

## ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 621.373.826

### ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ СО СКОРОСТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ

©2026 г. Ф. А. Губарев<sup>а,\*</sup>, Л. Ю. Давыдова<sup>а</sup>, А. А. Зыков<sup>а</sup>

*Севастопольский государственный университет*

*Россия, 299053, Севастополь, ул. Университетская, 33*

*\*e-mail: fagubarev@sevsu.ru*

Поступила в редакцию 03.09.2025 г.

После доработки 05.11. 2025 г.

Принята к публикации 29.11.2025 г.

Рассмотрена экспериментальная установка для исследования процесса инициирования горения высокоэнергетических материалов. Установка совмещает два варианта инициирования горения, синхронизованных с двуканальной системой визуализации на основе лазерного монитора на парах бромида меди. На выбор применяется контактное инициирование путем контакта исследуемого материала с нагретым электрическим проводником или лазерное инициирование с использованием твердотельного лазера с длиной волны 635 нм и оптоволоконным выводом излучения. В обоих режимах инициирования момент начала воздействия синхронизован с моментом начала записи скоростными камерами Evercam F 1000-16-C, осуществляющими запись изображений в собственном свечении и изображений лазерного монитора. Лазерный мониторинг, совмещенный с прямой видеорегистрацией, дает возможность одновременного исследования поверхности образца в выбранной области и распространения пламени по всему образцу. При работе в составе лазерного монитора обе камеры работают как ведомые. Особенностью внешней синхронизации камер Evercam является необходимость формирования цугов синхроимпульсов, синхронизованных с импульсами излучения усилителя яркости и начинающихся в момент начала воздействия. В настоящей работе синхронизация реализована с применением оптоволоконных линий связи и платы микроконтроллера STM32F103C8T6. Показана возможность применения спроектированной установки для исследования инициирования и высокотемпературного горения термитной смеси на основе Al–CuO.

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Высокоэнергетические материалы (ВЭМ), в том числе термитные смеси на основе нано- и микропорошков алюминия и оксидов металлов, представляют значительный интерес в области физики горения и взрыва [1–6]. Высокотемпературное горение применяется на практике как для синтеза материалов (СВС), так и для быстрого высвобождения энергии с

целью нагрева. Скорость и характер протекания являются ключевыми характеристиками процессов, от которых зависит качество продуктов синтеза и/или эффективность процесса. Не менее важным является характер инициирования горения [7–9], в ходе которого ВЭМ сообщается энергия от внешнего источника, например лазера или нагретого тела.

Вопросы скоростной визуализации процессов являются актуальными для многих научно-исследовательских задач [9–16], в том числе для исследования горения в режиме реального времени [13–16]. Это связано с возможностью исследования динамики процессов в режиме реального времени с высоким временным разрешением с целью открытия новых явлений и эффектов определения закономерностей развития и протекания процессов. В качестве средств визуализации в последнее время выступают цифровые скоростные камеры, при этом методология исследований и схемы экспериментов могут различаться в зависимости от особенностей сред и динамики процессов.

Сложностью исследования горения высокоэнергетических материалов и высокотемпературных процессов в целом является не только высокая скорость протекания процессов, но и высокая яркость излучения, сопровождающая процесс [1, 2]. Для преодоления яркого свечения при визуализации горения таких материалов или процессов требуется оборудование, позволяющее снизить влияние яркой фоновой засветки. Основные технические решения в этой области связаны с применением систем с активной фильтрацией (лазерные мониторы) и лазерной подсветкой [17–22]. С учетом импульсного режима работы лазера такие системы требуют синхронизации съемки и лазерной подсветки.

Лазерный монитор на основе активной среды на парах бромида меди имеет высокую спектральную яркость и малую длительность импульса излучения (20–40 нс) [23, 24], что дает возможность визуализировать поверхность горящих материалов сквозь яркую широкополосную засветку, создаваемую пламенем. При исследовании процессов лазерного инициирования требуется синхронизация лазерного импульса с началом записи [25, 26]. В ряде задач визуализации необходимо синхронизировать две скоростные камеры [26] для получения двух последовательностей кадров с целью увеличения информативности процесса визуализации. Таким образом, решается задача синхронизации усилителя яркости лазерного монитора и двух скоростных камер. Синхронизация необходима и при инициировании другими способами. В частности, интерес представляет применение лазерного монитора для исследования контактного инициирования горения ВЭМ.

В настоящее время системы, подобные описанным в работах [25–27], реализованы на основе скоростных камер марок Phantom и Photron. В последние годы альтернативой зарубежным аналогам становятся камеры марки Evercam [28]. Их функционирование имеет

ряд особенностей по сравнению с другими моделями, в частности, отличается принцип синхронизации, что имеет принципиальное значение при работе в составе лазерной системы визуализации на основе импульсного усилителя яркости и требует разработки специфических решений.

Целью данной работы является создание multifункциональной лабораторной установки для исследования процесса инициирования горения ВЭМ лазерным излучением или накаливаемым проводником с двухканальной скоростной визуализацией на основе лазерного монитора и скоростных камер Evercam F 1000-16-C.

## 2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Инициирование лазерным излучением характеризуется относительно быстрым процессом теплопередачи, при котором время инициирования может составлять доли миллисекунд [29]. Очевидно, что для исследования таких процессов с использованием скоростных камер необходимо обеспечить синхронизацию начала лазерного воздействия с началом скоростной видеозаписи. При использовании импульсного лазера подсветки или усилителя яркости требуется синхронизация импульса подсветки и экспозиции скоростной камеры. В частности, в работе [25] одна скоростная камера имела два канала синхронизации: 1 – начало записи синхронизовалось с началом лазерного воздействия; 2 – синхроимпульсы скоростной камеры и импульсы накачки активной среды (импульсы излучения) формировались внешним генератором. В работе [26] осуществлялась съемка двумя скоростными камерами, при этом синхроимпульсы обеих камер формировались генератором синхронно с импульсами накачки активной среды и импульс лазерного воздействия был синхронизован с синхроимпульсами камеры. Использовались скоростные камеры Phantom Miro C110 и Photron Fastcam SA1, управление которыми осуществлялось двумя последовательностями импульсов: импульсная синхронизация экспозиции и общий триггер записи. В настоящей работе использовались две одинаковые скоростные камеры Evercam 1000-16-C, синхронизованные друг с другом, для прямой скоростной регистрации изображений горящего объекта и изображений, формируемых лазерной средой. Камеры Evercam 1000-16-C являются относительно новыми на рынке скоростных систем видеозаписи, поэтому их внедрение в лазерные системы визуализации представляет практический интерес.

Основным компонентом системы визуализации являлся лазерный монитор на основе активной среды на парах бромида меди. Оптическая схема лазерного монитора, рассмотренная в работах [25, 26], послужила основой для универсальной лабораторной

установки для исследования инициирования горения, схема которой представлена на рис. 1. Изображение формировалось линзой с фокусным расстоянием 50 см, которая освещала область образца диаметром 4.5 мм. Выходное излучение усилителя яркости фокусировалось на матрице скоростной камеры Evercam 1000-16-C объективом MC Zenitar 1.2/50s. Регистрируемая область наблюдения составляла  $4.0 \times 1.2 \text{ мм}^2$  с пространственным разрешением 12.5 мкм. Разброс продуктов сгорания при горении термитных смесей может превышать 50 см, поэтому перед линзой устанавливалось защитное кварцевое стекло. В отличие от работ [25, 26], в настоящей работе лабораторная установка имеет не только лазерное, но и контактное инициирование посредством нагрева проводника. Это позволило расширить исследовательские возможности установки.

**Рис. 1.** Схема лабораторной установки

В работе использовался усилитель яркости на парах бромида меди с газоразрядной трубкой (ГРТ) диаметром 3 см и длиной активной части (внутри внешнего нагревателя) 60 см. Для накачки активной среды использовался источник питания с импульсным зарядом рабочей емкости, высоковольтные импульсы от которого подавались на электроды ГРТ посредством коаксиального кабеля (HV PS). Особенности конструкции ГРТ и источника накачки рассмотрены в работе [27]. Частота следования импульсов (ЧСИ) накачки, а следовательно, и ЧСИ лазерного излучения, составляла 20 кГц. Условия эксплуатации были оптимизированы для обеспечения однородного профиля луча усиленного спонтанного излучения (ASE) и относительно низкой средней мощности ASE, составляющей 26 мВт на длине волны 510.6 нм. Малая средняя мощность ASE при относительно большой области наблюдения обеспечивала чрезвычайно малую плотность мощности излучения лазерного монитора на поверхности объекта исследования ( $1.6 \text{ мВт/мм}^2$ ), не оказывала заметного воздействия на поверхность объекта наблюдения и исключала вероятность неконтролируемого инициирования. Несмотря на высокую спектральную яркость излучения усилителя яркости, только нейтрального фильтра между усилителем яркости и объективом было недостаточно для подавления засветки, создаваемой яркостным свечением объекта исследования, проходящим по оптическому пути лазерного монитора. Поэтому непосредственно перед камерой устанавливался полосовой фильтр  $510 \pm 5 \text{ нм}$ .

В дополнение к каналу визуализации лазерного монитора устанавливалась вторая скоростная камера Evercam 1000-16-C с объективом MC Zenitar 1.2/50s для регистрации общего вида горящего образца, синхронизованная со скоростной камерой канала лазерной визуализации. Для уменьшения засветки перед объективом устанавливались нейтральные

светофильтры типа НС [30]. В данной работе представлены результаты визуализации со скоростью 2000 кадров/с при пространственном разрешении матрицы  $960 \times 512$  пикселей (для обеих камер). При необходимости скорость съемки может задаваться дискретно путем деления частоты работы усилителя яркости (20 кГц) на целое число. При этом разрешение кадров определяется параметрами, заданными заводом-изготовителем [28]. Таким образом, скорость съемки не может превышать 20000 кадров/с. При меньшей скорости съемки матрица камеры может быть экспонирована одним или несколькими импульсами лазерного излучения.

Модуль инициирования состоит из двух частей (лазерный и контактный), которые переключаются в зависимости от применяемого способа инициирования. При этом для каждого способа можно программно установить разную длительность импульса разрешения, который подается на вход разрешения иницирующего лазера 2 (рис. 1) или на блок питания контактного инициирования. Для лазерного инициирования использовался диодный лазер с длиной волны 638 нм с оптоволоконным выводом излучения. Мощность лазера в непрерывном режиме могла изменяться в диапазоне от 0.2 до 2 Вт. С учетом потерь в оптоволокне и на фокусирующей системе мощность излучения, измеренная на месте образца, в непрерывном режиме могла варьироваться от 0.15 до 1.5 Вт. Диаметр пятна на объекте составлял 0.6 мм, что обеспечивало максимальную плотность мощности  $5.3 \text{ Вт/мм}^2$ . Для контактного инициирования в работе использовалась проволока из нержавеющей стали толщиной 0.6 мм, которая разогревалась до  $700^\circ\text{C}$  со скоростью около  $100^\circ\text{C/с}$  путем пропускания электрического тока. Источник питания для контактного инициирования представлял собой понижающий трансформатор с релейным переключением. На рис. 2а приведен внешний вид модуля инициирования.

**Рис. 2.** Фотография модуля инициирования (а) и схема синхронного подключения скоростных камер (б)

В качестве объекта исследования использовались образцы, полученные путем нанесения нанотермитной смеси Al-CuO+полимер (импирон) на бумажную основу. Термитные смеси изготавливались с применением ультразвукового перемешивания [31]. Выбранные объекты исследования интересны с точки зрения использования ВЭМ в аддитивных технологиях, а также с точки зрения исследования возможности применения скоростных систем с усилением яркости для визуализации подобных объектов.

### 3. СИНХРОНИЗАЦИЯ

Скоростная камера Evercam 1000-16-C имеет вход SYNC-IN для синхронизации экспозиции и TRIG-IN для общего триггера. В отличие от камер Phantom Miro C110 и

Photron Fastcam SA1, синхронизация камеры Evercam 1000-16-C осуществляется одной управляющей последовательностью. Вход SYNC-IN является приоритетным, запись происходит при наличии сигнала на этом входе и не зависит от состояния на входе TRIG-IN. При синхронизации начала записи по входу TRIG-IN скорость записи устанавливается программно, при этом на вход SYNC-IN импульсы не должны подаваться. Таким образом, для синхронизации экспозиции скоростной камеры с излучением лазерного монитора и с моментом начала записи необходимо формировать последовательность импульсов, начинающуюся одновременно с подачей сигнала разрешения на диодный лазер или на блок питания контактного инициирования, с частотой, равной скорости записи камеры.

Синхронная работа двух камер (CAM-1 и CAM-2) осуществляется в режиме, когда одна или обе камеры работают как ведомые [28]. В настоящей работе обе камеры работают как ведомые, входы TRIG-IN обеих камер не подключены, а на входы SYNC-IN поступают синхронные импульсы, формируемые схемой синхронизации. Поскольку синхронизация камер Evercam 1000-16-C отличается от синхронизации камер, используемых нами в более ранних работах, была изготовлена схема синхронизации специально для этих камер. В отличие от известных систем [24–27], в настоящей работе синхронизация реализована с использованием оптоволоконных линий связи (комплекты HFBR-1522Z/HFBR-2522Z) на основе платы микроконтроллера STM32F103C8T6. На рис. 26 приведена фотография подключения камер к блоку синхронизации. По оптоволоконному каналу OPT-IN 13 (рис. 26) импульсы, синхронные с импульсами накачки активной среды, поступают на вход микроконтроллера. На входы микроконтроллера также поступает сигнал 15 с кнопки START или с внешнего генератора импульсов. Микроконтроллер формирует два выходных сигнала: сигнал разрешения инициирования INIT-EN и сигнал управления экспозицией камер SYNC-IN, который подается на два оптических передатчика. Сигналы START и INIT-EN гальванически развязаны с использованием оптронов FOD817. Для минимизации помех от высоковольтных импульсов накачки активной среды электронная схема помещена в металлический корпус и имеет два гальванически развязанных источника питания.

В программе микроконтроллера предустановлены пять значений длительности импульса лазерного излучения и пять значений длительности импульса контактного инициирования, которые выбираются переключателем, для осуществления воздействия на исследуемый образец для режима работы от кнопки Start. По нажатию этой кнопки формируются сигнал INIT-EN и цуг импульсов SYNC-IN. Количество импульсов в цуге предустанавливается программно. Важно, чтобы это значение было меньше значения, установленного в сервисной программе, для избежания перезаписи кадров и потери

начального фрагмента записи. В программе микроконтроллера предустановлены пять значений коэффициента деления частоты следования импульсов (4, 6, 10, 20, 40), поступающих по оптическому каналу OPT-IN от источника накачки усилителя яркости. Таким образом, блок синхронизации формирует цуг импульсов с частотой 5.0, 3.33, 2.0, 1.0 или 0.5 кГц, синхронизированных с импульсами излучения усилителя яркости. По импульсам этого цуга проводится запись кадров цифровыми камерами со скоростью записи 5000, 3333, 2000, 1000 и 500 кадров/с.

На рис. 3 приведены осциллограммы работы схемы синхронизации, записанные с использованием осциллографа Rigol MSO5354. Частота синхронизации экспозиции скоростных камер составляла 2000 Гц. Осциллограммы регистрировались на входе оптического передатчика 18 (рис. 1) (синхросигнал источника накачки усилителя яркости) и на выходах оптических приемников 20 и 21, т. е. непосредственно на входах SYNC-IN скоростных камер. Осциллограммы соответствуют логике работы схемы синхронизации: импульсы SYNC-IN1 и SYNC-IN2 начинаются в момент начала импульса INIT-EN и продолжают как во время импульса INIT-EN, так и после его окончания; импульсы SYNC-IN1 и SYNC-IN2 формируются по каждому десятому импульсу накачки усилителя яркости, т.е. по каждому десятому импульсу излучения.

**Рис. 3.** Осциллограммы импульсов синхронизации...

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 4 приведены результаты визуализации процесса контактного инициирования и горения образца ВЭМ, полученные с использованием разработанной лабораторной установки. На рассмотренном образце часть бумажного основания покрыта ВЭМ, часть не покрыта. На изображении лазерного монитора четко видна граница раздела. Отличием лазерного мониторинга от прямой скоростной визуализации является наблюдение поверхности, по которой распространяется горение. Синхронная регистрация с использованием лазерного монитора позволяет анализировать как интенсивность пламени, так и соответствующее ей изменение поверхности. Кроме поверхности образца можно наблюдать за изменением накаливаемого проводника. При разогреве видно исчезновение бликов, т.е. потемнение поверхности проводника. После воспламенения ВЭМ дальнейший разогрев проводника происходит уже за счет его взаимодействия с ВЭМ. В области контакта видна большая деградация металла по сравнению с областью, где ВЭМ не нанесен.

**Рис. 4.** Визуализация горения образца ВЭМ при контактном инициировании.

На рис. 5 приведены результаты визуализации процесса лазерного инициирования и горения образца ВЭМ, полученные с использованием разработанной лабораторной установки. По кадрам лазерного монитора видно распространение горения от области лазерного инициирования. При этом видно, как оголяется бумажная основа. Поскольку горение происходит с высокой скоростью, воспламенение бумажной основы происходит после прогорания ВЭМ. Таким образом, скоростной лазерный мониторинг дает возможность изучать влияния горения ВЭМ на поверхность, на которую они нанесены или помещены. Лазерное инициирование интересно тем, что поверхность поглощает практически все лазерное излучение. Таким образом, энергию воспламенения, при которой начинается горение, можно определить по времени начала горения, согласно кадрам скоростной записи. По кадрам лазерного монитора было установлено время начала горения образца (74.5 мс), что соответствует энергии 112 мДж.

**Рис. 5.** Визуализация горения образца ВЭМ при лазерном инициировании.

Возможности разработанной экспериментальной установки не ограничиваются рассмотренными в настоящей работе. Система позволяет визуализировать как поверхность горящего ВЭМ, так и поверхность объектов, контактирующих с ВЭМ (накаленный проводник, подложка). Яркое пламя при этом не является препятствием для визуализации.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена лабораторная установка для исследования контактного и лазерного инициирования высокоэнергетических материалов, в которой реализованы два канала скоростной визуализации на основе скоростных камер Evercam F 1000-16-C и лазерного монитора на парах бромида меди. Установка позволяет исследовать процесс инициирования горения, при этом не только наблюдать общий вид протекания процесса, но и визуализировать поверхность горящего материала, его выгорание, влияние горения ВЭМ на подложку и инициирующее тело.

Рассмотрена одновременная работа двух скоростных камер Evercam F 1000-16-C, синхронизованная с импульсным излучением лазерного усилителя яркости и с системой инициирования. Применение скоростных камер Evercam 1000-16-C в двухканальной системе лазерной визуализации расширяет границы применимости данных камер. Для корректной работы скоростной камеры Evercam F 1000-16-C в составе лазерного монитора с усилителем яркости на парах бромида меди разработана схема синхронизации на основе платы микроконтроллера STM32F103C8T6, позволяющая реализовать цуговый режим записи изображений. Отличием представленной системы от подобных систем визуализации с

применением лазерного монитора является реализация гальванической развязки схемы синхронизации, схемы инициирования, источника накачки усилителя яркости и непосредственно самих скоростных камер. Подача синхроимпульсов на скоростные камеры осуществлялась посредством волоконно-оптических линий связи.

В работе с использованием лазерного монитора визуализировалась поверхность ВЭМ, нанесенного на бумажную подложку. Инициирование осуществлялось как накаливаемым проводником, так и лазерным излучением. Полученные результаты показывают возможность использования данной системы для исследования горения слоистых материалов, в том числе полученных методом аддитивных технологий. Полученный опыт использования камер Evercam F 1000-16-C и реализация лазерного монитора с использованием данных камер интересны для расширения возможностей систем визуализации и их дальнейшего внедрения в задачи исследования горения ВЭМ.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории физикохимии высокодисперсных материалов Института физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск) за предоставленные нанопорошки.

Приготовление смесей нанопорошков осуществлялось с использованием оборудования ЦКП “Перспективные материалы и технологии” Севастопольского государственного университета.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zarko V.E., Gromov A.A. *Energetic Nanomaterials: Synthesis, Characterization, and Application*. Amsterdam: Elsevier, 2016.
2. Громов А.А., Хабас Т.А., Ильин А.П. и др. *Горение нанопорошков металлов*. Томск: Дельтаплан, 2008.
3. Sundaram D.S., Yang V., Zarko V.E. // *Combust. Explos. Shock Waves*. 2015. V. 51. № 2. P. 173. <https://doi.org/10.1134/S0010508215020045>
4. Vorozhtsov A.B., Rodkevich N.G., Lerner M.I., Bondarchuk S.S., Dyachenko N.N. // *Int. J. Energetic Mater. Chem. Propul.* 2017. V. 16. № 3. P. 231. <https://doi.org/10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2018025003>
5. Korotkikh A.G., Glotov O.G., Arkhipov V.A., Zarko V.E., Kiskin A.B. // *Combust. Flame*. 2017. V. 178. P. 195. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.01.004>
6. Mostovshchikov A.V., Tokarev D.S., Gubarev F.A., Pirozhkov A.V., Tikhonov D.V. // *J. Surf. Invest.* 2024. V. 18. № 6. P. 1477. <https://doi.org/10.1134/S1027451024701428>

7. Сеплярский Б.С., Ивлева Т.П., Грачёв В.В., Мержанов А.Г. // Журнал физической химии. 2017. Т. 91. № 7. С. 1132142. <https://doi.org/10.7868/S0044453717070299>
8. Dolgoborodov A.Yu., Kirilenko V.G., Brazhnikov M.A., Grishin L.I., Kuskov M.L., Valyano G.E. // Def. Technol. 2022. V. 18. № 2. P. 194. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.01.006>
9. Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И., Черданцев А.В. // Научная визуализация. 2023. Т. 15. № 3. С. 83. <https://doi.org/10.26583/sv.15.3.09>
10. Тригуб М.В., Малахов Д.В., Степахин В.Д. // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 3. С. 199. <https://doi.org/10.15372/AOO20200308>
11. Болотов С.В., Хомченко А.В., Шульга А.В., Болотова Е.Л. // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. Т. 91. № 6. С. 4. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43002087>
12. Дьячков Ю.А., Краснов М.Н., Камишин С.В., Новичков С.А., Коротков Д.И. // Военное обозрение. 2022. Т. 12. № 2. С. 30. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50336989>
13. Li L., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Antipov P.A., Shiyanov, D.V., Gubarev, F.A. // J. Appl. Phys. 2020. V. 127. № 19. P. 194503. <https://doi.org/10.1063/1.5139508>
14. Jiang Y., Wang Y., Baek J. et al. // Combust. Flame. 2022. V. 242. P. 112170. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112170>
15. Wainwright E.R., Dean S.W., Vummidi Lakshman S., Weihs T.P., Gottfried J.L. // Combust. Flame. 2020. V. 213. P. 357. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.12.009>
16. Kline D.J., Alibay Z., Rehwoldt M.C. et al. // Combustion and Flame. 2020. V. 215. P. 417. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.01.020>
17. Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyanov D.V. // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. P. 033111. <https://doi.org/10.1063/1.4869155>
18. Trigub M.V., Platonov V.V., Evtushenko G.S., Osipov V.V., Evtushenko T.G. // Vacuum. 2017. V. 143. P. 486. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.03.016>
19. Батенин В.М., Климовский И.И., Селезнева Л.А. // Доклады АН СССР. 1988. Т. 303. № 4. С. 857.
20. Абрамов Д.В., Галкин А.Ф., Жарёнова С.В., Климовский И.И., Прокошев В.Г. // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. № 2. С. 97. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11394231>
21. Zepper E.T., Pantoya M.L., Bhattacharya S., Marston J.O., Neuber A.A., Heaps R.J. // Appl. Opt. 2017. V. 56. P. 2535. <https://doi.org/10.1364/AO.56.002535>
22. McNesby K.L., Homan B.E., Benjamin R.A., Boyle V.M., Densmore J.M., Biss M.M. // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. № 5. P. 051301. <https://doi.org/10.1063/1.4949520>

23. Оптические системы с усилителями яркости. / Под ред. Г.Г. Петраша. Труды ФИАН. Т. 206. М.: Наука, 1991.
24. Methods and instruments for visual and optical diagnostics of objects and fast processes./ Ed. By G.S. Evtushenko Nova Science Publishers, New York, USA, 2018.
25. Губарев Ф.А., Ким С., Ли Л., Мостовщиков А.В., Ильин А.П. // ПТЭ. 2020. № 3. С. 96. [Gubarev F.A., Kim S., Li L., Mostovshchikov A.V., Il'in A.P. // Instrum. Exp. Tech. 2020. V. 63. № 3. P. 375. <https://doi.org/10.1134/S0020441220030173>]
26. Gubarev F.A., Mostovshchikov A.V., Li L. // Opt. Laser Technol. 2023. V. 159. P. 108981. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108981>
27. Burkin E.Y., Gubarev F.A., Sviridov V.V., Shiyanov D.V. // Iranian J. Electrical and Electronic Engineering. 2023. V. 19. № 3. P. 2617. <https://doi.org/10.22068/IJEEE.19.3.2617>
28. Высокоскоростные камеры EVERCAM, EVERCAM F, EVERCAM HR, EVERCAM HS, EVERCAM L, EVERCAM FL. Руководство пользователя. Версия 5.00. <https://evercam.ru/dokumentatsiya/>
29. Медведев В.В., Ципилев В.П., Решетов А.А. // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 2. С. 83. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9025185>
30. Цветное оптическое стекло и особые стекла. / Под ред. Г.Т. Петровского. Москва: Дом оптики, 1990.
31. Toropkov N.E., Sagun A.I., Kudryashova O.B., Lerner M.I. // Russ. Phys. J. 2023. V. 66. № 9. P. 978. <https://doi.org/10.1007/s11182-023-03032-w>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис. 1.** Схема лабораторной установки: 1 – предметный столик с размещенным образцом; 2 – диодный лазер с оптоволоконным выводом излучения для лазерного инициирования; 3 – линза; 4 – защитные стекла; 5 – накаливаемый проводник для контактного инициирования; 6 – источник питания для контактного инициирования; 7 – лампа подсветки; 8 – скоростная камера общего вида; 9, 13 – объективы; 10, 16 – нейтральные светофильтры; 11 – линза, формирующая изображение лазерного монитора; 12 – усилитель яркости; 14 – камера лазерного монитора; 15 – фильтр  $510\pm 5$  нм; 17 – блок питания усилителя яркости; 18 – формирователь синхроимпульса с оптоволоконным выходом; 19 – блок синхронизации; 20, 21 – оптические преобразователи; 22 – кнопка начала исследования.

**Рис. 2.** Фотография модуля инициирования (а) и схема синхронного подключения скоростных камер (б): 1 – подвижная платформа, 2 – оптоволоконный световод инициирующего излучения, 3 – линза фокусировки инициирующего излучения, 4 – защитное стекло, 5 – накаливаемый проводник, 6 – объект, 7 – лампа подсветки, 8 – линза лазерного монитора, 9 – усилитель яркости, 10 – скоростная камера лазерного монитора (CAM-1), 11 – скоростная камера общего вида (CAM-2), 12 – блок синхронизации, 13 – оптоволоконный вход синхроимпульсов источника накачки (OPT IN), 14 – оптоволоконные линии передачи синхроимпульсов, 15 – кнопка начала эксперимента START, 16 – выход синхронизации инициирования и вход внешней синхронизации, 17 – оптоэлектронные преобразователи синхроимпульсов, 18 – коаксиальный кабель SYNC-IN1 1 и шнур питания оптоэлектронного преобразователя, 19 – коаксиальный кабель SYNC-IN2 2 и шнур питания оптоэлектронного преобразователя.

**Рис. 3.** Осциллограммы импульсов синхронизации: а – синхроимпульсы SYNC-IN1 1, SYNC-IN2 2 и INIT-EN 3, б – синхроимпульсы SYNC-IN1 1, SYNC-IN2 2 при уменьшенной развертке осциллографа и синхросигнал с источника накачки усилителя яркости 4.

**Рис. 4.** Визуализация горения образца ВЭМ при контактном инициировании. Верхний ряд кадров – общий вид, нижний ряд кадров – изображения лазерного монитора.

**Рис. 5.** Визуализация горения образца ВЭМ при лазерном инициировании. Верхний ряд кадров – общий вид, нижний ряд кадров – изображения лазерного монитора.

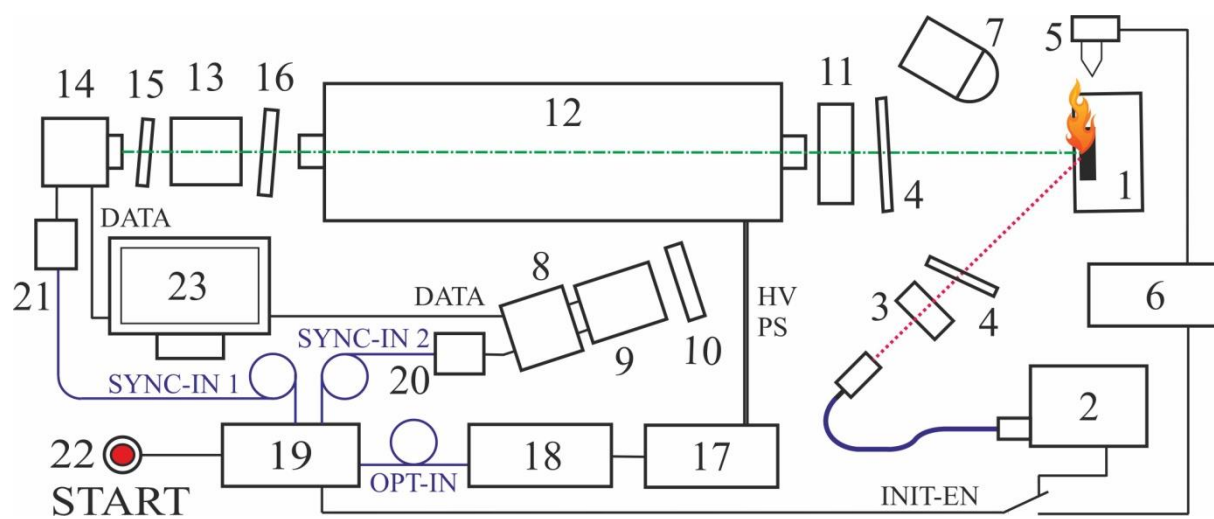
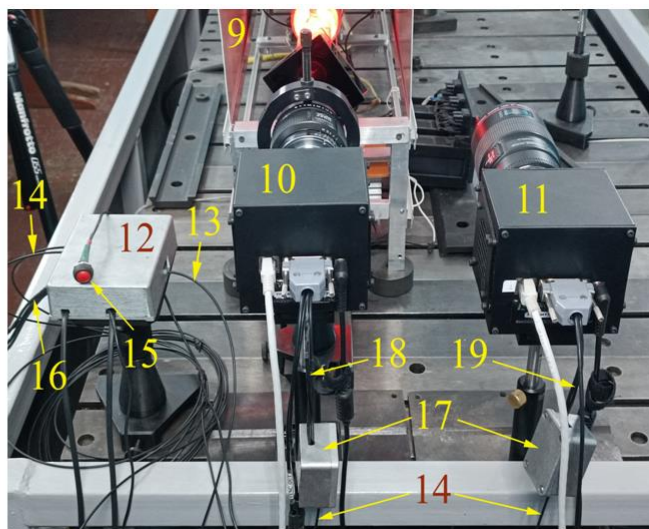


Рис. 1.

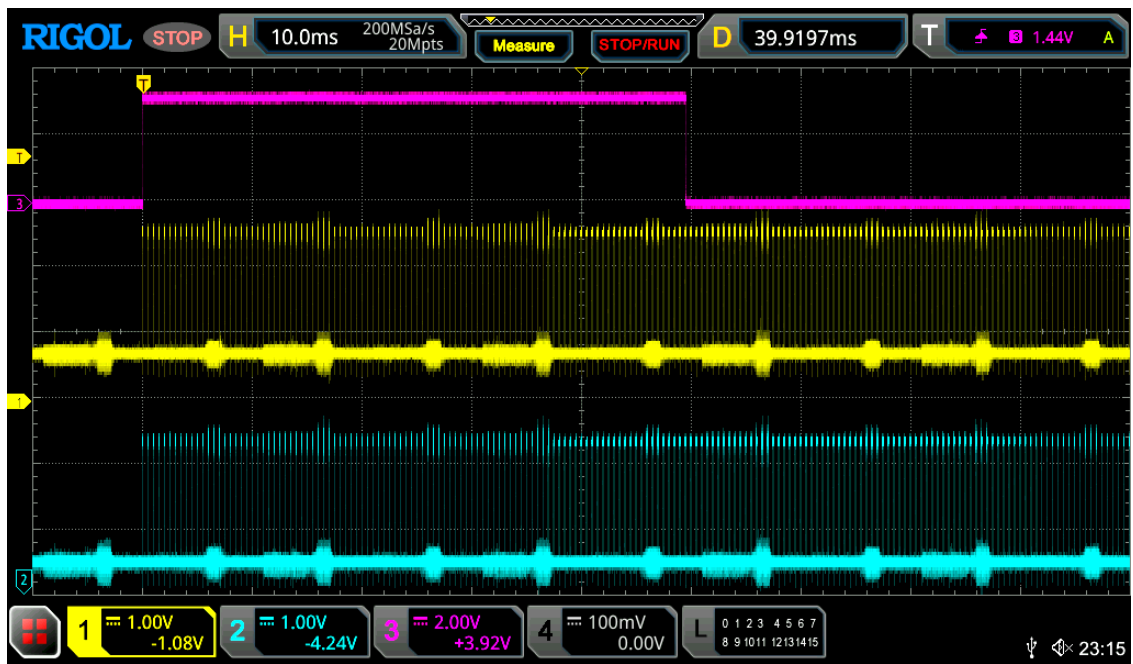


(a)

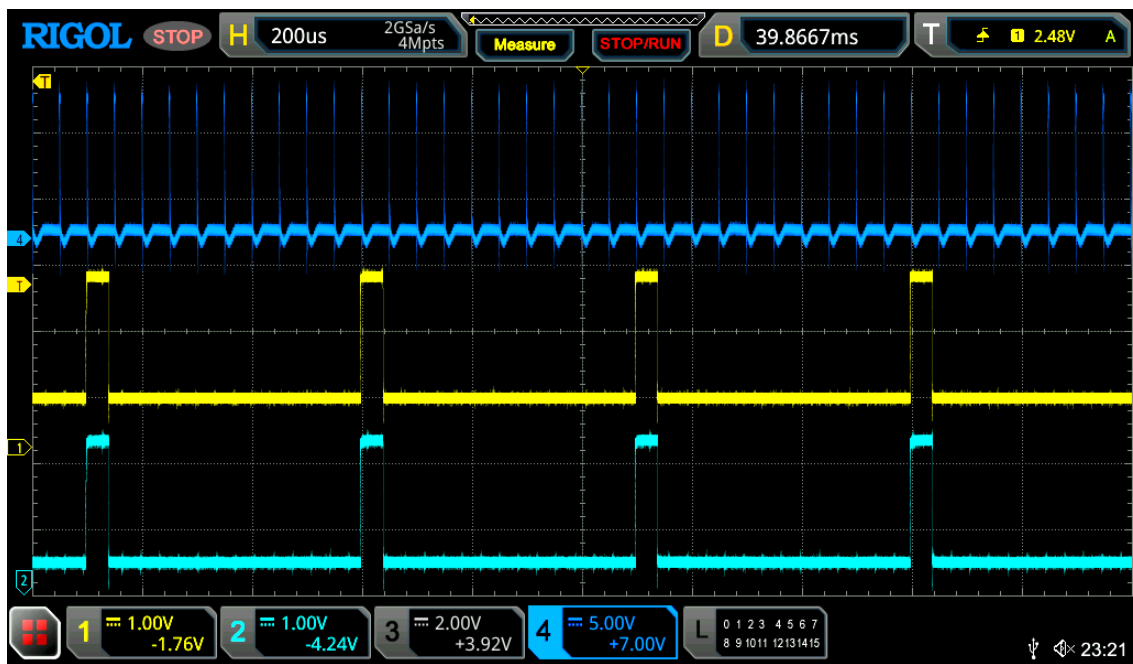


(б)

Рис. 2.



(a)



(б)

Рис. 3.

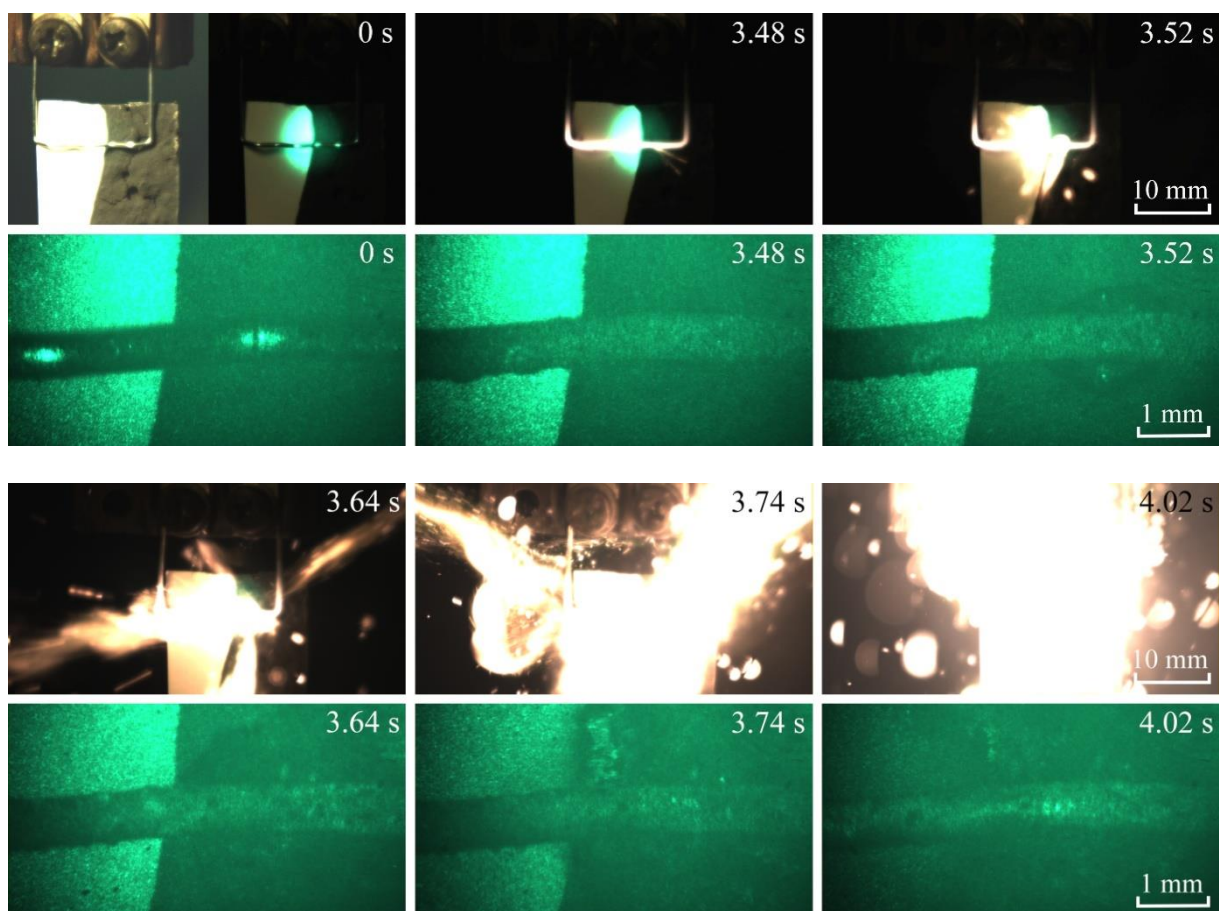


Рис. 4.

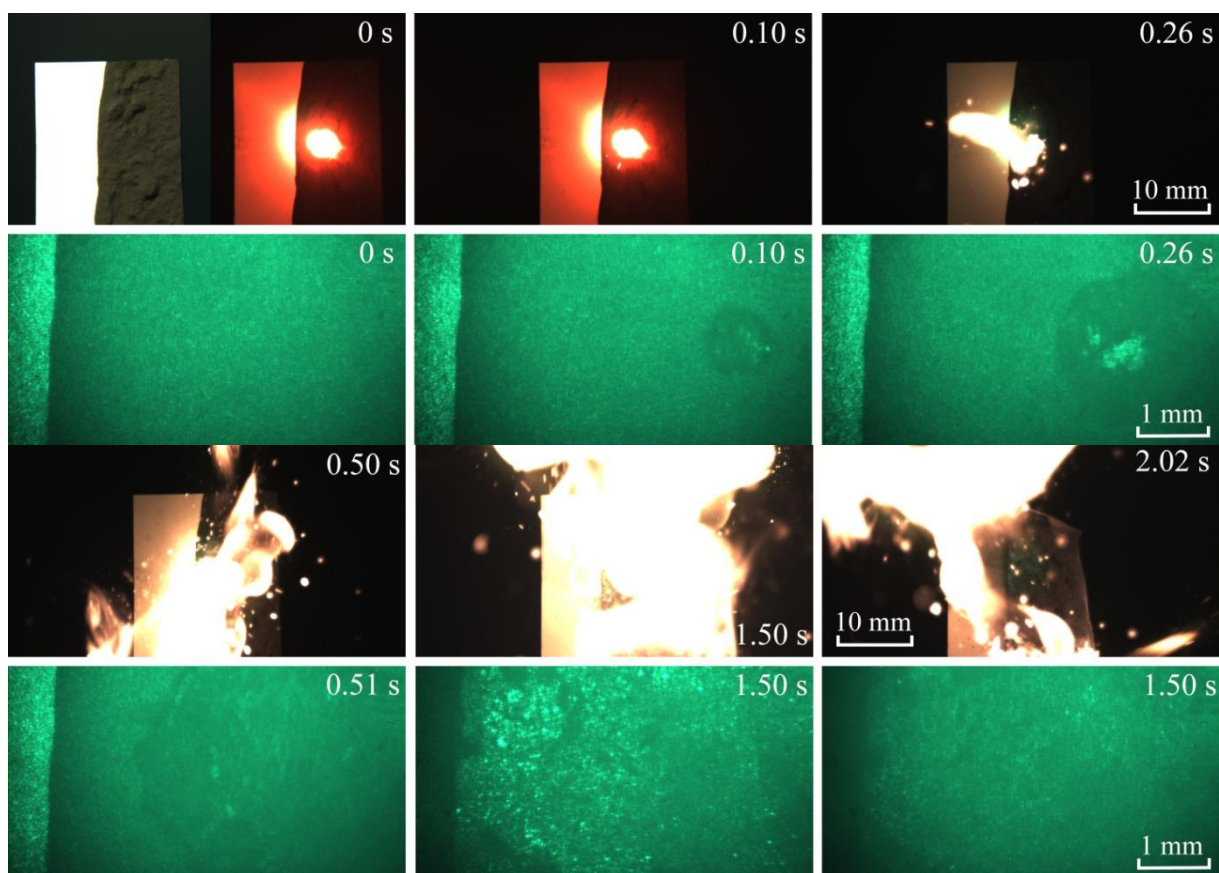


Рис. 5.