

## РЕГИСТРАЦИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

PACS 06.30.Ft; 06.60.Jn; 07.05.Pj

# Научное приборостроение на японских конгрессах, посвященных регистрации изображений быстропротекающих процессов

М.Я.Щелев

*Представлена информация о проходивших в Японии конгрессах, посвященных регистрации изображений быстропротекающих процессов и фотонике. Рассмотрены доклады, посвященные методике и результатам применения сверхскоростной регистрирующей аппаратуры в различных областях науки и техники.*

**Ключевые слова:** научное приборостроение, быстропротекающие процессы, регистрация изображений.

В декабре 2009 г. и сентябре 2010 г. состоялись Национальный и Международный конгрессы по регистрации изображений быстропротекающих процессов (БПП) и фотонике (ICHSIP).

На конгрессах, проведенных на высоком научном уровне, присутствовали по 150–200 делегатов, которые представили не менее 50 докладов. Традиционно тематика конгрессов условно делится на два больших блока: первый – теоретическое обоснование, экспериментальная реализация и испытание приборов и методов, используемых для регистрации изображений БПП, в том числе создание калибровочных источников излучения; второй – методика и результаты применения сверхскоростной регистрирующей аппаратуры в самых различных областях науки и техники. Поскольку по применениям существует множество смежных конференций, здесь мы, в основном, сосредоточимся на докладах, посвященных аппаратуре.

Разработки рентгеновских электронно-оптических камер (ЭОК), предназначенных для кадровой съемки изображений взрывающегося ядра мишени в ЛТС-экспериментах по быстрому поджигу в условиях мощных рентгеновских засветок, рассматривались в докладах Н. Azechi, Н. Shiraga, М. Koga и др. (Институт лазерной техники при Осаком университете). Была обеспечена одновременная регистрация процессов взрыва мишени с термоядерным горючим и момента инжекции греющего лазерного излучения. В подобных экспериментах очень важно знать гидродинамику самого взрывного процесса, а также механизмы нагревания взрывающегося ядра мишени. Исследовать это одновременно довольно сложно, прежде всего в связи с тем, что процессы протекают в существенно разных спектральных диапазонах. Для решения поставленных вопросов была разработана камера для кадровой съемки, обеспечивающая одновременную регистрацию 12 кадров с временем экспозиции кадра 360 пс; интервал между каждыми тремя кадрами составлял 80 пс, между каждой последовательностью из четырех групп по три кадра – 500 пс. Кадровая съемка реализуется за счет прикладывания электрического импульса длительностью 360 пс к по-

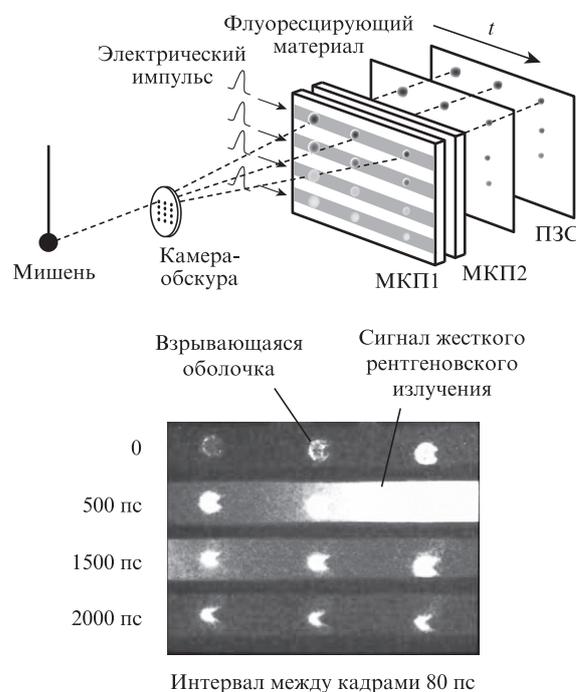


Рис.1. Принцип работы рентгеновской пикосекундной камеры для кадровой съемки (вверху) и типичные экспериментальные результаты (внизу).

лосковой линии, нанесенной на поверхность микроканальной пластины (МКП) (рис.1). Фотокатодом для рентгеновских изображений служит та же МКП, чувствительная как к мягкому рентгеновскому излучению (тепловое рентгеновское излучение из плазмы взрывающейся мишени при ее поджиге мощными наносекундными лазерными импульсами), так и к жесткому ( $\sim 50$  кэВ) рентгену, возникающему при последующем облучении мишени фемтосекундными лазерными импульсами петаваттной мощности. На основании проведенных измерений авторы пришли к выводу о том, что им с точностью до десятков пикосекунд удалось измерить момент инжекции в мишень излучения лазера ( $10^{15}$  Вт, 800 пс, 200 Дж) относительно момента схлопывания мишени под действием излучения 9-канальной лазерной системы GeKK0 XII (0.53 мкм, 1.5 нс, 400 Дж в одном канале).

М.Я.Щелев. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 37; e-mail: m.schelev@ran.gpi.ru

Поступила в редакцию 22 ноября 2010 г.

Несомненный интерес у делегатов вызвал доклад T. Shimizu с соавторами (Осацкий университет и фирма Hamamatsu), в котором был рассмотрен ВУФ-спектрометр, состыкованный со стрик-камерой. Система работает в спектральном диапазоне 125–850 нм, на ее входе находится оптика отражательного типа с покрытиями из Al и  $MgF_2$ . В экспериментах использовался кристалл  $Nd^{3+}:LaF_3$  с размерами  $1 \times 1 \times 3$  см и полированными поверхностями, который помещался в вакуумную камеру и облучался сфокусированным излучением третьей гармоники Ti:сапфирового лазера (290 нм, 100 фс, 0.6 мДж, 1кГц). Для сравнения использовалось также излучение  $F_2$ -лазера (157 нм, 1 мДж, 5 нс, 100 Гц). Электронно-оптическая камера, работавшая в режиме линейной развертки и синхронного сканирования, имела входное окно из  $MgF_2$ . Измеренная длина волны флуоресценции испытуемого кристалла лежала в области 175 нм, постоянная времени затухания составляла  $\sim 7$  нс.

Исследования по созданию ЭОК интенсивно ведутся не только в Японии, но и в других странах. Так, G. Smith (Британское управление по ядерному оружию) сообщил о создании ЭОК с рекордно высокой частотой покадровой съемки ( $5 \times 10^8$  кадр/с), предназначенной для регистрации высокоинтенсивного рентгеновского излучения. ЭОПы для этой камеры с синей границей спектральной чувствительности 200 нм разработаны на английской фирме Photek. Камера применялась для фотографической регистрации процессов, происходящих в пикосекундных рентгеновских ускорителях, и позволила получить важную информацию об оптимальной конфигурации рентгеновского диода и рентгеновских конвертеров.

Французская фирма Photonics представила разработку новой малогабаритной ЭОК типа EZ-Streak. Камера работает в диапазоне разверток от 2 нс до 1 мкс на экран и имеет максимальное временное разрешение 10 пс. Время-анализирующие ЭОПы для этой камеры разрабатываются и изготавливаются на самой фирме Photonics. О серии немецких стрик-камер фирмы Optronics доложил P. Summ. ЭОПы для этих камер закупаются на фирме Photek. О новых разработках ЭОК британской фирмы Specialized Imaging для многокадровой съемки рассказал Wai Chan.

Анализ экспериментальных проблем, связанных с достижением суб-100-фемтосекундного временного разрешения в режиме щелевой (streak) развертки фотоэлектронных изображений и в режиме формирования фотоэлектронных сгустков нестационарным электрическим полем (TRED-эксперименты), выполнил М. Щелев (ИОФАН, Россия). Большой интерес вызвало его сообщение о сравнительных испытаниях, проведенных в ИРЭ РАН (Россия), стрик-камеры Optoscope (Optronics, Германия) и стрик-камеры типа PS-1/S1, разработанной и изготовленной в ИОФАНе. Российская аппаратура продемонстрировала существенно лучшие эксплуатационные параметры, позволившие проводить высокоточные измерения в широком спектральном диапазоне (200–1300 нм) с однопикосекундным временным разрешением.

Особое внимание вызвали оригинальные разработки сверхскоростных видеокамер, выполненные совместно японскими (Университет Kinki), американскими (Университет Аризоны) и голландскими (фирма Dalsa) исследователями. Создана сверхскоростная ( $10^7$  кадр/с) видеокамера с размерами кадра до  $10^6$  пикселей на базе облучаемых со стороны подложки охлаждаемых ISIS-структур, снабженных элементами памяти, совмещенными с фоточув-

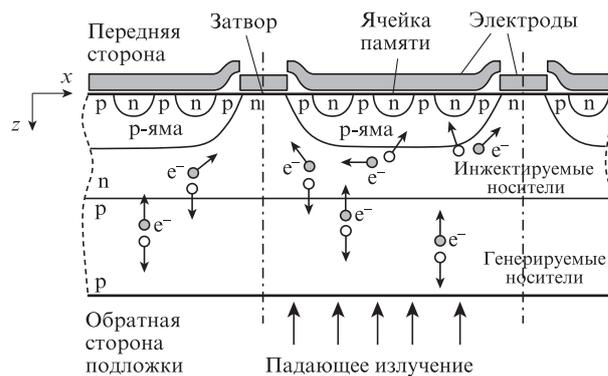


Рис.2. Поперечное сечение ISIS – MV12-сенсора, облучаемого со стороны подложки.

ствительными элементами (рис.2). Максимальная чувствительность их матрицы составляет менее 10 фот./пиксель, что достигается введением в каждый пиксель более 100 ПЗС-элементов памяти, а также путем улучшения геометрической конфигурации самой матрицы и использования метода умножения носителей заряда.

Специалисты из Лос-Аламосской национальной лаборатории (США) сообщили о завершении разработки уникального CMOS-сенсора, предназначенного для многокадровой протонной радиогрaфии и обеспечивающего 10-кадровую регистрацию протонных изображений с временем экспозиции 50 нс, размером кадра  $1024 \times 1024$  пикселей и динамическим диапазоном регистрации 12 бит. Матрицы изготавливаются на фирме Teledyne Imaging Sensors (США). Серия видеокамер на этих сенсорах прошла многолетнюю успешную апробацию на протонном ускорителе с энергией 800 МэВ в Лос-Аламосе. Кадровая последовательность может устанавливаться в интервале от 250 нс до 2 с. При времени считывания кадра 70 мс камеры могут быть надежно синхронизированы с протонными пучками длительностью 50 нс, следующими с частотой от 0.1 до 5 Гц. При этом может записываться до 1000 радиогрaфических фильмов продолжительностью 5–30 мин, причем экспозиция одиночного кадра сохраняется равной  $\sim 180$  нс.

E. Sato с сотрудниками (Иватский медицинский университет, Япония) сообщили о разработке высокоскоростных рентгеновских методов онкологической диагностики и терапии (с дискриминацией энергии рентгеновского излучения), отличающихся пониженной (по сравнению с ныне используемой) дозой облучения пациента. Это достигнуто за счет применения многопиксельного детектора на основе CdTe и высокой частоты считывания (до 20 МГц) рентгеновских изображений многоканальным анализатором, а также в результате использования ZnO-сцинтилляторов толщиной 2 мм, обеспечивающих малое время высвечивания (постоянная затухания короче 0.5 нс) и высокую чувствительность не только к рентгеновскому, но и к  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , нейтронному, ВЧ и УФ излучениям. В качестве примера была продемонстрирована K-edge томограмма сердца кролика, на которой с высоким контрастом видны коронарные артерии, заполненные микросферами с иодом, и отчетливо выделяются канцерогенные области (рис.3). Разработанная аппаратура может быть очень эффективной для регистрации изображений на молекулярном уровне.

Параллельно с разработками новейших образцов регистрирующей аппаратуры рассматривались вопросы создания новых источников излучения. Так, Yo. Ochi и др.

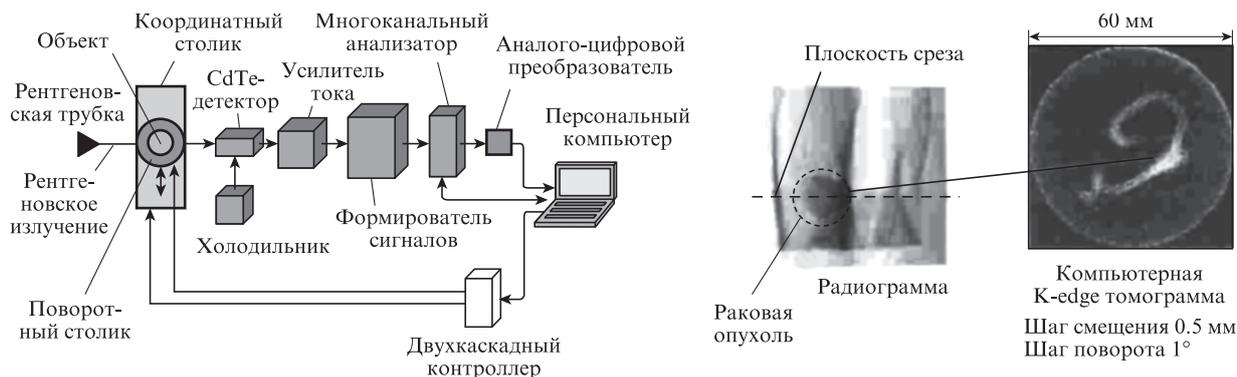


Рис.3. Схема рентгеновской системы для компьютерной томографии с дискриминацией энергии (слева); K-edge томограмма сердца кролика и ее увеличенная канцерогенная область (справа).

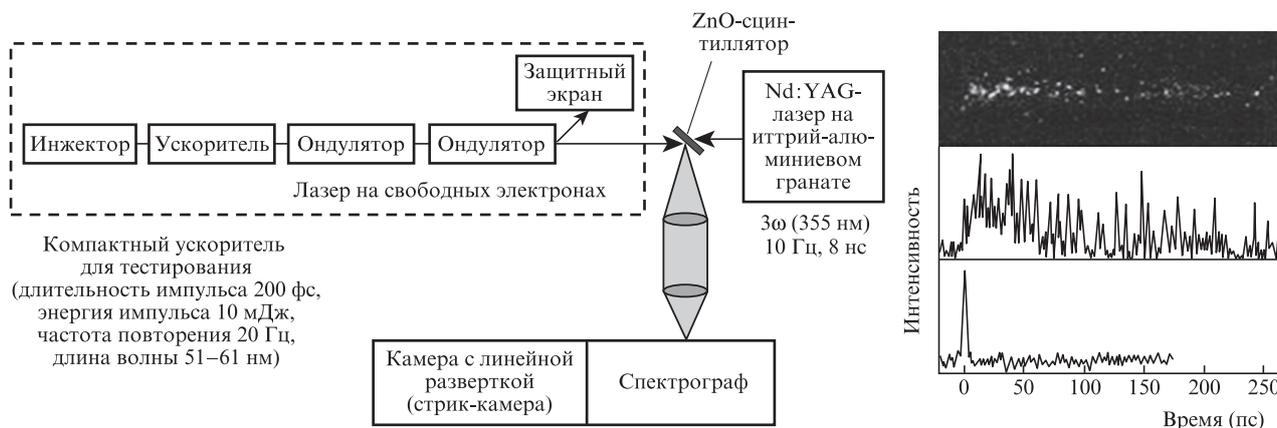


Рис.4. Схема экспериментальной установки для измерения временного отклика ZnO-сцинтилляторов в ВУФ области, а также однократная развертка на стрик-камере сцинтилляционного отклика и соответствующая микроденситограмма.

(Японское агентство по атомной энергии) доложили о создании рентгеновского лазера с длиной волны 13.9 нм, генерирующего  $10^{10}$  квантов в телесном угле 0.5 ср за одиночный импульс длительностью 7 пс. Для изучения параметров рентгеновского лазера авторы разработали рентгеновский интерферометр на двойных зеркалах Ллойда, обеспечивающий пространственное разрешение 1.5 мкм в направлении поверхности и 6 нм в направлении, перпендикулярном ей.

Ряд сообщений был посвящен разработке сверхбыстродействующих рентгеновских сцинтилляторов. Т.Shimizu с соавторами (Осацкий Институт лазерной техники) доложили о создании сверхбыстрых ZnO-сцинтилляторов, используемых в экспериментах по синхронизации фемтосекундных импульсов от рентгеновских лазеров на свободных электронах с импульсами от других источников излучения (рис.4). Нарастание и спад сигнала флуоресценции (длина волны 380 нм) ZnO-сцинтилляторов, материал для которых выращивался гидротермическими методами и был легирован ионами железа, составляли 10 и 100 пс соответственно. Благодаря их высокой светотдаче при облучении одиночными рентгеновскими импульсами удалось установить, что джиттер рентгеновских ( $\lambda = 50-60$  нм) импульсов не превышает 70 пс. Эти измерения были выполнены с помощью ЭОК Hamamatsu C1587.

S.Sakobe и др. (Институт химии при Университете Киото) продемонстрировали дифракционную картину от кристаллической золотой фольги (Au 001), полученную на просвет под действием одиночного электронного импульса (340 кэВ), генерируемого мощными импульсами

фемтосекундного лазера (рис.5). Такой метод получения высокоэнергетичных электронных пучков в будущем может найти широкое применение в экспериментах по электронной дифракции с временным разрешением.

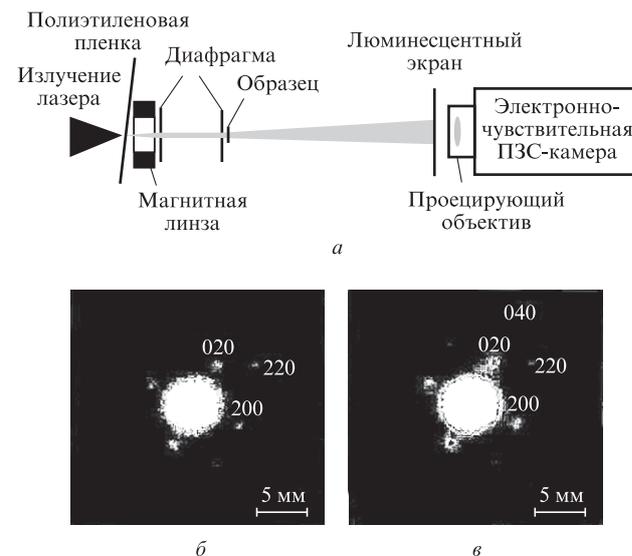


Рис.5. Схема установки (а) и дифракционная картина на просвет от монокристаллического Au (001) в однокадровом режиме (б) и в режиме накопления десяти кадров (в). Использовались одиночные импульсы излучения третьей гармоники (262 нм) Ti:сапфирового лазера (170 фс, 0.15 мДж). В фотоэлектронной пушке установлен медный фотокатод.

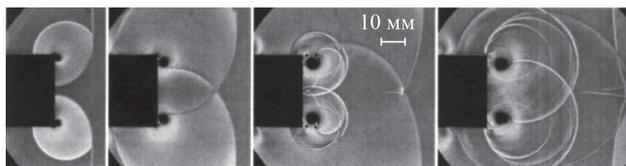


Рис.6. Четырехкадровая последовательность шлирен-изображений, полученных на видеокамере при дифракции ударной волны на цилиндрической поверхности. Частота съемки –  $2.5 \times 10^5$  кадр/с.

Как и прежде, большая серия докладов была посвящена исследованию ударных волн и взрывных процессов. Н.Кleine (Военно-воздушная академия, Австралия) совместно с коллегами из Японии и Германии сообщил о регистрации видеокамерами с высоким временным разрешением ударных волн, газовых струй и потоков жидкостей. В качестве примера на рис.6 показана четырехкадровая последовательность шлирен-изображений ударной

волны, огибающей цилиндрическую поверхность (число Маха в воздухе 1.23, межкадровый интервал 40 мкс). По мнению авторов, основным препятствием в экспериментах по визуализации ударных волн является недостаточное пространственное разрешение существующей сверхскоростной видеоаппаратуры.

Проведенные конгрессы четко выявили основные тенденции развития высокоскоростной фотографии и фотоники на современном этапе. Разработка и применение методов и средств сверхскоростной регистрации изображений БПП на сегодняшний день сконцентрировались в области лазерного УТС, ускорительной техники, биофизики, медицины и изучения ударных волн. Отметим, что Россия все еще продолжает удерживать высокий профессиональный уровень в области пико- и фемтосекундной фотоэлектроники. Подтверждением этому стало вручение автору этих строк Международной Золотой медали «High-Speed Imaging Award – VIDE et CREDE» («Увидеть и уверовать»).