

Многоканальный высоковольтный наносекундный импульсный генератор для системы ориентированной укладки волокон

И. Е. Ребров, А. В. Кашин, К. И. Луканина, К. Г. Антипова, Т. Е. Григорьев, В. Ю. Хомич

В работе представлена система послойной ориентированной укладки волокон методом электроформования с помощью многоканального высоковольтного наносекундного генератора импульсов на основе твердотельных коммутаторов с рабочим напряжением до 32 кВ. Описаны примененные схемотехнические решения и принцип его работы.

Ключевые слова: генератор высоковольтных импульсов, электроформование, ориентированные волокна.

Ссылка: Ребров И. Е., Кашин А. В., Луканина К. И., Антипова К. Г., Григорьев Т. Е., Хомич В. Ю. // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 98.

Reference: I. E. Rebrov, A. V. Kashin, K. I. Lukanina, K. G. Antipova, T. E. Grigoriev, and V. Yu. Khomich, Prikl. Fiz., No. 3, 98 (2019).

Введение

В настоящее время все большее внимание уделяется развитию технологии создания нетканых материалов для применения в различных областях биомедицины, биоинженерии, хирургии и регенеративной медицины. Широко распространенным методом получе-

ния микр- и нановолокнистых полимерных материалов является процесс электроформования. Полученные данным методом материалы обладают рядом уникальных свойств, такие как возможность создания композиционных скаффолдов на основе природных и синтетических компонентов с биомиметичной морфологией [1, 2], высокая удельная поверхность в сочетании с высокой пористостью и многие другие. Как следствие, подобные материалы подходят для выращивания дифференцированных клеточных популяций в качестве тканеинженерных трансплантатов органов и тканей, биодеструктурируемых лекарственных носителей и перевязочных средств, многофункциональных фильтров. Применение ориентированной укладки волокон позволит контролировано создавать требуемую механику получаемых материалов, воспроизводить нативную структуру коллагеновых каркасов, формировать анизотропные условия для миграции, дифференциации и пролиферации клеток [3, 4], а также существенно расширить области применения материалов полученных методом электроформования.

В литературе представлено много вариантов модификации метода электроформования с целью получения упорядоченной укладки полимерных волокон в слое. В ряде

Ребров Игорь Евгеньевич¹, зав. лаб., к.т.н.

Кашин Артем Вячеславович¹, инженер-исследователь.

Луканина Ксения Игоревна², нач. отдела нанобиоматериалов и структур, к.т.н.

Антипова Кристина Георгиевна¹, инженер-исследователь.

Григорьев Тимофей Евгеньевич², зам. руководителя по научной работе курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий, к.ф.-м.н.

Хомич Владислав Юрьевич¹, директор, д.ф.-м.н.

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН. Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18.

E-mail: rbrv.igor@gmail.com; artem-benz@mail.ru; kris444ti@yandex.ru; khomich@ras.ru

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Россия, 123098, Москва, пл. Академика Курчатова, 1. E-mail: lukanina_ki@nrcki.ru; grigoriev@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2019 г.

© Ребров И. Е., Кашин А. В., Луканина К. И., Антипова К. Г., Григорьев Т. Е., Хомич В. Ю., 2019

публикаций авторы для получения ориентированных волокон методом электроформования используют вращающийся коллектор в виде диска диаметром в несколько десятков сантиметров со скоростью вращения от 1000 до 5000 об/мин [5, 6]. Ориентация достигается за счет постоянного смещения точки осаждения волокна на поверхности коллектора и его вытягивания по периметру барабана. Не менее распространенным методом формирования ориентированных волокон является формование на щель между близко расположенными коллекторными пластинами с характерным расстоянием 1–5 см [7–9]. Пластины имеют одинаковый электрический потенциал, и ориентированные волокна укладываются в межколлекторный зазор исключительно за счет флуктуации точки осаждения волокна.

Метод стабилизированного электроспиннинга, при котором подавляются все нестабильности струи из полимерного раствора в процессе дрейфа от фильеры к коллектору, позволяет путем смещения плоскости осадительного электрода (подобно трехмерной печати из расплава) получать произвольный рисунок укладки волокон [10–13]. Однако при этом за один проход укладывается лишь одно волокно, поэтому производительность такого процесса крайне низкая.

Для достижения высокой эффективности и контролируемой ориентации было предложено вместо рассмотренных подходов к получению электроформованного материала использовать генераторы [14–17] для управления переменным электрическим полем, в котором движется электрогидродинамическая струя из полимерного раствора. В предложенном методе волокна ориентировано осажда-

ются за счет динамического изменения напряженности электрического поля, отклоняя полимерную струю, быстрой смены точки осаждения между коллекторами, а также неразрывности волокна. Данный подход позволяет получать материал из однонаправленных ориентированных волокон, однако для достижения требуемых механических свойств необходимо создавать слои с разной ориентацией укладываемых волокон. Для этого нами было использовано большее количество приемных электродов и соответственно выходов высоковольтного генератора, система синхронного управления каналами с возможностью изменять режимы формования.

В данной работе представлена высоковольтная импульсная система для реализации послойной ориентированной укладки полимерных материалов методом контролируемого электроформования.

Установка для получения ориентированного материала

Фотография установки для получения ориентированного материала изображена на рис. 1, а. Она состоит из следующих узлов: 1 – система подачи полимерного раствора, 2 – фильеры или капилляр, через который подается раствор, 3 – система коллекторов, а также 4-канальный генератор высоковольтных импульсов (ГВИ). Генератор включает в себя следующие элементы: 4 – высоковольтный источник питания Spellman SL-30, 5 – низковольтный синхронизирующий генератор, 6 – восемь высоковольтных коммутаторов (ВВК), 7 – драйвера управления.

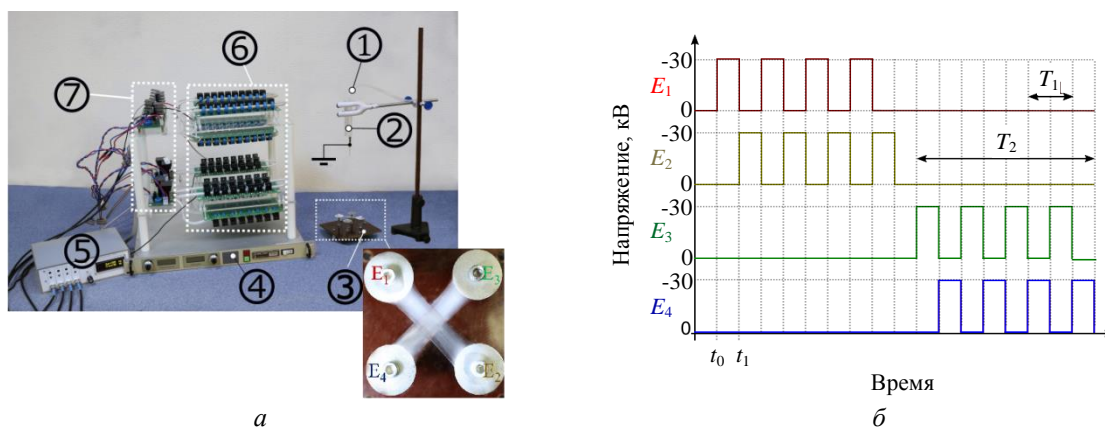


Рис. 1. Установка для получения послойно ориентированных волокон и режим её работы: а – фотография установки; б – зависимость напряжения на коллекторах системы от времени.

Коллекторная система выполнена из 4-х отдельных электродов E_1 – E_4 , расположение которых относительно друг друга отдельно показано на рис. 1, а. На электроды попарно в противофазе подается импульс в форме меандра (рис. 1, б). При этом отличным относительно фильеры потенциалом в любой момент времени обладает только один из электродов.

К каждому из коллекторов подключены два высоковольтных ключа, один из которых заряжает его до установленного источником питания потенциала, а другой – заземляет. Процесс формования делится на два этапа: 1) на электроды E_1 – E_2 поступает сигнал с ГВИ, E_3 – E_4 не изменяют своего потенциала и 2) активными являются E_3 и E_4 , пассивными – E_1 и E_2 . На первом этапе в первоначальный момент времени t_0 высоковольтный импульс приходит на первый электрод. За время длительности импульса $T_1/2$ под действием электростатических сил полимерная струя вытягивается из капилляра, дрейфует и осаждается на коллектор E_1 . В момент времени t_1 импульс подается на противолежащий электрод E_2 , а потенциал E_1 сравнивается с потенциалом фильеры, и струя дрейфует от E_1 к E_2 , формируя между коллекторами ориентированный материал. Через период времени T_2 электроды E_1 и E_2 приобретают нулевой потенциал, а импульсы начинают прикладываться к E_3 и E_4 . При необходимости полярность источника питания и фильеры может быть реверсирована. Малый межимпульсный период T_1 определяется электрогидродинамической скоростью смещения волокна в пространстве и зависит от расстояния между электродами, напряжения источника питания, наличия дополнительных отклоняющих электродов, сопротивлением воздуха движению полимерной струи и др. Большой межканальный период T_2 характеризует толщину однонаправленного слоя. Регулировка этих параметров осуществляется с помощью специальной системы управления.

Наличие соседних электродов, находящихся под потенциалом капилляра, ослабляет электрическое поле между капилляром и электродом, на который поступил высоковольтный импульс, что заставляет увеличивать

напряжение, требуемое для устойчивого формования. Поэтому для повышения эффективности процесса и скорости получения образцов требовалось повысить рабочее напряжение. В этих целях был разработан высоковольтный коммутатор на рабочее напряжение 32 кВ (К-32), способный выдержать перенапряжения до 38 кВ. Высокие значения блокируемого напряжения позволяют проводить процесс электроформования ориентированных волокон в новых условиях и расширить диапазон рабочих параметров системы, например, увеличить высоту между фильерой и плоскостью коллекторной системы, использовать широкий спектр полимеров, увеличить расстояние между коллекторами, тем самым увеличив площадь получаемых образцов.

Ключ К-32, фотография которого представлена на рис. 2, состоит из 16 последовательно соединенных звеньев M_1 ... M_{16} . Каждое звено содержит по два быстродействующих 1200В/20А биполярных транзистора с изолированным затвором T_i ... T_{i+1} и с нагрузочным сопротивлением R_i ... R_{i+1} , подтягивающее затвор транзистора к эмиттерному потенциалу, и ферритовое кольцо Tr_{i+1} , выполняющее функции магнитопровода в трансформаторе тока системы управления. Для повышения плотности размещения электрических компонентов один феррит служит для управления двумя транзисторами, а вторичная обмотка трансформатора выполнена на отдельной плате. С ее помощью также осуществляется механическое крепление колец, помещенных в пропилены на основной плате ключей. В итоге, коммутатор К-32 имеет размеры 210×100 мм².

Для минимизации времени переходных процессов и коммутационных потерь применен быстродействующий БТИЗ IRG7PH35UD с характерным временем открытия в сборке 150 нс [18, 19]. Для стабильной работы ВБК необходимо, чтобы все составляющие его БТИЗ срабатывали синхронно (разброс не более 10 % времени открытия), а сопротивление, подтягивающее потенциал затвора к эмиттеру, было низким. Нами произведена оптимизация длины линии и подобран резистор в 4,7 Ома для уменьшения времени переходных процессов.

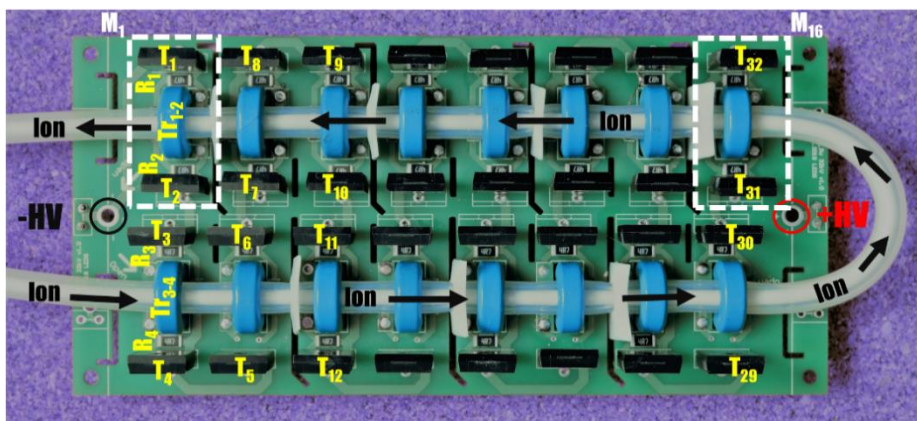


Рис. 2. Фотография высоковольтного коммутатора с обозначением схемотехнических элементов и направления тока открытия Ion.

Открытие и закрытие высоковольтного коммутатора осуществляется с помощью драйвера управления. Схема управления состоит из трех частей: 1) драйвер двух высоковольтных коммутаторов, выполненный по топологии полного моста с нагрузкой на первичную обмотку токового трансформатора, работа которых регулируется цифровой логикой, 2) источник питания 1200 В и 3) задающий генератор. Управляющие сигналы задающего генератора развивают в цепи управления ток Ion. Его направление выбрано таким образом, чтобы при нарастании сигнала через одновитковый трансформатор происходило открытие верхнего ВВК полумостовой пары и одновременное закрытие нижнего. При прекращении импульса ключи переходят в непроводящее состояние благодаря резистору затвора R1...R32. Использование противоположного направления тока реверсирует состояния проводимости коммутаторов, таким образом, становится возможным использовать один драйвер управления на канал. Нагрузкой у такой системы высоковольтных ключей служит электрод приемного коллектора установки для электроформования.

На рис. 3 представлена осциллограмма высоковольтного сигнала одного из выходных каналов импульсного генератора и передний фронт нарастания напряжения и тока на эквивалентной нагрузке 20 пФ. Как видно из графика, время нарастания напряжения t_{10-90} по уровню 10–90 % составляет 180 нс, а скорость нарастания доходит до 500 В/нс.

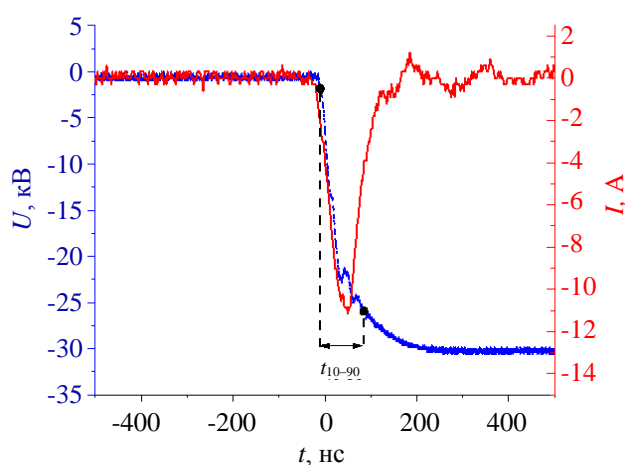


Рис. 3. Осциллограммы переднего фронта нарастания высоковольтного импульса U на коллекторе (частота 60 Гц) и тока I через коллектор.

Разработанная коллекторная система позволяет изменять угол от 90° до 65° между ориентированными волокнами с помощью изменения геометрии расположения электродов. На рис. 4 представлена электродная система с полученными материалами из полиамида (ПА) и ориентацией слоев углом между ориентированными волокнами 65° . Между электродами должно быть выдержано минимальное расстояние a из расчета максимальной напряженности электрического поля 30 кВ/см для недопущения пробоя межколлекторного воздушного промежутка [20]. Предельное удаление b определяется исходя из напряженности электрического поля между коллектором и капилляром, при которой возможен устойчивый процесс электроформования.

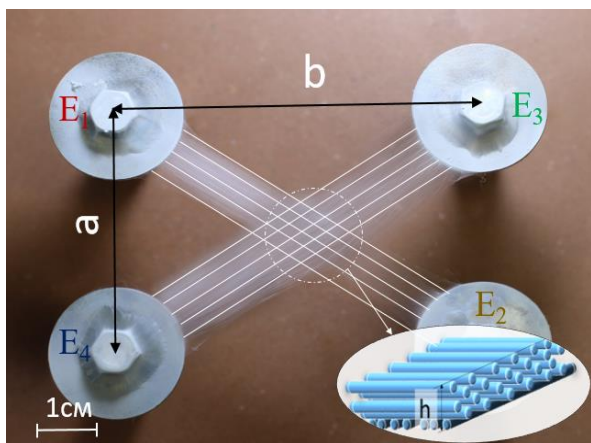


Рис. 4. Материал с заданным углом между ориентированными волокнами 65° : h – толщина однонаправленного слоя. $a = 4,5$ см $b = 7$ см E – коллекторные электроды.

Для оценки эффективности процесса получения ориентированных материалов проведено исследование влияния параметров и режимов работы высоковольтного генератора на выход полезной массы материала. При прочих одинаковых рабочих параметрах установки за различные промежутки времени формования T были получены материалы, взвешена часть ориентированных волокон M_c и часть, осажденная на электродах M_{el} . Расстояние между электродами составляло 6 см, высота между фильерой и плоскостью коллекторов 9 см. На электроды подавался меандр напряжением 20 кВ с частотой 60 Гц. Для получения материалов использовался 18%-раствор полиамида в спирте (80 %) с водой (20 %). В таблице представлены результаты исследования, в том числе и процентное отношение полезной массы M_c к суммарной.

Таблица

Масса волокон в зависимости от времени формования

T , мин	M_c , мг	M_{el} , мг	$\frac{M_c}{M_c + M_{el}}$, %
10	0,35	3,95	8,1
20	0,93	10,81	7,9
30	1,56	21,54	6,8

Из таблицы видно, что максимальный выход ориентированного материала составляет 8 % в первые 10 минут процесса. В дальнейшем наблюдается постепенное снижение его полезной массы, связанное с накоплением

заряда и отталкиванием осаждающегося волокна. Для решения этой проблемы требуется периодическая смена полярности капилляра, обеспечивающее чередование знака заряда слоев материала.

Заключение

В статье представлена разработанная система послойной направленной укладки волокон с изменяемым углом ориентации. Из полимерного раствора ПА 6/66 в спирте (80 %) с водой (20 %) получены материалы с направленной ориентацией под углом 65° и 90° .

Разработаны высоковольтные ключи с блокируемым напряжением 32 кВ и током 20 А и временем нарастания напряжения 180 нс, система синхронизированного управления для последовательной работы восьми высоковольтных коммутаторов, позволяющая подстраивать время переключения, требуемое для электрогидродинамического перемещения струи между коллекторами, толщину ориентированного слоя, а также препятствующая сквозному открытию ВВК при высоких скоростях нарастания напряжения.

Эффективная масса ориентированных волокон ПА длиной 6 см составила 8 % на частоте высоковольтного сигнала 60 Гц. Ее значение снижается по мере увеличения толщины материала.

Рассмотренная электрофизическая система позволяет получать многослойные ориентированные материалы с контролируемой толщиной слоев для перехода к персонализированной медицине, создания каркасов искусственных органов и тканей.

Работа выполнена при поддержке
РНФ 17-79-10470.

ЛИТЕРАТУРА

- Lukanina K. I., Grigoriev T. E., Krasheninnikov S. V., Mamagulashvili V. G., Kamyshinsky R. A., Chvalun S. N. // Carbohydrate Polymers. 2018. Vol. 191. P. 119.
- Lukanina K. I., Grigor'ev T. E., Tenchurin T. K., Shepelev A. D., Chvalun S. N. // Fibre Chemistry. 2017. Vol. 49. No. 3. P. 72.
- Caliari S. R., Gonnerman E. A., Grier W. K., Weisgerber D. W., Banks J. M., Alsop A. J., Lee J. S., Bai-

- ley R. C., Harley B. A. // Advanced healthcare materials. 2015. Vol. 4. No. 1. P. 58.
4. Jianga T., Carbone E. J., Lo K. W.-H. // Progress in Polymer Science. 2015. Vol. 46. P. 1.
5. Nguyen D. N., Hwang Y., Moon W. // European Polymer Journal. 2016. Vol. 77. P. 54.
6. De Prá M. A. A., Ribeiro-do-Valle R. M., Maraschin M., Veleirinho B. // Materials Letters. 2017. Vol. 193. P. 154.
7. Baji A., Mai Y. W., Wong S. C., Abtahi M., Chen P. // Composites science and technology. 2010. Vol. 70. No. 5. P. 703.
8. Kishan A. P., Robbins A. B., Mohiuddin S. F. // Acta Biomaterialia. 2017. Vol. 56. P. 118.
9. Jha B. S., Colello R. J., Bowman J. R., Sell S. A., Lee K. D., Bigbee J. W. // Acta biomaterialia. 2011. Vol. 7. No. 1. P. 203.
10. Zhang D., Chang J. // Nano Letters. 2008. Vol. 8. No. 10. P. 3283.
11. Lee J., Jang J., Oh H., Jeong Y. H., Dong // Materials Letters. 2013. Vol. 93. P. 397.
12. Sun D., Chang C., Li S., Lin L. // Nano letters. 2006. Vol. 6. No. 4. P. 839.
13. Luo G., Teh K. S., Liu Y., Zang X., Wen Z., Lin L. // ACS applied materials & interfaces. 2015. Vol. 7. No. 50. P. 27765.
14. Кашин А. В., Ребров И. Е., Хомич В. Ю. // Прикладная физика. 2018. № 3. С. 85.
15. Иванов Е. В., Мошкунев С. И., Хомич В. Ю. // Прикладная физика. 2006. № 2. С. 122.
16. Гамируллин М. Д., Курячий А. П., Ребров И. Е., Хомич В. Ю., Чернышев С. Л., Ямщиков В. А. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 95.
17. Мошкунев С. И., Ребров И. Е., Хомич В. Ю. // Известия Вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 9/3. С. 110.
18. Мошкунев С. И., Ребров И. Е., Хомич В. Ю. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 630.
19. Moshkunov S. I., Rebrov I. E., Khomich V. Y., Shershunova E. A. // Instruments and Experimental Techniques. 2018. Vol. 61. No. 6. P. 821.
20. Kuffel E., Zaengl W. S. High voltage engineering fundamentals. – Toronto: Elsevier, 2013.

PACS: 07.50.Ek

Multichannel high-voltage nanosecond pulse generator for oriented fiber laying system

I. E. Rebrov¹, A. V. Kashin¹, K. I. Lukanina², K. G. Antipova¹, T. E. Grigoriev²,
and V. Yu. Khomich¹

¹Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences
18 Dvortsovaya naberezhnaya, St. Petersburg, 191186, Russia
E-mail: rbrv.igor@gmail.com; artem-benz@mail.ru; kris444ti@yandex.ru; khomich@ras.ru

²National Research Center “Kurchatov Institute”
1 Akademika Kurchatova pl., Moscow, 123098, Russia
E-mail: lukanina_ki@nrcki.ru; grigoriev@nrcki.ru

Received April 16, 2019

High-voltage nanosecond pulse generator with several output channels based on solid-state switches with blocking voltage of up to 32 kV for oriented fiber laying system is presented. The schematic solutions and the principle of its work are described.

Keywords: high-voltage pulse generator, electroforming, oriented fibers.

REFERENCES

1. K. I. Lukanina, T. E. Grigoriev, S. V. Krashennnikov, V. G. Mamagulashvilli, R. A. Kamyshinsky, and S. N. Chvalun, Carbohydrate Polymers. **191**, 119 (2018).
2. K. I. Lukanina, T. E. Grigoriev, T. K. Tenchurin, A. D. Shepelev, and S. N. Chvalun, Fibre Chemistry **49** (3), 72 (2017).

3. S. R. Caliri, E. A. Gonnerman, W. K. Grier, D. W. Weisgerber, J. M. Banks, A. J. Alsop, J. S. Lee, R. C. Bailey, and B. A. Harley, *Advanced healthcare materials* **4** (1), 58 (2015).
4. T. Jianga, E. J. Carbone, and K. W.-H. Lo, *Progress in Polymer Science* **46**, 1 (2015).
5. D. N. Nguyen, Y. Hwang, and W. Moon, *European Polymer Journal* **77**, 54 (2016).
6. M. A. A. De Prá, R. M. Ribeiro-do-Valle, M. Maraschin, and B. Veleirinho, *Materials Letters* **193**, 154 (2017).
7. A. Baji, Y. W. Mai, S. C. Wong, M. Abtahi, and P. Chen, *Composites science and technology* **70** (5), 703 (2010).
8. A. P. Kishan, A. B. Robbins, and S. F. Mohiuddin, *Acta Biomaterialia* **56**, 118 (2017).
9. B. S. Jha, R. J. Colello, J. R. Bowman, S. A. Sell, K. D. Lee, and J. W. Bigbee, *Acta biomaterialia* **7** (1), 203 (2011).
10. D. Zhang and J. Chang, *Nano Letters* **8** (10), 3283 (2008).
11. J. Lee, J. Jang, H. Oh, Y. H. Jeong, and Dong, *Materials Letters* **93**, 397 (2013).
12. D. Sun, C. Chang, S. Li, and L. Lin, *Nano letters* **6** (4), 839 (2006).
13. G. Luo, K. S. Teh, Y. Liu, X. Zang, Z. Wen, and L. Lin, *ACS applied materials & interfaces* **7** (50), 27765 (2015).
14. A. V. Kashin, I. E. Rebrov, and V. Y. Khomich, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 85 (2018).
15. E. V. Ivanov, S. I. Moshkunov, and V. Y. Khomich, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 122 (2006).
16. M. D. Gmirullin, A. P. Kuryachii, I. E. Rebrov, V. Yu. Khomich, S. L. Chernyshev, and V. A. Yamshchikov, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 95 (2015).
17. S. I. Moshkunov, I. E. Rebrov, and V. Y. Khomich, *Russian Physics Journal* **59** (9/3), 110 (2016).
18. S. I. Moshkunov, I. E. Rebrov, and V. Y. Khomich, *Usp. Prikl. Fiz.* **1** (5), 630 (2013).
19. S. I. Moshkunov, I. E. Rebrov, V. Y. Khomich, and E. A. Shershunova, *Instruments and Experimental Techniques*. **61** (6), 821 (2018).
20. E. Kuffel and W. S. Zaengl, *High voltage engineering fundamentals*. (Elsevier, Toronto, 2013).