

04;07;09;12

Механизм генерации мощного излучения терагерцового диапазона частот при воздействии мощных лазерных импульсов на мишень

© А.Н. Диденко,¹ В.И. Ращиков,¹ В.Е. Фортов²¹ Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ),
115409 Москва, Россия² Объединенный институт высоких температур РАН,
119991 Москва, Россия
e-mail: virashchikov@mephi.ru

(Поступило в Редакцию 1 марта 2011 г.)

Исследован механизм генерации излучения терагерцового диапазона при облучении мишеней короткими ~ 0.1 ns лазерными импульсами высокой интенсивности $I \sim 10^{18} - 10^{19} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Исследование проводилось путем численного моделирования с использованием релятивистского электромагнитного PIC-кода. При взаимодействии такого импульса с мишенью на мишени образуется плазма. Вылетающие из плазмы электроны образуют виртуальный катод, колебания которого определяются не только их собственным полем, но и полем ионов плазмы. Генерация идет в терагерцовом диапазоне частот, причем эффективность генерации втрое выше, чем в случае отсутствия ионов, т.е. при традиционном ридитронном механизме генерации. Дано объяснение подобного эффекта.

В последние годы интенсивно развивается направление исследований, связанное с созданием и применением источников электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот. Разработка новых методов диагностики вещества, являющихся одним из приоритетов в развитии nano- и биотехнологий, невозможна без генераторов подобного типа. Такие импульсные генераторы высокой интенсивности терагерцового диапазона могут быть созданы на основе изучения взаимодействия мощного лазерного излучения с мишенью.

Целью настоящей работы является исследование механизма генерации излучения терагерцового диапазона при облучении мишеней короткими лазерными импульсами высокой интенсивности. Вид исследуемого генератора представлен на рис. 1.

Рассмотрим излучение в терагерцовом диапазоне частот. Такой диапазон частот может быть реализован при взаимодействии короткого лазерного импульса ~ 0.1 ns высокой интенсивности $I \sim 10^{18} - 10^{19} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ с мишенью (радиус пятна 10^{-4} m, энергия ~ 10 kJ). На мишени образуется плазма и с ее задней плоскости вылетают электроны, а затем и ионы с плотностью $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (ток $\sim 10^4$ A) и релятивистским максвелловским распределением по энергии с температурой ~ 1 MeV ($T \sim (I\lambda^2)^{1/3}$, $I \sim 10^{18} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, $\lambda = 1 \mu\text{m}$ [1]). Вылетающие из плазмы электроны образуют виртуальный катод, колебания которого определяются не только их собственным полем, но и полем ионов плазмы. Это означает, что при этом реализуется механизм генерации излучения, аналогичный тому, который имеет место в виркаторах — сильноточных СВЧ-приборах с виртуальным катодом [2]. Однако принципиальным отличием данного механизма является наличие ионной компоненты.

Исследование проводилось путем численного моделирования с использованием 2.5-мерного релятивистского

электромагнитного PIC (particle-in-cell) кода СУМА (Системы Уравнений Максвелла) [3]. За более чем двадцатилетний период использования код прошел многоуровневую проверку начиная с синтетических тестов, сравнения с существующими моделями и заканчивая проверкой экспериментом. Код представляет собой 2.5-мерную нестационарную модель, позволяющую описывать самоогласованным образом динамику заряженных частиц в прямоугольной, цилиндрической и полярной системах координат.

Система уравнений математической модели состоит из уравнений Максвелла, уравнения среды и уравнения движения. На каждом шаге решения в текущий момент времени t сначала выполняются вычисления плотностей заряда и тока, входящие в уравнения Максвелла. Раздача заряда и токов в узлы пространственной сетки и их сглаживание выполняются путем взвешивания площадей частицы (облака) и ячейки сетки. Поступление новых частиц на шаге моделирования Δt в рассматриваемую область реализовано в виде механизма инжекции,

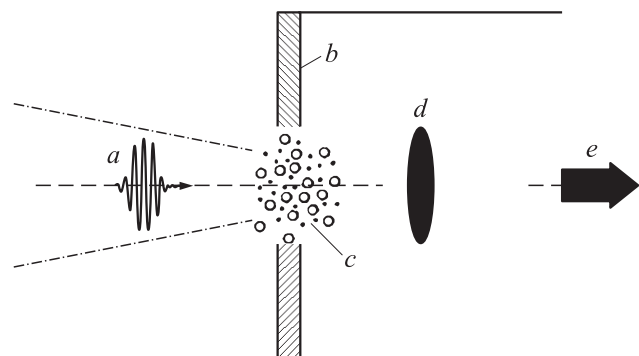


Рис. 1. Схема исследуемого генератора: a — лазерный импульс, b — мишень, c — плазма, d — виртуальный катод, e — генерируемое излучение.

эмиссии либо вторичной эмиссии с соответствующими законами распределения. После этого численно решаются уравнения Максвелла и осуществляется коррекция полученного решения на предмет соответствия уравнению Пуассона. Коррекция выполняется путем решения уравнения Пуассона для разности распределения плотностей заряда, полученных из дивергентного уравнения Максвелла, и реальным распределением зарядов ρ

$$\Delta\Phi_c = \frac{-(\rho - \rho^*)}{\epsilon_0}, \quad \text{где} \quad \text{div} \mathbf{E} = \frac{\rho^*}{\epsilon}.$$

Скорректированное выражение для поля имеет следующий вид:

$$\mathbf{E}_c = \mathbf{E} - \text{grad}(\Phi_c).$$

Уравнение Пуассона решается с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье по одной координате и прогонки (алгоритм Томаса) по второй. Для областей со сложной геометрией, а также при наличии электродов внутри области используется метод матрицы емкости, связывающий потенциал и заряд в необходимых узлах.

На границе области могут задаваться следующие краевые условия:

- 1) металлическая поверхность,
- 2) условия периодичности,
- 3) условия симметрии,
- 4) условия прохождения волны.

Поскольку в результате решения уравнений Максвелла поле находится в узлах пространственной сетки, для численного интегрирования уравнений движения необходимо вычисление поля в промежуточных точках, где располагаются частицы. Для этого используются интерполирование и сглаживание сеточных функций.

Интегрируя уравнения движения, находим распределение частиц в фазовом пространстве в следующий момент времени: $t + \Delta t$ и т.д. Для интегрирования применен релятивистский вариант метода с перешагиванием с использованием временного сдвига пространственной координаты и импульса.

В модели в процессе расчетов контролируется баланс энергии в исследуемой области

$$P_\Sigma + \frac{\partial W}{\partial t} + P = 0.$$

С этой целью на сетке вычисляются интегралы следующего вида:

$$W = \frac{1}{2} \int (\mathbf{H}\mathbf{B} + \mathbf{E}\mathbf{D}) dV,$$

дающий величину запасенной в области энергии;

$$P = \int_V \mathbf{j}\mathbf{E} dV,$$

позволяющий оценить преобразование мощности в системе;

$$P_\Sigma = \oint [\mathbf{E}\mathbf{H}] d\mathbf{S},$$

вычисляющий поток через заданную поверхность.

Пространственная сетка строится таким образом, чтобы размер ее ячеек был меньше радиуса Дебая, который в нашем случае составляет величину порядка $\sim 10^{-2}$ см. Чтобы удовлетворить этим условиям, в представленном варианте использовалась сетка размерностью (Z, R) 1024×200 с общим числом участвующих в моделировании крупных частиц $3 \cdot 10^6$. При попадании на стенки камеры частицы удаляются. Условия устойчивости накладывают жесткие ограничения на временной шаг, который в нашем случае, с учетом того что он выбирался для частицы с меньшей массой электрона, был равен 10^{-14} с.

Область моделирования представляла собой цилиндрический резонатор с открытым правым торцом (рис. 1). Радиус и длина резонатора равны соответственно 0.5 см и 1 см. С левой торцевой стенки резонатора вылетают электронный и протонный пучки радиусом 0.01 см каждый с одинаковой ($n \sim 10^{16}$ см $^{-3}$), равномерно распределенной плотностью заряда и релятивистским максвелловским распределением по энергии с температурой ~ 1 MeV вдоль оси резонатора. Угловой разброс составлял 30 deg. Генерируемое таким пучком поле на выходе системы ($Z = 1$ см) и его частотный спектр приведены на рис. 2.

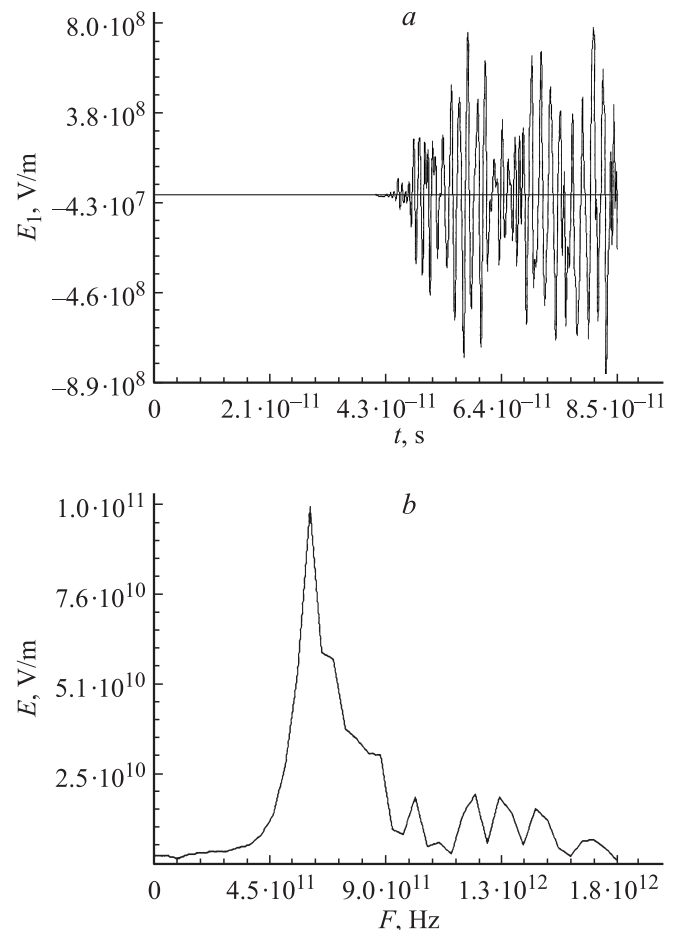


Рис. 2. Зависимость продольного электрического поля от времени (a) и его частотный спектр (b) на оси системы.

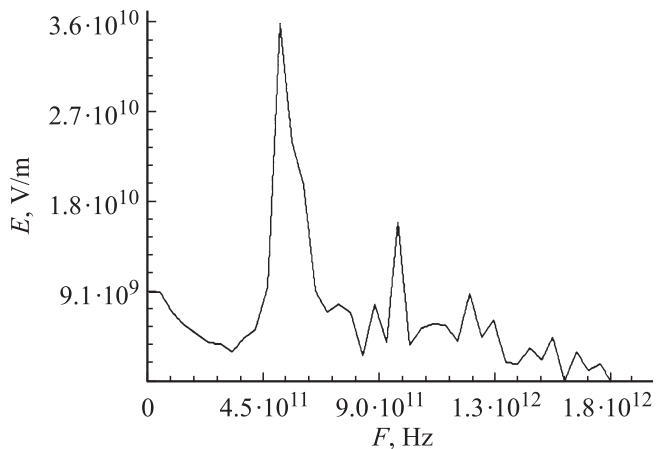


Рис. 3. Частотный спектр продольного электрического поля на оси системы при отсутствии ионов.

Видно, что при таких плотностях энергии и токах генерация идет в терагерцовом диапазоне частот $f \sim 0.6$ THz, причем для образования виртуального катода и начала процесса генерации требуются времена порядка нескольких пикосекунд.

Для сравнения процессов генерации промоделируем традиционный редитрон с теми же входными параметрами электронного пучка, ионы при этом будут отсутствовать. Результаты расчета представлены на рис. 3. Видно, что частота генерируемого сигнала смещается к $f \sim 0.5$ THz, а амплитуда уменьшается втрое. Объяснение этого эффекта можно получить, исследуя процесс образования виртуального катода и дальнейшей генерации ВЧ-мощности.

На рис. 4, *a* в плоскости (Z, R) приведено распределение электронов в системе при редитронном механизме генерации. При этом ионы отсутствуют. Видно, что выходящий с мишени электронный пучок большой плотности образует виртуальный катод. Создаваемое виртуальным катодом поле сил пространственного заряда быстро уводит частицы с оси системы, препятствуя их эффективному участию в процессе генерации.

При наличии ионов (см. рис. 4, *b*) картина существенно меняется. Ионы в данном случае помимо дополнительного тормозящего эффекта играют фокусирующую роль, не позволяя электронам быстро покинуть область эффективной генерации. Это и приводит к росту частоты и мощности генерируемого сигнала. Поток выходной мощности составляет при этом ~ 1 GW, что соответствует $\sim 10\%$ коэффициенту преобразования мощности электронного пучка в ВЧ-сигнал (в редитроне при отсутствии ионов этот коэффициент составляет $\sim 2\%$).

В классических СВЧ-генераторах с виртуальным катодом высокоплотный электронный пучок, проходя сквозь анод, также создает положительно заряженные ионы. Однако для того чтобы их влияние привело к заметному росту эффективности генерации, необходимо, во-первых, чтобы их плотность была сравнима с плотностью электронного пучка. Во-вторых, они должны находиться

достаточно близко от виртуального катода, чтобы их поле оказывало влияние на процесс его формирования.

Расчеты показывают, что если с анода вылетает электронный пучок с током 20 кА, энергией 250 keV и длительностью импульса 15 ns (типичные параметры для виркатора гигагерцового диапазона частот), а на аноде создается ионная плазма такой же плотности, то заметное увеличение эффективности генерации наблюдается лишь тогда, когда энергия ионов превышает 50 keV. Если же ионы покоятся, то их влиянием можно пренебречь.

В этом и заключается существенное отличие влияния ионов плазмы на процесс генерации в тера- и гигагер-

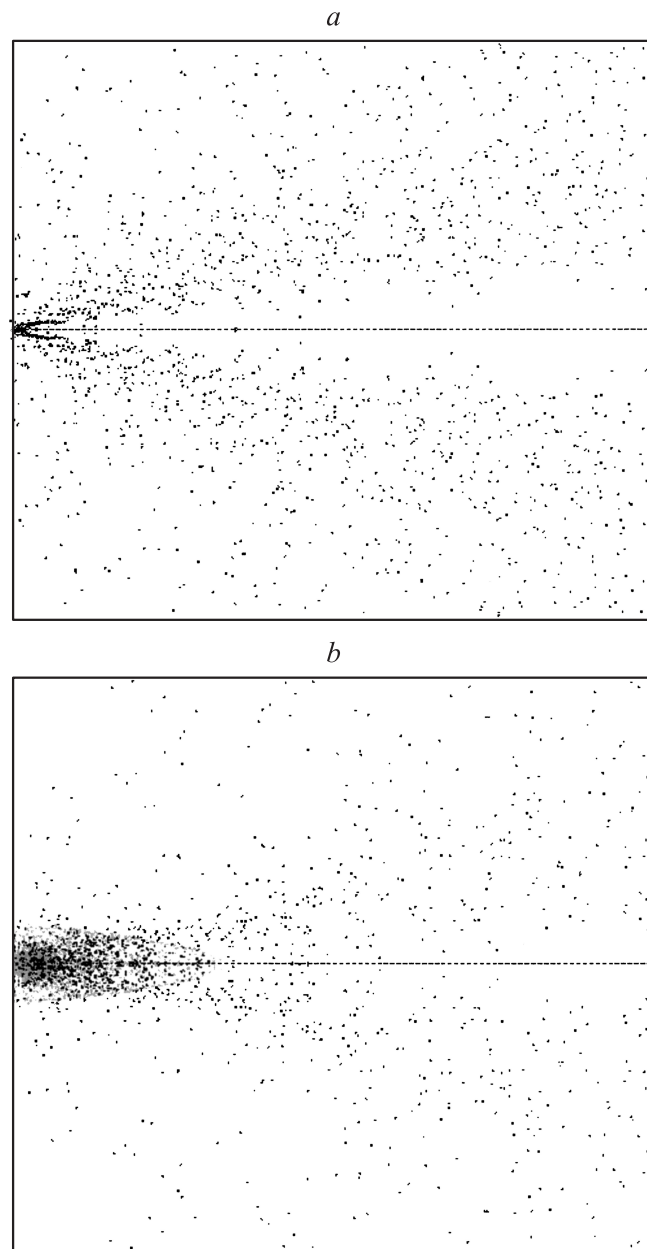


Рис. 4. Распределение электронов (*a*) и электронов и ионов (*b*) в системе в плоскости (Z, R) в момент времени $t = 0.085$ ns: электроны — черные точки, ионы — серые точки, сплошные линии — стенки резонатора.

цовом диапазоне частот. В терагерцовых генераторах виртуальный катод находится в непосредственной близости от ионов плазмы и действие их поля существенным образом влияет на процесс генерации. Даже при неподвижных ионах эффективность генерации оказывается выше, чем при их отсутствии. В гигагерцовом диапазоне частот формирование виртуального катода происходит на значительно больших расстояниях от анода, чем и объясняется пренебрежимо малое влияние ионов в случае их покоя даже при плотностях, сравнимых с плотностью электронного пучка.

Чтобы влияние ионов в традиционном виркаторе стало заметным, кроме высокой плотности необходима достаточная начальная энергия ионов, чтобы за время, меньшее длительности импульса тока, они оказались в области формирования виртуального катода. В силу изложенных выше причин ионы в виркаторах гигагерцового диапазона частот практически не оказывают влияния на эффективность процесса генерации.

Заключение

Используя взаимодействие мощных лазерных импульсов с мишенями, возможно создание генераторов терагерцового диапазона частот. Эффективность генерации такого генератора оказывается в несколько раз выше, чем у традиционных виркаторов подобного типа.

Список литературы

- [1] *Beg F.N., Bell A.R., Dangor A.E. et al. // Phys. Plasmas. 1997. Vol. 4. P. 447.*
- [2] *Диденко А.Н., Ращиков В.И. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 9. С. 1182.*
- [3] *Ращиков В.И. / Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. 1990. Вып. 10 (18). С. 50.*