

ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА МИШЕНЬ

А.Н. Диденко¹, В.И. Ращиков¹, В.Е. Фортков²

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия;

²Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия
virashchikov@mephi.ru

При облучении мишеней мощным ($10^{18} \dots 10^{19}$ Вт/см²) коротким (10...100 пс) лазерным импульсом вылетающие из формирующейся плазмы электроны образуют виртуальный катод, колебания которого вызывают генерацию в терагерцовом диапазоне частот. Исследование механизма генерации проводилось на численной модели с использованием релятивистского электромагнитного PIC-кода. Механизм генерации, в основном, аналогичен виркаторному. Однако наличие ионного фона плазмы мишени приводит к существенному увеличению эффективности генерации.

В последние годы интенсивно развивается направление исследований, связанное с созданием и применением источников электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот. Разработка новых методов диагностики вещества, являющихся приоритетными в развитии нано- и биотехнологий, невозможна без генераторов подобного типа. Такие импульсные генераторы высокой интенсивности терагерцового диапазона могут быть созданы на базе приборов с виртуальным катодом (виркаторов). Необходимые для этого пучки высокой интенсивности можно получить, например, при взаимодействии коротких интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями.

Целью настоящей работы является исследование механизма генерации излучения терагерцового диапазона приборами с виртуальным катодом, источниками в которых служат мишени, облучаемые короткими лазерными импульсами высокой интенсивности.

Вид исследуемого генератора представлен на Рис.1.

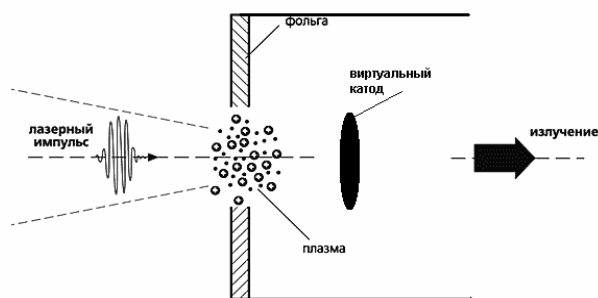


Рис.1. Схема исследуемого генератора

Исследование проводилось путём численного моделирования с использованием 2,5-мерного релятивистского электромагнитного PIC (particle-in-cell)-кода СУМА (Система Уравнений Максвелла) [1].

Код представляет собой 2,5-мерную нестационарную модель, позволяющую описывать самосогласованным 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 выполняется

вычисление плотностей заряда и токов, входящих в уравнения Максвелла. Раздача заряда и токов в узлы пространственной сетки и их сглаживание выполняется путем взвешивания площадей частицы (облака) и ячейки сетки. Поступление новых частиц на шаге моделирования Δt в рассматриваемую область реализовано в виде механизмов инжекции, 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 .

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

Скорректированное выражение для поля имеет следующий вид:

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

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 ёмкости, связывающий потенциал и заряд в необходимых узлах.

На границе области могут задаваться следующие краевые условия:

- металлическая поверхность;
- условия периодичности;
- условия симметрии;
- условия прохождения волны.

Поскольку в результате решения уравнений Максвелла поля находятся в узлах пространственной сетки, для численного интегрирования уравнений движения необходимо вычисление поля в промежуточных точках, где располагаются частицы. Для этого используется 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 интегри-

рования применен релятивистский вариант метода с перешагиванием и 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: $W = \frac{1}{2} \int_V (\mathbf{H}\mathbf{B} + \mathbf{E}\mathbf{D})dV$, дающий величину запасенной в области энергии; $P = \int_V \mathbf{j}\mathbf{E}dV$, позволяющий оценить преобразование мощности в системе; $P_{\Sigma} = \iint [\mathbf{E}\mathbf{H}]dS$, вычисляющий поток через заданную поверхность.

Излучение в терагерцовом диапазоне частот с использованием виркаторного механизма генерации может быть получено при взаимодействии мощного короткого лазерного импульса с мишенью [2].

Вылетающие из плазмы электроны образуют виртуальный катод, колебания которого определяются не только их собственным полем, но и полем ионов плазмы.

На Рис.2 представлены распределения электронов в исследуемой области (цилиндрический резонатор с открытой правой стенкой, радиус и длина которого равны 1 см) в плоскости R-Z. Плотность образующейся под действием лазерного импульса плазмы на левой стенке резонатора составляла $3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Рис.2,б соответствует случаю вылета электронов с энергией 1 МэВ и остающихся в покое ионов (ионы без начальной скорости). Незначительная часть ионов под действием кулоновского поля вылетевших электронов всё же покидают плазму, но их влияние на процесс формирования виртуального катода оказывается не существенным. Рис.2,в отличается лишь начальной энергией ионов, также, как и у электронов, равной 1 МэВ. Для сравнения на Рис.2,а представлен случай отсутствия ионов. Левые рисунки соответствуют моменту времени $3,5 \times 10^{-11} \text{ с}$, когда виртуальный катод уже сформирован, и начались его колебания и генерация мощности. Правые рисунки соответствуют моменту времени $6,5 \times 10^{-11} \text{ с}$, установившегося режима.

Образование виртуального катода приводит, вследствие действия сил кулоновского расталкивания, к уходу электронов от оси системы и, следовательно, из области активной генерации. Колебания виртуального катода приводят к модуляции плотности электронов, хорошо различимых на рисунках, причем пространственный период соответствует длине волны генерируемого сигнала.

Сравнение Рис.2,а,б,в позволяет сделать вывод, что наличие ионов плазмы препятствует быстрому выходу электронов из области взаимодействия, повышая тем самым передачу их кинетической энергии полю.

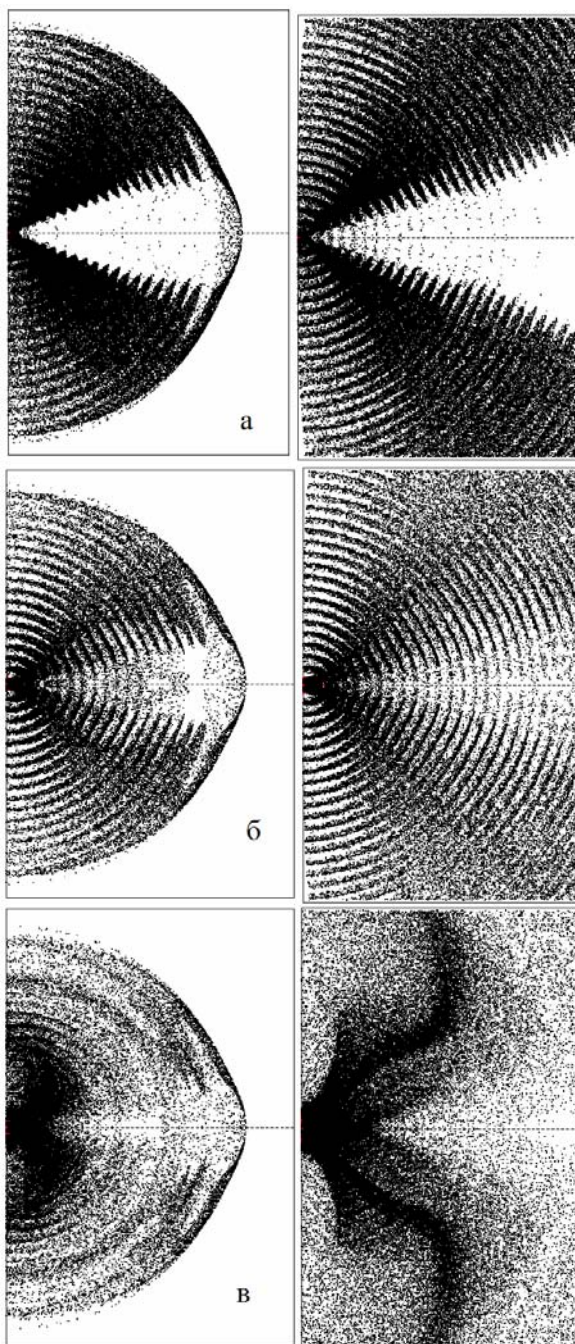


Рис.2. Распределения электронов в исследуемой области в плоскости R-Z: а – ионы отсутствуют; б – ионы покоятся; в – ионы вылетают с начальной энергией

На Рис.3,а представлено поле на выходе системы ($z = 1 \text{ см}$), генерируемое электронным пучком при отсутствии ионов, а на Рис.3,б – соответствующий ему частотный спектр.

Видно, что генерация идёт в терагерцовом диапазоне частот $f \sim 0,6 \text{ ТГц}$, причём для образования виртуального катода и начала процесса генерации требуются времена порядка нескольких десятков пикосекунд.

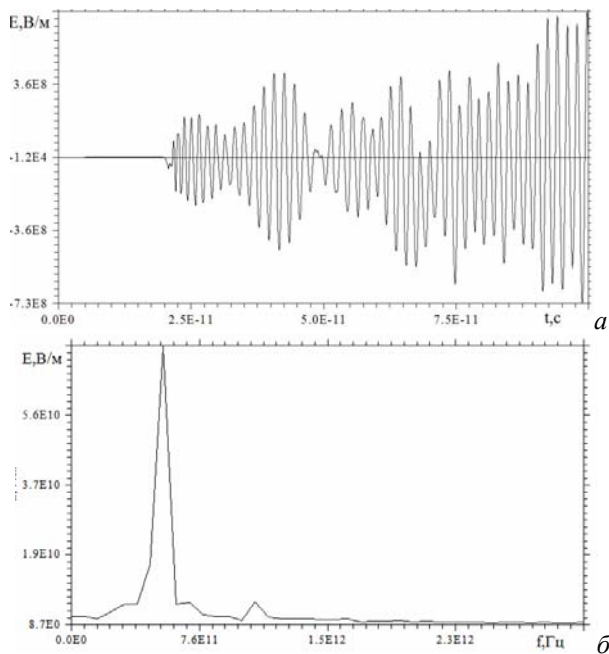


Рис.3. Зависимость продольного электрического поля от времени (а) и его частотный спектр (б) на оси системы при отсутствии ионов

На Рис.4,а представлено поле на выходе системы, генерируемое электронным пучком при наличии покоящихся ионов, а на Рис.4,б – соответствующий ему частотный спектр.

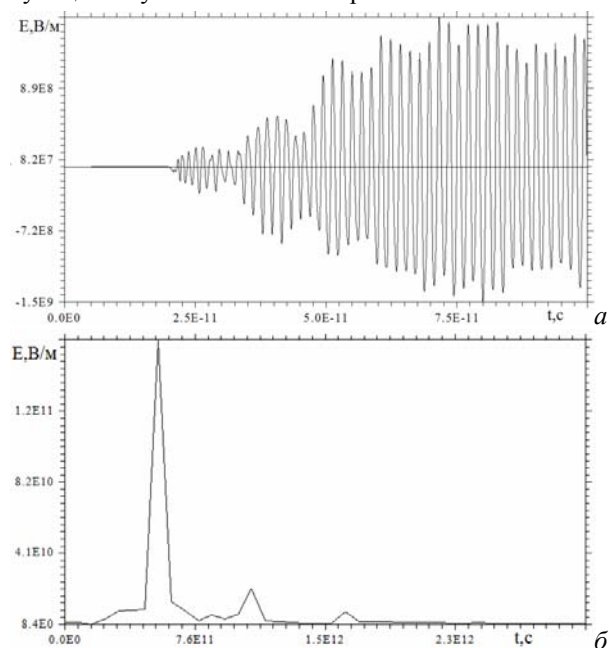


Рис.4. Зависимость продольного электрического поля от времени (а) и его частотный спектр (б) на оси системы. Ионы покоятся

Рис.5 отличается от Рис.4 лишь тем, что ионы вылетают из плазмы с энергией 1 МэВ.

Исследуемый нами механизм генерации отличается от традиционного вибраторного механизма в приборах СВЧ-диапазона [3-4] (редитронах) двумя обстоятельствами.

Во-первых, колебания виртуального катода совершаются на расстояниях от левой стенки резонатора (сетка в редитроне и мишень в нашем случае) на порядок меньших, чем в диапазоне СВЧ.

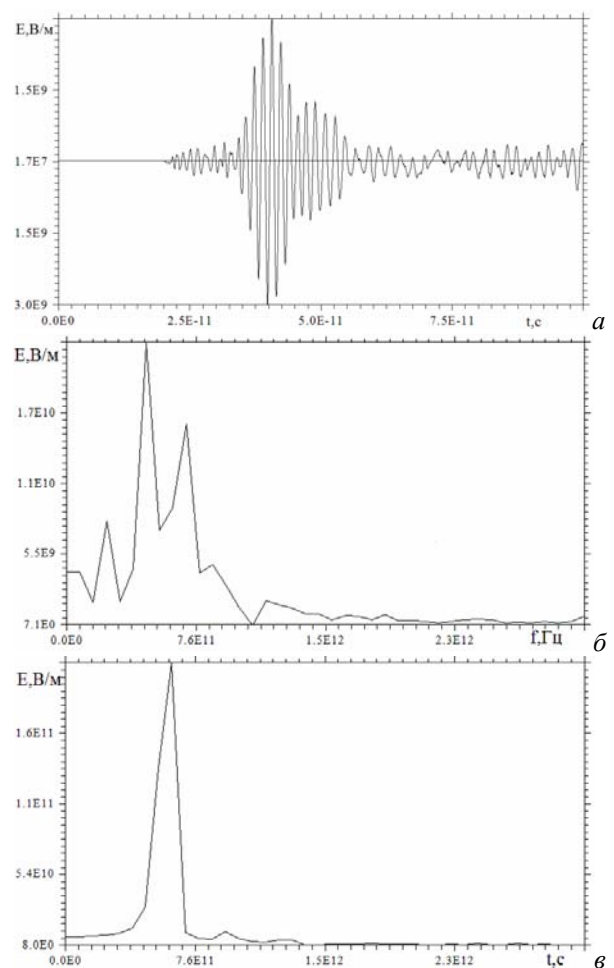


Рис.5. Зависимость продольного электрического поля от времени (а) и его частотные спектры (б,в) на оси системы. Ионы летят

Во-вторых, в области мишень-виртуальный катод присутствуют положительно заряженные ионы, вылетевшие из плазмы мишени как под действием лазерного импульса, так и выгнанные полем вылетающих электронов.

Оба эти фактора оказывают существенное влияние на процесс формирования виртуального катода и дальнейшей генерации.

Рис.2,а и Рис.3 иллюстрируют процесс генерации в редитроне терагерцового диапазона частот, то есть через сетку на левом торце резонатора (не прозрачную для поля, но прозрачную для частиц) влетают электроны с той же плотностью и энергией, как и с мишени. В случае, представленном на Рис.2,б и Рис.4 на левой стенке резонатора (мишень) присутствуют неподвижные ионы, а в варианте, изображенном на Рис.2,в и Рис.5, ионы вылетают с мишени с начальной скоростью.

Сравнение результатов, приведенных на рисунках, позволяет сделать следующие выводы.

1. Наличие ионов приводит к существенному росту генерируемого поля, которое связано не только с фокусирующим действием ионов, но и с вызываемым ими дополнительным торможением электронов.

2. Максимальное поле достигается в случае, когда ионы имеют начальную скорость (см. Рис.5,а). Однако с ростом длительности импульса, когда ио-

ны заполняют пространство мишень-виртуальный катод, мощность генерируемого сигнала падает, а его частотный спектр сильно искажается. Спектр на Рис.5,б, как и спектры Рис.3,б и Рис.4,б, снят через 85 пикосекунд с момента подачи импульса. Спектр Рис.5,в соответствует началу процесса генерации ($t = 35$ пс).

3. В случае, когда ионы вылетают из плазмы лишь под действием кулоновского поля электронов (см. Рис.4), генерируемое поле не ослабевает и частотный спектр не искажен.

4. 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 виркаторах СВЧ-диапазона частот колебания виртуального катода происходят на порядок больших расстояниях от сетки, да и концентрация вторичных ионов на сетке существенно меньше электронной. Сетку стараются сделать прозрачной для электронов. В силу этих причин влиянием ионов на механизм генерации мощности в таких приборах можно пренебречь.

Моделирование виркатора гигагерцового диапазона частот с типичными параметрами электронного пучка (ток 20 кА, энергия 250 кэВ, длительность импульса 15 нс), даже при условии, что на сетке образуются положительно заряженные ионы равной концентрации, не показало сколь-нибудь заметного увеличения эффективности генерации.

Для получения заметного эффекта ионы должны приблизиться к области колебаний виртуального

катода на расстояние, когда их кулоновское поле окажет влияние на процесс генерации. Для приведенных выше параметров электронного пучка начальная энергия ионов на сетке должна быть больше 50 кэВ, чтобы при такой длительности импульса появился ощутимый рост генерируемого сигнала, однако, как и в случае Рис.5, этот эффект оказывается не продолжительным.

Таким образом, при облучении мишеней лазерными импульсами с определенными параметрами, возможно получить генерацию в терагерцовом диапазоне частот и мощностью порядка гигаватт.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.И. Рашиков. Расчет электромагнитных полей в структурах сложной геометрии // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 1990, в.10 (18), с.50-53.
2. А.Н. Диденко, В.И. Рашиков, В.Е. Фортов. О возможности генерации мощного излучения терагерцового диапазона частот при воздействии мощных лазерных импульсов на мишень // *Письма в ЖТФ*. 2011, т.37, в.6, с.27-32.
3. А.Н. Диденко, В.И. Рашиков. Механизм генерации мощных СВЧ-колебаний в системах с виртуальным катодом // *ДАН СССР*. 1990, т.313, №3, с.597-599.
4. А.Н. Диденко, В.И. Рашиков. Генерация мощных СВЧ-колебаний в системах с виртуальным катодом // *Физика плазмы*. 1992, т.18, №9, с.1182-1190.

Статья поступила в редакцию 23.09.2011 г.

TERAHERTZ EMISSION FROM TARGET UNDER THE ACTION OF POWERFUL LASER PULSES

A.N. Didenko, V.I. Rashchikov, V.E. Fortov

The target irradiated by high intensity ($10^{18} \dots 10^{19}$ W/cm²) short (10...100 ps) laser pulses generates plasma and electron emission from plasma produce virtual cathode. Virtual cathode oscillation leads to power generation in a THz range. This generation mechanism has been studied by numerical simulations using a relativistic electromagnetic PIC code and appears to be very similar to those of usual vircator. However plasma ions result in not only additional electron deceleration but electron focusing. Thereof the efficiency of generation in these radiation sources is several times higher compared to that in the analogous traditional vircators. This mechanism can be used for high power THz range radiation sources creation.

ГЕНЕРАЦІЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ВНАСЛІДОК ВПЛИВУ ПОТУЖНИХ ЛАЗЕРНИХ ІМПУЛЬСІВ НА МІШЕНЬ

A.M. Діденко, В.І. Рашиков, В.Є. Фортов

При опроміненні мішеней потужним ($10^{18} \dots 10^{19}$ Вт/см²) коротким (10...100 пс) лазерним імпульсом, що вилітає з формуючої плазми, електрони утворюють віртуальний катод, коливання якого викликають генерацію в терагерцовому діапазоні частот. Дослідження механізму генерації проводилося на чисельній моделі з використанням релятивістського електромагнітного PIC-коду. Механізм генерації, в основному, аналогічний віркаторному. Однак наявність іонного фону плазми мішені призводить до істотного збільшення ефективності генерації.