

文章编号: 2095-4980(2017)01-0070-05

高功率激光装置电磁环境研究进展

孟萃^{a,b}, 杨超^{a,b}, 李鑫^{a,b}, 金晗冰^{a,b}

(清华大学 a.工程物理系; b.粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 激光惯性约束聚变研究中, 高功率激光器靶室中强激光-靶物质作用产生的高能电子的运动、X射线与周围物质作用产生的置换电流将激励出强电磁脉冲, 场强幅值高达几万 V/m, 频率达 GHz 量级, 能库等工作区域大电流、大电压的快速变化过程也将辐射电磁场, 这些电磁脉冲对电子设备将产生各种电磁耦合效应, 影响控制时序、测量数据的准确性, 严重的甚至使仪器设备毁坏, 这种电磁脉冲对生物组织具有损伤效应。本文详细介绍了国内外高功率激光装置电磁环境的理论与实验研究进展情况。

关键词: 传输损耗激光惯性约束聚变; 高功率激光; 超热电子; 电磁兼容

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201701.0070

Development of electromagnetic environment research of high power laser facility

MENG Cui^{a,b}, YANG Chao^{a,b}, LI Xin^{a,b}, JIN Hanbing^{a,b}

(a.Department of Engineering Physics; b.Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Laser Inertial Confinement Fusion(LICF) is one of the research hotspots today and has played an important role in the study of clean energy, military and astrophysics. In the high power laser-target matter interaction process within the high power laser facility, the movement of hot electron can excite high power electromagnetic(EM) pulses with electric field amplitude up to 10 000 V/m and frequency of GHz level. The electromagnetic pulses couple to surrounding electronic equipment and affect the accuracy of the measured data, even more destroy the electronic equipment. In addition, it has damage effect on biological tissues. The research trends of the EM environment in high power laser facility at home and abroad are introduced in this paper.

Keywords: laser ignition fusion; high power laser; hot electrons; Electromagnetic Compatibility(EMC)

惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)是依靠热核燃料和推进层剩余质量的惯性对高温高密度热核燃料进行约束, 使其实现热核聚变, 从而获得聚变能的方法。用热核聚变释放的能量解决能源问题是人类追求的理想。1960年激光问世不久, 我国王淦昌院士和原苏联的巴索夫院士就分别提出利用强激光引发核聚变的原始概念设想^[1]。随着激光核聚变物理以及高功率激光驱动器技术的发展, 半个世纪以来, 国内外激光惯性约束聚变研究取得了巨大进展。

美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)是与我国“神光”计划一样的工程, 由位于美国加利福尼亚州劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)研制。国家点火装置主要用于惯性约束聚变和进行高能密度(High-Energy-Density, HED)科学研究的相关实验。2010年9月29日, NIF进行了第1次点火演练, 192束激光成功同时出光, 192束激光系统向首个低温靶室发射了1 MJ激光能量。除了支持能源部的核武器储备管理项目, NIF还为国内外的研究人员提供前所未有的机会, 探索“前沿”基础科学, 涉及的领域包括天体物理学、行星物理学、流体动力学、非线性光学物理和材料科学。

NIF在建造初期(1994年)就提出了NIF的电磁兼容要求^[2]: “为了确定国家点火装置靶室区域的噪声问题, 对于那些在靶室中将会暴露于辐射和电磁干扰场的各种元器件, 采用文献调研的方法来确定它们的敏感度。通过

预计的影响来看, 电离辐射和电磁干扰对靶室中的光纤、电缆和电子元器件存在显著的效应, 所以需要进行抗辐射加固。在靶室壁与房间墙壁之间的区域, 也要求做一些加固的措施。对电磁干扰进行了一定的评估, 其结果表明在设计的过程中需要加入电磁屏蔽措施。”报告中预计这种电磁脉冲场强高达 10^6 V/m, 属于高功率电磁脉冲范畴。

高功率电磁脉冲通过电缆、孔缝和天线等耦合通道, 把电磁脉冲的能量传递给电子部件, 引起电子设备的失效或损坏: 如电路开关跳闸或触发器翻转、磁存贮器消磁、微处理器代码改变、电子元器件击穿等损坏或瞬时干扰等。

近 30 年来, 美国、法国及中国都开展了高功率激光装置电磁脉冲产生机理以及电磁兼容设计的相关研究工作。到目前为止, 研究表明激光打靶产生超热电子是靶室内电磁脉冲的主要激励源, 激光打靶产生 X 射线比物质作用激励的电磁脉冲小 1~2 个量级, 但是关于超热电子产生的电磁脉冲的机理与物理过程尚不十分明确。下面介绍国内外的研究现状。

1 美国的研究工作

在高功率激光装置的实验研究中, 美国研究人员发现在短脉冲、高能激光器运行过程中, 即使有些电子设备已经被隔离及屏蔽, 仍然出现电磁脉冲造成的诊断失效、数据丢失等问题。为更好地解释这一现象, 避免在下一代高功率激光器上出现同样问题, 科学家们对点火装置中的电磁脉冲现象开展了深入系统的研究工作。

美国点火攻关计划(NIF Ignition Campaign, 简称 NIC)^[3]是 17 亿美元的国家计划, 其目的是通过详细地执行计划来协调各方面的资源, 包括科学、技术和设备等, 获得聚变点火。包括国家核安全局(National Nuclear Security Administration, NISA)、通用原子(General Atoms, GA)、罗切斯特大学激光力能实验室(University of Rochester Laboratory for Laser Energetics, URLLE)、LLNL、洛斯阿拉莫斯实验室(Los Alamos National Laboratory, LANL)、圣地亚国家实验室(Sandia National Laboratory, SNL)等研究机构。基本框架见图 1。

有关电磁兼容方面的工作主要由 LLNL 以及 SNL 两个实验室承担。其中 LLNL 实验室负责用户光纤传输装置设计、个人以及环境防护系统(Personnel and Environmental Protection Systems, PEPS)的设计, SNL 实验室负责靶区诊断系统的中子及电磁脉冲的防护设计。

为研究高能激光装置的电磁环境, LLNL 实验室开发的 EMSolve 软件的一个模块专门研究高功率激光器中激光-靶作用激励电磁脉冲(Electromagnetic Pulse, EMP)的物理过程^[4-7]。

高功率激光装置靶室中强电磁脉冲的主要来源被认为是激光等离子体相互作用产生的、从目标靶脱离的超热电子。由于电子的存在, 它们从一个带有正电荷的靶离开, 因而创造了一个静电场, 从而使得电子在空间流动来中和正电荷; 电子撞击靶室壁产生来回流动的电流, 这些物理过程激励了强电磁脉冲。通过利用 Livermore Jupiter Laser Facility 的 Titan 激光装置, 科学家们获得了理解 EMP 过程的第一手的实验数据。研究者测量了逃离电子的数量、电子在时间和空间上的分布、EMP 和导致的瞬态电流。对于电子流记录的特性与 EMSolve 对于相同实验的 3-D 仿真结果进行了比较。通过这种方式, 他们用该验证代码程序作为一种预测 Titan 和其他激光设施产生 EMP 的场强、持续时间和电磁场频率的工具。这项工作由 Laboratory Directed Research and Development Program 出资支持, 并且是 Engineering Directorate 的一项技术基础工程, 负责人是 Eder。

图 2 给出 EMSolve 仿真结果。在一个 Titan 靶室的详细 3-D 模型中进行, 周围被光学支架包围。这项仿真描述了电子加速向靶室壁运动时产生的电磁场变化情况, 包括流过靶室的电流。在这些结果之中, 红色代表最强磁场, 蓝色代表零磁场。可以看到一部分电子流撞击了支撑实验靶的金属杆顶部, 突然被电离的支架被来自支撑实验靶桌面的电子中和。

Eder 希望这种仿真技术在包括 NIF 和法国兆焦耳激光装置(Laser Mega Joule, LMJ)在内的激光装置的实验规划方面能够有同样成功的效果。NIF 靶室设计有 1 个长度 10 cm 的不锈钢天窗, 用来减少在聚变实验中产生的熔化材料的数量。对于靶室良好的设计, 包括天窗和支架, 能够影响电磁场的高频特性。Eder 希望利用 EMSolve 去建立 NIF 的天窗对 EMP 影响的模型。图 3 给出了 NIF 实验测量得到的靶室内电场强度与激光能量、靶材料的关系。

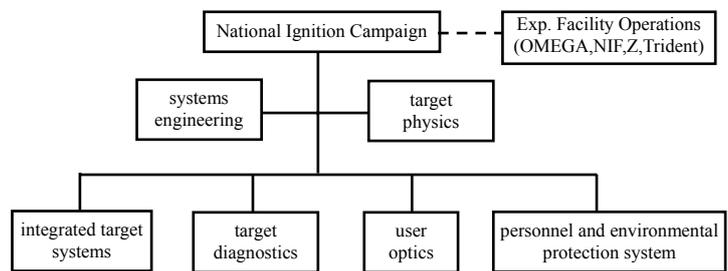


Fig. 1 National Ignition Campaign
图 1 NIC 基本框架

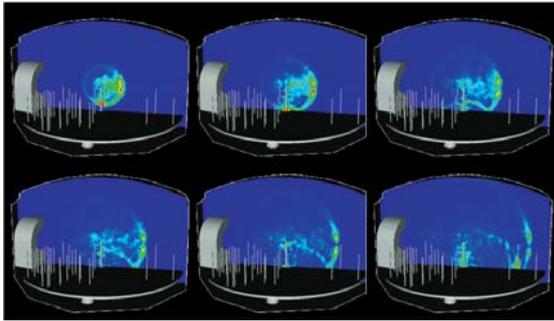


Fig.2 EMP simulation results with EMSolve software of LLNL
图2 LLNL实验室EMSolve软件Titan激光器激励的电磁脉冲的仿真结果

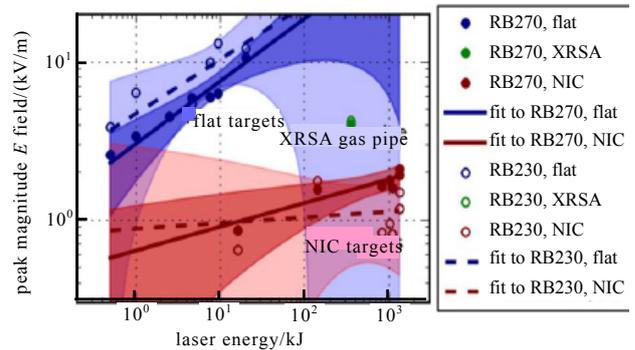
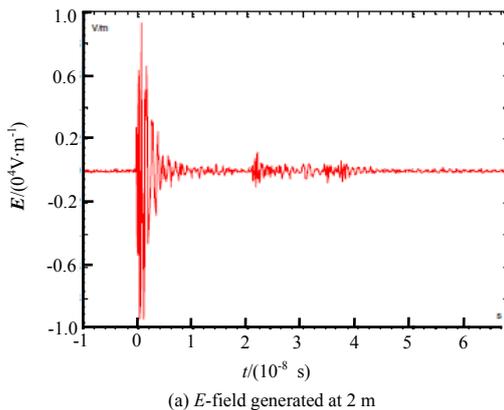


Fig.3 Electric field measured in target chamber of NIF
图3 NIF实验测量得到的靶室内电场强度与激光能量、靶材料的关系

2 法国原子能委员会的 LMJ 装置上的工作

法国原子能委员会(CEA)国家实验室经过实验与理论研究,认为靶室区域激光-等离子体作用产生热电子激励电场强度在 $10\ 000\ \text{V/m}$, 频率 $100\ \text{MHz}\sim 5\ \text{GHz}$ 。针对超高速扫描相机开展了电磁脉冲效应研究。LMJ 实验室建立了一个 $10\ \text{kV/m}$, $100\ \text{ps}$ 上升前沿的电场环境模拟装置,以产生靶室的电磁环境,对诊断装置开展抗扰度实验^[8-13],见图 4。



(a) E-field generated at 2 m



(b) susceptibility diagnostic test in-situ

Fig.4 EMP test in LMJ
图4 LMJ-EMP实验现场图

CEA 实验室开展的高功率激光装置在 $2\ \text{kJ}$ 激光打在金靶的强电磁场环境下,测量用条纹相机未做电磁防护时,静态狭缝成像由 $100\ \mu\text{m}$ 变为 $8\ \text{mm}$,最后是在条纹管和电子地之间加了一块大导体连接解决了该问题。CEA 实验室建立了完善的基于 LMJ 装置的电磁兼容标准体系与规范。

国外还有一些机构和组织就高功率激光装置中的电磁脉冲现象以及核辐射射线激励电磁脉冲现象开展了理论与实验研究^[10-13]。

3 国内的研究工作

20 世纪六七十年代,中国工程物理研究院在王淦昌院士直接指导下,自两弹突破早期开始建立了高功率脉冲技术研究队伍,探索了 ICF 研究的不同途径,建成了“SG-1”,“SG-II”高能激光装置以及“Yang”,“QG-1”,等 Z 箍缩装置,在 ICF 研究中占有一席之地。

从公开文献看,国内针对大型科学装置开展电磁环境研究的主要有:清华大学工程物理系在神龙 I 直线感应加速器开展了 MARX 发生器周围电磁环境的测量^[14-17],清华大学工程物理系与西北核技术研究所还对强光 I 加速器靶区的电场环境进行了测量,并进行了传感器 γ 损伤阈值的研究^[18-19]。在理论仿真方面,清华大学工程物理系开发了高空核爆炸激励电磁脉冲的数值模拟程序,数值模拟了 γ 射线与空气分子作用激励强电磁脉冲的物理过程,并研制有瞬态电场传感器测量辐射环境下的电场^[20-22]。

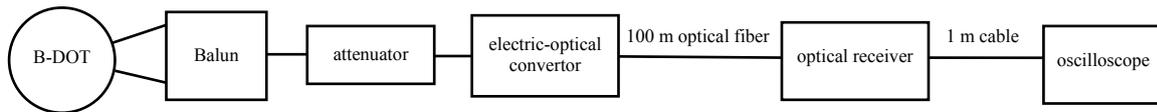


Fig.5 Measurement system for magnetic field
图5 磁场测量系统

中国工程物理研究院与国防科大等单位就激光-靶作用产生 X 射线的物理过程开展了研究^[23-25]；1998 年上海光机所就高功率激光光源本身的电磁干扰问题提出了相关概念^[26]，但未开展实际测量与理论研究；2011 年长春光机所就大功率激光光源本身的电磁屏蔽设计开展了研究^[27]。2010 年开始，清华大学工程物理系强电磁脉冲环境及效应研究组开始研究高功率激光打靶后的强电磁场激励的物理机理问题，并提出高功率激光装置整体电磁兼容设计的研究建议。2011 年开始初步进行高功率激光装置中电磁脉冲的物理机理以及电磁兼容相关研究工作，2014 年在神光 II、神光 III 及星光装置上开展了靶室外-靶室房间内的电磁环境测量工作。图 5 为该项目组自行研制的进行磁场测量的系统示意图。图 6 是在神光 II 激光装置上测量得到的磁场波形。得出电磁场强度与激光能量、激光脉冲宽度、靶形状、靶材料的初步关系，与国外结果一致，但在电磁场频带宽度上与 NIF 公布结果差距较大。

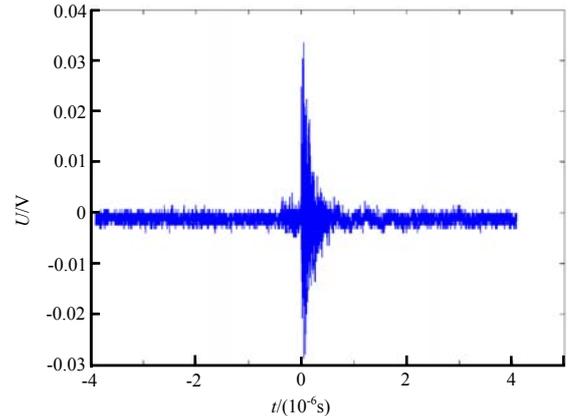


Fig.6 Magnetic field measured outside the target chamber of SG-II
图 6 神光 II 靶室外磁场测量结果

4 结论

在激光惯性约束聚变研究中，高功率激光装置靶室内的强电磁脉冲机理与物理规律还需要进行更深入与完善的研究工作。我国的激光惯性约束聚变装置的建设也迫切需要开展靶室内电磁环境产生机理研究，一方面加深对激光惯性约束聚变物理过程的理解，另一方面为开展各种诊断装置在这种电磁脉冲环境下的抗干扰能力提供研究依据，为激光惯性约束聚变相关物理研究工作提供保障，同时也为人员的电磁安全提供评估依据。

参考文献：

- [1] 王淦昌,王乃彦. 惯性约束聚变的进展与展望[J]. 核科学与工程, 1989,9(4):289-299. (WANG Ganchang,WANG Naiyan. The progress and prospect in the inertial confinement fusion[J]. Nuclear Science and Engineering, 1989,9(4):289-299.)
- [2] STATHIS Pete. Radiation and EMI effects in the NIF environment[R]. Nasa Sti/recon Technical Report N, 1994:95.
- [3] MACGOWAN Brian. The NIF ignition campaign[EB/OL]. [2015-07-02]. https://laser.llnl.gov/newsroom/project_status/index.php.
- [4] MEAD M J,NEELY D,GAUOIN J,et al. Electromagnetic pulse generation within a petawatt laser target chamber[J]. Review of Scientific Instruments, 2004,75(10):4225-4227.
- [5] A code to model electromagnetic phenomena[R]. LLNL S &TR, 2007.
- [6] MICAELE Caldwell. Electromagnetic Test Facilities at Sandia National Laboratories[R]. IMS, 2005.
- [7] REMO J L,ADAMS R G,JONES M C. Atmospheric electromagnetic pulse propagation effects from thick targets in a terawatt laser target chamber[J]. Applied Optics, 2007,46(24):6166-6175.
- [8] RAIMBOURG J. EMC management in a high power pulse laser[C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Hawaii,USA:[s.n.], 2007:1-5.
- [9] RAIMBOURG J. Compact ultrashort rise time electromagnetic bench test[C]// AMEREM 2010. Ottawa,Canada:[s.n.], 2010.
- [10] OGANESYAN S. Electromagnetic pulse amplification in a Cherenkov laser[J]. Technical Physics, 1999,44(4):422-425.
- [11] BROWN C G,THROOP A,EDER D,et al. Electromagnetic pulses at short-pulse laser facilities[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2007,112(3):1231-1236.
- [12] KHACHATRYAN A G,BOLLER K J,VAN Goor F A. Charged particle interaction with a chirped electromagnetic pulse[C]// Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference. Piscataway,NJ,USA:[s.n.],2003:1903-1905.
- [13] LAZARUS J. Electromagnetic pulse suppression in laser plasma interaction experiments on the vulcan petawatt laser[R]. Central Laser Facility Annual Report, 2004/2005:40-41.

- [14] 程奇峰,倪建平,孟萃. 直线感应加速器脉冲功率系统电场辐射测量分析[J]. 核电子学与探测技术, 2009,29(5):1160-1164. (CHENG Qifeng,NI Jianping,MENG Cui. Measurement and analysis of the electric field radiation in pulsed power system of linear induction accelerator[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009,29(5):1160-1164.)
- [15] 孟萃,程建平. 强电磁脉冲传感器 γ 辐照效应实验研究[J]. 核电子学与探测技术, 2007,27(5):567-569. (MENG Cui, CHENG Jianping. Experimental research for γ -ray interference threshold effect of high electromagnetic pulse sensor[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007,27(5):567-569.)
- [16] 张晓明,孟萃. 偶极天线电场传感器的设计与实现[C]// 电磁环境效应及防护学术讨论会. 昆明:[s.n.], 2009:89-92. (ZHANG Xiaoming,MENG Cui. Design and development of dipole electric field sensor[C]// Electromagnetic Environment, Effects and Protection Conference. Kunming,China:[s.n.], 2009:89-92.)
- [17] 孟萃,陈雨生. 爆炸高度及威力对核电磁脉冲影响的数值模拟[J]. 计算物理, 2003,20(2):174-178. (MENG Cui, CHEN Yusheng. Effects of the HOB and the burst yield on the properties of NEMP[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2003,20(2):174-178.)
- [18] MENG C,CHEN Y S. Numerical simulation of the early-time high altitude electromagnetic pulse[J]. Chinese Physics, 2003,12(12):1378-1382.
- [19] MENG C. Numerical simulation of NEMP environment[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013,55(3):440-445.
- [20] 张均,常铁强. 激光核聚变靶物理基础[M]. 北京:国防工业出版社, 2004. (ZHANG Jun,CHANG Tieqiang. Fundamentals of the Target Physics for Laser Fusion[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.)
- [21] 张均. 激光产生 X 光的理论模型[J]. 强激光与粒子束, 1990,12(2):179-185. (ZHANG Jun. Theoretical model of laser generation X ray[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1990,12(2):179-185.)
- [22] 贾正根. 用 fs 激光产生 X 射线[J]. 半导体情报, 2001,38(3):21-45. (JIA Zhenggen. X ray pulse penetration by femto second laser[J]. Semiconductor Information, 2001,38(3):21-45.)
- [23] 孟萃,陈雨生. 二极管区对虚阴极振荡器影响的数值模拟[J]. 计算物理, 2000,17(1):102-106. (MENG Cui,CHEN Yusheng. The numerical simulation of the diode region affection on the vircator[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2000, 17(1):102-106.)
- [24] 唐永建,罗江山,雷海乐,等. ICF 靶中的纳米金属材料研究进展[J]. 原子能科学技术, 2009,43(B12):109-115. (TANG Yongjian,LUO Jiangshan,LEI Haile,et al. Research progress of metallic function nanomaterials for inertial confinement fusion targets[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009,43(B12):109-115.)
- [25] 李玉同,远晓辉,徐妙华,等. 强激光与等离子体相互作用中沿靶表面发射的高能超热电子[J]. 物理, 2006,35(9):716-719. (LI Yutong,YUAN Xiaohui,XU Miaohua,et al. A fast electron beam along a target surface irradiated by intense laser pulses[J]. Physics, 2006,35(9):716-719.)
- [26] 孟绍贤,唐贤忠,高奇,等. 高功率激光实验室电磁干扰的危害和防护[J]. 激光与光电子学进展, 1998,35(2):15-19. (MENG Shaoxian,TANG Xianzhong,GAO Qi,et al. Harm and protection of electromagnetic interference in high power laser laboratory[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 1998,35(2):15-19.)
- [27] 葛欣宏,郭立红,孟范江,等. 大功率 TEA CO₂ 激光器的电磁辐射测试及屏蔽方舱设计[J]. 光学精密工程, 2011,19(5):983-991. (GE Xinhong,GUO Lihong,MENG Fanjiang,et al. Electromagnetic radiation test of high power TEA CO₂ laser and its shielding cabin design[J]. Optics and Precision Engineering, 2011,19(5):983-991.)

作者简介:



孟萃(1970-),女,吉林省延吉市人,博士,主要研究方向为核电磁脉冲产生机理的理论仿真、强电磁脉冲环境的产生机理及效应研究、强电磁场测量校准方法、电磁敏感度系统预估算法,email:mengcui@tsinghua.edu.cn.

杨超(1990-),男,贵阳市人,在读硕士研究生,主要从事高功率电磁环境实验测量及校准技术研究.

李鑫(1987-),女,安徽省黄山市人,在读博士研究生,主要从事系统 EMC 预测相关研究工作.

金晗冰(1993-),女,江西省宜春市人,在读硕士研究生,主要从事激光与靶作用激励电磁脉冲的机理研究.