

УДК 533.9.08

БЕСПАРАЛЛАКСНАЯ ШЕСТИКАДРОВАЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКАЯ КАМЕРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ИМПУЛЬСНОГО УТС И ДРУГИХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ

С.С. Ананьев, Е.Д. Казаков, А.А. Шведов

НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В работе представлена новая модульная система электронно-оптического фотографирования в видимом диапазоне, позволяющая делать шесть последовательных кадров с экспозицией 3 нс и задержкой между кадрами 10 нс. Применение данной диагностической системы является чрезвычайно актуальным при исследовании динамики плазмы в быстротекающих процессах, в частности, при изучении имплозии многопроволочных мегаамперных лайнеров. Конструкция камеры позволяет легко перенести её на различные установки. Приведены результаты экспериментов, проведённых на сильноточном импульсном генераторе Стенд-300.

Ключевые слова: диагностика плазмы, электронно-оптическое фотографирование, многокадровые системы, мощный импульсный генератор тока.

SIX-FRAME ELECTRON-OPTICAL CAMERA WITHOUT PARALLAX FOR FAST PROCESSES AND ICF INVESTIGATION

S.S. Anan'ev, E.D. Kazakov, A.A. Shvedov

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

New multi-module electron-optical diagnostic system for visible region is presented. One can obtain six frames with 3 ns exposure and 10 ns delay by this system. Application of such diagnostic system is very important for plasma dynamics and other fast processes investigation, for example, for experiments on implosion of multi-wire loads by mega-ampere current. The system design allows to use it at different installations without serious changes in device alignment. The first experimental results from high current generator S-300 obtained using described device are presented.

Key words: plasma diagnostic, electron-optical photography, multi-frame systems, high current generator.

ВВЕДЕНИЕ

Для исследования динамики быстротекающих плазменных процессов требуется многокадровый прибор, позволяющий регистрировать изображение исследуемого объекта с экспозициями порядка нескольких наносекунд и задержками между кадрами в десятки наносекунд. Существующие серийные приборы типа «лупы времени», где все кадры с помощью электроники формируются на одной электронно-оптической трубке [1], наряду с удобством управления имеют ряд существенных недостатков, из которых два являются принципиальными. Первый из них — относительно малое число разрешаемых каналов, второй — ограниченный динамический диапазон всей системы, так как чувствительность и динамический диапазон каждого канала одинаковы, тогда как интенсивность излучения во время процесса может меняться на несколько порядков. Кроме того, они дороги и крайне чувствительны к электромагнитным помехам, что значительно затрудняет их эксплуатацию на мощных импульсных установках.

Свободными от этих недостатков являются так называемые модульные системы, в которых для регистрации каждого кадра используется отдельный электронно-оптический преобразователь (ЭОП) с импульсным питанием, время прихода и длительность которого определяют момент и экспозицию соответственно. Обычно в таких системах [2] изображения объекта на катодах строились одним объективом с последующим делением световых пучков полупрозрачными зеркалами. В этом случае для регистрации изображений с каждого из входящих в систему ЭОП требовалось несколько фотоприставок — по одной на каждый ЭОП. Неоспоримым преимуществом такой системы является возможность расширения её динамического диапазона за счёт установки фильтров в каналах, срабатывающих в моменты времени, когда интенсивность излучения исследуемого объекта значительно (в некоторых случаях на порядки) превышала средние значения. Однако этот вариант громоздок, он действительно является «системой», а не «прибором», перенос на другую установку реально требует полного демонтажа и воссоздания системы заново. В этой работе описан созданный нами прибор, который сочетает в себе достоинство много-

модульной системы вместе с относительной компактностью прибора, который легко можно переносить с установки на установку и использовать в различных задачах.

РАЗРАБОТКА И НАСТОЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В данной работе представлена новая беспараллаксная система многокадрового фотографирования, которая позволяет получать шесть последовательных кадров с интервалами между кадрами 10 нс. Для оперативности эксплуатации, удобства обработки изображений с ЭОП и их относительной калибровки в новой системе регистрация изображений осуществлялась на КМОП-матрицу (светочувствительная матрица, выполненная на основе КМОП-технологии (комплементарная логика на транзисторах металл—оксид—полупроводник)) фотокамеры CANON EOS 350D [3].

Выбрана схема с шестью ЭОП ЭП-15 — два ряда по три ЭОП. Для регистрации изображений с ЭОП использовалась КМОП-матрица с соотношением сторон 3:2. Таким образом удалось наиболее эффективно заполнить площадь регистратора для увеличения пространственного разрешения. Также рассматривалась возможность установки дополнительных ЭОП в каждый каскад для увеличения коэффициента усиления.

В разработанной системе электронно-оптической регистрации все элементы смонтированы неподвижно на единой платформе, и в дальнейшем система с фотоаппаратом помещалась в экранированный бокс, установленный на юстировочном столе. Кабельные линии задержки были фиксированными (по 10 нс). ЭОП подобраны с близкими коэффициентами усиления.

Световой поток делился между всеми ЭОП поровну с помощью светоделительных кубиков с различными коэффициентами отражения. Для регистрации изображений, получаемых всеми ЭОП с помощью одной фотокамеры, изображения с их экранов должны находиться в одной плоскости и максимально близко друг к другу. Первоначально для компенсации разницы оптических путей от экранов ЭОП до объектива регистрирующей фотокамеры предполагалось использовать оптические ромбы, но система получилась громоздкой и имела ряд недостатков, в результате которых возникали сложности с её юстировкой. В дальнейшем ромбы были заменены системой волоконно-оптических жгутов с регулярным расположением волокон, позволяющих переносить изображение с пространственным разрешением.

На рис. 1, *а*, *б* приведены схемы светоделительной части и системы построения изображений на экранах ЭОП.

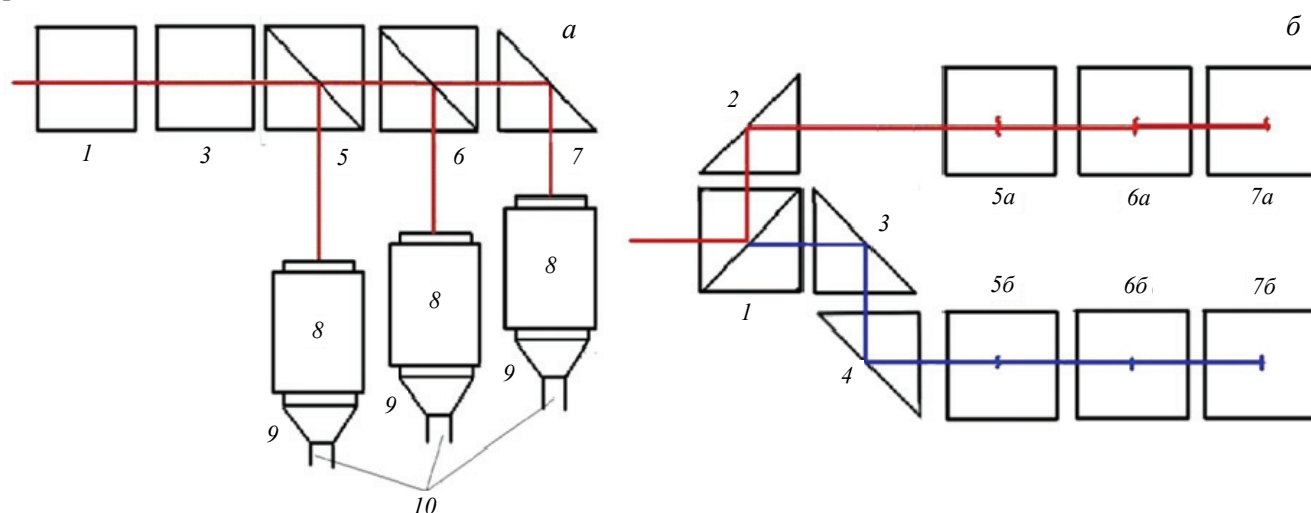
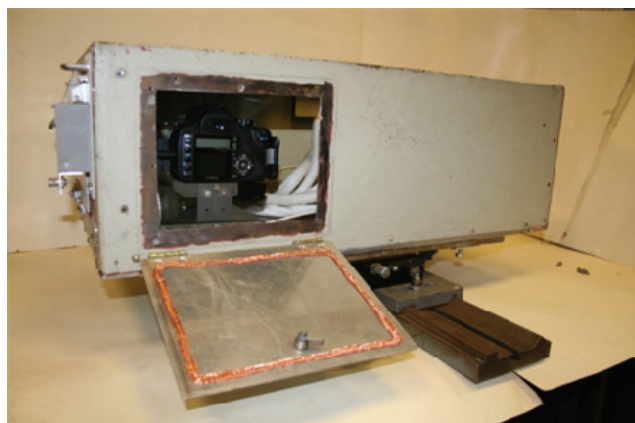


Рис. 1. Схема построения изображений на экранах ЭОП (*а*) и светоделительной части (*б*): 1, 5, 6 — светоделительный куб; 2, 3, 4, 7 — прямоугольная призма; 8 — ЭОП; 9 — фокус; 10 — оптоволоконный жгут; индексами *а* и *б* обозначены верхний и нижний ряды светоделительных кубов соответственно

Световой поток от исследуемого объекта делится светоделительным кубом (коэффициенты отражения и пропускания 50%) и затем разводится с помощью призм полного внутреннего отражения на идентичные верхний и нижний светоделительные каскады. Каждый из них состоит из двух светоделительных кубов (у первого коэффициент отражения 30%, у второго — 50%) и призмы полного внутреннего

отражения, отклоняющей прошедший через светоделительные кубы световой поток на последний ЭОП. ЭОП закреплены попарно на диэлектрических конструкциях таким образом, чтобы расстояние от входного делительного куба до фотокатодов всех ЭОП было одинаковым. Такая конструкция позволяет системе оставаться беспараллаксной, что актуально в лабораторных экспериментах, где ограничен угол зрения на объект, а ЭОП расположены на относительно небольшом расстоянии от исследуемого объекта. С экранов ЭОП изображение переносится посредством оптоволоконных световодов, выходные концы которых закреплены в оправе в одной плоскости, откуда излучение переносится объективом фотокамеры на КМОП-матрицу. Для согласования диаметров волоконного жгута и экрана ЭОП были применены фоконы с коэффициентом уменьшения 2:1.

Расхождение интенсивностей света в каналах системы не превышает 15%. Общий вид системы представлен на рис. 2, а.



а



б

Рис. 2. Общий вид системы шестикадрового фотографирования на основе ЭОП (а); светоделительная система и системы построения изображений на экранах ЭОП (б)

При делении светового потока с помощью светоделительных кубиков проходящий и отражённый свет получают эллиптические поляризации, ориентированные большими компонентами перпендикулярно друг к другу. В результате световые потоки в верхнем и нижнем каналах делятся кубиками поразному. Для компенсации этого эффекта и достижения равномерного распределения интенсивности света по каналам были предприняты попытки устранения и изменения поляризации света на участке за первым светоделительным кубиком. Для неполяризованного излучения на входе в верхний и нижний светоделительные каскады расхождение интенсивностей в каналах не превышало 15%.

Предприняты попытки выравнивания интенсивностей в каналах за счёт изменения типа и направления плоскости поляризации излучения в верхнем и нижнем каскадах с помощью полуволновых ($\lambda/2$) и четвертьволновых пластин ($\lambda/4$) для длины волны 532 нм, а также ромбов Френеля. Оптимальным был признан вариант с использованием поляризаторов.

Подбором угла наклона основной оси поляризатора удалось добиться расхождения интенсивности света в каналах системы, не превышающего 15% (рис. 3). Стоит отметить, что, как указывалось ранее, существует также возможность применения простых фильтров на отдельных каналах.

Пространственное разрешение и глубина резкости такой системы будут зависеть от геометрии конкретного эксперимента. В предварительных тестах с использованием миры прибор обеспечивал пространственное разрешение не хуже 10 штр./мм по объекту, которое определялось разрешающей способностью оптоволоконных жгутов.

Система вместе с регистрирующей фотокамерой смонтирована в помехозащищённом светонепроницаемом корпусе, который защищает компоненты от пыли, электромагнитных помех и естественной

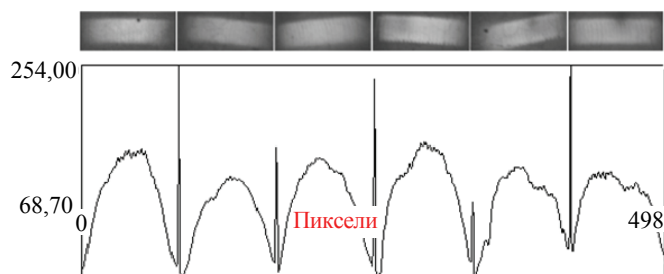


Рис. 3. Интенсивность излучения в различных каналах прибора

засветки. Ввод излучения в корпус прибора оформлен в виде запердельного волновода. Для дистанционного управления затвором фотокамеры используется электромагнит с диэлектрическим толкателем, проходящим сквозь корпус. На электромагнит на время экспозиции подаётся постоянное напряжение. Толкатель замыкает контакты микровыключателя, соединённого с фотоаппаратом через штатный разъём дистанционного управления.

Ввод и вывод высоковольтного импульса питания ЭОП в корпус осуществляются через модернизированные разъёмы СР-75, позволяющие подавать на ЭОП статическое высоковольтное питание для юстировки.

Система съюстирована и испытана. Полученные изображения спирали лампы накаливания на столе подтвердили работоспособность системы даже с малой глубиной резкости (см. рис. 3).

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Апробация диагностической системы проводилась в экспериментах по исследованию многопроволочных X-пинчей при мегаамперных токах на установке Стенд-300 [4]. Система установлена в экранированной диагностической кабине. Наблюдение за исследуемым объектом производилось через специальное окно, направленное на выходной диагностический патрубков установки.

X-пинч представляет собой две или более перекрещенные в одной точке проволоочки, помещённые в диоде сильноточного генератора [5, 6, 7], при протекании тока формируется яркий источник рентгеновского излучения малых размеров с заранее заданной локализацией — горячая точка. Горячая точка X-пинча является уникальным сверхярким источником мягкого (до 10 кэВ) рентгеновского излучения с

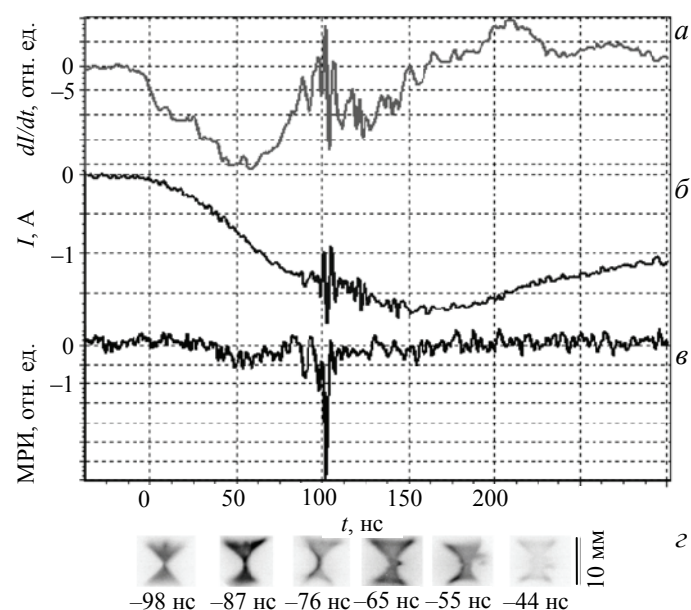


Рис. 4. Экспериментальные результаты. На осциллограмме представлены производная тока (а), ток через нагрузку (б) и сигнал с детектора мягкого рентгеновского излучения (в); з — кадры в видимом свете, полученные с помощью описанной системы (пространственное разрешение 100 мкм, глубина резкости 3 мм)

экстремальными параметрами ($n_e \sim 10^{23} \text{ см}^{-3}$, $T \sim 1 \text{ кэВ}$, $P \sim 10 \text{ ГПа}$), в связи с чем исследование данного типа нагрузок представляет значительный интерес. Рассматриваемая в данной работе диагностика применялась для исследования динамики плазмы в видимом диапазоне. Экспозиция кадров в системе составляла $\sim 3 \text{ нс}$, задержка между кадрами $\sim 10 \text{ нс}$. На рис. 4 представлены результаты одного из характерных «выстрелов». Моменты времени для оптических кадров указаны относительно максимума тока.

На представленном рисунке видно значительное падение яркости на шестом кадре оптической диагностики. Как показали дальнейшие измерения, в реальном эксперименте в отличие от настольных тестов наблюдалось ощутимое $\sim 30\%$ падение амплитуды импульса напряжения при прохождении шести ЭОП оптической диагностики. В связи с этим принято решение осуществлять независимое питание каждого канала системы. Для этого необходимо разработать шестиканальную систему формирования высоковольтных импульсов с возможностью взаимной синхронизации каналов. Данное усовершенствование позволит значительно расширить область применения разработанной диагностической системы.

ВЫВОДЫ

Разработана новая шестикадровая беспараллаксная система электронно-оптического фотографирования для исследования динамики высокотемпературной плазмы и других быстропротекающих процессов. Основными достоинствами прибора являются широкий динамический диапазон, защищённость от

электромагнитных помех и относительная портативность. Данные преимущества позволят использовать представленный прибор на установках различного типа, включая ускорители и мощные импульсные генераторы тока.

При развитии данной диагностической системы планируется организовать независимое питание каждого модуля, что позволит избежать проседания амплитуды импульса напряжения и даст возможность произвольным образом изменять экспозицию каждого кадра и задержки между кадрами.

Авторы выражают благодарность студенту МФТИ Калинину Ю.П. за активное участие в сборке и тестовых испытаниях представленной системы.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-2436.2011.2 и гранта РФФИ № 11-02-01008-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутслов М.М., Степанов Б.М., Фанченко С.Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. — М.: Наука, 1978. 368 с.
2. Боголюбовский С.Л., Гордеев Е.М. и др. Исследование динамики сжатия лайнера на установке «Ангара-5-01». — Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, с. 1271.
3. Ананьев С.С. Регистрация полутоновых изображений на импульсных сильноточных установках в условиях сильных электромагнитных полей: Препринт ИАЭ-6440/7. — М., 2008. 15 с.
4. Chernenko A.S., Gorbunin Yu.M., Kalinin Yu.G. et al. S-300, new pulsed power installation in Kurchatov Institute, investigation of stable liner implosion. — In: Proc. of the 11th Intern. Conf. on High-Power Particle Beam. Prague, 1996, p. 154.
5. Захаров С.М., Иваненков Г.В., Коломенский А.А. и др. Проволочный X-пинч в сильноточном диоде. — Письма в ЖТФ, 1982, т. 8, вып. 9, с. 1060.
6. Shelkovenko T.A., Sinars D.B., Pikuz S.A., Hammer D.A. Radiographic and spectroscopic studies of X-pinch plasma implosion dynamics and x-ray burst emission characteristics. — Phys. Plasmas, 2001, vol. 8, p. 1305.
7. Пикюз С.А., Шелковенко Т.А., Синарс Д.Б., Хаммер Д.А. Временные характеристики рентгеновского излучения X-пинча. — Физика плазмы, 2006, т. 32, с. 1106.



Сергей Станиславович Ананьев, м.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия



Евгений Давидович Казаков, м.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия
evgenische@yandex.ru



Александр Алексеевич Шведов, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия

Статья поступила в редакцию 8 ноября 2011 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 2, с. 89—93.