

Электронно-оптическая метрология с фемтосекундным временным разрешением (теория и эксперимент)

С.В.Андреев, Н.С.Воробьев, Д.Э.Гринфельд, В.И.Лозовой,
М.А.Монастырский, Ю.Н.Сердюченко, А.В.Смирнов, М.Я. Щелев

Применительно к времяанализирующим электронно-оптическим преобразователям (ЭОП) теоретически исследованы и экспериментально реализованы принципы одновременной пространственной и временной фокусировки фотоэлектронных пучков в нестационарных электрических полях. Теоретически показано, что применение нестационарных фокусирующих электрических полей позволяет превысить теоретический предел временного разрешения ЭОПа (10^{-14} с), установленный для стационарных полей Е.К.Завойским и С.Д.Фанченко в середине 40-х–50-х годов прошлого века. Возможность формирования электронных пакетов с энергией 10–30 кэВ субфемтосекундной длительности (менее 10^{-15} с) дает новый импульс развитию электронной дифракции с временным разрешением, являющейся прямым методом исследования атомно-молекулярной динамики в твердых и газообразных средах.

Ключевые слова: времяанализирующий ЭОП, фотоэлектронная пушка, временные aberrации, нестационарные фокусирующие поля, «временное сжатие» фотоэлектронных пакетов.

1. Введение

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

Импульсный лазер 1 генерирует субпикосекундный световой импульс, который делится полупрозрачным зер-

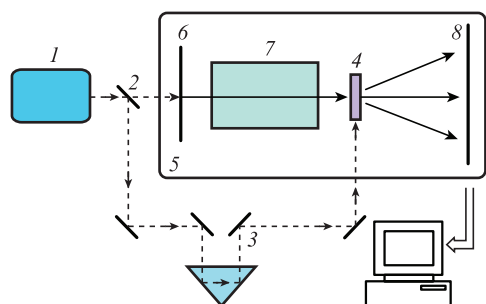


Рис.1. Принципиальная схема устройства для проведения TRED-экспериментов:

1 – фемтосекундный лазер; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – линия оптической задержки; 4 – исследуемый образец; 5 – фотоэлектронная пушка; 6 – фотокатод; 7 – система электродов; 8 – приемник изображения (например, электронно-чувствительная ПЗС-матрица).

С.В.Андреев, Н.С.Воробьев, Д.Э.Гринфельд, В.И.Лозовой, М.А.Монастырский, Ю.Н.Сердюченко, А.В.Смирнов, М.Я. Щелев. Институт общей физики РАН им. А.М.Прохорова, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: m.schelev@gan.gpi.ru

Поступила в редакцию 24 декабря 2012 г.

калом 2 на два импульса. Пройдя через оптическую линию задержки 3, первый импульс возбуждает исследуемый образец 4. Второй импульс поступает на вход фотоэлектронной пушки 5 и, взаимодействуя с фотокатодом 6, генерирует пучок фотоэлектронов, который затем ускоряется и фокусируется системой электродов 7 на образец 4. Взаимодействуя с атомно-молекулярной структурой образца, электронный пучок создает на приемнике изображения 8 дифракционную картину в момент прихода на образец возбуждающего лазерного импульса. Варьируя временной интервал между исходным лазерным импульсом и моментом прихода электронного пучка на образец, можно получать прямую информацию на атомно-молекулярном уровне о переходных процессах внутри исследуемого объекта.

2. Теоретические основы фокусировки в стационарных и квазистационарных полях фотоэлектронных пучков в ЭОПе

Временное разрешение TRED-метода в режиме «на просвет» в основном определяется длительностью электронного пучка, «просвечивающего» мишень. Современные лазеры с самосинхронизацией мод генерируют оптические импульсы длительностью в несколько фемтосекунд, однако получение фотоэлектронного пучка аналогичной длительности представляет собой серьезную проблему. В настоящей статье суммируются итоги работы Отдела фотоэлектроники ИОФ РАН за последнее десятилетие в области создания времяанализирующих ЭОПов и фотоэлектронных пушек с субпикосекундным временным разрешением. Наиболее труднопреодолимым препятствием при продвижении временного разрешения ЭОПа в фемтосекундный диапазон является разброс начальных энергий фотоэлектронов $\delta\epsilon$, который для современных классических фотокатодов составляет 0.3–1 эВ при их работе в видимом и ближнем ИК диапазонах. В соответствии с фор-

мулой Завойского–Фанченко [5] временной разброс электронов в зависимости от их начальных энергий в пучке, сформированном в статическом фокусирующем поле,

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

где m и e – масса и заряд электрона, а 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 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 для достижения временного разрешения лучше 100 фс в статических полях требуется увеличение прикатодного поля E до ~ 25 кВ/мм и более. Учитывая ограничения, связанные с наличием порога электрического пробоя в вакууме, такое «лобовое» решение проблемы требует значительных технических усилий.

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 предложен нами в работе [6] и затем развит в [7–12]. Выполненные в этих работах теоретические и компьютерные исследования показали, что, в противоположность статическому электрическому полю, в специальном образом выбранном нестационарном электрическом поле можно полностью устранить временную хроматическую aberrацию первого порядка и, следовательно, обеспечить временную фокусировку первого порядка. Это объясняется тем, что зависящее от времени электрическое поле вносит дополнительный разброс по энергиям электронов 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 тот момент времени, когда длительность электронного пучка становится минимальной, определяет положение временного фокуса первого порядка в пространстве, в которое и должен быть помещен исследуемый образец. Указанный принцип в определенной степени аналогичен принципу группировки заряженных частиц в клистродах. 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.

Нестационарные электрические поля позволяют обеспечить временную фокусировку первого порядка, а также существенно уменьшить временное уширение пучка, вызванное кулоновскими эффектами. Этот вывод был подтвержден нами в результате детальных вычислительных экспериментов, в которых моделирование кулоновского взаимодействия осуществлялось на основе специально разработанного общего «фрактального» алгоритма [10].

Во временном фокусе первого порядка оказывается значительным вклад временных aberrаций второго порядка. Если длительность δt исходного лазерного им-

пульса достаточно велика, то длительность пучка на образце зависит от δt квадратично. Укорочение лазерного импульса может привести к сокращению длительности электронного импульса в плоскости образца, но только до предела, обусловленного наличием временной хроматической aberrации второго порядка. Как показано в [6], эта aberrация может быть полностью устранена путем применения дополнительного стационарного магнитного поля, что совместно с увеличением скорости изменения электрического поля представляет собой весьма перспективный путь дальнейшего сокращения длительности электронного пучка на образце. Но, даже в случае полной компенсации временной хроматической aberrации второго порядка, из известной теоремы Лиувилля о сохранении фазового объема следует, что наличие других (смешанных) aberrаций не позволит нам преодолеть предел, по сути аналогичный соотношению неопределенности Гейзенберга.

3. Компьютерное моделирование и практическая реализация гибридного электронно-оптического устройства «времена анализирующий ЭОП – фотоэлектронная пушка»

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. Компьютерное моделирование осуществлялось с применением пакетов прикладных программ ELIM/DYNAMICS [13] и MASIM [14], также разработанных сотрудниками Отдела.

Один из последних вариантов разработанного и изготовленного в Отделе фотоэлектроники ИОФ РАН гибридного устройства «ЭОП – фотоэлектронная пушка» показан на рис.2. Эти гибридные устройства отличаются от ранее изготовленных тем, что в них блок фотокатод – сетка выполнен в виде «сосредоточенной емкости» с низкоиндуктивной системой подачи импульсного напряжения на промежуток фотокатод – сетка. В режиме ЭОПа усовершенствованное гибридное устройство должно обеспечить достижение временного разрешения не хуже 100 фс при импульсной напряженности поля не менее 25 кВ/мм



Рис.2. Модернизированный образец гибридного устройства «ЭОП – фотоэлектронная пушка».

(электрические импульсы с амплитудой, превышающей 12.5 кВ, прикладываются к промежутку фотокатод–сетка длиной 0.5 мм). Как показывает численное моделирование, эта же конструкция в режиме фотоэлектронной пушки позволяет «сжать» электронный пучок до 35 фс.

4. Результаты экспериментов

Принципиальная схема функционирования фотоэлектронной пушки показана на рис.3. Лазерный импульс 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 импульсного напряжения в зависимости от конкретного режима временной фокусировки составляет несколько киловольт за наносекунду. Генератор зависящего от времени электрического поля жестко синхронизован с инициирующим лазером, что обеспечивает возможность варьирования временной задержки между моментами эмиссии фотоэлектронного пучка с фотокатода и началом генерации электрического поля, ответственного за временную фокусировку пучка. Как указывалось выше, при прохождении пучка в нестационарном (в данном случае – линейно возрастающем) электрическом поле энергии «передних» и «задних» электронов пучка становятся различными и, как показано на рис.3, абберационный коэффициент T_r , ответственный за временную фокусировку, начинает уменьшаться, обращаясь в нуль в плоскости временной фокусировки, расположенной за анодом 6. Электроды 4 и 5 осуществляют пространственную фокусировку пучка таким образом, что плоскость пространственного изображения совпадает с приемником изображения 8 (например, с плоскостью электронно-чувствительной ПЗС-матрицы), тогда как кроссовер пучка оказывается практически совмещенным с временным фокусом. Динамический дефлектор 7 производит развертку пучка по экрану с фазовой скоростью, близкой к трем скоростям света, что позволяет с достаточной точностью измерять длительность электронного пучка на образце. На рис.4 представлены результаты экспериментов по временной фокусировке фотоэлектронных пучков с применением разработанных нами фотоэлектронных пушек [15].

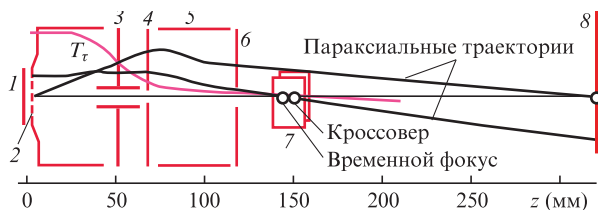


Рис.3. Принципиальная схема фотоэлектронной пушки для пространственно-временной фокусировки электронных пучков при помощи стационарных и нестационарных электрических полей: 1 – фотокатод; 2 – ускоряющая мелкоструктурная сетка; 3 – электрод, генерирующий линейно изменяющееся во времени электрическое поле;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

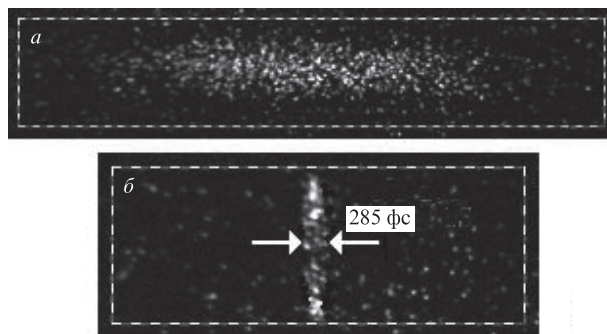


Рис.4. Хронографическое изображение электронного пучка, полученного с помощью оптического импульса длительностью 7 пс полупроводникового лазера без временной фокусировки в режиме щелевой развертки (а), и хронографическое изображение сфокусированного во времени электронного пучка длительностью 285 фс (скорость изменения фокусирующего во времени электрического поля ~2.4 кВ/нс, скорость развертки ~2.8c, где c – скорость света) (б).

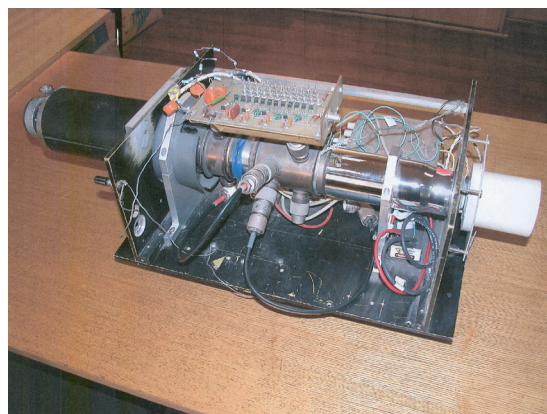


Рис.5. Экспериментальная камера для проведения статических и динамических испытаний гибридного устройства «ЭОП–фотоэлектронная пушка».

Для дальнейшего сокращения длительности исходных «фотоэлектронных пакетов» [16] необходимо увеличение скорости изменения во времени фокусирующего электрического поля, что влечет за собой создание новой импульсной схемотехники. Более того, необходим поиск, а возможно и разработка, нового поколения активных элементов (лавинных транзисторов, обострителей и т.п.), обеспечивающих коммутацию электрических импульсов с амплитудой 1–10 кВ при длительности переходной характеристики не более 100 пс. Другими словами, необходимо создание схемотехнических устройств, способных формировать киловольтные электрические импульсы с крутизной нарастания не менее 10^{13} В/с. При этом время срабатывания таких устройств не должно превышать единицы наносекунд при нестабильностях срабатывания в единицы пикосекунд. Один из используемых нами для решения данной проблемы подходов состоит в разработке импульсных схем, содержащих цепочки из последовательно соединенных лавинных транзисторов и полупроводниковых обострителей (рис.5).

5. Заключение

Основные результаты НИР, выполненной Отделом фотоэлектроники за последнее десятилетие, могут быть сформулированы следующим образом.

1. Разработана детальная абберационная теория пространственно-временной фокусировки фотоэлектронных пучков в нестационарных электрических полях. Показано, что в таких полях, выбранных надлежащим образом, может быть обеспечена временная фокусировка первого порядка, которая принципиально невозможна в статических полях. Получено прямое обобщение формулы Завойского–Фанченко на случай нестационарных полей и показано, что их применение позволяет заметно (по крайней мере на порядок величины) превысить теоретический предел временного разрешения для фотоэлектронных пучков (10 фс), установленный для стационарных фокусирующих 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 в значительной степени скомпенсированы за счет оптимального выбора параметров электрического поля, ответственного за временную фокусировку.

2. С применением разработанных в Отделе фотоэлектроники пакетов прикладных программ выполнено компьютерное моделирование, практическое конструирование и изготовлена серия экспериментальных образцов гибридного устройства «ЭОП–фотоэлектронная пушка». Созданное фотоэлектронное устройство представляет собой уникальную электронно-оптическую систему, в которой впервые в истории электронно-оптического приборостроения одновременно обеспечена как временная, так и пространственная фокусировка фотоэлектронных пучков.

3. Серия тестовых экспериментов, проведенных с использованием созданного гибридного устройства «ЭОП–фотоэлектронная пушка», подтвердила теоретические положения и результаты компьютерного моделирования, положенные в основу практической реализации этого уникального устройства. В частности, в результате проведенных экспериментов фотоэлектронный пучок, полученный с помощью оптического импульса длительностью 7 пс полупроводникового лазера, был сжат до 285 фс. Данный эксперимент выполнен при скорости изменения фокусирующего во времени электрического поля ~ 2.4 кВ/нс и фазовой скорости развертки пучка по экрану $\sim 2.8c$, где c – скорость света.

4. Теоретически показано, что для экспериментальной реализации фотоэлектронных пакетов длительностью менее 100 фс требуются нестационарные фокусирующие поля с амплитудой в несколько киловольт и с крутизной нарастания не менее 10^{13} В/с.

Авторы выражают глубокую благодарность всем сотрудникам исследовательско-технологической цепочки Отдела фотоэлектроники ИОФ РАН за их самоотверженный труд, результатом которого явилась практическая реализация опытных образцов гибридного устройства «ЭОП–фотоэлектронная пушка».

Работа выполнена в рамках базового бюджетного финансирования, в том числе в рамках реализации проектов по программам Президиума РАН «Фемтосекундная оптика и новые оптические материалы» и «Экстремальные световые поля и их приложения», а также по Проекту МНТЦ № 2643.

- Williamson J.C., Dantus M., Kim S.B., Zewail A.H. *Chem. Phys. Lett.*, **196** (6), 529 (1992).
- Lobastov V.A., Srinivasan R., Zewail A.H. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **102** (20), 7069 (2005).
- Siwick B.J., Dwyer J.R., Jordan R.E., Dwayne Miller R.J. *Science*, **302**, 1382 (2003).
- Siwick B.J., Dwyer J.R., Jordan R.E., Dwayne Miller R.J. *Chem. Phys.*, **299**, 285 (2004).
- Завойский Е.К., Фанченко С.Д. *ДАН СССР*, **108** (2), 218 (1956).
- Monastyrskiy M.A., Andreev S.V., Greenfield D.E., Tarasov V.A., Schelev M.Ya. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4948**, 305 (2003).
- Andreev S.V., Greenfield D.E., Monastyrskiy M.A., Tarasov V.A., Schelev M.Ya. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5398**, 1 (2004).
- Monastyrskiy M., Andreev S., Greenfield D., Bryukhnevich G., Schelev M., Tarasov V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5580**, 324 (2004).
- Andreev S., Greenfield D., Monastyrskiy M., Tarasov V. *Physics Procedia*, **1** (1), 273 (2008).
- Greenfield D., Monastyrskiy M. *Physics Procedia*, **1** (1), 217 (2008).
- Andreev S., Bryukhnevich G., Degtyareva V., Greenfield D., Lozovoi V., Monastyrskiy M., Schelev M., Serdiuchenko Y., Tarasov V., Vorobiev N. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6279**, 627970-02 (2006).
- Greenfield D.E., Monastyrskiy M.A., Lozovoi V.I., Schelev M.Ya., Serdyuchenko Yu.N. *Opt. Memory Neural Networks (Inform. Opt.)*, **16** (4), 248 (2007).
- Degtyareva V.P., Monastyrskiy M.A., Schelev M.Ya., Tarasov V.A., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Research (NIM-A)*, **427**, 225 (1999).
- Monastyrskiy M.A., Greenfield D.E., Tarasov V.A. *Software Demonstrations Abstract Book, 'CPO-7' International Conference* (Cambridge, UK, 2006, p. 23).
- Андреев С.В., Белолипецкий В.С., Брюхневич Г.И., Воробьев Н.С., Дегтярева В.П., Кузьменко Е.А., Лозовой В.И., Моностырский М.А., Сердюченко Ю.Н., Тарасов В.А., Щелев М.Я. *Прикл. физика*, № 2, 33 (2008).
- Щелев М.Я. *УФН*, **122** (6), 649 (2012).