



## ПЕРВООТКРЫВАТЕЛЬ ПИКОСЕКУНДНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ХРОНОГРАФИИ. ЧАСТЬ I

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

Закономерности пико-фемто-аттосекундной фотоэлектроники лежат в основе техники экспериментов по фотобиологии, изучению состояния плазмы, фазовых переходов в различных средах, измерению излучающих характеристик поверхностей, исследованию взаимодействия лазерного излучения с веществом. Основу этого направления технической физики составляют работы академика Е.К.Завойского и его научной школы. В статье излагаются сформулированные Е.К.Завойским фундаментальные принципы формирования фотоэлектронных изображений в пико-фемтосекундных электронно-оптических преобразователях (ЭОП). Приводятся результаты экспериментов, в которых впервые в мире было достигнуто временное разрешение в единицы пикосекунд. Анализируется современное состояние и прослеживаются тенденции развития сверхскоростной фотоэлектроники.

Сегодня многие помнят, что электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) в сороковые годы прошлого столетия открыл академик Е.К.Завойский [1-3]. Однако лишь немногие знают, что Евгений Константинович был основоположником по крайней мере еще одного нового направления технической физики – электронно-оптической фотохронографии с пико-фемтосекундным временным разрешением.

После своего удивительно творческого периода жизни в Казанском государственном университете (1931-1947 годы) Евгений Константинович прошел краткую стажировку у академика П.Л.Капицы (в 1945 году) в Москве в Институте физических проблем АН СССР. Там он с успехом подтвердил результаты своих опытов по ЭПР и 30 января 1945 года в ФИАНе защитил докторскую диссертацию. Вскоре после этих событий И.В.Курчатов пригласил его в КБ-11 (Арзамас-16). За работы, проведенные в эти годы

## DISCOVERER OF PICOSECOND ELECTRON-OPTICAL CHRONOGRAPHY

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

Regularities of pico-femto-attosecond photoelectronics are fundamental for the experimental technique in photobiology, study of plasma state, phase transitions in different media, measurement of the surface radiation characteristics, analysis of the interaction between laser radiation and material. Papers of the Academician Y.K. Zavoisky and his scientific school form the basis of this school of applied physics. Fundamental principles concerning the formation of photoelectron images in pico-femtosecond image intensifier tubes (IITs), which were formulated by Y.K. Zavoisky, are set forth in the article. Results of the experiments during which the time resolution with the value of units of picoseconds was reached are specified here. The current state is analyzed and trends of the advancement of ultrahigh-speed photoelectronics are traced back.

Nowadays, many people remember that electron paramagnetic resonance (EPR) was discovered by the Academician Y.K. Zavoisky in the forties of the last century [1-3]. However, not many people know that Yevgeny Konstantinovich was the founder of minimum one more new school of applied physics – electron-optical photochronography with pico-femtosecond time resolution.

After his wonderful constructive period of life at the Kazan State University (1931-1947) Yevgeny Konstantinovich worked as the trainee of the Academician P.L. Kapitsa (in 1945) at the Institute for Physical Problems in Moscow for a short period of time. There he successfully confirmed the results of his experiments on EPR and defended doctoral dissertation at the Physical Institute of the Academy of Sciences on the 30th of January, 1945. Soon after these events, I.V. Kurchatov



(1947–1951), Евгений Константинович был удостоен Сталинской премии и награжден орденом Ленина "За разработку электромагнитных методов регистрации быстропротекающих процессов по исследованию центральной части заряда атомной бомбы" (1949). В 1951 году Е.К.Завойский был назначен начальником сектора №74 в Лаборатории измерительных приборов АН СССР (ЛИПАН) – Курчатовском институте. Там же в 50-е годы он с сотрудниками построил первую в стране люминесцентную камеру для регистрации треков ионизирующих излучений и создал искровые счетчики ионизирующих частиц с использованием многокаскадных ЭОПов, изготовленных М.М.Бутсловым и его сотрудниками. Впервые в мире были созданы ЭОПы, способные регистрировать отдельные кванты света и обеспечивать пикосекундное временное разрешение при изучении быстропротекающих процессов (БПП).

О первых уникальных экспериментах Завойского и его школы с помощью отечественных времяанализирующих ЭОПов, получивших наименование ПИМ-УМИ, и пойдет речь ниже.

### РОЖДЕНИЕ ПИКОСЕКУНДНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ХРОНОГРАФИИ

Когда в начале 30-х годов прошлого столетия были изобретены первые электронно-оптические преобразователи [4], никто и не думал использовать их в высокоскоростной фотографии с целью регистрации БПП. В том изобретении для улучшения наблюдения объектов в ночное время автор предлагал освещать их предварительно невидимым глазу ИК-излучением. Первые ЭОПы содержали фотокатод и люминесцентный экран, расположенные параллельно друг другу, и между ними прикладывалось ускоряющее напряжение. В однородном электрическом поле фотоэлектроны разлетались по параболическим траекториям, давая на экране размытое изображение объекта. В начале 40-х годов в работах Л.А.Арцимовича [5] в нашей стране, а также в исследованиях ученых Германии и США [6–8] опубликованы результаты о получении пространственного разрешения в ЭОПах величиной несколько десятков пар линий на миллиметр. Это было достигнуто за счет фокусирования изображения в ЭОПе электростатическими и магнитными линзами. К концу 40-х – началу 50-х годов относятся первые попытки подачи

invited him to the Design Engineering Bureau-11 (Arzamas-16) (1947–1951). Yevgeny Knostantinovich was awarded the Stalin Prize and the Order of Lenin "For the Development of Electromagnetic Methods of Registration of Fast Processes on the Study of Core Part of Nuclear Bomb Charge" (1949) for the works accomplished during these years. In 1951 Y.K. Zavoisky was appointed to the position of Head of the Sector No. 74 in the Laboratory of Measuring Instruments of the Academy of Sciences of the USSR (LIPAN) at the Kurchatov Institute. There, in 1950s together with his colleagues he constructed the first luminescence camera in the country for the registration of ionizing particle tracks and created the spark counters of ionizing particles using the multi-stage IITs which were designed by M.M. Butslav and his colleagues. IITs which could register individual light quanta and ensure picosecond time resolution during the study of fast processes (FPs) were designed for the first time in the world.

The first unique experiments of Y.K. Zavoisky and his school using the domestic time-analyzing IITs which were called PIM-UMI will be described below.

### BIRTH OF PICOSECOND ELECTRON-OPTICAL CHRONOGRAPHY

When the first image intensifier tubes were invented in the early 1930s [4] nobody thought that they could be used for the high-speed photography in order to register FPs. In order to improve the object observation during the night time the author suggested the prior illumination of that invention with invisible IR radiation. First IITs contained photocathode and luminescent screen located parallel to each other and accelerating potential was applied between them. In homogeneous electric field photoelectrons spread along the parabolic trajectories giving the blurred object image on the screen. In the early 1940s in the papers of L.A. Artsimovich [5] in our country and studies of German and US scientists [6–8] the results connected with the obtainment of spatial resolution in IITs with the value of tens of line pairs per millimeter were published. It was achieved at the expense of the image focusing in IIT by electrostatic and magnetic lens. The first efforts for the application of pulse voltage on accelerating electrodes of night vision IIT were made in the late 1940s – early 1950s with the further use of such IITs for the study of time characteristics of non-stationary light sources. At the State Optical



импульсного напряжения на ускоряющие электроды ЭОПа ночного видения с последующим использованием таких ЭОПов для изучения временных характеристик нестационарных источников света. В Государственном оптическом институте (ГОИ) М.П.Ванюков с сотрудниками реализовал экспозиции длительностью в доли микросекунды ( $4 \cdot 10^{-7}$  с) [9] на ЭОП ночного видения типа АЕГ (с электростатической фокусировкой фотоэлектронных изображений) путем включения их короткими импульсами напряжения. Дж. Коуртни-Пратт (Англия), прикладывая к подобным ЭОП переменное магнитное поле, достиг временного разрешения вплоть до долей наносекунды ( $2,8 \cdot 10^{-10}$  с) [10]. Однако настоящую революцию в разработке методов и средств электронно-оптической фотографии с пикосекундным временным разрешением совершил в 50-х годах академик Евгений Константинович Завойский с сотрудниками [11]. Работы проводились в Институте атомной энергии, яркую память о них оставил замечательный ученый Сергей Дмитриевич Фанченко [12].

Всецело идея отклонения изображения в ЭОП системой, подобной осциллографической, также принадлежит академику Е.К. Завойскому. Это его судьбоносное предложение заключалось в радикальной модернизации ЭОПа, тогда только что разработанного и созданного М.М. Бутсловым в 1949 году. Этот прибор, известный под названием ПИО-1 (преобразователь импульсный однокадровый), был предназначен для покадрового фотографирования БПП с электростатической фокусировкой. Суть предложения заключалась во введении в область кроссовера, габариты которого занимали в диаметре доли миллиметра, а в длину – несколько сантиметров, двух пар ориентированных одна относительно другой под  $90^\circ$  отклоняющих пластин осциллографического типа. Модернизированный прибор (ПИМ-3 – преобразователь импульсный многокадровый) представлял собой первый в мире времяанализирующий ЭОП [13]. Михаил Михайлович экспериментально продемонстрировал высокоскоростную покадровую съемку с предельной частотой до  $10^7$ – $10^8$  кадр/с и вполне удовлетворительным динамическим пространственным разрешением, достигавшим 15–20 пар лин./мм. Результат показал разрешение, всего лишь в два-три раза хуже разрешения, получаемого в статическом режиме. Зато уже в этих первых опытах скорость отклонения фотоэлектронных

Institute (SOI) M.P. Vaniukov with his colleagues implemented the exposures with the duration of fractions of microsecond ( $4 \cdot 10^{-7}$  s) [9] using the night vision IIT of AEG type (with electrostatic focusing of photoelectron images) by their activation with short voltage pulses. J. Courtney-Pratt (England) applying alternating magnetic field to the similar IITs achieved the time resolution up to the fractions of nanosecond ( $2.8 \cdot 10^{-10}$  s) [10]. However, the real revolution in the development of methods and devices for electron-optical photography with picosecond time resolution was accomplished by Yevgeny Konstantinovich Zavoisky with his colleagues in 1950s [11]. Works were performed at the Institute of Nuclear Power Engineering and great scientist Sergei Dmitrievich Fanchenko left bright memories about these works [12].

The idea of image deflection in IIT by the system which is similar to oscillographic system completely belongs to the Academician Y.K. Zavoisky too. This decisive suggestion consisted in the radical modernization of IIT which had just been developed and designed by M.M. Butslav at that time in 1949. This device known as PIO-1 (single-frame pulse converter) was intended for the frame-by-frame photography of FPs with electrostatic focusing. The main point of the suggestion consisted in the introduction of two pairs of oscillographic-type deflection plates oriented towards each other at  $90^\circ$  to the area of crossover which dimensions were: diameter – fractions of millimeter, length – several centimeters. Upgraded device (PIM-3 – multiframe pulse converter) represented the first time-analyzing IIT in the world [13]. Mikhail Mikhailovich demonstrated the high-speed frame-by-frame photography with the cutoff frequency up to  $10^7$ – $10^8$  frame/s and quite satisfactory dynamic spatial resolution reaching 15–20 line pair/mm experimentally. Result showed the resolution just by two-three times worse than the resolution obtained under the static conditions. But in these first experiments the rate of photoelectron image deflection on output screen ( $3 \cdot 10^7$  cm/s) exceeded the result achieved by Courtney-Pratt in his experiments with the magnetic deflection of photoelectron images. So this is how the principle of registration of FP individual phases at the expense of the deflection of photoelectron images in fast-changing electric fields was implemented experimentally for the first time in the world.

The second fundamental experiment initiated by Y.K. Zavoisky was carried out in 1952 by M.M. Butslav. The fact is that in the world practice IIT



изображений по выходному экрану ( $3 \cdot 10^7$  см/с) превышала результат, достигнутой Коуртни-Праттом в его опытах с магнитным отклонением фотоэлектронных изображений. Так впервые в мире был экспериментально реализован принцип фиксации отдельных фаз БПП за счет отклонения фотоэлектронных изображений в быстроменяющихся электрических полях.

Второй фундаментальный эксперимент, инициируемый Е.К.Завойским, был реализован в 1952 году М.М.Бутсловым. Дело в том, что в мировой практике использование ЭОП было ограничено низкой яркостью получаемых изображений. В тридцатые годы немецкий ученый Г.Холст запатентовал схему усиления яркости изображений за счет последовательного соединения нескольких однокаскадных ЭОП в бипланарной конфигурации. Однако реализовать ее на практике никто не мог. М.М.Бутслов, будучи великолепным технологом-вакуумщиком, сумел собрать в общем стеклянном баллоне несколько двухэлектродных ЭОП с магнитной фокусировкой изображения. Уникальность этого многокаскадного ЭОПа заключалась в том, что каждый последующий каскад отделялся от предыдущего вакуумно-прочной 10-мкм слюдой, на одну

use was restricted due to the low luminance of obtained images. In the thirties German scientist G. Holst patented the scheme of image luminance intensification at the expense of series connection of several single-stage IITs in biplanar configuration. However, nobody could implement it practically. M.M. Butslav, great technologist and vacuum expert, managed to collect several two-electrode IITs with magnetic image focusing in one glass bulb. Uniqueness of this multi-stage IIT consisted in the fact that every subsequent stage was separated from the previous one by the vacuum-tight 10-micron mica; luminescent screen of the previous stage was applied on one side of mica, and cesium-antimonide ( $\text{Cs}_3\text{Sb}$ ) photocathode of the following stage was formed on the other side of mica. Coefficient of luminance intensification of one such stage was 20-30. Connecting five-six stages sequentially it was possible to implement the total intensification of image luminance by  $10^5$ - $10^8$  times. And depending on the required coefficient of luminance intensification it was possible to choose either single-stage IIT with the magnetic focusing of photoelectron images (of M9 type) or IIT containing up to six single intensifying chambers connected to each other in one glass encapsulation [14].





сторону которой наносился люминесцентный экран предыдущего, а на другой – формировался сурьмяно-цезиевый ( $Cs_3Sb$ ) фотокатод последующего каскада. Коэффициент усиления по яркости одного такого каскада составлял 20–30. Соединяя последовательно до пяти-шести каскадов, можно было реализовать суммарное усиление яркости изображений в  $10^5$ – $10^8$  раз. При этом в зависимости от требуемого коэффициента усиления по яркости можно было выбирать либо однокамерный ЭОП с магнитной фокусировкой фотоэлектронных изображений (типа М9), либо ЭОП, содержащий в единой стеклянной оболочке до шести сочлененных друг с другом одиночных усилительных камер [14].

В один из счастливых дней 1953 года Е.К.Завойский с сотрудниками испытали первый в мире шестикаскадный усилитель яркости – прибор типа УМ-95, изготовленный М.М.Бутсловым с сотрудниками. Приборы подобного типа так никогда и нигде в мире не были воспроизведены. Новый усилитель позволил наблюдать на экране изображение отдельных электронов. Вспоминая этот эксперимент, С.Д.Фанченко подчеркивал их научную значимость: был достигнут фундаментальный предел усиления по яркости – дальнейшее повышение коэффициента усиления уже не приводило к увеличению числа электронов в регистрируемом изображении и, следовательно, не давало никакой дополнительной информации, кроме увеличения уровня электронного шума.

В дальнейшем Е.К.Завойский, будучи в течение нескольких лет единственным в мире обладателем усилителей яркости изображений с предельным коэффициентом усиления, сумел внедрить многокамерные ЭОПы в науку, технику и медицину. Большим энтузиастом в использовании многокаскадных ЭОПов в астрономических исследованиях стала профессор В.В.Прокофьева – сотрудница Крымской астрономической обсерватории [15].

Широта кругозора стремительно вела Евгения Константиновича к обоснованию физических принципов пико-фемтосекундной электронно-оптической хронографии. Свой доклад на семинаре в Курчатовском институте в 1953 году Е.К.Завойский закончил словами: "Я пока не уверен, но похоже, что ЭОПы типа ПИМ-3 в состоянии реализовать временное разрешение короче, чем 10 нс, полученное в режиме покадровой съемки. Фокусировка изображения в нем – очень острая: размер изображения

On one significant day in 1953 Y.K. Savoisky and his colleagues tested the first six-stage luminance intensifier in the world – UM-95 type device designed by M.M. Butslav and his colleagues [15]. Since then, similar devices have never been reproduced in any other place of the world. New intensifier allowed observing the image of individual electrons on the screen. Remembering this experiment, S.D. Fanchenko emphasized its scientific significance: fundamental limit of luminance intensification was achieved – further increase of intensification coefficient did not result in the increase of electron number in the registered image and therefore did not give any additional information except for the increase of electron noise level.

Afterwards, Y.K. Zavoisky, who has been the only possessor of image intensifiers with the marginal coefficient of intensification in the world for many years, managed to implement multi-stage IITs in science, engineering and medicine. Professor V.V. Prokofieva, worker of the Crimean Astronomical Observatory, was great enthusiast with the respect to the use of multi-stage IITs in astronomical research.

Open-mindedness rapidly led Yevgeny Konstantinovich to the explanation of the physical principles of pico-femtosecond electron-optical chronography. Y.K. Zavoisky finished his report on the seminar at the Kurchatov Institute in 1953 with the words: "I am not sure yet but it seems like IITs of PIM-3 type are capable to accomplish the time resolution shorter than 10 ns obtained under the conditions of frame-by-frame photography. Image focusing in it is very sharp – size of the image from perfect point source is 3-5  $\mu m$ . As far as I know, there is no good theory on IIT. However, in accordance with the Fermat's principle upon the focusing of point source radiation into the point image every elementary wave arrives to the image point without phase distortions. Therefore, basically obtainment of the perfect stigmatic image enables to transmit the infinitely-short signal. I invite all of you, my listeners, to solve this problem in my sector".

In order to organize the next decisive experiment Yevgeny Konstantinovich instructed M.M. Butslav to attach the time-analysing IIT PIM-3 to the luminance intensifier UM-94. This is how the legendary time-analyzing IITs of UMI series, representing the combination of PIM-3 and intensifying stages M-9, were designed for the first time in the world and then started to be produced in our country [16-17].



от идеального точечного источника составляет 3–5 мкм. Насколько мне известно, хорошей теории по ЭОП – нет. Однако, в соответствии с принципом Ферма, при фокусировке излучения точечного источника в точечное изображение каждая элементарная волна приходит в точку изображения без фазовых искажений. Поэтому, в принципе, получение идеального стигматического изображения дает возможность передать бесконечно короткий сигнал. Я приглашаю всех вас, моих слушателей, заняться решением этой проблемы в моем секторе".

Для постановки следующего решающего эксперимента Евгений Константинович поручил М.М.Бутслову пристыковать времяанализирующий ЭОП ПИМ-3 к усилителю яркости УМ-94. Так впервые в мире были созданы, а затем и начали выпускаться в нашей стране легендарные времяанализирующие ЭОПы серии УМИ, представляющие комбинацию ПИМ-3 с усилительными каскадами М-9 [16–17].

Вскоре Сергей Дмитриевич Фанченко получил от М.М.Бутслова шестикамерный ЭОП УМИ-95 и пристыковал 300-МГц, 100-Вт непрерывный генератор к его ПИМ-овской части. Два выхода генератора через 75-Ом коаксиальные

Shortly, Sergei Dmitrievich Fanchenko received from M.M. Butslav six-chamber IIT UMI-95 and attached 300 MHz 100 W continuous generator to its PIM part. Two outputs of the generator were connected to the deflection plates of PIM-3 through 75 Ohm coaxial cables. Resonant circuit was assembled on the output terminals of each of two pairs. With its help it was possible to introduce the phase shift between two sinusoidal signals fed to every pair of plates. As result of this shift, there was opportunity to observe either circular scan (phase shift  $\pi/2$ ) or Lissajous figures on IIT screen. When the scan speed was  $(2-3) \cdot 10^9$  cm/s and spot had the size of  $(1-2) \cdot 10^{-2}$  cm the technical time resolution was limited to the value of 2-5 ps.

In order to carry out the dynamic tests with UMI-95 it was necessary to find the proper light source generating the radiation pulses with the duration which was less than the technical time resolution or shorter than 2-5 ps. It should be taken into account that then in 1953 lasers have not existed yet. Researchers had to use the glow of small spark dischargers in nitrogen occurring at high pressure. Duration of such spark discharge was intentionally shorter than the period of elliptical scan (3 ns). Densitogram of the spark



кабели были подсоединены к отклоняющим пластинам ПИМ-3. На выходных клеммах каждой из двух пар отклоняющих пластин был собран резонансный контур. С его помощью можно было вводить фазовый сдвиг между двумя синусоидальными сигналами, подаваемыми на каждую пару пластин. В результате этого сдвига появилась возможность наблюдать на экране ЭОПа либо круговую развертку (фазовый сдвиг  $\pi/2$ ), либо фигуры Лиссажу. При скорости развертки  $(2-3) \cdot 10^9$  см/с и пятне размером  $(1-2) \cdot 10^{-2}$  см техническое временное разрешение было ограничено величиной 2-5 пс.

Для проведения динамических испытаний УМИ-95 оставалось найти только подходящий источник света, генерирующий импульсы излучения с длительностью, меньшей технического временного разрешения, то есть короче 2-5 пс. Надо иметь в виду, что тогда, в 1953 году, лазеров еще не существовало. Исследователям пришлось использовать свечение миниатюрных искровых разрядов в азоте, появляющихся при высоком давлении. Длительность такого искрового разряда была заведомо короче периода эллиптической развертки (3 нс). Денситограмма развертки свечения искры показала, что время разгорания искрового разряда длится менее десяти пикосекунд. Форма профиля интенсивности во времени от искры сильно отличалась от формы гауссовой кривой. Не существовало каких-либо других независимых источников света, чтобы измерить аппаратную функцию УМИ-95.

В то же время, фотометрические кривые позволяли различать изменения временного профиля интенсивности с точностью до нескольких пикосекунд. Дальнейшие исследования проводили с помощью ПИМ-3, состыкованного через слюдяные пленки с пятикамерным усилителем яркости. Это обеспечивало регистрацию каждого одиночного фотоэлектрона, покидающего входной фотокатод времяанализирующего ЭОП. Полученные экспериментальные данные привели к выводу о том, что собственное временное разрешение такого ЭОП не хуже 10 пс.

По этим данным можно с уверенностью сделать вывод о том, что в 1954 году в Москве в Институте атомной энергии усилиями Е.К.Завойского и его соратников родилась пикосекундная электронно-оптическая хронография. Это событие было документально зафиксировано в статье Е.К.Завойского (тогда члена-корреспондента АН СССР) и С.Д.Фанченко "Об изучении сверхбыстрых процессов", присланной

glow scan showed that the time of spark discharge build up was less than ten picoseconds. The shape of time-spark intensity profile differed greatly from the shape of Gaussian curve. In order to measure the instrument function of UMI-95 there were no other independent light sources.

At the same time, photometer curves allowed to differentiate the changes of intensity time profile with the accuracy to several picoseconds. Further studies were carried out using PIM-3 attached to the five-chamber luminance intensifier through mica films. It ensured the registration of every single photoelectron leaving the input photocathode of time-analyzing IIT. Results led to the conclusions that IIT own time resolution was not worse than 10 ps.

On the basis of this data we can certainly conclude that picosecond electron-optical chronography came into being in 1954 in Moscow at the Institute of Nuclear Power Engineering by the efforts of Y.K. Zavoisky and his colleagues. This event was documented in the article of Y.K. Zavoisky (at that time he was corresponding member of the Academy of Sciences of the USSR) and S.D. Fanchenko called "On the Study of Ultra-Fast Processes" sent to the editorial body on the 1st of September, 1954, and published in 1955 in the Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR (Proceedings of the Academy of Sciences, v. 100, No. 4).

### PHYSICS OF PICO-FEMTOSECOND ELECTRON-OPTICAL CHRONOGRAPHY

Results of the unique experiments of Y.K. Zavoisky with IIT literally in several months found their brilliant interpretation in his new article sent on the 1st of December 1955 to the Proceedings of the Academy of Sciences and called "Physics of Electron-Optical Chronography" (Proceedings of the Academy of Sciences, 1956, v. 108, No. 2).

Yevgeny Konstantinovich understood very well that Fermat's postulate is not applicable for the zero time of image placing in the focusing area. Since German scientist O. Scherzer [6] showed the mandatory availability of chromatic aberrations for the electron lens used in IIT in 1930s. Academician Lev Andreevich Artsimovich was actively involved into the study of the theory of photoelectron images formation in electrostatic IITs intended for the night viewing in 1940s. Relying on the general considerations he derived the formula for longitudinal chromatic aberrations. According to his research [5] longitudinal chromatic aberrations



в редакцию 1 сентября 1954 года и опубликованной в 1955 году в ДАН СССР (ДАН, т. 100, № 4).

### **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПИКО-ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ХРОНОГРАФИИ**

Результаты уникальных экспериментов Е.К.Завойского с ЭОП буквально через несколько месяцев нашли свое блестящее толкование в его новой статье, присланной 1 декабря 1955 года в ДАН и озаглавленной "Физические основы электронно-оптической хронографии" (ДАН, 1956, т.108, №2).

Евгений Константинович прекрасно понимал, что постулат Ферма не работает для нулевого времени установления изображения в плоскости фокусировки. Он был знаком с работами немецкого ученого О.Шерцера [6], который в 1930-е годы показал, что в электронных линзах, используемых в ЭОП, обязательно присутствуют хроматические aberrации. Академик Лев Андреевич Арцимович в 40-е годы был активно вовлечен в изучение теории формирования фотоэлектронных изображений

$\Delta Z$  in the focusing electrostatic lens of IIT can be expressed as follows:

$$\Delta Z = m \cdot \Delta V_{oz} \cdot V / eE,$$

where  $Z$  is the axial coordinate;  $m$  and  $e$  are the electron mass and charge respectively;  $E$  is the intensity of electric field close to photocathode;  $\Delta V_{oz}$  is the spread of photoelectron initial speed along the axial component;  $V$  is the longitudinal component of axial speed which photoelectrons obtain at the combined accelerating potential applied to IIT. The theory of spatial chromatic aberrations of L.A. Artsimovich became conventional theory for the description of quality of static images formed in IIT.

After ten years, on the basis of L.A. Artsimovich formula Y.K. Zavoisky and S.D. Fanchenko easily obtained the expression for the temporal aberrations of electron optics. The time of image formation  $\Delta\sigma$  in the focusing area was estimated taking into account the following:

$$\Delta\sigma = \Delta Z / V.$$





в электростатических ЭОП, предназначенных для ночного видения. Исходя из общих соображений он вывел формулу для продольных хроматических aberrаций. Согласно его исследованиям [5], продольные хроматические aberrации  $DZ$  в фокусирующей электростатической линзе ЭОП могут быть представлены выражением

$$\Delta Z = m \cdot \Delta V_{oz} \cdot V / eE,$$

где  $Z$  – аксиальная координата;  $m$  и  $e$  – соответственно, масса и заряд электрона;  $E$  – напряженность электрического поля у фотокатода,  $\Delta V_{oz}$  – разброс начальных скоростей фотоэлектронов по осевой компоненте;  $V$  – продольная составляющая осевой скорости, которую приобретают фотоэлектроны при полном ускоряющем напряжении, приложенном к ЭОП. Теория пространственных хроматических aberrаций Л.А.Арцимовича стала общепринятой для описания качества статических изображений, формируемых в ЭОП.

Спустя десять лет, исходя из формулы Л.А.Арцимовича, Е.К.Завойский и С.Д.Фанченко легко перешли к выражению для временных aberrаций электронной оптики. Время установления изображения  $\Delta\sigma$  в плоскости фокусировки было определено с учетом того, что

$$\Delta\sigma = \Delta Z / V.$$

Авторы имели в виду, что, если ускоряющее напряжение на ЭОП постоянно, то и скорость электронов вблизи плоскости фокусировки – постоянна. Так в 1955 году было выведено принятое мировой наукой знаменитое соотношение

$$\Delta\tau = m \cdot \Delta V_{oz} / e \cdot E.$$

Сегодня оно известно как формула Завойского-Фанченко для определения вклада продольных хроматических aberrаций в предельно достижимое временное разрешение ЭОП.

Для качественных оценок, которыми обычно пользуются разработчики, авторы ввели упрощенное выражение

$$\Delta\tau = a \cdot 10^{-11} / E,$$

где  $E$  – напряженность электрического поля в непосредственной близости к фотокатоду, выраженное в единицах CGSE заряда (1 CGSE = 30 В/мм),  $a$  – безразмерный коэффициент, равный

Authors meant that if the accelerating potential on IIT is constant the electron speed close to the focusing area is constant too. Thus, in 1955 the famous correlation accepted by the world science was derived:

$$\Delta\tau = m \cdot \Delta V_{oz} / e \cdot E.$$

Nowadays, it is known as the formula of Zavoisky-Fanchenko for the determination of contribution of longitudinal chromatic aberrations to the maximum achievable time resolution of IIT.

For the qualitative evaluations which are usually used by the developers authors introduced the simplified expression:

$$\Delta\tau = a \cdot 10^{-11} / E,$$

where  $E$  is the intensity of electric field which is in close proximity to photocathode expressed in the units of CGSE charge (1 CGSE = 30 V/mm),  $a$  is the dimensionless coefficient equal to 1-2 for silver-oxygen-cesium photocathodes. In accordance with the calculations of these authors for the device PIM-3 the maximum time resolution turned out to be equal to 5-10 ps. And the values  $E = 2$  CGSE (60 V/mm) and  $a = 2$  are used here and it agrees well with the experimental results.

Zavoisky and Fanchenko did not limit their attention with theoretical consideration of unavoidable longitudinal chromatic aberrations of focusing lens. Laying the groundwork for the pico-femtosecond electron-optical chronography they considered the whole path of the formation of photoelectron images from photocathode to IIT output screen. Having analyzed the resulting images they came to the conclusion on the possibility of achievement of time resolution up to 10 femtoseconds ( $10^{-14}$  s). And indeed, during the next two decades the leap was made in the development of electron-optical photography. In the late 70s many papers of national and foreign researchers devoted to the improvement of IIT time resolution by more than one order were written; the value of time resolution reached and exceeded one picosecond.

In the article “Pico-Femtosecond Electron-Optical Chronography” (Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, 1976, v. 226, No. 5) Y.K. Zavoisky draws the following fundamental conclusion: “In order to master the range 10-12-10-14 s there is only one way: minimization of the



1-2 для серебряно-кислородно-цезиевых фотока-  
тодов. В соответствии с расчетом этих авторов,  
для прибора ПИМ-3 предельное временное раз-  
решение оказалось равным 5-10 пс. При этом  
используются значения  $E=2$  CGSE (60 В/мм) и  $a=2$ ,  
что хорошо согласуется с экспериментальными  
результатами.

Завойский и Фанченко не ограничились свое  
внимание рассмотрением только в принципе  
неустраняемых продольных хроматических  
аббераций фокусирующих линз. Закладывая  
физические основы пико-фемтосекундной элек-  
тронно-оптической хронографии, они рассмо-  
трели весь тракт формирования фотоэлектрон-  
ных изображений от фотокатода до выходного  
экрана ЭОП. Проанализировав результирующие  
изображения, они пришли к выводу о возможно-  
сти достижения временного разрешения вплоть  
до 10 фемтосекунд ( $10^{-14}$  с). И действительно,  
за два последующих десятилетия был сделан  
скачок в развитии электронно-оптической фото-  
графии. В конце 70-х годов появились много-  
численные работы отечественных и зарубежных  
исследователей об улучшении временного разре-  
шения ЭОП более чем на порядок – оно достигло  
и перешло однопикосекундную отметку.

chromatic aberration effect through the increase of  
electric field intensity close to IIT photocathode up  
to 103-104 CGSE units (30-100 kV/mm) particularly  
on the basis of pulse supply”.

Thus, the main physical principles underlying  
in pico-femtosecond electron-optical registration  
are as follows [11].

1. Due to the dispersion of group velocities in glass  
lens of deflective-type objectives minimum  
time of the image formation cannot be shorter  
than 50-100 fs. Therefore, in order to reach the  
range of short times of 10-100 fs it is necessary  
to use the projection lens of reflective type  
projecting the image plane (for example,  
entrance micrometer slit) on IIT photocathode.
2. The finite thickness of photocathode determines  
the spread of the moment of photoelectrons  
departure in photocathode plane turned into  
vacuum. Upon the photocathode thickness  
of 100~( $10^{-6}$  cm) and initial electron velocity  
of  $\sim 10^8$  cm/s the value of this spread should  
not exceed 10 fs. Evaluation is accomplished  
under the condition of the absence of multiple  
scattering of electrons in photocathode depth.  
(Unfortunately, correctness of this statement  
has not been subjected to the careful theoretical



В статье "Пико-фемтосекундная электронно-оптическая хронография" (ДАН СССР, 1976, т.226, №5) Е.К.Завойский делает следующий основополагающий вывод: "Для освоения диапазона  $10^{-12}$ - $10^{-14}$  с есть только один путь: сведение к минимуму эффекта хроматической аберрации посредством увеличения напряженности электрического поля у фотокатода ЭОП до  $10^3$ - $10^4$  единиц CGSE (30-100 кВ/мм), в частности на основе импульсного питания".

Таким образом, основные физические принципы, лежащие в основе пико-фемтосекундной электронно-оптической фоторегистрации, таковы [1]:

1. Из-за дисперсии групповых скоростей в стеклянных линзах объективов преломляющего типа минимальное время установления изображения не может быть короче 50-100 фс. Поэтому для достижения диапазона коротких времен 10-100 фс необходимо использовать проекционные объективы отражательного типа, проецирующие плоскость изображения (например, входную микрометрическую щель) на фотокатод ЭОП.
2. Конечная толщина фотокатода определяет разброс момента вылета фотоэлектронов в плоскости фотокатода, обращенной в вакуум. При толщине фотокатода 100 Å ( $10^{-6}$  см) и начальной скорости электронов  $\sim 10^8$  см/с величина этого разброса не должна превышать 10 фс. Оценка сделана при условии отсутствия многократного рассеяния электронов в толще фотокатода. (К сожалению, справедливость этого утверждения до сих пор не подвергнута тщательным теоретическим и, тем более, экспериментальным проверкам.)

Фотокатоды должны обладать низкоомным поверхностным сопротивлением. Материалы фотокатода должны выдерживать воздействие высокоинтенсивных электрических полей: при поверхностной напряженности 1-6 кВ/мм в статическом и до 30-100 кВ/мм в импульсном режимах. (Согласно этим рекомендациям следовало бы поставить специализированные исследования по фотокатодам для фемтосекундных ЭОП и научиться измерять распределение начальных энергий фотоэлектронов в реальных условиях. Причина в том, что при вышеобозначенных напряженностях прикатодные электрические поля могут серьезно искажать энергетические уровни в полупроводниках и влиять на энергетическое распределение фотоэлектронов при внешнем фотоэффекте.)

and particularly experimental verifications yet).

Photocathodes must have low surface resistance. Photocathode materials must withstand the impact of high-intense electric fields (at the surface intensity of 1-6 kV/mm under static conditions and up to 30-100 kV/mm under pulse conditions). (According to these recommendations the specialized studies on photocathodes for femtosecond IITs should be accomplished and it is necessary to learn how to measure the distribution of photoelectron initial energies in actual practice. The reason is that at the abovementioned intensities near-cathode electric fields can severely distort the energy levels in semiconductors and influence on the energy distribution of photoelectrons upon the external photoeffect).

3. It is evident that time resolution (up to 10 fs) can be achieved at the phase velocities of images deflection on the screen which exceed the light speed by many times. It is so-called technical time resolution,  $\tau_t = \delta x/V$  or the time during which the scan travels with the velocity  $V$  equal to one resolution spatial element  $\delta x$ . However, the influence of edge effects in deflecting plates at such deflection velocities and finite size of the beam in deflection plates can considerably deteriorate the spatial quality of the images deflected at such velocity.

Interaction of the electrons carrying the FP image with fast-changing deflecting field has quantum-mechanical character. It can cause the peculiar "shot effect" of deflection. If the scan velocity is subjected to the random fluctuations then the limit of time measurement accuracy will be not more than several units of femtoseconds, as the evaluations showed.

4. The effect of signal tailing exists at the expense of Coulomb repulsion of the electrons which are the parts of one resolution element during the time of transit through IIT. Indeed, the electrons, which departure from photocathode during the time of 10 fs, form groups in the bundle with the thickness which is not more than  $10^{-6}$  cm. In its thin layer during the whole transit through IIT Coulomb repulsion occurs and it unavoidably causes the bundle thickening. Estimated correlation for Coulomb component of time resolution indicates the fact that number of electrons  $N$  contained in the image spatial element does not exceed one electron at the time resolution of 10 fs ( $\tau_k$



3. Очевидно, что временное разрешение (вплоть до 10 фс) может быть достигнуто при фазовых скоростях отклонения изображений по экрану, превышающих во много раз скорость света. Это так называемое техническое временное разрешение,  $\tau_t = \delta x / V$ , то есть время, за которое развертка проходит путь со скоростью  $V$ , равной одному разрешаемому пространственному элементу  $\delta x$ . Однако влияние краевых эффектов в отклоняющих пластинах при таких скоростях отклонения, а также конечный размер пучка в отклоняющих пластинах могут существенно ухудшать пространственное качество отклоненных с такой скоростью изображений.

Взаимодействие электронов, несущих изображение БПП, с быстроменяющимся отклоняющим полем носит квантово-механический характер. Это может привести к своеобразному "дробовому эффекту" отклонения. Если скорость развертки будет подвергнута неупорядоченным флуктуациям, то, как показали оценки, предел точности измерения времени будет не выше нескольких единиц фемтосекунд.

$\sim 10^{-14}$  N). It means that the time analysis of photoelectron images in femtosecond IITs must be carried out at the level of counting of single photoelectrons.

5. Compulsory condition for the reliable registration of the images scanned on luminescent screen with pico-femtosecond time resolution is their considerable (up to  $10^4$ – $10^6$ ) luminance intensification. Meeting this condition will ensure the mode of the registration of every single photoelectron departing from the photocathode of time-analyzing IIT and carrying the information of the registered FP. Therefore, high-quality luminance intensifiers for the images analyzed in time (possibly with the use of micro-channel plates (MCP)) as well as ultra-sensitive CCD-matrices (including the electron-sensitive matrices) for the further signal input and images processing on computer are required.

And in conclusion we want to remind that evaluating the contribution of individual components to the maximum time resolution of IIT our classics never forgot about well-known effect of electron spectral broadening determined on the basis of quantum-mechanical uncertainty



4. Существует эффект затягивания сигнала за счет кулоновского расталкивания электронов, составляющих один разрешимый элемент, за время пролета через ЭОП. Действительно, вылетающие с фотокатода за время 10 фс электроны группируются в сгустке толщиной, не превышающей  $10^{-6}$  см. В его тонком слое на всем протяжении пролета через ЭОП происходит кулоновское расталкивание, что неизбежно ведет к утолщению сгустка. Оценочное соотношение для кулоновской составляющей временного разрешения говорит о том, что число электронов  $N$ , содержащихся в пространственном элементе изображения, не превышает одного электрона при 10-фс временном разрешении ( $\tau_k \sim 10^{-14}$  N). Это означает, что временной анализ фотоэлектронных изображений в фемтосекундных ЭОП должен проводиться на уровне счета одиночных фотоэлектронов.

5. Обязательным условием надежной регистрации изображений, развернутых по люминесцентному экрану с пико-фемтосекундным временным разрешением, является их значительное (до  $10^4$ - $10^6$ ) усиление по яркости. Выполнение этого условия обеспечит режим регистрации каждого одиночного фотоэлектрона, вылетающего с фотокатода времяанализирующего ЭОП и несущего информацию о регистрируемом БПП. Поэтому нужны высококачественные усилители яркости проанализированных во времени изображений (возможно с использованием микроканальных пластин – МКП, а также современные сверхчувствительные ПЗС-матрицы (в том числе электронно-чувствительные) для последующего ввода сигнала и обработки изображений на компьютере.

И в заключение напомним о том, что, оценивая вклад отдельных составляющих в предельное временное разрешение ЭОП, наши классики никогда не забывали о хорошо известном эффекте уширения спектра электронов, определяемом квантово-механическим соотношением неопределенностей:  $\Delta\epsilon\Delta t \geq \hbar$ . Если учесть, что в сверхкоротком фотоэлектронном импульсе электроны неизбежно имеют разброс скоростей, определяемый соотношением неопределенностей, то этот разброс может оказаться сравнимым с разбросом скоростей, определяемым природой внешнего фотоэффекта. С учетом этого дополнительного (квантово-механического) разброса скоростей

relation:  $\Delta\epsilon\Delta t \geq \hbar$ . If we take into account that in ultra-short photoelectron pulse electrons unavoidably have velocity spread estimated on the basis of uncertainty relation, this spread can be compared with the velocity spread estimated on the basis of external photoeffect character. Taking into account this additional (quantum-mechanical) velocity spread the estimation formula for the maximum  $\tau_{\max}$  time resolution was derived:

$$\tau_{\text{пред}} = \hbar / (eV_0E)^{1/2},$$

where  $\hbar$  is the Planck's constant;  $E$  is the field close to photocathode in the units of CGSE charge;  $V_0$  is the initial velocity of photoelectrons;  $e$  is the electron charge. According to this formula, at the intensity of the field close to photocathode of 30-100 kV/mm using the silver-oxygen-cesium photocathode maximum time resolution will be maintained at the level of 10 fs.

\* \* \*

Summarizing this section it should be noted that theoretical basics of pico-femtosecond electron-optical photography formulated in 1950s in the papers of the school of Y.K. Zavoisky and submitted to the scientific community at the IV International Congress for High-Speed Photography in Cologne (Federal Republic of Germany) in 1958 [18] withstood the test of time during the half of century. Their validity was tested and successfully confirmed on the basis of the results of many IIT applications during the study of FPs in laser physics, laser plasma physics, semiconductor physics, fiber and nonlinear optics, photobiology and medicine. Time-analyzing IITs are actively applied in nuclear physics for the study of ionizing particle tracks in luminescent materials [19], for the photography of Cherenkov radiation of individual relativistic charged particle [20], synchronization of the moment of arrival of colliding beams of relativistic electrons in time in the experiments with synchrotron radiation [21], in the experiments with controlled thermonuclear fusion (CTF) in order to estimate the density, fractional composition and electron temperature of plasma by the luminance of spectral lines [22]. Please, read the second part of the review in the next issue of the magazine on how applied physics devices impulse the rapid development of electron-optical diagnostic equipment.





была выведена оценочная формула для предельного  $\tau_{\text{пред}}$  временного разрешения

$$\tau_{\text{пред}} = \hbar / (eV_0 E)^{1/2},$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка,  $E$  – поле у фотокатода в единицах CGSE заряда,  $V_0$  – начальная скорость фотоэлектронов,  $e$  – заряд электрона. Согласно этой формуле, при напряженности поля у фотокатода 30–100 кВ/мм и при использовании серебряно-кислородно-цезиевого фотокатода максимальное временное разрешение еще сохраняется на уровне 10 фс.

\* \* \*

Подводя итог сказанному в этом разделе, отметим, что теоретические основы пико-фемтосекундной электронно-оптической фотографии, сформулированные в 50-х годах в работах школы Е.К.Завойского и представленные научному сообществу на IV Международном конгрессе по высокоскоростной фотографии в Кельне (ФРГ) в 1958 году [18], выдержали более чем полувековую проверку временем. Их достоверность была опробована и с блеском подтверждена результатами многочисленных применений ЭОП при изучении БПП в лазерной физике, физике лазерной плазмы, физике полупроводников, волоконной и нелинейной оптике, фотобиологии и медицине. Времяанализирующие ЭОПы стали активно применять в ядерной физике для изучения треков ионизирующих частиц в люминесцирующих веществах [19], для фотографирования черенковского излучения отдельной релятивистской заряженной частицы [20], синхронизации во времени момента прихода встречных пучков релятивистских электронов в экспериментах с синхротронным излучением [21]; в экспериментах по управляемому термоядерному синтезу (УТС) для определения плотности, парциального состава и электронной температуры плазмы по яркости спектральных линий [22]. О том, как лазерная физика дала толчок бурному развитию и широкому применению электронно-оптической диагностической аппаратуры, читайте во второй части обзора в следующем номере журнала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Силкин И.И. Евгений Константинович Завойский. – Казань: Изд-во Казанского университета, 2007.
2. Завойская Н.Е. История одного открытия. – М: "Группа ИДТ", 2007.

## ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ИК-ЛАЗЕРЫ

Традиционная продукция компании LABFER – элементы, преобразующие длину волны излучения. Диапазон излучения выпускаемых перестраиваемых ИК-источников широк – от 1,5 до 5 мкм. Технология изготовления достаточно универсальна: берется классический кристалл ниобата лития, литографическим методом в кристалле создается периодическая структура (причем период структуры определяет функциональные свойства элемента), к кристаллу прикладывается электрическое поле, и структура остается навечно запечатленной в кристалле. Готовый полуфабрикат обрабатывают, тестируют, покрывают отражающим покрытием, и – изделие готово. Эффективность преобразования уникальна и достигает 70% при однократном прохождении.

Число потребителей таких изделий растет, хотя с каждым годом содержание решаемых задач меняется. По ним можно проследить новейшую историю развития лазерных устройств. Сначала стояла задача создать источники для проекционного телевидения, но затем неожиданно появились пикопроекторы. Пикопроекторы для мобильных телефонов – это гигантский перспективный рынок. Сначала был создан красный диодный лазер, затем синий диод, а вот зеленого – не было. Какой-то период времени перестраиваемые в зеленую гармонику лазеры пользовались высокой популярностью. Но недавно, с изобретением оптической накачки полупроводниковых структур, появились зеленые диодные лазеры. Похоже, что теперь этот рынок для перестраиваемых лазеров закрыт. Однако вернулась задача создания зеленых лазеров для настоящих мощных проекторов.

В то же время обнаружила себя медицинская потребность в желтых лазерах, необходимых для диагностики и лечения сосудов. Теперь наблюдается обратная картина: зеленых лазеров – много, а вот желтых – нет. Вообще-то желтых диодных лазеров в природе не бывает, а преобразовать ИК-излучение в желтый диапазон – технически трудное занятие. В компании LABFER умеют делать лазеры, излучающие на длине волны 589 нм. Дальше начинается интересная вещь: оказалось, медицине нужны компактные дешевые перестраиваемые лазеры. Перестраиваемый ИК-лазер, используя лидарные технологии, шагнул в медицинскую диагностику заболеваний по выдыхаемому человеком газу.

Компактные изделия сине-зеленого диапазона нужны для подводных коммуникаций, для полупроводниковой индустрии, где они заменяют громоздкие конструкции газовых лазеров, аргоновых и на парах меди. Компания начала производить твердотельный элемент для производства ТГц-излучателей. Надеемся найти новые приложения для перестраиваемых лазеров.

В.Шур, генеральный директор  
компании LABFER



3. **Бабыкин М.В., Рудаков Л.И. и др.** – Физика плазмы, 1982, т.8, Вып.5, с. 901.
4. **Holst G., De Boer J.H., Teves M.C., Vennemans C.F.**, Ned. Oct. 1928; British Patent 3262000; D.R.P. 535208; Physica, 1934, v. 1, p. 297.
5. **Арцимович Л.А.** – Известия АН СССР, Сер. Физ., 1944, т. 8, № 6, с. 331.
6. **Scherzer O.** – Zft. f. Phys, 1936, v. 101, p. 593.
7. **Zworykin V.K. et al.** Electron Optics and Electron Microscope. – New York: Wiley, 1948.
8. **Glaser W.** Grundlagen der Elektronenoptik. – Wien: Springer, 1952; Основы электронной оптики –М.: Гостехиздат, 1957.
9. **Ванюков М.П., Нилов Е.В.** – ЖТФ, 1954, т. XXIV, вып. 7, с. 1209.
10. **Courtney-Pratt J.S.** – Research, 1949, v. 2, p. 287; The Photographic J., 1952, v. 92B, p. 137; Reports on Progress in Physics, 1957, v. 20, p. 329.
11. **Завойский Е.К., Фанченко С.Д.** – ДАН СССР, 1955, т. 100, № 4, с. 661; ДАН СССР, 1956, т. 108, № 2, с. 218; ДАН СССР, 1976, т. 226, № 5, с. 1062; Appl. Opt., 1965, v. 4, № 9, p. 1155; Препринт ИАЭ им. И.В. Курчатова. – М., 1966.
12. **Фанченко С.Д.** – Труды XIV Межд. конгр. по высокоскор. фотогр. и фотонике. – М., 1980, с. 26–41; Proc. of the XXIIIth Intern. Congr. on High-Speed Photogr. and Photonics (ICHSP). – М., Sept. 1998; Proc. SPIE., 1998, v. 3516, p. 15–24, p. 429–432.
13. **Бутслов М.М.** – Успехи научной фотографии, 1959, т. 6, с. 76.
14. **Бутслов М.М., Завойский Е.К. и др.** – ДАН СССР, 1956, т. 111, № 5, с. 996; Природа. 1970, №8, с.10.
15. **Бутслов М.М., Завойский Е.К., В.В Прокофьева и др.** – ДАН СССР, 1958, т. 121, с. 815; Атомная энергия, 1956, т. 1, № 4, с. 4.
16. **Бутслов М.М., Степанов Б.М. и др.** Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях/Под ред. Е.К. Завойского. – М.: Наука, 1978.
17. Физическая электроника. Сборник статей, посвященных памяти М.М. Бутлова/Под ред. Б.М. Степанова. – М.: Наука, 1976.
18. **Butslov M.M., Zavoisky E.K., et al.** – Proc. of the IV-th Intern. Congr. On High-Speed Photography (ICHSP), Köln, 1958.
19. **Завойский Е.К. Плахов А.Г. и др.** – ДАН СССР, 1955, т.100, с.241.
20. **Бутслов М.М. и др.** – Атомная энергия, 1962, т. 12, №5, с. 412.
21. **Зинин Э.И. и др.** – Атомная энергия, 1966, т. 20, с. 320.
22. **Загородников С.П. и др.** – ЖЭТФ, 1963, т. 45, с. 1850.

## ЭКСИМЕРНЫЕ ЛАЗЕРЫ

OptoSystems – одна из крупнейших российских компаний по производству лазеров для коррекции зрения. На отечественном офтальмологическом рынке системы для коррекции зрения компании OptoSystems занимают около 55%, а эксимерные лазеры – первое место. Российский лазерный рынок очень маленький, если говорить об офтальмологии. Всего в России с эксимерными лазерами работают около 100 клиник, из них 60 – с лазерами компании OptoSystems (для сравнения: в одном городе Нью-Йорке столько же офтальмологических клиник). Беда еще и в том, что в отечественных клиниках отсутствует политика обновления оборудования. Хотя стоит отметить, что свое оборудование OptoSystems обновляет каждые 3–4 года, меняя конфигурацию, улучшая характеристики. Компания поставляет эксимерные лазеры и за границу (порядка 10 штук в год), но, желая расширить свое производство, ищет новые рынки.

Спецификация изделий компании постоянно меняется в соответствии с новыми задачами и с учетом потребностей технологий, за прошедшие два года в ее продуктовой линейке произошел сильный сдвиг в сторону фемтосекундных лазеров. Появились новые типы фемтосекундных лазеров, которые в первую очередь предназначены для медицины, правда такие лазеры можно использовать и для других целей. Традиционная техника компании OptoSystems – газовые эксимерные лазеры и источники питания для лазеров. Компания принимает участие в крупном проекте по созданию мощного лазера для термоядерного синтеза, разрабатывая в кооперации один из элементов задающего генератора в системе формирования излучения.

С.Вартапетов, генеральный директор компании OptoSystems, [www.optosystems.ru](http://www.optosystems.ru)

## ЛАЗЕРЫ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ

Южный Федеральный университет (Ростовский госуниверситет), традиционно выступающий организатором симпозиумов и семинаров по лазерам на парах металлов и их применению, планирует организовать совместно с Российской Академией наук, Южным научным центром РАН, Инженерной Академией им. А.М.Прохорова и Северо-Кавказским научным центром высшей школы очередной симпозиум "ЛАЗЕРЫ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ" (ЛПМ-2014) 22–26 сентября 2014 года.

На Симпозиуме предполагается обсудить доклады, посвященные исследованиям лазеров на парах металлов, исследованиям физических процессов в активных средах таких лазеров, возможным применениям лазеров на парах металлов в науке и технике, а также смежные с ними вопросы.

Адрес для переписки: 344090, Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5, физический факультет ЮФУ, кафедра квантовой радиофизики. Оргкомитет симпозиума ЛПМ-2014. Электронная почта: [lpm-2014@yandex.ru](mailto:lpm-2014@yandex.ru), тел./факс (863)2975118. Текущая информация о Симпозиуме размещается на сайте: <http://lpm-conference.wix.com/laser>.

<http://lpm-conference>