

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского
Зональная научная библиотека имени В. А. Артисевич
Отдел научной информации*

Тонкие плёнки

**Методы получения,
физические свойства, применение**

**Тонкие плёнки полупроводников,
диэлектриков, металлов**

Виртуальная выставка

**Саратов
2022**

ЧАСТЫ III



СТАТИИ



ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ОКСИДОВ ТИТАНА, ХРОМА, ЦИРКОНИЯ, ОЛОВА, ПОЛУЧЕННЫЕ ИЗ РАСТВОРА

© А. М. Абызов

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
E-mail: andabyz@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 июля 2017 г.

Методом окунания в раствор и последующего отжига на воздухе получены пленки TiO_2 , Cr_2O_3 , ZrO_2 , SnO_2 толщиной ~ 10–100 нм. Связезированные пленки исследованы методами сканирующей электронной микроскопии, элементного рентгеноспектрального анализа, оптической спектроскопии, рентгеновской дифракции; измерена электропроводимость пленок на воздухе и в вакууме. Адгезия большинства пленок к подложке оценена как высокая. Для пленок толщиной более 10 нм регистрируется кристаллическая структура. Пленки характеризуются удельным поверхностным сопротивлением 10^8 – 10^{12} Ом на воздухе, 10^9 – 10^{14} Ом в вакууме и перспективны в качестве покрытий различного назначения, в том числе при создании структур типа ядро-оболочка.

Получение пленок из жидких растворов реагентов (Chemical Solution Deposition — CSD) [1, 2] привлекательно прежде всего с точки зрения аппаратурной простоты процесса. Это очевидно при сопоставлении метода CSD с методами осаждения из газовой фазы и вакуумного напыления (Chemical Vapor Deposition, Physical Vapor Deposition). Метод CSD не столь универсален, т. е. получение пленок материалов всевозможных классов (например, металлов) этим методом невозможно или затруднительно. Тем не менее метод CSD очень удобен для получения пленок и покрытий некоторых составов, в частности оксидных. Пленки оксидов, полученные методом CSD, используются в качестве защитных, оптических, электропроводящих, теплоотражающих, газовых сенсоров и др. [3–6]. Имеются несколько вариантов нанесения растворов на подложки — окунание или погружение (dip-coating), с вращением подложки (spin-coating), разбрызгивание (spray-coating). Наиболее простой является технология окунания, которая широко применяется как в лабораторной практике, так и в промышленности (см., например, <https://scscoatings.com>, <http://www.diptechsystems.com>, <http://www.apexicindia.com>). Кроме нанесения пленок на плоские подложки и изделия другой формы (например, трубы) метод

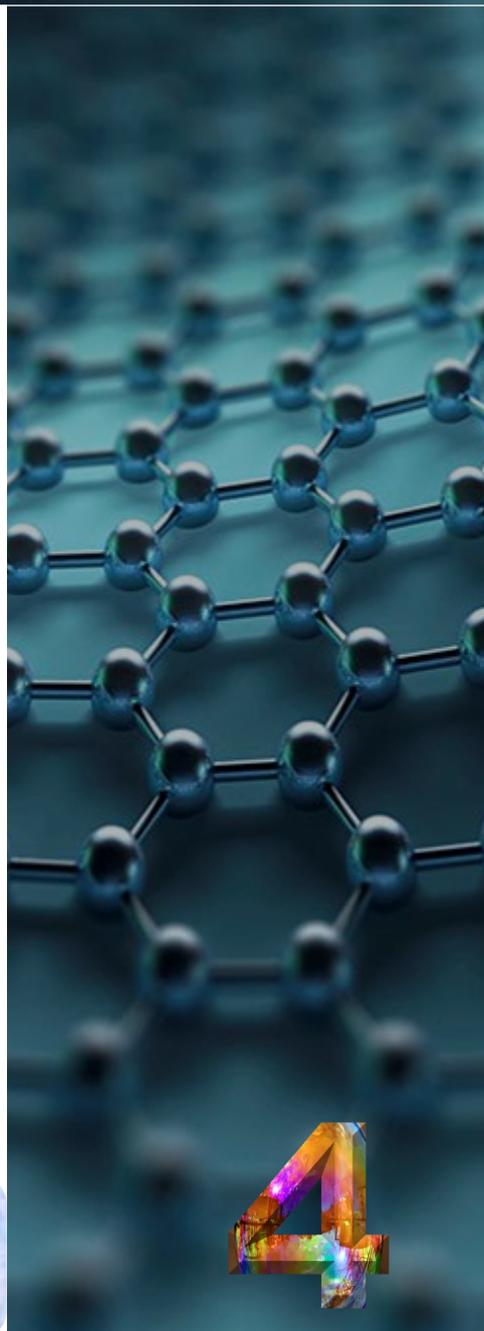
дисперсный состав и высокие механические свойства получаемой на их основе керамики [7]. Очевидно, что при этом обработку методик синтеза и анализ полученных покрытий предпочтительно начинать с тонких пленок на плоских подложках.

Представленная работа посвящена синтезу оксидных пленок на стеклянных подложках методом окунания, исследованию их структуры и свойств. Для обработки подложек взяты истинные растворы (алкоголята, дикетоната и карбоксилата различных металлов). Такой подход представляется предпочтительным ввиду большей стабильности и однозначности таких составов по сравнению с коллоидными растворами, которые также используют в методе CSD (золь-гель технология, водные растворы гидролизующихся оксидов).

Экспериментальная часть

В работе использованы следующие реактивы: ацетилацетонат циркония $Zr(OC_5H_7)_4$ (х.ч.), изопропилат титана $Ti(OC_3H_7)_4$ ($\geq 98\%$), олеат олова $(C_{17}H_{33}COO)_2Sn$ («чистый»), олеат калия $C_{17}H_{33}COOK$ («чистый»), нонагидрат нитрата хрома $Cr(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (гексан С.Н., «чистый»), хлоридом

Абызов, А. М. Тонкие плёнки оксидов титана, хрома, циркония, олова, полученные из раствора / А. М. Абызов. – Текст : непосредственный // Журнал прикладной химии. – 2017. – Т. 90, № 7. – С. 869-876 : 3 таб., 5 рис. – Библиогр.: с. 875-876 (16 назв.). – ISSN 0044-4618. – Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30003877> (дата обращения: 26.01.2022). – Режим доступа : свободный.



Мадатов, Р. С. Влияние примесных атомов Sm на эффект переключения в тонких плёнках GeS / Р. С. Мадатов, А. С. Алекперов, А. Э. Набиев. – DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-212-217. – Текст : непосредственный // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 212-217 : 2 рис. – Библиогр.: с. 217 (13 назв.). – ISSN 1817-3020. – eISSN 2542-193X. – Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28200537> (дата обращения: 26.01.2022). – Режим доступа : свободный.

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ Sm НА ЭФФЕКТ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ GeS

Р. С. Мадатов¹, А. С. Алекперов², А. Э. Набиев²

¹Мадатов Рагим Селим оглы, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией радиационной физики полупроводников, Научно-исследовательский институт радиационных проблем Национальной академии наук Азербайджана, msrahim@mail.ru

²Алекперов Айдын Сафарбек оглы, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, Азербайджанский государственный педагогический университет, aydin60@inbox.ru

²Набиев Асаф Энвер оглы, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, Азербайджанский государственный педагогический университет, asaaf.fizik@mail.ru

В последние годы возросло внимание к новым полупроводниковым материалам на основе A^mB^n . Среди них особый интерес представляют тонкие фоточувствительные пленки моносульфида германия. Недавно было создано уникальное устройство из GeS. Тонкие пластинки способны содержать большое количество ионов лития. Данный материал отлично подходит в качестве сырья при производстве солнечных панелей. Наряду с этим качеством тонкие пленки моносульфида германия обладают эффектами переключения и памяти. Тонкие пленки, полученные термическим испарением на холодных подложках, являются аморфными. Примеси редкоземельных элементов, в том числе атомы Sm, образуют зародыши кристаллизации. Несмотря на то что кристаллизация полностью не осуществляется по всему объему, фазовый переход обнаруживается в тонких пленках GeS:Sm. Характерными для этого эффекта является большая разница в сопротивлении высокоомного и низкоомного состояния, большое число циклов переключения, малые времена и энергии переключения. В ходе наших исследований было выявлено, что кратность изменения сопротивления при переключении равна 10^5 – 10^6 , время переключения – ($\sim 10^{-6}$ с), потребляемая энергия при переключении – ($\sim 10^{-7}$ Дж). Это обуславливает необходимость исследования основных закономерностей эффекта переключения проводимости в тонких пленках GeS:Sm с памятью, их зависимость от внешних факторов. В связи с этим были проведены исследования влияния температуры и освещения на эффект переключения в тонких пленках GeS:Sm.

Ключевые слова: тонкие пленки, моносульфид германия, примесные атомы, редкоземельные элементы, sandwich-структура, эффект переключения и памяти, фазовый переход, кристалли-



зация, самокомпенсация, высокоомное и низкоомное состояние, комплексы и ассоциаты, уровни прилипания.

DOI: 10.18500/1817-3020-2016-16-4-212-217

Введение

Повышенный интерес к слоистым кристаллам GeS обусловлен возможностью использования их в устройствах электрической памяти в качестве среды записи голограмм, создания на их основе солнечных ячеек [1]. Новый этап интенсивных исследований слоистых кристаллов GeS начался после того как исследователи из Университета штата Северная Каролина создали похожие на цветы структуры, имеющие чрезвычайно тонкие лепестки с большой поверхностной площадью. Атомная структура моносульфида германия очень хорошо поглощает солнечную энергию и может преобразовывать ее в полезное электричество. Такой материал отлично подходит в качестве сырья при производстве солнечных панелей и суперконденсаторов [2]. Наночастицы сульфида германия были синтезированы новым газофазным лазерным фотолитоном и последующим термическим отжигом. Они показали отличную циклическую производительность для литий-ионных батарей с максимальной емкостью 1010 мАч после 100 циклов. Метастабильные тетрагональные фазы наночастиц Ge были предложены в качестве активных материалов для обратимого процесса экстракции [3]. Многослойный GeS-полевой транзистор (ПТ) демонстрирует удивительно высокий фотоотклик $R_{\lambda} \sim 206$ А/Вт при освещении мощностью 1.5 мВт на длине волны $\lambda = 633$ нм, при напряжении на затворе $V_g = 0$ В и напряжении на контактах сток-исток $V_{sd} = 10$ В. Результат $R_{\lambda} \sim 206$ А/Вт превосходит аналогичный параметр, полученный на

© Мадатов Р. С., Алекперов А. С., Набиев А. Э., 2016

Прохождение электромагнитных излучений через тонкие пленки Cu

© Э.С. Эргашов,¹ З.А. Исаханов,² Б.Е. Умирзаков^{1,2}

¹Ташкентский государственный технический университет, 100095 Ташкент, Узбекистан

²Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН Республики Узбекистан, 100125 Ташкент, Узбекистан
e-mail: ftmet@rambler.ru

(Поступила в Редакцию 13 января 2015 г. В окончательной редакции 12 октября 2015 г.)

Впервые методом прохождения света исследована электронная структура наноразмерных фаз Cu, полученных на поверхности монокристаллического NaCl(100) методом высоковакуумного напыления. Показано, что нанопленки Cu с толщиной 1–1.5 monolayer обладают свойствами, характерными для узкозонных полупроводников.

Введение

Многослойные свободные нанопленочные структуры на основе металлов могут быть использованы в качестве армирующего материала, а также для изготовления контактов и соединений в приборах и устройствах электронной техники. Известны работы, посвященные изучению физических свойств наноразмерных структур на основе Ti, W, Fe, Ni, Au, Ag с учетом их практического применения [1–6]. В этих работах показано, что наноразмерные кластеры обладают нехарактерными для металлов электронными свойствами. Это объясняется проявлением квантово-размерных эффектов (резким изменением электронной структуры) в кластерах, когда их размеры, уменьшаясь, приближаются к длине волны электрона (≤ 1 nm) [2]. Поэтому изучение электронной структуры наноразмерных пленок металлов различной толщины является актуальной задачей современного электронного приборостроения. Определение ширины запрещенной зоны E_g и плотности электронных состояний материалов затруднительно, так как требует одновременного применения комплекса методов вторичной и фотоэлектронной спектроскопии. Ранее [7,8] нами изучены состав и структура свободных пленок Cu разной толщины ($d = 10.0–100.0$ nm), выращенных на поверхности NaCl(100) при $T = 480–500$ K в условиях сверхвысокого вакуума. Однако до настоящего времени недостаточно изучена начальная стадия формирования нанопленок Cu и практически не изучены их зонно-энергетические параметры. В настоящей работе с использованием метода прохождения света исследованы степень покрытия поверхности NaCl(100) атомами Cu и электронная структура наноразмерных фаз и пленок Cu.

Методика эксперимента

Напыление тонких пленок ($d \leq 1.0–1.5$ nm) Cu на

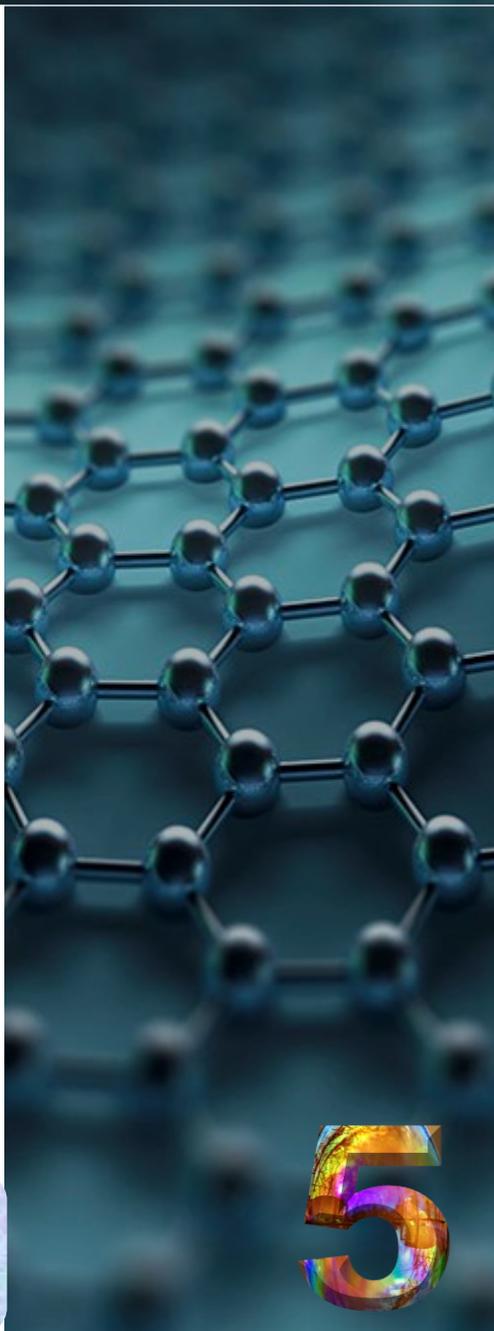
Толщина пленок оценивалась по времени и скорости их роста, которые откалиброваны предварительно по относительному изменению интенсивностей оже-пииков Na и Cu. Скорость напыления выбрана 0.1–0.15 nm/min (~ 0.5 monolayer/min). Исследования проводились в сверхвысоковакуумном приборе ($P \leq 10^{-7}$ Pa), состоящем из двух отсеков. В первом отсеке проводились исследования состава, структуры и свойств поверхности с использованием методов оже-электронной спектроскопии (ОЭС), ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС) и спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ), а во втором отсеке — степень покрытия поверхности и электронная структура наноразмерных фаз Cu методом прохождения световых лучей через систему Cu + NaCl(100). Исследования проводились с использованием света с длиной волны $\lambda = 6200–300$ nm ($E_e = 0.2–4$ eV). Исследуемые образцы (до 6 шт.) устанавливались в специальную каретку, которая может перемещаться от одного отсека в другой с помощью магнитов.

Результаты и их обсуждение

Перед исследованием система Cu + NaCl обезгаживалась в условиях сверхвысокого вакуума при $T \approx 600$ K в течение 2–3 h. Анализ спектров ОЭС показал, что после обезгаживания поверхностная концентрация атомов O и C не превышает 2–3 at.% и не наблюдается образования оксидов и карбидов Cu.

На рис. 1 приведены кривые зависимости изменения интенсивности I монохроматического света ($E_e \approx 1.5$ eV) и белого света, проходящих через систему Cu + NaCl, от времени напыления пленок Cu. Из рис. 1, а видно, что с ростом времени напыления интенсивность I монохроматического света сначала (до $t = 50–60$ s) резко, а затем (в интервале $t \approx 60–150$ s) медленно

Эргашов, Э. С. Прохождение электромагнитных излучений через тонкие пленки Cu / Э. С. Эргашов, З. А. Исаханов, Б. Е. Умирзаков. – Текст : непосредственный // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86, № 6. – С. 156–158 : 3 рис. – Библиогр.: с. 158 (9 назв.). – ISSN 0044-4642. – Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27368443> (дата обращения: 02.02.2022). – Режим доступа : свободный.



Расчет высокочастотной электропроводности и постоянной Холла для тонкой металлической пленки

© И.А. Кузнецова, О.В. Савенко, А.А. Юшканов

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, 150000 Ярославль, Россия
e-mail: kuz@uriyar.ac.ru

(Поступило в Редакцию 30 марта 2016 г.)

Рассмотрена кинетическая задача о нахождении высокочастотной электропроводности и постоянной Холла для тонкой металлической пленки в поперечном стационарном магнитном поле и в продольном переменном электрическом поле. Предполагается диффузное отражение электронов от верхней и нижней границ пленки. На соотношение между толщиной пленки и длиной свободного пробега электронов ограничений не накладывается. Исследованы зависимости электропроводности и постоянной Холла от безразмерных параметров: частоты электрического поля, индукции магнитного поля и толщины пленки. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

DOI: 10.21883/JTF.2017.12.45196.1831

Введение

Еще в XIX веке Фарадеем было установлено, что

Кузнецова, И. А. Расчет высокочастотной электропроводности и постоянной Холла для тонкой металлической пленки / И. А. Кузнецова, О. В. Савенко, А. А. Юшканов. – DOI: 10.21883/JTF.2017.12.45196.1831. – Текст : непосредственный // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87, № 12. – С. 1769–1775 : 6 рис. – Библиогр.: с. 1774–1775 (18 назв.). – ISSN 0044-4642. – Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30684881> (дата обращения: 26.01.2022). – Режим доступа : свободный.

применяться при создании высокочастотных конденсаторов с малой площадью обкладок [3]. Современные интегральные схемы содержат несколько миллиардов транзисторов, поэтому требования к качеству, параметрам и свойствам тонких пленок являются довольно высокими [4].

Нанотехнологии позволяют создавать материалы с характерным линейным размером порядка нанометров, тогда как длина свободного пробега носителей заряда в металлах варьируется в пределах 10–100 nm, а в полупроводниках — в интервале 10–1000 nm [5,6], таким образом, практически реализуется ситуация, когда длина свободного пробега носителей заряда сравнима или больше толщины пленки. Из эксперимента следует, что для пленок серебра, золота, меди наблюдается резкая зависимость электропроводности и оптических характеристик, в частности коэффициента отражения, от толщины пленки при ее увеличении в диапазоне от 5 до 40 nm [7]. Поэтому теоретическое исследование электрических и оптических свойств тонких пленок остается актуальным. Если толщина пленки много больше длины волны де Бройля, которая в типичных металлах составляет величину порядка межатомного расстояния (~ 0.3 nm), а в полупроводниках принимает значение ~ 10 nm [5,6], то квантовыми эффектами в подобных задачах можно пренебречь.

кочастотной электропроводности тонкой металлической пленки, находящейся в поперечном магнитном поле и в продольном переменном электрическом поле. Предполагаем, что толщина пленки меньше глубины скин-слоя, что позволяет пренебречь скин-эффектом. Отметим, что скин-эффект учитывался в работе [11] для случая тонкой цилиндрической проволоки. Будем считать, что электрическое и магнитное поле однородны.

Постановка задачи

Рассмотрим тонкий металлический слой толщины a , находящийся в поперечном магнитном поле напряженности H . К этому слою приложено однородное периодическое во времени электрическое поле напряженности E_0 , параллельное плоскости пленки и меняющееся по закону:

$$E = E_0 \exp(-iat), \quad (1)$$

где ω — частота переменного напряжения, приложенного к слою.

Если толщина пленки много больше длины свободного пробега электронов ($a \gg \lambda$), то для решения данной задачи можно воспользоваться классической электроди-

МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ЭДС В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ МАНГАНИТА

В. А. Ацаркин^{a*}, Б. В. Сорокин^{a,b}

^aИнститут радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук
125009, Москва, Россия

^bМосковский физико-технический институт
141700, Долгопрудный, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 13 марта 2014 г.

На тонких эпитаксиальных пленках редкоземельных манганитов $\text{La}_{0.97}\text{Sr}_{0.03}\text{MnO}_3$ обнаружен и исследован эффект магнитно-резонансной ЭДС (МРЭДС). Эффект состоит в возникновении постоянного напряжения под действием СВЧ-накачки в магнитных полях, соответствующих условиям ферромагнитного резонанса. Сигнал магнитно-резонансной ЭДС включает симметричную и антисимметричную компоненты и меняет свою полярность при переключении внешнего магнитного поля. Исследована температурная зависимость эффекта, в том числе и в окрестности фазового перехода. Полученные экспериментальные данные, включая форму сигнала и его зависимость от ориентации поля, хорошо согласуются с результатами теоретической модели, основанной на механизме анизотропного магнитосопротивления. Показано, что анизотропия магнитосопротивления в исследованном манганите отрицательна и резко ослабевает с приближением к точке Кюри, практически обращаясь в нуль в парамагнитной фазе.

DOI: 10.7868/S004451014090247

1. ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие между спиновыми (магнитными) и зарядовыми (транспортными) свойствами и явлениями — одна из центральных тем современных исследований в физике твердого тела. Среди наиболее значительных достижений в этой области можно отметить открытие и многочисленные применения эффектов гигантского и колоссального магнитосопротивления, разработку наноразмерных устройств для магнитного управления током, возникновение и развитие спинтроники. Свое место в этой обширной области занимают и магнитно-резонансные методы. Впервые влияние магнитно-резонансной накачки на электрические свойства проводящих ферромагнетиков было теоретически предсказано и экспериментально обнаружено еще в 60-х гг. прошлого века [1, 2]. В последние годы интенсивность таких исследований резко возросла в связи с прогрессом нанотехнологии и перспективами спинтроники [3–15].

Данная статья посвящена одному из спин-заря-

довых явлений — возникновению постоянной разности потенциалов под действием СВЧ-облучения в условиях ферромагнитного резонанса (ФМР). В дальнейшем будем называть этот эффект магнитно-резонансной электровысущившей силой (МРЭДС); его также называют микроволновым фотоэффектом, спиновым выпрямлением, спиновым динамо и т. п. Физическая природа МРЭДС в проводящих ферромагнетиках подробно обсуждалась уже в первых работах [1, 2], где были выделены два механизма возникновения эффекта: анизотропное магнитосопротивление и аномальный эффект Холла. Вследствии к ним добавился так называемый обратный спиновый эффект Холла [3], связанный с возникновением спинового тока через границу ферромагнитного и нормального металлов в условиях ФМР («спиновая накачка») [4]. Характерной особенностью всех этих механизмов является смена полярности МРЭДС при переключении направления постоянного магнитного поля. В дальнейшем теоретическое описание этих явлений было модифицировано и приближено к экспериментальным условиям [6, 12], а сам эффект нашел целый ряд применений, от характеристики параметров СВЧ-полей [10]



Ацаркин, В. А. Магнитно-резонансная ЭДС в тонких пленках манганита / В. А. Ацаркин, Б. В. Сорокин. — DOI: 10.7868/S004451014090247. — Текст : непосредственный // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2014. — Т. 146, № 3. — С. 645–650 : 1 таб., 4 рис. — Библиогр.: с. 650 (22 назв.) — ISSN 0044-4510. — Имеется электронная версия: <http://jetp.ras.ru/cgi-bin/r/index/r/146/3/p645?a=list> (дата обращения: 02.02.2022). — Режим доступа : свободный.

АНОМАЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$

Л. С. Успенская^{a*}, И. Н. Хлюстикова^b

^aИнститут физики твердого тела Российской академии наук
142432, Черноголовка, Московская обл., Россия

^bИнститут физических проблем им. П. Л. Капицы Российской академии наук
119334, Москва, Россия

Поступила в редакцию 24 мая 2017 г.

Успенская, Л. С. Аномальная магнитная релаксация в тонких пленках $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ / Л. С. Успенская, И. Н. Хлюстикова. — DOI: 10.7868/S004451017110177. — Текст : непосредственный // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2017. — Т. 152, № 5. — С. 1029–1033 : 4 рис. — Библиогр.: с. 1033 (12 назв.). — ISSN 0044-4510. — Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30521629> (дата обращения: 26.01.2022). — Режим доступа : свободный.

DOI: 10.7868/S004451017110177

Сплавы $\text{Pd}_{1-x}\text{Fe}_x$ принадлежат к классу сплавов переходных металлов, в которых ферромагнетизм появляется за счет усиления локального обмена и магнитного момента у ионов матрицы Pd, локализованных вблизи магнитных ионов Fe [1, 2]. При концентрациях Fe $\sim 0.01\%$ в сплаве PdFe уже появляются ферромагнитные кластеры, а эффективный магнитный момент, приходящийся на один ион железа, достигает величины $12 \mu_B$ [3]. При больших концентрациях Fe, на уровне 1%, сплав становится однородным ферромагнитным материалом [4, 5]. Однако это справедливо лишь для объемного материала. Пленки того же состава, имеющие толщину 90–20 нм, характеризуются нанокластерным ферромагнетизмом [6–8]. При этом, как недавно было показано, свойства пленок с толщинами больше или порядка 40 нм хотя бы качественно совпадают со свойствами объемного материала, в то время как более тонкие пленки, толщиной 20–30 нм, демонстрируют принципиально отличные свойства: изменяются и тип температурной зависимости намагниченности $M(T)$, и вид петли гистерезиса $M(H)$ [6]. В данной работе мы продолжили изучение магнитных

свойств пленок $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$, уделяя особое внимание эффектам магнитного последования, которые значительно усиливаются по мере уменьшения толщины пленок. Мы определили характерные времена релаксации, энергии активации процессов и активационный объем.

Эксперименты проводились на пленках $\text{Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}$ толщиной 25 нм и 40 нм, площадью $1 \times 6 \text{ мм}^2$, изготовленных стандартным методом: осаждение при комнатной температуре на подложку из оксидированного кремния методом ионно-плазменного ВЧ-распыления мишени того же состава. Базовый вакуум составлял $2 \cdot 10^{-6}$ мбар, давление аргона при распылении составляло $1.5 \cdot 10^{-2}$ мбар, напряжение смещения 1 кВ, скорость осаждения — 2 \AA/с . Предварительно проводилась ионная очистка подложки при давлении аргона $1.5 \cdot 10^{-2}$ мбар в течение 60 с при напряжении смещения 1 кВ и 120 с при напряжении смещения 600 В. Это позволило обеспечить хорошую адгезию пленки PdFe, а также обезгаживание подложки и столика подложкодержателя. Магнитные измерения выполнялись на СКВИД-магнитометре с временным разрешением 40 мс [9]. Регистрировались зависимости $M(H)|_T$, $M(T)|_H$ и $M(t)|_{T,H}$. Здесь M , H , T и t — магнитный момент образца, приложенное внешнее магнитное поле, температура и время. Температура

* E-mail: uspenskaya@issp.ac.ru

ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В КОМПОЗИТНЫХ ПЛЕНКАХ МЕТАЛЛ–ДИЭЛЕКТРИК И МЕТАЛЛ–УГЛЕРОД

© 2020 г. Л. Н. Котов¹, М. П. Ласёк^{1, *}, В. К. Турков¹, Д. М. Холопов¹, В. С. Власов¹, Ю. Е. Калинин², А. В. Ситников²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина», Сыктывкар, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

*E-mail: mplasek@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.04.2020 г.

После доработки 29.04.2020 г.

Принята к публикации 27.05.2020 г.

Приведены результаты исследований магнитно-резонансных свойств композитных пленок состава металл–диэлектрик (CoFeB + SiO₂) и металл–углерод (CoFeB + C). Проанализировано влияние концентраций магнитной металлической, диэлектрической и углеродной фаз композитных пленок на характеристики ферромагнитного резонанса.

DOI: 10.31857/S0367676520090215

Исследования магнитных нанокompозитных материалов ведутся уже несколько десятилетий [1–4], но до сих пор многие их свойства еще недостаточно изучены. Это обстоятельство связано со сложной структурой таких материалов и большим разнообразием их неоднородных структур, в зависимости от состава [5–7]. Наноструктурированные композитные пленки также обладают такими необычными свойствами, как гигантское магнетосопротивление, аномальный эффект Холла и др. [3–9]. Особое место занимает углерод в качестве одной из фаз пленок, который может значительно изменять как проводящие, так и релаксационные свойства композитов. Это обстоятельство хотя и усложняет, но в тоже время и обогащает исследование СВЧ магнитных характеристик пленок.

Работа посвящена выявлению особенностей магнитных свойств композитных пленок (металл–диэлектрик) с составами: ((Co_{0.44}Fe_{0.36}B_{0.2})_x + (SiO₂)_{(1-x)/3}), 0.22 < x < 0.62; и (металл–углерод) ((Co_{0.2}Fe_{0.2}B_{0.6})_x + (C)_(1-x)), 0.28 < x < 0.57. Проводится сравнение СВЧ магнитных свойств пленок и выяснение влияния углерода как дополнительной фазы пленок на эти свойства.

Напыление пленок осуществлялось на стеклянные подложки методом ионной бомбардировки смешанной плазмой элементов Co, Fe, B и

определялись с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3. Толщины композитных пленок составляли: металл–диэлектрик – 0.20–0.40 мкм и металл–углерод – 0.05–0.20 мкм. Характеристики (полуширина линии и резонансные поля) ферромагнитного резонанса (ФМР) пленок определялись с помощью радиоспектрометра РЭ-1306 на частоте поля $f = 9.36$ ГГц при комнатной температуре. Внешнее магнитное поле было направлено касательно к плоскости пленки. Переменное магнитное поле было направлено параллельно плоскости пленки и перпендикулярно постоянному полю.

На рис. 1 показаны спектры производной поглощаемой мощности P композитных пленок двух серий. Как известно, спектры производных dP/dH одного пика поглощения (линии ФМР гауссовой формы) состоят из максимума и минимума. Для пленок металл–диэлектрик ((Co_{0.44}Fe_{0.36}B_{0.2})_x + (SiO₂)_{(1-x)/3}) наблюдается один пик поглощения сигнала в области ФМР. Для пленок металл–углерод ((Co_{0.2}Fe_{0.2}B_{0.6})_x + (C)_(1-x)) наблюдаются два пика поглощения сигнала в области ФМР при средних концентрациях металла (0.34 < x < 0.54). Такое поведение сигнала ФМР для пленок с углеродом может быть связано с наличием более одной магнитной фазы разной намагнитченности насы-

Ферромагнитный резонанс в композитных пленках металл–диэлектрик и металл–углерод / Л. Н. Котов, М. П. Ласёк, В. К. Турков [и др.]. – DOI: 10.31857/S0367676520090215. – Текст : непосредственный // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2020. – Т. 84, № 9. – С. 1255-1257 : 3 рис. – Библиогр.: с. 1257 (9 назв.). – ISSN 0367-6765. – Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43832602> (дата обращения: 02.02.2022). – Режим доступа : свободный.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ТОНКИХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ

© 2020 г. О. С. Баруздина^{1,2}, О. Г. Максимова^{1, *}, А. В. Максимов¹, В. И. Егоров¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Череповецкий государственный университет», Череповец, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия

*E-mail: og62@mail.ru

Поступила в редакцию 10.04.2020 г.

После доработки 29.04.2020 г.

Принята к публикации 27.05.2020 г.

Для исследования процессов переключения в тонких сегнетоэлектрических пленках использована модифицированная трехмерная модель Изинга, в которой учтена роль деполаризующего поля. Исследовано влияние толщины пленки и деполаризующего поля на величину коэрцитивного поля и форму кривой диэлектрического гистерезиса.

DOI: 10.31857/S0367676520090070

Моделирование переключения в тонких сегнетоэлектрических пленках / О. С. Баруздина, О. Г. Максимова, А. В. Максимов, В. И. Егоров. – DOI: 10.31857/S0367676520090070. – Текст : непосредственный // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2020. – Т. 84, № 9. – С. 1265-1268 : 3 рис. – Библиогр.: с. 1268 (15 назв.). – ISSN 0367-6765. – Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43832605> (дата обращения: 02.02.2022). – Режим доступа : свободный.

ских и экспериментальных исследований зависимости поляризации от напряженности внешнего электрического поля $P(E)$ в сегнетоэлектрических тонких пленках сосредоточены на изучении: нарушения динамической симметрии [3, 4], изменения площади петли гистерезиса при изменении толщины пленки [5], наличия внутреннего поля смещения [6]. Экспериментальные исследования показывают, что точка фазового перехода при уменьшении толщины пленки может сдвигаться как в сторону высоких [7], так и низких температур [8]. В [8] показано, что в некоторых достаточно тонких пленках спонтанная поляризация не наблюдается, т.е. существует критическое значение толщины.

Использование при моделировании «закрепленных» или «свободных» граничных условий в модели Изинга позволяет подтвердить смещение точки Кири к высоким, или низким температурам соответственно. Однако, при моделировании поляризации сегнетоэлектрических тонких пленок без учета деполаризующего поля критической толщины обнаружить не удается. Эту проблему решает учет в модели деполаризующего поля, которое ока-

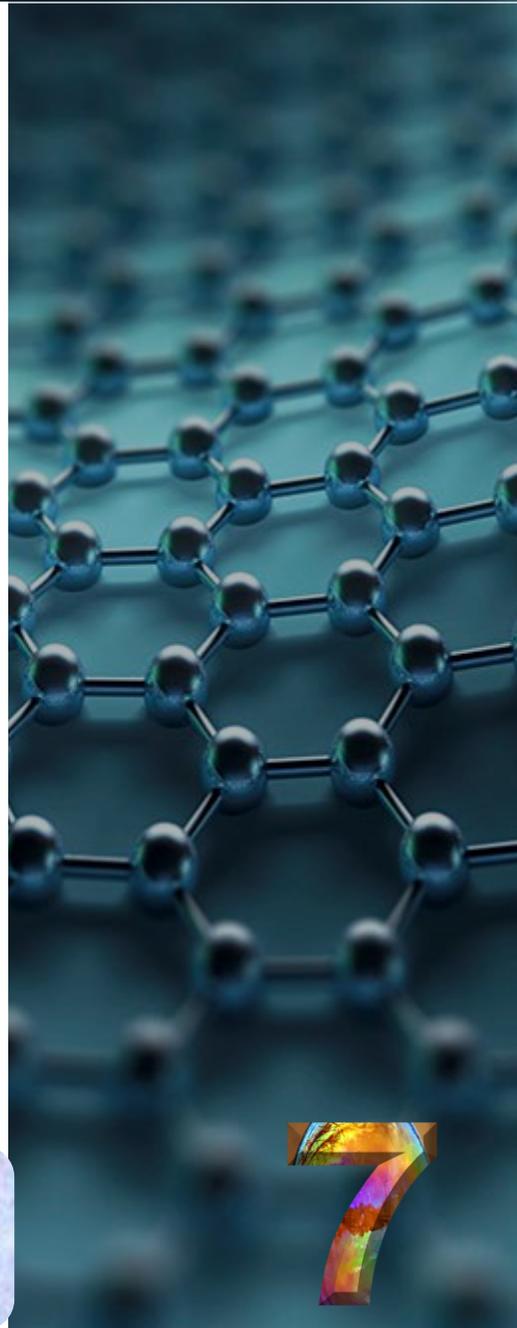
жет влияние толщины пленки на переключение тонких сегнетоэлектрических пленок.

Для изучения переключаемых характеристик тонких сегнетоэлектрических пленок и описания их свойств мы используем трехмерную модель Изинга [10, 11], состоящую из N_1 , N_2 и N_3 узлов вдоль соответствующих осей декартовой системы координат. Предполагалось, что в поперечном сечении толщиной пленки L содержится N_3 элементарных ячеек. Положение узла решетки характеризуется набором трех чисел $\vec{n} = (n_1, n_2, n_3)$ (рис. 1а, 1б).

В данной работе потенциальная энергия одного диполя, расположенного в узле n , описывается следующей формулой [9]:

$$U_n = -J \sum_m S_n S_m - p E S_n - p S_n E_d, \quad (1)$$

где величина S_n может принимать два значения +1 и -1, J – энергетическая константа, p – дипольный момент, E_d – напряженность деполаризующего поля. Суммирование производится по ближайшим соседям.



06

Особенности локализации света неоднородной пленкой

© В.И. Иванов-Омский¹, И.Е. Истомин^{1,†}, М. Singh², С.Г. Ястребов¹¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия² Western University, London, Ontario, Canada[†] E-mail: kasha22ist@gmail.com

Поступило в Редакцию 22 марта 2021 г.

В окончательной редакции 10 апреля 2021 г.

Принято к публикации 11 апреля 2021 г.

Рассмотрен случай удержания света в тонкой неоднородной пленке аморфного углерода, легированного медью. Эффект проявляется из-за рассеяния света наночастицами меди, введенными в пленку. Локализация объясняет усиление „двухфононных“ линий поглощения инфракрасного излучения наноразмерными алмазами, одновременно присутствующими в пленке.

Ключевые слова: метаматериалы, наночастицы, локализация света в волноводе, усиление поглощения.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.14.51180.18778

В последнее время возрос интерес к так называемым метаматериалам, т.е. к любым материалам, спроектированным таким образом, чтобы они имели некое свойство или набор свойств, которые не встречаются в материалах природного происхождения [1].

В качестве примера можно привести аморфный углерод, модифицированный металлами [2]. Такой материал получается методом совместного магнетронного распыления графитовой и металлической мишеней. Некоторые образцы поглощают радиоволны и поэтому могут быть использованы в качестве электромагнитных экранов. Эффект поглощения радиоволн был объяснен нами сравнительно недавно [2].

Другим интересным эффектом является аномальное увеличение интенсивности некоторых весьма слабых полос поглощения в инфракрасной (ИК) области спектра. Так, например, нами наблюдалось явление гигантского увеличения двухфононных полос поглощения наночастиц алмаза, присутствующих по нашим данным в этом материале как в исходном состоянии, так и при модификации его медью [3–6]. В работах [4,6] нами используются качественные модели, способные описать данное явление.

В настоящей работе мы объясним возможную причину такого увеличения эффектами локализации-делокализации света в тонкой пленке синтезированного материала. Эта пленка представляет собой планарный волновод. Эффект захвата в волноводе проявляется с помощью рассеяния света на наночастице (рис. 1). Из рисунка видно, что делокализация света, приводящая к его выводу из волновода, также может происходить благодаря механизму рассеяния на нанокластере. Очевидно, что эффект локализации приводит к значительному увеличению оптического пути. За рассеяние света могут быть ответственны кожные нанокластеры

содержит наноразмерные кластеры алмаза диаметром порядка 1 нм [9], которые практически не рассеивают свет. Форма наночастиц меди близка к сферической, поскольку для таких образцов наблюдается резонанс Фрелиха с энергией порядка 2 эВ [7,8]. Если для оценки воспользоваться формулой Бутера $I = I_0 \exp(-h\alpha)$, то при толщине пленки примерно $h = 1 \mu\text{m}$ в случае однократного прохождения света имеем пренебрежимо малое изменение интенсивности на выходе из образца I по сравнению с падающим на него излучением I_0 , если, как в случае массивного алмаза, коэффициент поглощения в области частот с волновыми числами $2000\text{--}2200 \text{ cm}^{-1}$ принять равным $\alpha = 14 \text{ cm}^{-1}$ [10]. Однако в случае локализации света в волноводе при значительном расстоянии между наночастицами меди на входе и выходе света происходит заметное увеличение оптического пути (рис. 1).

Заметим, что из указанного выше следует, что в ИК-области $\sim 2000 \text{ cm}^{-1}$ задачу об эффективной диэлектрической функции пленки ξ_{eff} можно свести к задаче о смеси диэлектрических проницаемостей двух фаз, т.е. в рамках простой модели суммы двух компонент запишем

$$\xi_{eff} = \Theta \xi_m + (1 - \Theta) \xi_d. \quad (1)$$

Здесь Θ — объемная доля вклада матрицы, ξ_m — диэлектрическая проницаемость матрицы, ξ_d — диэлектрическая проницаемость алмаза. В рассматриваемом спектральном диапазоне минимальная часть ξ_m равна нулю, ξ_{1m} оценивалась по данным работы [7] и принималась равной 4. Точное значение Θ неизвестно. Однако если исходить из анализа электронно-микроскопических изображений алмазов в аморфном углероде, полученных с помощью просвечивающего электронного микроскопа в работе [9], можно принять для оценки, что нанокластеры занимают не менее 60 vol.% объема. Таким образом, для

Особенности локализации света неоднородной пленкой / В. И. Иванов-Омский, И. Е. Истомин, М. Singh, С. Г. Ястребов. – DOI: 10.21883/PJTF.2021.14.51180.18778. – Текст : непосредственный // Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47, № 14. – С. 14-17 : 3 рис. – Библиогр.: с. 17 (14 назв.). – ISSN 0320-0116. – Имеется электронная версия: <https://journals.ioffe.ru/articles/51180> (дата обращения: 27.01.2022). – Режим доступа : свободный.

022;05;06;13.1;13.3

Формирование наноразмерных пленок золота в условиях многократного автооблучения при ионно-лучевом осаждении

© С.А. Шарко¹, А.И. Серокурова¹, Н.Н. Новицкий¹, А.И. Стогний¹, В.А. Кецко²¹ НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь² Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

E-mail: sharko@physics.by

Поступило в Редакцию 21 июня 2021 г.

В окончательной редакции 22 сентября 2021 г.

Принято к публикации 23 сентября 2021 г.

Методом ионно-лучевого осаждения-распыления впервые получены однородные пленки золота толщиной несколько десятков нанометров на кремниевых и кварцевых подложках. Показано, что в условиях воздействия высокоэнергетической составляющей потока расплывших атомов происходит преимущественный латеральный рост наноразмерных слоев металла вдоль поверхности подложки. Решающую роль в формировании нанометровой пленки золота играют процессы упругого столкновения расплывших атомов металла с атомами подложки и растущей пленки. Применение операции многократного осаждения-распыления позволяет подавить процесс транулирования и получить пленки золота с лучшими характеристиками, чем при однократном осаждении.

Ключевые слова: ионно-лучевое осаждение-распыление, наноразмерная пленка золота, электрическое сопротивление, шероховатость поверхности, автооблучение.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.01.51875.18930

Формирование наноразмерных плёнок золота в условиях многократного автооблучения при ионно-лучевом осаждении / С. А. Шарко, А. И. Серокурова, Н. Н. Новицкий [и др.]. – DOI: 10.21883/PJTF.2022.01.51875.18930. – Текст : непосредственный // Письма в Журнал технической физики. – 2022. – Т. 48, № 1. – С. 27-30 : 11 рис. – Библиогр.: с. 30 (17 назв.). – ISSN 0320-0116. – Имеется электронная версия: <https://journals.ioffe.ru/articles/51875> (дата обращения: 10.03.2022). – Режим доступа : свободный.

с пленки задает практический характер возможности эффективного управления светом путем воздействия на оптические свойства среды внешними магнитными полями ограничивается малостью величин магнитооптических эффектов [1]. Одним из путей их повышения является использование материалов, в которых требуемые оптические характеристики достигаются благодаря подбору геометрических параметров структуры, а не химического состава. В частности, создание периодических структур в виде металлических решеток на диэлектрической подложке [1] позволяет локализовать энергию электромагнитного поля на интерфейсе металла/диэлектрик за счет возбуждения поверхностных электромагнитных волн (поверхностных плазмон-поляритонов) и, как следствие, усилить взаимодействие света с веществом. При этом наиболее интенсивное возбуждение плазмон-поляритонов наблюдается при использовании наноразмерных пленок благородных металлов, в частности золота [1–3]. Однако для формирования структур магнитоопластики [1,3–5] нужны ультратонкие пленки с большой степенью однородности.

Существует большое количество работ [6–8], в которых синтезировались пленки золота толщиной десятисотни нанометров различными методами [6], такими

связано с химической инертностью золота к материалам иной природы, что обуславливает преимущественное взаимодействие атомов золота друг с другом, а не с атомами подложки [6].

Целью настоящей работы является синтез сплошных однородных пленок золота толщиной несколько десятков нанометров на кремниевых и кварцевых подложках методом вакуумного осаждения при ионно-лучевом распылении [2,9].

Перед осаждением слоя золота проводилась очистка кремниевых и кварцевых подложек от посторонних ионов кислорода с энергией менее 0.3 кэВ и плотностью тока ионного пучка 0.1–0.15 мА/см². Осаждение осуществлялось с помощью установки двойного ионно-лучевого осаждения-распыления с широкоапертурным источником ионов [10]. Нанесение слоя золота на предварительно подготовленную подложку производилось распылением мишени золота ионами аргона с энергией 1–1.3 кэВ и плотностью тока ионного пучка 0.1–0.25 мА/см². Рабочее давление во время осаждения пленки не превышало 10⁻² Па, остаточное давление в рабочей камере составляло 10⁻³ Па. Для отработки до требуемого уровня вакуума использовался масляный

Наноструктурированный графен на β -SiC/Si(001): атомная и электронная структура, магнитные и транспортные свойства (Миниобзор)

В. Ю. Аристов⁺¹, А. Н. Чайка⁺¹, О. В. Молодцова*, И. М. Аристова⁺, Д. В. Поторочин*

⁺Институт физики твердого тела РАН, 142432 Черноголовка, Россия

* Университет ИТМО, 197101 С.-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 18 декабря 2020 г.

После переработки 18 декабря 2020 г.

Принята к публикации 28 декабря 2020 г.

В обзоре представлены результаты исследований, выполненных в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований # 17-02-01139. Изучены свойства графена, синтезированного на поверхности эпитаксиальных пленок монокристаллического кубического карбида кремния, предварительно выращенных на пластинах Si(001). Полученные результаты демонстрируют, что слои графена, синтезированные на подложках β -SiC/Si(001), имеют атомную структуру и электронные свойства свободно висшнего однослойного графена. На видяльных подложках SiC(001) могут быть синтезированы непрерывные слои графена с одним предпочтительным направлением границ нанодоменов, которое определяется ориентацией ступеней на исходной поверхности. Проявлена возможность контролируемого роста одно-, двух- и трехслойного графена на пластинах β -SiC/Si(001). Проведенные исследования показали открытие транспортной щели и большое положительное магнетосопротивление в параллельном магнитном поле в упорядоченной системе нанополос графена на видяльной поверхности SiC(001). Показано, что функционализация графена органическими соединениями приводит к изменению электронных свойств графена на SiC(001), превращая его в полупроводник с заданными свойствами, что открывает возможности для применений в современной микро- и наноэлектронике.

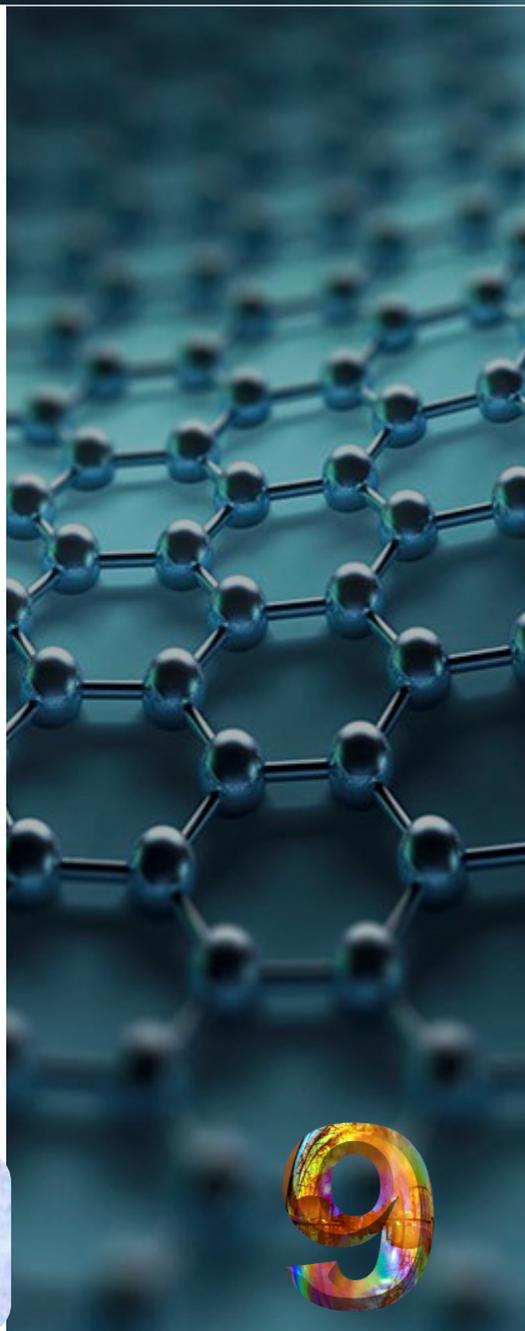
DOI: 10.31857/S1234567821030083

Введение. Графен – один слой атомов углерода, связанных между собой sp^2 -орбиталями и образующих двумерную (2D) гексагональную решетку. Термин “графен” может применяться, строго говоря, только к “свободно висшнему” монослою атомов углерода. Тем не менее, этот термин часто применяется в литературе для нескольких слоев графена, или даже ультратонких графитовых мультислоев, уложенных в определенном порядке. Электронные свойства графена, связанные с симметрией его двумерной кристаллической решетки, были теоретически изучены несколько десятилетий назад [1]. Тем не менее, интерес к графену резко вырос в 2000-е гг. после успешного практического извлечения ультратонких слоев из широлитического графита [2]. С 2004 года было опубликовано много работ, демонстрирующих уникальные физические свойства графена, квантово-размерные эффекты, наблюдаемые в эксперименте даже при комнатной температуре, а также возмож-

ностатчиков, прозрачных электрических контактов и ячеек памяти. Благодаря своим уникальным механическим и электронным транспортным свойствам графен можно рассматривать в качестве альтернативы кремнию в электронных технологиях. Графен может быть особенно перспективным для создания приборов, работающих в условиях высоких температур и высоких частот, требующих повышенной устойчивости кристаллической решетки и чрезвычайно высокой подвижности электронов, которыми обладают ультратонкие графитовые пленки. Уникальные свойства графена могут быть использованы для разработки приборов спинтроники, квантовых компьютеров, террагерцовых источников и др. Однако для успешного применения в электронных устройствах слои графена должны быть синтезированы на полупроводниковых или изолирующих подложках.

Графитизация поверхности карбида кремния [3–5] позволяет выращивать слои графена на

Наноструктурированный графен на β -SiC/Si(001): атомная и электронная структура, магнитные и транспортные свойства (Миниобзор) / В. Ю. Аристов, А. Н. Чайка, О. В. Молодцова [и др.]. – DOI: 10.31857/S1234567821030083. – Текст : непосредственный // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 113, № 3. – С. 189–209 : 13 рис. – Библиогр.: с. 207–209 (66 назв.). – ISSN 0370-274X. – Имеется электронная версия: http://jetpletters.ru/ps/2314/article_34460.shtml (дата обращения: 26.01.2022). – Режим доступа : свободный.



Магнитно-электронная неустойчивость графена на ферромагнитной подложке

Д. Н. Дресвянкин⁺, А. В. Рожков^{*1}, А. О. Сбойчаков*

⁺Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ), 141701 Долгопрудный, Россия

*Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, 125412 Москва, Россия

Поступила в редакцию 11 ноября 2021 г.

После переработки 11 ноября 2021 г.

Принята к публикации 11 ноября 2021 г.

В данной работе теоретически исследуется графен на ферромагнитной подложке. Нами показано, что при низких температурах такая система обладает неустойчивым электронным состоянием. А именно, при определенных условиях идеальная однородная ферромагнитная поляризация нарушается спонтанно возникающим подкосом. Повышение подкоса в подложке приводит к открытию диэлектрической щели в одноэлектронном спектре графена. В статье проводится расчет этой щели, а также обсуждаются условия наблюдения неустойчивости на эксперименте.

DOI: 10.31857/S1234567821240071

1. Введение. Графен – двумерная углеродная структура с гексагональной решеткой. Огромный интерес к этому материалу вызван необычными физическими свойствами, например, крайне высокой подвижностью носителей заряда. Подобных систем проводились и численными методами [6, 7]. Многообразие научных тем, поднятых в этих и близких [3, 8–11] работах, свидетельствует о том, что графен, находящийся в контакте с ферромагнитной подложкой, представляет собой интересную систему. Д. Н. Дресвянкин, А. В. Рожков, А. О. Сбойчаков. – DOI: 10.31857/S1234567821240071. – Текст : непосредственный // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 114, № 12. – С. 824–832 : рис. 3. – Библиогр.: с. 831–832 (34 назв.). – ISSN 0370-274X. – Имеется электронная версия: http://jetpletters.ru/ps/2360/article_34980.shtml (дата обращения: 02.02.2022). – Режим доступа : свободный.

турным элементом которых является графен [3, 4].

Одним из перспективных способов управления спиновыми свойствами графена является помещение графенового образца на магнитную подложку. Например, в экспериментальной работе [5] авторы сообщают о создании гетероструктуры, состоящей из графена на ферромагнитном субстрате EuS. В такой ситуации, из-за магнитного эффекта близости, электронные зоны графена утрачивают спиновую вырожденность, что сопровождается возникновением ферромагнитной поляризации электронной жидкости. Авторы данной работы предполагают, что в гетероструктуре подобного типа эффективное зеемановское обменное поле для электронов в графене может быть доведено до сотен тесла. Исследования

возникновение упорядоченных электронных состояний в графене в параллельном магнитном поле было рассмотрено в работе [12]. Большой объем литературы был посвящен изучению спонтанного упорядочения в однослойном графене под действием сильного межэлектронного кулоновского отталкивания [13–20]. Неустойчивости двухслойных систем (как с АВ упаковкой, так и с АА упаковкой) также активно обсуждались [21–30].

В отличие от упомянутых неустойчивостей, механизм утраты стабильности, рассматриваемый нами в данной работе, не является чисто электронным. Он предполагает своего рода кооперацию между электронной и магнитной подсистемами. А именно, мы покажем, что возникновение подкашивающей деформации идеального ферромагнитного упорядочения в подложке приводит к понижению энер-

¹е-mail: arozhkev@gmail.com

Латеральные 2D-1D-2D структуры графен-УНТ-графен: Теоретическое исследование электронных и транспортных свойств

Б. Ю. Валеев^{1*}, А. Н. Токсумаков⁺, Д. Г. Квашиин⁺, Л. А. Чернозатонский^{1*}

⁺Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701 Долгопрудный, Россия

¹Институт биохимической физики им. Н. М. Эмануэля РАН, 119334 Москва, Россия

^{*}Школа химии и технологии полимерных материалов, Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова, 117997 Москва, Россия

Поступила в редакцию 15 ноября 2021 г.

После переработки 25 ноября 2021 г.

Принята к публикации 25 ноября 2021 г.

В работе проведено теоретическое исследование электронных и транспортных свойств новых гибридных 2D-1D-2D структур из атомов углерода, представляющих собой непрерывное соединение графеновых листов через фрагмент однослойной углеродной нанотрубки, неоднократно наблюдаемое экспериментально. С помощью метода сильной связи в рамках теории функционала электронной плотности была изучена эволюция электронных свойств таких систем с “зигзагообразными” углеродными нанотрубками различного диаметра с индексами хиральности: (14, 0), (15, 0), (16, 0) и (18, 0). На основе расчета коэффициента прохождения была показана сильная нелинейность в поведении транспортных свойств этих структур вблизи энергии Ферми в зависимости от диаметра УНТ, что объясняет расхождения в ранее полученных на них экспериментальных данных.

DOI: 10.31857/S1234567822020069

Латеральные 2D-1D-2D структуры графен-УНТ-графен: Теоретическое исследование электронных и транспортных свойств / Б. Ю. Валеев, А. Н. Токсумаков, Д. Г. Квашиин, Л. А. Чернозатонский. – DOI: 10.31857/S1234567822020069. – Текст : непосредственный // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2022. – Т. 115, № 2. – С. 103-107 : 3 рис. – Библиогр.: с. 107 (29 назв.). – ISSN 0370-274X. – Имеется электронная версия: http://jetpletters.ru/ps/2362/article_34997.shtml (дата обращения: 16.03.2022). – Режим доступа : свободный.

де материала [2]. В частности, нанотрубки являются наименьшими по диаметру из возможных систем, которые могут быть использованы для эффективного транспорта электронов, и поэтому имеют решающее значение для функционирования наноразмерных устройств.

Из-за трудностей использования графена в качестве элемента полупроводниковой электроники, связанных с полуметаллической зонной структурой графена, были предложены возможные пути создания запрещенной зоны в графено-образных структурах с сохранением в них высокой подвижности носителей зарядов. Среди наиболее успешных можно выделить следующие: функционализация графенов (их гидрирование [3], фторирование [4], окисление [5]), изготовление графеновых нанолент с использованием метода электронной литографии [6]). Отдельно

родные сетки с определенными индексами хиральности, что позволяет использовать их в качестве фильтров для прохождения электронов с определенной энергией. Таким образом синтез и создание латеральных устройств на основе графена-УНТ структур могут стать одним из перспективных направлений развития посткремниевой квази-двумерной электроники за счет возможности изготовления структуры, целиком состоящей из углерода.

Стоит отметить, что недавние успешные эксперименты по изготовлению графеновых наноканалов методом лазерной абляции [7, 8] открывают новый подход к формированию гибридных структур на основе графена, представляющих интерес для “плоской” нанoeлектроники. Измерения электрических свойств полученных наноканалов показывают нелинейное поведение вольтамперных характеристик (ВАХ), когда сопротивление превышает 20 кОм, что указывает на присутствие эффектов туннелирования [9]. Кроме



Структура магнитных неоднородностей в пленках с топологическими особенностями

Е. Б. Магадеев, Р. М. Вахитов¹

Башкирский государственный университет, 450076 Уфа, Россия

Поступила в редакцию 24 ноября 2021 г.

После переработки 1 декабря 2021 г.

Принята к публикации 2 декабря 2021 г.

В работе рассматриваются магнитные пленки с одноосной анизотропией типа “легкая плоскость”. Установлено, что при наличии в таких пленках структурных дефектов, представляющих собой искусственно созданные отверстия или немагнитные включения, на них могут образовываться вихреподобные неоднородности, имеющие топологический заряд. Рассмотрена их устойчивость и показано, в каких случаях (в зависимости от величины и направления токов, числа отверстий и т.д.) они образуют стабильные конфигурации, пригодные для кодирования информации.

DOI: 10.31857/S1234567822020100

Введение. В настоящее время ведутся активные исследования структуры и свойств вихреподобных неоднородностей (магнитных вихрей, скирмионов, бимеронов и т.д.), возникающих в некоторых классах магнетиков, что связано с реальными перспективами их использования в различных устройствах спинтроники, а также магнитной памяти нового поколения [1]. Такой интерес обусловлен их топологической защищенностью, наноразмерами, высокой подвижностью и другими уникальными спин-электронными свойствами [2–4]. В данной работе, в продолжение идей, изложенных и рассмотренных в [5] на примере простейшей одномерной модели, предлагается еще один тип вихреподобных неоднородностей, образующихся в тонких магнитных пленках с искусственно созданными отверстиями (антидотами [6]) или немагнитными включениями.

1. Континуальная модель. Пусть материал тонкой пленки с одним отверстием представляет собой ферромагнетик с сильной одноосной анизотропией типа “легкая плоскость”, благодаря чему вектор намагниченности почти не выходит из плоскости пленки. Тогда энергия магнетика может быть приближенно представлена в следующем виде [5]:

$$E = \int A(\nabla\theta)^2 h dS, \quad (1)$$

где угол θ задает ориентацию вектора намагниченности на плоскости, A – обменный параметр, h – тол-

щинающие поля в рассматриваемом материале значительно меньше обменного взаимодействия.

В случае пленки без топологических особенностей функционал (1) имеет единственный минимум $E = 0$, достигаемый при $\theta = \text{const}$, что соответствует однородному распределению намагниченности. Однако при наличии даже одного отверстия в пленке (осуществимость таких наноразмерных перфораций на практике подтверждается аналогичными экспериментами с графеном [7]) это утверждение становится неверным. Введем на плоскости полярную систему координат (r, φ) и примем, что магнетик заполняет область $R_{\text{in}} \leq r \leq R_{\text{ex}}$, имея тем самым форму проколотого диска. В этом случае, кроме однородного состояния, появятся также локальные минимумы, представляющие собой нетривиальные решения уравнения Эйлера-Лагранжа для функционала (1), а именно – уравнения Лапласа $\Delta\theta = 0$. Дело в том, что при указанной топологии образца угол θ может уже и не быть однозначной функцией радиус-вектора. Вместо этого достаточно выполнения физического эквивалентного условия $\theta(r, \varphi + 2\pi) = \theta(r, \varphi) + 2\pi k$, где k – целое число. Несложно видеть, что при заданном значении k , которое в данном случае имеет смысл топологического заряда, решением уравнения $\Delta\theta = 0$ является $\theta(r, \varphi) = k\varphi + \text{const}$. Заметим, что решения, отвечающие разным значениям k , топологически неэквивалентны, и переходы магнетика между соответствующими состояниями были бы сопряжены с появлением разрывов в функ-

Магадеев, Е. Б. Структура магнитных неоднородностей в пленках с топологическими особенностями. – DOI: 10.31857/S1234567822020100. – Текст : непосредственный / Е. Б. Магадеев, Р. М. Вахитов // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2022. – Т. 115, № 2. – С. 123-128 : 5 рис. – Библиогр.: с. 127-128 (8 назв.). – ISSN 0370-274X. – Имеется электронная версия: http://jetpletters.ru/ps/2362/article_35001.shtml (дата обращения: 10.03.2022). – Режим доступа : свободный.

¹e-mail: bulat_valsev@phystech.edu

Новые наноструктуры на основе графена: физико-химические свойства и приложения

Л.А.Чернозатонский,^a П.Б.Сорокин,^{a,b} А.А.Артох^a^a Институт биохимической физики им. Н.М.Эмануэля Российской академии наук
Россия, 119334 Москва, ул. Косыгина, 4^b Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов
Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Центральная, 7а

Рассмотрены физико-химические свойства наноструктур на основе графена — графеновых лент нанометровой ширины, структур с адсорбированными атомами водорода и фтора, чисто углеродные композиты — и химико-технологические методы их получения. Обсуждены подходы к решению задач, стоящих перед современной нанотехнологией. Рассмотрены возможные приложения графена и наноструктур на его основе в различных устройствах.

Библиография — 286 ссылок.

Оглавление

I. Введение	251
II. Графеновые нанопленки	254
III. Функционализированный графен	258
IV. Углеродные композиты, включающие графен	268
V. Заключение	274

Чернозатонский, Л. А. Новые наноструктуры на основе графена: физико-химические свойства и приложения / Л. А. Чернозатонский, П. Б. Сорокин, А. А. Артох. — Текст : непосредственный // Успехи химии. — 2014. — Т. 83, № 3. — С. 251-279 : 1 таб., 29 рис. — Библиогр.: с. 275-279 (286 назв.). — ISSN 0042-1308 ; ISSN 1817-5651. — Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21215787> (дата обращения: 16.03.2022). — Режим доступа : свободный.

одного атомарного слоя графита и имеет в своей основе сетку sp²-гибризованных атомов углерода. Модель учета только π-электронов ближайших соседних атомов (приближение сильной связи (ПСС)), использованная в первой работе по графену¹, дает правильное описание его основных элект-

Л.А.Чернозатонский (L.A.Chernozatonskiy). Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ИБХФ РАН. Телефон: (49 5) 939-71 72, e-mail: chernoz@sky.dph.ras.ru

П.Б.Сорокин (P.B.Sorokin). Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Технологического института сверхтвердых и новых углеродных материалов. Телефон: (49 5) 272-23 14, e-mail: PBSorokin@gmail.com

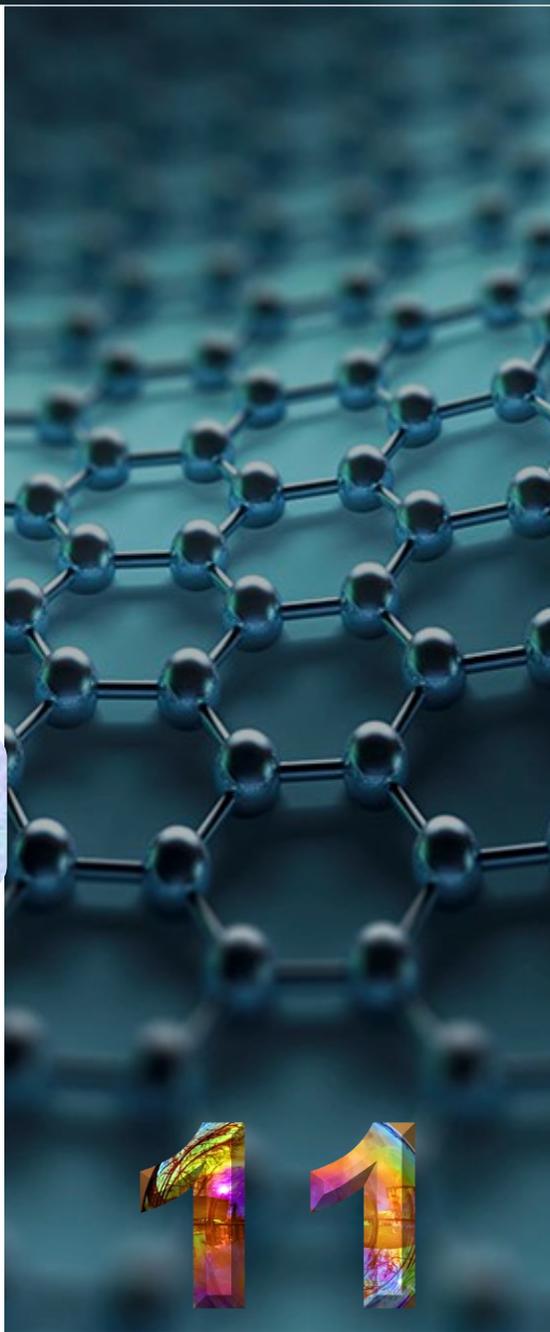
А.А.Артох (A.A.Artyukh). Аспирант ИБХФ РАН. Телефон: (49 5) 939-71 72, e-mail: anastasiya2000@gmail.ru

Область научных интересов авторов: физико-конденсированного состояния вещества, наноматериалы, компьютерное моделирование.

Дата поступления 29 декабря 2012 г.

ний группы ученых, в состав которой входили лауреаты Нобелевской премии по физике за 2010 г. А.К.Гейм и К.С.Новоселов, квазидвумерных (2D) материалов (к ним принадлежит графен) соотношение о получении пленок толщиной от нескольких десятков^{4–6} до нескольких единиц⁷ графеновых монослоев. Однако исследователями этой группы не только был получен отдельный монослой графена, но и обнаружены, а также подробно изучены его физические и химические свойства.⁸ Предыстория графена достаточно полно изложена в статье⁹.

Получение графена открыло новую область химии — химию 2D-материалов, которая включает, в частности, и исследование функционализированного графена (с присоединенными функциональными группами),¹⁰ интересное для приложений в электронике, оптике, создании композитных материалов¹¹ и катализаторов.¹² По синтезу моно- и многослойных графеновых структур,^{13,14} а также их модифицированных вариантов опубликовано около десяти обзоров (см., например, работу¹⁵ и приведенную в ней библиографию). В одной из последних публикаций¹⁶ обобщены сведения по способам модифицирования углеродных материалов



Графен: химические подходы к синтезу и модифицированию

Е.Д.Грайфер, В.Г.Макогаченко, А.С.Назаров, С.-Дж.Ким, В.Е.Федоров

Учреждение Российской академии наук

Институт неорганической химии им. А.В.Николаева Сибирского отделения РАН

630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 3, факс (383) 330-9489

Женский университет Ихва

120750 Сеул, Республика Корея, факс +82(2)3277-3419

Систематизированы литературные данные о новом углеродном наноматериале — графене — с точки зрения химии. Большое внимание уделено химическим методам синтеза графеноподобных материалов из различных предшественников — природного и расширенного графита, оксида графита, интеркалированных соединений графита и др. Рассмотрены подходы к химическому модифицированию графеновой плоскости с помощью различных реагентов и пути получения коллоидных дисперсий графена.

Библиография — 220 ссылок.

Оглавление

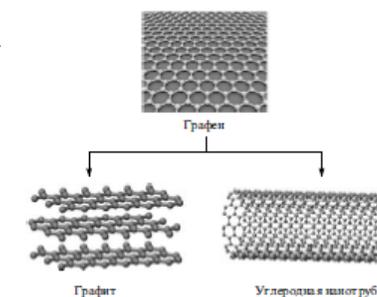
I. Введение	784
II. Получение графена из различных предшественников	786
III. Химическое модифицирование графена	794
IV. Заключение	801

I. Введение

Графен представляет собой единичную графитовую плоскость, в которой sp²-гибризованные атомы углерода образуют гексагональную решетку. Графен можно представить как «строительный блок» графита, нанотрубок и других углеродных материалов (рис. 1). Термин «графен» для индивидуального графитового слоя был введен в 1994 г. в соответствии с рекомендациями ИЮПАК по номенклатуре интеркалированных соединений графита (ИСГ), их также называют соединениями включения или соединениями введ-

рения графита).¹ Термин предложен по аналогии с названиями полициклических ароматических углеводородов (антрацен, коронен и т.д.). В настоящее время исследования в области графена не ограничиваются только однослойными образцами, интерес представляют также структуры, содержащие два и более (до 10) графеновых слоев.^{2–4}

В последние годы синтез и свойства графена стали одной из самых широко обсуждаемых и быстро развивающихся тем



Е.Д.Грайфер. Аспирант ИХ СО РАН.

Телефон: (383) 316-5634, e-mail: catherine.graifer@gmail.com

В.Г.Макогаченко. Кандидат химических наук, старший научный сотрудник того же института. Телефон: (383) 316-5634, e-mail: mwg@iic.nsc.ru

А.С.Назаров. Кандидат химических наук, старший научный сотрудник того же института. Телефон: (383) 316-5634, e-mail: albert@iic.nsc.ru

С.-Дж.Ким. Кандидат химических наук, профессор, заведующий Отделением нанотехники Женского университета Ихва.

Телефон: +82(2)3277-2350, e-mail: sjkim@ewha.ac.kr

В.Е.Федоров. Доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник ИХ СО РАН. Телефон: (383) 330-9253, e-mail: fed@iic.nsc.ru

Область научных интересов авторов: углеродные наноматериалы, интеркалированные соединения графита; синтез, модифицирование, электронная и кристаллическая структура

Графен: химические подходы к синтезу и модифицированию / Е. Д. Грайфер, В. Г. Макогаченко, А. С. Назаров [и др.]. — DOI: 10.1070/RC2011v080n08ABEH004181. — Текст : непосредственный // Успехи химии. — 2011. — Т. 80, № 8. — С. 784-804 : 11 рис. — Библиогр.: с. 801-804 (220 назв.). — ISSN 0042-1308. — eISSN 1817-5651. — Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16521995> (дата обращения: 22.02.2022). — Режим доступа : свободный.

Графеновые и графеноподобные материалы

А.Л.Ивановский

Институт химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук
620990 Екатеринбург, ул. Первомайская, 91, факс (343)374–4495

Обобщены сведения по способам модифицирования углеродных материалов на основе графена — за счет создания структурных дефектов, путем введения примесей замещения, адсорбции инородных атомов, механических деформаций. Рассмотрены графеновые ленты и нанопластины, аллотропы графена, многослойные графены, гибридные углеродные структуры с участием графена. Обсуждены методы синтеза, результаты изучения свойств и моделирования производных графена — графана, графона, фторграфена. Обобщены данные исследования родственных неуглеродных графеноподобных материалов — структурных аналогов графена на основе кремния, германия, олова, графеноподобных бинарных фаз этих элементов (SiC, GeC, SiGe, SiSn и т.д.), а также соединений типа $A^{IV}B^V$ (белый графен, $B_4C_3N_4$, BC_2 , CN , и др.) и $A^{IV}B^VI$ (BeO, ZnO, ZnS). Приведены сведения о других графеноподобных материалах — диалкилголендах, оксидах и карбидах металлов.

Библиография — 605 ссылок.

Оглавление

I. Введение	571
II. Графен и способы модификации его свойств	573
III. Производные графена	583
IV. Структурные аналоги графена	585
V. Графеноподобные 2D-фазы неорганических соединений	594
VI. Заключение	596

I. Введение

Графен — квазидвумерный (2D) кристалл, состоящий из атомов углерода, которые образуют упорядоченную гексагональную сетку. Активные исследования этого материала начались в 2004 г. — после того, как для получения его образцов был предложен^{1,2} сравнительно простой метод «склейки лент» (микромеханического расщепления).

Очень интересными оказались свойства графена. Наиболее примечательными материалведческими особенностями графена — самого тонкого из кристаллов — являются его экстремальная прочность в сочетании с упругостью и аномально высокая теплопроводность. Графен отличается рядом уникальных физических свойств, которые во многом определяются его электронной структурой: графен — бесщелевой полуметалл, носители заряда в нем — безмассовые дираковские фермионы. Большое внимание привлекают химические характеристики графена, обусловленные его 2D-структурой с чрезвычайно высокой удельной поверхностью — около $2675 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$. Все составившие эту систему атомы (в отличие от 3D-кристаллов) — повернутост-

ные, т.е. являются химически активными и могут вступать в различные взаимодействия, что открывает широчайшие возможности для химического модифицирования графена.

Сочетание указанных свойств обусловило высокую исследовательскую активность в изучении графена, а также определило привлекательность этого материала для различных технологических приложений. Полученные к настоящему времени впечатляющие результаты исследований графена отражены в многочисленных оригинальных статьях и обобщены в ряде обзорных публикаций (рис. 1).

Авторы первых обзоров,^{3–8} опубликованных в 2006–2008 гг., излагали первичные сведения о способах синтеза и свойствах графена в сравнении с аналогичными данными для иных углеродных наноструктур.

Общие проблемы синтеза, изучения свойств и областей применения графена продолжают обсуждать (с учетом вновь появляющихся сведений) в обзорных статьях^{9–17} последних лет. Современный взгляд на «проблему графена» можно найти в Нобелевских лекциях К.С.Новоселова¹⁸ и А.К.Гейма.¹⁹

Интенсификацией исследований графена (см. рис. 1) и накоплением огромного массива новых экспериментальных и теоретических результатов обусловлено появление в последние годы значительного числа специализированных обзоров, тематика которых отчетливо иллюстрирует основные направления текущих работ. Так, проведен анализ химиче-

А.Л.Ивановский, Доктор химических наук, заведующий лабораторией квантовой химии и спектроскопии ИХТТ УрО РАН. Телефон: (343)374–5331, e-mail: ivanovskii@ihim.uran.ru
Область научных интересов: квантовая химия, теория химиче-

Ивановский, А. Л. Графеновые и графеноподобные материалы / А. Л. Ивановский. — DOI: 10.1070/RC2012v081n07ABEN004302. — Текст : непосредственный // Успехи химии. — 2012. — Т. 81, № 7. — С. 571–605 : 8 таб., 31 рис. — Библиогр.: с. 597–605 (605 назв.). — ISSN 0042-1308. — eISSN 1817-5651. — Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17788396> (дата обращения: 24.02.2022). — Режим доступа : свободный.

Графеноподобные нанокарбиды и нанонитриды переходных металлов

А.Л.Ивановский, А.Н.Еняшин

Институт химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук
620990 Екатеринбург, ул. Первомайская, 91

Рассмотрен способ синтеза МХенов — нового семейства графеноподобных квазидвумерных нанокарбидов и нанонитридов переходных металлов с нетривиальными свойствами и интересными перспективами технологических применений. Обобщены экспериментальные данные о свойствах и результаты теоретического моделирования структуры, условий стабильности, электронных и магнитных свойств широкого ряда МХенов, их окисленных, фторированных и гидроксильных производных, а также наноситков и нанотрубок на их основе. Отмечены основные направления и перспективы дальнейших исследований этого уникального семейства 2D-наноматериалов.

Библиография — 67 ссылок.

Оглавление

I. Введение	735
II. Синтез, свойства, возможные области применения	736
III. Моделирование	739
IV. Заключение	744

I. Введение

Карбиды и нитриды переходных металлов благодаря уникальным свойствам и перспективам применения являются объектом пристального внимания исследователей. Другое направление ориентировано на изучение наноразмерных карбидов и нитридов платиноидов.¹⁰ Ивановский, А. Л. Графеноподобные нано-карбиды и нано-нитриды переходных металлов / А. Л. Ивановский, А. Н. Еняшин. — DOI: 10.1070/RC2013v082n08ABEN004398. — Текст : непосредственный // Успехи химии. — 2013. — Т. 82, № 8. — С. 735-746 : 5 таб., 13 рис. — Библиогр.: с. 745-746 (67 назв.). — ISSN 0042-1308. — eISSN 1817-5651. — Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20174484> (дата обращения: 24.02.2022). — Режим доступа : свободный.

детаальных исследований группы кристаллических карбидов и нитридов платиноидов.¹⁰

Карбиды и нитриды переходных металлов благодаря уникальным свойствам и перспективам применения являются объектом пристального внимания исследователей. Другое направление ориентировано на изучение наноразмерных карбидов и нитридов платиноидов.¹⁰

А.Л.Ивановский (A.L.Ivanovskii), Доктор химических наук, заведующий лабораторией квантовой химии и спектроскопии ИХТТ УрО РАН. Телефон: (343)374–5331, e-mail: ivanovskii@ihim.uran.ru

Область научных интересов: квантовая химия, теория химической связи, компьютерное материаловедение.

А.Н.Еняшин (A.N.Enyashin), Кандидат химических наук, старший научный сотрудник того же института. Телефон: (343)362–3115, e-mail: enyashin@ihim.uran.ru

Область научных интересов: компьютерное моделирование наноструктурированных материалов.

Дата поступления 15 апреля 2013 г.

и окисленных нитридных наноматериалов в виде нанопорошков или их компактов, наноструктурированных пленок, сплавов, керамик, композитов и др. с нетривиальным набором эксплуатационных характеристик.

Одно из наиболее заметных событий последнего времени — разработка способа синтеза и получения первых образцов принципиально нового семейства графеноподобных (квазидвумерных, 2D) нанокарбидов и нанонитридов d-металлов.¹¹ Особое внимание к нему обусловлено следующими причинами.

Успешный синтез,^{12,13} необычные свойства и впечатляющие перспективы использования графена (см. обзорные публикации^{14–34}) послужили стимулами к поиску родственных неуглеродных графеноподобных 2D-материалов. Наиболее очевидными кандидатами для получения таких материалов являются слоистые фазы (например, гексагональный нитрид бора, диалкилголенды металлов и т.д.) с резко выраженной анизотропией межatomных взаимодействий. В монологах



Гибридные наноструктуры графен–квантовые точки с контролируемыми оптическими и фотоэлектрическими свойствами для применения в составе солнечных батарей

П.М.Соколов,^a М.А.Звайгзне,^a В.А.Кривенков,^a А.П.Литвин,^b А.В.Баранов,^b А.В.Федоров,^b П.С.Самохвалов,^a И.Р.Набиев^{a,c}

^a Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(Московский инженерно-физический институт)

Россия, 115409 Москва, Каширское шоссе, 31

^b Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (СПбНИУ ИТМО)

Россия, 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49

^c University of Reims Champagne-Ardenne (URCA)

51 str. Cognacq Jay, 51100 Reims, France

Проанализировано современное состояние исследований, связанных с проблемами повышения эффективности и удешевления преобразователей солнечной энергии. Один из путей решения этих проблем — включение графена и его производных в фотоактивный слой солнечных батарей. Такие соединения характеризуются рекордными значениями подвижности носителей заряда при нормальной температуре и низкими значениями сечения поглощения солнечного излучения. Обсуждены методы химического материаловедения и нанотехнологические подходы к созданию гибридных 2D-структур на основе графена и квантовых точек. Приведены примеры их наиболее успешного применения в составе солнечных батарей, а также сформулированы перспективные направления исследований и разработки в этой области.

Библиография — 173 ссылки.

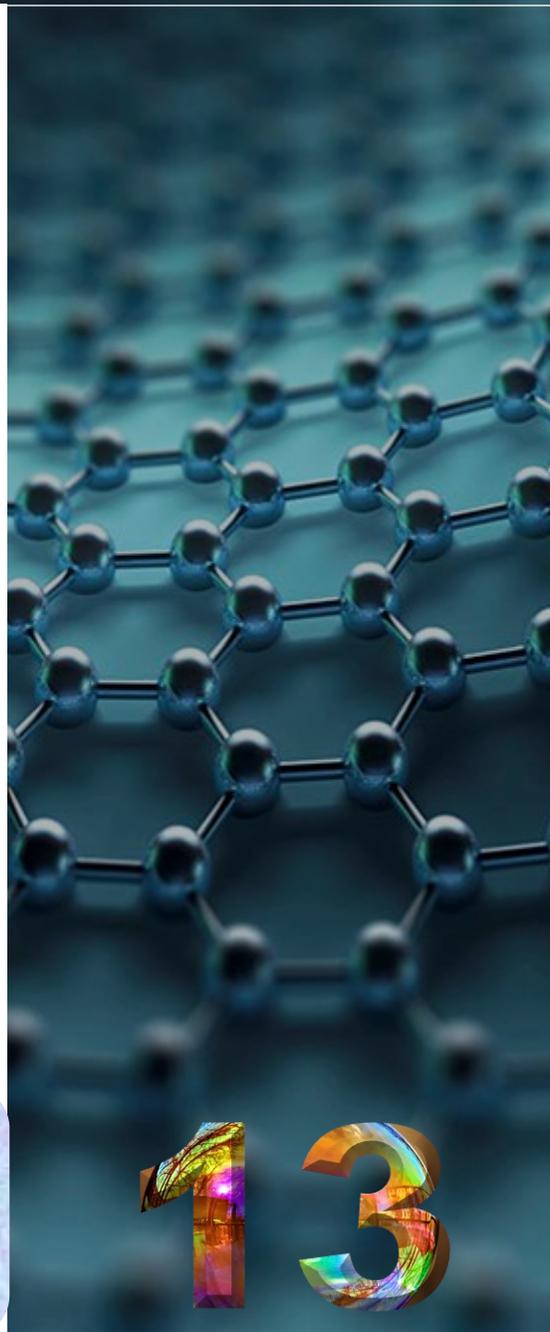
Оглавление

1. Введение	371
2. Современные типы солнечных батарей	373
3. Гибридные 2D-структуры графен–квантовые точки. Синтез отдельных компонентов, их свойства и предпосылки для использования в составе солнечных батарей	375
4. Солнечные батареи на основе гибридных 2D-структур графен–квантовые точки	377
5. Заключение	383

П.М.Соколов (P.M.Sokolov). Кандидат биологических наук, инженер НИЯУ МИФИ.
Телефон: +7(495)788–5699 (доб. 8088),
e-mail: sokolovpm87@mail.ru
М.А.Звайгзне (M.A.Zvaigzne). Инженер-исследователь, аспирантка того же университета.
Телефон: +7(495)788–5699 (доб. 8088),
e-mail: ma@zvaigzne@gmail.com
В.А.Кривенков (V.A.Krivenkov). Кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник того же университета.
Телефон: +7(495)788–5699 (доб. 8088), e-mail: vkrivenkov@list.ru

Телефон: +7(812)232–9704, e-mail: a_v_fedorov@inbox.ru
П.С.Самохвалов (P.S.Samokhvalov). Кандидат химических наук, старший научный сотрудник НИЯУ МИФИ.
Телефон: +7(495)788–5699 (доб. 8088),
e-mail: p.samokhvalov@gmail.com
И.Р.Набиев (I.R.Nabiev). Доктор химических наук, профессор, ведущий научный сотрудник нано-бионикс энергии того же университета, заведующий лабораторией по исследованию в области нанонауки и директор Европейской технологической платформы «Полупроводниковые нанокристаллы», URCA, France.
Телефон: +33(0)326–918127, e-mail: ianr.nabiev@univ-reims.fr

Гибридные наноструктуры графен–квантовые точки с контролируемыми оптическими и фотоэлектрическими свойствами для применения в составе солнечных батарей / П. М. Соколов, М. А. Звайгзне, В. А. Кривенков [и др.]. – DOI: 10.1070/RCR4859. – Текст : непосредственный // Успехи химии. – 2019. – Т. 88, № 4. – С. 370–386 : 5 таб., 11 рис. – Библиогр.: с. 384–386 (173 назв.). – ISSN 0042-1308. – eISSN 1817-5651. – Имеется электронная версия: https://www.uspkhim.ru/php/paper_rus.phtml?journal_id=rc&paper_id=4859&year_id=2019&volume=88&issue_id=4&fpage=370&lpage=386 (дата обращения: 28.02.2022). – Режим доступа : свободный.



Синтез, свойства и применение полупроводникового наноструктурированного сульфида цинка

С.И.Садовников

Институт химии твердого тела Уральского отделения Российской Академии наук
Россия, 620990 Екатеринбург, ул. Первомайская, 91

Проанализированы и обобщены экспериментальные результаты последних лет, полученные при изучении синтеза, строения и свойств наноструктурированного сульфида цинка. Описаны его кристаллические модификации, методы синтеза в виде квантовых точек, наночастиц, допированных наночастиц, тонких пленок и гетеронаноструктур с разной морфологией. Особое внимание уделено излучательной способности и полупроводниковым свойствам сульфида цинка. Рассмотрены возможные области практического применения наноструктур на основе этого соединения.
Библиография — 194 ссылки.

Оглавление

1. Введение	571
2. Структура и полупроводниковые характеристики сульфида цинка	572
3. Методы синтеза наноструктурированного сульфида цинка	574
4. Контроль морфологии наноструктур сульфида цинка	583
5. Свойства и применение наноструктурированного сульфида цинка	586
6. Заключение	590

Садовников, С. И. Синтез, свойства и применение полупроводникового наноструктурированного сульфида цинка / С. И. Садовников. – DOI: 10.1070/RCR4867. – Текст : непосредственный // Успехи химии. – 2019. – Т. 88, № 6. – С. 571–593 : 2 таб., 17 рис. – Библиогр.: с. 591–593 (194 назв.). – ISSN 0042-1308. – eISSN 1817-5651. – Имеется электронная версия: https://www.uspkhim.ru/ukh_frm.phtml?page=paper&paper_id=4867 (дата обращения: 28.02.2022). – Режим доступа : свободный.

С.И.Садовников (S.I.Sadovnikov). Кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории наноструктурных соединений ИХТТ УрО РАН.
Телефон: +7(343) 362–3034, e-mail: sadovniko@ihm.uran.ru
Область научных интересов: синтез, строение и реакционная способность халькогенидов металлов, коллоидные растворы, наночастицы, наноструктурированные материалы.

Дата поступления 11 октября 2018 г.

полупроводников. Извлечено из «Успехи химии», 2019, 88 (6) 571–593.

В настоящее время основная часть энергетических потребностей человечества обеспечивается за счет сжигания ископаемых источников энергии — нефти, газа, угля. Одним из перспективных направлений, которое должно привести к сокращению потребления этих природных ресурсов, является преобразование солнечной энергии в электричество. Технологическими устройствами для такого преобразования являются солнечные батареи, для создания которых необходим ZnS.

Сульфид цинка имеет широкую область пропускания — от видимого света с длиной волны 0,4 мкм до ИК-области 16 мкм,²¹ поэтому его применяют для изготовления элементов различных оптических приборов и устройств.

Наноструктуры сульфида цинка характеризуются эмиссионной способностью в УФ- и видимой областях спектра. Функциональные эмиссионные свойства наноструктур ZnS и их использование как эмиттеров непосредственно связаны с

Гибридные материалы на основе производных графена и порфириновых металл-органических каркасов

В.В.Арсланов,^{a,*} М.А.Калинина,^a Е.В.Ермакова,^a О.А.Райтман,^a Ю.Г.Горбунова,^b
О.Е.Аксютин,^c А.Г.Ипков,^c В.А.Грачев,^a А.Ю.Цивадзе^a

^a Институт физической химии и электрохимии имени А.Н.Фrumкина Российской академии наук Россия, 119071 Москва, Ленинский просп., 31, корп. 4

^b Институт общей и неорганической химии имени Н.С.Курнакова Российской академии наук Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 31

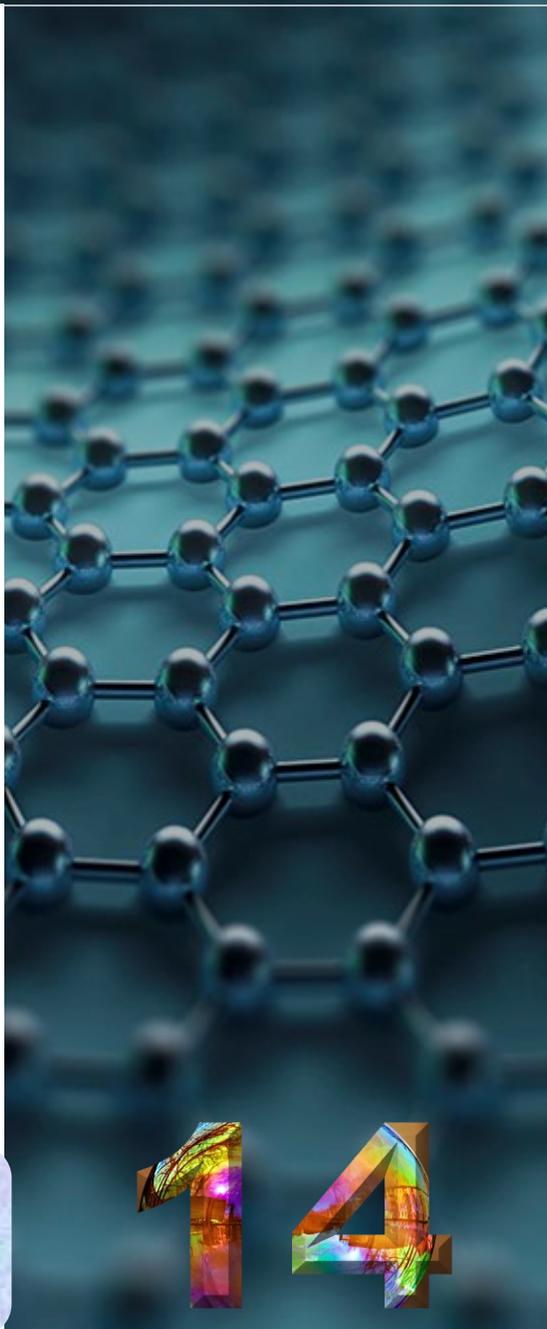
^c Публичное акционерное общество «Газпром» Россия, 117997 Москва, ул. Наметкина, 16

Проведен анализ отечественной и зарубежной литературы, посвященной получению графена и его производных — оксида графена и восстановленного оксида графена — как представителей семейства двумерных слоистых материалов. Особое внимание уделено оксиду графена, большие возможности окислительно-восстановительной модификации которого, а также необычные свойства этого материала и его производных могут быть использованы для решения задач биомедицины, экологии, оптоэлектроники и др. Рассмотрены химические и физические способы восстановления оксида графена для создания графеноподобных материалов, сходных как по структуре, так и по свойствам с чистым графеном, полученным путем прямого механического отщепления. Обсуждены способы функционализации графеновых материалов. Рассмотрены вопросы получения гидро- и органогелей, а также эмульсий Пикеринга из производных графена как предшественников пористых монолитов. Обсуждены образование азрогелей на основе графеновых материалов и адсорбция метана на этих структурах. Приведены основные сведения о гибридных материалах, содержащих производные графена и металл-органические каркасы, и дана оценка их адсорбционных характеристик по отношению к метану. Ковалентные и нековалентные взаимодействия в графен-порфириновых гибридах рассмотрены с позиций формирования порфириновых архитектур на поверхности графеновых материалов. Приведены примеры использования порфирино-графеновых композиционных материалов в фото- и электрокатализе, топливных элементах, газоразделительных мембранах. Библиография — 243 ссылки.

Оглавление

1. Введение	776
2. Графен — представитель семейства двумерных слоистых материалов	777
3. Оксид графена — функционализированный аналог графена	779
4. Получение оксида графена. Метод Хаммера и его модификации	780
5. Восстановление оксида графена	780
6. Химическая модификация графена	782
7. Химическая модификация оксида графена	782
8. Дисперсии оксида графена и восстановленного оксида графена в водных и органических средах	782
9. Формирование гелей оксида графена и восстановленного оксида графена	784
10. Эмульсии Пикеринга как предшественники однородных пористых структур	785
11. Образование монолитов азрогелей на основе производных графена	785
12. Графеновые материалы в качестве сорбентов метана	788
13. Адсорбция метана на гибридных материалах, содержащих производные графена и металл-органические каркасы	789
14. Формирование порфириновых архитектур на поверхности графеновых материалов. Ковалентные и нековалентные взаимодействия в графен-порфириновых гибридах	791
15. Композитные материалы на основе порфиринов и производных графена	794
16. Заключение	795

Гибридные материалы на основе производных графена и порфириновых металл-органических каркасов / В. В. Арсланов, М. А. Калинина, Е. В. Ермакова [и др.]. — DOI: 10.1070/RCR4878. — Текст : непосредственный // Успехи химии. — 2019. — Т. 88, № 8. — С. 775-799 : 2 таб., 11 рис. — Библиогр.: с. 796-799 (243 назв.). — ISSN 0042-1308. — eISSN 1817-5651. — Имеется электронная версия: https://www.uspkhim.ru/php/paper_rus.phtml?journal_id=rc&paper_id=4878&year_id=2019&volume=88&issue_id=8&page=775&lpage=799 (дата обращения: 28.02.2022). — Режим доступа : свободный.



От спин-меченых конденсированных полиароматических соединений к магнитно-активным графеновым наноструктурам

Ю.А.Тен,^a Н.М.Трошкова,^a Е.В.Третьяков^{a, b*}

^a Новосибирский институт органической химии имени Н.Н.Ворожцова Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 9

^b Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 1

Молекулярный дизайн магнитно-активных графеновых наноструктур — формирующаяся область науки. Основная цель таких исследований — получение графеновых нанолент и графеновых квантовых точек с заданными электронными, оптическими и магнитными свойствами. В обзоре рассмотрены методы синтеза спин-меченых полициклических ароматических углеводородов — гомологических предшественников графеновых наноструктур. Обсуждены достижения и перспективы развития дизайна магнитно-активных графеновых материалов. Библиография — 134 ссылки.

Оглавление

1. Введение	693
2. Графеновые наноструктуры	694
3. Нитронитротроксиламененые конденсированные поли- и тетарены	697
4. трет-Бутилнитротроксиламененые поликонденсированные арены	701
5. Магнитно-активные графеновые наноструктуры	704
6. Заключение	709

1. Введение

Развитие современного общества невозможно без использования разнообразных магнитно-активных систем и материа-

лов. Такие материалы были известны еще в глубокой древности, их использовали для создания первых навигационных приборов.^{1,2} В ходе научно-технической революции потребность в материалах, обладающих задан-

Тен, Ю. А. От спин-меченых конденсированных полиароматических соединений к магнитно-активным графеновым наноструктурам / Ю. А. Тен, Н. М. Трошкова, Е. В. Третьяков. — DOI: 10.1070/RCR4923. — Текст : непосредственный // Успехи химии. — 2020. — Т. 89, № 7. — С. 693-712 : 5 таб., 11 рис. — Библиогр.: с. 801-804 (134 назв.). — ISSN 0042-1308. — eISSN 1817-5651. — Имеется электронная версия: https://www.uspkhim.ru/php/paper_rus.phtml?journal_id=rc&paper_id=4923&year_id=2020&volume=89&issue_id=7&page=693&lpage=712 (дата обращения: 21.02.2022). — Режим доступа : свободный.

ботка методов синтеза новых эффективных биологически активных полифтор-1,4-нафтахинонов.

Е.В.Третьяков (E.V.Tretyakov). Доктор химических наук, заведующий лабораторией, заместитель директора по научной работе НИОХ СО РАН; старший преподаватель НГУ. Телефон: +7(383)330-9171, e-mail: tretyakov@niokh.nsc.ru

Область научных интересов: функционально-ориентированный синтез химия гетероциклических соединений, в том числе фторированных, стабильные органические радикалы, гетероспиральные системы, молекулярный дизайн магнетиков.

важные обменно-связанные двух- (и более) спиновые системы. Под воздействием внешних факторов эти системы способны изменять свое состояние, что на макроуровне приводит к дрейфу либо скачку физических характеристик.¹³ Фактически такие материалы способны на молекулярном уровне перекодировать внешний сигнал или внешнее воздействие в легко регистрируемый макропараметр, поэтому их рассматривают в качестве рабочих элементов сверхчувствительных сенсоров, ячеек энергоэффективной магнитоэлектрической оперативной памяти, а также компонентов квантовых компьютеров.

Семенцов, Д. И. Нелинейная регулярная и стохастическая динамика намагниченности в тонкопленочных структурах / Д. И. Семенцов, А. М. Шутый. – DOI: 10.3367/UFNr.0177.200708b.0831. – Текст : непосредственный. // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, № 8. – С. 831-857 : 20 рис. – Библиогр.: с. 856-857 (111 назв.). – ISSN 0042-1294. – eISSN 1996-6652. – Имеется электронная версия: <https://ufn.ru/ru/articles/2007/8/b> (дата обращения: 26.01.2022). – Режим доступа : свободный.

ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Нелинейная регулярная и стохастическая динамика намагниченности в тонкопленочных структурах

Д.И. Семенцов, А.М. Шутый

Представлены результаты исследований нелинейных режимов однородной прецессионной динамики намагниченности в феррит-гранатовых пленках с различной ориентацией кристаллографических осей и металлических тонкопленочных структурах. Основное внимание уделяется рассмотрению статических и динамических бистабильностей, приводящих под воздействием переменного магнитного поля к перемагничиванию систем, бифуркационному изменению амплитуды прецессии намагниченности или установлению как стохастических, так и сложных регулярных, в том числе автоколебательных, прецессионных режимов. Приведены бифуркационные диаграммы выявляют широкие возможности эффективного управления нелинейной динамикой намагниченности в тонкопленочных структурах посредством изменения внешних магнитных полей.

PACS numbers: 75.40.Gb, 75.40.Mg, 76.50.+g

Содержание

1. Введение (831).
 2. Низкоамплитудная прецессия и ориентационные динамические переходы в феррит-гранатовых пленках типа (111) (833).
 3. Многовитовая прецессия намагниченности в пленках типа (100) (835).
 4. Динамические эффекты в металлических двухслойных структурах (836).
 - 4.1. Равновесные состояния. 4.2. Динамическое перемагничивание в поперечном поле в. 4.3. Колебательные режимы при низкочастотном поперечном поле.
 5. Бистабильные состояния в магнитовывающих металлических сверхрешетках (841).
 - 5.1. Равновесные состояния. 5.2. Динамическая бистабильность.
 6. Неометрические колебательные моды в структурах со слабым косослойным обменным взаимодействием (844).
 7. Амплитудные бифуркации и динамическая бистабильность в феррит-гранатовых пленках (847).
 8. Стохастическая прецессия в феррит-гранатовых пленках (848).
 9. Стохастические колебания намагниченности в металлических сверхрешетках (852).
 10. Заключение (856).
- Список литературы (856).

Д.И. Семенцов, А.М. Шутый.
Ульяновский государственный университет,
432970 Ульяновск, ул. Л. Толстого 42, Российская Федерация
Тел. (8422) 32-15-98
E-mail: semenцовdi@ulnu.ru, shuty@mail.ru

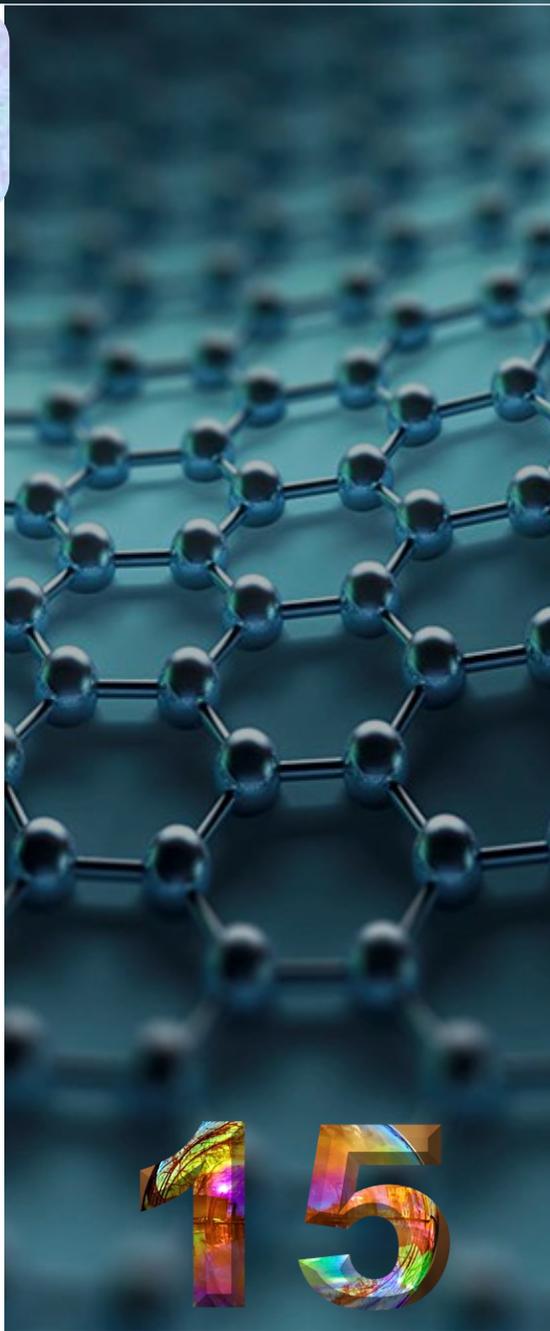
Статья поступила 14 июля 2006 г.,
после доработки 1 марта 2007 г.

1. Введение

Интерес к нелинейной прецессионной динамике намагниченности в магнитоупорядоченных кристаллах объясняется разнообразием динамических эффектов, возникающих при воздействии на диссипативную спиновую систему высокочастотного поля [1–5], а также возможностью получения больших углов прецессии намагниченности и реализации динамического хаоса, различных статических и динамических самоорганизующихся состояний магнитных систем [6–8]. Одним из наиболее удобных объектов для реализации и исследования самого широкого круга нелинейных динамических режимов являются используемые в современных интегральных технологиях тонкопленочные структуры [9].

В последние годы в связи с активными разработками новых носителей и способов записи информации стали весьма актуальными исследования динамического перемагничивания пленок [10–13], формирования и распространения фронта возбуждения [14], а также развития однородных и неоднородных по структуре нелинейных динамических состояний [15–19]. При этом многие из основных особенностей нелинейных регулярных и стохастических прецессионных режимов в наибольшей степени должны проявляться в однородно намагниченных структурах. Кроме того, при практическом использовании нелинейных эффектов, когда важна величина отклика системы на внешнее воздействие, однородная прецессионная динамика является предпочтительной. Особый интерес представляют высокоамплитудные прецессионные режимы, что связано с возможностью их использования для модуляции лазерного излучения, эффективность которой определяется величиной угла прецессии [20–23].

© Д.И. Семенцов, А.М. Шутый 2007



24. Toropov A A et al. *Phys. Rev. Lett.* **103** 037403 (2009)
 25. Jmerek V N et al. *J. Cryst. Growth* **301** – 302 469 (2007)
 26. Ivanov S V et al. *J. Cryst. Growth* **301** – 302 465 (2007)
 27. Lakowicz J B *Anal. Biochem.* **298** 1 (2001)
 28. Farahani J N et al. *Phys. Rev. Lett.* **95** 014002 (2005)
 29. Gersten J, Nitzan A *J. Chem. Phys.* **75** 1139 (1981)
 30. Golovashkin A И и др. *ЖЭТФ* **51** 1623 (1966) [Golovashkin A I et al. *Sov. Phys. JETP* **24** 1093 (1967)]
 31. Westphalen M et al. *Solar Energy Mater. Solar Cells* **61** 97 (2000)
 32. Shubina T V et al. *Phys. Status Solidi A* **202** 377 (2005)
 33. Shubina T V et al. *Phys. Status Solidi C* **4** 2474 (2007)
 34. Wu J et al. *J. Appl. Phys.* **94** 6477 (2003)
 35. Kotlyarova T A et al. *ФТД* **43** 304 (2009) [Semicond. **43** 285 (2009)]
 36. Шубина Т В и др., в сб. *Труды 1-го Междунар. форума по нанотехнологиям, Москва, Россия, 3 – 5 декабря 2008 г.* (М.: Ruspotech, 2008) с. 183
 37. Шубина Т В и др. *Изв. РАН, Сер. физ.* (в печати, 2009)
 38. Shalygin V A et al. *Appl. Phys. Lett.* **90** 161128 (2007)
 39. Mikhailov S A *SPIE Proc.* **3828** 139 (1999)
 40. Höpfel R A, Vam E, Gornik E *Phys. Rev. Lett.* **49** 1667 (1982)

PACS numbers: 42.25.Fx, 78.20.Ls, 78.67. – n
 DOI: 10.3367/UFNr.0179.200909j.1012

Резонансное рассеяние света на наноструктурированных металлических и ферромагнитных пленках

В.В. Курин

1. Введение

В докладе показано, что магнитооптические эффекты могут быть значительно усилены в композиционных наноструктурированных метаматериалах и ферромагнитных фотонных кристаллах. Причиной усиления могут быть как индивидуальные резонансы в наночастицах, плазменные или геометрические, так и коллективные резонансы, обусловленные эффектами многократного рассеяния в решетках нанонеоднородностей.

Магнитооптические эффекты, заключающиеся в изменении поляризации света при взаимодействии с ферромагнитными материалами, интенсивно изучаются на протяжении уже довольно длительного времени и практически используются для магнитооптической записи информации [1].

Какется очевидным, что магнитооптические эффекты могут быть значительно усилены в наноструктурированных композиционных материалах благодаря электродинамическим резонансным эффектам, изучению которых в последнее время уделяется повышенное внимание [2]. Природа резонансов может быть различной. Это могут быть, в частности, резонансы, связанные с возбуждением собственных мод индивидуальных нанонеоднородностей. Пример усиления магнитооптических эффектов, обусловленного индивидуальными резонансами в среде, состоящей из ферромагнитных нанопартикул, впервые был рассмотрен в работе [3].

В данном сообщении демонстрируется, что к усиле-

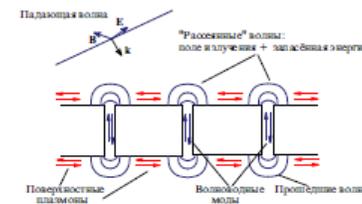


Рис. 1. Схема рассеяния электромагнитной волны на наноперфорированной ферромагнитной пленке. Показаны основные виды волн, возбуждаемых в процессе рассеяния.

Для того чтобы продемонстрировать эффекты резонансного усиления магнитооптических эффектов, мы рассмотрим простую модель искусственной среды, представляющую собой ферромагнитную пленку с цилиндрическими отверстиями. Вектор намагниченности будем полагать направленным по нормали к пленке. Размеры неоднородностей будем считать меньшими как длины волны, так и толщины скин-слоя в металле. На рисунке 1 приведена схема рассеяния электромагнитной волны на такой структуре и показаны основные возбуждающиеся волны.

В оптическом диапазоне частот гиротропия ферромагнетика связана с гирооптическим механизмом [1], обусловленным спин-орбитальным взаимодействием [4], которое проявляется только в недиагональных элементах тензора диэлектрической проницаемости. Магнитную проницаемость можно принять равной единичному диагональному тензору $\mu_x = \mu_y = \mu_0$. В системе координат, в которой ось z ориентирована вдоль направления вектора намагниченности \mathbf{M} , а вектор $\mathbf{r}_l = (x, y)$ лежит в перпендикулярной плоскости, тензор диэлектрической проницаемости ферромагнитной пленки является аналогичным по структуре тензору диэлектричного газа в магнитном поле и записывается в виде

$$\hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon & ig & 0 \\ -ig & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \eta \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где ϵ, η — продольная и поперечная диэлектрические проницаемости, g — параметр гиротропии, пропорциональный величине намагниченности. Характерная величина гиротропии типичного ферромагнетика Co $g \sim 10^{-2}$, что соответствует эффективному магнитному полю 10^5 Гс. Диагональные элементы тензора $\epsilon \approx \eta \sim 1$ имеют порядок, характерный для металлов.

2. Распространение волн в ферромагнитном нанополноводе

Решение задачи рассеяния на перфорированной пленке естественно начать с изучения собственных мод цилиндрической нанополуды. Будем считать, что вектор намаг-

Курин, В. В. Резонансное рассеяние света на наноструктурированных металлических и ферромагнитных пленках / В. В. Курин. – DOI: 10.3367/UFNr.0179.200909j.1012. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179, № 9. – С. 1012–1018 : 5 рис. – Библиогр.: с. 1018 (17 назв.). – ISSN 0042-1294. – eISSN 1996-6652. – Имеется электронная версия: <https://ufn.ru/ru/articles/2009/9/j> (дата обращения: 26.01.2022). – Режим доступа : свободный.

ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Двумерная графеновая электроника: современное состояние и перспективы

П.В. Ратников, А.П. Силин

Представлен обзор современного состояния в области применения двумерного углеродного материала графена в электронике с нанометровыми элементами — нанoeлектронике. Кратко описана история получения графена. Дан обзор теоретических работ, посвящённых графеновым гетероструктурам. Основное внимание уделено практическому использованию графена в нанoeлектронике. Рассмотрены перспективы графеновой и постграфеновой нанoeлектроники.

Ключевые слова: графен, нанoeлектроника, гетероструктуры, транзисторы, диоды, сенсоры, интегральные схемы

PACS numbers: 68.65.Cd, 68.65.Pq, 73.21.Fg, 73.40.Gk, 73.50.–h, DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2017.11.038231>
85.30.Tv, 85.40.–e, 85.60.–q, 85.65.+h

Содержание

1. Введение (1249).
 2. Свойства графена (1250).
 3. Графеновые гетероструктуры (1252).
 - 3.1. Слоистые гетероструктуры.
 - 3.2. Латерально наноструктурированные ван-дер-ваальсовы гетероструктуры.
 - 3.3. Плоскостные гетероструктуры.
 4. Графеновая нанoeлектроника (1259).
 - 4.1. Транзисторы.
 - 4.2. Диоды.
 - 4.3. Ячейки памяти.
 - 4.4. Интегральные схемы.
 - 4.5. Батареи.
 - 4.6. Суперконденсаторы.
 - 4.7. Термоэлектрические устройства.
 - 4.8. Солнечные элементы.
 - 4.9. Фотодетекторы.
 - 4.10. Сенсоры.
 5. Перспективы графеновой и постграфеновой нанoeлектроники (1280).
 6. Заключение (1281).
- Список литературы (1282).

1. Введение

Середина XX века и вся его вторая половина ознаменовались бурным развитием полупроводниковых технологий. Это привело к громадному прогрессу в электронике, главным образом на основе кремния. Создание транзистора в 1947 г. стало знаковым событием¹. На смену громоздким и энергозатратным вакуумным лампам в электронике пришли новые устройства относительно малых размеров и менее энергозатратные — транзис-

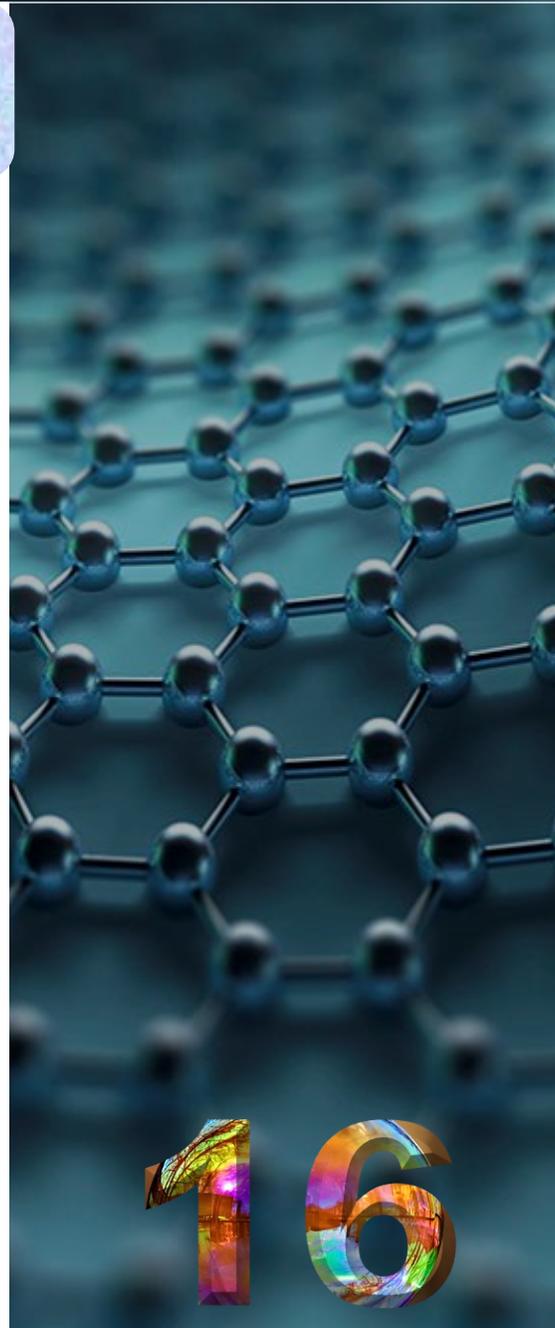
торы [1–4]. Помимо этого, транзисторы привлекательны такими свойствами, как отсутствие хрупких деталей, миниатюрность, большой срок работы. Транзистор интересен не только и не столько тем, что может заменить радиолампу, а своими уникальными свойствами, которыми в принципе не обладает радиолампа [5]. За исследования полупроводников и открытие транзисторного эффекта Дж. Бардину, У. Браттейну и У. Шокли была присуждена Нобелевская премия по физике за 1956 г.

Первая микросхема была создана Дж. Килби с сотрудниками в 1958 г. Они разработали технологию, которая совершила переворот в электронной промышленности. Как основа аналоговых схем, работающих в режиме пропорционального (прямого) усиления тока, были изготовлены радиочастотный генератор с фазовым сдвигом и триггер [6]. Впрочем, в последние три десятилетия аналоговые схемы активно вытесняются цифровыми, использующими лишь два крайних состояния — полностью открыт ("включено") и полностью закрыт ("выключено"), которым соответствуют значения 1 и 0 [7].

Нобелевская премия за 2000 г. была присуждена Дж. Килби "за вклад в изобретение интегральных схем" [6], а также Ж.И. Алфёрову и Г. Крёмеру "за разработку полупроводниковых гетероструктур, используемых в высокочастотной электронике и оптоэлектронике" [8, 9].

В 1953 г. Ж.И. Алфёров принял активное участие в создании первого советского транзистора на р–п–

¹ Историческая справка: фактическое создание транзистора произошло в середине декабря 1947 г., презентация транзистора для сотрудников компании Bell Lab состоялась 23 декабря 1947 г.; принятая транзисторного патента датирована 17.06.1948, а публичная презентация транзистора состоялась 30 июня 1948 г. [1–4]. Так что история науки и техники справедливо называют годом создания транзистора как 1947, так и 1948 гг.



ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Стрейнтроника — новое направление микро- и нанoeлектроники и науки о материалах

А.А. Бухараев, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов

Стрейнтроникой (straintronics) называют новое направление в физике конденсированного состояния вещества, использующее методы деформационной инженерии и физические эффекты, наведённые механическими деформациями в твёрдых телах, для реализации нового поколения устройств информационных, сенсорных и энергоэффективных технологий. Рассмотрены основные понятия стрейнтроники, физические эффекты, на которых она основана, её преимущества перед традиционной электроникой и стоящие перед ней проблемы и фундаментальные ограничения. Особое внимание уделено стрейнтронике магнитных и магнитоэлектрических материалов, так как с ней связывают надежды на радикальное снижение энергопотребления при проведении квантовых вычислений. На конкретных примерах рассмотрены практические применения принципов стрейнтроники в области информационных и энергоэффективных технологий, сенсорной и сверхвысокочастотной техники.

Ключевые слова: деформационная инженерия, магнитоупругое взаимодействие, магнитоэлектрические композиты, мультиферриты

PACS numbers: 75.80.+q, 75.85.+t

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2018.01.038279>

Содержание

1. Стрейнтроника: основные понятия (1288).
 - 1.1. Введение.
 - 1.2. Перекрёстные эффекты с участием упругой подсистемы.
 - 1.3. Деформационная инженерия.
 - 1.4. Композиционные материалы магнитной стрейнтроники.
 - 1.5. Принцип действия магнитных стрейнтронных устройств.
2. Физические эффекты в магнитных микро- и наночастицах и структурах, индуцированные механическими напряжениями (1296).
 - 2.1. Переключение намагниченности в частицах.
 - 2.2. Изменение микромагнитной структуры под действием механических напря-

- жений.
 - 2.3. Магнитные превращения, наведённые механическими напряжениями.
 - 2.4. Термомодулированный магнитоупругий эффект.
 - 2.5. Преобразование полей в компонентах структур.
3. Комбинированные материалы и устройства магнитной стрейнтроники (1315).
 - 3.1. Состав и методы изготовления структур.
 - 3.2. Устройства памяти и логики, переключаемые электрическим полем.
 - 3.3. Датчики, преобразователи энергии, микродвигатели.
 - 3.4. Устройства обработки радиосигналов, перестраиваемые электрическим полем.
 - 3.5. Производные элементы стрейнтронных гираторов, транзисторов и нейроморфные элементы.
 4. Заключение (1326).

Список литературы (1327).

1. Стрейнтроника: основные понятия

1.1. Введение

Стремительно и всё ускоряющееся развитие информационных технологий, выразившееся в последнее время в появлении таких новых областей, как Большие данные (Big Data) и цепочки блоков данных (blockchain), предполагают дальнейшее увеличение мощности вычислительных устройств. По оценкам специалистов [1], при сохранении тех же темпов роста информационных технологий и неизменных характеристиках электронных элементов к 2030 г. до половины потребляемой челове-

Стрейнтроника – новое направление микро- и нанoeлектроники и науки о материалах / А. А. Бухараев, А. К. Звездин, А. П. Пятаков, Ю. К. Фетисов. – DOI: 10.3367/UFN.2018.01.038279. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188, № 12. – С. 1288–1330 : 2 таб., 50 рис. – Библиогр.: с. 1327–1330 (290 назв.). – ISSN 0042-1294. – eISSN 1996-6652. – Имеется электронная версия: <https://ufn.ru/ru/articles/2018/12/b> (дата обращения: 06.02.2022). – Режим доступа : свободный.

ОБОЗРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Электроника на основе SiC

(к 100-летию Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН)

А.А. Лебедев, П.А. Иванов, М.Е. Левинштейн, Е.Н. Мохов,
С.С. Нагалюк, А.Н. Анисимов, П.Г. Баранов

Рассмотрены история и современное состояние исследований электрофизических параметров SiC. Представлены основные методы выращивания объемных кристаллов SiC и эпитаксиальных SiC-плёнок. Дан краткий обзор используемых для послеростовой обработки эпитаксиальных SiC-структур. Показан современный уровень, достигнутый при разработке приборов на основе SiC. Проанализированы основные проблемы, существующие при разработке SiC-приборов, и перспективы создания и развития таких приборов.

Ключевые слова: карбид кремния, объёмные кристаллы, сублиминационный рост, полиптины, латеральное разраствивание, высоковольтные силовые диоды, высоковольтные субмикроскопические импульсные диоды, тиристоры, биполярные транзисторы, аналитические модели, численное моделирование, центр окраски, спин, сенсорика, магнитное поле, оптическое детектирование магнитных резонансов, графен, спектроскопия вынужденного комбинационного рассеяния, двумерные материалы

PACS numbers: 81.05.ue, 81.10.-h, 85.30.-z

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.10.038437>

Содержание

1. Введение (803).
2. Электрофизические свойства карбида кремния (804).
 - 2.1. История развития технологии получения карбида кремния и приборов на его основе.
 - 2.2. Параметры SiC, важные для электроники.
3. Выращивание объёмных кристаллов карбида кремния (806).
 - 3.1. Выращивание кристаллов SiC и их характеристика.
 - 3.2. Уменьшение содержания структурных дефектов в выращиваемом кристалле.
4. Разработка и исследование высоковольтных силовых и импульсных диодов на основе 4H-SiC (810).
 - 4.1. Силовые диоды Шоттки с интегрированной шоттки-(p-n)-структурой.
 - 4.2. Быстростанавливающиеся лавинные диоды.
 - 4.3. Субмикроскопические диодные резальматы типа.
5. Моделирование переходных процессов в силовых биполярных приборах на основе 4H-SiC (826).
 - 5.1. Тиристоры.
 - 5.2. Биполярные транзисторы.
 - 5.3. Выпрямительные p-i-n-диоды.
 - 5.4. Особенности физических процессов в биполярных приборах на основе карбида кремния.
 - 5.5. Выводы.
6. Нанолитроника на основе карбида кремния (836).
 - 6.1. Спиновые центры окраски в карбиде кремния как платформы для сенсорики, квантовой фотоники и обработки информации в условиях окружающей среды.
 - 6.2. Графен на SiC: получение, исследование и возможные приборные применения.

А.А. Лебедев*, П.А. Иванов, М.Е. Левинштейн, Е.Н. Мохов,
С.С. Нагалюк, А.Н. Анисимов, П.Г. Баранов*
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
ул. Политехническая 26, 19-4021 С.Петербург, Российская Федерация
E-mail: *shura.lebe@mail.ioffe.ru, *pavel.baranov@mail.ioffe.ru

Статья поступила 4 сентября 2018 г.,
после доработки 1 октября 2018 г.

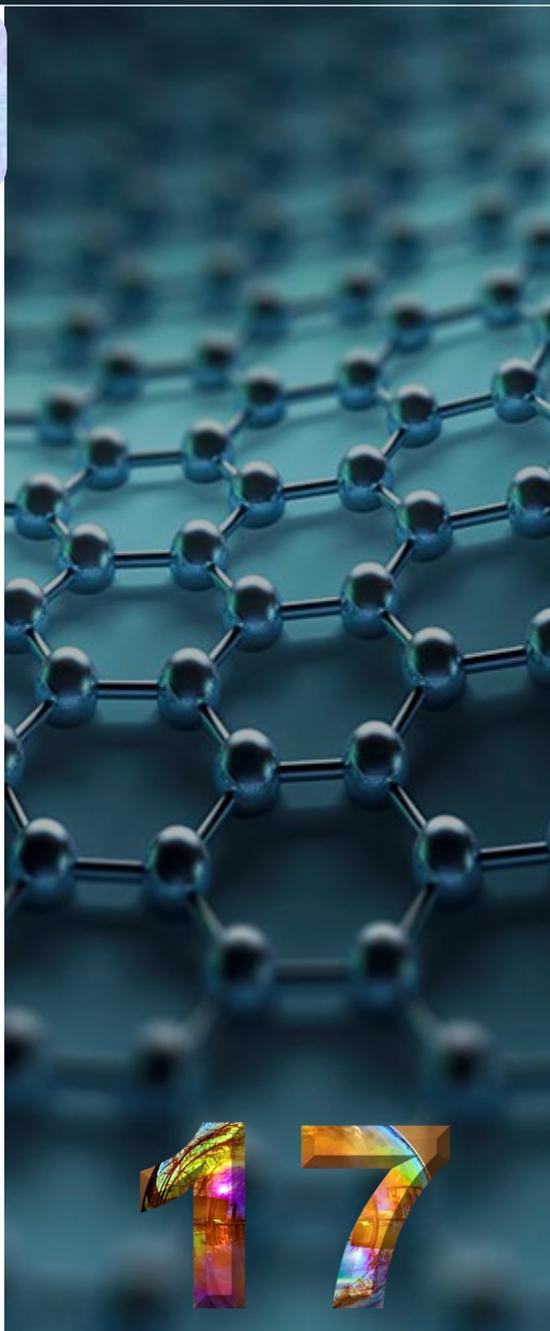
7. Заключение (845).
Список литературы (845).

1. Введение

В настоящем обзоре рассмотрены работы по развитию электроники на основе карбида кремния, значительная часть которых была выполнена в Физико-техническом институте (ФТИ) им. А.Ф. Иоффе. В разделе 2 дается краткий анализ электрофизических свойств SiC и других широкозонных полупроводников с точки зрения создания различных типов приборов. В разделе 3 описаны методы выращивания объёмных кристаллов карбида кремния высокого качества диаметром примерно до 0,1 м, как чистых, так и легированных примесями и обогащённых собственными изотопами. Продемонстрированы возможности контролируемого роста различных полиптинов карбида кремния. Показано, что при латеральном разраствивании затравки можно достичь существенного снижения плотности торчковых дислокаций.

В разделе 4 приведены экспериментальные данные по разработке и исследованию высоковольтных (1–3 кВ) 4H-SiC-диодов для силовой и короткоимпульсной электроники. Показано, что силовые диоды с интегрированной шоттки-(p-n)-структурой (Junction Barrier Schottky — JBS) сочетают малые времена обратного восстановления и малые потери при переключениях. Быстростанавливающиеся лавинные p-n-диоды имеют времена обратного восстановления, сравнимые с таковыми JBS-диодов, и способны рассеивать в режиме лавинных импульсов тока энергию в несколько Дж см⁻². 4H-SiC-диодные размыкатели тока — дрейфовые диоды с резким востановлением — генерируют высоковольтные импульсы с фронтом нарастания в субмикросекундном диапазоне времени.

© А.А. Лебедев, П.А. Иванов, М.Е. Левинштейн, Е.Н. Мохов,
С.С. Нагалюк, А.Н. Анисимов, П.Г. Баранов 2019



ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Двумерные сегнетоэлектрики и однородное переключение.
К 75-летию теории сегнетоэлектричества Ландау–Гинзбурга

В.С. Быстров, В.М. Фридкин

В рамках теории Ландау–Гинзбурга (ЛГ) рассмотрены кинетика переключения поляризации сегнетоэлектрических кристаллов и переход от доменного переключения к однородному в наноразмерных монокристаллических плёнках. Показано, что однородное (бездоменное) переключение может быть описано в рамках теории ЛГ только для двумерных сегнетоэлектриков. Дан обзор экспериментальных результатов для двумерных плёнок сегнетоэлектрического полимера и титаната бария. Для сверхтонких полимерных плёнок эти результаты подтверждаются также расчётами из первых принципов.

Ключевые слова: сегнетоэлектричество, теория Ландау–Гинзбурга–Девоншира, домены, двумерные сегнетоэлектрики, однородное переключение

PACS numbers: 77.55.-g, 77.80.Dj, 77.84.Cg

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.09.038841>

Содержание

1. Введение. Сегнетоэлектричество и теория Ландау–Гинзбурга–Девоншира (1217).
 2. Двумерные сегнетоэлектрики (1218).
 3. Кинетика переключения двумерного сегнетоэлектрика (кинетика Ландау–Халатникова) (1218).
 4. Однородное переключение в двумерном титанате бария (1219).
 5. Переключение поляризации в тонких сегнетоэлектрических полимерных плёнках: расчёты из первых принципов (1221).
 6. Заключение (1223).
- Список литературы (1224).

1. Введение. Сегнетоэлектричество и теория Ландау–Гинзбурга–Девоншира

Сегнетоэлектричеством в русскоязычной научной литературе назвали явление возникновения спонтанной поляризации кристалла (и иного материала), первоначально обнаруженное в сегнетовой соли Валашеком [1, 2] в 1920 г. В 1945 г. были открыты сегнетоэлектрические свойства в

титанате бария (BaTiO₃) (см., например, [3] и ссылки на литературу в [4]). Стало ясно, что такие сегнетоэлектрические свойства могут существовать у всех кристаллов, принадлежащих к 10 точечным шпротэлектрическим группам симметрии. В том же году Гинзбург, а позднее Девоншир развили на основе теории фазовых переходов второго рода Ландау феноменологическую теорию сегнетоэлектричества (теорию среднего поля) [5–7]. Теория Ландау–Гинзбурга–Девоншира (ЛГД) объяснила все основные свойства сегнетоэлектриков, в том числе переключение поляризации во внешнем электрическом поле и петлю гистерезиса. Но оказалось, что эта теория не описывает переключение сегнетоэлектрика, так как предсказывает величину коэрцитивного поля, на 2–3 порядка большую экспериментальной. Это противоречие оставалось невыясненным в течение нескольких лет.

Больше коэрцитивные поля, предсказываемые теорией ЛГД, мы здесь будем называть собственными, а их экспериментальные значения — несобственными. Собственное значение коэрцитивного поля получается в рамках теории среднего поля из разложения термодинамического потенциала по поляризации:

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{\alpha}{2} P^2 + \frac{\beta}{4} P^4 + \frac{\gamma}{6} P^6 - EP, \quad (1)$$

где Φ — термодинамический потенциал, P — спонтанная поляризация, E — внешнее поле. Отсюда следует выражение для собственного коэрцитивного поля E_c :

$$E_c = \frac{P}{\epsilon} f(t), \quad (2)$$

Быстров, В. С. Двумерные сегнетоэлектрики и однородное переключение. К 75-летию теории сегнетоэлектричества Ландау–Гинзбурга / В. С. Быстров, В. М. Фридкин. – DOI: 10.3367/UFNr.2020.09.038841. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190, № 11. – С. 1217-1224 : 9 рис. – Библиогр.: с. 1224 (51 назв.). – ISSN 0042-1294. – eISSN 1996-6652. – Имеется электронная версия: <https://ufn.ru/ru/articles/2020/11/e> (дата обращения: 27.01.2022). – Режим доступа : свободный.

Защитные покрытия с наноразмерной многослойной архитектурой: современное состояние и перспективы / А. Д. Погребняк, М. А. Лисовенко, А. Турлыбекулы, В. В. Буранич. – DOI: 10.3367/UFNr.2020.08.038823. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2021. – Т. 191, № 3. – С. 262–291 : 2 таб., 38 рис. – Библиогр.: с. 289–291 (209 назв.). – ISSN 0042-1294. – eISSN 1996-6652. – Имеется электронная версия: <https://ufn.ru/ru/articles/2021/3/b> (дата обращения: 07.02.2022). – Режим доступа : свободный.

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Защитные покрытия с наноразмерной многослойной архитектурой: современное состояние и перспективы

А.Д. Погребняк, М.А. Лисовенко, А. Турлыбекулы, В.В. Буранич

Рассмотрены бинарные системы (слои) и многокомпонентные слои с различной толщиной слоев — от микрометров до единиц нанометров. Обнаружена сильная зависимость формирования микроструктуры от условий осаждения: величины приложенного к подложке потенциала, потока инертного и реактивного газов, мощности ионного пучка (плотности тока), подаваемого на маску. Сформированы общие закономерности в изменении функциональных свойств и структурного состояния покрытий. Отмечены условия образования стабильной структуры, текстуры роста, а также предложены различные механизмы и их интерпретация. Показана связь размера нанозёрен и диффузии на межфазной границе с эффектами, определяющими физико-механические, трибологические характеристики, а также стойкость к коррозии и окислению.

Ключевые слова: многослойные покрытия, нанокompозиты, структура, твёрдость, износ, коррозия

PACS numbers: 61.46 – w, 62.20.Qr, 62.25 – g, 68.35.Gy

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.08.038823>

Содержание

1. Введение (262).
2. Структура и свойства многослойных бинарных покрытий (263).
 - 2.1. Влияние размера нанозёрен и границ раздела на характеристики покрытий.
 - 2.2. Изменение потенциала и энергии падающих частиц ионно-плазменного потока.
 - 2.3. Переход от микрометровой толщины слоев к наноразмерной.
3. Влияние элементного состава слоев на характеристики покрытий (275).
 - 3.1. Изменение энергетических параметров вакуумно-дугового и магнетронного разряда.
 - 3.2. Влияние остаточного давления на характеристики покрытий.
 - 3.3. Влияние увеличения ширины границ раздела и формирования переходного слоя на свойства многослойных покрытий.

А.Д. Погребняк^(1,2,4), М.А. Лисовенко^(1,3),
А. Турлыбекулы^(2,4), В.В. Буранич^(1,3)

⁽¹⁾ Сумский государственный университет,

ул. Рымского-Корсакова 2, 40007 Сумы, Украина

⁽²⁾ Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, просп. Аль-Фараби 71, 050040 Алматы, Республика Казахстан

⁽³⁾ Materials Science Division, Argonne National Laboratory,

9700 South Cass Ave., Argonne, Illinois, 60439, USA

⁽⁴⁾ Назарбаев университет,

просп. Кабыбай Багырау 53, 010000 Нур-Султан,

Республика Казахстан

E-mail: ⁽¹⁾ alexp@i.ua, ⁽²⁾ v.buranych@pbe.sumdu.edu.ua

Статья поступила 23 января 2020 г.,

после доработки 13 июля 2020 г.

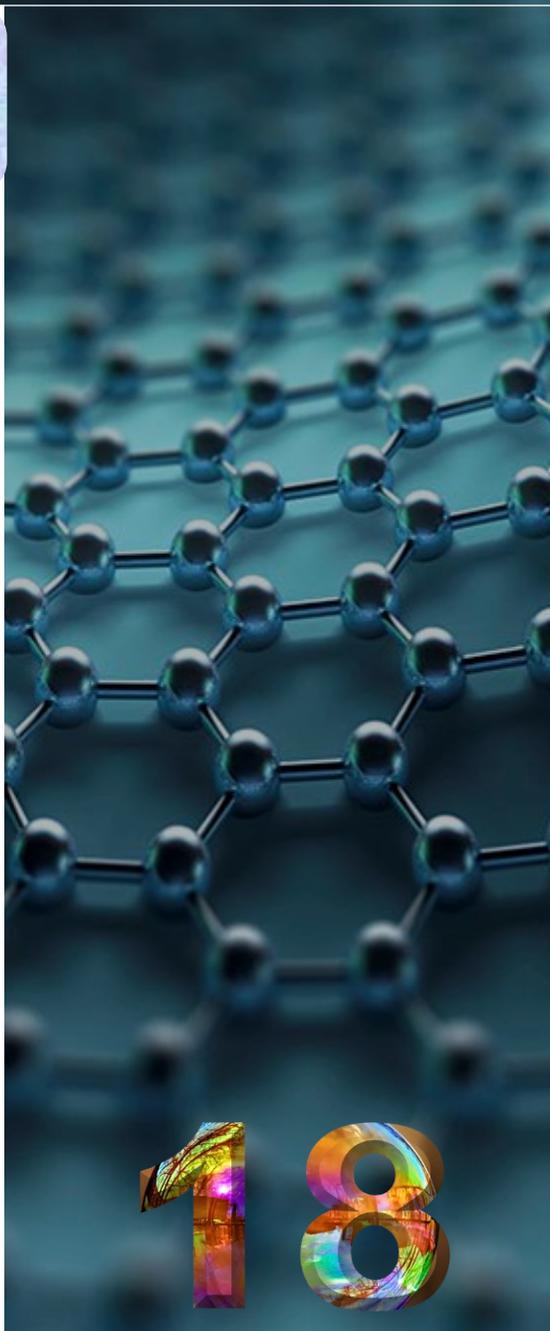
4. Применение многослойных покрытий (281).
 - 4.1. Износ и трение.
 - 4.2. Деформация.
 - 4.3. Высокотемпературное окисление.
 - 4.4. Стойкость к коррозии.
 5. Заключение (288).
- Список литературы (289).

1. Введение

На сегодняшний день одним из перспективных направлений улучшения рабочих характеристик промышленных изделий является модернизация с помощью нанесения покрытий на основе нитридов переходных металлов и интерметаллических соединений. Был предложен вариант перевода таких защитных покрытий в наноструктурное состояние, а также формирование многослойных структур с наноразмерной архитектурой [1–5]. Градиентный характер многослойных структур позволяет выполнять разнообразные функции, такие как увеличение адгезии, повышение стойкости к износу и коррозии и многое другое. Чередование двух и более слоев материала с различными физико-механическими характеристиками позволяет изменять свойства системы, в том числе концентраторов напряжений, влияя на распространение трещин в результате достижения повышенной вязкости разрушения материала [6–15]. Особый интерес представляют многослойные композиции на основе бинарных нитридов TiN/CrN, TiN/MoN, ZrN/CrN, ZrN/MoN, ZrN/AlN.

В литературе, как правило, используются гипотезы и идеи из различных областей естественных наук, а именно физики твердого тела, физического материаловедения, химической физики и физики конденсированного состоя-

© А.Д. Погребняк, М.А. Лисовенко, А. Турлыбекулы, В.В. Буранич 2021



Январь 2021 г.

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Том 191, № 1

ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ

Исследование плёнок моноатомной толщины: современное состояние

К.В. Ларионов, П.Б. Сорокин

Обзор посвящён текущему состоянию исследований в одной из актуальных областей физики и химии двумерных материалов: изучению моноатомных плёнок. Подробно анализируются свойства монокристаллических плёнок атомарной толщины, интенсивно изучаемых в последнее время, таких как двумерные железо, золото, литий, а также силанен, германен, борофен и др. Рассмотрены двумерные плёнки соединений металлов: оксидов железа, меди, цинка, карбидов железа, кобальта, меди и др. Обсуждены подходы к стабилизации плёнок моноатомной толщины в порах или между слоями других двумерных материалов. Описан механизм расщепления плёнок с ионно-ковалентным межатомным взаимодействием с поллярными поверхностями на отдельные слабо связанные слои.

Ключевые слова: двумерные монокристаллические плёнки, графен, железо (Fe), молибден (Mo), золото (Au), литий (Li), силанен, германен, борофен, двумерные плёнки соединений металлов, дисульфид молибдена (MoS₂), оксид цинка (ZnO), оксид меди (CuO), карбид железа (FeC), карбид кобальта (CoC)

PACS numbers: 61.46 – w, 68.90 + g, 81.05.ze

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.03.038745>

Содержание

1. Введение (30).
 2. Монокристаллические плёнки на основе металлов (32).
 3. Монокристаллические плёнки на основе соединений металлов (35).
 - 3.1. Эффект "ионной графитизации".
 - 3.2. 2D монооксиды переходных металлов.
 - 3.3. 2D монокарбиды переходных металлов.
 4. Двумерные плёнки на основе элементов XIII–XVI групп (40).
 - 4.1. Силанен и германен.
 - 4.2. Борофен.
 - 4.3. Двумерные плёнки других элементов XIII–XVI групп.
 5. Заключение (49).
- Список литературы (49).

1. Введение

Изолирование [1] и последующее подробнейшее исследование графена [1–4] показали его значительные перспективы и возможность использования в широкой области технологий, таких как: композиционные материалы,

К.В. Ларионов⁽¹⁾, П.Б. Сорокин⁽²⁾
Надвоинский исследовательский технологический университет "МИСиС",
Ленинский просп. 4, 119049 Москва, Российская Федерация;
Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет),
Институтский пер. 9, 141701 Долгопрудный, Московская обл.,
Российская Федерация
E-mail: ⁽¹⁾ konstantin.larionov@phystech.edu,

низкоразмерные катализаторы, сенсорные экраны, проводящие чернила, электронная бумага, органические светодиодные диоды и т.д. Через 10–20 лет ожидается внедрение транзисторов и других логических устройств на основе графена [5].

Основными препятствиями для широкого использования графена в электронике являются требования к высокому качеству его атомной структуры при синтезе, а также отсутствие запрещённой зоны. Последнее является фундаментальной проблемой, универсальное решение которой до сих пор не найдено. Каждый из предложенных подходов, как, например, функционализация, введение дефектов в структуру или разделение графена на отдельные ленты, имеет свои недостатки [6]. Действительно, химическая адсорбция сторонних атомов на графене приводит к изменению гибридизации атомов углерода с sp² на sp³ с разрушением и-системы, отвечающей за проводимость графена. Предложенный вариант частичной функционализации путём формирования гидрированных [7] или фторированных [8] участков (в качестве предельного случая — формирования отдельных периодически расположенных цепочек водорода [9–11]) решает указанную проблему, поскольку между данными участками в графене открывается запрещённая зона за счёт размерного эффекта. Однако такой способ, несмотря на экспериментальное подтверждение эффекта [12], требует атомарно точной адсорбции атомов, что на данный момент является трудновыполнимой задачей [13].

Ларионов, К. В. Исследование плёнок моноатомной толщины: современное состояние / К. В. Ларионов, П. Б. Сорокин. – DOI: 10.3367/UFNr.2020.03.038745. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 2021. – Т. 191, № 1. – С. 30–51 : 20 рис. – Библиогр.: с. 49–51 (243 назв.). – ISSN 0042-1294. – eISSN 1996-6652. – Имеется электронная версия: <https://ufn.ru/ru/articles/2021/1/c> (дата обращения: 21.02.2022). – Режим доступа : свободный.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.611.3

НЕЛИНЕЙНАЯ ПЕРЕСТРОЙКА СТРУКТУРЫ ДОМЕННЫХ ГРАНИЦ
В ТОНКОЙ ПЛЕНКЕ С ОДНООСНОЙ ПЛОСКОСТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

© 2014 г. М. Н. Дубовик*, **, В. В. Зверев**, Б. Н. Филиппов*, **

*Институт физики металлов УрО РАН, 620990 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

**Уральский федеральный университет, 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

e-mail: dubovik@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 08.05.2014 г.

в окончательном варианте – 09.06.2014 г.

Методом трехмерного компьютерного моделирования исследованы структуры доменных границ в пленках с одноосной плоскостной анизотропией при различных толщинах. Выбраны параметры, характерные для пленок из пермаллоя. Найдено, что при различных значениях толщины пленки стабильными будут одномерные неслесские стенки, стенки с перетяжками, С-образные и S-образные стенки. Получены значения толщины, при которых происходит переход между разными типами стенок. Исследована структура блоховских линий и точек в С-образных и S-образных стенках. Рассчитаны значения топологических зарядов для различных микромагнитных структур.

Ключевые слова: магнитные пленки, микромагнетизм, доменные стенки, стенки с перетяжками, блоховские линии, блоховские точки.

DOI: 10.7868/S0015323014110023

Дубовик, М. Н. Нелинейная перестройка структуры доменных границ в тонкой плёнке с одноосной плоскостной анизотропией / М. Н. Дубовик, В. В. Зверев, Б. Н. Филиппов. – DOI: 10.7868/S0015323014110023. – Текст : непосредственный // Физика металлов и металловедение. – 2014. – Т. 115, № 11. – С. 1226-1244 : 1 таб., 18 рис. – Библиогр.: с. 1243-1244 (51 назв.). – ISSN 0015-3230. – Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22403742> (дата обращения: 27.01.2022). – Режим доступа : свободный.

нитных потерь за цикл перемагничивания от ширины доменов, частоты и амплитудного значения магнитной индукции и др. Пространственное распределение намагниченности в ферромагнетике имеет иерархическую структуру. В то время как ферромагнитный образец разбит на домены с доменными границами между ними, сами эти границы могут состоять из сегментов с различными характеристиками, соединенных некими локализованными микромагнитными переходными структурами (ПС), в частности, блоховскими линиями или блоховскими точками [2]. Наличие таких структур может существенным образом влиять на статические и динамические свойства доменных стенок.

Формирование и динамическое поведение тех или иных пространственных распределений намагниченности подчиняется нелинейным уравнениям теории микромагнетизма (подробнее см. в следующем разделе), что делает локализован-

ного типа. Поскольку устойчивые микромагнитные структуры интересны как возможная основа для создания новых типов магнитной памяти, представляет интерес развитие методов анализа топологических характеристик распределений намагниченности, полученных в процессе теоретического исследования.

С течением времени происходит развитие и уточнение представлений о внутреннем распределении намагниченности в доменных стенках. Сравнительно давно было установлено, что конкуренция различных взаимодействий, влияющих на ориентацию магнитных моментов, может приводить к формированию в составе доменных границ нетривиальных структурных элементов – например, вихревых распределений намагниченности [4, 5]. Это особенно характерно для образцов ограниченных размеров. В настоящее время в центре внимания находятся исследования маг-

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.216.2.537.621

ПРОХОЖДЕНИЕ МИКРОВОЛН
ЧЕРЕЗ МАГНИТНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ НАНОСТРУКТУРЫ

© 2020 г. А. Б. Ринкевич*, **, Е. А. Кузнецов*, **, М. А. Мильев*, **, Л. Н. Ромашев*, **, В. В. Устинов*

*Институт физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

**ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет»,

ул. Машиностроителей, 11, Екатеринбург, 620012 Россия

*e-mail: rin@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 21.07.2020 г.

После доработки 11.08.2020 г.

Принята к публикации 19.08.2020 г.

Рассмотрено проникновение электромагнитных волн дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов через магнитные металлические наноструктуры. Приведена подробная информация о микроволновом гигантском магниторезистивном эффекте. Рассмотрены проявления ферромагнитного и спин-волнового резонансов в прохождении микроволн через наноструктуры.

Ключевые слова: металлические наноструктуры, гигантский магниторезистивный эффект, микроволны

DOI: 10.31857/S0015323020120116

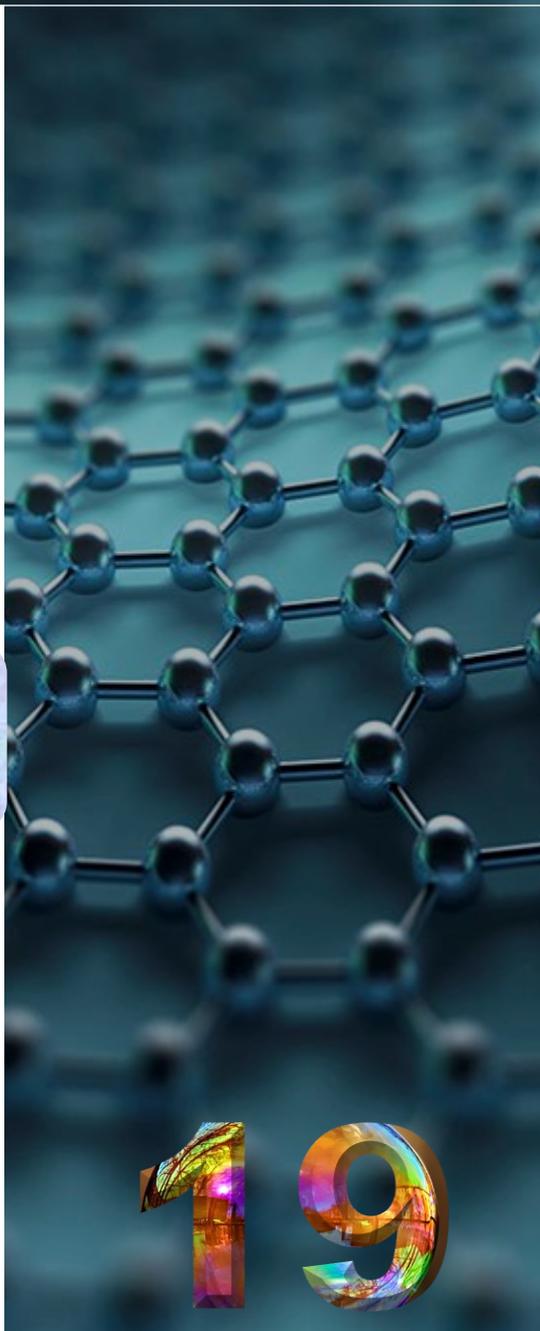
ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие физики металлических наноструктур началось с открытия эффекта гигантского магнитосопротивления [1, 2]. Этот эффект наблюдается в металлических наноструктурах, в которых есть по крайней мере два слоя, магнитные моменты внутри которых ферромагнитно упорядочены. Соседние ферромагнитно упорядоченные слои разделены неферромагнитной прослойкой – спейсером. Толщина спейсера такова, что соседние ферромагнитные слои связаны обменным взаимодействием. В наноструктурах разного типа (сверхрешетках, спиновых клапанах, трехслойных наноструктурах и др.) реализуется различная магнитная структура, которая может управляться магнитным полем. Управление спином электрона в структурах пониженной размерности составляет предмет современной области науки – спинтроники [3–6]. Сильная зависимость электросопротивления металлических наноструктур от магнитного поля быстро нашла практическое применение во многих областях техники, в первую очередь в сенсорах и устройствах магниторезистивной памяти. Поэтому сразу возник вопрос, до каких частот может осуществляться гигантский магниторезистивный эффект (GMR), и может ли он реализовываться в диапазоне микроволн и в оптике? Ответ на эти вопросы был дан в последующих работах. Тот факт, что эффект GMR реализуется на мик-

роволн через наноструктуру, и этот метод оказался очень эффективным. Сам эффект в микроволновом диапазоне частот получил название “микроволновой гигантский магниторезистивный эффект” (μGMR). Эффект GMR наблюдали также на инфракрасном излучении [10]. В этом обзоре мы сосредоточимся, в основном, на спешифике μGMR применительно к дециметровым, сантиметровым и миллиметровым волнам, т.е. к частотам от ~0.5 до ~100 ГГц. Обзор ранних работ по μGMR был опубликован в 2009 г. [11]. С тех пор прошло более десяти лет, в рассматриваемой области появились новые направления и накоплен существенно новый экспериментальный материал.

Структура настоящего обзора такова. Сначала будут изложены результаты исследования межслоевого обменного взаимодействия и “обычного” GMR, т.е. измеряемого на постоянном токе или токе низкой частоты. Затем будут приведены некоторые сведения о выращивании и аттестации металлических наноструктур, об их магнитных и магниторезистивных свойствах. Эти вопросы родственны основной теме обзора, и здесь не дается сколько-нибудь полного их изложения. Цель их обсуждения в обзоре – дать представление об этих проблемах и привести необходимые литературные ссылки. Далее будет раскрыта физика метода прохождения микроволн, будет указано, от каких параметров наноструктур зависит пропускатель-

Прохождение микроволн через магнитные металлические наноструктуры / А. Б. Ринкевич, Е. А. Кузнецов, М. А. Мильев [и др.]. – DOI: 10.31857/S0015323020120116. – Текст : непосредственный // Физика металлов и металловедение. – 2020. – Т. 121, № 12. – С. 1239-1270 : 1 таб., 32 рис. – Библиогр.: с. 1266-1270 (123 назв.). – ISSN 0015-3230. – Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44262575> (дата обращения: 27.01.2022). – Режим доступа : свободный.



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.216.2:537.624

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТООДНООСНЫХ ПЛЕНОК
С КОЛУМНАРНЫМИ ДЕФЕКТАМИ

© 2020 г. Р. М. Вахитов^{a, *}, Р. В. Солонешкий^a, А. А. Ахметова^a

^aБашкирский государственный университет, ул. З. Валиди, 32, Уфа, 450076 Россия

*e-mail: VakhitovRM@Yahoo.com

Поступила в редакцию 09.07.2019 г.

После доработки 18.11.2019 г.

Принята к публикации 26.11.2019 г.

Изучено поведение магнитных скирмионов, образующихся на колумнарных дефектах типа “потенциальная яма” в одноосных ферромагнитных пленках в магнитном поле. Показано, что их структура, которая характеризуется тремя участками вращения магнитных моментов, в магнитном поле претерпевает ряд трансформаций. Найдены критические поля перестройки их структуры, существенно зависящие от параметров дефекта. Выявлено, что при определенных параметрах материала, когда в отсутствие поля вихреподобные неоднородности являются неустойчивыми, они могут стать устойчивыми образованиями в ненулевом поле. Рассмотрены возможные типы магнитных материалов, в которых они могут реализоваться.

Ключевые слова: магнитоодноосная пленка, колумнарный дефект, магнитные скирмионы, процессы перемагничивания

DOI: 10.31857/S0015323020050137

Вахитов, Р. М. Особенности перемагничивания магнитоодноосных плёнок с колумнарными дефектами / Р. М. Вахитов, Р. В. Солонешкий, А. А. Ахметова. – DOI: 10.31857/S0015323020050137. – Текст : непосредственный // Физика металлов и металловедение. – 2020. – Т. 121, № 5. – С. 462-468 : 6 рис. – Библиогр.: с. 467-468 (40 назв.). – ISSN 0015-3230. – Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42635303> (дата обращения: 27.01.2022). – Режим доступа : свободный.

соответствующей 0-градусной доменной границе (0° ДГ) [3, 6]. Они играют важную роль во многих явлениях, происходящих в магнетиках, в том числе в процессах зародышеобразования при спин-переходных фазовых переходах [7, 8], намагничивания и перемагничивания [2, 9, 10] и т.д. Однако в последнее время исследования структуры и свойств магнитных образований на таких дефектах неожиданно приобрели особую актуальность, связанную с тем, что в ряде работ [4, 6, 11, 12] была показана возможность зарождения в магнитоодноосных пленках на колумнарных дефектах [13] магнитных скирмионов (МС) – вихреподобных магнитных неоднородностей, несущих топологический заряд. К этим солитоноподобным структурам исследователи проявляют возрастающий интерес, что связано с их уникальными спин-электронными свойствами [14–19], которые могут быть использованы при создании устройств многоуровневой логики и магнитной памяти нового поколения. Необыч-

многослойных пленках Co/Pt [5, 14]. Кроме того, есть определенные свидетельства их наблюдения на дефектах пленок ферритов-гранатов [6], а также в пленках аналогичного класса при локальном воздействии на них импульсного лазерного облучения [22] или неоднородного электрического поля [23]. В последнем случае в области взаимодействия поля с поверхностью пленки были обнаружены заряженные цилиндрические магнитные домены, которые, как известно [21], топологически идентичны МС. Приведенные экспериментальные результаты указывают на существование альтернативных способов стабилизации скирмионных состояний вектора намагниченности M в некоторых материалах. К ним, в частности, относятся неоднородные магнитные пленки, которые имеют возможно большие перспективы быть использованными в устройствах магнитной памяти нового поколения [24], чем киральные магнетики [25, 26]. В то же время существует необходимость дальнейших исследований структуры и свойств



ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 539.216.2:537.622.4

ГИСТЕРЕЗИС ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ
В ДВУХСЛОЙНОЙ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПЛЕНКЕ
ПРИ ВИХРЕВОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ НАМАГНИЧЕННОСТИ

© 2020 г. Н. В. Шульга^{a, b, *}, Р. А. Дорошенко^a

^aИнститут физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН, пр. Октября, 151, Уфа, 450075 Россия

^bФГБОУ ВО Башкирский государственный медицинский университет Минздрава России,

ул. Ленина, 3, Уфа, 450008 Россия

*e-mail: shulga@anrb.ru

Поступила в редакцию 17.12.2019 г.

После доработки 28.01.2020 г.

Принята к публикации 31.01.2020 г.

Численно исследован гистерезис электрической поляризации двухслойной обменно-связанной ферромагнитной пленки, слои которой обладают анизотропией типа “легкая плоскость” и “легкая ось” при перемагничивании. Перемагничивание осуществляли магнитным полем, перпендикулярным плоскости пленки, из состояния насыщения вдоль оси легкого намагничивания. Построены зависимости средней электрической поляризации от напряженности внешнего магнитного поля, а также соответствующие зависимости приведенной намагниченности слоев пленки. Обнаружена возможность перескока в магнитном поле знака электрической поляризации в пленках, толщина которых меньше поперечных размеров. В более толстых пленках при перемагничивании не наблюдается изменения знака поляризации.

Ключевые слова: двухслойная ферромагнитная пленка, неоднородный магнитоэлектрический эффект, электрическая поляризация, гистерезис

DOI: 10.31857/S0015323020060133

ВВЕДЕНИЕ

Исследование условий возникновения электрической поляризации на вихревой магнитной структуре представляет научный и практический интерес. Магнитные неоднородности в виде статических вихрей, образующиеся при различных условиях в ферромагнитных наноразмерных тонких пленках, могут использоваться как в быстро развивающейся области высокоплотных носителей информации [1], так и в устройствах спинтроники [2]. Магнитный вихрь с ядром нанометрового размера описывается двумя топологическими величинами [3, 4]. Одной из них является хиральность, т.е. направление вращения магнитного момента в плоскости по часовой стрелке, либо против нее. Другая величина – это поляризация, которая определяется направлением выхода намагниченности из плоскости вихря в его ядре вверх или вниз.

Важной задачей является изучение условий возникновения вихревой структуры, а также возможностей управления ее состояниями [5]. За-

Свойства вихря зависят также от формы и размера образца, на котором она формируется, и истории намагничивания образца [10].

Переключение между описанными состояниями вихря может осуществляться различными способами, в том числе, при проявлении неоднородного магнитоэлектрического эффекта [11], электрическим полем [12]. Исследование особенностей электрической поляризации на магнитных неоднородностях в пленках ферритов-гранатов привлекает определенный интерес [13–15]. Условия возникновения поляризации на магнитной неоднородности вблизи межслойной границы аналогичной пленки феррита-граната были исследованы в работе [16] в предположении, что ее поперечные размеры много больше толщины, а намагниченность в плоскости пленки распределена однородно.

В данной статье численно исследованы особенности электрической поляризации пленки, возникающие на вихревой неоднородности двухслойной пленки феррита-граната при перемагни-

Шульга, Н. В. Гистерезис электрической поляризации в двухслойной ферромагнитной плёнке при вихревом распределении намагниченности / Н. В. Шульга, Р. А. Дорошенко. – DOI: 10.31857/S0015323020060133. – Текст : непосредственный // Физика металлов и металловедение. – 2020. – Т. 121, № 6. – С. 583-588 : 5 рис. – Библиогр.: с. 588 (18 назв.). – ISSN 0015-3230. – Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42809478> (дата обращения: 27.01.2022). – Режим доступа : свободный.

06.11.13

О неоднородных поляризованных состояниях вблизи точки фазового перехода в тонкой сегнетоэлектрической пленке

© В.Н. Нечаев, А.В. Шуба

Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, Россия

E-mail: shandvit@rambler.ru

(Поступила в Редакцию 10 января 2018 г.)

В окончательной редакции 27 января 2018 г.)

В рамках феноменологической теории фазовых переходов Ландау показано, что в тонкой сегнетоэлектрической пленке возможен фазовый переход в неоднородную полярную фазу, по температуре предшествующий фазовому переходу в однородное полярное состояние. В результате решения краевой задачи на собственные значения для уравнения равновесия поляризации и уравнений электростатики определен волновой вектор k_{\perp} , характеризующий неоднородную фазу, и установлены температурные границы ее существования в зависимости от толщины пленки и свойств поверхности.

DOI: 10.21883/FTT.2018.07.46117.002

1. Введение

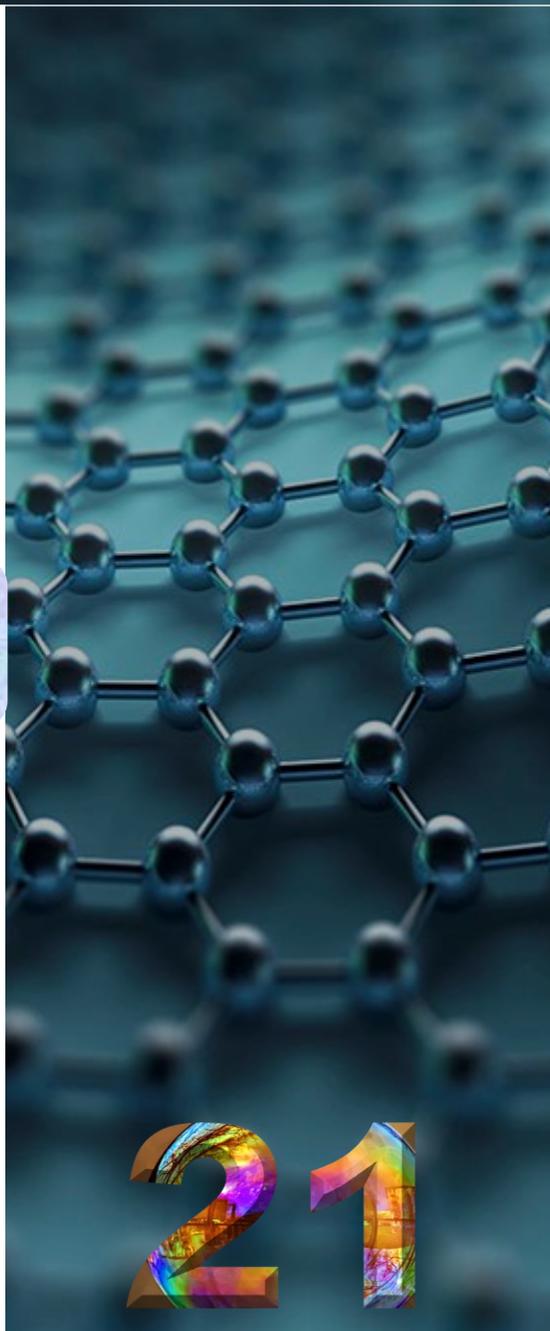
Нечаев, В. Н. О неоднородных поляризованных состояниях вблизи точки фазового перехода в тонкой сегнетоэлектрической пленке / В. Н. Нечаев, А. В. Шуба. – DOI: 10.21883/FTT.2018.07.46117.002. – Текст : непосредственный // Физика твердого тела. – 2018. – Т. 60, № 7. – С. 1322-1327 : 3 рис. – Библиогр.: с. 1326-1327 (22 назв.). – ISSN 0367-3294. – Имеется электронная версия: <https://journals.ioffe.ru/articles/46117> (дата обращения: 26.01.2022). – Режим доступа : свободный.

В работе [4] путем численных расчетов для нелинейной задачи обнаружено, что в нанокompозитных материалах с сегнетоэлектрическими выделениями при определенных условиях возможно образование неоднородных «доменоподобных» состояний. Отмечено, что в тонкой сегнетоэлектрической пленке при фазовом переходе также возможно появление пространственно-модулированного состояния [5]. Использование термина «доменоподобное» для характеристики неоднородного состояния связано с тем, что в отличие от обычной доменной структуры в этом случае нет четких границ, разделяющих полярные области. Существование неоднородного состояния в ограниченном температурном интервале вблизи точки Кюри, а также его поведение во внешнем электрическом поле, сопряженном параметру порядка [4], больше напоминает свойства несоизмерных фаз в сегнетоэлектриках [6], чем известных доменных структур. Отметим, что ранее в работе [7] при моделировании свойств сегнеторезакторов теоретически был предсказан фазовый переход в неоднородное состояние, с верным типом распределения поляризации по объему, в многослойных сегнетоэлектриках.

Поясним, что понимается под неоднородными состояниями применительно к пленкам, поскольку в образце ограниченных размеров параметр порядка всегда зависит от близости к поверхности раздела, то есть от

координат. Если среднее значение параметра порядка по толщине пленки зависит от этих координат, то состояние при фазовом переходе второго рода из параэлектрической фазы в сегнетоэлектрическую в зависимости от толщины пленки и свойств ее поверхности. Необходимым условием существования неоднородных «доменоподобных» состояний, как показано в работе [4], является возникновение при фазовом переходе дальнедействующих электрических полей. Чувствительность задачи к учету электростатических деполаризующих полей делает актуальным нахождение точного решения для поляризации P . Как правило, в исследованиях свойств тонких сегнетоэлектрических пленок или нанокompозитов с сегнетоэлектрическими выделениями используются различные приближения для учета электростатических деполаризующих полей [8–11]. Так в работах [8–10] применялся прямой вариационный метод Ритца, в [11] деполаризующее поле E_d аппроксимировалось формулой $E_d = -(P - P_{\text{mean}})/\epsilon$, где P_{mean} — средняя по толщине пленки поляризация, ϵ — диэлектрическая проницаемость.

Альтернативой таким подходам для нанокompозитов может являться численный метод, где необходимая точность всегда может быть достигнута путем увеличения количества итераций [4]. В случае сегнетоэлектрических тонких пленок, как показано в настоящей работе, возможно без каких-либо допущений аналитически получить решение задачи вплоть до итоговых формул, которые анализируются численно. Заметим, что аналогичная



УДК 537.611.3:539.216.2

Дубовик М.Н., Филиппов Б.Н., Корзунин Л.Г.

АСИММЕТРИЧНЫЙ ПИННИНГ ВИХРЕВЫХ ДОМЕННЫХ ГРАНИЦ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ С ПЛОСКОСТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ И НЕОДНОРОДНОСТЬЮ НАМАГНИЧЕННОСТИ НАСЫЩЕНИЯ

Исследован асимметричный пиннинг вихревых доменных стенок, существующих в ферромагнитных пленках с плоскостной анизотропией. В качестве центров закрепления доменной границы выступали области с пониженным или повышенным значением намагниченности насыщения. Использовалось численное микроматричное моделирование в двухмерной модели распределения намагниченности. Установлена связь асимметричного пиннинга с асимметричной структурой вихревой доменной границы.

Ключевые слова: вихревые доменные границы, пиннинг доменных границ, микроматричное моделирование.

Asymmetrical pinning was investigated of the vortex domain walls existing in ferromagnetic films with in-plane anisotropy. The domain wall pinning centers were the areas with increased or decreased saturation magnetization. Numerical micromagnetic simulation was employed using two-dimensional magnetization distribution model. The asymmetrical pinning relation to the vortex domain wall asymmetrical structure was stated.

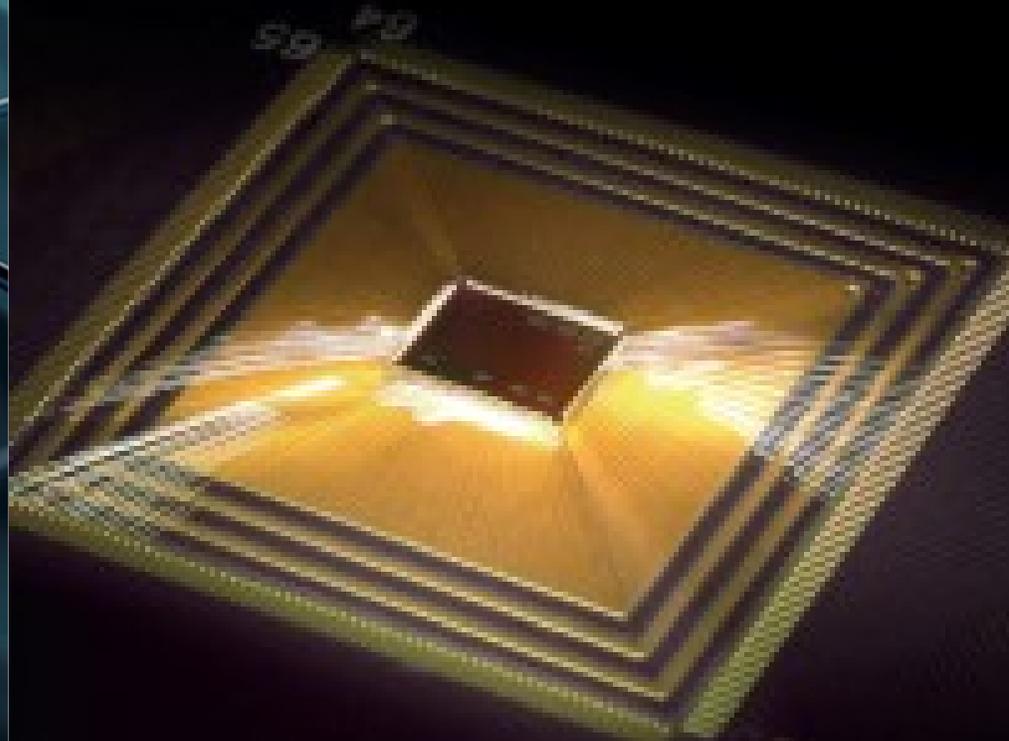
Keywords: vortex domain walls, domain wall pinning, micromagnetic simulations.

Введение

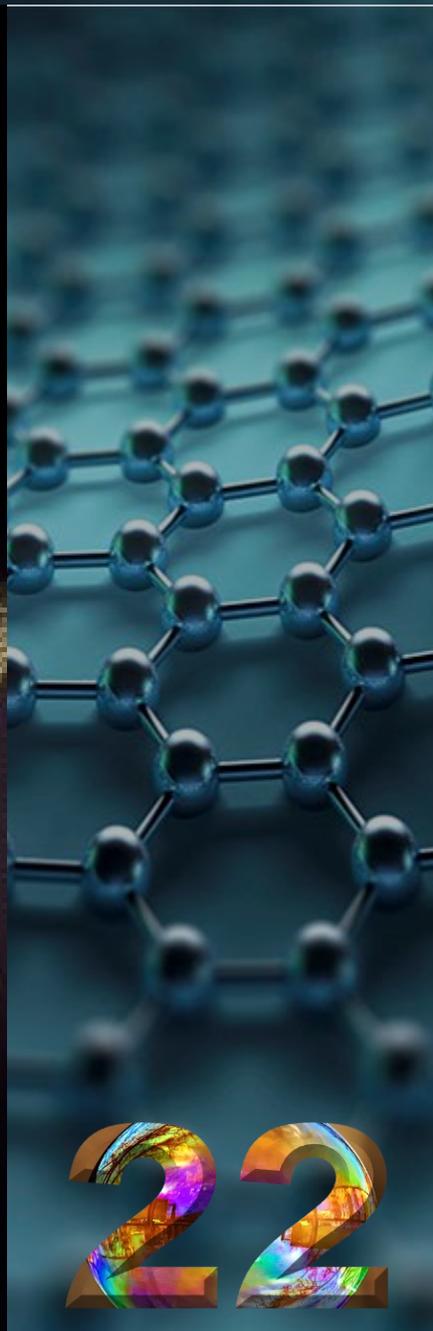
Обладая актуальностью, связанной с описанием природы практически важных характеристик магнитных материалов, задачи по взаимодействию доменных границ (ДГ) с дефектами (пустотами, магнитными и немагнитными включениями, дислокациями и др.) решались достаточно давно [1, 2] и продолжают решаться сейчас [3, 4]. Однако чаще всего при этом используются одномерные модели распределения намагниченности в доменной границе. Учет лишь одномерной модели распределения намагниченности M является приемлемым приближением для образцов большого объема, когда можно не учитывать поверхностные эффекты. Однако сегодня большую актуальность имеет изучение наноразмерных объектов, в частности, тонких пленок и наностримеров. В таких объектах поверхностные эффекты играют существенную роль, и поэтому зачастую требуется использовать двух- и трехмерные модели распределения M . Проведенные на основе та-

вышенными значениями намагниченности насыщения M_s и константы одноосной анизотропии K . Было исследовано закрепление («пиннинг») вихревой доменной границы [6, 7] на неоднородностях указанного типа и обнаружено явление асимметричного пиннинга ДГ. Величины полей отрыва закрепленной ДГ оказались различными при включении внешнего поля в противоположных направлениях вдоль оси легкого намагничивания. Кроме того, в [5] была впервые теоретически установлена зависимость результата взаимодействия движущейся ДГ с неоднородностью магнитных параметров (прохождение стеной неоднородности или отражение от нее) от расстояния между ДГ и неоднородностью в момент включения внешнего поля. В совокупности данные [5] позволяют по-новому взглянуть на природу коэрцитивной силы при учете реальной структуры ДГ и ее нелинейного динамического поведения. Однако необходимы дальнейшие исследования. В частности, следует выяснить вклад в полученные результаты каждого из магнитных параметров в зависимости от их соотношения с параметрами

Дубовик, М. Н. Асимметричный пиннинг вихревых доменных границ в тонких пленках с плоскостной анизотропией и неоднородностью намагниченности насыщения / М. Н. Дубовик, Б. Н. Филиппов, Л. Г. Корзунин. – Текст : непосредственный // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2015. – Т. 12, № 4. – С. 408-413 : 1 таб., 3 рис. – Библиогр.: с. 412-4138 (11 назв.). – ISSN 1811-1416. – Имеется электронная версия: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25025463> (дата обращения: 02.02.2022). – Режим доступа : свободный.



Memristors and CMOS
take AI to the edge



Van der Waals thin-film electronics

Zhaoyang Lin¹, Yu Huang^{2,3} and Xiangfeng Duan^{1,3*}

The development of emerging applications based on large-area flexible and wearable devices requires solution-processable thin-film electronics. Organic semiconductors can be processed in solution, but typically suffer from relatively low performance and insufficient stability in ambient conditions. Inorganic nanostructures, however, can be processed in solution while retaining the excellent electronic performance and structural stability of crystalline inorganic materials. In particular, a range of two-dimensional inorganic nanosheets can be dispersed in various solvents as stable colloidal inks. These nanosheets can be assembled into continuous thin films in which neighbouring sheets interact via van der Waals forces with few interfacial trapping states. The resulting tiled nanosheets, which we term two-dimensional van der Waals thin films, offer significant potential in thin-film electronics. Here we explore the development of van der Waals thin films and their use in high-performance large-area electronics. We examine the formulation of the nanosheet inks and their scalable assembly into van der Waals thin films and devices. We also consider their application in large-area wearable electronics and the challenges that exist in delivering practical devices.

For over half of century, the development of silicon microelectronics has followed Moore's law and advanced at an exponential rate. This has led to remarkable increases in computing power and, at the same time, dramatic reductions in manufacturing cost, highlighted by the evolution of the central processing unit for computers. Large-area electronics, in which electronic compo-

sitioning is the typical process required to produce high-quality inorganic crystalline semiconductor thin films. To this end, the solution-processable organic semiconductors offer an appealing path to semiconductor thin films on flexible substrates using low-temperature processes such as spin coating, screen printing or inkjet printing. In addition, the solution-based processes are generally suitable

Lin, Z. Y. Van der Waals thin-film electronics / Z. Y. Lin, Y. Huang, X. F. Duan. – DOI: 10.1038/s41928-019-0301-7. – Текст : непосредственный // Nature Electronics. – 2019. – Vol. 2, Iss. 9. – P. 378-388 : 5 Fig. – Bibliogr. P. 386-388 (92 ref.). – ISSN 2520-1131. – Имеется электронная версия: <https://www.nature.com/articles/s41928-019-0301-7> (дата обращения: 02.03.2022). – Режим доступа : по подписке СГУ.

high carrier mobility, but can only be produced in limited substrate sizes, which are too small for large-area electronics, and at relatively high cost. Large-area electronics today mostly rely on amorphous silicon thin films that can be applied over large-area substrates. However, these offer only limited electronic performance or switching speed for low-end electronic applications, such as pixel drivers in flat-panel displays, image sensor arrays and digital X-ray imagers¹⁻³. Polycrystalline silicon thin-film transistor (TFT) technology could enable large-area, integrated device arrays with improved performance and higher switching speed, but requires a moderate temperature process (> 500 °C) and can only be processed on rigid (such as glass) or thermal-tolerant substrates. To deliver emerging applications in flexible and wearable electronics, such as next-generation displays, electronic paper and health monitoring systems, higher-performance macroelectronics are required that can be integrated on flexible plastic substrates with sufficient performance to deliver the necessary computation, storage and communication functions.

Low-temperature fabrication of high-performance electronics on plastic is fundamentally challenging because all material processing steps must be carried out below the glass transition temperature of the plastic substrates (<300–400 °C), which is often not compatible

with the typical process required to produce high-quality inorganic crystalline semiconductor thin films.

Over the past two decades, solution-dispersible inorganic nanostructures have emerged as a unique class of materials that can be processed like organic materials in solution while simultaneously retaining the excellent electronic performance and structural stability of crystalline inorganic materials for high-performance electronics^{4,10}. With reduced dimension(s) at the nanoscale, inorganic materials that usually have an extended ionic or covalent bond framework can be well dispersed in proper solvents, allowing for solution processing like organic molecular materials. By anisotropic dimensions, the nanostructures are typically classified into three categories: zero-dimensional (0D; quantum dots, clusters), one-dimensional (1D; nanowires, nanotubes) and two-dimensional (2D; nanosheets, nanoplates).

Zero-dimensional nanostructures refer to nanocrystals with all three dimensions measured at the nanometre scale. Semiconductor nanocrystals or quantum dots represent the most studied 0D nanostructures for thin-film electronics. A wide range of electronic devices, including field-effect transistors, light-emitting diodes and solar cells, have been fabricated from colloidal quantum dots (such as CdSe or PbSe) or 0D molecular semiconductor precursors¹⁰⁻¹². However, with the intrinsically nanometre-scale dimensions of

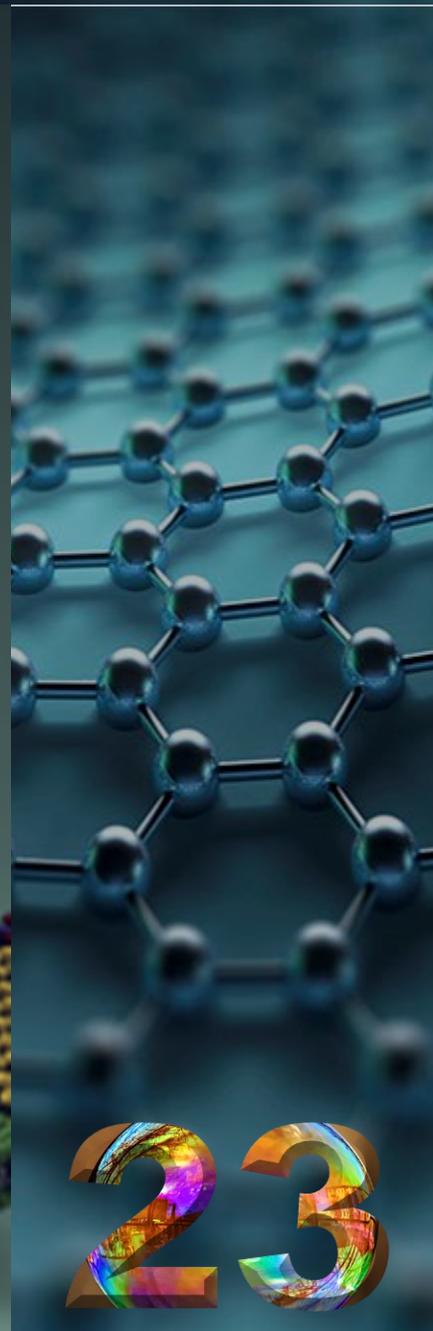
¹Department of Chemistry and Biochemistry, University of California, Los Angeles, Los Angeles, CA, USA. ²Department of Materials Science and Engineering, University of California, Los Angeles, Los Angeles, CA, USA. ³California NanoSystems Institute, University of California, Los Angeles, Los Angeles, CA, USA. *e-mail: xduan@chem.ucla.edu

Computational quest for 2D materials

ENVIRONMENTAL NANOTECHNOLOGY
Interacting with the community

ACHROMATIC METALENSSES
Visible images

NEUROMODULATION
Wireless excitement



Two-dimensional materials from high-throughput computational exfoliation of experimentally known compounds

Nicolas Mounet^{1*}, Marco Gibertini¹, Philippe Schwaller¹, Davide Campi¹, Andrius Merkys^{1,2}, Antimo Marrazzo¹, Thibault Sohier¹, Ivano Eligio Castelli¹, Andrea Cepellotti¹, Giovanni Pizzi¹ and Nicola Marzari^{1*}

Two-dimensional (2D) materials have emerged as promising candidates for next-generation electronic and optoelectronic applications. Yet, only a few dozen 2D materials have been successfully synthesized or exfoliated. Here, we search for 2D materials that can be easily exfoliated from their parent compounds. Starting from 108,423 unique, experimentally known 3D compounds, we identify a subset of 5,619 compounds that appear layered according to robust geometric and bonding criteria. High-throughput calculations using van der Waals density functional theory, validated against experimental structural data and calculated random phase approximation binding energies, further allowed the identification of 1,825 compounds that are either easily or potentially exfoliable. In particular, the subset of 1,036 easily exfoliable cases provides novel structural prototypes and simple ternary compounds as well as a large portfolio of materials to search from for optimal properties. For a subset of 258 compounds, we explore vibrational, electronic, magnetic and topological properties, identifying 56 ferromagnetic and antiferromagnetic systems, including half-metals and half-semiconductors.

Two-dimensional (2D) materials provide opportunities to venture into largely unexplored regions of the materials space. On the one hand, their ultimate thinness makes them extremely promising for applications in electronics^{1,2}. On the other, the physical properties of monolayers often change dramatically from those

screening materials without having to synthesize them first^{16–20}. For instance, these techniques have been successfully employed in the search for materials for Li–air and Li-ion batteries^{21,22}, for hydrogen storage²³, scintillators²⁴, electrocatalysts²⁵, or to accelerate the discovery of light-absorbing materials²⁶.

Two-dimensional materials from high-throughput computational exfoliation of experimentally known compounds / N. Mounet, M. Gibertini, P. Schwaller [et al.]. – DOI: 10.1038/s41565-017-0035-5. – Текст : непосредственный // Nature Nanotechnology. – 2018. – Vol. 13, No 3. – P. 246–252 : 2 Tab., 4 Fig. – Bibliogr. P. 251 (51 ref.). – ISSN 1748-3395 (online). – ISSN 1748-3387 (print). – Имеется электронная версия: <https://www.nature.com/articles/s41565-017-0035-5> (дата обращения: 07.02.2022). – Режим доступа : по подписке СГУ.

(both crystal structures and measured physical properties) has been collected in databases such as the Pauling file³, the Inorganic Crystal Structure Database⁴ (ICSD) or the Crystallographic Open Database⁵ (COD) (the latter two combined contain, to date, over half a million entries). In comparison, 2D materials databases are still scarce and limited in size: a first scan of the ICSD identified 92 2D compounds⁶ (including Cu₂S, subsequently synthesized⁷). This was followed by 103 compounds selected among specific classes⁸, while a recent study focused on transition-metal dichalcogenides and oxides, identifying 51 of them as stable¹¹. More extensive efforts^{12,13} have also been put forward to expand the set of prospective 2D materials by screening crystal structures from the Materials Project¹⁴. In fact, high-throughput computational methods represent a powerful tool¹⁵ for exploring materials space and for

held together by weak interactions and are ready for mechanical²⁷ or liquid-phase²⁸ exfoliation. This results in a portfolio of 1,825 materials that can be exfoliated in monolayers or multilayers. To showcase their potential, we explore the electronic, vibrational, magnetic and topological properties of 258 of the most promising systems, disclosing a number of functional materials that can be studied experimentally, notably including 56 magnetically ordered monolayers.

The reproducibility of all results is ensured by the deployment of the AiIDA²⁹ materials' informatics infrastructure, which keeps track of the full provenance of each calculation and result.

Identification of layered compounds

The search protocol starts from a comprehensive initial set of bulk 3D crystal structures extracted from the ICSD⁴ and COD⁵ databases,

¹Theory and Simulation of Materials (THEOS) and National Centre for Computational Design and Discovery of Novel Materials (MARVEL), École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland. ²Vilnius University Institute of Biotechnology, Vilnius, Lithuania. *e-mail: nicolas.mounet@polytechnique.org; nicola.marzari@epfl.ch

A scientist counts calories to make sense of human evolution pp. 710

Ordinary bilayer graphene is superconducting pp. 719 & 774

New insights on the peopling of the Americas p. 727

Science

\$15
18 FEBRUARY 2022
science.org



QUICK RELEASE

How lizards rapidly shed their tails to escape predators pp. 721 & 770



RESEARCH

2D MATERIALS

Isospin magnetism and spin-polarized superconductivity in Bernal bilayer graphene

Haoxin Zhou¹, Ludwig Holleis¹, Yu Saito¹, Liam Cohen¹, William Huynh¹, Caitlin L. Patterson¹, Fangyuan Yang¹, Takashi Taniguchi², Kenji Watanabe³, Andrea F. Young^{2*}

In conventional superconductors, Cooper pairing occurs between electrons of opposite spin. We observe spin-polarized superconductivity in Bernal bilayer graphene when doped to a saddle-point van Hove singularity generated by a large applied perpendicular electric field. We observe a cascade of electrostatic gate-tuned transitions between electronic phases distinguished by their polarization within the isospin space defined by the combination of the spin and momentum-space valley degrees of freedom. Although all of these phases are metallic at zero magnetic field, we observe a transition to a superconducting state at finite magnetic field $B_{\perp} \approx 150$ milliteslas applied parallel to the two-dimensional sheet. Superconductivity occurs near a symmetry-breaking transition and exists exclusively above the B_{\perp} limit expected of a paramagnetic superconductor with the observed transition critical temperature $T_c \approx 30$ millikelvins, consistent with a spin-triplet order parameter.

Spin-triplet superconductors are rare in nature. This scarcity is traceable, at least in part, to the inapplicability of Anderson's theorem (1), which renders conventional superconductors immune to disorder. Realizing spin-triplet superconductivity therefore places stringent bounds on materials' quality. Experimentally, one of the most notable manifestations of triplet superconductivity is resilience to applied magnetic fields, which may exceed the limit set by comparing the Zeeman energy with the superconducting gap (2, 3). Prominent examples of candidate spin-triplet superconductors observed to violate this limit include uranium-based compounds (4), such as URhGe (5) and UTe₂ (6). Recently, graphene-based, two-dimensional materials have emerged as a platform for superconductivity (7–11). In particular, two varieties of graphene trilayer—one rotationally faulted (12) and one in a metastable rhombohedral stacking order (13)—have shown superconducting states that persist above the paramagnetic limit (2, 3), suggestive of a spin-triplet order parameter. However, neither of these materials represents a structural ground state. Rotationally faulted structures are generally unstable, which limits sample uniformity and, consequently, reproducibility (13). Rhombohedral stacking orders, meanwhile, are only metastable, which allows uniform

more-complex devices making use of the array of gate-tuned phases available in these materials.

Here, we report magnetic field-induced superconductivity in Bernal bilayer graphene (BBG); the crystal structure is shown in Fig. 1A. Bilayer graphene has been the subject of hundreds of experimental studies since its original experimental description in 2006 (14). However, prior explorations of electron correlation physics have focused on instabilities of the parabolic band touching that occurs in the absence of an applied displacement field (15–16). When a perpendicular electric displacement field (D) is applied, the parabolic band touching is replaced by a bandgap (Fig. 1B), with van Hove singularities characterized by divergent single-particle density of states appearing near the band edge. Energy bands and associated single-particle density of states calculated within a four-band tight-binding model (19) are plotted in Fig. 1, B and C. Figure 1D shows the calculated density of states and select Fermi contours at an interlayer potential difference of 50 meV, corresponding (20) to $D \approx 0.5$ V nm⁻¹. A van Hove singularity occurs at a carrier density of $n_e \approx -0.5 \times 10^{12}$ cm⁻², where three low-density Fermi pockets merge into an annulus. Our choice of tight-binding parameters, derived from numerical band structure modeling (20), has not been quantitatively

field D are controlled by single-crystal graphite top and bottom gates (23) (fig. S1). We report data from two devices that show nearly identical behavior. Data shown in the main text are from device A, and data from device B are shown in fig. S11 (24).

Figure 1E shows inverse electronic compressibility $\kappa = \partial n_e / \partial n_e$ (23, 25) measured for small-hole doping. A series of transitions are visible as dips in the inverse compressibility, accompanied by concomitant sharp changes in the electrical resistivity (see fig. S2 for additional data). High-resolution quantum oscillation data as a function of the perpendicular magnetic field B_{\perp} show that these features are associated with changes in the Fermi surface topology linked to breaking of the spin and valley symmetries. Figure 1F shows the Fourier transform of the magnetoresistance (see fig. S3 for additional data), $R(1/B_{\perp})$ (where B_{\perp} is the out-of-plane magnetic field), measured at different (n_e, D) points indicated in Fig. 1E. Fourier transforms are plotted as a function of the oscillation frequency normalized to the total carrier density, which we denote as f_{ν} . f_{ν} corresponds to the fraction of the Luttinger volume encircled by the phase coherent orbit that generates a given oscillation peak. To determine Luttinger volume, we use the geometric capacitance per unit area of the top and bottom gates (α and α_b) and the spectroscopically determined (16) bandgap of bilayer graphene (Δ) to calculate the carrier density n_e . Accounting for the finite bandgap, the system will be doped with holes when $\frac{2\alpha_b + \alpha\Delta}{\alpha + \alpha_b} < -\frac{\Delta}{2}$ (where α_b and α are the bottom and top gate voltages and e is the elementary charge). Then, $n_e = \alpha\alpha_b + \alpha_b\nu_0 + \frac{(\alpha + \alpha_b)\Delta}{4}$. At large negative n_e , a prominent peak is visible at $f_{\nu} = 0.25$, along with associated harmonics. This is consistent with four identical Fermi surfaces, each enclosing one quarter of the Luttinger volume, as expected for a state that preserves the four-fold combined spin and valley degeneracy of the honeycomb lattice (see bottom right of Fig. 1F for a schematic depiction, with spin and valley flavors rendered in different colors). We refer to this symmetric phase as Sym₀. At low densities and high D , by contrast, the strongest peak occurs at $f_{\nu} = 1/12$. This is again consistent with intact isospin symmetry but in the regime of density where trigonal warping

Isospin magnetism and spin-polarized superconductivity in Bernal bilayer graphene / H. Zhou, L. Holleis, Y. Saito [et al.]. – DOI: 10.1126/science.abm8386. – Текст : непосредственный // Science. – 2022. – Vol. 375, Iss. 6582. – P. 774-778 : 4 Fig. – Bibliogr.: P. 778 (49 ref.). – ISSN 0036-8075. – Имеется электронная версия: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abm8386> (дата обращения: 20.02.2022). – Режим доступа : по подписке СГУ.

¹Kelowna Center for Functional Materials, National Institute for Materials Science, 1-1 Namiki, Tsukuba 305-0044, Japan.
²Corresponding author. Email: andrea@physics.ucsb.edu
³Present address: Department of Applied Physics and Material Science, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA

bility. Our devices consist of a BBG channel encapsulated in single-crystal hexagonal boron nitride gate dielectrics in which the charge carrier density n_e and electrical displacement

$f_{\nu} = 1$ and corresponds to a quarter Fermi surface with a single, fully isospin-polarized metal surface (we denote this isospin ferromagnet IF₁). Adjoining IF₁ is a phase with a strong peak

Finland's 100,000-year tomb
for nuclear waste p. 806

Machine learning tackles
antibiotic resistance pp. 818 & 889

Michelson & Science Prize highlights
autoantibodies in COVID-19 p. 829

Science

\$15
25 FEBRUARY 2022
science.org



GORDON RESEARCH CONFERENCES

Neural development,
computational materials
science, immunoengineering,
and more p. 900



RESEARCH

NANOMATERIALS

Highly stretchable van der Waals thin films for adaptable and breathable electronic membranes

Zhuocheng Yan¹, Dong Xu², Zhaoyang Lin¹, Peiqi Wang¹, Bocheng Cao¹, Huaying Ren¹, Frank Song¹, Chengzhang Wan¹, Laiyuan Wang², Jingxuan Zhou², Xun Zhao³, Jun Chen³, Yu Huang^{2,4*}, Xiangfeng Duan^{1,4*}

The conformal integration of electronic systems with irregular, soft objects is essential for many emerging technologies. We report the design of van der Waals thin films consisting of staggered two-dimensional nanosheets with bond-free van der Waals interfaces. The films feature sliding and rotation degrees of freedom among the staggered nanosheets to ensure mechanical stretchability and malleability, as well as a percolating network of nanochannels to endow permeability and breathability. With an excellent mechanical match to soft biological tissues, the freestanding films can naturally adapt to local surface topographies and seamlessly merge with living organisms with highly conformal interfaces, rendering living organisms with electronic functions, including leaf-gate and skin-gate transistors. On-skin transistors allow high-fidelity monitoring and local amplification of skin potentials and electrophysiological signals.

The integration of electronic systems with irregular, soft objects is of increasing importance for many emerging technologies, including electronics for the Internet of Things and bioelectronics for monitoring dynamic living organisms and for diagnosing and treating human diseases in the context of personalized medicine and telehealth (1). A robust bioelectronic system requires intimate interaction with biological structures to perform specific operations, such as biological signal recording (2–4), amplification (5–7), and extraction (8), as well as delivering electrical (9, 10) or chemical stimulation (11). Thus, the implementation of bioelectronics hinges on a number of unusual material and device characteristics, including electronic performance, mechanical flexibility, stretchability, or malleability to ensure conformal and adaptable interfaces with dynamically evolving microscopic surface topographies; and permeability or breathability for gas and/or nutrient exchange between living organisms and their surroundings to lessen perturbation of natural biofunctions.

Conventional hard electronic materials exhibit an intrinsic mismatch with soft biological tissues in terms of electrical conductivity, mechanical response, permeability, and environmental adaptability. Hard inorganic semiconductors can be made flexible in an ultrathin membrane format but are barely stretchable and cannot form a conformal interface with

irregular geometries with nonzero Gaussian curvatures owing to their fundamental topological limitations (12). The development of specifically designed deformation-tolerant structures, such as wrinkled (13), buckled (14), waved (15), or serpentine structures (16–18), bring macroscopic stretchability but not microscopic conformability, because of the intrinsic microscopic structural undulation. Organic or composite semiconductor thin films can be made stretchable or conformal (19) but usually exhibit insufficient electronic performance (12, 20) or limited stability in a typical wet biological environment.

Additionally, traditional inorganic membranes or organic thin films typically exhibit limited mechanical robustness in the ultrathin freestanding format and require a polymer [e.g., polydimethylsiloxane (PDMS) and polyimide (PI)] substrate support to retain structural integrity (12) and specific porous architecture design to achieve breathability (21). The polymer substrate is typically much thicker (>1 μm) than a cell membrane (~10 nm), with a large bending stiffness (22) and poor conformability and adaptability to the dynamically evolving biological structures (23).

Inspired by van der Waals (VDW) interactions in biological assemblies, we exploited these interactions to assemble two-dimensional (2D) nanosheets (24–27) into freestanding VDW thin films (VDWTFs) with an excellent mechanical match to soft biological tissues that can directly adapt to and merge with living

a percolating network of nanochannels for permeability or breathability.

Topological and mechanical limitations of a conformal interface

Although the flexibility of intrinsically stiff materials (e.g., a silicon wafer or hard cardboard) can be increased in the ultrathin membrane format (e.g., a silicon membrane or paper) (28), stretchability is fundamentally limited by the covalent chemical bonds and barely changes with reduced thickness (29). Owing to intrinsic topological limitations, it is impossible to use such flexible yet unstretchable membranes to make a conformal interface with local topographies with nonzero Gaussian curvatures (e.g., wrapping a piece of paper around a pen; Fig. 1A) (30). To achieve a conformal interface with irregular geometries, stretchability is essential to allow necessary deformation to adapt to the local surface topographies. Specific polymeric materials with intermolecular slippages between polymer chains can be made stretchable (31, 32) and adaptable to local topographies under sufficient tensile stress (e.g., wrapping parafilm around a pen; Fig. 1B) (29).

To achieve a conformal interface with a stretchable membrane, external pressure is needed to induce sufficient deformation to match the local surface topography, which results in a contact pressure that can cause tissue deformation or damage (e.g., tightly wrapping parafilm around a fingertip). A 3D geometric model is constructed to visualize the conformal adapting process of a stretchable membrane on spherical topographies and to explore the evolution of the local deformation with the contact pressure (Fig. 1C). With increasing load, the membrane gradually adapts to the spherical indentations, with the membrane grid stretched and expanded to accommodate the local strain and deformation during the conformal adapting process.

We use a simplified spherical indentation model to evaluate the maximum contact pressure needed for forming a conformal interface with a surface topography of a given curvature. The indentation strain, ϵ , is given by

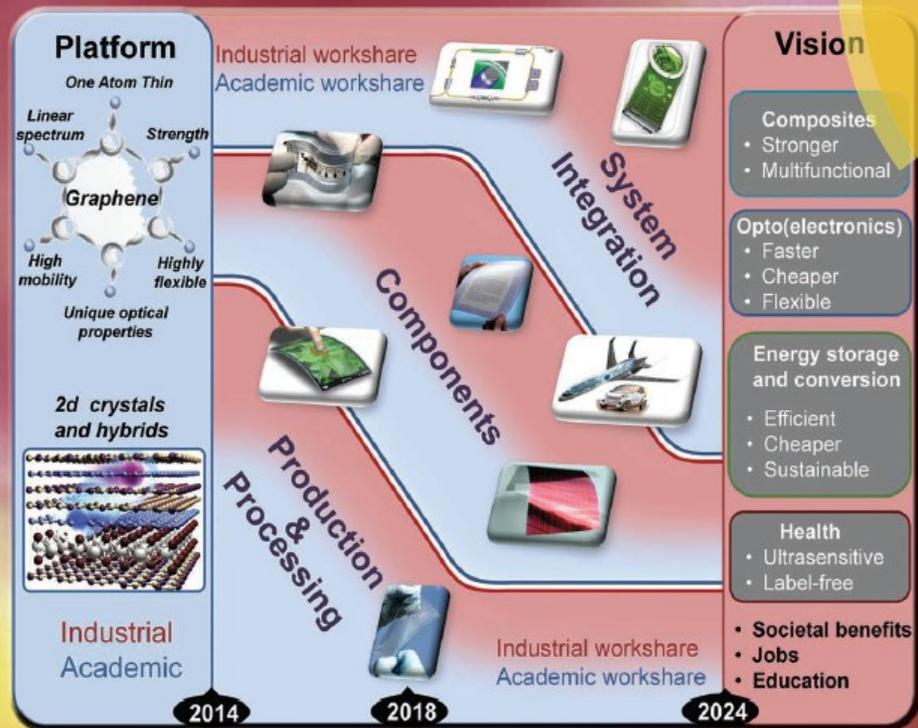
$$\epsilon = k \frac{r_{\text{contact}}}{r_{\text{curve}}} \quad (1)$$

where r_{contact} and r_{curve} are the contact radius

Highly stretchable van der Waals thin films for adaptable and breathable electronic membranes / Z. Yan, D. Xu, Z. Lin [et al.]. – DOI: 10.1126/science.abl8941. – Текст : непосредственный // Science. – 2022. – Vol. 375, Iss. 6583. – P. 852-859 : 5 Fig. – Bibliogr.: P. 858-859 (40 ref.). – ISSN 0036-8075. – Имеется электронная версия: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.abl8941> (дата обращения: 25.02.2022). – Режим доступа : по подписке СГУ.

Nanoscale

www.rsc.org/nanoscale



ISSN 2040-3364



REVIEW ARTICLE
 Andrea C. Ferrari et al.
 Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems



Open Access Article. Published on 22 September 2014. Downloaded on 2/8/2022 1:45:43 PM.
 This article is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 Unported Licence.



Nanoscale

REVIEW

Cite this: *Nanoscale*, 2015, 7, 4598

Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems

Andrea C. Ferrari,^{a,b} Francesco Bonaccorso,^{a,b} Vladimir Fal'ko,^c Konstantin S. Novoselov,^d Stephan Roche,^{e,f} Peter Bøggild,^g Stefano Borini,^h Frank H. L. Koppens,ⁱ Vincenzo Palermo,^j Nicola Pugno,^{k,l,m} José A. Garrido,ⁿ Roman Sordan,^o Alberto Bianco,^p Laura Ballerini,^q Maurizio Prato,^r Eleferios Lidorikis,^s Jani Kivioja,^t Claudio Marinelli,^u Tapani Ryhänen,^h Alberto Morpurgo,^v Jonathan N. Coleman,^{w,x} Valeria Nicolosi,^{v,w,x} Luigi Colombo,^y Albert Fert,^{z,aa} Mar Garcia-Hernandez,^{ab} Adrian Bachtold,^c Grégory F. Schneider,^{ac} Francisco Guinea,^{ad} Cees Dekker,^{ae} Matteo Barbone,^{af} Zhipei Sun,^{ag} Costas Galiotis,^{ah,ai} Alexander N. Grigorenko,^{aj} Gerasimos Konstantatos,^{ak} Andras Kis,^{al} Mikhail Katsnelson,^{am} Lieven Vandersypen,^{an} Annick Loiseau,^{ao} Vittorio Morandi,^{ap} Daniel Neumaier,^{aq} Emanuele Treossi,^{ar} Vittorio Pellegrini,^{as,at} Marco Polini,^{au} Alessandro Tredicucci,^{av} Gareth M. Williams,^{aw} Byung Hee Hong,^{ax} Jong-Hyun Ahn,^{ay} Jong Min Kim,^{az} Herbert Zirath,^{ba} Bart J. van Wees,^{bb} Herre van der Zant,^{bc} Luigi Occhipinti,^{bd} Andrea Di Matteo,^{be} Ian A. Kinloch,^{bf} Thomas Seyller,^{bg} Etienne Quesnel,^{bh} Xinliang Feng,^{bi} Ken Teo,^{bj} Nalin Rupasinghe,^{bk} Pertti Hakonen,^{bl} Simon R. T. Neil,^{bm} Quentin Tannock,^{bn} Tomas Löfwander^{bo} and Jari Kinaret^{bp}

We present the science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems, targeting an evolution in technology, that might lead to impacts and benefits reaching into most areas of society. This roadmap was developed within the framework of the European Graphene Flagship and outlines the main targets and research areas as best understood at the start of this ambitious project. We provide an overview of the key aspects of graphene and related materials (GRMs), ranging from fundamental research challenges to a variety of applications in a large number of sectors, highlighting the steps necessary to take GRMs from a state of raw potential to a point where they might revolutionize multiple industries. We also define an extensive list of acronyms in an effort to standardize the nomenclature in this emerging field.

Received 24th March 2014,
 Accepted 12th September 2014
 DOI: 10.1039/c4nr01600a

www.rsc.org/nanoscale

^aCambridge Graphene Centre, University of Cambridge, Cambridge, CB3 0FA, UK. E-mail: acf26@eng.cam.ac.uk

^bINR Istituto Italiano di Tecnologia, Graphene Labs, Genova, 16163, Italy

^cDepartment of Physics, Lancaster University, Lancaster, LA1 4YR, UK

^dSchool of Physics and Astronomy, University of Manchester, Manchester, M13 9PL, UK

^eICN2 Institut Català de Nanociència i Nanotecnologia, Campus UAB, 08193 Bellaterra (Barcelona), Spain

^fInstitució Catalana de Recerca i Estudis Avançats (ICREA), Barcelona, 08070, Spain

^gCentre for Nanostructured Graphene (CNG), Department of Micro- and Nanotechnology, Technical University of Denmark, Lyngby, 2800, Denmark

^hNokia Technologies, Broers Building, Cambridge, CB3 0FA, UK

ⁱInstitut de Ciències Fotòniques (ICFO), Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^jICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^kICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^lICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^mICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

ⁿICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^oICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^pICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^qICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^rICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^sICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^tICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^uICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^vICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^wICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^xICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^yICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^zICFO, Castelldefels (Barcelona), 08860, Spain

^{aa}School of Engineering and Materials Science, Queen Mary University of London, London, E1 4NS, UK

^{ab}Walter Schottky Institut, Technische Universität München, Garching, 85748, Germany

^{ac}LNESS, Dipartimento di Fisica, Politecnico di Milano, Como, 22100, Italy

^{ad}ICNRS, Institut de Biologie Moléculaire et Cellulaire, Immunopathologie et Chimie Thérapeutique, 67000 Strasbourg, France

^{ae}Centre for NanoScience (BRIN) and Dipartimento di Scienze della Vita, Università di Trieste, Trieste, 34127, Italy

^{af}Dipartimento di Scienze Farmaceutiche, Università di Trieste, Trieste, 34127, Italy

^{ag}Department of Materials Science and Engineering, University of Ioannina, Ioannina, 45110, Greece

^{ah}Applied Graphene Materials, The Wilson Centre, Redcar, Cleveland, TS10 4RF, UK

^{ai}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{aj}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{ak}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{al}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{am}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{an}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{ao}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{ap}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{aq}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{ar}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{as}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{at}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{au}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{av}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{aw}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{ax}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{ay}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{az}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{ba}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{bb}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{bc}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{bd}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{be}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{bf}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{bg}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{bh}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{bi}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{bj}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{bk}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{bl}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{bm}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{bn}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{bo}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

^{bp}Département de Physique de la Matière Condensée, Université de Genève, Genève, 1205, Switzerland

Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems / A. C. Ferrari, F. Bonaccorso, V. Fal'ko [et al.]. – DOI: 10.1039/c4nr01600a. – Текст : непосредственный // *Nanoscale*. – 2015. – Vol. 7, No 11. – P. 4598-4810 : 9 Tab., 122 Fig. – Bibliogr.: P. 4761-4810 (2344 ref.). – ISSN 2040-3364. – Имеется электронная версия: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/NR/C4NR01600A> (дата обращения: 08.02.2022). – Режим доступа : по подписке CГУ.

Emerging Applications of Elemental 2D Materials

Nicholas R. Glavin,* Rahul Rao, Vikas Varshney, Elisabeth Bianco, Amey Apte, Ajit Roy, Emilie Ringe, and Pulickel M. Ajayan*

As elemental main group materials (i.e., silicon and germanium) have dominated the field of modern electronics, their monolayer 2D analogues have shown great promise for next-generation electronic materials as well as potential game-changing properties for optoelectronics, energy, and beyond. These atomically thin materials composed of single atomic variants of group III through group VI elements on the periodic table have already demonstrated exciting properties such as near-room-temperature topological insulation in bismuthene, extremely high electron mobilities in phosphorene and silicene, and substantial Li-ion storage capability in borophene. Isolation of these materials within the postgraphene era began with silicene in 2010 and quickly progressed to the experimental identification or theoretical prediction of 15 of the 18 main group elements existing as solids at standard pressure and temperatures. This review first focuses on the significance of defects/functionalization, discussion of different allotropes, and overarching structure–property relationships of 2D main group elemental materials. Then, a complete review of emerging applications in electronics, sensing, spintronics, plasmonics, photodetectors, ultrafast lasers, batteries, supercapacitors, and thermoelectrics is presented by application type, including detailed descriptions of how the material properties may be tailored toward each specific application.

1. Introduction

Among layered 2D materials, research interest in elemental materials has rejuvenated over the past few years, driven largely

electronic, and optical) of a large number of metal monolayers on a variety of metallic substrates.^[1] While the study of elemental monolayers, and 2D materials, in general has largely been in the domain of surface science, the successful isolation and study of the fascinating electronic and thermal properties of monolayer graphene^[2] have led to a resurgence of interest in layered 2D materials including transition metal oxides, chalcogenides, and MXenes.^[3–7] This interest has been generated by the discovery of new and exciting physics such as nontrivial topology,^[8–10] high-temperature ballistic transport,^[11,12] valleytronics,^[13] and other optoelectronic^[14] properties that arise predominantly due to their 2D nature; these have recently been discussed in a number of excellent reviews.^[6,14–16] As a result, atomically thin materials are being targeted for a number of potential next-generation technology relevant applications, such as spintronics, advanced nanoelectronics, nanosensing, and many more.

Emerging Applications of Elemental 2D Materials / N. R. Glavin, R. Rao, V. Varshney [et al.]. – DOI: 10.1002/adma.201904302. – Текст : непосредственный // Advanced Materials. – 2020. – Vol. 32, Iss. 7. – Article Number 1904302 (P. 1–22) : 9 Fig. – Bibliogr.: P. 18–22 (271 ref.). – ISSN 0935-9648. – Имеется электронная версия: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201904302> (дата обращения: 07.02.2022). – Режим доступа : по подписке СГУ.

Dr. N. R. Glavin, Dr. R. Rao, Dr. V. Varshney, Dr. A. R. Roy
Materials and Manufacturing Directorate
Air Force Research Laboratory
Wright-Patterson AFB, OH 45433, USA
E-mail: nicholas.glavin.1@us.af.mil

Dr. R. Rao
UES Inc.
Beavercreek, OH 45431, USA

Dr. E. Bianco, Prof. E. Ringe
Department of Chemistry
Rice University
Houston, TX 77005, USA

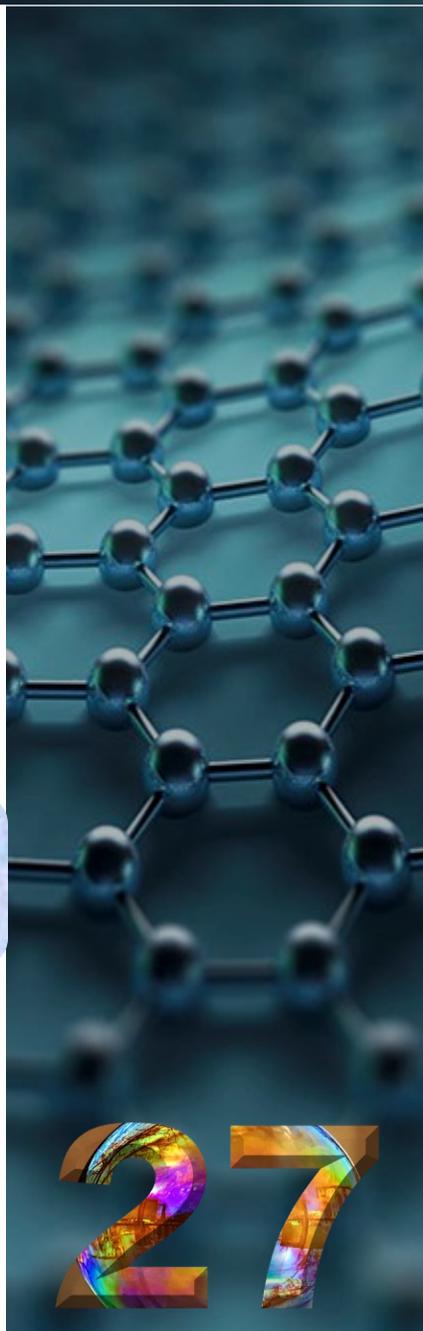
 The ORCID identification number(s) for the author(s) of this article can be found under <https://doi.org/10.1002/adma.201904302>.

DOI: 10.1002/adma.201904302

Dr. E. Bianco, Dr. A. Apte, Prof. P. M. Ajayan
Materials Science and Nano Engineering
Rice University
Houston, TX 77005, USA
E-mail: pma2@rice.edu

Prof. E. Ringe
Department of Materials Science and Metallurgy
University of Cambridge
Cambridge CB2 0FS, UK

Prof. E. Ringe
Department of Earth Sciences
University of Cambridge
Cambridge CB2 3EQ, UK



New effect of strong oscillation and anisotropy of electrical conductance in graphene films with vertically aligned carbon nanotubes and monolayer pillared graphene films

Olga E. Glukhova^{a,b}, Richard Pinčák^{c,*}

^a Department of Physics, Saratov State University, Astrakhanskaya 83, Saratov 410012, Russia

^b Laboratory of Biomedical Nanotechnology, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Bobshaya Pirogovskaya Street 2-4, 119991 Moscow, Russia

^c Institute of Experimental Physics, Slovak Academy of Sciences, Watsonova 47, 043 53 Košice, Slovakia

ARTICLE INFO

Keywords:
Electrical conductance
Graphene films
Vertically oriented carbon nanotubes
Local density of states
Electron transmission function

ABSTRACT

For the first time, a strong anisotropy of electrical conductance is established in graphene films with regular holes, graphene films with vertically aligned armchair carbon nanotubes (CNTs) seamlessly bonded to graphene, and monolayer pillared graphene films. Electrical conductance along the armchair direction is 3–7 times larger than that along the zigzag direction. Also, a prominent oscillation in electrical conductance along the armchair direction is first discovered. This effect is clearly manifested when the CNT length is increased by atomic layers. In this case, the electrical conductance oscillation can reach 80–90% and the oscillation frequency is equal to three.

1. Introduction

Anisotropy of properties and its control for graphene-based materials is one of the topical themes of recent research [1–36]. For example, the detection of anisotropic spin dynamics in bilayer heterostructures comprising graphene and tungsten or molybdenum disulfide reveals novel spin manipulation strategies based on spin relaxation anisotropy in two-dimensional materials [1]. Anisotropy of thermal conductivity in graphene/epoxy composite allows using this material for efficient heat removal [2]. The anisotropy of the mechanical properties of graphene modifications is promising in the field of biomedical applications [3–5]. The anisotropic optical properties of modified graphene allow using it as a polarizer and ultraweak photon emission source [6–7]. The addition of graphene layers to various polymers allows us to control their electrical conductivity, achieving a given anisotropy [7]. Recently, much attention has been paid to porous graphene [9–15], since it has been recognized as very promising for energy storage applications including lithium-ion batteries, supercapacitors, lithium-sulfur batteries, and lithium-air batteries. Particular attention is paid to increasing the electrical conductivity of 2D/3D porous graphene [14–16]. A new application of porous graphene is its use in the technology of obtaining anisotropic slippery liquid-infused porous surfaces, which is promising in the fields of microfluidics, microchips, and other related research

[17]. Porous ultralight graphene/epoxy aerogel has increased viscosity and electrical conductivity due to exceptional anisotropic structure [16]. Pillared graphene and graphene with vertically oriented carbon nanotubes (CNTs) are also attributed to porous graphene [19–35]. This graphene/CNT composite is a very promising materials used as a highly sensitive mechanical nanosensor [22], as an effective membrane for a gas filter [23,24], for hydrogen and lithium storage [25], and to create high-performance batteries [21,26–29]. Surface and pore modification can provide control of magnetic properties, as well as strength properties [30–35].

Full-scale measurements of electrical conductivity of porous graphene, including pillared graphene at nano-/micro-levels are quite complex and practically unrealizable. Theoretical research of electrical conductivity is difficult because of a large number of atoms in a supercell of pillared graphene (500–1000 atoms). The calculation of the electron transport along a CNT connecting two graphene monolayer is carried out by Novaes et al [36]. The calculation of electrical conductance along the graphene sheet was carried out by our team as a demonstration of a new original method for accelerating the calculation of the transmission function $T(E)$ [37]. It was found that the electrical conductance of mono- and bilayer films varies non-monotonously with increasing CNT length. In the current paper, we carry out a theoretical research of the regularities of electrical conductance and the mechanism of the appearance

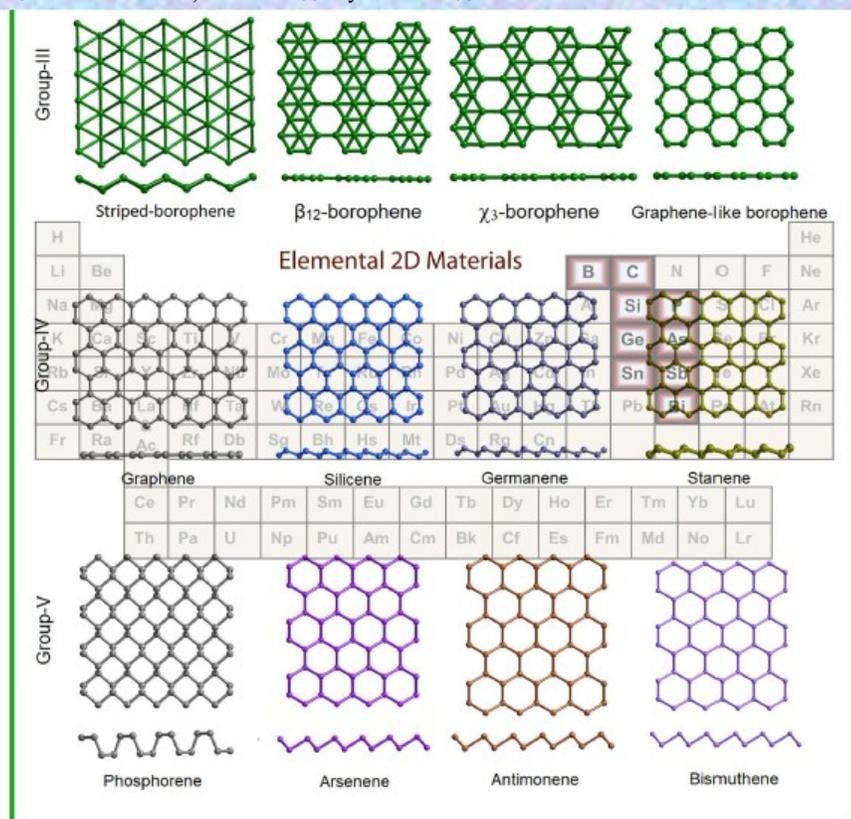
Glukhova, O. E. New effect of strong oscillation and anisotropy of electrical conductance in graphene films with vertically aligned carbon nanotubes and monolayer pillared graphene films / O. E. Glukhova, R. Pinčák. – DOI: 10.1016/j.chemphys.2021.111312. – Текст : непосредственный // Chemical Physics. – 2021. – Vol. 550. – Article Number 111312 (P. 1–6) : 4 Fig. – Bibliogr.: P. 6 (55 ref.). – ISSN 0301-0104. – Имеется электронная версия: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301010421002238> (дата обращения: 17.02.2022). – Режим доступа : по подписке СГУ.



2D Elemental Nanomaterials Beyond Graphene

Pratap Vishnoi, K. Pramoda, and C. N. R. Rao*^{1,2}

Vishnoi, P. 2D Elemental Nanomaterials Beyond Graphene / P. Vishnoi, K. Pramoda, C. N. R. Rao. – DOI: 10.1002/cnma.201900176. – Текст : непосредственный // ChemNanoMat. – 2019. – Vol. 5, No 9. – P. 1062-1091 : 4 Tab., 18 Fig. – Bibliogr.: P. 1086-1091 (340 ref.). – ISSN 2199-692X. – Имеется электронная версия: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cnma.201900176> (дата обращения: 09.02.2022). – Режим доступа : по подписке СГУ.



SCIENTIFIC DATA

OPEN

DATA DESCRIPTOR

2D MatPedia, an open computational database of two-dimensional materials from top-down and bottom-up approaches

Received: 19 February 2019
Accepted: 7 May 2019
Published online: 12 June 2019

Jun Zhou¹, Lei Shen², Miguel Dias Costa³, Kristin A. Persson^{4,5}, Shyue Ping Ong⁶, Patrick Huck⁵, Yunhao Lu⁷, Xiaoyang Ma¹, Yiming Chen⁸, Hanmei Tang⁹ & Yuan Ping Feng^{1,3}

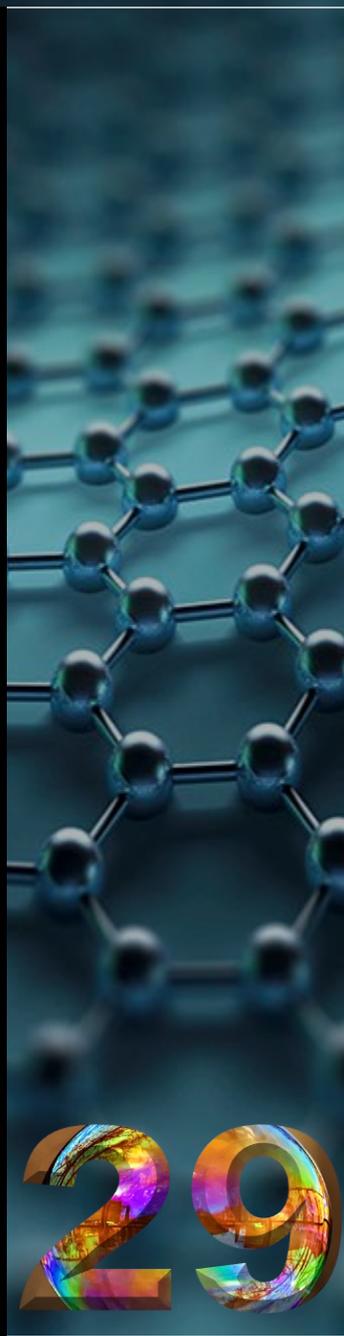
Two-dimensional (2D) materials have been a hot research topic in the last decade, due to novel fundamental physics in the reduced dimension and appealing applications. Systematic discovery of functional 2D materials has been the focus of many studies. Here, we present a large dataset of 2D materials, with more than 6,000 monolayer structures, obtained from both top-down and bottom-up discovery procedures. First, we screened all bulk materials in the database of Materials Project for layered structures by a topology-based algorithm and theoretically exfoliated them into monolayers. Then, we generated new 2D materials by chemical substitution of elements in known 2D materials by others from the same group in the periodic table. The structural, electronic and energetic properties of these 2D materials are consistently calculated, to provide a starting point for further material screening, data mining, data analysis and artificial intelligence applications. We present the details of computational methodology, data record and technical validation of our publicly available data (<http://www.2dmatpedia.org>).

Background & Summary

Atomically thin two-dimensional (2D) materials have attracted tremendous research interest for both novel fundamental physics and extremely appealing applications. For example, new emerging physics such as half-integer quantum Hall effect¹, Klein tunnelling², valley Hall effect³ and topological superconductivity^{4,5} have been reported in 2D materials. 2D structures are naturally beneficial for performance of various types of devices, such as large surface-to-volume ratio for high sensing sensitivity and catalysis efficiency^{6,7}, reduced size for immunity against short channel effects⁸ and flexibility for wearable devices^{9,10}, to name only a few. Furthermore, the Van-der-Waals stacking of homo/hetero 2D materials provides another degree of freedom to tune the desired properties of the system^{11,12}. However, only dozens of 2D materials have been experimentally synthesized. New 2D materials with novel properties are needed to meet the demand of ever growing technological applications.

The traditional material discovery is mainly based on trial-and-error experiments which are time consuming and resource intensive. To accelerate development and deployment of novel advanced materials, the US White House launched the "Materials Genome Initiative" in 2011 (<https://www.mgi.gov/>). This approach integrates high throughput computation, data analytics together with experimental research and represents a new paradigm for materials discovery. The data-driven material discovery can significantly reduce the cost from many long iterations of trial-and-error experiments by providing the most promising candidates from high-throughput computations. This approach is also more flexible as different screenings can be conducted to target materials with

2D MatPedia, an open computational database of two-dimensional materials from top-down and bottom-up approaches / J. Zhou, L. Shen, M. D. Costa [et al.]. – DOI: 10.1038/s41597-019-0097-3. – Текст : электронный // Scientific Data. – 2019. – Vol. 6. – Article Number 86 (P. 1-10) : 1 Tab., 6 Fig. – Bibliogr.: P. 8-10 (102 ref.). – ISSN 2052-4463 (online): <https://www.nature.com/articles/s41597-019-0097-3> (дата обращения: 10.02.2022). – Режим доступа : свободный.



MATERIALS SCIENCE

Nanospike electrodes and charge nanoribbons: A new design for nanoscale thin-film transistors

Kelly Liang^{1,2}, Xin Xu¹, Yuchen Zhou^{1,2}, Xiao Wang^{1,2}, Calla M. McCulley^{1,3}, Liang Wang¹, Jaydeep Kulkarni², Ananth Dodabalapur^{1,2*}

To scale down thin-film transistor (TFT) channel lengths for accessing higher levels of speed and performance, a redesign of the basic device structure is necessary. With nanospikes-shaped electrodes, field-emission effects can be used to assist charge injection from the electrodes in sub-200-nm channel length amorphous oxide and organic TFTs. These designs result in the formation of charge nanoribbons at low gate biases that greatly improve sub-threshold and turn-off characteristics. A design paradigm in which the gate electric field can be less than the source-drain field is proposed and demonstrated. By combining small channel lengths and thick gate dielectrics, this approach is also shown to be a promising solution for boosting TFT performance through charge focusing and charge nanoribbon formation in flexible/printed electronics applications.

INTRODUCTION

In more demanding applications of thin-film transistors (TFTs), such as in back-end-of-line (BEOL) applications, scaling down the channel length (1, 2) is problematic because of increasing contact resistance and short-channel effects (3–5). When contact resistance is high, it can dominate TFT performance at short channel lengths. Contact resistance and short-channel effects can both be seen in amorphous oxide semiconductors, organic/polymer semiconductors, and two-dimensional (2D) semiconductors such as MoS₂ (6–8), and various approaches have been tried to overcome these problems (8, 9).

The new device design proposed and demonstrated in this letter addresses both contact resistance and short-channel effect problems in multiple classes of semiconductors with channel lengths below 200 nm. Charge injection is facilitated because of a combination of field-emission and enhanced charge carrier density near the source electrode. Simultaneously, subthreshold swings are much steeper, and off currents are kept low at short channel lengths. A new mode of TFT operation is described in which the spatial distribution of charges in the channel changes, such that charges are expected to form one or more narrow channels in subthreshold and near turn-off conditions (we designate these narrow regions of charge as “charge nanoribbons”). A TFT design for printed electronics is also proposed in which the maximum gate electric field is less than the maximum source-drain field. In these TFTs, charge nanoribbons persist well above threshold and can continue to enhance TFT performance. Data from indium gallium zinc oxide (IGZO) TFTs and the organic semiconductor (pentacene) TFTs are used to demonstrate the effects, showing that they are not confined to a single material system and can benefit many materials systems.

RESULTS

The basic device design of a nanospike TFT with IGZO is shown in Fig. 1, where both the source and drain electrodes are nanospike-shaped. These electrodes are analogous to field-emission tips used

in vacuum electronics and in conducting scanning probe microscopes, both of which take advantage of shaping metal tips to sharp points to achieve local field enhancement for facile emission of electrons into the vacuum energy level (10). In TFTs, nanospike-shaped tips similarly focus high electric fields at the source and/or drain contact tips, lowering the Schottky barriers for carrier injection from the metal to the semiconductor. For comparison, conventional flat edge electrodes (or flat TFTs) are also fabricated alongside with the same channel length. For accurate channel current measurements and to avoid collecting spreading currents, separate side guard electrodes are used, and they are biased to the same potential as the drain.

Figure 1 (E and F) shows the measured characteristics of a 50-nm channel length single-nanospike IGZO TFT. The characteristics show excellent drain current modulation with gate voltage despite the physical gate dielectric thickness being almost twice the channel length. At low gate voltages in the subthreshold region, drain currents do not change notably with increasing drain voltage. This is different from what is typically observed in short-channel TFTs. When the source-drain field exceeds the gate field, there is greater field focusing of the electrons onto a narrower channel. The output characteristics in Fig. 1F show linear and saturation behavior in the expected voltage regions. The gate leakage current, which flows from the drain contact through the insulator, was subtracted from these characteristics to arrive at more accurate drain currents. The procedure used and original raw data are shown in the Supplementary Materials.

To increase drive current in a spike electrode TFT, a line array of nanospikes can be used. Three different spacings between individual nanospikes were studied. Output characteristics are shown in Fig. 2A for TFTs with spike width to spike spacing ratios of 1:0 (in which the spikes are all coalesced), 1:1, and 1:3. The currents approximately scale with the overall device width. This is because the wider spacings between spikes correspond to a greater gate area and hence a greater number of channel electrons. Electrostatic electric field simulations in Fig. 2C were performed with COMSOL. The magnitude of the enhancement of the electric field at the tips and the distribution of the field within the device channel are shown. As

Copyright © 2022
The Authors, some
rights reserved;
exclusive licensee
American Association
for the Advancement
of Science. No claim to
original U.S. Government
Works. Distributed
under a Creative
Commons Attribution
NonCommercial
License 4.0 (CC BY-NC).

Downloaded from <https://www.science.org at Saratov State University on February 01, 2022>

Nanospike electrodes and charge nanoribbons: A new design for nanoscale thin-film transistors / K. Liang, X. Xu, Y. Zhou [et al.]. – DOI: 10.1126/sciadv.abm1154. – Текст : непосредственный // Science Advances. – 2022. – Vol. 8, No 4. – Article Number eabm1154 : 5 Fig. – Bibliogr.: P. 5 (15 ref.). – ISSN 2375-2548. – Имеется электронная версия: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abm1154> (дата обращения: 01.02.2022). – Режим доступа : свободный.



РЕСУРСЫ ИНТЕРНЕТ



<https://www.elibrary.ru>



Поиск в библиотеке

Навигатор

- ЖУРНАЛЫ
- КНИГИ
- ПАТЕНТЫ
- ПОИСК
- АВТОРЫ
- ОРГАНИЗАЦИИ
- КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА
- РУБРИКАТОР
- ССЫЛКИ
- ПОДБОРКИ

Начальная страница

Текущая сессия

Легенда

- Доступ к полному тексту документа открыт
- Полный текст доступен на сайте издателя
- Полный текст может быть получен через систему заказа
- Доступ к полному тексту закрыт
- Если иконки нет - полный текст документа отсутствует в НЭБ

ВСЕГО НАЙДЕНО ПУБЛИКАЦИЙ: 11625 из 38803425

№	Публикация	Цит.
1	МЕХАНИЗМЫ ЗАКРЕПЛЕНИЯ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ОБЪЕМОМ \1 ГБ <i>Прищепа С.Л., Ваглио Р.</i> В сборнике: Новые технологии изготовления многокристалльных модулей. Материалы докладов Международной научно-технической конференции. Редкол.: В. А. Лабунов, В. А.Сокол, Л. М. Лыньков, В. М. Паркун. 2002. С. 98-101.	0
2	ТОНКАЯ ПЛЕНКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ, СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТАКОЙ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ И ТРАНЗИСТОР, ИЗГОТОВЛЕННЫЙ ИЗ ТАКОЙ ТОНКОЙ ПЛЕНКИ <i>Чжан Л.</i> Патент на изобретение RU 2642140 C2, 24.01.2018. Заявка № 2016124647 от 30.12.2013.	0
3	FORMATION OF HOLOGRAPHIC DIFFRACTION GRATINGS IN THIN FILMS OF CHALCOGENIDE GLASSY SEMICONDUCTORS <i>Nastas A.M., Iovu M.S., Agishev I.N., Gavrusenok I.V., Melnikova E.A., Stashkevitch I.V., Tolstik A.L.</i> Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2021. № 3. С. 4-11.	0
4	ЖҰҚА ПОЛИМЕР ҚАБЫРШАҚТАРДАН ӨТКЕН А-БӨЛШЕКТЕРДІҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ СПЕКТРІН ЗЕРТТЕУ <i>Әбілдаев Х., Шинбулатов С.К.</i> Вестник Казахского национального университета. Серия физическая. 2017. № 2 (61). С. 94-98.	0
5	RESISTIVE SWITCHING IN ALD ZINC OXIDE THIN FILMS <i>Zelenov F.V.</i> Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. 2021. № 20. С. 395-397.	0
6	OPTICAL PROPERTIES OF CDTE THIN FILM OBTAINED BY HIGH-FREQUENCY MAGNETRON SPUTTERING METHOD <i>Kashuba A.I., Andriyevsky B.V., Ilchuk H.A., Piasecki M., Semkiv I.V., Petrus R.Yu.</i> Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2021. № 2. С. 88-95.	0
7	THERMALLY STIMULATED TRANSFORMATIONS IN THIN FILMS OF CRYOVACUUM CONDENSATES OF METHANE <i>Drobyshev A., Aldiyarov A., Nurekeyev Zh., Tychengulova A.</i> Recent Contributions to Physics. 2014. № 3 (50). С. 97-98.	0
8	EXTRAORDINARY AND PLANAR HALL EFFECTS IN THIN PERMALLOY FILMS <i>Halauchuk V.I., Lukashevich M.G.</i> Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2021. № 2. С. 53-60.	0



623,503 результатов — Web of Science Core Collection для:

thin film (Тема)

Анализ результатов

Отчет по цитированию

Создать оповещение

Копировать ссылку запроса

Публикации

Возможно, вам также понравится...

Уточните результаты

Поиск в результатах по...



Быстрые фильтры

- Высокоцитируемые документы 3,025
- Самые популярные документы 54
- Review Articles 14,764
- Early Access 1,687
- Открытый доступ 98,498

Годы публикаций

- 2022 2,547
- 2021 24,778
- 2020 28,254
- 2019 29,292
- 2018 30,934

0/623,503

Добавить в список отмеченных публикаций

Экспорт

Сортировать по: Цитируемость по убыванию

1 из 2,000

1 Electric field effect in atomically thin carbon films

Novoselov, KS; Geim, AK; (...); Firsov, AA

Oct 22 2004 | SCIENCE 306 (5696) , pp.666-669

We describe monocrystalline graphitic films, which are a few atoms thick but are nonetheless stable under ambient conditions, metallic, and of remarkably high quality. The films are found to be a two-dimensional semimetal with a tiny overlap between valence and conduction bands, and they exhibit a strong ambipolar electric field effect such that electrons and holes in concentrations up to 10^{13} per square centimeter and with room-tem ... Больше

[Бесплатно отправленная статья из репозитория](#) [Полный текст у издателя](#) ...

45,603

Цитирования

16

Ссылки

[Связанные записи](#) ?

2 Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides

Wang, QH; Kalantar-Zadeh, K; (...); Strano, MS

Nov 2012 | NATURE NANOTECHNOLOGY 7 (11) , pp.699-712

The remarkable properties of graphene have renewed interest in inorganic, two-dimensional materials with unique electronic and optical attributes. Transition metal dichalcogenides (TMDCs) are layered materials with strong in-plane bonding and weak out-of-plane interactions enabling exfoliation into two-dimensional layers of single unit cell thickness. Although TMDCs have been studied for decades, recent advances in nanoscale r ... Больше

[Бесплатно опубликованная статья из репозитория](#) [Полный текст у издателя](#) ...

10,402

Цитирования

163

Ссылки

[Связанные записи](#)





362,806 результатов поиска документов

KEY (thin AND film)

✎ Редактировать 📄 Сохранить 🔔 Настроить оповещение

<http://www.scopus.com>



Документы Вспомогательные документы Патенты

[Просмотреть данные Mendeley \(12018\)](#)

📊 Анализировать результаты поиска

[Показать все краткие описания](#) Сортировать по: [Цитирования \(по убыванию\)](#) ▾

Все ▾ Экспорт Скачать Просмотреть обзор цитирования Просмотр цитирующих документов Добавить в список ... 🖨️ ✉️ 📄

	Название документа	Авторы	Год	Источник	Цитирования
<input type="checkbox"/> 1	Electric field in atomically thin carbon films <i>Открытый доступ</i>	Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., (...), Grigorieva, I.V., Firsov, A.A.	2004	Science 306(5696), с. 666-669	47749
	Просмотр краткого описания ▾ View at Publisher Связанные документы				
<input type="checkbox"/> 2	Light-emitting diodes based on conjugated polymers	Burroughes, J.H., Bradley, D.D.C., Brown, A.R., (...), Burns, P.L., Holmes, A.B.	1990	Nature 347(6293), с. 539-541	11323
	Просмотр краткого описания ▾ View at Publisher Связанные документы				
<input type="checkbox"/> 3	Self-assembled monolayers of thiolates on metals as a form of nanotechnology	Love, J.C., Estroff, L.A., Kriebel, J.K., Nuzzo, R.G., Whitesides, G.M.	2005	Chemical Reviews 105(4), с. 1103-1169	6742





© Стольниц, М. М., Шишкина, В. Н., виртуальная выставка, 2022