

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ВИЗАР С УСТАНОВКОЙ “АНГАРА-5-1”

© 2019 г. В. В. Александров^а, А. В. Браницкий^а, Е. В. Грабовский^а,
Я. Н. Лаухин^а, Г. М. Олейник^{а,*}, С. И. Ткаченко^{а,б}, И. Н. Фролов^а

^а “ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”
Россия, 142190, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12

^б Московский физико-технический институт (государственный университет)
Россия, 141701, Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9

* e-mail: oleinik@triniti.ru

Поступила в редакцию 13.04.2018 г.

После доработки 14.05.2018 г.

Принята к публикации 03.06.2018 г.

На установке “Ангара-5-1” проводятся эксперименты по созданию мегабарных давлений и ускорению металлических флаеров давлением импульсного магнитного поля. Достигнуты скорости до 10 км/с. Регистрация скорости флаеров осуществлялась лазерным интерферометром ВИЗАР (VISAR – Velocity Interferometer System for Any Reflector). Рассматриваются вопросы электромагнитной совместимости ВИЗАР с установкой “Ангара-5-1”, поскольку при срабатывании установки “Ангара-5-1” возникают электромагнитные наводки и при установлении магнитной самоизоляции в вакуумных передающих линиях возникает тормозное рентгеновское излучение, воздействующее на оптику, оптоволоконные кабели и фотоэлектронные умножители. Подавление этих двух источников помех позволило надежно зарегистрировать сигналы ВИЗАР и определить скорость флаера.

DOI: 10.1134/S0032816218060204

ВВЕДЕНИЕ

Создание высокого давления с помощью магнитного поля тока, протекающего по образцу, позволило в последние годы надежно получать мегабарные давления и разгонять образцы-флаеры до скоростей 10 км/с и выше [1–3]. Эксперименты по разгону флаеров проводятся на установках ZR [4], PTS [5] и “Ангара-5-1” [6].

ВИЗАР (VISAR – Velocity Interferometer System for Any Reflector) – широко используется при регистрации скорости флаеров [7]. Лазерная интерферометрия является эффективным методом определения скорости поверхности образца. Принцип работы практически всех лазерных методов непрерывного измерения скорости основан на анализе доплеровского сдвига частоты в зондирующей монохроматической волне, отраженной от движущейся поверхности исследуемого образца [8]. В нашем случае излучение, отраженное от исследуемого объекта, вводится в “сдвиговый” интерферометр. Интерференционная картина несет информацию о скорости исследуемого объекта.

ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВИЗАР НА УСТАНОВКЕ “АНГАРА-5-1”

На установке “Ангара-5-1” световой пучок непрерывного лазера “Моцарт” (ООО “Техноскан-Лаб”, Новосибирск [9]) с длиной волны 532 нм направляется на тыльную поверхность ускоряемого образца – флаера. Излучение на выходе лазера имеет линейную поляризацию, электрический вектор которого направлен под углом 45° к вертикали. Отраженный от мишени свет направляется в сдвиговый интерферометр, в плечах которого имеются разные оптические линии задержки.

Для регистрации интерференционной картины были использованы два фотоэлектронных умножителя (ф.э.у.), один для горизонтальной и другой для вертикальной поляризации. Часть отраженного флаером пучка направляется на третий ф.э.у. для измерения интенсивности отраженного света. Использовались ф.э.у. Hamamatsu H10720-01 с временным разрешением 0.57 нс и чувствительностью $1.5 \cdot 10^5$ А/Вт. Специальная система питания динодов ф.э.у. позволила получить ток насыщения до 1 мА [10].

Для записи электрических сигналов ф.э.у. с временным разрешением 1 нс используется ос-

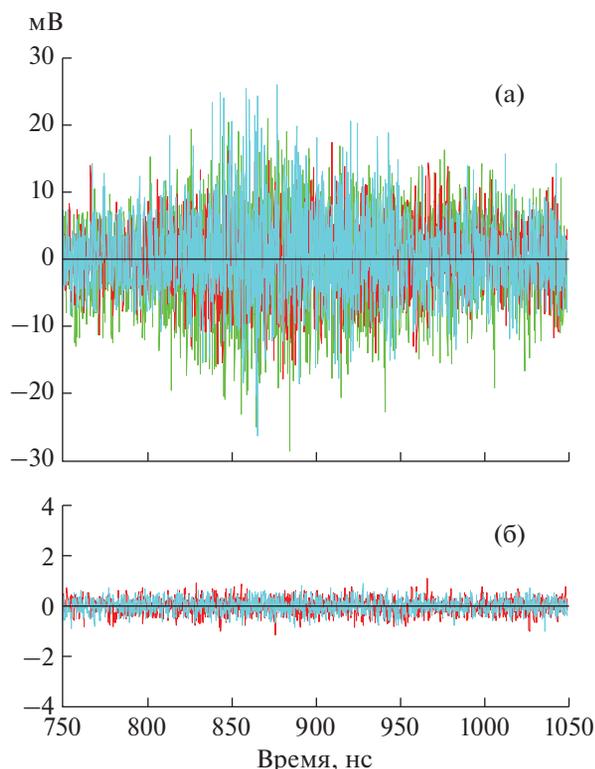


Рис. 1. Влияние закрытия вентиляционных отверстий сеткой – сигналы наводки на осциллограф с подключенными ф.э.у. без питания: **а** – без сетки, **б** – вентиляционные отверстия закрыты медной сеткой ($\varnothing 0.24 \times 0.56$ мм) с пропусканием 0.37.

циллограф LeCroy WaveRunner 610Zi с граничной частотой регистрации не менее 1 ГГц.

По зарегистрированным сигналам с трех ф.э.у. восстанавливается информация о скорости поверхности фляера.

ПОМЕХИ НА УСТАНОВКЕ “АНГАРА-5-1”

Установка “Ангара-5-1” [11] работает в напряженном электротехническом режиме. При срабатывании установки возникают мегавольтные напряжения и импульсы электрического тока до 5 МА. Эти импульсы наводят паразитные сигналы в диагностических системах, поэтому при их эксплуатации должны быть приняты меры по защите систем диагностики от наводок. Вопросы электромагнитной совместимости регистрирующего оборудования с установкой “Ангара-5-1” рассматривались в работе [12]. Было показано, что при использовании гибкого сплошного металлического экрана на диагностических кабелях уровень помехи в экранированном помещении был < 30 мВ.

В отличие от работы [12], для ВИЗАР на установке “Ангара-5-1” условия другие:

- диапазон частот 1 ГГц, время нарастания 1 нс;
- необходимо регистрировать сигналы амплитудой < 100 мВ, при этом уровень помех должен быть < 10 мВ;
- при установлении магнитной самоизоляции в вакуумных передающих линиях возникает тормозное излучение, воздействующее на оптику, оптоволоконные кабели и ф.э.у.

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ЗАЩИТЕ ОТ ПОМЕХ

Для защиты оборудования лазера он располагался в экранированном помещении на большом удалении (40 м) от основных токоведущих частей. Срабатывание установки на него никак не влияло. Луч лазера направлялся на фляер и после отражения от него – в интерферометр.

Для уменьшения паразитного сигнала электротехнической наводки был сконструирован экранирующий бокс из оцинкованных панелей листового железа толщиной 1.5 мм, размещенный на оптическом столе. Скин-слой для характерных времен составляет доли миллиметра. Панели плотно прижимаются винтами М6 к уголкам из нержавеющей стали Х18Н9Т на раме. В этом боксе размещались регистрирующий осциллограф, ф.э.у. и система питания ф.э.у.

Осциллограф при работе потребляет 600 Вт. Поэтому необходимо удалять из бокса выделяемое тепло. Это обеспечивается четырьмя вентиляторами, установленными на наружных сторонах панелей бокса: два работают в режиме подачи воздуха, а другие два – в режиме откачки воздуха из объема. Через отверстия $\varnothing 100$ мм для подачи и откачки воздуха в бокс проникает электротехническая наводка.

Для подавления этого канала проникновения наводки на границе стыковки корпусов вентиляторов установлены медные сетки ($\varnothing 0.24 \times 0.56$ мм) с коэффициентом пропускания 0.37, находящиеся в электрическом контакте с панелями бокса.

На рис. 1 представлены результаты сравнения величины электротехнических наводок, зарегистрированных в экспериментах без их подавления и с подавлением после установки этих сеток. На рис. 1а (без сетки) амплитуда помехи составляет 10–25 мВ, на рис. 1б (с сеткой) амплитуда помехи < 0.5 мВ. Таким образом, принятое техническое решение надежно защищает систему регистрации от электротехнических наводок установки “Ангара-5-1”.

Однако данная система защиты не защищает ф.э.у. от жесткого тормозного излучения, возникающего за счет торможения электронов тока утечки на электродах высоковольтных вакуумных транспортирующих линий установки при уста-

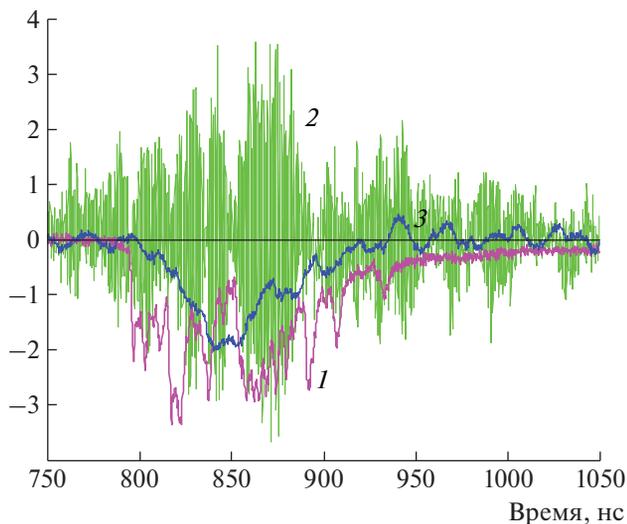


Рис. 2. Влияние тормозного излучения и экранирования свинцом на уровень наводки (вентиляционные отверстия закрыты медной сеткой). 1 — сигнал [100 мВ/клетка] с ф.э.у. вне свинцового бокса, питание 700 В; 2 — сигнал [2 мВ/клетка] с ф.э.у. в свинцовом боксе толщиной 1 см, питание 700 В; 3 — сигнал тормозного излучения [усл. ед.]

новлении в них режима магнитной самоизоляции.

Для защиты оптических элементов и ф.э.у. был создан единый контейнер со стенками и крышкой из свинца толщиной 1 см.

Для ввода сигналов интерферометра в стенке контейнера выполнены три отверстия $\varnothing 6$ мм. Рассеянное рентгеновское излучение может проникать через эти отверстия и попадать на ф.э.у. Для предотвращения этого ф.э.у. были смещены вверх или вниз от указанных отверстий, а для передачи излучения до ф.э.у. использовались гибкие стеклянные световоды. Длина световодов 20 см, световой диаметр 5 мм. Следует отметить, что паразитный сигнал помехи от тормозного излучения генерируется как непосредственно в самих ф.э.у., так и оптоволоконных кабелях.

Отверстие в стенке контейнера для ввода лазерного излучения допускает достаточно широкий угол проникновения жесткого рентгеновского излучения в контейнер. Для уменьшения этого угла на стенку контейнера с внутренней стороны установлены дополнительные коллиматоры в виде втулок, через которые проходят световоды. Втулки изготовлены из вольфрам-медного сплава ВД-90 с содержанием вольфрама 95%. Длина коллиматоров 60 мм, наружный диаметр 25 мм, в центре отверстие $\varnothing 10$ мм для ввода головки световода. Для защиты торцов световодов от воздействия жесткого рентгеновского излучения с наружной стороны контейнера на них были дополнительно надеты свинцовые втулки длиной 30 мм.

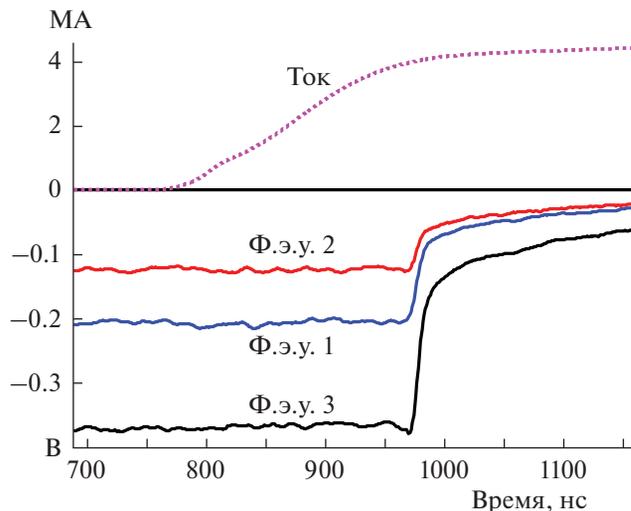


Рис. 3. Осциллограмма тока и сигналов с трех ф.э.у.

Кабели питания ф.э.у. и сигнальные кабели выводились из контейнера через лабиринты из свинцовых перегородок. При этом паразитный сигнал был не более 12 мВ.

Напомним, что если ф.э.у. без питания, то уровень помехи (см. рис. 1б) составляет 0.5 мВ. На рис. 2 представлены данные о влиянии тормозного излучения на сигналы наводки при включенном питании ф.э.у. и результат подавления этой помехи с помощью перечисленных выше мер. Включение питания ф.э.у. приводит к радикальному увеличению помехи до 300 мВ (сигнал 1), если ф.э.у. располагается не в свинцовом боксе. На этом же рисунке представлена интенсивность жесткого тормозного излучения (сигнал 3). Как видно, сигналы помехи и тормозного излучения коррелируют по времени друг с другом. Установка всех ф.э.у. в свинцовом боксе и дополнительные меры, перечисленные выше, позволили снизить максимальный уровень помех до 12 мВ. Для выстрела (сигнал 2) уровень помехи был даже меньше 7 мВ. Уровни типичных сигналов ф.э.у. до начала движения флаера составляли около 0.5 В. Таким образом, отношение сигнал/шум до начала движения флаера составляло около 40.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ВИЗАР

На рис. 3 представлены сигналы, зарегистрированные с трех ф.э.у. в эксперименте с медным флаером. Уровень помех в этом эксперименте < 12 мВ. На этом же рисунке представлена осциллограмма тока, который возникает в момент времени 770 нс. Видно, что амплитуды всех трех сигналов начинают уменьшаться в момент времени ~980 нс, это свидетельствует о начале движения флаера. При обработке зарегистрированных сиг-

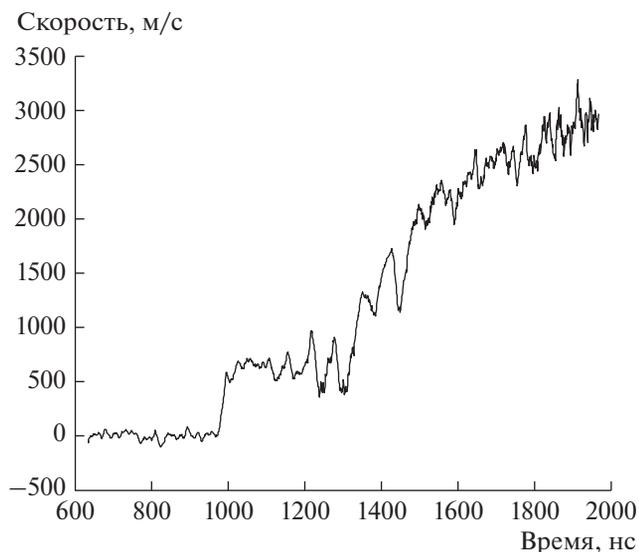


Рис. 4. Зависимость скорости тыльной стороны медного флаера от времени.

налов получена временная зависимость скорости флаера (рис. 4). В представленных экспериментах скорость флаера из меди достигает 3 км/с при токе более 5 МА [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря предпринятым мерам удалось подавить электромагнитные наводки, возникающие при срабатывании установки “Ангара-5-1”, когда генерируются мегавольтные напряжения и мегаамперные токи в течение сотен наносекунд. Было подавлено также влияние тормозного излучения на оптоволоконные кабели и ф.э.у. Уровень помех был снижен до 12 мВ, что позволило зарегистрировать сигналы ВИЗАР и определить скорость флаера.

Работа поддержана РНФ, грант 16-12-10487.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаркушин Г.В., Игнатова О.Н., Канель Г.И., Мейер Л., Разоренов С.В. // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2010. № 8. С. 155.
2. Канель Г.И., Савиных А.С., Разоренов С.В., Фортвов В.Е. // Сб. Успехи механики сплошных сред. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 257–271.
3. Cochran K.R., Lemke R.W., Riford Z., Carpenter J.H. // J. Appl. Phys. 2016. doi 10.1063/1.4943417
4. Ao T., Harding E.C., Bailey J.E., Lemke R.W., Desjarlais M.P., Hansen S.B., Smith I.C., Geissel M., Maurer A., Reneker J., Romero D., Sinars D.B., Rochau G.A., Benage J.F. // High Energy Density Physics. 2016. doi 10.1016/j.hedp. 2016.01.002
5. Jianjun Deng, Weiping Xie, Xianbin Huang // 2015 IEEE International Conference on Plasma Sciences.
6. Grabovskii E.V., Alexandrov V.V., Branitskii A.V., Frolov I.N., Gribov A.N., Gritsuk A.N., Mitrofanov K.N., Laukhin Ya.N., Oleinik G.M., Sasorov P.V., Shishlov A.O., Tkachenko S.I. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 946. P. 012041.
7. Кузнецов А.П., Колесников С.А., Голубев А.А., Губский К.Л., Дудин С.В., Канцырев А.В., Туртиков В.И., Уткин А.В., Якушев В.В. // ПТЭ. 2011. № 3. С. 116.
8. Dolan D.H. Foundations of VISAR analysis. SANDIA Report 006-1950. Printed April 2006.
9. Мощный непрерывный Nd:VVO4 лазер 266/532/1064 нм, модель “Моцарт”. <http://www.tekhnoscan.ru/russian/mozart.htm>
10. Губский К.Л. Дис. ... к.ф.-м.н. МИФИ. 2012. 134 с.
11. Альбинов З.А., Велихов Е.П., Веретенников А.И., Глухих В.А., Грязнов Г.М., Гусев О.А., Жемчужников Г.Н., Зайцев В.И., Золотовский О.А., Истомин Ю.А., Козлов О.В., Крашенинников И.С., Курочкин С.С., Латманнизова Г.М. и др. // Атомная энергия. 1990. Т. 68. Вып. 1. С. 26.
12. Зайцев В.И., Копырина Р.И., Костромин А.П. // ПТЭ. 1990. № 4. С. 150.
13. Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Лаухин Я.Н., Олейник Г.М., Ткаченко С.И., Фролов И.Н. // Сб. научных трудов IV Международной конференции “Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз 2018”, 30 января–1 февраля 2018. С. 248.