

Образование плазмы вокруг углеродного волокна под воздействием импульсного тока

Л. А. Буркова, Д. К. Иванов, К. Г. Иванов, А. П. Щербаков

Исследовано воздействие на углеродные волокна импульсных токов с амплитудным значением в тысячи ампер и длительностью 250 мкс. При таких токах происходит частичное испарение материала волокна. Вылетевшие частицы образуют плазму, малое сопротивление которой шунтирует углеродное волокно, предохраняя его от полного разрушения. В первом импульсе происходит пробой диэлектрической матрицы композита, причем плотность образовавшейся плазмы оказывается большой, и ее проводимость определяется процессами рассеяния электронов на частицах плазмы. При повторных импульсах плотность плазмы существенно уменьшается и ее проводимость носит индуктивный характер. Полученные временные зависимости тока и напряжения позволяют провести оценку некоторых параметров плазмы, образовавшейся при первичном и последующих импульсных воздействиях.

Ключевые слова: углеродное волокно, импульсные токи, проводимость, плазма.

Ссылка: Буркова Л. А., Иванов Д. К., Иванов К. Г., Щербаков А. П. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 20.
Reference: L. A. Burkova, D. K. Ivanov, K. G. Ivanov, and A. P. Shcherbakov, Prikl. Fiz., No. 6, 20 (2018).

Введение

Углеродное волокно (УВ) представляет собой композитный материал, который состоит из диэлектрической полимерной матрицы, в которую в качестве наполнителя вводятся высокопроводящие кластеры карбонизированных волокон. Транспортные свойства таких композитов изучались в широком диапазоне как постоянных, так и переменных электрических полей. В области небольших полей исследовалась зависимость проводимости от фактора наполнения матрицы проводящими кластерами [1], определялись различные механизмы проводимости, такие как индуцированное полем туннелирование [2] и прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка [3], изучалась также температурная зависимость проводимости [4]. Исследования, проведенные в сильных импульсных полях, показали, что их воздействие приводит к взрывному разрушению УВ и

образованию плазмы [5, 6]. Возможность использования УВ в качестве эмиссионного катода, в котором образовавшаяся в поверхностном пробое плазма является источником мощного электронного потока, продемонстрирована в работах [7, 8].

Следует отметить, что поведение УВ в промежуточной области полей, в которых происходит лишь частичное разрушение материала, исследовано сравнительно слабо. В работе авторов [9] показано, что образовавшаяся при частичном разрушении образца пылевая плазма участвует в проводимости, она шунтирует образец, и он остается целым при многократных (до нескольких десятков) импульсах.

В настоящей работе продолжено изучение электрических свойств композитной системы, состоящей из УВ и плазмы.

Постановка работы

Источником импульсного тока служила установка, описанная в работе [9]. Исследовали УВ марки TeraX^R HTS 5331, которое по электрическим свойствам можно отнести к полупроводникам. Плотность волокна составляет $\rho = 1,5 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$, удельная теплоемкость $c = 0,8 \times 10^3 \text{ Дж/(кг К)}$.

В эксперименте использовалось УВ в виде ленты. Токовая шина от воздушного разрядника подводилась к болту, на котором между двумя шайбами зажималась лента УВ. На расстоянии 2 см другой конец ленты зажимался между двумя

Буркова Людмила Алексеевна, доцент, к.ф.-м.н.
Иванов Дмитрий Константинович, ст. преподаватель, к.т.н.
Иванов Константин Георгиевич, зав. кафедрой, д.ф.-м.н.
Щербаков Александр Павлович, доцент, к.т.н.
 Санкт-Петербургский государственный университет
 промышленных технологий и дизайна.
 Россия, 191186, Санкт-Петербург, Большая Морская ул., 18.
 Тел.: 8(812) 315-13-83, 8(812) 315-5-56.
 E-mail: kivanov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17 мая 2018 г.

© Буркова Л. А., Иванов Д. К., Иванов К. Г.,
 Щербаков А. П., 2018

такими же шайбами, расположенными на другом болте, к которому подсоединялась заземленная шина установки.

Размеры образцов, подвергавшихся воздействию импульсного тока, составляли: длина – 2 см, площадь сечения – 0,02 см². Сопротивление образца таких размеров составляло величину ~2 Ом при комнатной температуре. Для оценки проводимости плазмы была определена площадь сечения плазменного шнура. Для этого перпендикулярно к горизонтально расположенным шайбам устанавливалась медная фольга, толщиной 50 мкм. В фольге, стоящей справа и слева, были проделаны отверстия, через которые проходило зажатое между шайбами УВ. Фольга имела контакт с шайбами, зажимающими УВ. После импульса на фольге вокруг УВ наблюдались отверстия и каверны, оставленные частицами пылевой плазмы в радиусе ~1 см. На пластинах, поставленных около заземленного электрода, никаких следов воздействия плазмы не обнаружено. Это позволяет заключить, что частицы плазмы отрицательно заряжены. Кроме того, проводились измерения падения напряжения на электродах, помещенных в плазму в зависимости от расстояния от УВ. Напряжение обращалось в ноль на расстоянии 1,5 см от УВ. Эти результаты позволяют считать радиус пылевой плазмы равным 1 см.

Далее приведены осциллограммы, полученные при входном напряжении 800 В.

Энергия разряда рассчитывалась по формуле

$$W = \frac{CU^2}{2} = 160 \text{ Дж, энергия, поглощенная волокном, составила } 75 \text{ Дж.}$$

Температура плазмы, полученная из уравнения теплового баланса $IU\Delta t = cm\Delta T$, оказалась равной $T = 3000 \text{ К}$.

Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены осциллограммы тока и напряжения УВ, обмотанного стеклонитью. Из них видно, что ток и напряжение представляют собой апериодические функции времени, монотонно убывающие в течение 500 мкс, что свидетельствует о достаточно большом сопротивлении УВ. Осциллограммы тока и напряжения УВ в отсутствие стеклонити представлены на рис. 2. В этом случае кривые имеют сложную форму и носят периодический характер, что говорит о существенном уменьшении сопротивления образца вследствие образования плазмы.

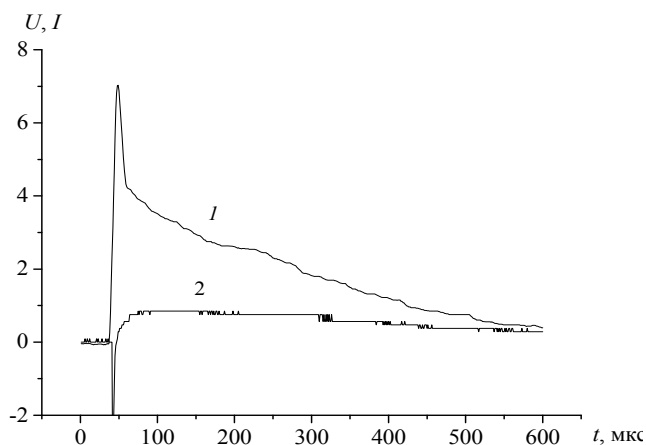


Рис. 1. Осциллограммы напряжения (1) и тока (2) УВ, обмотанного стеклонитью. Масштаб для напряжения – 100 В, для тока – 1 кА.

Обращают на себя внимание различия в формах кривых тока и напряжения для образцов, подвергнутых первому импульсному воздействию (рис. 2, а), и последующих (рис. 2, б).

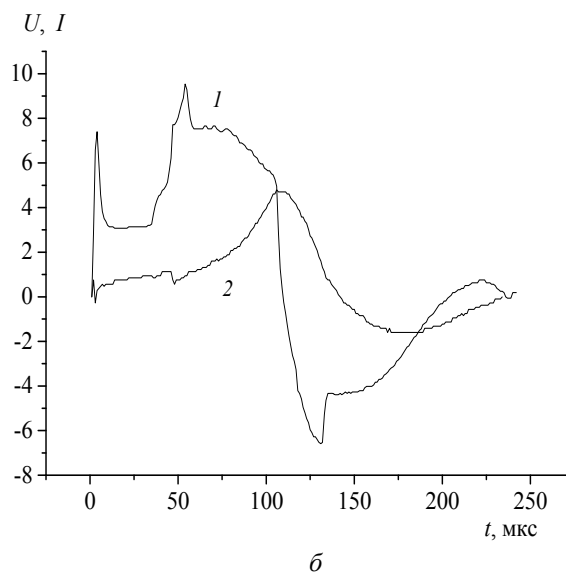
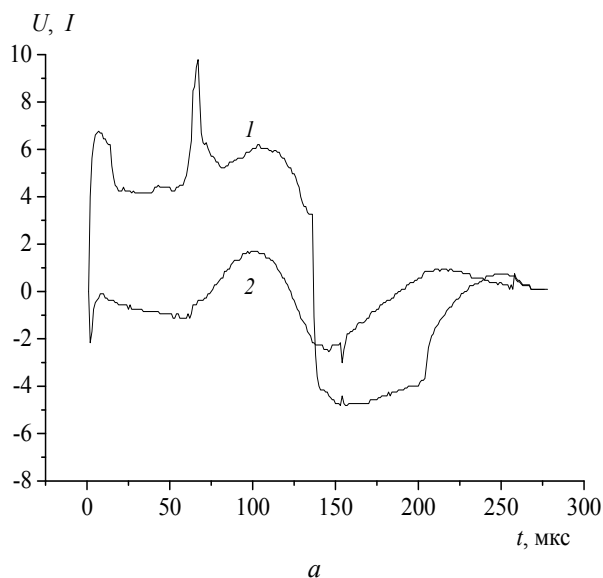


Рис. 2. Осциллограммы напряжения (1) и тока (2) УВ: а) – в первом импульсе, б) – в повторных импульсах. Масштаб для напряжения – 100 В, для тока – 1 кА.

Из рис. 2, *а* видно, что при первом разряде через УВ напряжение достигает максимума и остается практически неизменным в течение времени ~ 20 мкс. Резкое падение напряжения приводит к появлению тока смещения в диэлектрической компоненте УВ. В течение последующих 50 мкс напряжение практически не меняется. Затем наблюдается второй пик на зависимостях напряжения от времени, который в ряде случаев оказывается выше первого. Ток в этот момент уменьшается до нуля. После этого ток и напряжение меняются гармонически и совершают одно полное колебание с периодом ~ 180 мкс с небольшим отставанием тока по фазе.

В случае образцов, подвергнутых повторно-импульсному воздействию (рис. 2, *б*), первый пик на зависимостях напряжения от времени отсутствует, и протекание тока проводимости начинается сразу же после подачи напряжения. Затем, как и в предыдущем случае, напряжение резко возрастает, а ток при этом обращается в ноль. После чего наблюдаются периодические изменения тока и напряжения с тем же периодом, что и при первом импульсе. Однако при повторном воздействии ток существенно отстает от напряжения по фазе ($\varphi \sim 80^\circ$), что свидетельствует об его индуктивном характере.

Обсуждение результатов

Ранее проведенные исследования показали, что углеродное волокно является полупроводником, сопротивление которого падает с увеличением температуры [10].

Однако даже сильный разогрев волокна при протекании через него большого тока не приводит к такому уменьшению сопротивления, при котором возникает периодический процесс. Ток и напряжение волокна, обернутого стеклонитью, препятствующей образованию плазмы, постепенно убывают, обращаясь в ноль в течение 500 мкс (см. рис. 1). Периодическое изменение тока и напряжения в отсутствие стеклонити (см. рис. 2) говорит о том, что образовавшаяся плазма принимает участие в проводимости, существенно уменьшая сопротивление образцов.

Сложный вид осциллограмм тока и напряжения УВ, подвергнутого импульсному воздействию, свидетельствует о том, что оно претерпевает в этом процессе ряд структурных преобразований и связанных с ними изменений в характере проводимости. Сравнение осциллограмм образцов при первичном (рис. 2, *а*) и повторном (рис. 2, *б*) воздействии показывает, что на начальном этапе в образцах протекают разные процессы. Несмотря на то, что при комнатной температуре новые об-

разцы имеют достаточно низкое сопротивление ~ 2 Ом, при импульсном воздействии в осциллограммах наблюдается картина, характерная для пробоя диэлектрика. Об этом свидетельствует постоянство напряжения в течение первых 20 мкс разряда и затем его резкое падение. После первого импульса сопротивление образца при комнатной температуре уменьшается всего лишь на 10 %, однако при повторных импульсах фаза пробоя уже отсутствует и проводимость начинается сразу после подачи напряжения. Появление пробоя в низкоомном проводнике связано с различным температурным поведением кластеров углеродных волокон и диэлектрической матрицы композита. Известно, что коэффициент температурного расширения полимерной матрицы на два порядка величины больше, чем у углеводородных волокон [11]. Разогрев образца при протекании тока в первые моменты подачи напряжения приводит к температурному расширению диэлектрической матрицы. Расстояние между проводящими кластерами увеличивается, и образуются зазоры, заполненные диэлектриком. Проводящие каналы для омического тока прерываются. Диэлектрик во внешнем электрическом поле поляризуется, и на границах диэлектрической области возникают заряды, приводящие к появлению локального поля, которое в десятки раз превосходит внешнее поле [12]. Это поле создает пробой диэлектрика, сопровождающийся резким падением напряжения. В образце возникает ток смещения, пропорциональный dU/dt . После пробоя диэлектрика наряду с током смещения появляется ток проводимости, который в новых образцах, по-видимому, оказывается меньше тока смещения. Ток проводимости приводит к дальнейшему разогреву волокна. Термическое разрушение аморфной полимерной матрицы и выброс образовавшихся микрочастиц в окружающее пространство сопровождается резким увеличением сопротивления волокна, напряжения на нем и уменьшением тока до нуля. Эти процессы приводят к появлению второго пика напряжения в осциллограммах, который в ряде случаев оказывается выше первого. Это связано с резким падением тока и появлением напряжения, пропорционального dI/dt [13].

Волокно после импульсного воздействия остается неповрежденным, его сопротивление при комнатной температуре оказывается даже меньше, чем до воздействия. Это означает, что вследствие удаления эпоксидной смолы в образце образуются новые проводящие каналы, и его проводимость увеличивается. При повторном импульсном воздействии на образец эффекты, связанные с температурным расширением матрицы, оказываются слабо выраженными, и фаза пробоя отсутствует.

Пик, соответствующий пробою, полностью исчезает после нескольких импульсов, количество которых зависит от величины приложенного напряжения. Ток, протекающий по волокну, является в этом случае током проводимости. Разогревание образца за счет джоулева тепла, так же как и при первичном воздействии, приводит к образованию плазмы, проявляющемуся в появлении пика напряжения в осциллограммах.

Плазма шунтирует волокно, и после ее образования ток протекает в основном по ней. Об этом свидетельствует резкое увеличение тока, колебательный характер его изменения и одинаковая величина амплитуды тока в первом и втором полупериоде колебательного процесса. Кроме того, резкое обрывание колебательного процесса без обычного затухания также говорит о том, что ток протекает в плазме, которая быстро остывает.

Плазма, получающаяся при первичном и повторном воздействии, различается по своим свойствам, что находит свое отражение в характере тока, протекающего по ней в первом и втором случаях. Сравнение рис. 2, а и б показывает, что при первичном импульсе ток и напряжение совпадают по фазе, а при повторном импульсе ток отстает по фазе от напряжения на 80° . Это означает, что в первом случае проводимость лимитируется процессами рассеяния электронов, то есть плазма ведет себя как активное сопротивление. При повторном импульсе рассеяние электронов не играет существенной роли, и проводимость носит чисто индуктивный характер. Это может показаться удивительным, поскольку эксперимент проводился при атмосферном давлении, и, казалось бы, рассеяние электронов на молекулах воздуха должно в обоих случаях определять характер проводимости. Однако эксперимент показывает, что это не так. Связано это, по-видимому, с тем, что высокая температура и взрывная волна, образующаяся при разрушении волокна, приводит к стремительному расширению газа и выталкиванию молекул воздуха из области плазмы. Уменьшение количества вылетевших фрагментов в повторных импульсах является следствием строения углеродного волокна. В первом импульсе происходит разрушение аморфной полимерной оболочки, сопровождающееся вылетом большого количества фрагментов, для разрушения же кристаллитов карбонизированных волокон в повторных импульсах требуется значительно бóльшая энергия, и количество вылетевших фрагментов уменьшается.

Наблюдаемые различия описываются известной формулой для проводимости плазмы:

$$\sigma_p = \frac{e^2 n_e}{m(\nu + i\omega)}, \quad (1)$$

где e , m , n_e – заряд, масса и концентрации электронов в плазме; ν – частота столкновений электронов с частицами пылевой плазмы; ω – угловая (круговая) частота внешнего поля.

Малое количество рассеивающих центров в повторном импульсе приводит к выполнению условия $\nu \ll \omega$. В отсутствие рассеяния скорость электронов отстает по фазе от осциллирующего поля, что приводит к отставанию тока от напряжения. Проводимость плазмы в этом случае определяется выражением:

$$\sigma_p = \frac{e^2 n_e}{m\omega}. \quad (2)$$

Основываясь на формуле (2), можно получить оценку для концентрации электронов в плазме при повторных импульсах. Определенная по осциллограммам проводимость плазмы оказалась равной $\sigma = 400 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, а концентрация электронов в ней составила $n_e = 5 \times 10^{14} \text{ м}^{-3}$.

Синфазное изменение тока и напряжения, наблюдающееся в осциллограммах в первом импульсе, свидетельствует о том, что концентрация частиц в плазме велика и проводимость лимитируется процессами рассеяния электронов на них. В этом случае выполняется соотношение $\nu \gg \omega$, и проводимость принимает вид:

$$\sigma_p = \frac{e^2 n_e}{m\nu}. \quad (3)$$

Проводимость плазмы в первом импульсе можно вычислить из экспериментальных кривых тока и напряжения, и она оказывается равной $\sigma = 200 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$. Однако в данном случае дальнейшие исследования необходимы для того, чтобы получить надёжные количественные оценки параметров плазмы.

Заключение

В настоящей работе предложен простой способ создания плазмы из УВ, который, тем не менее, позволяет получить информацию о процессах, происходящих в волокне до образования плазмы, и в плазме после ее появления. Показано, что вследствие участия плазмы в проводимости, УВ способно выдержать многократное импульсное воздействие, оставаясь при этом неповрежденным. При первичном воздействии проводимость плазмы имеет омический характер, который меняется на индуктивный при последующих воздействиях. Из осциллограмм тока и напряжения вычислены значения проводимостей плазмы. Кроме того, получены оценки некоторых параметров

плазмы, таких как размеры плазменного шнура, температура, концентрация электронов в повторных импульсах.

Представленные результаты позволят целенаправленно изменять свойства системы «УВ-плазма» с целью оптимизации ее свойств для различных применений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ram R., Rahaman M., Aldalbahi A., Khastgir D. // Polym. Int. 2017. Vol. 66. No. 4. P. 573.
2. Macutkevic J., Kuzlur P., Paddubskaya A., Maksimenko S., Banys J., Celzard A., Fierro V., Bistarelli S., Cataldo A., Micciulla F., Bellucci S. // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 114. No. 3. P. 033707.
3. Cheah C. Y., Kaiser A. B. // Int. J. Nanotechnol. 2014. Vol. 11. No. 5/6/7/8. P. 412.
4. Taherian R., Ghorbani M. // J. Solid State Sci. Technol. 2017. Vol. 6. No. 6. P. M3019.

5. Li L., Liu L., Cheng G., Chang L., Wan H., Wen J. // Laser and Particle Beam. 2009. Vol. 27. No. 3. P. 511.
6. Li L., Liu L., Wan H., Xu Q., Cheng G., Wen J. // Appl. Surf. Sci. 2009. Vol. 255. No. 18. P. 8030.
7. Krasik Ya. E., Dunaevsky A., Felsteiner J. // Eur. Phys. J. D. 2001. Vol. 15. No. 3. P. 345.
8. Liu L., Li L., Xu Q., Cheng G., Chang L. // Chin. Phys. B. 2010. Vol. 19. No. 3. P. 032902.
9. Иванов К. Г., Щербаков А. П., Иванов Д. К. // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 47.
10. Иванов Д. К., Иванов К. Г., Урюпин О. Н. // ФТП. 2017. Т. 51. Вып. 7. С. 870.
11. Ribeiro M. C. S., Reis J. M. L., Fefreira A. J. M., Marques A. T. // Polymer Testing. 2003. Vol. 22. No. 8. P. 849.
12. Sheth C., Parekh B. R., Manocha L. M., Sheth P. // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2013. Vol. 2. No. 11. P. 5551.
13. Tkachenko S. L., Pikuz S. A., Romanova V. M., Ter-Oganesyan A. E., Mingaleev A. R., Shelkovenko T. A. // J. Phys D, Appl Phys. 2007. Vol. 40. No. 6. P. 1742.

PACS: 52.00.00.

Plasma formation around carbon fiber impulse current

L. A. Burkova, D. K. Ivanov, K. G. Ivanov, and A. P. Shcherbakov

Saint Petersburg State University of Industrial Technology and Design
18 Bolshaya Morskaya str., Saint Petersburg, 191186, Russia
E-mail: kivanov@mail.ru

Received May 17, 2018

The behavior of carbon fibers subjected to a high current pulse in the kiloampere range and duration ~250 μs was investigated. The sharp increase in temperature due to Joule heating results in the partial evaporation of fiber material. Ejected particles form dusty plasma with a low resistance. The plasma shunts the carbon fiber resistance preventing its complete destruction. The breakdown of composite dielectric matrix occurs during first shot, the plasma density turns out to be high, and the plasma conductivity defines by electron scattering on emitted particles. On further shots, the plasma density substantially decreases, and the current through the plasma accepts an inductive character. The obtained waveforms of voltage and current allow estimating the characteristics of the plasma formed during first and subsequent shots.

Keywords: carbon fiber, impulse current, conductivity, dusty plasma.

REFERENCES

1. R. Ram, M. Rahaman, A. Aldalbahi, et al. Polym. Int. **66**, 573 (2017).
2. J. Macutkevic, P. Kuzlur, A. Paddubskaya, et al. J. Appl. Phys. **114**, 033707 (2013).
3. C. Y. Cheah and A. B. Kaiser. Int. J. Nanotechnol. **11**, 412 (2014).
4. R. Taherian and M. Ghorbani. J. Solid State Sci. Technol. **6**, M3019 (2017).
5. L. Li, L. Liu, G. Cheng, et al. Laser and Particle Beam **27**, 511 (2009).
6. L. Li, L. Liu, H. Wan, et al. Appl. Surf. Sci. **255**, 8030 (2009).
7. Ya. E. Krasik, A. Dunaevsky, and J. Felsteiner. Eur. Phys. J. D. **15**, 345 (2001).
8. L. Liu, L. Li, Q. Xu, et al. Chin. Phys. B. **19**, 032902 (2010).
9. K. G. Ivanov, A. P. Shcherbakov, and D. K. Ivanov. Prikl. Fiz., No. 3, 47 (2015).
10. D. K. Ivanov, K. G. Ivanov, and O. N. Urupin. Semiconductors **51** (7), 870 (2017).
11. M. C. S. Ribeiro, J. M. L. Reis, A. J. M. Fefreira, et al. Polymer Testing. **22**, 849 (2003).
12. C. Sheth, B. R. Parekh, L. M. Manocha, et al. Int. J. Adv. Res. in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering **2**, 5551 (2013).
13. S. L. Tkachenko, S. A. Pikuz, and V. M. Romanova, J. Phys D, Appl Phys. **40**, 1742 (2007).