

Методика калибровки стрик-спектрометра в условиях работы импульсного генератора МИГ

А. Жигалин, А. Русских, В. Ванькевич, В. Орешкин*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**Zhigalin@ovpe2.hcei.tsc.ru*

Абстракт. В статье описан метод спектрально-временной калибровки спектрометра Hamamatsu C10910 выполненной перед экспериментами на импульсном генераторе МИГ. Описаны конструкция и принцип работы водородной импульсной лампы, специально предназначенной для спектральной и временной калибровки. Представлены оптические схемы регистрации спектра водородной лампы-вспышки и электрические схемы синхронизации стрик-камеры с импульсным генератором МИГ.

Ключевые слова: генератор тока, электрический взрыв проводников, спектр излучения.

1. Введение

Интерес к исследованию электрического взрыва проводников (ЭВП) в быстро нарастающих мегагауссовых магнитных полях, т. е. в режиме скинирования тока, во многом, связан с проблемой эффективности транспортировки электромагнитной энергии в разрабатываемых в настоящее время мультитераваттных генераторах (уровень тока более 30 МА, время нарастания менее 100 нс) [1], которые предполагается использовать для реализации схем инерциального термоядерного синтеза на основе Z-пинча [2–4]. Так же активно ведутся работы по сжатию тяжелых металлических лайнеров по проекту MagLIF (Magnetized Liner Inertial Fusion) [5].

В ходе выполнения данных экспериментов исследовался электрический взрыв цилиндрических проводников из различных материалов и с различными диаметрами. Результаты, полученные на установке МИГ, призваны определить, как изменяются во времени такие физические характеристики взрывающихся проводников как их температура и плотность. Кроме того, исследовался процесс перехода вещества проводников в плазменное состояние и развитие плазменных неустойчивостей на самой поверхности проводников. Для определения временной зависимости температуры проводников было решено использовать оптический стрик-спектрограф в режиме пирографа. Поскольку согласно закону смещения Вина длина волны, соответствующая наибольшей интенсивности сплошного спектра излучения поверхности вещества, прямолинейно зависит от её температуры, то регистрируя поведение сплошного спектра во времени мы можем судить о температуре поверхности излучающего проводника. Поскольку в рамках проведения данных экспериментов предполагалось задействовать стрик-спектрометр в качестве спектральной диагностики, необходимо было провести калибровку данного стрик-спектрометра в условиях работы на генераторе МИГ [6] (амплитуда тока до 2.5 МА и время нарастания тока около 100 нс).

2. Методика эксперимента

Калибровка прибора Universal streak camera C10910-05 Hamamatsu Photonics, в которой был установлен спектрограф Action SpectraPRO SP-2300 Princeton Instruments проводилась перед экспериментами непосредственно на генераторе МИГ. При регистрации спектра свечения взрывающихся проводников использовалась временная развертка длительностью 2 мкс. Входная щель спектрометра шириной 200 мкм располагалась перпендикулярно оси исследуемого объекта. Оптический тракт был настроен таким образом, что изображение центральной части взрывающегося проводника строилось непосредственно на входной щели спектрометра. Спектральное разрешение прибора составляет 8 нм.

Калибровка прибора производилась в реально используемой геометрии эксперимента. Специально для калибровки используемого стрик-спектрометра была изготовлена импульсная водородная лампа (см. Рис.1). Она представляла собой герметичную камеру небольшого объема, в которую закачивался водород под давлением 1 атм. Внутрь камеры были подведены два конусных электрода, на которые подавался импульс напряжения амплитудой 15 кВ. Расстояние между электродами было 3 мм. Для того, чтобы сформировать изображение дугового разряда в водородной среде на входной щели стрик-спектрографа, в торцевой части лампы вспышки была установлена линза 3 с фокусным расстоянием $F = 6.7$ см. Поскольку расстояние от дугового разряда до линзы и от линзы до входной щели стрик-спектрографа составляло $2 \cdot F$, то изображение дугового водородного источника света передавалось на щель в масштабе 1:1.

Синхронизация стрик-камеры с высоковольтным генератором МИГ осуществлялась по схеме, приведенной на Рис.1. Цифровой генератор запускающих импульсов (DPG-digital program generator) одновременно формировал два импульса напряжения амплитудой 300 В с фронтом 100 нс, один из которых подавался на управляющий электрод тригatronа коммутирующего электрическую емкость C в цепи дугового разряда, а второй импульс подавался на запуск стрик камеры. Этот же (второй) сигнал, в качестве опорного, заводился на один из каналов осциллографа и запускал его. При срабатывании ключа тригatronа происходил пробой газового (водородного) промежутка импульсной водородной лампы, а синхросигнал с делителя напряжения, расположенный в цепи дугового разряда, регистрировался на осциллографе. Регистрируя на осциллографе одновременно время начала протекания тока в цепи дугового разряда (начала свечения дуги), время прихода синхросигнала на вход стрик-спектрографа и измеряя время от начала развертки до появления изображения свечения можно вычислить реальное значение времени задержки срабатывания стрик-спектрографа для конкретной временной развертки, которая может существенно отличаться от заявленной в паспорте прибора.

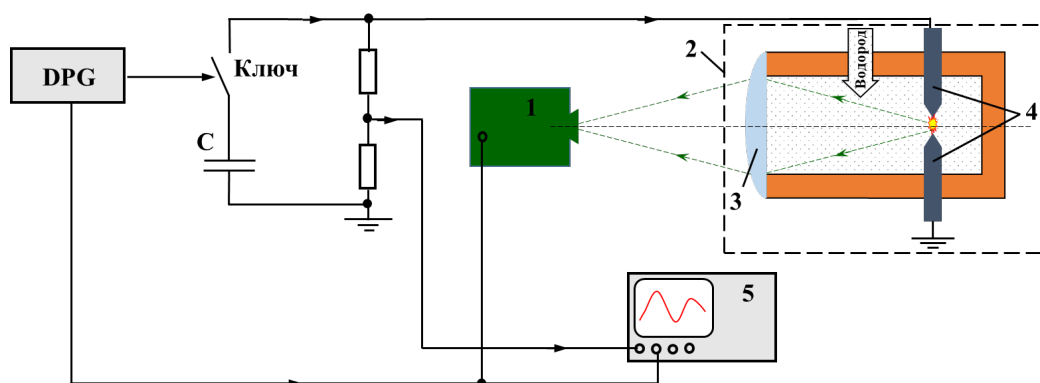


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – стрик-спектрометр; 2 – импульсная водородная лампа; 3 – линза; 4 – электроды; 5 – осциллограф.

3. Экспериментальные результаты

Время задержки срабатывания стрик-спектрографа $t_{стрик}$ относительно запускающего сигнала DPG вычислялось по формуле (1):

$$t_{стрик} = t_{синх} - t_{пуск} - \Delta t, \quad (1)$$

где $t_{\text{пуск}}$ – время срабатывания DPG, $t_{\text{синх}}$ – время появления синхроимпульса с делителя напряжения, расположенного в цепи дугового разряда, Δt – промежуток времени от начала развертки на экране стрик-спектрографа до появления изображения спектра (см. Рис.2б).

При регистрации спектра излучения лампы вспышки мы работали в спектральном диапазоне 468–747 нм. Отметим, что спектральное окно, используемое в наших экспериментах с стрик-спектрографом, составляет 280 нм. Выбор спектрального интервала был обусловлен с одной стороны тем, что именно в нем наблюдаются наиболее яркие линии водорода, а с другой стороны именно этот диапазон будет использоваться в экспериментах по электрическому взрыву цилиндрических проводников на генераторе МИГ.

На Рис.2а приведена диаграмма зависимости интенсивности излучения, в относительных единицах, от длины волны. Изображение временной развертки спектра, полученное в процессе калибровки приведено на Рис.2б. На спектрально-временной развертке 0 времени соответствует началу свечения, которое начинается с началом протекания тока. Начиная с момента времени $t = t_1$ и на протяжении всего остального времени развертки наблюдается очень яркое свечение линии водорода $H_\alpha = 656$ нм. Экспериментально полученный спектр излучения водорода (Рис.2б) позволяет нам достаточно точно прокалибровать заявленную шкалу прибора.

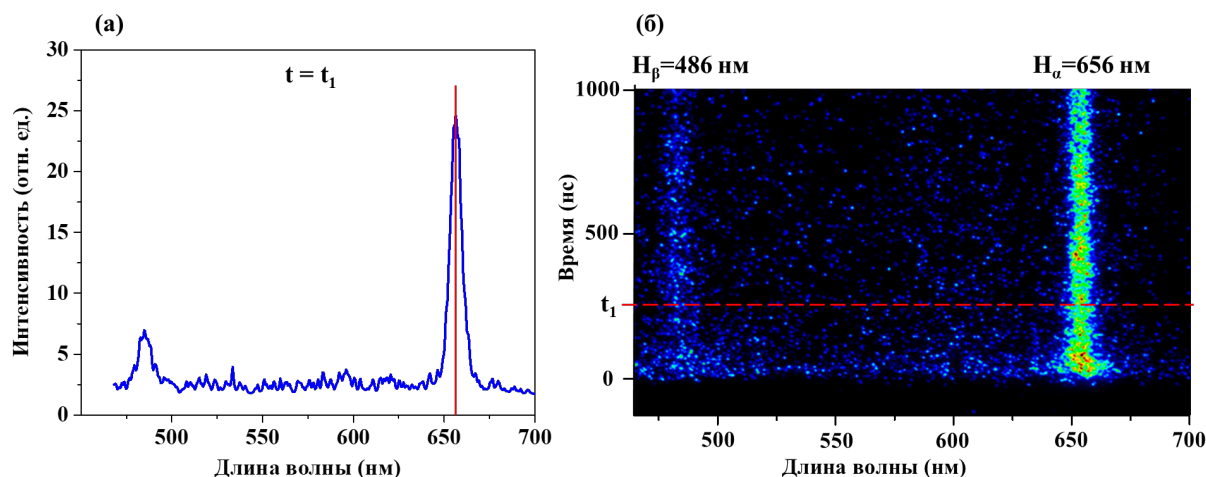


Рис.2. Интенсивность излучения (а) и спектр излучения водородной лампы вспышки (б).

4. Заключение

Благодаря разработанному прибору удалось прокалибровать соответствие заявленной шкалы длин волн спектра реальной. Кроме того, вычислено время задержки срабатывания стрик-камеры относительно запускающего импульса.

Благодарности

Данная работа поддержана Российским научным фондом (проект № 22-19-00686).

5. Литература

- [1] Stygar W., Awe T., Bailey J., et al., *Phys. Rev. Special Topics: Accelerator Beams*, **18**, 110401, 2015; doi: 10.1103/PhysRevSTAB.18.110401
- [2] Grabovskii E.V., Aleksandrov V.V., Gritsuk A.N., et al., *Abstracts IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conf.*, San Francisco, 224, 2013; doi: 10.1109/PLASMA.2013.6634826
- [3] Struve K., Corley J., Johnson D., et al., *12th IEEE Int. Pulsed Power Conf.*, Monterey, **1**, 493, 1999; doi: 10.1109/PPC.1999.825518

- [4] Smirnov V.P., Zakharov S.V., Grabovskii E.V., *J. Exp. Theor. Phys. Lett.*, **81**, 442, 2005;
doi: 10.1134/1.1984026
- [5] Gomez M.R., Slutz S.A., Sefkow A.B., et al., *Phys. Rev. Lett.*, **113**, 155003, 2014;
doi: 10.1103/PhysRevLett.113.155003
- [6] Gorelchanik I.E., Korostelev A.F., Petin V.K., Ratakhin N.A., Shepelev A.N., Fedushchak V.F., Shlyakhtun S.V., *13th International Conference on High-Power Particle Beams (BEAMS 2000)*, 172, 2000.