

04;10;12

## **Управляемая коммутация высоковольтного газового разрядника с пикосекундной точностью**

© Г.А. Месяц, К.А. Шарыпов, В.Г. Шпак,  
С.А. Шунайлов, М.И. Яландин

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва  
E-mail: mesyats@pran.ru  
Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург  
E-mail: yalandin@ier.uran.ru

Поступило в Редакцию 4 февраля 2008 г.

Экспериментально показано, что азотный разрядник наносекундного высоковольтного генератора может включаться электронным пучком с разбросом по времени, не превышающим  $\sim 25$  ps относительно фронта ускоряющего импульса пучка. Режим прецизионного управления получен для случая однородного распределения потенциала в промежутке при микросекундном нарастании напряжения до значения, составляющего  $\sim 90\%$  от порога самопробоя. Время существования индуцированной проводимости в зазоре разрядника соответствует длительности тока управляющего пучка.

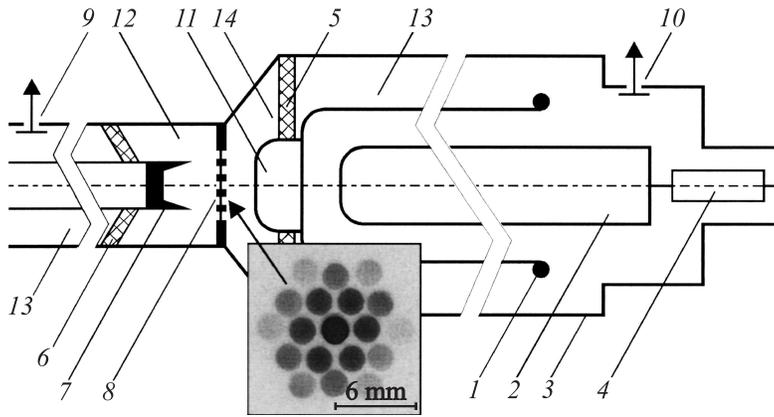
PACS: 52.80.-s, 84.30.Ng

Мощные высоковольтные наносекундные источники на основе формирующих линий и управляемых газовых разрядников, запускаемых с точностью лучше 1 ns, представляют большой интерес в физических экспериментах (см., например, [1]). Несколько подобных источников могут быть основой многоканального генератора сверхширокополосных электромагнитных импульсов, альтернативного системам с „расщеплением“ импульса питания одного модулятора [2,3]. Кроме того, в случае прецизионной синхронизации высоковольтных ускоряющих импульсов реально когерентное суммирование мощности нескольких СВЧ-генераторов с высокоточными релятивистскими электронными пучками. Эта перспектива показана в экспериментах [4], где для нестационарных релятивистских ламп обратной волны, работающих на частотах 3.7 GHz и 10 GHz при гигаваттных пиковых мощностях, был продемонстрирован

эффект стабилизации фазы генерируемых микроволн по отношению к субнаносекундному фронту импульса ускоряющего напряжения. В последнем случае (10 GHz) разброс фазы от импульса к импульсу был значительно меньше периода высокочастотных осцилляций (100 ps) и составлял  $\pm(10 \div 20)$  ps.

В работе [5] мы показали, что в трехэлектродном 200 kV разряднике с искажением поля достижима точность включения  $\sim 300$  ps, соизмеримая с длительностью управляющего высоковольтного импульса. Понятно, что данная концепция вряд ли может обеспечить увеличение точности включения разрядника более чем на порядок, так как формирование управляющих импульсов с амплитудой от десятков до сотни киловольт и с длительностью  $\sim 10^{-11}$  s на данный момент проблематично. Целью настоящей работы являлось исследование альтернативного варианта прецизионного управления коммутацией разрядника — с помощью сильнооточного электронного пучка. Принцип работы такого устройства известен достаточно давно (см., например, [6] и цитированные там источники). Он базируется на концепции получения несамостоятельного объемного разряда при внешней ионизации газа быстрыми электронами, и поддерживаемого электронным пучком. В технической реализации управляемый коммутатор подобного типа получил название „инжекционный тиратрон“.

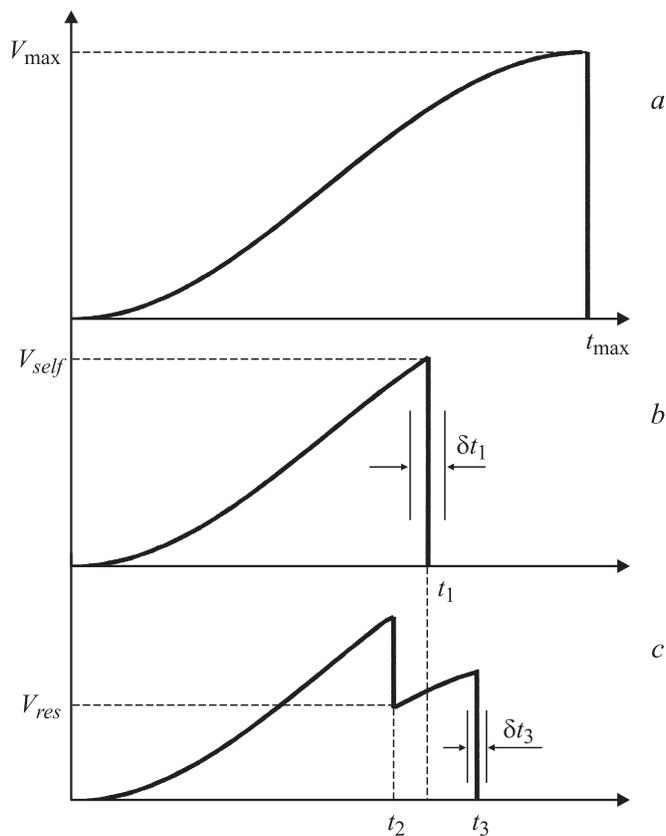
Схема эксперимента по исследованию режима прецизионной коммутации разрядника показана на рис. 1. Основа установки — импульсный генератор РАДАН-303 [7] с 45-омной коаксиальной двойной формирующей линией (ДФЛ), заряжаемой трансформатором Тесла за  $t_{\max} = 8 \mu\text{s}$  (рис. 2, а). Генератор формирует импульс с максимальной амплитудой  $V_{\max} = -220$  kV и длительностью  $t_{pfl} \sim 5$  ns. Отличительная особенность ДФЛ-генератора с инвертированной зарядкой емкостного накопителя энергии состоит в том, что один из электродов разрядника заземлен, а потенциальный электрод — положительный. Поэтому для управления разрядником легко использовать как короткий отрицательный импульс напряжения [5], так и электронный пучок. Электроны инжектировались в зазор разрядника через специальное фольговое окно (Al–Be,  $40 \mu\text{m}$ ), встроенное в заземленный электрод, и имевшее две взаимно ориентированные мозаичные решетки: поддерживающую с вакуумной стороны и защитную — с газовой. При диаметре ячеек поддерживающей решетки  $\sim 1$  mm фольга выдерживала давление до 50 atm. Нарушение герметичности фольги



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки на основе двойной формирующей линии. 1, 2, 3 — электроды ДФЛ (потенциальный, центральный и заземленный соответственно); 4 — нагрузочный резистор; 5, 6 — изоляторы; 7 — графитовый катод; 8 — фольговое окно; 9, 10 — делители напряжения; 11 — анод разрядника; 12 — вакуумный диод ускорителя; 13 — масляная изоляция; 14 — азот, 40 atm.

отмечалось вблизи оси системы, когда плотность тока пучка была выше некоторой критической. Искровые пробои при неуправляемом срабатывании разрядника происходили между защитной решеткой и потенциальным электродом ДФЛ и не разрушали фольгу. Пучок генерировался сильноточным ускорителем [1] со взрывоэмиссионным графитовым катодом. Длительность ускоряющего импульса регулировалась в пределах (0.2–5) ns, фронт составлял  $\sim 200$  ps. Максимальная амплитуда подводимого к катоду импульса ( $V_{ac} = -240$  kV) могла обеспечиваться при его длительности в диапазоне 0.3–1 ns. При этом пучок, вводимый в разрядник, имел амплитуду тока  $\sim 130$  A. Отпечаток пучка на дозиметрической пленке, установленной с газовой стороны окна, при длительности тока  $\sim 1$  ns показан на рис. 1.

В экспериментах определялся момент пробоя разрядника по отношению к фронту ускоряющего импульса пучка. Нестабильность включения фиксировалась по разбросу фронта импульса, формируемого



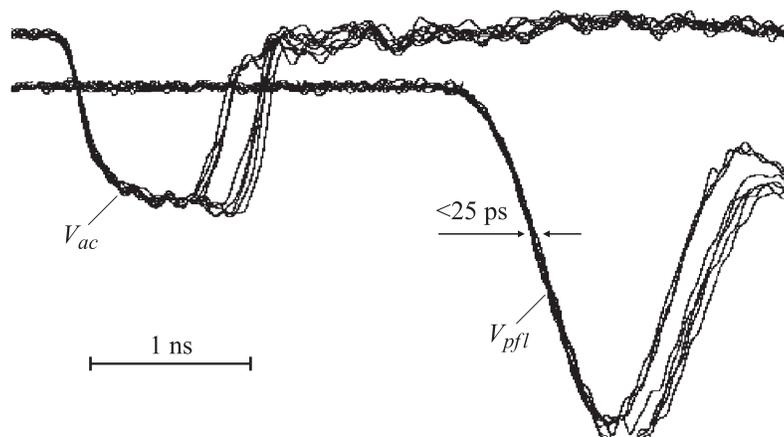
**Рис. 2.** Схематические зарядные кривые двойной формирующей линии в различных режимах коммутации разрядника: *a* — неуправляемый пробой разрядника при максимальном зарядном напряжении в момент  $t = t_{max}$ ; *b* — неуправляемый пробой при  $t_1 < t_{max}$ ; *c* — включение разрядника электронным пучком при  $t = t_2$  и повторный пробой при  $t = t_3$  после подзарядки накопителя ДФЛ.

на выходе ДФЛ-генератора ( $V_{pfl}$ ). Для регистрации использовались два емкостных делителя напряжения, схематически показанные на рис. 1, и цифровой осциллограф реального времени Tektronix TDS6154C (15 GHz, интервал дискретизации 25 ps).

При межэлектродном зазоре разрядника 3 mm и давлении азота 40 атмосфер наблюдалось несколько режимов коммутации разрядника. Когда пучок не инжектировался, имел место неуправляемый пробой, который происходил при времени зарядки ДФЛ  $t_1 \sim 5.5 \mu s < t_{\max}$  (рис. 2, *b*). Напряжение включения разрядника при этом составляло  $V_{self} \sim 140-150 \text{ kV}$ , поле в зазоре  $\sim 450 \text{ kV/cm}$ , а типичный полный разброс момента неуправляемой коммутации достигал  $\delta t_1 \sim \pm 200 \text{ ns}$ . В случае инжекции пучка в газ, на выходе ДФЛ генерировались два последовательных импульса — в моменты  $t_2$  и  $t_3$  (рис. 2, *c*). Следует заметить, что момент инжекции пучка ( $t_2$ ) был задан таким образом, чтобы выполнялось  $(t_2 - t_1) \sim 0.5 \mu s < \delta t_1$ . Моменту  $t_2$  соответствовала коммутация разрядника, поддерживаемая электронным пучком. Когда длительность пучка была меньше  $t_{pfl}$ , вывод энергии ДФЛ в нагрузку в момент  $t_2$  был неполным. Наличие на ДФЛ остаточного напряжения  $V_{res}$  означает отсутствие контракции разряда непосредственно после инжекции пучка. При  $t > t_2$  трансформатор Тесла продолжал зарядку емкостного накопителя, и в момент  $t_3$  происходило повторное включение разрядника (рис. 2, *c*), которое, однако, считать полностью неуправляемым некорректно. Во-первых, даже при задержке повторного пробоя  $(t_3 - t_2) \sim 1 \mu s$  стабильность включения ( $\delta t_3 \sim \pm 100 \text{ ns}$ ) была значительно лучше, чем  $\delta t_1$ . Более того, по мере снижения длительности ускоряющего импульса ( $1 \rightarrow 0.3$ ) ns при неизменной его амплитуде задержка  $(t_3 - t_2)$  уменьшалась до  $\sim 60 \text{ ns}$ , а разброс — до  $\pm 20 \text{ ns}$ .

В дальнейшем, по мере снижения амплитуды  $V_{ac}$  (и, соответственно, энергии пучка к границе прозрачности фольгового окна), по существу реализовалась управляемая коммутация, инициируемая пучком [6]. В частности, при  $V_{ac} \sim -120 \text{ kV}$  и минимальной длительности токового импульса пучка ( $\sim 200 \text{ ps}$ ) задержка  $(t_3 - t_2)$  составила 40 ns, а разброс  $\delta t_3$  не превышал  $\pm 5 \text{ ns}$ . В этом режиме сигнал на выходе ДФЛ в момент  $t_2$  практически отсутствовал. Заметим, что с учетом глубины каналов в защитной решетке фольгового окна (2 mm) длина пробега электронов была в данном случае меньше суммарной длины газового слоя (2 + 3 mm). То есть, пикосекундный пучок обеспечивал многоэлектронное инициирование разряда в прикатодной области. Для представленных режимов не стоит также исключать влияние предионизации газа тормозным излучением электронов на решетке и фольговом окне.

Для получения пикосекундной точности включения интерес представляет режим разряда, поддерживаемый электронным пучком. Если



**Рис. 3.** Осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения ( $V_{ac}$ ) с амплитудой — 240 кВ (делитель „9“, рис. 1) и выходного импульса двойной формирующей линии ( $V_{pfl}$ ) с амплитудой — 65 кВ (делитель „10“, рис. 1) при запуске разрядника электронным пучком с током  $\sim 130$  А. Синхронизация развертки осциллографа — по фронту импульса  $V_{ac}$ . Регистратор — Tektronix TDS6154C (15 GHz; 40 Gs/s). Абсолютной привязки осциллограмм по времени нет.

использовать пучок с длительностью большей, чем  $t_{pfl}$ , то вывод энергии из ДФЛ в нагрузку будет максимален в той мере, какая реализуется при конечном сопротивлении проводящего канала несамостоятельного разряда в газе. Повторная коммутация при  $t = t_3$  в данном случае маловероятна. Если же обеспечить инжекцию такого пучка вблизи максимума зарядки ДФЛ ( $t_2 \rightarrow t_{max}$ ), то после управляемой пучком коммутации  $V_{res} \rightarrow 0$  и повторной пробой будет исключен. Как отмечалось выше, в наших экспериментах обеспечить амплитуду ускоряющего импульса на максимальном уровне ( $-240$  кВ) было возможно для относительно коротких длительностей пучка:  $\leq 1$  нс. Режим управляемой коммутации таким пучком представлен на рис. 3. Полный разброс фронта импульса на выходе ДФЛ не превышает 25 пс, а, скорее всего, был еще меньше, так как это значение совпадает с дискретностью оцифровки сигналов. Сравнивая разбросы задних фронтов видно, что имелась четкая корреляция длительности пучка и выходного импульса.

Различие форм ускоряющего импульса и выходного объясняется тем, что последний регистрировался делителем напряжения в неоднородной области стыковки ДФЛ и нагрузочного резистора (рис. 1). Кроме того, этот делитель напряжения конструктивно выполнен для регистрации наносекундных сигналов и имел переходную характеристику не лучше 0.7 ps.

Амплитуда выходного импульса ДФЛ (рис. 3) была  $\sim -65$  kV. Поскольку импульс короткий, то для анализа параметров несамостоятельного разряда эта амплитуда сравнивалась с напряжением на эквивалентном по времени участке фронта выходного 5-ти наносекундного импульса ДФЛ в режиме самопробоя разрядника, в отсутствие пучка. При этом в экспериментах самопробой разрядника с необходимой точностью обеспечивался в тот же момент зарядки ДФЛ, что и инжекция пучка. Полученное соотношение амплитуд (65/95) и известные волновые сопротивления коаксиальных линий ДФЛ позволили оценить, что ток поддерживаемого пучком разряда достигал  $\sim 3$  kA. Это составляет  $\sim 70\%$  по отношению к току разрядника в режиме самопробоя, а коэффициент усиления тока пучка был не менее 20. Сопротивление разряда составляло  $\sim 10 \Omega$ .

В специальных экспериментах длительность токового импульса пучка была увеличена до  $\sim 5$  ns, что потребовало снизить ускоряющее напряжение до  $\sim -180$  kV. Несмотря на сопутствующее уменьшение тока пучка до 40 А, эффект управления также был получен, хотя сопротивление разряда возросло приблизительно в 4 раза. Вполне понятно, что наиболее очевидный путь снижения сопротивления разряда — это инжекция пучка увеличенного сечения с той же энергией частиц и плотностью тока, как в исследованном режиме при длительности пучка  $\sim 1$  ns. Продолжение работ по оптимизации режима управляемой коммутации разрядника предполагается. На данный же момент можно констатировать факт получения управляемого запуска высоковольтного разрядника с точностью не хуже 25 ps.

Авторы признательны Ю.Д. Королеву и В.В. Осипову за полезные консультации.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований РАН „Фундаментальные проблемы релятивистской импульсной и стационарной электроники большой мощности“ и при поддержке РФФИ, гранты: 07-08-12037; 08-02-00183.

## Список литературы

- [1] *Denisov G.G., Ginzburg N.S., Shpak V.G., Yalandin M.I.* // IEEE Trans. on Plasma Science. 2006. V. 34. N 5. P. 1777–1781.
- [2] *Shpak V.G., Shunailov S.A., Oulmascoulov M.R., Yalandin M.I.* Synchronously Operated Nano- and Subnanosecond Pulsed Power Modulators // In Digest of Tech. Papers of the 12th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Monterey, USA. 1999. V. 2. P. 1472–1475.
- [3] *Koshelev V.I., Gubanov V.P., Efremov A.M., et al.* High-Power Ultrawideband Radiation Source with Multielement Array Antenna // In: Proc. of 13th Int. Symp. on High Current Electronics, Tomsk. 2004. P. 258–261.
- [4] *Afanasyev K.V., Bykov N.M., Eltchaninov A.A., et al.* State of the Art in Pulse-Repetitive Generation of GW-level Superradiative Pulses // In: Proc. of the 16th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Albuquerque, USA. 2007. P. 1848–1851.
- [5] *Shpak V.G., Shunailov S.A., Yalandin M.I.* Investigations of compact high-current accelerators RADAN 303 synchronization with nanosecond accuracy // In Proc. of the 10th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Albuquerque, USA. 1995. P. 544–549.
- [6] *Королев Ю.Д., Месяц Г.А.* Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука. 1991. 224 с.
- [7] *Mesyats G.A., Korovin S.D., Rostov V.V., et al.* // Proc. of the IEEE. 2004. V. 92. N 7. P. 1166–1179.