

12.3

## Влияние состояния рабочей поверхности гальванического датчика импульсного рентгеновского излучения на его быстродействие

© И.А. Барыков<sup>1,2</sup>, А.В. Буташин<sup>3</sup>, В.И. Зайцев<sup>1</sup>, А.Э. Муслимов<sup>3</sup>, И.А. Тараканов<sup>4</sup>, А.М. Исмаилов<sup>5</sup>, В.А. Федоров<sup>3</sup>, В.М. Каневский<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Государственный научный центр РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Москва, Троицк, Россия

<sup>2</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup> Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup> Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

E-mail: amuslimov@mail.ru

Поступило в Редакцию 12 декабря 2022 г.

В окончательной редакции 1 марта 2023 г.

Принято к публикации 1 марта 2023 г.

Предложена новая конструкция гальванического датчика импульсного рентгеновского излучения, представляющая собой плоский электрический конденсатор с окном в одной металлической обкладке и твердым диэлектриком из монокристаллического сапфира толщиной 200–300 мкм внутри. Установлено влияние шероховатости поверхности диэлектрика (сапфира) в области окна на гальваническое линейное детектирование рентгеновского излучения. Испытания показали, что при сверхгладкой полировке рабочей поверхности пластины из сапфира в области окна до шероховатости  $R_q \leq 0.2$  нм можно обеспечить возможность гальванического линейного детектирования рентгеновского излучения с энергией в диапазоне 0.1–1 keV и плотностью мощности  $1–2 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$  со временем срабатывания датчика около 8 нс. Датчики такого типа могут найти применение в исследованиях процессов инерциального термоядерного синтеза.

**Ключевые слова:** рентгеновское излучение, гальванический датчик, сапфир, диэлектрик, плоский конденсатор.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.09.55319.19461

Регистрация мощных потоков рентгеновского излучения в экспериментальных исследованиях является одной из важных задач в области ядерной физики и физики взаимодействия ионизирующего излучения с твердым телом. Предложен и применяется ряд способов измерений параметров излучений [1], в большинстве случаев основанных на эффекте ионизации атомов под действием излучения. Исследования в области инерциального термоядерного синтеза поставили новые диагностические задачи [2], в частности задачу разработки метода регистрации электромагнитного излучения плазмы, удовлетворяющего следующим основным требованиям:

- 1) рабочий диапазон измерений должен находиться в области энергий квантов 0.025–10 keV;
- 2) разрешение по времени должно быть в диапазоне единиц наносекунд;
- 3) датчик должен находиться в линейной области чувствительности при плотности мощности потока излучения выше  $1 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ .

Работы по поиску простых, надежных, обеспечивающих быстродействие, линейность сигнала отклика материалов и схем детекторов импульсного рентгеновского излучения с высокой плотностью мощности продолжаются. Обычно для измерения интенсивности импульсного рентгеновского излучения используются твердотельные полупроводниковые детекторы, чувствительность

которых определяется затратой энергии  $\Delta E$ , необходимой для образования пары носителей заряда: для кремния  $\Delta E \sim 3 \text{ eV}$ , для алмаза  $\Delta E \sim 13 \text{ eV}$  [3]. К недостаткам полупроводниковых детекторов относится то, что в исследованиях по инерциальному термоядерному синтезу для регистрации излучения в линейном диапазоне чувствительности требуется работа в вакууме с удалением детектора (даже алмазного) на расстояние нескольких десятков метров от источника излучения, что существенно усложняет конструкцию термоядерной установки, а иногда просто невозможно. Далее, применение фильтров, ослабляющих интенсивность падающего излучения, одновременно искажает его спектральный состав, что не позволяет идентифицировать процессы, протекающие в термоядерной мишени.

Детектирование импульсных ионизирующих излучений с высокой плотностью мощности возможно и на основе других физических принципов, например с использованием сцинтилляционных счетчиков. Так, неупорядоченные массивы микрокристаллов ZnO на подложках интенсивно люминесцировали в УФ-области спектра со временем затухания менее 1 нс в пучке мощного рентгеновского излучения [4]. Недостатками данного способа детектирования излучения являются малая площадь рабочей поверхности массивов и значительная неоднородность параметров рентгенолюминесценции по ней,

сложности аппаратного решения детектора. Кроме того, по предварительным данным микрокристаллы ZnO в отличие от кристаллов алмаза и сапфира не достигают требуемой величины радиационной стойкости.

Кроме полупроводниковых детекторов на установках инерциального термоядерного синтеза для рутинных измерений мощных потоков рентгеновского излучения используются вторично-эмиссионные рентгеновские детекторы (ВРД), чувствительность которых варьируется за счет изменения материала катода [5]. Однако применение ВРД для регистрации рентгеновского излучения с высокой плотностью мощности, так же как и полупроводниковых детекторов, ограничено из-за эффектов насыщения. ВРД можно использовать только с применением различных ослабляющих фильтров. Реализация данной диагностической методики требует вакуумных условий, наличия в измерительной схеме источника высокого напряжения и учета зависимости эмиссионного отклика от энергии квантов измеряемого излучения. Кроме того, происходит деградация эмитирующей поверхности при высокой мощности измеряемых потоков излучения.

Поиск новых технических решений в области детектирования привел к разработке способа достоверных измерений больших интенсивностей излучения  $I \approx 10^5 - 10^7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  при упрощении схемы измерений и снижении ее стоимости [6]. Чувствительный элемент для реализации этого способа выполнен в виде тонкой диэлектрической пластины с первым и вторым контактами из металла, которые нанесены на две противоположные плоскости пластины, имеющие большую площадь, причем толщина первого контакта делает его прозрачным для ионизирующего излучения. Детектор на базе упомянутого чувствительного к излучению элемента устанавливается на пути регистрируемого ионизирующего излучения таким образом, чтобы сторона пластины с первым контактом была ориентирована навстречу ионизирующему излучению. Способ заключается в измерении электрического сигнала, возникающего под действием излучения в твердом чувствительном к излучению элементе из кварцевого стекла КУ-1 со сравнительно высокой энергией образования свободных носителей заряда  $\Delta E \sim 150 \text{ eV}$ . К недостаткам способа [6] относится значительное время нарастания фронта сигнала (40 ns) как характеристика его быстродействия, а также сильно затянутый по времени отклик на воздействие импульсного рентгеновского излучения.

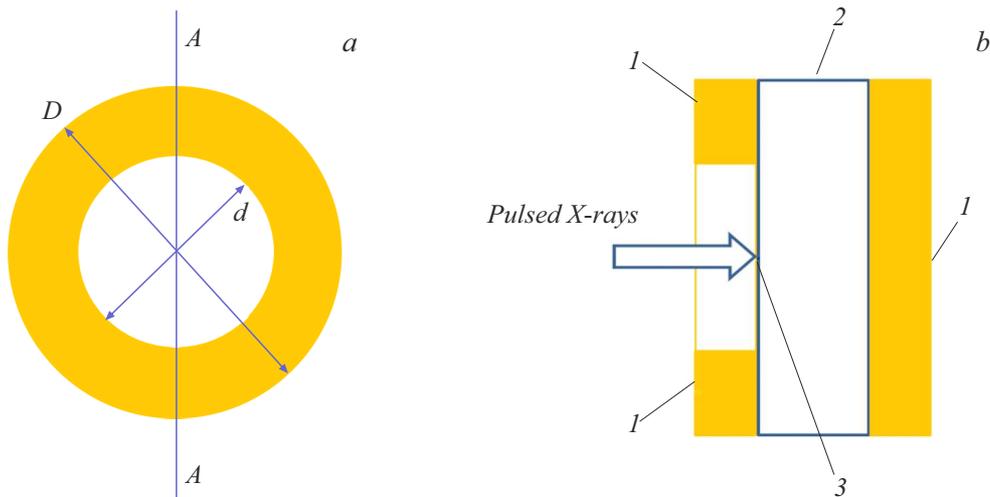
Для преодоления этих недостатков, т.е. увеличения быстродействия детектора рентгеновского излучения с высокой плотностью мощности, в настоящей работе предложена новая схема детектора. Для его изготовления использованы диэлектрические пластины из другого диэлектрика — монокристаллического сапфира. Кроме того, исследовано влияние шероховатости поверхности сапфира на быстродействие детектора рентгеновского излучения.

В настоящей работе была изменена конструкция гальванического датчика в сравнении с представленной ранее в [6]: один из электродов датчика выполнен в виде кольца (рис. 1). Были использованы диэлектрические пластины из монокристаллического сапфира толщиной 200–300  $\mu\text{m}$  и диаметром 18–19 mm, рабочая поверхность которых подверглась полировке в соответствии с разработанной ранее методикой [7] (рис. 2, *a, b*): тип I — с атомно-гладкими террасами и среднеквадратичной шероховатостью  $R_q$  не более 0.2 nm; тип II — со следами полировки и среднеквадратичной шероховатостью в диапазоне 1–2 nm. Электроды из золота толщиной 1–5  $\mu\text{m}$  наносились на сапфировые пластины методом термического осаждения.

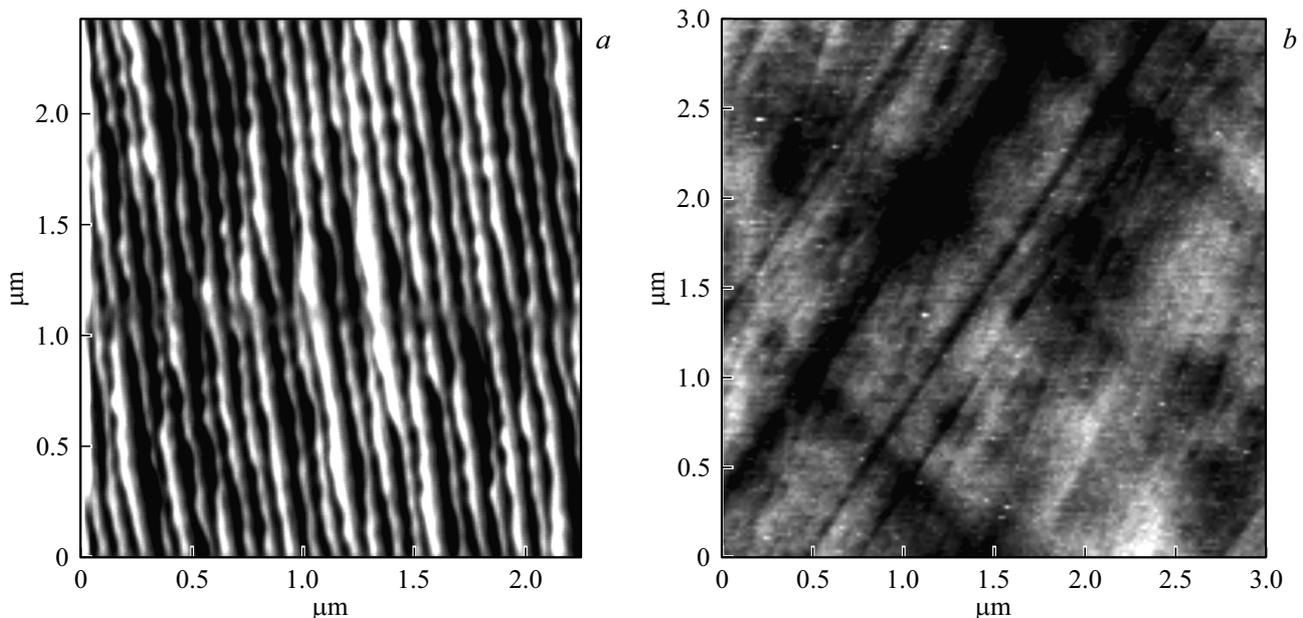
Далее датчики из сапфира (рис. 1) были испытаны в составе простейшего электрического блока регистрации из сопротивления нагрузки и импульсного осциллографа-вольтметра, аналогичного описанному в работе [6]. Источником импульсного рентгеновского излучения (полная пиковая мощность до  $10^{13} \text{ W}$ ) служила плазма мегаамперного Z-пинча, реализованная на специализированной термоядерной установке Ангара-5-1 [8]. Энергия рентгеновских квантов была в диапазоне 0.1–1 keV, плотность мощности в импульсе 1–2  $\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Микроскопические измерения проводились с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) „Интегра Прима“ (НТ-МДТ, Зеленоград).

Проведено испытание датчиков из сапфира, сконструированных и изготовленных в соответствии со схемой, показанной на рис. 1. Как и предполагалось, датчики ВРД отличаются высоким быстродействием (кривая *0* на рис. 3, *a, b*), однако им присущи отмеченные во вводной части работы недостатки. Из исследованных в работе датчиков нового типа на основе сапфира наибольшим быстродействием (время нарастания фронта около 8 ns) при облучении импульсным рентгеновским излучением от Z-пинча обладал датчик типа I (рис. 3, *a*). Датчик типа II (рис. 3, *b*), для которого характерна большая шероховатость лицевой (рабочей) поверхности  $R_q$ , демонстрировал меньшее быстродействие (время нарастания фронта около 32 ns). Для сравнения время нарастания фронта сигнала при облучении импульсным рентгеновским излучением от Z-пинча у датчиков на основе стекла КУ-1 с неконтролируемой шероховатостью поверхности [6] составляет  $\sim 40 \text{ ns}$ . Следует также отметить, что гальванический сигнал от датчика типа II (рис. 3, *b*) явно отличается по длительности и форме от рентгеновского импульса. Предлагаемое изменение конструкции датчика (рис. 1), включая замену стекла КУ1 на монокристаллический сапфир с шероховатостью рабочей поверхности не более 0.2 nm, приводит к многократному увеличению быстродействия датчика.

Явления, наблюдаемые в датчике представленной конструкции при воздействии мощного рентгеновского излучения, можно интерпретировать в рамках следующей модели. Электродвижущая сила, генерируемая в контакте металл–диэлектрик, возникает за счет радиационной



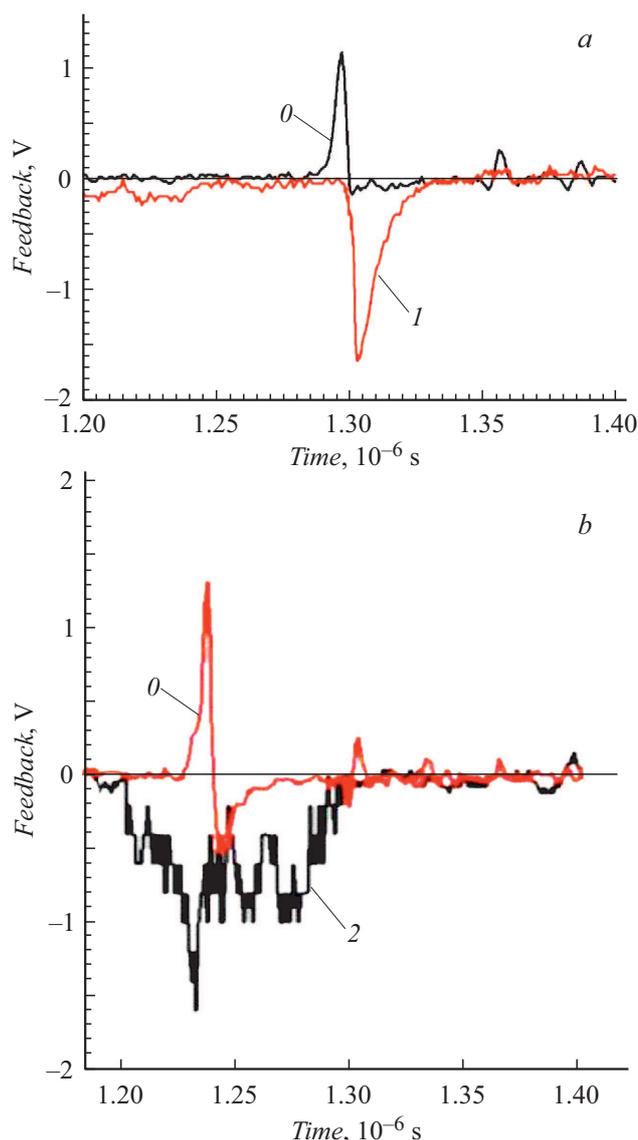
**Рис. 1.** Схема конструкции гальванического датчика импульсного рентгеновского излучения. *a* — фронтальное изображение, диаметр датчика  $D \approx 18\text{--}19\text{ mm}$ , диаметр рабочего окна  $d \approx 14\text{--}15\text{ mm}$ ; *b* — сечение по  $A\text{--}A$ : 1 — золотые электроды толщиной  $1\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ , 2 — диэлектрическая пластина из монокристаллического сапфира толщиной  $200\text{--}300\text{ }\mu\text{m}$ , 3 — лицевая (рабочая) поверхность диэлектрической пластины.



**Рис. 2.** АСМ-изображения поверхности пластин из монокристаллического сапфира со среднеквадратичной шероховатостью рабочей поверхности не более  $0.2\text{ nm}$  (*a*) и в диапазоне  $1\text{--}2\text{ nm}$  (*b*).

проводимости, обусловленной движением неравновесных носителей заряда — электронов проводимости. Неравновесное распределение избыточных носителей заряда в диэлектриках возникает при воздействии рентгеновского излучения. Рентгеновское излучение поглощается в достаточно тонком приповерхностном (около  $1\text{ }\mu\text{m}$ ) слое диэлектрика и генерирует фотоэлектроны. Этот процесс описывается классическими уравнениями переноса фотонов и электронов. Фотоны и фотоэлектроны теряют свою энергию, которой достаточно для возбуждения электронно-дырочных пар. При этом в

зоне проводимости возникают избыточные электроны с достаточно большой подвижностью по сравнению с подвижностью дырок валентной зоны. При воздействии на диэлектрические датчики мощного рентгеновского излучения возникает достаточное число электронов. Возникающее сильно неоднородное электрическое поле приводит к направленному радиальному движению образовавшихся электронов в приповерхностном слое. Физические процессы можно в данном случае описывать в терминах радиационной проводимости. Известно, что приповерхностный слой кристаллов сапфира ти-



**Рис. 3.** Сравнение сигналов датчиков излучения (плотность мощности рентгеновского импульса  $\sim 2 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) типа I (a) и II (b) с ВРД. 0 — ВРД, 1 — тип I, 2 — тип II.

па II после механической полировки является „нарушенным“ [7], т. е. содержит точечные, линейные и объемные дефекты, присущие сапфиру. В этой области кристаллов возможно образование дополнительных долгоживущих энергетических уровней, которые могут захватывать как электроны, так и дырки, сгенерированные рентгеновским импульсом, что в итоге приводит к увеличению времени релаксации облака электронно-дырочных пар (кривая 2 на рис. 3, b). Те же рассуждения применимы и к стеклу, которое по своей природе является неоднородным на микроуровне в отличие от монокристаллов. Более детально теоретические основы возникновения радиационной проводимости и напряженности электрического поля в кристаллическом диэлектрике рассмотрены в [8,9].

Таким образом, в работе предложена новая конструкция гальванического датчика импульсного рентгеновского излучения: плоский электрический конденсатор с окном в одной металлической обкладке и твердым диэлектриком из монокристаллического сапфира толщиной  $200\text{--}300 \mu\text{m}$  внутри. Датчики такого типа могут быть использованы в исследованиях процессов инерциального термоядерного синтеза. Установлено, что лицевая поверхность диэлектрической пластины, обращенная к источнику импульсного рентгеновского излучения через окно в металлической обкладке, должна иметь малую величину шероховатости  $R_q \leq 0.2 \text{ nm}$ , чтобы обеспечить возможность гальванического линейного детектирования рентгеновского излучения с энергией в диапазоне  $0.1\text{--}1 \text{ keV}$  и плотностью мощности  $1\text{--}2 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$  со временем срабатывания датчика около  $8 \text{ ns}$ . При увеличении шероховатости поверхности  $R_q$  лицевой стороны диэлектрической пластины в экспериментах по регистрации мощных импульсных потоков рентгеновского излучения время срабатывания датчика значительно увеличивается и нарушается линейность отклика датчика на рентгеновский импульс.

#### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках госзадания ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] В.И. Калашникова, М.С. Козодаев, *Детекторы элементарных частиц* (Наука, М, 1966).
- [2] Н.Г. Басов, Ю.А. Захаренков, А.А. Рупасов, Г.В. Склизов, А.С. Шиканов, *Диагностика плотной плазмы*, под ред. Н.Г. Басова (Наука, М., 1989).
- [3] В.Н. Амосов, А.И. Емельянов, Н.И. Крисько, Н.Б. Родионов, *Алмазный детектор*, патент РФ № 2522772. Официальный бюллетень № 20 (Роспатент, 2014).
- [4] В.-Н. Lin, X.-Y. Li, D.-J. Lin, B.-L. Jian, H.-Ch. Hsu, H.-Y. Chen, Sh.-Ch. Tseng, C.-Y. Lee, B.-Y. Chen, G.-C. Yin, M.-Y. Hsu, Sh.-H. Chang, M.-T. Tang, W.-F. Hsieh, *Sci. Rep.*, **9** (1), 207 (2019). DOI: 10.1038/s41598-018-36764-8
- [5] H.N. Kornblum, V.W. Slivinsky, *Rev. Sci. Instrum.*, **49** (8), 1204 (1978). DOI: 10.1063/1.1135548
- [6] В.И. Зайцев, *Способ регистрации импульсного ионизирующего излучения*, патент РФ № 2640320. Официальный бюллетень ФИПС № 36 (2017).
- [7] А.Е. Муслимов, В.Е. Асадчиков, А.В. Буташи, В.Р. Власов, А.Н. Дерыбин, В.С. Рощин, С.Н. Сулянов, В.М. Каневский, *Cryst. Rep.*, **61** (5), 730 (2016). DOI: 10.1134/S106377451605014X

- [8] В.И. Зайцев, И.А. Барыков, А.В. Карташов, О.В. Терентьев, Н.Б. Родионов, Письма в ЖТФ, **42** (22), 72 (2016). [V.I. Zaitsev, I.A. Barykov, A.V. Kartashov, O.V. Terent'ev, N.B. Rodionov, Tech. Phys. Lett., **42**, 1134 (2016). DOI: 10.1134/S1063785016110225].
- [9] И.А. Барыков, И.Ю. Вичев, Ю.А. Волков, В.И. Зайцев, Н.В. Заложный, В.М. Каневский, И.А. Тараканов, В.А. Федоров, *Математическая модель радиационно-индуцированной проводимости в кварце при воздействии мощного рентгеновского излучения*, препринт ИПМ им. М.В. Келдыша № 18 (2021). DOI: 10.20948/prepr-2021-18