

**Высоковольтная импульсная система для электроформования сложноструктурированных полимерных материалов***А. В. Кашин, И. Е. Ребров, В. Ю. Хомич*

*В работе исследован ряд высоковольтных коммутаторов на основе дискретных полупроводниковых приборов для электрофизических установок формования полимерных материалов. Представлены характеристики работы высоковольтных ключей в составе генераторов импульсов для формирования сигнала прямоугольной формы.*

*Ключевые слова:* твердотельный коммутатор, электроформование, генератор высоковольтных импульсов.

**Введение**

Для получения различных биоматериалов активно используется метод электроспиннинга, позволяющий формировать микро- и нановолокнистые высокопористые структуры с заданными физико-механическими характеристиками [1, 2].

В настоящее время особую актуальность приобретают исследования в области «природоподобных технологий», которые воспроизводят структурные мотивы природных материалов и позволяют создать полимерные и гибридные композиты с уникальным комплексом функциональных свойств. Одним из важнейших параметров таких структур является ориентация при осаждении волокон. Традиционно полимерные волокна в материалах, полученные в процессе электроспиннинга, укладываются хаотично [3, 4]. Существующие методы формирования ориентированных волокнистых покрытий имеют существенные технологические ограничения, связанные с перемещением приемного электрода и лимитированы его максимальным размером, скоростью отклика системы, сложностью модификации конструкции под конкретную задачу [5–7].

Для достижения управляемой ориентации было предложено вместо классической методики электроспиннинга использовать метод управления электрогидродинамической струей [8]. Данный

подход реализуется посредством изменения величины и пространственного распределения напряженности электрического поля, в котором движется струя. Для получения заданного потенциала на электродах коллекторной системы служит высоковольтный наносекундный генератор.

В данной работе рассмотрен один из важных аспектов решения задачи управляемой укладки электроформованных волокон, а именно, разработка высоковольтных коммутаторов с системой цифрового управления для формирования наносекундных импульсов.

**Экспериментальная установка**

Драйвер управления и высоковольтный коммутатор представлены на рис. 1. Высоковольтные твердотельные ключи имеют модульную структуру и состоят из цепи последовательно соединенных биполярных транзисторов с изолированным затвором (БТИЗ) [9]. Для устойчивой и безотказной работы высоковольтного коммутатора HV5 необходимо обеспечить высокую синхронность срабатывания всех составляющих его полупроводниковых элементов ( $Qs1...Qs16$ ) и низкое эквивалентное сопротивление цепей затвора ( $Rs1...Rs16$ ) [10]. Это достигается применением мультитрансформаторной схемы управления с высоким напряжением на входе драйвера (HV1) и принудительным закрытием коммутатора для предотвращения неконтролируемого открытия при высоких значениях  $dU_{HV2}/dt$  [11] на его входе. Данный подход облегчает проектирование высоковольтного ключа под требуемое напряжение, позволяет применять полумостовую схему [9] включения с высокой скоростью нарастания напряжения, а также обеспечивает возможность работы с источниками разной полярности и использование «плавающего» потенциала.

**Кашин Артем Вячеславович**, инженер-исследователь.

**Ребров Игорь Евгеньевич**, зав. лаб., к.т.н.

**Хомич Владислав Юрьевич**, директор ИЭЭ РАН, д.ф.-м.н.  
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.

Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18.  
Тел. +7(499) 135-11-95.

E-mail: rbrv.igor@gmail.com, artem-benz@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2018 г.

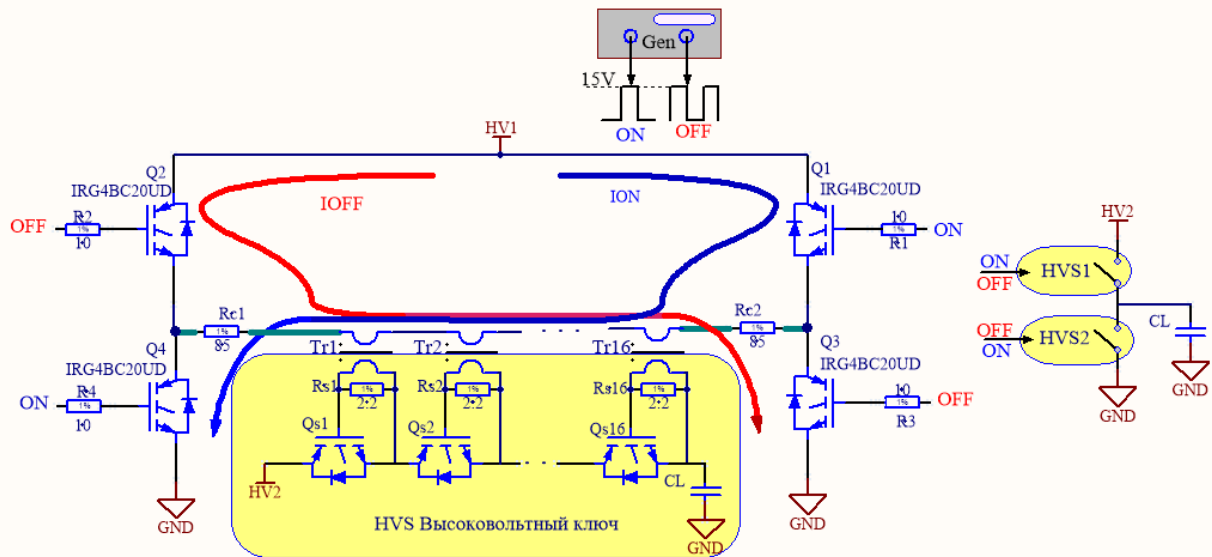


Рис. 1. Схема управления высоковольтным ключом и полумостовая схема включения двух коммутаторов HVS1 и HVS2.

Драйвер коммутатора состоит из четырёх быстродействующих транзисторов Q1-Q4, включённых по мостовой схеме и формирующих ток в первичной обмотке цепи управления; высоковольтного регулируемого источника питания HV1 (0–1200 В), задающего генератора импульсов Gen. При приходе низковольтного сигнала ON с задающего генератора открываются 1-й и 4-й транзисторы, в цепи через резисторы Rc1, Rc2 развивается ток  $I_{ON}$  и через одновитковый трансформатор Tr1-16 происходит открытие высоковольтного ключа. В случае резкой смены входного сигнала HV2, для предотвращения самопроизвольного открытия транзисторов коммутатора через ёмкость Миллера на драйвер посылается сигнал OFF и током  $I_{OFF}$  затвор транзисторов Qs1–Qs16 оказывается под отрицательным потенциалом относительно эмиттера, препятствуя протеканию тока коллектор-эмиттер.

Применение высокого напряжения (до 1200 В) на драйвере позволяет получить меньшее время переходного процесса  $\tau = \frac{L \times I_{ON}}{U_{HV1}}$  (где  $L$  – индуктивность цепи управления,  $U_{HV1}$  – напряжение высоковольтного источника HV1) и развитие максимального тока  $I_{ON}$  в цепи управления достигается за  $18 \pm 2$  нс по уровню 10–90 %. Это повышает синхронность открытия высоковольтной сборки БТИЗ и равномерность распределения напряжения при динамических процессах открытия и закрытия.

Высоковольтные ключи HVS1 и HVS2 с рассмотренной схемой управления, включенные по полумостовой схеме, применяются в высоковольтных импульсных генераторах. В качестве нагрузки у такой системы используется приемный

коллектор установки для электроспиннинга CL. Подачей управляющего импульса на драйвер верхнего высоковольтного ключа HVS1 осуществляется коммутация приемного электрода на высоковольтный источник постоянного напряжения, после чего ключ переходит в непроводящее состояние. Собственная ёмкость ключей и их малые токи утечки обеспечивают длительное сохранение заряда на нагрузке (до 10 мкс).

Для формирования сигнала большей длительности применяется повторное периодическое открытие HVS1. Посредством управляющего импульса драйвера нижнего ключа HVS2 происходит разряд коллекторного электрода через коммутатор на землю. В результате на нем формируются высоковольтные импульсы прямоугольной формы с заданной длительностью. Синхронизировав две полумостовые высоковольтные схемы, подключенные к двум коллекторным электродам, можно получить изменяемое электрическое поле, которое будет отклонять электрогидродинамическую струю в процессе формирования, а обеспечив требуемое время нарастания потенциала – управлять ее характеристическими параметрами смещения между электродами и количеством осаждаемого материала на тот или иной электрод.

Для оптимизации работы высоковольтных коммутаторов была произведена оценка энергетических потерь и параметров переходных процессов транзисторов с использованием электрической схемы с полным разрядом накопительного конденсатора, показанной на рис. 2, а. Исследования проводились для серии транзисторов с разрядной ёмкостью  $C = 100$  пФ и нагрузочным сопротивлением  $R = 50$  и  $100$  Ом. Ток измерялся резистивным

делителем номиналом 0,1 Ом, напряжение на транзисторе – высоковольтным пробником HP9258 с помощью осциллографа LeCroy 104Xi.

Конденсатор заряжался до напряжения  $V_{DS}$ , после чего производилась коммутация транзистора Q, и в цепи развивался ток  $I_D$ .

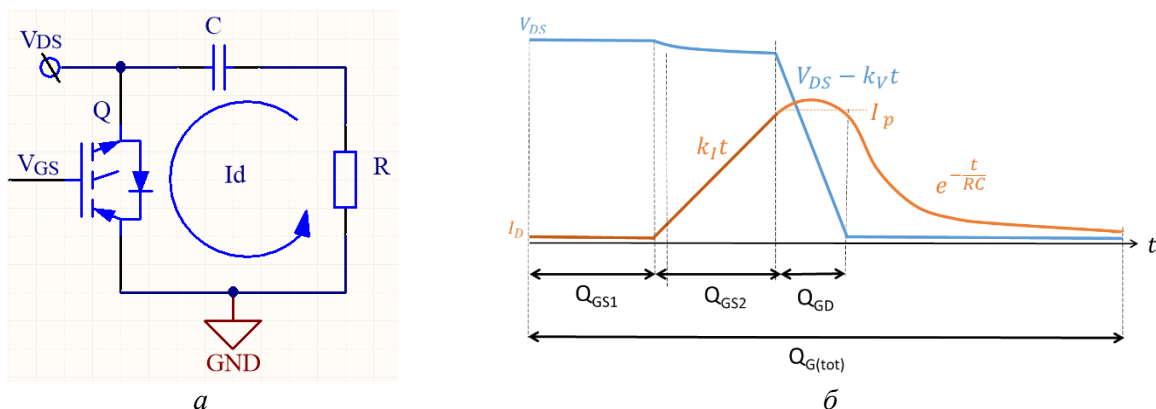


Рис. 2. Оценка параметров цепи: а) электрическая схема эксперимента; б) осциллограмма тока и напряжения во время коммутационного процесса.

Осциллограммы процесса открытия транзистора представлены на рис. 2, б. В момент достижения напряжения на базе  $V_{GS}$  порогового значения (соответствует заряду затвора  $Q_{GS1}$ ) и до плато Миллера [11] ( $Q_{GS2}$ ) при открытии транзисторов ток нарастает линейно. Напряжение на транзисторе соответствует напряжению на конденсаторе C и незначительно спадает по квадратичному закону. После преодоления плато Миллера ( $Q_{GD}$ ) транзистор оказывается полностью открыт.

нарастания импульса тока по уровню 10–90 %,  $k_I$  – скорость нарастания тока,  $k_V$  – скорость спада напряжения, эффективность – отношение энергии, накопленной в конденсаторе к энергии потерь, измеренной по осциллограммам тока и напряжения,  $E$  – энергия рассеянная на резисторе R.

Для выбора и оценки работы транзисторов в составе высоковольтных ключей были испытаны шесть моделей транзисторов. Полученные значения коммутационных параметров приведены в табл. 1 и 2, где  $I_p$  – максимальный ток,  $t_p$  – время

Потери в транзисторе складываются из потерь на проводимость и коммутационных потерь. Коммутационные потери являются функцией тока нагрузки, скорости нарастания тока и спада напряжения:

$$E_{SW} = \frac{1}{2} k_I \frac{Q_{GS2}}{I_G} V_{DS} + \frac{1}{2} \frac{V_{DS}^2}{k_V} I_p$$

Таблица 1

Параметры дискретных коммутаторов при  $R = 100$  Ом,  $C = 100$  нФ,  $V_{ds} = 500$  В, запасенной энергии 12,5 мкДж

Наименование	$I_p$ , А	$t_p$ , нс	$k_I$ , А/нс	$k_V$ , В/нс	Эффективность	E, мкДж
IRGB20B60PD1	3,10	6,7	0,46	100	0,68	8,55
IRGPS40B120UD	2,15	14,5	0,15	45	0,51	6,32
IRG7PH35UD	3,45	6,2	0,56	165	0,75	9,56
47N60C3	3,00	8,1	0,37	125	0,64	8,03
IRFP43N50K	2,55	11,2	0,23	71	0,58	7,19
APT45GP120UD	3,50	5,5	0,63	142	0,77	9,39

Таблица 2

Параметры дискретных коммутаторов при  $R = 50$  Ом,  $C = 100$  нФ,  $V_{ds} = 500$  В, запасенной энергии 12,5 мкДж

Наименование	$I_p$ , А	$t_p$ , нс	, А/нс	, В/нс	Эффективность	E, мкДж
IRGB20B60PD1	4,35	7,5	0,58	100	0,57 ↓	7,17
IRGPS40B120UD	2,60	11,2	0,23	45	0,35 ↓	4,32
IRG7PH35UD	6,15	6,5	0,94	165	0,77 ≈	9,58
47N60C3	4,80	9,1	0,53	125	0,63 ≈	7,84
IRFP43N50K	3,60	11,9	0,30	71	0,49 ↓	6,10
APT45GP120UD	6,35	5,0	1,37	142	0,79 ≈	9,91

Из данных таблиц можно видеть, что эффективность при фиксированной емкости конденсатора, увеличивается с ростом скорости нарастания тока, при этом блокируемое напряжение транзистора не сказывается на скорости открытия. При уменьшении сопротивления нагрузки  $R$  эффективность сохраняет свое значение только для быстрых транзисторов. Это связано с увеличением коммутационных потерь, так как открытие происходит в большем токе, и небольшому снижению потерь проводимости. Таким образом, применение транзисторов с максимальным значением  $k_f$  позволит уменьшить потери при использовании их в высоковольтных ключах, сократит время переходного процесса и увеличит предельную частоту работы.

На основе анализа переходных процессов в дискретных полупроводниковых приборах созданы три высоковольтных коммутатора с рабочим напряжением до 16 кВ на базе транзисторов с изолированным затвором APT45GP120UD, IRG7PH35UD, IRGPS40B120UD. Осциллограммы коммутации таких ключей на нагрузку в 100 пФ приведены на рис. 3.

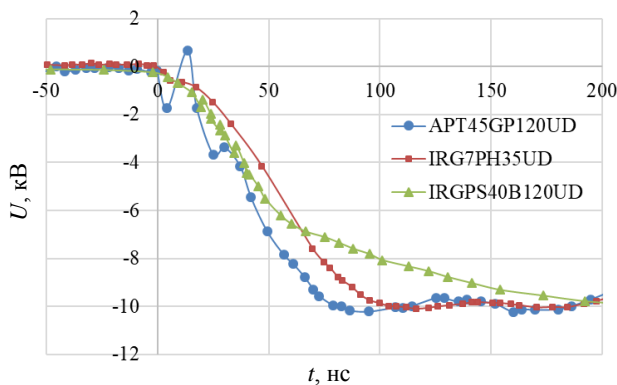


Рис. 3. Переходной процесс на спаде напряжения на высоковольтном ключе из транзисторов APT45GP120UD, IRG7PH35UD, IRGPS40B120UD.

Из этих осциллограмм следует, что скорость нарастания высоковольтного импульса по уровню 10–90 % для транзистора APT45GP120UD составляет 50 нс, IRG7PH35UD – 75 нс и IRGPS40B120UD – 100 нс. Ключ на основе АРТ показал наибольшее быстродействие, однако из-за высокой скорости открытия переходной процесс отличается сильными пульсациями, вызывая перенапряжения на транзисторах и выход их из строя. Высоковольтный ключ на основе IRGPS40B120UD обладает самым медленным временем переходного процесса и не требует дополнительных систем синхронизации и управления, однако его эффективность оказывается невысокой – 0,65. Областью его при-

менений является низкочастотные генераторы повышенной надежности. Ключ на основе IRG7 обладает средней скоростью открытия среди рассмотренных коммутаторов. Однако он требует принудительного закрытия при работе в полумостовой схеме из-за высокого значения  $du/dt$ , что вызывает открытие второго ключа, ведущее к высоким потерям. Его переходная характеристика является гладкой, а эффективность составляет 0,86. Он является наилучшим вариантом для построения высоковольтных коммутаторов и генераторов на их основе. Частота работы коммутатора с радиаторами охлаждения может достигать до 50 кГц.

### Заключение

В работе создана серия полностью управляемых высоковольтных твердотельных коммутаторов с наносекундными временами переключения, соединенных по полумостовой схеме с единой системой управления, обеспечивающей требуемую частоту переключения, скважность, контролируемую задержку, синхронность срабатывания всех элементов. Высоковольтные ключи обладают полным управлением, позволяющим переводить их в проводящее состояние логическим сигналом с генератора задающих импульсов.

Разработан драйвер управления, позволяющий открывать и принудительно закрывать коммутаторы. Полное управление ключами позволяет менять частоту коммутации в диапазоне от 0–50 кГц, длительность импульсов от 600 нс до  $\infty$  со временем переходного состояния до 50 нс и напряжением до 16 кВ. На основе этих схем создан генератор прямоугольных импульсов с импульсным током до 100 А. Объединение разработанной высоковольтной наносекундной твердотельной системы с технологией электроформования позволит формировать заданную архитектуру волокнистого материала. Вся аппаратура обладает большим потенциалом в масштабируемости при производстве высокотехнологичных биоматериалов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ  
17-79-10470.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Lukanina K. I., Grigor'ev T. E., Tenchurin T. Kh., Shepelev A. D., Chvalun S. N. // Fibre Chemistry. 2017. Vol. 49. No. 3. P. 205.
2. Kumbhar S. G., James R., Nukavarapu S. P., Lauren-cin C. T. // Biomedical Materials. 2008. Vol. 3. No. 3. P. 034002.

3. Reneker D. H., Yarin A. L. // Polymer. 2008. Vol. 49. No. 10. P. 2387.
4. Afshari M. *Electrospun Nanofibers* – Woodhead Publishing, 2016.
5. Solberg R. H. M. *Position-controlled deposition for electrospinning* – Eindhoven University of Technology, 2007.
6. Haseeb B. *Controlled deposition and alignment of electrospun PMMA-g-PDMS nanofibers by novel electrospinning setups* – KTH Chemical science and engineering, 2011.
7. Baede T. A. *Towards a new position-controlled electrospinning setup*. – Eindhoven University of Technology, 2009.
8. Grigoriev T. E., Kashin A. V., Lukanina K. I., Rebrov I. E. / Anniversary XV Kurchatov Interdisciplinary Youth Scientific School, a collection of annotations. (Moscow 2017). P. 132.
9. Moshkunov S. I., Rebrov I. E., Khomich V. Yu. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. P. 630.
10. Khomich V. Y., Malashin M. V., Moshkunov S. I., Rebrov I. E., Shershunova E. A. / SPEEDAM 2012. 2012. P. 1512.
11. Barkhordarian, Vrej. *Power MOSFET basics*. – California: International Rectifier, 1996.

PACS: 07.50.Ek

## High-voltage power system for electrospinning of complex-structured polymer materials

A. V. Kashin, I. E. Rebrov, and V. Yu. Khomich

Institute for Electrophysics and Electric Power of the RAS  
18 Dvortsovaya naberezhnaya, Saint-Petersburg, 191186, Russia  
E-mail: rbrv.igor@gmail.com, artem-benz@mail.ru

*Received April 28, 2018*

***A number of high-voltage switches based on discrete semiconductor devices for electrospinning of polymer materials have been investigated. The characteristics of the operation of high-voltage switches as a part of pulse generators for the formation of a rectangular waveform are presented.***

***Keywords:*** solid-state switch, electroforming, high-voltage pulse generator.

### REFERENCES

1. K. I. Lukanina, T. E. Grigor'ev, T. Kh. Trenchurin, A. D. Shepelev, and S. N. Chvalun, *Fibre Chemistry* **49** (3), 205 (2017).
2. S. G. Kumbar, R. James, S. P. Nukavarapu, and C. T. Laurencin, *Biomedical Materials* **3** (3), 034002 (2008).
3. D. H. Reneker and A. L. Yarin, *Polymer*. **49** (10), 2387 (2008).
4. M. Afshari, *Electrospun Nanofibers* (Woodhead Publishing, 2016).
5. R. H. M. Solberg, *Position-controlled deposition for electrospinning* (Eindhoven University of Technology, 2007).
6. B. Haseeb, *Controlled deposition and alignment of electrospun PMMA-g-PDMS nanofibers by novel electrospinning setups* (KTH Chemical science and engineering, 2011).
7. T. A. Baede, *Towards a new position-controlled electrospinning setup*. (Eindhoven University of Technology, 2009).
8. T. E. Grigoriev, A. V. Kashin, K. I. Lukanina, and I. E. Rebrov, in *Proc. Anniversary XV Kurchatov Interdisciplinary Youth Scientific School* (Moscow 2017). P. 132.
9. S. I. Moshkunov, I. E. Rebrov, and V. Yu. Khomich, *Usp. Prikl. Fiz.* **1** (5), 630 (2013).
10. V. Y. Khomich, M. V. Malashin, S. I. Moshkunov, I. E. Rebrov, and E. A. Shershunova, in *SPEEDAM 2012*, (2012). P. 1512.
11. Vrej Barkhordarian, *Power MOSFET Basics*. (California: International Rectifier, 1996).