

## Генерация сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения с частотой следования порядка 100 MHz вакуумным фотоэмиссионным элементом с сурьмяно-цезиевым фотокатодом

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

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, 456770 Снежинск, Челябинская область, Россия  
e-mail: dep5@vniitf.ru

(Поступило в Редакцию 7 ноября 2013 г.)

Исследована генерация вакуумным фотоэмиссионным элементом с сурьмяно-цезиевым фотокатодом сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения с максимальной частотой следования. Эмиссия фотоэлектронов осуществлена подачей четырех импульсов инициирующего лазерного излучения пикосекундной длительности с длиной волны 527 nm и интервалом между импульсами от 3.65 до 6.7 ns. Напряжение между анодом и фотокатодом в экспериментах изменялось от 5 до 60 kV.

### Введение

В работах [1,2] был предложен способ генерации сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения (СКИ ЭМИ). Плоская волна инициирующего излучения проходит через сетчатый анод и падает под углом  $\vartheta$  на поверхность плоского фотокатода, вызывая эмиссию электронов с поверхности. Фронт тока эмиссии распространяется вдоль поверхности катода со сверхсветовой фазовой скоростью  $c/\sin\vartheta$ , поэтому такой источник также называют сверхсветовым. Эмитированные электроны ускоряются электрическим полем, приложенным между катодом и анодом, проходят через сетчатый анод и создают над анодом излучающий дипольный слой. При использовании фотоэмиссионного элемента (ФЭЭ) с диаметром катода 50 mm, расстоянием между анодом и катодом 2 mm и напряжением питания 100 kV была достигнута пиковая мощность излучения  $\sim 100$  MW при ширине спектра излучения  $\sim 14$  GHz [3]. Для практических применений представляет интерес генерация последовательности импульсов с максимально возможной частотой следования. Целью настоящей работы было определение этой частоты для ФЭЭ с сурьмяно-цезиевым катодом.

### Постановка эксперимента

Для генерации СКИ ЭМИ использовался ФЭЭ с сурьмяно-цезиевым катодом диаметром 50 mm и зазором между анодом и катодом 3 mm. Квантовая эффективность фотокатода составляла 0.02–0.03 на длине волны 527 nm. Угол падения излучения на фотокатод был равен  $45 \pm 2^\circ$ . Лазерная система, используемая для инициирования эмиссии электронов, обеспечивала следующие параметры излучения:

- длина волны 527 nm,
- ширина импульса на полувысоте  $0.9 \pm 0.1$  ps,

- расходимость пучка  $< 0.3$  mrad,
- энергия излучения в апертуре катода фотоэлемента от 5 до 340  $\mu$ J,
- равномерность распределения интенсивности на катоде не хуже  $\pm 10\%$ .

Для получения нескольких импульсов лазерного излучения (ЛИ) было добавлено устройство, оптическая схема которого приведена на рис. 1. Первый импульс формируется отражением от полупрозрачного зеркала (светоделителя), имеющего коэффициент отражения 37%. Прощедший через светоделиТЕЛЬ импульс отражается от системы зеркал и снова приходит на светоделиТЕЛЬ, формируя второй импульс. Аналогично образуются третий и последующие импульсы. Интервал времени между импульсами в экспериментах составлял 3.65, 4.75 и 6.7 ns и задавался изменением расстояния между зеркалами. Измерения относительной мощности ЛИ показали, что отношение энергии второго, третьего и четвертого импульсов к энергии первого составляет  $1.08 \pm 0.02$ ,  $0.25 \pm 0.05$ ,  $0.07 \pm 0.02$  соответственно.

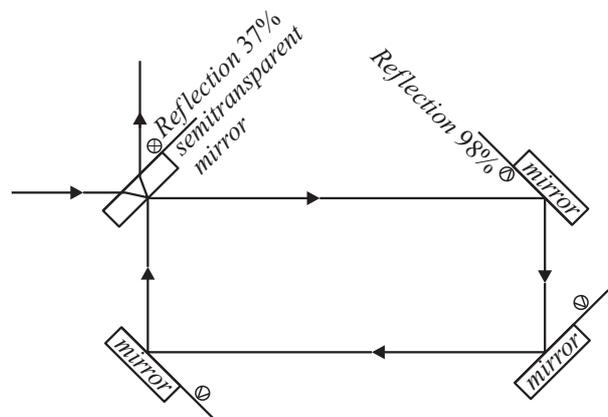


Рис. 1. Оптическая схема, используемая для получения нескольких импульсов лазерного излучения.

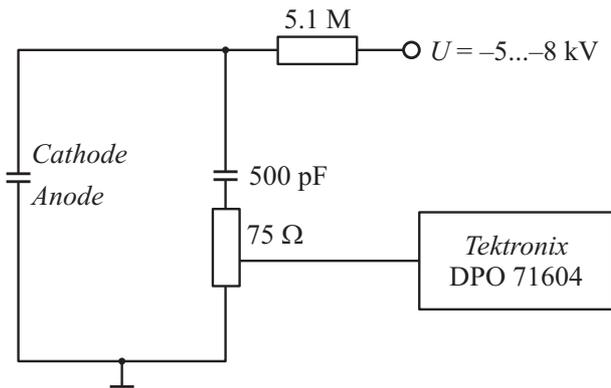


Рис. 2. Схема измерения тока.

Между анодом и катодом подавалось постоянное питание с напряжением 5–8 kV или импульсное питание амплитудой до 60 kV и длительностью  $\sim 25$  ns от генератора импульсного напряжения. Постоянное напряжение питания подавалось от источника СБПК-20 через сопротивление 5.1 МΩ. Электрическая емкость анод-катодного зазора ФЭЭ составляет  $C_{AC} \approx 6$  pF. На рис. 2 показана схема измерения тока ФЭЭ при использовании потянного напряжения питания.

Параметры магнитной составляющей поля ЭМИ измерялись в безэховой камере преобразователем СПМП-36, который располагался в направлении зеркального отражения ЛИ от катода на расстоянии 1.4 м. Длительность нарастания переходной характеристики измерительного тракта преобразователя СПМП-36 составляла  $\sim 30$  ps. Регистрация сигналов производилась осциллографом Tektronix DPO 71604 с аналоговой полосой пропускания 16 GHz и частотой дискретизации АЦП 50 GHz. В экспериментах с импульсным питанием в измерительном тракте использовался делитель Agilent Technologies 8493B 20dB (полоса частот 18 GHz).

## Результаты экспериментов

На рис. 3 приведены осциллограммы тока в цепи питания ФЭЭ, полученные при подаче на фотокатод одиночных импульсов ЛИ различной энергии и напряжения питания  $U = 5$  kV. Величина электрического заряда на катоде  $C_{AC} U \approx 3 \cdot 10^{-8}$  C. Энергия ЛИ, требуемая для снятия этого заряда с катода, равна  $\sim 3.5$  μJ. В обоих случаях энергия ЛИ, приходящая на катод, превышала указанное значение. При энергии ЛИ, равной 13 μJ, через  $\sim 5$  ns после разряда ФЭЭ ток в цепи практически равен нулю. Это означает, что ФЭЭ полностью заряжен и готов для генерации следующего импульса. Величина заряда, прошедшего через измерительную цепь, составляет  $\sim 40$  nC. Осциллограммы тока не зависят от энергии ЛИ в диапазоне от 3.5 μJ до некоторого порогового значения. Когда энергия ЛИ превышает пороговое значение  $\varepsilon_{thr}$ , происходит резкое изменение длительности

импульса тока, и для зарядки ФЭЭ требуется  $\sim 8$  ns, а заряд, прошедший через измерительную цепь, составляет  $\sim 140$  nC. При дальнейшем увеличении энергии ЛИ осциллограммы тока не изменяются. Аналогичный эффект для сурьмяно-цезиевого фотокатода был обнаружен в работе [4], где значительное увеличение длительности разрядного тока наблюдалось при плотности энергии 1–2 mJ/cm<sup>2</sup> и длительности импульса 180 ns (плотность мощности  $\sim 10^4$  W/cm<sup>2</sup>).

Генерация последовательности, состоящей из четырех импульсов ЭМИ с интервалом следования 4.75 ns, при подаче на катод ФЭЭ ЛИ с энергией 20 μJ (суммарная энергия всех импульсов) показана на рис. 4. Уменьшение амплитуды третьего и четвертого импульсов обусловлено снижением энергии ЛИ в этих импульсах. При увеличении энергии ЛИ до 27 μJ, превышающей  $\varepsilon_{thr}$ , ФЭЭ не успевает заряжаться и поэтому наблюдается исчезновение второго импульса. На рис. 5 приведена зависимость относительной амплитуды второго импульса от энергии ЛИ при интервале следования импульсов 3.65 и 4.75 ns и разном напряжении питания. Величина пороговой энергии, при которой происходит потеря второго импульса, равна  $\sim 20$  μJ. Плотность мощности при этом составляет  $\sim 4 \cdot 10^5$  W/cm<sup>2</sup>.

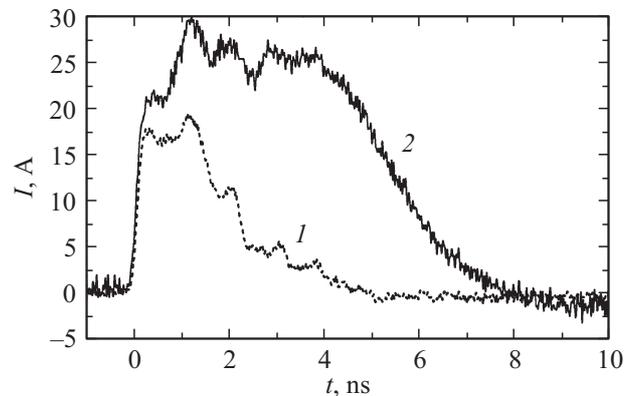


Рис. 3. Ток в цепи питания ФЭЭ при энергии ЛИ на катоде 13 (1) и 88 μJ (2).

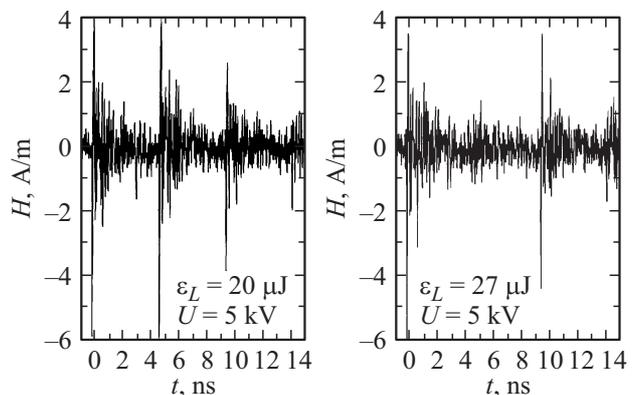
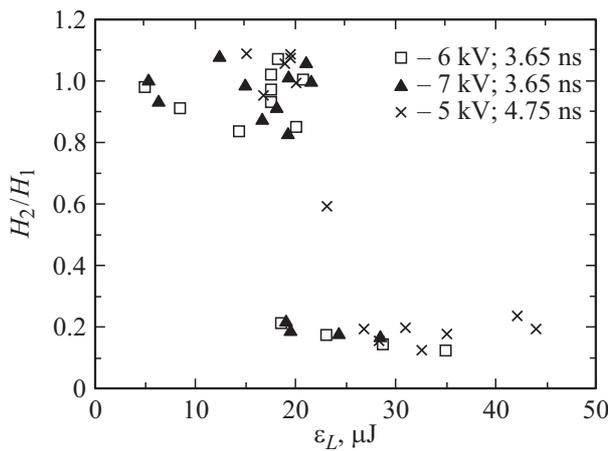
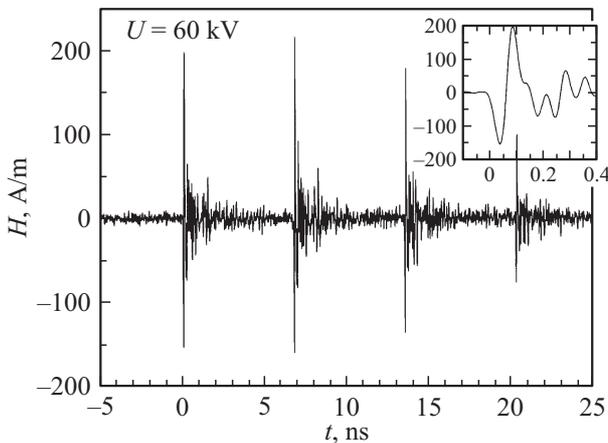


Рис. 4. Осциллограммы сигналов датчика магнитного поля.



**Рис. 5.** Зависимость отношения амплитуды второго импульса к амплитуде первого импульса от энергии лазерного излучения.



**Рис. 6.** Генерация последовательности импульсов ЭМИ.

На рис. 6 показана генерация последовательности СКИ ЭМИ при использовании импульсного питания амплитудой 60 kV, энергии ЛИ  $340 \mu\text{J}$  и интервале между импульсами 6.7 ns (частота следования 150 MHz). Величина интервала между импульсами достаточна для заряда анод-катодного зазора ФЭЭ, поэтому наблюдается генерация всех импульсов, несмотря на то, что энергия ЛИ превышает  $\epsilon_{thr}$ .

## Заключение

Экспериментально показана возможность генерации СКИ ЭМИ вакуумными ФЭЭ с сурьмяно-цезиевым фотокатодом при частоте следования импульсов до 150 MHz. Обнаружено, что при превышении плотности энергии ЛИ некоторого значения ( $\sim 4 \cdot 10^{-7} \text{ J/cm}^2$  при длительности  $\sim 1 \text{ ps}$ ) скачком увеличивается длительность тока, протекающего через анод-катодный зазор. Причиной этого может быть образование плазмы на поверхности катода [4].

## Список литературы

- [1] Лазарев Ю.Н., Петров П.В. // Письма в ЖЭТФ. 1991. Т. 60. Вып. 9. С. 625–628.
- [2] Лазарев Ю.Н., Петров П.В. // ЖЭТФ. 1999. Т. 88. Вып. 5. С. 926–935.
- [3] Кондратьев А.А., Лазарев Ю.Н., Потапов А.В., Тищенко А.С., Заволоков Е.В., Сорокин И.А. // ДАН. 2011. Т. 438. Вып. 5. С. 615–618.
- [4] Ding L., Chen Y., Hua Z. // J. Nucl. Mater. 1993. Vol. 200. P. 305–308.