

04;15

Высоковольтный импульсный источник для питания холодных плазменных струй

© С.И. Мошкун, В.Ю. Хомич, Е.А. Шершунова[¶]

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

[¶] E-mail: eshershunova@gmail.com

Поступило в Редакцию 17 сентября 2018 г.

Проведено исследование параметров ряда высоковольтных твердотельных коммутаторов. На основании анализа их работы собран импульсный источник высокого напряжения размером $105 \times 260 \times 180$ mm для питания холодных плазменных струй, работающий от сети переменного напряжения 220 V, 50 Hz.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.03.47270.17528

В последнее десятилетие быстрыми темпами развивается плазменная медицина. Многие научные группы уже показали эффективное использование неравновесной низкотемпературной плазмы за счет формирования OH- и NO-группы в плазме для коагуляции крови, дезинфекции и стерилизации поверхности, запуска иммунной реакции организма в борьбе с раковыми клетками [1,2].

Как правило, источник холодной плазмы представляет собой плазмотрон, или „плазменный карандаш“ [3]. Из сопла „карандаша“ на объект выдувается плазменная струя, которая очень удобна и безопасна для биомедицинских точечных воздействий благодаря небольшой площади обработки и температуре до 40°C [4]. Ввиду компактности чаще всего для генерации таких струй используют маломощные резонансные источники напряжения синусоидальной формы с частотой в десятки килогерц [5,6], которое формируется высоковольтным трансформатором. Однако такой подход не позволяет оперативно изменять мощность, вкладываемую в разряд, тогда как применение прямоугольных импульсов, эффективно формируемых составными твердотельными коммутаторами, напротив, этому способствует. Генераторы на их основе позволяют изменять как амплитуду, так и частоту выходного напряжения.

На рис. 1 представлена схема генерации высоковольтных импульсов и фотография собранного генератора. Принцип формирования импульсов основан на работе высоковольтных составных коммутаторов $S1$ и $S2$, набранных путем последовательного включения силовых транзисторов, по полумостовой схеме [7]. Необходимое количество транзисторов n для сборки определялось как отношение блокируемого напряжения составного ключа 6 kV к рабочему напряжению на отдельном транзисторе V_1 , рассчитанному как $V_{ces}/1.2$, где V_{ces} — напряжение пробоя транзистора.

Для питания высоковольтного коммутатора (HVS) был собран источник постоянного напряжения на 6 kV мощностью 100 W (6 kV DC), построенный на базе полумостового инвертора (HBI — half bridge inverter), управляемого посредством широтно-импульсной модуляции (PWM — pulse width modulation), и умножителя

напряжения (VM — voltage multiplier) [8]. Этот источник заряжает накопительный конденсатор C , емкость которого (1.3 nF) много больше емкости нагрузки. Напряжение на накопительном конденсаторе можно регулировать в пределах 0–6 kV посредством переменного резистора.

В качестве транзисторов для составного коммутатора были испытаны МОП-транзисторы (транзисторы на основе структуры металл–оксид–полупроводник) и биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ) производства фирм Infineon и STMicroelectronics в корпусах TO-220 и TO-247, обеспечивающие наносекундные времена переключения: 1) IPW60R045CP ($V_{ces} = 650$ V и ток I_{ce} до 60 A); 2) IRFB20B60PDI (600 V, 20 A); 3) SPP17N80C3 (800 V, 17 A); 4) STW9N150 (1500 V, 8 A); 5) IPP90R340C3 (900 V, 15 A); 6) IRGPS40B120UD (1200 V, 80 A).

Была проведена экспериментальная оценка быстродействия транзисторов в зависимости от сопротивления в затворе R при работе на емкостную нагрузку 115 pF. Быстродействие оценивалось по длительности тока через емкость по полувысоте (FWHM). Как видно из рис. 2, а, при сопротивлении в затворе \sim до 3Ω все транзисторы ведут себя приблизительно одинаково, однако с его увеличением транзисторы, рассчитанные на большее напряжение: STW9N150 (1500 V) и IRGPS40B120UD (1200 V), уступают другим по быстродействию.

Для выбранных транзисторов также была проведена оценка мощности потерь. Суммарная мощность потерь P_{loss_1} находилась как сумма статических потерь транзистора P_{st} , определяющихся его током проводимости I_{ce} и напряжением насыщения V_{ces} , и динамических потерь P_d , включающих потери в затворе транзистора P_g , потери при переключениях P_{sw} и потери, обусловленные разрядом выходной емкости транзистора P_{oss} .

Потери в затворе определялись зарядом емкости затвора как $P_g = Q_g V_g \cdot f/2$, где Q_g — заряд в затворе транзистора, V_g — напряжение на затворе, f — частота повторения импульсов. Потери при переключении рассчитывались по формуле $P_{sw} = (\tau_{on} + \tau_{off}) V_{ces} I_{ce} \cdot f/2$, где τ_{on} , τ_{off} — времена переходных процессов транзисторов при $R = 2\Omega$. Потери при разряде выходной

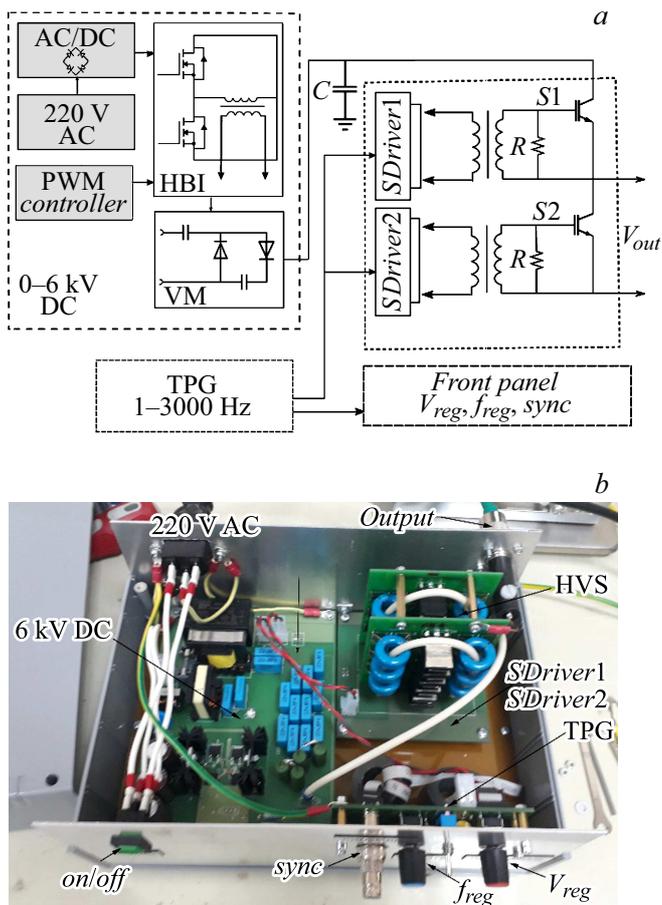


Рис. 1. a — функциональная схема генератора, b — фотография генератора импульсов (без верхней крышки).

емкости определялись как $P_{oss} = C_{oss}V_{ces} \cdot f/2$. Полезная мощность транзистора находилась из выражения $P_1 = V_1 I_{ce} D$, где D — коэффициент заполнения импульсов.

Мощности были рассчитаны при работе коммутатора на частоте 3 kHz при длительности открытого состояния 500 ns. Мощность потерь 6 kV-ключа P_{loss} и его полезная мощность P были найдены как $P_{loss_1} n$ и $P_1 n$ соответственно. Согласно расчетам (рис. 2, b), менее 10% теряется на коммутаторах из транзисторов моделей 1, 3, 5 и 6.

Ввиду высокой стойкости БТИЗ к короткому замыканию (в отличие от МОП-транзисторов) и их стабильной работы в полумостовой схеме выбор был сделан в пользу транзисторов модели 6 — IRGFS40B120UD, что также способствовало снижению габаритных размеров высоковольтного коммутатора благодаря высокому напряжению насыщения 1200 V.

Управление транзисторными сборками было выполнено на отдельной плате, соосной с платой HVS (на фотографии находится под HVS, рис. 1, b). Плата управления включала два драйвера (SDriver 1, SDriver 2) для управления ключами S1 и S2 и была с ними галь-

ванически развязана. За передней панелью генератора (front panel) была расположена плата генератора задающих импульсов (TPG). Она формирует прямоугольные импульсы требуемой длительности и частоты от 0 до 3000 Hz для формирования импульсов управления транзисторами в сборке, а также задержку между ними, определяющую длительность выходных высоковольтных импульсов. В основе работы TPG лежит использование RC-таймеров NE555 совместно с триггерами Шмитта.

На переднюю панель прибора (front panel) вынесен разъем синхронизации импульсов (sync), ручки для регулировки частоты (f_{reg}) и амплитуды напряжения (V_{reg}). Сеть (220 V AC), заземление и высоковольтный вывод (Output) находятся на задней панели.

При испытании генератора в качестве нагрузки был использован плазмотрон на базе барьерного разряда [9], выполненный в виде кварцевой трубки диаметром 5 mm с толщиной стенок 1 mm. Медная проволока диаметром 2 mm использовалась в качестве высоковольтного электрода, медная фольга снаружи трубки — в качестве заземленного. Эффективная емкость нагрузки составляла ~ 10 pF. Тестирование происходило без прокачки газоразрядного промежутка. Напряжение регистрировалось высоковольтным пробником Tektronix P6015A,

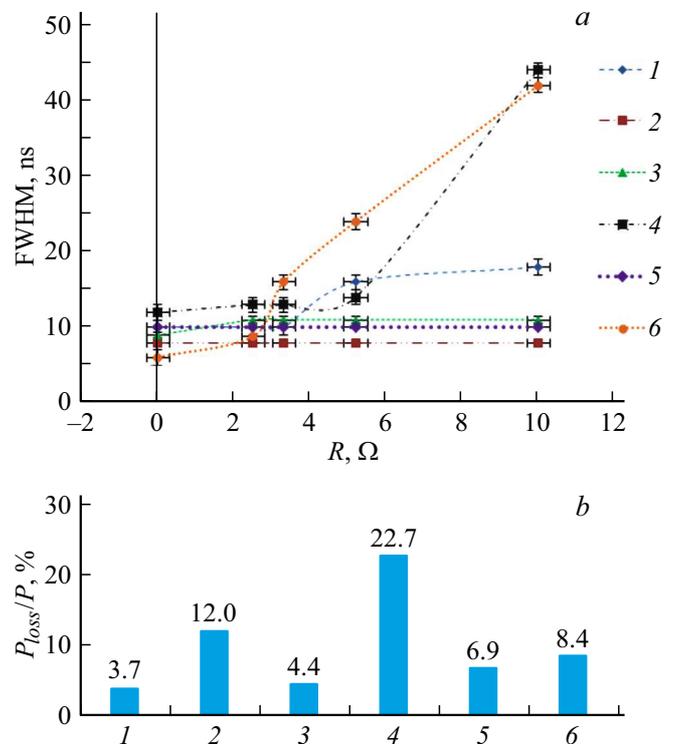


Рис. 2. Результаты исследования высоковольтных коммутаторов. a — зависимость быстродействия (FWHM) транзисторов от сопротивления в затворе R; b — потери мощности в составных 6 kV-коммутаторах, набранных из транзисторов моделей 1–6. 1 — IPW60R045CP, 2 — IRFB20B60PDI, 3 — SPP17N80C3, 4 — STW9N150, 5 — IPP90R340C3, 6 — IRGFS40B120UD.

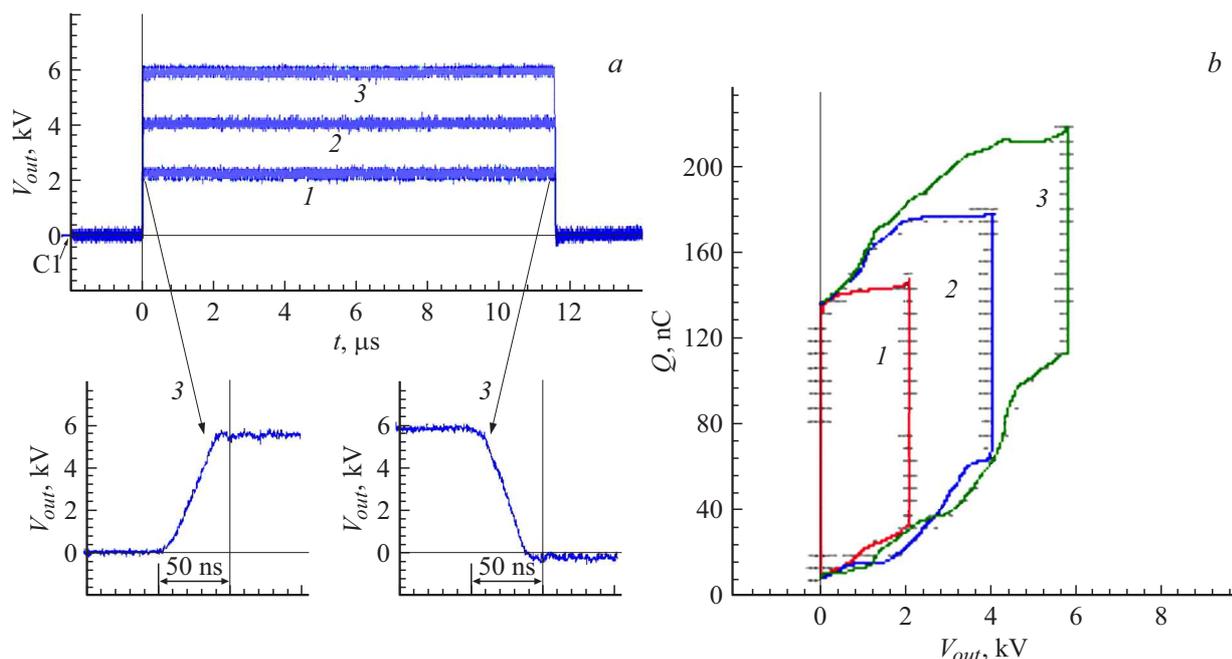


Рис. 3. Осциллограммы импульса напряжения V_{out} на электродах плазмотрона (а) и фигуры Лиссажу (b) для трех амплитуд напряжения. 1 — 2 kV, 2 — 4 kV, 3 — 6 kV.

а ток — резистивным датчиком с коэффициентом 40 A/V.

Как видно из рис. 3, а, несмотря на нелинейность емкостной нагрузки, импульсы стабильны вне зависимости от амплитуды напряжения V_{out} и имеют наносекундные времена нарастания t_r и спада t_f . При $V_{out} = 6$ kV $t_r = 17.2 \pm 0.7$ ns, $t_f = 24.3 \pm 0.6$ ns. По фигурам Лиссажу (рис. 3, b) для $V_{out} = 2, 4$ и 6 kV (отмечены цифрами 1–3) была посчитана энергия в импульсе. Установлено, что при $V_{out} = 6$ kV энергия в импульсе составляет около 0.7 мДж, а следовательно, средняя мощность при частоте 3 kHz достигает около 2 Вт.

Таким образом, разработан генератор, который в отличие от резонансного синусоидального источника напряжения может формировать прямоугольные импульсы регулируемой амплитуды и частоты с наносекундными временами нарастания и спада на нелинейную емкостную нагрузку с эквивалентной емкостью в единицы-десятки пикофард.

Прибор достаточно компактен, отличается эргономичной конструкцией, имеет размеры $105 \times 260 \times 180$ mm и питается от бытовой сети 220 V, 50 Hz.

Его испытания в качестве источника питания воздушных плазменных струй доказали надежность и стабильность прибора и указывают на перспективность его использования для различных прикладных задач.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 31 на 2018–2020 гг.

Список литературы

- [1] Weltmann K.D., von Woedtke T. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2016. V. 59. N 1. P. 014031.
- [2] Miller V., Lin A., Fridman A. // Plasma Chem. Plasma Process. 2016. V. 36. N 1. P. 259–268.
- [3] Laroussi M. // IEEE Transact. Plasma Sci. 2015. V. 43. N 3. P. 703–712.
- [4] Reuter S., von Woedtke T., Weltmann K.D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. N 23. P. 233001.
- [5] Lunov O., Zablotskii V., Churpita O., Chanová E., Syková E., Dejneka A., Kubinová Š. // Sci. Rep. 2014. V. 4. P. 7129.
- [6] Xu N., Cui X., Fang Z., Shi Y., Zhou R. // IEEE Transact. Plasma Sci. 2018. V. 46. N 4. Pt 2. P. 947–953.
- [7] Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 2. С. 71–75.
- [8] Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. В. 2. С. 104–110.
- [9] Lu X., Laroussi M., Puech V. // Plasma Sources Sci. Technol. 2012. V. 21. N 3. P. 034005.