

ЭОПы – для лазеров, лазеры – для ЭОПов (опыт работы Отдела фотоэлектроники ИОФ РАН)

М.Я.Щелев

Подведены итоги почти полувековой работы, проведенной Отделом фотоэлектроники ИОФ РАН в области электронно-оптической диагностики быстропротекающих процессов, инициируемых лазерным излучением. Разработаны новые фемтосекундные электронно-оптические преобразователи, обеспечивающие в режиме целевой развертки временное разрешение не хуже 100 фс, а также фотоэлектронные пушки, предназначенные для экспериментов по дифракции электронов с временным разрешением. Продемонстрированы результаты недавних исследований по многократному (до 50-кратного) сжатию электронных пучков пикосекундной длительности в нестационарных фокусирующих полях.

Ключевые слова: пико-фемтосекундная лазерная физика, времяанализирующие ЭОП и стрип-камеры, фотоэлектронные пушки для экспериментов по электронной дифракции с временным разрешением.

1. Введение

Сегодня, как и более 50 лет назад, когда они были изобретены, времяанализирующие ЭОПы являются единственными приборами, позволяющими непосредственно наблюдать развитие во времени отдельных фаз слабосветящихся оптических процессов в интервале 10 пс – 10 фс. Принцип действия времяанализирующего ЭОПа (рис.1) состоит в следующем: сфокусированное на фотокатод оптическое изображение быстропротекающих процессов (БПП) преобразуется в фотоэлектронный аналог в виде пучка ускоренных электронов, который фокусируется с помощью электромагнитной линзы и визуализируется на выходном экране (люминофор, электронно-чувствительная ПЗС-матрица). Одновременно с формированием фотоэлектронного изображения осуществляется его пространственно-временное преобразование (отклонение, запираение и т.п.) на выходном экране с помощью быстроменяющихся электрических полей. Развернутое во времени фотоэлектронное изображение после преобразования на выходном экране в свой оптический аналог представляет собой одно- и/или двумерную картину отдельных временных фаз регистрируемых БПП.

Идея времяанализирующего ЭОПа, в котором одновременно фокусируются и анализируются во времени изображения БПП (streak imaging tube), была запатентована в конце 1940-х годов известным американским ученым австралийского происхождения, работавшим в то время в Англии, Дж. Кортни-Праттом [1]. Физические основы электронно-оптической фотографии с теоретически обоснованным пределом временного разрешения 10 фс были заложены в нашей стране в начале 1950-х годов работами Е.К.Завойского и С.Д.Фанченко [2]. По инициативе ученых Института атомной энергии им. И.В.Кур-

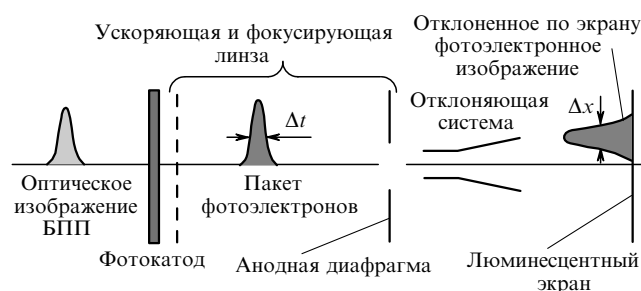


Рис.1. Пространственно-временные преобразования изображений во времяанализирующем ЭОПе.

чатова в НИИ прикладной физики (ныне НПО «Орион») коллективом специалистов в области электровакуумного приборостроения, возглавляемом М.М.Бутсловым, впервые в мире были созданы многокаскадные времяанализирующие ЭОПы серии ПИМ-УМИ, способные регистрировать отдельные фотоэлектроны [3]. На этих так нигде и никем в мире впоследствии не воспроизведенных приборах было реализовано временное разрешение лучше 10 пс в экспериментах по регистрации сверхминиатюрных искровых разрядов (ИАЭ, 1953 г.) [4] и в экспериментах по изучению физики эмиссии лазерного излучения (ФИАН, 1965 г.) [5].

Большой вклад в разработку и тиражирование времяанализирующих ЭОПов и электронно-оптических камер (ЭОК), а также в их применение для научных исследований, в том числе в квантовой электронике, внесли ученые и специалисты ВНИИ оптико-физических измерений, где под руководством Б.М.Степанова с середины 1960-х годов были развернуты работы по электронно-оптическому приборостроению, которые успешно продолжают. Примерно в это же время Ю.Е.Нестерихин вначале в ИЯФ СО РАН, а затем в Институте автоматики и электрометрии СО РАН начал разработку оригинальных времяанализирующих ЭОПов, на которых впоследствии были построены ЭОКи. Был накоплен бога-

М.Я.Щелев. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: m.schelev@ran.gpi.ru

Поступила в редакцию 9 июля 2007 г.

тый опыт по их применению в лазерной физике, сильноточной электронике, физике плазмы. На базе разработок М.И.Пергамент (ИАЭ) Зааводом электронных микроскопов (г. Сумы, Украина) была выпущена серия промышленных ЭОКов на отечественных времяанализирующих ЭОПах. Активная деятельность по разработке и применению высокоскоростных электронно-оптических камер была развернута в ГОИ, НИИ импульсной техники, Институте физики Земли, во Всесоюзном электротехническом институте. Таким образом, российская научная школа стала родоначальницей совершенно нового научного направления в технической физике, известная сегодня как высокоскоростная электронно-оптическая фотография. Положительный эффект от применения ЭОПов в науке и технике оказался настолько заметным, что во всех промышленно развитых странах мира исследования по созданию методов и приборов электронно-оптической регистрации выделались в самостоятельное направление.

ЭОПы отличаются уникальным сочетанием замечательных свойств, например возможностью фиксации пространственных картин БПП объемом $10^3 - 10^8$ элементов с размерами 10–30 мкм в очень широком спектральном диапазоне (1–1600 нм) и до 3 мкм в режиме многофотонного фотоэффекта. Максимальная квантовая эффективность в отдельных спектральных областях может достигать нескольких десятков процентов. Использование усилителей яркости изображений с коэффициентом усиления $10^3 - 10^6$ позволяет регистрировать одиночные фотоэлектроны в каждом элементе изображения. Это означает, что в пределе может быть получено изображение объекта, с пространственно-разрешаемого элемента которого излучается всего несколько квантов. В режиме однофотонного фотоэффекта динамический диапазон регистрации по интенсивности достигает $10^3 - 10^6$. С учетом быстродействия внешнего фотоэффекта и безынерционности отклонения пучка электронов во внешнем электрическом поле временное разрешение в пределе может достигать $10^{-18} - 10^{-20}$ с; оно определяется деброевской длиной волны фотоэлектронов, участвующих в формировании изображения (менее 10^{-2} нм для пучка электронов с энергией 20–30 кэВ). Если к перечисленным достоинствам добавить высокую компьютерную совместимость, то становится очевидной перспективность разработки электронно-оптических измерительных комплексов для экспериментальных исследований БПП.

2. Лазерно-ориентированная электронно-оптическая диагностика

Александр Михайлович Прохоров первым увидел перспективность применения сверхскоростной электронно-оптической диагностики в лазерных исследованиях. Благодаря огромной эрудиции и тонкому научному чутью он пришел к выводу о том, что с помощью ЭОПов можно будет с пикосекундным временным разрешением регистрировать изображения отдельных фаз БПП, инициируемых лазерным излучением. По его инициативе и при его поддержке в начале 1960-х годов в ФИАНе были созданы первые пикосекундные ЭОКи и разработаны методы их применения в лазерных экспериментах [6]. Тогда рекордное временное разрешение ЭОКов было не больше 10 пс, что, однако, не помешало наблюдению

ряда явлений, обнаружить которые было невозможно никакими другими из существовавших методов и средств. Это – экспериментальное обнаружение движущихся фокусов при самофокусировке лазерного излучения в нелинейных средах, наблюдение распространения фронта ионизации лазерной искры путем последовательных пробоев, исследование тонкой временной структуры в излучении лазеров на неодимовом стекле с самосинхронизацией мод, измерение ухода несущей частоты в одиночном пикосекундном лазерном импульсе и затягивания во времени пикосекундных лазерных импульсов, распространяющихся по световодам [7]. Примерами недавнего применения лазерно-ориентированной сверхскоростной электронно-оптической диагностики для изучения БПП служат эксперименты, выполненные Отделом совместно с коллективами, которые возглавляют С.В.Гарнов, Е.М. Дианов, В.И.Конов и И.А.Щербаков.

Так, в экспериментах по изучению динамики формирования и развития фемтосекундной лазерной микроплазмы в газах [8] использовалась пикосекундная ЭОК, позволявшая проводить исследования в широком диапазоне длин волн (300–1100 нм) и отличающаяся высокой спектральной чувствительностью входного фотокатода (2.1 мА/Вт на длине волны 800 нм), достаточным динамическим диапазоном регистрации (не менее 10) и временным разрешением не хуже 2.4 пс. Предложенный и экспериментально реализованный электронно-оптический метод спектрально-временной регистрации плазмы позволил с пикосекундным временным разрешением исследовать динамику формирования и развития спектрального континуума и спектральных линий фемтосекундной лазерной плазмы в газах – воздухе, азоте, аргоне и гелии. В этих экспериментах удалось впервые зарегистрировать генерацию второй (четной) гармоники фемтосекундных лазерных импульсов в плазме докритической плотности.

Для фотографической регистрации детонационно-подобного режима разрушения волоконных световодов под действием интенсивного лазерного излучения использовалась наносекундная ЭОК, работавшая в режиме щелевой развертки [9]. Изображение сердцевины световода диаметром несколько микрон с увеличением проецировалось на входную щель камеры, с помощью которой измерялась скорость распространения оптического разряда. В итоге удалось наблюдать «быстрый», детонационно-подобный режим распространения (со скоростями до 3 км/с) оптического разряда по волоконному световоду, изготовленному из плавленого кварца, при интенсивности лазерного излучения в сердцевине до 40 Вт/мкм².

Пикосекундная ЭОК со щелевой разверткой применялась для регистрации излучения лазеров на новых активных элементах, выращиваемых в ИОФ РАН. Исследовалась работа твердотельных лазеров с диодной накачкой в режиме синхронизации мод. На основе кристаллов смешанного ванадата $\text{Nd}:\text{Gd}_{0.7}\text{Y}_{0.3}\text{VO}_4$ были созданы лазеры, работающие в различных режимах синхронизации мод. Наилучшие результаты были достигнуты в режиме пассивной синхронизации мод на керровской нелинейности. Измеренная с помощью ЭОК длительность импульсов излучения в этом режиме составила 1.7 пс при средней выходной мощности несколько сотен милливатт.

3. Специализированные лазеры для калибровки ЭОПов

Внося заметный вклад в изучение лазеров и проблем взаимодействия лазерного излучения с веществом, сверхскоростная фотоэлектроника нуждалась в совершенствовании, для чего были нужны специализированные лазеры. Именно поэтому одно из традиционных направлений работ Отдела состояло в поиске и разработке лазеров, генерирующих оптические сигналы ультракороткой длительности с известными параметрами для последующей калибровки ЭОПов. Нами были разработаны лазеры на неодимовом стекле, генерирующие только две моды с регулируемым спектральным интервалом между ними [10]. В результате биений мод исходное излучение модулируется с периодом от сотен фемтосекунд до нескольких пикосекунд. При этом период биений и глубина модуляции определяются заранее по спектральным измерениям. Метод биений мод позволил с высокой точностью калибровать скорости разверток и определять временное разрешение ЭОПов, работающих в режиме линейной (по времени) развертки проецируемых на фотокатод изображений БПП, ограниченных узкой щелью (в стрик-режиме). Для импульсной калибровки ЭОПов был создан Nd:YAP-лазер с гибридной синхронизацией мод и пассивной внутрирезонаторной обратной связью на основе кристалла GaAs [11]. Лазер формировал высокостабильные по энергии ($\pm 1.5\%$) и длительности (4.5 ± 0.5 пс) цуги импульсов, а его излучение с успехом использовалось для накачки LiF-лазера на F_2^- -центрах (длительность импульсов менее 0.5 пс) и для накачки волоконно-оптического компрессора (минимальная длительность импульсов около 100 фс).

В Отделе фотоэлектроники ИОФ РАН с 1995 г. работает лазер на титанате сапфира, генерирующий последовательность одиночных импульсов длительностью менее 60 фс при частоте следования 82 МГц. В целом фемтосекундная лазерная Ti:сапфировая установка включает в себя регенеративный усилитель на титанате сапфира, а также генераторы второй (кристалл KDP) и четвертой (кристалл ВВО) гармоник. Используется также параметрический генератор бегущей волны на кристалле ВВО. Недавно введен в эксплуатацию Ti:сапфировый лазер, генерирующий на длине волны 800 нм одиночные высокостабильные импульсы длительностью около 30 фс. Готовится к запуску лазер, обеспечивающий одиночные импульсы с длительностью менее 10 фс. Такие лазеры нужны для измерения предельных параметров (временного разрешения, динамического диапазона, чувствительности и т. п.) экспериментальных образцов электровакуумных изделий, разрабатываемых и изготавливаемых в Отделе.

4. Физика фотоэмиссии и фотокатоды

По мере совершенствования самих лазеров все более возрастали требования к используемой электронно-оптической аппаратуре с точки зрения повышения временного и пространственного разрешения, расширения диапазона спектральной чувствительности, уменьшения времени и нестабильностей срабатывания, увеличения динамического диапазона регистрации, оптимизации систем считывания и компьютерной обработки регистрируемых изображений. Известно, что быстрдействие фотоэлектронных приборов в значительной степени определяется инерционностью фотоэмиссии. В Отделе поставлены работы по изучению времени фотоэмиссии различных фотокатодов. Исследуются классические фотокатоды (Ag–Cs–O и Na–K–Cs–Sb), фотокатоды с отрицательным электронным сродством (ОЭС), а также фотокатоды, изготовленные с использованием современных нанотехнологий. «Разбухание» во времени электронного пакета, определяемое полушириной распределения фотоэлектронов по начальным энергиям (ΔE), зависит от многих факторов, в том числе от материала фотокатода и его толщины, интенсивности и длины волны падающего излучения, типа засветки (прямая или тыльная). В эксперименте показано, что для Ag–Cs–O-фотокатодов с поверхностным сопротивлением порядка 10 Ом/см², разработанных и созданных в Отделе фотоэлектроники, ΔE составляет 0.1 эВ на длине волны 1550 нм и уширяется до 2 эВ на длине волны 395 нм.

Реализован двухкомпонентный (Au + (Sb–Cs)) фотокатод, чувствительный одновременно в мягком рентгеновском и видимом спектральных диапазонах. На базе такого фотокатода создан ЭОП и построена по заказу ФИАН рентгеновская камера, обеспечивающая в режиме щелевой развертки временное разрешение не хуже 10 пс.

Предложен новый принцип создания быстродействующих фотокатодов, основанный на использовании полупроводниковой $In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP/Ag$ -гетероструктуры с барьером Шоттки [12]. В таких фотокатодах при обратном смещении от внешнего источника тока электрическое поле распространяется внутри рабочего слоя, и происходит дрейф фотоэлектронов к поверхности с максимальной скоростью, составляющей для InGaAs примерно 10^7 см/с. Поэтому при толщине рабочего слоя 1 мкм постоянная времени фотокатода не может быть меньше 10 пс. В то же время чувствительность изготовленных ОЭС-фотокатодов на длине волны 1.55 мкм на два порядка величины превышает чувствительность лучших Ag–O–Cs-фотокатодов.

Получены металлические наночастицы в сверхвысоком вакууме (5×10^{-11} Тор) и изучена динамика их роста методами рентгеновской и электронной спектроскопии. Показано, что фотоэмиссия в таких структурах вызвана возбуждением поверхностных плазмонов. Поскольку при этом отсутствует транспорт фотоэлектронов к поверхности, то фотокатоды на основе металлических наночастиц могут обладать малой (около 10 фс) постоянной времени, не превышающей времени жизни плазмонов. Созданные нами фотокатоды на основе наночастиц Ag и Au работают на просвет при нормальном угле падения света в спектральном диапазоне 350–800 нм [13, 14]. Раньше фотокатоды, основанные на поверхностном фотоэффекте, могли работать только на отражение при большом угле падения света, что не позволяло использовать их в фемтосекундных ЭОПах, в которых принципиально необходима малая длина промежутка фотокатод–сетка (несколько сотен микрометров). Изготовлен ЭОП с вводным (помещенным в прибор с помощью вакуумного манипулятора) фотокатодом на основе наночастиц Au, активированных Cs и O. Показано, что фотоэффект в таких структурах определяется вероятностью туннелирования неравновесных фотоэлектронов через потенциальный барьер, образованный активирующим слоем. В приближении треугольного потенциального барьера для фотокатодов на основе наночастиц Ag и Au, а также для

серебряно-кислородно-цезиевого (Ag–O–Cs) фотокатода получено соответствие рассчитанных спектров фотоэмиссии с экспериментальными. Такое представление о фотоэлектронной эмиссии позволяет искать новые пути повышения чувствительности наноструктурированных фотокатодов в ИК области спектра.

5. Теоретическое обеспечение работ по пико-фемтосекундной фотоэлектронике

Дальнейшее продвижение в фемтосекундный диапазон по-новому ставит задачу компьютерного моделирования и совершенствования математического обеспечения, предназначенного для проектирования современных фотоэлектронных приборов. В Отделе развиты теоретическая и алгоритмическая базы для компьютерного моделирования времяанализирующих ЭОПов и дифрактометров, разработаны пакеты прикладных программ (ELIM/DYNAMICS, MASIM), в основу которых положены современные методы вычислительной математики и электронной оптики – метод интегральных уравнений теории потенциала, теория разностных схем, асимптотические методы теории возмущений, теория аббераций эмиссионных изображающих систем и т. д. [15].

Одним из последних достижений Отдела фотоэлектроники в области вычислительной электронной оптики является разработка теории пространственно-временной фокусировки фотоэлектронных пучков в нестационарных электрических полях [16], что позволило создать уникальную фотоэлектронную пушку, обеспечившую в эксперименте более чем 50-кратную временную компрессию фотоэлектронных пучков [17]. Суть решения состоит в создании абсолютно нового поколения фокусирующих линз, в которых, кроме традиционной стационарной электромагнитной линзы для формирования пространственных фотоэлектронных изображений, используется дополнительная нестационарная электронная линза для временной фокусировки. Компьютерное моделирование показало, например, что при длительности падающего на фотокатод лазерного импульса 15 фс минимальная длительность импульса электронов на мишени может составлять 350 ас.

6. Фотоэлектронные пушки для экспериментов по электронной дифракции

Возможность получения импульсных электронных пучков столь малой длительности привела к постановке в Отделе фотоэлектроники исследований по созданию фотоэлектронных пушек для экспериментов по электронной дифракции с временным разрешением (TRED). Принцип действия фотоэлектронного дифрактометра основан на пространственно-временном анализе дифракционной картины, возникающей при рассеянии моноэнергетического ($E = 30 - 50$ кэВ) импульсного электронного пучка фемтосекундной длительности, взаимодействующего с объектом исследований (рис.2). При разработке фотоэлектронных пушек не надо заботиться о сохранении в фотоэлектронном пучке исходной пространственно-временной информации о падающем на фотокатод оптическом сигнале. Основная задача – сделать импульсный электронный пучок как можно короче для того, чтобы проанализировать дифракционное изображение с максимально возможным временным разрешением.

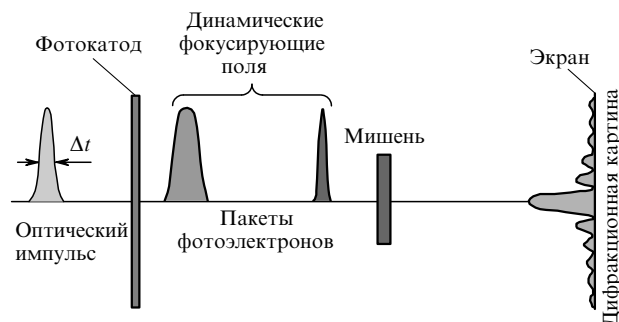


Рис.2. Формирование фотоэлектронных пучков в системе с динамической фокусировкой.

Экспериментальная реализация теоретических задумок по созданию систем формирования импульсных пучков электронов сверхмалой длительности для целей дифрактометрии велась в двух направлениях. Вначале были разработаны системы с электростатическими фокусирующими полями, а затем системы с динамической фокусировкой фотоэлектронных пучков. Мотивация работ определялась необходимостью создания принципиально нового прибора – фемто-аттосекундного дифрактометра, используемого для изучения фундаментальных свойств материи путем регистрации структурной кинетики вещества на атомно-молекулярном уровне. Разработанный и изготовленный в Отделе фотоэлектроники дифрактометр с традиционной стационарной фокусирующей линзой (рис.3) формирует однократные фотоэлектронные сгустки длительностью менее 500 фс, содержащие до $10^3 - 10^5$ фотоэлектронов с энергией 30 кэВ [18]. Угловая расходимость электронного пучка в кроссовере составляет $10^{-2} - 10^{-3}$ рад, а размер пятна равен 0.5–0.7 мм. Работоспособность фотоэлектронной дифрактометрической пушки демонстрировалась на примере алюминиевой фольги толщиной 300 Å, для чего с помощью традиционного электронографа предварительно снималась картина дифракции на этой фольге. Дифракционная картина была получена при времени экспозиции 7 с и токе пучка 50 мкА. На фемтосекундном дифрактометре та же картина была получена за одну лазерную вспышку.

На рис.4 представлен прибор, представляющий собой новое поколение фотоэлектронных дифрактометрических пушек, основанных на принципе динамического сжатия фотоэлектронных пучков [19]. При подаче на фотокатод такой пушки импульсов лазерного излучения ($\tau = 150$ пс, $\lambda = 800$ нм) длительность «сжатых» импуль-

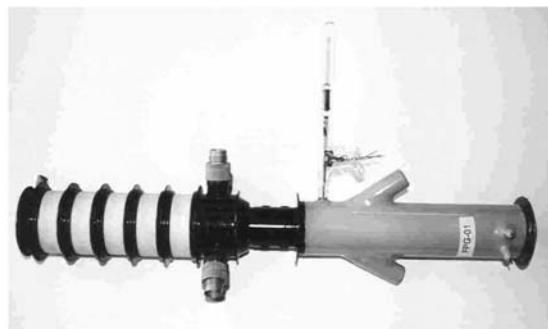


Рис.3. Экспериментальный образец фемтосекундного дифрактометра со стационарной фокусирующей линзой.



Рис.4. Фотоэлектронная пушка с динамической фокусирующей линзой для экспериментов по электронной дифракции с временным разрешением.

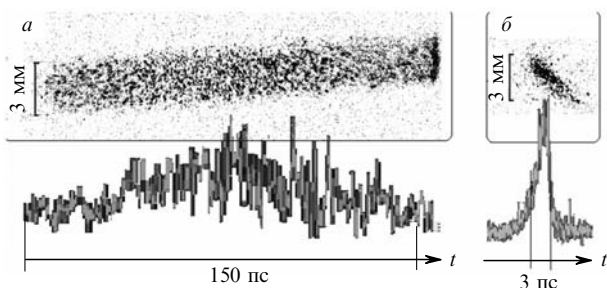


Рис.5. Развернутое на экране фотоэлектронной пушки исходное (а) и сжатое (б) «изображения» электронного пакета и соответствующие им денситограммы.

сов электронов ($E = 10$ кэВ) составила 3 пс (рис.5) при скорости изменения фокусирующего напряжения 10^{12} В/с. В случае увеличения крутизны фокусирующего напряжения до 4×10^{12} В/с фотоэлектронные импульсы длительностью 10 пс (при освещении фотокатода излучением лазерного диода с длиной волны 860 нм) «сжимались» до 285 фс.

7. Разработка электронно-оптической аппаратуры

Очевидно, что новые научные достижения напрямую связаны с уровнем развития научного приборостроения, в том числе средств сверхскоростной электронно-оптической диагностики. К наиболее заметным событиям последних лет следует отнести бесперебойное функционирование научно-исследовательской технологической цепочки, созданной в Отделе фотоэлектроники в конце 1980-х годов по инициативе А.М.Прохорова и предназначенной для проектирования, разработки и изготовления экспериментальных образцов времяанализирующих ЭОПов, фотоэлектронных пушек и камер на их основе. Эта уникальная исследовательско-технологическая цепочка обеспечивает замкнутый цикл работ от постановки задачи до выдачи конечной продукции. В Отделе ведутся работы по теоретической электронной оптике и компьютерному моделированию, по исследованию фотоэмиссии и совершенствованию фотокатодов, по созданию специализированных лазерных стендов, предназначенных для прецизионной динамической калибровки ЭОПов и ЭОКов, а также по конструированию, технологическому сопровождению, изготовлению, тестированию

и применению в физических экспериментах времяанализирующих ЭОПов и ЭОКов и фотоэлектронных дифрактометрических пушек.

Отдел располагает двумя чистыми комнатами, используемыми, в частности, для сборки электродов фокусирующих линз и систем управления электронным изображением. Имеется разнообразное механическое оборудование, в том числе токарно-фрезерное, оптическое и шлифовально-отрезное, а также оборудование для лазерной, электроискровой, аргоно-дуговой, высокочастотной (токи Фуко) и плазменной сварки. Стеклодувная мастерская отвечает всему комплексу современных требований. Отдельно расположена станция водородного отжига, снабженная двумя двухколпаковыми печами, а также двухколпаковой печью для вакуумного отжига. Нанесение проводящих покрытий на внутренние поверхности электровакуумных изделий обеспечивается высоковакуумными напылительными установками, работающими по методу термораспыления. Для обработки вакуумных оболочек ЭОПов и формирования фотокатодов используются восемь вакуумно-откачных постов с высоковакуумной (до 10^{-9} Тор) безмасляной откачкой и термонагревом до 450°C . Два сверхвысоковакуумных (до 10^{-11} Тор) поста применяются для экспериментов по созданию наноструктурированных фотокатодов. Работают несколько течеискателей, в том числе сверхчувствительный гелиевый, способный обнаруживать вакуумные течи при остаточном давлении $10^{-11} - 10^{-12}$ Тор. Нанесение люминесцентных экранов на волоконно-оптические шайбы и стеклянные подложки осуществляется методом катафореза. Для измерения светоотдачи и пространственного разрешения изготовленных экранов используется специально разработанная установка, формирующая электронные изображения в виде испытательной миры с регулируемой энергией электронов в пучке от нуля до 30 кэВ.

К настоящему времени в Отделе разработаны и изготовлены сотни экспериментальных образцов времяанализирующих ЭОПов, в том числе обеспечивающих временное разрешение в режиме щелевой развертки лучше 100 фс (рис.6) [20]. Пространственное разрешение изготавливаемых ЭОПов составляет 30–50 лин./мм, а их чувствительность достаточна для регистрации нескольких десятков одиночных фотонов, падающих на фотокатод в спектральном диапазоне от мягкого рентгеновского (1–10 нм) до ближнего инфракрасного (1600 нм). Рассчитаны, смоделированы и изготовлены фотоэлектронные пушки, которые в нестационарных электрических полях реализуют многократное временное сжатие исходных фотоэлектронных пучков. В ближайших планах



Рис.6. Общий вид фемтосекундного ЭОПа типа ПВ-ФС-М.

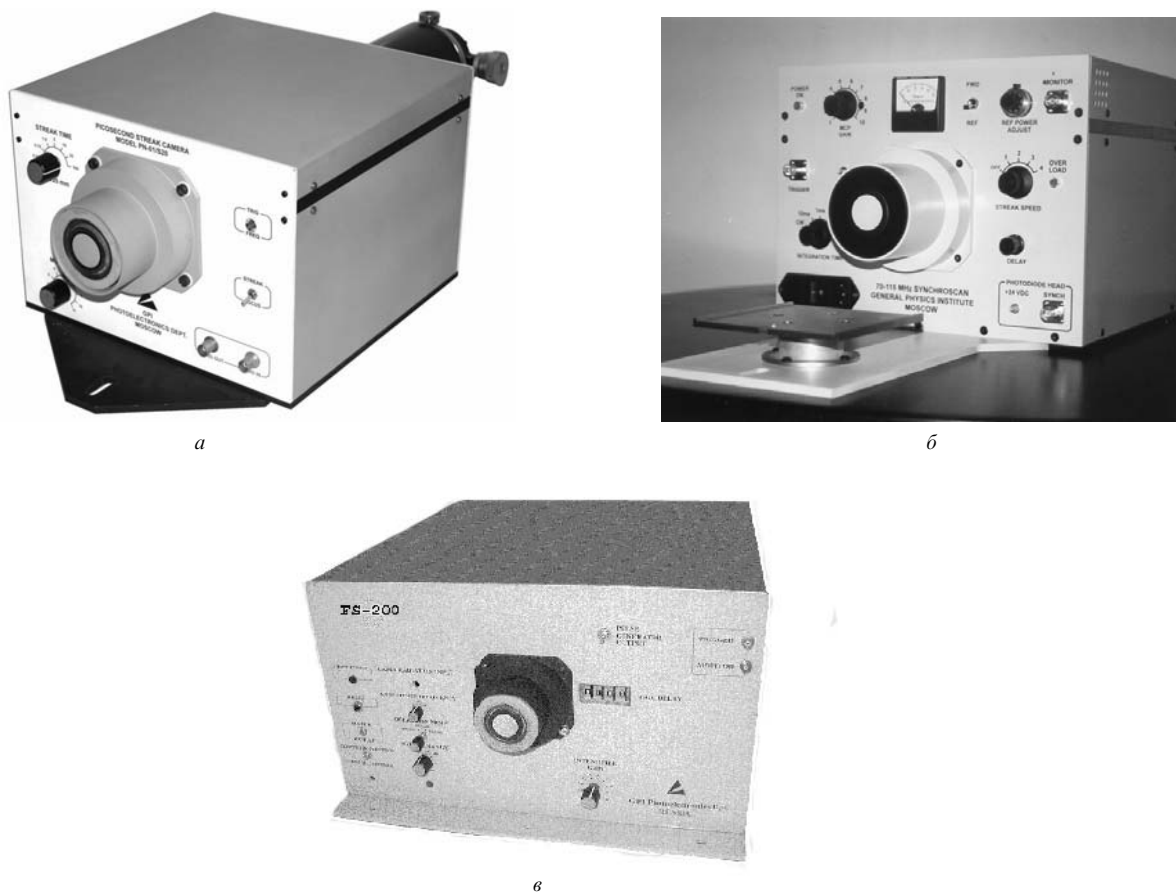


Рис.7. Пико-наносекундная ЭОК (а), синхроскан (б) и пико-фемтосекундная ЭОК (в)..

Отдела – создание фотоэлектронных пушек, генерирующих сгустки электронов ($E = 20 - 50$ кэВ) аттосекундной длительности.

На базе времяанализирующих ЭОПов коллективом Отдела фотоэлектроники разработаны и изготовлены десятки сверхскоростных электронно-оптических камер [21]. Эти камеры работают в однокадровом и многокадровом режимах фотографирования БПП, синхронного сканирования и щелевой развертки. Они покрывают широкий временной и спектральный диапазоны. Например, одна из недавних разработок – ЭОК с временным разрешением 10 пс – чувствительна как в видимом, так и в мягком рентгеновском спектральном диапазоне. На рис.7,а показана пико-наносекундная ЭОК (стрик-камера), изготавливаемая в Отделе небольшими партиями по отдельным заказам, на рис.7,б – ЭОК типа синхроскан, работающая с частотой сканирования 70–115 МГц, а на рис.7,в – камера, обеспечивающая в стрик-режиме временное разрешение не хуже 200 фс. Подобные камеры были поставлены в ФИАН, ИФП СО РАН, ИВТАН, ЦАГИ и другие организации.

Благодаря инициированному А.М.Прохоровым международному научно-техническому сотрудничеству в области высокоскоростного электронно-оптического приборостроения, многие из увидевших свет электронно-оптических камер, создавались в содружестве с ведущими приборостроительными фирмами мира: Hadland-Photonics (Англия), CORDIN (США), Hamamatsu (Япония), Thomson-CSF (Франция), V-Тек (Ю.Корея), Optronis (Германия). Хорошим примером является стрик-камера

с предельным временным разрешением 1.5 пс «Имакон-500» (рис.8,а), сотни экземпляров которой находятся в научных лабораториях многих стран. Этот прибор разработан совместно с фирмой Hadland-Photonics. Партия пикосекундных электронно-оптических камер, работающих в режимах щелевой развертки и синхроскана (рис.8,б), была выпущена российско-американским предприятием PROSCHEN (Prokhorov, Schelev, Nebeker). Интенсивные экспериментальные разработки велись и с японской фирмой Hamamatsu (рис.8,в). Построенные нами и с нашим участием электронно-оптические камеры успешно используются российскими и зарубежными исследователями в самых различных областях науки и техники, в том числе в физике лазеров и лазерной плазмы, в волоконной и нелинейной оптике, в биомедицине и нанохирургии, в фемтохимии и синтезе новых материалов, в оборонных технологиях.

8. Заключение

Научная школа, созданная А.М.Прохоровым в области лазерно-ориентированной высокоскоростной электронно-оптической диагностики БПП, имеет большой международный авторитет и уже многие десятилетия объединяет высококвалифицированных профессионалов. Результаты проделанной работы отражены в многочисленных публикациях (около 500), в том числе в учебных пособиях и книгах. Наши достижения были отмечены многими отечественными и международными премиями и наградами. С 1968 г. сотрудники Отдела непременно

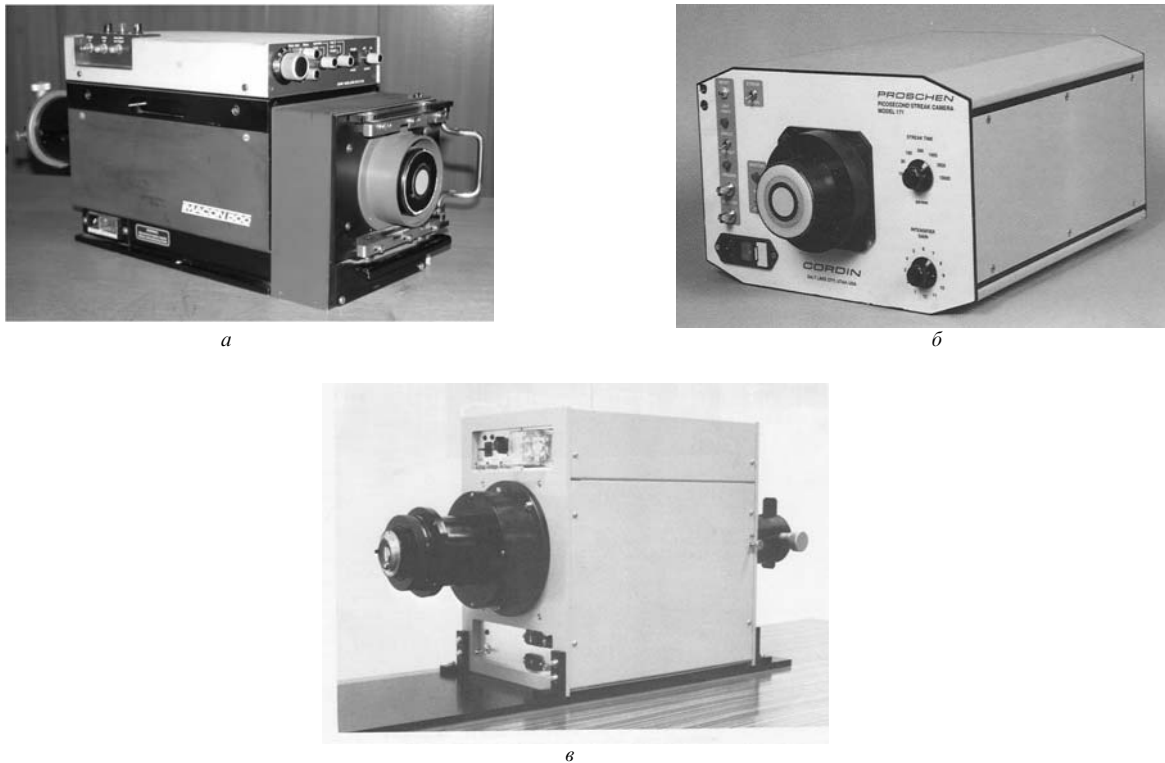


Рис.8. Камеры «Имакон-500» (а), PROSCHEN (б) и экспериментальная электронно-оптическая измерительная система с предельным временным разрешением 1.4 пс (в).

участвуют в работе Международных конгрессов по высокоскоростной фотографии и фотонике (МКВФФ), где выступают с пленарными и приглашенными докладами. Дважды мы брали на себя организацию этих конгрессов в Москве (1980 г. – 14-й конгресс, 1998 г. – 23-й конгресс). Президентом 23-го МКВФФ был академик А.М.Прохоров, а заведующий Отделом фотоэлектроники с 1970-го года и по настоящее время является российским национальным делегатом в международном Комитете по высокоскоростной фотографии и фотонике.

Сверхскоростные фотоэлектронные технологии динамично развиваются в направлении повышения временного разрешения, приближающегося к своему физическому пределу, который оценивается в 10 фс при формировании фотоэлектронных изображений, и в 10 ас (10^{-17} с) при формировании фотоэлектронных пакетов ($E = 20\text{--}50$ кэВ). Сотрудники Отдела фотоэлектроники активно участвуют в этом созидательном процессе.

Автор выражает благодарность за помощь в написании статьи М.А.Монастырскому, Э.Л.Нолле, В.П.Дегтяревой, Е.А.Кузьменко, В.И.Лозовому, Ю.Н.Сердюченко, а также всем сотрудникам Отдела фотоэлектроники ИОФ РАН.

1. Courtney-Pratt J.S. *Research, Suppl.*, **2**, 287 (1949); *Photogr. J.*, **92B**, 137 (1952).
2. Завойский Е.К., Фанченко С.Д. *ДАН СССР*, **108**, 218 (1956); *Appl. Opt.*, **4**, 1155 (1965); *ДАН СССР*, **226**, 1062 (1976).
3. Бутслов М.М. В сб. *Успехи научной фотографии* (М.: Наука,

(1959, т. 6, с. 76); Бутслов М.М., Степанов Б.М., Фанченко С.Д. *Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях* (М.: Наука, 1978).

4. Завойский Е.К., Фанченко С.Д. *ДАН СССР*, **100**, 661 (1955).
5. Коробкин В.В., Щелев М.Я., in *Proc 8th Intern. Congr. High-Speed Photography* (Stockholm, Sweden, 1968, p. 36); *ЖТФ*, **41**, 216 (1971).
6. Коробкин В.В., Малявин Л.П., Щелев М.Я. *ПТЭ*, **4**, 129 (1965); **3**, 145 (1966); **6**, 214 (1968).
7. Щелев М.Я. *УФН*, **170**, 1002 (2000); *Квантовая электроника*, **31**, 477 (2001); **33**, 609 (2003).
8. Букин В.В. и др. *Квантовая электроника*, **36** (7), 638 (2006).
9. Дианов Е.М., Фортгов В.Е. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **83** (2), 84 (2006).
10. Воробьев Н.С., Коробкин В.В. *Труды ФИАН*, **155**, 200 (1985).
11. Бабушкин А.В. *Квантовая электроника*, **15**, 2036 (1988).
12. Нолле Э.Л., Прохоров А.М., Щелев М.Я. *Докл. РАН*, **348**, 45 (1996).
13. Нолле Э.Л., Щелев М.Я. *Письма в ЖТФ*, **30**, 304 (2004); *ЖТФ*, **75** (11), 136 (2005).
14. Нолле Э.Л. *УФН*, **177**, № 10, (2007).
15. Гринфельд Д.Э., Монастырский М.А. и др. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6278**, 15 (2006).
16. Монастырский М.А. и др. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4948**, 305 (2002).
17. Монастырский М.А. и др. *Nucl. Instr. & Methods in Phys. Research A* (in press).
18. Щелев М.Я. и др. *Opt. Eng.*, **37**, 2249 (1998).
19. Андреев С.В. и др. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6279**, 000 (2006).
20. Дегтярева В.П., Белолипецкий В.С. и др. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4948**, 281 (2002).
21. Щелев М.Я. В сб. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы*. Под ред. В.Е.Фортгова (М.: Янус-К, 2006, т. V-1, с. 148).