

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ВКЛЮЧЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО УСКОРИТЕЛЯ С ОПТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

© 2021 г. А. И. Липчак^{а,*}, С. В. Барахвостов^а

^а Институт электрофизики УрО РАН
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

*e-mail: lipchak@iep.uran.ru

Поступила в редакцию 06.11.2020 г.

После доработки 06.12.2020 г.

Принята к публикации 08.12.2020 г.

Описана конструкция разрядника импульсного сильноточного ускорителя электронов, управляемого лазерным излучением. Приведены результаты испытаний разрядника при работе в качестве первичного коммутатора в сильноточном ускорителе типа “Радан”. Разработанный разрядник обеспечивает джиттер включения ускорителя не хуже 0.3 нс.

10.31857/S0032816221030216

ВВЕДЕНИЕ

Электрический пробой газа, инициированный лазерным излучением [1], используется в разрядниках высокого давления с оптическим управлением [2, 3]. Газовый разрядник является одним из основных элементов, определяющих стабильность работы высоковольтных импульсных генераторов [4], поэтому использование коммутаторов с высокой временной стабильностью важно для такого рода аппаратуры.

Возможность синхронизации сильноточных импульсных ускорителей электронов с помощью лазерного излучения с точностью не хуже ± 2 нс была показана в [5]. Между тем, использование трехэлектродного управляемого разрядника обеспечивает точность включения не хуже 0.3 нс, однако при этом запускающий импульс должен иметь амплитуду 15–50 кВ [6]. Возможность управления генератором с точностью не хуже чем 25 пс путем синхронизации двух импульсных генераторов с помощью такого же третьего была показана в работе [7]. Однако данный подход сложно использовать, если необходимо синхронизировать разнородные приборы: генератор (ускоритель) и импульсный лазер, например, для исследования взаимодействия субнаносекундных электронных пучков с конденсированным веществом [8].

Несомненным преимуществом оптического запуска является гальваническая развязка цепей управления от коммутируемых цепей, что важно, в частности, когда оба электрода коммутатора не заземлены. В работе [6] отмечается, что лазерные системы, применяемые для запуска разрядников, сложны и дороги. Однако значительный техноло-

гический прогресс в области производства лазеров, в том числе их удешевление, делает актуальны-

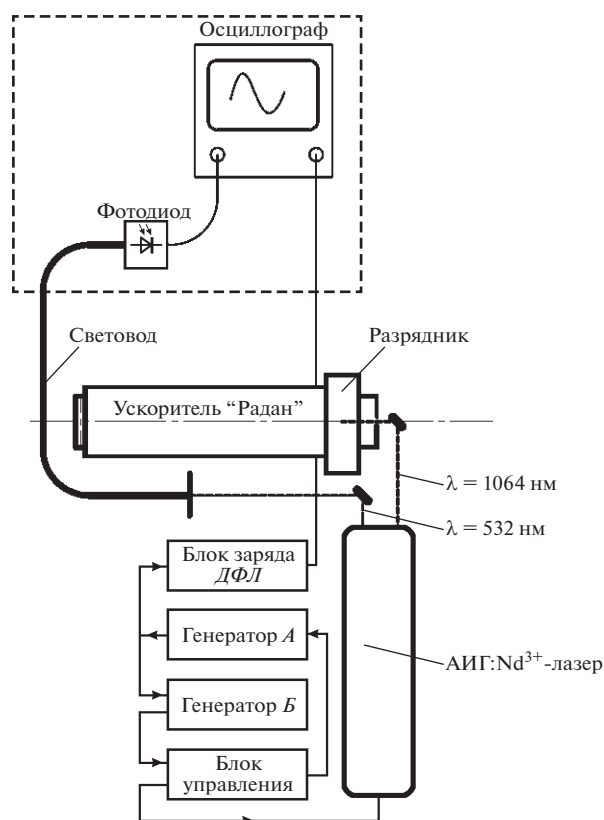


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки. ДФЛ – двойная формирующая линия.

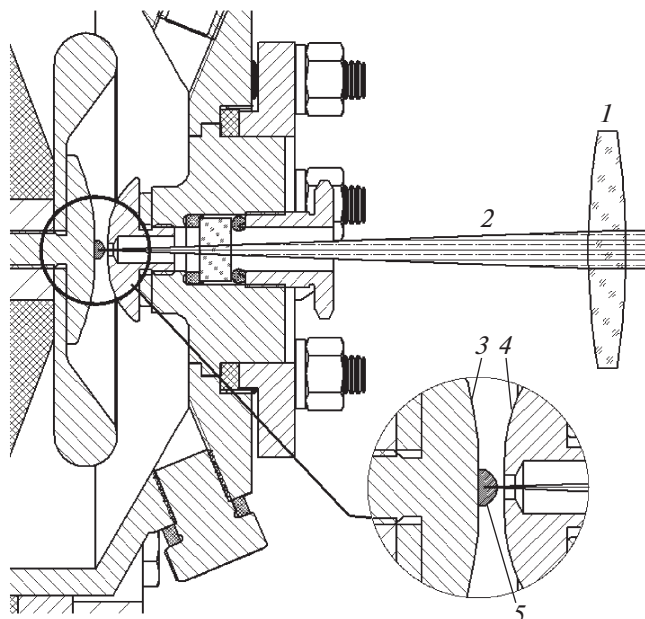


Рис. 2. Эскиз экспериментальной установки. 1 – линза с фокусным расстоянием $f = 100$ мм; 2 – излучение лазера; 3 – анод; 4 – катод; 5 – плазма.

ми исследования, направленные на совершенствование высоковольтных высоковольтных разрядников с оптическим управлением [9, 10].

В данной работе приводятся результаты испытаний, полученные при запуске высоковольтного коммутатора излучением импульсно-периодического АИГ:Nd³⁺-лазера. Для обеспечения запуска высоковольтного коммутатора лазерным излучением нами был доработан стандартный разрядник ускорителя “Радан” [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ, ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Блок-схема экспериментальной установки для исследования работы ускорителя “Радан” с лазерным запуском представлена на рис. 1, эскиз разрядника ускорителя с лазерным запуском – на рис. 2.

Излучение 2 первой гармоники АИГ:Nd³⁺-лазера LS-2134 (СП “ЛОТИС ТИИ”, Республика Беларусь, <https://www.lotis-tii.com>) с длиной волны $\lambda = 1064$ нм и энергией 200 ± 0.5 мДж направлялось вдоль оси установки и через отверстие диаметром 2 мм в катоду 4 фокусировалось на аноде 3 (см. рис. 2). Диаметр фокусировки составлял порядка 0.2 мм. Данная конфигурация является оптимальной с точки зрения снижения джиттера включения такого разрядника [12]. Одновременно с запускающим импульсом формировался импульс второй гармоники $\lambda = 532$ нм, передний фронт которого по уровню 0.05 от мак-

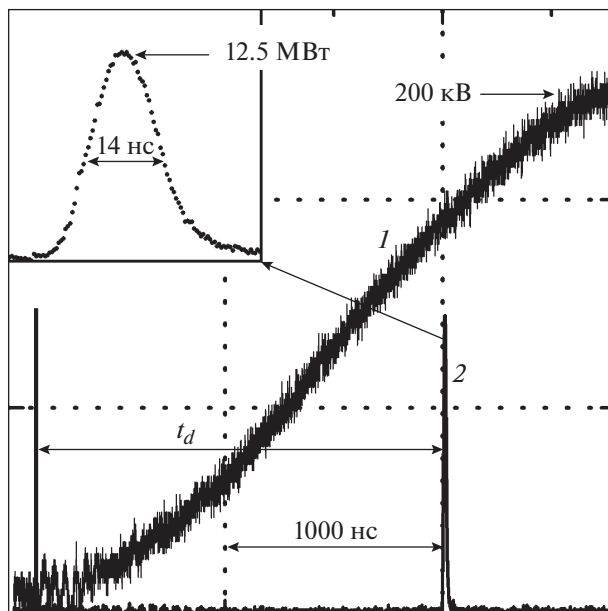


Рис. 3. Осциллограмма работы разрядника в режиме самопробы. 1 – напряжение заряда ДФЛ; 2 – лазерный импульс (не подается в разрядник); t_d – время задержки. На вставке – типичная осциллограмма лазерного импульса.

симума использовался в качестве точки отсчета. Типичная осциллограмма лазерного импульса приведена на вставке к рис. 3.

Регистрация излучения осуществлялась с помощью фотодиода UPD-50-UP-FR (время нарастания фронта 50 пс) и осциллографа Tektronix

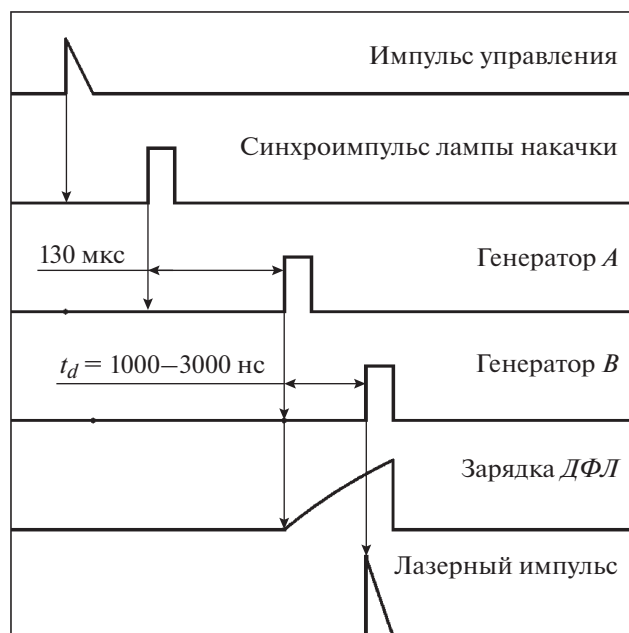


Рис. 4. Эпюра синхронизации.

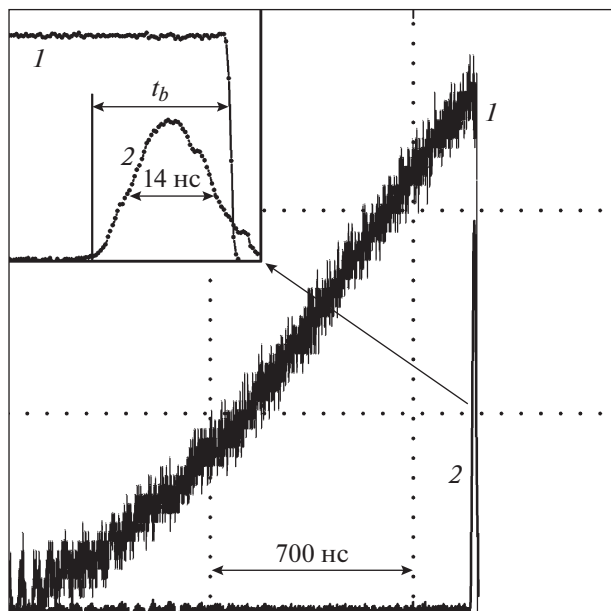


Рис. 5. Осциллограмма работы разрядника в режиме управления лазерным излучением. 1 – напряжение заряда ДФЛ; 2 – лазерный импульс. На вставке t_b – время задержки включения разрядника.

TDS 3054C (время нарастания/спада 0.7 нс [13]). Разрядник был настроен так, что, если лазерное излучение не поступало в разрядник, происходил его самопробой, наблюдаемый через 3 ± 0.25 мкс после начала заряда двойной формирующей линии (ДФЛ) ускорителя при напряжении $U_s = 210$ кВ (при давлении в разряднике 4 МПа и межэлектродном расстоянии 3 мм). Тем самым обеспечивалась защита изоляции ускорителя. На рис. 3 показана осциллограмма для случая самопробоя, когда лазерное излучение регистрируется, но не поступает в разрядник. При проведении измерений между импульсами выдерживался интервал порядка 2 мин, с тем чтобы электрическая прочность газового промежутка успела восстановиться.

Для определения момента срабатывания разрядника регистрировалось зарядное напряжение ДФЛ. Для этого использовался низкоиндуктивный емкостный делитель [14]. Длины оптических путей, сигнальных кабелей были подобраны так, чтобы разность задержек между запускающим лазерным импульсом и сигналом емкостного делителя, с одной стороны, и опорным импульсом второй гармоники лазера – с другой была минимальной. Расчетная нескомпенсированная разность задержек составляла 0.6 нс и учитывалась программно при обработке результатов измерений.

В качестве параметра измерений было взято время с начала заряда ДФЛ до момента подачи управляющего лазерного импульса t_d . Время задавалось с помощью генераторов задержек. На рис.

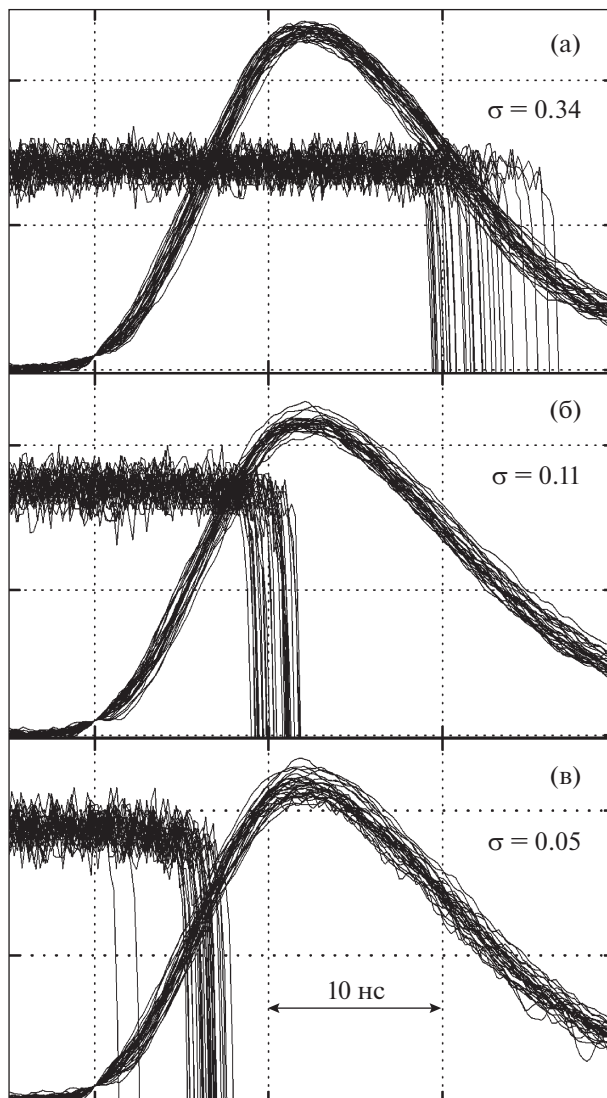


Рис. 6. Осциллограмма серии из 30-ти импульсов в режиме управления лазерным излучением для нормированного напряжения $\sigma = 0.34$ (а), 0.11 (б), 0.05 (в).

4 представлены эпюры напряжений, иллюстрирующие работу схемы синхронизации комплекса аппаратуры. Импульс управления лазера запускал лампу накачки. После этого блоком управления лазера формировался синхроимпульс, который использовался для формирования задержек.

Генератор А формировал задержку 130 мкс, необходимую для работы лампы накачки, и запускал схему заряда ДФЛ. Генератор Б формировал с задержкой t_d импульс на оптический затвор лазера для генерации импульса в режиме модуляции добротности. Изменением t_d варьировался момент прихода лазерного импульса, тем самым изменялось напряжение заряда ДФЛ в момент срабатывания разрядника (рис. 5). На рис. 6 показано, как меняется задержка срабатывания разрядника t_b

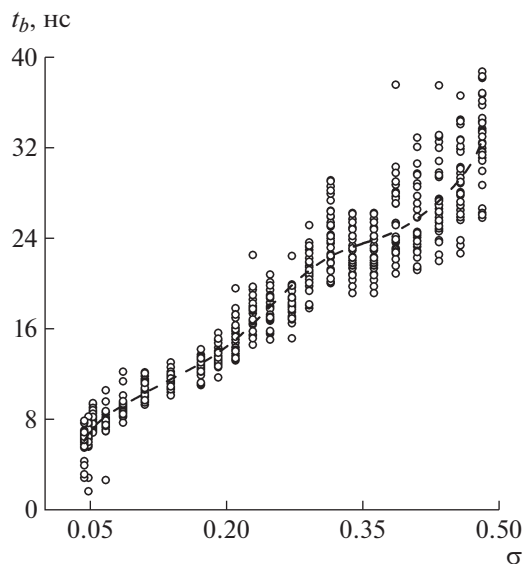


Рис. 7. Задержка включения разрядника в зависимости от нормированного напряжения σ .

(см. вставку к рис. 5) в зависимости от нормированного напряжения $\sigma = (U_s - U_b)/U_s$, где U_b — напряжение заряда ДФЛ при срабатывании разрядника; U_s — напряжение самопробоя.

На рис. 7 приведены результаты измерения t_b в зависимости от нормированного напряжения σ . Был рассчитан джиттер Δt включения разрядника как доверительная граница случайной погрешности измеренного значения t_b [15]. На рис. 8 показаны результаты расчетов джиттера для доверительной вероятности $\alpha = 0.95$ по 30-ти импульсам. Джиттер уменьшается со снижением σ , достигая минимального значения 0.3 нс в интервале $\sigma = 0.1-0.2$.

Согласно рис. 6б, величина джиттера сравнима с нестабильностью импульса лазерного излучения. Нестабильность управляющего лазерного импульса является определяющей, но не единственной причиной нестабильности срабатывания. Свой вклад в джиттер могут давать различные нестабильности лазерной плазмы [16, 17], а на фронте лазерной плазмы возможно возникновение осцилляций [18].

Дальнейшее уменьшение σ (см. рис. 8) приводит к появлению дополнительного фактора, влияющего на Δt , — более высокой вероятности самопробоя. В частности, это иллюстрирует рис. 6в, на котором видно, как разрядник два раза срабатывает в самом начале управляющего импульса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученная нестабильность разрядника ускорителя “Радан” с оптическим

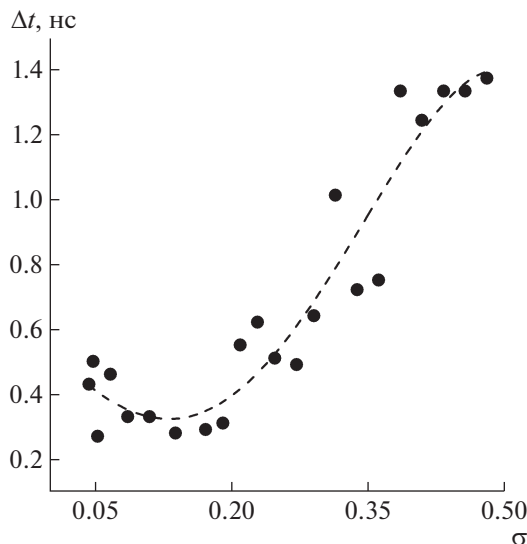


Рис. 8. Джиттер включения разрядника.

управлением по своей величине соответствует джиттеру трехэлектродного управляемого разрядника. Найден режим работы и интервал нормированного напряжения заряда ДФЛ, при которых нестабильность определяется преимущественно запускающим импульсом лазерного излучения. Это позволяет надеяться, что при использовании более стабильного источника лазерного излучения будет получен еще более низкий джиттер.

Описанный выше экспериментальный комплекс позволит провести исследования характеристик управления сильноточным ускорителем при изменении давления и межэлектродного расстояния в разряднике с целью получения информации о предельном джиттере срабатывания.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность д.ф.-м.н. Н.Б. Волкову за инициирование данного исследования и полезное обсуждение результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meyerand R.G., Haught A.F. // Phys. Rev. Lett. 1963. V. 11. P. 401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.11.401>
2. Pendleton W.K., Guenther A.H. // Review of Scientific Instruments. 1965. V. 36. P. 1546. <https://doi.org/10.1063/1.1719388>
3. Alcock A.J., Richardson M.C., Leopold K. // Review of Scientific Instruments. 1970. V. 41. P. 1028. <https://doi.org/10.1063/1.1684689>
4. Хайлов И.П. // ПТЭ. 2015. № 4. С. 53. <https://doi.org/10.7868/S0032816215040060>
5. Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шнак В.Г., Юрике Я.Я., Яландин М.И. // ПТЭ. 1998. № 2. С. 146.

6. *Shpak V.G., Shunailov S.A., Yalandin M.I.* // Digest of Technical Papers. Tenth IEEE International Pulsed Power Conference. 1995. P. 544.
<https://doi.org/10.1109/ppc.1995.596684>
7. *Yalandin M., Sharypov K.A., Shpak V.G., Shunailov S.A., Mesyats G.A.* // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2010. V. 17. № 1. P. 34.
<https://doi.org/10.1109/tdei.2010.5411999>
8. *Barakhvostov S.V., Volkov N.B., Lipchak A.I., Tarakanov V.P., Tkachenko S.I., Turmyshev I.S., Yalovets A.P.* // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018. V. 1115. 022007.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1115/2/022007>
9. *Liao M., Duan X., Chen Zh., Zou J., Dong E., Wang Y., Huang Zh., Zhang H.* // Patent US № 10 594 113 B2. 17.03.2020.
10. *Parkevich E.V., Medvedev M.A., Selyukov A.S., Khirianova A.I., Mingaleev A.R., Oginov A.V.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. V. 29. № 5. P. 05LT03.
<https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab8173>
11. *Mesyats G.A., Korovin S.D., Rostov V.V., Shpak V.G., Yalandin M.I.* // Proc. of the IEEE. 2004. V. 92. № 7. P. 1166.
<https://doi.org/10.1109/jproc.2004.829005>
12. *Guenther A.H., Bettis J.R.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1978. V. 11. P. 1577.
13. TDS3000C Series Digital Phosphor Oscilloscopes. User Manual. Appendix A: Specifications. P. 123.
<https://download.tek.com/manual/071230803web.pdf>
14. *Месяц Г.А., Насибов А.С., Кремнев В.В.* Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения. М.: Энергия, 1970.
15. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Утвержден и введен в действие приказом Росстандарта от 13.12.2011 № 1045-ст. М.: Стандартинформ, 2013.
16. *Gizzi L.A., Batani D., Biancalana V., Borghesi M., Chessa P., Deha I., Giulietti A., Giulietti D., Schifano E., Willi O.* // Laser Interaction and Related Plasma Phenomena. 1992. V. 10. P. 171.
https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3324-5_17
17. *Месяц Г.А., Осипов В.В., Волков Н.Б., Платонов В.В., Иванов М.Г.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 18. С. 54.
18. *Липчак А.И., Соломонов В.И., Осипов В.В., Тельнов В.А.* // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. № 4. С. 367.