

Генерация терагерцевых и инфракрасных релятивистских импульсов при взаимодействии мощного лазерного излучения с наноразмерными мишенями

В. В. Кулагин^{1,2,*}, В. Н. Корниенко^{1,2}, В. А. Черепенин^{1,2}

¹ГАИШ МГУ, Россия, 119991, Москва, Университетский проспект, д. 13

²ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН, Россия, 125009, Москва, ул.Моховая, д. 11, стр. 72

Исследована генерация излучения, возникающего при синхронном смещении электронов мишени под действием сверхмощного лазерного импульса и дальнейшей релаксации системы после его прохождения. Показано, что возможна как генерация одиночных импульсов с длительностью до десятков периодов лазерного поля, так и генерация цуга колебаний.

PACS: 42.62.-b.

УДК: 535.8.

Ключевые слова: взаимодействие лазерного излучения с веществом, ускорение электронов лазерными импульсами, генерация терагерцевого и инфракрасного излучения.

Существенное разделение зарядов в мишени может возникать, если на нее падает сверхмощный лазерный импульс с достаточно большой амплитудой [1, 2]. Если при этом фронт импульса (или сам импульс) достаточно короткий (несколько периодов лазерного излучения), то процесс будет сильно нестационарным. В этом случае могут формироваться сгустки электронов практически твердотельной плотности, которые достигают релятивистских скоростей за времена, значительно меньшие периода лазерного импульса, а их смещение по отношению к ионам мишени может быть существенно больше длины волны лазера. В ходе ускорения электронных сгустков и релаксации системы после прохождения лазерного импульса может генерироваться мощное излучение. При этом характеристики излучения могут существенно различаться в зависимости от выбранных параметров системы — амплитуды и длительности лазерного импульса, формы мишени, начальной плотности электронов в ней и т. д. Возможно как генерация одиночных импульсов (в том числе и однополярных) с длительностью от долей периода лазерного поля до десятков периодов, так и генерация цуга периодического излучения, частота и длительность которого зависят от параметров системы. Из-за большого возможного заряда электронных сгустков могут быть получены релятивистские амплитуды импульсов, что может иметь существенное значение для их использования в различных экспериментах и приложениях.

В работе исследована генерация терагерцевых и инфракрасных импульсов, возникающих при синхронном смещении электронов мишени под действием сверхмощного лазерного импульса с крутым фронтом и дальнейшей релаксации системы после прохождения лазерного импульса. С помощью двумерного численного моделирования изучена зависимость излучаемого поля от начальной плотности электронов в мишени, от длительности лазерного импульса, от ширины мишени

и от амплитуды лазерного импульса. При моделировании было показано, что распределение излучаемого поля практически не зависит от формы мишени (соотношения толщины и ширины) при сохранении ее заряда, пока геометрические размеры мишени остаются существенно меньше длины волны (точечная мишень). Кроме того, диаметр лазерного импульса также не играет существенной роли при малых поперечных размерах мишени (значительно меньших диаметра импульса).

Различные формы генерируемых импульсов представлены на рисунках. На рис. 1а показано пространственное распределение компоненты поля E_x через 12 периодов после начала ускорения электронов при взаимодействии гауссовского импульса длительностью 2,39 периодов лазерного излучения (половина ширины по уровню e^{-1}) с мишенью шириной в 0,1 длины волны лазера и толщиной в 0,01 длины волны. Лазерный импульс с безразмерной амплитудой, равной 10, распространяется в положительном направлении оси x (все расстояния на рисунках нормированы на длину волны) и поляризован линейно вдоль оси y , а поперечное распределение его поля — гауссовское с диаметром 8 длин волн (ось луча проходит через $y = 25$). Начальная плотность электронов в мишени в 70 раз больше критической. Безразмерная амплитуда поля показана цветовой кодировкой (шкала справа от рисунка, в нормировке использована частота лазерного импульса). Мишень располагается в $x = 13$, $y = 25$. На рис. 1б представлена компонента поля E_x вдоль вертикальной прямой, проходящей через мишень, через 25 периодов после начала взаимодействия, а на рис. 1в — та же компонента, но для мишени с плотностью электронов, в 900 раз большей критической. При увеличении плотности вместо одиночного короткого импульса возникает последовательность импульсов. Это связано с тем, что для рис. 1б все электроны из мишени удаляются уже первым полупериодом лазерного импульса достаточной интенсивности, а для рис. 1в удаление электронов из мишени осуществляется несколькими последовательными полупериодами лазерного импульса. Следует отметить, что максимальная амплитуда генерируемого импульса на рис. 1в оказывается увеличенной

*E-mail: victorvkulagin@yandex.ru

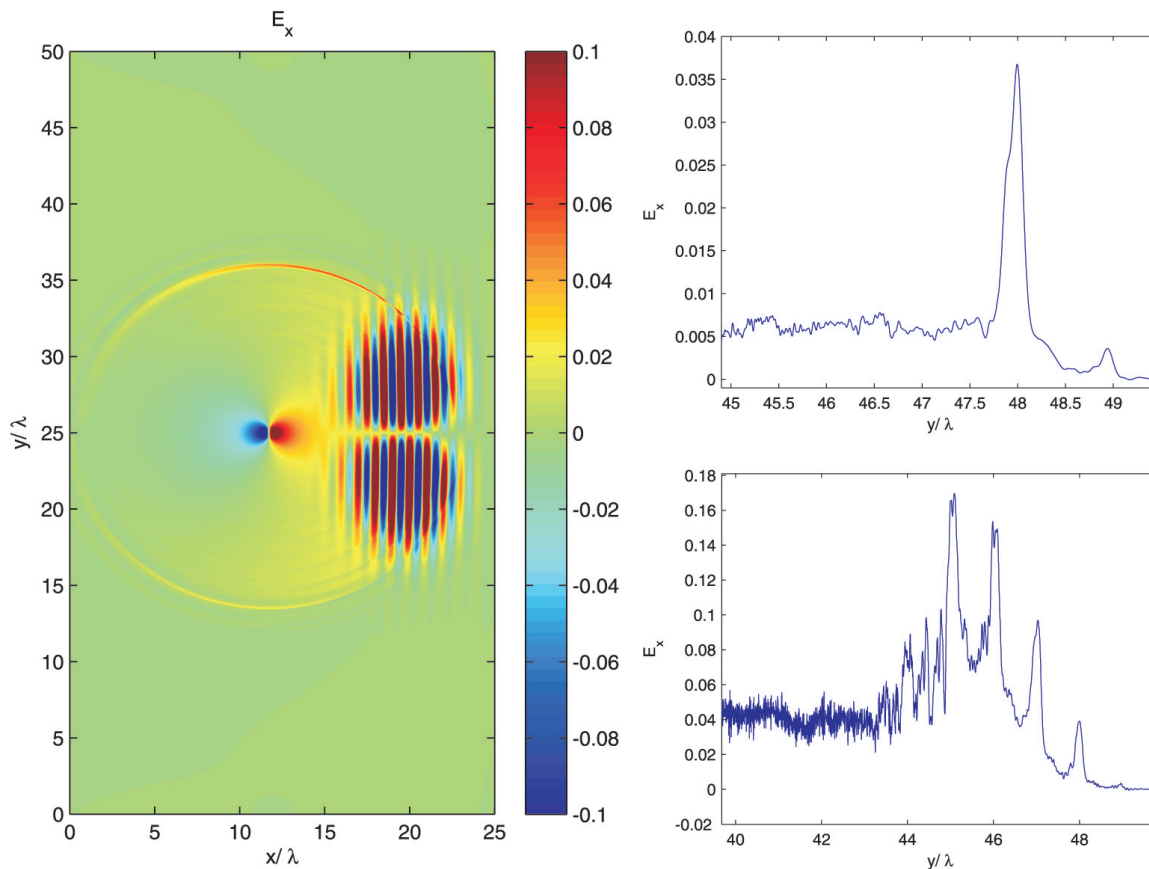


Рис. 1: (а) Пространственное распределение компоненты поля E_x через 12 периодов после начала взаимодействия. Гауссовский импульс с $a_0 = 10$ поляризован вдоль оси y и имеет длительность 2.39 периодов лазерного излучения. Ширина мишени 0,1 длины волны, толщина — 0,01 длины волны, начальная плотность электронов в мишени в 70 раз больше критической. Мишень располагается в $x = 13$, $y = 25$. (б) Компонента поля E_x вдоль вертикальной прямой, проходящей через мишень, через 25 периодов после начала взаимодействия. (в) — то же, но плотность электронов в 900 раз больше критической

больше, чем в 4 раза, по сравнению с рис. 1б. Сравнение начальной стадии генерации излучения показывает, что импульсы вблизи $y = 48$ и $y = 49$ практически совпадают на обоих рисунках, затем мишень меньшей плотности истощается, а для мишени большей плотности формируются еще несколько сгустков ускоряемых электронов, генерирующих короткие импульсы (порядка четверти периода лазерного поля) на пьедестале из более длинного импульса (около 5 периодов).

Компонента поля E_x вдоль вертикальной прямой, проходящей через мишень, через 30 периодов после начала взаимодействия для разной ширины мишени представлена на рис. 2: ширина мишени на рис. 2а в 40 раз меньше длины волны, на рис. 2б — равна длине волны, на рис. 2в — в 4 раза больше длины волны. Здесь лазерный импульс поляризован вдоль оси z и имеет крутой фронт с амплитудой первой полуволны, равной максимальной амплитуде импульса. Остальные параметры лазерного импульса и мишени такие же, как и на рис. 1. При увеличении ширины мишени не только увеличивается амплитуда импуль-

Suk Phys. Rev. Lett. **99**. P. 124801. (2009).

са, но и изменяется его форма. Так, из рис. 2в следует, что вместо короткого однополярного импульса формируется цуг, содержащий несколько колебаний с частотой, примерно в 10 раз меньшей частоты лазерного поля. Эта частота определяется динамикой колебаний электронных сгустков около ионов мишени. Наличие колебаний говорит о том, что часть электронов возвращается к ионам до окончания одиночного импульса излучения, что связано с более сильным притяжением ионов протяженной мишени по сравнению с точечной мишенью.

В случае широкой мишени система может вернуться в режим генерации одиночного импульса при увеличении амплитуды лазерного поля (рис. 3а, амплитуда лазерного импульса равна 20). Дальнейшее увеличение амплитуды лазерного импульса (рис. 3б) не приводит к увеличению амплитуды излучения (все электроны уже двигаются практически синхронно), однако, форма импульса излучения становится близка к форме, определяемой суммой импульсов излучения от отдельных частей мишени, соответствующих рис. 2а, с учетом за-

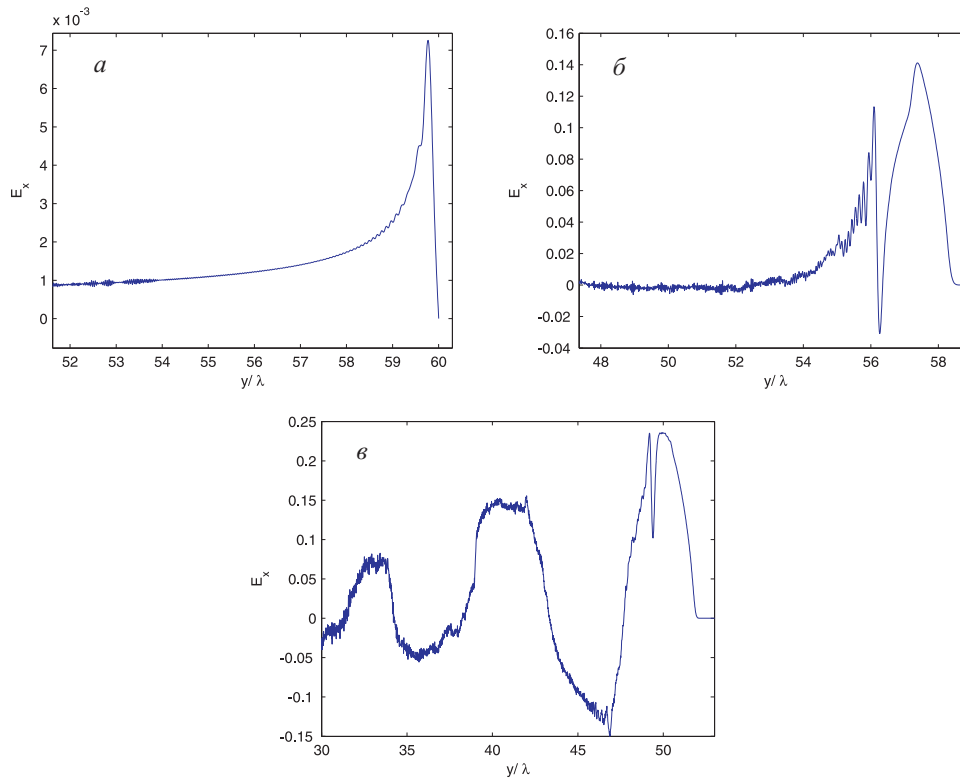


Рис. 2: Компонента поля E_x вдоль вертикальной прямой, проходящей через мишень, через 30 периодов после начала взаимодействия: ширина мишени (а) — в 40 раз меньше длины волны, (б) — равна длине волны, (в) — в 4 раза больше длины волны. Лазерный импульс поляризован вдоль оси z и имеет крутой фронт с амплитудой первой полуволны, равной максимальной амплитуде импульса. Остальные параметры лазерного импульса и мишени такие же, как и на рис. 1

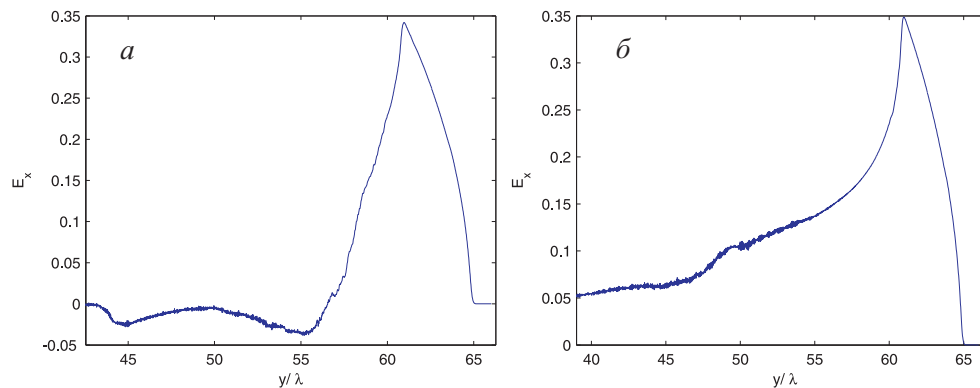


Рис. 3: Компонента поля E вдоль вертикальной прямой, проходящей через мишень, через 30 периодов после начала взаимодействия: безразмерная амплитуда лазерного импульса равна (а) — 20 и (б) — 30. Ширина мишени и форма лазерного импульса соответствуют рис. 2в, остальные параметры лазерного импульса и мишени такие же, как и на рис. 1. Генерируемые импульсы достигают релятивистских интенсивностей

паздывания. При этом полная длительность генерируемых одиночных однополярных импульсов составляет порядка 5 периодов лазерного поля по уровню половины амплитуды, а их амплитуда достигает 0,35, что

с учетом длительности соответствует уже релятивистской интенсивности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-02-01398_a).

[1] Kulagin V.V., Cherepenin A.V., Min Sup Hur, Hyyong Suk Phys. Rev. Lett. **99**. P. 124801. (2009).

[2] Kulagin V.V., Cherepenin A.V., Gulyaev Yu.V., Kornienko

V.N., Ki Hong Pae, Valuev V.V., Lee J., Hyyong Suk
Phys. Rev. E. **80**. P.016404. (2007).

Generation of terahertz and infrared pulses during relativistic interaction of intense laser radiation with nanoscale targets

V. V. Kulagin^{1,2,a}, V. N. Kornienko^{1,2}, V. A. Cherepenin^{1,2}

¹*Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

²*Kotelnikov's Institute of Radioengineering and Electronic RAS. Moscow 125009, Russia*

E-mail: ^avictorvkulagin@yandex.ru

The generation of the radiation produced by the synchronously displaced electrons of a target under the influence of high-powered laser pulse and further relaxation of the system after its passage was investigated. It is shown that generation of single pulses (up to tens of periods of laser field) as well as train of oscillations is possible.

PACS: 42.62.-b.

Keywords: computer simulation, generation of terahertz radiation, interaction of laser radiation with matter.

Сведения об авторах

1. Кулагин Виктор Владимирович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (495) 939-53-27, e-mail: victorvkulagin@yandex.ru.
2. Корниенко Владимир Николаевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (495) 629-72-79, e-mail: korn@cplire.ru.
3. Черепенин Владимир Алексеевич — чл.-корр. РАН, заместитель директора; тел.: (495) 629-72-79, e-mail: cher@cplire.ru.