

文章编号: 2095-4980(2024)04-0412-08

高功率激光装置中瞬态磁场信号的研究

朱宇洁, 郭晓东*, 何鹏, 于明媚

(中国工程物理研究院 计量测试中心, 四川 绵阳 621999)

摘要: 现有高功率激光装置中瞬态磁场测量装置未考虑屏蔽性能和信号还原。为了准确地对打靶后产生的瞬态磁场进行分析, 根据瞬态磁场的频率范围和特点, 基于电磁感应原理, 采用黄铜作为屏蔽材料, 利用皮革作为绝缘材料, 设计并研制了一款适用于高功率激光装置中瞬态磁场测量的传感器。频率响应达到 500 MHz, 完成了相应瞬态磁场的测量, 为高功率激光装置的电磁干扰、电磁兼容方面研究提供了测试手段和数据支撑。

关键词: 瞬态磁场; 瞬态磁场传感器设计; 瞬态磁场测量

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022125

Research on the transient magnetic signal in high-power laser device

ZHU Yujie, GUO Xiaodong*, HE Peng, YU Mingmei

(Metrology and Test Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The existing transient magnetic field measurement in high power laser devices does not consider the shielding and signal reduction. A sensor is designed and developed for transient magnetic field measurement in high power laser devices according to the frequency range and characteristics of transient magnetic field. The brass is taken as the shielding material, and the leather is taken as the insulation material. The sensor is employed to measure the transient magnetic field, and the magnetic field response is up to 500 MHz. This work provides data support for the research on electromagnetic interference and electromagnetic compatibility for high power laser device.

Keywords: transient magnetic field; design of transient magnetic field sensor; measurement of transient magnetic field

高功率激光装置可以用来开展惯性约束聚变物理研究, 在高功率激光工程试验中会产生强烈的瞬态磁场, 这种瞬态磁场具有脉宽窄、幅值高的特点, 其产生的物理机制非常复杂^[1]。高功率激光与靶材料相互作用产生强烈的瞬态磁场, 它携带着激光等离子体的演化信息, 同时也对高功率激光装置靶场的精密诊断仪器带来严重的干扰, 影响实验数据采集的准确性, 严重时将导致诊断设备的损坏^[2]。

为了对高功率激光装置中的瞬态磁场环境进行正确的评估, 需要对高功率激光打靶后的瞬态磁场信号进行分析, 靶场近似一个球状腔体, 一方面, 装置打靶后会产生包括瞬态电磁场、X射线、 γ 射线以及共模信号在内的各种干扰射线, 为了准确地测量瞬态磁场信号, 需要对其他的信号做屏蔽; 另一方面, 由于打靶所产生的瞬态电磁场具有高频特性, 目前前端传感器已经可以对其进行很好的响应, 但由于经传感器转换后的信号均为微分信号, 若要还原被测电磁场信号需要选择与之频率相匹配的积分器, 由于模拟积分器的频率普遍较低, 而数字积分器由于采样设备在不同时间段底噪不同, 积分后的数据存在漂移, 不能直接用来反映被测电磁场的真实大小, 因此需要对微分数据以及积分数据进行进一步的处理。

目前, 国内还没有完整的用于高功率激光装置中瞬态磁场测量的装置, 只是利用未定标的磁场探头对装置内磁场进行粗略定量分析, 因此对磁场大小没有直观的认识。而美国同类型高功率激光装置中已经完成了一整套瞬态电磁场测量装置的研制, 但由于保密性, 并没有向外界公开其相关原理和测量结果。对于商用的传感器, 如国外 MONTENA 公司研制的磁场探头, 由于体积较大, 所占空间较大, 会占用装置内较多空间, 影响其他测试设备的放置, 并且 MONTENA 公司虽然将磁场探头频率做到了 2 GHz, 但其积分器频率仅做到了 300 MHz 左

收稿日期: 2022-06-13; 修回日期: 2022-07-21

*通信作者: 郭晓东 email:715408178@qq.com

右，以至于使用其测量系统最高仅能对 300 MHz 左右的时域脉冲场准确测量，对更高频率信号的测量，没有给出相应的解决方案。

本文研制了一套针对高功率激光装置中瞬态磁场特征的测量装置，用于解决打靶后所产生的磁脉冲辐射的测量问题，通过仿真证明了它能很好地响应 500 MHz 内的瞬态磁场信号，通过试验初步对高功率激光装置中的瞬态磁场进行了测量，试验结果表明测量装置能很好地完成高功率激光装置中瞬态磁场信号的测量。

1 基本原理

根据法拉第电磁感应定律：感应电动势与穿过回路所围面积的磁通量的时间变化率成正比^[3]，如图 1 所示。

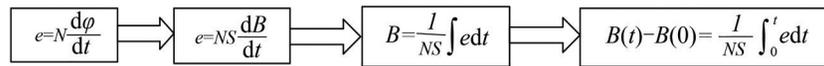


Fig.1 Theoretical formula for pulsed magnetic field measurement
图 1 脉冲磁场测量理论公式推导图

在图 1 中 e 为感应电动势， N 为线圈匝数， ϕ 为通过线圈的磁通量， S 为线圈面积， B 为被测磁场的磁感应强度。如果 $B(0) = 0$ ，积分时间从 0 到被测时间 t_m 出现峰值，此时脉冲磁场见式(1)：

$$B_m = \frac{1}{NS} \int_0^{t_m} e dt \tag{1}$$

根据式(1)，在自由空间时谐场激励下，可以将磁场在线圈上的感应电压等效为^[4-5]：

$$\varepsilon = j\omega NS \dot{B}(j\omega) \tag{2}$$

式中： ε 为感应电压； ω 为角频率； $\dot{B}(j\omega)$ 为瞬态磁场的频域表达式。瞬态磁场探头的等效电路如图 2 所示。

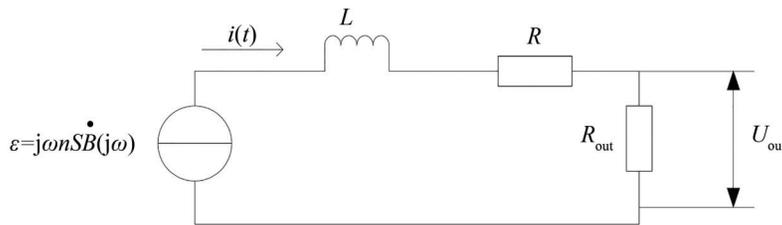


Fig.2 Equivalent circuit diagram of transient magnetic field sensor
图 2 瞬态磁场传感器等效电路图

如图 2 所示，瞬态磁场通过传感器产生的感应电动势作为输入电压分布在传感器线圈、线路电阻以及输出电阻上，将传感器线圈的电感等效为 L ，线路电阻等效为 R ，输出电阻等效为 R_{out} ， U_{out} 表示输出电压， $i(t)$ 表示流经该等效线圈的电流，那么上述等效电路可表示为：

$$\varepsilon = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + R_{out}i(t) \tag{3}$$

将其进行拉氏变换后如下：

$$U_{out} = \varepsilon \times \frac{R_{out}}{j\omega L + R + R_{out}} = j\omega NS \dot{B}(j\omega) \times \frac{R_{out}}{j\omega L + R + R_{out}} \tag{4}$$

如果不考虑线路电阻，那么式(4)可以写为：

$$U_{out} = j\omega NS \dot{B}(j\omega) \times \frac{1}{j\omega L / (R_{out} + 1)} \tag{5}$$

在电感足够小的情况下，即当 $R_{out} \gg \omega L$ 时：

$$U_{out} = j\omega NS \dot{B}(j\omega) \tag{6}$$

由于 $\omega = 2\pi f$ 带入上式可知当 $f \ll R_{out} / 2\pi L$ ：

$$|U_{out}| = 2\pi fNS |B(f)| \quad (7)$$

由式(7)可知, 瞬态磁场传感器的输出电压与频率成正比。

2 瞬态磁场探头的设计

2.1 瞬态磁场探头匝数和线圈半径的确定

由上节可知, 当 $f \ll R_{out}/2\pi L$ 时, 瞬态磁场传感器的输出电压与频率成正比, 即传感器的输出对频率敏感, 考虑极限情况, 当 $f = R_{out}/2\pi L$ 时, 是瞬态磁场传感器可测的极限频率^[6-7]。对于瞬态磁场传感器线圈的电感近似计算公式为^[8-9]:

$$L = N^2 R \mu_0 \left[\ln \left(\frac{8R}{r} \right) - 1.75 \right] \quad (8)$$

式中: N 为线圈匝数; R 为传感器线圈半径; r 为绕制线圈的导线半径; μ_0 为自由空间磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。极限频率的表达式为:

$$f = \frac{R_{out}}{2\pi N^2 R \mu_0 \left[\ln \left(\frac{8R}{r} \right) - 1.75 \right]} \quad (9)$$

由上可知匝数 N 越小, 半径 R 越小, 极限频率就越大, 然而随着半径 R 的变小, 其传感器的响应也会变小。因此在响应足够的情况下, 为了获得较大的极限频率, 可以采取单匝线圈的绕制方式。

根据极限频率公式 $f = R_{out}/2\pi L$ 结合式(9)可知, 在 500 MHz 时, 瞬态磁场传感器线圈半径 R 约为 5 mm, 因此半径 R 为 5 mm 的线圈可以响应 500 MHz 以内的瞬态磁场信号。

2.2 瞬态磁场探头的屏蔽设计

高功率激光打靶会产生包括脉冲电磁场、X射线、 γ 射线在内的各种干扰射线, 因此为了准确地测量瞬态磁场信号, 需要对其余的信号做屏蔽。然而各类干扰信号是分布在装置中的每一处, 对其做整体的屏蔽显然难度较大, 也不易实现, 因此可以从传感器的设计和屏蔽性能上着手, 使设计的传感器可以屏蔽掉其他干扰信号, 只对瞬态磁场信号有良好的响应。本文采用黄铜为传感器的屏蔽材料^[10], 屏蔽除线圈之外的探头部分, 使得被测信号只来自于传感器感应到的高功率激光打靶后的瞬态磁脉冲信号。

2.3 瞬态磁场探头的设计

根据以上分析, 设计出磁场传感器探头如图 3 所示。

磁场测量探头的设计分为 2 个部分: 探头设计部分和连接线设计部分。

对于第 1 部分, 图中 4 为法拉第环骨架, 所用材料为不导磁、不导电、有一定硬度且随温度变化形变较小的皮革(Peek)^[10], 在该骨架上开具有一定深度绕骨架一周的凹槽用来固定法拉第环, 同时也为法拉第环提供准确度较高的绕制模型。凹槽深度与线圈直径相关, 同时凹槽中间开小孔, 方便测量线圈 2 根引线进入小孔, 并从中空的引线骨架 3 内部引出。以上两部分是磁场测量探头的基本设计。

对于第 2 部分的设计, 为了完成信号的测量, 2 根引线双绞后与同轴杆 7 进行连接, 双绞引线的设计是为了屏蔽掉共模信号; 由于引线同轴杆连接的部分容易耦合入噪声, 利用黄铜做成屏蔽外壳 1 对噪声信号进行屏蔽; 同时为了固定同轴杆, 在屏蔽腔内加入由聚四氟乙烯制成的固定台 6, 在屏蔽腔外加入压装螺母 4。通过第 2 部分的设计, 可以很好地屏蔽掉外界噪声。

2.4 瞬态磁场探头的仿真

利用细胞信号技术(Cell Signaling Technology, CST)电磁仿真软件对该瞬态磁场探头进行仿真, 使该探头对

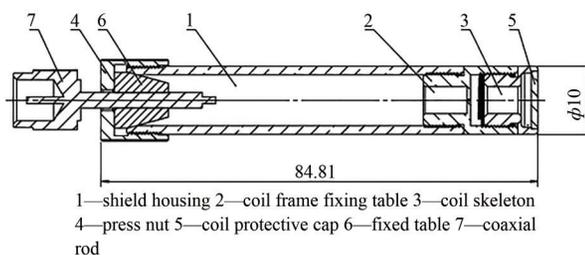


Fig.3 Transient magnetic field sensor probe
图3 瞬态磁场传感器设计图

0.002 6 A/m 的场强信号进行响应，仿真图和仿真结果如图 4 所示。

由图 4 可知，瞬态磁场探头的频响曲线整体趋势是曲线随频率增加后逐渐趋于平坦。该探头的频率响应在 500 MHz 内随着频率的增加而增加，且呈现出较大的变化趋势，即在该频率段内瞬态磁场探头对频率的变化敏感，可用于测试该频率段的瞬态磁场信号。

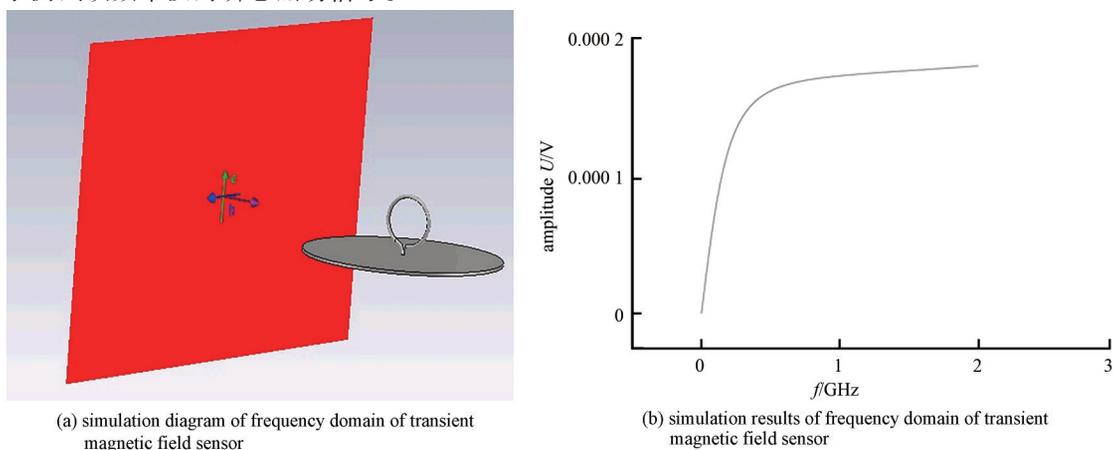


Fig.4 Frequency simulation of the transient magnetic field sensor probe
图 4 瞬态磁场传感器频域响应仿真图和仿真结果

2.5 灵敏度系数的确定

在对瞬态磁场传感器的灵敏度系数进行确定时，可以将瞬态磁场探头和已知灵敏度系数的霍尔效应特斯拉计探头放入同一脉冲场中，通过示波器或高精度数采卡来记录 2 个探头的脉冲电信号，由于霍尔特斯拉计的灵敏度系数已知，那么所测得脉冲场幅度已知，以此脉冲磁场幅度为标准来确定脉冲磁场探头灵敏度系数，如图 5 所示。

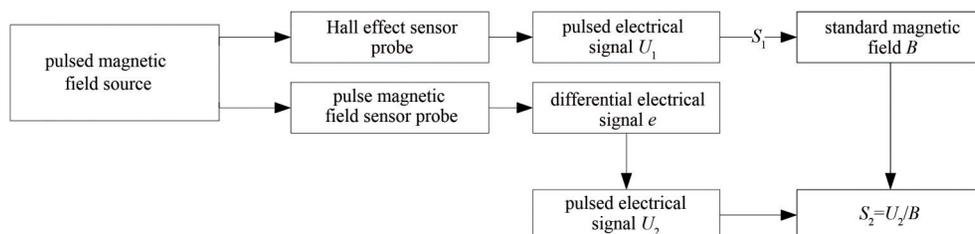


Fig.5 Derivation diagram of sensitivity coefficient of transient magnetic field sensor
图 5 瞬态磁场传感器灵敏度系数推导图

如图 5 所示，霍尔效应传感器探头和脉冲磁场传感器探头放入同一脉冲磁场源中，分别采集到脉冲电信号 U_1 和微分电信号 e ，由于霍尔效应传感器灵敏度系数已知，设为 S_1 ，那么被测磁场源的磁感应强度 $B=U_1/S_1$ ，以该磁感应强度值作为标准幅值，根据图 1 中的公式推导可知，为了得到脉冲磁场传感器探头的灵敏度系数，需要将微分电信号进行积分，得到脉冲电信号 U_2 ，那么脉冲磁场传感器探头的灵敏系数 $S_2=U_2/B$ 。

3 试验

3.1 时域响应对比、线性度和频域标定试验

瞬态磁场测量系统最高工作频域为 500 MHz，利用横电磁波 (Transverse Electro Magnetic, TEM) 小室、信号发生器、功率计等设备可以对脉冲磁场测量系统 500 MHz 以内的时域响应对比、线性度、频率性能等进行试验，试验框图如图 6 所示。

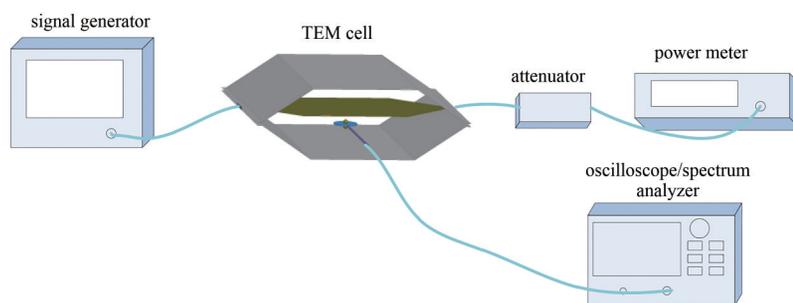


Fig.6 Schematic diagram of transient magnetic field measurement system
图 6 瞬态磁场测量系统示意图

根据图 6 搭建测量系统如图 7 所示。

为了对测量系统进行严格的时域响应对比,按照图 7,在同一激励下,将原场数据和瞬态磁场测量系统测得的数据在同一坐标下进行对比,如图 8 所示,由图 8 可知瞬态磁场测量系统测得曲线与原场曲线较为一致。

最后,为了对测量系统在 500 MHz 以内进行频域响应验证,在同一激励下对不同的频率点进行频响试验,其频响曲线如图 9 所示,由图可知,500 MHz 内频响良好。

3.2 灵敏度系数的确定试验

根据 2.5 节的分析,搭建灵敏度系数测试系统如图 10 所示。在脉冲磁场源中同时放入霍尔效应磁场传感器和脉冲磁场传感器,两者实物图如图 11 所示。在图 11 中位于上方的是瞬态磁场传感器,为了测试便利性,将其置于聚四氟乙烯所制作的夹具内,由高精度数采卡读取并显示该微分信号,通过后续对该微分信号进行数字积分以及灵敏度系数的换算,完成对脉冲磁场的测量;位于图 11 中下方的是作为标准的霍尔效应磁场传感器,通过该传感器可以直接将瞬态磁场信号转换成电信号,本次实验采用的霍尔效应磁场传感器是由 F.W.BELL 公司所生产的型号为 STF71040205T 的霍尔效应磁场传感器,最大允许误差为 $\pm 0.25\%$,灵敏度系数为 1 V/T 。



Fig.7 Transient magnetic field measurement system
图 7 瞬态磁场测量系统现场试验图

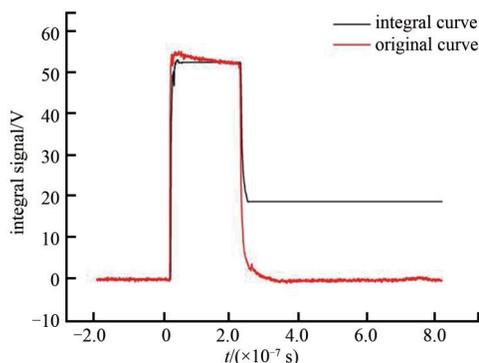


Fig.8 Measurement results of original field and transient magnetic field

图 8 原场和瞬态磁场测量结果图

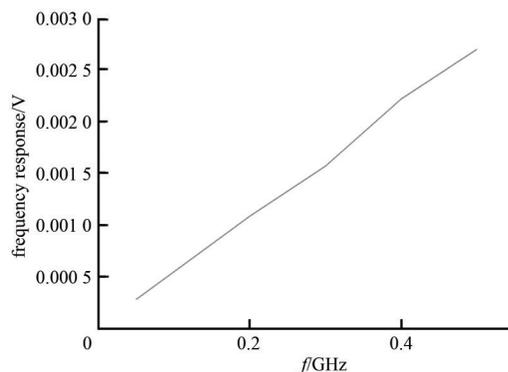


Fig.9 Frequency response curve of transient magnetic field measurement system

图 9 瞬态磁场测量系统频率响应曲线



Fig.10 Testing system for sensitivity coefficient of transient magnetic field sensor

图 10 瞬态磁场传感器灵敏度系数测试系统

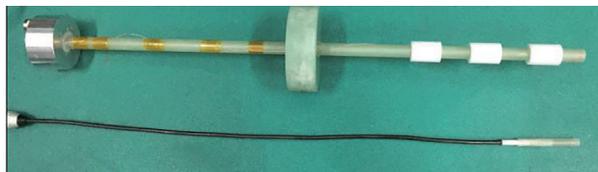


Fig.11 Transient magnetic sensor probe and the standard Hall effect sensor

图 11 瞬态磁场传感器和标准霍尔效应传感器

高压脉冲源分别产生幅值为 100 V、200 V、300 V、400 V、500 V、600 V、700 V 的脉冲高压,通过负载产生脉冲大电流馈入到螺线管中产生脉冲磁场,作为标准的霍尔效应传感器和瞬态磁场传感器同时对脉冲磁场信

号进行采集，将采集到的数据进行处理得出脉冲磁场测量结果。

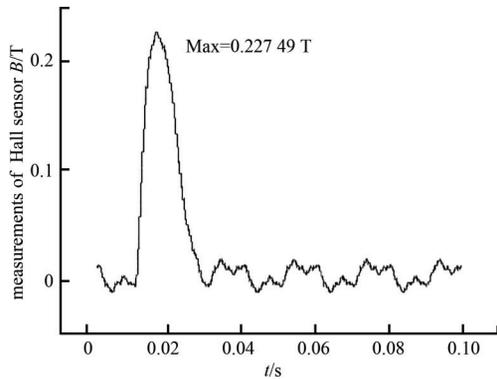


Fig.12 Pulsed magnetic field signal collected by Hall effect sensor

图 12 霍尔效应传感器采集到的脉冲磁场信号

以幅值为 100 V 的点为例，由霍尔效应传感器采集到的脉冲磁场信号如图 12 所示。图 12 中，脉冲磁场电信号的幅值为 0.227 49 V，由于该霍尔效应传感器的灵敏度系数为 1 V/T，因此被测的脉冲磁场幅值为 0.227 49 T。

瞬态磁场传感器采集到的信号如图 13 所示，是一个微分信号，为了还原脉冲磁场信号，首先需要对其进行数据处理并积分。将整个微分信号减去零偏后再对其进行积分^[11-12]，积分结果如图 14 所示。

磁场传感器积分信号幅值为 2.434×10^{-5} V，以霍尔效应磁场传感器所测的磁场幅值作为标准值，由式(1)可知，灵敏度系数 $S = \int_0^{t_m} edt/B_m = 1.070 \times 10^{-4}$ V/T。

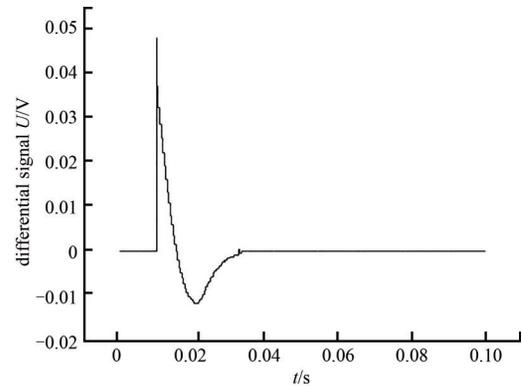


Fig.13 Pulsed magnetic field signal collected by pulse magnetic field sensor

图 13 脉冲磁场传感器采集到的脉冲磁场信号

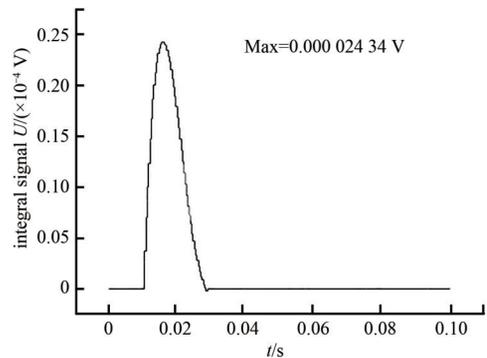


Fig.14 Integral signal of pulsed magnetic field

图 14 脉冲磁场积分信号

表 1 100~700 V 7点测量数据表

Table1 7-point measurement data in 100~700 V

excitation voltage/V	Hall-effect magnetic field by sensor measurement/T	integral voltage of transient magnetic field sensor/V
100	0.227 49	$2.449\ 37 \times 10^{-5}$
200	0.440 14	$4.957\ 43 \times 10^{-5}$
300	0.647 72	$7.336\ 07 \times 10^{-5}$
400	0.874 00	$9.838\ 16 \times 10^{-5}$
500	1.064 01	$11.915\ 6 \times 10^{-5}$
600	1.287 74	$14.494\ 3 \times 10^{-5}$
700	1.503 28	$16.992\ 5 \times 10^{-5}$

表 2 100~700 V 两类传感器在单位电压下的测量值

Table2 Measurement values of two types of sensors per unit voltage

excitation voltage/V	Hall effect sensor measurement value per unit voltage/T	transient magnetic field sensor measurement value per unit voltage/V
100	0.002 275	$2.449\ 37 \times 10^{-7}$
200	0.002 201	$2.478\ 72 \times 10^{-7}$
300	0.002 159	$2.445\ 36 \times 10^{-7}$
400	0.002 185	$2.459\ 54 \times 10^{-7}$
500	0.002 128	$2.383\ 12 \times 10^{-7}$
600	0.002 146	$2.415\ 72 \times 10^{-7}$
700	0.002 148	$2.427\ 50 \times 10^{-7}$
average value	0.002 177	$2.437\ 05 \times 10^{-7}$

为了使得对灵敏度系数的标定更加准确,分别在 100 V、200 V、300 V、400 V、500 V、600 V、700 V 共 7 个点处对灵敏度系数进行测量,测量结果见表 1。

将表 1 中数据进行处理,得出霍尔效应磁场传感器和瞬态磁场传感器在单位励磁电压下的响应值,见表 2。

由表 2 可知,单位励磁电压下积分信号最大值的平均值为 $2.437 05 \times 10^{-7}$ V,霍尔效应磁场传感器所测磁感应强度幅值为 0.002 177 T,根据式(1),灵敏度系数 $S = \int_0^{t_m} edt/B_m = 1.12 \times 10^{-4}$ V/T。

3.3 瞬态磁场的测量

将灵敏度系数已知的瞬态磁场传感器探头置于高功率激光装置中,在距金平面靶靶心 35 cm 处测试的瞬态磁场微分信号如图 15 所示。对该微分信号进行积分处理后如图 16 所示。

由图 16 可知,积分电压为 7.663 3 mV,由于其灵敏度系数为 1.12×10^{-4} V/T,距离金平面靶 35 cm 处瞬态磁场场强大小为装置中该点的磁场强度,为 68.4 T。

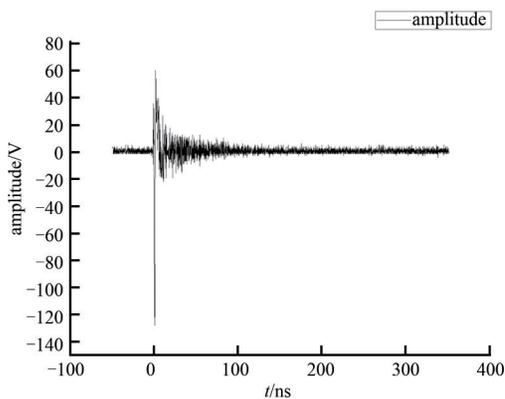


Fig.15 Differential signal of the transient magnetic field
图 15 高功率激光装置中瞬态磁场信号测量的微分信号示意图

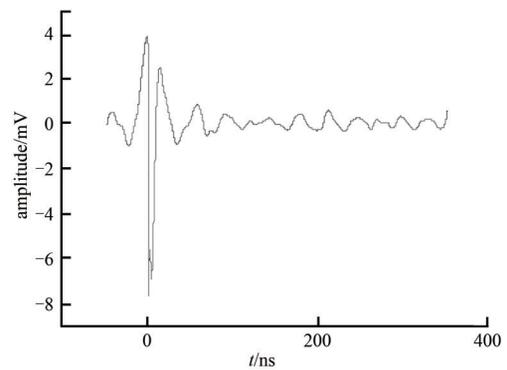


Fig.16 Measurement result of the transient magnetic field
图 16 高功率激光装置中瞬态磁场信号测量结果

4 结论

本文针对高功率激光装置中产生的电磁脉冲信号设计了一种瞬态磁场测量探头,可用于测试频率小于 500 MHz 的瞬态磁场信号,且可以很好地屏蔽干扰信号。通过具体试验,对装置中某点的瞬态磁场信号进行了测量,为高功率激光装置的电磁干扰、电磁兼容方面研究提供了数据支撑。

参考文献:

- [1] 易涛,景峰,王新彬,等. 神光III装置电磁脉冲测量[J]. 安全与电磁兼容, 2017(6):83-85. (YI Tao, JING Feng, WANG Xinbin, et al. Electromagnetic pulse measurement at Shen Guang III laser facility[J]. Safety & EMC, 2017(6):83-85.)
- [2] 杨进文,杨鸣,李廷帅,等. 基于神光III主机装置激光打靶产生电磁脉冲特性研究[J]. 电气技术, 2016(11):21-24. (YANG Jinwen, YANG Ming, LI Tingshuai, et al. Investigation of electromagnetic pulses generated by the laser shooting based on SG-III facility[J]. Electrical Engineering, 2016(11):21-24.) doi:10.3969/j.issn.1673-3800.2016.11.010.
- [3] 朱宇洁,郭晓东,宋佳玲. 脉冲磁场传感器的设计与灵敏度修正方法[J]. 中国测试, 2019,45(3):114-120. (ZHU Yujie, GUO Xiaodong, SONG Jialing. Design and sensitivity correction method of pulsed magnetic field sensor[J]. China Measurement & Test, 2019,45(3):114-120.) doi:10.11857/j.issn.1674-5124.2018060012.
- [4] 梁可道,米彦,李成祥,等. ns级脉冲磁场传感器的研制[J]. 高电压技术, 2009,35(8):1995-1999. (LIANG Kedao, MI Yan, LI Chengxiang, et al. Development of a nanosecond pulsed magnetic field sensor[J]. High Voltage Engineering, 2009,35(8):1995-1999.) doi:10.13336/j.1003-6520.hve.2009.08.047
- [5] 王勇,季振山,刘广君,等. EAST上低漂移差分积分器的研制[J]. 原子能科学技术, 2014(5):920-924. (WANG Yong, JI Zhenshan, LIU Guangjun, et al. Development of low drift difference integrator for EAST[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014,48(5):920-924.) doi:10.7538/yzk.2014.48.05.0920.

(下转第 430 页)