

04;07;10

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

© А.Н. Диденко, В.И. Ращиков, В.Е. Фортон

Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ), Москва
Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
E-mail: virashchikov@mephi.ru

Поступило в Редакцию 29 сентября 2010 г.

Исследована возможность генерации излучения терагерцового диапазона при облучении мишеней короткими ~ 0.1 пс 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 релатронном 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 нано- 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 возможности генерации излучения терагерцового диапазона частот при облучении мишеней короткими лазерными импульсами высокой интенсивности. Вид исследуемого генератора представлен на рис. 1.

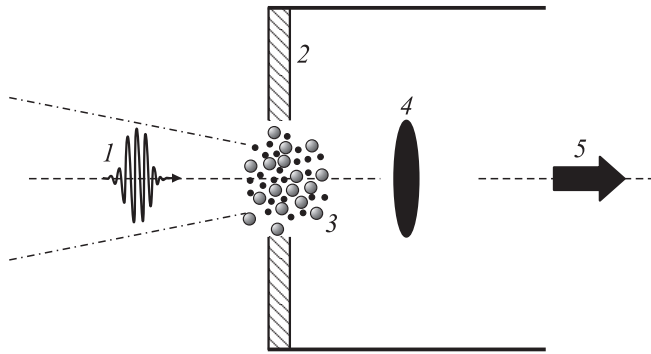


Рис. 1. Схема исследуемого генератора: 1 — лазерный импульс, 2 — мишень, 3 — плазма, 4 — виртуальный катод, 5 — генерируемое излучение.

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} м, энергия ~ 10 кДж). На мишени образуется плазма, и с ее задней плоскости вылетают электроны, а затем и ионы с плотностью $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (ток $\sim 10^4$ А) 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 — сверхточных СВЧ-приборах с виртуальным катодом [2].

Исследование проводилось путем численного моделирования с использованием 2.5-мерного релятивистского электромагнитного PIC-кода. На каждом шаге интегрирования уравнений движения на пространственной сетке решается полная система уравнений Максвелла. 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). Диаметр и длина резонатора равны соответственно 2 и 1 см. С левой торцевой стенки резонатора вылетают электронный и протонный пучки радиусом 0.01 см каждый, с одинаковой ($n \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) равномерно распределенной плотностью заряда и релятивистским максвелловским распределением по энергии с температурой $\sim 1 \text{ MeV}$ вдоль оси резонатора. Угловой разброс составлял 30° .

Генерируемое таким пучком поле на выходе системы ($Z = 1 \text{ cm}$) и его частотный спектр приведены на рис. 2.

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

Для сравнения процессов генерации промоделируем традиционный ридитрон с теми же входными параметрами электронного пучка. Ионы при этом будут отсутствовать.

Результаты расчета показывают, что частота генерируемого сигнала смещается к $f \sim 0.5 \text{ THz}$, а амплитуда уменьшается втрое.

Объяснение этого эффекта можно получить, исследуя процесс образования виртуального катода и дальнейшей генерации ВЧ-мощности.

На рис. 3, *a* в плоскости $Z-R$ приведено распределение электронов в системе при ридитронном 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 (рис. 3, *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 составля-

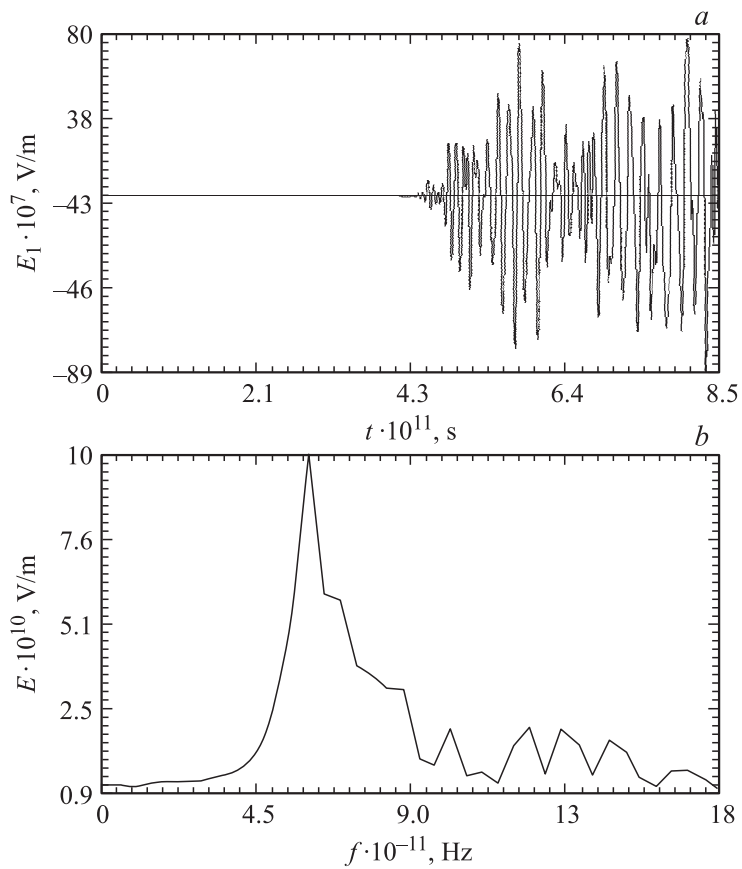


Рис. 2. Зависимость продольного электрического поля от времени (а) и его частотный спектр (б) на оси системы.

ет при этом ~ 1 GW, что соответствует $\sim 10\%$ -му коэффициенту преобразования мощности электронного пучка в ВЧ-сигнал (в релитроне при отсутствии ионов этот коэффициент составляет $\sim 2\%$).

В классических СВЧ-генераторах с виртуальным катодом сильно-точный электронный пучок, проходя сквозь анод, также создает положительно заряженные ионы. Однако для того чтобы их влияние привело

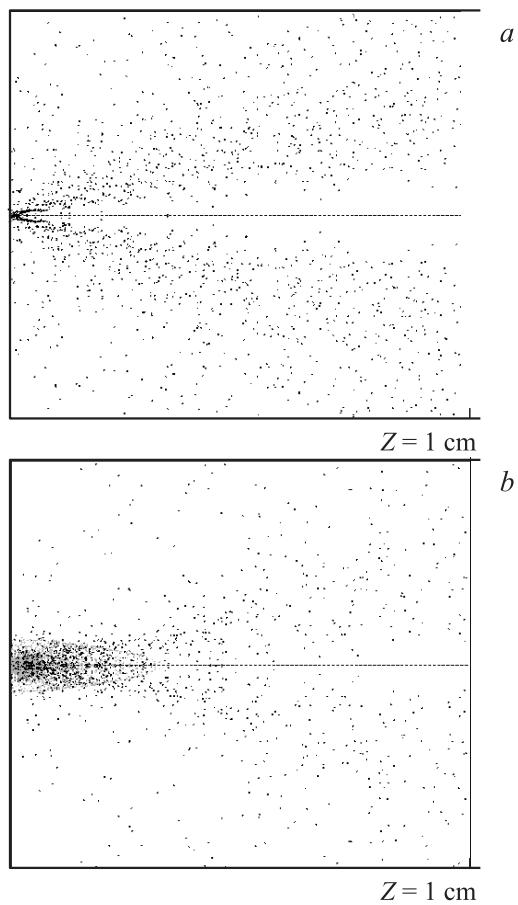


Рис. 3. Распределение электронов (*a*) и электронов и ионов (*b*) в системе в плоскости $Z-R$ в момент времени $t = 0.085$ ps: электроны — черные точки, ионы — серые точки, сплошные линии — стенки резонатора.

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 гигагерцовом диапазонах 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. 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.

Таким образом, 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.E., Dangor A. et al. // Phys. Plasmas. 1997. V. 4. P. 447.*
- [2] *Диденко А.Н., Ращиков В.И. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 9. С. 1182.*