw CO₂ laser[J]. Applied Optics, 1980, 19(5): 818-821.