

Экспериментальное исследование мощного широкополосного сверхсветового источника электромагнитного излучения

Е.В. Заволоков, Д.О. Замураев, А.А. Зубков, А.А. Кондратьев, Н.В. Купырин, Ю.Н. Лазарев, Е.А. Лобода, А.В. Потапов, Ю.О. Романов, И.А. Сорокин, А.С. Тищенко, Н.Н. Хавронин, А.Л. Шамраев

ФГУП «РФЯЦ–ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл. Россия, E-mail: dep5@vniitf.ru

Приведены результаты экспериментальных работ по созданию и исследованию характеристик источника мощного широкополосного электромагнитного излучения (ЭМИ). Для генерации ЭМИ используется сверхсветовой источник на основе электровакуумного фотоэлемента, инициируемого лазерным излучением пикосекундной длительности. Получена пиковая мощность ЭМИ более 10 МВт при ширине спектральной полосы более 10 ГГц и угловой расходимости излучения $\pm 17^\circ$.

Results of experimental work on development and characterization of powerful ultra wideband electromagnetic source are presented. Faster-than-light source, based on vacuum phototube, initiated by picosecond laser pulse, is used to generate electromagnetic radiation. The peak power of 10 GHz spectral bandwidth radiation with $\pm 17^\circ$ (FWHM) angular distribution, exceeding 10 MW, is achieved.

Введение

В настоящее время в НИО–5 РФЯЦ-ВНИИТФ ведутся работы по созданию и исследованию характеристик мощного широкополосного генератора электромагнитного излучения СВЧ диапазона. В работах [1,2] для получения направленного сверхкороткого (менее 100 пс) ЭМИ высокой мощности было предложено использовать сверхсветовой источник на основе фотоэлементов. Электроны, эмитируемые с поверхности катода за счет фотоэффекта, ускоряются приложенным напряжением между катодом и анодом, проходят через сетчатый анод и формируют излучающий дипольный слой над его поверхностью. При наклонном падении инициирующего излучения токовый слой распространяется вдоль поверхности анода со сверхсветовой скоростью. В этом случае ЭМИ излучается с поверхности под углом, зеркальным к углу падения инициирующего излучения. Это позволяет создавать источник с малой угловой расходимостью, зависящей только от отношения длины волны излучения к размеру источника.

Экспериментальная установка для исследования генерации ЭМИ

Конструктивно фотоэмиссионные электровакуумные коаксиальные (ФЭК) элементы представляют собой металлостеклянный электровакуумный прибор, размещенный в металлическом корпусе и являющийся отрезком коаксиальной линии с волновым сопротивлением 75 Ом. Сурьмяно-цезиевый (SbCs) фотокатод сформирован на металлической подложке диаметром 50 мм. В качестве анода используется ортогональная сетка с прозрачностью ~70% или линейная сетка с прозрачностью ~90%. Для инициирования эмиссии электронов с поверхности фотокатода, используется излучение пикосекундного лазера ЭЛАС-ПС с длиной волны 1053 мкм, преобразованное во вторую гармонику (527 нм) с использованием кристалла KDP.

Плоский фронт лазерного излучения (ЛИ) направляется на поверхность фотокатода под углом 45° . Длительность ЛИ на основной гармонике составляет $\tau = 0,9 \pm 0,1$ пс. Во всех экспериментах обеспечивалась энергия ЛИ в апертуре катода фотоэлемента от 100

до 600 мкдж, что существенно выше энергии насыщения фототока. Для синхронизации появления на фотоэлементе ЛИ и импульсного напряжения запуск высоковольтного генератора осуществлялся ЛИ, полученным отражением части основной гармоники.

Высоковольтный генератор обеспечивал следующие выходные параметры:

- Амплитуда напряжения на разомкнутом конце передающей линии до 100 кВ;
- Длительность импульса напряжения на полувывоте 7 нс;
- Длительность фронта импульса напряжения (по уровню 0,1...0,9) 2 нс;
- Нестабильность задержки срабатывания, не более ± 2 нс.

Диагностика параметров ЭМИ осуществлялась при помощи трех преобразователей напряженности импульсного электрического поля ИППЛ-Л и преобразователя магнитного поля СПМП-36. Время нарастания переходной характеристики (ПХ) ИППЛ-Л составляет от 32 пс до 44 пс. Для СПМП-36 эти значения составляют 30 пс и 100 нс, соответственно. В качестве регистратора использовался осциллограф Tektronix DPO 71604 (аналоговая полоса пропускания 16 ГГц; время нарастания ПХ $\tau_{ПХ} \approx 27,5$ пс, частота дискретизации АЦП 50 ГГц). В каналах регистрации ИППЛ-Л применялись аттенюаторы СДНР 7 с временем нарастания ПХ $\tau_{ПХ} \approx 35$ пс и паспортной полосой пропускания $\sim 12,5$ ГГц, а в канале регистрации СПМП-36 аттенюатор с временем нарастания ПХ $\tau_{ПХ} \approx 50$ пс. Таким образом, суммарное время нарастания ПХ измерительного тракта напряженности электрического поля составляет от $\tau_{ПХ} \leq 42$ пс (без аттенюаторов) до $\tau_{ПХ} \leq 55$ пс. Время нарастания ПХ тракта измерения напряженности магнитного поля $\tau_{ПХ} \leq 40$ пс без аттенюатора и $\tau_{ПХ} \leq 64$ пс с аттенюатором. Погрешность измерений напряженности электрического поля без учета влияния переходной характеристики тракта составляет $\sim 7\%$, магнитного $\sim 10\%$.

Фотоэмиссионный элемент и измерительные преобразователи ЭМИ размещаются внутри безэховой камеры. Безэховая камера представляет собой металлический параллелепипед с размерами 2Ч1Ч1 м, внутренняя поверхность которого обклеена радиопоглощающим материалом. Схема установки аппаратуры диагностики ЭМИ приведена на рисунке 1. Все измерительные преобразователи установлены на расстоянии 1,3 м от излучателя вблизи оси диаграммы направленности излучения, совпадающей с осью безэховой камеры.

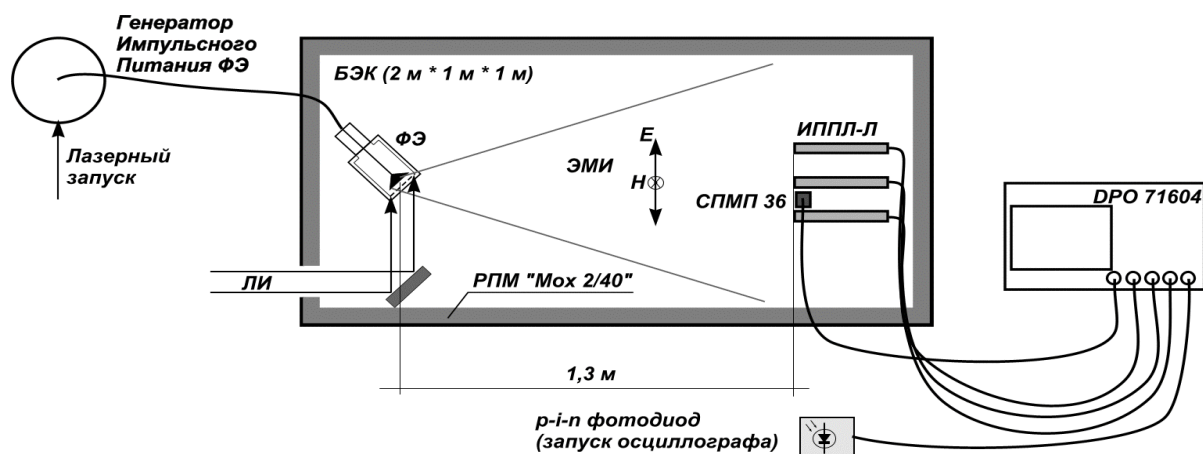


Рис. 1. Схема размещения аппаратуры диагностики ЭМИ

Результаты экспериментальных измерений

Зависимость напряженности поля ЭМИ от амплитуды импульсного напряжения на фотоэлементах с различными величинами ускоряющих промежутков h (2 и 3 мм) показана на рисунке 2.

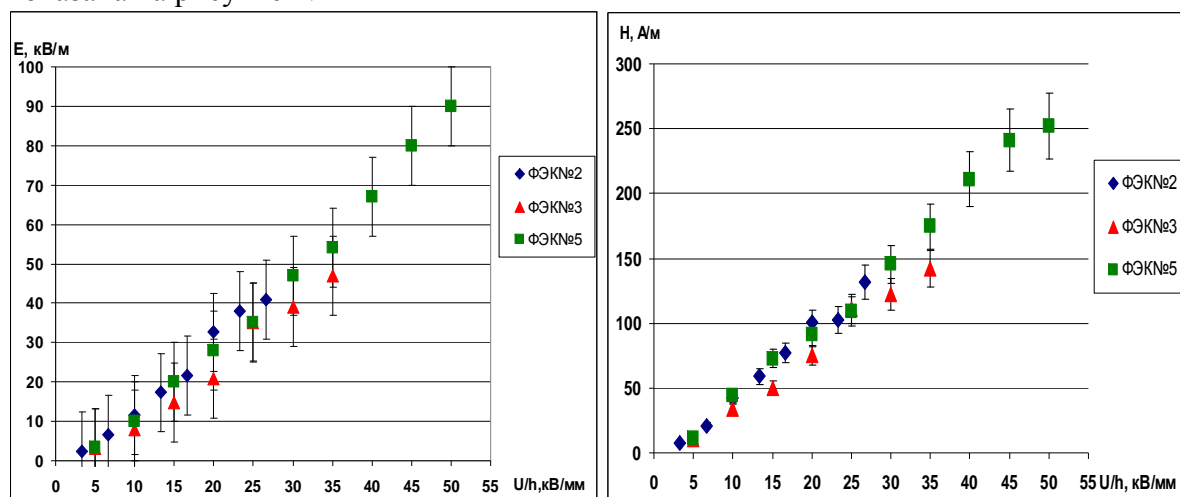


Рис. 2. Зависимость напряженности электрической (слева) и магнитной (справа) составляющей ЭМИ от напряженности ускоряющего поля

Максимальное измеренное на расстоянии $R=1,3$ м от излучателя значение напряженности поля ЭМИ соответствует амплитуде импульсного питания ФЭК ($h = 2$ мм, линейная сетка) 100 кВ и составляет $E=90$ кВ/м для электрического поля и $H=250$ А/м для магнитного. Показатель качества излучателя при этом $E\dot{C}R = 117$ кВ.

Информация о спектральном составе излучения получалась применением преобразования Фурье к регистрируемым осциллограммам напряженности поля. Так как кроме сигнала ЭМИ в осциллограммах присутствуют другие сигналы (наводки, отражения), то регистрируемые осциллограммы перед преобразованием Фурье подвергались обработке, при которой выделялся изучаемый импульс, а его окрестности «занулялись» (рисунок 3). На рисунке 4 представлены спектры напряженности магнитного поля, полученные преобразованием зарегистрированной (необработанной) осциллограммы и выделенного импульса. Как видно из рисунка, спектр выделенного импульса может быть использован для количественного описания характерной частоты и ширины спектра ЭМИ.

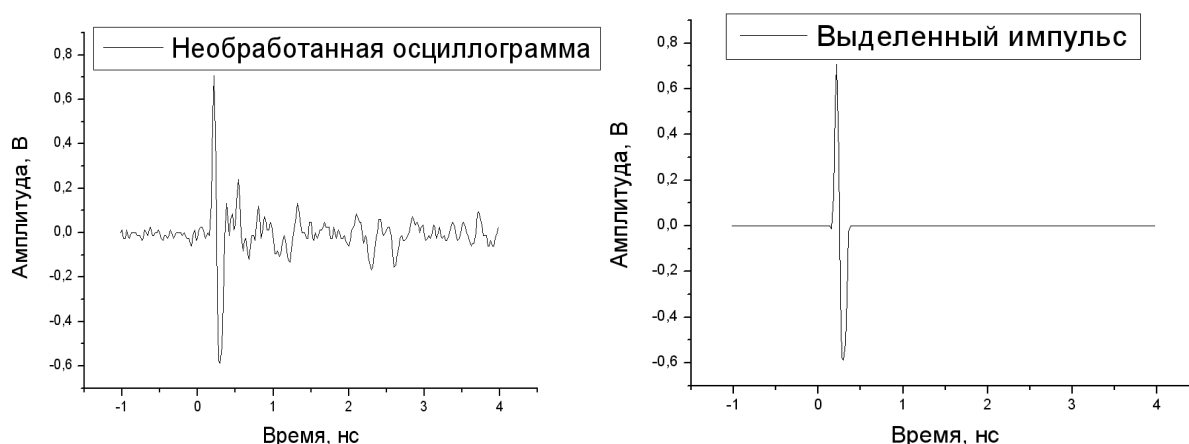


Рис. 3. Осциллограмма сигнала измерительного преобразователя СПМП-36

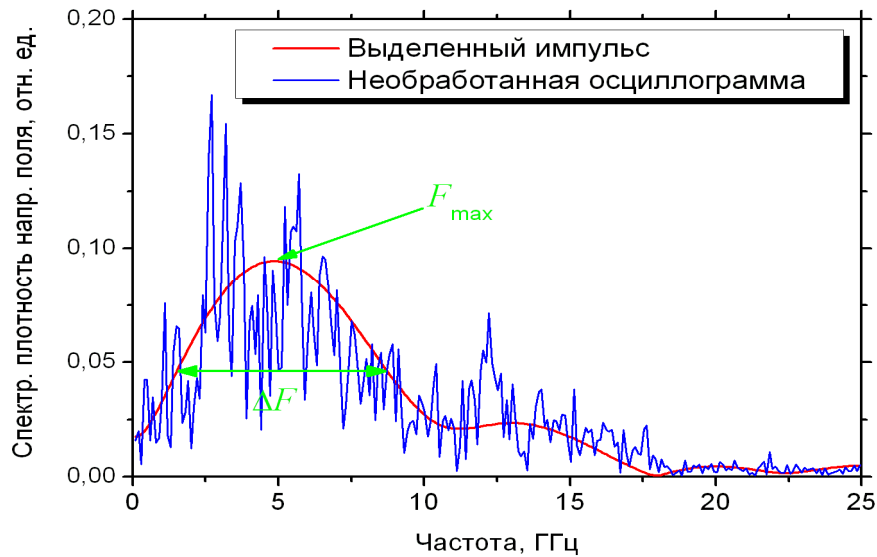


Рис. 4. Спектр напряженности магнитного поля ЭМИ

Приняв за характеристику спектра ЭМИ частоту F_{\max} , соответствующую максимальной спектральной плотности напряжённости поля, и ширину спектра на полувывоте ΔF , построена зависимость этих величин от напряжённости ускоряющего поля (см. рисунок 5).

Регистрируемая зависимость поля от времени является сверткой $E_{\text{рег}}(t) = \int_0^t dt_1 f(t-t_1)E(t_1)$ поля ЭМИ $E(t)$ и импульсной характеристики $f(t)$ измерительного тракта. Характерное время нарастания сигнала, регистрируемого в наших экспериментах, сравнимо со временем переходной характеристики измерительного тракта. Это свидетельствует о том, что измерительный тракт искажает исходный сигнал, увеличивая его длительность и уменьшая амплитуду. Согласно теоретическим оценкам длительность переднего фронта при высоких напряжённых существенно меньше $\tau_{\text{ПХ}}$ (так, при ускоряющем напряжении 100 кВ на катод-анодном промежутке $h=2$ мм длительность переднего фронта поля ЭМИ должна составлять 21,3 пс).

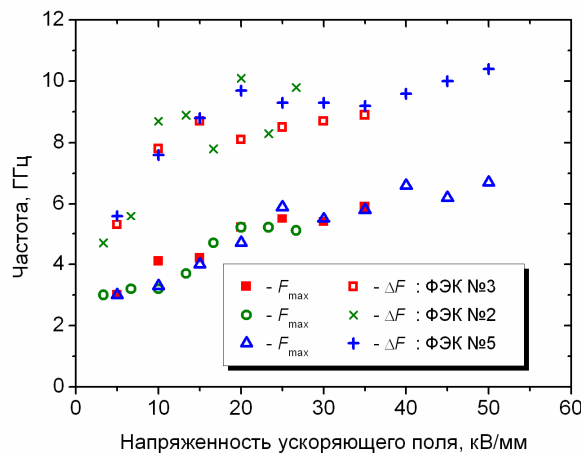


Рис. 5. Зависимость спектральных характеристик напряжённости поля ЭМИ от напряженности ускоряющего поля

К сожалению, в настоящее время у нас отсутствуют средства измерения импульсов ЭМИ такой короткой длительности. Поэтому, чтобы получить представление, насколько велики искажения, вносимые трактом регистрации, была выполнена серия расчетов с временными зависимостями электромагнитного поля в волновой зоне $E(t) \propto d^2 p / dt^2$, (p – плотность дипольного момента), полученными в одномерных и двухмерных расчетах разряда фотодиода, и модельными импульсными характеристиками:

$$f_1(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot \tau} \exp(-t^2 / \tau_{\text{ПХ}}^2), \quad f_2(t) = \frac{1}{\tau} \exp(-t / \tau_{\text{ПХ}}).$$

Получено, что для ускоряющего напряжения 100 кВ и $\tau_{\text{ПХ}} = 64$ пс возможное снижение амплитуды сигнала составляет 5,4–5,9 раза (регистрируемая амплитуда поля составляет 0,184 и 0,17 от фактического значения для функций $f_1(t)$ и $f_2(t)$, соответственно). С учетом этой оценки, в проведенных экспериментах максимальная амплитуда поля ЭМИ составляет примерно 500 кВ/м на расстоянии 1,3 м, а показатель качества примерно 650 кВ. Соответственно величина излученной энергии и мощность ЭМИ составляют 3,2–3,7 мДж и 120–140 МВт. Поскольку переходная характеристика увеличивает длительность фронта импульса примерно в три раза (при ускоряющем напряжении 100 кВ), то следует ожидать, что частота максимума спектра ЭМИ должна быть в три раза выше, чем регистрируется, т.е. должна равняться ~20 ГГц, а ширина спектра ~30 ГГц. Частоту максимума спектра также можно оценить из значения угла расходимости излучения $\vartheta \sim \lambda / D$, где D – диаметр катода. Для измеренных значений $\vartheta \approx 0,3$ характерная длина волны излучения $\lambda \approx 1,5$ см, а частота $F_{\text{max}} \approx 20$ ГГц, что согласуется с приведенными выше значениями.

Заключение

Экспериментально получены следующие результаты по генерации широкополосного ЭМИ с использованием сверхсветового источника:

- Измеренная напряженность электрического поля ЭМИ составляет $E \approx 90$ кВ/м на расстоянии $R = 1,3$ м от излучателя, что соответствует показателю качества излучателя $E \square R \approx 117$ кВ. Исключая влияние переходной характеристики измерительного тракта на результаты измерений, имеем значения $E \approx 500$ кВ/м и $E \square R \approx 650$ кВ.
- Измеренная пиковая мощность ЭМИ составляет $P \approx 10$ МВт, энергия импульса ЭМИ $Q \approx 0,8$ мДж. Теоретические оценки, в которых исключается влияние переходной характеристики измерительного тракта на измерения, дают значения $P \approx 120-140$ МВт и $Q \approx 3,2-3,7$ мДж.
- Максимальная измеренная центральная частота спектра излучения $F_{\text{max}} = 6,5$ ГГц при ширине спектра $\Delta F \approx 10$ ГГц. Исключая влияние переходной характеристики измерительного тракта на измерения имеем $F_{\text{max}} = 20$ ГГц и $\Delta F \approx 30$ ГГц.
- Ширина диаграммы направленности ЭМИ по уровню 0,5 мощности составляет $\pm 17^\circ$.

Литература

1. Ю.Н. Лазарев, П.В. Петров, Письма в ЖЭТФ 60, 625 (1994).
2. Ю.Н. Лазарев, П.В. Петров // ЖЭТФ. Т. 115. С. 1689. 1999.