

强激光辐照平面靶与柱腔靶产生电磁脉冲对比研究

杨 鸣¹ 易 涛² 杨进文^{1,2} 王传珂^{2*} 李廷帅¹ 刘慎业² 江少恩² 丁永坤²

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 通过脉冲接收天线的设计和测试方法的优化,建立了神光Ⅲ原型激光器电磁脉冲(EMP)的强度分布等激光参数和靶型的关系,为进一步研究它们的产生机理和激光靶相互作用提供实验依据。考虑到电磁场极化方向的不确定性,使用三个相互正交的环形磁天线对激光装置靶室内部的电磁脉冲信号进行了测量,对比分析了两种靶型辐射电磁脉冲信号的频域特性,探讨了天线摆放位置对信号强度的影响,同时通过多物理场模拟对球形腔内电磁场的分布进行了分析。

关键词 激光技术; 电磁脉冲; 天线; 模拟

中图分类号 TL65; TL67

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0801009

Comparative Investigation of Electromagnetic Pulses Generated by Strong Laser Irradiating Planar and Hohlräum Targets

Yang Ming¹ Yi Tao² Yang Jinwen^{1,2} Wang Chuanke² Li Tingshuai¹
Liu Shenye² Jiang Shao'en² Ding Yongkun²

¹School of Energy Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

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

Abstract By designing pulsed receiving antennas and optimizing test methods, the relationship between laser parameters, such as intensity distribution of electromagnetic pulses (EMPs) from SGIII prototype laser facility and target type is established, which can provide an experimental basis for further investigating EMP generation mechanism and laser-target interaction. Based on the consideration of the polarization direction uncertainty of electromagnetic fields, three mutual orthogonal magnetic loop antennas are selected to measure the EMP signal inside the target chamber of the laser facility. A comparative analysis on the frequency features of the EMP signals from two kinds of targets is conducted, and the influence of antenna position on the signal strength is discussed. At the same time, the distribution of EMPs inside the spherical chamber is analyzed by multi-physics simulation.

Key words laser technique; electromagnetic pulse; antenna; simulation

OCIS codes 140.3295; 140.3538; 350.5610

1 引 言

惯性约束核聚变(ICF)是实现可控核聚变的重要途径之一,其原理为利用高功率激光、高功率电磁脉冲

收稿日期: 2016-02-05; 收到修改稿日期: 2016-04-14

基金项目: 中央高校基本科研基金(ZYGX2015J108)

作者简介: 杨 鸣(1993—),女,硕士研究生,主要从事脉冲激光产生的电磁脉冲方面的研究。

E-mail: 15102885415@163.com

导师简介: 李廷帅(1983—),男,博士,副教授,主要从事强激光材料相互作用产生等离子体机制方面的研究。

E-mail: litingshuai@uestc.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: wck1981@caep.cn

和高能重粒子束作为外部能源,直接或者间接驱动含热核燃料(氘、氚)的靶丸内爆,压缩燃料至高温高密度的状态,从而发生核聚变^[1]。高功率激光装置打靶会产生大量的电磁辐射,对靶室内外的诊断设备和电子器件会产生严重干扰^[2],甚至导致诊断设备出现故障,无法准确地对物理量进行测量。为保障物理实验的正常进行,保证信号测量的精确性,迫切需要从产生机制和辐射特性方面对电磁脉冲展开研究。

脉冲强激光与靶耦合过程中产生的电磁脉冲信号涵盖了极宽的频谱范围^[3],从低频的太赫兹及射频辐射波段,一直延伸到高频的 γ 射线、X射线、深紫外线波段,耦合过程中产生电磁脉冲的时间非常短,只有几纳秒,因此它的频谱宽且能量高,需要选取合适的脉冲天线对它进行测量。Brown等^[4]采用环形线圈探测器(B-dot)和单极子天线探测器(D-dot)放在国家点火装置(NIF)和泰坦(Titan)装置的靶室内,分别对实验过程中产生的磁场和电场进行测量,得到了特定条件下电磁脉冲的强度和频谱分布。杨正华等^[5]采用电场测试天线,对神光III原型靶室电场干扰数据进行了初步测量,得到靶室内距离靶心550 mm处的电场干扰强度达到了26 kV/m,靶室外2200 mm处强度为978 V/m。Mead等^[6]使用莫比乌斯(Moebius)环形天线探测了火神(Vulcan)激光器产生的电磁脉冲信号,得到了中心频率为63 MHz、最大磁场强度为4.3 A/m的信号。Consoli等^[7]使用一种超宽带偶极子天线与单极子天线对激光器电磁脉冲信号进行了测量,并结合仿真分析了电磁脉冲强度大小和对应频谱的关系。

电磁脉冲的准确测量可为材料辐射特性的研究提供实验依据,但由于电磁脉冲的产生机制十分复杂,目前对其产生机制的解释尚不完善,还存在许多无法解释的现象。为了完善对激光与靶耦合物理过程的解释,研究人员进行了前期探索。Dubois等^[8]建立了激光与固体靶耦合模型,通过热电子运动机制初步解释了电磁场的产生机理。Marco等^[9]发现电磁脉冲和回流电流的大小与强激光作用于金靶产生的等离子体的特性相关。Varma等^[10]观测到当纳秒和飞秒激光脉冲同时作用于硼硅玻璃靶和铜靶时,电磁脉冲的能量得到了很大的提升。Krygier等^[11]通过粒子模拟(PIC),提出了产生超热电子的环形注入直接加速机制。

研究人员为阐述电磁脉冲的物理机制所进行的大量工作为后期的研究奠定了基础。随着研究的深入,测试过程中一些容易忽略的问题也应该引起重视,如在电磁脉冲信号测量过程中,天线放置方位的不同对测量值的影响;在打靶条件相同的情况下,激光作用于不同靶型产生的电磁脉冲信号是否存在差异等。本文在前期研究的基础上^[12],对比两种不同靶型辐射电磁脉冲的不同特性,探讨了脉冲频率分布与强激光参数的关系,为深入理解聚变的基本物理过程提供了实验依据。

2 实验装置

该实验在神光-III原型装置靶场完成,实验装置如图1所示,靶型以柱腔靶为例。原型装置为神光-III主机的工程样机,可输出8束口径为290 mm、波长为0.351 μm 、脉宽为1 ns、输出能量达10 kJ和波长为0.351 μm 、脉宽为3 ns、输出能量达15 kJ(长脉冲)的紫外激光^[13-14]。实验中8束激光从靶室上下两个方向相对于柱腔轴线成45°方向注入腔内,最终会聚到靶材上。

激光打靶各发次的激光束能量与靶条件的对比见表1,选取的9组数据都是在靶室内测得。一般情况

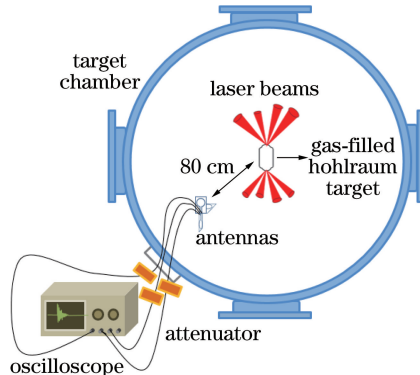


图1 实验装置布局

Fig. 1 Arrangement of experimental setup

下,8路三倍频激光分别从N1、N2、N3、N4、S1、S2、S3、S4方向入射或者再加入背光源入射,最终各路激光会聚于靶上。在本次实验过程中,没有加入第9路激光束背光源能量,第1~3发只有常规8路激光束中除去S4路以外的7路激光束进行打靶,第4~9发只接收了N1、N2、N3这三路激光束进行打靶。

表 1 打靶信息

Table 1 Targeting information

	Light energy of laser beam /J	Light energy of backlight /J	Pulse width /ns	Focal spot size / μm	Target type	Target material
Shot 1	4647	0	0.5,1	500	Gas-filled hohlraum target	Au
Shot 2	4863	0	0.5,1	500	Gas-filled hohlraum target	Au
Shot 3	5124	0	0.5,1	500	Gas-filled hohlraum target	Au
Shot 4	2053	0	3	500	Au-disk target	Au
Shot 5	2187	0	3	500	Au-disk target	Au
Shot 6	1378	0	3	500	Au-disk target	Au
Shot 7	2214	0	3	500	Au-disk target	Au
Shot 8	2286	0	3	500	Au-disk target	Au
Shot 9	2882	0	3	500	Au-disk target	Au

实验选取柱腔靶和平面靶两种靶型,如图2所示。柱腔靶尺寸为 $1.0\text{ mm}\times 2.1\text{ mm}$,腔两端激光注入孔直径为 0.8 mm ,腔壁厚度为 $25\text{ }\mu\text{m}$,柱腔靶轴线沿南北方向,侧面狭缝对准第9路,激光脉宽为 $(0.5+1)\text{ ns}$,其中 0.5 ns 为预脉冲, 1 ns 为主脉冲,波形对比度为 $1:10$ 。平面靶直径为 1.0 mm ,靶面朝向第9路,激光脉宽为 3 ns 。在保持靶参数相同的条件下,调整各发次的激光束能量,对比分析脉冲信号分布的规律。其中,第1~3发的打靶都选用柱腔靶,第4~9发的打靶都选用平面靶。

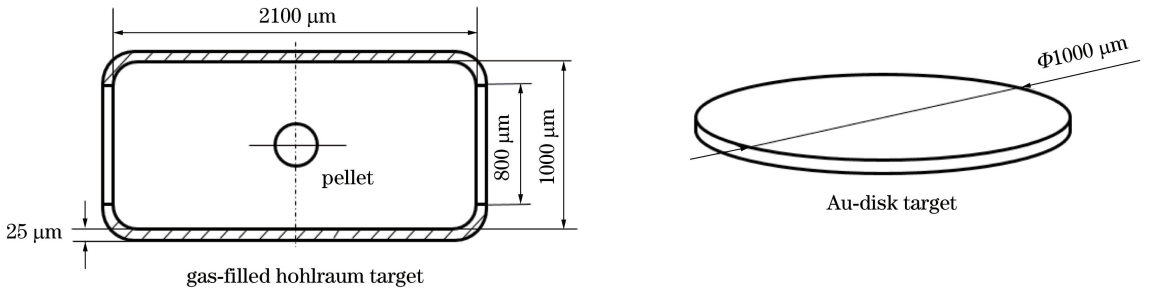


图 2 两种靶尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sizes of two kinds of targets

实验采用三个环形磁天线,在空间上相互正交放置,如图3(a)所示,天线通过支架固定在靶室内部。天线与示波器的输入端通过同轴线相连,实验数据由示波器采集。为减少干扰,示波器加套防护罩且传输线采用防辐射同轴线。同时为了防止电压过高引起示波器的损坏,接收天线与示波器之间接入了一定倍数的衰减器,调控脉冲信号至示波器量程范围内。实验天线设计成环状,尺寸较小,有助于避免天线与周围金属的共

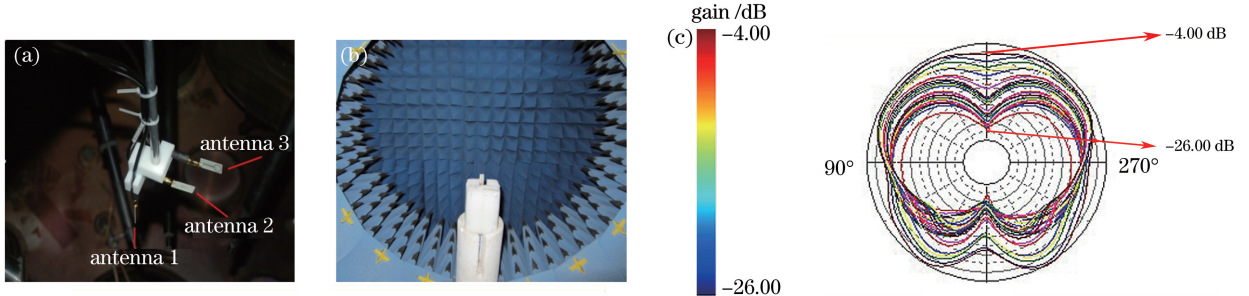


图 3 (a)靶室内天线安装图示;(b)微波暗室中进行标定的天线以及(c)标定结果

Fig. 3 (a) Schematic diagram of antenna installation inside target chamber; (b) antenna calibration in microwave anechoic chamber and (c) calibration results

振;天线的尺寸是影响频率特性的重要参数,小天线有利于宽频电磁脉冲信号的测量。天线基板材质采用FR-4环氧树脂板,实验前使用仿真软件对天线进行优化得到天线的最佳尺寸:外环半径为5 mm,环宽为1 mm。

实验前对天线进行标定。图3(b)所示为正在标定的天线,图3(c)所示为测试得到的天线辐射方向图,左侧彩条不同颜色对应不同大小的增益。从图3(c)可以看出,天线具有很好的全向性,能够实现对外室内各个方位电磁脉冲信号的采集。

3 实验分析

3.1 靶室内柱腔靶和平面靶辐射电磁脉冲的测量与对比分析

环形磁天线可以认为是一个放置于待测等离子体区域附近的导电线圈,根据法拉第电磁感应定律可知,处于磁场中的线圈磁通量的改变会产生感应电动势,天线接收到的信号通过A类超小型(SMA)同轴线传送给示波器,示波器最终输出数据即为天线处的电压时域分布,通过傅里叶变换(FFT),将时域信号变为频域信号。图4所示为柱腔靶对应天线的电压频域分布,图5所示为平面靶对应天线的电压频域分布。从图4、5可以看出,电磁脉冲的频域分布较广,能量峰值较强。柱腔靶对应天线峰值簇在0~3 GHz频域范围内,在0.6,1.0,1.6 GHz处出现明显的峰,靶型相同但打靶能量不同的第1~3发对应打靶结果的峰值强度分别为5860、14000和12000。平面靶对应天线的峰值簇在0~2 GHz频域范围内,在0.2,0.5,0.8,1.2 GHz处出现明显的峰,靶型相同但打靶能量不同的第4~9发对应打靶结果的峰值强度分别为980、3950、4230、3200、4400和4200。

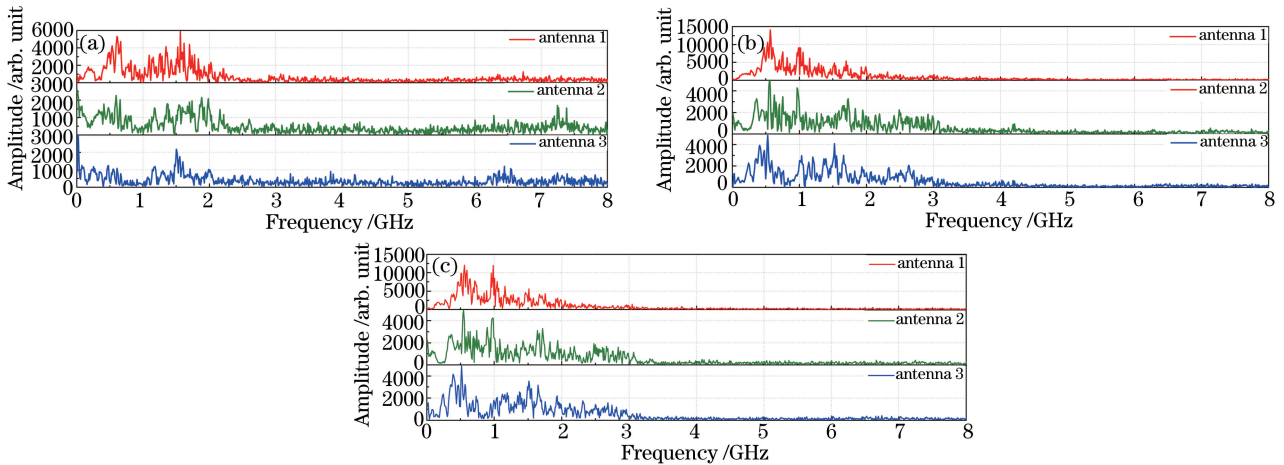


图4 柱腔靶对应天线的频谱。(a)第1发;(b)第2发;(c)第3发

Fig. 4 Spectra of antennas for hohlraum target. (a) Shot 1; (b) shot 2; (c) shot 3

由图4、5可以看出,柱腔靶对应的电磁脉冲信号峰值簇范围较大,电磁脉冲峰值较高,且shot 1~shot 3与shot 4~shot 9在不同频率处均出现波形尖峰。除了对打靶能量的影响外,靶型对电磁脉冲特性也有影响。图6所示为柱腔靶与平面靶在激光入射时的示意图,不同靶型所得到的电磁脉冲强度有差别,可能原因如下:1)激光与两种靶所成的立体角不同,柱腔靶对应的立体角更小;2)两种靶对应的焦斑尺寸有差别,根据 $I_L = E / (\pi R^2 \Delta t)$ (I_L 为打靶激光的功率密度, R 为焦斑半径, E 为激光能量, Δt 为激光脉宽),柱腔靶为聚焦打靶,焦斑更小,得到的功率密度更大,即X射线和电磁辐射较强;3)柱腔靶真空封闭,激光可多次辐射,即与金腔壁多次作用,而平面靶靶面开放,激光与靶材一次作用,因此靶型对电磁脉冲强度影响较大。另外激光功率密度不同也会对电磁脉冲强度产生影响。

天线距离靶室中心80 cm,在信号衰减之前能迅速接收到较强能量的电磁脉冲信号,所以电磁脉冲强度峰值量级较大。电磁脉冲频域分布图中,颜色相同的波形所指天线的测试方位相同,观测发现同种靶型测试方位相同的天线所得到的电磁脉冲频域分布基本相同,验证了测量的准确性;不同测试方位的天线虽然峰值位置相似但强度峰值差别较大,说明天线的摆放位置是影响测量电磁脉冲信号的关键因素。

三个天线的方位由图3(a)已经给出,其中antenna 1在靶室内垂直放置,环面正对靶心,antenna 2水平

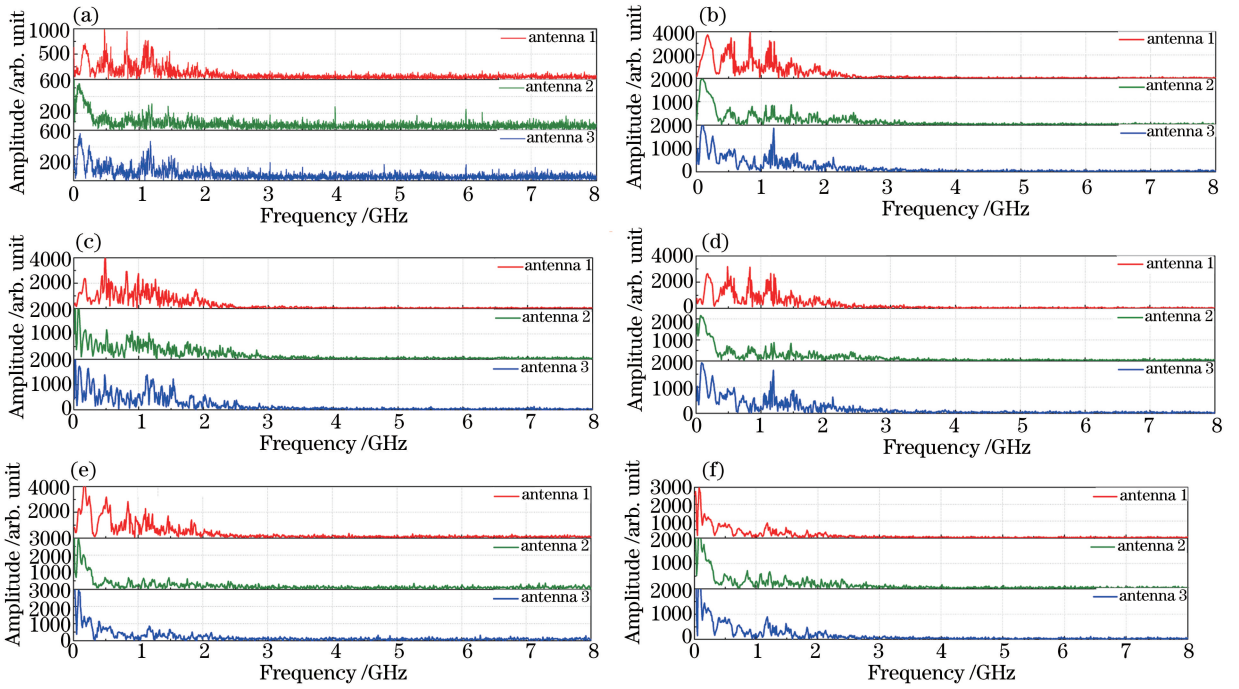


图5 金平面靶对应天线的频谱。(a) 第4发；(b) 第5发；(c) 第6发；(d) 第7发；(e) 第8发；(f) 第9发
Fig. 5 Spectra of antennas for planar Au target. (a) Shot 4; (b) shot 5; (c) shot 6; (d) shot 7; (e) shot 8; (f) shot 9

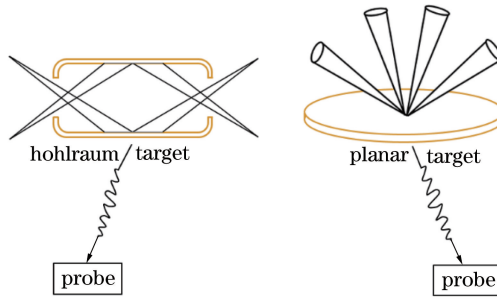


图6 激光与两种靶相互作用示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of laser interaction with two kinds of targets

放置,环面朝下,antenna 3 水平放置,环面朝前。三个天线在打靶能量相同的情况下,位置差异导致接收到的电压信号有很大差异,即测量得到的电磁脉冲强度不同。图7、8 分别是两种靶型对应天线的摆放位置与峰值电压的关系。靶型为柱腔靶时,antenna 1~antenna 3 测得的峰值电压呈递减关系,antenna 1 接收到的电磁脉冲信号最强,antenna 3 接收到的电磁脉冲信号最弱;当靶型为平面靶时,antenna 1 测得的峰值电压

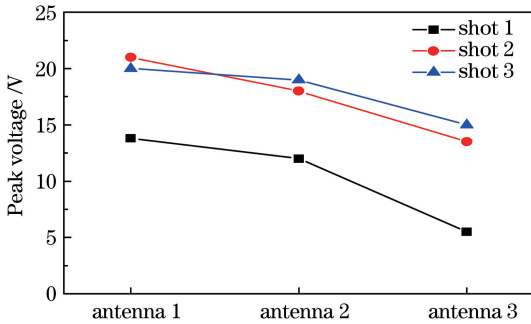


图7 柱腔靶对应的天线摆放位置与峰值电压的关系
Fig. 7 Relationship between antenna position and peak voltage for hohlraum target

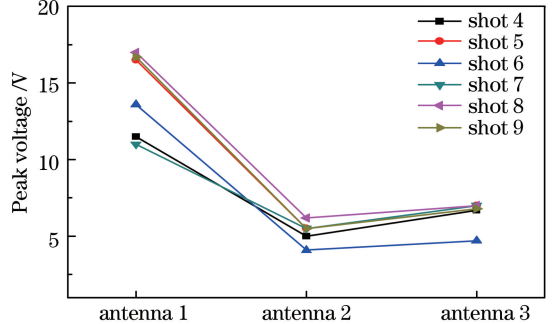


图8 金平面靶对应的天线摆放位置与峰值电压的关系
Fig. 8 Relationship between antenna position and peak voltage for planar Au target

最大, antenna 2 的峰值电压最小。打靶能量发生变化时,两种靶型对应的三个天线的峰值电压的相对大小关系并不会变化。

强激光与靶作用会产生等离子体,等离子体的密度梯度和温度梯度不共线而产生环形自生磁场^[15],电子在自生磁场中发生漂移离开靶面,并在靶后激起电磁辐射,形成由靶后表面指向靶外的静电场^[16]。由于静电场的存在,靶后形成很强的静电分离势,在静电分离势的作用下电子会被拉回并以等离子体频率作往复振荡^[17]。其中基于强激光与靶材相互作用的自生磁场的产生机制和空间分布随时间的演化关系,研究人员利用软件仿真(如 PIC)、数值模拟、理论推导和实验设计的方法对其展开了一系列的研究^[18-19]。另外 Poyé 等^[20]将靶/支架系统当作偶极天线处理,给出了偶极辐射模型,认为激光打靶过程产生了大量超热电子和 X 射线,超热电子从靶材的逃逸和回流造成了靶材的充放电。从图 4、5 可以看出,电磁辐射信号分布在一些分立的频段内, Poyé 认为这是由不同能量的超热电子在多次回流出射过程中产生的不同频率电磁脉冲引起的,而 Perlman 等^[21]认为这是电磁波在金属真空腔中的本征模式引起的。

3.2 靶室内电磁辐射理论与建模分析

电磁脉冲在靶室内的辐射具有持续时间短、频谱宽的特点,打靶过程靶室封闭,室内为真空,能量在一定范围内被限制在靶室内部,所以辐射损耗较小,因此可以将靶室当作一个微波谐振腔进行分析。根据 Helmholtz 方程,腔中电场和磁场满足:

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 k 为波数, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{H} 为磁场强度。假定腔的内表面是理想导体,那么电磁场应满足边界条件:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0, \quad (2)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{H} = 0, \quad (3)$$

式中 \mathbf{n} 为所求边界的外法向单位矢量。

求解满足边界条件的 k 值就可以得到一系列的本征值 k_i ($i=1, 2, 3, \dots$), 每个 k_i 对应一种模式的谐振频率 f_{0i} :

$$f_{0i} = \frac{vk_i}{2\pi} = \frac{k_i}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad i=1, 2, 3, \dots, \quad (4)$$

式中 v 为光在介质中的速度, ϵ 为介电常数, μ 为磁导率。为了模拟靶室内的电磁场分布,建立了图 9 所示的球状模型,球形半径 $a=1.35$ cm,本征频率 $f_0=9$ GHz。图中红色箭头表示在腔中上下对称分布的电场,灰色箭头表示呈环形分布的磁场,球体的颜色表示腔中电场的强弱分布,可知电场强度最大值为 1191.6 V/m,最小值为 2.1963 V/m,其值不代表靶室内电场的真实大小,只是对靶室周边电磁场分布的定性估算。电场最大值出现在靶心,远离靶心电场逐渐减弱。一些研究结果表明电场强度与 $1/r^2$ 呈正比,其中 r 为天线到靶室中心的距离^[5,22]。

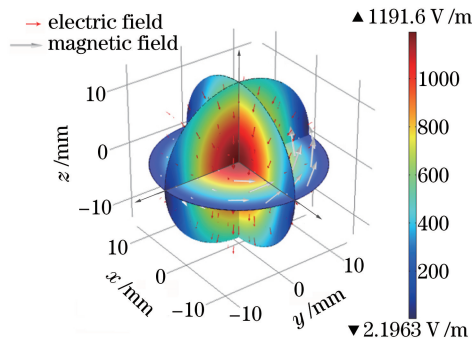


图 9 模拟的靶室内部电磁场分布

Fig. 9 Simulated electromagnetic distribution inside target chamber

Dubois 等^[8]结合 PIC、蒙特卡罗和电磁代码三种模拟软件,对激光辐照平面靶造成部分热电子逃逸进而产生电磁场的过程进行了建模理论研究。结果表明,如果激光均匀注入到平面靶表面,产生的电磁脉冲信

号就具有对称性的空间分布,但是激光与靶相互作用会产生等离子体,这使得靶表面情况十分复杂,出射脉冲无法保持严格的对称性,必然会有一定的频率分布,因此空间分布和强度有差异。该情况切合此处建立的简单模型,把靶室中心作为辐射源,设该源向腔内任意方向的电磁辐射几率相等,频率对电磁脉冲分布有较大影响。对于柱腔靶,激光在靶上的会聚比平面靶更复杂,何武等^[23]采用并行的二维全相对论电磁 PIC 程序 OPIC2D 进行了数值模拟,用一束超短超强的激光脉冲入射真空柱腔靶产生超热电子,结果发现超热电子束被准静态的电场和磁场约束在内壁表面附近,因此电磁辐射的方向不再具有全向性,本实验选取的测试方位恰好处在柱腔靶覆盖的范围内,所以可以测得较大的强度值。这一结果也可以从文献^[23]模拟获得的电子角分布中得到证实。但是对于实际靶室而言,由于室壁上很多法兰口和靶室内部很多诊断设备的存在,造成模拟时方程的边界条件十分复杂,还需进一步更深入的探索。

4 结 论

对强激光与柱腔靶、平面靶两种不同靶型耦合产生的电磁脉冲在靶室内的分布进行了测试与分析。柱腔靶对应的信号频谱范围较宽,由于柱腔靶的打靶能量高于平面靶,因此电磁脉冲信号峰值较大。另外,用于测量电磁脉冲的三个相互正交的环天线测量方位的不同导致信号强弱有差别,环面正对靶心的 antenna 1 得到的电磁脉冲信号最强,且三个天线峰值电压的相对大小与打靶能量无关。最后采用球形腔类比激光靶室,利用建模仿真对腔内电磁场进行了简单模拟,得到了电磁场分布情况,有望为更好地理解靶室内激光与物质相互作用的物理过程与脉冲辐射机制提供参考。

参 考 文 献

- Jiang Shao'en, Ding Yongkun, Miao Wenyong, *et al.* Recent progress of inertial confinement fusion experiments in China [J]. Science in China (Series G: Physics Mechanics & Astronomy), 2009, 39(11): 1571-1583.
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: 物理学 力学 天文学), 2009, 39(11): 1571-1583.
- Brown C G, Jr, Ayers J, Felker B, *et al.* Assessment and mitigation of diagnostic-generated electromagnetic interference at the National Ignition Facility[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83: 10D729.
- Eder D C, Throop A, Brown C G, Jr, *et al.* Mitigation of electromagnetic pulse (EMP) effects from short-pulse lasers and fusion neutrons[R]. United States: Lawrence Livermore National Laboratory, 2009: 1-35.
- Brown C G, Jr, Bond E, Clancy T, *et al.* Assessment and mitigation of electromagnetic pulse (EMP) impacts at short-pulse laser facilities[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2010, 244: 032001.
- Yang Zhenghua, Liu Shenye, Xiao Shaoqiu, *et al.* Research of electric field pulse of Shengguang III prototype laser facility target chamber[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, 35(2): 210-214.
杨正华, 刘慎业, 肖绍球, 等. 神光III原型装置靶室电磁干扰测量与分析[J]. 核电子学与探测技术, 2015, 35(2): 210-214.
- 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.
- Consoli F, Angelis R D, Andreoli P, *et al.* Measurement of the radiofrequency-microwave pulse produced in experiments of laser-plasma interaction in the ABC laser facility[J]. Physics Procedia, 2015, 62: 11-17.
- 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.
- Marco M D, Cikhardt J, Krása J, *et al.* Electromagnetic pulses produced by expanding laser-produced Au plasma[J]. Nukleonika, 2015, 60(2): 239-243.
- Varma S, Spicer J, Brawley B, *et al.* Plasma enhancement of femtosecond laser-induced electromagnetic pulses at metal and dielectric surfaces[J]. Optical Engineering, 2014, 53(5): 051515.
- 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]. Phys Plasmas, 2014, 21(2): 023112.
- Yang Jinwen, Yi Tao, Li Tingshuai, *et al.* Electromagnetic pulse characteristic in process of laser shooting[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(10): 103224.
杨进文, 易涛, 李廷帅, 等. 激光打靶过程中的电磁脉冲特性[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(10): 103224.

- 13 Jiang Shao'en, Ding Yongkun, Liu Shenye, *et al.* Recent inertial confinement fusion experiments and diagnostic techniques on the shengguang laser facility[J]. *Physics*, 2010, 39(8): 531-542.
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.
- 14 Yang Dong, Li Sanwei, Li Zhichao, *et al.* Hohlraum physics study on Shenguang-III prototype[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(3): 032014.
杨冬, 李三伟, 李志超, 等. 神光III原型黑腔物理实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(3): 032014.
- 15 Tidman D A, Stamper J A. Role of magnetic fields in suprathreshold particle generation by laser-produced plasmas[J]. *Appl Phys Lett*, 1973, 22(10): 498-499.
- 16 Schwoerer H, Pfotenhauer S, Jäckel O, *et al.* Laser-plasma acceleration of quasi-monoenergetic protons from microstructured targets[J]. *Nature*, 2006, 439(7075): 445-448.
- 17 Umstadter D. Relativistic laser-plasma interactions[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2003, 36: R151-R165.
- 18 Abulikemu A, Abudurexiti A. Self-magnetic field and proton acceleration in a laser plasma interaction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(2): 021401.
阿不力克木, 阿不都热苏力. 激光等离子体中的自生磁场和质子加速[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(2): 021401.
- 19 Abuduresuli, Aierken Zakeer, Palihati Mijiti. Self-generated magnetic field in the interaction of ultraintense laser-plasma slab target[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(8): 083201.
阿不都热苏力, 艾尔肯·扎克尔, 帕力哈提·米吉提. 超强激光与等离子体平面靶相互作用中的自生磁场[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(8): 083201.
- 20 Poyé 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.
- 21 Pearlman J S, Dahlbacka G H. Emission of rf radiation from laser-produced plasmas[J]. *J Appl Phys*, 1978, 49(1): 457-459.
- 22 Brown C G, Jr, Clancy T J, Eder D C, *et al.* Analysis of electromagnetic pulse (EMP) measurements in the National Ignition Facility's target bay and chamber[J]. *EPJ Web Conf*, 2013, 59: 08012.
- 23 He Wu, Zhou Weimin, Zhang Zhimeng, *et al.* High-energy collimated electron acceleration from ultra-intense laser interaction with tube targets[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(7): 072003.
何武, 周维民, 张智猛, 等. 强激光与柱腔靶作用下准直高能电子束的产生[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(7): 072003.