

文章编号: 2095-4980(2016)06-0905-05

神光-III 原型高功率激光装置电磁脉冲辐射

杨为明¹, 王传珂¹, 易涛^{1*}, 李廷帅², 高崇信^{1,2},王锐², 张健¹, 王保清^{1,2}, 刘慎业¹, 丁永坤¹, 江少恩¹

(1.中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621999; 2.电子科技大学 能源科学与工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要: 实验测量了神光-III 原型装置上脉冲强激光与金属靶相互作用产生的电脉冲辐射, 电脉冲峰值梯度为 3 kV/m, 频谱范围大约在 50 MHz~2 GHz, 在 160 MHz 等处有明显的特征峰, 信号持续时间大约 60 ns。本文研究表明电偶极辐射是打靶过程产生电磁脉冲信号的来源之一, 由理论模型计算得到频率为 160 MHz 的特征峰, 并计算出探测点电场脉冲峰值梯度约为 2 kV/m, 辐射总功率约 10^5 W, 能量转换率约 10^{-6} , 辐射功率近似正比于激光能量的 $4/3$ 次方, 可见激光能量越大, 功率密度越高, 电脉冲的辐射强度越大。大型激光装置上的激光与靶作用产生的电磁脉冲测量, 对大型激光装置产生的电磁辐射的防护有重要指导作用, 在等离子体诊断等领域也有潜在应用价值。

关键词: 激光等离子体相互作用; 电磁脉冲; 天线; 偶极辐射

中图分类号: TN73; O536

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201606.0905

Investigation of electromagnetic pulse emission from Shenguang high power laser facilities

YANG Weiming¹, WANG Chuanke¹, YI Tao¹, LI Tingshuai², GAO Chongxin^{1,2}, WANG Rui², ZHANG Jian¹,
WANG Baoqing^{1,2}, LIU Shenye¹, DING Yongkun¹, JIANG Shaoen¹

(1. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;

2. School of Energy Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: Electromagnetic pulse emission of Shenguang-III prototype laser facilities from pulse-laser-irradiated metallic target is evaluated by using B-dot. An electric signal lasting for about 60 ns is detected in the experiment, with radiated field up to 3 kV/m and frequency bins for 0.1 GHz–2 GHz which has an obvious peak at 160 MHz. The results demonstrate that the model of dipole radiation is one of the major mechanisms of electromagnetic pulse emission from laser–target interaction. The dipole radiation model can produce about 10^5 W, 160 MHz central frequency electromagnetic pulse with an energy conversion efficiency of 10^{-6} according to the calculation, and the electric field of antenna position is about 2 kV/m. This experiment evaluates the electromagnetic pulse emission from pulse-laser-irradiated metallic target on Shenguang-III prototype laser facilities, which is of great significance for shielding electromagnetic disturbance of diagnostics on large laser facilities. Moreover, investigation of electromagnetic pulse emission may have many potential applications.

Keywords: laser–target interaction; electromagnetic pulse; antenna; dipole radiation

近年来, 强激光与固体物质相互作用的研究已成为科学研究的热点。强激光与固体靶相互作用过程中会产生丰富的物理现象, 如电磁辐射、粒子发射等, 这在惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)^[1–2]、激光等离子体基础上的新辐射源(THz, X-ray)^[3–4]以及高能粒子(电子、离子)加速器^[5–7]中都有着广泛的应用前景。

收稿日期: 2015-07-23; 修回日期: 2015-09-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11105129); 中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目(2014B0102011; 2014B0102012)

*通信作者: 易涛 email:yitao2008@caep.cn

电磁辐射是强激光与固体作用过程中不可忽视的现象,特别是随着大型激光装置的建成,在使用拍瓦甚至功率更高的大型激光器进行实验时,激光与金属靶作用会产生很强的电磁脉冲,而电磁脉冲对诊断设备的电子学系统会造成很明显的影 响,所以近年来大型激光装置上强激光打靶产生电磁脉冲的研究越来越受到关注。2009 年 LLNL 的 D. Eder 对 ns 量级的长脉冲激光器 NIF 产生的电磁脉冲效应做了研究,测得电磁脉冲峰值强度约 10 kV/m,并经分析认为出射电子的进一步振荡是产生电磁脉冲的主要来源^[8]。2010 年 C.G. Brown 在 ps 量级的短脉冲激光器 Titan 上的实验中也测到了电场强度约为几十到几百 kV/m 的电磁脉冲信号^[9]。

为了测量国内大型激光装置上打靶过程中产生的电磁脉冲强度,研究激光等离子体辐射电磁脉冲的机制,本文开展了神光-III 原型装置电磁辐射测量实验,实验探测到了脉冲峰值强度高达 3 kV/m 的电磁脉冲信号,并分析出偶极辐射是产生电磁脉冲辐射的机制之一。研究结论表明,在更大的激光能量与靶材料相互作用时,将会产生更强的电磁脉冲,这对神光-III 原型装置产生的电磁脉冲进行针对性的屏蔽具有重要作用,对神光-III 主机装置也有一定的参考价值。

1 激光等离子体电磁辐射模型

脉冲强激光与金属靶作用过程复杂,产生电磁辐射的具体物理机制还在研究之中^[10-14]。本文认为电偶极辐射是实验中辐射电磁脉冲的主要机制之一。脉冲强激光与金属靶相互作用会在表面迅速形成等离子体,并产生热电子,形成电子的出射与回流,等离子体中的回流电流将产生偶极辐射,回流电流的大小为^[15]:

$$I \approx U \left(R + \frac{2L}{\tau} \right)^{-1} \approx \frac{T}{e} \left(\frac{d}{\pi a^2 \sigma} + \frac{2d}{\tau c^2} \right)^{-1} \quad (1)$$

式中: U 是等离子体柱轴向电压; R 是等离子体柱等效电阻; L 是等离子体柱等效电感; a 为半径; d 为临界密度面到靶面的距离; T 为等离子体电子温度; e 为电子电荷; σ 是电导率; c 是光速; τ 为激光作用的时间。

利用经典电动力学即可求得偶极辐射产生的电磁脉冲强度。回流电流的电偶极矩变化率为 $dp/dt = Id$, 将等离子体看成振荡时间尺度为 τ 的半波单极子天线, 则其电流周期为 $T_0 = 2\tau$, 对应辐射频率 $f = 1/T_0$, 角频率 $\omega_0 = \pi/\tau$, 因此电偶极矩为:

$$p = \frac{Id}{\omega_0} \quad (2)$$

偶极辐射的电场强度为:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2 R} \ddot{p} e^{i\theta} \sin\theta e_\theta \quad (3)$$

探测点电磁脉冲强度为:

$$|E| = \frac{T}{8\pi\epsilon_0 e R} \left(1 + \frac{\tau c^2}{2\pi a^2 \sigma} \right)^{-1} \sin\theta \quad (4)$$

辐射总功率为:

$$P = \frac{|\ddot{p}|^2}{12\pi\epsilon_0 c^3} = \frac{T^2 c}{24\pi\epsilon_0 e^2} \left(1 + \frac{\tau c^2}{2\pi a^2 \sigma} \right)^{-2} \quad (5)$$

T 为等离子体的电子温度^[16]:

$$T = m_i v_c^2 \approx m_i (2f\Phi/3\rho_c)^{2/3} \quad (6)$$

式中: m_i 为离子质量; f 为激光能量被吸收用来加热电子的比重; ρ_c 为质量密度; Φ 为激光功率密度; R 为探测点距靶心的距离。

由式(5)可以看出,电磁脉冲辐射功率与激光能量密切相关,实验中使用的激光能量越大,辐射电磁脉冲的强度越大,势必会对电子学诊断设备造成严重影响。

2 实验结果和分析

本实验在神光-III 原型装置上进行,神光-III 原型装置既是神光-III 主机的工程样机,又是用于惯性约束聚变

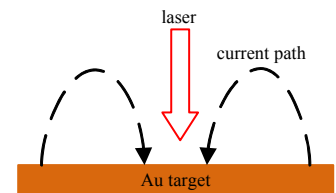


Fig.1 Illustration of dipole radiation produced by circuit current
图 1 回流电流产生偶极辐射示意图

(ICF)实验研究的大型铷玻璃固体激光装置,可以同时输出 8 路激光,输出能量达 10 kJ^[17]。靶室为一个球体,实验中,靶室处于高真空状态,避免激光能量用于电离背景气体,产生出射光电子和产生电磁脉冲对辐射信号造成影响。

本实验采用 N1,N2,N3 三路激光加第 9 路激光发射轰击 Au 盘靶,其中 N1,N2,N3 三路激光三倍频,激光脉宽 3 ns,能量 800 J,焦斑直径 $\phi 500\ \mu\text{m}$;第 9 路激光四倍频,激光脉宽 3 ns,能量 80 J,焦斑直径 $\phi 100\ \mu\text{m}$,相对前 3 路延迟 0.5 ns 发射。利用自主设计的环形 B-dot 接收激光打靶过程中产生的电测脉冲信号,将天线通过法兰口伸入靶室固定在靶室内壁,距离靶点 1.3 m,再利用同轴线连接天线与示波器输入端,如图 2 所示。本文所有实验数据都使用 Agilent 公司 8 GHz 示波器测得,传输所用的是专门为神光-Ⅲ原型装置试验场地的测试设备定制的防辐射同轴线。



Fig.2 Illustration of measuring electromagnetic pulse in target chamber(a) and B-dot(b)
图 2 靶场内电磁波测量示意图(a),以及环形 B-dot 示意图(b)

测量结果如图 3 所示,其中图 3(a)为测得的电磁脉冲时域信号,图 3(b)为相应的经过快速傅里叶变换得到的频谱分布。采用的 B-dot 可采集的信号频率范围大约在 0.05 GHz~8 GHz,由图 3(b)可知记录到的信号在可采集的范围内。

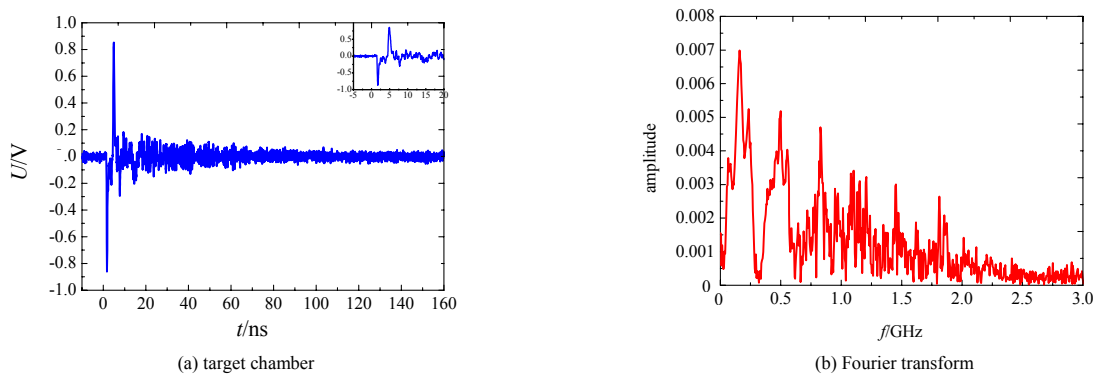


Fig.3 A typical temporal oscillogram(a) and Fourier transform(b) of electromagnetic pulse signal recorded by the B-dot
图 3 B-dot 记录的典型电磁脉冲时域波形图(a)及相应的频谱分布(b)

由图 3(a)可以看出,从激光作用到靶上产生电磁信号开始,天线记录到迅速产生的高频振荡和逐渐衰减的电磁信号,整个过程持续时间约为 60 ns。为了得到探测点的电场强度,首先利用 HFSS 对 B-dot 进行天线仿真,由仿真结果推导出频域上的传递函数,从未得到信号的频域分布,并用 Tikhonov 正则化^[18]优化,最后通过逆傅里叶变换得到天线处电场强度大小。处理得到电磁脉冲的电场强度可达 3 kV/m,因常规的电子学仪器可承受的电场梯度仅为 3 V/m,因此需要合理的屏蔽来对强激光打靶实验中的诊断设备实现屏蔽保护。由图 3(b)可知电磁辐射信号主要分布在 0.1 GHz~2 GHz,在 160 MHz 处有明显的特征峰。将激光能量等实验条件及实验参数代入式(4),得到由偶极辐射模型辐射到天线处电磁脉冲的电场强度约为 2 kV/m,与实验结果相近;总功率约为 $10^5\ \text{W}$,激光作用的时间为 3 ns,能量大约 2 500 J,能量转换率约 10^{-6} ,与 F. S. Felber 的结果一致^[19]。由偶极辐射模型可知,在频率为 $1/2\tau \approx 160\ \text{MHz}$ 处应有峰值,这与实验结果非常一致。由此可以看出,在长脉冲强激光与金属靶相互作用产生电磁辐射的过程中,偶极辐射是辐射电磁波的主要机制之一。在图 3(b)中,可看到除 160 MHz 的特征峰外,在 0.3 GHz 到 2 GHz 还有其他特征峰分布,这是因为强激光与金属靶相互作用过程复杂,产生电磁脉冲的机制也有很多,还存在其他的辐射电磁波的机制,还有待进一步的研究。

神光-Ⅲ原型装置在实验过程中产生的电磁脉冲强度,距离激光等离子体光源 1.5 m 处高达 3 kV/m,而由式(4)可知,在激光能量、激光功率更大的激光装置上产生的电磁脉冲强度会更高,这对神光-Ⅲ主机装置实验上的诊断设备的电磁屏蔽具有重要作用。

3 结论

利用 B-dot 测量了神光-Ⅲ原型装置打靶过程中产生的电磁辐射,实验探测到了明显的电磁脉冲信号,信号的电场强度峰值约 3 kV/m,频谱范围大约在 0.1 GHz~2 GHz,在 160 MHz 处有明显的特征峰。用偶极辐射模型解释了频率为 160 MHz 的特征峰,并计算出探测点电场强度为 2 kV/m,辐射总功率约 10^5 W,能量转换率约 10^{-6} ,证实了电偶极辐射是激光与金属靶作用产生电磁辐射的主要机制之一。神光-Ⅲ原型装置打靶过程中产生的电磁脉冲测量,对更大能量的激光装置如神光-Ⅲ主机装置及点火装置上的电磁防护具有重要指导意义。

参考文献:

- [1] 丁永坤,江少恩,刘慎业,等. 激光聚变研究中心聚变靶物理实验和诊断技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12):3077-3081. (DING Yongkun,JIANG Shaoen,LIU Shenye,et al. Recent progress on physical experiment and target diagnostics in Research Center of Laser Fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(12):3077-3081.)
- [2] KODAMA R,NORREYS P A,MIMA K,et al. Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition[J]. Nature, 2001,412(3849):798-802.
- [3] LI C,ZHOU M L,DING W J,et al. Effects of laser-plasma interaction on terahertz radiation from solid targets irradiated by ultrashort intense laser pulse[J]. Physical Review E, 2011,84(3):036405.
- [4] TEUBNER U,GIBBON P. High-order harmonics from laser-irradiated plasma surfaces[J]. Reviews of Modern Physics, 2009,81(2):445-479.
- [5] ESAREY E,SCHROEDER C B,LEEMANS W P. Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators[J]. Reviews of Modern Physics, 2009,81(3):1229-1285.
- [6] SCHWOERER H,PFOTENHAUER S,JACKEL O,et al. Laser-plasma acceleration of quasi-monoenergetic protons from microstructured targets[J]. Nature, 2006,439(7075):445-448.
- [7] YAN X Q,LIN C,SHENG Z M,et al. Generating high-current monoenergetic proton beams by a circularly polarized laser pulse in the phase-stable acceleration regime[J]. Physical Review Letters, 2008,100(13):135003-1-135003-4.
- [8] EDER D C,THROOP A,BROWN C G,et al. Mitigation of electromagnetic pulse(EMP) effects from short-pulse lasers and fusion neutrons[R]. Livermore:Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL), 2009.
- [9] BROWN C G,BOND JR E,CLANCY T,et al. Assessment and mitigation of electromagnetic pulse(EMP) impacts at short-pulse lasers facilities[R]. Livermore:Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL), 2010.
- [10] 但加坤,任晓东,黄显宾,等. Z 箍缩内爆产生的电磁脉冲辐射[J]. 物理学报, 2013,62(24):245201-1-245201-6. (DAN Jiakun,REN Xiaodong,HUANG Xianbin,et al. Electromagnetic pulse emission produced by Z pinch implosions[J]. Acta Physica Sinica, 2013,62(24):245201-1-245201-6.)
- [11] 但加坤,任晓东,张思群,等. Z 箍缩等离子体振荡引起的电磁脉冲辐射[J]. 强激光与粒子束, 2014,26(4):045038-1-045038-4. (DAN Jiakun,REN Xiaodong,ZHANG Siqun,et al. Electromagnetic pulse emission by plasma oscillations from Z pinches[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014,26(4):045038-1-045038-4.)
- [12] 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.
- [13] DUBOIS J L,LUBRANO-LAVADERCI F,RAFFESTIN D,et al. Target charging in short-pulse-laser-plasma experiments[J]. Physical Review E, 2014,89(1):013102-1-013102-15.
- [14] KRYGIER A G,SCHUMACHER D W,FREEMAN R R. On the origin of super-hot electrons from intense laser interactions with solid targets having moderate scale length preformed plasmas[J]. Physics of Plasmas, 2014,21(2):023112-1-023112-8.
- [15] DROUET MG,BOLTON R. Distribution of self-generated current in laser-produced plasmas[J]. Physical Review Letters, 1976,36(11):591-594.
- [16] FELBER F S. Steady-state model of a flat laser-driven target[J]. Physical Review Letters, 1977,39(2):84-87.
- [17] 江少恩,丁永坤,刘慎业,等. 神光系列装置激光聚变实验与诊断技术研究进展[J]. 物理, 2010,39(8):531-542. (JIANG Shaoen,DING Yongkun,LIU Shenye,et al. Recent inertial confinement fusion experiments and diagnostic techniques on the Shenguang laser facility[J]. Physics, 2010,39(8):531-542.)
- [18] YAO T Z,LU S,XU H L. L-curve based Tikhonov's regularization method for determining relaxation modulus from creep test[J]. Journal of Applied Mechanics, 2011,78(3):031002-031009.
- [19] FELBER F S. Dipole radio-frequency power from laser plasmas with no dipole moment[J]. Applied Physics Letters, 2005,86(23):231501-1-231501-3.

作者简介:



杨为明(1992-), 男, 湖南省常德市人, 学士, 研究实习员, 主要研究方向为激光等离子体产生电磁辐射的诊断.email: ywm835093137@yeah.net.

王保清(1991-), 男, 山东省青岛市人, 硕士研究生, 主要研究方向为激光诊断.

刘慎业(1962-), 男, 湖南省湘潭市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为惯性约束聚变诊断.

丁永坤(1965-), 男, 四川省遂宁市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为惯性约束聚变理论及诊断.

江少恩(1964-), 男, 湖北省黄冈市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为惯性约束聚变理论及诊断.

王传珂(1981-), 男, 山东省沂蒙市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为惯性约束聚变实验.

易 涛(1980-), 男, 湖北省孝感市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为激光等离子体产生电磁辐射的诊断研究和光折变诊断.

李廷帅(1983-), 男, 山东省枣庄市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为激光等离子体产生电磁辐射的诊断.

高崇信(1990-), 男, 山东省枣庄市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁诊断.

王 锐(1992-), 男, 四川省绵阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁诊断.

张 健(1987-), 男, 四川省绵阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为非线性光学诊断.

(上接第 896 页)

- [7] 蒋曦曦,吴瑛. 一种稳健的稀疏 Capon 波束形成算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(1):130-134. (JIANG Xixi,WU Ying. A sparse robust Capon beamforming algorithm[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(1):130-134.)
- [8] 黄庆东,庞胜利,卢光跃. 基于 Householder 多级维纳滤波器的全联通 WSN 分布式 LCMV 波束形成方法[J]. 电子学报, 2015,43(2):283-288. (HUANG Qingdong,PANG Shengli,LU Guangyue. A householder multistage Wiener filter method for distributed LCMV beamforming in fully connected WSN[J]. Acta Electronica Sinica, 2015,43(2):283-288.)
- [9] 幸璐璐. 基于线性约束最小方差的全球定位系统抗干扰技术[J]. 计算机应用, 2014,34(S2):354-356. (XING Lulu. Global position system anti-interference technology based on linear constrained minimum variance[J]. Journal of Computer Applications, 2014,34(S2):354-356.)
- [10] ZHU L Y,SER W,ER M H,et al. Robust adaptive beamformers based on worst-case optimization and constraints on magnitude response[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009,57(7):2615-2628.

作者简介:



黄 涛(1990-), 男, 河北省保定市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星导航、抗干扰技术.email:465777023@qq.com.

常 青(1962-), 男, 天津市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信息传输与处理、移动通信、卫星导航.

徐 勇(1981-), 男, 杭州市人, 讲师, 主要研究方向为卫星导航与星间链路技术.