

- [9] D. Poleman ,R.L. Van Meirhaeghe ,B. A. Vermeersch ,*J. Phys. D: Appl. Phys.* ,**30**(1997) ,465.
- [10] X. Ouyang , A. H. Kitai , T. Xiao ,*J. Appl. Phys.* , **79** (1996) ,3229.
- [11] S. Tanaka et al. ,*Proc. Soc. Inf. Display* ,**29** (1988) , 305.
- [12] J. Mita et al. ,*SID '91 Digest* ,(1991) ,290.
- [13] YUN - Hi Lee et al. ,*IEEE Transaction on Electron Devices* ,**44**(1997) ,39.
- [14] E. Soininen et al. ,*Proc. of the 7th International Workshop on Electroluminescence* ,Beijing ,China ,(1994) ,97.
- [15] B. Huttel ,K. O. Velthaus ,U. Troppenz ,*J. Cryst. Growth* , **159**(1996) ,943.
- [16] T. A. Oberacker , H. W. Schock ,*J. Cryst. Growth* , **159** (1996) ,935.
- [17] T. E. Peterand ,J. A. Baglio ,*J. Electrochem. Soc.* , **119** (1972) ,230.
- [18] Chunxiang Xu et al. ,*Thin Solid Film* ,**306**(1997) ,160.

高功率钕玻璃激光放大器优化设计的研究现状与展望^{*}

张 华 范滇元

(中国科学院上海光学精密机械研究所,上海 201800)

摘 要 系统地分析了高功率钕玻璃激光放大器及其优化设计的研究现状和进一步发展的方向,简要报道了在钕玻璃放大器优化设计方面所取得的主要成果。

关键词 惯性约束核聚变,钕玻璃放大器,优化设计

OPTIMIZATION OF THE DESIGN OF HIGH POWER Nd GLASS LASER AMPLIFIERS

Zhang Hua Fan Dianyuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract The development of high power solid state lasers and the optimized design of Nd glass amplifiers are described. Our own successes in the optimized design of Nd glass amplifiers are reported.

Key words inertial confinement fusion , Nd glass amplifier , optimized design

1 引言

惯性约束核聚变(ICF)激光驱动器的发展在很大程度上代表了目前高功率固体激光技术发展的最高成就。在ICF开展以来的20多年内,世界各国不断提出新的发展计划,探索新的技术途径,使ICF激光驱动器的研究蓬勃发展,现在已经建成了输出能量达100kJ的高功率激光装置。在高功率固体激光的发展过程中又不断开拓新的物理领域,如X射线激光、强场物理等,取得了一系列令人瞩目的成就。

惯性约束核聚变的研究和发展对激光驱动器的要求越来越高,主要表现在两方面:首先是规模巨大,因而要尽可能降低造价;其次是精密程度日益提高,要求激光系统具有高度的稳定性、可重复性和多路光束性能的一致性,从而对激光系统的设计提出了十分严格的要求,每一种类型的器件都需要进行最佳化设计。

本文将从高功率钕玻璃激光器及其优化设计的发展现状、我们在钕玻璃放大器优化设计方面所取得的主要成果和钕玻璃固体激光器进

^{*} 国家高技术 863 - 416 主题资助项目
1998 - 05 - 11 收到初稿,1998 - 09 - 07 修回

一步发展的方向等 3 个方面,对高功率钕玻璃激光放大器的发展现状进行系统分析.

2 高功率固体激光系统的发展概况

美国国家点火装置(NIF)计划的实施标志着高功率钕玻璃固体激光驱动器一个新的研究高潮的到来.在此之前,世界上开展 ICF 研究的国家纷纷建造新的大型激光装置和对现有的装置进行升级改造,使激光器输出能量和功率水平幅度提高.表 1 列出了目前已建成或正在建设的大型钕玻璃固体激光装置,其中以美国 LLNL 实验室的精密 NOVA 装置和国家点火装置最具代表性.

表 1 世界各国钕玻璃激光驱动器的发展计划

激光装置和计划	研究机构	输出能量
国家点火装置	美国利弗莫尔实验室	1.8MJ
法国点火装置	法国里梅尔实验室	1.8MJ
诺瓦装置	美国利弗莫尔实验室	100kJ
精密诺瓦装置	美国利弗莫尔实验室	100kJ
激光- 装置	日本大阪大学	10kJ
激光- 升级装置	日本大阪大学	1—2MJ
欧米加升级装置	美国罗切斯特大学	30kJ
神光 装置	中国联合实验室	4.8kJ
神光 装置	中国工程物理研究院	180kJ
ISKRA - 6	俄罗斯实验物理研究所	300kJ

2.1 NOVA、精密 NOVA 和国家点火装置

NOVA 装置是目前世界上运行的最大的激光系统,于 1985 年建成并投入运行.在此之后,又不断进行升级改造.NOVA 装置分成 10 路光束,能提供给靶场 80—120kJ (3ns) 的能量或 80—120TW 的功率(100ps).其设计思想为:尽可能增大输出光束孔径,每束光具有尽可能大的能量,采用自动光束校准和测试系统,这样能减少系统工程造价,同时能广泛应用于物理实验、ICF 和其他物理应用.

为满足物理实验的需要,1990 年美国确定了在已有 NOVA 装置上升级的最终目标:以 350nm 波长及 3ns 脉宽工作时,总输出能量为 1—2MJ,共分为 288 条光束.为了使如此众多

的光束合理地分布,他们采用了简单、紧凑且具有高性能价格比的列阵片状放大器.主放大器的口径为 35cm,采用 4 ×4 多列阵布局.还采用了以下一系列新技术:带开关的四程主放大器,提高了储能利用率;空间滤波器的像传递技术;利用大口径等离子体电极开关和大口径偏振膜,提取腔内强激光脉冲;焦点每次在空间滤波器的焦平面上处于不同的位置,可以避免小孔产生的等离子体影响后序光束的通过.

美国利弗莫尔国家实验室继 NOVA 装置之后,针对靶物理实验的需要,又提出了精密 NOVA 计划.精密 NOVA 在功率平衡方面的要求促进了激光诊断技术、多路激光同步技术、高压泵浦能源稳定性技术、增益饱和控制和谐波转换效率控制技术的发展,光束指向稳定性也对自动瞄靶技术提出了更高的要求.

总体造价达 18 亿美元的美国“国家点火计划”(NIF)代表了目前高功率固体激光器发展的最新趋势.为获得 1.8MJ,500TW,350nm 的激光输出,总共采用 192 路激光,其中单路激光驱动器的口径达 46cm ×81cm(净口径 40cm ×40cm).输出激光能量 10kJ.各种大口径的光学玻璃需要 7518 片,每块光学玻璃的加工要求极高.在总体上仍采用与 NOVA 升级装置相似的技术路线.

2.2 OMEGA 升级装置

OMEGA 升级装置是罗切斯特大学在原 OMEGA 装置基础上改进的.与 NOVA 升级装置“间接驱动为主,直接驱动为辅”的方针不同,OMEGA 升级装置一直以直接驱动作为其激光器发展的主方向.OMEGA 升级装置曾考虑采用 15 组的多列阵放大器,每组 4 束.但为了使 15 组光束达到直接驱动要求的功率平衡极为困难,所以现在采用 2 个 5 ×6 列阵布局.由于组合式放大器具有较高的增益,使用单通放大方式就可获得较高的抽取效率.输出能量为 30kJ.为了减小泵浦腔的容积(这意味着提高了泵浦腔的转换效率),而又不影响两边片状放大器的能量条件,氙灯采用 NOVA 装置的横向排列,冷却采用 Chroma 系统的水冷方式.

2.3 法国 PHEBUS 装置和 MJ 固体激光驱动器计划

法国 PHEBUS 激光装置^[1]是仅次于 NOVA 装置的目前世界上运行的第二大激光装置. 该装置由两束 NOVA 装置的子束构成, 其技术方案也与 NOVA 装置相似. 继美国提出 NIF 计划之后, 法国也提出了相应的兆焦耳固体激光驱动器计划. 为获得 1.8MJ, 500TW (355nm) 的能量输出, 采用 288 路子光束, 主放光束口径为 35cm × 35cm 或 37cm × 37cm, 采用新型 4 × 4 或 2 × 2 多通组合式 L - U 主放大器. 采用 L - U 主放大器最大的好处是不需要大口径光学开关即可实现四程放大.

2.4 GEKKO - 装置和金刚计划

GEKKO - 装置为典型的 MCPA 式结构高功率固体钷玻璃激光系统, 总共 12 路, 输出能量为 20kJ^[2]. 该装置采用 50% 部分相干光源, 改进无规位相板 (RPP), 使用光谱色散平滑技术 (SSD) 和列阵透镜技术, 使其在靶面均匀照明方面处于世界领先地位. 1992 年, 实现靶面均匀照明达 3.8%, 成功地将 CD 薄壳靶压缩到 600 倍液体密度, 前级各路激光的能量平衡和功率平衡达 8%. 实现直接点火所需要的激光装置是 GEKKO - 升级装置, 金刚计划中的该装置预计 24—60 路, 初级输入能量 1MJ (基频).

2.5 神光装置

中国高功率激光物理联合实验室先后成功地研制了神光^[3]和神光装置. 神光装置共有两束激光, 每束包括 100, 150, 200 等 3 种规格的片状放大器, 3 种片状放大器的小信号增益系数分别达到 7.36%/cm, 5.95%/cm 和 5.92%/cm. 末级输出功率为 1.0TW/束 (0.1ns), 输出能量为 800J/束 (1ns) 和 960J/束 (3ns).

神光装置是神光的升级装置, 参考了国外大型激光器发展的新成果, 并结合我国的实际情况, 确定以组合式结构提高泵浦效率、双程放大提高抽取效率的总体技术路线. 神光装置主要具有以下特色:

(1) 钷玻璃片采用 2 × 2 阵列式结构, 氙灯纵向放于两边和中间, 允许 4 个直径为 200mm 的光束并行通过. 纵向片数为 8 片, 每片的标称尺寸为 20cm × 20cm.

(2) 主放大器采用同轴双程放大光路布局. 在 LLNL 多程放大器方案中, 采用大口径电光开关实现光束的引出. 这种电光开关成本贵, 技术复杂, 也不够成熟. 罗切斯特大学采用斜入射 - 反射光路来实现双路放大, 显著增大钷玻璃片的横向尺寸, 在造价和效率上受较大影响. 神光装置利用空间滤波器来实现光束的注入和引出, 显著地提高了系统的性能价格比.

(3) 采用组合放大器结构, 显著提高了泵浦效率, 效率系数比原神光装置提高将近一倍, 泵浦源的成本大幅度下降.

3 钷玻璃放大器优化设计的研究与发展

放大器系统是大型高功率固体激光系统的主要组成部分之一, 不仅占总造价的很大比例, 而且对系统的总体性能有重要影响. 在高功率钷玻璃激光器 20 多年的发展历程中, 世界上许多著名实验室如美国利弗莫尔实验室、法国里梅尔实验室等都在寻求优化的设计方案, 提高激光系统的性能价格比, 并为此作出了不懈的努力, 取得了许多有意义的结果.

美国利弗莫尔实验室从 70 年代开始建造大型高功率固体激光系统, 在高功率激光装置的研究方面一直处于世界领先地位, 先后建造了 JANUS (1974 年), ARGUS (1976 年), SHIVA (1977 年), NOVETTE (1983 年) 和 NOVA (1984 年) 等固体激光系统, 同时还建造了 SSA, MSA - 1, MSA - 2 等单元激光器. 1994 年, 为了全面考核、验证用于国家点火装置 (NIF) 的关键技术和元器件, 又建立了 BEAMLET 激光装置, 这些装置的成功运转为推动激光核爆模拟实验作出了重要贡献. 与此同时, 利弗莫尔实验室在优化设计方面完成了大量的卓有成效的工作, 建立了许多有用的分析的经验模型, 主要包括放大器的性能、氙灯泵浦、泵浦

光从氙灯到钨玻璃的腔转换效率、玻璃片内部由于 ASE 引起的损耗以及包边吸收 ASE 的影响等。通过 SSA 和 MSA 原型机、NOVA 放大器和其他试验装置的实验数据的比较,这些模型已得到了验证。以下主要介绍利弗莫尔实验室的研究成果,同时也报道我们的研究工作。

3.1 氙灯辐射光谱

Trenholme 和 Emmett 首先建立了氙灯的辐射光谱模型,氙灯的辐射是充满氙灯内径的均匀加热等离子体的辐射,氙灯等离子体用温度和与波长有关的等离子体吸收辐射系数来描述。根据这个模型,利弗莫尔实验室建立了用于模拟氙灯辐射光谱的计算机模拟程序,例如,GENEFF 和 VODAC。所有这些物理基础和计算程序都把电流密度作为描述氙灯工作特性的一个重要参量,并作为氙灯光谱成分好坏的一个重要标准。

从 1984 年开始,利弗莫尔实验室详细测量了闪光灯的绝对瞬态光谱分布,详细研究了闪光灯的各种工作参数对输出光谱特性的影响,结果表明:

(1) 不同直径的氙灯在单位侧面积上的输入电功率相同的情况下,绝对光谱辐射强度分布和光电转换效率是相近的。在以前的研究中,大多用电流密度作为描述氙灯工作特性的参数,把氙灯等离子体当作光性薄来处理。用氙灯单位侧面积上的输入电功率作为描述氙灯工作特性的参数,把氙灯等离子体当作光性厚来处理。实际上,氙灯等离子体的发光更接近于光性厚,在某些条件和波长下甚至可以看到是灰体辐射。

(2) 氙灯的输出光谱和输入功率之间存在约 $30\mu\text{s}$ 的时间延迟,这个时间延迟是长输入脉冲氙灯放电的特性,表明氙灯等离子体的辐射需要时间。在比较小的输入能量情况下,观察到了更长的时间延迟和输入功率与输出功率之间的形状变化。

3.2 能量沉积分布和增益均匀性

钨玻璃放大器的技术基础是泵浦源及其在激光介质中的能量沉积,它决定了增益、增益均匀性、效率及动态光学质量等关系全局的重要

参数,因此,各国实验室都花大量的精力研究泵浦光在钨玻璃内的沉积问题。美国海军实验室 Alexander 和 Troost 等首次用蒙特卡罗和光线追迹方法完成了泵浦光在放大器腔内传输的模拟计算程序 ZAP。ZAP 可以模拟计算泵浦光在放大器内的能量沉积分布和泵浦光在腔内的传输效率,能对比较复杂的泵浦腔形状和比较宽的泵浦光波长范围进行分波长计算。

利弗莫尔实验室在泵浦能量沉积和增益均匀性方面也完成了大量的卓有成效的工作,可以分为以下两个方面:

(1) 单元激光放大器 SSA 的研制。1984 年,利弗莫尔实验室为了提高钨玻璃放大器的储能效率,同时考核用于设计高功率固体激光装置的模拟计算软件,建造了单元激光放大器 SSA。SSA 共有 4 块矩形的钨玻璃片,优化之后的 SSA 激光放大器储能效率达到 7%,是 NOVA 装置储能效率的 3 倍。这些优化设计包括:优化氙灯的封装系数、反射器构形、泵浦脉冲宽度和采用预电离电路。他们同时还发展了用于计算 SSA 性能的模拟程序,这些内容包括:用光线追迹方法优化设计反射器的形状;用与时间有关的氙灯光谱去预言钨玻璃的泵浦效率,建立了氙灯的辐射光谱模型,研究了氙灯的输出功率随输入功率的变化关系等。

(2) 组合放大器(MSA)的研制。1989 年,利弗莫尔实验室建造了第一台一片长的 2×2 组合式放大器 MSA - 1,几个光束均包含在同一个放大器壳体内。MSA 比传统的单一口径放大器造价低的原因主要有以下 3 个方面:(1) 放大器更加紧凑,从而减小了尺寸;(2) 是高了泵浦效率,降低了能源系统的造价;(3) 减少了放大器内部元件的数量。在 MSA - 1 上得到如下结果:中间的氙灯阵列比边缘氙灯阵列具有更高的泵浦效率。

虽然组合放大器 MSA - 1 具有比较高的储能效率,但是它的增益均匀性却很差,增益沿口径方向的起伏非常严重。为了改进增益均匀性,利弗莫尔实验室发展了 BEAMLET 的原型样机(MSA - 2),在 MSA - 2 上做了大量的优

化设计工作. 这些工作包括: 优化设计了 MSA - 2 的泵浦腔和泵浦源, 放大器增益分布的预估, 13 束增益探针的方法测量放大器的增益分布, ASE 对增益均匀性的影响.

3.3 BEAMLET 放大器的设计与性能

1994 年, 利弗莫尔实验室为了全面考核、验证用于国家点火装置 (NIF) 的关键技术和元器件, 又建立了 BEAMLET 激光装置. 这些关键问题包括制造大口径激光玻璃的可行性、ASE 的增加对储能效率和增益均匀性的影响. BEAMLET 放大器同时验证了组合式放大器 (MSA) 机械设计的许多进步点, 这些优点都将用于国家点火装置 (NIF) 的设计中.

BEAMLET 装置采用 2×2 矩阵排列的 4 个口径的 MSA 结构, BEAMLET 包含两台大型的放大器: 一台是 11 片组成四通谐振腔放大器, 另一台是 5 片的单通助推放大器, 通光口径为 $39.5\text{cm} \times 39.5\text{cm}$. 利弗莫尔实验室在 BEAMLET 装置上测量了如下几个方面的增益特性: 水平增益分布与氙灯爆炸系数之间的关系; 水平增益分布随时间变化的关系; 全口径增益分布; ASE 的衰减速率对增益分布的影响; 储能效率.

3.4 热畸变效应

泵浦引入的光束偏转和波前畸变主要由两个原因引起: (1) 当泵浦光沉积在一面的热能比另一面多时, 激光玻璃片弯曲, 这将引起光束偏转和在整个口径上的波前畸变; (2) 包边吸收 ASE 和寄生振荡的能量而使得包边加热, 由此引起的热膨胀在包边约一个片厚的范围内, 产生相当大的波前畸变. 这种波前畸变可以通过合理地设置放大器的通光口径来消除.

3.4.1 物理模型和计算程序

1984 年, 利弗莫尔实验室首次完成了用有限元的方法求解热传导问题的计算机模拟程序——TOPAZ. TOPAZ 是一个二维计算机程序, 可以用来求解平面的或轴对称的温度场. 后来又把该程序升级为一个三维计算程序 TOPAZ3D, 完成了研究片状放大器热畸变效应的 3 个计算机程序, 这 3 个程序分别是

TOPAZ3D, NIKE3D 和 OPTICS. 第 1 个程序用来计算玻璃片内的温度分布, 片表面的热交换系数和冷却气流的温度作为计算的边界条件; 第 2 个程序用来计算玻璃片内位移和应力分布, 计算中假设玻璃片的每个面都不受约束, 第 3 个程序用来计算激光位相畸变.

3.4.2 实验研究

1994 年, 利弗莫尔实验室在 BEAMLET 装置上测量了泵浦引入的波前畸变. 全口径上的泵浦引入的光束偏转角在 $15\mu\text{rad}$ 以内, 泵浦引入的相位畸变小于 2 个波长 ($1.053\mu\text{m}$). 从束偏转测量中所得到的主要结论是: (1) 在距包边半个片厚度外的中央区域内, 泵浦引入的波前畸变对通光口径的竖直位置只有较弱的依赖关系; (2) 在水平方向泵浦引起的束偏转比竖直方向大得多; (3) 泵浦引入的束偏转在端片中比中央片大得多.

1995 年, 利弗莫尔实验室首次测量了组合放大器 (MSA) 中的热恢复过程. 结果表明, 放大器的冷却过程可以用两个重要的时间概念来描述, 一是玻璃片内的温度梯度消失时的时间 (称为自平衡时间), 二是玻璃片恢复到它打靶之前的温度的时间 (称为片平衡时间). 一般地, 片平衡时间是自平衡时间的 2—3 倍. 对即将用于 NIF 装置中的大口径放大器内的热性能也进行了分析. NIF 装置空气或氮气来冷却氙灯盒和屏蔽罩, 初步的分析表明, 以每支氙灯 $10\text{ft}^3/\text{min}$ 的速率冷却是有效的方法, 足以满足 NIF 装置 6h 达到热平衡的要求.

3.5 优化设计的模拟程序

我们充分借鉴了国内外关于钨玻璃放大器优化设计的先进成果, 研究了钨玻璃放大器优化设计所涉及的主要物理问题, 编制了一套用于优化设计的计算机模拟程序. 这套程序既吸取了国外的先进成果, 又不受制于人, 具有自主知识产权. 整套程序包括以下方面的内容:

(1) LC 网络电路的放电特性, 首次考虑了氙灯放电过程中等离子体直径随时间的变化; 氙灯的辐射光谱, 在国内首次运用最新的氙灯辐射光谱模型计算了氙灯的绝对辐射光谱强度

和对时间积分的光谱效率;粒子数反转随时间变化的动力学过程。

(2) 放大器内能量沉积分布,包括自发辐射放大引起的能量沉积的再分布,首次研究了包边吸收 ASE 能量沿周长的不对称分布。

(3) 泵浦期间和冷却过程中棒状放大器内的温度分布、应力分布和光束畸变。

(4) 钕玻璃参数的最佳选择,首次从实验和理论上研究了国产磷酸盐钕玻璃的荧光寿命和损耗对其增益性能的综合影响,确定了两者之间的定量关系。

4 钕玻璃固体激光器进一步发展的方向

目前,钕玻璃固体激光器进一步的发展主

要集中在以下一些方面:开拓新的系统概念设计和总体技术路线研究;根据钕玻璃放大器在工作过程中能量转换的各个环节,对放大器的各个元器件进行优化设计;提高效率,降低造价;大幅度提高负载强度,产生合适的激光脉冲宽度和波形;提高光束质量,完善大口径高效率倍频;研究靶场光学和提高靶面均匀照明,提高参数测量和光学诊断技术,精密机械技术和实验室环境工程研究等。

参 考 文 献

- [1] M. Andre, C. Bayer, D. Babonneau, 强激光技术进展, No. 2, (1994), 7.
- [2] S. Nakai, G. H. Miley (eds.), Physics of High Power Laser Matter Interactions, World Scientific, (1992), 3.
- [3] 范滇元, 激光与红外, 21 - 2 (1991), 12.

金属泡沫材料研究*

朱 震 刚

(中国科学院固体物理研究所,内耗与固体缺陷研究实验室,合肥 230031)

摘 要 金属泡沫或金属多孔材料是 80 年代后期国际上迅速发展起来的一种物理功能与结构一体化的新型工程材料。它所具备的多种优异物理性能特别是阻尼性能已引起广泛关注,并在消声、减震、分离工程、催化载体、屏蔽防护、吸能缓冲等一些高技术领域获得了广泛应用。文章着重介绍了铸造发泡法制造铝泡沫材料的技术难点。对金属泡沫材料的力学性质和阻尼特性进行了详细介绍。为金属泡沫材料开发、应用提供基础知识和信息。

关键词 金属泡沫,铸造发泡,阻尼

METALLIC FOAM MATERIALS

Zhu Zhengang

(Laboratory of Internal Friction and Defects in Solid, Institute of Solid State Physics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract Metallic foam or porous materials were developed at the end of the 80 's and applied to industry at the beginning of the 90 's. They have excellent physical properties, especially damping characteristics, so they are widely used for vibration insulation, noise elimination, electromagnetic screening and so forth. A description is given of the "casting and foaming" method for the fabrication of these

* 中国科学院开放实验室资助课题

1998 - 04 - 03 收到初稿, 1998 - 05 - 25 修回