

“Создание фемтосекундной фотоэлектронной пушки с нестационарным фокусирующим полем (теория, практическая реализация, эксперимент)”

**С.В. Андреев, В.С. Белолипецкий, В.И. Лозовой, М.А. Монастырский,
Ю.Н. Сердюченко, М.Я. Щелев**

Отдел фотоэлектроники, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

С использованием программного обеспечения, созданного в Отделе фотоэлектроники, проведено теоретическое исследование и компьютерное моделирование пространственно-временной фокусировки фотоэлектронных пучков в нестационарных электрических полях. На основе этих исследований разработана конструкция и изготовлены экспериментальные образцы уникальной фемтосекундной фотоэлектронной пушки, совмещающей в себе функции фотохронографа и формирователя ультракоротких пучков электронов, предназначенных для экспериментов по электронной дифракции с временным разрешением (TRED). В традиционный времяанализирующий электронно-оптический преобразователь (ЭОП) введена дополнительная фокусирующая линза, обеспечивающая динамическую компрессию фотоэлектронных пучков под действием нестационарных электрических полей. Экспериментально подтверждена возможность сокращения длительности исходных фотоэлектронных пучков в десятки раз (исходный 7 пс импульс был “сжат” до 285 фс). Показано, что теоретический предел временного разрешения электронно-оптической хронографии, установленный в 1955 году Е.К. Завойским и С.Д. Фанченко и составляющий для статических полей примерно 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 электрических полях.

I. Введение и теоретический базис

Данная работа посвящена теоретическому исследованию и экспериментальной реализации принципов пространственной и временной фокусировки фотоэлектронных пучков в нестационарных электрических полях. В результате выполнения работы показано, что применение нестационарных электрических полей позволяет существенно (по крайней мере, на порядок) превзойти теоретический предел временного разрешения, установленный для стационарных полей Е.К. Завойским и С.Д. Фанченко в середине 50-х годов прошлого века. Указанный результат дает новый значительный импульс развитию экспериментов по электронной дифракции с временным разрешением (Time-Resolved Electron Diffraction Experiments – TRED), являющихся прямым методом исследования атомно/молекулярной динамики в твердотельных и газообразных средах.

Два главных преимущества ускоренных пучков электронов – достаточно малая длина волны де-Бройля ($\lambda \sim 10^{-2}$ нм при энергии пучка $\sim 20 - 30$ кэВ) и существенно (в 10^6 раз) более сильное чем у фотонов взаимодействие с веществом - делает их весьма эффективным инструментом для изучения фундаментальных свойств материи в рамках метода электронной дифракции с временным разрешением (TRED) [1-4]. Принципиальная схема TRED – экспериментов показана на рис.1.

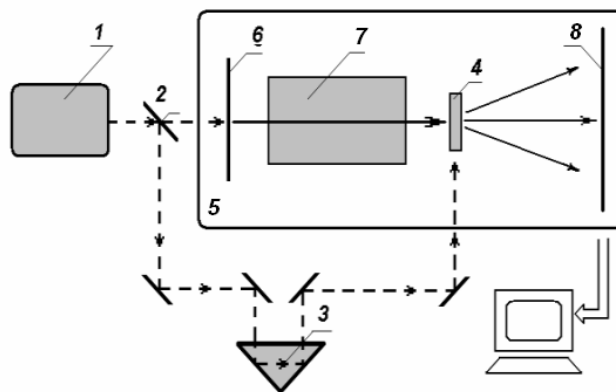


Рис. 1. Принципиальная схема TRED экспериментов (1 – фемтосекундный лазер, 2 – делитель пучка, 3 – линия оптической задержки, 4 – исследуемый образец, 5 – фотоэлектронная пушка, 6 – фотокатод, 7 – система электродов, 8 – приемник изображения)

Импульсный лазер 1 генерирует оптический импульс, который затем разделяется на два импульса при помощи делителя пучка 2. Пройдя через оптическую линию задержки 3, первый импульс возбуждает исследуемый образец 4. Второй импульс поступает на вход фотоэлектронной пушки 5, взаимодействует с фотокатодом 6 и генерирует пучок фотоэлектронов, который затем ускоряется, фокусируется и направляется на исследуемый образец системой электродов 7. Взаимодействуя с атомно/молекулярной структурой образца, электронный пучок создает на приемнике изображения 8 дифракционную картину, “привязанную” к моменту времени прихода пучка на образец и отражающую его состояние в данный момент времени. Изменяя временной интервал между исходным лазерным импульсом и моментом времени прихода электронного пучка на образец, можно получить прямую информацию о переходных процессах на атомно/молекулярном уровне внутри исследуемого образца.

Временное разрешение TRED-метода в основном определяется длительностью исходного лазерного импульса и длительностью электронного пучка на мишени. В то время как современные лазеры позволяют генерировать оптические импульсы с длительностью несколько фемтосекунд, получение электронного пучка аналогичной длительности представляет собой серьезную проблему. Наиболее труднопреодолимым препятствием здесь является разброс фотоэлектронов по начальным энергиям, который для современных фотокатодов составляет величину порядка 0.5 эВ. В соответствии с формулой Завойского – Фанченко [5], полученной в середине 50-х годов прошлого века, временной разброс в электронном пучке, сформированном в статическом поле, оценивается как

$$\delta T = \frac{\sqrt{2m}}{eE} \sqrt{\delta \mathcal{E}} \quad , \quad (1)$$

где m и e , соответственно, масса и заряд электрона, $\delta \mathcal{E}$ начальный энергетический разброс фотоэлектронов, E - напряженность электрического поля вблизи поверхности фотокатода. Важно отметить, что временная хроматическая aberrация (1) является принципиально неустранимой в статическом электрическом поле, и может быть лишь уменьшена за счет увеличения напряженности поля E . Используя терминологию теоретической электронной оптики, можно утверждать, что временная фокусировка первого порядка (идеальная временная фокусировка) принципиально недостижима в статических полях. Непосредственно из (1) следует, что достижение временного разрешения 100-200 фс в статических полях требует увеличения прикатодного поля E до величин порядка 30 кВ/мм и более. Учитывая ограничения, связанные с порогом электрического пробоя в вакууме, такое “лобовое” решение проблемы представляется малопродуктивным.

Эффективный способ обеспечить временную фокусировку фотоэлектронных пучков с использованием нестационарных электрических полей, и, таким образом, существенно преодолеть предел, диктуемый формулой Завойского-Фанченко для статических полей, был впервые нами предложен в работе [6] и затем развит в работах [7-19]. Выполненные в этих работах теоретические и компьютерные исследования показали, что, в противоположность статическому электрическому полю, в специальном образом выбранном нестационарном электрическом поле возможно полностью устранить временную хроматическую aberrацию первого порядка и, следовательно, обеспечить временную фокусировку первого порядка. Этот эффект объясняется тем, что зависящее от времени электрическое поле вносит дополнительный разброс по энергиям в пучке, так что частицы, находящиеся на заднем фронте пучка начинают двигаться быстрее частиц, находящихся на его переднем фронте. Спустя некоторое время, “задние” частицы обгоняют “передние”, и такой момент времени, когда длительность электронного пучка становится минимальной, определяет положение временного фокуса первого порядка, в котором и должен быть помещен исследуемый образец. Указанный принцип в определенной степени аналогичен принципу группировки заряженных частиц в клистронах. Существенное отличие, однако, здесь состоит в том, что для регистрации дифракционной картины в фотоэлектронных пушках рассматриваемого типа необходимо обеспечить не только временную фокусировку электронного пучка на образце, но и его пространственную фокусировку на приемнике изображения.

Важный теоретический результат, полученный в [6,7] состоит в том, что два главных фактора, определяющих временное уширение электронного пучка – разброс по начальным скоростям $\sqrt{\delta\varepsilon}$ и разброс по начальным моментам вылета $\delta\tau$ фотоэлектронов с фотокатода – являются тесно связанными в том смысле, что соответствующие aberrационные коэффициенты $T|\sqrt{\varepsilon}$, $T|\tau$ в aberrационном разложении

$$\begin{aligned} T(z_s, \tau, \varepsilon) = & T_0(z_s) + [T|\tau](z_s)\tau + [T|\sqrt{\varepsilon}](z_s)\sqrt{\varepsilon} + \\ & + [T|\tau^2](z_s)\tau^2 + [T|\varepsilon](z_s)\varepsilon + [T|\tau\sqrt{\varepsilon}](z_s)\tau\sqrt{\varepsilon} + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

времени прихода частицы, стартовавшей в начальный момент τ со скоростью $\sqrt{\varepsilon}$, на произвольную плоскость $z = z_s$, оказываются строго пропорциональными в любом, зависящем от времени электромагнитном поле:

$$T|\sqrt{\varepsilon} = -\frac{\sqrt{2m}}{eE} T|\tau \quad . \quad (3)$$

В работах [7-9] нами было получена и исследована система дифференциальных уравнений

$$\frac{d}{dz}(T|\tau) = -\frac{\sqrt{m}}{(2W)^{3/2}}(E|\tau) \quad (4)$$

$$\frac{d}{dz}(E|\tau) \approx e \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t \partial z}(T|\tau) - \frac{4\pi e^2}{S(z)} J_0 \quad , \quad (5)$$

связывающая эволюцию вдоль главной оптической оси aberrационного коэффициента первого порядка $T|\tau$ и вариации первого порядка $E|\tau$ полной энергии частицы по

отношению к начальному моменту времени τ . Здесь $\Phi(z, t)$ - зависящий от времени электрический потенциал, $W = W(z)$ - средняя кинетическая энергия электронов в аксиальном направлении, $J_0 = J_0(z)$ - локальный ток в пучке, $S(z)$ локальное сечение пучка. Начальные условия для системы уравнений (4), (5) очевидны: $(T|\tau)|_{z=0} = 1$, $(E|\tau)|_{z=0} = 0$. Второй член в уравнении (5) для $(E|\tau)$ лишь приближенно отражает кулоновское взаимодействие в пучке, поэтому точное равенство в этом уравнении заменено на приближенное.

Для стационарного поля и в пределе пренебрежимо малого пространственного заряда система уравнений (4), (5) имеет тривиальное решение $(T|\tau) = 1$, $(E|\tau) = 0$, которое, очевидно, полностью соответствует формуле Завойского-Фанченко (1). Таким образом, система уравнений (4), (5) является прямым обобщением формулы Завойского-Фанченко на случай нестационарных электрических полей и значимого пространственного заряда в пучке.

В стационарном электрическом поле первый член в правой части (5) равен нулю, и вариация полной энергии $E|\tau$ полностью определяется вторым членом, ответственным за кулоновское взаимодействие в пучке. Наличие этого (всегда отрицательного) члена указывает на то, что “передние” частицы пучка, стартовавшие в более ранние моменты времени τ , в результате кулоновского взаимодействия приобретают большую энергию, чем “задние”, что приводит к уширению электронного пучка. В статическом поле этот эффект не может быть скомпенсирован. Напротив, в зависящем от времени электрическом поле первый член в правой части (5) отличен от нуля и может быть выбран таким образом, чтобы скомпенсировать (по крайней мере, частично) энергетический разброс, обусловленный кулоновским взаимодействием. Таким образом, нестационарные электрические поля позволяют не только обеспечить временную фокусировку первого порядка, но и существенно уменьшить временное уширение пучка, вызванное кулоновскими эффектами. Этот вывод, был подтвержден нами в результате детальных вычислительных экспериментов, в которых моделирование кулоновского взаимодействия осуществлялось не с помощью приближенного представления, использованного в (5), а на основе специально разработанного общего “фрактального” алгоритма [10].

Во временном фокусе первого порядка оказывается значительным вклад временных aberrаций второго порядка. Если длительность $\delta\tau$ исходного лазерного импульса достаточно велика, в aberrационном разложении (2) преобладает член $(T|\tau^2) \tau^2$ и длительность пучка на образце зависит от $\delta\tau$ квадратично. “Укорочение” лазерного импульса может улучшить временное разрешение во временном фокусе первого порядка, но только до предела, обусловленного наличием временной хроматической aberrации второго порядка $(T|\varepsilon) \varepsilon$. Как показано в [6], aberrация $(T|\varepsilon) \varepsilon$ может быть полностью устранена путем применения дополнительного стационарного магнитного поля. Совместно с увеличением скорости изменения электрического поля это представляет собой весьма перспективный путь дальнейшего сокращения длительности электронного пучка. Но даже и в случае полной компенсации временной aberrации $(T|\varepsilon) \varepsilon$, как это следует из теоремы Лиувилля, неустранимая “смешанная” aberrация $(T|\tau\sqrt{\varepsilon}) \tau\sqrt{\varepsilon}$ не позволит нам преодолеть предел, связанный с квантово-механической природой электрона и соотношением неопределенности Гейзенберга.

II. Результаты компьютерного моделирования и практической реализации фотоэлектронной пушки с нестационарным фокусирующим электрическим полем

Для того, чтобы подтвердить теоретически обоснованную возможность временной фокусировки фотоэлектронных пучков при помощи нестационарных электрических полей, в Отделе фотоэлектроники ИОФ РАН был рассчитан и практически реализован экспериментальный образец фотоэлектронной пушки, показанный на рис.2. Компьютерное моделирование осуществлялось с применением пакетов прикладных программ ELIM/DYNAMICS [20] и MASIM [21], разработанных сотрудниками Отдела.



Рис.2. Общий вид фемтосекундной фотоэлектронной пушки с нестационарным электрическим полем

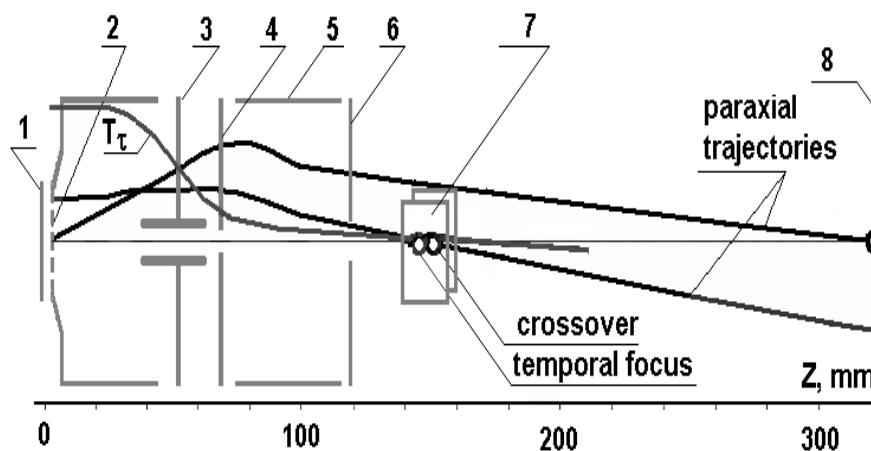


Рис.3. Принципиальная схема фотоэлектронной пушки для временной фокусировки электронных пучков при помощи нестационарных электрических полей: 1 – фотокатод, 2 – ускоряющая мелкоструктурная сетка, 3 – электрод, генерирующий линейно-изменяющееся во времени электрическое поле, 4,5 – электроды, обеспечивающие пространственную фокусировку пучка, 6 – анод, 7 – динамический дефлектор, 8 – приемник изображения

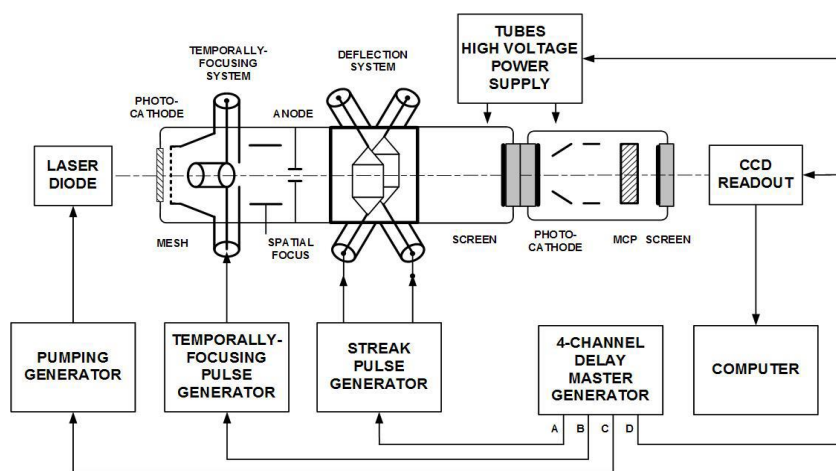


Рис.4. Блок – схема экспериментальной установки

Принципиальная схема функционирования фотоэлектронной пушки и блок-схема всей установки для временной компрессии пучков электронов показаны на рис.3,4 соответственно. Импульсный лазер освещает узкую щель в центре фотокатода и создает фотоэлектронный пучок, который затем ускоряется мелкоструктурной сеткой, расположенной на расстоянии 1 мм от фотокатода, до энергии 3 кэВ. Пройдя сквозь мелкоструктурную сетку, пучок попадает в область нестационарного электрического поля, управляемого электродом 3, на который подается зависящий от времени потенциал, скорость изменения которого, в зависимости от конкретного режима временной фокусировки, составляет несколько киловольт в наносекунду. Генератор зависящего от времени электрического поля синхронизован с инициирующим лазером, что позволяет обеспечить возможность варьирования временной задержки между моментами эмиссии фотоэлектронного пучка и началом генерации электрического поля, ответственного за временную фокусировку. Как указывалось выше, при прохождении пучка в нестационарном (в данном случае - линейно-нарастающем) электрическом поле, энергия “передних” и “задних” электронов пучка становится различной, и, как показано на рис. 3, абберационный коэффициент $T|\tau$ начинает уменьшаться, обращаясь в нуль в плоскости временной фокусировки, расположенной за анодом 6. Электроды 4 и 5 обеспечивают пространственную фокусировку пучка таким образом, что плоскость пространственного изображения совпадает с приемником изображения 8, в то время как кроссовер пучка оказываются практически совмещенным с временным фокусом. Динамический дефлектор 7 обеспечивает развертку пучка по экрану с фазовой скоростью, близкой к трем скоростям света, что позволяет с достаточной точностью измерить длительность электронного пучка на образце.

III. Экспериментальные результаты по временной и пространственной фокусировке фотоэлектронных пучков

Результаты экспериментов по временной фокусировке фотоэлектронных пучков с применением вновь разработанной фотоэлектронной пушки показаны на рис. 5 -13. Отметим, что уникальность данной фотоэлектронной пушки состоит в том, что в ней впервые реализована возможность одновременной временной и пространственной фокусировки первого порядка.

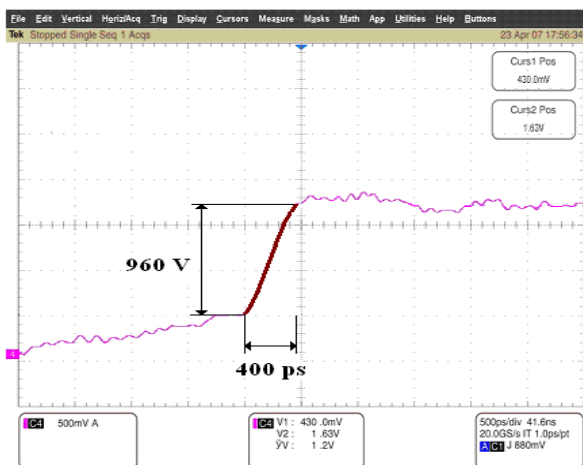


Рис.5. Электрический импульс в системе временной фокусировки (крутизна нарастания 2.4 кВ/нс)

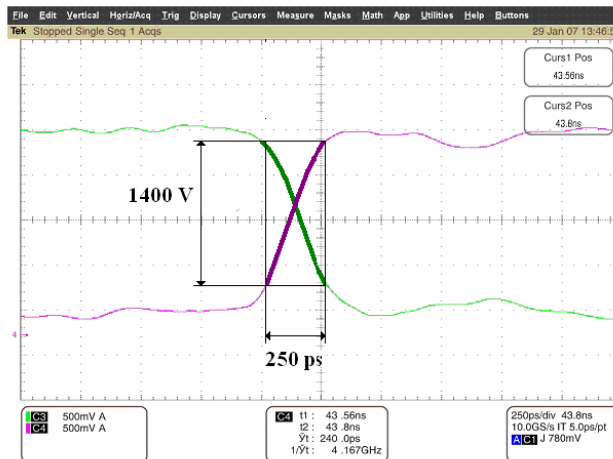
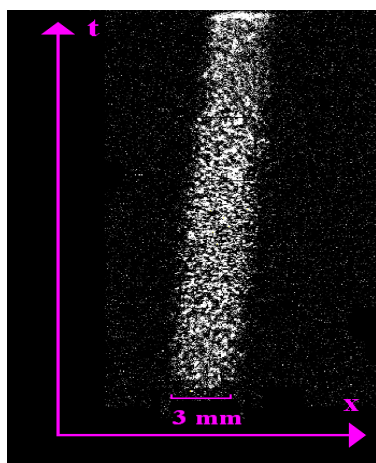
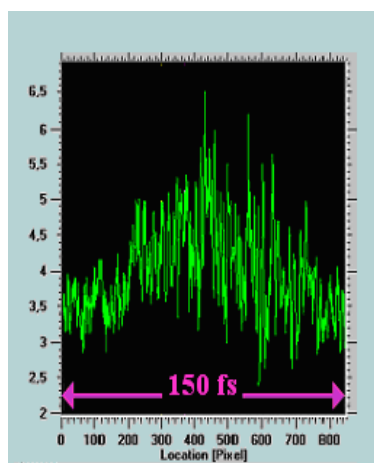


Рис.6. Электрические импульсы в системе временной развертки

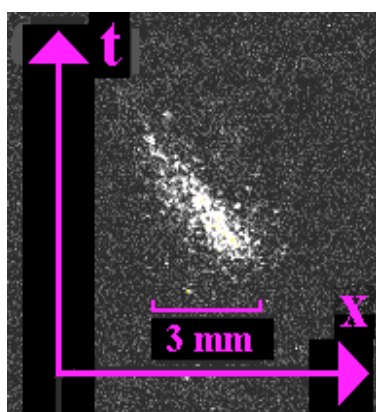


(a)

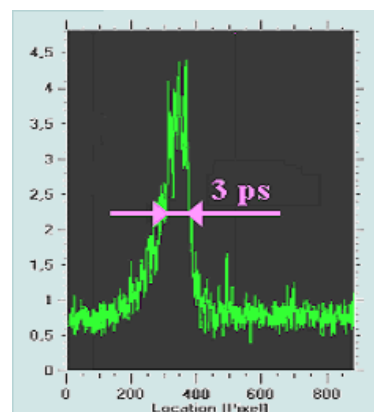


(б)

Рис.7. Развернутое изображение (а) и профиль интенсивности (б) электронного пучка, полученного от 150 пс лазерного импульса (без временной фокусировки)



(a)



(б)

Рис.8. Электронное изображение (а) и профиль интенсивности (б) сфокусированного во времени электронного импульса (исходная длительностью 150 пс, скорость нарастания фокусирующего электрического поля ~ 1 кВ/нс)

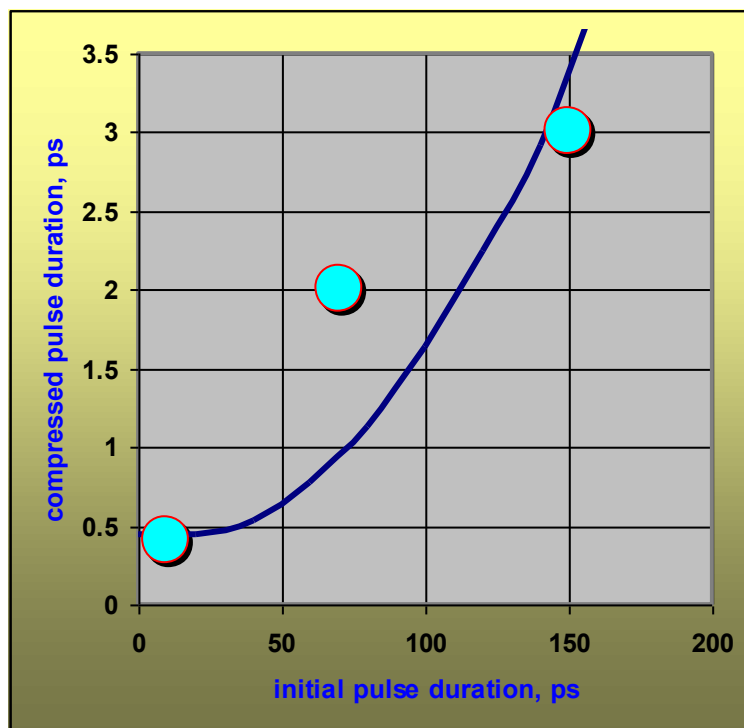


Рис.9. Теоретическая кривая и экспериментальные точки, соответствующие временной фокусировке (временному “сжатию”) фотоэлектронных пучков в разработанной фотоэлектронной пушке (скорость изменения фокусирующего электрического поля ~ 1 кВ/нс). Результаты получены в мае 2006 г.

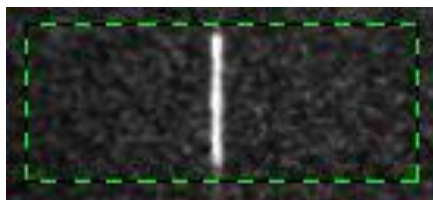


Рис.10. Изображение входной щели, освещаемой 7 пс лазером, в статическом режиме (FWHM ~ 40 микрон).

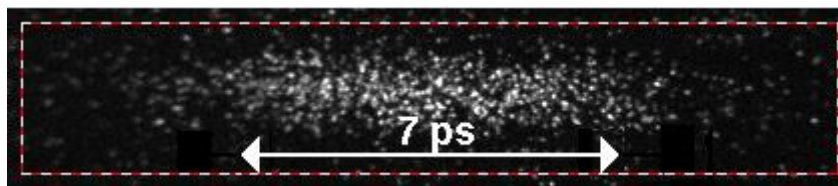


Рис.11. Изображение входной щели, освещаемой 7 пс лазером, в режиме линейной развертки (без временной фокусировки)

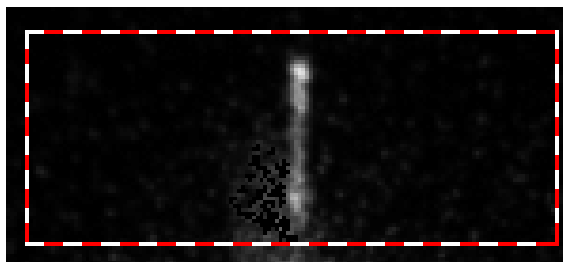


Рис.12. Изображение “сжатого” во времени импульса без развертки (скорость нарастания фокусирующего поля ~ 2.4 кВ/нс, FWHM ~ 60 микрон).

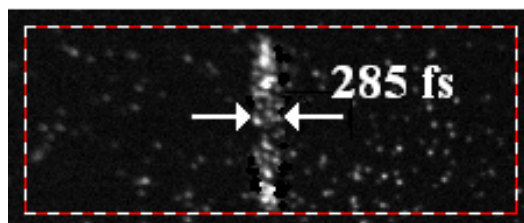


Рис.13. Изображение “сжатого” во времени импульса с разверткой (скорость нарастания фокусирующего поля ~ 2.4 кВ/нс, скорость развертки ~ 2.8 скорости света). Результат получен в мае 2007 г.

IV. Заключение

Основные результаты представленной работы могут быть кратко сформулированы следующим образом.

1. Впервые разработана детальная абберационная теория пространственно-временной фокусировки фотоэлектронных пучков в нестационарных электрических полях. Показано, что в специально выбранных нестационарных электрических полях может быть обеспечена временная фокусировка первого порядка, принципиально невозможная в статических полях. Получено прямое обобщение формулы Завойского-Фанченко на случай нестационарных полей и показано, что применение нестационарных полей позволяет существенно (по крайней мере, на порядок) превзойти теоретический предел временного разрешения, установленного для стационарных полей Е.К. Завойским и С.Д. Фанченко. Впервые показано, что, в отличие от стационарных полей, в нестационарных электрических полях эффекты пространственного заряда могут быть существенно (на порядок величины) скомпенсированы за счет оптимального выбора амплитуды нестационарного поля, ответственного за временную фокусировку.

2. С применением разработанных в Отделе фотоэлектроники пакетов прикладных программ выполнено компьютерное моделирование и осуществлено конструирование фотоэлектронной пушки с нестационарным электрическим полем, предназначенной для временной фокусировки фотоэлектронных пучков в экспериментах по электронной дифракции с временным разрешением (TRED-экспериментов). Созданная фотоэлектронная пушка представляет собой уникальную электронно-оптическую систему, в которой впервые одновременно обеспечена как временная, так и пространственная фокусировка первого порядка электронного пучка.

3. Серия тестовых экспериментов, выполненных с использованием вновь разработанной фотоэлектронной пушки, полностью подтвердила теоретические положения и результаты компьютерного моделирования, положенные в основу практической реализации. В частности, в результате проведенных экспериментов фотоэлектронный пучок с начальной длительностью ~ 7 пс был “сжат во времени” до 285 фс. Данный эксперимент был выполнен

при скорости изменения фокусирующего во времени электрического поля ~ 2.4 кВ/нс и фазовой скорости развертки электронного пучка по экрану ~ 2.8 скорости света.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J.C. Williamson, M. Dantus, S.B. Kim, and A.H. Zewail, Ultrafast diffraction and molecular structure // *Chemical Physics Letters*, 1992, 196 (6), pp.529-534.
2. V.A. Lobastov, R. Srinivasan, and A.H. Zewail, Four-dimensional ultrafast electron microscopy // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 102 (2005), N20, p. 7069-7073
3. B.J. Siwick, J.R. Dwyer, R.E. Jordan, R.J. Dwayne Miller. An atomic-level view of melting using femtosecond electron diffraction // *Science*, 302 (2003) p. 1382-1385
4. B.J. Siwick, J.R. Dwyer, R.E. Jordan, R.J. Dwayne Miller. Femtosecond electron diffraction studies of strongly driven structural phase transitions. // *Chemical physics*, 299 (2004), p. 285-305
5. Е.К. Завойский, С.Д. Фанченко, Физические основы электронно-оптической хронографии // *Доклады Академии наук СССР*, 108 (2), с.218-221, 1956.
6. М.А. Monastyrskiy, S.V. Andreev, D.E. Greenfield, V.A. Tarasov, M.Ya. Schelev. Theoretical and computer study on the possibility of subfemtosecond (attosecond) temporal focusing of photoelectron probing bunches with quasi-stationary electromagnetic fields // *SPIE Proceedings*, vol. 4948, 2003, p. 305-310.
7. S. V. Andreev, D.E. Greenfield, M.A. Monastyrskiy, V.A. Tarasov, and M.Ya. Schelev, Formation of sub-femtosecond photoelectron bunches in time-dependent electric field // *SPIE Proceedings*, vol. 5398, p. 1-15, 2003г.
8. М. Monastyrskiy, S. Andreev, D. Greenfield, G. Bryukhnevich, M. Schelev, and V. Tarasov, Computer modeling of a subfemtosecond photoelectron gun with time-dependent electric field for TRED experiments // *SPIE Proceedings*, v. 5580, p.324-334, 2004.
9. S. Andreev, D. Greenfield, M. Monastyrskiy, and V. Tarasov, Spatial and temporal focusing of femtosecond electron bunches in time-dependent electric fields, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research (NIM), Series A*, 2006 (in press).
10. D. Greenfield and M. Monastyrskiy, New approach to the problem of Coulomb interaction in electron and ion bunches, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research (NIM), Series A*, 2006 (in press).
11. S. Andreev, G. Bryukhnevich, V. Degtyareva, D. Greenfield, V. Lozovoi, M. Monastyrskiy, M. Schelev, Y. Serdiuchenko, V. Tarasov, and N. Vorobiev, The results of computer and experimental studies on compressing the ultrashort photoelectron bunches with time-dependent electric fields, *Proceedings of the 26th International Congress on High-Speed Photography and Photonics (September 2006, Xi'an, China)*, // *SPIE Proceedings*, vol. 6279, p.p. 701-705, 2007.
12. D.E. Greenfield, M.A. Monastyrskiy, V.I. Lozovoi, M.Ya. Schelev, Yu. N. Serdyuchenko, New computer modeling and experimental results on a photoelectron gun with time-dependent electric field, *Memory&Neural Networks (Information Optics)*, # 4, 2007) (in press).
13. М.Я. Щелев, Академик А.М. Прохоров и фемто-аттосекундная фотоэлектроника, *Квантовая электроника*, №7, т.33, стр. 609-620, 2003г.
14. Э.Л. Нолле, М.Я. Щелев, Фотоэлектронная эмиссия из наночастиц серебра, обусловленная поверхностными плазмонами, *Письма в ЖТФ*, т.30, стр. 1-6, 2004г.
15. М.Я. Schelev, М.А. Monastyrskiy, V.P. Degtyareva, V.S. Belolipetskiy, V.A. Tarasov, S.V. Andreev, G.I. Bryukhnevich, D.E. Greenfield, An electron-optical device for compressing

ultrashort photoelectron bunches down to sub-femtosecond level with the use of non-stationary electric fields. (Record of Invention, December 28, 2004).

16. L. Zhou, Y.Li, Z. Zhang, M. Monastyrskiy, M. Schelev, On the theory of temporal aberrations for cathode lenses, *Optik (Optics)*, **34**, pp.1-11, 2005.

17. М.Я. Щелев, Высокоскоростная электронно-оптическая фотография. Энциклопедия низкотемпературной плазмы под ред. Академика В.Е. Фортова, Москва, Янус-К, стр. 148-152, 2006г.

18. M.Ya. Schelev, Femto-attosecond photoelectronic imaging (the present state of the art and new trends), *Proceedings of the 17th International Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices (Moscow, Russia, 27-31 May 2002)*, SPIE, vol.5126, p.p. 13-20, 2003.

19. М.Я. Щелев ЭОП'ы для лазеров, лазеры для ЭОП'ов (Опыт работы Отдела фотоэлектроники ИОФ РАН), *Квантовая электроника* № 10, т.37, стр. 927-933, 2007г.

20. V.P. Degtyareva, M.A. Monastyrskiy, M.Ya. Schelev, and V.A. Tarasov, Dynamics of electron bunches in subpicosecond streak tubes // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (NIM-A)*, 1999, A 427, p. 225-229.

21. M.A. Monastyrskiy, D.E. Greenfield, and V.A. Tarasov, MASIM 3D package for precise CPO calculations based on perturbation technique // *Software Demonstrations Abstract Book, 'CPO-7' International Conference, Cambridge, UK, 2006*, p.23

С.В. Андреев,

В.С. Белолипецкий,

В.И. Лозовой,

М.А. Монастырский

Ю.Н. Сердюченко,

М.Я. Щелев