

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики

наименование кафедры

**Теоретическое прогнозирование эмиссионных свойств  
функционализированного стеклоуглерода на основе фуллерен-графеновой  
атомистической модели**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента(ки) 4 курса 422 группы

направления (специальности) 03.03.03 Радиофизика

код и наименование направления (специальности)

физического факультета

наименование факультета, института, колледжа

Зыкина Артема Александровича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

зав.кафедры, д.ф.-м. н., проф. Глухова О.Е.

должность, учёная степень, звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Зав.кафедрой

зав.кафедры, д.ф.-м. н., проф. Глухова О.Е.

должность, учёная степень, звание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саратов 2017

**Введение.** Актуальность данной работы заключается в разработке методов улучшения характеристик матричных автоэмиссионных катодов изготовленных из стеклоуглерода. А именно снижение работы выхода материала путём его функционализации, а также оценка увеличения работы выхода при его окислении.

Исследование состоит в теоретическом прогнозировании эмиссионных свойств данного материала с привлечением молекулярно-динамических методов моделирования конденсированных сред для построения атомистической модели структуры материала. Для расчёта электронных свойств были использованы полуэмпирические методы квантовой химии.

Работа состоит из введения, двух разделов, заключения и списка используемых источников. Во введении обосновывается актуальность работы и формулируется научная новизна, а также приводится выбор методов, при помощи которых проводилось исследование. В разделе «Методы и подходы, применяемые в данной работе» описывается суть методов и приближений используемых при расчёте, основные формулы и их получение. В следующем разделе «Исследование эмиссионных свойств стеклоуглерода» описывается методика построения атомистической модели стеклоуглерода для дальнейшего её использования в расчёте зонной структуры материала, после чего описывается сам процесс расчёта зонной структуры и других эмиссионных свойств материала на её основе. В заключение обобщается актуальность и выводы по результатам исследования.

**Основное содержание работы.** В нынешнее время, одним из перспективных материалов для изготовления матричных автоэмиссионных катодов является стеклоуглерод. Он представляет из себя неграфитизированный аморфный углерод [1]. Этот материал полностью соответствует современным требованиям к автоэмиссионным эмиттерам, а именно отличается плотностью тока эмитированных электронов в  $10^9$  А/см<sup>2</sup> и выше, а также высокой стабильностью при пандеромоторных нагрузках до нескольких кг/см<sup>2</sup> [2].

Одним из основных показателей эмиссионных свойств эмиттера является работа выхода материала, из которого он изготовлен. Для разных аллотропных модификаций углерода эта величина колеблется в пределах 4.6 - 4.7 эВ [3–5]. Вместе с этим возможности стеклоуглерода не исчерпаны. В

достаточной мере не была исследована возможность функционализации этого материала. Например, внесение примесей щелочных элементов, таких как калий. С другой стороны, остаётся малоизученным влияние окисления на эмиссию из стеклоглерода, в то время как, кислород в малых концентрациях присутствует в виде остаточных газов на различных этапах изготовления и сборки электровакуумных приборов.

Целью данного исследования является расчёт эмиссионных свойств стеклоглерода при его функционализации такими элементами, как калий и кислород. В связи с этим возникает квантово-химическая задача на построение зонной диаграммы функционализированного материала и расчёт уровня Ферми. В силу того, что в рамках квантово-химического подхода необходимо знание атомистической структуры вещества, встаёт задача о построении таковой для стеклоглерода.

Метод молекулярной динамики позволяет рассчитывать классические траектории отдельных атомов и атомных систем. Она обладает высокой степенью масштабируемости как во времени, так и по количеству моделируемых частиц. В рамках данной модели атомистическая система представляет собой набор материальных точек, которым приписываются некоторые свойства химических элементов, которые они представляют. Для системы, состоящей из  $N$  частиц можно записать уравнение движения в следующем виде:

$$m_i \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = - \frac{\partial U(r)}{\partial \vec{r}_i}, \quad (1)$$

где  $i$  - номер частицы;

$m_i$  - масса частицы;

$\vec{r}_i$  - радиус-вектор частицы в декартовых координатах;

$U(r)$  - функция потенциальной энергии, зависящая от координат всех частиц. В качестве функции потенциальной энергии был взят адаптивный межмолекулярный реактивный потенциал порядка связи AIREBO (Adaptive Intermolecular Reactive Empirical Bond-Order). Который записывается как [6]:

$$U^{AIREBO} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left[ \sum_{j \neq i} \left( U_{ij}^{bond} + \sum_{k \neq i, j} \sum_{l \neq i, j, k} U_{ijkl}^{tors} \right) + \sum_{m \neq i, j, k, l} U_{im}^{LJ} \right] \quad (2)$$

где  $N$  - количество атомов в системе;

$i, j$  - упорядоченная пара химически связанных атомов;

$i, j, k, l$  - упорядоченные четвёрки химически связанных атомов, не составляющих циклы;

$i, m$  - упорядоченная пара атомов, не связанных химической связью;

$U_{ij}^{bond}$  - слагаемое потенциальной функции, отвечающий за взаимодействие между атомами с номерами  $i$  и  $j$ ;

$U_{ijkl}^{tors}$  - слагаемое потенциальной функции, отвечающий за взаимодействие между атомами с номерами  $i, j, k, l$ ;

$U_{im}^{LJ}$  - слагаемое потенциальной функции, отвечающий за взаимодействие несвязанных химической связью атомов, описывается потенциалом Ленарда-Джонсона.

В рамках данного метода по, модифицированной в ходе данной работы, методике, описанной П.Харрисом в работе [7], была построена атомистическая супер-ячейка атомистической модели стеклоуглерода, представленная на рисунке (Рис.1). Полученная структура имеет три большие полости раз-

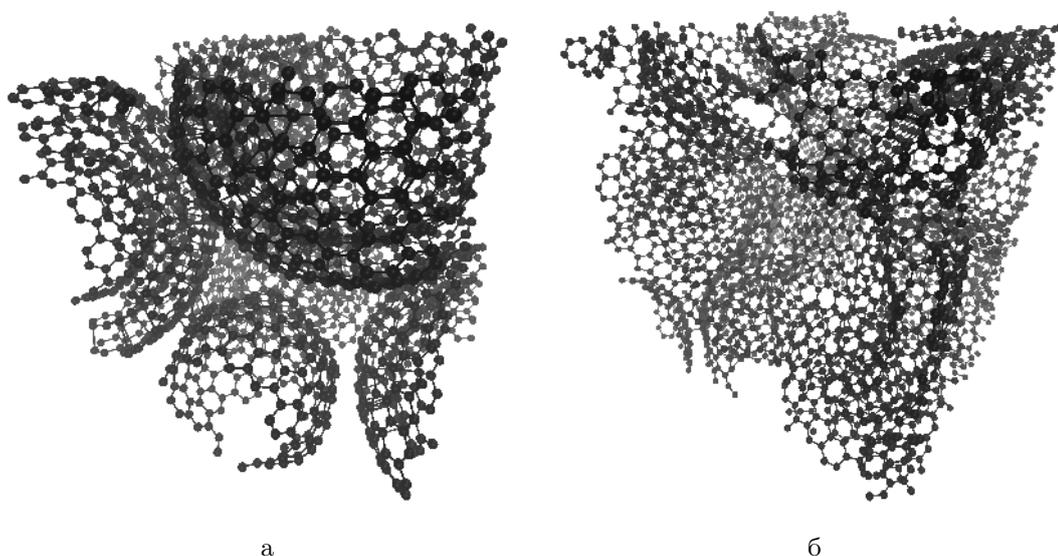


Рис. 1 — а - начальная структура супер-ячейки; б - конечная структура супер-ячейки.

мером в 0.8 - 1 нм и 13 меньших размером 0.2 - 0.5 нм. Количество негексагональных элементов составляет 10.6%. Данная модель полностью отвечает строению стеклоуглерода type-II [7], для которого характерно наличие 10-15% негексагональных элементов, плотность 1.20 - 1.42 г/см<sup>3</sup> [8], а так же



$\varepsilon(k)$  - собственные значения гамильтониана системы (энергетические уровни кристалла);

$$S_{ij} = \int_V \psi_j^*(r) \psi_i(r) dV;$$

$H_{ij}$  - матричные элементы гамильтониана.

При этом в рамках метода функционала плотности в приближении сильной связи гамильтониан системы приближается выражением [10]:

$$H_{ij} = H_{band} + \frac{1}{2} S_{ij} \sum_k (\gamma_{ik} + \gamma_{jk}) \Delta q_k \quad (4)$$

где  $\gamma_{ik}$  - кулоновская энергия двух сферически симметричных гауссовых распределений зарядов  $i$ -о и  $k$ -о электронов;

$\Delta q_k$  - флуктуация заряда на  $k$ -ом атоме.

$$H_{band} = \int_V \psi_j^*(r) \hat{H} \psi_i(r) dV.$$

При решении уравнения (3)  $k$  менялось вдоль траектории, которую определяют вектора трансляции кубической супер-ячейки. Таким образом были получены зонные структуры чистого и функционализированных стеклоуглеродных материалов с, представленные на рисунке (Рис.3).

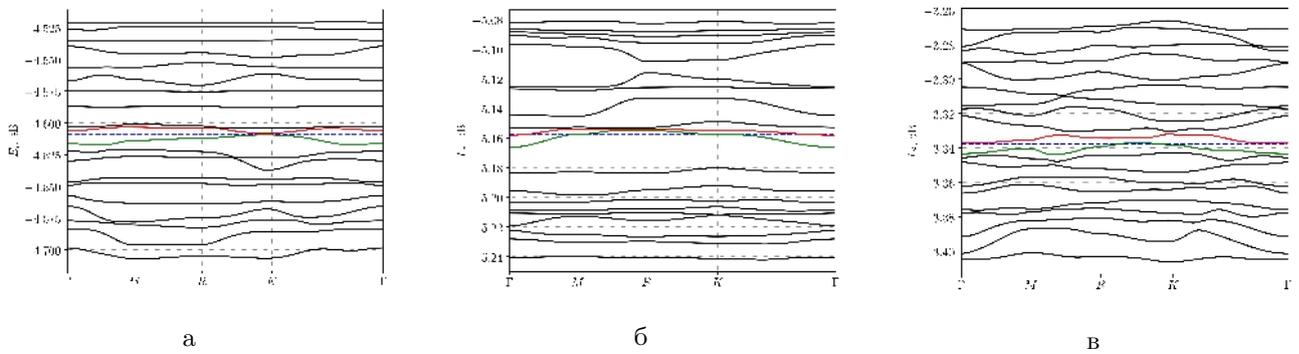


Рис. 3 — Зонные структуры (20 уровней вблизи уровня Ферми): а - чистого; б - функционализированного кислородом (7.06%); в - функционализированного калием (7.66%). Красным выделен первый уровень зоны проводимости, зелёным - последний уровень валентной зоны, пунктиром - энергия Ферми.

Если считать работу выхода разностью между свободным состояние электрона и уровнем Ферми, то, исходя из зонных диаграмм для разных концентраций примесей, можно рассчитать зависимость работы выхода материала от концентрации примеси (Рис.4).

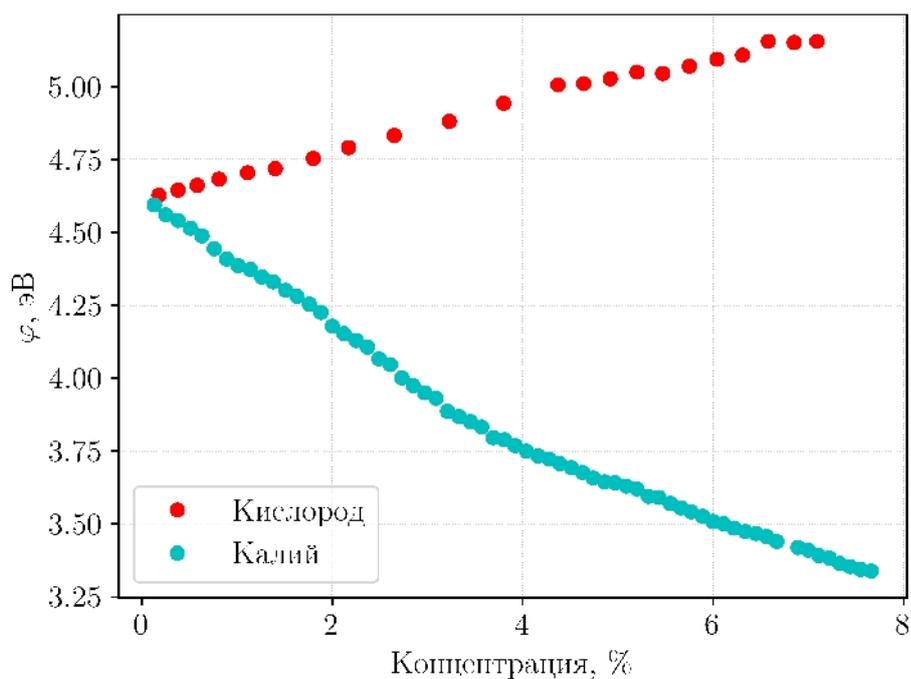


Рис. 4 — Зависимость работы выхода от примеси и её концентрации.

По графику видно, что в присутствии примесей калия работа выхода материала значительно снижается, а при функционализации кислородом работа выхода значительно увеличивается, что говорит о снижении эмиссионной способности при окислении стеклоглерода.

**Заключение.** В данном исследовании была рассмотрена возможность функционализация стеклоглерода для использования его как материала для изготовления матричных автоэмиссионных катодов с острой многоуровневой топологией. В ходе решения основной задачи с применением описанных методов была построена атомистическая модель чистого стеклоглерода, которая полностью соответствует как экспериментальным данным, так и известным теоретическим моделям строения данного материала, а также построены атомистические модели функционализированного калием и окисленного кислородом стеклоглерода. Теоретически исследован способ улучшения характеристик, а так же исследованы эмиссионные свойства улучшенного материала, в частности эффект снижения работы выхода при функционализации стеклоглерода калием. Также оценено снижение показателей в случае адсорбции остаточного кислорода, а именно снижение работы выхода

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. В.Д.Чеканов, А.С.Фиалков. Стеклоуглерод. Получение, свойства, применение. // Успехи химии. — 1971. — № 5. — С. 777 – 805.
2. М.П.Апин, Н.А.Бушуев, Л.В.Поздняков. Углеродные материалы в приборах вакуумной электроники и микроэлектроники // Высокие технологии - путь к прогрессу: Сб. научных трудов. — Саратов: Изд-во "Научная Книга". — 2003.
3. Б.В.Некрасов. Основы общей химии. — М. : Химия, 1973.
4. А.П.Бабичев, Н.А.Бабушкина, А.М.Братковский. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — ISBN: 5-283-04013-5.
5. А.Л.Мусатов, К.Р.Израэльянц, Е.Г.Чиркова. Автоэлектронная эмиссия из одностенных углеродных нанотрубок с нанесёнными на них атомами цезия // Физика твердого тела. — 2011. — № 7 (53). — С. 1428 – 1432.
6. Stuart S.J., A.V.Tutein, J.A.Harrison. A reactive potential for hydrocarbons with intermolecular interactions // The Journal of Chemical Physics. — 2000. — № 14. — С. 6472–6486.
7. P.J.F.Harris. Fullerene-like models for microporous carbon // Journal of Materials Science. — 2013. — № 48 (565). — С. 565–577.
8. Nanoarchitected materials composed of fullerene-like spheroids and disordered graphene layers with tunable mechanical properties / Z.Zhao, E.F.Wang, H.Yan и др. // Nature Communications. — 2015. — № 6 (6212).
9. P.J.F.Harris. Structure of non-graphitising carbon. // International Materials Reviews. — 1997. — Т. 42, № 5. — С. 206–218.
10. Koshinen P., V.Makinen. Density-functional tight-binding for beginners // Computational Materials Science. — 2009. — № 47. — С. 237–235.