

# Формирование ультракоротких электронных импульсов в электростатическом лазерном рефлектроне-дефлекторе

С.А.Асеев, Б.Н.Миронов, С.В.Чекалин, В.Г.Миногин

*Проведён анализ временного сжатия фотоэлектронных импульсов, полученных облучением мишени фемтосекундными лазерными импульсами с помощью электростатического рефлектрона, содержащего отклоняющее импульсное лазерное поле. Показано, что использование рефлектрона-дефлектора позволяет не только создавать, но и отклонять ультракороткие импульсы счётного числа электронов с длительностью порядка 30 фс, одновременно фокусируя их в заданной области с размером фокального пятна в десятки микрон. Установлено, что лазерный пондеромоторный потенциал может играть в электростатическом рефлектроне роль дисперсионного элемента, осуществляющего пространственное разделение электронных импульсов с разными энергиями.*

**Ключевые слова:** электронный пучок, фемтосекундные лазерные импульсы, фокусировка, отклонение, сжатие импульса.

## 1. Введение

Создание сфокусированных ультракоротких электронных пучков с большой длиной когерентности представляет значительный интерес для применений в схемах дифракции электронов с целью диагностики быстропротекающих физико-химических процессов, в том числе инициированных высокоинтенсивными электромагнитными полями, излучаемыми за предельно короткие интервалы времени. В современных исследованиях используются три основных способа формирования ультракоротких электронных пучков длительностью несколько пикосекунд и менее. В первом из них ультракороткие электронные сгустки создают посредством облучения интенсивным фемтосекундным лазерным излучением твёрдотельного фотокаатода, атомарного или молекулярного газа либо диэлектрика, на поверхности которого формируется мощное эванесцентное поле. При выполнении специальных условий данный подход позволяет получать электронные пучки фемтосекундной и даже аттосекундной длительности. В современной мировой практике эта достаточно обширная область исследований подробно освещена в литературе [1–7].

Во втором способе объектом импульсного облучения является сам электронный пучок, распространяющийся в вакууме. В этом случае лазерные ультракороткие импульсы (УКИ) высокой интенсивности создают пондеромоторные потенциалы, которые модифицируют распределение электронов по скоростям и обеспечивают условия для пространственного выделения ультракоротких электронных сгустков из исходного электронного пучка. Данный подход, в отличие от первого, не имеет принципиального ограничения, обусловленного необходимостью использо-

вания лазерного излучения с интенсивностью, меньшей порога разрушения фотокаатода или диэлектрика. При этом деформация исходного пространственно-скоростного распределения электронов осуществляется импульсными оптическими градиентными силами, принципиально безынерционными на временном масштабе действия УКИ лазерного излучения. Второй подход открывает также возможности для управления параметрами электронных пучков, поскольку пондеромоторный потенциал, создаваемый фемтосекундным лазерным полем в вакууме, может иметь достаточно разнообразную пространственно-временную структуру [8–10].

Наконец, в третьем способе для временного сжатия и пространственной фокусировки электронных импульсов используются импульсные электрические поля. Согласно теоретическим оценкам, данный подход позволяет формировать электронные УКИ субфемтосекундной длительности [11, 12]. В последние годы уже продемонстрировано сжатие исходных 7-пикосекундных фотоэлектронных импульсов до длительности около 280 фс [12].

При любом способе создания ультракороткого фотоэлектронного пучка представляет интерес использование методов, позволяющих уменьшать длительности электронных импульсов. Одним из таких простых подходов является отражение электронов от постоянного электростатического поля, часто называемого рефлектреном [13–16]. Рефлектрон действует как дисперсионное зеркало для электронов, позволяя восстановить исходную длительность ультракороткого электронного пучка. Известным недостатком электростатического рефлектрона является значительное пространственное уширение отражённого электронного пучка, для уменьшения которого приходится применять дополнительные отклоняющие и фокусирующие элементы.

В настоящей статье мы анализируем возможность одновременного временного и пространственного сжатия фотоэлектронных импульсов в схеме электростатического рефлектрона-дефлектора, в которой ультракороткий лазерный пондеромоторный потенциал осуществляет нелинейную деформацию скоростного распределения элек-

С.А.Асеев, Б.Н.Миронов, С.В.Чекалин, В.Г.Миногин. Институт спектроскопии РАН, Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Физическая, 5; e-mail: minogin@isan.troitsk.ru

Поступила в редакцию 24 декабря 2013 г., после доработки – 12 февраля 2014 г.

тронного пучка в области его остановки в рефлектроне. Результаты работы показывают, что в рефлектроне-дефлекторе возможно создание УКИ счётного числа электронов с длительностью  $\sim 30$  фс и поперечным размером электронного пучка порядка десятков микрон. Также установлено, что лазерный пондеромоторный потенциал ультракороткой длительности может играть роль дисперсионного элемента, осуществляющего пространственное разделение электронных УКИ разных энергий. Указанные новые возможности управления пространственно-временной структурой электронных УКИ обусловлены значительным увеличением времени нелинейной деформации распределения электронов по скоростям за счет пондеромоторного потенциала в области остановки электронного пучка, где пондеромоторный потенциал воздействует на медленные электроны.

## 2. Схема рефлектрона-дефлектора для электронного пучка

Схема электростатического лазерного рефлектрона-дефлектора представлена на рис.1. Ультракороткие электронные импульсы образуются в результате фотоэмиссии электронов из плоской твердотельной мишени, облучаемой лазерными УКИ. Здесь и далее мы считаем, что электронные импульсы создаются 100-фемтосекундными лазерными импульсами, соответственно длительности электронных импульсов  $\tau_p$  на выходе из источника считаются равными 100 фс. Лазерное излучение  $L$  ультракороткой длительности предполагается сфокусированным вблизи области остановки электронного пучка. Для анализа возможности совместного использования в рефлектроне электростатического замедляющего и лазерного отклоняющего полей мы выбираем следующие реалистические параметры схемы. Исходные фотоэлектроны предполагаются распределёнными в области энергий от  $E_1 = 0.4$  эВ до  $E_2 = 0.6$  эВ с центром при  $E_0 = 0.5$  эВ. Выбор достаточно низкой энергии фотоэлектронного пучка обусловлен тем обстоятельством, что при использовании электронной микроскопии для снижения вероятности разрушения образцов органических и биологических структур, а также для повышения контраста изображения целесообразно применять электронные пучки низкой энергии [17, 18].

Предполагается, что электроны ускоряются постоянным электрическим полем на небольшом отрезке длиной  $l_a = 0.5$  см, к которому приложен ускоряющий потенциал  $V_a = -1$  кВ. После области ускорения электроны проходят через коллимирующую диафрагму  $O$ . Исходное угловое распределение электронов не фиксируется, поскольку учитываются только те электроны, которые прошли через диафрагму. Соответственно угол вылета электронов из мишени полностью определяется размером диафрагмы, исходными энергиями электронов, длиной ускоряющей области и величиной ускоряющего потенциала, и при вы-

бранных параметрах схемы он составляет  $6^\circ$ . После прохождения диафрагмы электроны свободно распространяются в области длиной  $l_f = 2$  см. В конце области свободного пролёта электроны попадают в замедляющую область рефлектрона, образованную приложением постоянного замедляющего электростатического поля между тонким экраном с отверстиями  $d_{1r}$ ,  $d_{2r}$  и плоским электродом, находящимся при отрицательном потенциале  $V_r = -1.1$  кВ. В соответствии с выбранными значениями электростатических потенциалов расстояние между плоскостями рефлектрона  $l_r$  выбрано равным 16 см. При такой длине области замедления электроны останавливаются примерно на расстоянии 1 см от плоскости второго электрода.

В том случае, когда в рефлектроне отсутствует лазерное поле, быстрые электроны, имеющие скорость выше средней и соответственно движущиеся в передней части электронного импульса, проходят большие расстояния внутри замедляющего электростатического поля и останавливаются ближе ко второй плоскости рефлектрона. В результате быстрые электроны тратят больше времени на прохождение рефлектрона и оказываются позади медленных электронов на выходе из него. После выхода из рефлектрона и прохождения определённого расстояния, которое может быть оптимизировано заданием параметров рефлектрона, быстрые электроны догоняют медленные. В результате рефлектор обычно восстанавливает исходную длительность электронного импульса в области нахождения мишени  $M$ .

Если в момент остановки электронного импульса происходит его облучение лазерным УКИ, то возникший пондеромоторный потенциал осуществляет деформацию координатного и скоростного распределений электронного пучка вследствие двух основных эффектов. Во-первых, пондеромоторный потенциал отклоняет электроны благодаря действию градиентной силы, что может приводить к фокусировке пучка из-за нелинейной зависимости градиентной силы от координаты электрона поперек оси пучка. Во-вторых, при достаточно симметричном положении пондеромоторного потенциала по отношению к пространственному распределению медленных электронов одна его часть может ускорять те электроны, которые были медленными в исходном фотоэлектронном импульсе, а другая – замедлять те электроны, которые были более быстрыми в исходном распределении. Результатом такого нелинейного влияния потенциала на скоростное распределение электронов в области их остановки может быть уменьшение длительности импульсов на выходе рефлектрона, т. е. в области нахождения мишени, если параметры пондеромоторного потенциала согласованы с параметрами рефлектрона.

Ниже приведены оценки пондеромоторного потенциала и градиентной силы, на основании которых осуществлен численный анализ возможности временной компрессии и фокусировки электронного пучка.

## 3. Пондеромоторный потенциал и сила

В рассматриваемой схеме мы предполагаем, что импульсный пондеромоторный потенциал создаётся лазерными импульсами, локализованными в области остановки электронов в рефлектроне. Предполагается, что лазерный пучок имеет гауссов профиль интенсивности

$$I(x, y, t) = I_0 u(x, y, t), \quad (1)$$

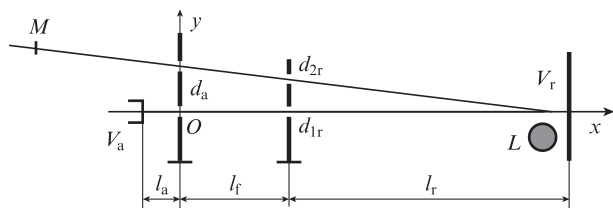


Рис.1. Схема электростатического лазерного рефлектрона-дефлектора.

где  $I_0$  – максимальная интенсивность лазерного импульса, а функция  $u(x, y, t)$  описывает пространственно-временную огибающую лазерного импульса:

$$u(x, y, t) = \exp\left[-\frac{(x-l)^2 + (y-d)^2}{w^2}\right] \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\tau_{\text{las}}}\right)^2\right]. \quad (2)$$

Здесь  $w$  – радиус лазерного пучка на высоте  $l/e$ ;  $l$  и  $d$  – координаты, определяющие положение центра пучка по осям  $x$  и  $y$ ;  $2\tau_{\text{las}}$  – длительность импульса на уровне  $1/e$ ;  $t_0$  – временная задержка максимума лазерного импульса. Пондеромоторный потенциал, создаваемый лазерным пучком, определяется соотношением

$$U(x, y, t) = U_0 u(x, y, t), \quad (3)$$

где

$$U_0 = \frac{e^2 \lambda^2 I_0}{2\pi m c^3} \quad (4)$$

– величина потенциала в максимуме;  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона;  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения;  $c$  – скорость света в вакууме. Пондеромоторный потенциал создаёт градиентную силу

$$F(x, y, t) = -\nabla U(x, y, t), \quad (5)$$

которая совместно с ускоряющей электрической силой определяет эволюцию пространственно-скоростного распределения электронного пучка. Проекция градиентной силы на оси  $x$  и  $y$  таковы:

$$F_x(x, y, t) = \frac{2U_0(x-l)}{w^2} u(x, y, t), \quad (6)$$

$$F_y(x, y, t) = \frac{2U_0(x-d)}{w^2} u(x, y, t).$$

#### 4. Компрессия, отклонение и фокусировка электронного пучка

На рис.2 показаны траектории электронных импульсов в электростатическом лазерном рефлектроне-дефлекторе при указанных ниже параметрах лазерных импульсов. Центр лазерного пучка выбран расположенным при  $l = 16.5$  см и  $d = -0.03$  см, параметры пучка следующие: длина волны  $\lambda = 800$  нм, интенсивность  $I_0 = 1.5 \times 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>, радиус пучка на половине высоты  $w_0 = 0.5$  мм, длительность импульсов  $\tau_1 = 250$  пс. При заданных параметрах пондеромоторный потенциал отклоняет электронный пучок на расстояние, превышающее поперечный размер пучка. При этом сам пучок фокусируется в область размером около 50 мкм, расположенную на продольной координате  $x = -16$  см.

В анализируемой схеме рассматривается распространение электронных пучков, содержащих счётное число электронов. Соответственно в пренебрежении кулоновским расталкиванием электронов основным источником удлинения электронных импульсов является конечная ширина начального скоростного распределения электронных импульсов. Изменение длительности электронных импульсов при их распространении внутрь замедляющей

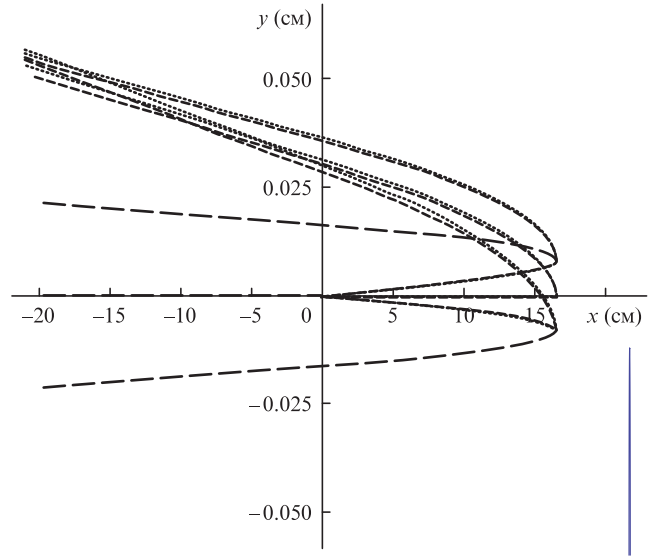


Рис.2. Траектории электронных импульсов в различных областях рефлектрона. Длинными штрихами показаны траектории, которые имели бы место в отсутствие лазерного излучения (расположены симметрично оси  $x$ ), пунктирные кривые – траектории электронов с энергией  $E_1 = 0.4$  эВ, короткие штрихи – траектории электронов с энергией  $E_2 = 0.6$  эВ. Эти траектории смещены в положительном направлении оси  $y$  вследствие действия пондеромоторного потенциала. Сплошной линией в нижней правой части рисунка показано сечение лазерного пучка, имеющее вид сильно сжатого эллипса из-за большого различия в масштабах координатных осей.

области и при обратном распространении из области замедления показано на рис.3. Рисунок, в основном, отображает воздействие на электронный пучок электростатического потенциала, на который также слабо влияет пондеромоторный потенциал. Кривая 1 демонстрирует характер увеличения длительности электронного импульса при его распространении внутрь замедляющей области. Поскольку при постоянной величине отрицательного ускорения более медленные электроны замедляются быстрее, то увеличение длительности импульса происходит тем быстрее, чем дальше импульс проходит в область замедляющего поля. При обратном распространении импульса (кривая 2) происходит его сужение в результате пространственного перераспределения электронов с различными энергиями. Более быстрые электроны в исходном

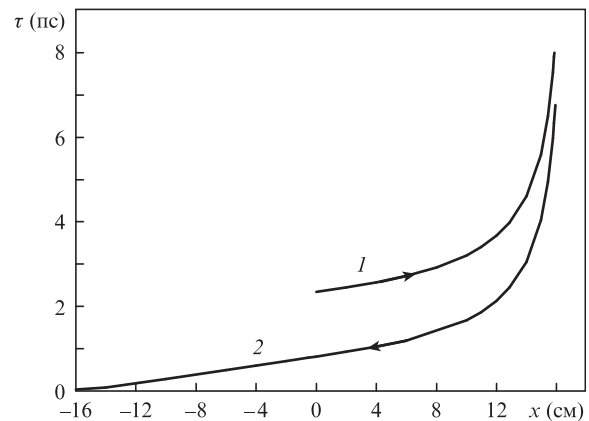


Рис.3. Длительности падающего (1) и отражённого (2) электронного импульса в различных сечениях рефлектрона, отвечающих различным значениям координаты  $x$ . Стрелками показано направление распространения импульсов.

падающем пучке теперь оказываются позади передних медленных. Соответственно они тем дольше догоняют передние электроны, чем больше была их скорость в исходном пучке. В результате кривая 2 качественно повторяет форму кривой 1, будучи, однако, смещенной по оси ординат в область меньших длительностей импульса. При выбранных выше параметрах распространения электронного пучка его минимальная длительность достигается в точке продольной координаты  $x = -16$  см, в которой также имеет место наибольшая фокусировка импульса. При дальнейшем распространении электронного импульса его быстрая задняя и медленная передняя части меняются местами, и длительность импульса начинает неограниченно возрастать.

При выбранной длительности исходных фотоэлектронных импульсов 100 фс длительность импульсов в месте нахождения коллимирующей апертуры  $\tau_{a1} = 2.3$  пс. В случае достижения входного отверстия рефлектрона длительность импульсов увеличивается до  $\tau_{r1} = 2.5$  пс, а при пересечении выходного отверстия рефлектрона она уменьшается до 0.9 пс. Минимальная длительность импульсов ( $\tau = 30$  фс) достигается в точке  $x = -17$  см.

Результаты численного моделирования также показывают, что при подходящем выборе параметров взаимодействия пондеромоторный потенциал может осуществлять пространственное разделение импульсов с разными энергиями, выполняя, таким образом, роль дисперсионного элемента для электронных импульсов.

## 5. Заключение

Проведенный анализ показывает, что электростатический лазерный рефлектрон-дефлектор может использоваться для эффективного одновременного уменьшения длительности электронных импульсов, а также для отклонения и фокусировки импульсов в схемах электронной 3D микроскопии. Из результатов численного моделирования следует, что при энергиях электронов  $\sim 1$  кэВ и длине рефлектрона около 15 см возможно сокращение длительности импульсов до 30 фс при их фокусировке в

область размером около 50 мкм. Такие параметры электронных импульсов могут быть достигнуты при достаточно высокой ( $\sim 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>) интенсивности лазерного излучения, мощности излучения  $10^{11}$  Вт и энергии в импульсе  $\sim 10$  Дж.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 13-02-00651-а) и Программы Президиума РАН № 24.

1. Zawadzka J., Jaroszynski D.A., Carey J.J., Wynne K. *Nucl. Instr. Meth. A*, **445**, 324 (2000).
2. Brabec T., Krausz F. *Rev. Mod. Phys.*, **72**, 545 (2000).
3. Niikura H., Legare F., Hasbani R., Bandrauk A.D., Ivanov M.Yu., Villeneuve D.M., Corkum P.B. *Nature*, **417**, 917 (2002).
4. Aseyev S.A., Ni Y., Frasiniski L.J., Muller H.G., Vrakking M.J.J. *Phys. Rev. Lett.*, **91**, 223902 (2003).
5. Hebeisen C.T., Ernstorfer R., Harb M., Dartigalongue T., Jordan R.E., Miller R.J.D. *Opt. Lett.*, **31**, 3517 (2006).
6. Миронов Б.Н., Асеев С.А., Миногин В.Г., Чекалин С.В. *ЖЭТФ*, **133**, 1155 (2008).
7. Krausz F., Ivanov M. *Rev. Mod. Phys.*, **81**, 164 (2009).
8. Balykin V.I., Subbotin M.V., Letokhov V.S. *Opt. Commun.*, **129**, 177 (1996).
9. Minogin V.G., Fedorov M.V., Letokhov V.S. *Opt. Commun.*, **140**, 250 (1997).
10. Миногин В.Г. *Квантовая электроника*, **39**, 1095 (2009).
11. Schelev M.Ya., Monastyrskiy M.A., Vorobiev N.S., Garnov S.V., Greenfield D.E. *Aspects of Streak Image Tube Photography* (Elsevier Acad. Press, AIEP **180**, 2013).
12. Андреев С.В., Воробьев Н.С., Гринфельд Д.Э., Лозовой В.И., Монастырский М.А., Сердюченко Ю.Н., Смирнов А.В., Щелев М.Я. *Квантовая электроника*, **43**, 392 (2013).
13. Flory C.A., Taber R.C., Yefchak G.E. *Int. J. Mass Spectrom. Ion Process.*, **152**, 177 (1996).
14. Weber P.M., Carpenter S.D., Lucza T. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2521**, 23 (2005).
15. Kassier G.H., Haupt K., Erasmus N., Rohwer E.G., Schwoerer H. *J. Appl. Phys.*, **105**, 113111 (2009).
16. Wang Y., Gedik N. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **18**, 140 (2012).
17. Nebesarova J., Vancova M. *Microscopy and Microanalysis*, **13**, 248 (2007).
18. Drummy L.F., Yang J., Martin D.C. *Ultramicroscopy*, **99**, 247 (2004).