

## ОСОБЕННОСТИ ОТРАЖЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА ОТ РЕЗКОЙ ГРАНИЦЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

С. Н. Андреев<sup>1</sup>, Ю. И. Еремеичева<sup>1</sup>, В. П. Тараканов<sup>2</sup>

*Аналитически и численно исследованы особенности отражения фемтосекундного лазерного импульса от плазменной мишени околоритической плотности в широком диапазоне интенсивности и длительности лазерного импульса. На основании аналитических расчетов показано, что при постоянной интенсивности коэффициент отражения импульса уменьшается с уменьшением длительности импульса. На основании результатов численного моделирования показано, что при падении сверхинтенсивного фемтосекундного лазерного импульса на плазменный слой с концентрацией, близкой к критической, внутри плазмы формируется квазипериодическая структура электронной плотности, которая может как увеличивать, так и уменьшать коэффициент отражения лазерного импульса.*

**Ключевые слова:** лазерная плазма, фемтосекундный лазерный импульс, коэффициент отражения, плазма околоритической плотности, формулы Френеля.

При взаимодействии лазерных импульсов с плазменными мишенями эффективность инжекции лазерной энергии в плазму определяется, прежде всего, коэффициентом отражения импульса от плазмы. Помимо этого коэффициент отражения – это один из немногих параметров фемтосекундной лазерной плазмы, достаточно надежно измеряемых в экспериментах [1]. За последние пятнадцать лет проблеме определения коэффициента отражения лазерного импульса от плазмы было посвящено множество экспериментальных и теоретических работ [1–9]. Однако верхнее значение интенсивности

<sup>1</sup> ИОФ РАН, Россия 119991, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: eremeicheva@yandex.ru.

<sup>2</sup> Объединенный институт высоких температур Российской академии наук.

лазерного импульса  $I = 10^{16} - 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>, которое могут обеспечить доступные широкому кругу исследователей экспериментальные установки, не позволяет получить представление о том, какова будет зависимость коэффициента отражения от различных параметров плазмы при переходе в область интенсивностей  $I \geq 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>. Помимо этого, большинство как экспериментальных [3–7], так и теоретических работ [1, 5, 9] посвящено определению коэффициента отражения лазерного импульса для случая плазменной мишени с твердотельной плотностью, которая намного превышает критическую плотность. В данной работе приводятся результаты аналитического и численного исследования коэффициента отражения фемтосекундного лазерного импульса с интенсивностью  $I = 10^{16} - 10^{21}$  Вт/см<sup>2</sup> от плазмы околоскритической плотности.

Аналитические расчеты коэффициента отражения лазерного импульса от плазмы для случая, когда импульс нормально падает на плазменный слой постоянной плотности с резкой границей, проводились по формулам, полученным на основе общеизвестных формул Френеля [10]. При этом некогерентность фемтосекундного импульса учитывалась следующим образом: импульс раскладывался на гармонические компоненты с помощью интеграла Фурье, затем для каждой из компонент импульса по формулам Френеля вычислялся коэффициент отражения, а затем с помощью обратного преобразования Фурье вычислялся коэффициент отражения всего импульса. В формулы Френеля входит показатель преломления среды. В случае, когда мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости плазмы гораздо меньше действительной, то есть плазма обладает слабым коэффициентом поглощения, показатель преломления плазмы описывается формулой [11]:

$$n_{pl} \cong \sqrt{\varepsilon_\omega} = \sqrt{1 - \frac{4\pi \cdot e^2 n_e}{m_e \omega^2}} = \sqrt{1 - \frac{\omega_{pl}^2}{\omega^2}}, \quad (1)$$

где  $e$  и  $m_e$  – заряд и масса электрона соответственно,  $n_e$ <sup>1</sup> – концентрация электронов в плазме,  $\omega$  – частота электромагнитного излучения,  $\omega_{pl} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}}$  – плазменная частота.

На основании результатов расчетов, проведенных в соответствии с данной методикой, был построен график зависимости коэффициента отражения по энергии от длительности импульса для случая, когда плотность плазмы равна критической, а длина

<sup>1</sup>Так как общепринятые литеры, обозначающие показатель преломления и концентрацию электронов плазмы совпадают, в дальнейшем показатель преломления плазмы всегда будем обозначать  $n_{pl}$ , а электронную концентрацию  $n_e$ , критическую концентрацию электронов плазмы будем обозначать  $n_{cr}$ .

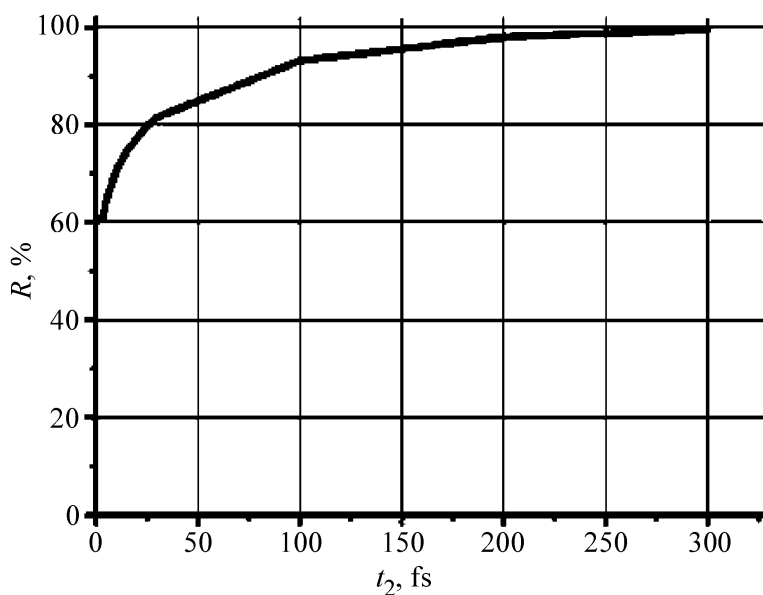


Рис. 1: Зависимость коэффициента отражения от длительности импульса в случае критической концентрации плазмы  $n_{cr}$ .

волны лазерного излучения  $\lambda = 1$  мкм (рис. 1). Из графика на рис. 1 видно, что коэффициент отражения уменьшается с уменьшением длительности импульса. Данный факт является следствием увеличения ширины спектра импульса при уменьшении его длительности. Следует отметить, что коэффициент отражения в данных расчетах не зависит от интенсивности излучения, так как подобный подход не позволяет учесть проявление нелинейных свойств плазмы при увеличении интенсивности импульса, а также влияние на коэффициент отражения процесса поглощения электромагнитной энергии в плазме.

Численное моделирование отражения лазерного импульса от плазмы проводилось посредством двухмерной XZ-версии электромагнитного 3D PIC-кода KARAT [12]. В расчетах использовалась следующая модель физической системы: плоская электромагнитная волна с огибающей, описываемой распределением Гаусса ( $FWHM = 35$  фс), распространяясь в вакууме, падала нормально на поверхность плазменного слоя, моделируемого PIC-частицами. Расчеты проводились для лазерного импульса с длиной волны  $\lambda = 1$  мкм и трех вариантов плотностей плазмы:  $n_e = 0.5n_{cr}$ ,  $n_e = 0.75n_{cr}$ ,  $n_e = n_{cr}$ , где  $n_{cr} = 1.21 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$  – критическая плотность плазмы для данной длины волны.

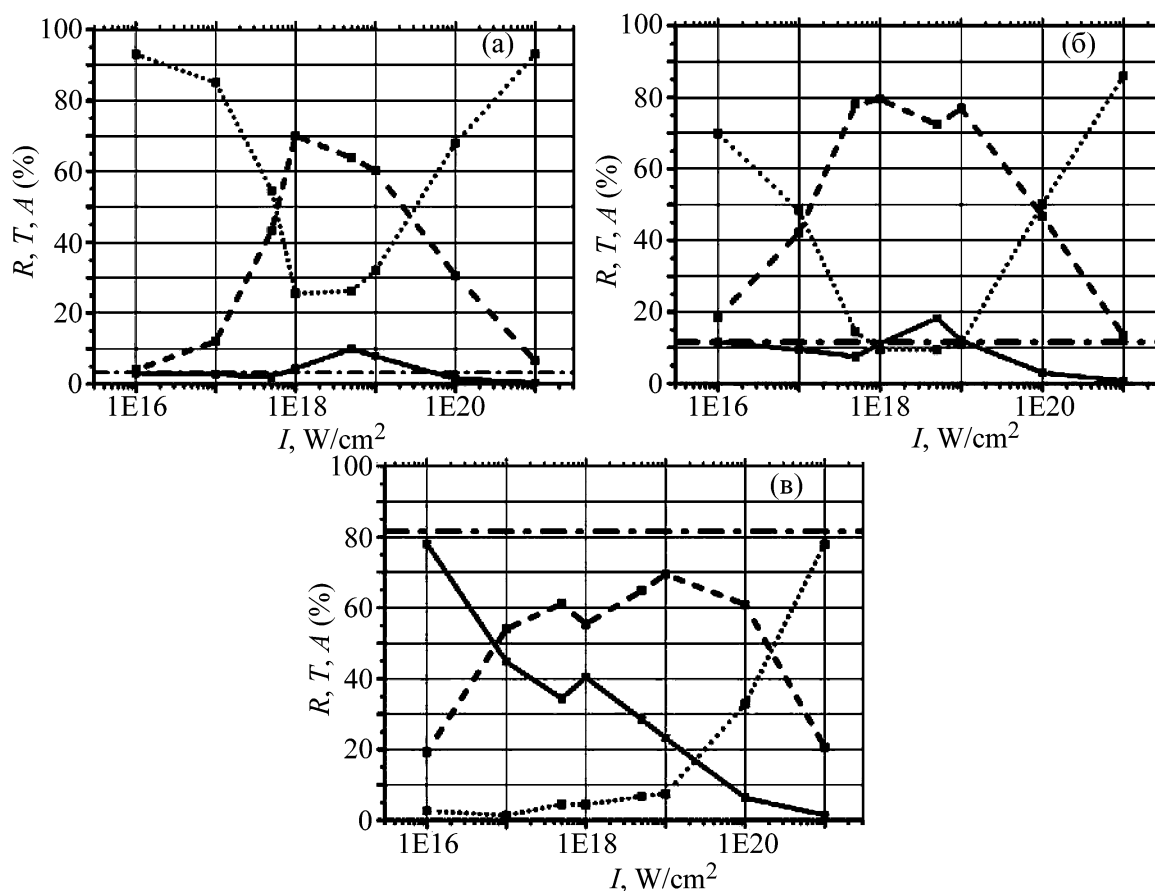


Рис. 2: Зависимости коэффициента отражения (сплошная линия), пропускания (пунктирная линия) и поглощения (штриховая линия) от интенсивности лазерного импульса для различных плотностей плазмы: (а)  $n_e = 0.5n_{cr}$ , (б)  $n_e = 0.75n_{cr}$ , (в)  $n_e = n_{cr}$ ; штрихпунктирные линии – результат расчета коэффициентов отражения по формулам Френеля с учетом некогерентности импульса.  $FWHM = 35$  фс.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициентов отражения, прохождения и поглощения от интенсивности электромагнитного импульса, полученные в результате моделирования. Из рис. 2 видно, что для всех рассматриваемых плотностей плазмы характерно следующее: коэффициент отражения убывает в интервале интенсивностей импульса  $10^{16} - 5 \cdot 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>, затем следует возрастание – локальный максимум находится в интервале  $10^{18} - 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>, и затем при интенсивности более  $10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup> коэффициент отражения вновь убывает практически до нуля. Уменьшение коэффициента отражения в области высоких интенсивностей импульса было описано достаточно давно [13, 14] и получило название релятивистского просветления. Интерес пред-

ставляет локальное увеличение коэффициента отражения на интервале интенсивностей  $10^{18} - 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>, где присутствует также и локальный минимум коэффициента пропускания для случаев  $n_e = 0.5n_{cr}$ ,  $n_e = 0.75n_{cr}$  (рис. 2(а), (б)).

Мы предположили, что изменение коэффициента отражения обусловлено поглощением электромагнитной энергии в слое и развитием в плазме внутренних процессов, влияющих на отражение. Для проверки этого предположения мы рассмотрели эти процессы более подробно.

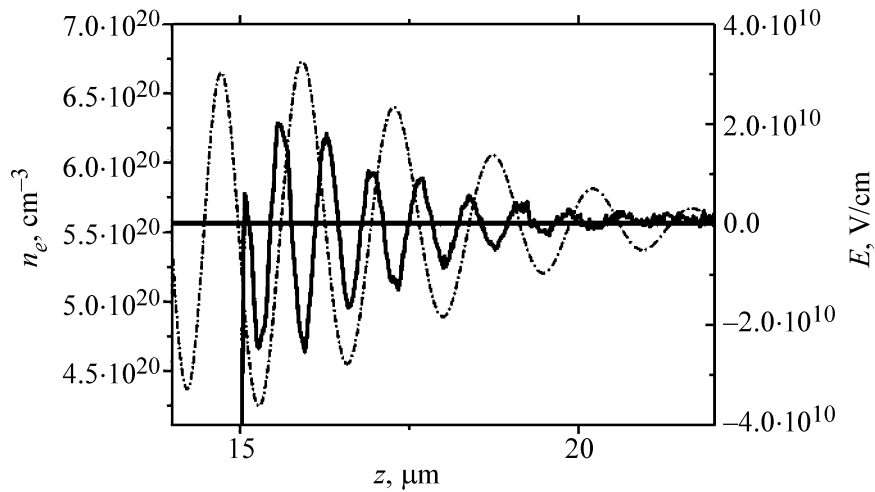


Рис. 3: Профиль электронной плотности плазменного слоя (сплошная линия) и мгновенная напряженность электромагнитной волны (штрихпунктирная линия) для начальной концентрации плазмы  $n_e = 0.5n_{cr}$  и интенсивности  $I = 5 \cdot 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>; горизонтальная линия соответствует уровню начальной концентрации электронов и нулю электрического поля.

Было обнаружено, что при интенсивностях выше  $I \cong 5 \cdot 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup> внутри плазменного слоя существует квазипериодическая структура электронной плотности. На рис. 3 график профиля электронной плотности совмещен с графиком напряженности электромагнитной волны внутри плазменного слоя для случая  $n_e = 0.5n_{cr}$ ,  $I = 5 \cdot 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup> в момент времени, когда передний фронт лазерного импульса уже проник в глубь плазменного слоя на половину его толщины. Из рис. 3 видно, что локальные максимумы электронной плотности совпадают с минимумами электромагнитной волны, т.е. период структуры электронной плотности равен половине длины электромагнитной волны в плазме. Аналогичная структура электронной плотности наблюдается и в расчетах для плазмы с  $n_e = 0.75n_{cr}$  и  $n_e = n_{cr}$ . По мере распространения электромагнитной волны

в глубь плазменного слоя синхронно смещается и структура электронной плотности. Величина скорости смещения локального экстремума плотности в глубь плазмы совпадает с фазовой скоростью электромагнитной волны, а величина скорости смещения огибающей электронной структуры  $V_{ee}$  совпадает с групповой скоростью  $V_{gr}^{EM}$  электромагнитной волны в плазме. При отражении той части лазерного импульса, которая падает на плазменный слой с уже сформированной структурой электронной плотности, наблюдается эффект Доплера: в спектре отраженной волны присутствует частотный сдвиг в красную сторону, соответствующий отражению от структуры, движущейся со скоростью  $V_{ee}$ . Данный факт однозначно указывает на то, что отражение происходит от периодической структуры электронной плотности внутри плазменного слоя. Таким образом, мы имеем основания предположить, что именно структура электронной плотности является причиной существования локального максимума коэффициента отражения на графике зависимости от интенсивности (рис. 2).

Для проверки этого предположения были исследованы оптические характеристики подобной слоистой среды с помощью методики, описанной в [15], где для нахождения коэффициента отражения предлагается использовать характеристическую матрицу среды. Была задана система из шести слоев с чередующимися показателями преломления  $n_{pl1}$  и  $n_{pl2}$ , постоянными внутри каждого слоя. Значения показателей преломления  $n_{pl1}$  и  $n_{pl2}$  были рассчитаны для соответствующих значений электронной плотности, полученных в ходе численного моделирования, по формуле (1). Расчеты коэффициента отражения слоистой структуры показали, что такая структура может как увеличивать, так и уменьшать коэффициент отражения лазерного импульса в зависимости от разницы показателей преломления, которая в свою очередь зависит от разницы величин электронных плотностей в слоях. Помимо этого, коэффициент отражения будет зависеть от того, на слой с большим или меньшим показателем преломления изначально падает лазерный импульс. Выше отмечалось, что профиль электронной плотности со временем смещается в глубь плазмы, концентрация плазмы на границе с вакуумом будет меняться от максимального до минимального значения и обратно, и различные части лазерного импульса будут изначально падать на плазменные слои с различными показателями преломления. Данный результат объясняет существование локальных максимумов на графиках зависимости коэффициента отражения от интенсивности, а также значительное уменьшение коэффициента отражения в случае  $n_e = n_{cr}$  (см. рис. 2(в)) в диапазоне интенсивностей  $I = 10^{16} \dots 5 \cdot 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>, которое не может быть обусловлено релятивистскими эффектами в силу низких значений интенсивности импульса.

Таким образом, в работе проведено подробное исследование коэффициента отражения сверхинтенсивного фемтосекундного лазерного импульса от плазмы с околокритической плотностью. В результате аналитического расчета по формулам Френеля с учетом немонахроматичности импульса показано, что в случае лазерных импульсов длительностью менее 100 фс наблюдается значительное уменьшение коэффициента отражения импульса по сравнению с его значением для монохроматической электромагнитной волны по причине увеличения ширины спектра импульса. На основании результатов численного моделирования показано, что при падении сверхинтенсивного фемтосекундного лазерного импульса на плазменный слой с концентрацией, близкой к критической, внутри плазмы формируется квазипериодическая структура электронной плотности, которая может как увеличивать, так и уменьшать коэффициент отражения лазерного импульса. Физические механизмы, приводящие к формированию таких структур в плазме, требуют дальнейших исследований.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК – 1117.2012.2.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] О. М. Величко, В. Д. Урлин, Б. П. Якутов, Сборник трудов “VI Забабахинские научные чтения” (РФЯЦ-ВНИИТ, 2001), URL: <http://www.vniitf.ru/rig/konfer/6zst/dokl/sec3/1.pdf>.
- [2] Ю. В. Афанасьев, Н. Н. Демченко, О. Н. Крохин, В. Б. Розанов, ЖЭТФ **72**, 170 (1977).
- [3] M. K. Grimes, A. R. Rundquist, Y.-S. Lee, M. C. Downer, Phys. Rev. Lett. **92**(20), 4010 (1999).
- [4] П. С. Комаров, М. Б. Агранат, С. И. Ашитков и др., Научная сессия МИФИ. Том IV, (2009), <http://library.mephi.ru/data/scientific-sessions/2009/t4/7-2-1.doc>.
- [5] М. Б. Агранат, Н. Е. Андреев, С. И. Ашитков и др., Письма в ЖЭТФ **85**(6), 328 (2007).
- [6] L. M. Chen, J. Zhang, Q. L. Dong, et al., Phys. Plasmas **8**, 2925 (2001).
- [7] Y. Cai, W. Wang, C. Xia, et al., Phys. Plasmas **16**, 103104 (2009).
- [8] D. F. Price, R. M. More, R. S. Walling, et al., Phys. Rev. Lett. **75**(2), 252 (1995).
- [9] E. Lefebvre, G. Bonnaud, Phys. Rev. Lett. **74**(11), 2002 (1995).
- [10] Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Электродинамика сплошных сред* (М., Физматлит, 2005).
- [11] Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Физическая кинетика* (М., Физматлит, 2002).

- [12] V. P. Tarakanov, *User's Manual for Code KARAT* (VA, USA: Berkeley Research Associates, Inc., 1992).
- [13] A. D. Steiger, C. H. Woods, *Phys. Rev. A* **5**, 1467 (1972).
- [14] P. Kaw, J. Dawson, *Phys. Fluids* **13**, 472 (1970).
- [15] М. Борн, Э. Вольф, *Основы оптики* (М., Наука, 1973).

Поступила в редакцию 24 июня 2013 г.