

Данный текст является русскоязычной версией опубликованной на английском языке статьи и представлен в авторской редакции только на данном сайте!

UDC 621.793

Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-478-484

For citation: Voronin A. S., Fadeev Yu. V., Simunin M. M., Podshivalov I. V., Khartov S. V. Research of electromagnetic shielding properties of single-walled carbon nanotubes thin transparent films. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2019, Vol. 20, No. 4, P. 478–484. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-478-484

Для цитирования: Воронин А. С., Фадеев Ю. В., Симунин М. М., Подшивалов И. В., Хартов С. В. Исследование радиоэкранирующих свойств тонких прозрачных пленок одностенных углеродных нанотрубок // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 4. С. 478–484. Doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-4-478-484

RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC SHIELDING PROPERTIES OF SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES THIN TRANSPARENT FILMS

A. S. Voronin^{1*}, Yu. V. Fadeev¹, M. M. Simunin^{1,2}, I. V. Podshivalov³, S. V. Khartov¹

¹Krasnoyarsk Scientific Center of the SB RAS
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

³Institute of Physics named after L.V. Kirensky
50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

*E-mail: a.voronin1988@mail.ru

The paper presents the results of studying the shielding properties of thin transparent films in single-walled carbon nanotubes on flexible substrates of polyethylene terephthalate. The films were formed by spraying colloidal solution on single-walled carbon nanotubes. The film thickness was determined by the volume of the sprayed colloidal solution and was measured using transmission electron microscopy in a cross-section mode. The morphology and structural quality of the films were studied by electron microscopy, optical spectroscopy, and Raman spectroscopy. The results showed the high structural quality of the material. According to Raman spectroscopy, the ratio of peaks intensities G / D is 23.4, which is the evidence of a significant predominance of carbon in the sp² hybridization. It is typical for graphitelike systems and, in particular, carbon nanotubes. The spectral dependences of the transmission and reflection coefficients of radio waves in the K range of 18–26.5 GHz were studied. Absorption of radiation is the dominant shielding mechanism. Increasing the film thickness from 15.9 to 56.1 nm is accompanied by decreasing the surface resistance from 971 to 226 Ohm / sq, while optical transparency decreases from 93.58 to 76.71 %. Shielding efficiency increases from 2.29 to 6.6 dB, increasing the proportion of absorbed radiation from 34.6 to 51.2 % at a frequency of 18 GHz. This indicates the prospects for the use of films as electromagnetic shielding and anti-icing coatings in the aerospace industry.

Keywords: single-walled carbon nanotubes, thin films, electromagnetic shielding.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОЭКРАНИРУЮЩИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПРОЗРАЧНЫХ ПЛЕНОК ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

А. С. Воронин^{1*}, Ю. В. Фадеев¹, М. М. Симунин^{1,2}, И. В. Подшивалов³, С. В. Хартов¹

¹ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН»

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
²Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
³Институт физики имени Л. В. Киренского
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50
*E-mail: a.voronin1988@mail.ru

Представлены результаты исследования экранирующих свойств тонких прозрачных пленок одностенных углеродных нанотрубок на гибких подложках из полиэтилентерефталата. Пленки формировались спрей распылением коллоидного раствора одностенных углеродных нанотрубок. Толщина пленок задавалась объемом распыляемого коллоидного раствора и измерялась при помощи просвечивающей электронной микроскопии в режиме cross-section. Морфология и структурное качество пленок были изучены методами электронной микроскопии, методами оптической спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. Результаты позволяют судить о высоком структурном качестве материала. Согласно данным спектроскопии комбинационного рассеяния, соотношение интенсивностей пиков G/D составляет 23,4, что является свидетельством существенного преобладания углерода, находящегося в состоянии sp^2 гибридизации. Это характерно для графитоподобных систем и, в частности, углеродных нанотрубок. Изучены спектральные зависимости коэффициента прохождения и отражения радиоволн в К-диапазоне 18–26,5 ГГц. Доминирующим механизмом экранирования является поглощение излучения. Увеличение толщины пленки с 15,9 до 56,1 нм сопровождается снижением поверхностного сопротивления с 971 до 226 Ом/кв, оптическая прозрачность при этом снижается с 93,58 до 76,71 %. Эффективность экранирования увеличивается с 2,29 до 6,6 дБ, повышая долю поглощенного излучения с 34,6 до 51,2 % на частоте 18 ГГц. Это говорит о перспективах применения пленок в качестве радиоэкранирующих и антиобледенительных покрытий в аэрокосмической отрасли.

Ключевые слова: одностенные углеродные нанотрубки, тонкие пленки, электромагнитное экранирование.

Введение: Одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) являются перспективным материалом для аэрокосмической отрасли в силу уникального сочетания высокой механической прочности (модуль Юнга ~ 1 ТПа), высокой электропроводности, а также низкой плотности и, как следствие, малой массы готового изделия. Перечисленные свойства предполагают широкие перспективы применения ОУНТ в качестве армирующего материала для полимерных композитов, легких и прочных электрокабелей, функциональных слоёв для прозрачных электрообогреваемых и радиоэкранирующих элементов конструкции. Функция радиоэкранирования представляют интерес, в частности, с точки зрения решения задачи защиты информации. Еще в 80-х гг. XX в. была показана принципиальная возможность перехвата и расшифровки информации, содержащейся в излучении от монитора компьютера. Это обстоятельство повышает приоритет применения различных мер по защите самых разнообразных электронных объектов от несанкционированного съема информации, содержащейся в них, или возможного внешнего воздействия. Основным решением по защите информации стало экранирование устройств вывода. Реалистичность такого сценария была экспериментально доказана. В России этот канал утечки информации называется ПЭМИН (побочные электромагнитные излучения и наводки), в США стандарт имеет название TEMPEST (Transient Electromagnetic Pulse Emanation Standard).

Традиционно в виде экранирующих пленок выступают тонкие слои прозрачных проводящих оксидов, таких как $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ [1] и $\text{ZnO}:\text{Al}$ [2].

Углеродные наноматериалы, такие как углеродные нанотрубки (одностенные [3] и многостенные), графен [4; 5], восстановленный оксид графена [6], а также полимеры с

сопряженными связями [7], перспективны в данной задаче, в следствии чего в настоящее время ведется активное изучение их экранирующих свойств.

В работе [3] исследовалась эффективность экранирования электромагнитного излучения ВЧ и СВЧ диапазона пленками ОУНТ толщиной от 10 нм до 10 мкм. Показано, что эффективность экранирования пленки ОУНТ толщиной 100 нм составляет порядка 40 дБ на частоте 10 ГГц, однако оптическая прозрачность такой пленки порядка 50 %, что существенно ниже эксплуатационных требований (>80 %). В случае монослоя графена эффективность экранирования составляет 2,27 дБ при поверхностном сопротивлении 635 Ом/кВ и оптической прозрачности 97,8 % [4]. Монослой графена обладает достаточно низкой эффективностью экранирования, однако за счет высокой прозрачности может быть частью композитного покрытия, например, в сочетании с металлическими сетками либо нанопроволоками.

Методика формирования пленок одностенных углеродных нанотрубок. В работе исследуется экранирующая способность тонких пленок ОУНТ (OCSiAl, Новосибирск) на подложках из полиэтилентерефталата. Нанесение тонких пленок ОУНТ осуществлялось спрей-методом. Подробное описание приводится в работах [8; 9]. Принцип заключается в следующем: сжатый воздух от компрессора подается к форсунке (аэрографу) под давлением 6 атм. (0,6 МПа), распыляя коллоидную дисперсию ОУНТ (методика приготовления подробно описана в работе [9]) на нагретые подложки из полиэтилентерефталата (производство Hi-Fi, Япония, толщина 50 мкм) в качестве основной подложки и предметное щелочное стекло толщиной 1 мм для спектроскопических измерений. Температура подложки контролируется нагревательным элементом. В данной работе она составляла 120 °С. Этого достаточно, чтобы микрокапли коллоидного раствора испарялись, не успевая коалесцировать на подложке.

Толщина пленок ОУНТ задавалась объемом распыляемой дисперсии ОУНТ. В работе использовались четыре объема ОУНТ чернил: 1, 2, 3 и 4 мл. После распыления коллоидного раствора пленки промывались в течение часа дистиллированной водой, а затем сушились при температуре 100 °С в течение часа с целью удаления остаточной воды и формирования связной пленки нанотрубок.

Исследование морфологии и толщины пленок ОУНТ методом сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии. Морфология и толщина пленок ОУНТ изучалась методами электронной микроскопии. Исследование морфологии осуществлялось при помощи сканирующего электронного микроскопа Hitachi S5500 (ЦКП ФИЦ КНЦ СО РАН). На рис. 1, *a*, *b*, *c* приведены пленки, полученные распылением 1 и 3 мл дисперсии ОУНТ соответственно. Видно, что при увеличении объема распыляемой дисперсии увеличивается плотность пленки ОУНТ.

Измерение толщины пленок ОУНТ осуществлялось методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) при помощи просвечивающего электронного микроскопа Hitachi HT7700 в режиме cross-section, согласно методике, описанной в работе [10].

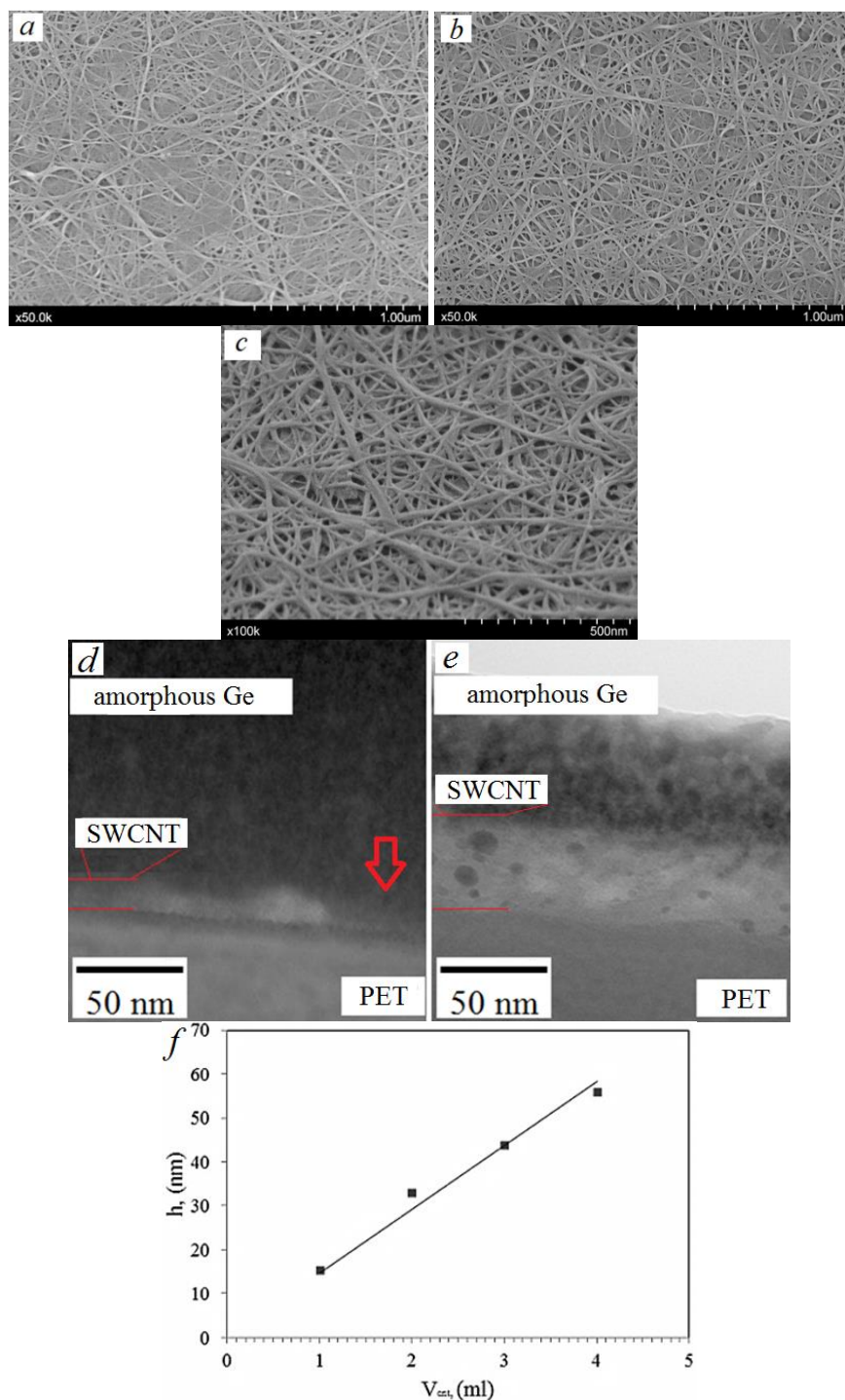


Рис. 1. СЭМ изображение пленок ОУНТ различной толщины: 1 мл (a) и 3 мл (b и c) дисперсии; ПЭМ изображение пленок ОУНТ различной толщины: 1 мл (d) и 3 мл (e) дисперсии; зависимость толщины пленок ОУНТ от объема распыленной дисперсии (f)

Fig. 1. SEM images of SWCNT films of various thicknesses: 1 ml (a) and 3 ml (b and c) of dispersion; TEM image of SWCNT films of various thicknesses: 1 ml (d) and 3 ml (e) of dispersion; dependence of the thickness of SWCNT films on the volume of dispersed dispersion (f)

Измерение средней толщины пленок ОУНТ в режиме cross-section позволило определить среднюю толщины плёнок для всех объемов распыленной дисперсии. Толщины пленок для 1, 2, 3 и 4 мл дисперсии составляют 15,3, 32,9, 44,9 и 56,1 нм соответственно. Исходя из тангенса угла наклона прямой, зависимость толщины пленки от объема распыленного

коллоида может быть описана уравнением $h = 14,56 \cdot V$. Это позволяет точно характеризовать параметры пленок ОУНТ для выбранного технологического режима.

Исследование структурных и оптоэлектронных характеристик тонких пленок ОУНТ. Все спектроскопические исследования проводились для пленок ОУНТ на щелочном стекле, что исключало вклад подложки в спектры и тем самым делало анализ более объективным. Оптическая прозрачность пленок ОУНТ была исследована методом оптической спектрофотометрии при помощи спектрофотометра Shimadzu UV-3600 в диапазоне 400–2500 нм.

На рис. 2, *a* показано спектральное пропускание для подложки из щелочного стекла и пленки ОУНТ толщиной 44,9 нм. На графике видны характерные для ОУНТ три пика поглощения, которые соответствуют электронным переходам между особенностями ван Хофа для полупроводниковых ($S_{11} \sim 1836$ нм и $S_{22} \sim 1064$ нм) и металлических ($M_{11} \sim 786$ нм) ОУНТ [11]. Положение этих пиков зависит от диаметра ОУНТ. При уменьшении диаметра все три пика испытывают голубой сдвиг.

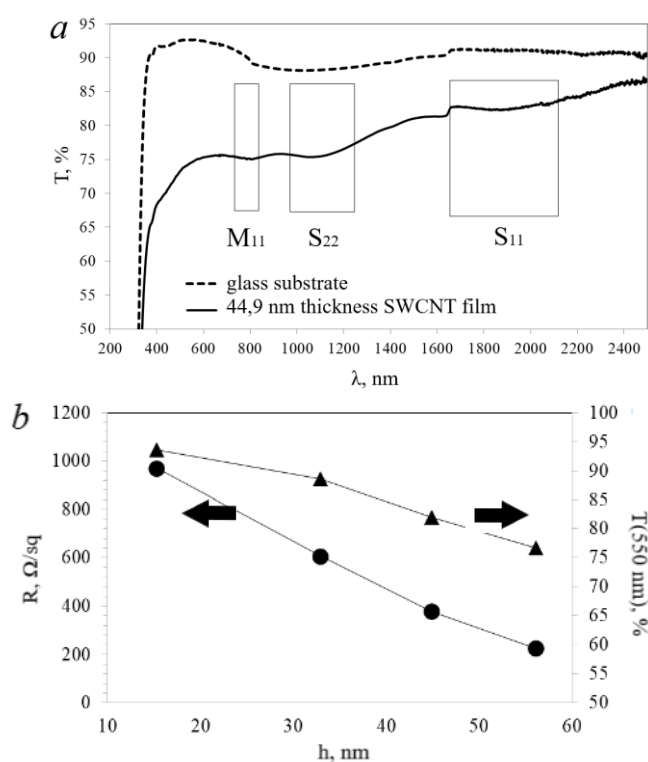


Рис. 2. Пропускание пленки ОУНТ толщиной 44,9 нм в диапазоне 400–2500 нм (*a*); зависимость поверхностного сопротивления и пропускания пленок ОУНТ от толщины пленки (*b*)

Fig. 2. Transmission of a SWCNT film 44.9 nm thick in the range 400–2500 nm (*a*); dependence of surface resistance and transmission of SWCNT films as a function of film thickness (*b*)

На рис. 2, *b* приведены зависимости удельного поверхностного сопротивления и оптического пропускания на длине волны 550 нм от толщины пленки ОУНТ. Поверхностное сопротивление пленок равно 971, 607, 379 и 226 Ом/кВ соответственно, а оптическое пропускание за вычетом отражения от стеклянной подложки равно 93,6, 88,5, 81,9 и 76,7 % соответственно.

Структурное качество ОУНТ наиболее полно можно охарактеризовать при помощи спектроскопии комбинационного рассеяния. Атомные колебания в ОУНТ исследовались при помощи спектроскопии комбинационного рассеяния. На рис. 3 показаны спектры

комбинационного рассеяния для пленок толщиной 15,3 и 56,1 нм, полученные при помощи Раман-спектрометра Horiba Jobin Yvon T64000 (ЦКП ФИЦ КНЦ СОРАН).

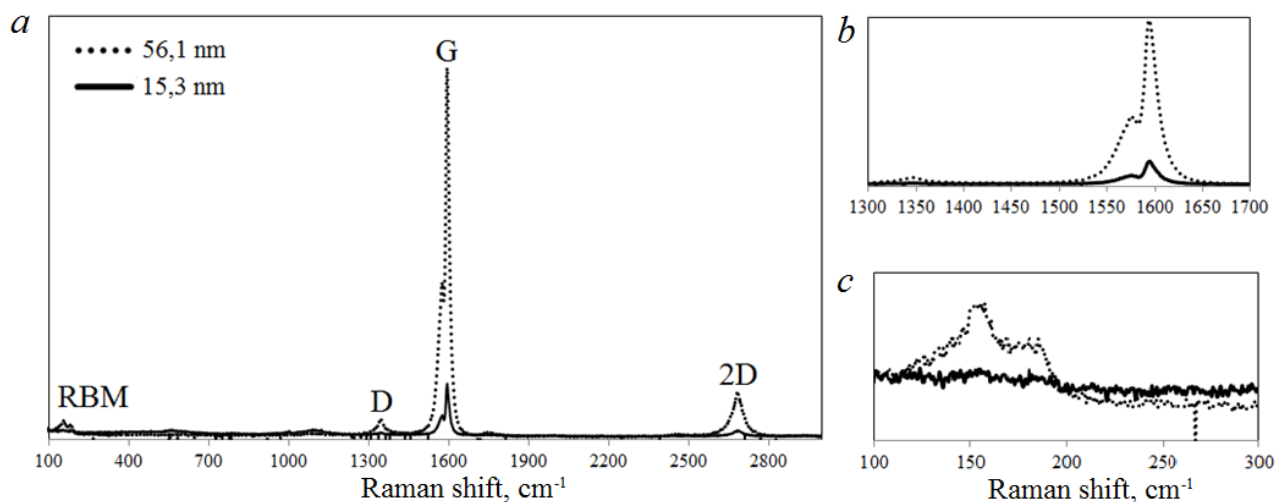


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния пленок ОУНТ толщиной 15 и 50 нм (а); увеличенные фрагменты D и G пиков (б) и дыхательной RBM моды (в)

Fig. 3. Raman spectra of SWCNT films with a thickness of 15 and 50 nm (a); enlarged fragments of D and G peaks (b) and respiratory RBM modes (c)

На спектрах можно выделить три пика, характерных для ОУНТ: G-линия, характеризующая колебания системы углеродных sp^2 связей ($\sim 1592,8$ см⁻¹) (графитоподобная зона), 2D-линия ($\sim 2678,7$ см⁻¹), свидетельствующая о двумерности материала, являющаяся обертоном D-линии (дефектная зона) ($\sim 1332,5$ см⁻¹). RBM-пик (дыхательная мода расщепленный пик на $\sim 150,6$ см⁻¹ и $\sim 180,29$ см⁻¹) характеризует колебания типа «расширение – сжатие» относительно центральной оси нанотрубок [12]. Также стоит отметить, что толщина пленки не влияет на положение пиков. Низкая интенсивность D-моды свидетельствует о низкой дефектности нанотрубного материала, соотношение интенсивностей пиков G/D составляет 23,4.

В работе [9] нами был вычислен диаметр ОУНТ данного типа. Он составил 1,6–1,8 нм, что коррелирует с результатами работы [13].

Исследование радиоэкранирующих свойств пленок ОУНТ. Коэффициенты отражения (S_{11}) и прохождения (S_{21}) в К-диапазоне (18–26,5 ГГц) измерялись согласно схеме, приведенной на рис. 4. Образцы пленок ОУНТ зажимались при помощи резьбовых соединений между двух волноводно коаксиальных переходов прямоугольного сечения с размерами $5,5 \times 11$ мм. Возбуждение и анализ сигнала производились при помощи векторного анализатора цепей R&S ZVA 50. Изменение уровня прошедшего и отраженного сигнала позволит сделать выводы о величине эффекта экранирования и его механизме. Стоит заметить, что подход, предусматривающий использование волновода, в отличие от метода измерения в свободном пространстве (с использованием рупоров), позволяет оценить уровень отражений СВЧ сигнала от образца.

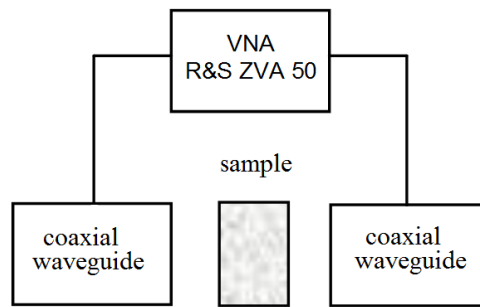


Рис. 4. Схематическое изображение измерительной установки
Fig. 4. Schematic representation of a measurement setup

На рис. 5 приведены спектральные зависимости параметров S_{11} и S_{21} , измеряемые в дБ и являющиеся коэффициентами отражения и прохождения соответственно.

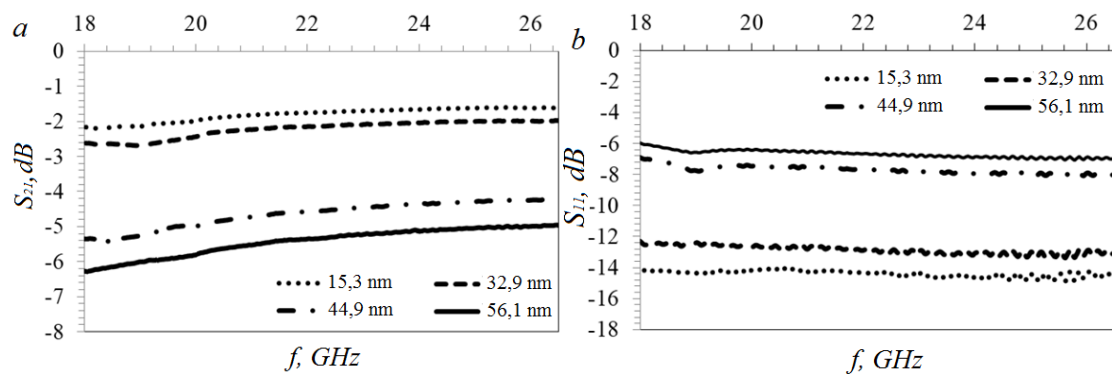


Рис. 5. Спектральные зависимости параметров S_{21} (a) и S_{11} (b) для пленок ОУНТ различной толщины
Fig. 5. Spectral dependences of parameters S_{21} (a) and S_{11} (b) for SWCNT films of various thicknesses

Таким образом, зная величины коэффициентов S_{21} и S_{11} , можно вычислить коэффициенты пропускания и отражения, согласно следующим уравнениям [14]

$$T = \frac{P_t}{P_i} = 10^{(0.1S_{21})}, \quad (1)$$

$$R = \frac{P_r}{P_i} = 10^{(0.1S_{11})}$$

Исходя из того, что сумма всех компонент излучения равна 1, можно вычислить долю поглощенного излучения, согласно следующему уравнению $A = 1 - T - R$ (см. таблицу).

Зависимость пропускания, отражения и поглощения пленок ОУНТ различной толщины на частоте 18 ГГц

Толщина пленки ОУНТ, нм	T (18 ГГц), %	R (18 ГГц), %	A (18 ГГц), %
15,3	60,8	4,1	34,6
32,9	54,8	5,8	39,4
44,9	29,2	20,4	50,4
56,1	23,6	25,2	51,2

Основной моделью, описывающей взаимосвязь между величиной удельного поверхностного сопротивления тонких пленок немагнитных материалов, является модель сплошного слоя [14]

$$SE(dB) = 20 \lg \left(1 + \frac{Z_0}{2R_s} \right) \quad (2)$$

На рис. 6 представлено сравнение зависимостей экспериментально полученных значений эффективности экранировки на частоте 18 ГГц от величины поверхностного сопротивления покрытий, вычисленной по уравнению $SE(dB) = -10 \lg T$, и от величины поверхностного сопротивления пленок ОУНТ на границах исследуемого диапазона и аппроксимация экспериментальных точек (уравнение 2).

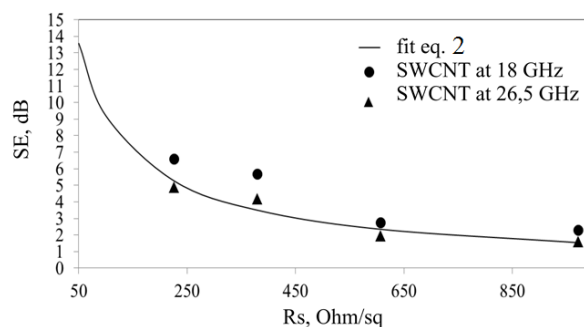


Рис. 6. Зависимость эффективности экранирования от величины поверхностного сопротивления для пленок ОУНТ на границах исследуемого диапазона

Fig. 6. Shielding efficiency as a function of surface resistance for SWCNT films at the boundaries of the studied range

Из графика видно, что полученные результаты имеют хорошее согласие с моделью, в результате чего можно сделать предположение, что эффективность экранирования может быть увеличена за счет снижения поверхностного сопротивления пленок ОУНТ. Одностенные углеродные нанотрубки могут быть легированы и приобретать либо дырочную [15] (легирование акцепторами электронов, такими как HNO_3 , FeCl_3 , HAuCl_4), либо электронную [16] проводимость (легирование донорами электронов: амины, фосфины и т. д.). Изначально пленки ОУНТ имеет дырочную проводимость, о чем свидетельствует знак коэффициента Зеебека (+40 мВ при комнатной температуре) [9]. Как видно из уравнения 2, понижение поверхностного сопротивления за счет легирования до величины 50 Ом/кв способствует увеличению эффективности экранирования до величины 13,5 дБ или пропусканию не более 4,5 %. Таким образом, оставшиеся 95,5 % мощности будут поглощены в пленке и частично отражены назад. Это обстоятельство говорит о перспективности использования прозрачных пленок ОУНТ в задаче экранирования электромагнитного излучения СВЧ диапазона.

Закключение. Исследованы радиоэкранирующие свойства тонких пленок ОУНТ на гибких ПЭТ подложках. Определены величины вкладов отражения и поглощения. Превалирующим фактором ослабления радиоизлучения в исследуемом К-диапазоне (18–26,5 ГГц) является поглощение излучения. Увеличение толщины пленки с 15,9 до 56,1 нм увеличивает долю поглощенного излучения с 34,6 до 51,2 % на частоте 18 ГГц.

Благодарности. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект «мол_а» № 18-38-00852.

Acknowledgment. This work was supported by Russian Foundation for Basic Research project «mol_a» № 18-38-00852.

Библиографические ссылки

1. M. Zhu, C. Xiong, Q. Lee Research on ITO transparent electromagnetic shielding coatings for E-O system // *Proc. of SPIE*. 2009. Vol. 6722. P. 1–7.
2. Characteristics of the electromagnetic interference shielding effectiveness of Al-doped ZnO thin films deposited by atomic layer deposition / Y.-J. Choi, S. C. Gong, D. C. Johnson et al. // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 269. P. 92–97.
3. Microwave shielding of transparent and conducting single-walled carbon nanotube films / H. Xu, S. M. Anlage, L. Hu, G. Gruner // *Applied Physics Letters*. 2007. Vol. 90. P. 183119.
4. Electromagnetic interference shielding effectiveness of monolayer grapheme / S. K. Hong, K. Y. Kim, T. Y. Kim et al. // *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. P. 455704.
5. Zhang H.-L., Xia Y., Gai J.-G. Ultrathin Active Layer for Transparent Electromagnetic Shielding Window // *ACS Omega*. 2018. Vol. 3. P. 2765–2772.
6. Electromagnetic Interference (EMI) Transparent Shielding of Reduced Graphene Oxide (RGO) Interleaved Structure Fabricated by Electrophoretic Deposition / S. Kim, J.-S. Oh, M.-G. Kim et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2014. Vol. 6. P. 17647–17653.
7. Intrinsic electromagnetic radiation shielding/absorbing characteristics of polyaniline-coated transparent thin films / B. R. Kim, H. K. Lee, E. Kim, S. H. Lee et al. // *Synthetic Metals*. 2010. Vol. 160. P. 1838–1842.
8. Preparation and Investigation of Composite Transparent Electrodes of Poly (3,4-ethylenedioxythiophene) Polystyrene Sulfonate/Single-Wall Carbon Nanotubes / A. S. Voronin, M. M. Simunin, F. S. Ivanchenko et al. // *Technical Physics Letters*. 2017. Vol. 43, No. 9, P. 783–786.
9. Структурные и термоэлектрические свойства оптически прозрачных тонких пленок на основе одностенных углеродных нанотрубок / И. А. Тамбасов, А. С. Воронин, Н. П. Евсевская и др. // *Физика твердого тела*. 2018. Т. 60, вып. 12. С. 2456–2462.
10. Структурные и магнитные характеристики однослойных и многослойных наногранулированных пленок $\text{Co-Al}_2\text{O}_3$, полученных методом твердофазного синтеза / М. Н. Волочаев, С. В. Комогорцев, В. Г. Мягков и др. // *Физика твердого тела*. 2018. Т. 60, вып. 7. С. 1409–1415.
11. Transparent, conductive carbon nanotube films / Z. Wu, Z. Chen, X. Du et al. // *Science*. 2004. Vol. 305, No. 5688. P. 1273–1276.
12. Raman spectroscopy of carbon nanotubes / M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, R. Saito, A. Jorio // *Phys. Rep.* 2005. Vol. 409, No. 2. P. 47–99.
13. Universal Selective Dispersion of Semiconducting Carbon Nanotubes from Commercial Sources Using a Supramolecular Polymer / A. Chortos, I. Pochorovski, P. Lin et al. // *ACS Nano*. 2017. Vol. 11. P. 5660–5669.
14. Graphene paper for exceptional EMI shielding performance using large-sized graphene oxide sheets and doping strategy / Y.-J. Wan, P.-L. Zhu, S.-H. Yu et al. // *Carbon*. 2017. Vol. 122. P. 74–81.
15. Hecht D. S., Hu L. B., Irvin G. Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures // *Adv. Mater.* 2011. Vol. 23. P. 1482–1513.
16. Brownlie L., Shapter J. Advances in carbon nanotube n-type doping: Methods, analysis and applications // *Carbon*. 2018. Vol. 126. P. 257–270.

References

1. Zhu M., Xiong C., Lee Q. Research on ITO transparent electromagnetic shielding coatings for E-O system. *Proc. of SPIE*. 2009, Vol. 6722, P. 1–7.
2. Choi Y.-J., Gong S. C., Johnson D. C. et al. Characteristics of the electromagnetic interference shielding effectiveness of Al-doped ZnO thin films deposited by atomic layer deposition. *Applied Surface Science*. 2013, Vol. 269, P. 92–97.

3. Xu H., Anlage S. M., Hu L., Gruner G. Microwave shielding of transparent and conducting single-walled carbon nanotube films. *Applied Physics Letters*. 2007, Vol. 90, P. 183119.
4. Hong S. K., Kim K. Y., Kim T. Y. et al. Electromagnetic interference shielding effectiveness of monolayer graphene. *Nanotechnology*. 2012, Vol. 23, P. 455704.
5. Zhang H.-L., Xia Y., Gai J.-G. Ultrathin Active Layer for Transparent Electromagnetic Shielding Window. *ACS Omega*. 2018, Vol. 3, P. 2765–2772.
6. S. Kim, J.-S. Oh, M.-G. Kim, W. Jang, M. Wang, Y. Kim, H. W. Seo, Y. C. Kim, J.-H. Lee, Y. Lee, J.-D. Nam Electromagnetic Interference (EMI) Transparent Shielding of Reduced Graphene Oxide (RGO) Interleaved Structure Fabricated by Electrophoretic Deposition // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2014. V. 620. P. 17647-17653.
7. Kim B. R., Lee H. K., Kim E., Lee S. H. et al. Intrinsic electromagnetic radiation shielding/absorbing characteristics of polyaniline-coated transparent thin films // *Synthetic Metals*. 2010, Vol. 160, P. 1838–1842.
8. Voronin A. S., Simunin M. M., Ivanchenko F. S. et al. Preparation and Investigation of Composite Transparent Electrodes of Poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) Polystyrene Sulfonate/Single-Wall Carbon Nanotubes. *Technical Physics Letters*. 2017, Vol. 43, No. 9, P. 783–786.
9. Tambasov I. A., Voronin A. S., Evsevskaya N. P. et al. Structural and Thermoelectric Properties of Optically Transparent Thin Films Based on Single-Walled Carbon Nanotubes. *Physics of the Solid State*. 2018, Vol. 60, No. 12, P. 2649–2655.
10. Volochaev M. N., Komogortsev S. V., Myagkov V. G. et al. Structural and Magnetic Characteristics of Nanogranular Co–Al₂O₃ Single- and Multilayer Films Formed by the Solid-State Synthesis. *Physics of the Solid State*. 2018, Vol. 60, No. 7, P. 1425–1431.
11. Wu Z., Chen Z., Du X., J. M. Logan et al. Transparent, conductive carbon nanotube films. *Science*. 2004, Vol. 305, No. 5688, P.1273–1276.
12. Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Saito R., Jorio A. Raman spectroscopy of carbon nanotubes. *Phys. Rep.* 2005, Vol. 409, No. 2, P. 47–99.
13. Chortos A., Pochorovski I., Lin P. et al. Universal Selective Dispersion of Semiconducting Carbon Nanotubes from Commercial Sources Using a Supramolecular Polymer. *ACS Nano*. 2017, Vol. 11, P. 5660–5669.
14. Wan Y.-J., Zhu P.-L., Yu S.-H. et al. Graphene paper for exceptional EMI shielding performance using large-sized graphene oxide sheets and doping strategy. *Carbon*. 2017, Vol. 122, P. 74–81.
15. Hecht D. S., Hu L. B., Irvin G. Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures. *Adv. Mater.* 2011, Vol. 23, P. 1482–1513.
16. Brownlie L., Shapter J. Advances in carbon nanotube n-type doping: Methods, analysis and applications. *Carbon*. 2018, Vol. 126, P. 257–270.

Воронин А. С., Фадеев Ю. В., Симунин М. М., Подшивалов И. В., Хартов С. В., 2019

Антон Сергеевич Воронин – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела молекулярной электроники; ФИЦ КНЦ СО РАН. E-mail: a.voronin1988@mail.ru.

Фадеев Юрий Владимирович – младший научный сотрудник отдела молекулярной электроники; ФИЦ КНЦ СО РАН.

Симунин Михаил Максимович – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела молекулярной электроники; ФИЦ КНЦ СО РАН.

Подшивалов Иван Валерьевич – младший научный сотрудник лаборатории научного приборостроения; Институт физики имени Л. В. Киренского.

Хартов Станислав Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела молекулярной электроники; ФИЦ КНЦ СО РАН.

Voronin Anton Sergeyevich – Ph.D. researcher Department of Molecular Electronics; FRC KSC SB RAS. E-mail: a.voronin1988@mail.ru.

Fadeev Yuri Vladimirovich – junior researcher Department of Molecular Electronics; FRC KSC SB RAS.

Simunin Mikhail Maksimovich – Ph.D, researcher Department of Molecular Electronics; FRC KSC SB RAS.

Podshivalov Ivan Valerevich – junior researcher Laboratory of Scientific Instrumentation; L.V. Kirensky Institute of Physics.

Khartov Stanislav Viktorovich – Ph.D, Senior Researcher Department of Molecular Electronics, FRC KSC SB RAS.