

Пико-фемтосекундная электронно-оптическая фотография в квантовой электронике*

М.Я.Щелев

Применительно к задачам квантовой электроники обсуждаются возможности экспериментального достижения временного разрешения электронно-оптических преобразователей (ЭОП), соответствующего теоретическому пределу (10 фс). Создано новое поколение ЭОП, обеспечивающих временное разрешение 200–500 фс при регистрации лазерного излучения фемтосекундной длительности. На базе времяанализирующих ЭОП построены принципиально новые приборы – фемтосекундные фотоэлектронные дифрактометры, предназначенные для исследования динамики фазовых переходов в веществе методами дифракции электронов с энергией 20–40 кэВ.

Ключевые слова: ЭОП, дифрактометр, фемтосекундные технологии, лазерная плазма, нелинейная волоконная оптика.

1. Введение

Среди традиционных методов и средств измерений, используемых в квантовой электронике (осциллография, автокорреляционные методики, видеография, оптико-механическая фотография), особое место занимает сверхскоростная фотоэлектроника с применением времяанализирующих электронно-оптических преобразователей (ЭОП). Уникальность регистрирующих свойств ЭОП определяется большим объемом одновременно регистрируемой пространственной информации (до 10^3 – 10^8 элементов с минимально разрешаемыми размерами 20–30 мкм). При этом в каждой точке изображения, в принципе, обеспечивается линейная зависимость между числом электронов, эмиттируемых фотокатодом, и числом квантов входного электромагнитного излучения (динамический диапазон внешнего однофотонного фотоэффекта превышает шесть порядков).

Чувствительность современных фотоэлектронных регистраторов, снабженных усилителем яркости изображения с коэффициентом усиления 10^3 – 10^6 , достаточна для регистрации каждого отдельного фотоэлектрона, покинувшего фотокатод. Это означает, что, например, в случае многощелочного фотокатода в разрешаемом пространственном элементе должно содержаться только 5–10 фотонов с длиной волны 500–600 нм.

Современные классические (Ag–O–Cs, Na–K–Cs–Sb) и многокомпонентные (Au + Cs₃Sb; CsI + Cs₃Sb) фотокатоды, а также фотокатоды с отрицательным электронным сродством (InGaAs/InP) позволяют изучать быстротекающие процессы (БПП) в спектральном диапазоне, охватывающем рентгеновское (0.1–1 нм), УФ (115–350 нм), видимое (380–780 нм) и ближнее ИК

(850–1600 нм) излучения. Спектральная чувствительность фотокатодов может быть существенно расширена в красную область спектра при работе в режиме многофотонного фотоэффекта с повышенной интенсивностью входного излучения.

Помимо вышеперечисленных свойств ЭОП обладает чрезвычайно высоким временным разрешением (в настоящее время в экспериментах реализовано временное разрешение 180–500 фс). За счет практически безынерционного внешнего фотоэффекта двумерное изображение БПП, сформированное на фотокатод ЭОП, преобразуется в свою фотоэлектронную реплику, переходя из оптического диапазона в более высокочастотный, характерный для электронов с энергией в несколько десятков килоэлектронвольт (де-бройлевские длины волн – сотые-тысячные доли нанометра). В принципе это означает, что временное разрешение фотоэлектронного информационного тракта превышает на несколько порядков временное разрешение чисто оптического тракта.

На практике максимально достижимое временное разрешение ЭОП лимитируется разбросом времени пролета фотоэлектронов между фотокатодом и экраном, который прямо пропорционален разбросу начальных скоростей фотоэлектронов и обратно пропорционален напряженности электрического поля у фотокатода. На временное разрешение существенно влияет уширение электронных волновых пакетов на пути их следования от фотокатода к экрану за счет кулоновского расталкивания электронов и аберраций фокусирующих линз и отклоняющих систем.

И, наконец, развернутые во времени (с максимальными фазовыми скоростями, превышающими скорость света в вакууме) фотоэлектронные изображения могут быть введены в компьютер для последующего хранения, обработки и наглядного представления.

Российская научная школа внесла весомый вклад в формирование физических принципов электронно-оптической регистрации БПП (Е.К.Завойский, С.Д.Фанченко и др.[1]), в разработку и реализацию времяанализирующих ЭОП и электронно-оптических камер (ЭОК) (М.М. Бутслов, Б.М.Степанов и др. [2]), в их применение в им-

*По материалам доклада на семинаре «Сверхбыстрые процессы в веществах и лазерные фемтотехнологии» (Н.Новгород, Институт прикладной физики РАН, 7–8 декабря 2000 г.).

пульсной светотехнике, ядерной физике, сильноточной электронике, в физике плазмы (М.П.Ванюков [3], Ю.Е.Нестерихин [4], М.И.Пергамент [5] и др.). В 1958 г. на IV Международном конгрессе по высокоскоростной фотографии в Кельне наши ученые впервые в мире предсказали возможность достижения 10-фемтосекундного предела временного разрешения электронно-оптической хронографии [6]. Так было положено начало кропотливой и пока еще не завершенной работы по практической реализации этого временного разрешения.

2. Пикосекундные ЭОП серии ПИМ-УМИ в лазерных экспериментах

К концу 60-х годов отечественные ЭОП серии ПИМ-УМИ (рис.1,а) получили широкое распространение в квантовой электронике и нелинейной оптике. Они обеспечили получение богатейшей пространственно-временной информации при изучении дискриминации и самосинхронизации аксиальных мод в лазерах на рубине и неодимовом стекле, при фотографировании поля генерации в ближней и дальней зонах, при регистрации спектров, когерентности и волнового фронта.

С помощью ЭОП был выполнен цикл работ по исследованию лазерной искры, возбуждению ВРМБ-компонент, возникающих в случае рассеяния лазерного излучения в газообразном азоте при давлении 150 атм, по наблюдению кинетики самофокусировки лазерного излучения в нелинейных жидкостях. Эти эксперименты стали возможными благодаря высокому временному (менее 500 пс) и пространственному разрешению камер [7], разработанных нами на базе трубок ПИМ-УМИ, а также ориентированности этих камер на проведение лазерных экспериментов (задержка времени срабатывания составляет менее 100 нс при нестабильностях ± 0.1 нс).

После реализации режима синхронизации аксиальных мод в лазерах на рубине и неодимовом стекле возникла потребность измерения пространственно-временной структуры лазерных УКИ. Их реальная длительность не могла быть измерена ни осциллографическими методами (временное разрешение не лучше 50–100 пс), ни методами оптико-механической фотографии (предел разрешения – единицы наносекунд). Обладая, в принципе, фемтосекундным временным разрешением, автокорреляционные методы не решали проблемы измерения реальной пространственно-временной структуры однократных сигналов. Информацию о временном профиле интенсивности для фемтосекундных лазерных импуль-

сов можно получать методами оптического стробирования со спектральным разрешением. При этом спектральные измерения основываются на кросс-корреляции, для осуществления которой может быть использована либо восприимчивость третьего порядка (оптический эффект Керра), либо генерация гармоник.

К этому времени в используемой нами электронно-оптической аппаратуре максимальная скорость развертки была увеличена до $5 \cdot 10^9$ см/с, что в принципе обеспечивало достижение временного разрешения, равного 5 пс, а время срабатывания было снижено до 20 нс при нестабильностях ± 0.05 нс [8].

Поставленный нами в [9] эксперимент по изучению тонкой временной структуры в излучении лазера на неодимовом стекле, работавшего одновременно в режимах модуляции добротности и самосинхронизации аксиальных мод на просветляющемся красителе, исключал неоднозначную интерпретацию имевшихся к тому времени экспериментальных результатов (осциллографических и автокорреляционных). Если на осциллографе наблюдался регулярный цуг одиночных на аксиальном интервале импульсов, то при тех же условиях картина генерации, снятая на ЭОП, была довольно неустойчивой и менялась от вспышки к вспышке. Как следовало из энограмм, каждый зафиксированный на осциллографе «одиночный» импульс состоял из нескольких подимпульсов длительностью 10–15 пс, отстоящих друг от друга на расстоянии ~ 330 пс.

Поскольку на трубках ПИМ-УМИ не удавалось зарегистрировать одиночные лазерные импульсы с длительностью менее 10–20 пс, встал вопрос о том, существуют ли в лазерном излучении более короткие импульсы. Оценочные формулы Завойского–Фанченко [1, 10] указывали на то, что предельное разрешение трубок ПИМ-УМИ, определяемое хроматическими аберрациями катодной линзы, должно составлять единицы пикосекунд: минимальная длительность фотоэлектронного импульса $\tau_{ch} \sim 10^{-11} \alpha / E$ (E – напряженность электрического поля у фотокатода, выраженная в электростатических единицах заряда; $\alpha = 1 - 5$ – коэффициент, изменяющийся в зависимости от формы распределения начальных энергий фотоэлектронов). В трубках ПИМ-УМИ напряженность электрического поля у фотокатода составляла 0.3–0.6 кВ/см ($\sim 1 - 2$ ед. СГСЭ).

Для измерения предельного временного разрешения ЭОП и точной временной калибровки скоростей развертки изображений, ограниченных узкой щелью, нами был предложен метод биений мод [11, 12]. Сущность метода состоит в регистрации на экране ЭОП синусоидально-модулированного во времени лазерного излучения с заранее известными периодом и глубиной модуляции, что позволяет с высокой точностью прокалибровать временную развертку ЭОП. При этом полуширина временной аппаратной функции вычисляется из уравнения свертки входного сигнала с аппаратной функцией.

Метод биений мод оказался незаменимым во всех тех случаях, когда было трудно сформировать регулярные и надежно воспроизводимые оптические импульсы с длительностью, в несколько раз меньшей, чем предполагаемая полуширина аппаратной функции. Эксперименты по измерению временного разрешения трубок ПИМ-УМИ [13] были выполнены с помощью лазера на неодимовом стекле, генерировавшего либо две аксиальные моды с регулируемым спектральным интервалом между ними,

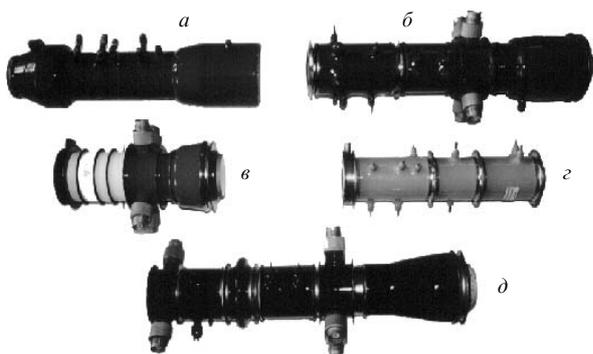


Рис.1. Отечественные пико-фемтосекундные ЭОП (показаны без усилителей яркости изображения): ПИМ-3, 1949 г. (а); ПВ-001, 1978 г. (б); БШВ-4, 1989 г. (в); ПИФ-01, 1991 г. (г); ПВ-ФС, 2001 г. (д).

либо одиночные УКИ. Измерения, проведенные при различных (от 10 до 20 кВ) ускоряющих напряжениях на трубках и при освещении Ag–O–Cs-фотокаатода излучением на основной частоте и второй гармонике неодимового лазера, показали, что полуширина временной аппаратной функции ЭОП типа ПИМ-УМИ составляет 15–20 пс (1060 нм) и 30–40 пс (530 нм). Так впервые в прямом эксперименте подтвердилось положение о том, что основное ограничение на полуширину временной аппаратной функции накладывает разброс начальных энергий фотоэлектронов.

3. Новое поколение субпикосекундных ЭОП с ускоряющей сеткой

К концу 70-х годов в нашей стране на базе приборов ПИМ-УМИ было создано новое поколение субпикосекундных ЭОП, специально предназначенных для регистрации БПП в лазерных экспериментах [14]. В новых трубках (от УМИ-93М до ПВ-001) за счет ускоряющей сетки оригинальной конструкции напряженность поля у фотокаатода была повышена до 30–60 кВ/см, (т. е. в 100 раз по сравнению с ПИМ-3). Коммутация изображений осуществлялась затворной системой компенсирующего типа и одной-двумя парами отклоняющих пластин с коаксиальными выводами и полосой пропускания до 3 ГГц.

В трубках использовались низкоомные Ag–O–Cs-фотокаатоды (с поверхностным сопротивлением порядка 10 Ом/□) со спектральной чувствительностью, перекрывающей диапазон 115–1550 нм, а также двухкомпонентные (Au + SbCs₃) фотокаатоды, одновременно чувствительные как в видимом, так и в мягком рентгеновском (0.1–1 нм) спектральных диапазонах. Выходной экран монтировался на волоконно-оптическом диске, а вместо громоздких усилителей яркости с магнитной фокусировкой изображений использовались микроканальные пластины.

Электронные ловушки, устанавливаемые перед люминесцентным экраном, позволили существенно улучшить отношение сигнал/шум в развернутых изображениях. Вместо сверхчувствительной пленки, используемой для фотографирования изображений с экрана ЭОП, были успешно испытаны системы считывания изображений на базе передающих телевизионных камер на сверхчувствительных кремниконах, а в последствии и на оптических и электронно-чувствительных ПЗС-матрицах.

Динамические испытания ЭОП и информационных систем, построенных на базе субпикосекундных ЭОП нового поколения, проводились на разработанных нами калибровочных лазерных стендах, генерирующих синусоидально-модулированные и одиночные сигналы пико- и субпикосекундной длительности [15, 16]. В 1976 г. на камере с ЭОП типа УМИ-93М (скорость развертки $V = 5 \cdot 10^{10}$ см/с, $E = 40$ кВ/см) были зарегистрированы биения мод от лазера на неодимовом стекле с минимальным периодом 1.4 пс при максимальной глубине модуляции до 40 % [17]. Оцененное временное разрешение приблизилось к 0.7 пс. Той же камерой были измерены импульсы от лазера на неодимовом стекле с быстрорелаксирующим красителем [18]. Минимальная длительность одиночных лазерных импульсов составила 1.5 ± 0.5 пс.

Для прямых экспериментов по измерению временной аппаратной функции трубки ПВ-001 (см. рис.1,б) нами был запущен фемтосекундный лазер на красителе рода-

мин 6Ж с накачкой от непрерывного аргонового лазера, работавший в квазинепрерывном режиме по принципу сталкивающихся импульсов [19]. Полуширина аппаратной функции при освещении ЭОП одиночными импульсами длительностью 90–120 фс на длине волны 610 нм составила 0.9 пс ($E = 30$ кВ/см, $V = 2 \cdot 10^{10}$ см/с, Ag–O–Cs-фотокаатод). Эта же функция сузилась до 0.7 пс при освещении фотокаатода импульсами длительностью менее 500 фс от лазера на LiF:F₂⁻, работавшего на длине волны 1.15 мкм [20].

Одна из задач, которую требовалось решить с помощью пикосекундных ЭОП, состояла в изучении возможности их использования для исследования лазеров ИК диапазона за пределом спектральной чувствительности фотокаатодов, определяемым однофотонным фотоэффектом. Нами была продемонстрирована принципиальная возможность регистрации пикосекундных импульсов лазера на кристалле иттрий-эрбий-алюминиевого граната, работавшего в режиме активной синхронизации мод на длине волны 2.94 мкм [21]. Ag–O–Cs-фотокаатод трубки ПВ-001 надежно регистрировал импульсы излучения на основной частоте, а также на частотах второй (1.47 мкм) и четвертой (0.73 мкм) гармоник. Пороговая чувствительность регистрации составляла соответственно 10^8 , 10^6 и 10^3 Вт/см². В этих экспериментах был определен порядок нелинейности фотоотклика, составивший 2.6 ± 0.3 на второй гармонике и 4.6 ± 0.5 на основной частоте лазера.

На камерах с времяанализирующими ЭОП нового поколения был проведен большой цикл исследований и получена ценная пространственно-временная информация. Изучались волоконно-оптические эрбиевые лазеры ИК диапазона (1.55 мкм), предназначенные для создания сверхбыстродействующих волоконно-оптических линий связи [22]. Наблюдалось усиление света при нелинейном взаимодействии встречных волн в одномодовом световоде [23] и затухание пикосекундных лазерных импульсов при самопереключении света в туннельно-связанных оптических волноводах [24]. Регистрировалось затухание флуоресценции в реакционных центрах фотосинтезирующих организмов [25]. Было сфотографировано рентгеновское излучение плазмы, образованной при фокусировке на плоскую титановую или углеродную мишень, расположенную в вакуумной камере, одиночных импульсов длительностью 10 пс с энергией 1–3 Дж от мощной установки на неодимовом стекле [26].

4. Фемтосекундные фотоэлектронные технологии

Создание в начале 90-х годов лазеров, генерирующих импульсы длительностью десятки и единицы фемтосекунд [27], стимулировало новые исследования в электронике и оптоэлектронике, в волоконной и нелинейной оптике, в физической химии, в создании новых материалов с заранее программируемыми свойствами, в молекулярной динамике. Актуальность разработки прямых методов диагностики БПП на основе ЭОП с фемтосекундным временным разрешением стала очевидной. Для решения этой проблемы в ИОФАНе в 1989 г. по инициативе академика А.М.Прохорова был организован Отдел фотоэлектроники. Задача Отдела состояла в освоении фемтосекундной фотоэлектроники – нового междисциплинарного направления научных исследований, включающего

работы по физике фотоэмиссии, фотокатодам как классического типа, так и с отрицательным электронным сродством [28], электронной оптике и математическому моделированию [29], по физике фемтосекундных лазеров [30], электровакуумной технологии и электронно-оптическому приборостроению [31], включая вопросы съема, ввода в компьютер, обработки и визуализации развернутых во времени фотоэлектронных изображений.

Новая попытка улучшения временного разрешения ЭОП была предпринята совместно с Х.Ниу [32], когда на компьютере была смоделирована 50-фемтосекундная трубка с цилиндрической фокусирующей линзой и компенсатором разброса тангенциальных составляющих начальных энергий фотоэлектронов. На экспериментальном макете этого ЭОП, изготовленном во ВНИИОФИ (см. рис.1,е), была измерена полуширина временной аппаратной функции, составившая 500 ± 50 фс в режиме однократной линейной развертки ($E = 60$ кВ/см, $V = 1.2 \cdot 10^{10}$ см/с) [33]. Несоответствие расчетных и экспериментальных данных выявило необходимость совершенствования технологии изготовления ЭОП при условии оперативного взаимодействия всех участников разработки – от математиков и физиков-экспериментаторов до инженеров-технологов и мастеров-операторов. Стала очевидной необходимость воссоздания как старой, частично утраченной, так и отработки новой, научно-обоснованной и воспроизводимой технологии изготовления фемтосекундных ЭОП.

К середине 90-х годов в ИОФАНе была создана компактная, гибкая и замкнутая исследовательско-технологическая и опытно-производственная цепочка по разработке и изготовлению экспериментальных образцов фемтосекундных ЭОП – от технического задания до конечной продукции. Изготавливаемые нами в настоящее время ЭОП типа ПИФ-1 (рис.1,з) и ПВ-ФС (рис.1,д) отличаются мировой конкурентоспособностью [34]. Их параметры: размер входного поля фотокатода до 4×20 мм; пространственное разрешение, отнесенное к плоскости входного фотокатода, 30–50 пар линий на миллиметр; масштаб электронно-оптического отображения фотокатод/экран 0.7–2; спектральный диапазон чувствительности 115–1600 нм; эквивалентный темновой фон не выше 10^{-7} лм/см². Отметим, что в ЭОП ПВ-ФС предусмотрен режим импульсного питания промежутка фотокатод – сетка. При достигнутой в этом ЭОП напряженности электрического поля у фотокатода 300 кВ/см расчетное временное разрешение не превышает 100 фс.

Для определения временных характеристик ЭОП и ЭОК в Отделе фотоэлектроники в 1995 г. была запущена в работу фемтосекундная лазерная установка (рис.2), с помощью которой было измерено максимальное временное разрешение (400 фс) камеры типа синхроскан [35] на трубке ПИФ-01. Синхроскан работал в режиме накопления $10^3 - 10^4$ изображений импульсов длительностью 60 фс, генерируемых Тi:сапфировым лазером с частотой повторения 82 МГц.

Возможность формирования в ЭОП электронных пучков фемтосекундной длительности открыла новую область его применения – в качестве электронной пушки фотоэлектронного дифрактометра, предназначенного для изучения фундаментальных свойств материи путем наблюдения динамики химических реакций в веществе методами дифракции электронов с высоким временным разрешением [36]. Ранее Ж.Муру и С.Вильямсон [37] с

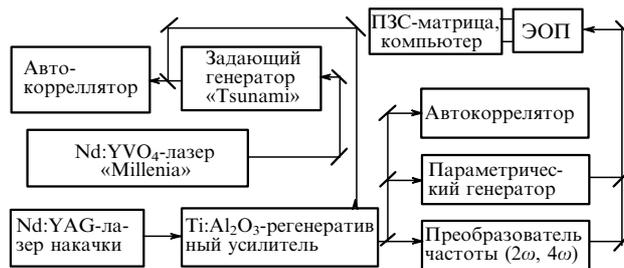


Рис.2. Блок-схема фемтосекундной лазерной установки. Параметры излучения задающего генератора: длительность импульса 60 фс, частота повторения 82 МГц, длина волны 800 нм; параметры излучения на выходе усилителя: длительность импульса 120 фс, частота повторения 10 Гц, пиковая энергия 1 мДж; перекрываваемый спектральный диапазон 210–1600 нм.

помощью электронных импульсов (100 пс, 20 кэВ), формируемых во времяанализирующем ЭОП, наблюдали картину электронной дифракции от пленки алюминия толщиной 150 Å в режиме «на просвет». Мы также попробовали использовать для дифрактометра фемтосекундную фотоэлектронную пушку от времяанализирующего ЭОП типа ПВ-001 [38], но после нескольких попыток стало очевидно, что совместить функции ЭОП (генерирование и измерение длительности фотоэлектронного пучка) и электронографические функции (формирование пучка электронов с требуемой расходимостью и получение дифракционных картин) можно лишь в специальном приборе – фемтосекундной дифрактометрической камере на основе фемтосекундной фотоэлектронной пушки (ФФП).

Наша первая ФФП была рассчитана на компьютере с использованием собственного пакета программ, спроектирована и в 1996 г. изготовлена в Отделе фотоэлектроники ИОФАН [39]. По расчетам пушка обеспечивала формирование фотоиндуцированного импульса электронов длительностью 500 фс с энергией до 30–40 кэВ и энергетическим разбросом менее 0.5 эВ. Электронный импульс имел угловую расходимость, меньшую 0.5° , и фокусировался на мишень в пятно диаметром 0.7 мм (по уровню $1/e$).

Блок-схема проведения динамических испытаний ФФП приведена на рис.3,а. Измерялся временной профиль фотоэлектронного импульса (рис.4), сформированного в ФФП, и было показано, что в однократном им-

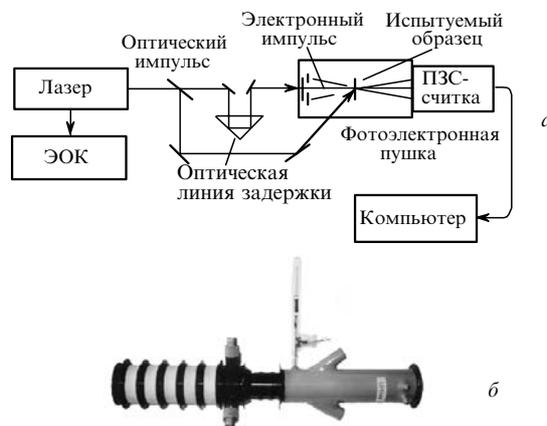


Рис.3. Блок-схема экспериментов по фемтосекундной дифракции электронов (а) и внешний вид фотоэлектронной пушки (б).

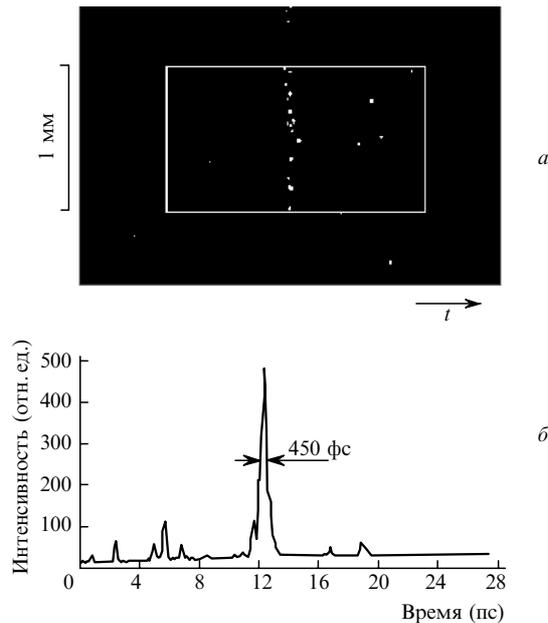


Рис.4. Временная развертка импульса длительностью 500 фс, генерируемого ФФП (а), и соответствующая микроденситограмма (б).

пульсе содержится до 10^3 фотоэлектронов. Для проверки технических параметров разработанной ФФП использовалась алюминиевая пленка толщиной 300 Å. Вначале с помощью стандартного электронографа регистрировалась статическая дифракционная картина. При этом пленка просвечивалась электронным пучком с энергией 30 кэВ в течение 7 с при токе 50 мкА (рис.5,а). Затем этот же образец помещался в ФФП. Была зарегистрирована дифракционная картина (рис.5,б) в режиме накопления $4 \cdot 10^4$ фотоэлектронных импульсов длительностью 500 фс, следующих с частотой 82 МГц и содержащих $\sim 10^3$ электронов в импульсе. Это означает, что чувствительность разработанной нами ФФП почти на шесть порядков выше, чем у стандартного электронографа, а ее быстродействие выше почти на тринадцать порядков!

5. Заключение

Итак, сверхскоростная электронно-оптическая диагностика является эффективным исследовательским инструментом в решении многих задач квантовой электроники. На этапе становления лазерной физики ЭОП с временным разрешением 10 пс обеспечивали прямую регистрацию быстропротекающих процессов в реальном масштабе времени. Чтобы сохранить преимущества этого метода исследований в современных лазерных экспериментах, когда минимальная длительность лазерных импульсов сократилась от единиц пикосекунд до единиц фемтосекунд, необходимо по крайней мере на порядок повысить временное разрешение ЭОП. Как показал многолетний опыт, решить эту задачу очевидными способами (например, только за счет повышения напряженности поля у фотокатода) уже не удается.

Один из возможных методов повышения временного разрешения ЭОП на один-два порядка был предложен Т.И.Кузнецовой [40]. В новом методе используется специальный алгоритм обработки данных, полученных об исследуемом сверхкоротком оптическом сигнале при его спектральной развертке на ЭОП с высоким спектраль-

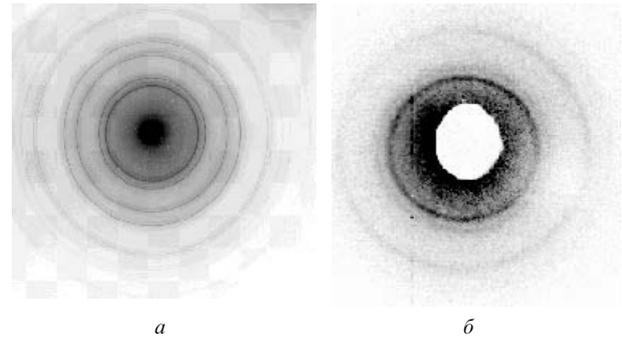


Рис.5. Дифракционная картина алюминиевой пленки толщиной 300 Å, снятая на стандартном электронографе (а) и на 500-фемтосекундной фотоэлектронной пушке (б).

ным разрешением. В [41] подробно рассмотрена процедура восстановления сигналов пикосекундной длительности и с помощью компьютерного моделирования проиллюстрированы возможности метода.

В своих уроках по фемтосекундной фотографии С.Д.Фанченко [10] предлагает перенести эксперименты по созданию 10-фемтосекундного ЭОП на Луну! Во-первых, там прекрасный вакуум. Во-вторых, солнечный отжиг в глубоком вакууме и отсутствие пыли гарантируют абсолютную чистоту всех поверхностей прибора и решение многих технологических проблем.

Однако, возвращаясь к решению земных задач, следует подчеркнуть, что основной вопрос сейчас заключается в рассмотрении и учете более сложных и менее изученных факторов, влияющих на временное разрешение ЭОП. В первую очередь это относится к физическим свойствам фотокатодов и фотоэмиссии в режиме сильных электрических полей, воздействующих на фотокатод.

В результате проникновения внешнего поля в тонкие (сотни ангстрем) фотокатодные пленки энергетические уровни фотоэмиттера будут сильно искажены. На аномальную зависимость временного разрешения от напряженности электрического поля у фотокатода мы обращали внимание ранее, например при измерении аппаратной функции трубки ПВ-001 с помощью 300-фемтосекундных одиночных импульсов лазера на красителе родамин 6Ж (615 нм) [42].

В трубках с ускоряющей сеткой работа выхода фотокатода заметно снижается, а спектральная чувствительность смещается в красную область (эффект Шоттки). Кроме того, в промежутке фотокатод – сетка вследствие эффектов пространственного заряда и наведенного потенциала, вызванного конечным сопротивлением фотокатода, может нарушиться линейное распределение поля. Сегодня настало время для скрупулезного изучения этих и многих других факторов, определяющих реально достижимый предел временного разрешения ЭОП.

Автор выражает искреннюю благодарность А.М. Прохорову за всестороннюю поддержку работ по фемтосекундной фотоэлектронике. Представленные здесь результаты были получены благодаря слаженной работе всех сотрудников Отдела фотоэлектроники ИОФАН, которым автор выражает глубокую признательность. Автор также благодарен А.А.Маненкову и П.Г.Крюкову за ценные замечания при обсуждении данной статьи.

1. Завойский Е.К., Фанченко С.Д. *ДАН СССР*, **100**, 661 (1955); *ДАН СССР*, **108**, 218 (1956); *Appl.Optics*, **4**, 1155 (1965); *ДАН СССР*, **226**, 1062 (1976).
2. Бутслов М.М., Степанов Б.М. *Фанченко С.Д. ЭОП и их применение в научных исследованиях* (М., Наука, 1978).
3. Ванюков М.П. *УФН*, **60**, 295 (1956).
4. Ефимов В.М., Искольдский А.М., Нестерихин Ю.Е. *Электронно-оптическая фотосъемка в физическом эксперименте* (Новосибирск, Наука, 1978).
5. Пергамент М.И., Нестерихин Ю.Е., Комельков В.С. *Успехи научной фотографии*, **9**, 64 (1964).
6. Butslav M.M. et al. In: *IV Intern. kongress fur kurzzeit photographie* (Verlag, Darmstadt, 1959, p.230).
7. Коробкин В.В., Малявкин Л.П., Щелев М.Я. *ПТЭ*, № 4, 129 (1965).
8. Коробкин В.В., Щелев М.Я. *ПТЭ*, **6**, 214 (1968).
9. Малютин А.А., Щелев М.Я. *Письма в ЖЭТФ*, **9**, 445 (1969).
10. Fanchenko S.D. *Proc.SPIE*, **3516**, 15 (1998).
11. Korobkin V.V., Malyutin A.A., Schelev M.Ya. *J.Photogr.Sci.*, **17**, 179 (1969).
12. Щелев М.Я. В кн.: *Устройства и элементы систем автоматизации научного эксперимента* (Новосибирск, Наука, 1970, с.253).
13. Korobkin V.V., Schelev M.Ya. In: *Proc.VIII ICHSP* (Almqvist and Wiksell, Stockholm, 1968, p. 36); *ЖТФ*, **41**, 216 (1971).
14. Bryukhnevich G.I. et al. *Proc.SPIE*, **97**, 339 (1976); *Proc.SPIE*, **1032**, 16 (1988).
15. Воробьев Н.С., Коробкин В.В. *Труды ФИАН*, **155**, 200 (1985).
16. Бабушкин А.В. *Квантовая электроника*, **16**, 2036 (1989); *Proc.SPIE*, **1358**, 888 (1990).
17. Брюхневич Г.И., Воробьев Н.С., Коробкин В.В., Прохоров А.М., Степанов Б.М., Щелев М.Я. *Письма в ЖТФ*, **2**, 1009 (1976).
18. Бабенко В.А. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **25**, 366 (1977).
19. Vorobiev N.S., Degtyareva V.P. et al. *Proc.SPIE*, **793**, 178 (1987).
20. Бабушкин А.В. и др. *Квантовая электроника*, **13**, 2262 (1986).
21. Водопьянов К.Л. и др. *Квантовая электроника*, **10**, 471 (1983).
22. Brito-Cruz C.H., Scarpato M. A. et al. *Proc.SPIE*, **1358**, 550 (1990).
23. Воробьев Н.С., Грудинин А.Б., Дианов Е.М. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **44**, 15 (1986).
24. Майер А.А., Щербачев И.А. и др. *Квантовая электроника*, **14**, 1157 (1987).
25. Воробьев Н.С. и др. В кн.: *Труды XIV МКВФФ* (М., 1980, с.593).
26. Bryukhnevich G.I. et al. *Laser + Elektro-Optik*, **4**, 40 (1974); *Phys.Letts*, **51**, 249 (1975); *Proc.XI ICHSP* (Chapman and Hall, London, 1974, p.554, 561); *Proc.SPIE*, **189**, 492 (1978).
27. Крюков П.Г. *Квантовая электроника*, **31**, 95 (2001).
28. Нолле Э.Л., Прохоров А.М., Щелев М.Я. *ДАН*, **348**, 45 (1996).
29. Degtyareva V.P., Monastyrskii M.A., Schelev M.Ya. *Proc.SPIE*, **2869**, 124 (1996).
30. Vorobiev N.S., Cheburkin A.N., Smirnov A.V. et al. *Proc.SPIE*, **2869**, 735 (1996).
31. Degtyareva V.P. et al. *Proc.SPIE*, **1801**, 44 (1992); *Proc.SPIE*, **2869**, 112 (1996).
32. Niu H., Degtyareva V.P. et al. *Proc.SPIE*, **1032**, 79 (1988).
33. Babushkin A.V., Bryukhnevich G.I. et al. *Proc.SPIE*, **1801**, 218 (1992).
34. Щелев М.Я. *УФН*, **170**, 1002 (2000).
35. Schelev M.Ya., Serduychenko Yu.N., Vaschenko G.O. *Proc.SPIE*, **2869**, 154 (1996).
36. Zewail A.H. *Science*, **242**, 1645 (1988); *Scientific American*, № 12, 76 (1990); *J.Phys.Chem.*, **100**, 12701 (1996); *Nature (London)*, **386**, 159 (1997).
37. Mourou G., Williamson S. *Appl.Phys.Letts*, **41**, 44 (1982); *Proc.SPIE*, **348**, 313 (1982).
38. Bryukhnevich G.I. et al. *Proc.SPIE*, **1801**, 115 (1992).
39. Schelev M.Ya. et al. *Proc.SPIE*, **2869**, 157 (1996); *Optical Engng*, **37**, 2249 (1998); *Proc.SPIE*, **3516**, 979 (1998); Патент РФ № 2131629 от 30 декабря 1997 г.; в сб. *Перспективное изобретение*, вып.1 (2000).
40. Кузнецова Т.И. *Письма в ЖЭТФ*, **63**, 924 (1996).
41. Кузнецова Т.И., Малютин А.А. *Квантовая электроника*, **25**, 571 (1998).
42. Degtyareva V.P., Gorbunkov M.V. et al. *Proc.SPIE*, **348**, 590 (1982); *Труды ФИАН*, **155**, 200 (1985).