

文章编号: 0258-7025(2010)09-2202-06

激光核聚变的发展

(邀请论文)

林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

摘要 概述了激光的诞生以及激光核聚变(主要是神光装置)的发展历程和应用前景。

关键词 激光;核聚变;能源

中图分类号 TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103709.2202

Progress of Laser Fusion

(Invited Paper)

Lin Zunqi

(National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The invention, progress and prospects of laser fusion (mainly SG laser driver systems) are summarized.

Key words laser; fusion; energy

1 激光的诞生

激光器与原子能、半导体、计算机被称为 20 世纪的四大发明。激光的诞生可以分为几个阶段:

1916 年爱因斯坦提出的受激辐射概念以及量子力学和量子电子学的建立和发展为激光器的产生奠定了极为重要的理论和技术基础。

1951 年,美国物理学家珀塞尔和庞德在实验中成功地实现了粒子数反转,并获得了 50 kHz/s 的受激辐射。随后,美国物理学家查尔斯·汤斯以及苏联物理学家巴索夫和普洛霍罗夫先后提出了利用原子和分子的受激辐射原理来产生和放大微波的设计。1954 年,汤斯终于制成了第一台氨分子束微波激光器(Maser),成功地开创了利用分子和原子体系作为微波辐射相干放大器或振荡器的先例。

1960 年,在微波激光器的基础上,美国物理学

家梅曼研制出了世界上第一台红宝石激光器。

1959 年,中国科学院电子学研究所的黄武汉研制出中国的第一台铬氰化钾微波量子放大器(Maser)。此后他对微波量子放大器进行了改进,在 1961 年研制成液氮温度下工作的 3 cm 红宝石量子放大器,提出了自弛豫微波顺磁放大器原理简化分析方法。该工作可视为我国激光器研制成功之前重要的奠基性工作之一^[1]。

1961 年,在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所工作的王之江试制成国内第一台红宝石激光器,比美国梅曼研制成世界上第一台红宝石激光器略晚,而性能优于梅曼的激光器。

“激光”是 laser(light amplification by stimulated emission of radiation)的意译,在我国曾被翻译成“莱塞”、“光激射器”、“光受激辐射放大器”等,1964 年,钱

收稿日期: 2010-07-20; **收到修改稿日期**: 2010-07-30

作者简介: 林尊琪(1942—),男,高功率激光技术专家。2003 年当选为中国科学院院士。现任中科院上海光机所研究员,学术委员会副主任;高功率激光物理国家实验室总师;国家高技术 863 下属领域专家委员会顾问。从事激光惯性约束核聚变,高功率激光驱动器和 X 光激光研究等。近年负责并圆满完成国家项目神光 II 工程的技术工作,在项目研制工作中提出多项新方案,组织及实施技术攻关,解决了一度制约神光 II 工程进展的众多科学技术难题,使装置性能全面达到国际先进水平,为实现我国激光核聚变驱动器研究能力的重大跨越做出了关键性的贡献。曾获国家科技进步奖、中科院科技进步和自然科学奖、上海市科技进步奖、军队科技进步奖等多项奖项,获何梁何利技术科学奖,胡刚复物理奖,首届中科院杰出科技成就奖(金质奖章),1991 年获国务院政府特殊津贴。发表科技论文 230 余篇。E-mail: zqlin@mail.shenc.ac.cn

学森院士提议将其译为“激光”，既反映其“受激辐射”的科学内涵，又表明它是一种很强烈的新光源，得到我国科学界的一致认同并沿用至今。

2 激光核聚变的提出

早在 1957 年，我国就在长春建立了国内第一所光学专业的研究所——中国科学院长春光学精密机械和物理研究所（简称“长春光机所”），在王大珩等老一辈专家带领下，一批青年科技工作者迅速成长，并取得了一系列先进成果。各类固体、气体、半导体和化学激光器相继研制成功。在基础研究和关键技术方面，一系列新概念、新方法和新技术（如腔的 Q 突变及转镜调 Q、行波放大、稀土系离子的利用、自由电子振荡辐射）纷纷提出并获得实施，其中不少具有独创性：

王之江等在 1961 年 9 月研制出中国第一台固体红宝石激光器；

邓锡铭等在 1963 年 7 月研制出中国第一台 He-Ne 激光器；

干福熹等在 1963 年 6 月研制出中国第一台掺钕玻璃激光器；

王守武等在 1963 年 12 月研制出中国第一台 GaAs 同质结半导体激光器；

万重怡等在 1964 年 10 月研制出中国第一台脉冲 Ar⁺ 激光器；

王润文等在 1965 年 9 月研制出中国第一台 CO₂ 分子激光器；

邓锡铭等在 1966 年 3 月研制出中国第一台 CH₃I 化学激光器；

屈乾华等在 1966 年 7 月研制出中国第一台 YAG 激光器。

我国激光技术的早期发展主要得力于我国多年来在技术光学、精密机械、激光的前身，微波量子放大（Maser）技术和电子技术方面积累的综合能力和基础。

为了专门开拓激光科学技术，我国在 1964 年专门成立了中国科学院上海光学精密机械研究所（简称“上海光机所”）。当时的所长为王大珩，分管科研业务的副所长为黄武汉、邓锡铭。建所不久，王大珩所长与所领导班子成员一起，带领全所科技人员集中主要研究力量，开展了以大能量激光和大功率激光为中心任务的各项单元技术和总体装置的研究，在科研工作上取得了可喜的成绩^[2]。

激光问世后，当时正在从事保密研究的杰出的

核物理学家王淦昌，经过深入思考，敏锐地觉察到激光可以引发氘核出中子，并撰写了《利用大能量大功率光激光器产生中子的建议》，得到了上海光机所高功率激光研究专家邓锡铭的积极响应。在邓锡铭领导下，1965 年，上海光机所开展了高功率钕玻璃激光驱动器研究。1973 年，用激光加热氘冰靶获得氘-氘聚变反应中子。此后，谭维翰、徐至展等又开展了激光等离子体冕区相互作用物理^[3]和内爆物理研究^[4]。

虽然苏联和美国的科学家在当时也提出了类似的设想，但是由于保密原因，王淦昌独立于苏美科学家提出了用激光打热核材料靶实现核聚变反应的科学设想，并组织开拓了我国这一新的研究领域^[5]。

在国外，1972 年，美国加利福尼亚州劳伦斯利弗莫尔国家实验室的物理学家约翰·纳科尔斯（John Nuckolls）解密并公开了可以用激光来驱动惯性约束聚变的中心点火新物理机制，用激光脉冲加热和压缩重氢同位素热核燃料来实现可控核聚变。自此之后，劳伦斯利弗莫尔实验室一直追寻着这个新机制开展工作，所用激光驱动器也越来越大，终于在美国国家点火装置（NIF）中达到巅峰。NIF 是有史以来规模最大，最为复杂的光学系统工程，也是目前世界上最大的激光核聚变装置^[6]。

3 激光核聚变的概念和意义

人类的能源从根本上说，来自核聚变反应，即发生在太阳上的“轻核聚变”。人类已经在地球上实现了不可控的热核反应，即氢弹爆炸。要获得取之不尽的新能源，必须使这一反应在可控条件下持续进行。为实现可控核聚变有两种方法，一是用托卡马克装置开展“磁约束聚变”的研究。另一条技术路线是 20 世纪 70 年代初公开的“包括以激光驱动为主攻方向的惯性约束核聚变（ICF）”。

激光惯性约束核聚变的基本原理是：使用强大的脉冲激光束直接，或间接利用 X 光光子照射内含氘、氚燃料的微型靶丸的外壳表面。利用表面被烧蚀的材料向外喷射而产生向内聚心的反冲力，将靶丸内的燃料以极高速度均匀对称地压缩至高密度和热核燃烧所需的高温，并在一定的惯性约束时间内，完成核聚变反应，释放出大量的聚变能。然而聚变反应所要求的条件却极为苛刻。首先要在点火瞬间获得 1 亿度 K 左右的高温；其次，参与反应的粒子密度要足够高，并能维持一定的反应时间，即“ $n\tau$ ”值要大于或达到 5 百万亿（秒/厘米³）以上，这就是著

名的劳逊判据。一些国家的实验室已经在这类激光装置上作了大量的基础研究工作。美国、法国等已建造或正在建造百万焦耳级激光能量输出的巨型激光器,美国 NIF 和法国兆焦耳激光装置(LMJ)期望能够实现激光热核“点火”。

激光惯性约束核聚变主要有以下几个目的^[6]:

1) 美国把核爆模拟作为保证在无需核试验的情况下保持核武库存安全管理及威慑力的重要手段之一。

2) 天体物理研究。利用高功率激光驱动装置可模拟黑洞、行星内爆等环境,进行科学实验,为科学研究提供数据。

3) 解决未来能源问题。在 2009 年落成的 NIF 的科学公报中就指出,科学家希望从 2010 年开始借助 NIF 来制造类似太阳内部的可控氢核聚变反应,最终用来生产可持续的清洁能源。公报说:“NIF 所产生的能量将远大于启动它所需要的能量,这是半个多世纪以来核聚变研究人员一直梦寐以求的‘能量增益’目标。如能取得成功,将是有历史意义的科学突破”。科学家们期待将激光聚变能转变成驾驶汽车和家庭生活所需的能源,这将有可能使拥有这项技术的国家的能源结构发生革命性变化。而美国 NIF 的建成,无疑将会给业内人士带来巨大的鼓舞和信心。

4) 太空垃圾处理。最近,美国又提出利用高功率激光装置处理太空垃圾等设想^[7]。

惯性约束聚变研究的长远目标是为人提供干净的聚变能源,彻底解决人类的能源问题。近年来,世界其他国家也对惯性约束聚变研究十分关注,并不同程度投入到了相关研究中,我国也不例外^[8]。

目前,巨型激光驱动器已经成为一个国家综合国力的反映,能够代表一个国家在高技术领域的科技水平。

4 国内激光驱动器的发展历史

在王淦昌的倡导和邓锡铭的积极响应下,上海光机所从 1965 年开始进行高功率钕玻璃激光核聚变研究。钱学森院士曾形象地指出:“你们的事业是在地球上人造一个小太阳!”

1973 年 5 月,上海光机所建成两台功率达到万兆瓦级的高功率钕玻璃行波放大激光系统,先后对固体氘和氘化锂进行了一系列打靶实验。首次在低温固氘靶、常温氘化靶和氘化聚乙烯上打出中子,冷冻氘靶获 10^3 中子产额。这项突破性成果表明,我

国成功地实现了激光产生高温高密度的等离子体,获得了轻核聚变反应,这是我国激光核聚变研究的一个里程碑,标志着我国在该领域的研究迈入世界先进国家的行列。

4.1 神光 I 装置

1974 年,上海光机所研制成功十万兆瓦级毫微秒大型单路和 6 路高功率钕玻璃激光系统,激光输出功率提高了 10 倍,中子产额增加了一个量级。

1977 年,上海光机所利用 6 束激光系统装置(10^{11} W),对充气玻壳靶照射,获得了近百倍的体压缩。使我国的激光聚变研究进入了逐级论证向心聚爆原理的重要发展阶段,为以后长期的持续发展奠定了基础。

同年,中国工程物理研究院(简称“中物院”)的于敏提出,激光惯性约束聚变是一项非常复杂的大科学研究系统工程,涉及理论、实验、诊断、制靶和激光驱动器等五个方面的研究内容和彼此之间的协调发展,即“五位一体”的思想。并同胡仁宇、方正知、王淦昌、邓锡铭等共商“强强联合”,充分发挥中物院在聚变物理和实验技术方面与上海光机所在高功率激光物理和技术方面的特长,协作开展激光聚变研究^[6]。

1980 年,由王淦昌提出、由两院共同投资建设脉冲功率为 10^{12} W 固体激光装置,称为激光 12 号实验装置。

1985 年,激光 12 号装置按时建成并投入运行。试运行中成功地进行了激光打靶试验,取得了重要结果,达到了预期目标。当时,该装置是中国规模最大的高功率钕玻璃激光装置。它由激光器系统、靶场系统、测量诊断系统和实验环境工程系统组成。输出激光总功率可达 10^{12} W。可用透镜聚焦到直径约 $50 \mu\text{m}$ 的靶面尺寸上。可以产生千万度的高温,强冲击波和反冲击压力。装置的靶场系统,能适应微球靶、黑腔靶、台阶靶和各类 X 光靶等多种靶型的实验需要,并具有单束、双束激光打靶的功能,为多种物理研究提供重要的实验手段。

激光聚变物理研究的理论、制靶、诊断和实验队伍初步形成,有关的设备和能力也初步具备,我国激光聚变研究从此开始了比较系统的协同发展的新阶段。1985 年,在王淦昌和王大珩两位王老的倡议下,成立了“高功率激光物理联合实验室”,期望更好地推进我国激光聚变研究的顺利快速发展。于敏担任实验室的学术委员会主任,并多次强调中国科学院和中物院要精诚团结,“合则成,分则败”^[2~8]。

1986 年夏天,张爱萍将军为激光 12 号实验装

置亲笔题词“神光”。于是,该装置正式命名为神光装置,此后为与“神光 II”相区别,改为“神光 I”。

1987 年 6 月 27 日,神光 I 通过了国家鉴定。专家们一致认为:装置的综合总体技术性能,达到了国内同类装置的先进水平。神光 I 的建成,是我国激光技术发展中的一项重大成就。在该装置上先后进行了不少基频直接驱动和基频间接驱动为基础的激光等离子体物理实验,标志着我国在该领域开始进入世界先进行列。

1989 年起,神光 I 直接驱动获 5×10^6 中子产额,间接驱动获 10^4 中子产额,冲击波压强达 0.8 TPa,获近衍射极限类氪锆 X 光激光增益饱和。

1990 年,神光 I 获得国家科技进步奖一等奖。

1993 年,在老一辈科学家王淦昌、王大珩、于敏等的积极建议下,“惯性约束聚变”被列入了国家 863 计划。首届主题专家组由陶祖聪任首席科学家,贺贤土任秘书长,于敏任顾问。当时,于敏与陶祖聪一起,提出了一系列有关发展我国激光聚变研究的战略,发展“神光系列”高功率激光驱动装置的构想等,做了十分重要的布局安排,进一步推动了我国惯性约束聚变研究和高功率激光技术的发展^[8]。

1994 年,神光 I 退役。神光 I 连续运行 8 年,在 ICF 和 X 射线激光等前沿领域取得了一系列有国际水平的物理成果。主要有:1)我国首次间接驱动内爆出中子实验成功;2)极高压下材料状态方程的高精度测量;3)类氪锆 X 光激光达增益饱和并获得近衍射极限的光束质量。

4.2 神光 II 装置

1994 年 5 月,神光 II 装置立项,工程正式启动。在 1997~1998 年,联合实验室神光 II 装置的工程研制遇到了相当严重的科学技术上的困难,出现了悲观情绪、畏难情绪,各方面对激光驱动技术发展方向众说纷纭。1998 年 11 月,于敏在有 70 余位领导和专家参加的关键性的第二届第五次学术委员会常熟会议上总结出了 4 个方面的重要意见^[6]。这些重要的具体意见和精神对当时实验室的科学技术发展起了极为关键的作用。时至今日,这些意见仍然有很大的借鉴作用。

此后,神光 II 科技攻关团队团结合作,奋力攻关,解决了大量科学技术和工程工艺难题,取得了重大进展。

自 2000 年,神光 II 装置 8 路基频达标 (8×10^{12} W),开始试运行打靶。

2000 年起,在神光 II 的实验中,直接驱动获 $4 \times$

10^9 中子产额,间接驱动获 10^8 中子产额,直接驱动冲击波压强达 1.5 TPa,间接驱动冲击波压强达 3.7 TPa,获增益饱和类镍银和高强度类镍钽 X 光激光输出。

2001 年 8 月,神光 II 装置建成,基频总输出能量达到 6 kJ/ns 或 8 TW/100 ps,总体性能参数优良,工作稳定、可重复性好。神光 II 是我国第一台具有二倍频三倍频输出实施靶物理实验能力的高水平运行实验装置。

2001 年,神光 II 三倍频达标,圆满完成两轮三倍频试打靶物理实验。

2002 年,神光 II 获上海市科技进步奖一等奖,并入选 2002 年中国十大科技进展。

2003 年,神光 II 获中国科学院杰出科技成就奖。

2005 年,神光 II 获国家科技进步奖二等奖。

2006 年新研制成功的神光 II 第九路激光输出能量打破纪录,较此前单束激光输出提高了 5.8 倍,离最终实现核聚变更进了一步。

2006 年,神光 II 自投入运行以来高效率、高质量“打靶”已达 4000 余发,已多次开展与国外科学家联合进行的合作实验。

神光 II 同步发射 8 束激光,在约 150 m 的光程内逐级放大;每束激光的口径从 5 mm 扩为近 220 mm,输出能量从每束几十微焦耳增至 750 J,脉冲宽度为 1 ns,在激光靶面,获得的峰值激光通量密度达到 4×10^{17} W/cm²。神光 II 已实现“全光路自动准直定位”,实验中能及时纠正因震动和温度变化带来的激光光束微小偏差,使输出激光经聚焦后可精确穿过一个约 0.3 mm 的小孔。

新运行的“神光 II”第九路光束口径,由前 8 路的每束 190 mm 增至 310 mm,单路能量输出达 5200 J,为进一步升级奠定了坚实基础。神光 II 以稳定、精密化运行的长期实践为标志,实现了国内激光核聚变驱动器技术跨入国际先进行列的质的提升,正在为实现我国激光核聚变深入研究做出更大的贡献。

2006 年 12 月 24 日,神光 II 精密化技术研究项目通过了国家级验收。专家们认为:该项目自 1996 年立项以来,针对神光 II 装置的特点,在角变调控镜功率平衡调控技术、三级能量波形监测和三参数综合调控新技术、三倍频晶体光轴高精度匹配及偏光方向匹配新调试方法等方面做出了具有创新性的工作,使我国激光驱动器在激光功率平衡、激光打靶落点精度、准方波脉冲输出控制等 3 个精密化核心

技术环节方面取得了实质性的突破。

神光 II 激光装置自 2000 年建造完成以后,就作为国内“十五”期间最主要的激光聚变实验的研究装置。至今仍然在 高能密度物理、能源和天体物理领域发挥着重要的作用。

在神光 II 装置上,开展了大量高水平高能密度物理领域的分解物理实验研究^[9],包括:1) 黑腔辐射温度;2) 内爆物理;3) 流体动力学不稳定性;4) 辐射不透明度;5) 辐射驱动冲击波;6) 温密等离子体物理;7) X 光激光产生机制和应用等研究,得到了一批具有高精度和重复性好的高水平物理实验结果。在神光 II 装置上进行的大量高精度、稳定、可重复的实验结果表明我国在惯性约束聚变研究方面取得了显著的进步。

同时,神光 II 高功率激光装置为在实验室中模拟、研究天体物理现象提供了新手段。最近,我国科学家和日本、韩国的科学家合作,在神光 II 装置上和日本大学的 Gekko XII,对黑洞周围的光电离过程以及发出的 X 光辐射进行了实验室模拟,这些结果对于进一步探索黑洞的状态有重要的参考价值。

4.3 神光 III 装置

1995 年,激光惯性约束核聚变在国家 863 计划中得到支持,科研人员开始研制更大的巨型激光驱动器——几十万焦耳级的“神光 III”装置。目前,神光 III 原形装置已经建成,神光 III 原型装置(8 路,1 ns,3 ns,万焦耳级三倍频输出)是创新建成的大尺寸 4×2 组合方口径四程腔放大的钕玻璃激光驱动器。该装置不仅将为神光 III 主机的发展提供驱动器必需的技术基础,而且已经进行了大量的较高能量水平的有意义的基础靶物理实验。

神光 III 装置将是我国近期光学领域最宏伟的科学工程,必将全面带动相关科学技术攀登世界水平,是我国综合国力在科技领域的标志性体现。这是挑战也是机遇,激光惯性约束核聚变已在王淦昌、王大珩、于敏、邓锡铭、贺贤土等老一辈科学家带领下,取得了瞩目成果,但还需要后来者的不懈努力。

5 激光核聚变未来发展

随着越来越多的人走出贫穷以及发展中国家的逐渐壮大,全球对能源的需求越来越紧迫。寻找新能源又受到全球变暖以及大气二氧化碳排放的限制。而可再生能源如风能和太阳能,以及核裂变能源只能满足部分需求,核裂变又会带来核废料管理的问题。因此,清洁、安全、可持续的能源是人们一

直梦寐以求的。核聚变是太阳中心的能量,能在放射性污染最小的情况下,生成清洁、安全、环保、无碳排放污染的能量,因此,从激光核聚变的发展初始阶段,科学家们就期待利用可控核聚变来解决人类的能源问题^[6]。

美国利弗莫尔国家实验室在 2009 年 5 月提出七个未来五年重点关注研究的领域,其中一个就是激光惯性聚变能源(LIFE),其目标是到 2050 年为美国提供大于 200 GWe 的可持续、封闭燃料循环核能源选择。其前期研究的重点领域包括以下几个方面:

1) 国家点火攻关(NIC):虽然 NIC 是支持 NIF 点火的重要阶段,并不是 LIFE 的正式组成部分,但是其成功也是 LIFE 向前发展的重要环节。NIC 计划包括 2010~2012 年点火可靠性尝试。

2) LIFE 的“子束”,激光技术及可行性准备:演示高能、高平均功率激光性能及可靠性,实验台提供 LIFElet(7~10 kJ)和 2~3 W(15 Hz)20 cm×40 cm。

3) 靶设计及制造:点火需要在 LIFE 相应靶场 20~40 MJ 上演示,每个靶场都将探索大量的制造技术;

4) 靶约束:靶注入将以重频 15 Hz,在跟踪、操作以及低功率激光相应条件下演示。

5) 燃料及燃料的超深度燃烧:必须设计并且检测(试验和模拟)固体裂变物质颗粒燃料,以确保其性能稳定(结构完整、热传导等)。开发固体空心芯径展示及制造方法。

6) 结构性材料:第一层外壁材料需要在聚变中子、X 射线和离子的强照射下使用 5~10 年。需要进行 OSD-铁素体耐热钢及其他方法的模拟设计和离子束辐射测试。

7) 舱内环境:除第一层壁以外,还需要注重快速清除废料舱、光束传播和激光元件损伤等问题。

计划到 2100 年,LIFE 工程可以为美国提供大部分的能源电网^[6]。

与此同时,欧洲也正在计划新一代“超级激光装置”^[11,12],这将为科学家们提供前所未有的激光功率和强度,帮助打开新的研究领域大门,探索宇宙的起源,同时也希望能够为将来可持续能源的实现提供理论依据。该激光装置主要包括三部分,分别为高功率激光能源研究计划(HiPER)、超高强激光设施(ELI)和欧洲 X 射线自由电子激光器计划(XFEL)。三个装置总建筑费用预计将超过 20 亿欧元,每年的运行费用为几亿欧元。

HiPER 计划预定于 2014 年建成,由英国科学

技术装置委员会(STFC)带领建造,目的是对激光驱动的惯性约束聚变实现能量产生进行原理验证研究,主要挑战是要通过激光加热毫米量级的聚变靶丸,使其温度超过 1 亿摄氏度。负责监管政府在科技领域开支的英国研究理事会(RCUK)认为:“未来核聚变能源很可能在全球能源系统中起关键作用,英国应谋求该技术。”希望英国兴建世界首座核聚变发电站,并在 2030 年左右投入使用。

ELI 计划由法国巴黎理工大学的应用光学实验室(LOA)带领建造,计划于 2015 年点火。ELI 能够输出极高的功率(约 10^{18} W)和强度(约 10^{24} W/cm²),主要进行极端条件下的基础科学研究。

XFEL 已于 2005 年 4 月建成,将于 2013 年试运行,目的是产生超短、硬 X 射线用于相关的基础和应用研究。该装置全长约 3.4 km,加速器隧道长约 2.1 km,距离地面深 6~38 m。

欧洲的新一代大激光装置很大程度上依靠研究机构和相关企业的合作,从计划到实现过程都将会推动许多技术的快速发展,如高性能的陶瓷、更薄且损伤阈值更高的 KDP 晶体、更廉价的激光二极管、更大口径的光学元件等。

在我国,2020 年《国家中长期科学和技术发展规划》已经为惯性约束聚变能规定了长远目标。

6 激光核聚变对其他技术的带动

高功率激光驱动装置是我国光学领域最宏伟的科学工程,是多种学科、多种技术的系统集成,涉及到多个技术门类和相关内容,包括激光器和相关单元技术、高速电子学技术、光学材料和光学元件的生长和制作技术、各种光学镀膜技术、激光加工技术(包括高负载原件的损伤和修复等)、精密光学加工和检测技术、高精度诊断和测量技术、电工技术和抗电磁干扰技术、精密机械设计和加工技术、真空技术、计算机和自动控制技术、实验室环境控制技术以及热管理技术等^[13]。

一方面,高功率激光驱动器的研制带动了相关科学技术的发展,有些科学技术已经在国民经济中显现了相当可观的应用前景。比如激光器技术,在神光 II 项目中的光纤分布反馈激光器技术,已经应用到光纤激光水听器以及光纤布里渊传感技术等传感领域。在激光化学膜的基础上,太阳能镀膜技术也已经投入使用,用于提高太阳能发电装置的工作效率。

另一方面,相关科学技术的发展也推动了高功

率激光驱动器的研究进展。比如高速电子学的发展、计算机技术的发展。

7 结 论

回顾历史,无论是国际还是国内,激光驱动可控核聚变都取得了重大的进展,而美国 NIF 的建造成功,无疑给激光聚变和相关领域的科学家群体增加了聚变点火的信心。但是,激光驱动核聚变是一项大科学工程,实现聚变点火有诸多风险和问题尚待解决,NIF 是激光驱动核聚变的领军装置,我国目前也有两支有实力的 ICF 总体研究团队,“合则成、分则败”,在老一辈科学家的指引下,相信 ICF 研究团队团结协作,结合国内技术的发展情况,借鉴 NIF 经验,联合国内各个技术攻关单位,切实解决关键问题,将使我国 ICF 研究水平尽快赶上世界最先进的水平,为我国 ICF 研究的深入发展奠定基础。

致谢 感谢范薇教授对本文完成所做的有益讨论和实质性的协助。

参 考 文 献

- 1 上海科学技术志编纂委员会. 上海市地方志:专业志-上海科学技术志[M]. 上海:上海社会科学院出版社, 1996
- 2 宣明. 王大珩[M]. 北京:科学出版社, 2006
- 3 Tan Weihan, Xu Zhizhan. Single and double frequency resonance heating in laser-irradiated plasmas [J]. *Acta Physica Sinica*, 1977, **26**(2): 133~148
谭维翰, 徐至展. 激光等离子体的单频及双频加热[J]. *物理学报*, 1977, **26**(2): 133~148
- 4 Tan Weihan. Computer simulation of laser implosive compression of a DT target and analytic solutions on the shock waves and thermal waves [J]. *Acta Physica Sinica*, 1979, **28**(3): 364~376
谭维翰. 激光向心压缩 DT 靶计算及激波与热波的解析解[J]. *物理学报*, 1979, **28**(3): 364~376
- 5 胡仁宇. 王淦昌老师—我国惯性约束聚变研究的开创者与奠基人——纪念王淦昌老师诞辰 100 周年[J]. *物理*, 2007, **36**(5): 346~349
- 6 LLNL 未来五年发展规划 [J]. 中科院上海光机所光电信息简报, 2010, **144**: 12~15
- 7 A. M. Rubenchik, C. P. Barty, R. J. Beach *et al.*. Laser systems for orbital debris removal [C]. HPLA, Santa, 2010, LLNL-PROC-423323
- 8 曾先才. 揭开氢弹奥秘的物理学家[M]. //于敏院士八十华诞文集. 北京:原子能出版社, 2006
- 9 林尊琪. 为惯性约束聚变研究事业掌舵的人[M]. //于敏院士八十华诞文集. 北京:原子能出版社, 2006
- 10 江少恩, 丁永坤, 缪文勇 等. 我国激光惯性约束聚变实验研究进展[J]. *中国科学 G 辑*, 2009, **39**(11): 1571~1583
- 11 欧洲大型激光装置:艾瓦路线图 [J]. 中科院上海光机所光电信息简报, 2009, **111**: 1~3
- 12 欧洲兴建新一代“超级激光装置”[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(8): 7
- 13 范滇元, 贺贤土. 惯性约束聚变能源与激光驱动器[J]. *大自然探索*, 1999, **18**(67): 31~35