

Энергии активации для пленки $g\text{-C}_3\text{N}_4$ в различных структурах и способах измерения

Способ измерения	Структура	$U_1 = 5 \text{ В}$	$U_2 = 10 \text{ В}$	$U_3 = 5 \text{ В}$
Продольный ток	Al/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /Al/SiO ₂ /Si	1,94	1,92	2,01
	Al/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /Al/Si	0,77	0,61	0,69
Поперечный ток	Al/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /Al/SiO ₂ /Si	1,11	0,95	1,11
	Al/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /Al/Si	0,23	0,18	0,22

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что сопротивление слоистых пленок $g\text{-C}_3\text{N}_4$ нанесенных на поверхность подложки монокристаллического кремния с проводящим подслоем алюминия уменьшается при возрастании температуры. Рассчитанные по температурной зависимости сопротивления значения энергии активации, а следовательно и потенциальные барьеры имеют величину 0,18–0,22 эВ при протекании тока в поперечном направлении. Рассчитанные с учетом (8) межкристаллитные потенциальные барьеры в плоскости пленки составляют 0,79–1,00 эВ. Наличие подслоя SiO₂ приводит к заметному росту потенциальных барьеров – до 0,95–1,11 эВ между слоями и 2,87–3,12 эВ между кристаллитами в слое, что обусловлено встроенными зарядовыми состояниями в окисле. Полученные результаты показывают анизотропию электрических свойств пленок $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и указывают на возможные механизмы управления электропроводностью пленок из этого материала.

Данная работа выполнена в рамках задания 1.4 ГПНИ Республики Беларусь «Материаловедение, новые материалы и технологии».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Rapid chemical vapor deposition of graphitic carbon nitride films / E. B. Chubenko [et al.] // Materialia. – 2023. – Vol. 28. – P. 101724 (1–10).
2. Электрические свойства мелкозернистых поликристаллов CdTe / С.А. Колосов, Ю.В. Клевков, А.Ф. Плотников // Физика и техника полупроводников, 2004, том 38, вып. 4. – С. 473–478.

ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНОЙ НАНОСТРУКТУРЫ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ PECVD

А. А. Харченко, А. К. Федотов, Ю. А. Федотова

Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, ул. Бобруйская, 11, 220006 Минск, Беларусь, e-mail: ХааТМ@mail.ru

Обнаружено, что в дефектных графитовых слоях, полученных методом химического осаждения из газовой фазы, усиленной микроволновой плазмой (PECVD), толщинами 20 нм и 35 нм, основным механизмом электротранспорта является проводимость Друде в условиях двухмерных квантовых поправок. Показано, что температурные кривые проводимости описываются как комбинация вкладов от квантовых

поправок и активационного механизма. При увеличении толщины до 35 нм наблюдается появление трехмерных квантовых поправок.

Ключевые слова: проводимость; квантовые поправки к проводимости; слабая локализация; вертикальный графен; углеродная наноструктура.

ELECTROTRANSPORT PROPERTIES OF CARBON NANOSTRUCTURE OBTAINED BY PECVD METHOD

A. A. Kharchanka, A. K. Fedotov, J. A. Fedotova

*Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University, Bobruiskaya str., 11,
220006 Minsk, Belarus*

Corresponding author: A. A. Kharchanka (e-mail: XaaTM@mail.ru)

It is found that in defective graphite layers obtained by the method of chemical vapor deposition, enhanced by microwave plasma (PECVD), with thicknesses of 20 nm and 35 nm, the main mechanism of electric transport is the Drude conductivity under conditions of two-dimensional quantum corrections. It is shown that the temperature curves of conductivity are described as a combination of contributions from quantum corrections and the activation mechanism. With an increase in thickness to 35 nm, the appearance of three-dimensional quantum corrections is observed.

Key words: conductivity; quantum corrections to conductivity; weak localization; vertical grapheme; carbon nanostructure.

ВВЕДЕНИЕ

В литературе имеется обилие научных статей, посвященных получению и исследованию взаимосвязи структуры и многих прикладных свойств графитоподобных веществ. Однако, применительно к электрическим свойствам графитоподобных наноструктурированных материалов до сих пор нет полного понимания и удовлетворительного объяснения многих «странных» особенностей транспорта носителей заряда в этих классах материалов как в магнитном поле, так и без. Цель работы заключалась в установлении основных механизмов электротранспорта в дефектных графитовых слоях, получаемых на начальных стадиях синтеза так называемого вертикального графена (vertical graphene (VG) nanosheets). Этот тип углеродного наноматериала представляет собой взаимосвязанную пористую сеть вертикально ориентированных графитоподобных листов, каждый лист которого содержит несколько углеродных слоев, что делают VG уникальным и интересным материалом для изучения с точки зрения его применимости в областях накопления энергии, электроники и сенсорики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выращивание исследуемой структуры производилась методом химического осаждения из газовой фазы, усиленной микроволновой плазмой (PECVD) на установке Innovative Plasma Systems GmbH IPLAS [1–3]. Выбор времени осаждения углерода на подложку для этих образцов осуществлялся исходя из представлений о процессе формирования VG сформулированных в работах, когда на первой стадии осаждения происходит возникновение «зародышей» нанографитовой фазы. На второй стадии эти «зародыши» растут и сливаются в тонкий и сильно дефектный графитовый под-

слой, полностью покрывающий подложку. На третьей стадии, в области наиболее дефектных зон этого подслоя происходит зарождение островков VG-фазы. На четвертой стадии роста перпендикулярно подложке из этих островков формируется вертикальная графеноподобная структура, которая и получила в литературе название «вертикальный графен». В данном исследовании были изучены два типа образцов VG: при получении образца CBNL20 метановый газ подавался в реакторную камеру в течение 20 минут, а образца CBNL40 – в течение 40 минут. Толщины нанонрафитовых слоев составляли в среднем $20,31 \pm 2,09$ нм и $35,35 \pm 4,91$ нм для образцов CBNL20 и CBNL40, соответственно [1–3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На приведенных на вставке рисунка 1, б температурных зависимостях проводимости в полулогарифмическом масштабе $\sigma(T) - \text{Lg}T$ в изученных образцах можно выделить линейные участки, что указывает на возможность наличия вклада в $\sigma(T)$ квантовых поправок к проводимости Друде в условиях слабой локализации (WL). В упрощенном виде температурные зависимости проводимости в условиях WL можно представить в виде [5]:

$$\sigma(T) = A + C \cdot \ln(T) \quad (1)$$

для двумерного случая (2D–WL) и

$$\sigma = A + B \cdot \sqrt{T} \quad (2)$$

для трехмерного случая (3D–WL), где A , B и C – константы.

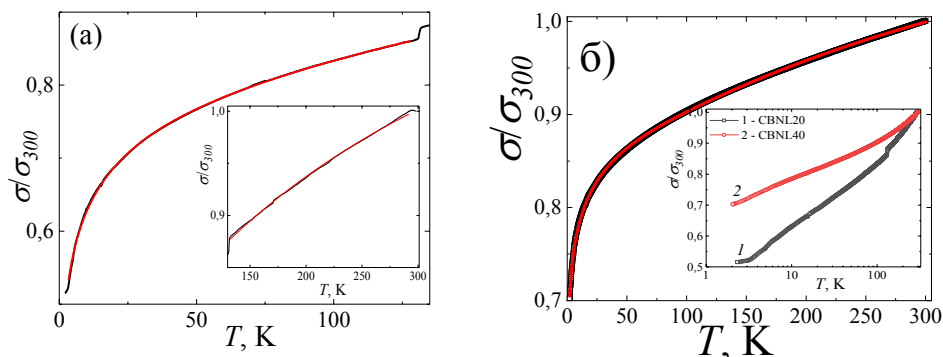


Рис. 1. Температурные зависимости нормированной проводимости (черные кривые) образцов CBNL20 (а) и CBNL40 (б) и её аппроксимация уравнением 3 (красные кривые).

На вставке к рис. 1, а представлена зависимость $\sigma(T)/\sigma(300 \text{ K})$ в полулогарифмическом масштабе для CBNL20 (1) и CBNL40 (2)

Отметим, что линейаризация наблюдается только в области низких температур ($T < 100 \text{ K}$), в то время при температурах выше 150 K наблюдается серьёзное отклонение от линейности. Первая причина такого отклонения может быть связан с толщиной образца. Как видно из вставки к рисунку 1, б, чем больше толщина образца, тем больше расхождение эксперимента и аппроксимации. Этот факт может указывать на наличие одновременно двух каналов проводимости - двумерного и трехмерного, то есть описываться как сумма уравнений (1) и (2). Второй причиной может служить наличие в образце активационного (зонного) механизма или одновременное

проявление упомянутых выше механизмов. Для анализа температурных кривых воспользуемся формулой, которая будет учитывать, как двухмерные и трехмерные квантовые поправки, так и активационный механизм:

$$\sigma = A + B \cdot \sqrt{T} + C \cdot \ln(T) + D \cdot e^{-E/T}, \quad (3)$$

где A , C , D и E – константы; второе слагаемое отвечает за 2D–WL, третье слагаемое – за 3D–WL, а четвертое слагаемое – за активационный механизм. Результаты аппроксимации формулой (3) представлены на рисунке 1 и в таблице. Как видно данная аппроксимация хорошо описывает экспериментальные данные. При этом стоит отметить, что для образца CBNL20 наилучшая аппроксимация наблюдается, когда параметр $B = 0$, то есть проявление трехмерных квантовых поправок не наблюдается. В тоже время для образца CBNL40 наблюдаются все три механизма переноса заряда.

**Параметры аппроксимации температурных зависимостей
нормированной проводимости уравнением 3**

	CBNL20		CBNL40
T , К	2 – 131	131 – 295	2 – 295
A	0,4276±0,0003	0,44±0,02	0,6689±0,0002
B	0±0,000001	0±0,000001	0,0009±0,0001
C	0,08676±0,0001	0,085±0,003	0,0482±0,0002
D	0,12±0,01	0,21±0,01	0,145±0,002
E	296±13	296±15	384±5

На рисунке 2 представлены зависимости слагаемых выражения 3 от температуры. Видно, что при низких температурах доминирующим является независящий от температуры параметр A , влияние которого особенно сильно для образца CBNL40 (рис. 2, б). Вторым по значимости является слагаемое $C \cdot \text{Lg}T$. Вклады $D \cdot \exp(-E/T)$ и $B \cdot \sqrt{T}$ являются слабыми и суммарно составляют не более 8 % и 5 % для образцов CBNL20 и CBNL40 соответственно.

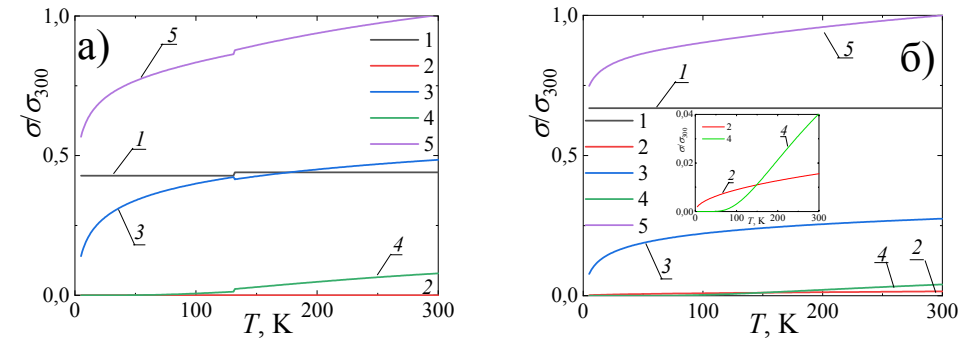


Рис. 2. зависимости слагаемых выражения 3 от температуры для образцов CBNL20 (а) и CBNL40 (б): 1 – A ; 2 – $B \cdot \sqrt{T}$; 3 – $C \cdot \ln(T)$; 4 – $D \cdot \exp(-E/T)$; 5 – экспериментальные зависимости нормированной проводимости от температуры ($\sigma(T)/\sigma_{300}$)

Для описания влияния вкладов на изменение проводимости от температуры удобно использовать производную по температуре (рис. 3). Видно, что независимо от образца при температурах менее 50 К температурная зависимость проводимости

полностью определяется вкладом 2D–WL (кривая 1). При $T > 100$ К вклад от активационного механизма (кривая 2) становится сопоставимым с вкладом двухмерной WL (кривая 3). Для образца CBNL40 вклад от 3D–WL является самым слабым и вносит заметное влияние на ход температурной кривой проводимости лишь при низких температурах.

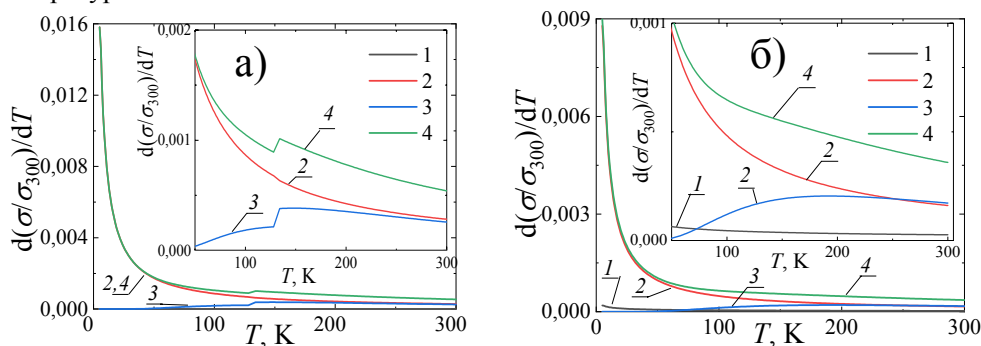


Рис. 3. Скорость изменения слагаемых выражения 3 от температуры для образцов CBNL20 (а) и CBNL40 (б): 1 – $d(B \cdot \sqrt{T})/dT$, 2 – $d(C \cdot \ln(T))/dT$, 3 – $d(D \cdot \exp(-E/T))/dT$, 4 – скорость изменения экспериментальной зависимости нормированной проводимости от температуры ($d(\sigma(T)/\sigma_{300})/dT$)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом доминирующим механизмом проводимости для исследуемых образцов является проводимость Друде в условиях 2D–WL. Температурные изменения проводимости при низких температурах определяются 2D–WL, а при температурах $T > 100$ К комбинацией вкладов 2D–WL и активационного. Увеличение толщины углеродного слоя с 20 нм (CBNL20) до 35 (CBNL40) привело к появлению относительно слабого вклада от 3D–WL.

Работа финансировалась в рамках государственной программы научных исследований «ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», 2021–2025 годы», «Микро- и нанoeлектроника») № г.р. 20212560.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Электротранспортные свойства углеродной наноструктуры, полученной методом усиленного плазмой химического осаждения из газовой фазы, при термоциклировании / А.А. Максименко [и др.] // Журнал БГУ. Физика. – 2020. – № 3. – С. 89–96.
2. Transient absorption spectroscopy as a promising optical tool for the quality evaluation of graphene layers deposited by microwave plasma / E. Rajackaitė [et al.] // Surf. Coat. Int. – 2020. – Vol. 395. – P. 125887 (1–9).
3. The evolution of properties with deposition time of vertical graphene nanosheets produced by microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition / E. Rajackaitė [et al.] // Surfaces and Interfaces. – 2021. – Vol. 27. – P. 101529 (1–9).
4. Влияние магнитных частиц Co - CoO на свойства электропереноса в однослойном графене / Ю.А. Федотова [и др.] // ФТТ. – 2020. – Т. 62, № 2. – С. 316–325.
5. Полянская, Т.А. Квантовые поправки к проводимости в полупроводниках с двумерным и трехмерным электронным газом/ Т.А. Полянская, Ю.В. Шмарцев // ФТП. – 1989. – Т. 23, № 1. – С. 3–32.