

ЦИФРОВОЙ МЕТОД КОРРЕЛИРОВАННОГО ПО ВРЕМЕНИ СЧЕТА
ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА© 2023 г. И. В. Селивонин^{а,*}, С. Кувардин^{а,б}, И. А. Моралев^а^а Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия^б Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

*e-mail: inock691@ya.ru

Поступила в редакцию 20.11.2022 г.

После доработки 29.12.2022 г.

Принята к публикации 11.01.2023 г.

Для изучения развития поверхностного барьерного разряда, питаемого синусоидальным переменным напряжением, был реализован метод подсчета одиночных фотонов с временной корреляцией (TCSPC) с цифровой постобработкой. Показано, что разрешение, полученное при цифровой реализации метода TCSPC, не хуже 300 пс при времени нарастания функции фотоприемников 15 нс и частоте дискретизации осциллографа 10 ГГц. Отбор импульсов после на этапе постобработки позволил изучить многоимпульсный режим ДБР, получить пространственно-временные диаграммы светового излучения разряда и оценить скорость распространения отрицательных и положительных микрозарядов.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, барьерный разряд, микрозаряд, коррелированная по времени спектроскопия, TCSPC

DOI: 10.31857/S0367292123600097, EDN: VEUIIV

1. ВВЕДЕНИЕ

Поверхностный диэлектрический барьерный разряд (пДБР) представляет собой импульсный слаботочный разряд высокого давления, который инициируется в электродной системе с диэлектриком на пути распространения разряда [1, 2]. пДБР может быть использован в качестве источника низкотемпературной плазмы в различных приложениях: обработка биологических объектов [3], генерация озона [4, 5], модификация поверхности и нанесение покрытий [6, 7], управление потоком [8–10].

При развитии разряда вдоль диэлектрического барьера происходит зарядка поверхности диэлектрика. Поверхностный заряд экранирует внешнее поле, создаваемое приложенным напряжением, в результате чего ток разряда прекращается. При дальнейшем увеличении напряжения между электродами происходит новый пробой между электродом и поверхностью барьера. Таким образом, пДБР при достаточно высоком напряжении существует в виде отдельных микрозарядов (МР), а разрядный ток представляет собой последовательность слабых импульсов с амплитудой порядка 1–100 мА.

Развитие МР можно разделить на 2 стадии. При низких локальных напряженностях электрического поля пДБР существует в фазе Таунсенда.

При этом происходит образование объемного заряда, который существенно искажает электрическое поле у электродной кромки. При достижении определенного порогового значения накопленного заряда наступает вторая стадия развития разряда, называемая стримерной.

Конфигурация пДБР с открытым металлическим электродом характеризуется ярко выраженной асимметрией разряда относительно полярности коронирующего электрода по отношению к заряженной поверхности диэлектрического барьера. Если открытый электрод является анодом, то разряд развивается в режиме прохождения катодонаправленных поверхностных стримеров; если открытый электрод является катодом, то разряд существует в виде нестационарных областей тлеющего разряда, равномерно распределенных вдоль электродной кромки.

Характерные времена развития разряда на первой и второй стадиях могут существенно различаться, так как процессы ионизации протекают при локальных напряженностях электрического поля, различающихся на несколько порядков. В атмосферных условиях длительность жизни МР без учета стадии Таунсенда составляет около 10–100 нс, при этом начальная стадия развития разряда приходится на субнаносекундные времена. Поскольку формирование МР является стохастиче-

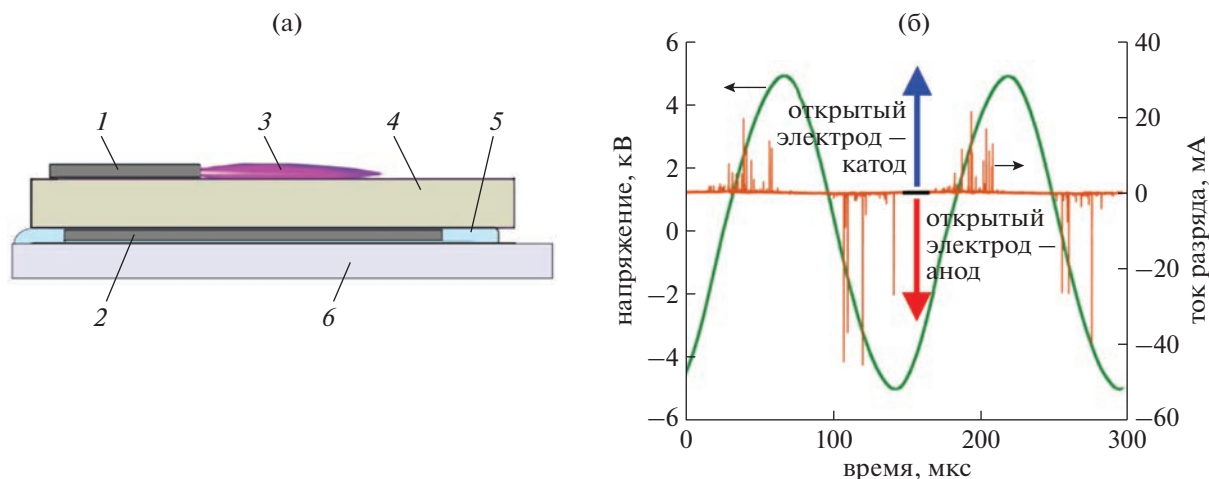


Рис. 1. Разрядная ячейка – вид сбоку (а): 1 – открытый заземленный электрод, 2 – ответный высоковольтный электрод, 3 – поверхностный барьерный разряд, 4 – керамический барьер, 5 – силиконовый компаунд, 6 – акриловая пластина; напряжение, приложенное к ответному электроду, и ток разряда (б).

ческим процессом, изучение полного развития отдельного МР является нетривиальной задачей.

Для решения этой проблемы можно использовать метод коррелированного по времени счета одиночных фотонов (англ. Time-Correlated Single Photon Counting – TCSPC, также называемый кросс-корреляционной спектроскопией), который обеспечивает высокое временное разрешение и хороший динамический диапазон [11–13].

Основная идея метода TCSPC заключается том, что вместо прямой регистрации динамики интенсивности повторяющихся световых импульсов (соответствующих МР) определяется статистически усредненная корреляционная функция между двумя оптическими сигналами, поступающими от одного источника. Первый из сигналов является синхронизирующим и позволяет определить масштаб времени относительно начала развития МР, второй “основной” сигнал регистрируется в определенной точке разрядного промежутка. Оба сигнала получают в однофотонном режиме работы фотодетекторов, когда вероятность обнаружения одного фотона за один временной интервал намного меньше 1 [11, 12].

Искомое значение представляет собой временную задержку между этими двумя сигналами. При накоплении большого количества значений задержек регистрируемая функция плотности вероятности (ФПВ) обнаружения фотона с разными временными задержками будет пропорциональна динамике интенсивности излучения рассматриваемого источника на заданной координате.

В классической реализации метода TCSPC используются аналоговые методы расчета задержек между моментами регистрации фотонов, когда

ФПВ статистически усредняется в блоке памяти, а затем производится ее преобразование в цифровой сигнал [12]. В этом случае сигнал усредняется по всей статистике импульсов, поэтому метод применим только для процессов с высокой повторяемостью. В случае пДБР существует несколько типов и поколений МР; таким образом, возникает необходимость разделения данных по различным критериям (например, по величине тока МР или по фазе питающего напряжения).

Целью данной работы является модификация метода TCSPC с использованием непосредственно регистрируемых сигналов от ФЭУ. Цифровая постобработка сигналов позволяет проводить анализ параметров МР на стадии обработки, что делает возможным применять метод для изучения различных процессов в пДБР.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Экспериментальная установка

В работе исследовался диэлектрический барьерный разряд в асимметричной поверхностной конфигурации поверхности кромка–плоскость (рис. 1а). В качестве диэлектрического барьера использовалась алундовая керамика толщиной 1 мм с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 10$. Открытый (коронирующий) электрод был изготовлен из алюминиевой фольги толщиной 20 мкм. Ответный электрод покрывался силиконовым компаундом для предотвращения развития разряда с него.

На ответный электрод подавалось переменное синусоидальное напряжение амплитудой 5 кВ и частотой 7 кГц, открытый электрод подключался к земле. Ток разряда измерялся с помощью мало-

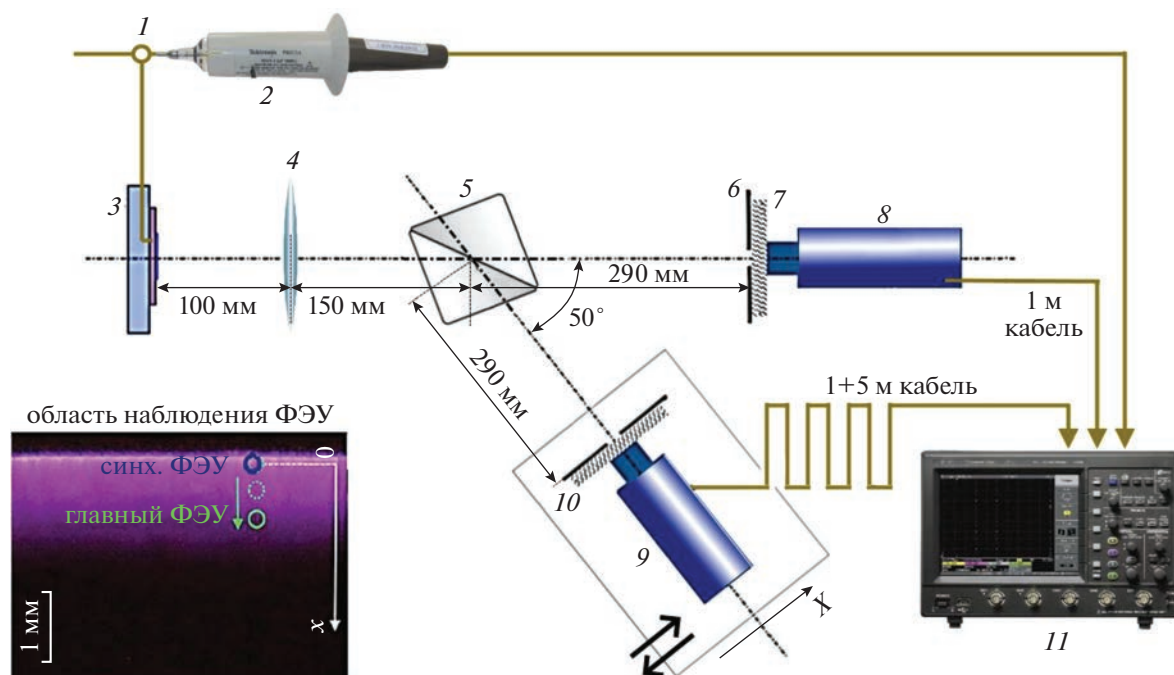


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — подключение высокого напряжения, 2 — высоковольтный шуп, 3 — разрядная ячейка, 4 — собирающая линза, 5 — светоделительный куб, 6 — диафрагма, 7 — серый фильтр, 8 — синхронизирующий ФЭУ, 9 — главный ФЭУ, 10 — траверсная система, 11 — осциллограф.

индуктивного токового шунта, подключаемого к секции открытого заземленного электрода. Детальное описание схемы измерений тока приводится в работе [14]. Питательное напряжение измерялось с помощью высоковольтного шупа Tektronix P6015A с полосой пропускания 75 МГц. На рис. 16 показаны осциллограммы напряжения, приложенного к ответному электроду, и тока пДБР.

Эксперимент проводился в комнатном воздухе при стандартных условиях. Разряд работал в импульсном режиме (рис. 16) с 6–10 положительными и 14–20 отрицательными токовыми импульсами за период питающего напряжения. Из-за пассивационной оксидной пленки на алюминиевом электроде происходит стохастизация положения МР, и пДБР на больших временах практически однороден по всей длине электрода [15, 16].

Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 2. Стеклолинза с фокусным расстоянием $f = 75$ мм использовалась для построения изображения разряда в масштабе 1 : 6 на двух экранах, установленных перед фотоэлектронными умножителями. Дублирование изображения осуществлялось светоделительным неполяризирующим кубом. В каждом экране было проделано отверстие диаметром 0.6 мм для ограничения рассматриваемой каждым датчиком области разряда. Для дополнительного ослабления светового по-

тока использовались серые фильтры и ирисовая диафрагма. Источником сигнала синхронизации считался синхронизирующий ФЭУ, расположенный на одной оптической оси с ячейкой. Основной ФЭУ размещался на траверсной системе с возможностью перемещения вдоль траектории развития разряда. Вся установка была помещена в темный бокс, чтобы избежать светового загрязнения и отражений. Частота регистрации фотонов, не связанных с развитием разряда, не превышала 10 с^{-1} .

В эксперименте использовались фотоэлектронные умножители Hamamatsu H10492-003 с чувствительностью катода около 100 мкА/лм (выходная чувствительность около $4 \cdot 10^7 \text{ В/лм}$) в диапазоне длин волн 300–700 нм. Полоса пропускания усилителя ФЭУ, указанная в его спецификации, составляет 8 МГц. Аппаратная функция ФЭУ (отклик прибора на один фотон), зарегистрированная в предварительных экспериментах, имеет время нарастания около 15 нс, а ее полуширина около 50 нс.

ФЭУ подключались коаксиальными BNC-кабелями с полосой пропускания 3 ГГц и волновым сопротивлением 50 Ом к входу 50 Ом осциллографа. Для решения проблемы “нулевого” фазового шума, а также для получения возможности обработать отрицательную и положительную задержки в одном эксперименте, основной ФЭУ подключался удлинненным на 5 м кабелем.

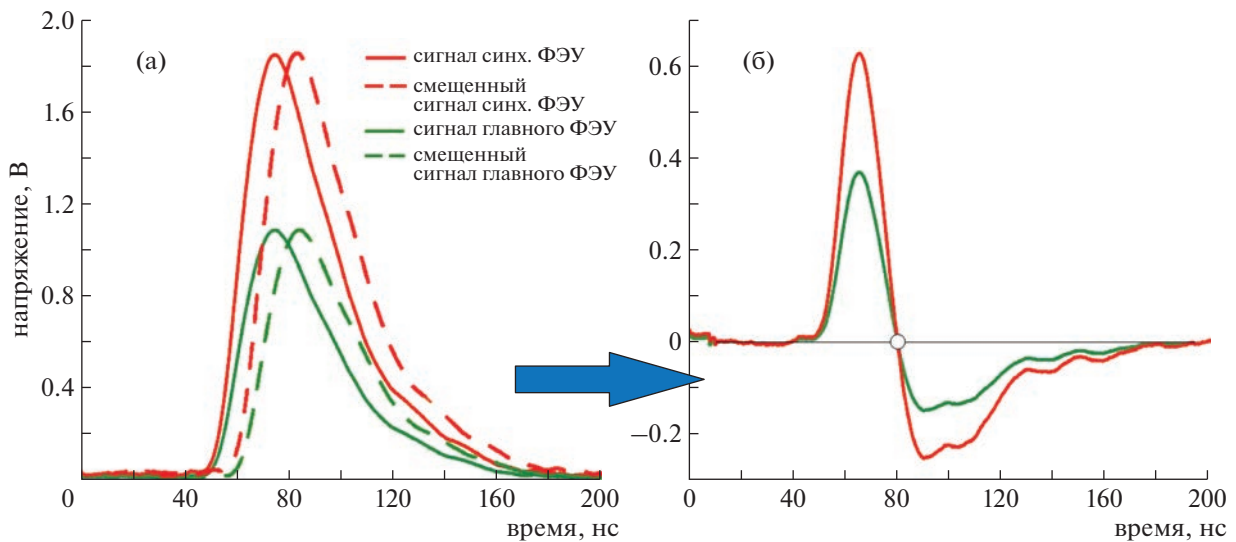


Рис. 3. Результат процедуры ДПЧ для сигналов синхронизирующего и основного ФЭУ с разной амплитудой без временного сдвига: (а) измеренные сигналы, (б) сигналы после выполнения процедуры.

Осциллограф настраивался на фиксирование парных событий: импульс синхронизирующего ФЭУ — импульс от основного ФЭУ, пришедший с небольшой задержкой $\tau \leq 50$ нс. Пороговое значение задержки выбиралось из соображений характерного времени жизни МР (10–30 нс) и задержки между МР различных поколений (сотни нс и более). При таких настройках регистрируемые сигналы с высокой вероятностью соответствуют паре фотонов, излучаемых одним МР. Запуска осциллографа по парным событиям в отсутствие разряда не происходило даже при повышенной фоновой засветке с частотой счета фотонов 10^4 – 10^5 с $^{-1}$.

Сигналы регистрировались цифровым запоминающим осциллографом LeCroy HDO6104AR с разрешением по вертикали 12 бит, полосой пропускания 1 ГГц и частотой дискретизации 10 Гвыб/с. Для каждой позиции хода регистрировалось около 200 тыс. импульсов с временным разрешением 100 пс.

В отличие от описанного в литературе способа реализации метода TCSPC, в данной работе ФЭУ, выдающий синхронизирующий сигнал, также работал в однофотонном режиме. Аппаратная функция используемых ФЭУ значительно шире светового импульса, излучаемого при распространении МР, длительность которого соответствует импульсу тока МР и составляет около 15–30 нс. Таким образом, ФЭУ имеет одинаковый отклик на одиночный фотон и на интегральное световое излучение МР. В связи с тем, что усиление ФЭУ влияет на форму его аппаратной функции, оба ФЭУ работали при одинаковых значениях усиления, т. е. в однофотонном режиме.

2.2. Алгоритм обработки данных

Обработка данных проводилась в среде MATLAB. Импульсы от обоих ФЭУ сравнивались с формой типичного импульса (полученного методом скользящего среднего при большой выборке импульсов), и импульсы с заметными искажениями фронта отфильтровывались. Это позволило исключить импульсы, соответствующие двум и более зарегистрированным фотонам, а также импульсы с артефактами от электромагнитных помех и шума усилителя ФЭУ.

Затем для отфильтрованных сигналов численно выполнялась процедура дискриминатора постоянной части (ДПЧ, англ. constant fraction discriminator — CFD). Каждый импульс был сдвинут на $dt = 10$ нс, а затем вычтен из исходного сигнала. Моментом регистрации фотона считалась точка пересечения результирующего сигнала с 0. Результат этой процедуры не зависит от амплитуды импульса. На рис. 3 представлены зарегистрированные импульсы разной амплитуды (от синхронизирующего и основного ФЭУ) с нулевой задержкой и результат выполнения функции ДПЧ.

Поскольку процедура ДПЧ корректно работает только при одинаковой форме фронта сравниваемых импульсов, был проведен контрольный эксперимент, в котором фотоны регистрировались при максимальном усилении ФЭУ. На рис. 4 показано время нарастания примерно 60 тыс. импульсов с различной амплитудой от обоих ФЭУ. Видно, что импульсы с амплитудой более 2.4 В характеризуются заметным увеличением разброса времени нарастания импульсов, что свидетельствует о возможном искажении их формы. Во избежание этого эксперименты проводились с ко-

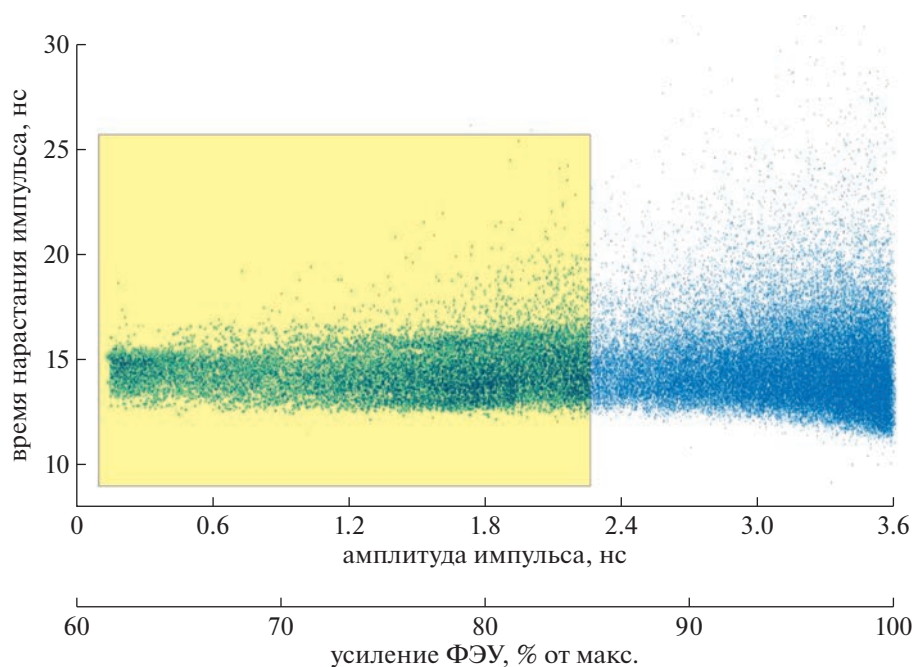


Рис. 4. Зависимость времени нарастания от амплитуды импульса, максимальное значение которой определяется коэффициентом усиления ФЭУ. Статистика была накоплена по 60 тыс. импульсов от обоих ФЭУ. Желтый прямоугольник показывает диапазон параметров, в которых проводился эксперимент.

эффицентом усиления ФЭУ не более 85% от максимального (желтая область на рис. 4). Это ограничивало максимальную амплитуду импульсов при работе ФЭУ в режиме счета фотонов.

Далее была получена статистика задержек между импульсами от синхронизирующего ФЭУ и основного ФЭУ τ по разным координатам. Полученный массив сортировался по фазе питающего напряжения. Распространение разряда изучалось отдельно для положительной и отрицательной полярности.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Гистограммы числа фотонов и различные поколения МР

Гистограммы числа фотонов, зарегистрированных на разных расстояниях от коронирующего электрода в течение активной фазы питающего напряжения, представлены на рис. 5.

Анализ полученных гистограмм позволяет сделать вывод, что при используемых в эксперименте параметрах питающего напряжения существует от двух до трех поколений МР в течение каждого полупериода приложенного напряжения. При смещении точки наблюдения вдоль разряда соотношение между различными пиками на гистограмме меняется. Это означает, что разные

поколения МР вносят разный вклад в интенсивность оптического излучения на разных расстояниях от края электрода.

3.2. Распространение отрицательных и положительных МР

Пространственно-временные диаграммы светимости МР показаны на рис. 6. При обеих полярностях барьерный разряд начинается вблизи кромки открытого электрода и распространяется вдоль поверхности диэлектрика. При отрицательной полярности электрода излучение разряда в основном сосредоточено вблизи кромки катода. При положительной полярности стример распространяется от края, световое излучение более или менее постоянно в пределах первых 0.8 мм и уменьшается по мере удаления от кромки. Различия в картинах распространения для положительной и отрицательной полярности открытого электрода объясняются тем, что при положительной полярности формируется катодонаправленный поверхностный стример, а при отрицательной полярности, при небольшом перенапряжении, поверхность заряжается электронами, образующимися в катодном слое, без образования области сильного поля на фронте плазмы.

Интенсивность светового излучения заметно уменьшается по мере удаления от кромки электрода. Это связано с тем, что количество МР бо-

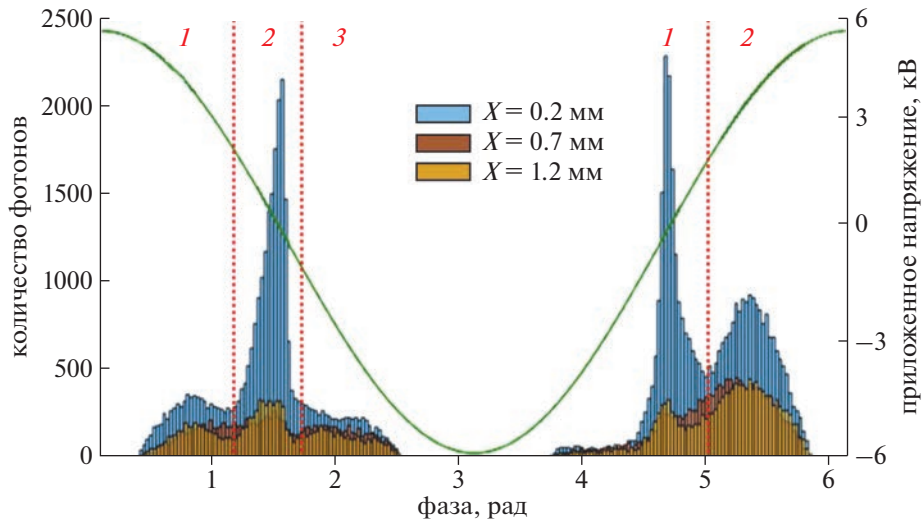


Рис. 5. Гистограммы количества фотонов, зарегистрированных на разных расстояниях от кромки электрода в течение периода питающего напряжения. Цифрами показаны номера поколений микроразрядов.

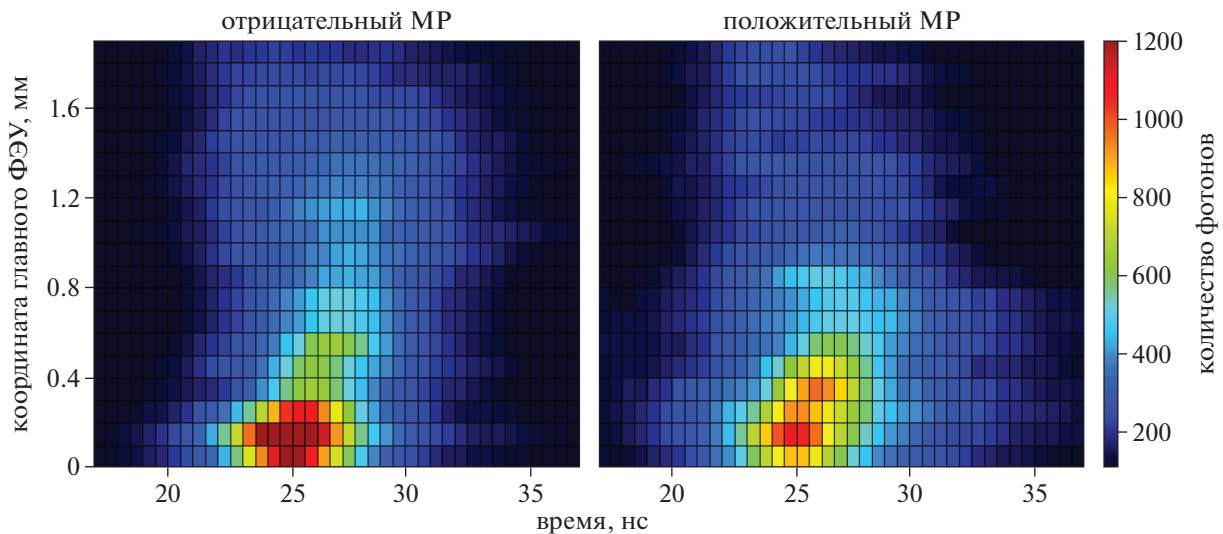


Рис. 6. Пространственно-временные диаграммы светимости отрицательных и положительных микроразрядов. Нулевое значение положения ФЭУ соответствует кромке электрода. Смещение временной задержки 25 нс обусловлено удлинением кабеля основного ФЭУ на 5 м.

лее поздних поколений, распространяющихся на большие расстояния, меньше, чем коротких МР первых поколений, что подтверждается анализом статистики МР [14]. Кроме того, МР расширяется при распространении, что приводит к снижению сигнала, регистрируемого при небольшой апертуре.

Можно заметить, что на больших от кромки электрода расстояниях световой фронт движется обратно к электроду при больших временных задержках, что наиболее отчетливо видно для положительной полярности. Этот эффект, по-видимо-

му, связан со сложной формой стримеров пДБР поздних поколений и вносимой соседними МР ошибкой измерений. МР первых поколений распространяются почти перпендикулярно электроду, для поздних поколений заряд на поверхности барьера оказывает существенное влияние на электрическое поле, тем самым изменяя направление распространения МР [17, 18]. Для положительной полярности дополнительным источником ошибок может быть синхронизация старта соседних МР вследствие фотоэмиссии, обусловленной испусканием фотонов из головки стримера.

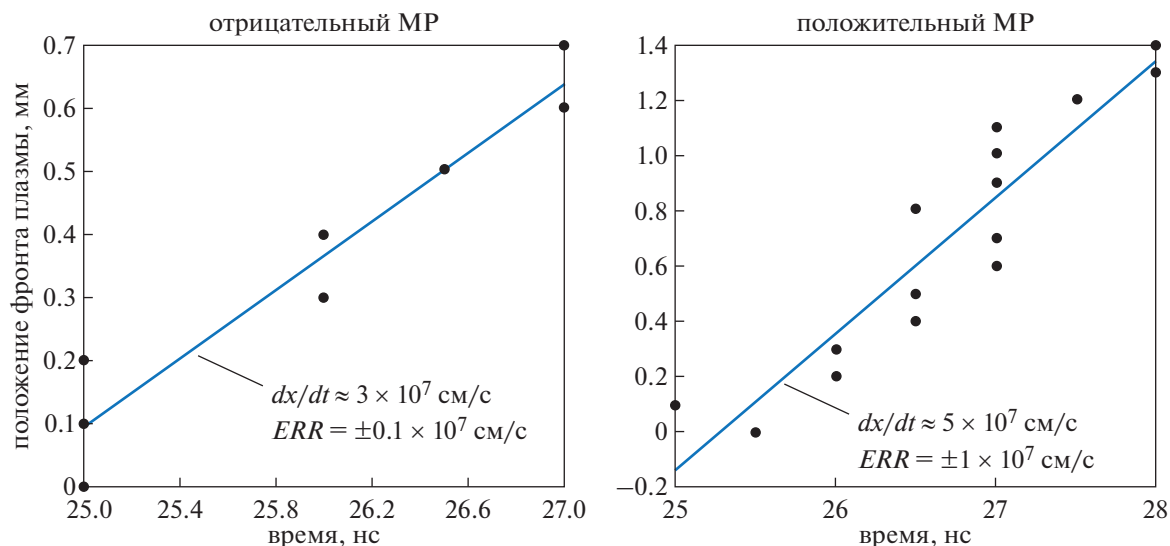


Рис. 7. Зависимость положения края светящейся области (фронта плазмы) микрозарядов отрицательной и положительной полярности. Скорость распространения МД определяется как производная полученной зависимости по времени, ERR указывает на ошибку аппроксимации.

3.3. Скорость распространения МР

По пространственно-временным диаграммам можно оценить среднюю скорость распространения МР положительной и отрицательной полярности. На рис. 7 представлены зависимости положения светящегося фронта плазмы от задержки относительно начала МР. Положение фронта выбиралось как максимальная интенсивность на пространственно-временных диаграммах в каждый момент времени. Оценка выполнялась для расстояний не более 1 мм от открытого электрода, чтобы отношение сигнал/шум было достаточно высоким и гарантировало, что большинство фотонов исходит от одиночного МР.

Можно видеть, что скорость распространения фронта плазмы отрицательного разряда 3×10^5 м/с примерно в 2 раза меньше скорости распространения поверхностного стримера в положительной фазе 5×10^5 м/с. Полученные значения скорости распространения качественно согласуются с данными других групп [19].

3.4. Динамика светимости МР и оценка временного разрешения метода

Путем интегрирования пространственно-временной диаграммы по координате можно получить форму светового импульса, соответствующего МР. На рис. 8 приведено сравнение формы полученного импульса светового излучения отрицательного МР и форма отрицательного импульса тока.

По времени нарастания интегрального импульса светимости можно оценить временное

разрешение метода, которое оказывается не хуже 300 пс (уровень 20–80%). Это намного выше временного разрешения ФЭУ (время нарастания аппаратной функции около 15 нс) и временного разрешения осциллографа, ограниченное его полосой пропускания. Предположительно, разрешение метода может быть увеличено до значения около 100 пс (ограничено частотой дискретизации осциллографа) за счет увеличения количества статистики регистрируемых фотонов.

ВЫВОДЫ

Метод TCSPC с цифровой постобработкой был реализован и испытан для диагностики поверхностного ДБР. Цифровая постобработка позволяет апостериорно разделить одиночные фотонные пары по свойствам микрозарядов, фазе напряжения и т. д. Было продемонстрировано наличие нескольких поколений отрицательных и положительных микрозарядов. Построены пространственно-временные диаграммы развития разряда, которые позволили оценить динамику развития одиночных микрозарядов. Скорость распространения положительных и отрицательных микрозарядов оценивается примерно в 5×10^5 и 3×10^5 м/с соответственно, что хорошо согласуется с литературными данными. Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности цифровой реализации метода TCSPC для высокоразрешающих оптических измерений импульсных процессов в электрических разрядах. Метод, реализованный в данной работе, имеет пространственное разрешение порядка 0.1 мм, которое можно улучшить за счет уменьше-

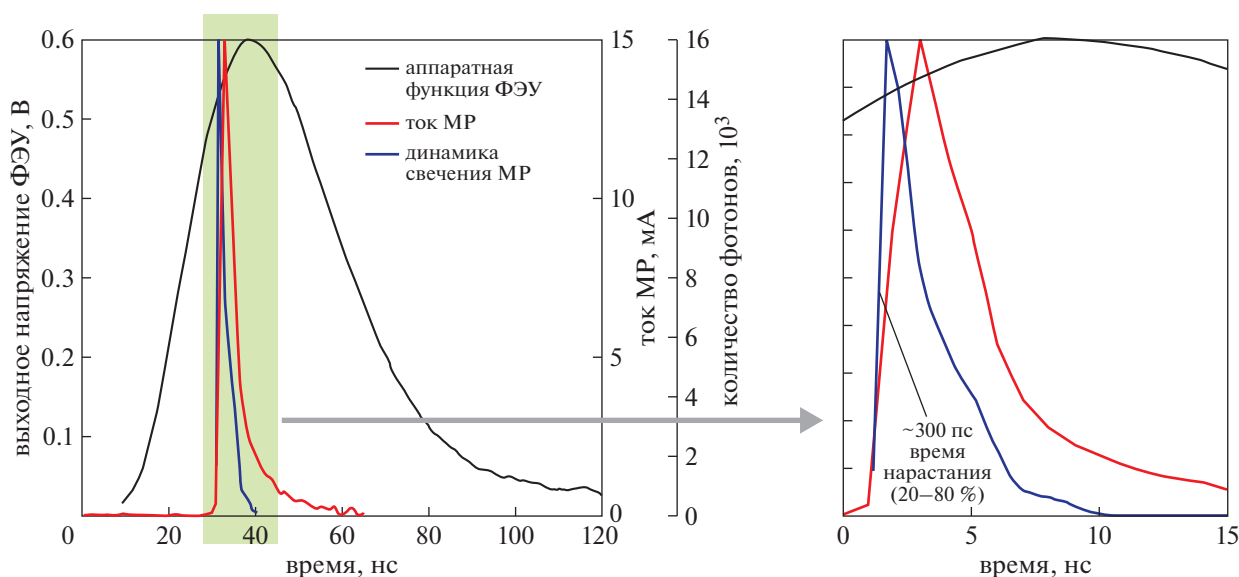


Рис. 8. Синяя линия – динамика свечения отрицательного микрозаряда, полученная при реализации метода TCSPC; красная линия – форма отрицательного импульса тока. Черная линия показывает аппаратную функцию ФЭУ.

ния шага перемещения основного ФЭУ, и временное разрешение не хуже 300 пс, которое, предположительно, может быть улучшено путем увеличения статистики регистрируемых фотонов до ~ 100 пс.

Реализация цифрового метода позволяет производить предварительную обработку сигналов ФЭУ, что позволяет избавиться от шумов и артефактов в сигнале, неизбежно присутствующих из-за нелинейности усилителей ФЭУ. Кроме того, возможна сортировка импульсов по множеству критериев, что может быть необходимо при изучении развития ДБР в многоимпульсных режимах или от кромок электродов со сложной морфологией.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание № 075-01056-22-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kogelschatz U., Eliasson B., Egli W.* // J. Phys. IV Fr. 1997. V. 7. P. 4. <https://doi.org/10.1051/jp4:1997405>
2. *Brandenburg R.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. V. 26. P. 053001. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa6426>
3. *Fridman G., Brooks A.D., Balasubramanian M., Fridman A., Gutsol A., Vasilets V.N., Ayan H., Friedman G.* // Plasma Process. Polym. 2007. V. 4. 370. <https://doi.org/10.1002/ppap.200600217>
4. *Yagi S., Tanaka M.* // J. Phys. D. Appl. Phys. 1979. V. 12. P. 1509. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/12/9/013>
5. *Eliasson B., Hirth M., Kogelschatz U.* // J. Phys. D. Appl. Phys. 1987. V. 20. P. 1421.
6. *Roth J.R., Rahel J., Dai X., Sherman D.M.* // J. Phys. D. Appl. Phys. 2005. V. 38. P. 555. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/4/007>
7. *Corke T.C., Jumper E.J., Post M.L., Orlov D., McLaughlin T.E.* // Proc. 40th AIAA Aerosp. Sci. Meet. Reno, NV, U.S.A. 2002. P. 0350. <https://doi.org/10.2514/6.2002-350>.
8. *Kriegseis J., Simon B., Grundmann S.* // Appl. Mech. Rev. 2016. V. 68. P. 020802. <https://doi.org/10.1115/1.4033570>
9. *Moreau E.* // J. Phys. D. Appl. Phys. 2007. V. 40. P. 605. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/3/S01>
10. *Ouyang L., Cao Z., Wang H., Hu R., Zhu M.* // J. Alloys Compd. 2017. V. 691. P. 422. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.179>
11. *Hoder T., Sernák M., Höft H., Gerling T., Brandenburg R.* // Proc. Sci. 2015. V. April 2015. P. 1–10. <https://doi.org/10.22323/1.240.0008>
12. *Becker W.* Advanced time-correlated single photon counting techniques. Springer Series in Chemical Physics (V. 81), 2005.
13. *Kozlov K.V., Wagner H.E., Brandenburg R., Michel P.* // J. Phys. D. Appl. Phys. 2001. V. 34. P. 3164. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/21/309>

14. *Selivonin I., Moralev I.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2021. V. 30. P. 035005.
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/abe0a1>
15. *Selivonin I., Moralev I.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. V. 27. P. 085003.
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/abe0a1>
16. *Selivonin I., Moralev I.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2100. P. 012014.
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/aacbf5>
17. *Jahanbakhsh S., Brüser V., Brandenburg R.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. V. 27. P. 115011.
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/aaec5f>
18. *Jahanbakhsh S., Hoder T., Brandenburg R.* // J. Appl. Phys. 2019. V. 126. P. 193305.
<https://doi.org/10.1063/1.5124363>
19. *Gibalov V.I., Pietsch G.J.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2012. V. 21. P. 024010.
<https://doi.org/10.1088/0963-0252/21/2/024010>