

用于强激光靶耦合诊断的脉冲天线

高崇信^{1,2}, 易涛², 王传珂², 刘慎业², 李廷帅¹

(1. 电子科技大学 能源科学与工程学院, 四川 成都 611731;
2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 惯性约束聚变(ICF)背景下的激光靶耦合过程产生大量电磁脉冲, 对诊断设备的正常运行和测试数据的采集产生不良影响, 严重时甚至损害诊断装置。介绍了强激光与金属靶相互作用过程中受激辐射产生等离子体的数学模型, 模拟了盘锥脉冲天线的物理模型、三维增益等各项指标, 并对打靶过程进行测量, 得出电磁辐射电场值, 并推导出其频域分布。实验结果显示, 影响电磁辐射强度的因素有激光能量、激光打靶方式和入射方向等。对于平面靶, 相同靶型和靶材质情况下, 不同功率激光与平面靶相互作用发出的电磁脉冲具有相似的频谱和相同的特征频率。诊断结果为激光打靶产生电磁脉冲物理机制研究提供重要实验依据。

关键词: 电磁脉冲; 圆锥天线; 电磁耦合; 时域分布; 频域分布

中图分类号: O532; O411 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0606007

Pulse antenna in application of high power laser target electromagnetic pulse diagnosis

Gao Chongxin^{1,2}, Yi Tao², Wang Chuanke², Liu Shenye², Li Tingshuai¹

(1. School of Energy Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Massive electromagnetic pulses could be generated by the interactions between intensive laser and solid targets in inertial confinement fusion (ICF), leading to the inaccuracy of experimental data and even the malfunction of diagnostic facilities. A method for diagnosing electromagnetic pulses (EMP) generated by laser illuminating solid targets was presented. A conical antenna was designed and simulated to obtain the attenuation coefficient, 3D gain and other parameters of the antenna physical model. The in situ monitoring the target process was performed to evaluate the value of electromagnetic radiation and electric voltage, by which the time-domain distribution of electromagnetic impulse was expected. The experimental results indicate that the intensity of electromagnetic radiation is related to many factors, such as the power of laser, the way of laser shooting, and angle of incidence. As for planar targets, if image and material are the same, EMP engendered by laser with different power has the similar energy spectral density (ESD) and the identical characteristic frequency. The results are expected to offer significant experiment information to study physics mechanism regarding the interactions between laser and target,

收稿日期: 2015-10-13; 修订日期: 2015-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(11105129)

作者简介: 高崇信(1988-), 男, 硕士, 主要从事天线设计以及激光靶耦合生成电磁脉冲方面的研究。Email: gaochongxin1988@163.com

which will also lay foundation for the later EMP shielding design for the important diagnostic facilities in ICF experiment.

Key words: electromagnetic pulse; conical antenna; electromagnetic coupling; time-domain distribution; frequency-domain distribution

0 引言

位于美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL) 的 NIF 装置, 是一个由 192 束固体钕玻璃激光组成的、总能量高达 1.8 MJ 的中心点火装置, 是目前世界上能量最大的激光装置。NIF、Titan 等大功率激光装置进行打靶实验时往往会产生强烈的电磁脉冲辐射, 这些电磁脉冲来源于强激光与固体靶相互作用。强激光靶耦合产生的电磁脉冲会对大功率激光装置内运行的各类精密诊断设备带来强烈的干扰, 甚至永久性损伤。研究强激光靶耦合产生电磁脉冲的特征, 对于如何有效屏蔽干扰信号和减少设备损伤非常重要^[1]。同时, 高能量激光与靶相互作用过程中会激发大量逃逸电子, 并且还能衍生出更多值得深入探索的二次反应: 等离子体出射、X 射线的产生等。在这一过程中不断有电磁辐射被激发。强激光靶耦合产生的电磁脉冲的研究也为人们提供了一种等离子体诊断手段, 通过时域和频谱信息分析, 可以为等离子体内部的电子演变过程提供诊断信息。因此, 在高功率激光装置建成时, 激光驱动电磁脉冲研究就引起了各国学者的关注, 并针对该激光装置进行了电磁脉冲的实验研究^[2]。LLNL 的 C.G.Brown 等人对兆焦级(MJ)长脉冲激光器 NIF(ns)和拍瓦级(PW)短脉冲激光器 Titan(ps)产生的电磁脉冲效应都做了初步研究。诊断结果显示所测得的电磁脉冲峰值电场强度达 167 kV/m, 持续时间约 400 ns, 频谱范围从 50 MHz 一直持续到 5 GHz(受示波器限制, 并不代表脉冲最高频率)。

文中从理论和实验两方面对电磁脉冲的产生机理和辐射特性开展研究, 介绍了在神光 III 原型大功率激光装置上开展的激光靶耦合产生电磁脉冲辐射的实验研究。由于强激光靶耦合产生的电磁脉冲具有短脉冲、宽频谱的特点, 普通的脉冲天线难以满足测量要求。自行设计了用于强激光靶耦合诊断的超宽带电磁脉冲天线, 覆盖 0.1~5 GHz 的频谱范围, 相

对带宽接近 200%。利用超宽带天线对神光 III 原型装置靶场电磁辐射进行了实验测量, 获取了电磁脉冲信号, 并进行了时域和频域分析。文中的工作对神光装置电磁脉冲干扰评估提供了新的手段和方法, 对深入理解脉冲形成机制和激光等离子体相互作用的物理过程提供了重要实验依据, 也为后期发展强电磁脉冲屏蔽和诊断技术提供了研究基础。

1 强激光靶耦合电磁辐射模型

强激光靶耦合时产生的电磁脉冲机制比较复杂, 当强激光入射到固体靶面上时, 会激发电子的强烈震荡, 一部分电子会逸出材料表面形成瞬变的空腔电流从而产生电磁辐射。F.S.Felber 提出了一个相对简单的激光等离子体回流电流模型^[3], 能够有效阐述激光靶耦合产生的低频电磁辐射的机理。

根据 F.S.Felber 的辐射模型, 激光入射到金属靶表面时会产生等离子体, 一部分电子在激光耦合过程中从靶面向外发射, 在离开靶面一段距离后从外部回流到金属中形成环形回流, 在此过程中由于电子加速度改变产生电磁辐射。Felber 的模型将金属平面靶表面的短圆柱型激光等离子体看成一根置于地平面上的短单极子天线, 如图 1 所示, 利用经典天线辐射理论即可求得偶极辐射产生的电磁波功率^[4]。

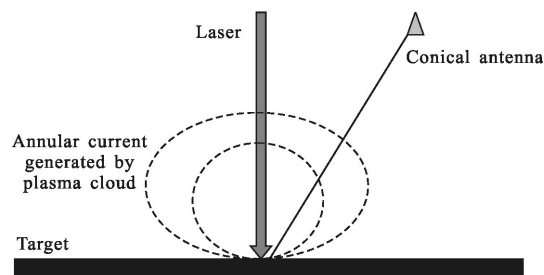


图 1 激光作用到金属平面靶界面产生的等离子体生成环形回流电流分布图

Fig.1 Illustration of model geometry showing dense plasma plume rising from target surface and poloidal currents immersed in plasma

如图 1 所示,方位对称电流流经激光激发的等离子体后向周围扩散并回到靶面形成回流^[5-6]。回流电流的电偶极矩变化率为 $dp/dt=Id$,对于振荡时间尺度为 τ 的 1/4 波单极子天线,其电流周期为 $T_0=4\tau$,对应回路电压脉冲角频率 $\omega_0=\pi/2\tau$,因此回路电流电偶极矩可表示为:

$$p=Id/2\omega_0 \quad (1)$$

激光等离子体产生辐射电磁波带宽为 rf ,频率为 $1/4\tau$, m_i 为离子质量, ρ_c 为质量密度, Φ 为激光通量,可将其等效为一个放置在水平面上的细小的单极子天线, a 为等效圆柱体半径^[7-8],电偶极子辐射功率可表示为:

$$P=\frac{\omega_0^4}{6c^3}|p|^2\approx\frac{\pi^2m_i^2c}{384e^2}\left(\frac{2f\Phi}{3\rho_c}\right)^{4/3}\left(1+\frac{\tau c^2}{2\pi a^2\sigma}\right)^{-2} \quad (2)$$

2 电磁脉冲天线设计模拟

由于激光靶耦合产生电磁脉冲辐射具有短脉冲、宽频谱的特点,因此相应的测量天线须具备辐射短脉冲、超宽带的测量能力,同时天线在整个超宽频带内保持稳定的性能^[9]。设计了盘锥形超宽带天线来测量激光靶耦合产生的电磁脉冲,通过天线馈源处接收到的信号幅度反推出空间电场强度。另外,用于高功率微波系统中的辐射天线,除了要求天线具备超宽的阻抗带宽和整个频带内固定的相位中心外,还要求天线具备较高的辐射效率,对低频信号具有较高的辐射能力^[10],同时尽量保持天线辐射脉冲的形状,使天线辐射出的能量不至于在超宽的频带范围内分散开来。

由于实验中待测的信号频谱非常宽(从 100 MHz~5 GHz 以上),因此需要采用超宽带天线来做到在整个频域信号的接收。天线输入阻抗为:

$$Z_0=\frac{V(r)}{I(r)}\frac{\eta}{\pi}\ln\left(\cot\frac{\theta_h}{2}\right) \quad (3)$$

通过终结无限双锥的延伸就形成了有限双锥天线,首先从无限长双锥天线入手,进而考虑有限半径 r 的双锥天线的情况。当向外的球面波到达半径 r 处时,反射的那部分能量导致储能。对于其余的能量辐射,垂直于轴的方向比近锥面的方向辐射得更多。按传输线概念给出辐射阻抗 Z_i 为:

$$Z_i=Z_k\frac{Z_k+jZ_m\tan\beta r}{Z_m+jZ_k\tan\beta r} \quad (4)$$

式中: r 为锥长; $\beta=2\pi/\lambda$; $Z_k=120\ln\cot(\theta/4)$; $Z_m=R_m+jX_m$ 。

由此可以看出,盘锥形天线的输入阻抗是其电长度 βr 的函数,由 Z_i 随电长度 βr 变化的快慢程度所决定。

天线的仿真结果如图 2、图 3 所示,设计的电磁脉冲天线在圆锥口圆心位置增益最小,圆锥喇叭口位置增益最大,而且天线在高频(5 GHz)具有更好的定向性,在特定方向具有更高的增益,而低频(1.2 GHz)可以在多个方向获得较高的增益。

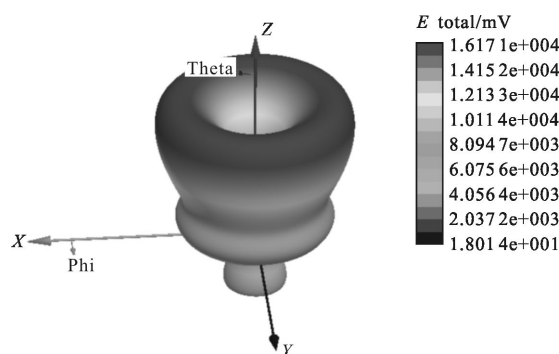


图 2 天线三维增益方向图(5 GHz)

Fig.2 3D gain pattern of antenna (5 GHz)

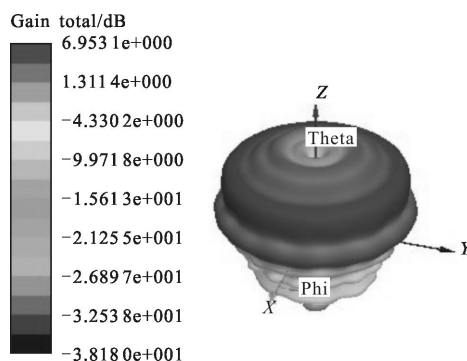


图 3 天线三维增益方向图(1.2 GHz)

Fig.3 3D gain pattern of antenna (1.2 GHz)

3 实验结果与分析

文中实验在神光 III 原型装置靶场完成,靶室为一个密闭真空球体,激光在西偏北 22.5° 方向射入轰击金属靶,如图 4 所示。天线通过支架被固定在靶室透明法兰口 A 位置,利用同轴线连接天线与示波器,采集原型装置激光与金属靶撞击相互作用产生的电磁脉冲信号。

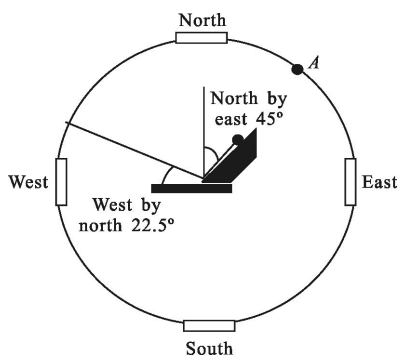


图 4 天线测试点分布图

Fig.4 Test point distribution of antenna

所有实验数据都使用8G 带宽示波器进行测量,测试过程中使用防浪涌插线板并且为示波器加了防护罩,传输所用的是专门为神光Ⅲ原型装置试验场地测试设备定制的防辐射同轴线,同轴电缆与示波器连接处中接入相应的衰减器,将电磁脉冲信号衰减到示波器量程内。测试结果如图 5~8 所示。

如表 1 所示,Shot 1 信号与 Shot 2 信号靶条件(靶的材质、形状、尺寸、安放位置与角度)完全相同,但是 Shot 1 信号为主光束前八路激光加背光源第九路激光打靶,主光束 3ω 能量总和为 5 600 J,脉宽 3 ns,背光源激光 3ω 能量为 1 000 J,脉宽 3 ns。Shot 2 信号为背光源第九路激光打靶, 3ω 能量为 1 000 J,脉宽 3 ns。

图 5 为 Shot 1 和 Shot 2 信号产生的场强分布,场强值由实验测量信号经基洪诺夫正则化所得,从激光脉冲作用到金属表面开始,天线记录到迅速产生的高频振荡和逐渐衰减的电磁脉冲信号。Shot 1 信号持续 150 ns 左右,峰值为 250 V/m,出现在 10 ns 左右。Shot 2 信号持续 150 ns 左右,峰值为 200 V/m,出现在 10 ns 左右。激光靶的耦合作用时间为 3 ns,而产生的电磁脉冲持续时间长达 150 ns,这主要是由于打靶过程发生在密闭的靶室内,电磁脉冲持续反射,形成了密闭的谐振腔,使信号振荡持续时间延长。图 6 为图 5 中的信号经快速傅里叶变换(FFT)后所得频谱,Shot 1 和 Shot 2 产生电磁脉冲频率主要分布在 0~3 GHz,Shot 1 特征频率为 0.4 GHz,0.6 GHz,1.2 GHz,Shot 2 特征频率为 0.2 GHz,0.4 GHz,1.2 GHz。在特征频谱方面,Shot 1 的特征频谱比 Shot 2 高,从公式(2)可以看出,电磁脉冲强度和激光能量强度有

关,当激光通量 Φ 增大时,逸出电子振荡更加剧烈,形成电子流能量加强,从而电磁振荡更加剧烈。

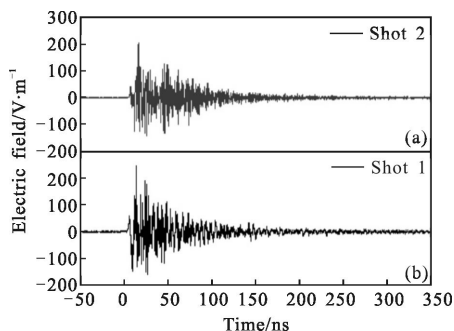


图 5 Shot 1 和 Shot 2 电磁脉冲信号场强时域分布

Fig.5 Time-domain distribution of electric field intensity

(Shot 1 and Shot 2)

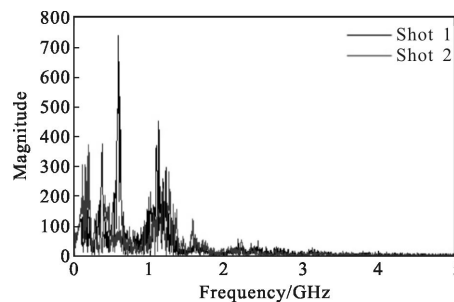


图 6 Shot 1 与 Shot 2 电磁脉冲信号频域分布

Fig.6 Frequency-domain distribution of electromagnetic pulse signal

(Shot 1 and Shot 2)

表 1 各发次激光束能量与靶条件对比

Tab.1 Comparison of laser beam energy and target conditions

	Energy of main laser beams/J	Energy of backlight/J	Pulse width /ns	Target
Shot 1	5 600	1 000	3	Hohlraum
Shot 2	0	1 000	3	Hohlraum
Shot 3	3 200	0	3	Flat target
Shot 4	0	2 700	3	Flat target

如表 1 所示,Shot 3 信号与 Shot 4 信号靶条件(靶的材质、形状、尺寸、安放位置与角度)完全相同,但是 Shot 3 信号为主光束 N3、N4、S3、S4 四路激光发射打靶,激光 3ω 能量总和为 3 200 J,脉宽 3 ns。Shot 4 信号为背光源第九路激光打靶, 3ω 能量为 2 700 J,脉宽 3 ns。

图 7 为 Shot 3 和 Shot 4 信号产生的场强分布,场强值由实验测量信号经基洪诺夫正则化所得,Shot 3 信号持续 150 ns 左右,峰值为 420 V/m,出现在 7 ns 左右。Shot 4 信号持续 200ns 左右,峰值为 610 V/m,出现在 7 ns 左右。图 8 为图 7 中的信号经 FFT 后所

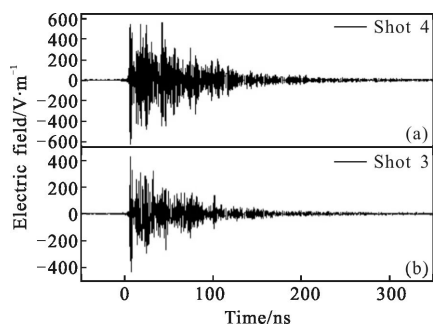


图 7 Shot 3 和 Shot 4 电磁脉冲信号场强时域分布

Fig.7 Time-domain distribution of electric field intensity (Shot 3 and Shot 4)

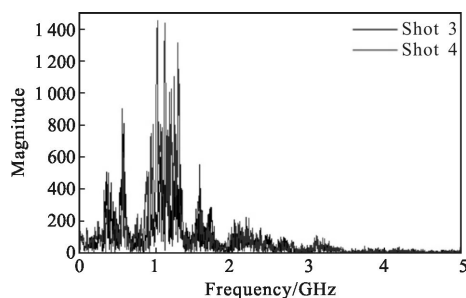


图 8 Shot 3 与 Shot 4 号电磁脉冲信号频域分布

Fig.8 Frequency-domain distribution of electromagnetic pulse signal (Shot 3 and Shot 4)

得频谱,Shot 3 和 Shot 4 频率主要分布在 0~3.5 GHz, Shot 3 特征频率为 0.4GHz,0.6GHz,1.2 GHz,1.6 GHz, Shot 4 特征频率也为 0.4 GHz,0.6 GHz,1.2 GHz,1.6 GHz。在时域方面,背光源第九路打靶 Shot 4 信号场强频谱明显比 N3、N4、S3、S4 四路主光束激光打靶的 Shot 3 信号产生的电磁脉冲强烈,这主要是由于背光源第九路激光在水平方向打靶,而 N3、N4、S3、S4 四路主光束分别斜向上、斜向下射入金属靶,N3、N4 分别和 S3、S4 相对于水平面对称,由图 1 构建的模型,推测两者产生的部分电子流相互作用,使 N3、N4、S3、S4 四路主光束产生的电磁脉冲强度低于背光源单路打靶。在频域方面,两者具有大体相同的特征频率,这里可以推断对于平面靶,在相同靶型和靶材质情况下,不同能量的激光作用发出的电磁

脉冲具有相似的频谱和相同的特征频率。

结合实验结果得出结论,在神光 III 原型装置打靶过程中,产生电磁脉冲持续时间远远大于激光靶的耦合作用时间,这主要是由于打靶过程发生在密闭的靶室内,电磁脉冲持续反射,形成了密闭的谐振腔,使信号振荡持续时间延长。电磁脉冲强度和激光能量强度有关,激光能量增强导致逸出电子振荡更加剧烈,形成电子流能量加强,从而电磁振荡更加剧烈。对于平面靶,在相同靶型和靶材质情况下,不同功率激光作用发出的电磁脉冲具有相似的频谱和相同的特征频率。此外,不同的打靶方式、不同的入射角度对产生电磁脉冲强度具有巨大的影响。

4 结 论

文中设计了用于强激光靶耦合诊断的超宽带电磁脉冲天线,利用该天线对神光 III 原型高功率激光装置的电磁辐射进行了实验测量,对激光装置实验场地内 0.1~5 GHz 频段的电磁辐射强度和频谱进行了实验测量和评估,获取时域和频域信息。在所进行的实验激光靶耦合过程中,由于密闭靶室的原因,电磁脉冲不断反射,导致产生电磁脉冲持续时间远远大于激光靶的耦合作用时间,在靶室外测得电磁脉冲的场强高达 610 V/m。影响电磁辐射强度的因素有激光能量、激光打靶方式和入射方向等。而对于平面靶,在相同靶型和靶材质情况下,不同功率激光作用发出的电磁脉冲具有相似的频谱和相同的特征频率。所研究的工作对评估神光装置电磁脉冲干扰有着重要的参考价值,同时为发展强电磁脉冲屏蔽和诊断技术提供了研究基础。

参 考 文 献:

- [1] Poye A, Hulin S, Bailly-Grandvaux M, et al. Physics of giant electromagnetic pulse generation in short-pulse laser experiments[J]. *Phys Rev E*, 2015, 91(4): 043106.
- [2] Zhuo H B, Chen Z L, Sheng Z M, et al. Collimation of energetic electrons from a laser-target interaction by a magnetized target back plasma preformed by a long-pulse laser[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112: 215003.
- [3] Pearlman J S. Emission of rf radiation from laser produced plasmas[J]. *J Appl Phys*, 1978, 49(1): 457-459.
- [4] Felber F S. Dipole radio-frequency power from laser plasmas

- with no dipole moment[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 86: 231501.
- [5] Dubois J L, Lubrano-Lavaderci F, Raffestin D, et al. Target charging in short-pulse-laser-plasma experiments [J]. *Phys Rev E*, 2014, 89(1): 013102.
- [6] Drouet M G, Bolton R. Distribution of self-generated current in laser-produced plasmas [J]. *Phys Rev Lett*, 1976, 36(11): 591–594.
- [7] Tidman D A, Stamper J A. Role of magnetic fields in suprathermal particle generation by laser produced plasmas [J]. *Appl Phys Lett*, 1973, 22: 498–499.
- [8] Stamper J A. Review on spontaneous magnetic fields in laser-produced plasmas: Phenomena and measurements [J]. *Laser Part Beams*, 1991, 9: 841–844.
- [9] Yan Chuanxiang. Research on impulse-radiation antenna of high power microwave system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 11–18. (in Chinese)
闫传祥. 高功率微波系统中脉冲辐射天线的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 11–18.
- [10] Zhang Lianhong. Study of UWB time-domain antenna array beam-scanning microwave and optical technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010: 13–17. (in Chinese)
张连红. 超宽带脉冲天线及其阵列波束扫描的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010: 13–17.