

ISSN: 2782-5515

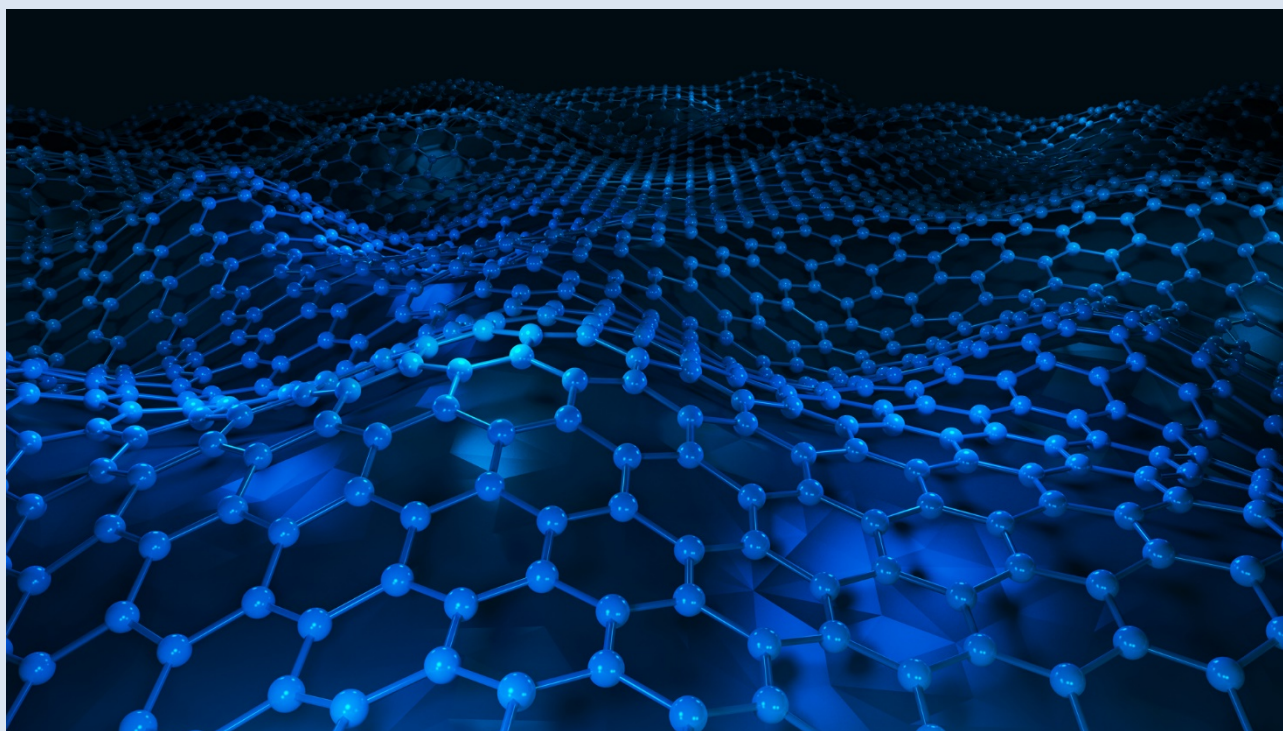


Перст

Информационный бюллетень
перспективные технологии
наноструктуры сверхпроводники фуллерены

Том 29, выпуск 6

июнь 2022 г.



Черноголовка

ФОТОНИКА

Оптическая квантовая память на фотонном эхе

При создании квантовых коммуникаций, позволяющих передавать кубиты на большие расстояния, неизбежно возникает проблема потерь, а значит, необходимость в создании квантовых повторителей — устройств, запоминающих и воспроизводящих волновую функцию сигнала без её разрушения. Основой такого повторителя является квантовая память. Существует несколько вариантов физической реализации квантовой памяти: на кремниевых микрорезонаторах, охлажденных атомах, эффектах самоиндуцированной прозрачности в нелинейных средах, и т.д. Ученые стремятся к повышению эффективности хранения, уменьшению количества фотонов в самих хранимых кубитах (в идеале — работа с однофотонными кубитами), увеличению времени хранения.

Одной из перспективных возможностей является использование эффекта фотонного эха. Этому и посвящена недавняя работа, опубликованная в журнале “Письма в ЖЭТФ” [1]. Исследователи из Казанского технического университета им. А.Н. Туполева экспериментально реализовали систему квантовой памяти на основе восстановления сигнала подавленного фотонного эха в кристалле ортосиликата иттрия, легированного эрбием $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$, и получили эффективность хранения информации более 40%, что является высоким показателем для подобного рода систем. Используемый кристалл интересен тем, что длина волны оптического перехода находится в окне прозрачности оптического волокна (1536 нм), что очень важно для применения в оптической квантовой связи.

На кристалл воздействуют последовательно лазерных импульсов частотой, равной частоте оптического перехода эрбия. Сигнальный импульс вызывает переходы осцилляторов в возбужденное состояние, создавая поляризацию среды. Рефазирующий импульс в момент времени t_2 (рис. 1) меняет фазы осцилляторов, и через определенное время они приходят в исходное состояние, образуя фотонное эхо. В схеме восстановления подавленного фотонного эха первоначальное эхо гасится за счет рассогласования фаз волн, излучаемых осцилляторами, в пространстве. Второй рефазирующий импульс в момент времени t_3 снова меняет фазы, образуя восстановленное эхо. Восстановленный сигнал и является сохраненной информацией. Такая схема, при согласованном подборе амплитуд и фаз рефазирующих импульсов,

И далее ...

ГРАФЕН

3 Ударим фуллереном по графену!

МУЛЬТИФЕРРОИКИ

4 Полу-ван-дер-ваальсовский композит

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

6 Монослой нитрида бора вместо антибиотиков

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

8 В ИФТТ РАН состоялась III Всероссийская конференция по сканирующей зондовой микроскопии

позволяет работать с более слабыми сигналами, чем обычное фотонное эхо. Подробнее об этом методе можно прочитать в работе [2].

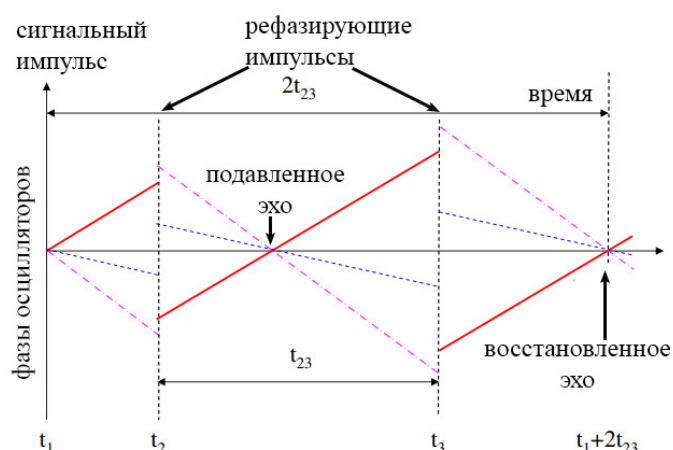


Рис. 1. Схема восстановления сигнала подавленного фотонного эха. Рисунок из работы [2], переведенный с английского.

Результаты экспериментов [1] позволили создать оптоволоконную ячейку памяти, позволяющую хранить оптический кубит в течение 40 микросекунд. На рис. 2 приведен один из экспериментальных графиков, показывающий сигнал восстановленного фотонного эха, а также зависимость эффективности хранения от интенсивности рефразирующих импульсов. Видно, что за только счёт подбора интенсивностей можно достичь эффективности более 50%.

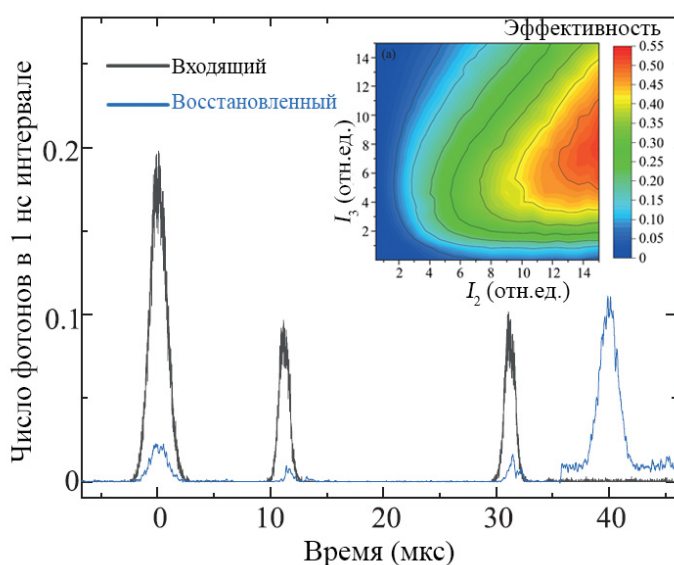


Рис. 2. Входящий и восстановленный импульсы в зависимости от времени. Входящий импульс содержит 340 фотонов, восстановленный — 150 фотонов. На вставке — эффективность хранения в зависимости от интенсивности рефразирующих импульсов I_2 и I_3 . Коллаж рисунков из статьи [1], переведен с английского.

Авторы также оценили факторы, уменьшающие возможную эффективность квантовой памяти, и утверждают, что в данной конфигурации возможно довести эффективность до 70%. Пока существенные ограничения на промышленное применение таких систем накладывает необходимость охлаждения самого кристалла, для увеличения времени когерентности оптического перехода, которое напрямую влияет на время хранения кубитов. Тем не менее, исследователи в этой области настроены оптимистично, и реализация промышленных систем оптической квантовой памяти уже не за горами. Ждём новых экспериментальных результатов.

З. Пятакова

1. М. Миннегалиев и др., *Письма в ЖЭТФ* 115, 769 (2022).

2. V. Damon et al., *New J. Phys.* 13, 093031 (2011).

ГРАФЕН

Ударим фуллереном по графену!

В работе [1] исследователи из Китая и Великобритании без всякого сожаления подвергли графен фуллереновой атаке, желая проверить его на прочность. С помощью молекулярно-динамического моделирования они изучили механизмы потери устойчивости графенового листа, образование в нем трещин и отверстий под действием налетающих с различной скоростью фуллеренов различного диаметра. Компьютерное моделирование проводили в программном комплексе LAMMPS. По сути, это классическая молекулярная динамика с эмпирическим многочастичным потенциалом AIREBO для описания внутримолекулярных и межмолекулярных взаимодействий. Такой подход в настоящее время получил достаточно широкое распространение для анализа углеродных систем. В процессе моделирования исследователи использовали термостат Нозе-Гувера, временной шаг был выбран 0.5 фс, а симуляцию “удара” проводили с использованием микроканонического (NVE) ансамбля. Непосредственно атомистическая модель представляла собой квадратный однослойный лист графена 20×20 нм с фиксированными краями (см. рис. 1), над центром которого помещали фуллерен. Первоначальное расстояние от фуллерена до поверхности графена выбирали таким образом, чтобы избежать взаимодействия между объектами.

Авторы рассмотрели широкий набор фуллеренов: от классического C_{60} до гигантского C_{1500} (см. рис. 1).

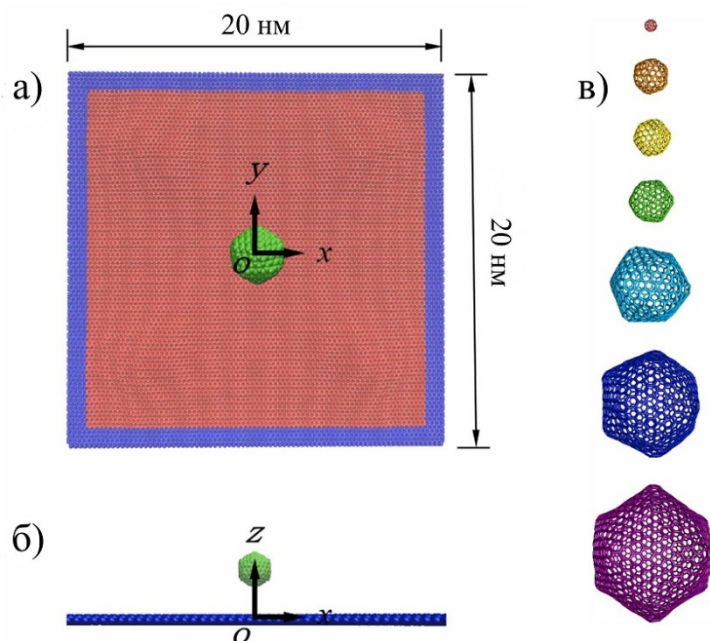


Рис. 1. Атомистическая модель из графена и фуллерена, используемая авторами: а) - вид сверху и б) - сбоку. Синим цветом обозначены зафиксированные атомы на границе графенового листа. Набор фуллеренов, рассматриваемых авторами: C_{60} , C_{180} , C_{240} , C_{320} , C_{540} , C_{960} , C_{1500} (в).

Однако особое внимание они уделили сравнительно небольшому C_{180} . Именно на его примере авторы изучили динамику перфорации графена при ударной нагрузке в широком диапазоне скоростей. Выяснилось, что, когда скорость фуллеренового “снаряда” меньше 4.25 км/с, то последний попросту отскакивает от графена (рис. 2а). При увеличении скорости налетающего фуллерена до 4.75 км/с, он намертво прилипает к поверхности (рис. 2б). Таким образом, графен обладает способностью захватывать “снаряд” в определенном диапазоне скоростей, рассеивая его кинетическую энергию. Дальнейшее увеличение скорости налетающего фуллерена приводит к более плачевным последствиям. Так, разогнавшись до 4.75 км/с, фуллереновый каркас пробивает графен насквозь. В центре удара рвутся ковалентные связи, выбиваются атомы углерода и образуются заметные трещины (рис. 2в). При этом характер трещин и отверстий, разумеется, зависит от начальной скорости фуллерена.

Авторы отмечают, что представленные в работе [1] наблюдения помогут в разработке специализированных материалов на основе фуллере-

нов и графена для создания защитных экранов и покрытий, способных уберечь оборудование, функционирующее в экстремальных условиях. Возможно, эти материалы найдут применение и в средствах индивидуальной защиты, заменив собой широко используемые сейчас кевлар и тварон.

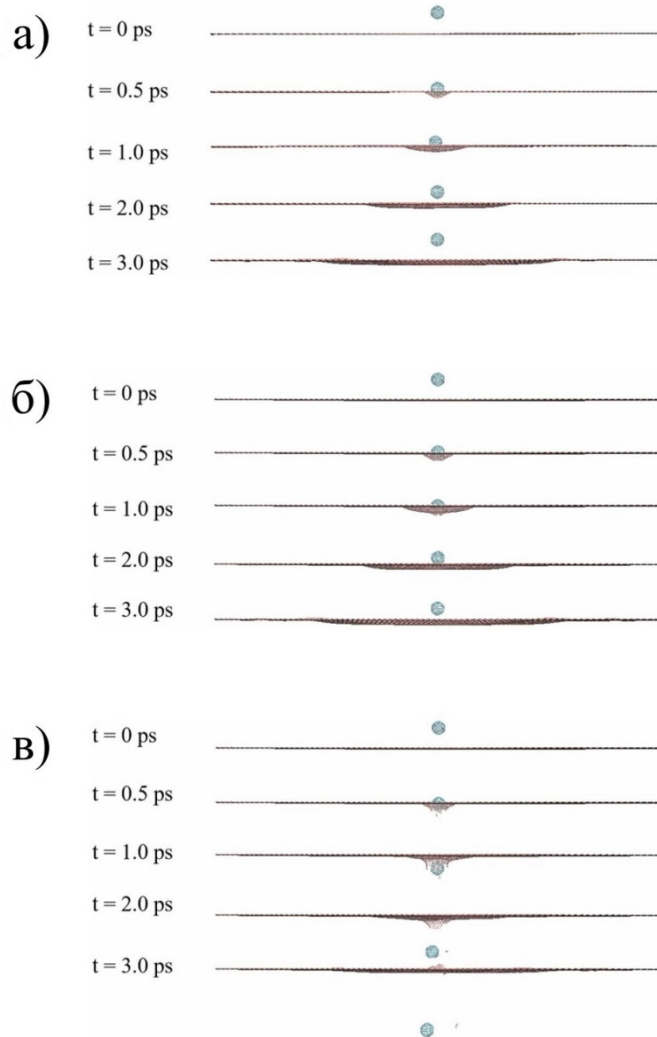


Рис. 2. Визуализация “удара” по графену фуллереновым “снарядом” со скоростью: а) - 4 км/с, б) - 4.5 км/с и в) - 5 км/с.

М. Маслов

1. Y.Zhang et al., *Mater. Today Commun.* **31**, 103642 (2022).

МУЛЬТИФЕРРОИКИ

Полу-ван-дер-ваальсовский композит

Композиционные материалы из сегнетоэлектрических и магнитных слоев с 90-х годов зарекомендовали себя как более практичная альтернатива естественным однокомпонентным магнитоэлектрическим материалам с их относительно слабыми эффектами и низкими температурами, при которых они проявляются. Однако у композиционных материалов есть

свои недостатки, связанные с самим наличием поверхности раздела магнитной и сегнетоэлектрических компонент: разорванные атомные связи приводят к эффектам гибридизации электронных орбиталей магнитной и сегнетоэлектрической среды и даже к миграции ионов между ними. Это, несомненно, сказывается на износостойкости таких структур и ставит крест на их использовании в современной электронике с ее миллиардами переключений в секунду. Вот почему такой живой интерес вызвали перспективы создания ван-дер-ваальсовых гетероструктур из недавно открытых двумерных магнетиков и сегнетоэлектриков: галогениды и халькогениды переходных металлов CrI_3 , VSe_2 и т.п. образуют атомарно тонкие и атомарно же гладкие магнитоупорядоченные монокристаллы, которые могут быть уложены в стопки

с такими же двумерными сегнетоэлектрическими материалами SnTe или In_2Se_3 . Ван-дер-ваальсовы силы, скрепляющие слои, достаточно велики, чтобы сохранять целостность гетероструктуры, но все же слишком слабы, чтобы покусаться на перемешивание атомов слоев.

Однако вот беда — двумерные слои сегнетоэлектриков требуют слишком больших электрических полей для переключения поляризации в них, поэтому ученые из Xi'an Jiaotong Univ. и Fudan Univ. (Китай) [1] рассмотрели промежуточный вариант гетероструктуры: двойной слой CrI_3 на сегнетоэлектрике феррите висмута и получили, как следует из самого названия статьи “Intriguing magnetoelectric effect ...”, интригующие результаты.

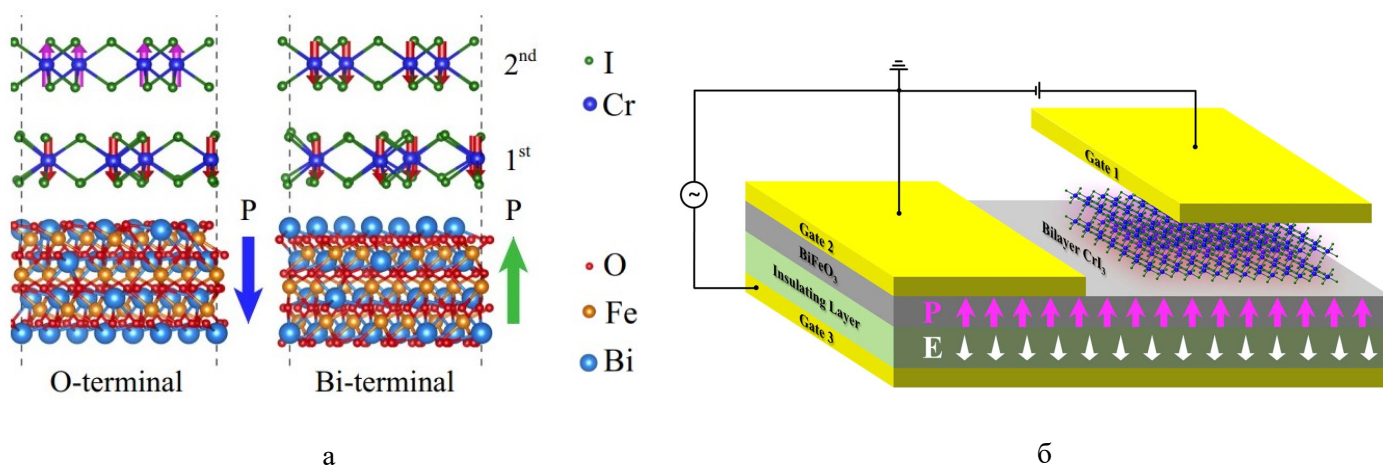


Рис. 1. а - Переход двойного слоя CrI_3 (вверху) из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние при переключении электрической поляризации подложки из феррита висмута из ориентации сверху вниз (на верхней поверхности - ионы кислорода) в противоположное (на верхней поверхности - ионы висмута) (малыми стрелками показаны спины ионов хрома); б - схематическое изображение спинового клапана: Gate 1, 2 - электроды, между которыми пропускается ток считывания состояния клапана, Gate 3 - управляющий электрод [1], Insulating layer - диэлектрическая прослойка между полупроводником BiFeO_3 и управляющим электродом.

Моделирование из первых принципов показало, что переключение поляризации в феррите висмута приводит к переходу двумерного слоя CrI_3 из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние (рис. 1а). В качестве механизма эффекта были исследованы три возможности: (1) структурная реконструкция поверхности двумерного материала под механическим воздействием подложки, (2) эффекты зарядового переноса, (3) непосредственное действие электрического поля. Моделирование методом теории функционала плотности показывает, что реконструкция и механическая деформация *ПерсТ, 2022, том 29, выпуск 6*

хотя и имеют место, но не оказывают влияния на магнитный фазовый переход из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние, а решающим фактором, вызывающим переход, является эффект зарядового переноса, в то время как электрическое поле влияет, но противоположным образом, снижая выигрыш по энергии от такого перехода. Поскольку переход от антиферромагнитного состояния в ферромагнитное сопровождается изменением электросопротивления материала, это позволило авторам пофантазировать, какие устройства можно сделать на основе такой гетероструктуры. Предлага-

гается создать спиновый клапан, переключаемый электрическим полем (рис. 1б): подавая на подложку разность потенциалов относительно электродов, расположенных сверху, можно переключать электрическую поляризацию, а значит магнитное состояние и проводимость двумерного слоя CrI_3 .

Впрочем, статья оставляет ощущение недосказанности: как быть с тем, что одна из компонент гетероструктуры все-таки из объемного кристалла? Не сводит ли на нет преимущества ван-дер-ваальсовых структур такое половинчатое решение? Во-вторых, сегнетоэлектрик феррит висмута сам по себе является мультиферроиком с антиферромагнитным упорядочением, а значит рассмотрение обменного взаимодействия только внутри системы CrI_3 , как это сделано в статье, вызывает вопросы.

А. Пятаков

1. P.Li et al., *NPJ Comput. Mater.* 8, 20 (2022).

НАНОСТРУКТУРЫ, НАНОТЕХНОЛОГИИ

Монослои нитрида бора вместо антибиотиков

Широкое, а зачастую и чрезмерное применение антибиотиков, к сожалению, привело к росту устойчивости микроорганизмов ко многим из этих препаратов, поэтому очень важны исследования и разработки новых лекарственных средств. Один из интересных подходов – использование наногибридов, в которых объединены действующее вещество и биосовместимый носитель. ПерсТ уже рассказывал о том, что наногибриды из биостекла и наночастиц диоксида церия существенно снизили жизнеспособность устойчивых штаммов золотистого стафилококка, способных выживать внутри клеток и даже прятаться в макрофагах [1]. Высокую антибактериальную активность продемонстрировали наночастицы металлов (особенно Ag), оксидов металлов, графен, оксиды графена и др. Однако во многих случаях наноматериалы, в отличие от антибиотиков, не идентифицируют микробы, и могут повреждать здоровые клетки и органы (например, если механизм их воздействия основан на разрушении мембран или образовании активных форм кислорода).

В поисках новых вариантов китайские исследователи (с участием коллег из Нидерландов) изучили воздействие на бактерии нанопластинок нитрида бора [2]. Гексагональный BN (“белый графит”), как и графит, может существо-

вать в виде отдельных слоев и считается перспективным материалом для нанoeлектроники. Работы последних лет, например, российских материаловедов из НИТУ “МИСиС”, показали, что на основе наночастиц нитрида бора можно сделать эффективное бактерицидное покрытие [3].

Авторы работы [2] проверили антибактериальную активность 16 наноматериалов (нанопластинок BN, наночастиц металлов и оксидов, углеродных нанотрубок CNT и нановолокон CNF, оксида графена GO и др.) в отношении штамма кишечной палочки *E. Coli*, устойчивого к 24 антибиотикам. Диаметры наночастиц – 20-200 нм, CNT и CNF – 10-30 нм при длине 300-800 нм. Латеральные размеры 2D наночастиц BN, GO, MoS_2 и WS_2 – 200-500 нм при толщине 0,5-4 нм. Рост клеток бактерий (%) измеряли после 24-часовой инкубации с этими наноматериалами и двумя антибиотиками – норфлоксацином (Nor), эффективным против этих бактерий, и ампициллином (Amp), который на них не действует. Использовали 9 доз в диапазоне 0-500 мкг/мл.

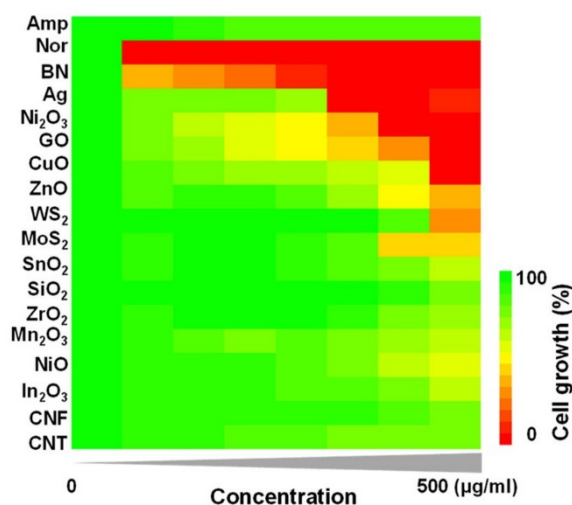


Рис. 1. Зависимость роста бактериальных клеток от концентрации действующего вещества. Красный, жёлтый и зелёный цвета представляют сильную, среднюю и незначительную антибактериальную активность.

На рис. 1 показана зависимость роста клеток от концентрации действующего вещества. Антибактериальная активность практически всех наноматериалов, кроме нано Ag и BN, очень низкая (либо проявляется при дозах выше 500 мкг/мл). Ампициллин неэффективен даже при 500 мкг/мл, а под воздействием 8 мкг/мл норфлоксацина происходит ингибирование почти 100% клеток бактерий. Минимальная ингибирующая концентрация наночастиц Ag и

нанопластинок BN ~ 125 мкг/мл, гораздо ниже, чем у других наночастиц (например, 250 мкг/мл для Ni₂O₃, 500 мкг/мл для GO и CuO).

Далее исследователи показали, что нанопластины BN проявляют антибактериальную активность в отношении других бактерий (*B. subtilis* и *S. aureus*), а также пяти устойчивых штаммов *E. coli*, *P. aeruginosa*, *S. aureus*, *L. Crispatus* и устойчивого к Ag штамма *E. coli*. Вторичная (приобретенная) устойчивость, характерная для многих антибиотиков, не возникает при длительном (30 дней) воздействии

нанопластинок BN на устойчивый штамм *E. Coli*.

Биосовместимость нанопластинок BN отличная. Она была проверена на трёх клеточных линиях млекопитающих (на клетках, подобных макрофагам THP-1, эпителиальных HUVEC и дендритных клетках костного мозга мышей BMDC) (рис. 2А). Для nano Ag выживаемость клеток THP-1 и BMDC довольно низкая. На рис. 2В показано, что наночастицы Ag, в отличие от нанопластинок BN, приводят к значительному образованию активных форм кислорода, которые могут повреждать клетки.

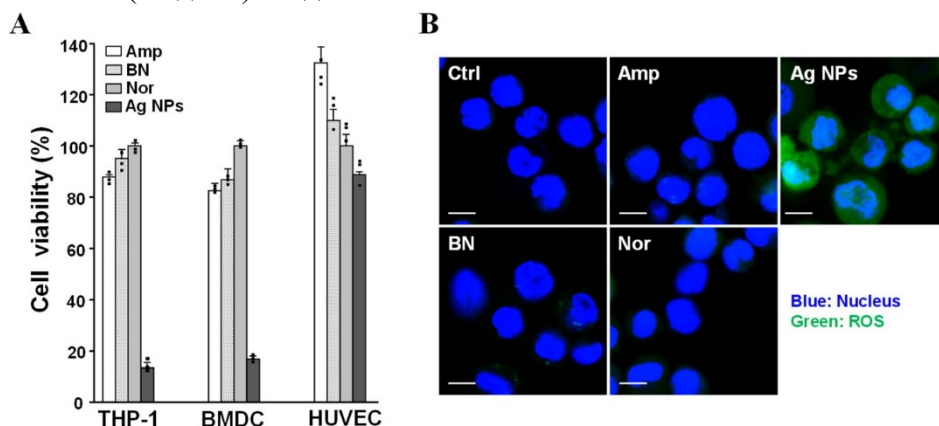


Рис. 2. А - Жизнеспособность (%) клеток разных линий при воздействии BN, nano Ag и двух антибиотиков Amp и Nor (концентрация наноматериалов и антибиотиков соответствует минимальной ингибирующей концентрации); В - изображения клеток THP-1 после воздействия наноматериалов и антибиотиков (синий цвет – клеточные ядра, зеленый цвет – активные формы кислорода).

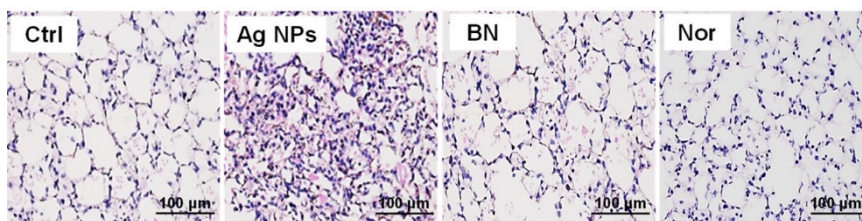


Рис. 3. Воспалительные отклики в тканях лёгкого после 24-часового воздействия.

Безопасность нанопластинок BN была также проверена *in vivo* на мышах. Воспалительные отклики в лёгких, сердце, печени, почках, селезёнке после воздействия BN, в отличие от nano Ag, минимальны (рис. 3).

Убедившись в биосовместимости, авторы [2] проверили антибактериальную активность нанопластинок BN *in vivo* на мышах. Были использованы клетки устойчивого штамма бактерий *P. aeruginosa*, которые вызывают лёгочную инфекцию. Степень выживаемости оказалась в два раза выше, чем при использовании антибиотиков.

Важный вопрос – механизм воздействия нанопластинок BN именно на бактерии, ведь клетки организма не повреждаются.

Как стало известно в начале 1990-х годов на примере изучения *E. coli*, деление клеток этих и многих других бактерий происходит вследствие формирования белком FtsZ так называемого Z кольца примерно посередине клетки [4]. Кольцо сокращается, образуя перетяжку, и клетка делится на две дочерние. Сокращением кольца управляют несколько белков на поверхности внутренних мембран. С помощью конфокальной микроскопии авторы [2] определили, что в присутствии BN деление бактериальных клеток прекращается.

Исследователи предположили, что нанопластинки BN нарушают биологическую функцию белков, управляющих сжатием. Для проверки своей гипотезы они разработали специальный метод идентификации белков, на которые могут быть нацелены нанопластинки BN. Также использовали математическое моделирование. Полученные результаты подтвердили, что BN быстро образует сильные связи с белками FtsP, EnvC и TolB, особенно важными для процесса сжатия кольца и бинарного деления клетки.

Таким образом, антибактериальная активность нанопластинок BN обусловлена адгезией к мембранам, взаимодействием с конкретными белками (FtsP, EnvC и TolB), блокировкой сжатия Z колец, необходимого для деления клеток (рис. 4).

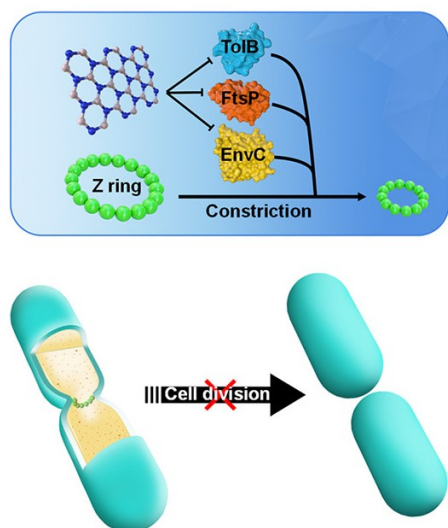


Рис. 4. Схема антибактериального действия нанопластинок BN.

Поверхностный заряд, толщина и площадь поверхности являются ключевыми физико-химическими свойствами нанопластинок BN, которые обеспечивают уничтожение бактерий подобно действию антибиотиков.

О. Алексеева

1. [ПерсТ 28, вып. 9/10, с.1 \(2021\).](#)
2. *Y.Pan et al., ASC Nano* **16**, 7674 (2022).
3. *K.Y.Gudz et al., ACS Appl. Mater. Interfaces* **12**, 42485 (2020).
4. *А.Д. Ведяйкин. Микробиология* **88**, 53 (2019).

ВЕСТИ С КОНФЕРЕНЦИЙ

В ИФТТ РАН состоялась III Всероссийская конференция по сканирующей зондовой микроскопии

С 1-го по 3-е июня 2022 года в Институте физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН (ИФТТ РАН) состоялась III Всероссийская конференция “Особенности сканирующей зондовой микроскопии в вакууме и различных средах”. Первое научное мероприятие по сканирующей зондовой микроскопии прошло в 2019 году в ИФТТ РАН с целью налаживания контактов между российскими учеными и специалистами, работающими в области сканирующей зондовой микроскопии в условиях сильно отличных от нормальных (вакуум, различные среды, низкие или высокие температуры). Традиционно, организаторами конференции в 2022 году выступили ИФТТ РАН, ООО НТ-МДТ (Москва, Зеленоград), РАН и РФФИ. Тематика конференции включала вопросы исследования низкоразмерных систем и поверхностей методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), разработки новых методик СЗМ для решения различных технологических задач, численного моделирования данных СЗМ и применения СЗМ для исследования биологических объектов.

Рабочую программу конференции открыл доклад основателя группы компаний NT-MDT Spectrum Instruments д.т.н. профессора В.А. Быкова. В своем выступлении Виктор Александрович рассказал о новых приборах и методиках, разработанных сотрудниками компании, для комплексного анализа молекулярных и поверхностных структур методами атомно-силовой микроскопии и спектроскопии. В ходе доклада были рассмотрены условия и особенности конструкции приборов и зондов для получения максимального объема информации об исследуемом объекте. В настоящее время, продукция группы компаний NT-MDT Spectrum Instruments востребована не только в России, но и за рубежом. Разработанные в компании сканирующие зондовые микроскопы и системы, сочетающие методы атомно-силовой микроскопии и оптической микроскопии ближнего поля, позволяют исследователям получать уникальные взаимодополняющие данные о структуре и свойствах материала на нанометровом и атомном уровне.



Основатель группы компаний НТ-МДТ д.т.н. профессор В.А. Быков выступает с докладом на конференции.

Программа мероприятия включала более 20 докладов, которые заслушивались и обсуждались в течение трех дней работы конференции. Конференция проходила в формате серии научных семинаров: докладчику предоставлялось 40 минут для презентации результатов исследования и их обсуждения, причем вопросы можно было задавать в ходе выступления. Конференция собрала ведущих российских ученых, работающих в области сканирующей туннельной микроскопии и атомно-силовой микроскопии. Они представляли российские научно-исследовательские организации, специализирующиеся в изучении физики микро- и наноструктур, гетероструктур и структур Вандер-Ваальса, разработке новых материалов и устройств для микроэлектроники, квантовых вычислений и биотехнологий: ИОФ РАН, ФИАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, МФТИ, ИРЭ РАН, ИФМ РАН, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ИПТМ РАН, ИАП РАН и др.

За время работы конференции прошло обсуждение современных тенденций развития сканирующей туннельной микроскопии и атомно-силовой микроскопии, были представлены новые методики и результаты, полученные с помощью СЗМ. В докладах были представлены как оригинальные данные, так и результаты, недавно опубликованные в высокорейтинговых научных журналах и уже признанные международным сообществом. Сканирующая зондовая микроскопия относится к неразрушающим методам анализа поверхности и наноструктур. Она позволяет не только исследовать структуру и свойства поверхности твердого тела с высоким пространственным разрешением, но и манипулировать отдельными атомами и молекулами, создавая новые наноструктуры с уникальными свойствами для фундаментальных исследований и возможных применений в микро- и нанoeлектронике. Методики сканирующей зондовой микроскопии находят все более широкое применение в материаловедении и медицине, различных разделах современной физики, химии и биологии. Использование микроскопов, работающих в специальных условиях (жидкие среды, высокие и низкие температуры, специальные газовые среды и т.д.), позволяет исследовать свойства и поведение клеток, бактерий, вирусов, белков, живых микроорганизмов и органических нанообъектов. Благодаря применению СЗМ, открывается возможность исследовать процессы на нанометровых масштабах, разрабатывать новые наноматериалы и нанотехнологии.

Учитывая актуальность тематики конференции, участниками были высказаны пожелания о продолжении данного научного мероприятия в ежегодном формате и, если возможно, расширении его географии.

О. Камынина

**Информационный бюллетень ПерсТ
издается информационной группой ИФТТ РАН**

Главный редактор: И.Чугуева, e-mail: ichugueva@yandex.ru

Научные редакторы К. Кугель, Ю. Метлин

В подготовке выпуска принимали участие О. Алексеева, О. Камынина, М. Маслов, А. Пятаков, З. Пятакова

Выпускающий редактор: И. Фурлетова

Адрес редакции: 119296 Москва, Ленинский проспект, 64