
НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

УДК 538.975;535.422:517.598

АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ И ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ УГЛЕРОДА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

С. А. МАКСИМЕНКО¹⁾, Т. А. КУЛАГОВА¹⁾, А. В. ОКОТРУБ²⁾, В. И. СУСЛЯЕВ³⁾

¹⁾Институт ядерных проблем БГУ, ул. Бобруйская, 11, 220006, г. Минск, Беларусь

²⁾Институт неорганической химии им. А. В. Николаева, Сибирское отделение РАН,
пр. Академика Лаврентьева, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия

³⁾Национальный исследовательский Томский государственный университет,
пр. Ленина, 36, 634050, г. Томск, Россия

Образец цитирования:

Максименко СА, Кулагова ТА, Окотруб АВ, Сусляев ВИ. Актуальные задачи использования композиционных и гибридных материалов на основе различных форм углерода в электромагнитных и биомедицинских приложениях. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2023;1:55–69.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2023-1-55-69>

For citation:

Maksimenko SA, Kulahava TA, Okotrub AV, Suslyayev VI. Actual problems of the usage of composite and hybrid materials based on different forms of nanocarbons in electromagnetic and biomedical applications. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2023;1:55–69. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2023-1-55-69>

Авторы:

Сергей Афанасьевич Максименко – доктор физико-математических наук, профессор; директор.

Татьяна Александровна Кулагова – кандидат биологических наук, доцент; заведующий сектором биофизических исследований лаборатории наноэлектромагнетизма.

Александр Владимирович Окотруб – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий отделом химии функциональных материалов.

Валентин Иванович Сусляев – кандидат физико-математических наук; доцент кафедры радиоэлектроники радиофизического факультета.

Authors:

Sergey A. Maksimenko, doctor of science (physics and mathematics), full professor; director.

sergey.maksimenko@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8271-0449>

Tatyana A. Kulahava, PhD (biology), docent; head of the sector of biophysical research, laboratory of nanoelectromagnetics.

tatyana_kulahova@tut.by

<https://orcid.org/0000-0002-1113-7323>

Alexander V. Okotrub, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the department of chemistry of functional materials.

spectrum@niic.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9607-911X>

Valentin I. Suslyayev, PhD (physics and mathematics); associate professor at the department of radioelectronics, faculty of radio-physics.

susl@mail.tsu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0935-975X>

Представлен краткий обзор актуальных проблем прикладного электромагнетизма (беспроводная связь и защита информационных каналов от несанкционированного доступа, электромагнитная совместимость, биомедицина и др.), которые решаются за счет использования композиционных наноматериалов, в том числе на основе углеродных наноструктур. Подчеркнута важность прикладных разработок с применением механизмов тонкой настройки свойств углеродсодержащих структур, таких как функционализация, легирование, комплексообразование и гибридизация. Отмечена необходимость практического освоения новых методов создания композиционных и гибридных материалов с использованием 3D-печати, CVD и других химических технологий, а также новых видов композиционных материалов на основе пенообразных и губчатых структур, полых микроструктур и структур «ядро – оболочка» с разным химическим составом, градиентных структур. Обзор содержит широкий перечень ссылок на оригинальные и обзорные публикации последних лет по исследованию и применению композиционных материалов на основе различных форм углерода. Этот перечень может быть полезен как преподавателям соответствующих дисциплин, так и молодым ученым, выбирающим свое научное направление или уже нацеленным на решение конкретных проблем взаимодействия электромагнитного излучения с наноструктурами. Отмечено, что задача опережающего развития ряда отраслей современной индустрии, таких как коммуникационные и биомедицинские технологии, требует существенных интеллектуальных и финансовых инвестиций в фундаментальные и прикладные исследования, а также совершенствования образовательных технологий в данной области, в первую очередь на базе передовых научно-учебных экспериментальных установок и комплексов. Обзор составлен по результатам работы VI Белорусско-российского семинара-конференции «Углеродные наноструктуры, тонкие пленки и композиты: синтез, физико-химические свойства и применения».

Ключевые слова: наноэлектромагнетизм; миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн; наноструктуры; наноуглерод; композиционные материалы; синтез углеродных наноструктур; научные мероприятия.

ACTUAL PROBLEMS OF THE USAGE OF COMPOSITE AND HYBRID MATERIALS BASED ON DIFFERENT FORMS OF NANOCARBONS IN ELECTROMAGNETIC AND BIOMEDICAL APPLICATIONS

S. A. MAKSIMENKO^a, T. A. KULAHAVA^a, A. V. OKOTRUB^b, V. I. SUSLYAEV^c

*^aInstitute for Nuclear Problems, Belarusian State University,
11 Babrujskaja Street, Minsk 220006, Belarus*

*^bNikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
3 Akademika Lavrentieva Avenue, Novosibirsk 630090, Russia*

^cNational Research Tomsk State University, 36 Lenina Avenue, Tomsk 634050, Russia

Corresponding author: S. A. Maksimenko (sergey.maksimenko@gmail.com)

A brief review of actual problems of present-day applied electromagnetism (wireless communication and information channels protection from unauthorised access, electromagnetic compatibility, biomedicine, etc.) which can be solved exploiting composite nanomaterials are presented. The importance has been outlined of applied developments exploiting different mechanisms of fine tuning of custom properties of carbon-based nanostructures, such as functionalisation, doping, complexing and hybridisation. The review stresses the necessity in practical implementation novel methods of composite and hybrid materials synthesis utilising 3D printing, modified CVD and other chemical technologies, as well as new types of composites such as foams and aerogels, sponges, hollow microstructures, core – shell structures with different chemical compositions, gradient structures. The review includes a wide list of references to recent original and review publications on nanocarbon based composite materials. This list can be helpful both for university lecturers, and young scientists either choosing an ambition research topic or aimed at a concrete task in the field of electromagnetic wave interaction with nanostructures. It has been noted that the priority development rate of advanced industrial sectors, such as communication and biomedical technologies, requires essential intellectual and financial investments in fundamental and applied research and also enhancement of educational technologies, first of all – on the base of present-day experimental facilities and research-educational complexes. The review has been compiled on the basis of the results presented at the 6th Belarusian-Russian seminar-conference «Carbon nanostructures, thin films, and composites: synthesis, physical-chemical properties and applications».

Keywords: nanoelectromagnetics; millimeter and submillimeter wavelength ranges; nanostructures; nanocarbon; composite materials; carbon nanostructures synthesis; scientific events.

Современные тенденции развития прикладного наноэлектromагнетизма

Решение комплекса актуальных прикладных задач быстроразвивающихся отраслей современной индустрии, таких как электроника, беспроводная связь и защита информационных каналов, авионавтика, биомедицина, энергетика и т. п., требует разработки и внедрения широкого класса новых наукоемких материалов. В большинстве случаев прогресс в этой области достигается за счет применения композиционных и (или) гибридных материалов, проявляющих свойства, несводимые к свойствам исходных составляющих. В частности, последние три десятилетия развития науки и технологии ознаменовались быстрым прогрессом в синтезе различных типов искусственных сред и материалов, обладающих наноразмерной структурированностью и открывающих не существовавшие ранее технологические возможности. Достаточно упомянуть современные технологии микроэлектроники, оперирующие на уровне размеров 5–10 нм [1], и технологии стандартов беспроводной связи 5G и 6G, которые практически полностью базируются на наноразмерной элементной базе и композиционных материалах [2–6], техническом освоении ранее малодоступных миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн (или частотного диапазона 0,1–10,0 ТГц) [7]. Стандарты 5G и 6G обеспечивают передачу информации со скоростью мультигигабит в секунду и большей на порядки плотностью при существенно меньшем времени ожидания по сравнению с существующими стандартами мобильной связи [8; 9].

Важным стимулом освоения гига- и терагерцевого диапазонов частот является развитие методов спектроскопии органических молекул, обеспечивающих прогресс фармацевтических и биомедицинских разработок [10], а также неинвазивных технологий визуализации и анализа в медицине и сфере безопасности [11; 12]. Создание и внедрение быстрodeйствующих высокочастотных радиоэлектронных средств с пониженными массогабаритными показателями и энергопотреблением открывают новые возможности для диагностических и лечебных целей в биомедицине [13] (включая контроль состояния крови [14; 15] и лечение кожных болезней [15; 16]), исследования произведений искусства [17; 18], детектирования газов и газовых смесей [19; 20]. При этом приходится иметь дело с отсутствием важных базовых элементов и обострением проблем электромагнитной совместимости (ЭМС) на макроуровне из-за таких факторов, как нарушение герметичности, возникновение несанкционированных обратных связей, возрастание электромагнитного фона до опасных пределов и т. п.

В условиях существенного повышения уровня интеграции электронных средств, когда характерные размеры элементов электрических цепей и межэлементные расстояния сравнимы с длиной волны де Бройля электронов в среде, остро встает проблема ЭМС элементов в субмикронных и наноразмерных интегральных схемах. Можно утверждать, что содержание основных принципов ЭМС применительно к наноэлектронике будет существенно отличаться от ее классической формулировки, используемой в макроскопической радиотехнике и являющейся обязательным элементом образования радиоинженера любого профиля. Кардинальное отличие проблемы ЭМС на наноуровне состоит в том, что функционирование наноразмерных элементов цепей базируется на законах квантовой физики и, соответственно, эти законы могут оказывать существенное влияние на интерференционное взаимодействие элементов [21; 22]. Возникают механизмы взаимодействия, которые не имеют аналогов в классической электродинамике. Поскольку современная теория ЭМС в СВЧ-диапазоне целиком основана на классической макроскопической электродинамике, то для более высоких частот применительно к наноструктурированным многоэлементным системам следует ожидать значительного пересмотра теоретических представлений [23]. Данная теория будет опираться на уравнения Максвелла одновременно с многочастичными квантовыми уравнениями движения. Результатом этого пересмотра будет набор рекомендаций по оптимальному с точки зрения ЭМС синтезу многоэлементных наноэлектронных систем и устройств. Решение обозначенных проблем невозможно без широкого класса новых наукоемких материалов. Таким образом, разработка элементной базы для указанных диапазонов и исследование операционных свойств таких элементов и устройств, обеспечивающих распространение и обработку высокочастотных электрических сигналов, выходят на передний план среди ключевых задач нанотехнологии.

Сложность освоения терагерцевого диапазона, где длина волны лежит в субмиллиметровой области, заключается в том, что эта частотная полоса является пограничной областью, в которой классические электронные и оптические технологии оказываются малопригодными. Действительно, сложно спроектировать и изготовить сосредоточенные элементы, характерные размеры которых сопоставимы с длиной волны или даже меньше ее. Кроме того, полые одномодовые волноводы и резонаторы становятся нереалистичными, поскольку для них потребуются технологически недоступная чистота поверхности, чтобы избежать потерь из-за рассеяния мод на ее нерегулярностях. И наоборот, классические оптические устройства выходят из строя на частотах ниже 10 ТГц из-за резкого увеличения преобразования энергии фотонов в тепловую энергию. По этой причине термин «терагерцевая щель» (*terahertz gap*) в настоящее

время используется для указания на тот факт, что по сравнению с хорошо зарекомендовавшими себя технологиями ВЧ- и СВЧ-диапазонов (электроника) и оптикой ближнего инфракрасного диапазона в данной области отсутствует или же недостаточно развит необходимый набор технических средств ее освоения (источники излучения, детекторы, антенны, межэлементные соединения и др.). В частности, для эффективного решения практических задач, связанных с ЭМС и защитой от воздействия электромагнитного излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, необходима разработка широкополосных радиопоглощающих покрытий на базе сред с низкой магнитной проницаемостью, но с высокой диэлектрической проницаемостью [6; 23–26].

Одной из важнейших проблем является осуществление электрического контакта наноразмерного устройства или же наноструктурированной среды с макроскопическим миром без деградации производительности и потери информации. Возникает задача интеграции нанотехнологий и коммуникационных технологий, что непосредственно приводит к формированию нового научного направления – наноэлектромагнетизма [27], охватывающего эффекты взаимодействия электромагнитного излучения с наноразмерными объектами и системами и объединяющего в себе хорошо развитые методы классической электродинамики и современные подходы физики конденсированного состояния. В связи с этим возникают новые постановки задач, а известные приемы и методы наполняются новым содержанием. Важно подчеркнуть, что в силу эффекта пространственного ограничения движения носителей заряда, присущего наноразмерным объектам, решение задач взаимодействия электромагнитных волн с такими объектами выходит за рамки классической электродинамики и требует привлечения современных методов физики твердого тела [27–29].

В качестве примера приведем результаты расчета проводимости углеродных нанотрубок (УНТ) в зависимости от радиуса (рис. 1) [28]. Графики демонстрируют экспериментально установленный факт изменения величины проводимости УНТ типа *zigzag* от полупроводниковой до металлической в зависимости от индекса киральности (радиуса), а также металлические свойства УНТ типа *armchair* при любых значениях этого индекса. Также видно, что с ростом радиуса проводимость нанотрубок стремится к проводимости графита. Частотная зависимость проводимости металлической УНТ типа *zigzag* с индексом киральности $(m, 0)$ в частотной области внутризонных переходов определяется простым выражением [28], которое широко используется в работах по электромагнетизму УНТ:

$$\sigma_{zz}(\omega) = -i \frac{2\sqrt{3}e^2\gamma_0}{\pi m \hbar^2 \left(\omega + \frac{i}{\tau} \right)}, \quad (1)$$

где $\gamma_0 = 2,7$ эВ – интеграл перекрытия в уравнении Больцмана; τ – время релаксации. В случае УНТ типа *armchair* коэффициент $\sqrt{3}$ в выражении (1) заменяется на 1.

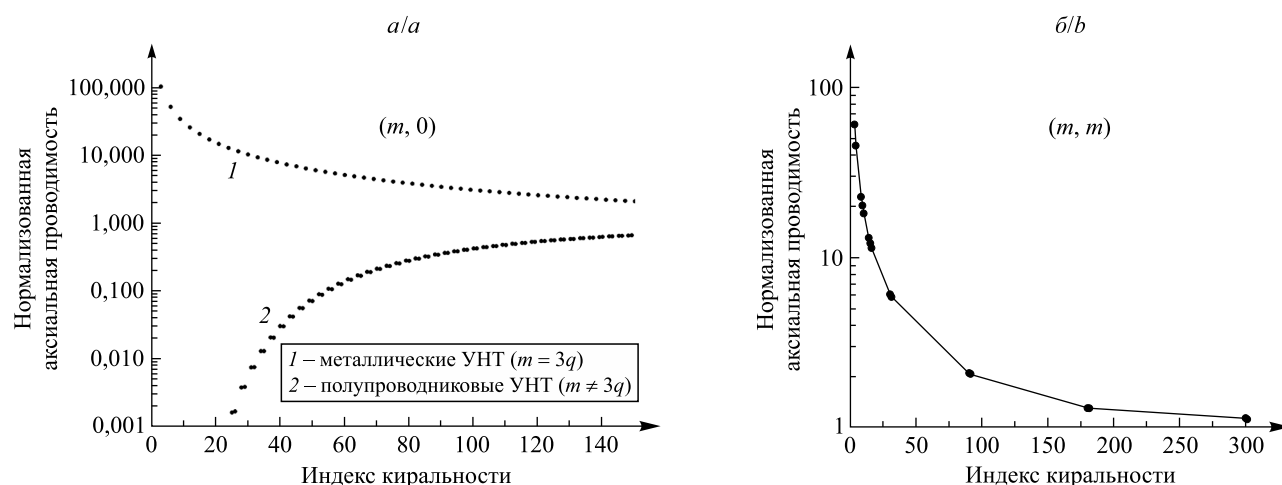


Рис. 1. Нормированная на проводимость графита аксиальная проводимость нанотрубок типа *zigzag* (a) и *armchair* (b).
Источник: [28]

Fig. 1. Axial conductivity of zigzag (a) and armchair (b) carbon nanotubes normalised to conductivity of graphite.
Source: [28]

В области межзонных переходов полуклассическая модель неприменима, и решение задачи о проводимости УНТ требует строгого квантово-механического рассмотрения. Выполненный в работе [28] анализ показал, что в этой области частотная зависимость проводимости УНТ проявляет сложную многопиковую структуру.

С точки зрения решения задач электродинамики УНТ главным является то, что разработанный авторами статьи [28] метод позволяет вычислять проводимость УНТ различного типа в широком диапазоне частот и тем самым делает возможным использование эффективных граничных условий для решения таких задач. Другими словами, в наном мире возникает неразрывная связь уравнений Максвелла и уравнения Шрёдингера, и нанoeлектромагнетизм является методологической базой для решения задач электродинамики наноструктур. Выполненные в Институте ядерных проблем БГУ исследования охватывают широкий класс эффектов переноса и линейной электродинамики УНТ [27–35] и композитов на их основе [36–41], генерации электромагнитных волн в УНТ и графене [42; 43]. Следует отметить, что вклад группы ученых Института ядерных проблем БГУ в развитие нанoeлектромагнетизма признан во всем мире. В качестве примера можно упомянуть публикацию [44], в которой разрабатываемый подход назван белорусским методом.

Особый интерес для решения широкого круга прикладных задач управления электромагнитным излучением и его контроля представляют наноуглеродные композиты [45] и структурированные на размерах длины волны материальные системы – метаматериалы [46]. Практическая задача создания таких композиционных материалов с программируемыми свойствами приводит к формированию новых научно-технологических направлений, в основе которых лежат технологии синтеза различных форм углеродных наноматериалов (графен, УНТ, фуллерены, углерод луковичной структуры, углеродные квантовые точки, пиролитический углерод и т. п.) [47]. Отметим, что в Институте неорганической химии имени А. В. Николаева Сибирского отделения РАН на протяжении многих лет проводятся исследования в области создания углеродных материалов. Здесь разработаны методы химической модификации наноструктур, получены гибридные материалы с полупроводниковыми квантовыми точками, металлическими частицами, анизотропные композиционные наноструктуры в полимерных и керамических матрицах и многое другое [48–55].

Развиваются методы характеристики углеродных наноструктур, методы диспергирования агломерированных частиц и методы создания тонких пленок и слоистых структур на их основе, синтез двух- и многофазных композитов и гибридных структур. Помимо задач материального обеспечения беспроводной связи, углеродные композиционные материалы находят применение при создании электромагнитных поглощающих и экранирующих материалов для задач ЭМС и электромагнитной защиты как в гражданских областях [45], так и в оборонной сфере [56; 57]. Следует подчеркнуть, что успех в создании новых перспективных материалов может быть достигнут только при условии серьезных финансовых и интеллектуальных инвестиций в фундаментальные исследования.

Примером важности фундаментального базиса для прикладных исследований может служить совместное российско-белорусское исследование разработанных в Институте неорганической химии имени А. В. Николаева Сибирского отделения РАН анизотропных композиционных материалов с использованием УНТ для элементов оптики СВЧ-диапазона и терагерцевого диапазона. В лаборатории физикохимии наноматериалов Института неорганической химии имени А. В. Николаева Сибирского отделения РАН разработаны CVD-методы синтеза массивов вертикально ориентированных многослойных УНТ длиной от 5 мкм до 5 мм и предложены способы придания нанотрубкам направленности в полимере [48; 49]. Проведены измерения угловой направленности отражения и пропускания СВЧ [49], терагерцевого [50; 51] и оптического [52] электромагнитного излучения, которые подтвердили высокую анизотропию оптических свойств во всех исследуемых диапазонах и ярко выраженный поляризационный эффект в терагерцевом диапазоне (рис. 2 и 3). Белорусские ученые предложили теоретическую модель, описывающую взаимодействие электромагнитного излучения с поверхностью материалов из УНТ, ориентированных горизонтально и перпендикулярно подложке [49; 50]. Формирование на подложке вертикальных УНТ позволило создать сверхлегкую метаповерхность с плотностью менее $0,4 \text{ г/см}^3$ [51].

Именно фундаментальные исследования в области биофизики и биомедицины послужили базой широкого внедрения наноструктурированных и гибридных углеродных материалов для целей тераностики опухолей, биофотоники и биосенсорики физико-химических параметров внутри- и внеклеточной среды [55; 58–60], а также для адресной доставки лекарственных веществ [61–64], избирательного термоллиза больных клеток [65; 66], фотодинамической терапии [67; 68], фотоакустической визуализации и фототермоакустической терапии [69; 70]. На рис. 4 приведена схема эксперимента по индуцированной импульсным лазерным излучением фотоакустической деструкции клеток, накопивших одностенные УНТ. Клетки инкубировали с одностенными УНТ в течение 24 ч и затем проводили облучение. Кроме того, воздействию лазерного излучения подвергали клетки, к которым одностенные УНТ добавляли во внеклеточную среду непосредственно перед облучением, и интактные клетки (контроль). В поврежденных клетках регистрировали флуоресценцию йодида пропидиума. Результаты эксперимента опубликованы в работе [67].

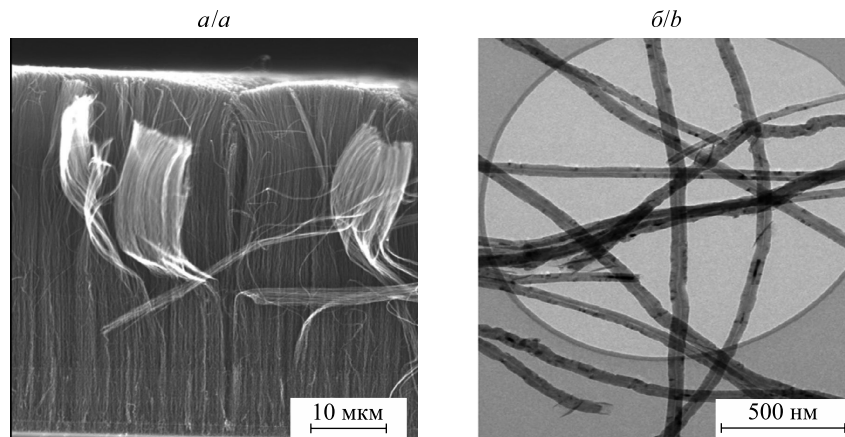


Рис. 2. Массив вертикально ориентированных многослойных УНТ.
Изображения получены с помощью растрового микроскопа (а)
и просвечивающего электронного микроскопа (б).
Источник: [48]

Fig. 2. Array of vertically oriented multiwalled carbon nanotubes.
The pictures have been obtained using scanning microscope (a)
and transmission electron microscope (b).
Source: [48]

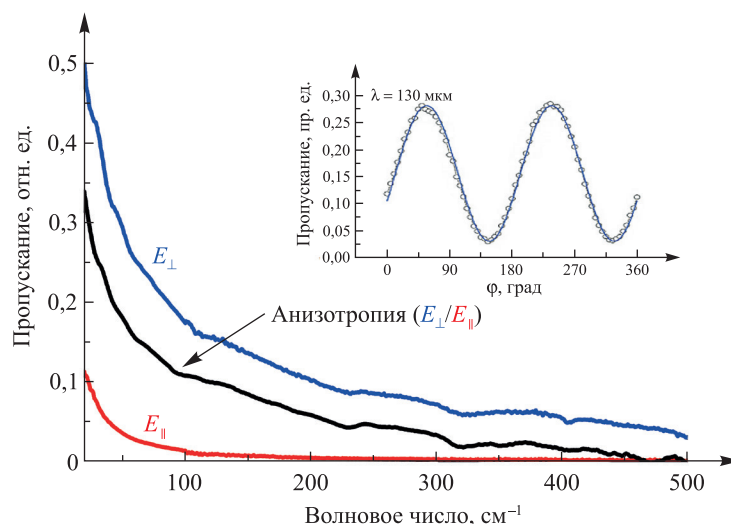


Рис. 3. Измерение анизотропии пропускания через пленку горизонтально направленных УНТ.
На вставке представлена интенсивность прошедшего
через анизотропный образец терагерцевого излучения с длиной волны 130 мкм,
измеренная на новосибирском лазере на свободных электронах
(пр. ед. – произвольные единицы)

Fig. 3. Anisotropy of the transmission through a film of in-plane oriented carbon nanotubes.
The insert shows intensity of the 130 μm wavelength terahertz radiation transmitted
through an anisotropic sample has been measured on the Novosibirsk free electron laser
(пр. ед. – arbitrary units)

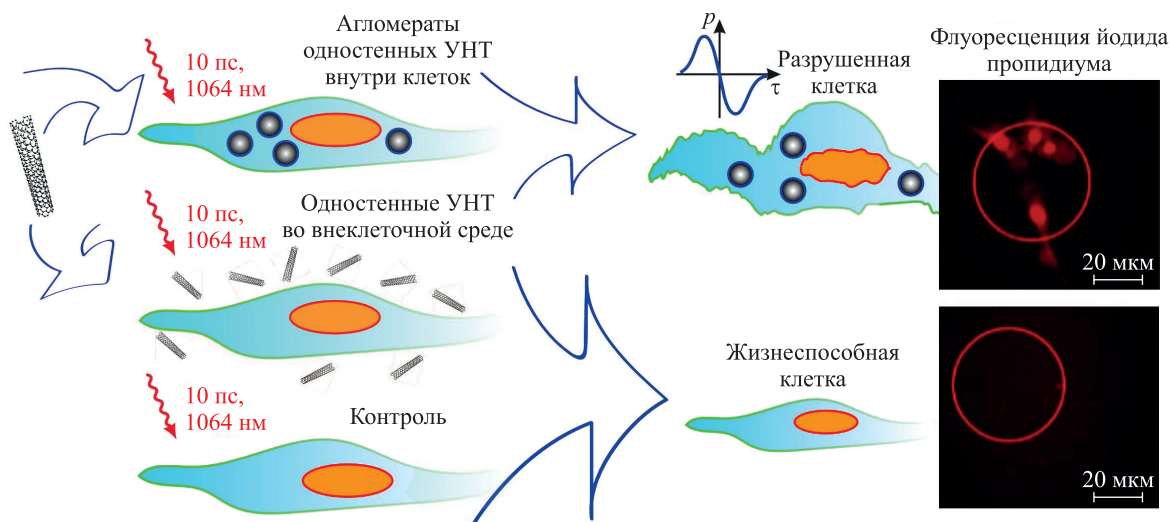


Рис. 4. Схема реализации эксперимента по фотоакустическому разрушению опухолевых клеток

Fig. 4. The scheme of the experiment on photoacoustic destruction of tumor cells

По сравнению с органическими красителями, полупроводниковыми квантовыми точками и наноматериалами на основе благородных металлов углеродные наноматериалы имеют более высокую фотостабильность, биосовместимость, низкую токсичность, настраиваемые поверхностные свойства [60; 71]. Объемные углеродсодержащие материалы широко используются при изготовлении эндопротезов и имплантатов [72].

Для эффективного решения задач ЭМС за счет применения композиционных материалов требуется обеспечить согласование импедансов на границе раздела со свободным пространством, что достигается путем использования слоистых [73] или градиентных [74] конструкций, создания метаповерхности [75] и включения наноразмерных магнитных частиц в состав активной фазы композита совместно с углеродными наноструктурами [76]. Многолетние исследования, проводимые в Национальном исследовательском Томском государственном университете с нанокристаллическими магнитными материалами [77–80], показали перспективность применения ферритов с гексагональной структурой [81; 82], которые имеют большие поля магнитной кристаллографической анизотропии и высокие значения естественного ферромагнитного резонанса. Детальный обзор ферритсодержащих поглощающих материалов представлен в работе [83].

Рассмотренные выше задачи послужили мотивацией и сформировали тематику ряда международных научно-практических мероприятий. Этому посвящен второй раздел данной статьи.

VI Белорусско-российский семинар-конференция «Углеродные наноструктуры, тонкие пленки и композиты: синтез, физико-химические свойства и применения»

Исходя из важности и научной новизны постановки вопроса о взаимодействии субмиллиметрового и миллиметрового электромагнитного излучения с наноструктурами и создании новых перспективных электромагнитных материалов, в Институте ядерных проблем БГУ были организованы три конференции под общим названием «Fundamental and Applied Nanoelectromagnetics» (2012, 2015, 2018). Их основной задачей являлось обеспечение платформы для взаимодействия ученых, специализирующихся на технологиях синтеза и применения наноструктур, с коллегами, работающими в области электромагнитной теории и прикладного электромагнетизма. Мероприятия прошли с большим успехом. По результатам конференций и под их влиянием организован специальный выпуск журнала «Journal of Nanophotonics» [84] и опубликована серия книг [85–87]. К сожалению, проведение конференций было остановлено из-за эпидемии COVID-19.

Параллельно с указанными конференциями в 2016 г. получила старт серия белорусско-российских семинаров-конференций по схожей тематике. Первый семинар состоялся в Институте ядерных проблем БГУ (2016), затем мероприятие принимали Институт неорганической химии имени А. В. Николаева Сибирского отделения РАН (2017), Сколковский институт науки и технологий (2018), Национальный исследовательский Томский государственный университет (2019, 2021).

С 2 по 5 ноября 2022 г. в БГУ проходил VI Белорусско-российский семинар-конференция «Углеродные наноструктуры, тонкие пленки и композиты: синтез, физико-химические свойства и применения» («БелРосНано-2022»). Организаторами мероприятия выступили Институт ядерных проблем БГУ и физический факультет БГУ, Национальный исследовательский Томский государственный университет. Активное участие в организации и проведении семинара также приняли сотрудники Института неорганической химии имени А. В. Николаева Сибирского отделения РАН.

Двойное название мероприятия (семинар-конференция) подчеркивает формат его проведения, обеспечивающий возможность дискуссии участников по всем рассматриваемым вопросам и достаточно широкий диапазон таких вопросов – от технологических аспектов синтеза углеродных структур до квантово-оптических эффектов в углеродных наноструктурах. Предшествующие семинары в большей степени были сфокусированы на вопросах взаимодействия углеродных наноструктур с электромагнитным излучением. В 2022 г. оргкомитет расширил тематику мероприятия в соответствии с запросами сегодняшнего дня как с точки зрения фундаментальных исследований углеродных наноструктур, так и с точки зрения решения насущных прикладных задач. Тематически структура семинара-конференции охватывала следующие направления (но не ограничивалась ими).

1. Синтез и диагностика углеродных наноструктур.
2. Электромагнитные свойства углеродных наноструктур.
3. Углеродные материалы в освоении гига- и терагерцевого диапазонов частот.
4. Гибридные углеродные материалы.
5. Магнитные наноматериалы.
6. Функциональные материалы для биомедицины.
7. Современные образовательные технологии в области обсуждаемых тематик.

Программа семинара включала 43 устных доклада (в том числе 9 приглашенных докладов) и 44 постера. В его работе приняли участие белорусские ученые из БГУ, Института ядерных проблем БГУ, Научно-исследовательского института физико-химических проблем БГУ, Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Института физико-органической химии НАН Беларуси, Института физики имени Б. И. Степанова НАН Беларуси, Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению, а также их российские коллеги, представляющие Национальный исследовательский Томский государственный университет, Сколковский институт науки и технологий, Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН, Петербургский институт ядерной физики имени Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет имени Ж. И. Алфёрова РАН, Институт катализа имени Г. К. Борескова Сибирского отделения РАН, Институт неорганической химии имени А. В. Николаева Сибирского отделения РАН, Институт физики полупроводников имени А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН.

Кроме того, 1 доклад был подготовлен научным работником из Пекинского института авиационных материалов.

На заключительном круглом столе представителями белорусских и российских участников обсужден ряд принципиальных вопросов. В ходе дискуссии были достигнуты следующие результаты.

1. Поддержано намерение участников укреплять научные связи в целях дальнейшего развития углеродной тематики и, в частности, исследований взаимодействия высокочастотного электромагнитного излучения с углеродными наноструктурами и материалами на их основе, а также с родственными двумерными образованиями, такими как силицен, гермацен, дихалькогениды металлов MoS₂, WS₂, MXenes и т. п. (см., например, [88; 89]). Достигнуты договоренности о разработке совместных научных проектов.

2. Подчеркнута важность прикладных разработок с использованием механизмов тонкой настройки свойств углеродсодержащих структур, таких как функционализация, легирование, комплексообразование и гибридизация. Отмечена необходимость практического освоения новых методов создания композиционных и гибридных материалов с использованием 3D-печати, CVD и других химических технологий, а также новых видов композиционных материалов на основе пенообразных и губчатых структур, полых микроструктур и структур «ядро – оболочка» с различным химическим составом, градиентных структур. Такие подходы могут значительно повысить характеристики поглощения электромагнитного излучения и обеспечить улучшенное согласование импедансов.

3. Отмечено, что быстроразвивающиеся отрасли современной индустрии, в которых находят применение композиционные и гибридные материалы на основе различных форм углерода, требуют развития компетенций научных сотрудников, обмена опытом и идеями, а также совершенствования и развития образовательных технологий в данной области. Положительную оценку в связи с этим получил разрабатываемый в настоящее

время в рамках государственной научно-технической программы совместный проект Института ядерных проблем БГУ и физического факультета БГУ по созданию научно-учебного лабораторного комплекса для синтеза графеноподобных и наноуглеродных материалов методом химического осаждения из газовой фазы.

4. Признано, что проведение научных мероприятий, подобных «БелРосНано-2022», способствует эффективной реализации актуальных задач использования композиционных и гибридных материалов на основе различных форм углерода и создает необходимые предпосылки для развития инновационной деятельности. Достигнуты договоренности о продолжении серии семинаров-конференций по изучению физико-химических и электромагнитных свойств углеродных наноматериалов. Обсуждены предложения по месту и датам проведения следующего, седьмого, семинара-конференции.

Заключение

Таким образом, представленные результаты конференции, а также обзор современных тенденций развития прикладного наноэлектромагнетизма убедительно показали актуальность тематики проведенного научного мероприятия и насущную необходимость интеллектуальных и финансовых инвестиций в решение поставленных задач. В настоящей статье авторы постарались продемонстрировать привлекательность данного направления как с точки зрения важности решения прикладных задач, так и в качестве поля для исследований фундаментальных проблем взаимодействия электромагнитного излучения с наноструктурами. По мнению авторов, круг заявленных вопросов предоставляет широкие возможности для магистрантов и аспирантов физических и химических специальностей российских и белорусских университетов.

Библиографические ссылки

1. *International Roadmap for Devices and Systems™: 2021 update. More Moore* [Internet]. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2021 [cited 2022 September 10]. 32 p. Available from: <https://irds.ieee.org/editions/2021/more-moore>.
2. Hao H, Hui D, Lau D. Material advancement in technological development for the 5G wireless communications. *Nanotechnology Reviews*. 2020;9:683–699. DOI: 10.1515/ntrev-2020-0054.
3. Banafaa M, Shayeia I, Din J, Azmi MH, Alashbi A, Daradkeh YI, et al. 6G mobile communication technology: requirements, targets, applications, challenges, advantages, and opportunities. *Alexandria Engineering Journal*. 2023;64:245–274. DOI: 10.1016/j.aej.2022.08.017.
4. Zhou Ye. Material foundation for future 5G technology. *Accounts of Materials Research*. 2021;2(5):306–310. DOI: 10.1021/accounts.mr.0c00087.
5. Kanerva M, Lassila M, Gustafsson R, O'shea G, Aarikka-Stenroos L, Hemilä J. *Emerging 5G technologies affecting markets of composite materials* [Internet]. [S. l.]: Excel Composites; 2018 [cited 2020 October 7]. 7 p. (Excel white paper; EWVL1:1:2018-1). Available from: https://www.luxturrim5g.com/s/Excel_whitepaper_2018_1.pdf.
6. Srivastava SK, Manna K. Recent advancements in the electromagnetic interference shielding performance of nanostructured materials and their nanocomposites: a review. *Journal of Materials Chemistry A*. 2022;10(14):7431–7496. DOI: 10.1039/D1TA09522F.
7. Antes J, Kallfass I. Performance estimation for broadband multi-gigabit millimeter- and submillimeter-wave wireless communication links. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2015;63(10):3288–3299. DOI: 10.1109/TMTT.2015.2467390.
8. Dangi R, Lalwani P, Choudhary G, You I, Pau G. Study and investigation on 5G technology: a systematic review. *Sensors*. 2022;22(1):26. DOI: 10.3390/s22010026.
9. Sharma T, Chehri A, Fortier P. Review of optical and wireless backhaul networks and emerging trends of next generation 5G and 6G technologies. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2021;32(3):e4155. DOI: 10.1002/ett.4155.
10. Davies AG, Burnett AD, Fan W, Linfield EH, Cunningham JE. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs. *Materials Today*. 2008;11(3):18–26. DOI: 10.1016/S1369-7021(08)70016-6.
11. Lavrukhin DV, Yachmenev AE, Goncharov YuG, Zaytsev KI, Khabibullin RA, Buryakov AM, et al. Strain-induced InGaAs-based photoconductive terahertz antenna detector. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2021;11(4):417–424. DOI: 10.1109/TTHZ.2021.3079977.
12. Tzydynzhapov G, Gusikhin P, Muravev V, Dremine A, Nefyodov Yu, Kukushkin I. New real-time subterahertz security body scanner. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2020;41(6):632–641. DOI: 10.1007/s10762-020-00683-5.
13. Chen X, Lindley-Hatcher H, Stantchev RI, Wang J, Li K, Serrano AH, et al. Terahertz (THz) biophotonics technology: instrumentation, techniques, and biomedical applications. *Chemical Physics Reviews*. 2022;3(1):011311. DOI: 10.1063/5.0068979.
14. Rööslä M, Dongus S, Jalilian H, Feychting M, Eyers J, Esu E, et al. The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on tinnitus, migraine and non-specific symptoms in the general and working population: a protocol for a systematic review on human observational studies. *Environment International*. 2021;157:106852. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106852.
15. Liu Shike, Deng Zhichao, Li Jianwei, Wang Jin, Huang Ningning, Cui Ruiming, et al. Measurement of the refractive index of whole blood and its components for a continuous spectral region. *Journal of Biomedical Optics*. 2019;24(3):035003. DOI: 10.1117/1.JBO.24.3.035003.
16. Betzalel N, Ben Ishai P, Einav S, Feldman Y. The AC conductivity of human sweat ducts as the dominant factor in the sub-THz reflection coefficient of skin. *Journal of Biophotonics*. 2021;14(7):e202100027. DOI: 10.1002/jbio.202100027.
17. Fukunaga K. *THz technology applied to cultural heritage in practice*. Tokyo: Springer Japan; 2016. 144 p. (Cultural heritage science). DOI: 10.1007/978-4-431-55885-9.
18. Koch Dandolo CL, Guillet J-P, Ma X, Fauquet F, Roux M, Mounaix P. Terahertz frequency modulated continuous wave imaging advanced data processing for art painting analysis. *Optics Express*. 2018;26(5):5358–5367. DOI: 10.1364/OE.26.005358.

19. Агранат МБ, Ильина ИВ, Ситников ДС. Применение терагерцевой спектроскопии для дистанционного экспресс-анализа газов. *Теплофизика высоких температур*. 2017;55(6):759–774. DOI: 10.7868/S0040364417060114.
20. Takida Y, Nawata K, Minamide H. Security screening system based on terahertz-wave spectroscopic gas detection. *Optics Express*. 2021;29(2):2529–2537. DOI: 10.1364/OE.413201.
21. Slepian GYa, Boag A, Mordachev V, Sinkevich E, Maksimenko S, Kuzhir P, et al. Nanoscale electromagnetic compatibility: quantum coupling and matching in nanocircuits. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2015;57(6):1645–1654. DOI: 10.1109/TEMPC.2015.2460678.
22. Slepian G, Boag A, Mordachev V, Sinkevich E, Maksimenko S, Kuzhir P, et al. Anomalous electromagnetic coupling via entanglement at the nanoscale. *New Journal of Physics*. 2017;19(2):023014. DOI: 10.1088/1367-2630/19/2/023014.
23. Zhao W-S, Wang D-W, D’alio AG, Chen W, Wang G, Yin W-Y. Recent progress of nano-electromagnetic compatibility (nano-EMC) in the emerging carbon nanoelectronics. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*. 2018;7(2):71–81. DOI: 10.1109/MEMC.2018.8410686.
24. Liu P, Cottrill AL, Kozawa D, Koman VB, Parviz DA, Liu T, et al. Emerging trends in 2D nanotechnology that are redefining our understanding of «Nanocomposites». *Nanotoday*. 2018;21:18–40. DOI: 10.1016/j.nantod.2018.04.012.
25. Zeng X, Cheng X, Yu R, Stucky GD. Electromagnetic microwave absorption theory and recent achievements in microwave absorbers. *Carbon*. 2020;168:606–623. DOI: 10.1016/j.carbon.2020.07.028.
26. Green M, Chen X. Recent progress of nanomaterials for microwave absorption. *Journal of Materiomics*. 2019;5(4):503–541. DOI: 10.1016/j.jmat.2019.07.003.
27. Maksimenko SA, Slepian GYa. Nanoelectromagnetics of low-dimensional structures. In: Lakhtakia A, editor. *Nanometer structures: theory, modeling, and simulation*. Bellingham: SPIE Press; 2004. p. 145–206 (The handbook of nanotechnology).
28. Slepian GYa, Maksimenko SA, Lakhtakia A, Yevtushenko OM, Gusakov AV. Electrodynamics of carbon nanotubes: dynamic conductivity, impedance boundary conditions, and surface wave propagation. *Physical Review B*. 1999;60(24):17136–17149. DOI: 10.1103/PhysRevB.60.17136.
29. Максименко СА, Слепьян ГЯ. Электродинамика углеродных нанотрубок. *Радиотехника и электроника*. 2002;47(3):261–280.
30. Slepian GYa, Shuba MV, Maksimenko SA, Lakhtakia A. Theory of optical scattering by achiral carbon nanotubes and their potential as optical nanoantennas. *Physical Review B*. 2006;73(19):195416. DOI: 10.1103/PhysRevB.73.195416.
31. Shuba MV, Slepian GYa, Maksimenko SA, Thomsen C, Lakhtakia A. Theory of multiwall carbon nanotubes as waveguides and antennas in the infrared and the visible regimes. *Physical Review B*. 2009;79(15):155403. DOI: 10.1103/PhysRevB.79.155403.
32. Batrakov K, Kuzhir P, Maksimenko S, Paddubskaya A, Voronovich S, Lambin P, et al. Flexible transparent graphene/polymer multilayers for efficient electromagnetic field absorption. *Scientific Reports*. 2014;4:7191. DOI: 10.1038/srep07191.
33. Batrakov K, Kuzhir P, Maksimenko S, Volynets N, Voronovich S, Paddubskaya A, et al. Enhanced microwave-to-terahertz absorption in graphene. *Applied Physics Letters*. 2016;108(12):123101. DOI: 10.1063/1.4944531.
34. Shuba MV, Paddubskaya AG, Kuzhir PP, Maksimenko SA, Flahaut E, Fierro V, et al. Short-length carbon nanotubes as building blocks for high dielectric constant materials in the terahertz range. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017;50(8):08LT01. DOI: 10.1088/1361-6463/aa5628.
35. Melnikov AV, Kuzhir PP, Maksimenko SA, Slepian GYa, Boag A, Pulci O, et al. Scattering of electromagnetic waves by two crossing metallic single-walled carbon nanotubes of finite length. *Physical Review B*. 2021;103(7):075438. DOI: 10.1103/PhysRevB.103.075438.
36. Slepian GYa, Shuba MV, Maksimenko SA, Thomsen C, Lakhtakia A. Terahertz conductivity peak in composite materials containing carbon nanotubes: theory and interpretation of experiment. *Physical Review B*. 2010;81(20):205423. DOI: 10.1103/PhysRevB.81.205423.
37. Shuba MV, Paddubskaya AG, Plyushch AO, Kuzhir PP, Slepian GYa, Maksimenko SA, et al. Experimental evidence of localized plasmon resonance in composite materials containing single-wall carbon nanotubes. *Physical Review B*. 2012;85(16):165435. DOI: 10.1103/PhysRevB.85.165435.
38. Bychanok DS, Paddubskaya AG, Kuzhir PP, Maksimenko SA, Brosseau C, Macutkevicius J, et al. A study of random resistor-capacitor-diode networks to assess the electromagnetic properties of carbon nanotube filled polymers. *Applied Physics Letters*. 2013;103(24):243104. DOI: 10.1063/1.4847335.
39. Bellucci S, Bistarelli S, Cataldo A, Micciulla F, Kranauskaitė I, Macutkevicius J, et al. Broadband dielectric spectroscopy of composites filled with various carbon materials. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2015;63(6):2024–2031. DOI: 10.1109/TMTT.2015.2418758.
40. Shuba MV, Yuko DI, Kuzhir PP, Maksimenko SA, Kanygin MA, Okotrub AV, et al. How effectively do carbon nanotube inclusions contribute to the electromagnetic performance of a composite material? Estimation criteria from microwave and terahertz measurements. *Carbon*. 2018;129:688–694. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.12.067.
41. Shuba MV, Yuko D, Kuzhir PP, Maksimenko SA, Ksenevich VK, Lim S-H, et al. Electromagnetic and optical responses of a composite material comprising individual single-walled carbon-nanotubes with a polymer coating. *Scientific Reports*. 2020;10:9361. DOI: 10.1038/s41598-020-66247-8.
42. Batrakov KG, Maksimenko SA, Kuzhir PP, Thomsen C. Carbon nanotube as a Cherenkov-type light emitter and free electron laser. *Physical Review B*. 2009;79(12):125408. DOI: 10.1103/PhysRevB.79.125408.
43. Batrakov K, Maksimenko S. Graphene layered systems as a terahertz source with tuned frequency. *Physical Review B*. 2017;95(20):205408. DOI: 10.1103/PhysRevB.95.205408.
44. Rutherglen C, Burke P. Nanoelectromagnetics: circuit and electromagnetic properties of carbon nanotubes. *Small*. 2009;5(8):884–906. DOI: 10.1002/smll.200800527.
45. Chung DDL. *Carbon composites. Composites with carbon fibers, nanofibers, and nanotubes*. 2nd edition. Amsterdam: Elsevier; 2017. 682 p. DOI: 10.1016/C2014-0-02567-1.
46. Capolino F, Khajavikhan M, Alù A. Metastructures: from physics to application. *Applied Physics Letters*. 2022;120(6):060401. DOI: 10.1063/5.0084696.
47. Backes C, Abdelkader AM, Alonso C, Andrieux-Ledier A, Arenal R, Azpeitia J, et al. Production and processing of graphene and related materials. *2D Materials*. 2020;7(2):022001. DOI: 10.1088/2053-1583/ab1e0a.
48. Okotrub AV, Kubarev VV, Kanygin MA, Sedelnikova OV, Bulusheva LG. Transmission of terahertz radiation by anisotropic MWCNT/polystyrene composite films. *Physica Status Solidi B*. 2011;248(11):2568–2571. DOI: 10.1002/pssb.201100128.

49. Быченко ДС, Каныгин МА, Окотруб АВ, Шуба МВ, Поддубская ОГ, Плющ АО и др. Анизотропия электромагнитных свойств полимерных композитов на основе многослойных углеродных нанотрубок в гигагерцевом диапазоне частот. *Письма в ЖЭТФ*. 2011;93(10):669–673.
50. Bychanok DS, Shuba MV, Kuzhir PP, Maksimenko SA, Kubarev VV, Kanygin MA, et al. Anisotropic electromagnetic properties of polymer composites containing oriented multiwall carbon nanotubes in respect to terahertz polarizer applications. *Journal of Applied Physics*. 2013;114(11):114304. DOI: 10.1063/1.4821773.
51. Gorokhov GV, Bychanok DS, Kuzhir PP, Gorodetskiy DV, Kurennya AG, Sedelnikova OV, et al. Creation of metasurface from vertically aligned carbon nanotubes as versatile platform for ultra-light THz components. *Nanotechnology*. 2020;31(25):255703. DOI: 10.1088/1361-6528/ab7efa.
52. Arutyunyan NR, Kanygin MA, Pozharov AS, Kubarev VV, Bulusheva LG, Okotrub AV, et al. Light polarizer in visible and THz range based on single-wall carbon nanotubes embedded into poly(methyl methacrylate) film. *Laser Physics Letters*. 2016;13(6):065901. DOI: 10.1088/1612-2011/13/6/065901.
53. Okotrub AV, Asanov IP, Larionov SV, Kudashov AG, Leonova TG, Bulusheva LG. Growth of CdS nanoparticles on the aligned carbon nanotubes. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2010;12(36):10871–10875. DOI: 10.1039/C000189A.
54. Bulusheva LG, Fedoseeva YuV, Kurennya AG, Vyalikh DV, Okotrub AV. Role of defects in carbon nanotube walls in deposition of CdS nanoparticles from a chemical bath. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2015;119(46):25898–25906. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b07549.
55. Fedoseeva YuV, Bulusheva LG, Okotrub AV, Kanygin MA, Gorodetskiy DV, Asanov IP, et al. Field emission luminescence of nanodiamonds deposited on the aligned carbon nanotube array. *Scientific Reports*. 2015;5:9379. DOI: 10.1038/srep09379.
56. Harussani MM, Sapuan SM, Nadeem G, Rafin T, Kirubaanand W. Recent applications of carbon-based composites in defence industry: a review. *Defense Technology*. 2022;18(8):1281–1300. DOI: 10.1016/j.dt.2022.03.006.
57. Przybył W, Januszko A, Radek N, Szczepaniak M, Bogdanowicz KA, Plebankiewicz I, et al. Microwave absorption properties of carbonyl iron-based paint coatings for military applications. *Defence Technology*. Forthcoming 2023. DOI: 10.1016/j.dt.2022.06.013.
58. Liu Jianping, Zhang Run, Xu Zhi Ping. Nanoparticle-based nanomedicines to promote cancer immunotherapy: recent advances and future directions. *Small*. 2019;15(32):1900262. DOI: 10.1002/smll.201900262.
59. Gautam M, Thapa RK, Poudel BK, Gupta B, Ruttala HB, Nguyen HT, et al. Aerosol technique-based carbon-encapsulated hollow mesoporous silica nanoparticles for synergistic chemo-photothermal therapy. *Acta Biomaterialia*. 2019;88:448–461. DOI: 10.1016/j.actbio.2019.02.029.
60. Kościk I, Jankowski D, Jagusiak A. Carbon nanomaterials for theranostic use. *C – Journal of Carbon Research*. 2022;8(1):3. DOI: 10.3390/c8010003.
61. Goenka S, Sant V, Sant S. Graphene-based nanomaterials for drug delivery and tissue engineering. *Journal of Controlled Release*. 2014;173:75–88. DOI: 10.1016/j.jconrel.2013.10.017.
62. Nair A, Haponiuk JT, Thomas S, Gopi S. Natural carbon-based quantum dots and their applications in drug delivery: a review. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2020;132:110834. DOI: 10.1016/j.biopha.2020.110834.
63. Омелянчук ЛВ, Гурова ОА, Окотруб АВ. Генотоксическое действие неорганических наночастиц на клетку. *Российские нанотехнологии*. 2014;9(3–4):90–97.
64. Gurova OA, Dubatolova TD, Shlyakhova EV, Omelyanchuk LV, Okotrub AV. Hyperthermal effect of infrared irradiation on aqueous dispersion of carbon nanotubes and their penetration into *Drosophila melanogaster* larvae. *Physica Status Solidi B*. 2018;255(1):1700264. DOI: 10.1002/pssb.201700264.
65. Burlaka A, Lukin S, Prylutska S, Remeniak O, Prylutskiy Yu, Shuba M, et al. Hyperthermic effect of multi-walled carbon nanotubes stimulated with near infrared irradiation for anticancer therapy: *in vitro* studies. *Experimental Oncology*. 2010;32(1):48–50.
66. Farzin L, Saber R, Sadjadi S, Mohagheghpour E, Sheini A. Nanomaterials-based hyperthermia: a literature review from concept to applications in chemistry and biomedicine. *Journal of Thermal Biology*. 2022;104:103201. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2022.103201.
67. Sundaram P, Abrahamse H. Phototherapy combined with carbon nanomaterials (1D and 2D) and their applications in cancer therapy. *Materials*. 2020;13(21):4830. DOI: 10.3390/ma13214830.
68. Wang Lei, Shi Jinjin, Liu Ruiyuan, Liu Yan, Zhang Jing, Yu Xiaoyuan, et al. Photodynamic effect of functionalized single-walled carbon nanotubes: a potential sensitizer for photodynamic therapy. *Nanoscale*. 2014;6(9):4642–4651. DOI: 10.1039/C3NR06835H.
69. Lan M, Guo L, Zhao S, Zhang Z, Jia Q, Yan L, et al. Carbon dots as multifunctional phototheranostic agents for photoacoustic/fluorescence imaging and photothermal/photodynamic synergistic cancer therapy. *Advanced Therapeutics*. 2018;1(6):1800077. DOI: 10.1002/adtp.201800077.
70. Golubewa L, Timoshchenko I, Romanov O, Karpicz R, Kulahava T, Rutkauskas D, et al. Single-walled carbon nanotubes as a photo-thermo-acoustic cancer theranostic agent: theory and proof of the concept experiment. *Scientific Reports*. 2020;10:22174. DOI: 10.1038/s41598-020-79238-6.
71. Chung S, Revia RA, Zhang M. Graphene quantum dots and their applications in bioimaging, biosensing, and therapy. *Advanced Materials*. 2021;33(22):1904362. DOI: 10.1002/adma.201904362.
72. Su S, Kang PM. Systemic review of biodegradable nanomaterials in nanomedicine. *Nanomaterials*. 2020;10(4):656. DOI: 10.3390/nano10040656.
73. Cozzolino F, Marra F, Fortunato M, Bellagamba I, Pesce N, Tamburrano A, et al. New sensing and radar absorbing laminate combining structural damage detection and electromagnetic wave absorption properties. *Sensors*. 2022;22(21):8470. DOI: 10.3390/s2218470.
74. Luo Feng, Liu Dongqing, Cao Taishan, Cheng Haifeng, Kuang Jiakai, Deng Yingjun, et al. Study on broadband microwave absorbing performance of gradient porous structure. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2021;4(3):591–601. DOI: 10.1007/s42114-021-00275-4.
75. Du Junsu, Zhang Pin, Qiu Leilei, Gao Xiaohui, Huang Shengxiang, He Longhui, et al. Chaos patterned metasurface absorber with multi-peak and broadband. *Journal of Applied Physics*. 2021;130(16):165101. DOI: 10.1063/5.0065004.
76. Kazakova MA, Semikolenova NV, Korovin EYu, Zhuravlev VA, Selyutin AG, Velikanov DA, et al. Co/multi-walled carbon nanotubes/polyethylene composites for microwave absorption: tuning the effectiveness of electromagnetic shielding by varying the components ratio. *Composites Science and Technology*. 2021;207:108731. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108731.
77. Найденов ЕП, Суляев ВИ, Бир АВ, Политов МВ. Спектры магнитной проницаемости наноразмерных порошков гексаферритов. *Журнал структурной химии*. 2004;45(7):102–105.

78. Zhuravlev VA, Suslyayev VI. Analysis of the microwave magnetic permeability spectra of ferrites with hexagonal structure. *Russian Physics Journal*. 2006;49(9):1032–1037. DOI: 10.1007/s11182-006-0220-8.
79. Zhuravlev VA, Suslyayev VI. Analysis and correction of the magnetic permeability spectra of $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ hexaferrite by using Cramers – Kronig relations. *Russian Physics Journal*. 2006;49(8):840–846. DOI: 10.1007/s11182-006-0183-9.
80. Naiden EP, Zhuravlev VA, Suslyayev VI, Minin RV, Itin VI, Korovin EYu. Structure parameters and magnetic properties of $\text{Me}_2\text{W}^{\text{I}}$ cobalt-containing hexaferrite systems synthesized by the SHS method. *Russian Physics Journal*. 2011;53(9):974–982. DOI: 10.1007/s11182-011-9519-1.
81. Minin RV, Zhuravlev VA, Lapshin OV, Itin VI, Svetlichnyi VA. Nanocrystalline cobalt ferrite powders by spray solution combustion synthesis. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2020;29(1):1–9. DOI: 10.3103/S1061386220010070.
82. Zhuravlev VA, Wagner DV, Dotsenko OA, Kareva KV, Zhuravlyova EV, Chervinskaya AS, et al. Static and dynamic magnetic properties of polycrystalline hexaferrites of the $\text{Ba}_2\text{Ni}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ system. *Electronics*. 2022;11(17):2759. DOI: 10.3390/electronics11172759.
83. Aherrao DS, Singh C, Srivastava AK. Review of ferrite-based microwave-absorbing materials: origin, synthesis, morphological effects, dielectric/magnetic properties, composites, absorption mechanisms, and optimization. *Journal of Applied Physics*. 2022;132(24):240701. DOI: 10.1063/5.0123263.
84. Maksimenko SA. Special section guest editor: fundamental and applied nanoelectromagnetics. *Journal of Nanophotonics*. 2012;6(1):061799. DOI: 10.1117/1.JNP.6.061799.
85. Maffucci A, Maksimenko SA, editors. *Fundamental and applied nanoelectromagnetics*. Dordrecht: Springer; 2016. 290 p. (NATO science for peace and security series B: physics and biophysics). DOI: 10.1007/978-94-017-7478-9.
86. Maffucci A, Maksimenko S, Svirko Yu, editors. *Carbon-based nanoelectromagnetics*. Amsterdam: Elsevier; 2019. 255 p. (Andrews DL, editor. Nanophotonics series).
87. Maffucci A, Maksimenko SA, editors. *Fundamental and applied nanoelectromagnetics II: THz circuits, materials, devices*. Dordrecht: Springer; 2019. 214 p. (NATO science for peace and security series B: physics and biophysics). DOI: 10.1007/978-94-024-1687-9.
88. Zhao Jijun, Liu Hongsheng, Yu Zhiming, Quhe Ruge, Zhou Si, Wang Yangyang, et al. Rise of silicene: a competitive 2D material. *Progress in Materials Science*. 2016;83:24–151. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.04.001.
89. Gogotsi Yu, Anasori B. The rise of MXenes. *ACS Nano*. 2019;13(8):8491–8494. DOI: 10.1021/acsnano.9b06394.

References

1. *International Roadmap for Devices and Systems™: 2021 update. More Moore* [Internet]. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2021 [cited 2022 September 10]. 32 p. Available from: <https://irds.ieee.org/editions/2021/more-moore>.
2. Hao H, Hui D, Lau D. Material advancement in technological development for the 5G wireless communications. *Nanotechnology Reviews*. 2020;9:683–699. DOI: 10.1515/ntrev-2020-0054.
3. Banafaa M, Shayea I, Din J, Azmi MH, Alashbi A, Daradkeh YI, et al. 6G mobile communication technology: requirements, targets, applications, challenges, advantages, and opportunities. *Alexandria Engineering Journal*. 2023;64:245–274. DOI: 10.1016/j.aej.2022.08.017.
4. Zhou Ye. Material foundation for future 5G technology. *Accounts of Materials Research*. 2021;2(5):306–310. DOI: 10.1021/accountsmr.0c00087.
5. Kanerva M, Lassila M, Gustafsson R, O'shea G, Aarikka-Stenroos L, Hemilä J. *Emerging 5G technologies affecting markets of composite materials* [Internet]. [S. l.]: Excel Composites; 2018 [cited 2020 October 7]. 7 p. (Exel white paper; EWVL1:1:2018-1). Available from: https://www.luxturnim5g.com/s/Exel_whitepaper_2018_1.pdf.
6. Srivastava SK, Manna K. Recent advancements in the electromagnetic interference shielding performance of nanostructured materials and their nanocomposites: a review. *Journal of Materials Chemistry A*. 2022;10(14):7431–7496. DOI: 10.1039/D1TA09522F.
7. Antes J, Kallfass I. Performance estimation for broadband multi-gigabit millimeter- and submillimeter-wave wireless communication links. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2015;63(10):3288–3299. DOI: 10.1109/TMTT.2015.2467390.
8. Dangi R, Lalwani P, Choudhary G, You I, Pau G. Study and investigation on 5G technology: a systematic review. *Sensors*. 2022;22(1):26. DOI: 10.3390/s22010026.
9. Sharma T, Chehri A, Fortier P. Review of optical and wireless backhaul networks and emerging trends of next generation 5G and 6G technologies. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2021;32(3):e4155. DOI: 10.1002/ett.4155.
10. Davies AG, Burnett AD, Fan W, Linfield EH, Cunningham JE. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs. *Materials Today*. 2008;11(3):18–26. DOI: 10.1016/S1369-7021(08)70016-6.
11. Lavrukhin DV, Yachmenev AE, Goncharov YuG, Zaytsev KI, Khabibullin RA, Buryakov AM, et al. Strain-induced InGaAs-based photoconductive terahertz antenna detector. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2021;11(4):417–424. DOI: 10.1109/TTHZ.2021.3079977.
12. Tzydynzhapov G, Gusikhin P, Muravev V, Dremine A, Nefyodov Yu, Kukushkin I. New real-time subterahertz security body scanner. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2020;41(6):632–641. DOI: 10.1007/s10762-020-00683-5.
13. Chen X, Lindley-Hatcher H, Stantchev RI, Wang J, Li K, Serrano AH, et al. Terahertz (THz) biophotonics technology: instrumentation, techniques, and biomedical applications. *Chemical Physics Reviews*. 2022;3(1):011311. DOI: 10.1063/5.0068979.
14. Rööslä M, Dongus S, Jalilian H, Feychting M, Eyers J, Esu E, et al. The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on tinnitus, migraine and non-specific symptoms in the general and working population: a protocol for a systematic review on human observational studies. *Environment International*. 2021;157:106852. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106852.
15. Liu Shike, Deng Zhichao, Li Jianwei, Wang Jin, Huang Ningning, Cui Ruiming, et al. Measurement of the refractive index of whole blood and its components for a continuous spectral region. *Journal of Biomedical Optics*. 2019;24(3):035003. DOI: 10.1117/1.JBO.24.3.035003.
16. Betzalel N, Ben Ishai P, Einav S, Feldman Y. The AC conductivity of human sweat ducts as the dominant factor in the sub-THz reflection coefficient of skin. *Journal of Biophotonics*. 2021;14(7):e202100027. DOI: 10.1002/jbio.202100027.

17. Fukunaga K. *THz technology applied to cultural heritage in practice*. Tokyo: Springer Japan; 2016. 144 p. (Cultural heritage science). DOI: 10.1007/978-4-431-55885-9.
18. Koch Dandolo CL, Guillet J-P, Ma X, Fauquet F, Roux M, Mounaix P. Terahertz frequency modulated continuous wave imaging advanced data processing for art painting analysis. *Optics Express*. 2018;26(5):5358–5367. DOI: 10.1364/OE.26.005358.
19. Agranat MB, Il'ina IV, Sitnikov DS. [Application of terahertz spectroscopy for remote express analysis of gases]. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2017;55(6):759–774. Russian. DOI: 10.7868/S00040364417060114.
20. Takida Y, Nawata K, Minamide H. Security screening system based on terahertz-wave spectroscopic gas detection. *Optics Express*. 2021;29(2):2529–2537. DOI: 10.1364/OE.413201.
21. Slepyan GYa, Boag A, Mordachev V, Sinkevich E, Maksimenko S, Kuzhir P, et al. Nanoscale electromagnetic compatibility: quantum coupling and matching in nanocircuits. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2015;57(6):1645–1654. DOI: 10.1109/TEM.2015.2460678.
22. Slepyan G, Boag A, Mordachev V, Sinkevich E, Maksimenko S, Kuzhir P, et al. Anomalous electromagnetic coupling via entanglement at the nanoscale. *New Journal of Physics*. 2017;19(2):023014. DOI: 10.1088/1367-2630/19/2/023014.
23. Zhao W-S, Wang D-W, D'aloia AG, Chen W, Wang G, Yin W-Y. Recent progress of nano-electromagnetic compatibility (nano-EMC) in the emerging carbon nanoelectronics. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*. 2018;7(2):71–81. DOI: 10.1109/MEM.2018.8410686.
24. Liu P, Cottrill AL, Kozawa D, Koman VB, Parviz DA, Liu T, et al. Emerging trends in 2D nanotechnology that are redefining our understanding of «Nanocomposites». *Nanotoday*. 2018;21:18–40. DOI: 10.1016/j.nantod.2018.04.012.
25. Zeng X, Cheng X, Yu R, Stucky GD. Electromagnetic microwave absorption theory and recent achievements in microwave absorbers. *Carbon*. 2020;168:606–623. DOI: 10.1016/j.carbon.2020.07.028.
26. Green M, Chen X. Recent progress of nanomaterials for microwave absorption. *Journal of Materiomics*. 2019;5(4):503–541. DOI: 10.1016/j.jmat.2019.07.003.
27. Maksimenko SA, Slepyan GYa. Nanoelectromagnetics of low-dimensional structures. In: Lakhtakia A, editor. *Nanometer structures: theory, modeling, and simulation*. Bellingham: SPIE Press; 2004. p. 145–206 (The handbook of nanotechnology).
28. Slepyan GYa, Maksimenko SA, Lakhtakia A, Yevtushenko OM, Gusakov AV. Electrodynamics of carbon nanotubes: dynamic conductivity, impedance boundary conditions, and surface wave propagation. *Physical Review B*. 1999;60(24):17136–17149. DOI: 10.1103/PhysRevB.60.17136.
29. Maksimenko SA, Slepyan GYa. [Electrodynamics of carbon nanotubes]. *Radiotekhnika i elektronika*. 2002;47(3):261–280. Russian.
30. Slepyan GYa, Shuba MV, Maksimenko SA, Lakhtakia A. Theory of optical scattering by achiral carbon nanotubes and their potential as optical nanoantennas. *Physical Review B*. 2006;73(19):195416. DOI: 10.1103/PhysRevB.73.195416.
31. Shuba MV, Slepyan GYa, Maksimenko SA, Thomsen C, Lakhtakia A. Theory of multiwall carbon nanotubes as waveguides and antennas in the infrared and the visible regimes. *Physical Review B*. 2009;79(15):155403. DOI: 10.1103/PhysRevB.79.155403.
32. Batrakov K, Kuzhir P, Maksimenko S, Paddubskaya A, Voronovich S, Lambin P, et al. Flexible transparent graphene/polymer multilayers for efficient electromagnetic field absorption. *Scientific Reports*. 2014;4:7191. DOI: 10.1038/srep07191.
33. Batrakov K, Kuzhir P, Maksimenko S, Volynets N, Voronovich S, Paddubskaya A, et al. Enhanced microwave-to-terahertz absorption in graphene. *Applied Physics Letters*. 2016;108(12):123101. DOI: 10.1063/1.4944531.
34. Shuba MV, Paddubskaya AG, Kuzhir PP, Maksimenko SA, Flahaut E, Fierro V, et al. Short-length carbon nanotubes as building blocks for high dielectric constant materials in the terahertz range. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017;50(8):08LT01. DOI: 10.1088/1361-6463/aa5628.
35. Melnikov AV, Kuzhir PP, Maksimenko SA, Slepyan GYa, Boag A, Pulci O, et al. Scattering of electromagnetic waves by two crossing metallic single-walled carbon nanotubes of finite length. *Physical Review B*. 2021;103(7):075438. DOI: 10.1103/PhysRevB.103.075438.
36. Slepyan GYa, Shuba MV, Maksimenko SA, Thomsen C, Lakhtakia A. Terahertz conductivity peak in composite materials containing carbon nanotubes: theory and interpretation of experiment. *Physical Review B*. 2010;81(20):205423. DOI: 10.1103/PhysRevB.81.205423.
37. Shuba MV, Paddubskaya AG, Plyushch AO, Kuzhir PP, Slepyan GYa, Maksimenko SA, et al. Experimental evidence of localized plasmon resonance in composite materials containing single-wall carbon nanotubes. *Physical Review B*. 2012;85(16):165435. DOI: 10.1103/PhysRevB.85.165435.
38. Bychanok DS, Paddubskaya AG, Kuzhir PP, Maksimenko SA, Brosseau C, Macutkevicius J, et al. A study of random resistor-capacitor-diode networks to assess the electromagnetic properties of carbon nanotube filled polymers. *Applied Physics Letters*. 2013;103(24):243104. DOI: 10.1063/1.4847335.
39. Bellucci S, Bistarelli S, Cataldo A, Micciulla F, Kranauskaite I, Macutkevicius J, et al. Broadband dielectric spectroscopy of composites filled with various carbon materials. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2015;63(6):2024–2031. DOI: 10.1109/TMTT.2015.2418758.
40. Shuba MV, Yuko DI, Kuzhir PP, Maksimenko SA, Kanygin MA, Okotrub AV, et al. How effectively do carbon nanotube inclusions contribute to the electromagnetic performance of a composite material? Estimation criteria from microwave and terahertz measurements. *Carbon*. 2018;129:688–694. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.12.067.
41. Shuba MV, Yuko D, Kuzhir PP, Maksimenko SA, Ksenevich VK, Lim S-H, et al. Electromagnetic and optical responses of a composite material comprising individual single-walled carbon-nanotubes with a polymer coating. *Scientific Reports*. 2020;10:9361. DOI: 10.1038/s41598-020-66247-8.
42. Batrakov KG, Maksimenko SA, Kuzhir PP, Thomsen C. Carbon nanotube as a Cherenkov-type light emitter and free electron laser. *Physical Review B*. 2009;79(12):125408. DOI: 10.1103/PhysRevB.79.125408.
43. Batrakov K, Maksimenko S. Graphene layered systems as a terahertz source with tuned frequency. *Physical Review B*. 2017;95(20):205408. DOI: 10.1103/PhysRevB.95.205408.
44. Rutherglen C, Burke P. Nanoelectromagnetics: circuit and electromagnetic properties of carbon nanotubes. *Small*. 2009;5(8):884–906. DOI: 10.1002/smll.200800527.
45. Chung DDL. *Carbon composites. Composites with carbon fibers, nanofibers, and nanotubes*. 2nd edition. Amsterdam: Elsevier; 2017. 682 p. DOI: 10.1016/C2014-0-02567-1.

46. Capolino F, Khajavikhan M, Alù A. Metastructures: from physics to application. *Applied Physics Letters*. 2022;120(6):060401. DOI: 10.1063/5.0084696.
47. Backes C, Abdelkader AM, Alonso C, Andrieux-Ledier A, Arenal R, Azpeitia J, et al. Production and processing of graphene and related materials. *2D Materials*. 2020;7(2):022001. DOI: 10.1088/2053-1583/ab1e0a.
48. Okotrub AV, Kubarev VV, Kanygin MA, Sedelnikova OV, Bulusheva LG. Transmission of terahertz radiation by anisotropic MWCNT/polystyrene composite films. *Physica Status Solidi B*. 2011;248(11):2568–2571. DOI: 10.1002/pssb.201100128.
49. Bychanok DS, Kanygin MA, Okotrub AV, Shuba MV, Paddubskaya AG, Plyushch AO, et al. [Anisotropy of the electromagnetic properties of polymer composites based on multiwall carbon nanotubes in the gigahertz frequency range]. *Pis'ma v ZhETF*. 2011;93(10):669–673. Russian.
50. Bychanok DS, Shuba MV, Kuzhir PP, Maksimenko SA, Kubarev VV, Kanygin MA, et al. Anisotropic electromagnetic properties of polymer composites containing oriented multiwall carbon nanotubes in respect to terahertz polarizer applications. *Journal of Applied Physics*. 2013;114(11):114304. DOI: 10.1063/1.4821773.
51. Gorokhov GV, Bychanok DS, Kuzhir PP, Gorodetskiy DV, Kurennya AG, Sedelnikova OV, et al. Creation of metasurface from vertically aligned carbon nanotubes as versatile platform for ultra-light THz components. *Nanotechnology*. 2020;31(25):255703. DOI: 10.1088/1361-6528/ab7efa.
52. Arutyunyan NR, Kanygin MA, Pozharov AS, Kubarev VV, Bulusheva LG, Okotrub AV, et al. Light polarizer in visible and THz range based on single-wall carbon nanotubes embedded into poly(methyl methacrylate) film. *Laser Physics Letters*. 2016;13(6):065901. DOI: 10.1088/1612-2011/13/6/065901.
53. Okotrub AV, Asanov IP, Larionov SV, Kudashov AG, Leonova TG, Bulusheva LG. Growth of CdS nanoparticles on the aligned carbon nanotubes. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2010;12(36):10871–10875. DOI: 10.1039/C000189A.
54. Bulusheva LG, Fedoseeva YuV, Kurennya AG, Vyalikh DV, Okotrub AV. Role of defects in carbon nanotube walls in deposition of CdS nanoparticles from a chemical bath. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2015;119(46):25898–25906. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b07549.
55. Fedoseeva YuV, Bulusheva LG, Okotrub AV, Kanygin MA, Gorodetskiy DV, Asanov IP, et al. Field emission luminescence of nanodiamonds deposited on the aligned carbon nanotube array. *Scientific Reports*. 2015;5:9379. DOI: 10.1038/srep09379.
56. Harussani MM, Sapuan SM, Nadeem G, Rafin T, Kirubaanand W. Recent applications of carbon-based composites in defence industry: a review. *Defence Technology*. 2022;18(8):1281–1300. DOI: 10.1016/j.dt.2022.03.006.
57. Przybył W, Januszko A, Radek N, Szczepaniak M, Bogdanowicz KA, Plebankiewicz I, et al. Microwave absorption properties of carbonyl iron-based paint coatings for military applications. *Defence Technology*. Forthcoming 2023. DOI: 10.1016/j.dt.2022.06.013.
58. Liu Jianping, Zhang Run, Xu Zhi Ping. Nanoparticle-based nanomedicines to promote cancer immunotherapy: recent advances and future directions. *Small*. 2019;15(32):1900262. DOI: 10.1002/sml.201900262.
59. Gautam M, Thapa RK, Poudel BK, Gupta B, Ruttala HB, Nguyen HT, et al. Aerosol technique-based carbon-encapsulated hollow mesoporous silica nanoparticles for synergistic chemo-photothermal therapy. *Acta Biomaterialia*. 2019;88:448–461. DOI: 10.1016/j.actbio.2019.02.029.
60. Kościk I, Jankowski D, Jagusiak A. Carbon nanomaterials for theranostic use. *C – Journal of Carbon Research*. 2022;8(1):3. DOI: 10.3390/c8010003.
61. Goenka S, Sant V, Sant S. Graphene-based nanomaterials for drug delivery and tissue engineering. *Journal of Controlled Release*. 2014;173:75–88. DOI: 10.1016/j.jconrel.2013.10.017.
62. Nair A, Haponiuk JT, Thomas S, Gopi S. Natural carbon-based quantum dots and their applications in drug delivery: a review. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2020;132:110834. DOI: 10.1016/j.biopha.2020.110834.
63. Omel'yanchuk LV, Gurova OA, Okotrub AV. [Genotoxic effect of inorganic nanoparticles on the cell]. *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2014;9(3–4):90–97. Russian.
64. Gurova OA, Dubatolova TD, Shlyakhova EV, Omelyanchuk LV, Okotrub AV. Hyperthermal effect of infrared irradiation on aqueous dispersion of carbon nanotubes and their penetration into *Drosophila melanogaster* larvae. *Physica Status Solidi B*. 2018;255(1):1700264. DOI: 10.1002/pssb.201700264.
65. Burlaka A, Lukin S, Prylutska S, Remeniak O, Prylutsky Yu, Shuba M, et al. Hyperthermic effect of multi-walled carbon nanotubes stimulated with near infrared irradiation for anticancer therapy: *in vitro* studies. *Experimental Oncology*. 2010;32(1):48–50.
66. Farzin L, Saber R, Sadjadi S, Mohagheghpour E, Sheini A. Nanomaterials-based hyperthermia: a literature review from concept to applications in chemistry and biomedicine. *Journal of Thermal Biology*. 2022;104:103201. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2022.103201.
67. Sundaram P, Abrahamse H. Phototherapy combined with carbon nanomaterials (1D and 2D) and their applications in cancer therapy. *Materials*. 2020;13(21):4830. DOI: 10.3390/ma13214830.
68. Wang Lei, Shi Jinjin, Liu Ruiyuan, Liu Yan, Zhang Jing, Yu Xiaoyuan, et al. Photodynamic effect of functionalized single-walled carbon nanotubes: a potential sensitizer for photodynamic therapy. *Nanoscale*. 2014;6(9):4642–4651. DOI: 10.1039/C3NR06835H.
69. Lan M, Guo L, Zhao S, Zhang Z, Jia Q, Yan L, et al. Carbon dots as multifunctional phototheranostic agents for photoacoustic/fluorescence imaging and photothermal/photodynamic synergistic cancer therapy. *Advanced Therapeutics*. 2018;1(6):1800077. DOI: 10.1002/adtp.201800077.
70. Golubewa L, Timoshchenko I, Romanov O, Karpicz R, Kulahava T, Rutkauskas D, et al. Single-walled carbon nanotubes as a photo-thermo-acoustic cancer theranostic agent: theory and proof of the concept experiment. *Scientific Reports*. 2020;10:22174. DOI: 10.1038/s41598-020-79238-6.
71. Chung S, Revia RA, Zhang M. Graphene quantum dots and their applications in bioimaging, biosensing, and therapy. *Advanced Materials*. 2021;33(22):1904362. DOI: 10.1002/adma.201904362.
72. Su S, Kang PM. Systemic review of biodegradable nanomaterials in nanomedicine. *Nanomaterials*. 2020;10(4):656. DOI: 10.3390/nano10040656.
73. Cozzolino F, Marra F, Fortunato M, Bellagamba I, Pesce N, Tamburrano A, et al. New sensing and radar absorbing laminate combining structural damage detection and electromagnetic wave absorption properties. *Sensors*. 2022;22(21):8470. DOI: 10.3390/s22218470.
74. Luo Feng, Liu Dongqing, Cao Taishan, Cheng Haifeng, Kuang Jiakai, Deng Yingjun, et al. Study on broadband microwave absorbing performance of gradient porous structure. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2021;4(3):591–601. DOI: 10.1007/s42114-021-00275-4.

75. Du Junsu, Zhang Pin, Qiu Leilei, Gao Xiaohui, Huang Shengxiang, He Longhui, et al. Chaos patterned metasurface absorber with multi-peak and broadband. *Journal of Applied Physics*. 2021;130(16):165101. DOI: 10.1063/5.0065004.
76. Kazakova MA, Semikolenova NV, Korovin EYu, Zhuravlev VA, Selyutin AG, Velikanov DA, et al. Co/multi-walled carbon nanotubes/polyethylene composites for microwave absorption: tuning the effectiveness of electromagnetic shielding by varying the components ratio. *Composites Science and Technology*. 2021;207:108731. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108731.
77. Naiden EP, Suslyayev VI, Bir AV, Politov MV. [Magnetic permeability spectra of nanosized hexaferrite powders]. *Zhurnal strukturnoi khimii*. 2004;45(7):102–105. Russian.
78. Zhuravlev VA, Suslyayev VI. Analysis of the microwave magnetic permeability spectra of ferrites with hexagonal structure. *Russian Physics Journal*. 2006;49(9):1032–1037. DOI: 10.1007/s11182-006-0220-8.
79. Zhuravlev VA, Suslyayev VI. Analysis and correction of the magnetic permeability spectra of $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ hexaferrite by using Cramers – Kronig relations. *Russian Physics Journal*. 2006;49(8):840–846. DOI: 10.1007/s11182-006-0183-9.
80. Naiden EP, Zhuravlev VA, Suslyayev VI, Minin RV, Itin VI, Korovin EYu. Structure parameters and magnetic properties of $\text{Me}_2\text{W}^{\text{I}}$ cobalt-containing hexaferrite systems synthesized by the SHS method. *Russian Physics Journal*. 2011;53(9):974–982. DOI: 10.1007/s11182-011-9519-1.
81. Minin RV, Zhuravlev VA, Lapshin OV, Itin VI, Svetlichnyi VA. Nanocrystalline cobalt ferrite powders by spray solution combustion synthesis. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2020;29(1):1–9. DOI: 10.3103/S1061386220010070.
82. Zhuravlev VA, Wagner DV, Dotsenko OA, Kareva KV, Zhuravlyova EV, Chervinskaya AS, et al. Static and dynamic magnetic properties of polycrystalline hexaferrites of the $\text{Ba}_2\text{Ni}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ system. *Electronics*. 2022;11(17):2759. DOI: 10.3390/electronics11172759.
83. Aherrao DS, Singh C, Srivastava AK. Review of ferrite-based microwave-absorbing materials: origin, synthesis, morphological effects, dielectric/magnetic properties, composites, absorption mechanisms, and optimization. *Journal of Applied Physics*. 2022;132(24):240701. DOI: 10.1063/5.0123263.
84. Maksimenko SA. Special section guest editor: fundamental and applied nanoelectromagnetics. *Journal of Nanophotonics*. 2012;6(1):061799. DOI: 10.1117/1.JNP.6.061799.
85. Maffucci A, Maksimenko SA, editors. *Fundamental and applied nanoelectromagnetics*. Dordrecht: Springer; 2016. 290 p. (NATO science for peace and security series B: physics and biophysics). DOI: 10.1007/978-94-017-7478-9.
86. Maffucci A, Maksimenko S, Svirko Yu, editors. *Carbon-based nanoelectromagnetics*. Amsterdam: Elsevier; 2019. 255 p. (Andrews DL, editor. Nanophotonics series).
87. Maffucci A, Maksimenko SA, editors. *Fundamental and applied nanoelectromagnetics II: THz circuits, materials, devices*. Dordrecht: Springer; 2019. 214 p. (NATO science for peace and security series B: physics and biophysics). DOI: 10.1007/978-94-024-1687-9.
88. Zhao Jijun, Liu Hongsheng, Yu Zhiming, Quhe Ruge, Zhou Si, Wang Yangyang, et al. Rise of silicene: a competitive 2D material. *Progress in Materials Science*. 2016;83:24–151. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.04.001.
89. Gogotsi Yu, Anasori B. The rise of MXenes. *ACS Nano*. 2019;13(8):8491–8494. DOI: 10.1021/acsnano.9b06394.

Получена 20.12.2022 / принята 20.01.2023.
Received 20.12.2022 / accepted 20.01.2023.