

# 基于电磁辐射的内爆物理实验时序诊断

严颖<sup>1,2</sup>, 江少恩<sup>2</sup>, 易涛<sup>2</sup>, 易有根<sup>1</sup>, 丁永坤<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中南大学物理与电子学院超微结构与超快过程湖南省重点实验室, 湖南长沙 410083;

<sup>2</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900

**摘要** 在内爆物理实验中, 多组激光脉冲在不同时刻与靶相互作用, 产生若干瞬态物理过程。准确诊断这些激光与靶作用产生的瞬态过程之间的时序关系, 对于成功获取实验状态的相关参数非常重要。提出了一种基于电磁辐射的内爆物理实验时序诊断方法, 利用激光与金属靶相互作用时会产生强烈的电磁脉冲辐射, 可获得不同激光与靶作用过程的时序关系, 为判断和控制不同激光与靶作用过程之间的时序提供重要依据。在神光 III 主机大型激光装置上进行的实验测试表明, 基于电磁辐射的内爆物理实验时序诊断方法可以准确确定预脉冲激光、主脉冲激光以及背光激光等与腔靶和平面背光靶之间作用的时序关系。该方法具有操作简单, 测量精度高的优点, 对于精确把握激光与靶相互作用过程的时间关系, 提升实验精度有着重要意义。

**关键词** 测量; 激光脉冲; 时序诊断; 电磁脉冲诊断; 内爆物理实验

中图分类号 O536

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0704007

## Time Sequence Diagnosis of Implosion Physics Experiment Based on Electromagnetic Radiation

Yan Ying<sup>1,2</sup>, Jiang Shaoen<sup>2</sup>, Yi Tao<sup>2</sup>, Yi Yougen<sup>1</sup>, Ding Yongkun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hunan Key Laboratory for Super-Microstructure and Ultrafast Process, College of Physics and Electronics, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

<sup>2</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** In the implosion physics experiment, several groups of laser pulses interact with the target at different times and produce several transient physical processes. Accurately diagnosing the time sequence relationship between these lasers and the transient process generated by the laser and the target is very important for successfully obtaining the relevant parameters of the experimental state. A time sequence diagnosis method of implosion physics experiment based on the electromagnetic radiation is proposed. It can produce intense electromagnetic pulse radiation when the laser is interacting with metal targets. The time sequence relationship between different lasers and target action processes can be obtained. It provides an important basis for judging and controlling the time sequence between different lasers and target actions. The experimental tests on Shenguang III host large laser devices show that the time sequence diagnosis method of the implosion physical experiment based on the electromagnetic radiation can accurately determine the time sequence relationship between the preliminary pulse laser, the main pulse laser and the interaction between backlight laser and cavity target and flat backlight target. This method has the advantages of simple operation and high measurement precision. It is of great significance to accurately grasp the time relationship between laser and target interaction and improve experimental accuracy.

**Key words** measurement; laser pulse; time sequence diagnosis; electromagnetic pulse diagnosis; implosion physics experiment

**OCIS codes** 120.1880; 140.3538; 320.5550; 320.7100

收稿日期: 2018-01-24; 收到修改稿日期: 2018-03-07

基金项目: 中南大学 2017 年研究生自主探索创新项目(2017zzts320)

作者简介: 严颖(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事强激光与靶作用产生电磁脉冲诊断方面的研究。

E-mail: 17708488535@163.com

导师简介: 易有根(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高能激光与等离子体相互作用产生的极端高温高密度物理规律方面的研究。E-mail: yougenyi@csu.edu.cn(通信联系人)

# 1 引 言

内爆物理是惯性约束聚变(ICF)领域的重要研究方向之一。在内爆物理实验中,靶主要分为两个部分——黑腔靶和平面靶。黑腔靶用于压缩靶丸实现聚变,平面靶用于提供均匀的背景光源,照亮黑腔内部。激光与靶相互作用过程如下,一部分激光从两端的激光注入孔(LEH)入射黑腔靶,激光在黑腔内壁沉积能量并转化为X射线,这些X射线烧蚀驱动黑腔中心的氘氚燃料靶丸,靶丸向外喷射等离子体的同时产生向内的冲击波压缩靶丸,使其发生内爆并发生热核聚变<sup>[1,3,5,7]</sup>。在产生聚变反应的瞬间,另一部分激光照射平面靶产生高亮度的X射线背景光源,对黑腔内部进行透射成像观察聚变靶丸的内爆状态。由于激光-靶相互作用持续时间极短,需要精确掌握和控制激光与不同靶作用的时序关系,以确保成功捕获内爆瞬态图像。

本文提出了一种基于电磁辐射的内爆物理实验时序诊断方法,能够测量内爆实验中激光与不同靶作用的时序关系。该方法通过测量激光与金属靶相互作用时产生的电磁脉冲辐射来诊断激光与靶作用的时序信息,具有探测时间范围宽、实现方式简单、探测角度广的优点。通过该方法可以获得各激光脉冲与靶作用过程的时序关系,为判断和控制各激光脉冲与靶作用过程之间的时序提供重要依据。精确诊断这些激光靶作用产生的瞬态过程之间的时序关系,对于精确获取实验状态参数以及开展精密物理实验具有重要意义。

# 2 实 验

## 2.1 实验原理

激光与靶作用过程中会产生高温等离子体并向靶外高速喷射,等离子体在喷射时产生电磁脉冲辐射,通过脉宽匹配的电磁脉冲天线接收其产生的电磁脉冲信号,将其转化为电信号并通过宽带示波器进行记录,对电磁脉冲辐射时间进行测量就可以得出激光靶作用产生等离子体的时间。激光注入后电磁脉冲辐射增强,直到激光注入结束电磁脉冲辐射强度达到峰值,随后电磁脉冲辐射逐渐减弱,直到等离子体冷却。因此,可以通过捕获电磁脉冲信号波形,通过波形起始点和峰值点对应时刻,判断激光注入时刻和结束时刻,从而获取时序信息。

由于激光打靶产生的电磁脉冲具有强度高和频谱宽的特点,频谱带宽涵盖几十兆赫兹到5 GHz甚

至更高<sup>[4]</sup>,并且波形与靶型密切相关。因此需要采用宽带脉冲天线捕获电磁脉冲才能准备判断时间信息。激光与不同靶作用的电磁脉冲波形不一样,便于区分不同作用过程。

## 2.2 实验装置

神光 III 主机装置作为此次内爆物理实验的反应装置,有48束激光光束,每束激光的输出能量可达3.75 kJ,脉宽为3 ns,波长351 nm,其峰值功率为60 TW<sup>[6]</sup>。与黑腔主体作用的激光束共40束分为2组:内环激光12束和外环激光28束,两组激光束均包括2个脉冲,即预脉冲和主脉冲。其中,预脉冲激光注入为0时刻,预热靶丸以及腔内气体,4.8 ns主脉冲激光注入压缩靶丸内实现内爆。在此之前有4束背光激光于3.6 ns时刻辐照背光靶产生特定X射线辐照黑腔。实验采用了超宽带的盘锥脉冲天线,如图1所示,盘锥底座直径 $\Phi 1$ 为24.5 mm,盘和锥间距 $D$ 为1 mm,锥高 $H$ 为26.5 mm,锥底面圆直径 $\Phi 2$ 为35 mm<sup>[11]</sup>,盘锥天线带宽从0.01~12 GHz<sup>[8-10]</sup>,天线通过配套的法兰固定装置固定在靶室内壁上,并用同轴电缆与靶室外高速1 GHz示波器相连。实验中还利用X射线衍射(XRD)在赤道面上 $64^\circ$ 和赤道面下 $20^\circ$ 分别测量了软X射线辐射流的强弱。实验总体布局如图2所示,其中DIM为诊断搭载平台,EMP为电磁脉冲。

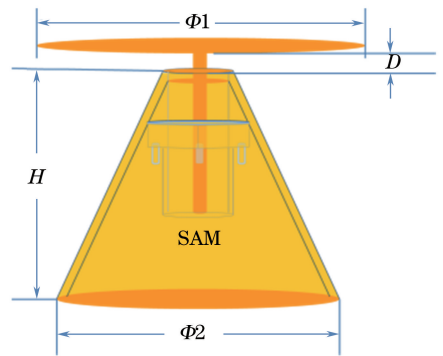


图1 盘锥天线结构示意图<sup>[11]</sup>

Fig. 1 Structural diagram of the cone antenna

实验所用靶为黑腔靶,靶尺寸为 $\Phi 2.4 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$ ,激光注入口 $\Phi 1.2 \text{ mm}$ ,其柱腔轴竖直放置,黑腔主体中心置于靶室基准位;背光靶中心距离黑腔中心3.5 mm,背光靶朝向天线方向。背光靶框架上用厚度为 $5 \mu\text{m}$ 的钼作为背光靶材料,用于给黑腔靶内提供均匀的面光源。与背光靶同一水平线上对开的诊断口上封有一层厚度为 $30 \mu\text{m}$ 的碳氢(CH)薄膜,使背光靶产生的光源从一端窗口进入照亮黑腔内部,在另一端窗口进行成像记录,靶结构示

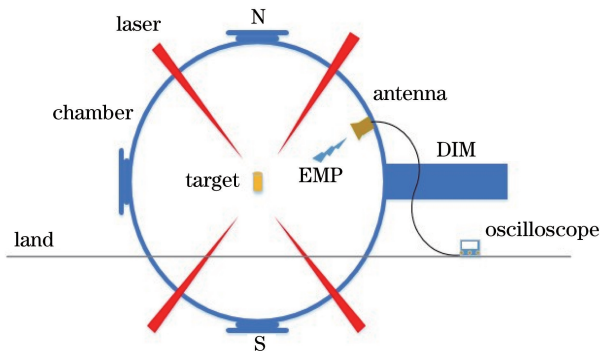


图 2 实验总体布局示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experiment overall layout

意图如图 3 所示。

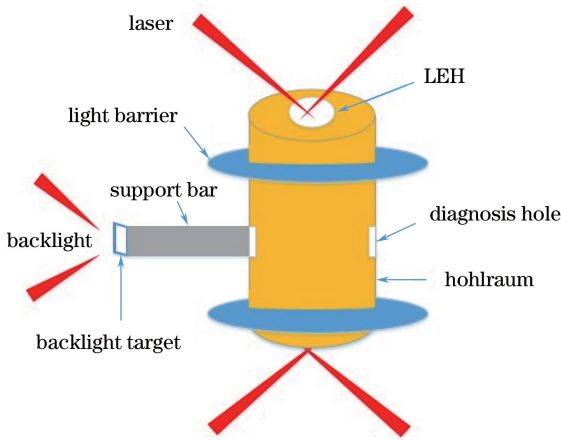


图 3 靶结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of the target

### 2.3 实验结果与分析

实验通过用于电磁脉冲测量的超宽带盘锥天线对激光与靶作用产生的电磁辐射的时序关系进行测量,并用 1 GHz 示波器成功记录了电磁脉冲的强度和时序关系,各激光脉冲与靶作用过程的时序关系,实验结果及相关数据如图 4 所示。盘锥天线是超宽带天线,纳秒级别的时间分辨率,响应频谱宽。此次内爆物理实验测到三个电磁脉冲辐射特征峰 1、3、4,以及一个抖动 2,其中特征峰 1 和抖动 2 幅值和持续时间都相差不大,特征峰 3 峰值最大,特征峰 4 持续时间最长。

此次内爆物理实验的激光注入情况如图 5(a)所示,突出了电磁辐射诊断相对于软 X 射线诊断的位置优势性。实验中共有三组激光辐照靶材料。蓝色和红色线分别代表内环激光和外环激光,两组激光同步注入,并均带有一个预脉冲和一个主脉冲。绿色线代表背光激光,只含有一个脉冲。预脉冲激光 0 ns 时刻注入,总能量为 3.91 kJ,持续时间

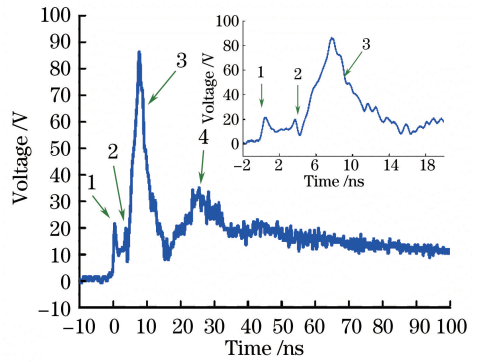


图 4 电磁辐射时序诊断图。插图是 -2~25 ns 时间内的信号放大图,1、3、4 分别表示 3 个时域信号的特征峰,2 表示一个抖动

Fig. 4 Time sequence diagnosis diagram of electromagnetic radiation. The inset is a enlarged drawing of the signal from -2 ns to 25 ns, 1, 3 and 4, respectively, represent the characteristic peaks of three time domain signals, 2 represents a jitter

0.5 ns,背光激光 3.6 ns 时刻注入,总能量 11.91 kJ,脉宽 3 ns。主脉冲激光 5.0 ns 时刻注入,总能量为 68.48 kJ,脉宽 2.5 ns。图 5(a)为背光激光提前于主脉冲激光的激光脉冲波形,电磁诊断信号和 X 射线辐射流大小的时序关系。比较图 5(a)的中图和下图的电磁辐射与 X 射线辐射流,下图蓝线代表的上 64°未探测到背光激光作用产生的 X 射线辐射流,在背光激光射出后未检测到信号,X 射线诊断相比电磁辐射诊断的方法在测量位置上具有局限性。电磁辐射的时序关系和激光的时序关系有着紧密的联系。图 5(b)为 3.5 ns 注入的背光激光与 3.8 ns 注入的主脉冲激光实现基本同步时的电磁辐射时序与激光波形对比图。对比图 5(a),(b)发现,图 5(b)的背光与主激光同步后,电磁时序图与图 5(a)中图相比,图像少了与背光激光提前单独作用对应的一个抖动,即在电磁辐射时序图中只看见了一个特征峰,以此说明两组激光已实现同步,证明电磁辐射诊断在不同情况下的可行性。特征峰的上升沿起始时刻对应激光脉冲的注入时刻,特征峰的上升沿持续时间对应激光脉冲的持续注入时间,特征峰峰值时刻对应激光脉冲结束注入时刻。

图 4 中电磁辐射脉冲的特征峰 1、3、4 和抖动 2 所对应的起始时刻,峰值时刻以及上升沿持续时间与激光参数的注入时刻,结束注入时刻以及脉宽的比较如表 1 所示。图 5(a)中间的盘锥信号图就是图 3 前 8.5 ns 的放大图,由表 1 可知,对应于图 4 中的特征峰 1 的上升沿起始 0 时刻,上升沿持续时间

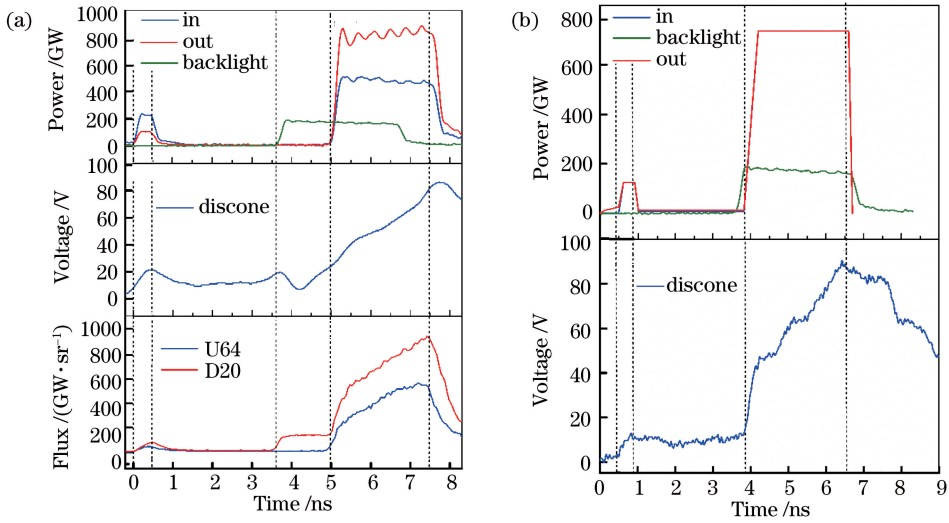


图 5 (a)背光与主脉冲未同步实验图,上图为激光波形,中图为盘锥天线的时域信号,下图为 X 射线辐射流;  
(b)背光与主脉冲同步实验图,上图为激光波形,下图为盘锥天线的时域信号

Fig. 5 (a) Unsynchronized experiment diagram of backlight and main pulse, the upper picture shows the laser waveform, the middle picture shows the time domain signal of disk cone antenna, the bottom picture shows the X-ray radiant flow;  
(b) synchronized experiment diagram of backlight and main pulse, the upper picture shows the laser waveform, the bottom picture shows the time domain signal of disk cone antenna

表 1 时域信号相关值

Table 1 Correlation values of time-domain signal

Item	C1		C2		C3		C4
	Discone	Laser	Discone	Laser	Discone	Laser	Discone
Time of start /ns	0	0	3.6	3.6	5.0	5.0	16.4
Time of peak (end of laser) /ns	0.5	0.5	-	5.0	7.7	7.5	25.4
Time of duration (pulse width) /ns	0.5	0.5	0.7	0.7	2.7	2.5	8.9

0.5 ns, 特征峰峰值时刻为 0.5 ns, 对应图 5(a) 的上图激光波形图中 0 时刻注入, 脉宽 0.5 ns 的预脉冲激光的作用, 即代表预脉冲激光预热加热靶丸以及腔内气体这一物理过程。背光辐照的背光靶为平面靶, 其产生的电磁辐射时序信号主要由起始时刻一个大抖动加上后续部分的小震荡组成<sup>[10-11, 13]</sup>, 图 4 对应的抖动 2 即为前部分的一个大抖动, 无峰值, 其持续时间为 1.4 ns, 代表 3.6 ns 时刻注入的背光激光提前 5.0 ns 时刻注入的主激光 1.4 ns。背光激光脉宽为 3 ns, 抖动 2 代表背光激光在 3.6 ~ 5.0 ns 间辐照背光靶产生高亮 X 射线辐射的作用, 后续作用还将体现在特征峰 3 上。图 4 对应的特征峰 3 的上升沿起始于 5.0 ns 时刻, 上升沿持续时间 2.7 ns, 特征峰峰值时刻为 7.7 ns, 对应 5.0 ns 注入, 脉宽 2.5 ns 的主脉冲激光, 同时背光激光会从 3.6 ns 时刻注入, 6.6 ns 时刻结束, 即该峰代表背光激光辐照背光靶产生高亮 X 射线辐射、主激光脉冲压缩靶丸实现内爆两个物理过程的叠加。由此可见, 电磁辐射脉冲诊断方法相较于传统方法操作简单, 且时域

上精度也相对较高, 仅在特征峰 3 上有 0.2 ns 的延迟, 由于测量精度主要取决于电磁辐射天线特性和数据接收记录的示波器时间分辨率, 如要提高测量精度则可进一步提高诊断设备的整体性能。

结合内爆物理实验所测的电磁辐射诊断结果和激光时序参数可以得出前面特征峰 1、抖动 2 和特征峰 3 分别代表内爆实验的三个主要过程: 第一台阶激光预脉冲预热靶丸以及腔内气体; 背光激光辐照背光靶产生高亮 X 射线辐射; 主激光脉冲压缩靶丸实现内爆。

特征峰 4 所在时刻激光早已结束注入, 属于实验后续阶段靶杆上的补充电流所产生的电磁辐射。激光打靶过程中会有等离子体喷射, 从而产生电磁辐射, 使靶杆带正电, 此时会有靶室上的电流沿着靶支撑机构到靶杆, 形成补偿电流辐射电磁脉冲。

实验表明, 将电磁辐射脉冲特征峰的上升沿起始时刻对应各激光脉冲的注入时刻, 特征峰的上升沿持续时间对应各激光脉冲的脉宽, 特征峰峰值时刻对应各激光脉冲结束注入时刻三个方面分析盘锥

天线特征峰的代表意义,同时还可以从能量方面加以辅证。能量 3.91 kJ 的预脉冲激光作用下测量到的电磁辐射脉冲幅值为 21.6 V,能量为 68.48 kJ 的主激光脉冲和能量约 6.55 kJ 的背光激光脉冲共同作用下测量所得的电磁辐射幅值为 68.48 V,激光能量越大,与靶作用时产生的等离子体也越多,从而产生的电磁辐射强度也越大,所以对比各激光能量与电磁辐射信号幅值也可辅助验证前面得出的结论。

将时域信号与激光的相关参数进行对比,主要从特征峰开始位置和峰值位置分别与激光靶作用的始末时刻以及信号上升沿持续时间与激光脉宽三个方面进行对比分析。电磁脉冲通过天线的接收转化,同轴电缆的传播和示波器不同通道的响应,在时间上会有几十到几百皮秒的延迟,对于纳秒级别的结果影响不大。

### 3 结 论

本文提出了一种基于电磁辐射的内爆物理实验过程时序诊断方法,这种方法通过电磁脉冲的时序信号与激光参数对应分析,诊断出内爆物理实验的三个主要过程:预脉冲激光预热加热靶丸以及腔内气体、背光激光辐照背光靶产生高亮 X 射线辐射、主激光脉冲压缩靶丸实现内爆的时序关系。该方法相对于传统的 X 射线诊断具有探测时间范围宽、实现方式简单、探测角度广的优势。实验通过提升电磁脉冲测量系统的带宽,可以跟踪记录更精密的物理演化过程,获得更高时间分辨率的时序判断。本方法对于惯性约束聚变的聚变过程研究有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] Stefano A, Jurgen M. The physics of inertial fusion [M]. Shen B F, Transl. Beijing: Science Press, 2008: 254-275.  
斯蒂法诺, 尤尔根·梅耶特沃恩. 惯性聚变物理 [M]. 沈百飞, 译. 北京: 科学出版社, 2008: 254-275.
- [2] Zhang Y. The discone antenna in a BPSK direct-sequence indoor UWB communication system [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(4): 1675-1680.
- [3] Yang D, Li S W, Li Z C, *et al.* Hohlräum 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.
- [4] Yang J W, Yang M, Li T S, *et al.* Measurement and

analysis of EMP generated from the interaction between laser and target [J]. Electrical Engineering, 2016(12): 5-10.

杨进文, 杨鸣, 李廷帅, 等. 强激光靶耦合过程中激发的电磁脉冲诊断与分析 [J]. 电气技术, 2016(12): 5-10.

- [5] Jiang S E, Ding S K, Miu W Y, *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, 丁少坤, 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.
- [6] Zheng W G, Wei X F, Zhu Q H, *et al.* SG-III laser facility has successfully achieved 60 TW/180 kJ ultraviolet laser (351 nm) output [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(1): 28019901.  
郑万国, 魏晓峰, 朱启华, 等. 神光-III 主机装置成功实现 60 TW/180 kJ 三倍频激光输出 [J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(1): 28019901.
- [7] Wang G C, Yuan Z S. Inertial confinement fusion [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2005.  
王淦昌, 袁之尚. 惯性约束核聚变 [M]. 北京: 原子能出版社, 2005.
- [8] Yang M, Li T S, Wang C K, *et al.* Characterization of electromagnetic pulses via antenna arrays on Shenguang III laser facility laser [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(10): 101402.
- [9] Gao C X, Yi T, Wang C K, *et al.* Pulse antenna in application of high power laser target electromagnetic pulse diagnosis [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(6): 0606007.  
高崇信, 易涛, 王传珂, 等. 用于强激光靶耦合诊断的脉冲天线 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0606007.
- [10] Yi T, Yang J W, Yang M, *et al.* Investigation into the electromagnetic impulses from long-pulse laser illuminating solid targets inside a laser facility [J]. Photonic Sensors, 2016, 6(3): 249-255.
- [11] Yang J W, Li T S, Yi T, *et al.* Electromagnetic pulses generated from laser target interactions at Shenguang II laser facility [J]. Plasma Science and Technology, 2016, 18(10): 1044-1048.
- [12] Poyé A, Hulin S, Bailly-Grandvaux M, *et al.* Physics of giant electromagnetic pulse generation in short pulse laser experiments [J]. Physical Review E, 2015, 91(4): 043106.
- [13] Yang M, Yi T, Yang J W, *et al.* Comparative investigation of electromagnetic pulses generated by strong laser irradiating planar and hohlraum targets [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0801009.