

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 681.385

УСТАНОВКА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗРЯДНИКЕ С ОПТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

© 2022 г. С. Г. Давыдов^а, *, В. О. Ревазов^а, В. П. Селезнёв^а, М. С. Скоробогатых^а, Р. Х. Якубов^а

^аВсероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, 127055 Россия

*E-mail: vnii4@vnii.ru

Поступила в редакцию 13.05.2022 г.

После доработки 13.05.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

В работе представлены результаты создания нового инструмента, позволяющего проводить исследования физических процессов, протекающих при работе импульсного разрядника с оптическим управлением. Получены практические данные о предельных измеряемых параметрах установки и результаты корпускулярных исследований в остаточной среде разреженного газа.

Ключевые слова: разрядник с оптическим управлением, лазерная плазма

DOI: 10.56304/S2079562922030101

ВВЕДЕНИЕ

Явление взаимодействия лазерного излучения с поверхностью металлов, приводящее к образованию лазерной плазмы, имеет как научный, так и прикладной интерес. Этот процесс лежит в основе коммутаторов с оптическим управлением. Ключевым преимуществом данного вида коммутатора в мощных импульсных системах, является гальваническая развязка цепей управления и коммутации и высокая стабильность работы, что повышает надежность всей системы в целом.

Для создания разрядника с оптическим управлением требуется проведение исследований в физике газового и вакуумного разряда, взаимодействия мощных импульсов лазерного излучения с веществом. Все это можно реализовать на разработанном авторами работы исследовательском комплексе, созданном во ФГУП ВНИИА.

РАЗРЯДНИК С ОПТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

На рис. 1. представлен эскиз типичной конструкции вакуумного разрядника с оптическим управлением [1]. Импульс лазерного излучения формируется лазером – 7, после чего передается в оптическую систему фокусировки – 6. Задача данного узла состоит в точной фокусировке лазерного излучения на катод – 5 разрядника. Между катодом и анодом – 4 имеется начальная разность потенциалов. После попадания импульса излучения на мишень, в области воздействия, происходит нагрев и сублимация материала катода.

Образуется приповерхностная лазерная плазма, при распространении которой нарушается электропрочность промежутка. Также в корпусе разрядника предусмотрены окно для ввода излучения – 3, диэлектрическое кольцо – 2 и технологический диск – 1, обеспечивающий лучшую механическую прочность корпуса прибора.

Управление работой газонаполненных разрядников с оптическим запуском может осуществляться двумя способами. Когда лазерное излучение фокусируется на поверхности одного из элект-

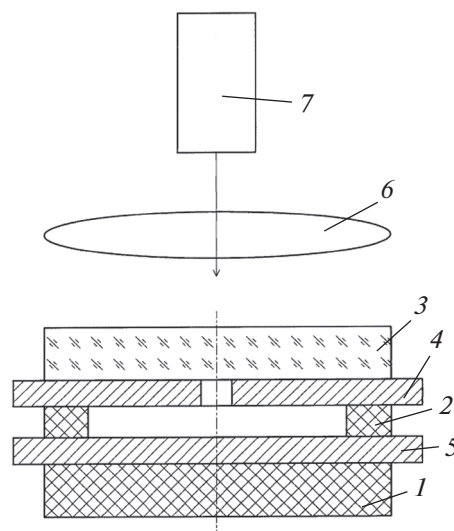


Рис. 1. Вакуумный разрядник с оптическим управлением [1].

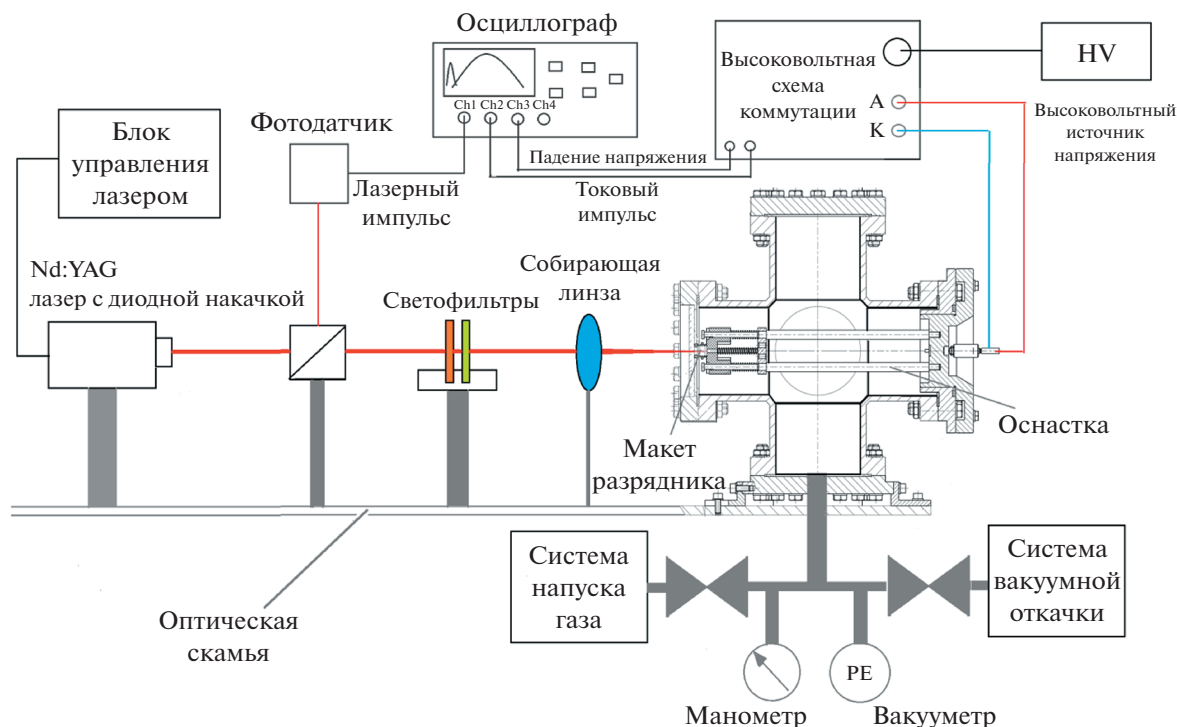


Рис. 2. Исследовательская установка.

тродов либо фокус находится непосредственно в межэлектродном промежутке. Первый способ является наиболее оптимальным для миниатюрных коммутаторов, т.к. для возникновения искры, при фокусировке в межэлектродном промежутке (2-ой способ) требуется высокая интенсивность излучения порядка 10^{11} Вт/см² (при давлении газа в приборе 1–3 бар). При воздействии лазерного излучения на мишень разрядника так же, как и для вакуумного исполнения наблюдается интенсивный нагрев и сублимация электрода. Эмиссия частиц из области нагрева приводит к образованию проводящей среды и запуску разряда схемы коммутации. Характерные времена задержки сильно зависят от интенсивности излучения, напряжения между электродами и давления газовой среды. Конструкция газового разрядника отличается использованием штенгеля вместо диска 1 с возможностью напуска газа [2].

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ УСТАНОВКА

На рис. 2. изображена схема экспериментального стенда. Оптическая часть установки представлена импульсным Nd:YAG лазером с модуляцией добротности и оптической линией, которая необходима для регистрации фотодатчиком лазерного импульса, а также фокусировки его собирающей линзой на катод-мишень разрядника. Все элементы (лазер, линза, фотодатчик, светоотражающая пластина, светофильтры) располо-

жены на трехпозиционных манипуляторах с возможностью быстрой регулировки положения на оптической плите.

Система вакуумной откачки представлена форвакуумным и турбомолекулярным насосами. Данное решение способно обеспечить необходимый уровень вакуума.

В установке также предусмотрена система напуска газов, предназначенная для наполнения макетов разрядника средой выбранного газа или смеси газов.

Системы откачки и газонапуска подключены к вакуумной камере, которая представляет собой «шестерник», нижний фланец которого жестко закреплен на оптической плите. Камера также оснащена вакуумным датчиком, высоковольтными выводами, оптически прозрачным окном и специально разработанной оснасткой для проведения исследований в разрядниках с оптическим управлением.

Используемый твердотельный лазер формирует импульс излучения с длиной волны 1064 нм при диаметре пучка 1.5 мм, энергией до 3.5 мДж, длительности по полувысоте 5.5 нс. Эти характеристики позволяют обеспечивать максимальную интенсивность на мишени $3 \cdot 10^9$ Вт/см².

Конструкцией оптической линии предусмотрена установка различных светофильтров и линз. Первое необходимо для регулировки энергии лазерного излучения, например, уменьше-

ние до 100 мкДж. Второе служит для фокусировки с возможностью удобного позиционирования пятна на электроде при различных испытаниях разрядника.

Система вакуумной откачки способна создавать разряжение вплоть до 10^{-6} торр. Этого вакуума вполне достаточно для проведения исследований, т.к. остаточное давление большинства диффузионно-сваренных ЭВП находится на том же уровне и выше. Система напуска газа предназначена для создания газовой среды с давлением выбранного газа до 3 атм.

Описанные характеристики комплекса позволяют проводить осциллографические исследования параметров формируемых импульсов, зондовые исследования лазерной плазмы, эксперименты по испытаниям разборных и диффузионно-сваренных разрядников.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

С помощью созданной установки были получены новые экспериментальные данные, которые позволили провести исследования и выявить основные механизмы, обеспечивающие работу разрядников с оптическим управлением.

В первой группе экспериментов, которая более подробно описана в работе [3] представлены результаты исследований с электродной системой, выполненной из сплава титана. Получена зависимость времени задержки начала разряда в цепи от интенсивности лазерного излучения при остаточном давлении в вакуумной камере 10^{-3} – 10^{-5} торр. За начало отсчета задержки принимался уровень 0.5 временного профиля лазерного импульса, который снимался с фотодатчика. При интенсивностях более $2 \cdot 10^8$ Вт/см² задержка не превышала 20 нс и наблюдались стабильные коммутации в выбранном диапазоне давлений с джиттером 1–2 нс. При интенсивности $5 \cdot 10^7$ Вт/см² задержка составляла 50 нс, а джиттер возрастал до 10 нс. Таким образом, данные, полученные в эксперименте, определяют пороговую интенсивность, необходимую для стабильной работы прибора, минимального джиттера, при использовании электродной системы из сплава титана. Также видно, что задержка с учетом погрешностей не зависит от давления остаточной среды в диапазоне 10^{-3} – 10^{-5} торр. При увеличении интенсивности до $3 \cdot 10^9$ Вт/см² наблюдалось значительное уменьшение задержки до 5 нс. При таких интенсивностях возможен эффект ионизации остаточных газов (с большой вероятностью азота) квантами УФ излучения лазерной плазмы, что приводит к более быстрому механизму возникновения разряда в цепи. В работе [3] также продемонстрирован широкий диапазон межэлектродных напряжений 0.25–5 кВ, при которых может

работать вакуумный разрядник, интенсивность поджига при этом составляла $7 \cdot 10^8$ Вт/см².

Дальнейшие результаты корпускулярных исследований [4] лазерной плазмы в вакууме с использованием одиночного электростатического зонда показали наличие характерных трех групп частиц. Первая группа возникала практически синхронно с импульсом лазерного излучения, вторая группа – через ~ 150 нс (пик сигнала с зонда), третья – ~ 500 нс. Интенсивность излучения на поверхности мишени составляла $\sim 10^9$ Вт/см², $P \sim 10^{-4}$ торр. Для первой группы частиц на пике сигнала с зонда рассчитаны следующие параметры плазмы $T_e \sim 6 \pm 2$ эВ, $n_e \approx 6 \cdot 10^{16}$ м⁻³, для второй группы: $T_e \sim 5 \pm 1$ эВ, $n_e \approx 10^{17}$ м⁻³. Для третьей группы частиц, судя по ВАХ, происходят сильные колебания, собственное электрическое поле которых превосходит поле, создаваемое в плазме зондом. При уменьшении давления до 10^{-5} торр электронная температура первой группы частиц возрастала до 20 ± 4 эВ, а концентрация падала. При увеличении давления до 10^{-3} торр наблюдалась только первая группа частиц, с электронной температурой 6 ± 5 эВ. Все это свидетельствует о механизме образования проводящей среды, связанным с ионизацией остаточных газов.

Отдельно следует отметить результаты исследований газоразрядного коммутатора с электродной системой, выполненной из сплава титана [5]. Первоначально был проведен эксперимент по снятию кривой Пашена в среде азота для нашей конфигурации электродов. Эксперимент показал отклонение от теоретической кривой Пашена для плоскопараллельной электродной системы в диапазоне $p \cdot d$: 1–100 торр · см, эти данные необходимы для точного сопоставления рабочего напряжения с напряжением самопробоя разрядника. Далее производилось исследование времени задержки начала разряда от давления в приборе при различных уровнях напряжения $(0.4–0.9)U_0$, где U_0 – напряжение самопробоя промежутка. Интенсивность излучения управления разрядником составляла $6 \cdot 10^8$ Вт/см². Удалось установить, что при давлении $(0.2–0.7)$ бар прибор стабильно работает с максимальной задержкой 20 нс, причем практически отсутствует влияние уровня напряжения между электродами. При больших давлениях наблюдается стремительный рост времени задержки разряда. Для управляемого разрядника с рабочим напряжением на уровне 3 кВ требуется электропрочность как минимум в полтора раза больше, для стабильной работы и минимальной вероятности самопроизвольного срабатывания. Такое напряжение самопробоя достигается при давлении в приборе более 1 атм. В работе [5] показана зависимость времени задержки от давления при различных уровнях интенсивности $I_{\max} \sim$

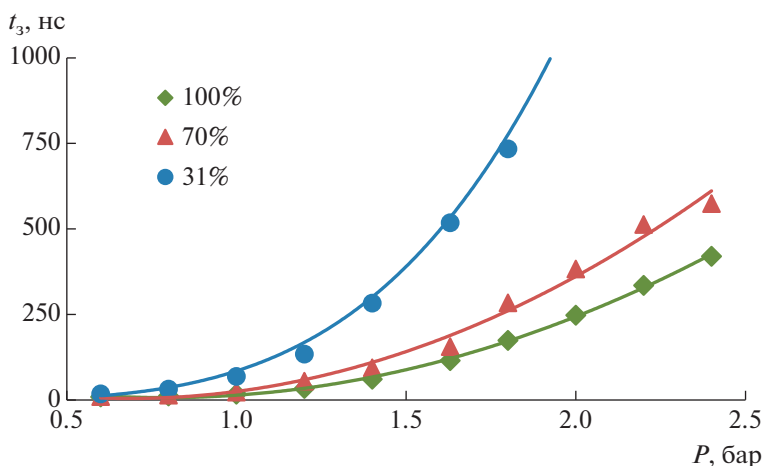


Рис. 3. Зависимость времени задержки t_3 от давления P при интенсивностях лазерного излучения $I_{\max}$, $0.7I_{\max}$, $0.3I_{\max}$ [5].

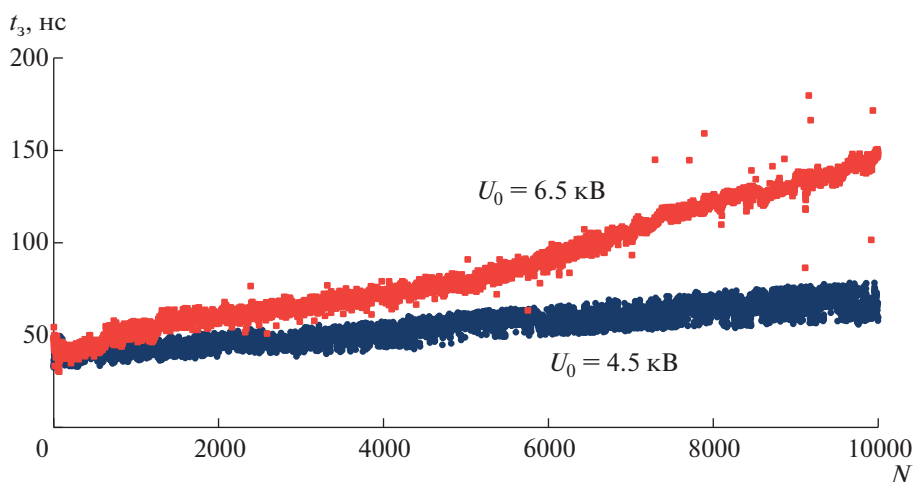


Рис. 4. Зависимость времени задержки t_3 от количества срабатываний N для разрядников с напряжением самопробоя U_0 6.5 и 4.5 кВ [5].

$\sim 6 \cdot 10^8$ Вт/см². Напряжение в межэлектродном промежутке фиксировалось и составляло 3 кВ. Результаты представлены на рис. 3.

Можно наблюдать значительное снижение времени задержки с увеличением интенсивности, а также удалось добиться стабильной работы прибора при давлении 1.4 бар ($U_0 \sim 7$ кВ). Также в статье продемонстрирована возможность управления разрядником при волоконно-оптической транспортировке излучения, при этом удалось добиться интенсивности на поверхности катода — мишени $5 \cdot 10^8$ Вт/см². Были изготовлены образцы с электропрочностью (напряжением самопробоя) на уровне 4.5 и 6.5 кВ. Которые испытывались на ресурс работы при коммутации импульсов амплитудой 250 А и длительностью 3.5 мкс. Разрядники продемонстрировали возможность приме-

нения волоконной транспортировки в качестве линии передачи управляющего излучения, а также высокие ресурсные показатели для такого компактного устройства рис. 4. В частности, для прибора с $U_0 = 4.5$ кВ максимальный разброс задержки за 10000 срабатываний составил 25 нс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена установка для диагностики вакуумных и газонаполненных коммутаторов с оптическим управлением, как удобный и информативный инструмент для исследований. Приведены предельные параметры, которые создаются в рабочем объеме камеры для исследований разряда, как в вакууме, так и в газовой среде. Получены зависимости временных характери-

стик разряда от давления остаточной среды и интенсивности иницирующей разряд в приборе. Сделаны выводы о наиболее вероятных механизмах формирования проводящей среды в зависимости от условий эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. RF Patent No. 200561, No. 2019140196, Byull. Izobret. No. 31. 2020 (in Russian).
2. RF Patent No. 196890, No. 2019140194, Byull. Izobret. No. 8. 2020 (in Russian).
3. Katorov A.S., Revazov V.O., Seleznev V.P., Yakubov R.H. // Tekhnol. Elektromagn. Sovmestim. 2018. V. 67 (4). P. 3–10 (in Russian).
4. Davydov S.G., Dolgov A.N., Katorov A.S., Revazov V.O., Yakubov R.H. // Zh. Tekh. Fiz. 2020. V. 90 (6). P. 919–924 (in Russian).
5. Katorov A.S., Revazov V.O., Seleznev V.P., Yarovskiy A.I. // Tekhnol. Elektromagn. Sovmestim. 2018. V. 67 (4). P. 35–42 (in Russian).

Installation for Diagnostics of Physical Processes in a Laser-Triggered Switch

S. G. Davydov¹, *, V. O. Revazov¹, V. P. Seleznev¹, M. S. Skorobogatykh¹, and R. Kh. Yakubov¹

¹*Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, 127055 Russia*

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

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

Abstract—The paper presents the results of the creation of a new tool that allows one to study the physical processes occurring during the operation of a pulsed switch with optical control. Practical data have been obtained on the limiting measured parameters of the installation and the results of corpuscular studies in the residual medium of a rarefied gas.

Keywords: laser-triggered switch, laser-plasma