



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

М. Я. Щелев, Пико-фемто-аттосекундная фотоэлектроника (взгляд через полувековую “лупу времени”), *УФН*, 2012, том 182, номер 6, 649–656

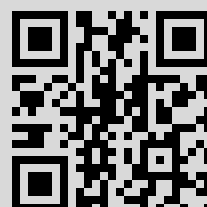
Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 84.53.235.221

7 марта 2015 г., 12:19:24



КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Современные проблемы физических наук

Научная сессия Отделения физических наук
Российской академии наук, 16 ноября 2011 г.

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0182.201206e.0649

16 ноября 2011 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (РАН) состоялась научная сессия Отделения физических наук РАН.

Объявленная на web-сайте ОФН РАН www.grad.ac.ru повестка заседания содержала следующие доклады:

1. **Щелев М.Я.** (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва). *Пико-фемто-аттосекундная фотоэлектроника.*

2. **Далькаров О.Д.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Физика антипротонов низких энергий и антивещества.*

3. **Полухина Н.Г.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Достижения в ядерно-физических исследованиях на трековых детекторах и перспективы использования трековой методики в астрофизике, физике элементарных частиц и прикладных работах.*

4. **Веденеев С.И.** (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Высокотемпературные сверхпроводники в сверхсильных магнитных полях.*

Статьи, написанные на основе докладов 1, 3 и 4, публикуются ниже.

PACS numbers: 06.60.Jn, 07.07.Hj, **85.60.** – q
DOI: 10.3367/UFNr.0182.201206f.0649

Пико-фемто-аттосекундная фотоэлектроника (взгляд через полувекую "лупу времени")

М.Я. Щелев

1. Введение

Конец 40-х – начало 50-х годов прошлого столетия ознаменовался становлением нового направления в технической физике — пико-фемтосекундной электронно-оптической хронографии, физические основы которой были заложены именно в нашей стране трудами школы

Е.К. Завойского [1, 2]. Суть этого весьма информативного способа пространственно-временного анализа быстропротекающих процессов (БПП) заключается в применении электронно-оптических преобразователей (ЭОП), позволяющих конвертировать оптические изображения в фотоэлектронные, отличающиеся повышенной частотой информационного тракта, быстродействием внешнего фотоэффекта, безынерционностью управления электромагнитными полями и наличием средств цифровой обработки. На фотокатоде оптические изображения преобразуются в соответствующий фотоэлектронный аналог с последующим фокусированием, усилением и отклонением по выходному экрану ЭОП фотоэлектронных изображений, ограниченных в пространстве точкой или узкой щелью (камеры с точечной и/или щелевой (streak) развёрткой изображений, так называемые стрик-камеры). В 1949 г. Дж. Коуртни-Пратт [3, 4] в своих самых первых опытах по развёртке щелевых фотоэлектронных изображений в быстроменяющемся магнитном поле сумел зарегистрировать со скоростью развёртки 3×10^7 см с^{-1} изображения отдельных фаз взрывающегося вещества с максимальным временным разрешением 3×10^{-10} с. Практически одновременно в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова Е.К. Завойский и С.Д. Фанченко с соавторами, используя отечественные многокамерные ЭОП типа УМИ-95, созданные М.М. Бутсловым специально для целей высокоскоростной фотографии [5, 6], построили первую хронографическую камеру. На этой камере при скорости развёртки 10^9 см с^{-1} были зарегистрированы отдельные фазы свечения высокочастотного искрового разряда с максимальным временным разрешением 10^{-11} с, причём за счёт многокаскадного усиления яркости ($10^5 - 10^6$) регистрировался каждый отдельный фотоэлектрон, покидавший входной фотокатод. В 1961 г. этими же авторами был создан ЭОП типа УМИ-95В, в котором напряжённость поля у входного фотокатода была увеличена по сравнению с таковой в УМИ-95 на порядок величины (вплоть до $0,6$ кВ мм^{-1}), а скорость развёртки точечных фотоэлектронных изображений доведена до 2×10^{10} см с^{-1} , что обеспечивало техническое временное разрешение вплоть до 5×10^{-13} с [7]. Результаты этих уникальных экспериментов явились толчком к теоретическому осмыслению основ высокоскоростной электронно-оптической фотографии и установлению предела

М.Я. Щелев. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, РФ
E-mail: m.schelev@ran.gpi.ru

её временного разрешения, оцениваемого величиной 10^{-14} с [8–10].

Отечественные достижения в области пико-фемтосекундной электронно-оптической хронографии были по достоинству оценены А.М. Прохоровым [11]. При его всесторонней поддержке и активном участии М.М. Бутловым и Б.М. Степановым и их сотрудниками во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений (ВНИИОФИ) были начаты разработки нового поколения ЭОП с ускоряющей сеткой у фотокатода и сверхвысокочастотной (СВЧ) отклоняющей системой [12, 13]. Всматриваясь через полувекую лупу времени в историю развития лазерно-ориентированного электронно-оптического приборостроения в Физическом институте им. П.Н. Лебедева (ФИАН) – Институте общей физики им. А.М. Прохорова (ИОФ РАН), следует отметить, что начиная с 1960-х годов ЭОП верно служили лазерной физике, позволяя исследовать быстротекающие процессы, изучение которых другими известными методами и средствами было недоступно, в то время как лазеры создавали надёжные ориентиры для развития ЭОП [14–17]. Одновременно с сокращением длительности излучения вновь создаваемых лазеров лейтмотивом этой работы было постоянное стремление улучшать временное разрешение ЭОП: 1968 г. — 10^{-11} с, 1976 г. — 7×10^{-13} с, 2001 г. — 2×10^{-13} с, настоящее время — менее 10^{-13} с. Наиболее заметные успехи в этом направлении были достигнуты при регистрации излучения титан-сапфирового лазера, когда экспериментально было реализовано временное разрешение $(1,6–2) \times 10^{-13}$ с в стрик-режиме при скорости развёртки 5×10^{10} см с^{-1} [18]. Итак, от момента создания первой стрик-камеры до сегодняшних дней временное разрешение ЭОП было улучшено более чем на три порядка величины. Однако совокупность технических трудностей, с которыми пришлось столкнуться в последние два десятилетия, существенно замедлила эту тенденцию и на практике не позволила приблизиться к предсказанному теоретическому пределу в 10^{-14} с.

Новой вехой в экспериментальной реализации фемтосекундного временного разрешения в фотоэлектронике стало наше предложение [19] по сжатию фотоэлектронных пучков в нестационарных фокусирующих полях. В эксперименте фотоэлектронный пучок с исходной длительностью 7×10^{-12} с был "сжат" до $2,8 \times 10^{-13}$ с. Теоретические оценки показывают, что в нестационарных фокусирующих полях в принципе возможно формирование электронных пучков с аттосекундной (10^{-18} с) длительностью [20]. Такие пучки, помимо прямого использования в экспериментах по электронной дифракции с временным разрешением (Time-Resolved Electron Diffraction, TRED) [21–26], могут с успехом применяться для тестирования систем развёртки фотоэлектронных изображений в ЭОП, в конечном счёте определяющих предельную точность пространственно-временных измерений с фемтосекундным разрешением.

Ниже обсуждаются наиболее заметные результаты нашего продвижения за последнее десятилетие в области достижения временного разрешения в диапазоне $10^{-12}–10^{-13}$ с. На основе ранее накопленного потенциала [27, 28] делается попытка определить наиболее рациональные пути приложения будущих усилий в этом направлении.

2. На пути преодоления 100-фемтосекундного барьера в электронно-оптической стрик-фотографии

Подводя итоги развития электронно-оптической фотографии на пороге нынешнего, третьего, тысячелетия, 23-й Международный конгресс по высокоскоростной фотографии и фотонике, состоявшийся в Москве в ФИАНе в 1998 г., пришёл к выводу о том, что в режиме электронно-оптической хронографии полностью освоен пикосекундный диапазон [29]. Но при этом ещё острее встал вопрос: каково же предельное временное разрешение, которое могут обеспечить стрик-камеры в сегодняшнем реально востребованном физическом эксперименте, в частности, с применением современных лазеров, генерирующих оптические импульсы длительностью всего в несколько фемтосекунд?

Анализ показывает, что взятие этого последнего бастиона в электронно-оптической фотографии, т.е. достижение на практике временного разрешения в диапазоне $10^{-13}–10^{-14}$ с, требует решения целой совокупности практических задач. Перечислим некоторые из них.

1. Создание наноструктурированных, быстродействующих фотокатодов, чувствительных в спектральном диапазоне от мягкого рентгеновского до ближнего инфракрасного (ИК), с поверхностным сопротивлением несколько Ом на квадрат (Ом/□).

2. Увеличение напряжённости электрического поля у фотокатода вплоть до $30–100$ кВ мм^{-1} .

3. Уменьшение разброса начальных энергий фотоэлектронов вплоть до значений, составляющих $0,05–0,1$ эВ с учётом смещения энергетических уровней в фотокатодных плёнках толщиной $100–300$ Å в режиме интенсивных ускоряющих полей, прикладываемых к промежутку "фотокатод–сетка" в фемтосекундных ЭОП.

4. Повышение фазовой скорости развёртки фотоэлектронных изображений по выходному приёмнику (люминесцентному экрану или электронно-чувствительной ПЗС-матрице (ПЗС — прибор с зарядовой связью)) до $3–10$ скоростей света.

5. Улучшение, по крайней мере на порядок величины, отношения сигнал/шум в развёрнутых на экране ЭОП фотоэлектронных изображениях.

6. Создание безабберационной оптики для отображения БПП на фотокатод ЭОП (пространственное разрешение не хуже $30–50$ пар линий на 1 мм, время установления изображения — несколько фемтосекунд).

7. Минимизация шероховатостей поверхности подложки под фотокатодом вплоть до нанометрового уровня.

8. Реализация блока "фотокатод–сетка", позволяющего прикладывать к этому промежутку $10–50$ -киловольтные импульсы с субнаносекундной длительностью.

9. Оптимизация фокусирующей линзы с учётом аберраций высших порядков, в том числе за счёт применения магнитной фокусировки и трансаксиальной оптики.

10. Замена отклоняющей и затворной систем конденсаторного типа СВЧ-системами типа "бегущей волны".

11. Использование наиболее совершенных усилителей яркости изображения, обеспечивающих коэффициент преобразования не менее $10^4–10^6$ при отношении сигнал/шум $\geq 10–100$.

12. Выбор сверхчувствительных и малошумящих систем ПЗС-считывания для цифровой обработки развёрнутых во времени изображений, в том числе за счёт применения электронно-чувствительных ПЗС-матриц,

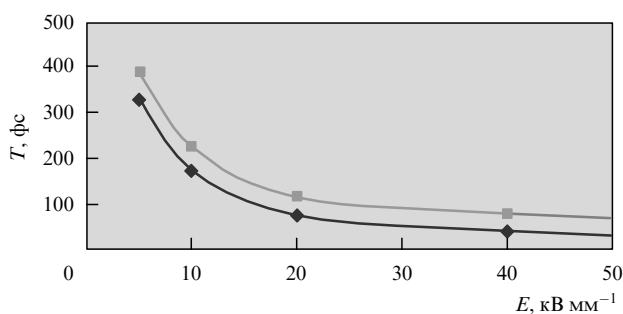


Рис. 1. Расчётное временное разрешение ЭОП с трёхэлектродной фокусирующей линзой в зависимости от напряжённости поля у фотокатода: нижняя кривая — с учётом только хроматических aberrаций первого порядка, верхняя — с учётом aberrаций первого и второго порядков.

сводящих к минимуму потери информации на объективах и волоконно-оптических сочленениях.

Из перечисленного очевидно, что лобовая атака для достижения предельного (10^{-14} с) временного разрешения требует огромных усилий. Например, учёта только хроматических aberrаций первого порядка в фокусирующей линзе ЭОП (т.е. только разброса начальных скоростей фотоэлектронов, что было сделано в пионерских работах Е.К. Завойского), уже недостаточно для корректной [30] оценки временного разрешения ЭОП в диапазоне менее 200 фс (рис. 1). Как следует из рисунка, при учёте aberrаций только первого порядка повышение напряжённости поля у фотокатода в пять раз (от 5 до 25 кВ мм⁻¹) должно улучшать временное разрешение также в пять раз (от 350 до 70 фс). Однако с учётом aberrаций второго порядка временное разрешение улучшается только в 3,5 раза (от 400 до 120 фс). Другими словами, увеличение только напряжённости поля у фотокатода от 25 до 50 кВ мм⁻¹ практически не приводит к сколько-нибудь заметному улучшению временного разрешения. Причина — во влиянии aberrаций высших порядков, для компенсации которых нужно повышать энергию пучка, несущего информацию о входном изображении.

Наши более чем десятилетние усилия по разработке и испытанию фемтосекундных ЭОП нового поколения с импульсным питанием промежутка фотокатод–сетка подтвердили эти умозаключения. В 2001 г. на исследовательско-технологической базе отдела фотоэлектроники ИОФ РАН был разработан, изготовлен и испытан ЭОП типа ПВ-ФС (рис. 2а) [31] с экспериментально измеренным временным разрешением, приближавшимся к 160 фс. На рисунке 2в показана хронограмма исходного 120-фемтосекундного импульса от Ti:Sa-лазера (800 нм) при входной интенсивности $(1-5) \times 10^3$ Вт см⁻², развёрнутого на экране ЭОП типа ПВ-ФС при фазовой скорости щелевой развёртки 5×10^{10} см с⁻¹ и напряжённости электрического поля у фотокатода 13 кВ мм⁻¹. При этом чувствительность фотокатода на длине волны 800 нм составляла 0,5 мА Вт⁻¹, ширина зазора фотокатод–сетка 0,47 мм, ускоряющее напряжение на промежутке фотокатод–сетка около 6 кВ.

В очередной модификации этого ЭОП была использована изменённая конфигурация блока фотокатод–сетка в виде сосредоточенной ёмкости. В трубке ПВ-ФС-М [32] формировался низкоомный (1–5 Ом/□) серебряно-кислородно-цезиевый фотокатод, чувствительный в спектральном диапазоне 115–1550 нм, и были оптими-

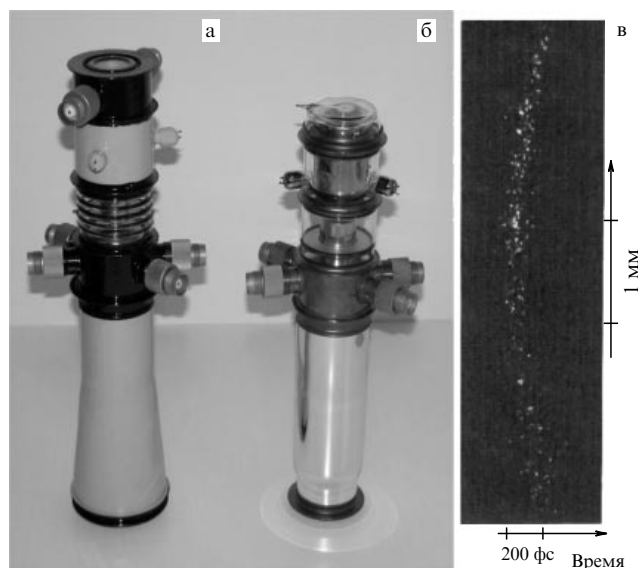


Рис. 2. Фемтосекундные ЭОП: ПВ-ФС с коаксиально-полосковой (а) и ПВ-ФС-М с ёмкостной (б) конфигурациями блока фотокатод–сетка. Хронограмма развёрнутого на экране ПВ-ФС лазерного импульса с исходной длительностью (по автокоррелятору) 120 фс (в).

зированы системы развёртки и затвора фотоэлектронных изображений (рис. 2б). Компьютерные оценки с учётом aberrаций высших порядков для этой конфигурации ЭОП давали максимальное временное разрешение 97 фс в центре фотокатода и 320 фс на расстоянии 3 мм от центра при напряжённости поля у фотокатода более 40 кВ мм⁻¹ (15-киловольтные, 2-наносекундные импульсы должны были прикладываться к 0,35-миллиметровому промежутку фотокатод–сетка). Дальнейшие численные эксперименты с ЭОП ПВ-ФС-М показали, что максимальное временное разрешение может быть улучшено ещё в полтора-два раза, но при условии, что к промежутку фотокатод–сетка будет прикладываться весь ускоряющий потенциал величиной не менее 25–30 кВ. Этот результат ещё раз наглядно подтверждает важность учёта временных aberrаций высших порядков.

На трубках ПВ-ФС и ПВ-ФС-М были построены экспериментальные макеты фемтосекундных стрик-камер [33]. Они были снабжены специально разработанной проецирующей оптикой с фемтосекундным временем установления изображений БПП в плоскости фотокатода, благодаря учёту дисперсии групповых скоростей в линзах проецирующих объектов. Субнаносекундные импульсные схемы управления, созданные для этих камер, обеспечивали задержку срабатывания 10 нс при нестабильностях ± 5 пс и максимальную фазовую скорость линейной ($\pm 5\%$ -ная нелинейность по времени) развёртки щелевых фотоэлектронных изображений, вплоть до 10^{11} см с⁻¹.

Динамические испытания экспериментальных макетов камер проводились с помощью 10-, 35- и 120-фемтосекундных Ti:Sa-лазеров при максимальной плотности входной мощности на фотокатоде $(1-5) \times 10^3$ Вт см⁻² (причём для регистрации изображений входной щели в статическом режиме было достаточно плотности мощности $\sim 10^{-7}-10^{-8}$ Вт см⁻²). При размерах входной щели на фотокатоде 30 мкм \times 5 мм и чувствительности фотокатода на длине волны 800 нм около 0,4 мА Вт⁻¹ в формировании развёрнутых во

времени изображений участвовало примерно 400–2000 фотоэлектронов. В итоге регистрируемые на экране ЭОП изображения состояли из отдельных светящихся точек, причём при условии, что система последующего отображения проанализированных во времени эопограмм обеспечивала надёжную фиксацию каждого фотоэлектрона, покинувшего входной фотокатод. Памятуя о том, что именно кулоновское расталкивание накладывает ограничение на количество электронов в пространственно-разрешаемом элементе (не более 1–10 электронов для достижения временного разрешения 10^{-14} с), приходится констатировать, что для повышения точности измерений с использованием фемтосекундных стрик-камер необходимо проводить наложение (суммирование) хронограмм вдоль направления щели.

3. Фотоэлектронные пушки с нестационарными фокусирующими полями — прорыв в фемтосекундной фотоэлектронике

Обращаясь к физическим принципам, лежащим в основе функционирования ЭОП, напомним, что его фотокатод с высокой степенью точности преобразует пространственно-временные оптические изображения БПП в соответствующие фотоэлектронные аналоги. Подтверждением этому является линейность фотоотклика по интенсивности, равная шести порядкам величины, причём считается, что сам акт фотоэмиссии длится не более нескольких фемтосекунд. Более того, плоскости оптического и фотоэлектронного изображений совпадают в пространстве с точностью до нескольких сотен ангстрем (толщина фотокатодной плёнки 100–300 Å).

В первом ЭОП, появившемся в начале 1930-х годов в Германии и получившем название "стакан Холста" [34], фотоэлектроны распространялись от фотокатода к экрану в однородном (ускоряющем) электрическом поле. Пространственное разрешение ΔR в таком ЭОП (всего несколько пар линий на 1 мм) принципиально ограничивалось абберрациями первого порядка:

$$\Delta R = 2d\sqrt{\frac{\varepsilon_r}{u}},$$

где ε_r — радиальная составляющая начальной энергии фотоэлектронов, u — ускоряющий потенциал, d — расстояние от фотокатода до сетки. Важным результатом исследований О. Шерцера [35], Л.А. Арцимовича [36] и др. по фокусировке фотоэлектронных изображений в ЭОП стало применение неоднородных статических электромагнитных полей, в которых пространственные абберрации первого порядка могли быть обращены в нуль в плоскости фокусировки (плоскости Гаусса). После этого диаметр кружка рассеяния электронов опреде-

ляется абберациями высших порядков. Эффект от использования неоднородных фокусирующих полей превзошёл все ожидания. Пространственное разрешение ЭОП было многократно улучшено — до нескольких десятков пар линий на 1 мм.

Возник вопрос: возможно ли по аналогии с пространственной фокусировкой фотоэлектронных изображений в неоднородных электростатических полях осуществить временную фокусировку (т.е. уменьшение длительности) фотоэлектронных пучков в нестационарных электрических полях? В известном смысле аналогами здесь являются некоторые типы СВЧ-приборов, использующих эффект группировки электронов, а также время-пролётные масс-спектрометры. На основе теоретического и компьютерного анализа М.А. Монастырский с соавторами показали [19], что в специально подобранном нестационарном фокусирующем поле (например, в поле гиперболического электронного зеркала) можно полностью устранить временную хроматическую абберацию первого порядка. Эта абберация, которая является неустранимой в статических фокусирующих полях, описывается знаменитой формулой Завойского–Фанченко:

$$\Delta T_{\text{chr}} = \sqrt{\frac{2m}{e}} \frac{\sqrt{\varepsilon}}{E},$$

где m и e — масса и заряд электрона, E — напряжённость электрического поля вблизи поверхности фотокатода, ε — полуширина энергетического распределения фотоэлектронов, покидающих фотокатод. Эффект временного сжатия фотоэлектронных пучков обеспечивается тем, что зависящее от времени электрическое поле вносит дополнительный разброс по энергиям в пучок электронов, так что частицы, находящиеся на заднем фронте пучка, начинают двигаться быстрее частиц, находящихся на его переднем фронте. Спустя некоторое время "задние" частицы догоняют "передние", и в этот момент длительность электронного пучка становится минимальной, что и определяет положение временного фокуса. Важное преимущество использования нестационарных фокусирующих полей состоит в том, что эффекты пространственного заряда могут быть существенно (на порядок величины) компенсированы посредством оптимального выбора амплитуды и крутизны нестационарных фокусирующих полей.

В отделе фотоэлектроники ИОФ РАН с применением разработанных сотрудниками отдела пакетов прикладных программ ELIM/DYNAMICS [37, 38] и MASIM 3D [39] был рассчитан, спроектирован и изготовлен экспериментальный образец фемтосекундной фотоэлектронной пушки, показанный на рис. 3а [40]. Уникальность этой

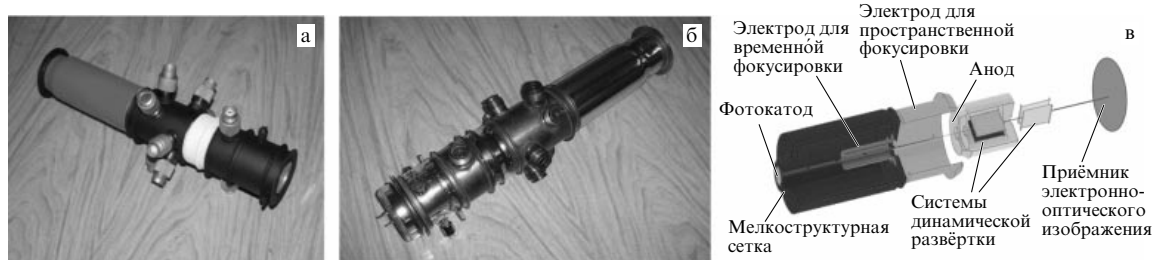


Рис. 3. Фемтосекундная фотоэлектронная пушка (а), multifunctionальное устройство ЭОП – фотоэлектронная пушка (б) и его геометрическая конфигурация (в).

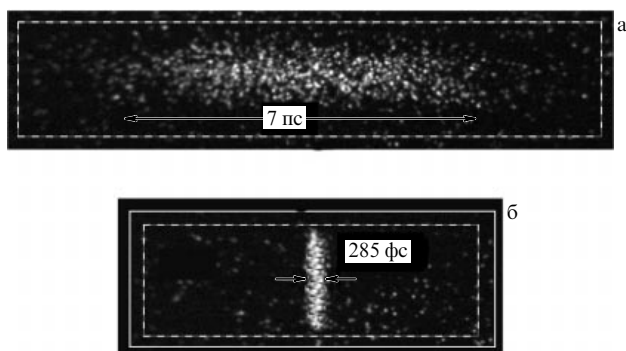


Рис. 4. Хронограмма развёрнутого на экране фотоэлектронной пушки лазерного импульса длительностью 7 пс (а) и хронограмма того же импульса после сжатия его до длительности 285 фс в нестационарных фокусирующих полях (б).

пушки состоит в том, что в ней впервые в истории электронно-оптического приборостроения была реализована возможность осуществлять временную и пространственную фокусировки фотоэлектронных пучков одновременно! Наши многочисленные эксперименты, проведённые с разработанной фотоэлектронной пушкой, подтвердили возможность многократного (в 25–50 раз) сжатия фотоэлектронных пучков. На рисунке 4а в качестве примера приведена хронограмма исходного 7-пикосекундного лазерного импульса, длительность которого была уменьшена до 285 фс (рис. 4б) в фокусирующем поле пушки (амплитуда фокусирующего импульса 960 В при крутизне $2,4 \times 10^{12}$ В с⁻¹, скорость развёртки $8,4 \times 10^{10}$ см с⁻¹).

Следующим шагом в освоении фемтосекундного временного диапазона явилось наше предложение по созданию многофункционального фотоэлектронного устройства, совмещающего в себе функции и фемтосекундного ЭОП, и фемтосекундной фотоэлектронной пушки для исследования атомно-молекулярной динамики вещества методами дифракции электронов "на просвет" (TRED). Такое гибридное устройство было смоделировано, сконструировано, изготовлено и испытано в режиме статического включения. Структура электродов гибридного устройства приведена на рис. 3в, а его общий вид представлен на рис. 3б. В режиме времяанализирующего ЭОП расчётное временное разрешение устройства составляет 110 фс. При подаче на электрод временной фокусировки 8-киловольтного импульса, линейно нарастающего в течение 0,5 нс, исходный 110-фемтосекундный пучок электронов "сжимается" до 35-фемтосекундного. Значит, уже сегодня с помощью такого прибора в режиме фотоэлектронной пушки можно сформировать пучок электронов с длительностью в несколько десятков фемтосекунд, а затем развернуть его на экране ЭОП и тем самым ответить на вопрос о предельной точности измерения столь коротких сигналов методами электронно-оптической хронографии.

Сказанное выше даёт право утверждать, что Институту общей физики РАН принадлежит приоритет в разработке абберационной теории пространственно-временной фокусировки фотоэлектронных пучков в нестационарных электрических полях. Получено прямое обобщение формулы Завойского–Фанченко для случая нестационарных фокусирующих полей и показано, что применение таких полей позволяет по крайней мере на порядок превзойти (т.е. уменьшить вплоть до нескольких

долей фемтосекунды) теоретический предел временного разрешения, обусловленный хроматическими aberrациями ЭОП со статическими фокусирующими полями. Проведённые с помощью изготовленных экспериментальных образцов фемтосекундных фотоэлектронных пушек измерения полностью подтвердили результаты теоретических расчётов. В 2007 г. цикл работ отдела фотоэлектроники по созданию теории и экспериментальной реализации фемтосекундной фотоэлектронной пушки получил наивысшую оценку на конкурсе научных работ, посвящённом 25-летию образования ИОФ РАН.

4. Инновационная пико-фемтосекундная фотоэлектроника

Инновационная деятельность и особенно многолетний опыт международного сотрудничества ИОФ РАН практически со всеми ведущими зарубежными научными центрами и фирмами, специализирующимися в области сверхскоростного электронно-оптического приборостроения [41], позволили сохранить от развала нашу собственную исследовательско-технологическую базу, поддержание которой в современных реалиях уже не обеспечивалось бюджетным финансированием. Выдающаяся роль в завоевании рынка пикосекундной электронно-оптической продукции принадлежала легендарному отечественному ЭОП типа ПВ001 [42]. Этот ЭОП был разработан Г.И. Брюхневичем и В.А. Миллером с соавторами во ВНИИОФИ в середине 1970-х годов, и на него получены авторское свидетельство [43], а также патенты США, Великобритании, Франции, Нидерландов, Японии. ПВ001 впитал в себя всё лучшее, что было реализовано М.М. Бутсловым и его школой в непревзойдённых отечественных приборах серии ПИМ–УМИ, в том числе снабжённых ускоряющей сеткой. На УМИ-93М нами ещё в 1976 г. было реализовано временное разрешение 0,7 пс [44]. ЭОП типа ПВ-001, изготовленные в нескольких тысячах экземпляров, стали основой для мелкосерийных камер ЭОК-2М и ЭОК-3 [45], выпущенных Специальным конструкторским бюро (СКБ) физического приборостроения для Государственного оптического института им. С.И. Вавилова (ГОИ), а также в знаменитых многосерийных камерах ВНИИОФИ типа "Агат" [12, 13]. В результате нашего научно-технического сотрудничества с фирмами Hamamatsu (Япония), Hadland-Photonics, Specialized Imaging (Англия), Cordin (США), Thomson-CSF (Франция), Optronis (Германия), V-Tek (Южная Корея) и др. на основе трубок серии ПВ были разработаны и изготовлены хорошо зарекомендовавшие себя пикосекундные стрик-камеры, например протиражированная в нескольких сотнях экземпляров британская камера "Имакон-500" [46]. В 2008 г. на трубке ПВ-003Р (рис. 5а) с двухкомпонентным фотокатодом, чувствительным как в видимом, так и в мягком рентгеновском диапазонах, в отделе фотоэлектроники по заказу ФИАНа была изготовлена 10-пикосекундная стрик-камера (рис. 5б).

Другим примером нашей инновационной деятельности является ЭОП типа ПИФ-01, разработанный в ИОФ РАН В.П. Дегтярёвой с соавторами в 1984 г. и тиражируемый до сих пор в десятках экземпляров на собственной исследовательско-технологической базе (рис. 5в) [47, 48]. С использованием ПИФ-01 В.И. Лозовым с сотрудниками была построена пикосекундная электронно-оптическая камера модели PS-1/S1 (рис. 5г), выгодно

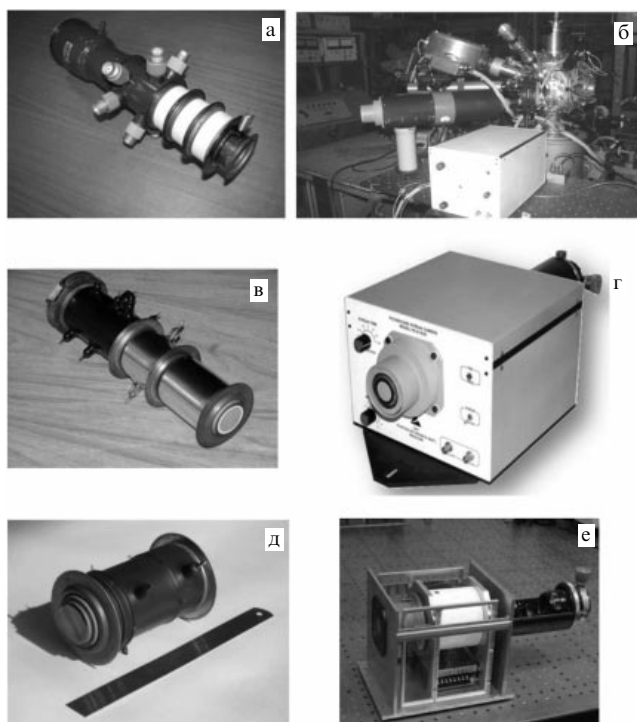


Рис. 5. Инновационные разработки отдела фотоэлектроники ИОФ РАН: (а) ЭОП ПВ-003Р [12, 13] с двухкомпонентным фотокатодом (Au + CsSb), чувствительным в видимом (360–650 нм) и мягком рентгеновском (0,1–1 нм) спектральных диапазонах; (б) построенная на его базе 10-пикосекундная камера, работающая в стрик-режиме и однокадровом режиме (показана встроеной в установку для экспериментов по лазерному управляемому термоядерному синтезу в ФИАНе); (в) ЭОП ПИФ-01 с вводным фотокатодом; (г) пикосекундная электронно-оптическая камера (ЭОК) PS1/S1 на базе ПИФ-01; (д) бессеточный ЭОП ПФ-М с большим полем фотокатода; (е) малогабаритная ЭОК типа "многоканальный осциллограф" на базе ПФ-М.

отличающаяся от зарубежных аналогов высоким временным разрешением в режиме щелевой развёртки ($1 \pm 0,2$) пс при скорости развёртки $(1-2) \times 10^{10}$ см с⁻¹ и напряжённости поля у фотокатода $3-4$ кВ мм⁻¹, широким диапазоном спектральной чувствительности (350–1300 нм), малыми временем (< 15 нс) и нестабильностью (± 10 пс) срабатывания. Более десяти таких камер ИОФ РАН поставил заказчикам (ФИАН, Институт физики полупроводников СО РАН, Институт прикладной физики РАН, Институт высоких температур РАН, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ) и др.). Совместно со специалистами ИРЭ РАН сотрудниками отдела фотоэлектроники ИОФ РАН Н.С. Воробьёвым, П.Б. Горностаевым, А.В. Смирновым, В.И. Пелипенко, Е.В. Шашковым и др. были осуществлены эксперименты по паспортизации технических параметров этой камеры с целью определения её пригодности для прецизионных пикосекундных измерений в области физики полупроводников [49]. Результаты этих испытаний позволили заметно улучшить эксплуатационные параметры последующих камер и подтвердили эффективность отечественных разработок, в том числе с точки зрения их стоимости (в 2–3 раза более низкой, чем стоимость аналогичной иностранной продукции). Кстати, трубка ПИФ-001 была успешно использована в коммерческой стрик-камере модели 173, до сегодняшнего дня производимой американской фирмой "Cordin" [50].

К числу востребованных разработок отдела фотоэлектроники относятся также пикосекундные бессеточные ЭОП с большим рабочим полем фотокатода (диаметр не менее 20–25 мм): ПВ-001-В, ПФ-01, ПФ-М. Например, бессеточный ЭОП типа ПВ-001-В с мультищелочным (200–850 нм) фотокатодом, имеющим диаметр рабочего поля 25 мм, был установлен в многоканальный вариант камеры "Имакон-500", используемый в Ливерморе на установке NIF (National Ignition Facility). ЭОП ПФ-01 был специально разработан нами для использования в стрик-канале многокадровой камеры "Имакон-468" британской фирмы Hadland Photonics. В 1999 г. эта камера была удостоена высшей королевской награды за технологическое совершенство [51]. Подобные камеры, будучи состыкованными со спектральными приборами или с большим числом световодных датчиков, требуют протяжённой щели для увеличения количества укладываемой вдоль неё пространственной информации, одновременно анализируемой во времени.

На недавно разработанных бессеточных трубках ПФ-М (рис. 5д), имеющих размер входного поля фотокатода 4×20 мм, пространственное разрешение не менее 30 пар линий на 1 мм, а временное — не хуже 50 пс, в отделе фотоэлектроники ИОФ РАН Ю.Н. Сердюченко построил макет универсальной стрик-камеры (рис. 5е), работающей в широком временном диапазоне скоростей развёрток — от 10 нс до 50 мкс на экран. Камера, построенная на трубке ПФ-М и микроканальном усилителе яркости ЭП-10, отличается малыми габаритами ($20 \times 20 \times 35$ см) и незначительным весом (менее 5 кг). Есть все основания полагать, что подобная инновационная разработка благодаря своей невысокой себестоимости могла бы, наконец, послужить основой для массового тиражирования. При цене, сравнимой с ценой хорошего осциллографа, одна такая камера могла бы заменить несколько сотен осциллографов благодаря возможности одновременного анализа множества каналов, определяемого числом пространственно-разрешаемых элементов, укладываемых по высоте щели.

5. Заключение

На пути дальнейшего продвижения к освоению фемтоаттосекундного временного диапазона в фотоэлектронике хотелось бы расставить следующие приоритеты. Любое фотоэлектронное устройство начинается с фотокатода, поэтому углублённое изучение природы внешнего фотоэффекта, создание быстродействующих и высокочувствительных фотокатодов, работающих в широком спектральном диапазоне в условиях интенсивных ускоряющих полей у их поверхности, — задача первоочередной важности. Считается, что в используемых нами классических Ag–O–Cs (S1)-фотокатодах собственно фотоэффект определяется вероятностью туннелирования неравновесных фотоэлектронов через потенциальный барьер, образованный активирующим слоем [52–55]. При изготовлении такой фотокатод формируется в результате реакции $\text{Ag}_2\text{O} + 2\text{Cs} \rightarrow 2\text{Ag} + \text{Cs}_2\text{O}$. В нём наночастицы серебра размером 10–50 нм окружены диполями ионов Cs^+ и $\text{Cs}^+ - \text{O}^- - \text{Cs}^+$ (дипольный слой составляет несколько нанометров), которые снижают работу выхода до 0,1–1 эВ при засветке видимым и инфракрасным излучением. Фотоэмиссия обусловлена возбуждением в наночастицах поверхностных плазмонов, а чувствительность в ИК-диапазоне определяется

размерами, формой и распределением наночастиц на поверхности. Транспорт фотоэлектронов из толщи фотокатода к поверхности отсутствует. Время фотоэмиссии — это время прохождения плазменной волны через наночастицу. Если размер наночастиц ~ 10 нм, а скорость плазменной волны $\sim 2 \times 10^8$ см с^{-1} , то время фотоэмиссии составляет не более 5 фс. Это означает, что для надёжной регистрации фотоэлектронных пакетов такой длительности требуется дальнейшее совершенствование фокусирующих и отклоняющих систем ЭОП. Такую работу можно осуществить только на основе углублённых теоретических и компьютерных исследований современных времяанализирующих ЭОП с учётом практических возможностей их последующего макетирования и мелкосерийного изготовления на существующей исследовательско-технологической базе ИОФ РАН. Сохранение и развитие уникального теоретического потенциала отдела фотоэлектроники является абсолютно необходимым условием для решения сегодняшних задач фемтосекундной фотоэлектроники.

Наряду с целесообразностью форсирования работ по совершенствованию уже имеющихся фемтосекундных ЭОП серии ПВ-ФС, заслуживает пристального внимания и скорейшего практического внедрения наше недавнее предложение по использованию трансаксиальных линз для фокусировки "щелевых" изображений. Парадоксальность ситуации с момента реализации щелевой развёртки в 1949 г. заключается в том, что практически во всех времяанализирующих ЭОП используются фокусирующие линзы с аксиальной симметрией. И это объясняется тем, что исходные приборы ночного видения, так же как и их последующие аналоги, специально разработанные для целей высокоскоростной фотографии (например, ПИМ-3), предназначались для отображения двумерных изображений, т.е. они могли использоваться и для кадровой съёмки, и для щелевой развёртки.

Справедливости ради надо отметить, что ещё в 1988 г. в рамках совместных исследований с находившимся тогда в ИОФ РАН китайским стажером, а теперь академиком, Х. Ниу, мы разработали конструкцию 50-фемтосекундного ЭОП с плоско-параллельной фокусирующей линзой конденсаторного типа [56, 57]. С использованием этих наработок был изготовлен и испытан ЭОП под названием БЩВ [58]. Такой ЭОП, который работал только с входными изображениями в виде щели, сразу показал обнадеживающие результаты. В частности, на нём было экспериментально реализовано временное разрешение 5×10^{-13} с

при скорости развёртки $1,7 \times 10^{10}$ см с^{-1} и напряжённости поля у фотокатода 6 кВ мм^{-1} .

В отделе фотоэлектроники в 2010 г. Д.Э. Гринфельдом была осуществлена компьютерная проработка новейшей конфигурации фемтосекундного ЭОП, основанного на использовании трансаксиальных фокусирующих линз (рис. 6а, б). Подобный ЭОП позволяет создавать остросфокусированные электронные пучки при практически неограниченной протяжённости рабочего поля фотокатода вдоль щели. Так, при напряжённости поля у фотокатода 4 кВ мм^{-1} расчётное временное разрешение такого ЭОП не хуже 0,45 пс при пространственной фокусировке 1–20 мкм в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Дальнейшей активизации требуют и наши оригинальные исследования по сжатию фотоэлектронных пучков в нестационарных фокусирующих полях, тем более что для достижения теоретического предела здесь остаётся ещё два-три порядка величины, а не один, как в случае электронно-оптической хронографии. Очень перспективным направлением представляется разработка фемтосекундной фотоэлектронной пушки с коррекцией аберраций второго и высших порядков посредством использования последовательно установленных систем сжатия электронных пучков в быстроменяющихся импульсных электрических полях с дополнительными фокусирующими магнитными линзами (рис. 6в). Наши расчёты [59], проведённые в том числе в рамках проекта РФФИ совместно с немецкими коллегами из Института Макса Планка, подтверждают практическую возможность формирования электронных пучков длительностью в несколько сотен аттосекунд (рис. 6г). Такие пучки в пределе могут быть сфокусированы на мишени в пятно диаметром несколько сотен нанометров.

Что касается инновационной деятельности, то на сегодня, помимо ЭОП (ПВ-001, ПВ-ФС, ПИФ-01, ПФ-01, ПФ-М и др.), полностью готовыми к мелкосерийному выпуску являются: пикосекундная камера PS-1/S1 и малогабаритная камера осциллографического типа на трубке ПФ-М. Последняя разработка, если найдётся достойный спонсор, может, наконец, составить серьёзную конкуренцию самым быстродействующим осциллографам.

Для реализации всех перечисленных планов требуется надёжно и бесперебойно функционирующая исследовательско-технологическая цепочка, созданная в ИОФ РАН по инициативе А.М. Прохорова ещё в 1989 г. и до

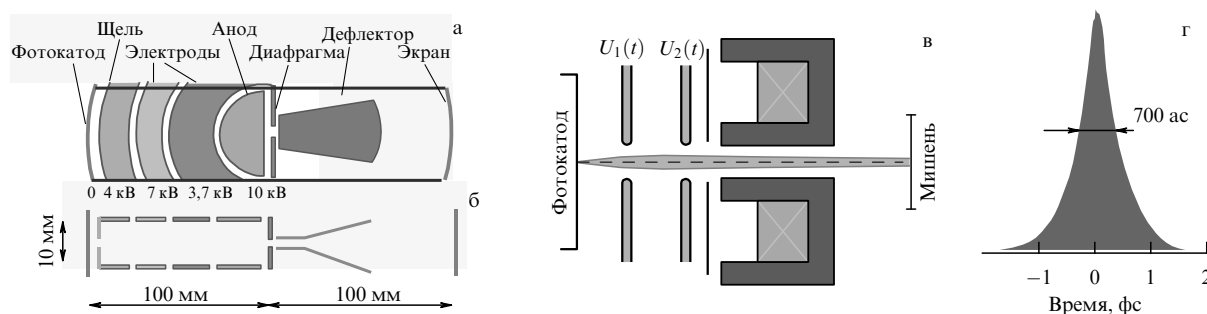


Рис. 6. Конструкция фемтосекундного ЭОП на трансаксиальных линзах: (а) вид сверху вдоль щели, (б) вид сбоку (поперёк щели). (в) Схема фотоэлектронной пушки с коррекцией аберраций второго порядка; U_1, U_2 — быстроменяющиеся импульсные электрические поля. (г) Сжатие 50-фемтосекундного фотоэлектронного пучка до длительности 700 ас (компьютерное моделирование).

сих пор существующая благодаря поддержке дирекции ИОФ РАН во главе с И.А. Щербаковым. В функции этой цепочки входят: разработка и поддержание пико-фемтосекундных лазерных установок, предназначенных для динамической калибровки ЭОП и фотоэлектронных пушек; создание программного обеспечения и компьютерное моделирование электронно-оптических систем фокусировки и отклонения; конструирование, развитие технологии и изготовление экспериментальных образцов ЭОП, а также фотоэлектронных пушек и камер на их основе; проведение статических и динамических испытаний разрабатываемых фотоэлектронных приборов с последующей отработкой методики их применения в физическом эксперименте. Сохранение, поддержание и развитие для будущих поколений существующего в ИОФ РАН исследовательско-технологического потенциала в области сверхскоростной фотоэлектроники — достойнейшая из задач!

В заключение автор сердечно благодарит всех сотрудников отдела фотоэлектроники за их преданность данному научному направлению. Особой благодарности заслуживают С.В. Андреев, Г.И. Брюхневич, Н.С. Воробьев, В.П. Дегтярева, М.А. Монастырский, Е.А. Кузьменко и А.В. Смирнов за помощь в подготовке данной рукописи к печати.

Список литературы

1. Завойский Е К, Фанченко С Д *ДАН СССР* **100** 661 (1955)
2. Завойский Е К, Фанченко С Д *ДАН СССР* **108** 218 (1956)
3. Courtney-Pratt J S *Research* **2** 287 (1949)
4. Courtney-Pratt J S *Photogr. J. B* **92** 137 (1952)
5. Бутслов М М *Успехи научной фотографии* (6) 76 (1959)
6. Butslav M M и др., in *Proc. IV Intern. Congress on High-Speed Photography, Cologne, 1958*, p. 230
7. Фанченко С Д *Приборы и техника эксперимента* (1) 5 (1961)
8. Zavoisky E K, Fanchenko S D *Appl. Opt.* **4** 1155 (1965)
9. Завойский Е К, Фанченко С Д "Высокоскоростная фотография с экспозицией 10^{-9} — 10^{-14} сек. на основе применения электронно-оптических преобразователей", Препринт (Москва: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1966)
10. Завойский Е К, Фанченко С Д *ДАН СССР* **226** 1062 (1976) [Zavoiskii E K, Fanchenko S D *Sov. Phys. Dokl.* **21** 107 (1976)]
11. Прохоров А М *Вестник РАН* **73** 483 (2003) [Prokhorov A M *Herald Russ. Acad. Sci.* **73** 249 (2003)]
12. Иванов В С и др., в сб. *Оптико-электронные измерения* (Под ред. В С Иванова) (М.: Университетская книга, 2005) с. 430
13. Брагин Б Н и др., в сб. *Оптико-электронные измерения* (Под ред. В С Иванова) (М.: Университетская книга, 2005) с. 462
14. Щелев М Я *Квантовая электроника* **31** 477 (2001) [Schelev M Ya *Quantum Electron.* **31** 477 (2001)]
15. Щелев М Я *Квантовая электроника* **33** 609 (2003) [Schelev M Ya *Quantum Electron.* **33** 609 (2003)]
16. Щелев М Я *Квантовая электроника* **37** 927 (2007) [Schelev M Ya *Quantum Electron.* **37** 927 (2007)]
17. Щелев М Я *Квантовая электроника* **41** 577 (2011) [Schelev M Ya *Quantum Electron.* **41** 577 (2011)]
18. Прохоров А М и др. *Квантовая электроника* **32** (4) 283 (2002) [Prokhorov A M et al. *Quantum Electron.* **32** 283 (2002)]
19. Monastyrski M A et al. *Proc. SPIE* **4948** 305 (2003)
20. Vartak S D, Lawandy N M *Optics Commun.* **120** 184 (1995)
21. Mourou G, Williamson S *Appl. Phys. Lett.* **41** 44 (1982)
22. Mourou G et al. *Proc. SPIE* **0348** 313 (1982)
23. Zewail A H *Science* **242** 1645 (1988)
24. Zewail A H *Sci. Am.* **263** (12) 76 (1990)
25. Zewail A H *J. Phys. Chem.* **100** 12701 (1996)
26. Williamson J C et al. *Nature* **386** 159 (1997)
27. Щелев М Я *Труды ФИАН* **155** 3 (1985)
28. Щелев М Я *УФН* **170** 1002 (2000) [Schelev M Ya *Phys. Usp.* **43** 931 (2000)]
29. Fanchenko S D *Proc. SPIE* **3516** 15 (1998)
30. Monastyrski M A, Andreev S V, Tarasov V A *Proc. SPIE* **2869** 92 (1996)
31. Degtyareva V P et al. *Proc. SPIE* **4948** 281 (2003)
32. Ageeva N V et al. *Proc. SPIE* **7126** 71261B (2008)
33. Losovoi V et al. *Proc. SPIE* **4948** 297 (2003)
34. Holst G et al. *Physica* **1** 297 (1934)
35. Scherzer O *Z. Phys.* **101** 593 (1936)
36. Арцимович Л А *Изв. АН СССР Сер. физ.* **8** 313 (1944)
37. Monastyrski M A, Andreev S V *Proc. SPIE* **2869** 92 (1996)
38. Andreev S V et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **427** (1–2) (1999)
39. Greenfield D E et al., in *Software Demonstrations, Intern. Conf., Cambridge, UK, 2006, Abstract Book*, p. 23
40. Andreev S V et al. *Proc. SPIE* **6279** 62797O (2006)
41. Прохоров А М, Щелев М Я *Труды ФИАН* **155** 233 (1985)
42. Брюхневич Г И и др., в сб. *14-й Международ. конгресс по высокоскоростной фотографии и фотонике, Москва, 19–24 окт. 1980, Тезисы докладов* (М., 1980) с. 170
43. Брюхневич Г И и др., Авт. свид. № 13535 от 14 ноября 1980 г. с приоритетом от 5 апреля 1978 г.
44. Брюхневич Г И и др. *Письма в ЖТФ* **2** 1009 (1976) [Bryukhnevich G I et al. *Sov. Tech. Phys. Lett.* **2** 396 (1976)]
45. *Квантовая электроника* **7** 2060 (1980) [Sov. J. Quantum Electron. **10** 1198 (1980)]
46. Vorob'ev N S et al. *Proc. SPIE* **1032** 16 (1988)
47. Degtyareva V P et al. *Proc. SPIE* **491** 239 (1984)
48. Degtyareva V P et al. *Proc. SPIE* **1801** 44 (1992)
49. Ageeva N N и др. *Приборы и техника эксперимента* (4) 108 (2011) [Ageeva N N et al. *Instrum. Exp. Tech.* **54** 548 (2011)]
50. Nebeker S, Prokhorov A M, Schelev M Ya *Laser Focus World* (12) 125 (1991)
51. "Imacon 468", Technical brochure, Hadland Photonics, UK (1998)
52. Нолле Э Л, Щелев М Я *Письма в ЖТФ* **30** (8) 1 (2004) [Nollé É L, Shchelev M Ya *Tech. Phys. Lett.* **30** 304 (2004)]
53. Нолле Э Л, Щелев М Я *ЖТФ* **75** (11) 136 (2005) [Nolle E L, Schelev M Ya *Tech. Phys.* **50** 1528 (2005)]
54. Nolle E L, Khavin Yu B, Schelev M Y *Proc. SPIE* **5580** 424 (2005)
55. Нолле Э Л и др. *УФН* **177** 1133 (2007) [Nolle É L *Phys. Usp.* **50** 1079 (2007)]
56. Niu H et al. *Proc. SPIE* **1032** 79 (1988)
57. Niu H et al., Авт. свид. № 1626989 от 8 октября 1990 г. с приоритетом от 20 июня 1988 г.
58. Prokhorov A M, Schelev M Ya *SPIE* **1359** 280 (1990)
59. Greenfield D E et al. *Proc. SPIE* **7126** 71260D (2008)

PACS numbers: 14.60.Pq, 29.40.Gx, **29.50.** + v
DOI: 10.3367/UFNr.0182.201206g.0656

Достижения в ядерно-физических исследованиях на трековых детекторах и перспективы использования трековой методики в астрофизике, физике элементарных частиц и прикладных работах

Н.Г. Полухина

Представлен краткий обзор результатов ядерно-физических исследований, выполненных с помощью трековых детекторов. О преимуществах и перспективах трековой методики в физике элементарных частиц, нейтринной физике, астрофизике и других областях рассказывается на примере результатов работ на комплексе ПАВИКОМ (Полностью Автоматизированный Измерительный КОМПлекс) Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН). Уникальный комплекс ПАВИКОМ, удовлетворяющий лучшим мировым стандартам для трековых детекторов, успешно работает около десяти лет. Обсуждаются результаты исследований по поиску прямого рождения таонного нейтрино в пучке мюонных

Н.Г. Полухина. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, РФ. E-mail: poluhina@sci.lebedev.ru