

# ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ КАК ИСТОЧНИКА ТЕРРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*А. П. Мелехов, В. В. Комарецкий, В. В. Беляков, Д. В. Доманин*

Национальный исследовательский ядерный университет («Мифи»), Москва

## Введение

Одним из возможных источников широкополосного ТГц-излучения (ТИ) может служить вакуумная искра с лазерным инициированием. Можно предложить несколько механизмов генерации ТГц излучения (ТИ) из вакуумной искры, отличающихся природой возникновения: тепловое (Планковское) излучение, излучение электронов в магнитном поле разрядного тока (циклотронный механизм) и излучение, обусловленное быстроразвивающимися неустойчивостями, возникающими в структуре микропинча [1].

Примерный спектр ТИ такой системы в диапазоне частот  $\nu = 400 \div 2400$  ГГц показан в работе [1]. Авторы работы показали, что зависимость мощности ТИ от частоты носит примерно линейный характер. Из этого следует, что природа ТГц излучения вакуумной икры, преимущественно не тепловая, т. к. спектральная плотность мощности в приближении *черного* тела (формула Рэлея – Джинса) пропорциональна квадрату частоты излучения.

Иной механизм генерации ТИ изучается в экспериментах по пучково-плазменной генерации ТИ [2–5]. При этом высокоэнергетичный (около 1 МэВ) пучок электронов инжектируется в газоразрядную плазму с последующим нагревом и турбулизацией плазмы.

В работах [2,3] показано, что при электронных плотностях  $n_e = 2 \times 10^{14} \div 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$  мощность терагерцового сигнала  $P_T$  зависит от  $n_e$  как  $P_T \sim (n_e)^{3/2}$  или  $P_T \sim (\omega_p^2)^{3/2}$ , где  $\omega_p$  – плазменная частота. Плазменная частота варьируется в пределах  $\omega_p = 7,5 \times 10^{11} \div 4,0 \times 10^{12}$  Гц. Авторы этой работы сделают вывод, что в слаботурбулентном режиме ленгмюровские волны могут либо рассеиваться на ионно-звуковых колебаниях, порождая электромагнитное излучение на плазменной частоте, либо участвовать в процессах слияния с образованием электромагнитных волн на удвоенной плазменной частоте.

В настоящей работе исследовались параметры масс-спектров ионов, эмитируемых из плазмы лазерно-инициированной вакуумной искры. Интенсивность пиков ионного тока и распределение ионов по зарядностям позволяют оценить концентрацию электронов в плазме. На самом деле оценивается величина  $N_e$  пропорциональная концентрации электронов в плазме  $n_e$ . Сопоставление этой величины с интенсивностью генерируемого плазмой терагерцового излучения (ТИ) позволило предположить вид зависимости мощности ТИ от концентрации электронов плазмы.

## 1. Экспериментальная установка

### 1.1. Вакуумная разрядная система с лазерным инициированием

Величина энергии инициирующего разряда лазерного импульса  $E_L = 8 \div 110$  мДж при длительности  $\tau \leq 20$  нс. Высвобождаемая в разряде энергия  $E_D \approx 17$  Дж при межэлектродном напряжении  $U_{AK} = 12,5$  кВ. Температура разрядной плазмы оценивается величиной  $T_e \approx 1000$  эВ. Интерферометрически была оценена электронная плотность плазмы вакуумной искры  $n_e \leq 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

Плазма вакуумной искры является источником интенсивных потоков ионов разной зарядности, электронов и электромагнитного излучения, в том числе ТИ. ТИ выводится из вакуумной камеры через окно из майларовой пленки (50 мкм) и детектируется пироэлектрическим приемником из танталата лития с чувствительностью  $5 \times 10^4$  В/Вт. В качестве защиты приемника от тормозного рентгеновского излучения с энергией кванта  $>10$  кэВ использовался диск толщиной 3 мм из тефлона.

Испускаемые из плазмы вакуумной искры потоки ионов попадают в трубу времяпролетного масс-спектрометра и далее в магнитный анализатор, где импульс ионного тока детектируется вторичным электронным умножителем ВЭУ-2, усиливается и передается на АЦП, и компьютер. Временное разрешение 12 разрядного АЦП составляет 25 нс.

На рис. 1 показан вид исследовательской установки с лазерным инициированием вакуумной искры. Приемник ТИ находится на верхней съемной крышке вакуумной камеры и на рисунке не показан.

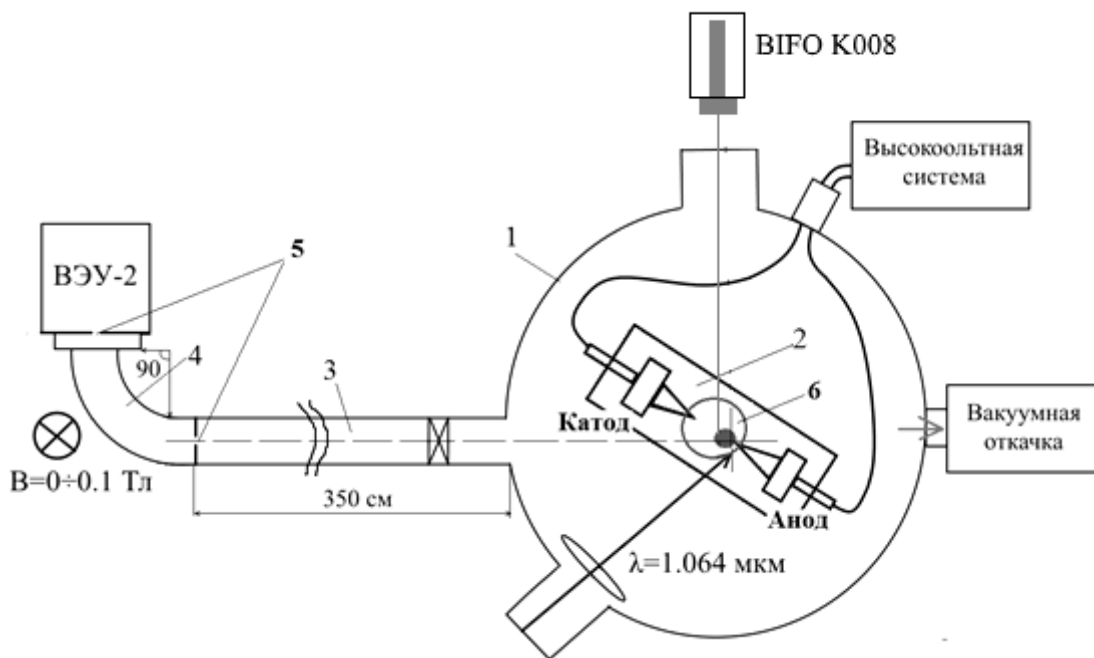


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – камера взаимодействия; 2 – электродный узел; 3 – времяпролетная труба масс-спектрометра; 4 – магнитный анализатор ионов; 5 – входная и выходная щели магнитного анализатора; 6 – область контроля ТИ (приемник расположен над областью разряда на верхней крышке вакуумной камеры)

## 1.2. Времяпролетный масс-спектрометр

Для анализа ионов вакуумной искры применялся времяпролетный масс-спектрометр с магнитным анализатором, который имеет достаточно большое пролетное расстояние 450 см, что позволяет исследовать массовый и зарядовый спектр ионов в большом диапазоне энергий [6]. Принципиальная схема времяпролетного масс-спектрометра изображена на рис. 1.

Ниже приведены некоторые характеристики масс-спектрометра:

- 1) анализируемые массы ионов  $m = 1 \div 300$  а.е.м;
- 2) разрешение  $m/\Delta m \approx 300$ ;
- 3) энергетический спектр ионов от 1эВ до 250 кэВ;
- 4) величина изменяемого магнитного поля анализатора  $B = 0 \div 0,1$  Тл.

## 2. Экспериментальные результаты и анализ

### 2.1. Масс-спектрометрические исследования

Во время эксперимента одновременно регистрировались масс-спектры ионов плазмы вакуумной искры и измерялась интенсивность терагерцового сигнала. Для *анодного* инициирования вакуумного разряда было проведено несколько серий измерений масс-спектров ионов для двух значений токов магнитного анализатора:  $I = 71,2$  мА и  $I = 139,1$  мА. Выбор величины тока магнитного анализатора позволяет детектировать более энергичные, для более сильного тока, или менее энергичные ионы.

Для анализа, полученных в одинаковых условиях масс-спектров, последние были разделены условно на 2 группы (для каждого тока магнитного анализатора) по величине интенсивности ТИ: 1 – величина терагерцового сигнала  $P_{T1} \approx 500$  мВ; 2 – величина терагерцового сигнала  $P_{T2} \approx 50$  мВ (соответствует уровню шума). На рис. 2 приведены усредненные масс-спектры плазмы *анодного* разряда для тока магнитного анализатора  $I = 71,2$  мА.

Из рис. 2 видно, что плазме с большей концентрацией ионов, т.е. с большей концентрацией электронов, соответствует более мощный сигнал ТИ. Похожая картина и в случае с масс-спектрами ионов при токе магнитного масс-анализатора  $I = 139,2$  мА.

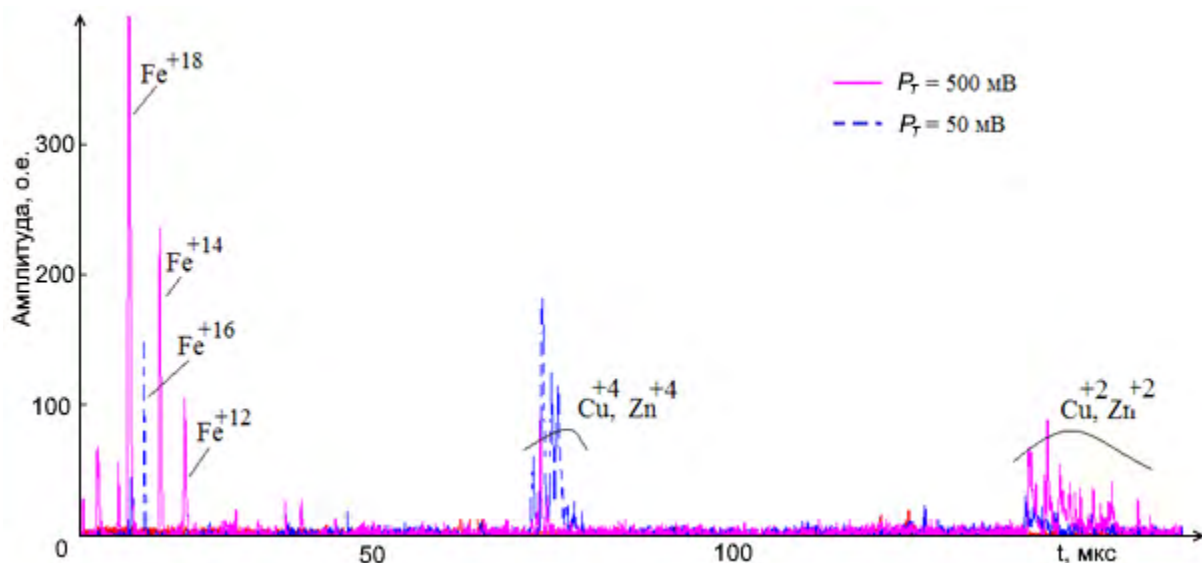


Рис. 2. Усредненные масс-спектры ионов плазмы *анодного* разряда для разных величин мощности ТИ. Ток магнитного анализатора  $I = 71,2$  мА

В таблице представлены результаты обработки нескольких серий измерений масс-спектров для двух величин тока магнитного анализатора:  $I = 71,2$  мА (*а*) и  $I = 139,2$  мА (*б*). Обработка проводилась в виде селекция по амплитудам ТИ и последующего усреднения для заданной амплитуды ТИ. Проведены оценки числа электронов для случаев без ТИ и с генерацией ТИ по формуле

$$N_e = \sum N_i \cdot Q \quad (1)$$

где  $Q$  – величина заряда иона,  $N_i$  – количество ионов с зарядом  $Q$ .

Условия регистрации масс-спектра	Количество электронов $N_e$ , о.е. (Нет ТИ)	Количество электронов $N_e^T$ , о.е. (Есть ТИ)
$I = 71,2$ мА	0,95	2,8
$I = 139,2$ мА	1,3	5,9

Из таблицы видно, что для *анодного* разряда (для обоих токов) выполняется соотношение

$$N_e^T / N_e = 3 \div 4, \quad (2)$$

здесь  $N_e^T$  – количество электронов в разряде в случае генерации ТИ,  $N_e$  – количество электронов в разряде без генерации ТИ.

Энергия в импульсе ТИ равна примерно  $P_{T1} \approx 500$  мВ для случая генерации и  $P_{T2} \approx 50$  мВ в обратном случае. Величина  $P_{T2} \approx 50$  мВ соответствует шуму измерительной системы ТИ. Поскольку  $P_{T1}/P_{T2} \approx 10$ , то с учетом (2) можно предположить степенную зависимость

$$P_T \sim (N_e^T)^x, \quad (3)$$

где  $x \geq 2$ .

Можно предположить, что генерация ТИ носит пороговый характер и условием *эффективной* генерации ТИ является существенная концентрация электронов в плазме при наличии определенным образом сконфигурированных достаточно сильных магнитных полей, если предполагать основным циклотронный механизм генерации СВЧ излучения и ТИ.

В нашем случае при радиусе токового канала  $b = 500$  мкм и пиковой величине разрядного тока равной  $I = 10$  кА величина магнитного поля  $B = 2$  Тл. Тогда циклотронная частота  $\omega_c = 1,76 \cdot 10^{11} \times B$  рад/с, где  $B$  в Тл.

Для поля  $B = 2$  Тл получаем  $\omega_c = 0,35 \cdot 10^{12}$  рад/с. С точки зрения приближения к терагерцовому диапазону это небольшая величина. Можно допустить, что локально, например при *глубоком* пинчевании разряда, магнитные поля достигают величин  $B \geq 20$  Тл и тогда  $\omega_c = 3,5 \cdot 10^{12}$  рад/с. Или же превалирует другой механизм генерации ТИ.

Предполагая механизм конверсии плазменных колебаний в энергию электромагнитных колебаний в плазме вакуумной искры выражение (3) можно переписать в виде

$$P_T \sim (\omega_p^2)^x, \quad (4)$$

где  $x \geq 2$ ,  $\omega_p$  – плазменная частота.

Наша оценка вида зависимости мощности терагерцового излучения от величины плазменной частоты косвенно подтверждается исследованиями аналогичной зависимости при пучково-плазменной генерации ТИ.

## 2.2. Исследование динамики развития плазменного образования с помощью высокоскоростной электронно-оптической камеры VIFO K008

В продолжение исследований связи параметров вакуумного искрового разряда и мощности терагерцового излучения (ТИ) был проведен качественный эксперимент с применением высокоскоростной камеры VIFO K008. Были получены снимки свечения плазмы вакуумного разряда в режиме *single-frame mode*. Одновременно с этим регистрировалась величина терагерцового излучения на осциллографе. Полученные изображения и осциллограммы представлены на рис. 3, 4.

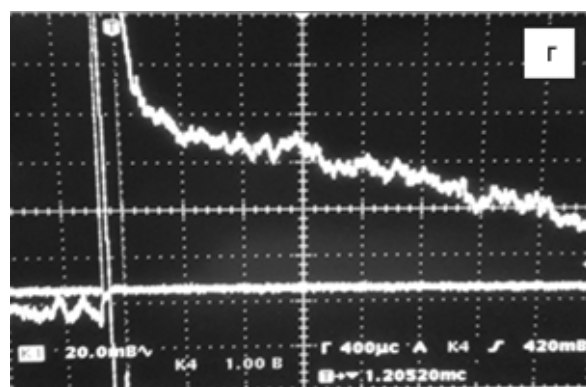
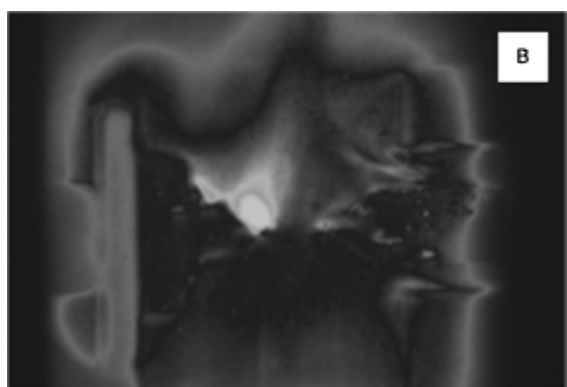
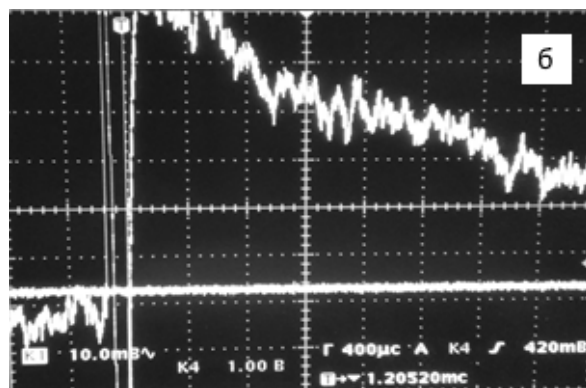
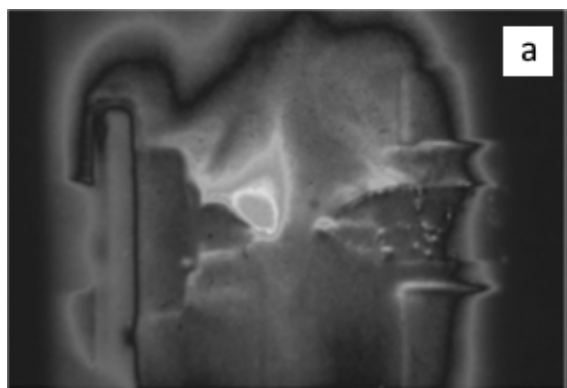


Рис. 3. Снимки вакуумного разряда, полученные с помощью электронно-оптической камеры K008 (а, в) и соответствующие им осциллограммы терагерцового сигнала (б, г)

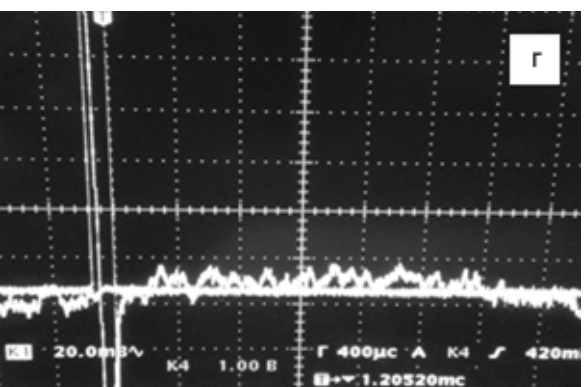
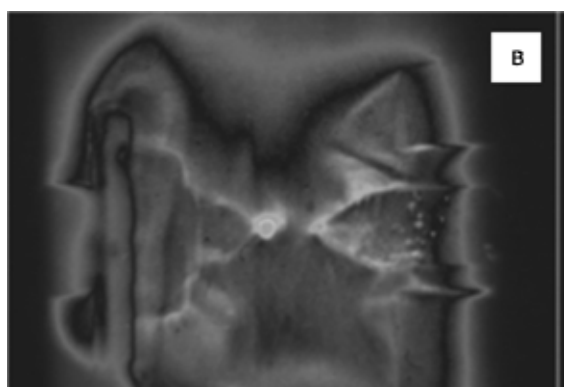
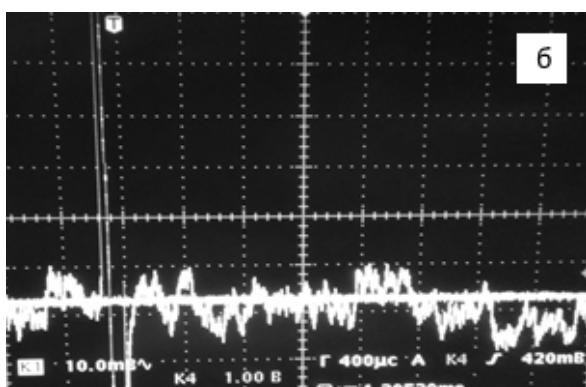
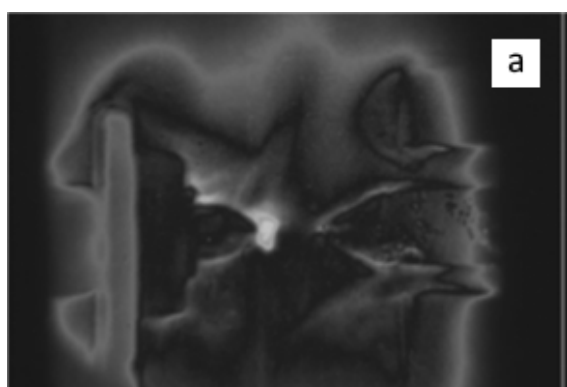


Рис. 4. Снимки вакуумного разряда, полученные с помощью электронно-оптической камеры K008 (а, в) и соответствующие им осциллограммы терагерцового сигнала (б, г)

Качественно анализируя приведенные снимки можно сказать, что большим размерам плазменного облака соответствует сигнал большей амплитуды ТИ.

### 3. Выводы

Природа генерации терагерцового излучения вакуумной икрой, скорее всего, носит комбинированный характер: есть вклад циклотронного механизма, вклад механизма конверсии плазменных колебаний в энергию ТИ, и есть какой-то вклад теплового механизма.

Вклад циклотронного механизма зависит от величины генерируемых спонтанных магнитных полей. Для терагерцового диапазона нужны поля величиной  $B \geq 20$  Тл. Это может быть, например, при *глубоком* пинчевании разряда.

Исходя из результатов проведенных масс-спектрометрических исследований плазмы вакуумной искры, можно предположить степенную зависимость мощности ТИ от концентрации электронов в плазме:  $P_T \sim (n_e)^x$ , где  $x \geq 2$ . Т. е. в нашем случае существенен вклад механизма пучково-плазменной генерации ТИ.

Этот вывод подтверждается результатами исследований, в частности, в ИЯФ СО РАН им. Г. И. Будкера, по пучково-плазменной генерации ТИ.

Из результатов исследования динамики развития плазмы вакуумной искры видна явная корреляция между мощностью ТИ и геометрическими, и яркостными параметрами плазменного образования искрового разряда.

### Список литературы

1. Kozlovskii K. I. et. al. Terahertz Radiation of a Low-inductance Discharge in Vacuum with Laser-plasma Initiation // VII International Conference on Photonics and Information Optics Volume 2018.
2. Аржанников А. В., Тимофеев И. В. Интенсивное пучково-плазменное взаимодействие как источник субмиллиметрового излучения // Вестник Новосибирского гос. ун-та. Сер.: Физика. 2016. Т. 11, № 4. С. 78–104.
3. <https://arxiv.org/pdf/1205.4081.pdf>
4. [http://www.phys.nsu.ru/vestnik/catalogue/2010/04/Vestnik\\_NSU\\_10T5V4\\_p44\\_p49.pdf](http://www.phys.nsu.ru/vestnik/catalogue/2010/04/Vestnik_NSU_10T5V4_p44_p49.pdf).
5. Two Ways for High-Power Generation of Subterahertz Radiation by Usage of Strong Relativistic Electron Beams A. V. Arzhannikov, Member, IEEE, Manfred K. A. Thumm, Fellow, IEEE et. al.
6. Alkhimova M. A. et. al. The source of X-rays and high-charged ions based on moderate power vacuum discharge with laser triggering // Nukleonika 15; 60 (2):221-227 doi: 10.1515/nuka-2015-0060.