

### Заключение

В результате проведенной оптимизация ионной оптики разработана интегрированная ЗФС, основой которой являются дублеты магнитных квадрупольных линз новой конструкции с источниками питания и модульный ферромагнитный сканер с системой управления сканированием и синхронизированным сбором данных. Первые эксперименты по определению параметров сфокусированного пучка на мишени дали следующие результаты: размеры пучка  $3,4 \times 2,5$  мкм, ток — 600 пА.

### Литература

1. Watt F., Bettiol A. A., J. A. van Kan et al.// Int. Journal of Nanoscience. 2005. V. 4. № 3. P. 269—286.
2. Martin B. W.// Scanning electron microscopy. 1980. V. I. P. 419—438.
3. Ryan C. G., Jamieson D. N.// Nucl. Instr. and Meth B 158. 1999. P. 97—106.
4. Вергунов А. Д., Левченко Ю. З., Новиков М. Т., Пустряк В. М., Сторишко В. Е., Чеканов С. Я.// ВАНТ. Сер. ТЭФ. 1985. № 1(22). С. 26—28.

5. Ponomarev A. G., Miroshnichenko V. I., Storizhko V. E.// Nucl. Instr. and Meth. A 586/1-2. 2003. P. 20—25.
6. Ponomarev A. G., Melnik K. I., Miroshnichenko V. I.// Nucl. Instr. and Meth B 231. 2005. P. 86—93.
7. Дымников А. Д., Явор С. Я.// ЖТФ. 1963. Т. 33. Вып. 7. С. 851—858.
8. Dymnikov A., Hellborg R.// Nucl. Instr. and Meth. A 330. 1993. P. 323—362.
9. Абрамович С. Н., Завьялов Н. В., Звенигородский А. Г. и др.// ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 2. С. 6—12.
10. Пономарев А. Г., Ребров В. А., Магиллин Д. В. Мультиплет квадрупольных линз: Пат. Украины UA 75687, H 01 J 3/20, H 01 J 3/22 (2006.01); 2004021145. 15.05.2006; Бюл. № 5.
11. Rebrov V. A., Ponomarev A. G., Palchik V. K., Melnik N. G. The new design of magnetic quadrupole lens doublet manufactured from a single piece// Nucl. Instr. and Meth. B. 2007. doi:10.1016/j.nimb.2007.01.275.
12. Сайко Н. А., Пономарев А. Г., Мордик С. Н. и др.// ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 3. С. 72—75.
13. Sayko N. A., Ponomarev A. G., Drozdenko A. A. The beam scanning control and data acquisition on the Sumy nuclear microprobe// Nucl. Instr. and Meth. B. 2007. doi:10.1016/j.nimb.2007.01.282.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

## Proton scanning microprobe with integrated probeforming system

A. G. Ponomarev, V. A. Rebrov, N. A. Sayko, A. B. Dudnik, P. A. Pavlenko,  
A. A. Drozdenko, V. I. Miroshnichenko, V. E. Storizhko  
Applied Physics Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Sumy, Ukraine

*The experiments with the object to determine the beam parameters on the target are started at the new proton scanning microprobe based on a single-ended 2 MV Van de Graaff accelerator "SOKOL". The main microprobe feature is the integrated probeforming system which is based on the doublet of magnetic quadrupole lenses of new design. The general approach of the ion optic optimization of the probeforming system is considered. The description of the microprobe design features is given. The experimental data of the beam parameters on the target are cited.*

УДК 537.533.3

## Временная и пространственная фокусировка фотоэлектронных пучков в нестационарных электрических полях (численное моделирование и эксперимент)

С. В. Андреев, В. С. Белолипецкий, Г. И. Брюхневич, Н. С. Воробьев,  
В. П. Дегтярева, Е. А. Кузьменко, В. И. Лозовой, М. А. Монастырский,  
Ю. И. Сердюченко, В. А. Тарасов, М. Я. Щелев  
Институт общей физики РАН им. А. М. Прохорова, Москва, Россия

Д. Э. Гринфельд

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

*Проведены теоретическое исследование и компьютерное моделирование пространственно-временной фокусировки фотоэлектронных пучков в нестационарных электрических*

полях. Разработана конструкция и изготовлены экспериментальные образцы фотоэлектронной пушки, совмещающей в себе функции фотохронографа и формирователя ультракоротких электронных пучков, предназначенных для экспериментов по электронной дифракции с временным разрешением (TRED). Экспериментально подтверждена возможность сокращения длительности исходного фотоэлектронного пучка в десятки раз (исходный 7 пс импульс был “сжат” до 285 фс). Показано, что теоретический предел временного разрешения, установленный в 1955 г. Е. К. Завойским и С. Д. Фанченко, может быть увеличен благодаря применению временной фокусировки фотоэлектронных пучков в специально выбранных электрических полях.

### Введение и теоретическая часть

Два главных преимущества ускоренных электронных пучков — малая длина волны де-Бройля ( $\lambda \sim 10^{-2}$  нм при энергии пучка  $\sim 20\text{--}30$  кэВ) и существенно более сильное (в  $10^6$  раз), 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. Импульсный лазер 1 генерирует субпикосекундный световой импульс, который затем разделяется на два импульса с помощью делителя 2. Пройдя через оптическую линию задержки, первый импульс возбуждает исследуемый образец. Второй импульс поступает на вход фотоэлектронной пушки, взаимодействует с фотокатодом 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 дифракционную картину, привязанную к моменту времени прихода пучка на образец. Варьируя временной интервал между исходным лазерным импульсом и моментом времени прихода электронного пучка на образец, мы получаем прямую информацию о переходных процессах на атомно-молекулярном уровне.

Временное разрешение TRED-метода определяется в основном длительностями исходного лазерного импульса электронного пучка на мишени. В то время как современные импульсные лазеры с самосинхронизацией мод обеспечивают световой импульс с длительностью менее 10 фс, получение электронного пучка аналогичной длительности представляет собой серьезную проблему. Наиболее труднопреодолимым препятствием здесь является разброс фотоэлектронов по 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

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

где  $m$  и  $e$  — соответственно, масса и заряд электрона;

$\delta \epsilon$  — начальный энергетический разброс;

$E$  — напряженность электрического поля вблизи поверхности фотокатода.

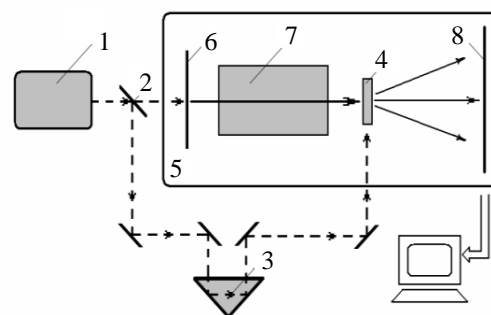


Рис. 1. Принципиальная схема TRED-экспериментов:

1 — фемтосекундный лазер; 2 — делитель пучка; 3 — линия оптической задержки; 4 — исследуемый образец; 5 — фотоэлектронная пушка; 6 — фотокатод; 7 — система электродов; 8 — приемник изображения

Важно отметить, что временная хроматическая aberrация (1) является принципиально неустранимой в статическом электрическом поле и может быть лишь уменьшена за счет увеличения напряженности электрического поля  $E$ . Используя терминологию теоретической электронной оптики, можно утверждать, что временная фокусировка первого порядка (идеальная временная фокусировка) принципиально недостижима в статических полях. Из формулы (1) следует, что получение временного разрешения 150—200 фс в статических полях требует увеличения прикатодного поля  $E$  до величин порядка 10 кВ/мм и более. Учитывая связанные с порогом электрического пробоя в вакууме ограничения, такое “лобовое” решение проблемы представляется малопродуктивным.

Эффективный способ обеспечить временную фокусировку фотоэлектронных пучков с использованием нестационарных электрических полей и, таким образом, преодолеть предел, диктуемый формулой Завойского–Фанченко, был впервые

предложен авторами в работе [6] и затем развит в работах [7—12]. Выполненные в этих работах теоретические и компьютерные исследования показали, что в специальном образом выбранном нестационарном электрическом поле в противоположность статическому электрическому полю возможно полное устранение временной хроматической aberrации первого порядка, т. е. временная фокусировка. 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. В некоторый момент времени “задние” частицы нагоняют “передние”, и это приводит к уменьшению длительности пучка. Именно этот момент определяет положение временного фокуса, в котором должен быть помещен исследуемый образец. Указанный принцип в определенной степени аналогичен принципу группировки заряженных частиц в клистронах. Существенное отличие 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. Кроме того, сжатие пучка до субпикосекундной длительности требует учета aberrаций второго и третьего порядков.

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  $\tau$  фотоэлектронов с фото катода — являются тесно связанными в том смысле, что соответствующие коэффициенты  $[T|\sqrt{\varepsilon}]$ ,  $[T|\tau]$  в aberrационном разложении

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

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

$$[T|\sqrt{\varepsilon}] = -\frac{\sqrt{2m}}{eE}[T|\tau].$$

В работах [7—9] была получена и исследована система дифференциальных уравнений

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

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

связывающая эволюцию aberrационного коэффициента первого порядка  $[T|\tau]$  и вариации первого порядка  $[E|\tau]$  полной энергии частицы по отношению к начальному моменту времени  $\tau$  вдоль главной оптической оси.

Здесь  $\Phi(z, t)$  — зависящий от времени электрический потенциал;

$W = W(z)$  — средняя компонента кинетической энергии электронов в аксиальном направлении;

$J_0$  — ток в пучке в начальный момент времени;

$S(z)$  — локальное сечение пучка.

Начальные условия для системы уравнений (3)—(4) имеют вид  $[T|\tau]_{z=0} = 1$ ,  $[E|\tau]_{z=0} = 0$ .

Второй член в уравнении (4) 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 (3)—(4) имеет тривиальное решение  $[T|\tau] = 1$ ,  $[E|\tau] = 0$ , которое, очевидно, полностью соответствует формуле Завойского—Фанченко (1).

Таким образом, полученная система уравнений 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 уравнения (4) 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  $\tau$ , в результате кулоновского взаимодействия приобретают большую энергию, чем “задние”, что приводит к уширению электронного пучка.

В статическом поле указанный эффект не может быть скомпенсирован. Напротив, в зависящем от времени электрическом поле первый член в правой части уравнения (4) отличен от нуля и может быть выбран таким, чтобы скомпенсировать (по крайней мере частично) энергетический разброс, обусловленный кулоновским взаимодействием. Таким образом, нестационарные электрические поля не только обеспечивают временную фокусировку первого порядка, но и существенно уменьшают временное уширение пучка, вызванное кулоновскими эффектами. Этот вывод был

подтвержден в результате детальных вычислительных экспериментов, в которых моделирование кулоновского взаимодействия осуществлялось не с помощью приближенного представления, использованного в уравнении (4), а непосредственным моделированием парных взаимодействий [10].

Во временном фокусе первого порядка оказывается значительным вклад временных aberrаций второго порядка. Если длительность  $\delta t$  исходного лазерного импульса велика, в aberrационном разложении (2) преобладает член  $[T|\tau^2]\tau^2$ , и длительность пучка на образце зависит от  $\delta t$  квадратично. “Укорочение” лазерного импульса может улучшить временное разрешение на образце, но только до предела, обусловленного наличием временной хроматической aberrации второго порядка  $[T|\epsilon]\epsilon$ . Как показано в [6], aberrация  $[T|\epsilon]\epsilon$  может быть полностью устранена путем применения более сложной системы временной фокусировки, что является перспективным для дальнейшего повышения временного разрешения. Но даже и в случае полной компенсации временной aberrации  $[T|\epsilon]\epsilon$ , закон сохранения фазового объема ограничивает сжатие электронного пучка и устанавливает соотношение между его длительностью и энергетическим разбросом, аналогичное соотношению неопределенности Гейзенберга. В терминах электронной оптики это выражается как неустранимость “смешанной” aberrации  $[T|\tau\sqrt{\epsilon}]\tau\sqrt{\epsilon}$ .

### Результаты компьютерного моделирования и экспериментальные результаты по временной и пространственной фокусировкам фотоэлектронных пучков

Для того чтобы подтвердить теоретически обоснованную возможность временной фокусировки фотоэлектронных пучков с помощью нестационарных электрических полей, в отделе фотоэлектроники ИОФ РАН был рассчитан и практически реализован экспериментальный обра-

зец фотоэлектронной пушки, показанный на рис. 2. Компьютерное моделирование осуществлялось с применением пакетов прикладных программ ELIM/DYNAMICS [13] и MASIM 3D [14].



Рис. 2. Общий вид фотоэлектронной пушки с нестационарными электрическими полями, предназначенной для TRED-экспериментов

Принципиальная схема функционирования фотоэлектронной пушки и электронная схема всей установки для временной компрессии фотоэлектронных пучков 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 сетку, пучок попадает в область нестационарного электрического поля, управляемого электродом 3 (см. рис. 3), на который подается потенциал, изменяющийся во времени со скоростью несколько киловольт в наносекунду.

Генератор электрических импульсов синхронизован с иницирующим лазером, что обеспечивает возможность варьирования временной задержки между моментами эмиссии фотоэлектронного пучка с фотокатода и началом изменения электрического поля, ответственного за временную фокусировку пучка.

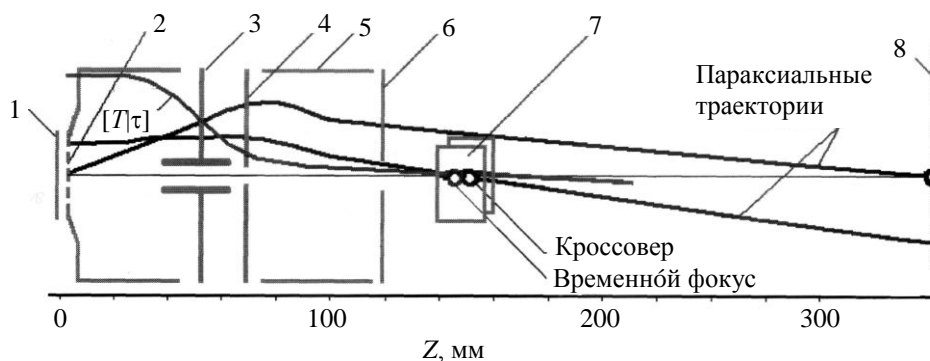


Рис. 3. Принципиальная схема фотоэлектронной пушки для временной фокусировки электронных пучков с помощью нестационарных электрических полей:

- 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

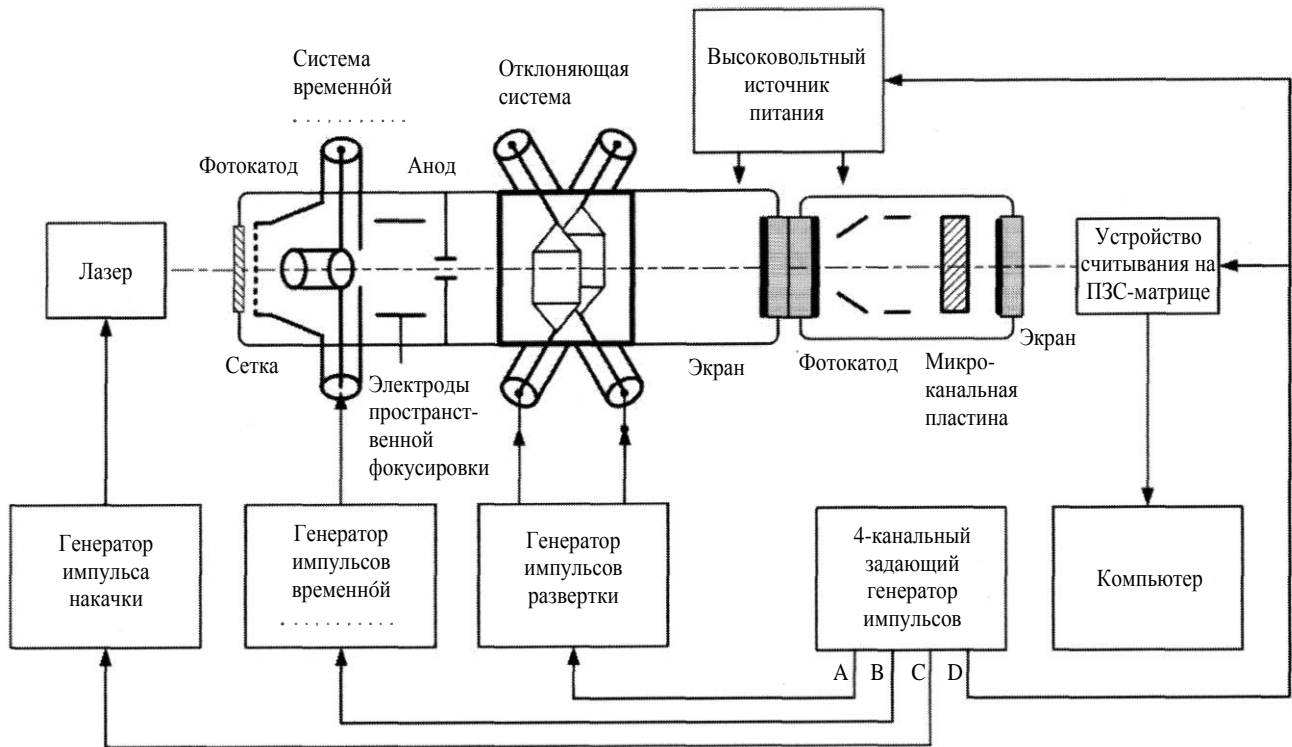
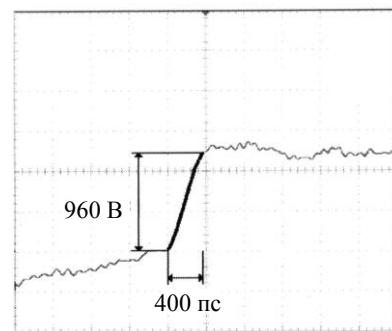


Рис. 4. Принципиальная электронная схема установки по временной фокусировке фотоэлектронных пучков

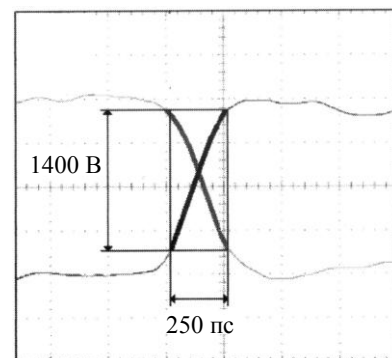
Как указывалось выше, при прохождении пучка в нестационарном (в данном случае квазилинейно возрастающем) электрическом поле, энергии “передних” и “задних” электронов пучка становятся различными и, как показано на рис. 3, абберационный коэффициент  $[T] \tau$  начинает уменьшаться, обращаясь в нуль в плоскости временной фокусировки, расположенной за анодом 6. Электроды 4 и 5 (см. рис. 3) обеспечивают пространственную фокусировку пучка таким образом, что плоскость пространственного изображения совпадает с приемником изображения, в то время как кроссовер пучка оказывается практически совмещенным с временным фокусом. Динамический дефлектор 7 (см. рис. 3) обеспечивает развертку пучка по экрану с фазовой скоростью, близкой к трем скоростям света, что дает возможность с достаточной точностью измерить длительность электронного пучка на образце.

Результаты экспериментов по временной фокусировке фотоэлектронных пучков с применением вновь разработанной фотоэлектронной пушки показаны на рис. 5—8. На рис. 5 представлены осциллограммы электрических импульсов в системе временной фокусировки (см. рис. 5, а) и системе развертки (см. рис. 5, б); на рис. 6 — расчетная зависимость длительности сжатого электронного пучка от длительности исходного импульса. От-

мечены точки, подтвержденные экспериментальными исследованиями.

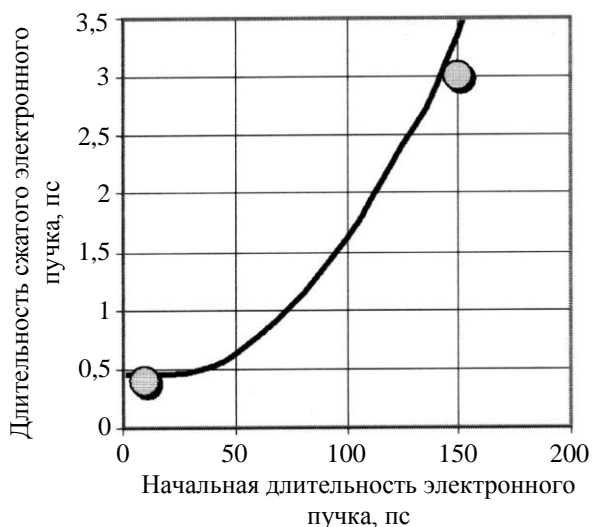


а

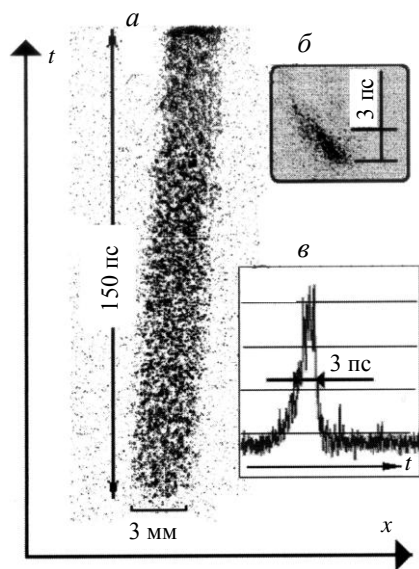


б

Рис. 5. Электрические импульсы: а — в системе временной фокусировки (крутизна нарастания импульса 2,4 кВ/нс); б — в системе временной развертки



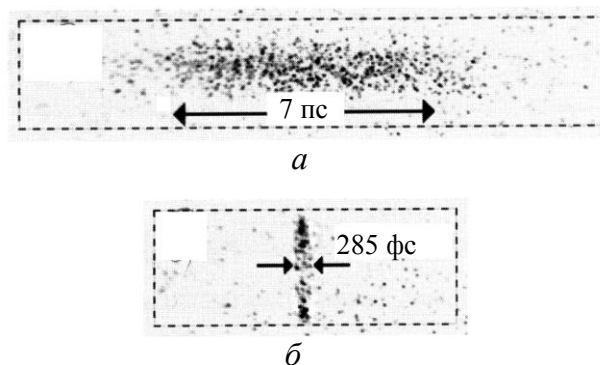
**Рис. 6.** Теоретическая кривая и экспериментальные точки, соответствующие временной фокусировке (временному сжатию) фотоэлектронных пучков в разрабатываемой фотоэлектронной пушке. (Скорость нарастания фокусирующего электрического поля  $\sim 1$  кВ/нс)



**Рис. 7.** Сжатие 150-пс электронного пучка при скорости нарастания фокусирующего электрического поля  $\sim 1$  кВ/нс:

*a* — развернутое изображение исходного электронного пучка (150-пс лазер, временная фокусировка выключена);  
*б* — развернутое изображение сжатого электронного пучка;  
*в* — профиль интенсивности сжатого пучка

Так, при длительности инициирующего фотоэмиссионного лазерного импульса 150 пс, динамическое сжатие электронного пучка приводит к 50-кратной компрессии до длительности 3 пс (см. рис. 7). При использовании более короткого лазерного импульса длительностью 7 пс возможно получение пучка электронов с длительностью, не превышающей 300 фс (см. рис. 8).



**Рис. 8.** Сжатие исходного 7-пс электронного импульса (скорость нарастания фокусирующего электрического поля  $\sim 2,4$  кВ/нс):

*a* — развернутое изображение исходного электронного пучка;  
*б* — развернутое изображение электронного пучка, сжатого до длительности 285 фс

### Заключение

Основные результаты представленной работы могут быть кратко сформулированы следующим образом.

1. Детально разработана 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 последних позволяет превзойти теоретический предел временного разрешения, установленный для стационарных полей Е. К. Завойским и С. Д. Фанченко. Показано, что в отличие от стационарных полей в нестационарных электрических полях эффекты пространственного заряда могут быть частично скомпенсированы за счет оптимального выбора амплитуды нестационарного поля, ответственного за временную фокусировку.

2. Выполнено компьютерное моделирование фотоэлектронной пушки с нестационарным электрическим полем, предназначенной для временной фокусировки фотоэлектронных пучков в экспериментах по электронной дифракции с временным разрешением (TRED-экспериментов). Сконструирован экспериментальный образец. Созданная фотоэлектронная пушка представляет собой уникальную электронно-оптическую систему, в которой одновременно осуществляются временная и пространственная фокусировки первого порядка.

3. Серия тестовых экспериментов полностью подтвердила теоретические положения и результаты компьютерного моделирования, положенные в основу практической реализации фотоэлектронной

пушки. В частности, фотоэлектронный пучок, полученный от 7-пс лазерного импульса, был сфокусирован во времени до длительности 285 фс. Данный эксперимент выполнен при скорости нарастания фокусирующего электрического поля  $\sim 2,4$  кВ/нс и фазовой скорости развертки пучка по экрану  $\sim 2,8$  скорости света.

*Работа выполнена в рамках проекта Международного научно-технического центра (грант ИСТС № 2343), а также при поддержке РФФИ (грант № 05-02-39026). Разработка программного обеспечения для проведения численного эксперимента финансировалась Президентским грантом МК-2123.2006.2.*

#### Литература

1. Williamson J. C., Dantus M., Kim S. B., Zewail A. H. Ultrafast diffraction and molecular structure// *Chemical Physics Letters*. 1992. № 196 (6). P. 529—534.
2. Lobastov V. A., Srinivasan R., Zewail A. H. Four-dimensional ultrafast electron microscopy// *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 2005. V. 102. № 20. P. 7069—7073.
3. Siwick B. J., Dwyer J. R., Jordan R. E., Dwayne Miller R. J. An atomic-level view of melting using femtosecond electron diffraction// *Science*. 2003. V. 302. P. 1382—1385.
4. Siwick B. J., Dwyer J. R., Jordan R. E., Dwayne Miller R. J. Femtosecond electron diffraction studies of strongly driven structural phase transitions// *Chemical physics*. 2004. V. 299. P. 285—305.
5. Завойский Е. К., Фанченко С. Д. Физические основы электронно-оптической хронографии// *Доклады Академии наук СССР*. 1956. № 108 (2). С. 218—221.
6. Monastyrskiy M. A., Andreev S. V., Greenfield D. E., Tarasov V. A., Schelev M. Ya. Theoretical and computer study on the possibility of subfemtosecond (attosecond) temporal focusing of photoelectron probing bunches with quasi-stationary electromagnetic fields// *SPIE Proceedings*. 2003. V. 4948. P. 305—310.
7. Andreev S. V., Greenfield D. E., Monastyrskiy M. A., Tarasov V. A., Schelev M. Ya. Formation of sub-femtosecond photoelectron bunches in time-dependent electric field// *Ibid*. V. 5398. P. 1—15.
8. Monastyrskiy M., Andreev S., Greenfield D., Bryukhnevich G., Schelev M., Tarasov V. Computer modeling of a subfemtosecond photoelectron gun with time-dependent electric field for TRED experiments// *Ibid*. 2004. V. 5580. P. 324—334.
9. Andreev S., Greenfield D., Monastyrskiy M., Tarasov V. Spatial and temporal focusing of femtosecond electron bunches in time-dependent electric fields// *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research (NIM), Series A*, 2008 (в печати).
10. Greenfield D. E., Monastyrskiy M. A. New approach to the problem of Coulomb interaction in electron and ion bunches// *Ibid*. (в печати).
11. Andreev S., Bryukhnevich G., Degtyareva V., Greenfield D., Lozovoi V., Monastyrskiy M., Schelev M., Serdiuchenko Y., Tarasov V., Vorobiev N. The results of computer and experimental studies on compressing the ultrashort photoelectron bunches with time-dependent electric fields. *Proceedings of the 26<sup>th</sup> International Congress on High-Speed Photography and Photonics (September 2006, Xi'an, China)*// *SPIE Proceedings*. 2007. V. 6279. 627970-02.
12. Greenfield D. E., Monastyrskiy M. A., Lozovoi V. I., Ya M., Schelev, M. Ya., Serduchenko Yu. I. New computer modeling and experimental results on a photoelectron gun with time-dependent electric field// *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. 2007. № 4 (в печати).
13. Degtyareva V. P., Monastyrskiy M. A., Schelev M. Ya., Tarasov V. A. Dynamics of electron bunches in subpicosecond streak tubes// *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (NIM-A)*. 1999. A 427. P. 225—229.
14. Monastyrskiy M. A., Greenfield D. E., Tarasov V. A. MASIM 3D package for precise CPO calculations based on perturbation technique// *Software Demonstrations Abstract Book, 'CPO-7' International Conference, Cambridge, UK, 2006*. P. 23.

*Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.*

## Temporal and spatial focusing of photoelectron bunches in non-stationary electric field (simulation and experiment)

*S. V. Andreev, V. S. Belolipetskiy, G. I. Brukhnevich, N. S. Vorob'ev, V. P. Degtyareva, E. A. Kuzmenko, V. I. Lozovoy, M. A. Monastyrskiy, Yu. I. Serduchenko, V. A. Tarasov, M. Ya. Schelev*  
Prokhorov General Physics Institute, RAS, Moscow, Russia

*D. E. Greenfield*

Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*The theoretical and numerical study of the spatial-temporal focusing of photoelectron bunches in non-stationary electric fields was carried out. The photoelectron gun designed on the basis of this research combines the functions of a photochronograph and an ultrashort electron bunch generator for time-resolved electron diffraction experiments. The possibility to shrink the photoelectron bunch duration several times (the original pulse of 7 ps was "compressed" down to 285 fs) was confirmed experimentally. It was shown that the theoretical limitation of the temporal resolution found by E. K. Zavoiski and S. D. Fanchenko in 1955, may be overcome due to the principle of temporal focusing in specially chosen time-dependant fields.*