

УДК 621.3.014.33

Образование плазменного шнура углеродным волокном

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

Приведены результаты исследования электрической проводимости углеродных волокон (УВ) под воздействием импульсных токов. Показано, что импульсные токи через УВ, создают ионизированную плазму, шунтирующую сопротивление УВ образованием канала с высокой проводимостью вдоль волокна. Подобное явление может найти применение, например, для молниезащиты различных объектов.

РАС: 52.00.00

Ключевые слова: импульсные токи, плазма, ионизированный канал.

Введение

Механизм электровзрыва проводников достаточно широко используется в технике: получение плазмы высокой плотности, создание импульсов высокого давления, получение больших температур и многое другое.

Физические явления, возникающие при прохождении больших токов, все чаще используются для исследования различных материалов, подвергающихся их воздействию. Так, в работе [1] исследовано влияние импульсных токов на морфологию поверхности углеродных волокон (УВ). В работе [2] получены токовые характеристики и ресурс работы взрывоэмиссионного катода на основе УВ в импульсно-периодическом режиме при длительности импульса около 5 нс. Методом спекания импульсным электрическим током УВ с металлами получены композиты, состоящие из алюминия, меди и углерода и имеющие высокую теплопроводность [3]. Нанесение пленочных покрытий углерода на поверхности металлов и диэлектриков осуществлено электровзрывом УВ в работе [4].

Углеродные волокна имеют исключительно высокую термостойкость на воздухе до 720 К, а в инертных средах или в вакууме — до 3300 К. Так как сопротивление УВ с ростом температуры падает, то возникает вопрос, а именно, до каких

пределов будет наблюдаться уменьшение сопротивления.

Целью данной работы было исследование процессов, сопровождающих электровзрыв графитированных УВ марки Tenax^R HTS 5331. Отметим, что эти углеродные волокна по своим электрическим свойствам можно отнести к полупроводникам.

Установка

Для решения задач, вытекающих из поставленной цели, через УВ пропускались импульсные токи с амплитудным значением до десятков килоампер, которые могли давать кратковременный разогрев волокна до тысяч градусов. Испытания проводились на графитированном углеродном волокне (шнуре) в 800 текс (800 грамм волокна на километр длины).

Источником импульсного тока служила установка, подробно описанная в работе [5]. Пять импульсных конденсаторов типа ИМ-5 емкостью по 100 мкФ заряжались до напряжения от сотен вольт до 5 кВ (рис. 1). Замыкание цепи производилось экранированным искровым разрядником. Для получения многократных разрядов с одного и того же напряжения с разбросом в 3—5 вольт, что было необходимо в данной работе, использовалось специально изготовленное устройство.

Импульсные токи через УВ измерялись бифилярным токовым сопротивлением R6, напряжение с которого записывалось на запоминающем осциллографе С8-13. Сопротивление изготовлялось из мельхиоровой полосы, изогнутой пополам через фторопластовую прокладку толщиной 0,1 мм. Обжим с двух сторон препятствовал расхождению пластин под действием пондеромоторных сил, возникающих при прохождении импульсного тока в двух противоположных направлениях. Сопротивление R6 (рис. 1) изготовленного таким обра-

Иванов Константин Георгиевич, заведующий кафедрой.

Щербаков Александр Павлович, доцент.

Иванов Дмитрий Константинович, старший преподаватель.
Санкт-Петербургский государственный университет
технологии и дизайна.

Россия, 191186, Санкт-Петербург, Большая Морская, 18.

Тел.: 8 (812) 315-13-83, 8 (812) 315-15-56.

E-mail: Kivanov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2015 г.

© Иванов К. Г., Щербаков А. П., Иванов Д. К., 2015

зом шунта равнялось $(3,75 \pm 0,01)$ мОм. Бифилярная конструкция токового шунта имеет малое реактивное сопротивление в сравнении с активным. Расчет и измерения показали незначительный нагрев шунта при импульсных токах в десятки кА, которым можно в дальнейшем пренебречь. Сопоставление осциллографических измерений тока с измерениями импульсного магнитного поля интегратором показало их совпадение при пересчете значений поля на величину тока через импульсный соленоид [6].

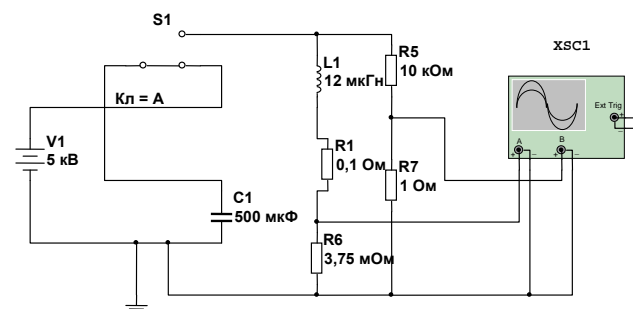


Рис. 1. Схема установки для исследования пропускания импульсных токов через углеродные волокна. Значения $L1$ и $R1$ имитируют комплексное сопротивление цепи импульсного разряда.

Напряжение, до которого заряжались импульсные конденсаторы $C1$, регулировалось от 0 до 5 кВ. Ключ A позволял запускать воздушный разрядник $S1$ с заданного напряжения с разбросом в несколько вольт.

Измерения и результаты

Эксперименты по пропусканию через УВ импульсных токов показали несоответствие в десятки раз их величины тем значениям, которые можно было бы оценить, исходя из закона Ома. Первая идея, почему это может быть, сводилась к мысли, что при разогреве волокна импульсным током его сопротивление очень сильно уменьшается. Для проверки этого положения через углеродное волокно пропускался постоянный ток, который можно было изменять, разогревая волокно до температуры свыше 1300 К в атмосфере азота.

На рис. 2 приведена зависимость сопротивления от тока двух УВ с различным начальным сопротивлением при комнатной температуре (8 и 5 Ом).

Экстраполяция степенным трендом (значение коэффициента аппроксимации близко к единице) на большие значения токов, а значит, на более высокие температуры, показывает снижение сопротивления на каждом из образцов приблизительно в 4 раза.

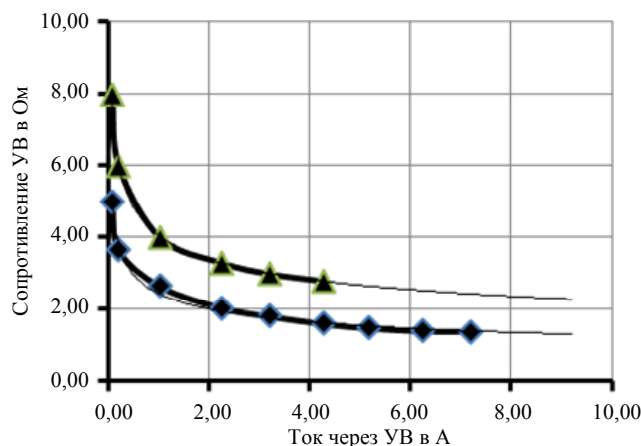


Рис. 2. Зависимость сопротивления двух углеродных волокон от величины постоянного тока

На аналогичные образцы УВ подавалось импульсное напряжение от 2 кВ и выше. На рис. 3 приведена фотография экрана осциллографа, на которой видна временная зависимость напряжения с токового сопротивления. Амплитудное значение тока для первого полупериода равно 10680 А. Длительность полупериода разряда составляет 0,1 мс. При напряжении разряда 2 кВ значения тока для экстраполированных величин сопротивления (из рис. 2) для $R = 1,5$ Ом составляет 1333 А. Это значительно меньше, чем измеренные амплитудные величины импульсных токов.

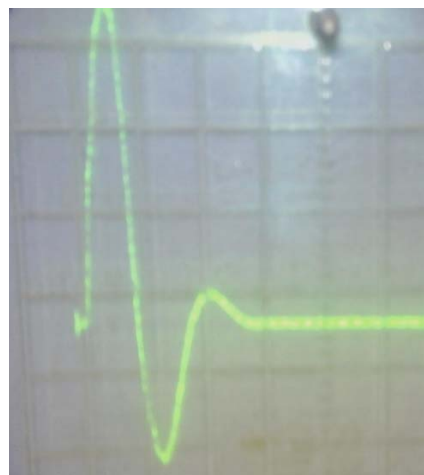


Рис. 3. Зависимость напряжения с токового сопротивления $R6$ от времени

Пластины белого полиэтилена, расположенные на разном расстоянии от УВ, приобретали после импульса тока зачерненные поверхности. Это позволило прийти к заключению, что во время разряда атомы углерода испаряются в окружающее пространство. При этом происходит их частичная ионизация (термоионизационный эффект [7]), которая шунтирует сопротивление волокна, уменьшая его сопротивление, чем, собственно, и объясняется значение больших импульсных токов.

Таблица

Амплитудные значения тока, сопротивление, масса и длина УВ

№ эксперимента	Максимальное напряжение на конденсаторах, В	Сопротивление УВ при комнатной температуре, Ом	Амплитудное значение тока разряда, А	Сопротивление при амплитудном значении тока, Ом	Длина волокна, см	Масса УВ, мг
1	2000	24	10680	0,19	2,0	9,7
2	2000	590	10680	0,19	2,0	0,4
3	2000	10	9345	0,21	17	174
4	2000	1549	10680	0,19	2,0	0,2
5	2500	8,0	14952	0,17	2,0	5,4
6	3000	8,6	17088	0,18	2,0	4,3
7	2000	$3,2 \cdot 10^{-5}$ Медная пластина	11481	0,17	2,0	Медная пластина

В пользу данной гипотезы говорит тот факт, что от начальных сопротивлений УВ, при комнатной температуре отличающихся в десятки и сотни раз, наблюдаемое в эксперименте амплитудное значение тока не зависит (см. таблицу). В третьей строке таблицы для УВ длиной 17 см амплитудное значение тока несколько уменьшилось, что можно связать со снижением температуры разогрева УВ, обусловленного большей массой волокна. Сопротивление плазменного канала вокруг волокна во время разряда должно быть очень мало, и амплитудное значение тока ограничивается комплексной суммой реактивного и активного сопротивлений используемой установки.

Из рис. 3 видно, что сопротивление цепи разряда конденсатора имеет активно-индуктивный характер, так как затухание тока не является строго аperiодическим. Экспериментальное определение активного и реактивного сопротивлений элементов опытной установки на практике осуществить сложно, поэтому возникла необходимость моде-

лирования процесса разряда, которое наиболее рационально проводить при помощи программы NIMultisim 12.

Моделирование

За исходные данные моделирования были приняты параметры осциллограммы процесса, полученные экспериментальным путем (рис. 3). При составлении схемы использованы следующие данные: величина емкости и максимальное напряжение заряда конденсаторов, частота колебательного процесса и его длительность.

Учет названных параметров позволил получить однозначные величины цепи разряда: $R1 = 0,1 \text{ Ом}$, $L1 = 12 \text{ мкГн}$. На рис. 4 приведены конечные результаты моделирования. Канал А демонстрирует волновую диаграмму тока через нагрузку, канал В — волновую диаграмму напряжения в мВ на нагрузке.

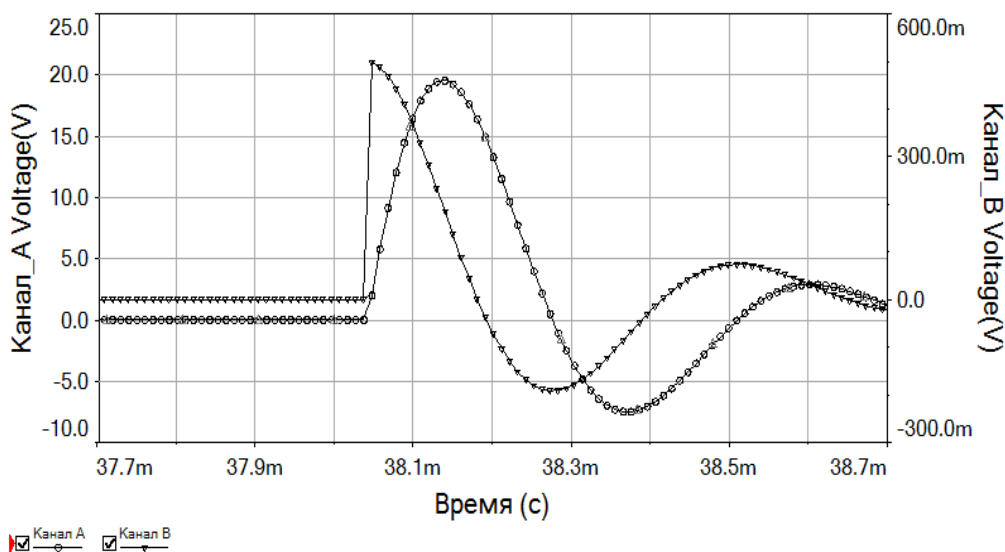


Рис. 4. Волновые диаграммы напряжения и тока на нагрузке, полученные при моделировании

Как видно из этого рисунка, характер изменения тока через нагрузку (канал А) повторяет форму линии экспериментальной зависимости напряжения с токового сопротивления, представленной на рис. 3. Попытка уменьшить индуктивность цепи разряда снижением длины плоских токоведущих шин установки не изменила период разряда. Из чего можно заключить, что основной вклад в указанный параметр вносит паразитная индуктивность конденсаторов.

Можно оценить температуру разогрева УВ исходя из закона сохранения энергии:

$$\Delta T = I_0^2 (R_k/4) (T/2)/c_{\text{ув}} m$$

где ΔT — изменение температуры УВ за время разряда, I_0 — действующее значение тока, R_k — сопротивление волокна при комнатной температуре, уменьшенное в 4 раза, исходя из экстраполяции рис. 2, T — период разряда (рис. 3), $c_{\text{ув}}$ — теплоемкость УВ, которая взята независимой от температуры, m — масса УВ. Подстановка значений сопротивления УВ $R_k = 24$ Ом, m и $(I_0)^2 = (I_a)^2/2$ амплитудного значения тока (из первой строки таблицы) в формулу дает величину температуры разогрева порядка 10^6 К. Подобные значения, конечно, не являются реальными из-за грубых допущений при расчете (не учитываются потери на излучение, неадиабатические условия и др.). Но главное — это уменьшение сопротивления, связанное с возникновением плазмы. Температуры в тысячи К кажутся вполне реальными для масс УВ на уровне в десятки миллиграмм. В пользу этого утверждения говорит и значение активного сопротивления в 0,1 Ом (R_1 на рис. 1), полученное из моделирования процесса разряда, а также амплитудные значения токов, указывающие на малое сопротивление УВ во время разряда.

Для прямого экспериментального подтверждения малости сопротивления УВ при прохождении импульсного тока вместо УВ между электродами была закреплена медная пластина (7 строка таблицы, сопротивление рассчитано). При этом амплитудное значение тока через медную пластину было не намного выше, чем на УВ при том же исходном напряжении. Этот результат указывает на то, что сопротивление УВ при разряде сопоставимо с очень малым сопротивлением медной пластины, что доказывает возникновение плазмы при прохождении импульсного тока через УВ.

Возможные варианты применения полученных в данной работе результатов

Как уже было сказано, подобные УВ-конструкции возможно использовать для молниезащиты и/или инициирования молний на расстояни-

ях, безопасных для электронного оборудования [8]. В отличие от металлических конструкций, они имеют гораздо меньшую массу, но достаточную прочность для длин в сотни и тысячи метров. Малая масса УВ дает возможность поднять шнур из него на большую высоту с помощью, например, шара, наполненного гелием и отделенного от УВ изоляционным подвесом, что позволит в случае угрозы молнии спровоцировать ее разряд на подобный громоотвод (молниеотвод).

Другой возможный вариант использования подразумевает создание плазменных антенн [9] для передачи информации средствами сверхбыстродействующей связи. Для передачи электромагнитного сигнала в километровом диапазоне длин волн необходима антенна подобного же размера. Её роль может выполнить шнур из УВ, поднятый над землей. Во время инициированного разряда сопротивление шнура может быть сравнимо с сопротивлением медного проводника. В этот короткодействующий токовый импульс можно ввести средствами быстродействующей связи необходимую информацию. Как известно, электромагнитные волны километрового диапазона распространяются на большие расстояния, огибая землю из-за дифракции, поэтому информация может быть передана в любую точку земного шара без использования спутников связи.

Также возможная область применения рассмотренного эффекта — создание длинно-искрового разрядника. Разрядный элемент на основе углеродных волокон может обеспечить большую длину импульсного перекрытия по поверхности защищаемого изделия и предотвратить переход импульсного перекрытия в силовую электрическую дугу. В настоящее время подобные разрядники (РДИ — разрядник длинно-искровой) [10] изготавливаются из металла.

Заключение

В работе показано, что углеродное волокно (УВ), разогретое большими импульсными токами, создает вдоль себя сильную ионизацию, что приводит к резкому падению активного сопротивления всей разрядной системы.

В отличие от всегда однократного электро взрыва тонких металлических проволочек, используемые графитированные УВ с площадью поперечного сечения в 1 мм^2 , как показали многочисленные эксперименты, выдерживали до 10 и более импульсов токов в десятки килоампер. Шунтирование плазмой волокна предохраняет его от разрушения. Испытания проводились на графитированном углеродном волокне (шнуре) в 800 текс (800 грамм волокна на километр длины. Марка волокна — Tenax^R HTS 5331).

Предполагается, что результаты исследований возникновения вдоль УВ плазменного шнура под действием сильных импульсных токов могут быть использованы для решения различных прикладных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Limin Li, Lie Liu, Hong Wanb, et al. // Applied Surface Science. 2009. V. 255. P. 8030.
2. Кутенков О. П., Пегель И. В., Тотменинов Е. М. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 5. С. 3.

3. Ueno Toshiyuki, Yoshioka Takashi, Ogawa Jin-ichi, et al. // Synthetic Metals. 2009. V. 159. Issues 21–22. P. 2170.
4. Иванов К. Г. // Журнал Дизайн. Материалы. Технология. 2013. № 3(28). С. 21.
5. Иванов К. Г., Зайцев А. А., Токарев В. В. // Вестник СПГУТД. 2009. № 1(16). С. 23.
6. Иванов К. Г., Кондаков О. В. ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 5. С. 543.
7. Зандберг Э. Я., Ионон Н. И. Поверхностная ионизация. — М.: Наука, 1969.
8. Базелян Э. М., Райзер Ю. П. // УФН. 2000. Т. 170. № 7. С. 753.
9. Сергейчев К. Ф., Карфидов Д. М. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 7. С. 1.
10. Интернет ресурс: <http://www.streamer.ru/lp>

Formation of a plasma filament along the carbon fiber

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

Saint-Petersburg State University of Technology and Design
18 Bol'shaya Morskaya, Saint-Petersburg, 191186, Russia
E-mail: Kivanov@mail.ru

Received April 1, 2015

Consideration is given to results of a research of an electrical conductivity of the carbon fibers (CF) under surge currents. It is shown that a surge current through CF forms an ionized plasma which shunts a carbon fiber resistance, protecting it from damage. The channel with a high conductivity is obtained along the fiber. This phenomenon can be applied, for example, for the lightning protection of various objects.

PACS: 52.00.00

Keywords: surge currents, plasma, ionized channel.

REFERENCES

1. Li Limin, Liu Lie, Wanb Hong, et al., Applied Surface Science **255**, 8030 (2009).
2. O. P. Kutenkov, I. V. Pegel', and E. M. Tot'meninin, Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Fizika **57** (5), 3 (2014).
3. Ueno Toshiyuki, Yoshioka Takashi, Ogawa Jin-ichi, et al, Synthetic Metals 2170 (2009).
4. K. G. Ivanov, Zhurn. Dizain. Mater. Tekhn., No. 3(28), 21 (2013).
5. K. G. Ivanov, A. A. Zaitsev, and V. V. Tokarev, Vestrik SPGUTD, No. 1(16), 23 (2009).
6. K. G. Ivanov and O. V. Kondakov, Semiconductors **37**, 543 (2003).
7. E. Ya. Zandberg and N. I. Ionov, *Surface Ionization* (Nauka, Moscow, 1969) [in Russian].
8. E. M. Bazelyan and Yu. P. Raizer, Phys. Usp. **170**, 753 (2000).
9. K. F. Sergeichev and D. M. Karfidov, Plasma Physics Reports **37**, 1 (2011).
10. <http://www.streamer.ru/lp>