

万焦耳级激光主放大器增益空间分布计算研究

王冰艳^{1,2} 张军勇¹ 王 利¹ 刘 强¹ 朱健强¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于蒙特卡罗算法及ASAP光学软件构建了完整分析万焦耳级激光主放大器抽运动力学过程的模型。该模型包含三维空域和一维时域,分析计算了包层完全吸收时不同抽运时刻通光面上的储能分布,其变化趋势与文献报道结果相同,验证了建模的正确性。通过对比包层完全吸收和部分剩余反射时的平均小信号增益系数,发现当剩余反射率低于0.05%时,两者区别并不明显。考虑包层部分反射后平均小信号增益系数的计算值比测量值4.42/m偏小6%,分析其原因主要在于模型计算过程中的采用部分近似、未考虑自发辐射的光谱宽度以及钕玻璃中存在的亚表面缺陷等。

关键词 激光器; 激光放大器; 放大自发辐射; 蒙特卡罗; 光线追迹; 增益空间分布

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0214003

Research on Calculation of Gain Spatial Distribution for Main Amplifiers in Million Joules Laser Facility

Wang Bingyan^{1,2} Zhang Junyong¹ Wang Li¹ Liu Qiang¹ Zhu Jianqiang¹

¹Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A model which can simulate the pump dynamics process of the main amplifiers in million joules laser facility is built based on Monte Carlo algorithm and a ASAP software. The model contains 3D airspace and 1D time domain, and the evolution of the distribution of the energy in light pass surface in different pumping time with complete absorption on cladding is calculated, which is the same with the results mentioned in previous articles proving the accuracy of the model. The comparisons of average small signal gain coefficient are made between the cases when the residual reflection in cladding is taken into consideration or not. The results show that there is no significant difference when residual reflectivity is below 0.05%. The value of calculated average small signal gain coefficient with residual reflection is 6 percentage smaller than the measured value(4.42/m), which results from the use of part approximation during the simulation, the unconsidered spectrum of spontaneous radiation, the subsurface damage in the actual Nd:phosphate glass and so on.

Key words lasers; laser amplifiers; amplified spontaneous emission; Monte Carlo; ray tracing; gain spatial distribution

OCIS codes 140.3280; 140.3430; 140.3460

1 引 言

万焦耳级激光装置是为了获取高能量而研制的新一代大口径激光驱动器系统,通常可实现单路10kJ的

收稿日期: 2015-06-26; 收到修改稿日期: 2015-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(61205212,61205210)

作者简介: 王冰艳(1989—),女,博士研究生,主要从事高功率激光片状放大器计算方面的研究。

E-mail: wby_ice@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事高功率激光驱动器总体设计方面的研究。

E-mail: jqzhu@mail.shcnc.ac.cn(通信联系人)

基频输出,输出的光束质量达到10倍衍射极限。美国利弗莫尔实验室(LLNL)先后发展了Shiva, Nova, Beamlet等驱动器装置,为国家点火装置(NIF)的研制提供了参考^[1-3]。NIF是迄今为止已建成的最大的激光驱动器装置,共包括192路光束,可输出1.8 MJ的高能激光,主放大器采用4×2组合式氙灯抽运片状结构,钽玻璃片采用11片+7片构型,主放大器采用四程放大形式^[4],可为整个激光链路提供99.9%以上的输出能量^[5]。

由于激光放大器体积较大,结构复杂且造价高昂,因此在工程实施之前,采用计算机模拟的方法对放大器性能进行预实验很有意义。LLNL的研究人员对放大器的工作过程进行了比较细致全面的研究,编写了一系列分析放大器工作状态的计算机程序,能够对放大器性能进行设计和评估。1999年Touze等^[6]报道了采用逆向法编制的3D模型,比较了其和2.5D模型的差别,3D模型和2.5D模型在增益系数预测上相差5%。国内,四川大学的冯国英等^[7]采用二维光线追迹法对主放大器抽运腔进行了计算。中国工程物理研究院的郑万国等^[8-9]对片状放大器的能量转化过程进行了研究,可计算三维腔传输效率。张华等^[10-11]编制了二维模拟程序,主要针对棒状放大器开展计算,也可对片状放大器的放大自发辐射(ASE)进行初步计算。刘涛等^[12]建立了氙灯放电回路模型,并采用模拟退火算法求解了最优抽运状态的电路参数。赵友全等^[13]利用量子理论和气体放电理论研究了氙灯的放电特性,设计脉冲氙灯驱动电路时可采用选取表面高电子发射的阴极,增大预电离时的电子浓度等措施提高发光能量。另外,也开展了针对片状放大器的实验测量,刘晶等^[14]构建了一套氙灯抽运的有源反射镜片状放大器装置,并实验测量了不同电压下的小信号增益系数和储能效率,也测量了氙灯发光效率和横向ASE对增益的影响。郝欣等^[15]利用大口径高通量实验平台,同时使用科学图像传感器(CCD)和哈特曼测量了大口径片状放大器增益均匀性,使用哈特曼能够较好地测量增益均匀性,但哈特曼所含微透镜阵列不可过少,以超过 50×50 较好。

本文比较完整地分析了主放大器能量转化的各个环节,编写了一套分析万焦耳级激光主放大器钽玻璃抽运动力学过程的动态模拟程序,实现了从氙灯放电到钽玻璃三维储能分布的时空模拟,可对增益能力进行分析和评估,且为未来实现氙灯抽运磷酸盐钽玻璃片状放大器的参数设计奠定基础。

2 片状放大器构成

片状放大器主要由氙灯功能模块、工作物质钽玻璃片、隔板玻璃、反射器、窗口玻璃、密封技术及氮气通道组成。反射器的作用是增加抽运均匀性,提高氙灯光的利用率,反射器的形状经过一系列的优化,渐开线形反射器在抽运均匀性方面效果较好,考虑其成本较高,万焦耳级激光主放大器外侧氙灯组采用了屋脊形反射器,中间位置在氙灯和氙灯之间加了菱形反射器,以提高抽运效率。隔板玻璃防止氙灯炸裂对钽玻璃的危害,也阻挡了氙灯光在腔中传输时产生声波造成的波前畸变^[4]。密封技术及氮气通道则用来快速带走放大器工作过程中产生的热量。片状放大器二分之一抽运腔示意图如图1所示。

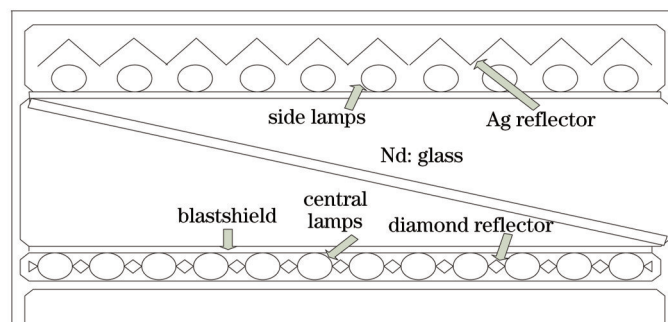


图1 主放大器抽运腔平面图

Fig.1 Plan view of slab amplifier pump cavity

3 放大器中的能量转换过程

片状放大器的能量转换过程主要分为以下过程,如图2所示。

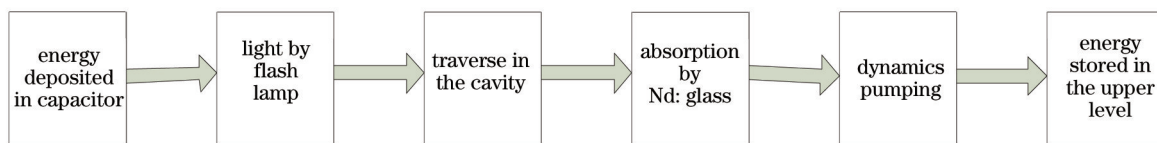


图2 放大器能量转换过程

Fig.2 Energy conversion process of amplifier

片状放大器的供电网络可把能库约70%~90%的能量传输到氙灯,其余的以热方式损失掉了。氙灯等离子体把约80%的电能转化为光能,其中约50%在钕离子的抽运吸收带宽内^[16]。氙灯发出的光通过放大腔传输至钕玻璃片,腔传输效率取决于腔的构型及反射器的形状等,万焦耳级激光主放大器的腔传输效率约为43%,到达钕玻璃表面的光约30%被钕玻璃吸收。前者根据ASAP光学软件,在设定了腔结构,氙灯个数等条件下,通过三维光学追迹得到,后者根据N31钕玻璃的测量吸收光谱数据计算出。由于吸收光子和激光上能级之间的量子亏损,抽运到高能态的粒子不能全部转换到亚稳态,这一部分的效率称为量子效率,约为60%^[17]。主激光到达前,当亚稳态能级上的粒子数大于激光下能级的粒子数时,可发生自发辐射,自发辐射光在激光增益介质中放大,产生ASE,消耗了一部分反转粒子数,同时伴随着无辐射跃迁的产生,这两部分总共的效率约为65%。

3.1 放电回路和脉冲氙灯

大功率激光放大系统一般采用LC供电网络和引燃管内触发进行工作,为了提高电光转换效率,放电回路采用了预电离设计,可以增加抽运均匀性。万焦耳级激光主放大器放电回路如图3所示,采用四氙灯串联,图中以二氙灯串联为例, C 、 L 、 R 、 S 、 V_0 分别为主放电回路的电容、电感、电阻、开关,其中, $C=250\ \mu\text{F}$, $L=75\ \mu\text{H}$ 。

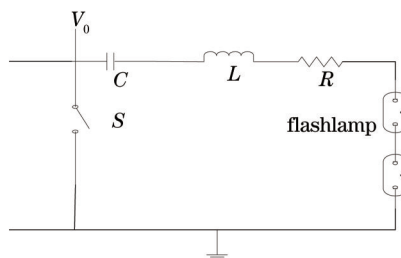


图3 放电回路示意图

Fig.3 Diagram of discharge loop

根据MEH理论^[18],电路方程为,

$$\begin{cases} L_1 \frac{d}{dt} \left(\sum_1^n i_m \right) + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + K \sqrt{\sum_1^n i_m} + R_1 \sum_1^n i_m = V_0 \\ L_2 \frac{d}{dt} \left(\sum_2^n i_m \right) + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt - \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + R_2 \sum_2^n i_m = 0 \\ \dots\dots \\ L_n \frac{d}{dt} \left(\sum_n^n i_m \right) + \frac{1}{C_n} \int i_n dt - \frac{1}{C_{n-1}} \int i_{n-1} dt + R_n \sum_n^n i_m = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 L_n 、 C_n 、 R_n 分别代表电路中电感、电容、电阻, i_m 为氙灯支路电流, K 为氙灯等离子体的非线性电阻系数, V_0 为初始电压。MEH理论中没有考虑氙灯等离子体直径随时间的变化,Dishington等^[19]研究了氙灯放电过程中等离子体直径随时间的变化。张华等^[20]在研究氙灯瞬时放电特性时考虑了这种变化,得出在大能量工作环境下,氙灯等离子体直径的变化可以忽略。根据实际需要,选择合适的电路参数和节数,采用龙格库塔算法求解(1)式即可得到放电电流波形,放电脉冲宽度约为650 μs ,如图4所示。

氙灯的辐射光谱对钕玻璃的吸收效率有重要的影响,根据Trenholme-Emmett理论^[21],似稳态氙灯的辐射光谱取决于电流密度、内径和充气压。氙灯辐射等效于充满灯径的均匀加热等离子体圆筒,可直接套用黑体辐射公式描述氙灯的瞬时辐射特性。其辐射光谱如图5所示。

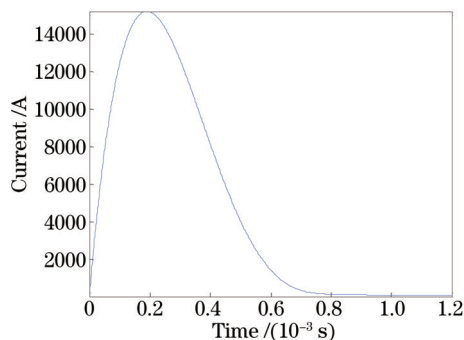


图4 氙灯电流波形

Fig.4 Current waveform of xenon lamp

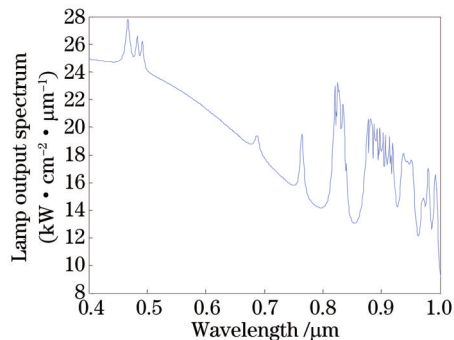


图5 氙灯辐射光谱

Fig.5 Radiation spectrum of xenon lamp

3.2 腔传输及钕玻璃片表面能量沉积

氙灯可看做朗伯光源发光,它经过隔板玻璃,部分直接入射到钕玻璃片表面,部分氙灯被反射器反射,二次传输到氙灯,部分被氙灯等离子体再吸收,作为新的辐射源再次发光,部分光由于角度关系,射出激光腔。准确的腔传输效率可由一个三维光线追迹模型或者采用光学软件得到,考虑到组合式片状放大器结构的复杂性,采用了ASAP软件对钕玻璃表面的抽运光辐照进行分析,可得到抽运能量在钕玻璃表面的能量沉积。图6为三维腔追迹的示意图,能量沉积效率约为43%。

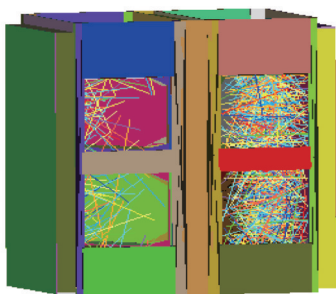


图6 三维腔追迹示意图

Fig.6 Map of three dimension cavity tracing

3.3 钕玻璃吸收谱及抽运动力学过程

万焦耳级激光主放大器增益介质采用N31磷酸盐钕玻璃,钕玻璃对氙灯光的吸收满足比尔定律,N31钕玻璃的吸收光谱如图7所示。经计算得到钕玻璃的吸收效率约为30%。

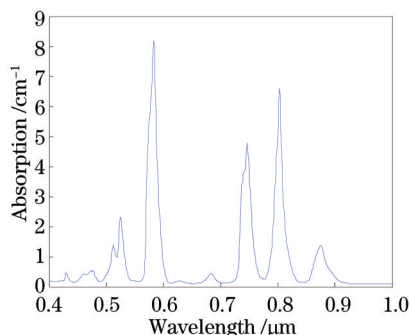


图7 钕玻璃吸收光谱

Fig.7 Absorption spectrum of Nd glass

氙灯抽运钕玻璃片的过程中存在两个相互竞争的过程,一方面钕离子吸收氙灯光使得上能级粒子数增加;另一方面,ASE增大了上能级粒子数的消耗,进而引起增益不均匀分布^[20]。随着对光束口径的需求不断增大,ASE率先引起钕玻璃片边缘的退抽运效应,是限制光束口径进一步增大的主要因素。Powell等^[22]对ASE的退抽运过程采用了经验模型进行计算:

$$k_{ASE}(10^3 s^{-1}) = \sum_{n=1}^5 c_n \cdot (gL)^n, c_n = 0.452, -0.312, 0.347, -0.1211, -0.167 (n=1\sim 5) \quad (2)$$

式中 k_{ASE} 为退抽运率, g 为小信号增益系数, L 为增益介质的长度。

该经验公式不能体现 ASE 对储能分布的影响, 且模型有适用范围。针对万焦耳级激光主放大器模块采用了 Monte Carlo 和光线追迹算法建立了三维储能时空分布模型。计算结果能够体现 ASE 的三维空间分布和一维时间分布, 能够为减少 ASE 效应或提出参数优化方案提供参考。

4 结果与讨论

4.1 平均小信号增益系数的测量

实验采用探针法对增益进行测量, 如图 8 所示。探针法不能直接测得小信号增益系数而是先得到增益 G , 再利用 G 和小信号增益系数的关系换算而成, 较为可靠。在激光束进入放大器之前, 分出部分光作为参考光, 另一部分光通过放大器并进入功率计进行增益测试, 测得的是剔除损耗的净增益, 最后转化为小信号增益系数。

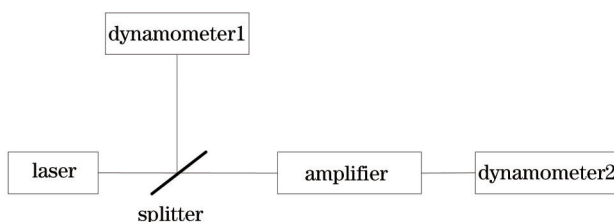


图 8 单通小信号增益系数测量示意图

Fig.8 Schematic diagram of small signal gain coefficient measurement for signal pass

采取 12 点测量法如图 9 所示, 即在钽玻璃通光面上端, 中端和下端各取 4 个点进行测量。

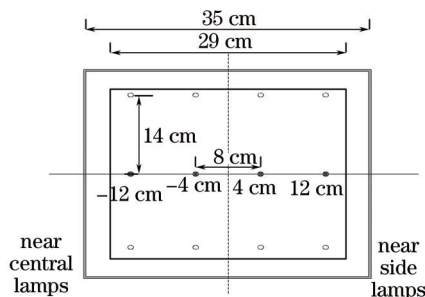


图 9 采取的 12 点测量图

Fig.9 Measurement of 12 points

钽玻璃片的尺寸为 $682 \text{ mm} \times 363 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$, 通光口径约为 310 mm , 受激发射截面为 $3.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 钽玻璃的非通光面有包层结构, 用于抑制寄生震荡及减少 ASE 对钽片储能的消耗。实验测得的平均小信号增益系数为 $4.42/\text{m}$ 。

4.2 模拟计算

利用前面得到的初始储能作为初始条件, 进行三维建模计算结果如下, 其中 g_{ave} 为平均小信号增益系数:

1) 包层完全吸收时, 对时间进行 25 片的切割, 不同时刻通光面的储能分布如图 10 所示。

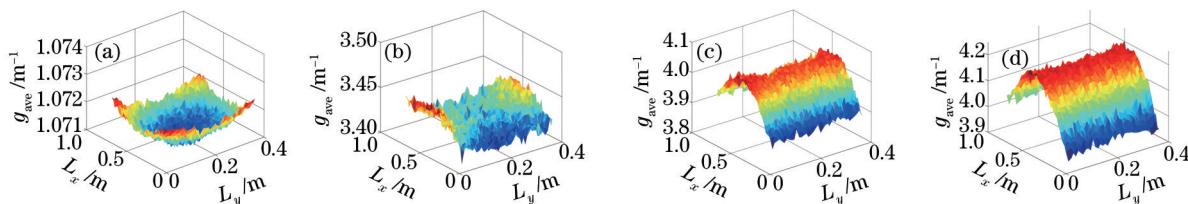


图 10 不同时刻通光面上的储能分布变化。(a) $t=78 \mu\text{s}$; (b) $t=338 \mu\text{s}$; (c) $t=520 \mu\text{s}$; (d) $t=650 \mu\text{s}$

Fig.10 Distribution of stored energy in light pass surface in different time. (a) $t=78 \mu\text{s}$; (b) $t=338 \mu\text{s}$; (c) $t=520 \mu\text{s}$; (d) $t=650 \mu\text{s}$

由上图可以看出, ASE 优先使得片边缘增益下降, 在初始时刻, 由于抽运到钕玻璃的能量较少, 片中心抽运不完全, 因此片边缘先产生增益, 随着抽运能量的增加, 由于边缘部分的增益距离最长, 因此 ASE 产生的退抽运作用最明显, 这与 Goren 等^[16]报道的 ASE 趋势一致。

2) 对比考虑包层剩余反射和包层完全吸收时钕玻璃片平均小信号增益系数, 如图 11 所示, 为显示方便, 对剩余反射率 r 取对数, 5 个点的剩余反射率依次为 0.01%、0.05%、0.1%、1%、5%。

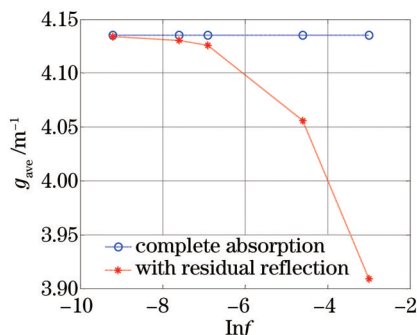


图 11 包层完全吸收和考虑剩余反射时的平均小信号增益系数

Fig.11 Average small signal gain coefficients of complete absorption and with residual reflection in cladding

由图 11 可知, 考虑包层剩余反射后, 平均小信号增益系数下降, 这是由于被包层反射的光线在钕玻璃内部传播放大, 消耗上能级粒子数。由于包层剩余反射不可能无限小, 因此, 考虑包层剩余反射的模型更接近实际情况。当剩余反射率小于 0.05% 时, 其影响可忽略不计。

3) 考虑包层剩余反射时, 通光面上的有效储能分布

据已有文献报道及数据分析显示钕玻璃包层剩余反射率一般小于 0.1%, 选取包层剩余反射率为 0.05%, 通光面的有效储能分布如图 12 所示。

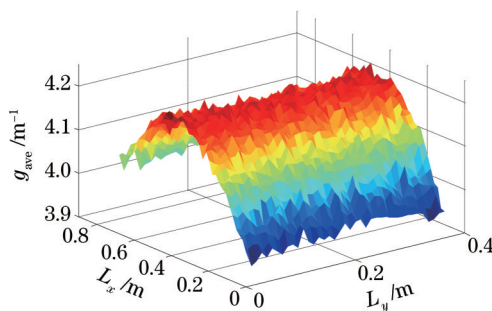


图 12 钕玻璃通光面上的 g_{ave} 分布图

Fig.12 Distribution of g_{ave} in light pass surface of Nd glass

片中心处沿 x 轴和沿 y 轴的平均小信号增益系数变化如图 13 所示。

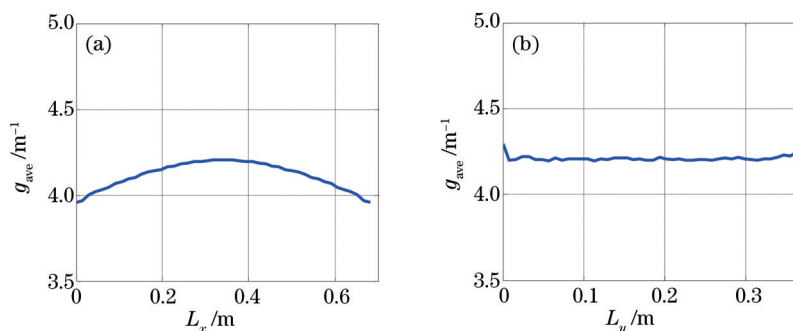


图 13 平均小信号增益系数。(a) 沿 x 轴; (b) 沿 y 轴的分布

Fig.13 Distribution of g_{ave} . (a) Along x axis; (b) along y axis

取剩余反射率为 0.05%, g_{ave} 的计算值为 4.13/m, 实验测量值为 4.42/m。模拟计算得到的小信号增益系

数平均值比实验结果偏小,分析原因主要由于未考虑自发辐射的光谱,计算模型中的一些近似以及未考虑实际加工完成的钕玻璃中不可避免地存在的亚表面缺陷等原因造成的。

5 亚表面缺陷对增益空间分布的影响

在以上的模拟计算中假定所计算的磷酸盐钕玻璃具有理想的光学质量,实际上光学玻璃的加工过程一般采用的切削,研磨,抛光等一系列方法,不可避免地会引入亚表面缺陷(SSD)。SSD一般表现为延伸至玻璃内部的微裂纹,导致 ASE 光线被亚表面缺陷散射而偏离原来的路径,且 ASE 以随机的角度入射至亚表面缺陷,其散射显示出随入射角度变化的特性。SSD 的存在可能会对增益的空间分布产生影响。

以脆性断裂产生的典型缺陷形貌^[23]为例,并采用 FDTD solutions 说明不同角度入射时对 SSD 周围场产生的影响。SSD 典型形貌如图 14 所示。

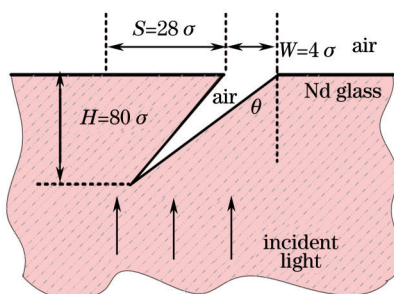


图 14 脆性断裂产生的亚表面缺陷形貌

Fig.14 Morphology of subsurface damage generated by brittle fracture

其中, $\sigma = \lambda/40$, λ 为入射波长, θ 为裂纹夹角, S, H, W 分别为裂纹在表面的投影长度,深度和开口宽度。以 P 偏振光为例,正入射和 70° 入射时,缺陷周围的电场分布如图 15 所示。

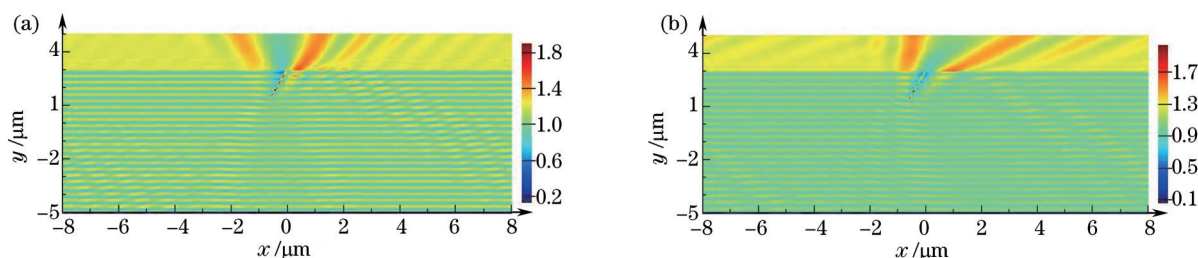


图 15 不同入射角度时缺陷周围的电场分布。(a) 90° ; (b) 70°

Fig.15 Distribution of electric-field around cracks with different incidence angles. (a) 90° ; (b) 70°

由上图可以看出,不同角度入射至同一个亚表面缺陷时,缺陷周围的场分布不相同,而 SSD 影响原光场分布也是由于缺陷产生了散射场,对未存在 SSD 时的场产生了扰动,因此可以推断,不同入射角时缺陷的散射特性不同,这些散射光在 ASE 计算程序中,对增益空间分布有一定的影响。

6 结 论

全面分析了万焦耳级激光主放大器的抽运动力学过程,构建了从氙灯供电网络到有效储能分布模型。由分析可知,主放大器通光口径为 310 mm 时 ASE 引起的退抽作用不容忽视,引起储能降低,影响增益均匀性。当包层剩余反射率小于 0.05% 时,被包层反射的光线造成的能量损耗很低,此时退化为包层完全吸收模型,在保证计算准确度的同时,能够大幅提升计算速度;包层剩余反射率大于 0.05% 时,包含包层剩余反射的计算模型更接近实际情况。下一步将研究亚表面缺陷在不同角度入射时的散射特性,完善包层模型,并定量描述亚表面缺陷对钕玻璃小信号增益系数及增益空间分布的影响。

参 考 文 献

1A C Erlandson, M D Rotter, D N Frank, *et al.*. Design and performance of the beamlet amplifiers[J]. ICF Quarterly Report, 1994, 5(1):

- 18-28.
- 2 J T Hunt, D R Speck. Present and future performance of the Nova laser system[J]. *Optical Engineering*, 1989, 28(4): 2844-61.
 - 3 J E Murray, H T Powell, B W Woods. Optimized flashlamp pumping of disc amplifiers[C]. SPIE, 1986, 609: 95-110.
 - 4 C Marshall, A Erandson, J Horvath, *et al.*. Design and performance of the main amplifier system for the national ignition facility[C]. *Advanced Solid State Laser*, Optical Society of America 1999: MC1.
 - 5 C A Haynam, P J Wegner, J M Auerbach, *et al.*. National ignition facility laser performance status[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3276-3303.
 - 6 G Le Touze, O Cabourdin, J F Mengue. 3D gain modeling of LMJ and NIF amplifiers[C]. SPIE, 1999, 3492: 630-637.
 - 7 Feng Guoying, Lv Baida. Ray-tracing analysis of pumping reflectors for the multisegment Nd: glass amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(6): 671-676.
冯国英, 吕百达. 多段阵列式钕玻璃放大器抽运腔的光线追迹分析[J]. *激光技术*, 1997, 17(6): 671-676.
 - 8 Zheng Wanguo. Research on Efficient Energy Conversion on Slab Amplifiers for High Power Laser System[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2001.
郑万国. 高功率激光驱动器片状放大器有效能量转换研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2001.
 - 9 He Shaobo, Yu Xuewu, Zheng Wanguo, *et al.*. Research of amplified spontaneous emission in high power slab laser amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(5): 603-606.
贺少勃, 於海武, 郑万国, 等. 高功率激光片状放大器中自发辐射放大研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(5): 603-606.
 - 10 Zhang Hua, Gao Yanxia, Fan Dianyuan. Optimized design of xenon flashlamp pumping of Nd:glass amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(12): 1616-1623.
张 华, 高艳霞, 范滇元. 钕玻璃放大器氙灯抽运的优化设计[J]. *光学学报*, 1998, 18(12): 1616-1623.
 - 11 Zhang Hua, Fan Dianyuan. Investigation of the amplified spontaneous emission in Nd:glass disk laser amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49(6): 1047-1051.
张 华, 范滇元. 钕玻璃片状激光放大器自发辐射放大特性的研究[J]. *物理学报*, 2000, 49(6): 1047-1051.
 - 12 Liu Tao, Zhou Shenlei, Zhang Panzheng, *et al.*. Optimization design of xenon flashlamp pumping in Nd glass slab amplifier based on simulated annealing algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0214002.
刘 涛, 周申蕾, 张攀政, 等. 模拟退火算法优化设计钕玻璃放大器氙灯抽运[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0214002.
 - 13 Liu Jing, Shi Xiangchun, Li Lei, *et al.*. Experimental research on gain characteristic in large aperture active mirror slab amplifiers [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0402007.
刘 晶, 施翔春, 李 磊, 等. 大口径有源反射镜片状放大器增益特性实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0402007.
 - 14 Zhao Youquan, Miao Peiliang, He Feng, *et al.*. Study on the discharge properties of xeon flash lamp and experimental measurement [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(7): 1978-1982.
赵友全, 苗佩亮, 何 峰, 等. 脉冲氙灯放电过程分析与实验测定[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(7): 1978-1982.
 - 15 Hao Xin, Chen Lin, Chen Yuanbin, *et al.*. Research on the measurement methods for the gain distribution uniformity of large aperture slab amplifiers[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(s1): s108001.
郝 欣, 陈 林, 陈远斌, 等. 大口径片状放大器增益均匀性测量方法研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(s1): s108001.
 - 16 C Goren, Y Tzuk, G Marcus, *et al.*. Amplified spontaneous emission in slab amplifiers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(12): 1239-1247.
 - 17 N O Dantas, E O Sequeira, A C Almeida, *et al.*. High Quantum Efficiency of Nd³⁺ Ions System using the Judd-Ofelt Theory[J]. *Braz J Phys*, 2013, 43(4): 230-238.
 - 18 J F Holzrichter, J L Emmett. Design and analysis of a high brightness axial flashlamp[J]. *Appl Opt*, 1969, 8(7): 1459-1465.
 - 19 R H Dishington, W R Hook, R P Hilberg. Flashlamp discharge and laser efficiency[J]. *Appl Opt*, 1974, 13(10): 2300-2312.
 - 20 Zhanghua, Fan Dianyuan. Transient property of xenon flashlamp discharge[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(4): 28-34.
张 华, 范滇元. 氙灯的瞬态放电特性研究[J]. *光学 精密工程*, 1999, 7(4): 28-34.
 - 21 J B Trenhoime, J L Emmett. Xenon flashlamp model for performance prediction[C]. *Proc 9th Inter Congre on High Speed Photography*, 1970: 299-302.
 - 22 H L Powell, A C Erlandson, K S Jancaitis, *et al.*. Flashlamp pumping of Nd:glass disk amplifiers[C]. SPIE, 1990, 1277: 103-120.
 - 23 Lei Zhang, Li Huang, Sijun Fan, *et al.*. Distribution of electric field and energy flux around the cracks on the surfaces of Nd-doped phosphate glasses[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(35): 6668-6674.

栏目编辑: 宋梅梅

需要作者修改的问题:

检查文中所有的物理量,第一次出现时需交代物理含义,英文缩写也给出全称。