

Отклонение, фокусировка и коллимация электронного пучка фемтосекундной лазерной линзой

В.Г.Миногин

Рассмотрено использование пондеромоторного потенциала, создаваемого фемтосекундными лазерными импульсами, для пространственного выделения фемтосекундных электронных сгустков. Показано, что действие пондеромоторного оптического потенциала позволяет осуществлять эффективное отклонение, фокусировку и коллимацию узконаправленных электронных сгустков фемтосекундной длительности.

Ключевые слова: электронный пучок, фемтосекундные импульсы, фокусировка, отклонение, коллимация.

1. Введение

Создание фемтосекундных электронных сгустков представляет значительный интерес в связи с возможностями их использования для диагностики быстро протекающих физико-химических процессов. С принципиальной точки зрения все методы создания ультракоротких электронных сгустков можно отнести к одному из двух подходов. В первом подходе ультракороткие электронные сгустки могут быть образованы непосредственно в процессе создания фотоэлектронных сгустков [1–6], а во втором – посредством пространственного выделения из предварительно созданных электронных сгустков ультракоротких электронных импульсов [7–10].

В последние годы развивается в основном первый подход, в котором активно используются затухающие поля на границе раздела диэлектрик–вакуум. Данный подход, однако, имеет принципиальные ограничения, накладываемые сверху на интенсивность лазерного излучения и определяемые порогами разрушения диэлектриков [11, 12]. Второй подход, будучи практически свободным от данных ограничений, представляет значительный интерес в связи с более широкими возможностями его использования для управления параметрами электронных сгустков. В связи с этим в настоящее время представляется целесообразным поставить вопрос о способах прямого воздействия пондеромоторных потенциалов, созданных фемтосекундными импульсами, на пучки электронов с целью выделения из них фемтосекундных электронных сгустков. Недавно один пример отклонения быстрого электронного пучка с энергией 55 кэВ импульсами лазерного излучения с интенсивностью 10^{17} Вт/см² был реализован в работе [9], где достигнута длительность электронного импульса ~ 400 фс. Вместе с тем результаты этой работы показали, что использование пучков электронов с большими энергиями приводит к весьма

малому влиянию пондеромоторного потенциала на поперечные скорости электронов вследствие малого времени пролёта электронов через область взаимодействия.

В настоящей работе мы обращаем внимание на возможность использования пондеромоторного оптического потенциала для эффективного пространственного выделения из исходных узконаправленных электронных пучков с небольшой энергией электронных сгустков фемтосекундной длительности. Мы анализируем воздействие пондеромоторного оптического потенциала, созданного оптическим импульсом фемтосекундной длительности, на распространение нерелятивистских электронных сгустков и показываем, что пондеромоторный потенциал может играть роль отклоняющего, фокусирующего и коллимирующего элемента в оптике фемтосекундных электронных сгустков. Приведённые нами примеры распространения электронов в поле лазерных импульсов фемтосекундной длительности подтверждают возможность разработки элементов фемтосекундной оптики электронных пучков на основе фемтосекундного лазерного излучения с интенсивностью $\sim 10^{14} - 10^{15}$ Вт/см².

2. Отклонение электронного пучка гауссовым лазерным пучком

Простейшей геометрией, в которой импульсный пондеромоторный потенциал может эффективно отклонять нерелятивистский электронный пучок, является внеосевое облучение пучка электронов фемтосекундными лазерными импульсами. В качестве простой модели примем, что пучок электронов, выходящий из начала системы координат из области с поперечным размером δd , имеющий угловую расходимость 2θ и распространяющийся вдоль оси x , облучается сфокусированным импульсным лазерным излучением, распространяющимся параллельно оси z . Предполагается, что ось пучка лазерного излучения смещена из начала координат вдоль оси x на расстояние l и вдоль оси y на расстояние d (рис. 1, a).

Будем считать, что исходный электронный пучок имеет широкий временной профиль интенсивности шириной $2\tau_e$, причём максимум электронного импульса проходит через начало системы координат в момент времени $t = 0$

В.Г.Миногин. Институт спектроскопии РАН, Россия, Московская обл., 142190 Троицк, ул. Физическая, 5;
e-mail: minogin@isan.troitsk.ru

Поступила в редакцию 13 марта 2009 г., после доработки – 29 июля 2009 г.

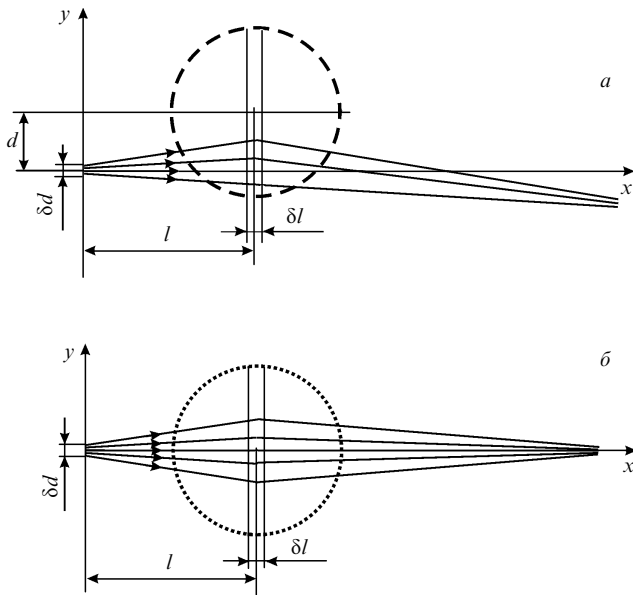


Рис.1. Схемы лазерного импульсного дефлектора электронного пучка, основанного на гауссовом пучке (а) и лазерной импульсной фокусирующей или коллимирующей электронной линзе на основе полого пучка (б). Штриховая кривая показывает профиль сечения гауссова пучка, пунктирная – профиль сечения полого пучка. Величина δl – расстояние, пролетаемое электронами за время, равное длительности лазерного импульса.

(рис.2). Пусть лазерный пучок имеет гауссовы пространственный и временной профили интенсивности с ширинами $2w$ и $2\tau_{\text{las}}$ на уровне $1/e$ соответственно:

$$I(x, y, t) = I_0 u(x, y, t), \tag{1}$$

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

где I_0 – интенсивность лазерного импульса в максимуме; t_0 – задержка максимума лазерного импульса относительно максимума исходного электронного импульса, т. е. к моменту прохождения максимума электронного импульса через начало координат (рис.2).

Ниже мы будем рассматривать интенсивности лазерного излучения, при которых для пондеромоторного потенциала может использоваться нерелятивистское приближение. В таком приближении пондеромоторный потенциал определяется известным соотношением:

$$U(x, y, t) = U_0 u(x, y, t), \tag{3}$$

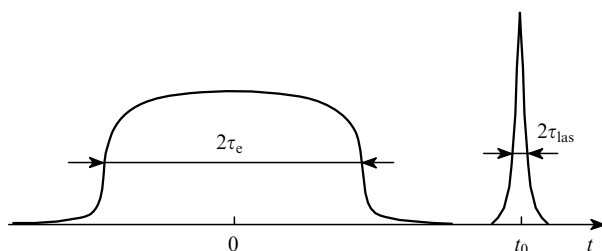


Рис.2. Исходный электронный импульс длительностью $2\tau_e$ и импульс лазерного излучения длительностью $2\tau_{\text{las}}$.

где

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

– значение потенциала в максимуме; e и m – заряд и масса электрона; λ – длина волны лазерного излучения; c – скорость света в вакууме. Данный потенциал создаёт градиентную силу

$$F(x, y, t) = -\nabla U(x, y, t), \tag{5}$$

имеющую проекции на оси x и y :

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

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

Компонента силы F_x осуществляет модуляцию скорости электронов, а компонента силы F_y – отклонение электронов от оси исходного пучка. Совместное действие данных сил может приводить как к фокусировке, так и к коллимации части электронного пучка, оказывающейся в области действия пондеромоторного потенциала в течение лазерного импульса.

В приведённых ниже примерах мы будем считать, что пондеромоторный потенциал создаётся импульсным лазерным излучением с длиной волны $\lambda = 800$ нм и длительностью импульса $\tau_{\text{las}} = 50$ фс. Предполагается, что исходный пучок электронов с энергией 100 эВ выходит из области с поперечным размером $\delta d = 0.5$ мкм и распространяется в пределах угла $2\theta = 1^\circ$. Длительность исходного электронного импульса τ_e взята в несколько раз большей длительности лазерного импульса τ_{las} . Для интенсивности лазерного излучения в максимуме I_0 выбираются значения $10^{14} - 10^{15}$ Вт/см², при которых пондеромоторный потенциал в максимуме U_0 достигает 10 – 100 эВ.

В качестве первого примера рассмотрим использование пондеромоторного потенциала, создаваемого лазерным пучком с гауссовым профилем интенсивности. На рис.3 показан пример отклоняющего и фокусирующего действия градиентной силы гауссового пучка на электронный пучок с указанными выше параметрами при интенсивности $I_0 = 2 \times 10^{15}$ Вт/см², радиусе пучка в каустике $w = 3$ мкм и координатах центра пучка $l = 100$ мкм, $d = 3.5$ мкм. Приведённые траектории получены численным решением уравнений движения электронов под действием компонент силы (6). Штриховая кривая показывает часть поперечного сечения лазерного пучка на уровне $1/e$, отвечающего радиусу $w = 3$ мкм. Отметим, что на рис.3 сечение лазерного пучка имеет эллиптическую форму вследствие различия масштабов по осям x и y . В данном примере отклонение электронного пучка составляет $\sim 5^\circ$.

Следует подчеркнуть, что импульсный пондеромоторный потенциал отклоняет, естественно, только ту часть исходного электронного пучка, которая оказывается в области лазерного пучка в течение оптического импульса весьма малой длительности. Соответственно большая часть исходного электронного пучка распространяется, не испытывая влияния лазерного импульса, а отклоняется только малая часть пучка. Фактически доля

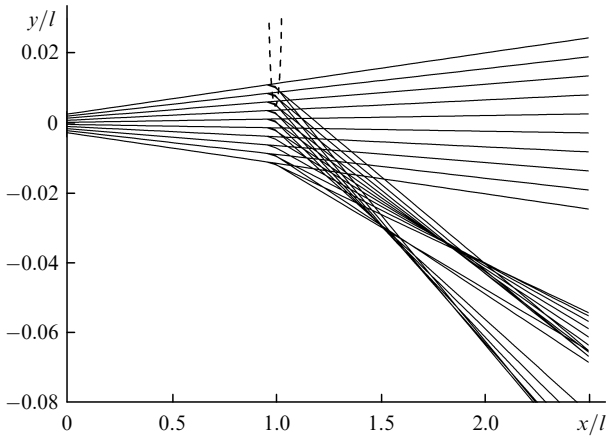


Рис.3. Отклонение и фокусировка электронного пучка ультракоротким гауссовым лазерным пучком.

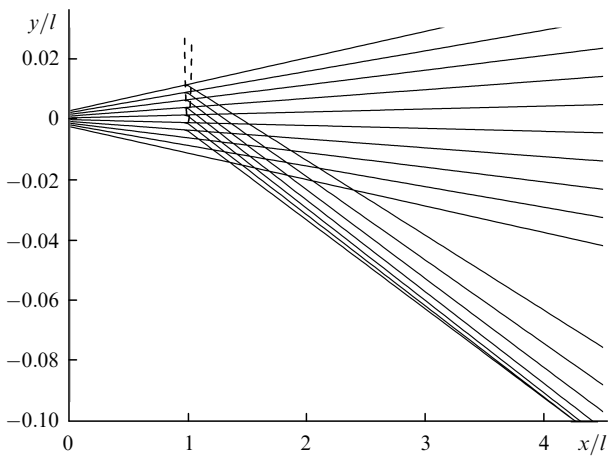


Рис.4. Отклонение и коллимация электронного пучка ультракоротким гауссовым лазерным пучком.

отклонённых электронов определяется частотами повторения электронных импульсов и импульсов лазерного излучения, а также отношением длительностей электронного и лазерного импульсов. Если, в простейшем случае, частота повторения лазерных импульсов совпадает с частотой повторения электронных импульсов, то доля отклонённых электронов β может быть оценена как $\beta = \tau_{\text{las}}/\tau_e$.

На рис.4 показан пример отклоняющего и коллимирующего действия градиентной силы гауссова пучка на электронный пучок. Предполагается, что исходный электронный пучок облучается лазерными импульсами с интенсивностью $I_0 = 9 \times 10^{14}$ Вт/см² при радиусе лазерного пучка в каустике $w = 3$ мкм и координатах центра лазерного пучка $l = 100$ мкм, $d = 2.9$ мкм. Штриховая кривая показывает поперечное сечение лазерного пучка, отвечающее радиусу $w = 3$ мкм. Угловое отклонение электронного пучка составляет также $\sim 5^\circ$.

В рассмотренных выше примерах отклонённые пучки могут быть отделены от исходного пучка подходящими диафрагмами.

3. Фокусировка и коллимация электронного пучка полым лазерным пучком

Полый импульсный лазерный пучок (см. рис.1,б) может играть роль фокусирующей линзы для электронного

пучка. Положим, что полый пучок имеет распределение интенсивности (1), определяемое нормированной огибающей

$$u(x, y, t) = \frac{(x-l)^2 + y^2}{w^2} \times \exp \left[-\frac{(x-l)^2 + y^2 - w^2}{w^2} \right] \exp \left[-\left(\frac{t-t_0}{\tau_{\text{las}}} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

Огибающая (7) имеет максимум, равный единице, при $t = t_0$ и радиальном смещении от центра пучка $r = [(x-l)^2 + y^2]^{1/2} = w$. Соответственно в поперечном сечении лазерного пучка интенсивность излучения имеет максимум, равный I_0 , вдоль окружности радиусом w . При заданном профиле интенсивности компоненты градиентной силы (5)

$$F_x(x, y, t) = \frac{2U_0(x-l)}{w^2} \frac{(x-l)^2 + y^2 - w^2}{w^2} u(x, y, t), \quad (8)$$

$$F_y(x, y, t) = \frac{2U_0 y}{w^2} \frac{(x-l)^2 + y^2 - w^2}{w^2} u(x, y, t). \quad (9)$$

Полый лазерный пучок может использоваться для фокусировки и коллимации электронного пучка. На рис.5 показан пример фокусировки электронного пучка градиентной силой полого лазерного пучка при указанных выше параметрах лазерного излучения и исходного электронного пучка, интенсивности в максимуме $I_0 = 4 \times 10^{14}$ Вт/см², радиусе пучка в каустике $w = 4$ мкм и координате центра пучка $l = 100$ мкм. Пунктирная кривая на рис.5 показывает поперечное сечение лазерного пучка радиусом $w = 4$ мкм в максимуме поперечного профиля интенсивности. В данном примере ponderomotorный потенциал фокусирует электронный пучок, который распространяется внутри полой области лазерного пучка за время, равное длительности лазерного импульса.

На рис.6 показан пример коллимирующего действия градиентной силы на электронный пучок. В данном случае полый лазерный пучок имеет интенсивность в максимуме $I_0 = 1.6 \times 10^{14}$ Вт/см², радиус в каустике $w = 4$ мкм и координату центра пучка $l = 100$ мкм. Остальные параметры лазерного и электронного пучков те же, что и раньше. Пунктирная кривая на рис.6 показывает попе-

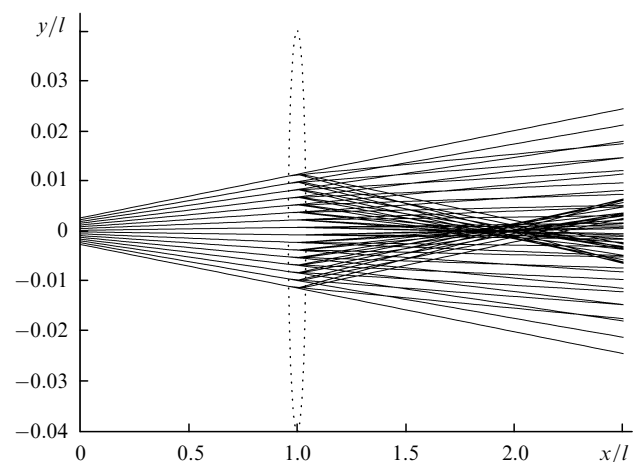


Рис.5. Импульсная фокусировка электронного пучка полым лазерным пучком.

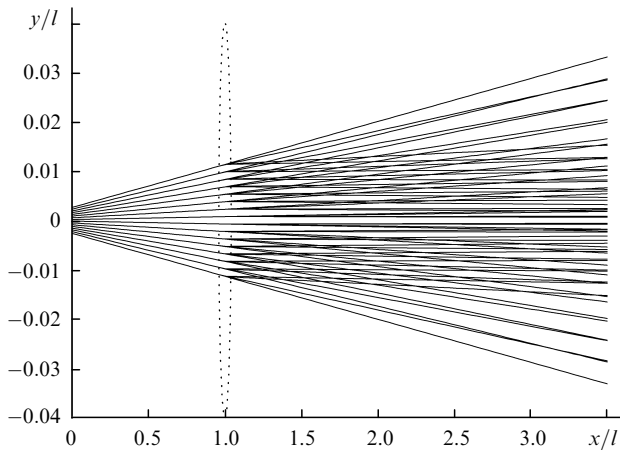


Рис.6. Импульсная коллимация электронного пучка полым лазерным пучком.

речное сечение лазерного пучка радиусом $w = 4$ мкм в максимуме интенсивности. Отметим ещё раз, что на рис.5 и 6 сечение пучка имеет эллиптическую форму вследствие различия масштабов по осям x и y .

В данных двух примерах выделение сфокусированного или отклонённого электронного пучка также может быть осуществлено с использованием подходящих диафрагм.

4. Заключение

Проведённый анализ показывает, что импульсный пондеромоторный оптический потенциал фемтосекундной длительности способен эффективно выделять фемтосекундный электронный сгусток из исходного, имеющего большую длительность. Такое выделение может быть реализовано посредством отклонения, фокусировки и (или) коллимации электронных сгустков. При небольшой начальной энергии электронного пучка (~ 100 эВ) и диаметре лазерного пучка ~ 10 мкм для эффектив-

ного управления параметрами электронного пучка достаточно интенсивности лазерного излучения $\sim 10^{14} - 10^{15}$ Вт/см². Фокусное расстояние лазерной электронной линзы составляет ~ 100 мкм.

Подчеркнём также, что, как показывает наш анализ, проиллюстрированный на рис.3–6, наиболее эффективным является лазерное управление узконаправленными электронными пучками, т.е. пучками, предварительно коллимированными диафрагмами. При использовании узконаправленного исходного пучка большая часть электронов пучка может распространяться в области действия достаточно гладкого пондеромоторного потенциала и соответственно подвергаться достаточно регулярному отклонению, фокусировке и (или) коллимации.

Автор благодарен С.А.Асееву и Б.Н.Мионову за обсуждение работы.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 07-02-00748-а).

1. Zawadzka J., Jaroszynski D.A., Carey J.J., Wynne K. *Nucl. Instr. Meth. A*, **445**, 324 (2000).
2. Niikura H., Legare F., Hasbani R., Bandrauk A.D., Ivanov M.Yu., Villeneuve D.M., Corkum P.B. *Nature*, **417**, 917 (2002).
3. Irvine S.E., Dechant A., Elezzabi A.Y. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 184801 (2004).
4. Hommelhoff P., Sortais Y., Aghajani-Talesh A., Kasevich M.A. *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 077401 (2006).
5. Мионов Б.Н., Асеев С.А., Чекалин С.В., Летохов В.С. *Письма в ЖЭТФ*, **83**, 435 (2006).
6. Мионов Б.Н., Асеев С.А., Миогиин В.Г., Чекалин С.В. *ЖЭТФ*, **133**, 1155 (2008).
7. Balykin V.I., Subbotin M.V., Letokhov V.S. *Opt. Commun.*, **129**, 177 (1996).
8. Minogin V.G., Fedorov M.V., Letokhov V.S. *Opt. Commun.*, **140**, 250 (1997).
9. Hebeisen C.T., Ernstorfer R., Harb M., Dartigalongue T., Jordan R.E., Miller R.J.D. *Opt. Lett.*, **31**, 3517 (2006).
10. Baum P., Zewail A. *Chem. Phys. Lett.*, **462**, 14 (2008).
11. Mao S.S., Quere F., Guizard S., Mao X., Russo R.E., Petite G., Martin P. *Appl. Phys. A*, **79**, 1695 (2004).
12. Tien A.C., Baskus S., Kapteyn H., Murnane M., Mourou G. *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 3883 (1999).