

**ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА И ПРОВОДИМОСТЬ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ В ПЛАЗМЕННЫХ РАЗРЯДАХ ТОКАМАКА T-10****Г.А. Соколова, И.И. Архипов, Н.Ю. Свечников, С.А. Грашин**

Галина Анатольевна Соколова\*, Игорь Иванович Архипов

Институт Физической Химии и Электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, ИФХЭ РАН, Ленинский пр., 31-4, Москва, Российская Федерация, 119071

E-mail: gasokolina@gmail.com\*, igor\_arkhipov\_54@mail.ru

Николай Юрьевич Свечников, Сергей Анатольевич Грашин

Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт», пл. Академика Курчатова, 1, Москва, Российская Федерация, 123182

E-mail: Svechnikov47@mail.ru, Grashin\_SA@nrcki.ru

*В работе изучены аморфные углеводородные пленки на кремниевых подложках, полученные в камере токамака T-10, имеющего углеродные диафрагмы, пространственно ограничивающие дейтериевую плазму. С помощью методов спектрофотометрии, эллипсометрии, рентгеновской фотоэмиссионной и рентгеновской электронной оже-спектроскопии установлено, что коэффициенты преломления и поглощения пленок, а также параметры их электронной структуры, такие как величина запрещенной зоны, доля  $sp^2$ -гибридизированных атомов углерода и химический состав примесей зависят от характеристик разряда в токамаке. Показано, что осажденные пленки относятся к высокоомным диэлектрикам и могут быть разделены по оптическим свойствам на твердые или мягкие аморфные углеводородные пленки в зависимости от типа разряда токамака: импульсного рабочего разряда – для твердых пленок или длительного низкоэнергетического чистящего разряда – для мягких пленок. При этом проводимость твердых пленок меньше, чем мягких, что соответствует меньшей доле  $sp^2$ -состояний углерода и более высокой величине запрещенной зоны в этих пленках. Проведено измерение вольтамперных характеристик и температурной зависимости проводимости на постоянном токе для твердых и мягких пленок. Показано, что в интервале температур 293–550 К проводимость определяется механизмом прыжковой проводимости по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми и границ разрешенных зон. В пользу механизма прыжковой проводимости указывает также полученный при комнатной температуре степенной характер проводимости на переменном токе со значением показателя степени, близким к 0,8. Измерение вольтамперных характеристик и температурной зависимости проводимости твердых и мягких пленок показало существенное различие в энергии активации проводимости и величине проводимости при повышенной температуре. Установленные зависимости проводимости на постоянном токе и величины энергии активации от параметров разрядов могут быть использованы в качестве диагностических реперов различных типов плазменных разрядов в токамаке. Данные по электропроводности пленок анализируются в рамках представлений об электронной структуре аморфных некристаллических материалов.*

**Ключевые слова:** аморфные углеводородные пленки, токамак, плазменные разряды, электронная структура, коэффициенты преломления и поглощения, прыжковая проводимость, энергия активации проводимости

## ELECTRONIC STRUCTURE AND CONDUCTIVITY OF HYDROCARBON FILMS OBTAINED IN PLASMA DISCHARGES OF TOKAMAK T-10

G.A. Sokolina, I.I. Arkhipov, N.Yu. Svechnikov, S.A. Grashin

Galina A. Sokolina\*, Igor I. Arkhipov

A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of RAS, Leninsky ave., 31-4, Moscow, 119071, Russia

E-mail: gasokolina@gmail.com\*, igor\_arkhipov\_54@mail.ru

Nikolay Yu. Svechnikov, Sergey A. Grashin

National Research Center "Kurchatov Institute", Kurchatov sq., 1, Moscow, 123182, Russia

E-mail: Svechnikov47@mail.ru, Grashin\_SA@nrcki.ru

*Amorphous hydrocarbon films on silicon substrates obtained in the chamber of tokamak T-10 with space-bounded deuterium plasma by carbon diaphragms were studied. Using the methods of spectrophotometry, ellipsometry, X-ray photoemission spectroscopy and X-ray excited Auger electron spectroscopy, it was established that the refraction and absorption coefficients of films, as well as the parameters of the electronic structure such as the magnitude of the band gap, the fraction of  $sp^2$ -hybridized carbon and the chemical composition of impurities depend on the characteristics of the discharge in the tokamak. It is shown that the deposited films refer to high-resistance dielectrics, and they can be classified by optical properties as hard or soft amorphous hydrocarbon films, depending on the type of the plasma discharge (pulse working discharge or long-term low-energy cleaning discharge). Wherein, the conductivity of hard films is less than that of soft films, which corresponds to a smaller fraction of  $sp^2$ -states of carbon in these films and to a higher value of the band gap. The current-voltage characteristics and the temperature dependence of the direct current conductivity of hard and soft films were measured. It was shown that in the temperature range of 293–550 K, the conductivity is determined by the hopping conductivity mechanism over localized states near the Fermi level and the boundaries of the allowed bands. The hopping conductivity mechanism is also indicated by the power law obtained at room temperature at alternating current with a value of a power exponent close to 0.8. The measurement of the current-voltage characteristics and the temperature dependence of the conductivity of hard and soft films showed a significant difference in the activation energy of conductivity and the conductivity at an elevated temperature. The established dependences of the direct current conductivity and the activation energy value of the films on the discharge parameters can be used as diagnostic benchmarks of different types of plasma discharges in a tokamak. Data on the electrical conductivity of the films are analyzed within the framework of the concept of the electronic structure of amorphous non-crystalline materials.*

**Key words:** amorphous hydrocarbon films, tokamak, plasma discharges, electronic structure, refraction and absorption coefficients, hopping conductivity, conduction activation energy

### Для цитирования:

Соколина Г.А., Архипов И.И., Свечников Н.Ю., Грашин С.А. Электронная структура и проводимость углеводородных пленок, полученных в плазменных разрядах токамака Т-10. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 11. С. 81–87

### For citation:

Sokolina G.A., Arkhipov I.I., Svechnikov N.Yu., Grashin S.A. Electronic structure and conductivity of hydrocarbon films obtained in plasma discharges of tokamak T-10. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 11. P. 81–87

### ВВЕДЕНИЕ

Потребности науки, техники и медицины в более совершенных материалах инициируют проведение работ по созданию новых углеродных

соединений. Некоторые из них образуются в экстремальных условиях. К таким материалам можно отнести аморфные углеводородные пленки, обнаруженные на внутренних стенках вакуумной камеры отечественных и зарубежных термоядерных

установок – токамаков [1-4]. В этих устройствах создается высокотемпературная (как правило, дейтериевая) плазма, которая удерживается с помощью сильного магнитного поля и пространственно ограничена графитовыми диафрагмами. Последние подвергаются мощному тепловому воздействию (до 3,5 ГВт/м<sup>2</sup>) и бомбардировке потоками нейтральных атомов и заряженных частиц с энергиями до 1 кэВ, что приводит к физическому и химическому распылению графитовых материалов. Образующиеся продукты эрозии (атомы углерода и углеводородные радикалы) сосаждаются с атомарным водородом на стенках камеры и технологических каналов, находящихся вне прямого воздействия плазмы, образуя углеводородные пленки CD<sub>x</sub> с большим относительным содержанием дейтерия ( $x \sim 0,5$ ) [5-8].

Образование таких пленок может приводить к возникновению нежелательных эффектов. Так, осаждение проводящих пленок вызывает короткое замыкание между элементами конструкции камеры, а покрытие металлических поверхностей диэлектрическими пленками способствует накоплению статического заряда, и, как следствие, приводит к дугообразованию и срыву плазменного разряда. Несмотря на то, что многие физико-химические свойства пленок, полученных в токамаках, подробно изучены [9-20], сведений по их электрофизическим свойствам, которые связаны с электронной структурой, наличием примесей и дефектов, явно недостаточно [21-24]. В данной работе исследованы электронная структура и проводимость углеродно-дейтериевых пленок, осажденных в различных режимах работы токамака Т-10 [7] (НИЦ «Курчатовский институт»).

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Углеводородные пленки на подложках монокристаллического кремния получены в двух режимах работы токамака Т-10, имеющего графитовые диафрагмы. Первый, «рабочий» режим, относится к экспозиции образцов в пристеночной области дейтериевого импульсного ( $\approx 1$  с) разряда в сильном магнитном поле (2-2,4 Т). При этом периферийная плазма имеет следующие параметры: электронная плотность  $n_e = (0,01-1) \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>, энергия ионов и электронов  $T_{i,e} = 10-100$  эВ, тепловая нагрузка  $W = 2-20$  МВт/м<sup>2</sup>. Второй, «чистящий» режим, представляет собой индукционный низкочастотный (50 Гц) разряд в дейтериевой плазме с  $T_{i,e} = 0,5-3$  эВ, длительностью 4-6 ч и принудительным прогревом стенок камеры до температуры 500-550 К.

С помощью спектрофотометра Lambda 850 и эллипсометра Gaertner L119XUV с длиной волны 632,8 нм были определены значения коэффициента преломления  $n$ , поглощения  $k$  и толщины  $h$

пленок. В соответствии с общепринятой классификацией [9], пленки, полученные в рабочем режиме, были отнесены к так называемым «твердым» ( $n = 2,31$ ,  $k = 0,81$ ;  $\rho = 2,1$  г/см<sup>3</sup>;  $h = 150$  нм за, примерно, 200 импульсов), а в чистящем режиме к «мягким» ( $n = 1,58$ ,  $k = 0,00$ ,  $\rho = 1,2$  г/см<sup>3</sup>,  $h = 840$  нм за, примерно, 250 ч экспозиции) углеводородным пленкам.

При измерении вольтамперных характеристик (ВАХ) пленок использовался электрометрический усилитель с диапазоном токов  $10^{-4}-10^{-15}$  А. Для устранения тока утечек эксперименты проводились в вакууме 0,01 Па. Кроме того, при комнатной температуре для твердой пленки была измерена динамическая проводимость  $G_{ac}(f)$  на переменном напряжении в диапазоне частот  $f > 10^2-10^5$  Гц с использованием измерителя иммитанса У7-20.

Для изучения электрических свойств пленок использовался метод измерения температурной зависимости темновой статической проводимости  $G(T)$  в диапазоне температур 293-550 К. Зависимость  $G(T)$  была получена с использованием двухэлектродной схемы для образцов с контактами из аквадага в сэндвич структуре пленка – монокристаллическая кремниевая подложка. На основании анализа зависимости  $G(T)$  были определены значения величин энергии активации проводимости  $E_a$  в различных диапазонах температур и получена информация о возможном механизме транспорта носителей заряда в исследуемом материале.

С помощью рентгеновской фотоэлектронной (РФЭС) и рентгеновской электронной спектроскопии на спектрометре ESCA VG MICROLAB МК-II (энергия  $h\nu = 1486,6$  эВ) были получены данные о зонной структуре пленок. Эти результаты позволили оценить химический состав пленок, ширину запрещенной зоны  $E_g$  и соотношение гибридных состояний  $sp^2$  и  $sp^3$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основании проведенных экспериментов установлено, что вольтамперные характеристики (ВАХ) пленок имеют вид типичный для токов, ограниченных пространственным зарядом при инжекции носителей заряда в диэлектрик с ловушками, когда линейная зависимость тока от напряжения (омический участок) сменяется степенной зависимостью [25]. Для корректного измерения температурной зависимости статической проводимости  $G(T)$  использовался омический участок ВАХ.

Графики аррениусовских зависимостей  $\lg G(1/T)$  в интервале температур 293-550 К для твердых и мягких пленок представлены на рис. 1.

На рис. 1 видно, что  $G(T)$  носит активационный характер и может быть представлена суммой двух экспонент:

$$G(T) = G_{01} \exp(-E_{ан}/kT) + G_{02} \exp(-E_{ав}/kT),$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $G_{01}$  и  $G_{02}$  – константы.  $E_{ан}$  – энергия активации в диапазоне «низких» температур 293-400 К, а  $E_{ав}$  в диапазоне «высоких» температур 400-550 К.

В интервале температур 293-400 К для обоих типов пленок энергии активации  $E_{ан}$  оказались одинаковы и равны  $0,11 \pm 0,02$  эВ. В области температур 400-550 К энергии активации  $E_{ав}$  различаются, составляя  $0,97 \pm 0,02$  эВ и  $0,33 \pm 0,02$  эВ для твердых и мягких пленок, соответственно.

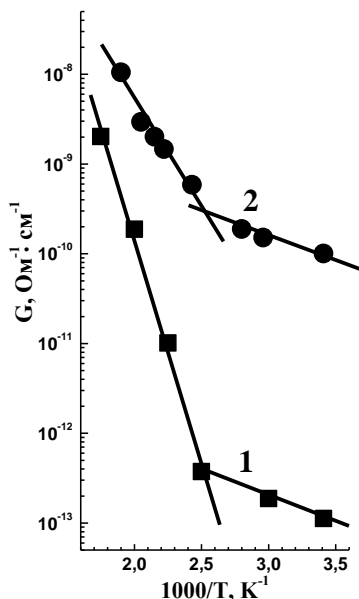


Рис. 1. Температурная зависимость проводимости  $\lg G(1/T)$  для твердой (1) и мягкой (2) углеводородных пленок в интервале температур 293–550 К

Fig. 1. Temperature dependence of conductivity  $\lg G(1/T)$  for hard (1) and soft (2) hydrocarbon films in the temperature range of 293–550 К

Определенные величины удельных сопротивлений при 293 К составляют  $10^{12}$ - $10^{13}$  Ом·см для твердых и  $10^9$ - $10^{10}$  Ом·см для мягких пленок, что позволяет отнести оба типа аморфных углеводородных пленок, полученных в токамаке, к высокоомным диэлектрикам.

Приведенные результаты исследования проводимости твердых и мягких пленок согласуются с особенностями их электронной структуры, изученной с помощью РФЭС и рентгеновской оже-спектроскопии.

На рис. 2 а представлены спектры РФЭС валентной зоны (ВЗ) обоих типов пленок в области энергий связи  $E_{св} = 0-30$  эВ. Оценка величины запрещенной зоны  $E_g$  была проведена по наклону касательной к краю ВЗ до пересечения с осью абсцисс, как показано на рис. 2 б.

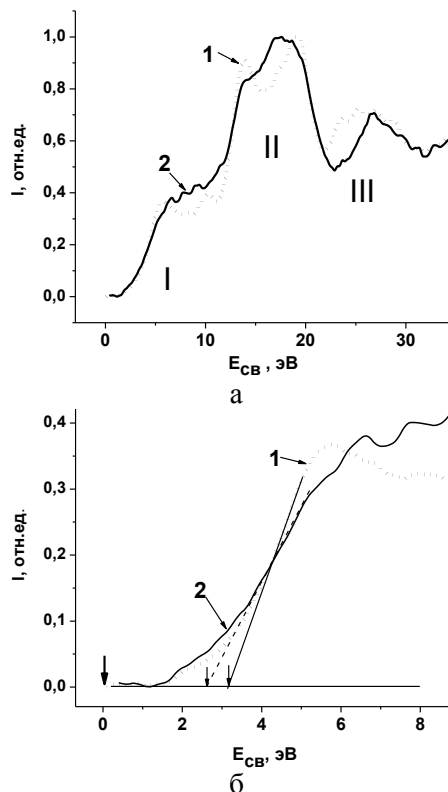


Рис. 2. а) Спектры валентной зоны пленок, нормированные на максимум интенсивности, с указанием основных электронных состояний: область I = C2p+O2p, II = C2s, III = O2s; 1– твердая пленка (пунктирная линия), 2 – мягкая пленка (сплошная линия). б) Фрагмент края спектра ВЗ с указанием величины запрещенной зоны для твердой и мягкой пленок по наклону касательной (2 маленькие стрелки). Уровень Ферми, где  $E_{св} = 0$ , отмечен большой стрелкой

Fig. 2. а) The valence band spectra of the films, normalized to a maximum of intensity, indicating the main electronic states: the region I = C2p + O2p, II = C2s, III = O2s; 1– solid film (dashed line), 2 – soft film (solid line). б) fragment of the VB spectrum edge with an estimate of the band gap for these films from the slope of the tangent (2 small arrows). The Fermi level, where  $E_{св} = 0$ , is marked by a large arrow

На рис. 2 видно присутствие плотности электронных состояний в хвостах валентной зоны и внутрizonных состояний, то есть, наличие дефектных и примесных состояний внутри  $E_g$  и вблизи уровня Ферми, которые участвуют в проводимости пленок. Найденные из рис. 2 величины  $E_g$  составляют:  $E_g(1) = 3,12 \pm 0,04$  эВ,  $E_g(2) = 2,40 \pm 0,05$  эВ для твердых и мягких пленок, соответственно. При этом доли графитоподобных  $sp^2$ -гибридизированных атомов углерода, полученные из спектров рентгеновской оже-спектроскопии (не приведено), составляют:  $sp^2 = 14 \pm 1\%$  и  $sp^2 = 38 \pm 1\%$  для твердых и мягких пленок, соответственно (при условии, что  $sp^1 = 0$ , а  $sp^2 + sp^3 = 100\%$ ). Таким образом, чем меньше доля  $sp^2$ -состояний, тем ниже проводимость и тем больше величина  $E_g$ , что подтверждается данными работы [20]. Кроме того, с помощью РФЭС обнаружено, что в составе

твердой пленки присутствует небольшое (менее 0,1 ат.%) количество примесей d-металлов (Cr и Mn), источником которых может быть стенка камеры токамака, изготовленная из нержавеющей стали. Полученные результаты свидетельствуют о том, что условия формирования аморфных  $CD_x$  пленок, имея в виду тип и параметры плазменного разряда, оказывают существенное влияние на электронную структуру и связанную с ней величину проводимости, а также на энергию активации проводимости.

Данные по проводимости  $G(T)$  обычно анализируются в рамках представлений о зонной структуре аморфных материалов, развитых Моттом и Дэвисом [26]. В них разрешенные зоны с делокализованными состояниями (валентная зона  $E_v$  и зона проводимости  $E_c$ ), как и в кристаллических материалах, разделены запрещенной зоной  $E_g$ , в которой из-за разупорядоченности системы возникают локализованные состояния у границ разрешенных зон (хвосты плотности состояний) и локализованные состояния возле уровня Ферми. На рис. 3 показано распределение плотности состояний  $N(E)$ , которое наиболее часто используется для некристаллических материалов. Обозначены три механизма проводимости, которые проявляются в различных интервалах температур и имеют различные значения энергий активации для  $G$ : проводимость по разрешенным зонам  $G_1$ , прыжковая проводимость в хвостах плотности состояний  $G_2$  и прыжковая проводимость  $G_3$  по состояниям возле уровня Ферми.

Обычно в качестве критерия при выборе реализуемого механизма транспорта носителей заряда используют данные по частотной зависимости проводимости  $G_{ac}(f)$  на переменном напряжении. При этом исходят из того, что величина  $G_1$  не зависит от частоты (вплоть до  $f > 10^8$  Гц), тогда как  $G_2$  и  $G_3$ , происходящие за счет прыжков между локализованными состояниями, меняются с частотой по степенному закону  $G_{ac}(f) \sim f^s$ , где  $s \approx 0,8$  [25]. В данной работе, при комнатной температуре для твердой пленки была измерена динамическая проводимость  $G_{ac}(f)$  на переменном напряжении в диапазоне частот  $f > 10^2-10^5$  Гц. Полученный степенной характер  $G_{ac} \sim f^{0,75}$  со значением  $s$ , близким к 0,8, свидетельствует в пользу механизма прыжковой проводимости. Можно предположить, что полученные значения величин энергий активации относятся к проводимости в хвостах плотности локализованных состояний  $G_2$  и прыжковой проводимости  $G_3$  по локализованным состояниям возле уровня Ферми. В работе [9] показано, что эти состояния формируются  $\pi$ -орбиталями в  $sp^2$ -связях.

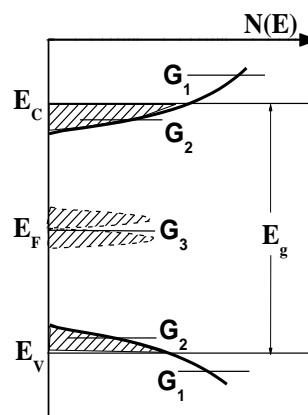


Рис. 3. Распределение плотности состояний  $N(E)$  в модели Мотта и Дэвиса [26], которое можно использовать для описания проводимости исследуемых аморфных пленок  $CD_x$ . Локализованные состояния заштрихованы. Показаны области состояний, определяющие проводимости  $G_1$ ,  $G_2$  и  $G_3$

Fig. 3. The density of states distribution  $N(E)$  in the Mott and Davis model [26], which can be used to describe the conductivity of the  $CD_x$  films under investigation. The localized states are shaded. The regions of states determining the conductivities  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  are indicated

Поскольку для активации носителей в хвосты плотности локализованных состояний необходима энергия значительно больше, чем у состояний возле уровня Ферми [26], можно сделать вывод о том, что  $E_{ав}$  характеризует проводимость  $G_2$ , а  $E_{ан}$  – проводимость  $G_3$ .

Одинаковые значения энергий активации проводимости  $E_{ан}$  для твердых и мягких пленок при 293-400 К (0,11 эВ) свидетельствуют о наличии в пленках одноподобных дефектов, не зависящих от параметров разряда. Различие энергий активации  $E_{ав}$  при  $T = 400-550$  К (0,97 эВ для твердой и 0,33 эВ для мягкой пленки, соответственно) может быть связано с тем, что формирование этих более глубоких состояний зависит от режима работы токамака. Поэтому зависимости  $G$  и  $E_a$  пленок от типа разряда могут быть использованы в качестве диагностического репера для определения типа и параметров плазменных разрядов в токамаке.

#### ВЫВОДЫ

В плазменных разрядах токамака Т-10 с графитовыми диафрагмами получены твердые и мягкие углеродно-дейтериевые пленки  $CD_x$  ( $x \sim 0,5$ ).

Показано, что оба типа пленок относятся к высокоомным диэлектрическим материалам, проводимость которых в диапазоне температур 293-550 К определяется механизмом прыжковой проводимости по локализованным состояниям внутри запрещенной зоны.

Для твердых и мягких пленок определены соотношения концентраций  $sp^2 - sp^3$  углеродных связей, которые зависят от режима работы токамака Т-10 и которые определяют величину запрещенной зоны  $E_g$ , величину проводимости  $G$ , а также энергию активации пленок  $E_a$ .

Полученные значения ширины запрещенной зоны  $E_g$  и величины проводимости  $G$  пленок также определяются режимом работы токамака T-10. Указанные характеристики могут быть использованы в качестве диагностического репера при определении типа и параметров плазменных разрядов в токамаках.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Hino T., Yoshida H., Akiba M., Suzuki S., Hirohata Y., Yamauchi Y., Nakamura K.** Deuterium retention in carbon flakes and tungsten-carbon mixed flakes produced by deuterium arc discharge. *Nuclear Fusion*. 2005. V. 45. P. 894–899. DOI: 10.1088/0029-5515/45/8/017.
2. **Roth J., Tsitrone E., Loarte A., Kukushkin A.S.** Recent analysis of key plasma wall interactions issues for ITER. *J. Nucl. Mater.* 2009. V. 390–391. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2009.01.037.
3. **Kirschner A.** Erosion and deposition mechanisms in fusion plasmas. *Trans. Fusion Sci. Technol.* 2012. V. 61. P. 230–245. DOI: 10.13182/FST12-A13510.
4. **Kolbasov B.N., Romanov P.V., Guseva M.I., Khripunov B.I., Stankevich V.G., Svechnikov N.Yu., Zimin A.M.** Some recent Russian studies of hydrogen isotope retention in plasma facing materials. *Plasma Devices and Operations*. 2006. V. 14. N 4. P. 303–321. DOI: 10.1080/10519990600975614.
5. **Kolbasov B.N., Stankevich V.G., Svechnikov N.Yu., Lebedev A.M., Menshikov K.A., Rajarathnam D., Somenkov V.A., Trunova V.A., Veligzhanin A.A., Zubavichus Y.V.** Studies of nanostructures formed in T-10 tokamak. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2011. V. 23. P. 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/23/1/012008.
6. **Svechnikov N.Yu., Stankevich V.G., Sukhanov L.P., Menshikov K.A., Lebedev A.M., Kolbasov B.N., Zubavichus Y.V., Rajarathnam D.** Investigations of adsorption states of protium and deuterium in redeposited carbon flakes formed in tokamak T-10. *J. Nucl. Mater.* 2008. V. 376. N 2. P. 152–159. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2008.02.072.
7. **Krauz V.I., Martynenko Yu.V., Svechnikov N.Yu., Smirnov V.P., Stankevich V.G., Khimchenko L.N.** Nanostructures in controlled thermonuclear fusion devices. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2010. V. 53. N 6. P. 1015–1038. DOI: 10.3367/UFNr.0180.201010c.1055.
8. **Arkhipov I., Klimov N., Svechnikov N., Grashin S., Vukolov K., Budaev V., Maslakov K., Stankevich V., Zhitlukhin A., Kovalenko D., Podkovirov V.** Experimental study of contamination and cleaning of in-vessel mirrors for ITER optical diagnostics on T-10 and QSPA-T facilities. *J. Nucl. Mater.* 2013. V. 438. P. 1160–1170. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.01.256.
9. **Robertson J.** Diamond-like amorphous carbon. *Mater. Sci. Eng.* 2002. R 37. P. 129–281.
10. **Liao X., Zhang X., Takai K., Enoki T.** Electric field induced  $sp^3$ -to- $sp^2$  conversion and nonlinear electron transport in iron-doped diamond-like carbon thin film. *J. Appl. Phys.* 2010. V. 107. N 1. P. 013709. DOI: 10.1063/1.3280037.
11. **Pardanaud C., Aréou E., Martin C., Ruffe R., Angot T., Roubin P., Hopf C., Schwarz-Selinger T., Jacob W.** Raman micro-spectroscopy as a tool to measure the absorption coefficient and the erosion rate of hydrogenated amorphous carbon films heat-treated under hydrogen bombardment. *Diam. Related Mater.* 2012. V. 22. P. 92–95. DOI: 10.1016/j.diamond.2011.12.015.
12. **Sedlovets D.M., Red'kin A.N., Korepanov V.I., Trofimov O.V.** Electrical conductivity and optical properties of thin carbon films grown from ethanol vapor. *Inorg. Mater.* 2012. V. 48. P. 34–39. DOI: 10.1134/S0020168511120168.

Работа выполнена при поддержке Росатома, договор № 1/15470-Д/230/1040-18.

Статья издана при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-03-20012.

#### REFERENCES

1. **Hino T., Yoshida H., Akiba M., Suzuki S., Hirohata Y., Yamauchi Y., Nakamura K.** Deuterium retention in carbon flakes and tungsten-carbon mixed flakes produced by deuterium arc discharge. *Nuclear Fusion*. 2005. V. 45. P. 894–899. DOI: 10.1088/0029-5515/45/8/017.
2. **Roth J., Tsitrone E., Loarte A., Kukushkin A.S.** Recent analysis of key plasma wall interactions issues for ITER. *J. Nucl. Mater.* 2009. V. 390–391. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2009.01.037.
3. **Kirschner A.** Erosion and deposition mechanisms in fusion plasmas. *Trans. Fusion Sci. Technol.* 2012. V. 61. P. 230–245. DOI: 10.13182/FST12-A13510.
4. **Kolbasov B.N., Romanov P.V., Guseva M.I., Khripunov B.I., Stankevich V.G., Svechnikov N.Yu., Zimin A.M.** Some recent Russian studies of hydrogen isotope retention in plasma facing materials. *Plasma Devices and Operations*. 2006. V. 14. N 4. P. 303–321. DOI: 10.1080/10519990600975614.
5. **Kolbasov B.N., Stankevich V.G., Svechnikov N.Yu., Lebedev A.M., Menshikov K.A., Rajarathnam D., Somenkov V.A., Trunova V.A., Veligzhanin A.A., Zubavichus Y.V.** Studies of nanostructures formed in T-10 tokamak. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2011. V. 23. P. 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/23/1/012008.
6. **Svechnikov N.Yu., Stankevich V.G., Sukhanov L.P., Menshikov K.A., Lebedev A.M., Kolbasov B.N., Zubavichus Y.V., Rajarathnam D.** Investigations of adsorption states of protium and deuterium in redeposited carbon flakes formed in tokamak T-10. *J. Nucl. Mater.* 2008. V. 376. N 2. P. 152–159. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2008.02.072.
7. **Krauz V.I., Martynenko Yu.V., Svechnikov N.Yu., Smirnov V.P., Stankevich V.G., Khimchenko L.N.** Nanostructures in controlled thermonuclear fusion devices. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2010. V. 53. N 6. P. 1015–1038. DOI: 10.3367/UFNr.0180.201010c.1055.
8. **Arkhipov I., Klimov N., Svechnikov N., Grashin S., Vukolov K., Budaev V., Maslakov K., Stankevich V., Zhitlukhin A., Kovalenko D., Podkovirov V.** Experimental study of contamination and cleaning of in-vessel mirrors for ITER optical diagnostics on T-10 and QSPA-T facilities. *J. Nucl. Mater.* 2013. V. 438. P. 1160–1170. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.01.256.
9. **Robertson J.** Diamond-like amorphous carbon. *Mater. Sci. Eng.* 2002. R 37. P. 129–281.
10. **Liao X., Zhang X., Takai K., Enoki T.** Electric field induced  $sp^3$ -to- $sp^2$  conversion and nonlinear electron transport in iron-doped diamond-like carbon thin film. *J. Appl. Phys.* 2010. V. 107. N 1. P. 013709. DOI: 10.1063/1.3280037.
11. **Pardanaud C., Aréou E., Martin C., Ruffe R., Angot T., Roubin P., Hopf C., Schwarz-Selinger T., Jacob W.** Raman micro-spectroscopy as a tool to measure the absorption coefficient and the erosion rate of hydrogenated amorphous carbon films heat-treated under hydrogen bombardment. *Diam. Related Mater.* 2012. V. 22. P. 92–95. DOI: 10.1016/j.diamond.2011.12.015.
12. **Sedlovets D.M., Red'kin A.N., Korepanov V.I., Trofimov O.V.** Electrical conductivity and optical properties of thin carbon films grown from ethanol vapor. *Inorg. Mater.* 2012. V. 48. P. 34–39. DOI: 10.1134/S0020168511120168.

13. Neeraj Dwivedia, Sushil Kumara, Careyc J.D., Hitendra K. Malikk, Govinda. Photoconductivity and Characterization of Nitrogen Incorporated Hydrogenated Amorphous Carbon Thin Films. *J. Appl. Phys.* 2012. V. 112. P. 113706. DOI: 10.1063/1.4768286.
14. Vadali V.S.S. Srikanth, P. Sampath Kumar, Vijay Bhooshan Kumar. A Brief Review on the In situ synthesis of boron-doped diamond thin films. *Internat. J. Electrochem.* 2011. V. 2012. Article ID 218393. 7 p. DOI: 10.1155/2012/218393.
15. Heon Woong Choi, Reinhold H. Dauskardt, Seung-Cheol Lee. Characteristic of silver doped DLC films on surface properties and protein adsorption. *Diamond Related Mater.* 2008. V. 17. P. 252–257. DOI: 10.1016/j.diamond.2007.12.034.
16. Wei Dai, Aiyang Wang. Synthesis, characterization and properties of the DLC films with low Cr concentration doping by a hybrid linear ion beam system. *Surf. Coat. Technol.* 2011. V. 205. P. 2882–2886. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.10.057.
17. Svechnikov N.Yu., Stankevich V.G., Sukhanov L.P., Lebedev A.M., Menshikov K.A. Detection of the Iron Impurity in CDx Films Formed in the T-10 Tokamak and its Influence on the  $sp^3 \rightarrow sp^2$  Conversion. *J. Surf. Investig. X-ray, Synch. Neut. Techniq.* 2015. V. 9. N 6. P. 1221–1227. DOI: 10.1134/S1027451015060397.
18. Svechnikov N.Yu., Stankevich V.G., Lebedev A.M., Sukhanov L.P., Menshikov K.A. EPR and photoluminescence spectra of smooth CDx films from T-10 Tokamak: The effect of iron impurity. *J. Surf. Investig. X-ray, Synch. Neut. Techniq.* 2016. V. 10. N 1. P. 23–34. DOI: 10.1134/S1027451016010183.
19. Свечников Н.Ю., Станкевич В.Г., Архипов И.И., Грашин С.А., Маслаков К.И., Лебедев А.М., Суханов Л.П., Меньшиков К.А. Исследование электронной структуры углеводородных пленок, полученных в контролируемых плазменных условиях токамака Т-10. *ВАНТ. Сер. Термоядер. синтез.* 2012. Вып. 3. С. 3–18.
20. Свечников Н.Ю., Станкевич В.Г., Колбасов Б.Н., Зубавичус Я.В., Велигжанин А.А., Соменков В.А., Суханов Л.П., Лебедев А.М., Меньшиков К.А. Кластерная структура аморфных гладких углеводородных пленок CDx ( $x \sim 0.5$ ) из токамака Т-10. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 12. С. 3–11. DOI: 10.7868/S0207352817120010.
21. Bruzzi M., Piseri P., Miglio S., Bongiorno G., Barborini E., Ducati C., Robertson J., Milani P. Electrical conduction in nanostructured carbon and carbon-metal films grown by supersonic cluster beam deposition. *Europ. Phys. J. B.* 2003. V. 36. P. 3–13. DOI: 10.1140/epjb/e2003-00311-4.
22. Xiaoyan Wang, Yuqing Zhao. Study of electrical conductivity and microcosmic structure of tetrahedral amorphous carbon films doped by boron. *Advan. Mater. Sci. Eng.* 2015. V. 2015. Article ID 727285. 6 p. DOI: 10.1155/2015/727285.
23. Sikora A., Paolino P., Ftouni H., Guerret-Piécourt C., Garden J.-L., Loir A.-S., Garrelie F., Donnet C., Bourgeois O. Depth-dependence of electrical conductivity of diamondlike carbon films. *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. P. 16211.1. DOI: 10.1063/1.340767.
24. Georgakilas V., Koutsoukis A., Petr M., Tucek J., Zboril R. Remarkable enhancement of the electrical conductivity of carbon nanostructured thin films after compression. *Nanoscale.* 2016. V. 8. P. 11413. DOI: 10.1039/c5nr09025c.
25. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М.: МИР. 1973. 413 с.
26. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: МИР. 1982. 664 с.
13. Neeraj Dwivedia, Sushil Kumara, Careyc J.D., Hitendra K. Malikk, Govinda. Photoconductivity and Characterization of Nitrogen Incorporated Hydrogenated Amorphous Carbon Thin Films. *J. Appl. Phys.* 2012. V. 112. P. 113706. DOI: 10.1063/1.4768286.
14. Vadali V.S.S. Srikanth, P. Sampath Kumar, Vijay Bhooshan Kumar. A Brief Review on the In situ synthesis of boron-doped diamond thin films. *Internat. J. Electrochem.* 2011. V. 2012. Article ID 218393. 7 p. DOI: 10.1155/2012/218393.
15. Heon Woong Choi, Reinhold H. Dauskardt, Seung-Cheol Lee. Characteristic of silver doped DLC films on surface properties and protein adsorption. *Diamond Related Mater.* 2008. V. 17. P. 252–257. DOI: 10.1016/j.diamond.2007.12.034.
16. Wei Dai, Aiyang Wang. Synthesis, characterization and properties of the DLC films with low Cr concentration doping by a hybrid linear ion beam system. *Surf. Coat. Technol.* 2011. V. 205. P. 2882–2886. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.10.057.
17. Svechnikov N.Yu., Stankevich V.G., Sukhanov L.P., Lebedev A.M., Menshikov K.A. Detection of the Iron Impurity in CDx Films Formed in the T-10 Tokamak and its Influence on the  $sp^3 \rightarrow sp^2$  Conversion. *J. Surf. Investig. X-ray, Synch. Neut. Techniq.* 2015. V. 9. N 6. P. 1221–1227. DOI: 10.1134/S1027451015060397.
18. Svechnikov N.Yu., Stankevich V.G., Lebedev A.M., Sukhanov L.P., Menshikov K.A. EPR and photoluminescence spectra of smooth CDx films from T-10 Tokamak: The effect of iron impurity. *J. Surf. Investig. X-ray, Synch. Neut. Techniq.* 2016. V. 10. N 1. P. 23–34. DOI: 10.1134/S1027451016010183.
19. Svechnikov N.Yu., Stankevich V.G., Arkhipov I.I., Grashin S.A., Maslakov K.I., Lebedev A.M., Sukhanov L.P., Menshikov K.A. Electronic structure investigations of hydrocarbon films obtained in controllable conditions of the tokamak T-10. *VANT. Ser. Termoyader. sintez.* 2012. N 3. P. 3–18 (in Russian).
20. Svechnikov N.Yu., Stankevich V.G., Kolbasov B. N., Zubavichus Y.V., Veligzhanin A.A., Somenkov V.A., Sukhanov L.P., Lebedev A.M., Sukhanov L.P., Menshikov K.A. Cluster-type structure of amorphous smooth hydrocarbon CDx films ( $x \sim 0.5$ ) from T-10 Tokamak. *J. Surf. Investig. X-ray, Synch. Neut. Techniq.* 2017. V. 11. N 6. P. 1208–1215. DOI: 10.1134/S1027451017060349.
21. Bruzzi M., Piseri P., Miglio S., Bongiorno G., Barborini E., Ducati C., Robertson J., Milani P. Electrical conduction in nanostructured carbon and carbon-metal films grown by supersonic cluster beam deposition. *Europ. Phys. J. B.* 2003. V. 36. P. 3–13. DOI: 10.1140/epjb/e2003-00311-4.
22. Xiaoyan Wang, Yuqing Zhao. Study of electrical conductivity and microcosmic structure of tetrahedral amorphous carbon films doped by boron. *Advan. Mater. Sci. Eng.* 2015. V. 2015. Article ID 727285. 6 p. DOI: 10.1155/2015/727285.
23. Sikora A., Paolino P., Ftouni H., Guerret-Piécourt C., Garden J.-L., Loir A.-S., Garrelie F., Donnet C., Bourgeois O. Depth-dependence of electrical conductivity of diamondlike carbon films. *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 96. P. 16211.1. DOI: 10.1063/1.340767.
24. Georgakilas V., Koutsoukis A., Petr M., Tucek J., Zboril R. Remarkable enhancement of the electrical conductivity of carbon nanostructured thin films after compression. *Nanoscale.* 2016. V. 8. P. 11413. DOI: 10.1039/c5nr09025c.
25. Lampert M., Mark P. Current injection in solids. М.: Mir. 1973. 413 p. (in Russian).
26. Mott N.F., Davis E.A. Electron processes in non-crystalline materials. М.: Mir. 1982. 664 p. (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 15.06.2018

Принята к опубликованию (Accepted) 08.10.2018