

# Академик А.М.Прохоров и фемто-аттосекундная фотоэлектроника

М.Я.Щелев

*Среди множества научных областей, развитие которых тесно связано с именем академика А.М.Прохорова, достойное место занимает высокоскоростная фотография с использованием времяанализирующих электронно-оптических преобразователей (ЭОП). Именно А.М.Прохоров с середины шестидесятих годов прошлого столетия до первых лет нового века возглавлял в нашей стране работы по изучению фундаментальных процессов, лежащих в основе высокоскоростной электронно-оптической фотографии. Им было организовано международное сотрудничество по созданию и применению методов и средств сверхскоростной электронно-оптической диагностики в лазерной физике. Он обеспечил условия для разработки конкурентоспособных ЭОПов, дифрактометров, электронно-оптических камер и для их успешного применения в квантовой электронике, нелинейной и волоконной оптике, физике лазерной плазмы и управляемом термоядерном синтезе (УТС). Под его влиянием сформировалось и успешно развивается новое научное направление – фемто-аттосекундная фотоэлектроника.*

**Ключевые слова:** фемто-аттосекундная лазерная физика, оптика и фотоэлектроника; времяанализирующие электронно-оптические преобразователи, камеры, дифрактометры.

## 1. Введение

Начало истории высокоскоростной фотографии относится к XIX веку. В это время два выдающихся ученых, француз Е.Ж.Мареу [1] и англичанин Е.Ж.Маубридж [2] (оба 1830–1904) изобрели оптико-механическое устройство для получения четких изображений объектов, движущихся со скоростью, гораздо большей, чем та, при которой человеческий глаз способен различать отдельные фазы такого движения. Будучи пионерами высокоскоростной кинематографии, они смогли с помощью «электро-фотографической съемки» преодолеть предел временной разрешающей способности человеческого глаза ( $\sim 10^{-1}$  с) и получить четкое изображение отдельных фаз движения людей и животных с временным разрешением  $10^{-2}$ – $1.7 \times 10^{-4}$  с. К настоящему времени оптико-механическая высокоскоростная фотография практически достигла своего предела по временному разрешению ( $\sim 10^{-9}$  с), определяемому конструкционной прочностью вращающихся компонентов оптико-механических камер [3, 4]. Ее позиции ныне занимает высокоскоростная видеография\*, которая основана на применении приборов с зарядовой связью (ПЗС), управляемых компьютером. Наилучшие ПЗС-видеокамеры обеспечивают съемку до сотни двумерных ( $312 \times 260$  пикселей и более) изображений быстротекающих процессов (БПП) со скоростями более  $10^6$  кадров в секунду [6].

\*Современная классификация методов и средств высокоскоростной фотографии приведена в учебном пособии [5].

М.Я.Щелев. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: schelev@ran.gpi.ru, m.schelev@ran.gpi.ru; тел.: 135 32 65; факс: 135 23 88

Поступила в редакцию 29 января 2003 г., после доработки – 8 мая 2003 г.

Настоящая революция в высокоскоростной фотографии произошла после того, как в конце 1940-х гг. в СССР усилиями наших выдающихся соотечественников Е.К.Завойского, М.М.Бутлова и др. были созданы и испытаны первые в мире времяанализирующие электронно-оптические преобразователи (ЭОП), обеспечившие фотографирование БПП с временным разрешением не хуже  $10^{-11}$  с [7]. Проведя теоретический анализ предельных возможностей времяанализирующих ЭОПов, Е.К.Завойский и С.Д.Фанченко [8] установили, что фотоэлектронные методы регистрации БПП отличаются уникальным сочетанием рекордных характеристик. В их числе высокое временное (менее  $10^{-14}$  с) и пространственное ( $50$ – $100$  пар лин./мм) разрешение, предельно высокая чувствительность (регистрация одиночных фотоэлектронов), широкий спектральный диапазон ( $0.1$ – $1700$  нм), большой объем одновременно регистрируемой информации ( $10^6$ – $10^8$  пикселей) и широкий диапазон входных интенсивностей (более  $10^5$ ).

Обладая незаурядным даром научного предвидения, А.М.Прохоров (рис.1) оценил уникальные регистрирующие свойства времяанализирующих ЭОПов и способствовал внедрению методов электронно-оптической диагностики в практику лазерных экспериментов. Автору данной статьи в 1962–2002 гг. посчастливилось работать под непосредственным руководством А.М.Прохорова над решением этой проблемы.

## 2. Субнаносекундные ЭОПы в предлазерные времена (1928–1962 гг.)

В период 1928–1934 гг., когда Александр Михайлович жил с родителями в Ленинграде, учился в школе, а затем на рабфаке, его зарубежные современники G.Holst, J.H.Boer, P.T.Farnsworth и др. [9, 10] впервые предложили идею создания электронно-оптического преобразовате-



Рис.1. Гений совершает то, что должен совершить. Талант – то, что может. Талант поражает цель, недоступную для других. Гений поражает цель, которую никто не видит.

ля и фотоэлектронного умножителя. В то время эти ученые вряд ли представляли себе возможность использования своих изобретений для регистрации БПП. Тогда было важно сделать видимыми изображения объектов в ИК области и решить проблему ночного видения. В первоначальной версии электронно-оптического преобразователя («стакан Холста», или ЭОП с прямым переносом изображения) качество изображения было низким: пространственное разрешение не превышало нескольких пар линий на миллиметр. В 1930-е гг. P.E.Brüche, O.Z.Scherzer, G.A.Morton, V.K.Zworykin, M.Ardene, J.D.McGee, A.Lallemand и др. [11–16] разработали теорию электростатических и магнитных линз. В результате в Германии, Англии, Франции и США было создано множество ЭОПов: однокаскадных и многокаскадных, чувствительных в ИК и рентгеновском спектральных диапазонах. Тогда же компанией AEG-Telefunken были изготовлены трехэлектродные электростатические ЭОПы типа AEG-126, которые для того времени были наиболее совершенными. После окончания Второй мировой войны именно эти приборы были использованы в высокоскоростной фотографии. Например, в 1949 г. М.П.Ванюков [17] в ГОИ благодаря импульсной коммутации ускоряющего напряжения на таких ЭОПах создал миллисекундную камеру для покадровой съемки, а J.S.Courtney-Pratt [18] в Англии с помощью пары магнитных отклоняющих катушек, питающихся от средневолнового генератора тока, осуществил развертку фотоэлектронных изображений с наносекундным временным разрешением.

В нашей стране первые ЭОПы с прямым переносом изображений были созданы в 1938–1939 гг. В.И.Красовским, С.Ю.Лукияновым и др. во Всесоюзном электротехническом институте им. В.И.Ленина. В конце 1940-х гг. М.М.Бутслов и его коллеги на основе теоретических расчетов Л.А.Арцимовича [19] разработали серию однокаскадных ЭОПов с электростатической фокусировкой изображения. Тогда же М.М.Бутслов совершил два важных

технологических прорыва. Он создал усилители яркости изображений, содержащие до шести каскадно-соединенных (через слюдяное окно микронной толщины) трубок с магнитной фокусировкой, которые обеспечили предельную чувствительность (т.е. способность регистрировать абсолютно минимальный сигнал: единичный электрон, испускаемый с поверхности входного фотокатода). Введение внутрь объема ЭОПа отклоняющих пластин, подобных тем, что используются в осциллографе, было вторым прорывом. В самом деле, примененное J.S.Courtney-Pratt отклонение фотоэлектронных изображений магнитным полем было ограничено по скорости индуктивностью отклоняющих катушек. Однако тогда никто и не пытался отклонять электронный пучок, несущий фотоэлектронное изображение, с помощью быстроменяющихся электрических полей. Скептики пытались убедить Бутслова, что любое отклоняющее электрическое поле разрушит фотоэлектронное изображение. Но при поддержке Е.К.Завойского он создал электростатический ЭОП типа ПИО-1, имевший кроссовер (область наименьшего сечения пучка, несущего фотоэлектронное изображение) очень маленького (доли миллиметра) диаметра, но достаточной протяженности (несколько сантиметров). В области этого кроссовера Бутслов поместил электронный затвор, состоящий из двух пар пластин и диафрагм, а за затвором – еще две пары отклоняющих пластин. Окончательное устройство получило название ПИМ-3 (преобразователь импульсный многокадровый). В дальнейшем времяанализирующий каскад ПИМ-3 был сочленен через тонкие слюдяные пленки с многокаскадным усилителем яркости с магнитной фокусировкой. В итоге была создана серия уникальных, не имевших мировых аналогов времяанализирующих ЭОПов типа УМИ (усилитель многокаскадный импульсный), которые отличались высоким ( $10^{-11}$  с) временным разрешением и огромным ( $10^5$ – $10^6$ ) коэффициентом усиления яркости изображений [7].

Е.К.Завойский и его ученики сыграли выдающуюся роль в развитии отечественного электронно-оптического приборостроения. Они применили эти новые устройства в ядерной физике (трековый детектор, счетчики ядерных импульсов с субнаносекундным временным разрешением), в термоядерном синтезе (спектроскопия разряженной плазмы, диагностика температуры и динамика плазмы), в астрономии (в наше время почти в каждом телескопе есть усилитель яркости изображения), в оптике (еще до изобретения лазеров). Александр Михайлович был хорошо знаком с Евгением Константиновичем и его работами по созданию и применению времяанализирующих ЭОПов в ядерной физике.

Наиболее захватывающим экспериментом, предпринятым Е.К.Завойским с сотрудниками, была работа по определению максимального временного разрешения УМИ-95. В 1955 г. было очень сложно найти для этих экспериментов импульсные световые источники сверхкороткой длительности. Е.К.Завойский и С.Д.Фанченко решили зарегистрировать световое излучение, создаваемое электрическим разрядом в азоте под высоким давлением. Разряды инициировались с частотой  $\sim 10^{10}$ – $10^{11}$  Гц. Общее время световой эмиссии высокочастотного разряда составляло 200–400 пс, а продолжительность отдельных световых импульсов, зарегистрированных в эксперименте, была менее 10 пс. Это был действительно уникальный и первый в мире экспериментальный резуль-

тат [8] по регистрации фотоэлектронных изображений с пикосекундным временным разрешением.

Успех экспериментов способствовал тому, что Е.К. Завойский и С.Д.Фанченко начали разрабатывать основные принципы пико-фемтосекундной электронно-оптической фотографии. Эти принципы на многие годы заложили основы для совершенствования и разработки новых времяанализирующих ЭОПов. В частности, исследуя aberrации, которые искажают качество изображений, эти ученые выяснили, что временная хроматическая aberrация первого порядка  $\delta\tau$  является в принципе неустранимой и зависит от разброса начальных скоростей фотоэлектронов, который, в свою очередь, определяется самой физикой внешнего фотоэффекта:

$$\delta\tau = mV_{0z}/eE,$$

где  $m$  и  $e$  – масса и заряд электрона;  $V_{0z}$  – распределение по нормальной к катоду компоненте начальной скорости фотоэлектронов;  $E$  – напряженность электрического поля вблизи фотокатода. В приборе ПИМ-3 напряженность поля у фотокатода составляла 300–600 В/см, что соответствовало минимальному значению коэффициента хроматической aberrации  $\sim 10^{-11}$  с. Чтобы предотвратить токовые перегрузки фотокатода и уменьшить кулоновское расталкивание, использовался усилитель яркости изображения, который обеспечивал надежную регистрацию каждого одиночного фотоэлектрона, эмиттируемого фотокатодом. Анализируя различные механизмы, ответственные за формирование изображений во времяанализирующих ЭОПах, Е.К.Завойский и С.Д.Фанченко пришли к выводу, что предельно достижимое временное разрешение электронно-оптической хронографии может приближаться к 10 фс.

В период с 1953 по 1965 гг. в нашей стране было разработано большое количество экспериментальных и промышленных электронно-оптических камер, предназначенных для регистрации БПП. Максимальное временное разрешение этих камер составляло доли наносекунды. Во всех камерах использовались отечественные трубки типа ПИМ-УМИ. Экспериментальные камеры изготавливались в ИАЭ им. И.В.Курчатова, в ГОИ, в ИФЗ и ФИАНе им. П.Н.Лебедева. На базе богатого опыта ИАЭ в г. Сумы на Заводе электронных микроскопов была выпущена серия промышленных камер типа УС и ЛВ. Под руководством Ю.Е.Нестерихина в Новосибирском институте автоматики и электрометрии СО РАН были созданы экспериментальные камеры на основе ЭОПов собственной разработки – двухэлектродных (ЗИМ) и трехэлектродных (ЗИС) с сеточным затвором. Таким образом, еще до изобретения лазеров у нас был накоплен уникальный потенциал в области создания и применения времяанализирующих ЭОПов и камер на их основе.

### 3. Освоение пикосекундного диапазона: ЭОПы – для лазеров, лазеры – для ЭОПов (1962–1980 гг.)

В период 1962–1969 гг. в лаборатории спектроскопии ФИАНа был создан ряд многофункциональных электронно-оптических камер [20, 21] (рис.2). Эти камеры были специально разработаны для исследований в области лазерной физики и физики плазмы [22] и выгодно отличались от существовавших тогда фотоэлектронных регистраторов широким диапазоном регистрации (от нано-

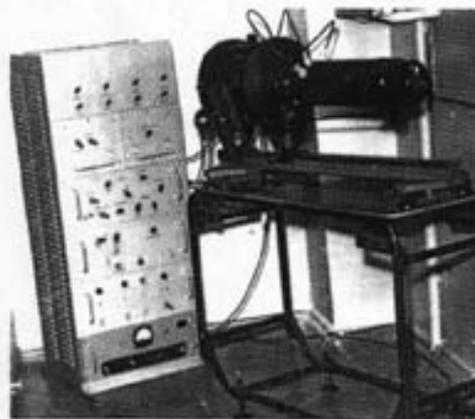


Рис.2. Субнаносекундная камера, разработанная на базе ЭОПа типа УМИ-93.

до миллисекунд), субнаносекундным временным разрешением, малым временем срабатывания ( $\sim 20$  нс) и нестабильностью ( $\pm 50$  пс), а также высокой чувствительностью (коэффициент усиления по яркости  $10^4 - 10^5$ ). Такие камеры успешно применялись в повседневной работе с лазерами, позволяя получать экспериментальные результаты, недостижимые при использовании каких-либо других методов и приборов. Например, в Лаборатории люминесценции ФИАНа были исследованы с временным разрешением лучше 0.1 нс пространственно-временные характеристики рубинового лазера с модулированной добротностью (рис.3). Изучались динамика поля генерации в ближней и дальней зонах, форма волнового фронта, пространственно-временная когерентность, спектрально-временное поведение лазерного излучения [23]. С помощью ЭОПа было зафиксировано распространение фронта ионизации плазмы путем последовательных пробоев в лазерной искре в воздухе [24] (рис.4). Эксперименты, посвященные изучению на ЭОПе кинетики самофокусировки в нелинейных жидкостях, позволили интерпретировать нити самофокусировки как результат движения фокальных точек [25].

Все эти работы, проведенные в период появления лазеров, стали первыми важными исследованиями в области квантовой электроники, нелинейной оптики и физики лазерной плазмы, в которых непосредственно использовались уникальные возможности высокоскоростной фотографии на основе времяанализирующих ЭОПов. В те-

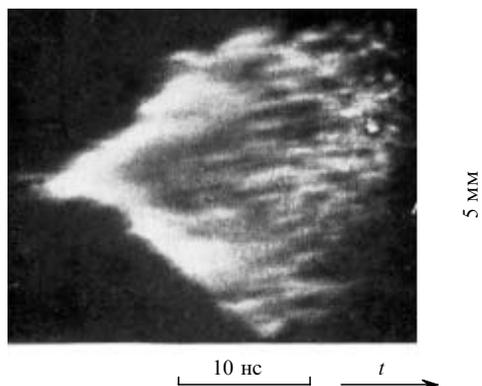


Рис.3. Динамика поля излучения рубинового лазера с модулированной добротностью в ближней зоне.

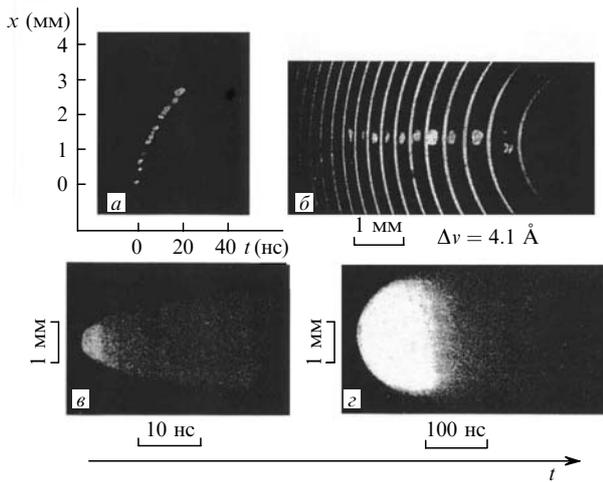


Рис.4. Динамика лазерной искры, возникающей при фокусировании в воздухе излучения рубинового лазера с модулированной добротностью: фотография в отраженном лазерном излучении (а), доплеровское смещение отраженного лазерного излучения (б), радиальное распространение плазмы (в,г).

чение последующих 35 лет (1967–2002 гг.) с участием А.М.Прохорова было опубликовано около 250 работ, посвященных разработке и применению ЭОПов в лазерных экспериментах.

В 1968 г. экспериментальные камеры на ЭОПах подверглись значительной модификации и их временное разрешение, определяемое скоростью развертки, было доведено до 5 пс. Это обеспечило получение новых экспериментальных данных. Была выявлена тонкая временная структура в излучении Nd-лазера, работающего в режиме пассивной синхронизации мод на нелинейном красителе [26] (рис.5). Поскольку длительность одиночных пикосекундных импульсов была нестабильной и менялась от долей пикосекунды до нескольких пикосекунд на протяжении цуга генерации, для динамических испытаний ЭОПов был сконструирован стенд, снабженный двухчастотным Nd-лазером, который генерировал только две спектральные компоненты. Для измерения временного разрешения ЭОПов и калибровки скорости развертки совместно с В.В.Коробкиным был разработан метод «биений» мод [27, 28] (рис.6), который широко ис-

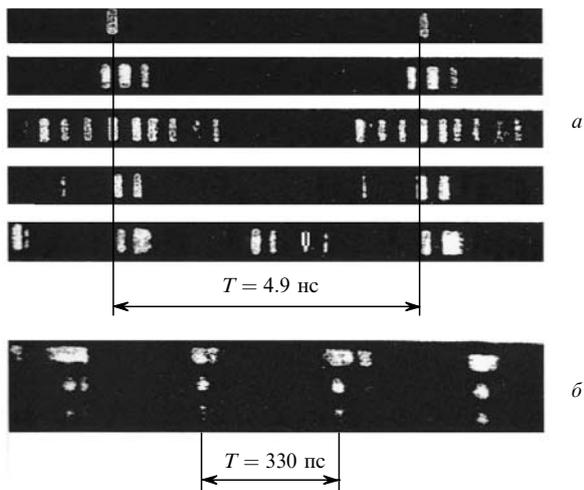


Рис.5. Временная структура излучения Nd-лазера с пассивной синхронизацией мод внутри последовательных аксиальных интервалов (а), тонкая временная структура излучения внутри одиночного аксиального интервала (б).

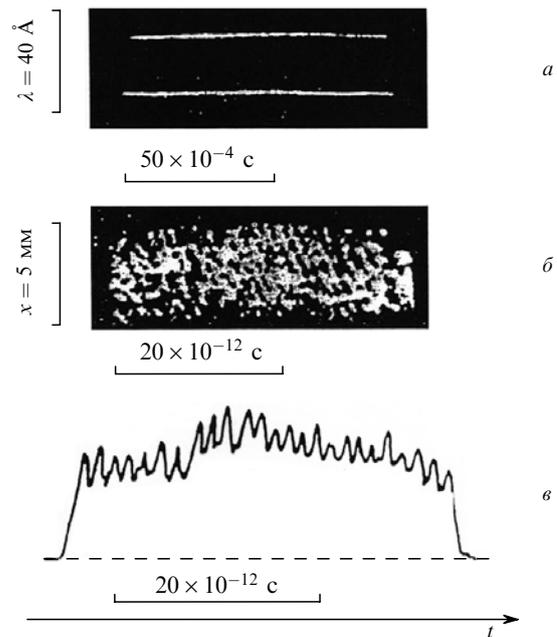


Рис.6. Спектр излучения двухчастотного Nd-лазера (а), соответствующие оптические биения с периодом модуляции 1.4 пс (б), микроденситограмма биений (в).

пользовался в экспериментах вплоть до начала 1990-х гг., когда на свет появился первый фемтосекундный лазер.

На электронно-оптических камерах, разработанных в лаборатории спектроскопии ФИАНа, были получены новые данные о динамике взаимодействия пикосекундных лазерных импульсов большой мощности с твердотельными мишенями. Серия этих экспериментов была реализована в лаборатории квантовой радиофизики ФИАНа Н.Г.Басовым, О.Н.Крохиным, П.Г.Крюковым и др. [29]. Тогда же были проведены первые эксперименты по регистрации формы и длительности пикосекундных лазерных импульсов, распространяющихся в стеклянных световодах [30]. Эксперименты, поставленные И.Л.Фабелинским [31], позволили наблюдать динамику компонент ВРМБ в азоте при давлении 150 атм.

Таким образом, в течение 1960-х гг. экспериментами в лазерной физике были успешно подтверждены основные принципы сверхскоростной электронно-оптической фотографии, выдвинутые Е.К.Завойским и С.Д.Фанченко, а экспериментальная практика пополнилась новыми разработками камер на основе отечественных ЭОПов типа ПИМ-УМИ с временным разрешением 10 пс. Необходимо отметить, что в конце 1960-х гг. D.Bradley и его соавторы в Англии [32] независимо подтвердили эти принципы с использованием английских ЭОПов типа P-856 и Photochron (аналогичных трубкам типа ПИМ). Во время научной стажировки в Научно-исследовательском Совете Канады (1969–1970 гг.) автору этих строк совместно с J.Alcock и M.Richardson на американских трубках типа RCA также удалось преодолеть 10-пикосекундный временной барьер в лазерных экспериментах [33].

В начале 1970-х гг. А.М.Прохоров совместно с М.М.Бутсловым и Б.М.Степановым разработали программу по созданию во ВНИИ оптико-физических измерений времяанализирующих ЭОПов и камер на их основе, ориентированных на лазерные исследования с временным разрешением не хуже 1 пс. Одним из наиболее выдающихся достижений этой хорошо финансирован-

шейся программы было создание в 1978 г. ЭОПа типа ПВ-001. На базе этого преобразователя и его модификаций было изготовлено и сейчас используется по всему миру несколько сотен электронно-оптических камер (в том числе отечественные камеры «Агат» и английские камеры «Имакон-500»). На рис.7 представлена камера типа ЭОК-2М, разработанная в ФИАНе и изготовленная в СКБ физического приборостроения в г. Троицке. Электронно-оптические преобразователи типа ПВ, используемые в камерах ЭОК-2 и ЭОК-3, отличаются повышенной напряженностью электрического поля (около 30 кВ/см) вблизи поверхности фотокатода; они снабжены электронным затвором компенсированного типа, одной или двумя симметричными широкополосными (до 3 ГГц) системами отклонения и выходным люминесцентным экраном на волоконно-оптической пластине. Широкий набор входных окон и фотокатодов обеспечивает перекрытие спектрального диапазона от 0.1 нм вплоть до 1600 нм. Для экспериментов по лазерному УТС были изобретены двухкомпонентные фотокатоды на основе Au–Sb–Cs, одновременно чувствительные и к мягкому рентгеновскому излучению, и к видимому свету. С помощью ЭОПов, снабженных подобными фотокатодами, в ГОИ под руководством А.А.Мака [34] изучалась динамика рентгеновского излучения из термоядерной мишени (CD<sub>2</sub>)<sub>n</sub>, облучаемой пикосекундными лазерными импульсами большой мощности.

В ЭОПе типа УМИ-93М и ПВ-001 при напряженности поля у фотокатода до 60 кВ/см временное разрешение на длине волны 1.06 мкм составило 0.7 пс [28], а в ЭОПе УМИ-93СР – на длине волны 1нм – приблизилось к 10 пс [35]. При этом максимальная скорость развертки фотоэлектронных изображений по экрану ЭОПа достигала  $5 \times 10^{10}$  см/с, в том числе за счет использования полупроводниковых обострителей, разработанных в ЛФТИ [36]. Следует отметить, что в этих разработках были применены отечественные микроканальные пластины и внутри

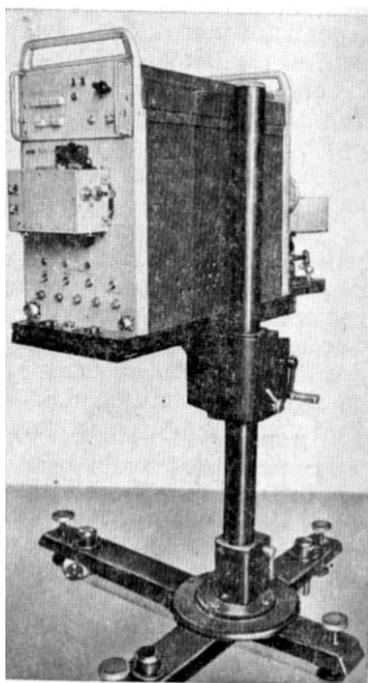


Рис.7. Электронно-оптическая пикосекундная камера типа ЭОК-2М для работы в режиме линейной развертки и однокадровой съемки, на базе ЭОПов типа ПВ-001 и ПМУ-2В.

времени анализирующей трубки, и в качестве внешнего усилителя яркости, сопрягаемого через волоконно-оптические диски с времяанализирующим ЭОПом.

Другое замечательное достижение 1970-х гг., реализованное по инициативе А.М.Прохорова, – это создание пикосекундной электронно-оптической информационно-измерительной системы, содержащей калибровочный источник лазерного излучения на неодимовом стекле, электронно-оптическую камеру и устройство считывания развернутых во времени изображений с экрана ЭОПа на SIT-видиконе [37]. Для улучшения качества регистрируемых изображений и увеличения точности определения по этим изображениям физических величин в сотрудничестве с учеными МГУ были разработаны компьютерные программы, позволяющие рассчитывать пространственную и временную аппаратные функции ЭОПа и учитывать их при оценке временного и пространственного разрешения ЭОПа [38].

В 1980 г. на впервые проводимом в Москве 14-м Международном конгрессе по высокоскоростной фотографии и фотонике (МКВФФ) в приветствии от Академии наук СССР было отмечено, что работы в области пикосекундной электронно-оптической фотографии, проводящиеся в ФИАНе под руководством А.М.Прохорова, имеют мировой уровень.

#### 4. Международное сотрудничество в области высокоскоростной электронно-оптической фотографии (1967 – 2002 гг.)

Академик А.М.Прохоров ясно понимал, что реальный прогресс в науке и технике невозможен без международной кооперации, и уделял ее организации большое внимание. Так с 1972 по 1976 г. в соответствии с планом сотрудничества в области науки и техники, подписанным Советско-французской комиссией по приборостроению, на лазерном оборудовании ФИАНа тестировались новейшие пикосекундные камеры типа TSN компании Thomson-CSF. В разработке этих камер принимал участие автор статьи в период его пребывания на стажировке в Saclay (1974–1975 гг.) В ходе совместных экспериментов в ФИАНе [39] было проведено сравнение двух методов записи изображений с экранов времяанализирующих ЭОПов – с помощью многокаскадного усилителя яркости типа УМИ-93 и французского усилителя яркости THX 496, построенного на микроканальной пластине (МКП). Вопреки своим таможенным ограничениям, французы все-таки решились привезти усилитель яркости на МКП, но только при гарантии его возврата, данной А.М.Прохоровым. Была показана перспективность использования усилителей яркости на МКП для пикосекундных камер, предназначенных для лазерных экспериментов. Кроме того, был сделан вывод о целесообразности замены фотопленки на высокочувствительные телевизионные трубки с последующей записью изображений на видеомэгнитофон и их обработкой на компьютере.

Сотрудничество с Британской компанией DRS-Hadland, начавшееся в 1967 г., оказалось наиболее длительным и плодотворным. Александр Михайлович был лично знаком с руководителями фирмы – J.Hadland, P.Rickett, D.Bowley и др. – и охотно встречался с ними во время их пребывания в Москве. Соглашение о совместной разработке и изготовлении пикосекундных элект-

ронно-оптических камер, подписанное на уровне Госплана СССР в 1980 г., объединило многолетний опыт создания в нашей стране нового поколения ЭОПов типа ПВ и опыт компании Hadland в разработке электронно-оптических камер широкого назначения. В результате этого сотрудничества была создана камера Имакон-500 (рис.8). К настоящему моменту произведено более ста камер такого типа, и все они на протяжении десятков лет надежно работают как в России, так и за рубежом, обеспечивая регистрацию БПП с временным разрешением лучше 1.5 пс в спектральном диапазоне 110–1550 нм [40]. В соответствии с соглашением о научно-техническом сотрудничестве между компанией DRS-Hadland и ИОФАНом велись совместные работы по созданию новых времяанализирующих ЭОПов. Трубка типа ПФ, разработанная в ИОФАНе по заказу фирмы, была установлена в знаменитую британскую камеру модели 468, которая в 1999 г. была отмечена Королевской премией в области высоких технологий.

Особое значение А.М.Прохоров придавал сотрудничеству с японской фирмой Hamamatsu. В наиболее интенсивный период этого сотрудничества (1978–1989 гг.) было условлено, что президент фирмы Teguо Niiguma посещает нас всегда, когда летит через Москву в Европу или Америку. На базе отечественных ЭОПов типа ПВ-001 и японских считывающих ТВ-систем С1330 и С1440 была совместно разработана пикосекундная электронно-оптическая информационная система [41]. Ее максимальное временное разрешение составило 1.4 пс на длине волны 610 нм при скорости развертки  $5 \times 10^9$  см/с и динамическом диапазоне регистрации около 70. Развернутое во времени изображение с экрана ЭОПа передавалось через SIT-видикон в компьютер в формате  $256 \times 256 \times 12$  бит для дальнейшей обработки и анализа данных. К сожалению, реализация крупного коммерческого соглашения, подписанного в 1982 г. через Внешторг, на поставку в Hamamatsu партии ЭОПов серии ПВ взамен поставок в ИОФАН телевизионных систем считывания так и не состоялась из-за лицензионных ограничений для нашей страны.

Другим примером стабильного и взаимообогащающего научно-технического сотрудничества являются исследования, которые проводятся совместно с американской приборостроительной компанией CORDIN [42].

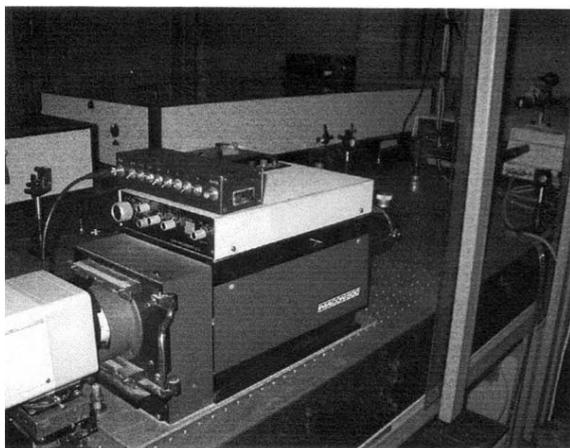


Рис.8. Электронно-оптическая камера Имакон-500, созданная на фирме DRS-Hadland (Великобритания) совместно с ИОФАНом на базе ЭОПа ПВ-001.

Александр Михайлович высоко оценивал организационные и профессиональные достоинства Sidney Nebeker – президента CORDIN. Именно с этой компанией было организовано совместное предприятие PROSCHEN (английская аббревиатура трех фамилий: Прохоров, Щелев, Небекер), которое просуществовало с 1989 по 1994 гг. Были разработаны и изготовлены партии пикосекундных электронно-оптических камер моделей 171 и 172, созданных на основе российской схмотехники и ЭОПов типа ПВ. Камеры работали в режиме однократной линейной развертки и в режиме синхроскана с частотой сканирования до 320 МГц (рис.9). В 2002 г. в результате совместных усилий увидела свет универсальная пикосекундная камера модели 173, работающая одновременно как в режиме линейной развертки, так и синхроскана, и использующая ЭОПы, разработанные и изготавливаемые в ИОФАНе.

В начале 1990-х гг. в результате научно-технического сотрудничества между Компанией V-TEK (Республика Корея) и ИОФАНом, которое академик А.М.Прохоров поддерживал с большим энтузиазмом, был адаптирован под корейскую схмотехнику времяанализирующий ЭОП типа ПИФ (преобразователь импульсный фемтосекундный). В дальнейшем эти ЭОПы использовались в совместно разработанных экспериментальных электронно-оптических камерах [43]. В режиме линейной развертки эти камеры обеспечивали временное разрешение не хуже 10 пс при динамическом диапазоне регистрации более 100. Изображение с люминесцентного экрана ЭОПа записывалось на ПЗС-камеру, управляемую компьютером.

А.М.Прохоров стоял у истоков плодотворного сотрудничества с Институтом точной механики и прикладной оптики (КНРО). В процессе совместных работ при участии Н.Ниу, В.П.Дегтяревой и др. были опубликованы и запатентованы результаты компьютерного моделирования ЭОПа, имеющего цилиндрическую электростатическую линзу и компенсатор разброса начальных энергий фотоэлектронов по углам вылета и обеспечивающего временное разрешение 50 фс [44]. Уже первые опыты с экспериментальными образцами ЭОПов с цилиндрической фокусирующей линзой (БЩВ-4) дали обнадеживающие результаты. Даже без использования компенсатора временное разрешение такого ЭОПа составило

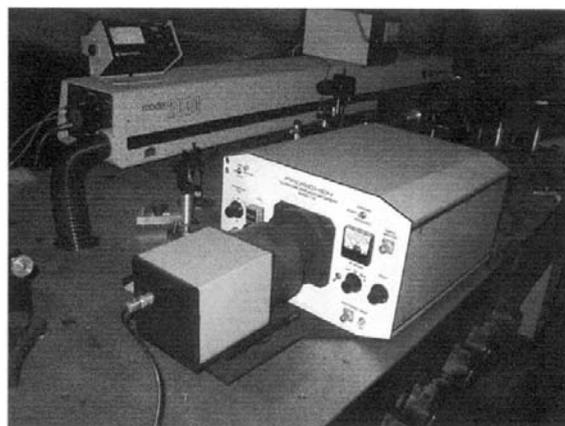


Рис.9. Синхроскан с частотой сканирования 320 МГц, созданный компанией CORDIN (США) совместно с ИОФАНом на базе трубок серии ПВ.



Рис.10. А.М. Прохоров среди делегатов 23-го Международного конгресса по высокоскоростной фотографии и фотонике. Москва, ФИАН, 1998 г.

500 фс на длине волны 1.08 мкм при напряженности электрического поля вблизи фотокатода 60 кВ/см и скорости линейной развертки  $1.7 \times 10^{10}$  см/с [45].

В конце 1980-х гг. по инициативе А.М.Прохорова совместно с Научным приборостроительным центром в Берлине (ГДР) проводилась серия экспериментов с целью создания времяанализирующих ЭОПов с прямым вводом в компьютер развернутых во времени изображений [46]. Были протестированы совместно разработанные ЭОПы со встроенной кремниевой мишенью, устанавливаемой вместо люминесцентного экрана. В этих экспериментах развернутое во времени фотоэлектронное изображение, спроецированное на кремниевую мишень, удавалось за доли секунды вводить в компьютер, сохраняя высокое качество изображений. В развитие идеи прямого съема изображений был создан отечественный ЭОП со встроенной электронно-чувствительной ПЗС-матрицей, заменившей люминесцентный экран. Специально для этой цели по заказу А.М.Прохорова на ленинградском предприятии «Электрон» изготовили партию электронно-чувствительных ПЗС-приемников, пригодных для установки во времяанализирующие ЭОПы [47].

В этот же период совместно с учеными Йенского университета (ГДР) в ИОФАНе был запущен фемтосекундный лазер на красителе R6G, работающий по принципу сталкивающихся импульсов. Этот лазер, генерировавший одиночные импульсы излучения длительностью 90 фс на длине волны 610 нм, использовался для измерения временной аппаратной функции ЭОПа типа ПВ-001 [48]. Минимальная зарегистрированная на экране ЭОПа длительность фотоэлектронного импульса оказалась равной 900 фс. Когда на фотокатод воздействовали импульсами длительностью менее 500 фс от твердотельного LiF-лазера с центрами окраски  $F_2^-$ , работавшего на длине волны 1.15 мкм [49], временной отклик ЭОПа сузился до 700 фс. В этих двух экспериментах использовался фотокатод типа Ag–O–Cs, напряженность электрического поля составляла 30 кВ/см, а скорость развертки –  $(1.6 - 2) \times 10^{10}$  см/с. Изображение с экрана ЭОПа пе-

редавалось через усилитель яркости, использующий МКП (с коэффициентом усиления  $3 \times 10^4$ ), на сверхчувствительную телевизионную систему считывания.

Нужно отметить, что конец 1980-х и начало 1990-х гг. для Института общей физики был периодом наиболее активного международного научно-технического сотрудничества в области сверхскоростного электронно-оптического приборостроения. В это время, например, совместно с Пражским техническим университетом (Чехословакия) были разработаны и успешно использованы [50] в экспериментах по лазерному зондированию атмосферы новые пикосекундные электронно-оптические камеры с круговой разверткой. Исследования волоконного эрбиевого лазера ( $\lambda = 1.55$  мкм), предназначенного для сверхширокополосных волоконно-оптических линий связи [51], были совместно выполнены в Университете Кампинас (Бразилия) на пикосекундных камерах серий ЭОК-2 и ЭОК-3, разработанных в ИОФАНе.

Признанием высокого уровня отечественных работ в области сверхскоростной электронно-оптической диагностики явилось проведение в 1998 г. очередного 23-го МКВФФ в Москве в ФИАНе. Президентом конгресса был академик А.М.Прохоров (рис.10).

## 5. Фемтосекундные электронно-оптические технологии en route (1980–2002 гг.)

Освоение фемтосекундного временного диапазона проходило в менее благоприятной обстановке по сравнению, например, с той, что была в предшествующем десятилетии. Наступил период организационной ломки, в результате чего существовавший темп научных работ был утерян. В этот критический момент А.М.Прохоров принимает экстраординарное решение: разрабатывать и изготавливать экспериментальные времяанализирующие ЭОПы у себя в институте, для чего он решает образовать собственную исследовательско-технологическую цепочку с полным и замкнутым циклом – от теоретических расчетов через изготовление экспериментальных из-



Рис.11. Блок-схема исследовательско-технологической цепочки для проектирования, разработки и изготовления фемтосекундных ЭОПов, камер и дифрактометров (Отдел фотоэлектроники ИОФАНа).

делий и их динамическое тестирование на лазерных стендах к применению созданной аппаратуры в физическом эксперименте. Вопреки многочисленным противникам этой идеи, в том числе в своем ближайшем окружении, Александр Михайлович шаг за шагом реализует задуманное. Прежде всего он укрепляет соответствующие подразделения ИОФАНа. Так, Сектор пикосекундной фотоники, созданный в 1982 г. в Лаборатории П.П.Пашинина и руководимый автором статьи, был в 1985 г. расширен до лаборатории, а в 1989 г. преобразован в Отдел фотоэлектроники. Более того, Александр Михайлович с согласия руководства Академии наук и Госстандарта добивается образования в 1991 г. временного творческого коллектива «ВТК Фемтофот» на базе Лаборатории В-4 ВНИИОФИ, возглавлявшейся Г.И.Брюхневичем, и Отдела фотоэлектроники ИОФАНа. Главная задача «ВТК Фемтофот» как раз и состояла в том, чтобы сохранить от разрушения накопленный научный, технологический и кадровый потенциал в области электровакуумных технологий и электронно-оптического научного приборостроения.

Используя свой огромный научный авторитет, А.М.Прохоров добивается финансирования на приобретение специализированного вакуумного и аналитического оборудования (трехкамерная установка фирмы «Рибер») и на закупку отечественных ростовых установок молекулярно-лучевой эпитаксии («Штат», «Цна-9»). С использованием этого уникального оборудования в Отделе фотоэлектроники на базе выращенных гетероструктур InGaAs/InP/Ag(Au) с барьером Шоттки были созданы фотокатоды для времяанализирующих ЭОПов, чувстви-

тельность которых на два порядка превышала чувствительность лучших Ag-O-Cs-фотокатодов на длине волны 1.55 мкм [52]. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии дал замечательные результаты и при выращивании традиционных мультищелочных фотокатодов: при высокой воспроизводимости спектральной характеристики квантовая эффективность на  $\lambda = 400$  нм составила 40 % [53].

В целом 1980-е гг. увенчались созданием в ИОФАНе замкнутой исследовательско-технологической цепочки по компьютерному моделированию, конструированию, технологическому сопровождению, изготовлению и динамическим испытаниям на собственных лазерных стендах экспериментальных образцов фемтосекундных ЭОПов, фемтосекундных фотоэлектронных пушек и камер [54] (рис.11). Сверхскоростные фотоэлектронные устройства (рис.12), разрабатываемые и изготавливаемые в настоящее время в ИОФАНе, являются конкурентоспособными на мировом рынке. В их числе времяанализирующие ЭОПы оригинальной конструкции: ПИФ, ПФ, а также модернизированные приборы серии ПВ [55]. Они имеют следующие параметры: размер рабочего поля фотокатодов от 6 до 20 мм, пространственное разрешение относительно плоскости входного фотокатода 30–50 пар лин./мм, коэффициент электронно-оптического увеличения 0.7–2.8, спектральный диапазон чувствительности 0.1–1600 нм, эквивалентный уровень темнового фона не более  $10^{-6}$  лм/см<sup>2</sup>. Подача импульсного напряжения между фотокатодом и ускоряющей сеткой позволяет увеличить напряженность электрического поля вблизи поверхности фотокатода до 300 кВ/см, что обеспечивает временное разрешение лучше 100 фс.



Рис.12. Пико-фемтосекундные ЭОПы, фотоэлектронные пушки и камеры, разрабатываемые и изготавливаемые в Отделе фотоэлектроники ИОФАНа.

Появление в начале 1990-х гг.  $Ti$ :сапфировых лазеров, генерирующих стабильные фемтосекундные одиночные импульсы [56], в значительной степени подстегнуло развитие прямых электронно-оптических методов диагностики БПП с фемтосекундным временным разрешением.

В 1995 г. в Отделе фотоэлектроники ИОФАНа с целью определения динамических характеристик ЭОПов, камер и дифрактометров была запущена фемтосекундная лазерная установка. В этой установке в качестве задающего генератора используется лазер на  $Ti$ :сапфире, работающий в режиме самосинхронизации мод за счет керровской линзы. Накачка генератора осуществляется второй гармоникой  $Nd:YVO_4$ -лазера с диодной накачкой. Задающий генератор излучает одиночные импульсы длительностью 60 фс с частотой следования 82 МГц при максимальной средней мощности 0.6 Вт, пиковая энергия одиночного импульса составляет 5–7 нДж. Использование регенеративного усилителя, работающего с частотой следования импульсов 10 Гц, позволило увеличить максимальную пиковую энергию до 1.5–1.8 мДж при длительности одиночного импульса 120 фс.

В конце 1990-х гг. по инициативе А.М.Прохорова были начаты работы по созданию фемтосекундных ЭОПов типа ПВ-ФС, отличающихся импульсным питанием промежутка фотокадод – ускоряющая сетка, а также повышенной чувствительностью и полосой пропускания отклоняющей системы. Ниже приводится описание динамических испытаний экспериментальных образцов ПВ-ФС с помощью фемтосекундной лазерной установки. Результаты этих испытаний неоднократно обсуждались с Александром Михайловичем в течение 2001 г. и были опубликованы в нашей последней совместной статье [57].

Лазерный пучок диаметром 3–5 мм освещает регулируемую (с точностью до 1 мкм) механическую щель, изображение которой проецируется на входной фотокадод диаметром 6 мм с помощью оптической системы, состоящей из двух фотографических объективов типа «Гелиос-44» и набора нейтральных и цветных фильтров. В соответствии с расчетами после прохождения оптической системы (суммарная толщина стекла в ней не менее

150 мм) длительность исходных импульсов возрастает до 230 фс, если эти импульсы поступают от генератора, и до 160 фс, если они поступают от регенеративного усилителя. Сквозное пространственное разрешение всей системы (ЭОП + ПЗС-камера) относительно фотокадод не менее 30 пар лин./мм. Используемые в таких ЭОПах  $Ag-O-Cs$ -фотокадоды обеспечивают регистрацию оптических изображений в диапазоне от 115 до 1550 нм.

В этих экспериментах напряженность электрического поля у фотокадод составляла 130 кВ/см. Лазерное излучение с выхода регенеративного усилителя подавалось на входную щель шириной 30 мкм. Развернутое во времени изображение с экрана ЭОПа проецировалось на ПЗС-матрицу через усилитель яркости на основе МКП с коэффициентом усиления  $3 \times 10^4$ . При электронно-оптическом увеличении 2.8 полуширина входной щели на экране ЭОПа составляла около 100 мкм.

На рис.13 показан характерный одиночный лазерный импульс, зарегистрированный на экране ЭОПа. Искривление изображения происходит из-за разницы во времени пролета электронов возле оси и на периферии. Эти данные дополнительно служат для точной калибровки скорости развертки. Длительность на полуширине регистрируемых фотоэлектронных импульсов составила  $240 \pm 40$  фс и зависела от положения окна интегрирования. Это означает, что временное разрешение трубок ПВ-ФС, зафиксированное при скорости развертки  $5 \times 10^{10}$  см/с, за вычетом аппаратной функции ЭОПа не хуже 200 фс.

Девяностые годы были отмечены активными исследованиями по фотоэлектронной дифрактометрии [58]. В 1991 г. А.Zewail [59] предложил нам для экспериментов по электронной дифракции с временным разрешением (TRED) разработать источник фотоэлектронных пучков с энергией электронов 30–50 кэВ и фемтосекундной длительностью. А.М.Прохоров благословил это предложение, и уже через несколько месяцев нами была изготовлена фотоэлектронная пушка на базе электронной оптики ЭОПа типа ПВ-001, которая формировала электронные ступки длительностью менее 700 фс. В течение нескольких последующих лет в рамках проектов МНТЦ № 037 и № 1280, поддерживаемых А.М.Прохоровым, была разработана, изготовлена и испытана пушка, испускавшая ступки электронов с энергией 30 кэВ и длительностью 250 фс.

Принципиальная схема TRED-экспериментов, позволяющих исследовать атомно-молекулярную динамику в твердых телах и газообразных веществах, состоит в следующем. Фемтосекундные лазерные импульсы воздействуют на исследуемое вещество и в зависимости от его физической структуры стимулируют быстротекающие процессы, такие как нагревание кристаллической решет-

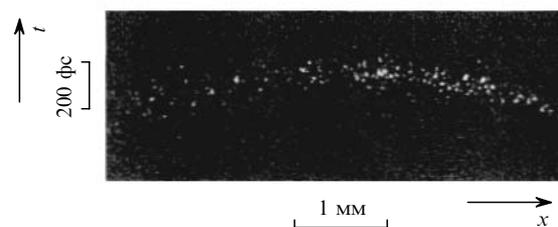


Рис.13. Щелевая развертка фотоэлектронного изображения, инициируемого одиночным 160-фемтосекундным импульсом  $Ti$ :сапфирового лазера. Скорость развертки  $5 \times 10^{10}$  см/с, напряженность электрического поля вблизи фотокадод ЭОПа  $1.3 \times 10^5$  В/см.

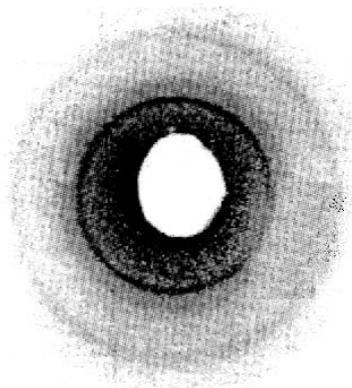


Рис. 14. Дифракционное изображение, полученное при взаимодействии 500-фемтосекундного фотоэлектронного пучка с энергией 30 кэВ с алюминиевой мишенью толщиной 300 Å в режиме «на просвет».

ки, фазовые переходы, химические реакции и т. д. Пробный электронный пучок соответствующей энергии, угловой расходимости и длительности «просвечивает» возбужденное вещество в моменты времени, сдвинутые относительно момента действия лазерного импульса. В результате этого формируется последовательность дифракционных изображений, привязанная к определенной временной фазе исследуемого процесса. В качестве примера на рис. 14 показано дифракционное изображение, полученное в 1995 г. при взаимодействии фемтосекундных электронных пучков с алюминиевой мишенью толщиной 300 Å в режиме «на просвет» [60].

Высоко оценил результаты этих экспериментов профессор А. Zewail, тогда еще будущий Нобелевский лауреат. Очевидно, что работы по фемтосекундной электронной дифракции должны быть продолжены и длительность фотоэлектронного пучка должна быть уменьшена, по крайней мере, на порядок величины.

## 6. Фемто-аттосекундная фотоэлектроника – новая научная дисциплина (2000 г. – настоящее время)

Итак, усилиями академика А.М. Прохорова и его школы к началу XXI века сформировалось новое междисциплинарное направление исследований в современной экспериментальной физике: фемто-аттосекундная фотоэлектроника. Сегодня это направление включает в себя изучение спектральных и пространственно-временных характеристик внешнего фотоэффекта, разработку фотокатодов классического типа и с отрицательным электронным сродством, теоретическую электронную оптику и компьютерное моделирование фокусирующих линз для времяанализирующих ЭОПов и фотоэлектронных пушек, физику фемтосекундных лазеров и их применение в высокоскоростной фотографии, электро-вакуумные технологии и электронно-оптическое приборостроение, а также вопросы съема, хранения и цифровой обработки развернутых во времени фотоэлектронных изображений.

Возникает законный вопрос: когда же весь этот потенциал, накопленный за 40 лет, сможет быть реализован в приборах, обеспечивающих фотографирование БПП с требуемым на сегодня фемтосекундным (лазеры видимого, УФ и ближнего ИК диапазонов) и аттосекундным (ВУФ и рентгеновское излучение) временным разрешением? Отталкиваясь от такой постановки задачи, прихо-

дится в который раз возвращаться к выводам, сделанным Е.К. Завойским и его коллегами пятьдесят лет назад. Тогда было предсказано, а последующими опытами многократно подтверждено, что для достижения временного разрешения в 10 фс необходимо увеличить напряженность электрического поля у поверхности фотокатода до  $3 \times 10^5 - 10^6$  В/см, уменьшить разброс фотоэлектронов по начальным энергиям до 0.05–0.1 эВ, увеличить скорость развертки до  $(1 - 3) \times 10^{11}$  см/с, в сотни раз улучшить отношение сигнал/шум при временной развертке изображений, уменьшить эффект кулоновского расталкивания внутри фотоэлектронного пучка, несущего изображение, и т. п. Следует одновременно оптимизировать параметры всех элементов регистрирующей цепочки: оптической системы, проецирующей изображение процесса на входной фотокатод, времяанализирующего ЭОПа и усилителя яркости изображений, импульсных субнаносекундных схем для отклонения и коммутации электронных пучков, устройств считывания и ввода в компьютер развернутых во времени фотоэлектронных изображений, а также материальной и программной компьютерной базы. Преодолевая значительные инженерные трудности на пути создания фемтосекундных ЭОПов, камер и дифрактометров, за последнюю четверть века (1976–2002 гг.) удалось улучшить их временное разрешение всего лишь в 3–5 раз (от 700 до 100–200 фс, в зависимости от виртуозности экспериментаторов). Более того, эта «лобовая атака» (повышение напряженности электрического поля у фотокатода, увеличение скорости развертки и т. п.) сулит возможное повышение временного разрешения всего лишь на порядок величины. Что делать дальше и куда направить усилия?

Интенсивные обсуждения этой проблемы с А.М. Прохоровым в течение 2000–2001 гг. способствовали поиску ее решения. Суть решения состоит в создании абсолютно нового поколения времяанализирующих ЭОПов, в которых кроме традиционной электромагнитной линзы для пространственной фокусировки фотоэлектронных изображений использовалась бы дополнительная линза для временной фокусировки фотоэлектронных изображений.

Принципиальная возможность пространственно-временной фокусировки электронных пучков в нестационарных (например, периодических во времени) электромагнитных полях хорошо известна и широко используется в микроволновых устройствах с непрерывными электронными потоками (таких как клистрон, магнетрон и т. д.), а также в некоторых времяпролетных масс-анализаторах. С середины 1990-х гг. в научной литературе [61] обсуждалась возможность пространственно-временной фокусировки фотоэлектронных пучков с помощью полей, зависящих от времени, однако применительно к фемтосекундной фотоэлектронике необходимая теоретическая база не была разработана.

Александр Михайлович одобрил и с энтузиазмом поддержал идею, связанную с использованием быстропеременяющихся электрических полей для временной фокусировки с целью обеспечения субфемтосекундной динамической компрессии электронных пучков во время их движения внутри вакуумной трубки. Очень важно, что такой подход не требует создания сверхвысокой напряженности электрического поля у поверхности фотокатода. В Отделе фотоэлектроники ИОФАН М.А. Монастырским с сотрудниками была осуществлена теоретиче-

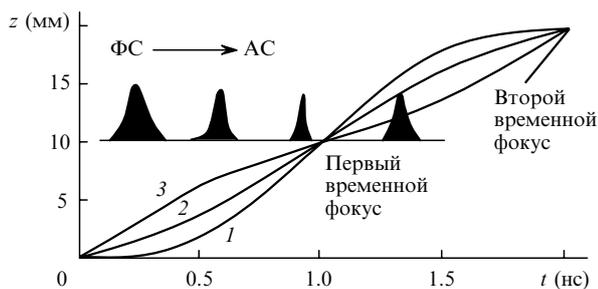


Рис.15. Результаты компьютерного моделирования временной фокусировки фотоэлектронных пакетов в нестационарных электрических полях при начальных энергиях фотоэлектронов 0 (1), 100 (2) и 500 эВ (3).

ская проработка этой идеи и создано программное обеспечение, позволяющее осуществить прецизионное компьютерное моделирование динамики сверхкоротких фотоэлектронных пучков в нестационарных полях. Была предложена простая модель, иллюстрирующая осуществимость временной фокусировки первого порядка с помощью квазистационарных электрических полей [62]. Было выбрано квазистационарное гиперболическое зеркало, распределение осевого потенциала которого может быть представлено следующей формулой:

$$\Phi(t, z) = Atz - C \frac{z^2}{2},$$

где  $t$  – время;  $z$  – осевая координата;  $A, C$  – положительные константы.

На рис.15 показано осевое движение электронов от начального момента времени  $t_0 = 0$  с различными начальными энергиями. Даже при сравнительно большом разбросе начальной энергии фотоэлектронов от 0 до 500 эВ (этот диапазон взят для наглядности рисунка), можно отчетливо наблюдать два первых временных фокуса электронного пучка. Временная фокусировка первого порядка с помощью квазистационарного гиперболического зеркала не может быть существенно искажена большим разбросом начальных энергий электронов, поскольку фокусирующее действие поля, зависящего от времени, распространяется на электроны не только вылетающие одновременно с различными начальными энергиями, но также и на электроны, вылетающие в разные моменты времени. Сжимающее действие изменяющегося вдоль оси фокусирующего поля на электроны с малыми начальными энергиями оказывается более сильным, а на электроны с большими начальными энергиями – более слабым. В определенной степени это относится и к эффектам кулоновского расталкивания электронов внутри электронного сгустка.

Один из вариантов компьютерной модели фемто-аттосекундного ЭОПа, где одновременно осуществляется временная и пространственная фокусировка фотоэлектронных изображений, представлен на рис.16. Расчеты показывают, что при экспериментально достижимых скоростях изменения фокусирующего потенциала на «временной линзе» (свыше 10 кВ/нс), фотоэлектронный пучок длительностью 500 фс с разбросом начальных энергий фотоэлектронов  $\sim 0.3$  эВ может быть сжат до 20 фс. В принципе, при определенных условиях, диктуемых прежде всего экспериментально достижимой скоростью изменения фокусирующего электрического поля, можно рассчитывать на временную компрессию до единиц и даже

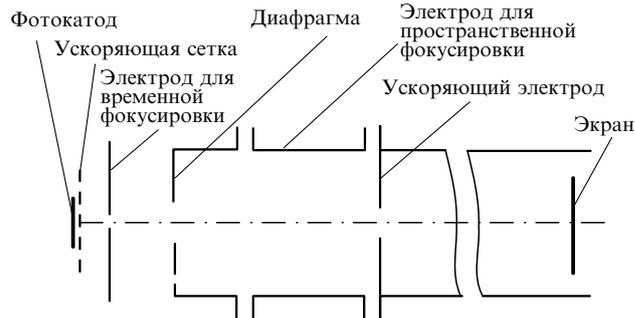


Рис.16. Компьютерная модель фокусирующей линзы, обеспечивающей одновременно пространственную и временную фокусировку фотоэлектронных изображений.

долей фемтосекунды. Если же говорить о предельной скорости передачи информации с помощью фотоэлектронного пучка, то еще есть огромный запас в скорости передачи информации, поскольку частотная полоса пропускания фотоэлектронного тракта в ЭОПе, определяемая дебройлевской длиной волны электронов с энергией 20–30 кэВ, составляет менее  $10^{-2}$  нм, что в пределе обеспечивает передачу информации с субаттосекундным ( $10^{-19} - 10^{-20}$  с) временным разрешением.

Приведенные оценки убеждают в неисчерпаемых возможностях сверхскоростной фотоэлектроники, а также в том, что работы здесь хватит еще не на одно поколение исследователей.

## 7. Вместо заключения

28 декабря 2001 г. с Александром Михайловичем в его кабинете мы в очередной раз обсуждали текущие проблемы сверхскоростной фотоэлектроники. Говорили, например, о необходимости использования «чистой» комнаты при сборке ЭОПов и, в связи с этим, о возможном повышении напряженности электрического поля у фотокатода. Он обещал принести из дома статью, в которой поднимались вопросы формирования импульсов электромагнитного излучения аттосекундной длительности, хотел позвонить в Минпромнауки с тем, чтобы учли интересы ИОФАНа при формировании межведомственной программы по фемтосекундным технологиям. Обсуждался ход подготовки его статьи в «Вестник РАН» [63], в которой он хотел обратить внимание руководства РАН на необходимость развития собственной приборной базы на основе уникальных разработок и наукоемких технологий, имеющихся в самой Академии. . . Времени для решения всех этих вопросов явно не хватало, но впереди был новый 2002 год, – и мы условились о следующей встрече в самые первые рабочие дни января. Но именно в первый рабочий день 2002 года, 8 января, А.М.Прохорова не стало.

Ныне здравствующие, все, кто работал под непосредственным руководством Александра Михайловича либо в тесном контакте с ним, и, наконец, просто знавшие или слышавшие о нем с глубоким уважением вспоминают об академике А.М.Прохорове – великом Ученом и замечательном Человеке [64]. Сорок лет назад благодаря огромной эрудиции и тонкому научному чутью он пришел к выводу о перспективности использования ЭОПов в лазерных экспериментах. Правильность этого вывода стала очевидной, когда только с помощью ЭОПов удалось сфотографировать пространственно-временную струк-

туру лазерного излучения и инициируемые лазерным излучением быстротекущие процессы с пико-фемтосекундным временным разрешением. Всячески поддерживая развитие этого направления творческим участием, финансированием, штатами, привлечением молодежи и т. п., А.М.Прохоров способствовал становлению нового направления научных исследований – фемто-аттосекундной фотоэлектроники. Пусть же новые успехи на этом поприще будут посвящены его памяти.

При подготовке этой статьи автор обращался за советами и помощью к К.А.Прохорову, Ю.Е.Нестерихину, И.А.Щербакову, П.П.Пашинину, А.А.Маненкову, Г.Н.Михайловой, Н.А.Ирисовой, а также к Г.И.Брюхневичу, В.П.Дегтяревой, М.А.Монастырскому, В.А.Тарасову, И.М.Щелевой и Е.А.Кузьменко. Всем им автор глубоко благодарен.

- Marey E.J. *Scientific American*, 19 October (1878).
- Maybridge E.J. In: *Animal Locomotion, an Electrophotographic Investigation of Consecutive Phases of Animal Movement* (Philadelphia: J.B. Lippincott and Co, 1887).
- Schardin H. *Proc. 3-d Intern. Congr. High-Speed Photogr. (ICHSP)* (London, 1956, p. 316).
- Шнирман Г.Л. В сб. *Успехи научной фотографии* (М.: Наука, 1959, т. 6, с. 93).
- Андреев А.Н., Дубовик А.С., Дегтярева В.П., Монастырский М.А., Щелев М.Я. *Высокоскоростная фотография и фотоника в исследовании быстротекущих процессов*. Под ред. А.М.Прохорова (М.: Логос, 2002).
- Kondo Ya. et al. *Conf. Dig. 25<sup>th</sup> ICHSPP* (Beaune, France, 2002, p. 6).
- Бутслов М.М. В сб. *Успехи научной фотографии* (М.: Наука, 1959, т. 6, с. 76).
- Завойский Е.К., Фанченко С.Д. *ДАН СССР*, **100**, 661 (1955); *ДАН СССР*, **108**, 218 (1956); *Appl. Opt.*, **4**, 1155 (1965); *Препринт ИАЭ «Высокоскоростная фотография с экспозицией  $10^{-9}$ – $10^{-14}$  с на основе применения ЭОП»* (Москва, 1966); *ДАН СССР*, **226**, 1062 (1976).
- Holst G., de Boer J.H., Teves M.C., Vennemans C.F. *Physica*, **1**, 297 (1934).
- Farnsworth P.T. US Patent 1969399 (1930).
- Brüche P.E., Henneberg W. *Ergebnisse der exacten Naturwissenschaften*, **15**, 365 (1936); *Koll. Zeits.*, **100**, 192 (1942).
- Scherzer O.Z. *Phys.*, **101**, 593 (1936).
- Zvorykin V.K., Morton G.A. *Opt. J. Soc. Am.*, **26**, 181 (1936).
- Ardene M. *Elektr. Nachr. Techn.*, **13**, 230 (1936).
- Mc Gee J.D. British Patent 504927 (1937).
- Lallemant A. *Compt. Rend.*, **203**, 243 (1936).
- Вашоков М.П., Нилов Е.В. *ЖТФ*, **24**, 1209 (1954).
- Courtney-Pratt J.S. *Research, Suppl.*, **2**, 287 (1949); *Photogr. J.*, **92 В**, 137 (1952).
- Арцимович Л.А. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **8**, 313 (1944).
- Щелев М.Я. *Установка для регистрации быстротекущих процессов* (Дипломный проект, М., ФИАН, 1962).
- Малявкин Л.П., Коробкин В.В., Щелев М.Я. *ПТЭ*, № 4, 129 (1965); *ПТЭ*, № 6, 214 (1968).
- Korobkin V.V., Maljutin A.A., Schelev M.Ya. *J. Photogr. Science*, **17** (5), 179 (1969).
- Коробкин В.В., Леонтович А.М. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **3**, 301 (1966); *ЖЭТФ*, **53**, 16 (1967); *Письма в ЖЭТФ*, **5**, 314 (1967); *Изв. вузов. Сер. радиофизика*, **11**, 945 (1968).
- Коробкин В.В., Манделштам С.Л., Прохоров А.М. и др. *ЖЭТФ*, **53**, 116 (1967).
- Бутенин А.В., Коробкин В.В. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **6**, 687 (1967); Коробкин В.В., Прохоров А.М. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **11**, 153 (1970).
- Малютин А.А., Щелев М.Я. *Письма в ЖЭТФ*, **9**, 445 (1969); *J. of the SMPTE*, **79**, 35 (1970).
- Коробкин В.В., Щелев М.Я. *ЖЭТФ*, **53**, 1230 (1967); *ЖТФ*, **38**, 497 (1968).
- Брюхневич Г.И. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **2**, 1009 (1976).
- Басов Н.Г., Крохин О.Н., Крюков П.Г. и др. *Квантовая электроника*, № 1, 4 (1971); *Proc. 9-th Int. Conf. Ionized Gases* (Bucharest, 1969, p. 330); *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, № 8, 48 (1970); *Препринт ФИАН № 60* (1970).
- Вульфсон К.С., Казачков В.Г., Малютин А.А. и др. *Светотехника*, **6**, 8 (1969).
- Коробкин В.В., Маш Д.И., Фабелинский И.Л. и др. *Письма в ЖЭТФ*, **5**, 372 (1967).
- Bradley D.J. *J. Phys. Chem.*, **82**, 2259 (1978).
- Schelev M.Ya., Richardson M.C., Alcock A.J. *Appl. Phys. Lett.*, **18** (8), 354 (1971).
- Бородин В.Г. и др. *Тезисы докладов 7-ой Конференции по когерентной и нелинейной оптике* (Тбилиси: Мецниереба, 1976, т. 2, с. 243).
- Bryukhnevich G.I., Richardson M.C., et al. *Phys. Lett. A*, **51** (4), 249 (1975).
- Грехов И.В., Кардо-Сысоев А.Ф. и др. *Труды 14-го МКВФФ* (М.: ВНИИОФИ, 1980, с. 222).
- Schelev M.Ya. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **189**, 142 (1978).
- Platonov V.N. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **97**, 552 (1976).
- Jean-Francois G. et al. In: *Proc. of the 11-th ICHSPP* (London: Chapman and Hall, 1974, p. 190); *ПТЭ*, № 1, 254 (1975).
- Prokhorov A.M., Hadland J., et al. In: *Proc. of the 14-th ICHSPP* (М.: ВНИИОФИ, 1980, с. 124).
- Прохоров А.М. и др. *Труды ФИАН*, **155**, 233 (1985); Hiruma T., Prokhorov A.M., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **348**, 206 (1982).
- Prokhorov A.M., Nebeker S.J., et al. *Laser Focus World*, February, 85 (1989); *Laser Focus World*, December, 125 (1991).
- Prokhorov A.M., Lozovoi V.I., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1801**, 233 (1992).
- Degtyareva V.P., Niu H., Prokhorov A.M., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1032**, 79 (1988).
- Babushkin A.V., Bryukhnevich G.I., Degtyareva V.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1801**, 218 (1992).
- Babushkin A.V. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1032**, 75 (1988).
- Dalinenko I.N., Prokhorov A.M., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1243**, 87 (1990); *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1358**, 739 (1990).
- Vorobiev N.S., Degtyareva V.P., Prokhorov A.M., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **793**, 185 (1987).
- Бабушкин А.В., Баснев Т.Т. и др. *Квантовая электроника*, **13** (11), 2262 (1986).
- Hamal K. et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **50** (3), 337 (1979).
- De Souza E.A., Prokhorov A.M., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1358**, 556 (1990).
- Нолле Э.Л., Прохоров А.М., Щелев М.Я. *Доклады РАН*, **348**, 45 (1996).
- Chernikov A.S. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1358**, 134 (1990).
- Degtyareva V.P., Prokhorov A.M., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2869**, 112 (1996).
- Щелев М.Я. *УФН*, **170**, 1002 (2000); *Квантовая электроника*, **31** (6), 477 (2001).
- Крюков П.Г. *Квантовая электроника*, **31** (2), 95 (2001).
- Прохоров А.М. и др. *Квантовая электроника*, **32** (4), 283 (2002).
- Mourou G., Williamson S., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **348**, 313 (1982); *Appl. Phys. Lett.*, **41** (1), 44 (1982).
- Zewail A.H. *J. Phys. Chem.*, **100**, 12701 (1996); *Letters to Nature*, **386**, 159 (1997); *Science*, **242** (4886), 1645 (1988).
- Prokhorov A.M. et al. *Opt. Engng.*, **37** (8), 2249 (1998).
- Vartak S.D., Lawandy N.M. *Opt. Commun.*, **120**, 184 (1995).
- Monastyrski M.A. et al. *Conf. Dig. 25-th ICHSPP* (Beaune, France, 2002, p. 57).
- Прохоров А.М. *Вестник РАН*, **73** (6), 483 (2003).
- Прохорова Г.А. *Луч надежды* (М.: ФИАН, 2001, с. 165).