

**Электрофизическая установка для электроформования полимерных материалов на диэлектрические подложки посредством смены полярности***В. В. Воеводин, И. Е. Ребров, В. Ю. Хомич, В. А. Ямщиков*

*Представлены и реализованы схемотехнические решения питания установки для получения нетканых материалов методом электроформования на коллекторы, покрытые диэлектриком. При помощи нескольких высоковольтных коммутаторов достигается периодическая смена полярности полимерного раствора, что позволяет осуществить осаждение полимерной струи при отсутствии стекания заряда с формованного материала. Приведены характерные электрические характеристики процесса и показаны возможные модификации установки.*

*Ключевые слова:* электроспиннинг, импульсное напряжение, полимеры.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2022-1-83-89

**Введение**

Электроформование – широко используемая технология для создания сверхтонких полимерных волокон диаметром от 2 нм до 10 мкм, получаемых из раствора полимера и укладываемых на подложку под действием сил электрического поля. С ее помощью можно получать материалы с контролируемой пористой структурой и требуемыми механическими параметрами, что актуально для решения задач медицины, материаловедения, текстильной промышленности и электротехники [1, 2]. Электроформование активно при-

меняется при разработке новых композиционных диэлектрических материалов [3], для заживления ран [4], для очистки сточных вод [5] и воздуха [6] от загрязнений, в задачах тканевой инженерии [4, 8, 9], для нанесения защитных покрытий на одежду [10]. Это обуславливает столь пристальный интерес исследователей к данной технологии, поскольку перспективы ее применения в различных областях еще не исчерпаны.

В ряде случаев требуется обеспечить нанесение нетканого материала на поверхность подложки с высоким электрическим сопротивлением, например, при необходимости достижения большой толщины материала, создании органических транзисторов. Это актуально и при формовании на щелевой промежуток между осаждающими электродами. Во всех вышеперечисленных случаях при электроформовании возникает проблема, связанная с взаимным отталкиванием волокон, сохраняющих одноименный заряд в течение длительного времени из-за отсутствия вокруг них проводящей среды, которая бы обеспечивала его достаточно быстрое стекание. Это приводит к ухудшению однородности укладки, изменению ориентации волокон, снижению производительности, и, в конечном итоге, к ухудшению свойств получаемого материала [11].

---

**Воеводин Вадим Вадимович**, н.с.

E-mail: voyevodinvv@gmail.com

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

E-mail: rbrv.igor@gmail.com

**Хомич Владислав Юрьевич**, науч. рук., д.ф.-м.н.

E-mail: khomich@ras.ru

**Ямщиков Владимир Александрович**, директор филиала ИЭЭ РАН, д.т.н.

E-mail: yamschikov52@mail.ru

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (ИЭЭ РАН).

Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18.

*Статья поступила в редакцию 23 декабря 2021 г.*

---

© Воеводин В. В., Ребров И. Е., Хомич В. Ю., Ямщиков В. А., 2022

Процесс электроформования заключается в приложении к емкости с полимерным раствором (фильере) высокого напряжения, вытягивании полимерной струи из капилляра под действием электрических сил, ее дрейфа к коллекторному электроду и осаждения на нем. В результате механического движения струи от капилляра к коллектору вместе с ней перемещается и заряд. В случае металлического заземленного коллектора, волокна, касаясь его, нейтрализуют часть своего заряда, возвращая его в цепь питания. Если коллектор покрыт диэлектриком, то ток проводимости в цепи будет отсутствовать. Часть электрической

схемы замещения процесса получения нетканого материала на диэлектрик представлена на рис. 1. Она состоит из источника высокого напряжения, создающего между точками  $\varphi_1$ – $\varphi_2$  разность потенциалов  $U$ , эквивалентного сопротивления полимера в зоне дрейфа  $R_{pol}$ , емкости  $C_{ce}$  между капилляром и коллектором, емкости между слоем формируемого материала и коллектором  $C_c$ , сопротивления стекания заряда  $R_d$  и диэлектрической подложки. Сопротивление  $R_d$  отражает процесс стекания заряда волокна за счет наличия ионов в воздухе, электроотрицательных газов или паров воды и пр.

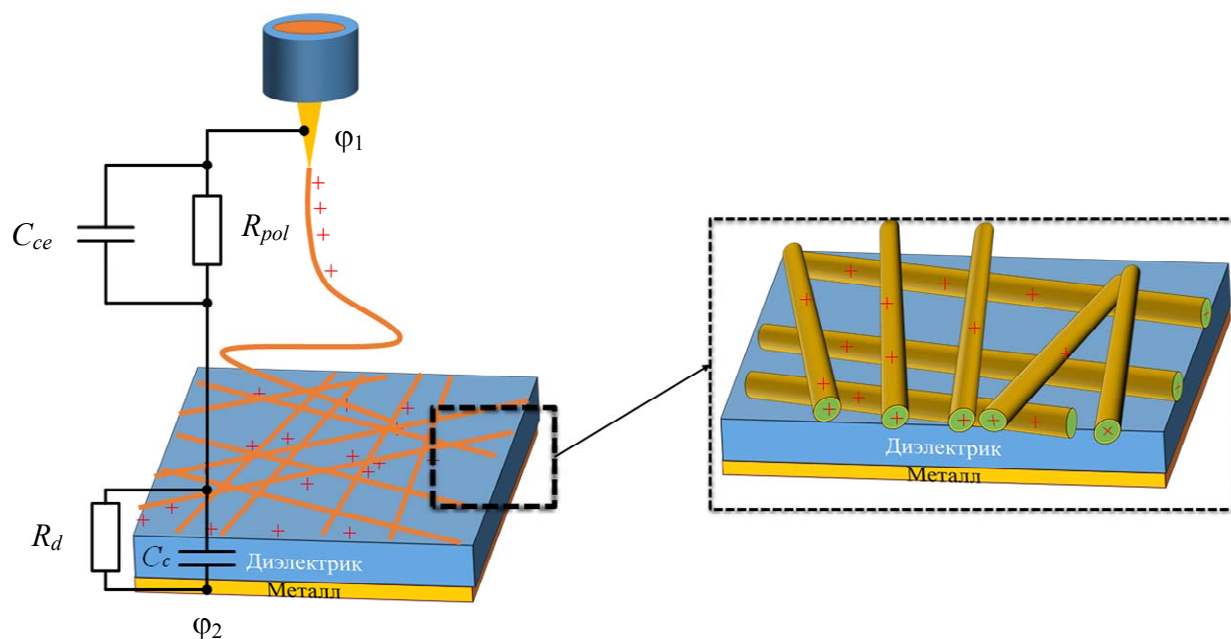


Рис. 1. Схема получения нетканого материала методом электроформования на диэлектрик и электрофизическая модель процесса

В стационарном режиме ток в такой цепи близок к нулю если сопротивление стока  $R_d$  достаточно велико, что ведет к прекращению формирования полимерной струи и остановке процесса формования. Однако, электроформование может осуществляться при наличии в цепи токов смещения если амплитуда приложенного к капилляру напряжения будет изменяться или осуществляться смена его полярности.

Целью настоящей работы является разработка универсальных схем питания импульсным напряжением различной полярности установки для электроформования, которые бы позволяли работать в условиях накопления

заряда на поверхности приемного электрода, в том числе и на биологических объектах.

### Электрические характеристики установки для электроформования и предлагаемые схемы реализации перемены полярности

Для оценки характерного времени процесса формования на диэлектрик и определения периода изменения напряжения была создана экспериментальная установка, аналогичная рис. 1 с плоским металлическим коллектором  $100 \times 100$  мм, покрытым фторопластом толщиной 1 мм. Характерное расстояние между коллектором и капилляром изменяется

в диапазоне от 7 до 30 см ( $C_{ce} = 3\text{--}10$  пФ), напряжение  $U$  от 10 до 30 кВ, ток струи от 100 нА до 5 мкА, емкость образовавшегося плоского конденсатора  $C_c = 280$  пФ.

Ток полимерной струи тесно связан с производительностью процесса формования. На него влияют: текущая напряженность электрического поля в зоне дрейфа, характеристики коллектора, тип полимерного раствора, скорость подачи полимера насосом через капилляр, факторы окружающей среды (влажность, температура), наличие коронного разряда на конце капилляра. Предполагается, что расход полимерного раствора регулируется только действием электростатических сил без дополнительной подачи и влияния силы тяжести.

При подаче высокого напряжения на капилляр для расстояния коллектор-капилляр 10 см при  $U = 20$  кВ стартует процесс электроформования с током в цепи коллектора  $I_c = 90$  нА, быстро заряжающим емкость  $C_c$  за время 100 с, при этом напряженность в промежутке спадает до  $\sim 1$  кВ/см. Затем возникает установившийся ток формования ( $I_c = 25$  нА – 15 нА), что с учетом приложенного напряжения позволяет оценить характерное значение сопротивления стока  $R_d = 500$  ГОм. Постепенно полимерными волокнами заряд переносится на покрытый диэлектриком коллектор, новые волокна затрудняют сток с уже уложенных, происходит накопление и еще большее экранирование поля зарядом электроформованного материала и процесс формования полностью прекращается через время  $t_{end} = 800\text{--}1000$  с при снижении разности потенциалов между электродами до 7 кВ. Экспериментальная зависимость тока полимерной и осаждаемого заряда показана на рис. 2.

Для того чтобы электроформование протекало без остановки, требуется нивелировать влияние оседающего заряда. При повышении напряжения источника питания для поддержания требуемой напряженности поля между коллектором и эмиттером максимальное значение  $U$  ограничивается пробивным напряжением воздуха и, как правило при напряжении более 50 кВ, требует повышенных мер для устранения коронных разрядов с подводящих проводов. Механическое устранение заряда требует остановки процесса или вывода мате-

риала из зоны формования. Альтернативным методом может являться изменение направления тока путем изменения полярности капилляра относительно коллектора.

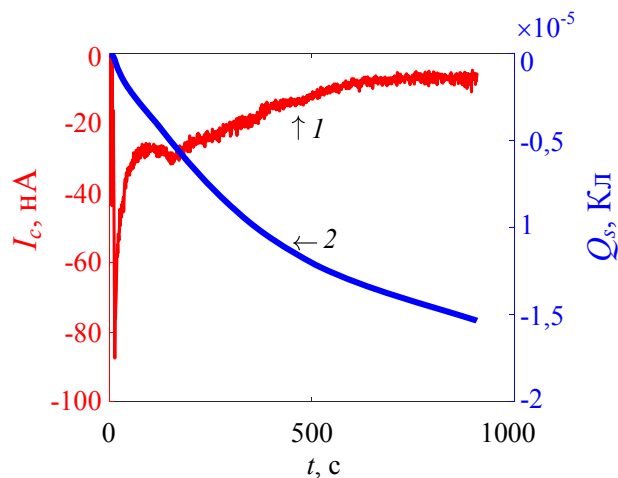


Рис. 2. Типичная осциллограмма тока  $I_c$  в цепи коллектора при резкой подаче высокого напряжения на капилляр (1) и зависимость суммарного протекшего в цепи заряда  $Q_s$  (2) от времени

Рядом исследователей для этих целей предлагается использовать в установках для электроформования источники синусоидального напряжения [11, 12]. Однако, для этих целей наиболее оптимальной является импульсная форма напряжения с коротким фронтом нарастания, обеспечивающая минимальный перерыв в процессе формования и фиксированную разность потенциалов. В работах [13, 14] применение импульсного напряжения позволило также влиять и на характеристики самих полимерных нитей путем варьирования параметров высоковольтных импульсов.

Исходя из оценки  $t_{end}$ , период изменения полярности должен составлять не более 100 с, что соответствует частоте не более 0,01 Гц. В данной работе предлагается использовать твердотельные высоковольтные ключи (ВВК) [15–20], включённые по полумостовой схеме, для формирования импульсного напряжения. В зависимости от возможности разземления (отключения от земляного потенциала) коллектора и подачи высокого напряжения на него (точка  $\varphi_2$  на рис. 1), для реализации режима с периодической переменной полярности используются две схемы формирования питающего напряжения, показанные на рис. 3.

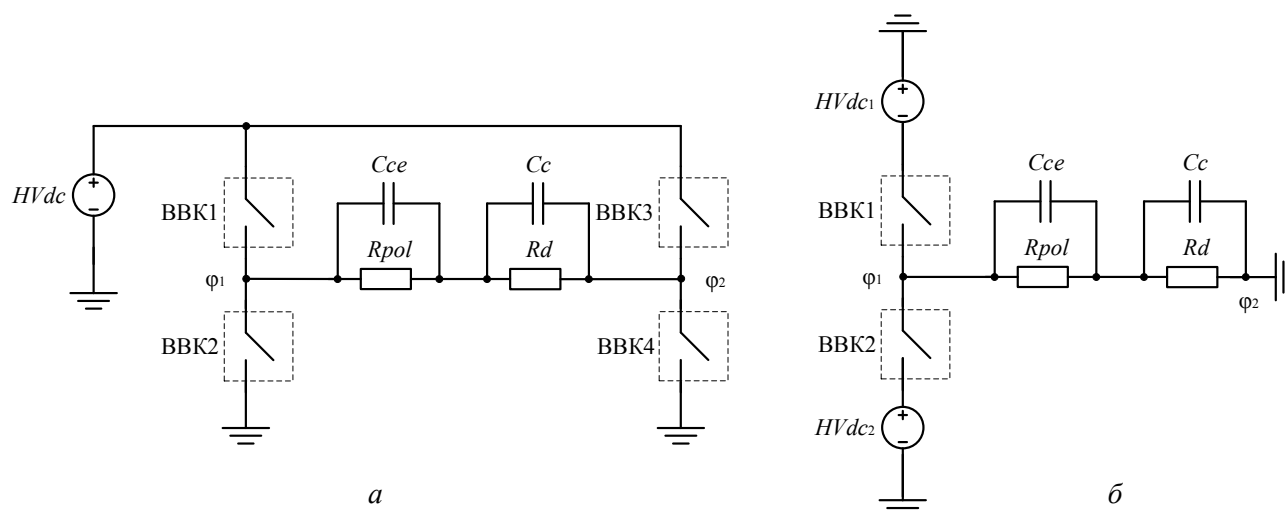


Рис. 3. Схемы формирования напряжения питания установки для электроформования в режиме с периодическим изменением полярности: а – схема с изменением точки приложения высокого напряжения; б – схема с двумя высоковольтными источниками разной полярности

Полномостовая схема (рис. 3, а) состоит из четырех управляемых высоковольтных ключей ВВК1-ВВК4, включаемых попарно в противофазе. Каждая пара ключей подключена к регулируемому высоковольтному источнику постоянного напряжения  $HV_{dc}$ . Смена полярности происходит благодаря чередующейся подачи высокого напряжения сначала на капилляр  $\phi_1$ , а земли на коллектор  $\phi_2$ , а затем земли на капилляр  $\phi_1$  и высокого положительного потенциала на коллектор  $\phi_2$ . Напряжение в межэлектродном зазоре  $U(R_{pol})$  до смены полярности ожидаемо экспоненциально падает (на малых временах зависимость близка к линейной) из-за зарядки емкости  $C_c$ , а затем после смены полярности становится равной сумме напряжения высоковольтного источника питания и падения напряжения на заряженном слое коллектора. Факт повышения напряженности поля необходимо учитывать при проектировании установки и определения частоты реверса напряжения, а также для корректировки напряжения источника питания.

Если высокий потенциал невозможно подать на коллектор (например, в случае работы с живым объектом), используется полумостовая схема с двумя высоковольтными источниками разной полярности (рис. 3, б). К ВВК в данной схеме в момент коммутации оказывается приложено значительно большее напряжение  $HV_{dc1} + HV_{dc2}$ , что нужно учитывать при проектировании коммутаторов. В результате, на капилляре формируются бипо-

лярные импульсы напряжения, которые аналогичным образом обеспечивают продолжительный процесс электроформования.

### Заключение

Предложены схемы питания установки для получения нетканых материалов методом электроформования на покрытые диэлектриком коллекторы с применением высоковольтных ключей, формирующих импульсно-периодическое напряжение. В зависимости от характера объекта, находящегося на коллекторе, имеется возможность быстрого перехода с одной схемы формирования импульсов переменной полярности на другую. Приведены оценки характерных значений электрических параметров процесса электроформования в типичной электродной конфигурации и обоснован период смены полярности импульсного напряжения для обеспечения непрерывности процесса электроформования в случае невозможности компенсации осаждаемого заряда.

Работа выполнена при поддержке  
РФФИ 18-29-17066 мк

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bhardwaj N., Kundu S. C. // Biotechnol. Adv. 2010. Vol. 28. № 3. P. 325.
2. Reddy V. S. et al. // Polymers (Basel). 2021. Vol. 13. № 21. P. 3746.

3. Hu J., Zhang S., Tang B. // Energy Storage Mater. 2021. Vol. 37. P. 530.
4. Guang Yang, Xilin Lia et al. // Progress in Polymer Science. 2018. Vol. 81. P. 80.
5. Song J. et al. // Environ. Res. 2022. Vol. 204. № PA. P. 111892.
6. Wang N. et al. // J. Colloid Interface Sci. 2014. Vol. 428. P. 41.
7. Jeong I. et al. // Nano Energy. 2014. Vol. 9. P. 392.
8. Tao Jiang, Erica J. Carbone et al. // Progress in Polymer Science. 2015. Vol. 46. P. 1.
9. Xu Y. et al. // Sci. Adv. 2020. Vol. 6. № 48. P. 1.
10. Verbič A., Gorjanc M., Simončič B. // Coatings. 2019. Vol. 9. № 9. P. 550.
11. Kessick R., Fenn J., Tepper G. // Polymer (Guildf). 2004. Vol. 45. № 9. P. 2981.
12. Balogh A. et al. // Int. J. Pharm. 2016. Vol. 505. № 1–2. P. 159.
13. Li K. et al. // J. Appl. Polym. Sci. 2018. Vol. 135. № 15. P. 46130.
14. Mirek A. et al. // Mater. Des. 2019. Vol. 183. P. 1.
15. Khomich V. Y. et al. High voltage IGBT switch with capability of pulse width control // SPEEDAM 2012. Sorrento, Italy, 2012. P. 1512–1514.
16. Kashin V. et al. // Applied Physics. 2018. № 3. P. 85.
17. Zharkov Y. E. et al. // Instruments and Experimental Techniques. 2021. Vol. 64. № 6. P. 805.
18. Иванов Е. В., Мошкунев С. И., Хомич В. Ю. // Прикладная физика. 2006. № 2. С. 122.
19. Иванов Е. В. и др. // Прикладная физика. 2008. № 5. С. 32.
20. Мошкунев С. И., Хомич В. Ю. Генераторы высоковольтных импульсов на основе составных твердотельных коммутаторов. – М: Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2018.

PACS: 07.50.Ek

## Electrophysical setup for the electroforming of polymeric materials onto dielectric materials by reversing the polarity

*V. V. Voevodin, I. E. Rebrov, V. U. Khomich, and V. A. Yamshchikov*

Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences  
18 Dvortsovaya naberezhnaya st., Petersburg, 191186, Russia  
E-mail: rbrv.igor@gmail.com

*Received December 23, 2021*

***The paper presents and implements circuit solutions for power supply of a setup for obtaining nonwoven materials by electroforming on dielectric-coated collectors. By means of several high-voltage commutators, a periodic change of polarity of polymer solution is achieved, which makes it possible to carry out deposition of polymer jet in the absence of charge leakage from the molded material. Typical electrical characteristics of the process are given and possible modifications of the unit are shown.***

*Keywords:* electrospinning, pulse voltage, polymers.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2022-1-83-88

### REFERENCES

1. N. Bhardwaj and S. C. Kundu, Biotechnol. Adv. **28**, 3 (2010).
2. V. S. Reddy et al., Polymers **13**, 21 (2021).
3. J. Hu, S. Zhang, and B. Tang, Energy Storage Mater. **37**, 530 (2021).
4. Guang Yang, Xilin Lia et al., Progress in Polymer Science **81**, 80 (2018).
5. J. Song, Q. Deng, M. Huang, and Z. Kong, Environ. Res. **204**, 111892 (2022).

6. N. Wang et al., *J. Colloid Interface Sci.* **428**, 41 (2014).
7. I. Jeong, et al., *Nano Energy* **9**, 392 (2014).
8. Tao Jiang, Erica J. Carbone et al., *Progress in Polymer Science* **46**, 1 (2015).
9. Y. Xu et al., *Sci. Adv.* **6**, 48 (2020).
10. A. Verbič, M. Gorjanc, and B. Simončič, *Coatings* **9**, 550 (2019).
11. R. Kessick, J. Fenn, and G. Tepper, *Polyme* **45**, 9 (2004).
12. A. Balogh et al., *Int. J. Pharm.* **505**, 1 (2016).
13. K. Li et al., *J. Appl. Polym. Sci.* **135**, 46130 (2018).
14. A. Mirek, P. Korycka, M. Grzeczkowicz, and D. Lewińska, *Mater. Des.* **183**, 108106 (2019).
15. V. Y. Khomich et al., *SPEEDAM 2012. Sorrento, Italy*, p. 1512–1514 (2012).
16. V. Kashin et al., *Applied Physics*, No. 3, 85 (2018) [in Russian].
17. Y. E. Zharkov et al., *Instruments and Experimental Techniques.* **64** (6), 805 (2021).
18. E. V. Ivanov, S. I. Moshkunov, and V. Yu. Khomich, *Applied Physics*, No. 2, 122 (2006) [in Russian].
19. E. V. Ivanov et al., *Applied Physics*, No. 5, 32 (2008) [in Russian].
20. S. I. Moshkunov and V. Yu. Khomich, *Generatory vysokovol'tnykh impul'sov na osnove sostavnykh tverdotel'nykh kommutatorov* (Izdatel'skaya firma "Fiziko-matematicheskaya literatura", Moscow, 2018).