

УДК 537.52

## КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ

© 2022 г. С. Г. Давыдов<sup>а, \*</sup>, А. Н. Долгов<sup>а</sup>, А. А. Козлов<sup>а</sup>, В. О. Ревазов<sup>а</sup>, Р. Х. Якубов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>ФГУП “Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова” (ВНИИА),  
Москва, 127055 Россия

\*E-mail: vniia4@vniia.ru.

Поступила в редакцию 13.05.2022 г.

После доработки 13.05.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

Представлен многофункциональный исследовательский комплекс, разработанный для получения основополагающих знаний в области физики разряда по поверхности диэлектрика, в вакуумных и газовых промежутках, изучения свойств плазмы вакуумных дуг в парах металла и свойств лазерной плазмы с применением различных методик.

*Ключевые слова:* коммутатор, вакуумный разрядник, искровой разряд, дуга

**DOI:** 10.56304/S2079562922030095

### ВВЕДЕНИЕ

Для детального рассмотрения и понимания особенностей развития высоковольтного сильно-точного разряда в вакуумных и газонаполненных промежутках, в том числе, при его инициации вспомогательным искровым разрядом или лазерным излучением в ФГУП “ВНИИА” разработан и создан многофункциональный исследовательский комплекс, позволяющий проводить разносторонние исследования в области физики плазмы [1–4] с применением взаимодополняющих методик:

– регистрация с наносекундным временным разрешением изображений исследуемого объекта методами импульсной тенеграфии и интерферометрии, получаемых с помощью лазерного осветителя (импульсного диагностического лазера);

– регистрация изображений, получаемых методами скоростной фотографии оптического диапазона в собственном излучении исследуемого объекта с помощью электронно-оптического преобразователя с наносекундным временным разрешением;

– регистрация визуальных изображений исследуемого объекта в инфракрасном диапазоне его собственного излучения с помощью тепловизора-пирометра.

– определение параметров плазмы (электронная температура, концентрация электронов и ионов) разряда с помощью зондовых измерений путем анализа вольт-амперных характеристик;

– определение параметров корпускулярной эмиссии с помощью электростатических и маг-

нитных анализаторов энергетического и зарядового состава корпускулярных потоков;

– регистрация импульсов электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне (от инфракрасной до рентгеновской области спектра).

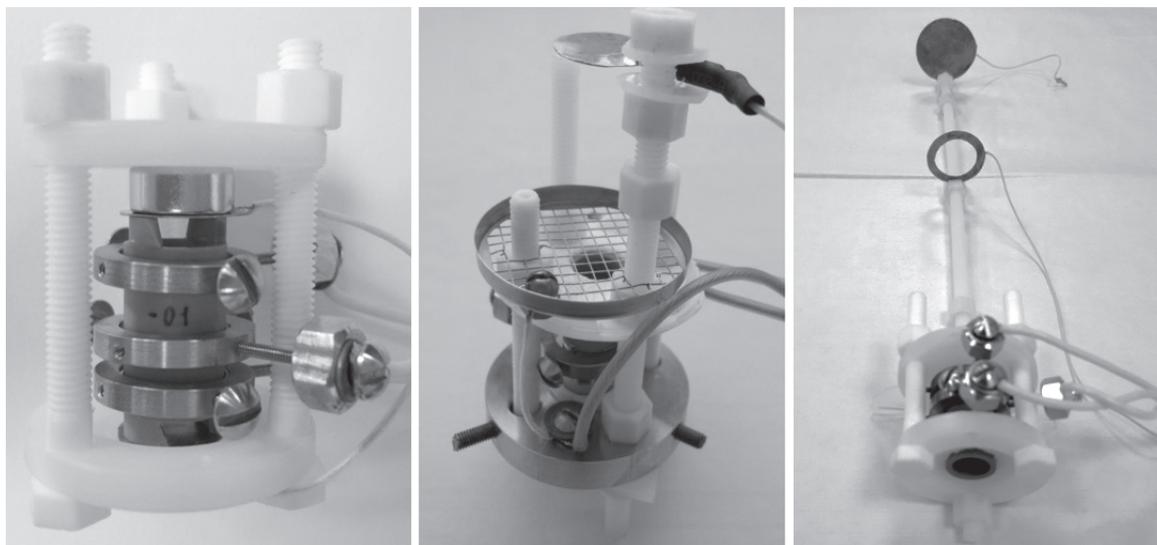
### ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМПЛЕКС

Комплекс обладает гибкой аддитивной архитектурой аппаратной части, допускающей дальнейшее развитие в целях решения возникающих задач и состоит из:

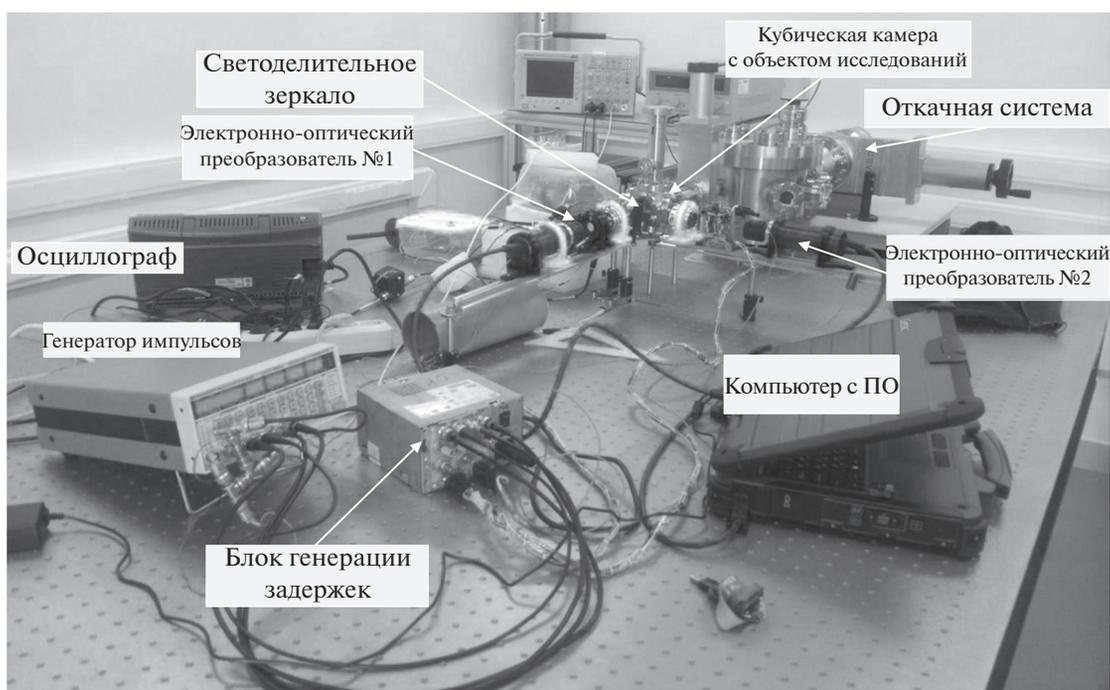
– вакуумной части – набор вакуумных камер с системой средств вакуумной откачки (форвакуумного и турбомолекулярного насосов для получения безмасляного вакуума до уровня  $10^{-4}$  Па), вакуумные вентили, средства контроля вакуума, средства формирования заданной газовой среды в специализированном герметичном объеме, система высоковольтных и низковольтных вводов, набора диагностических окон;

– электрической части – высоковольтные источники питания для запитывания электрических схем, источники высокого и низкого напряжения для средств диагностики, набор средств измерений и контроля электрических параметров цепей;

– электрооптической части – оптический стол ( $2.5 \times 1.5$  м), элементы точного позиционирования, набор линз, оптических фильтров, зеркал, средства визуализации исследуемых физических процессов (интерферометр), комплект лазеров (силовой, диагностический, юстировочный), на-



**Рис. 1.** Примеры конструкций исследовательских макетов высоковольтных миниатюрных вакуумных коммутаторов. Характерный размер макетов –  $\varnothing$  35 мм.



**Рис. 2.** Аппаратурный модуль для проведения скоростного фотографирования.

бор средств измерения параметров используемого лазерного излучения (рис. 1, 2);

- аппаратурной части, из элементов которой могут формироваться специализированные аппаратурные модули, предназначенные для проведения исследований конкретной направленности;

- макетной части, в состав которой входят макеты и имитаторы различных устройств плазмен-

ной электроники, в которых происходит формирование плазменных объектов, подлежащих изучению, и которые обеспечивают возможность проведения исследований с использованием самых различных методов (рис. 1).

Достоинством комплекса является возможность осуществить сравнительно быструю замену объекта исследований и выполнить в достаточно

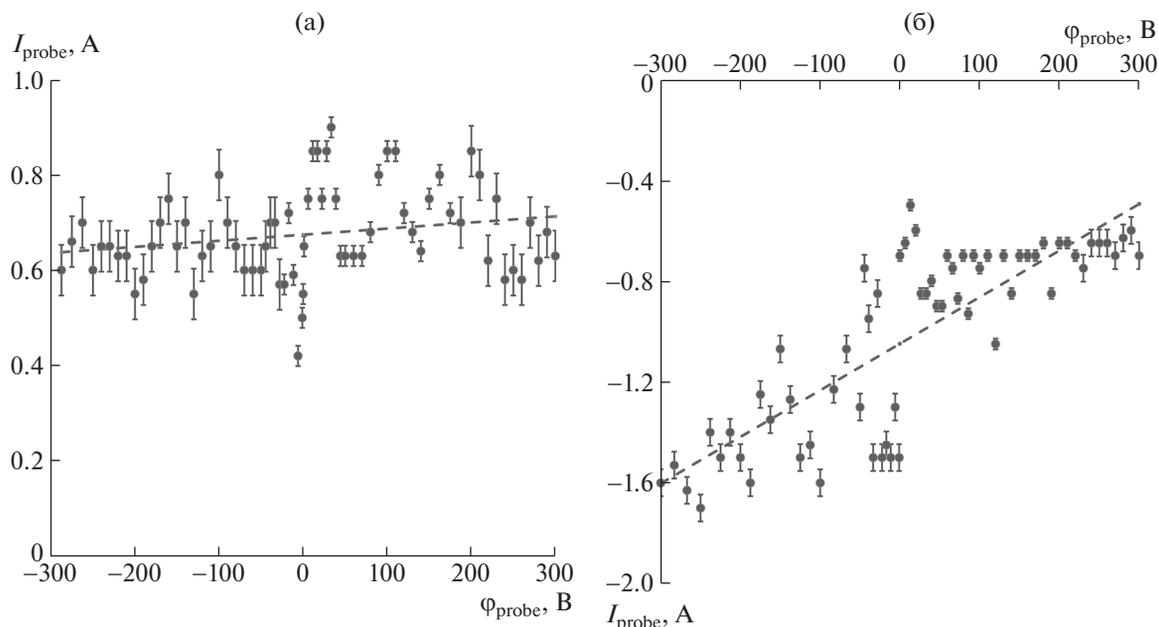


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики, зарегистрированные в момент времени  $\sim 2$  (а),  $\sim 4$  нс (б) после поджигающего импульса в трехэлектродной разрядной системе.

короткий срок перестройку и наладку схемы проведения экспериментов. Кроме того, следует указать на возможность осуществления экспериментов узким коллективом исследователей.

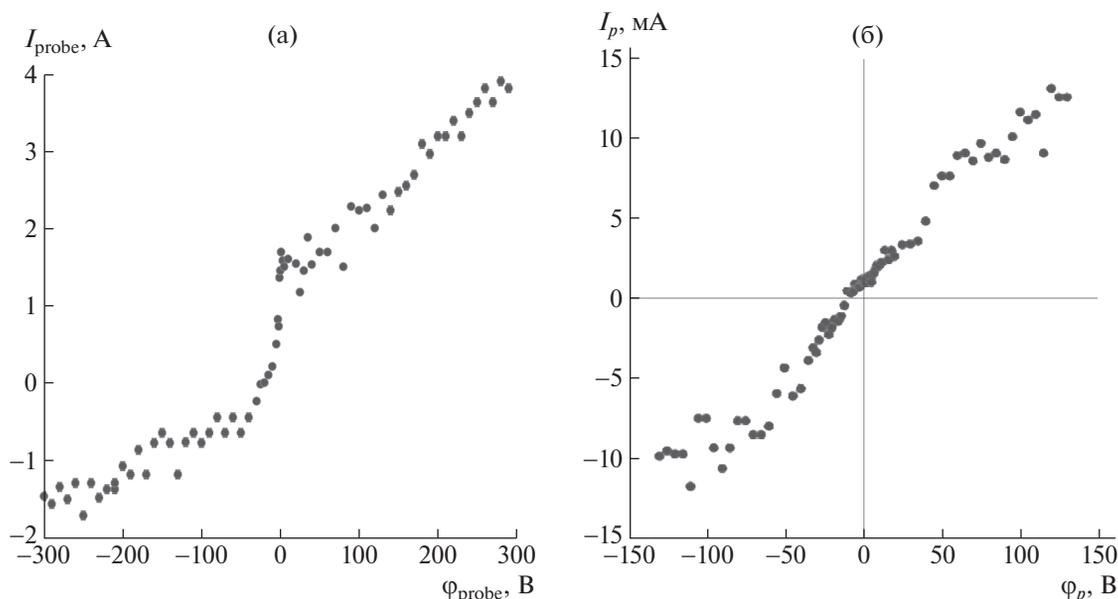
### НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В УСТРОЙСТВАХ ПЛАЗМЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

При использовании комплекса с помощью зондовых измерений были зарегистрированы параметры плазмы импульсных вакуумных дуговых разрядов в трехэлектродной коаксиальной разрядной системе с искровым поджигом по поверхности диэлектрика и в двухэлектродной разрядной системе катод(мишень)-анод с лазерным поджигом [1]. Протяженность коммутируемого разрядом вакуумного промежутка составляла 1 мм. Продолжительность вспомогательного искрового разряда и импульса лазерного излучения составляла 30 нс в обоих случаях. Кроме того, плотности потока энергии в центрах взрывной эмиссии электронов в первом случае и в пятне фокусировки на мишени во втором случае также были близки и составляли  $\sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. В трехэлектродной разрядной системе зафиксированы последовательно сначала потоки надтепловых электронов и ионов с энергиями 300–500 эВ (рис. 3) и далее образование плазмы в момент времени 10 нс (рис. 4а) с температурой 30 эВ в момент времени 10 нс в результате ионизации остаточного газа электронами и излучением, эмитированны-

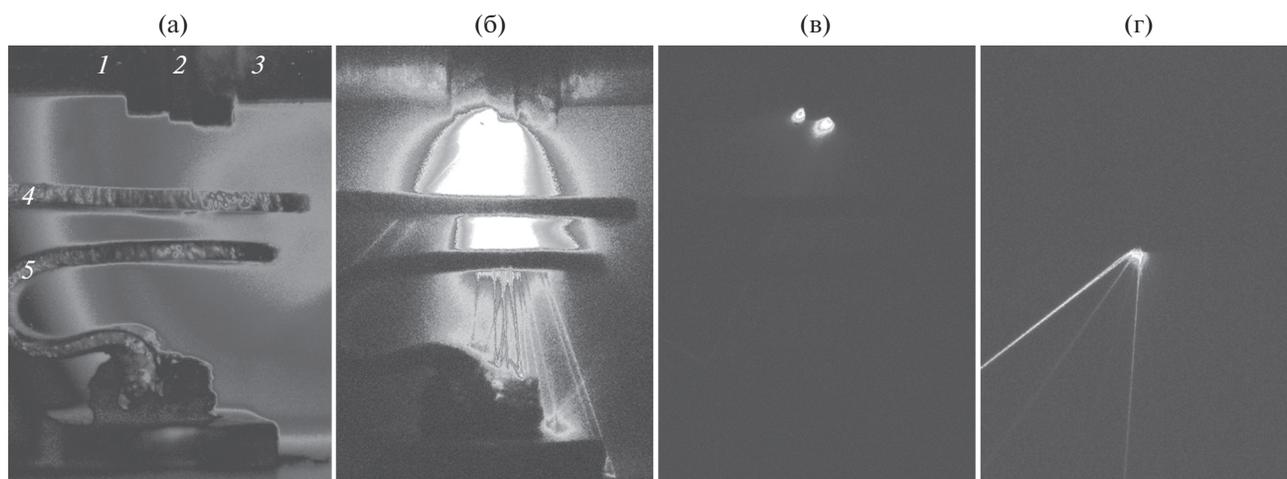
ми из плазмы катодного пятна, образующейся при формировании того же искрового разряда и плазмы самого искрового разряда, далее наблюдался набегающий поток плазмы с температурой 2–4 эВ. В случае двухэлектродной разрядной системы также зафиксировано образование за счет ионизации коротковолновым излучением и быстрыми электронами из пятна фокусировки первичной плазмы в момент времени 10 нс (рис. 4б) с температурой 16 эВ и следующего за ней, набегающего на зонд потока лазерной плазмы.

В экспериментах [2–4] обнаружена достаточно эффективная ионизация разреженного газа в коротком промежутке (рис. 5а) потоком коротковолнового излучения и быстрых электронов из плазмы вспомогательного искрового разряда по поверхности диэлектрика. На рис. 5б, 5в показаны изображения разряда при положительной и отрицательной полярностях анода, соответственно. При отрицательной полярности анода разряд в основном разрядном промежутке загорается, но крайне редко. Установлено, что факт зажигания разряда зависит от полярности прикладываемого к электродному промежутку напряжения и в развитии разряда основную роль играют электроны, эмитируемые узлом поджига.

Исследования развития искрового разряда [5] по поверхности диэлектрика позволили выявить ряд особенностей, отличающих разряд по керамике от разряда по слюде, например, протекание разряда по слюде сопровождается появлением многочисленных ярких изображений светящихся треков макрочастиц (капель жидкого металла –



**Рис. 4.** Вольт-амперные характеристики плазмы в трехэлектродной системе (а) и двухэлектродной системе (б) через  $\sim 10$  нс после поджигающих импульсов.

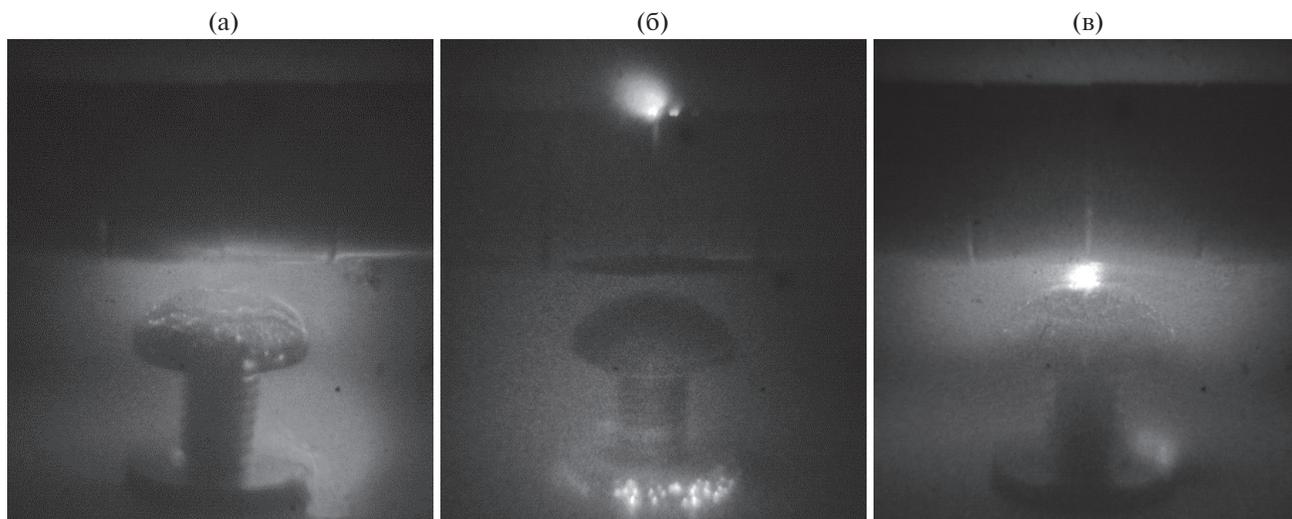


**Рис. 5.** Фотографии, полученные с помощью скоростной видеокамеры: (а) вид макета миниатюрного вакуумного коммутатора с двойным катодом и искровым поджигом: 1 – катод № 1, 2 – диэлектрическая вставка (керамика), 3 – управляющий электрод, 4 – катод № 2, 5 – анод (протяженность коммутируемого разрядом вакуумного промежутка – 1 мм); (б) разряд (дуговой) при положительной полярности – потенциала анода (+100 В); (в) разряд по поверхности керамики (только искровой в узле поджига) при отрицательной полярности потенциала анода (–100 В), наблюдается испарение материала электродов (анодный и катодный факелы); (г) искровой разряд по поверхности слюды в узле поджига, наблюдаются откольные явления и направленные выбросы плазмы материала диэлектрика, экспозиция – 60 мкс.

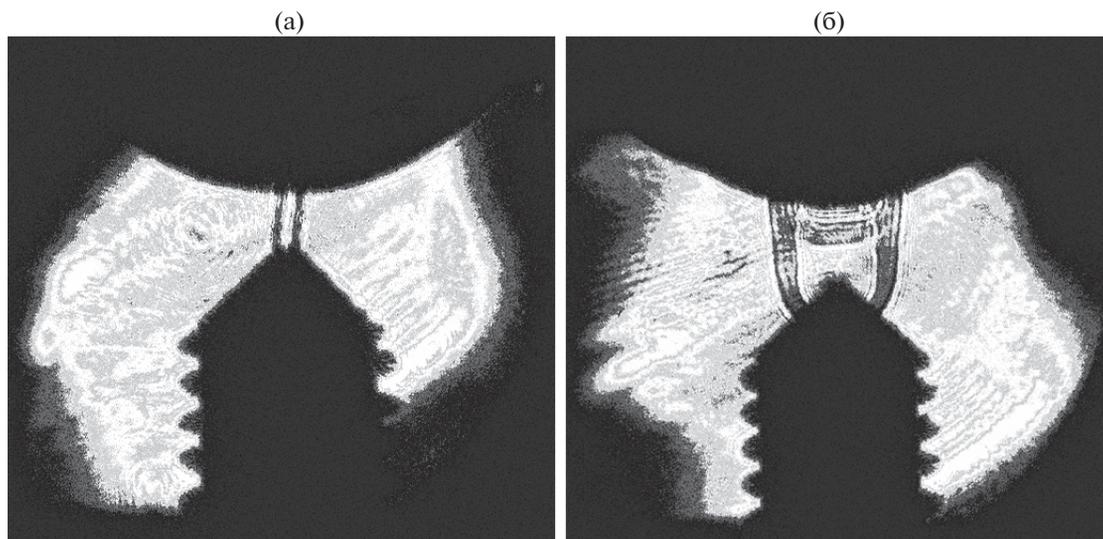
материала катода, твердых частиц – сколов материала диэлектрика и в некоторых случаях материала катода) и струй плазмы, а в случае разряда по поверхности керамики треков макрочастиц не наблюдается (рис. 5в, 5г). Область наиболее интенсивного свечения в случае разряда по керамике обычно заметно больше, чем при разряде по

слюде. Пространственная структура разрядов заметно отличается: наиболее яркий объект в первом случае – это область у поверхности слюды, во втором случае – две области у поверхности электродов.

Наиболее яркими источниками излучения, по крайней мере, видимого и ближнего ультрафио-



**Рис. 6.** Фотографии объемного вакуумного разряда на начальной стадии (а, б) и контрагированного разряда (в) в трех-электродной разрядной системе, полученные с помощью ЭОП, экспозиция – 100 нс.



**Рис. 7.** Теневые изображения разряда в коротком газовом промежутке: (а) фаза формирования канала тока; (б) фаза отрыва ударной волны (УВ) от канала тока. Протяженность коммутируемого разрядом газонаполненного промежутка – 1 мм.

летнего диапазона является плазма, эмитируемая из центров взрывной электронной эмиссии на катоде и анодных пятен (рис. 6).

Регистрация изображений исследуемого объекта методами импульсной тенеграфии для газового разряда позволило получить весьма интересные с научной точки зрения результаты касающиеся распространения ударных волн, вызванных протеканием разряда (рис. 7а, 7б). Наблюдаются две волны – первоначально цилиндрическая волна, образованная в результате расширения токового канала и трансформирующаяся в сферическую, и волна внутри токового канала, распространяю-

щаяся от катодного пятна в направлении анода. Приходится констатировать, что волна внутри токового канала распространяется слишком медленно со скоростью  $\sim 100$  м/с и не может быть источником значительного вклада в ионизацию газовой среды. Вероятно, наблюдается так называемая волна Маха, формирующаяся в результате интерференции сферических волн, отражающихся от стенок цилиндрического канала, и трансформирующаяся в плоскую волну.

Результаты экспериментов свидетельствуют в пользу того, что скорость распространения цилиндрической волны на начальном этапе мала

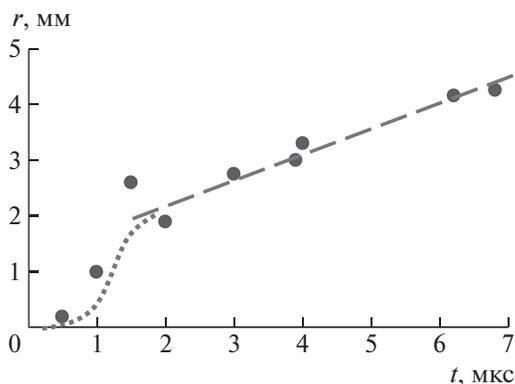


Рис. 8. График зависимости смещения УВ от времени с момента старта разряда.

(<0.5 мкс) в условиях сильно неоднородного электрического поля (рис. 8), поскольку энергия, выделяющаяся в канале разряда, по-видимому, первоначально превращается в энергию возбуждения и колебания молекул. Далее происходит разогрев газа и набор скорости распространения волны. Данный результат, касающийся начальной стадии распространения волны (рис. 8), отличается от ранее представленных в научной литературе для аналогичных условий.

Создание комплекса открыло широкие возможности для макетирования разрабатываемых приборов и изучения характеристик экспериментальных образцов. Ряд полученных с его использованием научно-технических результатов имеет важное прикладное значение для разработки перспективных образцов проектируемых приборов. В их числе можно указать следующие.

Обнаружено решающее влияние на скорость коммутации короткого вакуумного промежутка явления ионизации остаточного газа под действием эмиссии излучения и электронов из плазмы искрового разряда или лазерной плазмы при инициировании процесса коммутации в вакууме  $10^0$ – $10^{-2}$  Па.

Проведена расчетная и экспериментальная оценка энергии иницирующего искрового разряда, необходимой для обеспечения стабильности процесса коммутации короткого вакуумного промежутка. Экспериментально изучена зависимость времени задержки процесса коммутации от давления остаточного газа и энергии иницирующего искрового разряда по поверхности диэлектрика.

Обнаружены качественные различия характера развития искрового разряда в вакууме по поверхности диэлектриков, отличающихся термостойкостью.

Экспериментально показано влияние осевой симметрии миниатюрных электроразрядных коммутаторов на надежность их функционирования.

На основе полученных научных результатов предложены и опробованы на экспериментальных образцах новые методы повышения эксплуатационных характеристик миниатюрных электроразрядных коммутаторов с инициированием вспомогательным искровым разрядом и лазерным излучением.

Можно отметить, что был получен ряд научных результатов, в первую очередь, в области физики плазмы, имеющих фундаментальное значение. Среди них можно отметить следующие.

Путем измерения с высоким временным разрешением токов, протекающих в коротком ( $\sim 1$  мм) вакуумном промежутке, и падения напряжения на нем, при относительно невысоких напряжениях источника тока (не более 3 кВ) удалось впервые зарегистрировать пучки электронов и ионов, эмитируемые из катодного пятна искрового разряда, и зафиксировать процесс распространения плазмы.

При использовании зондовой методики была показана техническая возможность изучения с ее помощью быстропротекающих процессов (наносекундного временного масштаба), что до настоящего времени полагали невозможным (традиционно считается, что доступен временной масштаб  $\sim 1$  мкс и более).

Обнаружена возможность возникновения центра взрывной эмиссии электронов, т.е. элемента катодного пятна, при протекании в вакууме тлеющего разряда с током меньше критического ( $I_{\text{тл}} = 0.1 \text{ A} < I_{\text{кр}} = 1\text{--}3 \text{ A}$ ).

Обнаружена анизотропия по флюэнсу и электронной температуре потока плазмы, эмитированного из искрового разряда по поверхности диэлектрика.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный комплекс открывает возможности поиска новых конструктивных и технологических решений для совершенствования современных и разработки перспективных приборов плазменной электроники.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Davydov S.G., Dolgov A.N., Katorov A.S., Revazov V.O., Yakubov R.Kh. // Zh. Tech. Fiz. 2020. V. 90 (6). P. 919 (in Russian).
2. Davydov S.G., Dolgov A.N., Kozlov A.A., Yakubov R.Kh. // Zh. Tech. Fiz. 2021. V. 91 (12) P. 1916 (in Russian).
3. Davydov S.G., Dolgov A.N., Karpov M.A., Korneev A.V., Nikishin D.V., Pschenichnyy A.A., Yakubov R.Kh. // Usp. Prikl. Fiz. 2019. V. 7 (5). P. 454 (in Russian).
4. Davydov S.G., Dolgov A.N., Kozlov A.A., Yakubov R.Kh. // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84 (11). P. 1874.
5. Davydov S.G., Dolgov A.N., Kozlov A.A., Maksimov V.A., Yakubov R.Kh. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2059. P. 012006.

## Experimental Complex for the Research of Discharge Physics

S. G. Davydov<sup>1, \*</sup>, A. N. Dolgov<sup>1</sup>, A. A. Kozlov<sup>1</sup>, V. O. Revazov<sup>1</sup>, and R. Kh. Yakubov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA), Moscow, 127055 Russia*

*\*e-mail: vniia4@vniia.ru*

Received May 13, 2022; revised May 13, 2022; accepted May 16, 2022

**Abstract**—The multifunctional research complex is presented, designed to obtain fundamental knowledge in the field of physics of discharge on the dielectric surface, in vacuum and gas gaps, to study the plasma properties of vacuum arcs in metal vapors and the properties of laser plasma using various techniques.

*Keywords:* vacuum switch, vacuum breaker, spark discharge, arc