Физика наноструктур

Physics of nanostructures

УДК 537.31

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ ГИБРИДНЫХ ПЛЕНОК ИЗ УГЛЕРОДНЫХ И WS_2-НАНОТРУБОК

В. К. КСЕНЕВИЧ [1)]***, Н. И. ГОРБАЧУК*** [1)]***, ХО ВЬЕТ*** [1)]***,***
М. В. ШУБА [2)]***, О. Г. ПОДДУБСКАЯ*** [2)]***, Д. И. ЮКО*** [2)]

[1)]*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь*
[2)]*НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ, ул. Бобруйская, 11, 220030, г. Минск, Беларусь*

Исследована электропроводность на переменном токе гибридных пленок из однослойных углеродных нанотрубок и неорганических нанотрубок дисульфида вольфрама с различным соотношением между органической и неорганической компонентами в частотном диапазоне 100 Гц – 1 МГц при значениях температуры, равных 4,2; 77; 300 К. Установлено, что при температурах 77 и 300 К активная (резистивная) часть импеданса гибридных

Образец цитирования:
Ксеневич В. К., Горбачук Н. И., Хо Вьет, Шуба М. В., Поддубская О. Г., Юко Д. И. Электропроводность на переменном токе гибридных пленок из углеродных и WS_2-нанотрубок // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 3. С. 111–119.

For citation:
Ksenevich V. K., Gorbachuk N. I., Ho Viet, Shuba M. V., Paddubskaya A. G., Yuko D. I. AC-conductivity of carbon nanotubes / WS_2 nanotubes hybrid films. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 3. P. 111–119 (in Russ.).

Авторы:
Виталий Казимирович Ксеневич – кандидат физико-математических наук; заведующий научно-исследовательской лабораторией физики электронных материалов кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета.
Николай Иванович Горбачук – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета.
Хо Вьет – аспирант кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета. Научный руководитель – В. К. Ксеневич.
Михаил Владимирович Шуба – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории наноэлектромагнетизма.
Олеся Германовна Поддубская – научный сотрудник лаборатории наноэлектромагнетизма.
Дмитрий Иванович Юко – младший научный сотрудник лаборатории наноэлектромагнетизма.

Authors:
Vitaly Ksenevich, PhD (physics and mathematics); head of the research laboratory of physics of electronic materials, department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics.
ksenevich@bsu.by
Nikolay Gorbachuk, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics.
gorbachuk@bsu.by
Ho Viet, postgraduate student at the department of semiconductor physics and nanoelectronics, faculty of physics.
hviet@bsu.by
Mikhail Shuba, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory of nanoelectromagnetism.
mikhail.shuba@gmail.com
Alesia Paddubskaya, researcher at the laboratory of nanoelectromagnetism.
paddubskaya@gmail.com
Dzmitry Yuko, junior researcher at the laboratory of nanoelectromagnetism.
d.yuko@gmail.com

пленок существенно превышала реактивную. При температуре 4,2 К обнаружено возрастание вклада реактивной составляющей (емкостного типа) в импеданс гибридных пленок, которое наблюдается при росте частоты и содержания нанотрубок WS_2. Предложена эквивалентная схема замещения, характеризующая низкотемпературную электропроводность гибридных пленок на переменном токе, которая учитывает влияние контактных барьеров между углеродными нанотрубками.

Ключевые слова: гибридные пленки; углеродные нанотрубки; нанотрубки дисульфида вольфрама; электропроводность; импедансная спектроскопия.

Благодарность. Авторы выражают благодарность Р. Тенне (факультет материалов и поверхностей Научного института имени Вейцмана, г. Реховот, Израиль) и А. Зак (факультет науки Холонского института технологий, г. Холон, Израиль) за изготовление нанотрубок дисульфида вольфрама, а также А. Д. Вику (факультет физики и астрономии Бохумского Рурского университета, г. Бохум, Германия) за предоставление возможности проведения низкотемпературных измерений импеданса.

AC-CONDUCTIVITY OF CARBON NANOTUBES / WS_2 NANOTUBES HYBRID FILMS

V. K. KSENEVICH [a], ***N. I. GORBACHUK*** [a], ***HO VIET*** [a],
M. V. SHUBA [b], ***A. G. PADDUBSKAYA*** [b], ***D. I. YUKO*** [b]

[a] *Belarusian State University, Niezaliežnasci Avenue, 4, 220030, Minsk, Belarus*
[b] *Research Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University, Babrujskaja Street, 11, 220030, Minsk, Belarus*

Corresponding author: V. K. Ksenevich (ksenevich@bsu.by)

AC-conductivity of hybrid films consisting of carbon nanotubes and inorganic tungsten disulfide nanotubes with different ratios of the organic and inorganic components has been investigated over the frequency range 100 Hz – 1 MHz at temperatures 4.2; 77; 300 K. It has been found that an active (resistive) part of the impedance of these hybrid films is significantly greater than the reactive part at 77 and 300 K. The increasing contribution of a reactive (capacitive type) part of the impedance is observed at 4.2 K and is more obvious in the high frequency range and at the increasing content of WS_2 nanotubes in the hybrid films. The equivalent circuit characterizing low-temperature conductivity of hybrid films with regard to the influence of contact barriers between low-ohmic carbon nanotubes is suggested.

Key words: hybrid films; carbon nanotubes; tungsten disulfide nanotubes; electrical conductivity; impedance spectroscopy.

Acknowledgements. Authors would like to acknowledge R. Tenne (Department of Materials and Interfaces, Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel) and A. Zak (Department of Sciences, Holon Institute of Technology, Holon, Israel) for fabrication of tungsten disulfide nanotubes and A. D. Wieck (Department of Physics and Astronomy, Bochum Ruhr-University, Bochum, Germany) for possibility of implementation of low temperature impedance measurements.

Введение

Вскоре после открытия углеродных нанотрубок (УНТ) были синтезированы неорганические многослойные нанотрубки (НТ) и фуллереноподобные частицы дисульфида вольфрама [1]. Тем самым было продемонстрировано, что возможность образования нанотрубок и наночастиц не является уникальным свойством только лишь углерода. В настоящее время получены нанотрубки из большого количества неорганических материалов, таких как WS_2, MoS_2 [2], $MoSe_2$ [3], WSe_2 [3], GaN [4], и многих других. Для прогнозирования возможности получения новых неорганических наноструктур используются методы компьютерного моделирования [5]. Как и для углеродных нанотрубок, электрические свойства неорганических НТ определяются их хиральной структурой [6]. В отличие от УНТ, которые могут проявлять как металлические, так и полупроводниковые свойства, многослойные неорганические НТ, например MoS_2-НТ и WS_2-НТ, состоят из чередующихся слоев атомов разных элементов, проявляют полупроводниковые свойства и в зависимости от индексов хиральности являются прямозонными либо непрямозонными полупроводниками с различной шириной запрещенной зоны [7; 8]. Исследование электрических свойств индивидуальных неорганических нанотрубок, в частности WS_2-НТ, также показало, что

они проявляют полупроводниковые свойства, которые зависят от внешних условий, например от содержания паров воды и кислорода в атмосфере [9]. Показана возможность создания полевого транзистора на основе одиночных нанотрубок дисульфида вольфрама [10]. Исследованы электрические свойства композитов на основе эпоксидной смолы, в которых наполнителем служили WS_2-НТ [11]. Однако композиты с углеродными нанотрубками в качестве наполнителя и массивы углеродных нанотрубок характеризуются более высокой электропроводностью по сравнению со структурами из неорганических нанотрубок в силу наличия в их составе металлических нанотрубок. Ранее нами был предложен метод получения гибридных пленок из одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) и нанотрубок либо фуллереноподобных наночастиц дисульфида вольфрама [12]. Создание гибридных материалов, состоящих из характеризующихся высокой электропроводностью УНТ и неорганических НТ, обладающих высоким электрическим сопротивлением, позволяет управлять их электрическими и электромагнитными параметрами, изменяя соотношение между органической и неорганической компонентами.

Цель настоящей работы – характеризация электрических свойств гибридных пленок из углеродных и WS_2-нанотрубок с различным соотношением в них органической и неорганической компонент в широком интервале температур методом импедансной спектроскопии в диапазоне частот 100 Гц – 1 МГц.

Методика эксперимента

Для изготовления гибридных пленок использовался метод фильтрации через пористые мембранные фильтры (Millipore), размер пор которых составляет 0,22 мкм. Процедура получения гибридных пленок описана в работе [12]. В качестве органической компоненты пленок использовались ОУНТ диаметром 0,8–1,2 нм и длиной 1 мкм в диапазоне 100 нм, неорганической – многостенные нанотрубки дисульфида вольфрама (WS_2-НТ) диаметром 20–180 нм и длиной 1–30 мкм. Для получения образцов с различным соотношением между ОУНТ и WS_2-НТ при фильтрации через пористые мембраны в фильтровальной ячейке смешивались их суспензии в 1 % водном растворе поверхностно-активного вещества додецилсульфата натрия, содержащего смеси ОУНТ и WS_2-НТ в разных объемных соотношениях (1 мл ОУНТ : 10 мл WS_2-НТ, 2 мл ОУНТ : 10 мл WS_2-НТ, 5 мл ОУНТ : 10 мл WS_2-НТ). В дальнейшем образцы гибридных пленок будем обозначать как ГП1-10, ГП2-10 и ГП5-10. Для получения однородного распределения нанотрубок по объему суспензии предварительно проводился процесс ультразвуковой обработки сосудов, содержащих оба типа нанотрубок, в течение 1 ч при частоте ультразвука 44 кГц. Для удаления оставшихся агломератов ОУНТ, пучков ОУНТ и каталитических частиц полученная суспензия центрифугировалась в течение 10 мин при ускорении 12 000 *g*.

После фильтрации пленки переносились на изолирующие подложки поликристаллического Al_2O_3. Контакты к пленкам формировались нанесением электропроводящего лака на основе серебра. Исследование электропроводности гибридных пленок на переменном токе проводилось с использованием измерителя импеданса Agilent 4284A (США). Измерение комплексного сопротивления пленок $Z = Z' + iZ''$ проведено в диапазоне частот от 100 Гц до 1 МГц при значениях температуры (T) 4,2; 77 и 300 К. Амплитуда синусоидального сигнала составляла 40 мВ. Аппроксимация экспериментальных данных и определение параметров эквивалентных схем замещения осуществлялись с использованием программы *EIS Spectrum Analyser 1.0.*

Результаты эксперимента и их обсуждение

Для установления влияния неорганических нанотрубок на электропроводность гибридных пленок предварительно были измерены зависимости действительной Z' и мнимой Z'' частей импеданса пленок из ОУНТ от частоты f переменного тока и напряжения U_b постоянного смещения. Обнаружено, что пленки из ОУНТ характеризуются импедансом резистивного типа во всем диапазоне частот и при всех температурах. Импеданс пленок, полученных только из неорганических нанотрубок WS_2, превышал пределы измерения прибора Agilent 4284A, и детального их исследования не проводилось. Данные результаты позволяют сделать вывод о том, что импеданс пленок из неорганических НТ на много порядков превышает импеданс пленок из ОУНТ в силу следующих основных факторов: 1) электропроводность металлических ОУНТ значительно больше электропроводности нанотрубок WS_2; 2) контактное сопротивление между полупроводниковыми неорганическими нанотрубками может существенно превышать контактное сопротивление между металлическими ОУНТ. В результате в гибридных пленках перенос заряда в основном происходит по углеродным нанотрубкам. Соответственно, по мере уменьшения содержания ОУНТ следует ожидать снижения эффективной электропроводности гибридных пленок.

Типичные значения действительной и мнимой частей импеданса пленок ОУНТ и гибридных пленок при различных температурах и частотах представлены в таблице.

Значения угла сдвига фаз между напряжением и током, а также значения действительной и мнимой частей импеданса образцов

Phase-shift angles between voltage and current, real and imaginary parts of the impedance for the samples under study

Частота (f), кГц	Образцы											
	ОУНТ			ОУНТ – 1 мл WS_2-НТ (ГП1-10)			ОУНТ – 2 мл WS_2-НТ (ГП2-10)			ОУНТ – 5 мл WS_2-НТ (ГП5-10)		
	φ, град	Z', Ом	$-Z''$, Ом	φ, град	Z', кОм	$-Z''$, Ом	φ, град	Z', кОм	$-Z''$, Ом	φ, град	Z', кОм	$-Z''$, Ом
	T = 4,2 К											
0,1	–0,005	38 544	3	–	–	–	–0,1	13 730	15	–0,01	907	0,2
1	–0,002	38 433	1	–	–	–	–0,9	13 788	209	–0,1	907	1,3
10	–0,05	38 423	33	–83	7630	66 353	–11	13 429	2557	–1	908	15
100	–0,5	38 441	332	–89,995	545	6255	–66	2494	5512	–10	883	158
1000	–5,2	38 570	3489	–89,999	0,000 7	605	–88	21	655	–61	212	389
	T = 77 К											
0,1	–0,016	757,2	0,21	–0,01	330,7	0,05	–0,011	46,27	0,009	–0,015	6,79	0,001 7
1	–0,010	757,0	0,13	–0,03	330,7	0,15	–0,007	46,27	0,005	–0,008	6,79	0,000 9
10	–0,013	757,8	0,18	–0,3	330,8	1,7	–0,041	46,28	0,033	–0,016	6,79	0,001 9
100	–0,021	758,1	0,28	–3,2	330,3	19	–0,4	46,30	0,33	–0,084	6,79	0,009 9
1000	–0,241	767,8	3,23	–30,7	249,6	148	–4,5	46,68	3,63	–0,915	6,89	0,110 0
	T = 300 К											
0,1	–0,011	324,94	0,06	–0,01	75,2	0,016	–0,014	14,47	0,004	–0,017	2,48	0,000 8
1	–0,007	324,88	0,04	–0,02	74,9	0,02	–0,007	14,45	0,002	–0,009	2,47	0,000 4
10	–0,010	324,77	0,06	–0,10	74,7	0,1	–0,021	14,43	0,005	–0,014	2,47	0,000 6
100	–0,009	324,78	0,05	–0,89	74,3	1	–0,160	14,41	0,04	–0,043	2,47	0,001 8
1000	–0,155	328,52	0,89	–8,67	72,9	11	–1,622	14,54	0,41	–0,445	2,50	0,019 4

По итогам проведенных исследований и анализа экспериментальных результатов было установлено, что при комнатной температуре величина активной части импеданса гибридных пленок значительно превышала величину реактивной части. Например, даже для образца ГП1-10, обладающего наибольшим электрическим сопротивлением, полученного из раствора, который состоял из 1 мл ОУНТ и 10 мл WS_2-НТ, при $T = 300$ К на частоте 1 МГц $Z' = 72{,}9$ кОм, $-Z'' = 11$ кОм, а величина угла сдвига фаз между током и напряжением (φ) составляла всего –8,7 °. При этом в отличие от пленок из ОУНТ, в которых величина реактивной части импеданса $Z''(f)$ была незначительной по сравнению с активной его частью $Z'(f)$ во всем диапазоне частот (100 Гц – 1 МГц) и при всех температурах, в гибридных пленках наблюдалось возрастание вклада реактивной части импеданса в области высоких частот, а также при уменьшении температуры.

Измеренные при температуре 4,2 К зависимости $Z'(f)$ и $Z''(f)$, а также годографы импеданса для гибридных пленок показаны на рис. 1–3 соответственно. Отметим, что величина реактивного импеданса гибридных пленок существенно возрастает при низких температурах.

При уменьшении содержания углеродных нанотрубок в гибридных пленках, как видно из таблицы, наблюдается увеличение активной и реактивной частей их комплексного сопротивления, а также величины отрицательного угла сдвига фаз между прикладываемым к образцам переменным напряжением и протекающим через них током. Однако, несмотря на разницу в величинах Z' и Z'' для гибридных пленок с различным содержанием в них ОУНТ, было установлено, что при температуре 4,2 К комплексный импеданс гибридных пленок ОУНТ – WS_2-НТ аппроксимируется при помощи показанной на вставках на рис. 1–3 одинаковой эквивалентной схемы замещения, состоящей из двух последовательно соединенных контуров. Первый из этих контуров состоит из параллельно соединенных резистора R и конденсатора C_1, а второй – из параллельно соединенных конденсатора C_2 и элемента постоянной фазы *CPE* (constant phase element). Элемент *CPE* не имеет строго определенного физического смысла и используется для моделирования различных систем как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами [13]. Импеданс этого элемента определяется следующим образом:

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Q(i\omega)^n},$$

где Q – фактор пропорциональности; n – показатель степени, определяющий характер частотной зависимости ($-1 \le n \le 1$); i – мнимая единица [13]. Для целых значений $n = 1, 0, -1$ элемент *CPE* вырождается до классических элементов – конденсатора, резистора и индуктивности с сосредоточенными параметрами C, R и L соответственно [14].

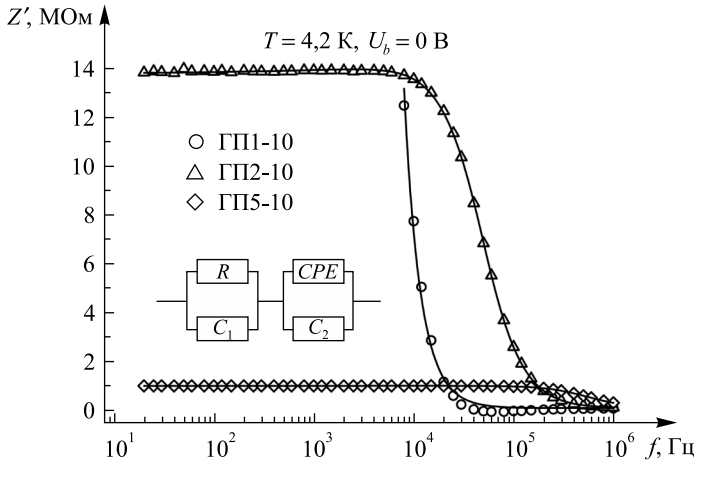


Рис. 1. Зависимости $Z'(f)$ гибридных пленок, полученных из суспензий, содержащих смеси ОУНТ и WS_2-НТ в различных соотношениях (1 мл ОУНТ : 10 мл WS_2-НТ, 2 мл ОУНТ : 10 мл WS_2-НТ, 5 мл ОУНТ : 10 мл WS_2-НТ). Сплошные линии – аппроксимация экспериментальных результатов показанной на вставке эквивалентной схемой замещения. Измерения выполнены при температуре 4,2 К

Fig. 1. $Z'(f)$ dependences of the hybrid films fabricated from suspensions which consist of the mixture of SWCNT and WS_2-NT in different ratios (1 ml SWCNT : 10 ml WS_2-NT, 2 ml SWCNT : 10 ml WS_2-NT, 5 ml SWCNT : 10 ml WS_2-NT). Solid lines – approximation of the experimental results by the equivalent circuit diagram (see inset in the figure). Measurements are carried out at 4.2 K

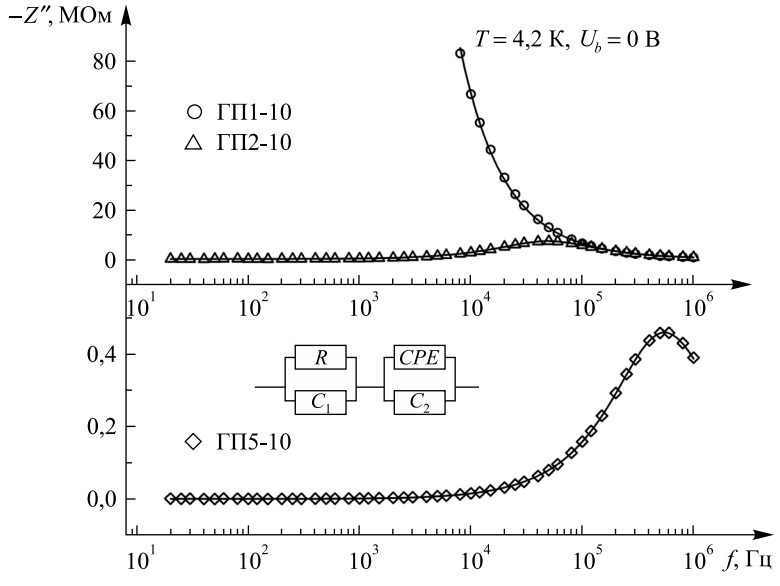


Рис. 2. Зависимости $Z''(f)$ гибридных пленок, полученных из суспензий, содержащих смеси ОУНТ и WS_2-НТ в различных соотношениях (1 мл ОУНТ : 10 мл WS_2-НТ, 2 мл ОУНТ : 10 мл WS_2-НТ, 5 мл ОУНТ : 10 мл WS_2-НТ). Сплошные линии – аппроксимация экспериментальных результатов показанной на вставке эквивалентной схемой замещения. Измерения выполнены при температуре 4,2 К

Fig. 2. $Z''(f)$ dependences of the hybrid films fabricated from suspensions which consist of the mixture of SWCNT and WS_2-NT in different ratios (1 ml SWCNT : 10 ml WS_2-NT, 2 ml SWCNT : 10 ml WS_2-NT, 5 ml SWCNT : 10 ml WS_2-NT). Solid lines – approximation of the experimental results by the equivalent circuit diagram (see inset in the figure). Measurements are carried out at 4.2 K

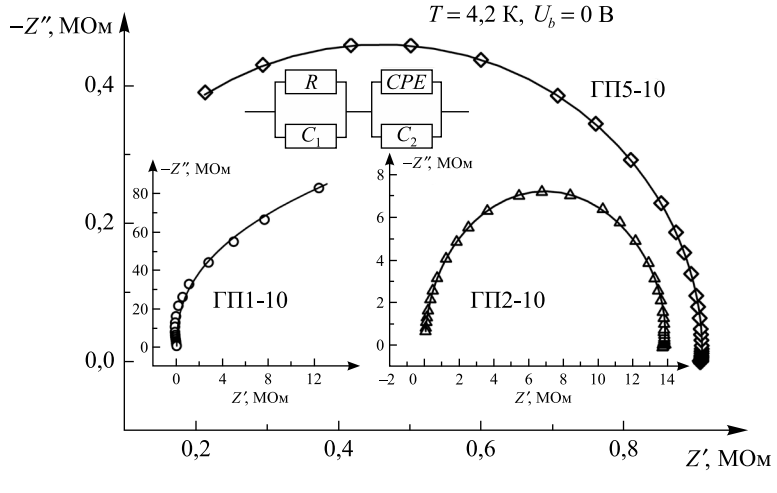


Рис. 3. Годографы импеданса гибридных пленок, полученных из суспензий, содержащих смеси ОУНТ и WS_2-НТ в различных соотношениях (1 мл ОУНТ : 10 мл WS_2-НТ, 2 мл ОУНТ : 10 мл WS_2-НТ, 5 мл ОУНТ : 10 мл WS_2-НТ). Сплошные линии – аппроксимация экспериментальных результатов показанной на вставке эквивалентной схемой замещения. Измерения выполнены при температуре 4,2 К

Fig. 3. Impedance diagrams of the hybrid films fabricated from suspensions which consist of the mixture of SWCNT and WS_2-NT in different ratios (1 ml SWCNT : 10 ml WS_2-NT, 2 ml SWCNT : 10 ml WS_2-NT, 5 ml SWCNT : 10 ml WS_2-NT). Solid lines – approximation of the experimental results by the equivalent circuit diagram (see inset in the figure). Measurements are carried out at 4.2 K

В результате расчетов были получены значения параметра *n*, близкие к нулю, для пленок ГП5-10 и значения параметра *n* в диапазоне от –0,27 до –0,46 для пленок ГП1-10 и ГП2-10 (в зависимости от приложенного напряжения постоянного смещения). Таким образом, для пленок ГП5-10 элемент *CPE* проявляет свойства резистора, а для пленок ГП1-10 и ГП2-10 наряду с резистивными свойствами наблюдается реактивный вклад индуктивного типа.

Приложение напряжения постоянного смещения в диапазоне от 1 до 5 В приводит к существенному уменьшению величины импеданса пленок при температуре 4,2 К, а также к уменьшению полученного в результате моделирования значения сопротивления резистора *R*. Годографы импеданса, построенные из измеренных при различных напряжениях постоянного смещения при температуре 4,2 К зависимостей $Z'(f)$ и $Z''(f)$ для образцов ГП1-10, ГП2-10 и ГП5-10, показаны на рис. 4–6 соответственно. Из рис. 4–6 видно, что приложение напряжения постоянного смещения приводит к снижению как действительной, так и мнимой части импеданса пленок в области низких частот в силу уменьшения высоты контактных барьеров между проводящими углеродными нанотрубками [15]. Эффект сильнее проявляется для образцов ГП1-10 с наименьшим содержанием ОУНТ. Имеющие нелинейный вид зависимости электропроводности гибридных пленок от напряжения постоянного смещения $G(U_b)$ будут представлены и обсуждены в последующей работе.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что резистор *R* и конденсатор C_1 моделируют эффективные значения сопротивления и емкости контактных барьеров между проводящими углеродными нанотрубками, а параллельно соединенные конденсатор C_2 и элемент постоянной фазы *CPE* – емкость и электропроводность самих ОУНТ. При этом использование элемента постоянной фазы *CPE* позволяет учесть дисперсию в значениях активной и реактивной (индуктивной) частей импеданса нанотрубок. Индуктивный импеданс пленок может быть связан с так называемым явлением кинетической индуктивности, характерным для бездефектных ОУНТ [16], присутствие которых возможно в исследованных образцах.

Следует отметить, что для образцов с наименьшим содержанием углеродных нанотрубок при температуре 4,2 К в области низких частот (меньше ~10 кГц) значения комплексного сопротивления превышали допустимый предел измерений импеданса прибора Agilent 4284A. Можно предположить, что включение нанотрубок WS_2 с низкой проводимостью в матрицу, состоящую из высокопроводящих ОУНТ, приводит к сильному возрастанию роли контактных барьеров между отдельными одностенными углеродными нанотрубками внутри пленки.

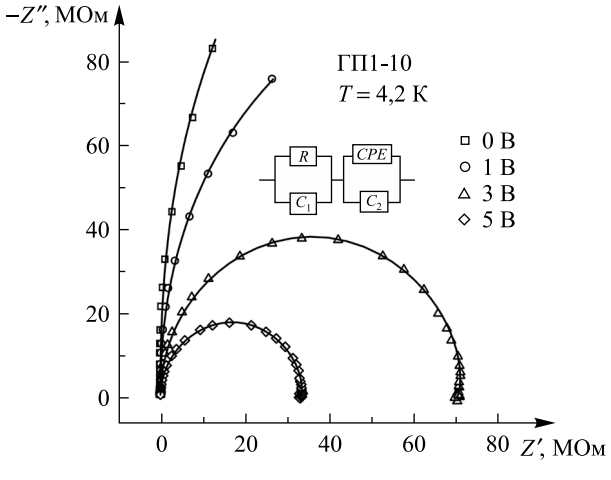


Рис. 4. Годографы импеданса гибридных пленок, построенные по результатам измерений зависимостей $Z'(f)$ и $Z''(f)$, выполненных при различных значениях постоянного напряжения смещения (указаны на рисунке). Сплошные линии – аппроксимация экспериментальных результатов показанной на вставке эквивалентной схемой замещения. Пленки получены из суспензий, содержащих смеси ОУНТ и WS_2-НТ в соотношении 1 мл ОУНТ : 10 мл WS_2-НТ. Измерения выполнены при температуре 4,2 К

Fig. 4. Impedance diagrams of hybrid films constructed on the basis of the measuring results for $Z'(f)$ and $Z''(f)$ dependences at different bias voltages (indicated in the figure). Solid lines – approximation of the experimental results by the equivalent circuit diagram (see inset in the figure). Films are fabricated from suspensions consisting of the mixture of SWCNT and WS_2-NT in the ratios 1 ml SWCNT : 10 ml WS_2-NT. Measurements are carried out at 4.2 K

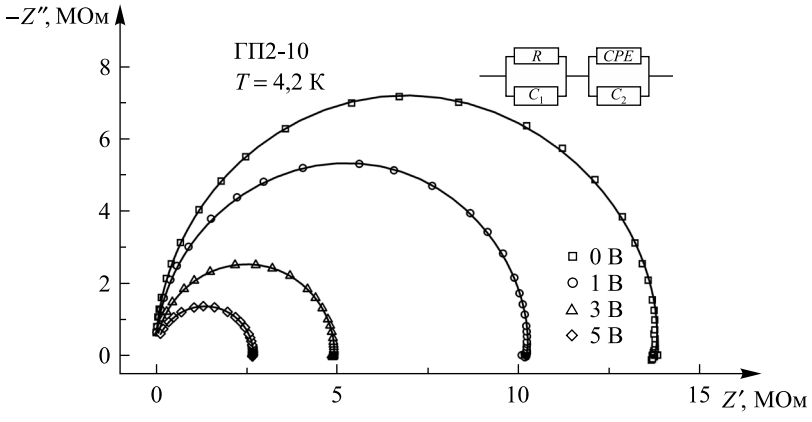


Рис. 5. Годографы импеданса гибридных пленок, построенные по результатам измерений зависимостей $Z'(f)$ и $Z''(f)$, выполненных при различных значениях постоянного напряжения смещения (указаны на рисунке). Сплошные линии – аппроксимация экспериментальных результатов показанной на вставке эквивалентной схемой замещения. Пленки получены из суспензий, содержащих смеси ОУНТ и WS_2-НТ в соотношении 2 мл ОУНТ : 10 мл WS_2-НТ. Измерения выполнены при температуре 4,2 К

Fig. 5. Impedance diagrams of hybrid films constructed from the measuring results for $Z'(f)$ and $Z''(f)$ dependences at different bias voltages (indicated in the figure). Solid lines – approximation of the experimental results by the equivalent circuit diagram (see inset in the figure). Films are fabricated from suspensions consisting of the mixture of SWCNT and WS_2-NT in the ratios 2 ml SWCNT : 10 ml WS_2-NT. Measurements are carried out at 4.2 K

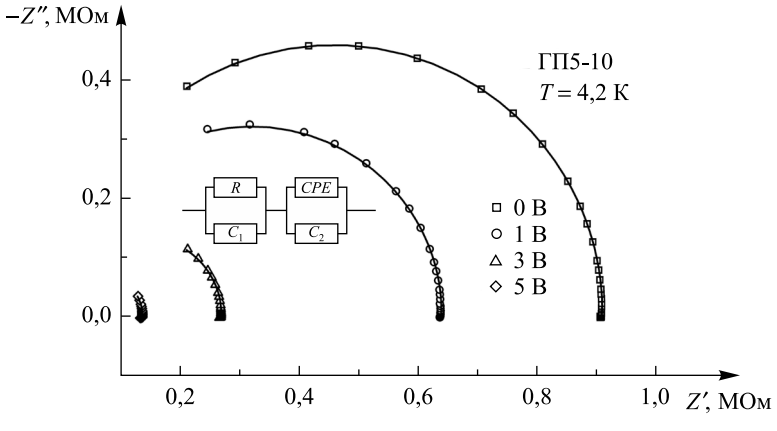


Рис. 6. Годографы импеданса гибридных пленок, построенные по результатам измерений зависимостей $Z'(f)$ и $Z''(f)$, выполненных при различных значениях постоянного напряжения смещения (указаны на рисунке). Сплошные линии – аппроксимация экспериментальных результатов показанной на вставке эквивалентной схемой замещения. Пленки получены из суспензий, содержащих смеси ОУНТ и WS_2-НТ в соотношении 5 мл ОУНТ : 10 мл WS_2-НТ. Измерения выполнены при температуре 4,2 К

Fig. 6. Impedance diagrams of hybrid films constructed from the measuring results for $Z'(f)$ and $Z''(f)$ dependences at different bias voltages (indicated in the figure). Solid lines – approximation of the experimental results by the equivalent circuit diagram (see inset in the figure). Films are fabricated from suspensions consisting of the mixture of SWCNT and WS_2-NT in the ratios 5 ml SWCNT : 10 ml WS_2-NT. Measurements are carried out at 4.2 K

Заключение

В работе представлены результаты исследований электропроводности на переменном токе (в диапазоне частот 100 Гц – 1 МГц) гибридных пленок из однослойных углеродных нанотрубок и многослойных нанотрубок дисульфида вольфрама в широком температурном интервале (4,2; 77 и 300 К). Установлено, что при значениях T, равных 77 и 300 К, пленки проявляют резистивные свойства (активная часть импеданса существенно превышает реактивную). Увеличение концентрации неорганических

нанотрубок в гибридных пленках приводит к повышению роли контактных барьеров между углеродными нанотрубками, характеризующимися высокой электропроводностью. Показано, что при низких температурах импеданс пленок определяется емкостью и сопротивлением барьеров между углеродными нанотрубками, а также электрическими свойствами самих нанотрубок.

Библиографические ссылки

1. *Tenne R., Margulis L., Genut M., et al.* Polyhedral and cylindrical structures of tungsten disulfide // Lett. Nat. 1992. Vol. 360, № 6403. P. 444–446.

2. *Feldman Y., Wasserman E., Srolovitz D. J., et al.* High-Rate, Gas-Phase Growth of MoS_2 Nested Inorganic Fulerenes and Nanotubes // Science. 1995. Vol. 267, № 5195. P. 222–225.

3. *Nath M., Rao C. N. M.* $MoSe_2$ and WSe_2 nanotubes and related structures // Chem. Commun. 2001. № 21. P. 2236–2237.

4. *Li J. Y., Chen X. L., Qiao Z. Y., et al.* Synthesis of GaN nanotubes // J. Mater. Sci. Lett. 2001. Vol. 20, № 21. P. 1987–1988.

5. *Ивановская В. В., Ивановский А. Л.* О некоторых направлениях компьютерного моделирования неорганических наноструктур // Наноструктуры. Матем. физика и моделирование. 2009. Т. 1, № 1. С. 7–24.

6. *Deniz H., Qin L.-C.* Determination of the chiral indices of tungsten disulfide (WS_2) nanotubes by electron diffraction // Chem. Phys. Lett. 2012. Vol. 552. P. 92–96.

7. *Seifert G., Terrones H., Terrones M., et al.* Structure and Electronic Properties of MoS_2 Nanotubes // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 85, № 1. P. 146–149.

8. *Seifert G., Terrones H., Terrones M., et al.* On the electronic Properties of WS_2 Nanotubes // Solid State Comm. 2000. Vol. 114, № 5. P. 245–248.

9. *Zhang C., Ning Z., Liu Y., et al.* Electrical transport properties on water and oxygen absorption // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 101, № 11. P. 113112-1–113112-5.

10. *Levi R., Bitton O., Leitus G., et al.* Field-effect transistors based on WS_2 nanotubes with high current-carrying capacity // Nano Lett. 2013. Vol. 13, № 8. P. 3736–3741.

11. *Sedova A., Khodorov S., Ehre D., et al.* Dielectric and Electrical Properties of WS_2 Nanotubes / Epoxy Composites and Their Use for Stress Monitoring of Structures // J. Nanomaterials. 2017. Vol. 2017. Article ID 4838095. P. 1–13.

12. *Ksenevich V. K., Gorbachuk N. I., Viet H., et al.* Electrical properties of carbon nanotubes / WS_2 nanotubes (nanoparticles) hybrid films // Nanosystems: Phys., Chem., Mathem. 2016. Vol. 7, № 3. P. 37–43.

13. *Barsoukov E., Macdonald J. R.* Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications. Hoboken, 2005. P. 37.

14. *Буянова Е. С., Емельянова Ю. В.* Импедансная спектроскопия электролитических материалов [Электронный ресурс]. 2008. URL: http://elar.urfu.ru/handle/10995/1542 (дата обращения: 12.06.2017).

15. *Зи С. М.* Физика полупроводниковых приборов : в 2 ч. М., 1984. Ч. 1. С. 283.

16. *Burke P. J.* An RF Circuit Model for Carbon Nanotubes // IEEE Trans. Nanotechnol. 2003. Vol. 2, № 1. P. 55–58.

References

1. Tenne R., Margulis L., Genut M., et al. Polyhedral and cylindrical structures of tungsten disulfide. *Lett. Nat.* 1992. Vol. 360, No. 6403. P. 444–446. DOI: 10.1038/360444a0.

2. Feldman Y., Wasserman E., Srolovitz D. J., et al. High-Rate, Gas-Phase Growth of MoS_2 Nested Inorganic Fulerenes and Nanotubes. *Science.* 1995. Vol. 267, No. 5195. P. 222–225. DOI: 10.1126/science.267.5195.222.

3. Nath M., Rao C. N. M. $MoSe_2$ and WSe_2 nanotubes and related structures. *Chem. Commun.* 2001. No. 21. P. 2236–2237. DOI: 10.1039/B107296J.

4. Li J. Y., Chen X. L., Qiao Z. Y., et al. Synthesis of GaN nanotubes. *J. Mater. Sci. Lett.* 2001. Vol. 20, No. 21. P. 1987–1988. DOI: 10.1023/A:1013155323435.

5. Ivanovskaya V. V., Ivanovsky A. L. [On some directions of computer modeling of inorganic nanostructures]. *Nanostruktury. Matem. fiz. modelirovanie.* 2009. Vol. 1, No. 1. P. 7–24 (in Russ.).

6. Deniz H., Qin L.-C. Determination of the chiral indices of tungsten disulfide (WS_2) nanotubes by electron diffraction. *Chem. Phys. Lett.* 2012. Vol. 552. P. 92–96. DOI: 10.1016/j.cplett.2012.09.041.

7. Seifert G., Terrones H., Terrones M., et al. Structure and Electronic Properties of MoS_2 Nanotubes. *Phys. Rev. Lett.* 2000. Vol. 85, No. 1. P. 146–149. DOI: 10.1103/PhysRevLett.85.146.

8. Seifert G., Terrones H., Terrones M., et al. On the electronic Properties of WS_2 Nanotubes. *Solid State Comm.* 2000. Vol. 114, No. 5. P. 245–248. DOI: 10.1016/S0038-1098(00)00047-8.

9. Zhang C., Ning Z., Liu Y., et al. Electrical transport properties on water and oxygen absorption. *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 101, No. 11. P. 113112-1–113112-5. DOI: 10.1063/1.4752440.

10. Levi R., Bitton O., Leitus G., et al. Field-effect transistors based on WS_2 nanotubes with high current-carrying capacity. *Nano Lett.* 2013. Vol. 13, No. 8. P. 3736–3741. DOI: 10.1021/nl401675k.

11. Sedova A., Khodorov S., Ehre D., et al. Dielectric and Electrical Properties of WS_2 Nanotubes / Epoxy Composites and Their Use for Stress Monitoring of Structures. *J. Nanomaterials.* 2017. Vol. 2017. Article ID 4838095. P. 1–13. DOI: 10.1155/2017/4838095.

12. Ksenevich V. K., Gorbachuk N. I., Viet H., et al. Electrical properties of carbon nanotubes / WS_2 nanotubes (nanoparticles) hybrid films. *Nanosystems: Phys., Chem., Mathem.* 2016. Vol. 7, No. 3. P. 37–43. DOI: 10.17586/2220-8054-2016-7-1-37-43.

13. Barsoukov E., Macdonald J. R. Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications. Hoboken, 2005. P. 37.

14. Buyanova E. S., Emelyanova Yu. V. [Impedance spectroscopy of electrolytic materials]. 2008. URL: http://elar.urfu.ru/handle/10995/1542 (date of access: 12.06.2017) (in Russ.).

15. Zi S. M. [Physics of semiconductor devices] : in 2 parts. Moscow, 1984. Part 1. P. 283 (in Russ.).

16. Burke P. J. An RF Circuit Model for Carbon Nanotubes. *IEEE Trans. Nanotechnol.* 2003. Vol. 2, No. 1. P. 55–58. DOI: 10.1109/TNANO.2003.808503.

Статья поступила в редколлегию 31.07.2017.
Received by editorial board 31.07.2017.