



ПЕРВООТКРЫВАТЕЛЬ ПИКОСЕКУНДНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ХРОНОГРАФИИ

ЧАСТЬ II

М.Щелев, д.ф.-м.н.,
Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН,
m.schelev@ran.gpi.ru, www.gpi.ru

Высокоскоростные электронно-оптические преобразователи (ЭОП) – уникальные научные приборы для фотографической регистрации быстропротекающих процессов и изучения сверхкоротких явлений пико-фемтосекундной длительности в физике лазерной плазмы, нелинейной и волоконной оптике, газодинамике, фотобиологии. В продолжении обзора рассмотрено развитие приборов технической физики, которые способны обеспечить передачу информации даже с аттосекундным временным разрешением.

ЭОП И ЛАЗЕРНЫЙ БУМ

Техническая реализация физических принципов пико-фемтосекундной электронно-оптической фотографии растянулась на многие годы, а потенциальные возможности повышения временного разрешения ЭОП на три порядка величины (от 10 пс до 10 фс) будоражат и поныне интерес многих исследователей. Успехи применения времяанализирующих ЭОП в физических экспериментах являлись одновременно мощным стимулом совершенствования самих ЭОП, а возникшая потребность в электронно-оптической диагностической аппаратуре привела к необходимости изготовления мелких партий этих приборов [23–25].

После основополагающих экспериментов, проведенных в середине 50-х годов Е.К.Завойским с сотрудниками, на смену шестикаскадным УМИ-95 с напряженностью поля у фотокатода ПИМ-3 ≤ 60 В/мм и скоростью развертки $2 \cdot 10^9$ см/с в 1959 году пришли приборы серии УМИ-95В. В этих приборах за счет прикатодного кольцевого электрода была повышена более чем на порядок величины напряженность электрического поля у входного фотокатода (вплоть до 600–900 В/мм) (по данным измерений в электростатической ванне). Для развертки

DISCOVERER OF PICOSECOND ELECTRON-OPTICAL CHRONOGRAPHY

PART II

M. Schelev,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Prokhorov General Physics Institute of the Russian
Academy of Sciences, m.schelev@ran.gpi.ru, www.gpi.ru

High-speed image intensifier tubes (IIT) refer to the unique scientific devices intended for the photographic record of fast processes and study of ultra-short phenomena with pico-femtosecond duration in laser plasma physics, nonlinear and fiber optics, gas dynamics, photobiology. The development of technical physics devices which are capable to transmit information with attosecond time resolution at the extreme is considered in the review continuation.

IIT AND LASER BOOM

Technical implementation of the physical principles of pico-femtosecond electron-optical photography prolonged to many years and the potential capabilities of increase of IIT time resolution by three orders of magnitude (from 10 ps to 10 fs) still stir up the interest of many researchers. Progress connected with the application of time analyzing IITs in physical experiments was simultaneously powerful stimulus for the improvement of IITs, and the need which occurred in the electron-optical diagnostic equipment led to the necessity of production of small batches of these devices [23–25].

After the fundamental experiments carried out in the middle of 50s by Y.K.Zavoisky and colleagues, the devices of UMI-95V series replaced the six-stage UMI-95 with the field intensity near the photocathode PIM-3 of ≤ 60 V/mm and scanning speed of $2 \cdot 10^9$ cm/s in 1959. At the expense of cathode circular electrode the electric field intensity near the entrance photocathode was increased by more than an order of magnitude (up to 600–900 V/mm)

фотоэлектронных изображений, ограниченной точкой, вместо обычных отклоняющих пластин конденсаторного типа с колпачковыми выводами С.Д.Фанченко с соавторами разработал новую отклоняющую систему. Она состояла из двух открытых резонаторов, настроенных на длину волны 10 см, расположенных под прямым углом друг к другу и заканчивающихся вакуумно-плотными коаксиальными вводами. На УМИ-95В была реализована непрерывная эллиптическая развертка с большой полуосью эллипса – 10 мм. Максимальная скорость развертки точечных фотоэлектронных изображений была повышена на порядок величины и составила $(1-2) \cdot 10^{10}$ см/с, что, в принципе, обеспечивало техническое временное разрешение вплоть до $8 \cdot 10^{-13}$ с.

В режиме непрерывной развертки импульсов многоэлектронной темновой эмиссии на УМИ-95В было экспериментально подтверждено, что электроны каждой группы, вылетающие из общей точки фотокатода, покидают его с разбросом по времени не более чем несколько пикосекунд. Тот же эксперимент, повторенный с ЭОП УМИ-95, показал, что зарегистрированная длительность многоэлектронной темновой эмиссии равна нескольким десяткам пикосекунд. Таким образом, в ноябре 1960 года С.Д.Фанченко, опираясь на результаты своих экспериментов с УМИ-95В, сделал вывод "о практической возможности довести временное разрешение электронно-оптической хронографии до нескольких единиц на 10^{-13} с."

Принципиально новая ситуация для испытания и совершенствования пико-фемтосекундных ЭОП сложились после середины 60-х годов, когда ЭОП раскрыли свои уникальные регистрирующие возможности в лазерных экспериментах и в экспериментах по лазерному УТС. В этих экспериментах практическая возможность реализации временного разрешения лучше 10 пс была особенно востребованной. После появления первых лазеров с синхронизацией мод возникла реальная потребность в камерах на ЭОП с временным разрешением порядка одной или даже долей пикосекунды. И в решение этой задачи Е.К.Завойский со своими коллегами также внесли заметный вклад. В творческом взаимодействии с М.М.Бутсловым, Б.М.Степановым и другими сотрудниками ВНИИ оптико-физических измерений [27] Евгений Константинович сосредоточил усилия своего коллектива на существенной модернизации УМИ-95В путем использования резонансной СВЧ-развертки непрерывного действия, работающей на длине волны 3 см [28-29]. В этом новом времяанализирующем ЭОП, созданном в 1970 году и получившим



а)



б)

в)

Фемтосекундная фотоэлектронная пушка с нестационарными фокусирующими полями (а); эопограмма исходного 7-пс лазерного импульса (б) и сжатого до 285 фс электронного пучка (в). Скорость развертки $8 \cdot 10^{10}$ см/с
Femtosecond photoelectron gun with non-stationary focusing fields (a); eopogram of initial 7 ps laser pulse (b) and electron beam compressed to 285 fs (c). Scanning speed – $8 \cdot 10^{10}$ cm/s

(according to the data of measurements in electrostatic bath). For the scanning of photoelectronic images limited by point instead of standard condenser-type deflecting plates with top caps, S.D.Fanchenko with colleagues developed new deflecting system. It consisted of two open resonators which were tuned in the wave length of 10 cm located at the right angle toward each other with vacuum-tight coaxial inputs on the edges. Continuous elliptical scan with the semimajor axis of 10 mm was performed on UMI-95V. The maximum scanning speed of dot-element photoelectron images was increased by an order of magnitude and had the value of $(1-2) 10^{10}$ cm/s which basically provided the technical time resolution up to $8 \cdot 10^{-13}$ s.

Under the conditions of continuous scanning of many-electron dark emission pulses on UMI-95V it was experimentally proved that electrons of every group, outgoing from the common photocathode point, leave it with the time spread of not more than several picoseconds. The same experiment repeated with the IIT of UMI-95 series showed that the recorded



наименование "Пикохрон", электроны попадали в отклоняющую систему через входное отверстие диаметром 2,5 мм. Отклонение осуществлялось электрическим СВЧ-полем в области "щели" двух взаимно перпендикулярных резонаторов. Оба резонатора типа "щель-отверстие" настраиваются на одну и ту же частоту, равную 10 ГГц. Для точной подстройки в одном из резонаторов предусмотрен плунжер. Возбуждение каждого резонатора производится через петлю связи коаксиального ввода, наружный конец которого является элементом волноводно-коаксиального перехода. При сканировании изображения непрерывно светящейся точки, развертке можно было легко придать форму окружности, эллипса или прямой путем изменения сдвига фаз с помощью фазовращателя.

Один из первых экспериментов научного коллектива под руководством Е.К.Завойского с использованием "Пикохрона" состоял в развертке импульсов многоэлектронной компоненты темновой эмиссии входного серебряно-кислородно-цезиевого фотокаатода. Известно, что при отсутствии освещения фотокаатода с него вылетают электроны "темнового шума", состоящего из двух компонент - одноэлектронной и многоэлектронной. Одноэлектронная компонента (10^2 - 10^3 электронов·см²/с) объясняется механизмом термоэлектронной эмиссии с фотокаатода и описывается обычной формулой Ричардсона. Многоэлектронные импульсы (10^4 - 10^5 электронов·см²/с) по-видимому, возникают в результате попадания на фотокаатод ускоренного электрическим полем иона (например, иона цезия). Сами импульсы имеют значительный статистический разброс по числу электронов в отдельной пачке (от 5 до 15). В режиме непрерывной эллиптической развертки импульсов многоэлектронной темновой эмиссии на "Пикохроне" [28] было экспериментально подтверждено, что электроны каждой группы, вылетающие из общей точки фотокаатода, покидают его с разбросом по времени не более чем несколько пикосекунд.

В этой серии экспериментов учеными ИАЭ еще раз было доказано, что для фотоэмиссионных изображений, характеризующихся на порядок меньшим разбросом начальных энергий фотоэлектронов по сравнению с изображениями от "темнового шума" фотокаатода, предельное физическое временное разрешение ПИМ-3, определяемое только хроматическими aberrациями первого порядка, должно быть не хуже 5-10 пс ($E < 60$ В/мм; $E = 2 \cdot 10^9$ см/с), а для "Пикохрона" ($E < 900$ В/мм; $E = 2 \cdot 10^{10}$ см/с) оно должно быть около одной пикосекунды или лучше!

В лазерных экспериментах, поставленных в 1972-1975 годы С.Д.Фанченко в лабораториях академика

duration of many-electron dark emission was equal to several tens of picoseconds. Thus, in November 1960 S.D.Fanchenko relying upon the results of his experiments with UMI-95V drew the conclusion "on the practical capability to reduce the time resolution of electron-optical chronography to several units of 10^{-13} s".

Conceptually new situation for testing and improvement of pico-femtosecond IITs occurred at the second half of 60s when IITs revealed their unique recording capabilities in laser experiments and experiments with laser controlled thermonuclear fusion (CTF). In these experiments the practical capability to implement the time resolution better than 10 ps was specifically in demand. After the occurrence of the first lasers with mode locking the real need in the cameras based on IIT with the time resolution of the order of one or even fractions of picosecond arose. And Y.K. Zavoisky with colleagues made the significant contribution into the solution of this task. In the creative cooperation with M.M. Butslav, B.M. Stepanov and other colleagues from the All-Union Research Institute of Opticophysical Measurements [27] Yevgeny Konstantinovich focused the efforts of his team on the significant modernization of UMI-95V using the resonance super-high frequency (SHF) scanning with continuous action operating on the wave length of 3 cm [28-29]. In this new time-analyzing IIT designed in 1970 and called "Picochrone" electrons got into the deflecting system through the inlet port with the diameter of 2.5 mm. Deflection was accomplished by the electrical SHF-field in the area of "slit" of two mutually perpendicular resonators. Both resonators having the type "slit-opening" were tuned in the same frequency equal to 10 GHz. For the accurate adjustment the plunger was provided in one of the resonators. Excitation of every resonator was accomplished through the coupling loop of coaxial input the outward end of which was the element of waveguide-to-coaxial adapter. Upon the scanning of the image of continuously luminous point it was possible to give the shape of circle, ellipse or straight line to the scan easily by changing the phase shift using the phase shifter.

One of the first experiments of the scientific team under the supervision of Y.K. Zavoisky using the Picochrone consisted in the scanning of pulses of many-electron component of



Н.Г.Басова с участием П.Г.Крюкова и его сотрудников [30–32], "Пикохрон" работал в режиме трохоидальной развертки: с помощью резонаторной СВЧ-отклоняющей системы фотоэлектронные изображения непрерывно развертывались по эллипсу, а при лазерном поджиге разрядника происходило однократное линейное отклонение изображений с помощью дополнительной пары пластин, размещенных в "Пикохроне". Максимальная скорость развертки на экране ЭОП равнялась $(4-6) \cdot 10^{10}$ см/с, что в принципе обеспечивало достижение технического временного разрешения лучше $5 \cdot 10^{-13}$ с. При таком высоком временном разрешении полный цикл развертки составлял 50–100 нс, что позволяло регистрировать несколько аксиальных периодов излучения неодимового лазера с самосинхронизацией мод. Период развертки был в точности привязан к частоте 3 см (частоте магнетрона), а требования к нестабильностям срабатывания импульсных схем управления снизились до 10^{-8} с. Изображение появлялось с одного края экрана, прочерчивало трохоиду и уходило за пределы поля зрения с противоположной стороны.

Система повторной (многоканальной) регистрации была основана на том, что излучение лазера перед попаданием на фотокатод ЭОП пропусклось

dark emission of entrance silver-oxygen-cesium photocathode. It is known that upon the absence of photocathode illumination the electrons of "dark noise" go out of it; this dark noise consists of two components - single-electron and many-electron components. Single-electron component (10^2-10^3 electrons cm^2/s) can be explained by the mechanism of thermionic emission from photocathode and described by the standard Richardson equation. Apparently, many-electron pulses (10^4-10^5 electrons cm^2/s) occur as a result of entering of the ion (for example, cesium ion) accelerated by electric field to photocathode. Pulses have the considerable statistical dispersion by the number of electrons in individual pack (5 to 15). Under the conditions of continuous elliptical scan of pulses of many-electron dark emission on Picochrone [28] it was experimentally proved that the electrons of every group outgoing from the common photocathode point leave it with the time spread of not more than several picoseconds.

In these series of experiments the scientists of the Atomic Energy Institute (AEI) proved one more time that for the photo-emission



через два параллельных друг другу полупрозрачных зеркала, расстояние между которыми могло меняться. Объектив фокусировал все пучки в одну точку входного фотокатода "Пикохрона", давая на экране диаметр пятна $\sim 0,2$ мм. Методика повторной регистрации обеспечивала учет собственных аппаратных эффектов, позволяла легче попасть в линейную область динамического диапазона регистрации, и при изменении расстояния между зеркалами позволяла определить направление развертки. Подводя итоги экспериментов по использованию "Пикохрона" для измерения временной структуры излучения неодимового лазера на силикатном стекле в режиме самосинхронизации мод, можно констатировать, что минимально зарегистрированная длительность одиночных лазерных пачек оказалась равной 1,7 пс.

Следует отметить, что на ЭОПах с ускоряющей сеткой вблизи фотокатода, разработанных во ВНИИОФИ по заказу ФИАН в начале семидесятых, напряженность электрического поля была повышена более чем на два порядка величины по сравнению с ПИМ-3. Впервые субпикосекундное временное разрешение, составившее 0,7 пс, было достигнуто в 1976 году группой исследователей ФИАН, руководимой А.М. Прохоровым, на трубке УМИ-93М, разработанной и изготовленной во ВНИИОФИ Г.И. Брюхневичем, Б.М. Степановым [33] в режиме линейной (щелевой) развертки при регистрации синусоидально-модулированного излучения с периодом 1,4 пс и глубиной модуляции $>10\%$ на длине волны 1060 нм. При этом скорость щелевой развертки достигала $5,5 \cdot 10^{10}$ см/с, а напряженность электрического поля у фотокатода была ≥ 3 кВ/мм. Основным элементом камеры являлся лазерный искровой разрядник, формировавший прямоугольный импульс с субнаносекундными фронтами и амплитудой до 20 кВ. Коэффициент усиления по яркости ЭОП надежно обеспечивал режим регистрации каждого фотоэлектрона, покидающего входной фотокатод. Использовался кислородно-серебряно-цезиевый фотокатод с поверхностным сопротивлением ≤ 10 Ом/□ и спектральной чувствительностью, простирающейся до 1,5 мкм. Особенности экспериментов с времяанализирующими ЭОП, проводимыми в ФИАН, состояла в развертке изображений, ограниченных узкой щелью, вдоль которой (в отличие от "Пикохрона") могло укладываться одновременно много десятков пространственно-разрешенных каналов.

Итак, в полном согласии с предсказаниями Е.К. Завойского, временное разрешение ЭОП в диапазоне от десятка до долей пикосекунды было надежно освоено к концу 1970-х годов как у нас в стране, так и за рубежом.

images, characterized by the spread of initial photoelectron energy with the value which is smaller by an order in comparison with the images from "dark noise" photocathode, the limit physical time resolution of PIM-3, estimated by the chromatic aberrations of the first order only, should not be worse than 5-10 picoseconds ($E < 60$ V/mm; $E = 2 \cdot 10^9$ cm/s) and for Picochrone ($E < 900$ V/mm; $E = 2 \cdot 10^{10}$ cm/s) it should be about one picosecond or better!

In the laser experiments carried out in 1972-1975 by S.D. Fanchenko in the laboratories of the Academician N.G. Basov with the participation of P.G. Kryukov and his colleagues [30-32], "Picochrone" operated in the mode of trochoidal scan: with the help of resonator SHF-deflecting system the photoelectron images continuously scanned over the ellipse and upon the laser ignition of switching tube the single linear deflection of images occurred with the help of additional pair of plates located in Picochrone. The maximum scan speed on IIT screen was equal to $(4-6) \cdot 10^{10}$ cm/s which basically provided the achievement of technical time resolution with the value better than $5 \cdot 10^{-13}$ s. With such high time resolution the complete scan cycle was 50-100 ns which made it possible to record several axial periods of radiation of neodymium laser with self-mode locking. Scan period was precisely attached to the frequency of 3 cm magnetron and the requirements to instabilities of response of pulse control circuits reduced to 10^{-8} s. The image occurred from one edge of the screen, drew the trochoid and left outside the field of vision from the opposite side.

The system of repeated (multi-channel) registration was based on the fact that laser radiation before entering the IIT photocathode passed through two parallel semi-reflecting mirrors the distance between which could change. The lens focused all beams into one point of Picochrone entrance photocathode giving the spot diameter of ~ 0.2 mm on the screen. The method of repeated registration ensured the record of native instrumental effects, allowed easier access to the linear area of dynamic registration range and upon change of the distance between mirrors made it possible to determine the scanning direction. Resuming the experiments on "Picochrone" use for the measurement of time structure of neodymium laser radiation on silicate glass under the conditions of self-mode locking, we can state



СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПИКО-ФЕМТО-АТТОСЕКУНДНОЙ ФОТОЭЛЕКТРОНИКИ

Приоритет отечественной науки в области пико-фемтосекундной электронно-оптической фотографии подтверждался в многочисленных российских докладах, представленных на всех международных конгрессах по формированию изображений БПП и фотонике: Япония (2000 г.), Франция (2002), США (2004), Китай (2006), Австралия (2008), Япония (2010), Южная Африка (2012). Упомянем здесь лишь некоторые, на наш взгляд важные, результаты, полученные в ИОФ РАН:

- разработка, изготовление и испытание фемтосекундного ЭОП типа ПВ-ФС-М с импульсным питанием промежутка фотокатод-сетка;
- создание пико-фемтосекундной фотоэлектронной пушки, предназначенной для экспериментов по изучению вещества на атомно-молекулярном уровне методами дифракции электронов;
- завершение концепции построения тиражируемой щелевой (стрик) камеры, обеспечивающей максимальное временное разрешение не хуже 200 фс.

Новую тенденцию в развитии пико-фемтосекундной фотоэлектроники обозначили работы

that the minimal recorded duration of single laser spikes turned out to be equal to 1.7 ps.

It should be noted that using the IIT with accelerating grid near photocathode developed in the All-Union Research Institute of Opticophysical Measurements under the order of the Lebedev Physical Institute of the Academy of Sciences in the early 70s the electric field intensity was increased by more than two orders of magnitude in comparison with PIM-3. For the first time, sub-picosecond time resolution equal to 0.7 ps was achieved in 1976 by the group of researchers from the Lebedev Physical Institute of the Academy of Sciences under the supervision of A.M. Prokhorov using the tube UMI-93M developed and produced in the All-Russian Research Institute of Opticophysical Measurements by G.I. Bryukhnevich, B.M. Stepanov [33] under the conditions of linear (slit-type) scanning upon the registration of sinusoidally modulated radiation with the period of 1.4 ps and modulation depth of >10% at the wave length of 10^{60} nm. The speed of slit scanning reached $5.5 \cdot 10^{10}$ cm/s and electric field intensity near photocathode was ≥ 3 kV/mm. The main element of camera was the laser spark gap which formed the rectangular



по формированию пучков электронов фемто- и даже аттосекундной длительности в квазистационарных фокусирующих полях (см. рисунок). Об этих работах, поставленных в ИОФ РАН, было заявлено в 2002 году на XXV международном конгрессе по высокоскоростной фотографии и фотонике во Франции. Принципиальный вклад в идею использования квазистационарных фокусирующих полей внес М.А.Монастырский [36]. В отделе фотоэлектроники ИОФ РАН были разработаны и испытаны экспериментальные образцы пико-фемтосекундной электронной пушки. Показательный эксперимент, проведенный на макете фотоэлектронной пушки, подтвердил возможность 25-кратного сжатия исходного фотоэлектронного пучка 7-пс длительности вплоть до 285 фмс.

Итак, усилиями школы академика Е.К.Завойского более шестидесяти лет тому назад был заложен фундамент нового раздела технической физики – пико-фемто-аттосекундной фотоэлектроники. Это направление живо и по сей день, активно развивается, в первую очередь усилиями российской академической науки, вносит ценный вклад в сокровищницу человеческих знаний о физике и приближает нас к познанию быстропротекающих процессов, происходящих за все более и более короткие временные интервалы [37].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Когда-то А.М.Прохоров, отвечая на вопрос, кого бы из российских ученых он считал возможным выдвинуть на Нобелевскую премию, дал четкий и однозначный ответ: "Академика Е.К.Завойского за ЭПР". За прошедшие годы физические принципы пико-фемтосекундной хронографии, сформулированные Е.К.Завойским, не только остались незабываемыми, но и получили дальнейшее развитие и широкое применение. На их базе были получены важные результаты в фундаментальных исследованиях, например, экспериментальные подтверждения явления самофокусировки путем наблюдения на ЭОП движущихся фокусов в нелинейных оптических средах); в промышленности – диагностика двигателей внутреннего сгорания; в экологии – лазерные лидары, медицине и биологии – фемтосекундные томографы; в сферах, обеспечивающих безопасность страны и борьбу с терроризмом – диагностика атомных реакторов, исследования в области аэродинамики и теории взрывов, газоанализ наркотических и взрывчатых веществ; в космических исследованиях – прецезионные измерения искусственных объектов – "маяки", "звезды" и т.п.

pulse with sub-nanosecond fronts and amplitude up to 20 kV. Amplification coefficient by IIT brightness reliably ensured conditions for the registration of every photoelectron leaving the entrance photocathode. Oxygen-silver-cesium photocathode with the surface resistance of $\leq 10 \Omega/\square$ and spectral sensitivity extending to $1.5 \mu\text{m}$ was used. The peculiarities of the experiments with time-analyzing IITs carried out in the Lebedev Physical Institute of the Academy of Sciences consisted in the scanning of the images restricted by the narrow slit along which (as opposed to "Picochrone") many tens of spatially-resolved channels could be inserted simultaneously.

Thus, in the total agreement with the forecasts of Y.K. Zavoisky the time resolution of IIT within the range from ten to fractions of picosecond was reliably mastered by the end of 70s in our country as well as abroad.

MODERN STATE AND DEVELOPMENT TRENDS OF PICO-FEMTO-ATTOSECOND PHOTOELECTRONICS

Priority of the national science in the area of pico-femtosecond electron-optical photography was proved in many Russian reports presented at all International Congresses on the formation of BPP images and photonics: Japan (2000), France (2002), USA (2004), China (2006), Australia (2008), Japan (2010), South Africa (2012). We will mention just some results obtained in the Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences which are important from our point of view:

- development, production and testing of femtosecond IIT of the type PV-FS-M with pulse power supply of the period photocathode-grid;
- creation of pico-femtosecond photoelectron gun intended for the experiments on the study of substances at atomic-molecular level using the methods of electron diffraction;
- completion of the concept of construction of slit (streak) camera providing the maximum time resolution not worse than 200 fs.

The new development trend of pico-femtosecond photoelectronics was indicated by the works on the formation of electron beams with femto- and even attosecond duration in quasi-stationary focusing fields (see Fig.). These works carried out in the Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences



В 2007 году по случаю 25-летия создания Института общей физики им. А.М.Прохорова был проведен конкурс научных работ. Наибольшее количество голосов получила работа под названием "Создание фемтосекундной фотоэлектронной пушки с нестационарным фокусирующим полем (теория, практическая реализация, эксперимент)". Суть этой работы состояла в том, что в традиционный времяанализирующий ЭОП была введена дополнительная фокусирующая линза, обеспечивающая динамическую компрессию фотоэлектронных пучков под действием нестационарных электрических полей. Был рассчитан, смоделирован и изготовлен экспериментальный образец такой пушки, на которой исходный 7-пс фотоэлектронный пучок был сжат почти в 25 раз. В этой работе показано, что теоретический предел временного разрешения электронно-оптической хронографии, установленный около 10 фемтосекунд, может быть превзойден на один-три порядка величины (вплоть до сотен и даже десятков аттосекунд) за счет временной фокусировки фотоэлектронных пучков в специально выбранных нестационарных электромагнитных полях. И эти аттосекунды не противоречат, а еще раз подтверждают воззрения школы

were represented at XXV International Congress on High-Speed Photography and Photonics in France in 2002. The considerable contribution into the idea of use of quasi-stationary focusing fields was made by M.A.Monastyrsky [36]. In the Department of Photoelectronics of the Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences the experimental samples of picofemtosecond electron gun were developed and tested. Representative experiment carried out on the prototype of photoelectron gun confirmed the capability of 25-fold compression of initial photoelectron beam of 7 ps with the duration up to 285 fms.

Thus, by the efforts of the school of the Academician Y.K. Zavoisky more than sixty years ago the fundament for the new chapter of technical physics - pico-femto-attosecond photoelectronics was laid. This school has been existing up to the present day; it is actively developing, first of all due to the efforts of the Russian academic science, making valuable contribution into the treasury of human knowledge in physics and bringing closer to the knowledge of fast processes occurring within progressively shorter time intervals [37].



Е.К.Завойского о физическом временном разрешении информационного тракта: де-бройлевская длина волны электронов с энергией 20–30 кэВ составляет менее 10^{-2} нм, что в пределе обеспечивает передачу информации с субаттосекундным временным разрешением (10^{-19} – 10^{-20} с).

В заключение еще раз хотелось бы подчеркнуть тот факт, что Евгений Константинович был не только выдающимся ученым, но и талантливым воспитателем истинно увлеченных и преданных делу ученых и специалистов. Они и сегодня с завидным постоянством, преодолевая технические и экономические преграды, делают все для того, чтобы приблизить то время, когда фотографирование быстропротекающих процессов с пико-фемтосекундным (а впоследствии и с аттосекундным) временным разрешением станет обыденной и недорогой процедурой в экспериментальной практике.

Автор выражает сердечную благодарность за полезные обсуждения, замечания и помощь при подготовке рукописи к печати своим товарищам и коллегам Н.Е.Завойской, Г.И. Брюхневичу, Н.С.Воробьеву, В.В.Коробкину, Е.А. Кузьменко, А.А.Маненкову, В.А.Скорюпину, А.В.Смирнову, В.К.Чукбару.

ЛИТЕРАТУРА

23. Ефимов В.М., Искольдский А.М., Нестерихин Ю.Е. Электронно-оптическая фотосъемка в физическом эксперименте. – М.: Наука, 1978.
24. Пергамент М.И. и др. В сб.: Диагностика плазмы. Вып. 1/под ред. Б.П. Константинова. – М.: Наука, 1963.
25. Брюханов А.С. и др. – ПТЭ. 1967. № 3. С. 214; В сб.: "Диагностика плазмы. Вып. 3/ под ред. С.Ю. Лукьянова. – М.: Наука, 1973.
26. Фанченко С.Д. – ПТЭ, 1961, №1, с. 5.
27. Иванов В.С. и др. Электронно-оптическое приборостроение во ВНИИОФИ за 40 лет. В сб. "Оптико-электронные измерения", – М.: Наука, 2005.
28. Бутслов М.М., Демидов Б.А. и др. – ДАН СССР, 1973, т.209, №5, с.1060.
29. Бутслов М.М., Фанченко С.Д., Чикин Р.В. "Пикохрон". – ПТЭ, 1973, № 5, с. 202; Proc. Xth Intern. Congr. on HSP, Nice, France, 1972, p. 137.
30. Фанченко С.Д., Фролов В.А. – Письма в ЖЭТФ, 1972, т. 16, вып. 3, с.147.
31. Басов Н.Г., Бутслов М.М. – ЖЭТФ, 1973, т. 65, с. 907

CONCLUSION

Once, A.M. Prokhorov, answering the question about which Russian scientists he considered to be worthy of nomination for Nobel Prize, gave clear and unambiguous answer: "Academician Y.K. Zavoisky for IIT". Over the last years the physical principles of pico-femtosecond chronography formulated by Y.K. Zavoisky have remained unshakeable and received the further development and widespread application. On their basis important results were obtained in the fundamental studies: experimental evidence of self-focusing phenomenon by the observation of moving focuses in nonlinear optical media using IIT); in industry (diagnostics of internal combustion engines); in ecology (laser lidars), medicine and biology (femtosecond tomographs); in the areas providing the national security and control of terrorism (diagnostics of nuclear reactors, studies in the area of aero-hydrodynamics and explosion theory, gas analysis of narcotic and explosive substances), space research (precision measurements of artificial objects – "beacons", "stars" etc.).

In 2007 on the occasion of 25th anniversary of the establishment of the Prokhorov General Physics Institute the contest of scientific papers was carried out. The paper called "Design of Femtosecond Photoelectron Gun with Non-Stationary Focusing Field (Theory, Practical Implementation, Experiment)" received the most of votes. The main point of this paper was that additional focusing lens ensuring the dynamic compression of photoelectron beams under the action of non-stationary electric fields was introduced into the traditional time-analyzing IIT. The experimental prototype of such gun was estimated, simulated and designed; its initial 7 ps photoelectron beam was compressed by almost 25 times. In this paper it was shown that the theoretical limit of time resolution of electron-optical chronography estimated at about 10 femtoseconds can be surpassed by one-three orders of magnitude (up to hundreds and even tens of attoseconds) at the expense of time focusing of photoelectron beams in the special selected non-stationary electromagnetic fields. And these attoseconds do not contradict but prove again the views of the school of Y.K. Zavoisky on the physical time resolution of data path: de Broglie wave

32. Гордеев Е.М., Крюков П.Г., Матвеец Ю.А. и др. – Квантовая электроника, 1975, т. 2, № 1, с. 205; Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 1, с. 211.
33. Брюхневич Г.И. и др. – Письма в ЖТФ, 1976, т. 2, с. 1009.
34. Щелев М.Я. – УФН, 2000 Т. 170, № 9 с. 1002; Квантовая электроника, 2001, т. 31, № 6, с. 477; Proc. of the XXVth ICHSPP, SPIE, 2003, v. 4948, p. 9; Квантовая электроника, 2003, т. 33, № 7, с. 609; Квантовая электроника, 2007, т. 37, № 10, с. 927; Энциклопедия высокотемпературной плазмы/Под ред. В.Е. Фортов. т. V-I, серия Б, с. 146-152 – М.: Наука, 2006; – УФН, 2012, т. 182, № 6, с. 649-656.
35. Прохоров А.М. и др. – Квантовая электроника, 2002, т. 32, № 4, с. 283.
36. Monastyrsky M.A., et al. Proc. of the XXVth ICHSPP, Beaune, France, SPIE. 2002. V. 4948. P. 305.; Proc. SPIE, 2009, v. 7126, p. 7126 OD.
37. Fanchenko S.D., Schelev M.Ya. – Proc. of the XXIIIth ICHSPP, Moscow, 1998, Proc. SPIE, v. 3516. p. 426.

length of electrons with the energy of 20-30 keV is less than 10^{-2} nm which ensures the information transmission with sub-attosecond time resolution (10^{-19} - 10^{-20} s) at the extreme.

In conclusion one more time we would like to emphasize the fact that Yevgeny Konstantinovich was not only distinguished scientist but talented teacher of truly infatuated and committed scientists and specialists as well. Even today with enviable constancy, overcoming the technical and economical obstacles they make every effort in order to bring closer the time when the photography of fast processes with pico-femtosecond (and subsequently attosecond) time resolution will become ordinary and inexpensive procedure in experimental practice.

Author expresses heartfelt gratitude to his fellows and colleagues for the useful discussions, commentaries and assistance when preparing the manuscript for printing: N.Y. Zavoiskaya, G.I. Bryukhnevich, N.S. Vorobyev, V.V. Korobkin, Y.A. Kuzmenko, A.A. Manenkov, V.A. Skoryupin, A.V. Smirnov, V.K. Chukbar.

ЛАЗЕРЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛАЗМЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ

Мировая промышленная индустрия проявляет усиленный интерес к мощным твердотельным лазерам, ведь по рабочим характеристикам они наиболее подходят к обработке хрупких материалов, маркировке, отжигу, очистке и к другим приложениям. Лазерная компания Powerlase Photonics Ltd известна своими инновационными разработками, внедренными в производство высокомоощных фемто-, пико- и наносекундных твердотельных лазеров с диодной накачкой. Особым спросом лазеры компании Powerlase Photonics пользуются в технологических процессах изготовления плоских дисплеев, в фотовольтаике, микроэлектронике, особенно в области глубокого УФ (EUV), продуктов для автомобильного и аэрокосмического рынков. Популярность лазерам компании обеспечивают разработанные технологии для обработки хрупких стеклообразных материалов. В основе технологий лежит почти пятнадцатилетний опыт исследовательских работ.

При изготовлении плоских дисплеев (Flat Panel Displays – FPDs) с помощью литографических методов с использованием влажного травления именно стоимость литографических

технологий вносит существенный вклад в производственные затраты.

Учитывая ценовое давление на все FPD-рынки мира, где сильна конкурентная борьба, инновационные компании занялись поиском альтернативных экономически выгодных методов выпуска FPD. Одним из таких методов стало использование лазеров в обработке тонких пленок на стекле, обычно это прозрачные оксидные пленки Transparent Conducting Oxides (TCOs). И хотя эти исследования были начаты уже давно, лишь с развитием лазеров с различной длительностью импульса и длиной волны короткоимпульсные лазеры стали столь популярны, чтобы заменить собой мокрое травление.

В операциях удаления ITO-тонких пленок со стекла используются твердотельные лазеры с модуляцией добротности с диодной накачкой с излучением на длине волны 1064 нм. Лазеры особенно подходят для производства плазменных панелей. Потому что их использование позволяет получать необходимые структуры пикселей с ITO-покрытием из стекла с размерами порядка 100–1000 мкм с позиционной точностью 5 мкм.



На недавней выставке Lasys-2014 компания продемонстрировала линейку продуктов для обработки стекол и тонких пленок. Среди них лазеры серии Rigel для скрайбирования фотовольтаических панелей и обработки хрупких материалов (M^2 от 20 до 30 в зависимости от модели) и лазеры серии POLARIS с высоким качеством луча ($M^2 < 1,5$). Лазеры обеих серий идеально подходят для больших объемов промышленного применения. Лазеры серии POLARIS предназначены для предприятий, которые в своем производстве используют широкий набор разнообразных хрупких и композитных материалов, таких как стекло, сапфир, керамика, полупроводники.

www.powerlase-photonics.com