

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук

# Международная зимняя школа по физике полупроводников

# 2017

## Научная программа и тезисы докладов

С.-Петербург – Зеленогорск  
1–6 марта 2017 года

## **Организатор**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук

### **Программный комитет**

Р.А. Сурис (председатель)  
А.Ю. Маслов (секретарь)  
П.А. Алексеев  
А.Г. Забродский  
Е.Л. Ивченко  
В.И. Козуб  
П.С. Копьев  
Р.В. Парфеньев  
О.М. Сресели  
С.А. Тарасенко

### **Организационный комитет**

А.Г. Забродский (председатель)  
Р.В. Парфеньев (зам. председателя)  
Е.В. Куницына (секретарь)  
П.А. Алексеев  
Л.Ф. Гребеновская  
П.А. Дементьев  
Е.Л. Ивченко  
П.С. Копьев  
А.Ю. Маслов

### **Финансовая поддержка**

Российский фонд фундаментальных исследований  
Федеральное агентство научных организаций  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук  
ООО «ИоффеЛЕД»

<b>Пятница, 3 марта</b>	<b>5</b>
<i>А.В. Якиманский</i>	<b>14:30–15:15</b>
Сообщение о работах, удостоенных Нобелевской премии по химии за 2016 год . . . . .	5
<i>А.К. Вершовский</i>	<b>15:25–16:10</b>
Холодные и ультра-холодные атомы: техника приготовления и перспективы применения . . . . .	9
<i>М.Ф. Limonov</i>	<b>16:40–17:25</b>
Phase diagram for the transition from photonic crystals to dielectric metamaterials . . . . .	11
<i>Е. Д. Образцова</i>	<b>17:40–18:40</b>
Тонкие пленки на основе углеродных нанотрубок и графена для электронных приложений . . . . .	11
<b>Суббота, 4 марта</b>	<b>16</b>
<i>С.Г. Тиходеев</i>	<b>09.30–10.15</b>
Вращение одиночных молекул туннельным током . . . . .	16
<i>И.С. Бурмистров</i>	<b>10:20–11:05</b>
Топология в физике конденсированных сред: от перехода Березинского–Костерлица–Таулесса до топологических изоляторов . . . . .	17
<i>В. Gil</i>	<b>11:40–12:25</b>
Optical properties of BN for UV emission . . . . .	17
<i>В.В. Лучинин</i>	<b>12:30–13:05</b>
Микро- и наносистемы для медико-биологической экспресс диагностики . . . . .	19
<i>А.А. Богданов</i>	<b>14:30–15:15</b>
Сила света: от атомов до космического корабля . . . . .	22
<i>П.А. Алексеев</i>	<b>15.25–16.10</b>
Оптомеханические резонаторы в атомно-силовой микроскопии . . . . .	23

<i>О.С. Кен</i>	<b>16:40–17:25</b>	
Механизмы усиления фототока в полупроводниковых наноструктурах . . . . .		25
<b>Воскресенье, 5 марта</b>		<b>26</b>
<i>Г.С. Соколовский</i>	<b>09:30–10:15</b>	
Оптические пинцеты: принцип работы и применения . . . . .		27
<i>В.Ю. Качоровский</i>	<b>10:20–11:05</b>	
Наномеханика графена . . . . .		28
<i>М.М. Глазов</i>	<b>11:30–12:15</b>	
Экситоны в двумерных полупроводниках . . . . .		31
<i>Л.Н. Галль</i>	<b>12:20–13:05</b>	
Сходство и различие в организации неживой материи и материи живого организма и в теоретическом подходе к их описанию . . . . .		32
<b>Понедельник, 6 марта</b>		<b>36</b>
<i>М.В. Дурнев</i>	<b>10:00–10:45</b>	
Электронные свойства двумерных топологических изоляторов .		36
<i>Н.А. Поклонский</i>	<b>10:50–11:35</b>	
Электро- и магнитомеханика полупроводниковых систем . . . .		37

# Сообщение о работах, удостоенных Нобелевской премии по химии за 2016 год

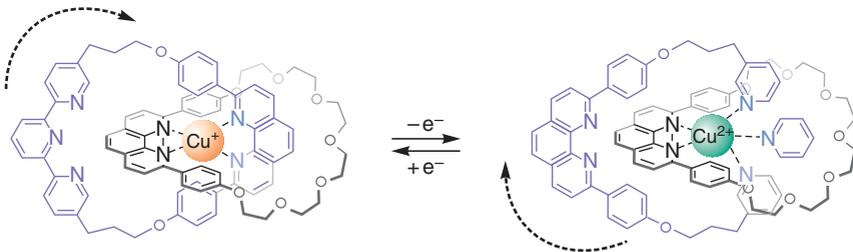
А.В. Якиманский

Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Россия

Лауреатами Нобелевской премии по химии 2016 года стали Жан-Пьер Соваж (Страсбургский университет, Франция), Фрейзер Стоддарт (Северо-Западный университет, США) и Бернард Феринга (Гронингенский университет, Голландия). Премия была присуждена «за дизайн и синтез молекулярных машин» — отдельных молекул или молекулярных комплексов, которые могут совершать определенные движения при подаче энергии извне. Дальнейшее развитие этой области сулит прорывы во многих областях науки и медицины.

Молекулярные машины — это молекулы, в которых одна часть способна двигаться относительно другой контролируемым образом, как правило, под действием внешних факторов (свет, тепло). Поэтому синтез молекулярных машин можно считать инженерией на молекулярном уровне. Среди природных молекулярных машин можно отметить некоторые белки органических клеток (миозин, кинезины) или, например, рибосомы. Но по сложности устройства молекулярных машин человеку как синтетику трудно пока тягаться с природой. Поэтому речь идет об относительно простых молекулах.

Для создания таких молекул Соваж, Стоддарт и Феринга придумали разные принципы. Соваж и Стоддарт делали механически сцепленные молекулы: катенаны — два и более сцепленных молекулярных кольца, вращающихся друг относительно друга (рис. 1), и ротаксаны — составные молекулы из двух

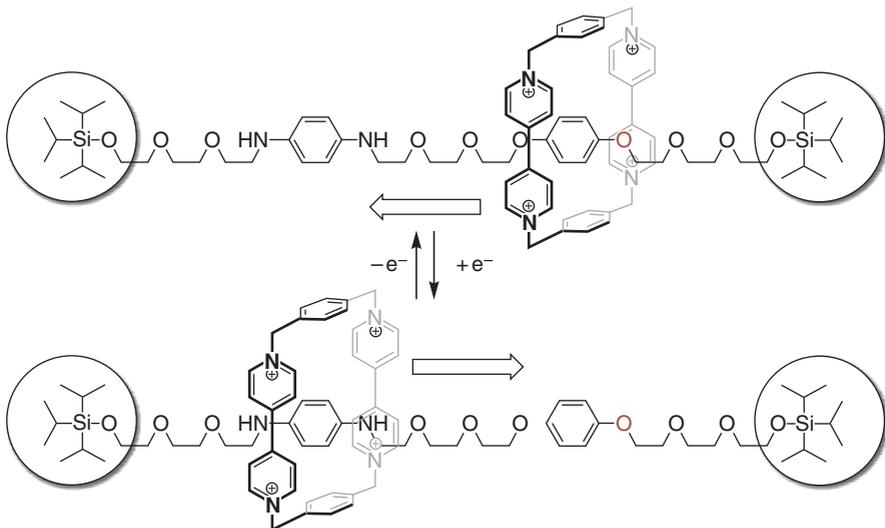


**Рис. 1.** Катенан, состоящий из двух колец, и иона  $\text{Cu}^+$ , который может обратимо окисляться до  $\text{Cu}^{2+}$ , меняя лигандное окружение путем вращения одного из макроциклов. Изображение с сайта nobelprize.org

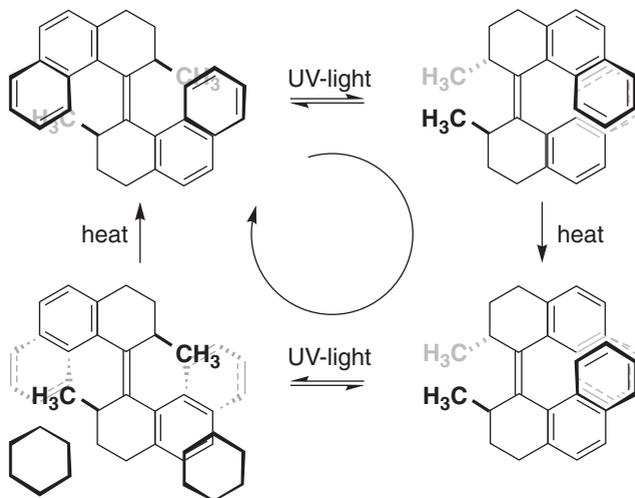
частей, в которых одна часть (кольцо) может двигаться вдоль другой (прямая основа), имеющей объемные группы (стопперы) по краям, чтобы кольцо «не слетало» (рис. 2).

На рис. 1 изображен катенан, состоящий из двух макроциклов со встроенными лигандными группами, и иона  $\text{Cu}^+$ , который может обратимо окисляться до  $\text{Cu}^{2+}$ . При этом один из макроциклов имеет бидентатный фенантролиновый и тридентатный терпиридиновый фрагменты. Координационное число иона  $\text{Cu}^{2+}$  выше, чем у  $\text{Cu}^+$ . Поэтому при окислении  $\text{Cu}^+$  до  $\text{Cu}^{2+}$  происходит вращение макроцикла, при котором фенантролиновый лиганд вытесняется терпиридиновым. При восстановлении  $\text{Cu}^{2+}$  до  $\text{Cu}^+$  происходит обратное вращение, при котором уже терпиридиновый лиганд вытесняется фенантролиновым.

На рис. 2 изображена схема работы «молекулярного поршня» на основе ротаксана, состоящего из прямого стержня и положительно заряженного макроцикла, который не может соскочить со стержня из-за три-изопропилсилановых группировок на концах. В структуру стержня встроены два бензольных кольца с атомами азота и кислорода в пара-положении друг к другу. Диаминифениленовый фрагмент легко окисляется, заряжаясь положительно и отталкивая положительно заряженный макроцикл к диоксифениленовому фрагменту с более высокой электронной плотностью. Однако, если диамино-



**Рис. 2.** Ротаксан («молекулярный поршень»), состоящий из прямого стержня и положительно заряженного макроцикла. Изображение с сайта nobelprize.org

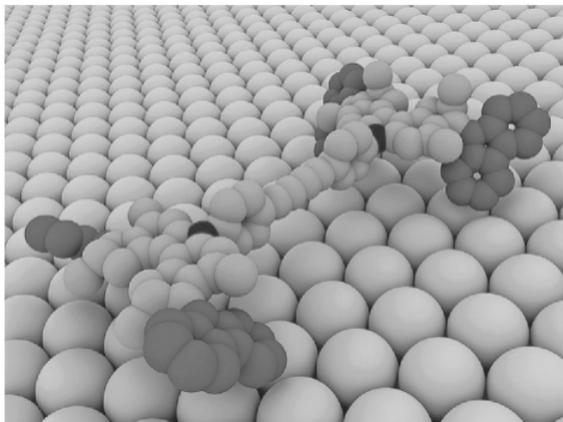


**Рис. 3.** Принцип работы молекулярного мотора Феринга. Изображение с сайта nobelprize.org

фениленовый фрагмент не окислен, то электронная плотность на его бензольном кольце выше, чем на бензольном кольце, диоксифениленового фрагмента, поскольку нейтральные атомы азота являются более эффективными донорами, чем атомы кислорода. Поэтому при восстановлении диаминофениленового фрагмента «надетый» на стержень макроцикл перемещается обратно к диаминодифениленовому фрагменту.

С использованием вышеизложенной концепции были созданы «молекулярный лифт», «молекулярные мышцы», различные молекулярные топологические структуры, представляющие теоретический интерес, и даже искусственная рибосома, способная очень медленно синтезировать короткие белки.

Подход Феринга принципиально другой (рис. 3). В «молекулярном моторе» Феринга крутящиеся друг относительно друга части молекулы сцеплены не механически, а соединены двойной связью  $C = C$ . Из-за внутримолекулярного отталкивания метильных групп и ароматических колец молекула структурно напряжена и двойная связь  $C = C$  удлинена относительно тех средних значений, которые имеют  $C = C$  связи в органических соединениях. Вращение вокруг двойной связи возможно только в ее возбужденном состоянии, когда  $\sigma$ -связь рвется и остается только одинарная  $\sigma$ -связь. При электронном возбуждении под действием УФ-облучения каждый раз происходит поворот на  $180^\circ$ , в результате которого двойная связь восстанавливается и получается еще более напряженная молекула. Чтобы сбросить напряжение, молеку-



**Рис. 4.** Наномашина на золотой поверхности. Изображение с сайта [cen.acs.org](http://cen.acs.org)

ла вращается еще немного, используя тепловую энергию, и таким образом оставляет только один путь вращения при дальнейшем облучении, что создает эффект «молекулярного мотора».

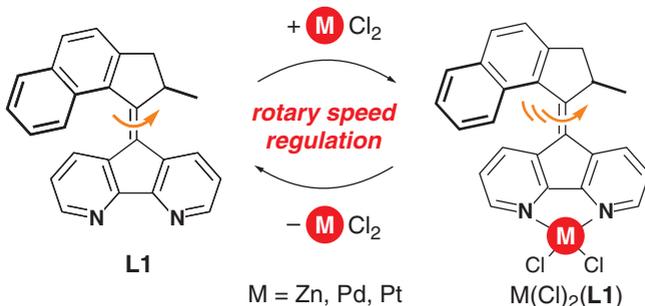
Поскольку переход из основного состояния в возбужденное и обратно происходит за наносекунды, подобные моторы способны делать до 12 миллионов оборотов в секунду.

Наиболее красивое использование мотора Феринга было продемонстрировано в «наномашине» на золотой подложке (рис. 4). Четыре мотора, привязанные как колеса к длинной молекуле, вращаются в одну сторону, и «машина» едет вперед.

В настоящее время разрабатываются молекулярные моторы, активируемые видимым светом. С помощью такого мотора будет возможно преобразовывать солнечную энергию в механическую, минуя электричество.

Феринга также сконструировал мотор, скорость вращения которого можно контролировать с помощью координационного взаимодействия с различными металлами (рис. 5).

Мотор обладает бидентатной лигандной группой, способной связываться с ионом металла. При добавлении молекулы-эффектора (дихлорида цинка, палладия или платины) к молекулярному мотору, последний меняет конформацию, что облегчает вращение. Измерения показали, что при 20 °С из трех проверенных эффекторов мотор быстрее всего вращает платина (с частотой 0,13 Hz), медленнее — палладий (0,035 Hz) и еще медленнее — цинк (0,009 Hz). Максимальная скорость мотора без эффектора 0,0041 Hz. Эффектор можно удалять с мотора путем добавления в раствор других молекул,



**Рис. 5.** Ускорение вращения молекулярного мотора (молекула L1) путем химической модификации — координации молекулы-эффектора, в роли которой выступает дихлорид металла  $M\text{Cl}_2$ , где  $M = \text{Zn, Pd, Pt}$ . Изображение из [1].

которые будут связываться с эффектором сильнее, чем мотор.

В заключение необходимо отметить, что хотя молекулярные моторы пока не нашли широкого применения, уже в ближайшем будущем они будут активно использоваться в различных устройствах, применяемых в повседневной жизни.

## Литература

- [1] A. Faulkner, T. van Leeuwen, B.L. Feringa, *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **138** (41), 13597 (2016).

## Холодные и ультра-холодные атомы: техника приготовления и перспективы применения

А.К. Вершовский

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Лекция посвящена общим принципам техники лазерного охлаждения, создатели которой в 1997 году удостоились Нобелевской премии — хотя идеи, на которых базируются методы лазерного охлаждения, были высказаны еще в 1970-е годы советскими учеными В.С. Летоховым и В.Г. Миногиным. Эта техника позволяет охладить облако атомов до температур, не достижимых никакими другими известными методами — на уровне единиц микрокельвин и сотен нанокельвин, что соответствует тепловым скоростям атомов менее сантиметра в секунду. Более того, сочетанием методов лазерного и испарительного охлаждения удалось перевести атомный ансамбль в принципиально

новое «пятое» состояние вещества — конденсат Бозе–Эйнштейна (Нобелевская премия по физике 2001 года).

В ходе лекции будут рассмотрены основные методы охлаждения атомов и ионов резонансным лазерным светом, и рассмотрено устройство магнито-оптической и ионной ловушек.

Далее будет дан обзор следующих перспективных применений холодных атомов: стандарты частоты радиочастотного и оптического диапазонов; атомные интерферометры, гироскопы и гравиметры на их основе.

Помимо того, что холодные и ультра-холодные атомы представляют огромный интерес в качестве объекта фундаментальных физических исследований, они позволяют решить ряд прикладных задач, в первую очередь — в области прецизионной метрологии.

По сути, методы лазерного охлаждения впервые предоставили в распоряжение исследователей такой объект, как практически неподвижный атом, энергетическая структура которого почти не возмущена его окружением. Частоты, соответствующие интервалам этой структуры, могут быть определены с очень высокой точностью, и использованы в качестве эталонных при проектировании самых прецизионных из существующих физических приборов — стандартов времени и частоты. Таким образом относительная точность этих устройств была повышена на два-три порядка, и сейчас она составляет  $10^{-17}$ – $10^{-18}$  — что примерно соответствует одной секунде за все время существования Вселенной.

Другие, не менее важные, применения медленных холодных атомов связаны с возможностью экспериментального наблюдения интерференции их волновых функций, и построения интерферометров, в которых интерферируют не фотоны, а атомы — при этом роль зеркал выполняют фотоны резонансного лазерного излучения. Такие интерферометры, в частности, обнаруживают предельную чувствительность к ускорениям и вращению, благодаря чему их можно использовать в качестве сверхпрецизионных измерителей этих величин.

## Литература

- [1] C.E. Wieman, D.E. Pritchard, D.J. Wineland. *Rev. Mod. Phys.*, **71**, 2, Centenary (1999).
- [2] William D. Phillips. *Rev. Mod. Phys.*, **70**, 3, July (1998).
- [3] В. И. Балыкин, В/ С. Летохов, В. Г. Миногин. *УФН* **147**, 117 (1985).
- [4] H. S. Margolis, *Contemporary Physics* **51**, 1, January–February, 37 (2010).
- [5] В. И. Балыкин. *Вестник Российской Академии Наук*, **81**, 291 (2011).
- [6] J. Ch. Fang and Jie Qin, *Sensors*, **12**, 6331, (2012).
- [7] P. F. Gillot *et al*, *Metrologia*, **51**, L15 (2014).

# Phase diagram for the transition from photonic crystals to dielectric metamaterials

M.F. Limonov

Ioffe Institute and ITMO University, St Petersburg, Russia

Photonic crystals and dielectric metamaterials represent two different classes of artificial media but are often composed of similar structural elements. The question is how to distinguish these two types of periodic structures when their parameters, such as permittivity and lattice constant, vary continuously. Here we discuss transition between photonic crystals and dielectric metamaterials and introduce the concept of a phase diagram, based on the physics of Mie and Bragg resonances [1–3]. We show that a periodic photonic structure transforms into a metamaterial when the Mie gap opens up below the lowest Bragg bandgap where the homogenization approach can be justified and the effective permeability becomes negative.

Our theoretical approach is confirmed by microwave experiments for a meta-crystal composed of tubes filled with heated water. This analysis yields deep insight into the properties of periodic structures, and provides a useful tool for designing different classes of electromagnetic materials with variable parameters.

## Bibliography

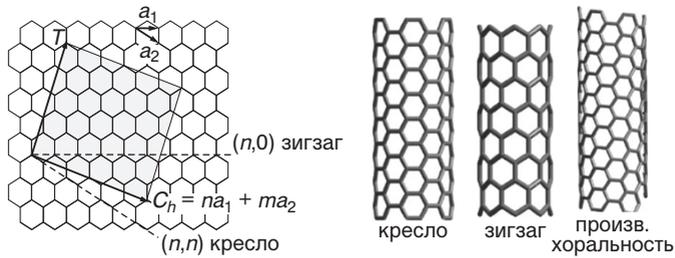
- [1] M.V. Rybin, D.S. Filonov, K.B. Samusev, *et al.*, *Nat. Commun.* **6**, 10102 (2015).
- [2] M.V. Rybin and M.F. Limonov, *Phys. Rev. B* **93**, 165132 (2016).
- [3] M.V. Rybin, K.B. Samusev, I.S. Sinev, *et al.*, *Optics Express* **21**, 30107 (2013).

# Тонкие пленки на основе углеродных нанотрубок и графена для электронных приложений

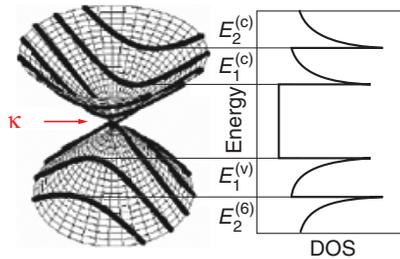
Е.Д. Образцова

Институт общей физики им .А.М. Прохорова, Москва, Россия

Существование одностенных углеродных нанотрубок — наноцилиндров различной геометрии (Рис. 1), свернутых из полосы графенового листа толщиной в 1 атом, было продемонстрировано более 20 лет назад [1–3]. Характерные параметры нанотрубок (диаметр 0.3–3 нм, длина 1–10 мкм) позволили



**Рис. 1.** Схема формирования углеродной нанотрубки и два специфических типа спиральности (хиральности) нанотрубки — кресло ( $n = m$ ) и зигзаг ( $m = 0$ ).

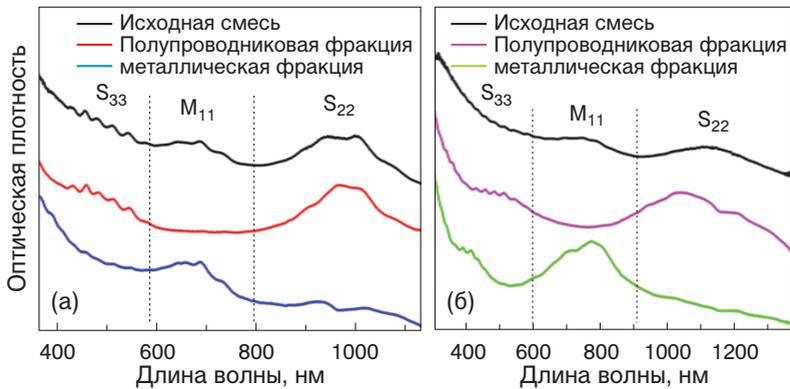


**Рис. 2.** Иллюстрация формирования дисперсионных кривых и одномерной плотности одноэлектронных состояний при переходе от двумерного графена к одностенным углеродным нанотрубкам [5].

считать их одномерным наноуглеродным материалом, для которого плотность одноэлектронных состояний представляет собой набор симметричных относительно уровня Ферми сингулярностей ван Хофа [4,5] (Рис. 2). Параметры электронной структуры изменяются с изменением геометрии нанотрубки.

Уникальной особенностью нанотрубок оказалось то, что в зависимости от геометрии они могут иметь полупроводниковый или металлический тип проводимости. Вскоре это было подтверждено экспериментально [6]. Однако, получить фракции чистых полупроводниковых или чисто металлических нанотрубок (содержащие до 98% нанотрубок одного типа), пригодные для проведения экспериментов, удалось относительно недавно [7–11]. Спектроскопия оптического поглощения оказалась информативным методом для идентификации фракций (Рис. 3).

Каждый тип нанотрубок имеет свою область применения. Металлическая фракция используется для создания сверхлегких проводящих шин. Большие надежды возлагаются на применение чисто полупроводниковой фракции для создания транзисторов и сенсоров транзисторного типа [12]. Полупроводни-

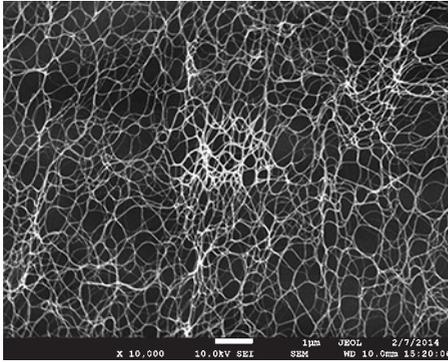


**Рис. 3.** Спектры оптического поглощения исходных, полупроводниковых и металлических фракций ОУНТ, со средним диаметром (а) 1.4 нм, (б) 1.8 нм.

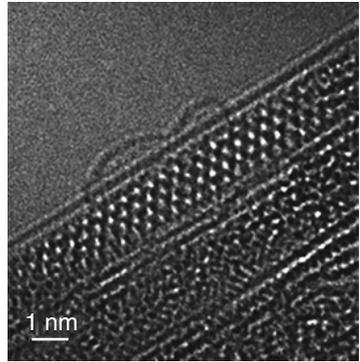
ковые нанотрубки уже нашли применение в нелинейной оптике — для создания сверхбыстрых модуляторов световых пучков (насыщающихся поглотителей) в лазерах. Широкий рабочий спектральный диапазон (800 нм–3 мкм) и короткие времена релаксации электронных возбуждений (десятки фемтосекунд) позволяют при помещении нанотрубочного насыщающегося поглотителя внутрь резонаторов различных лазеров реализовывать режим самосинхронизации мод и получать на выходе цуги фемтосекундных импульсов [14–17]. Использование графена в качестве насыщающегося поглотителя расширяет спектральную область применения углеродных насыщающихся поглотителей до 10 мкм [18,19].

В последнее время возник большой интерес к тонким (с толщиной менее 100 нм) пленкам из одностенных углеродных нанотрубок (Рис. 4), заполненным молекулами — акцепторами электронов (Рис. 5) [20–22]. Они являются макроскопическим объектом и обладают прозрачностью около 90% и поверхностным сопротивлением 50 Ом/квдрат. Эти параметры делают их реальным претендентом на замещение наиболее популярного сегодня материала для прозрачных электродов — ИТО (оксида индия-олова) в оптоэлектронике.

Обнаружено, что заполнение нанотрубок приводит к их легированию р-типа, подтвержденному сдвигом положения тангенциальной моды ( $1592 \text{ см}^{-1}$ ) в спектрах комбинационного рассеяния света и подавлением полос 11 и 22 в спектрах оптического поглощения света. Оцененный сдвиг уровня Ферми в валентную зону составляет около 1 эВ. После легирования электрическое сопротивление трубок падает почти на порядок, а оптическое пропускание увеличивается на 3–5% [23,24]. Эффект проявляется сильнее во



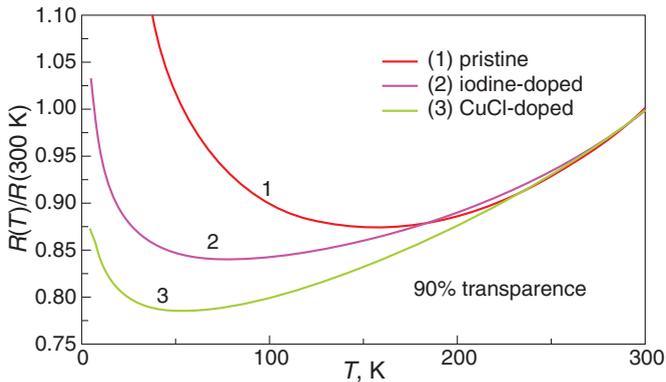
**Рис. 4.** Изображение тонкой пленки из одностенных углеродных нанотрубок, полученное методом сканирующей электронной микроскопии.



**Рис. 5.** Электронно-микроскопическое изображение одномерного кристалла CuCl, сформированного в канале одностенной углеродной нанотрубки.

фракциях трубок, разделенных по типу проводимости [25].

Термо-зависимое электрическое сопротивление пленок удалось достаточно точно аппроксимировать с помощью модели, учитывающей 2 вклада — сопротивление самих пучков как одномерного объекта и туннелирование с термо-зависимой высотой барьера между пучками нанотрубок. Изменение температуры точки перегиба определяется тем фактом, что при сдвиге уровня Ферми в валентную зону, в процессе рассеяния электронов, определяющем электрическое сопротивление материала, начинают участвовать дополнитель-



**Рис. 6.** Температурная зависимость электрического сопротивления пленок из одностенных углеродных нанотрубок, заполненных различными акцепторами (йод, CuCl).

ные фононы, запрещенные в чистых нанотрубках.

Эффекты оптического просветления и падения электрического сопротивления наблюдаются также при газозаимном легировании пленок графена.

## Литература

- [1] S. Iijima *Nature* **354**, 56 (1991).
- [2] S. Iijima, T. Ichinashi *Nature* **363**, 603 (1993).
- [3] D. S. Bethune, C.-H. Kiang, M. S. de Vries, *et al.*, *Nature* **363**, 605 (1993).
- [4] W. Mintwire, C.T. White *Phys. Rev. Lett.* **81**, 2506 (1998).
- [5] R. Saito, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, Imperial College Press, London, 1998, с. 272.
- [6] H. Kataura, Y. Kumazawa, Y. Maniwa, I. Umezumi *Synthetic Metals*, **103**, 2555 (1999).
- [7] M.S. Arnold, A.A. Green, J.F. Hulvat, *et al.*, *Nature Nanotech.* **1**, 60 (2006).
- [8] T. Tanaka, Y. Urabe, D. Nishide, H. Kataura, *Appl. Phys. Exp.* **2**, 125002 (2009).
- [9] C.Y. Khripin, J.A. Fagan, and M. Zheng, *J. Am. Chem. Soc.* **135**, 6822 (2013).
- [10] A.I. Chernov and E.D. Obraztsova *Phys. Status Solidi B* **246**, 2477 (2009).
- [11] V.A. Eremina, P.A. Obraztsov, P.V. Fedotov, *et al.*, *Phys. Status Solidi B* 1–7 (2016) / DOI 10.1002/pssb.201600659.  
bibitemobraztsova12 A.E. Islam, J.A. Rogers, M.A. Alam *Adv. Mater.* **27**, 7908 (2015).
- [12] Н.Н. Ильичев, Е.Д. Образцова, С.В. Гарнов, С.Е. Мосалева *Квантовая электроника* **34**, 572 (2004).
- [13] A.V. Tausenev, E.D. Obraztsova, A.S. Lobach, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 171113(1-3) (2008).
- [14] M.A. Solodyankin, E.D. Obraztsova, A.S. Lobach, *et al.*, *Optics Letters* **33**, 1336 (2008).
- [15] Yu Wang, Shaif-ul Alam, E.D. Obraztsova, *et al.*, *Optics Letters* **41**, 3864 (2016).
- [16] P.A. Obraztsov, M.G. Rybin, A.V. Tyurnina, *et al.*, *NanoLetters* **11**(4), 1540 (2011).
- [17] В.Р. Сороченко, Е.Д. Образцова, П.С. Русаков, и др., *Квантовая электроника*, **42** (10), 907 (2012).
- [18] M. Monthieux *Carbon Meta-Nanotubes*, John Willey & Son, Ltd. Publication, 2012, 426 с.
- [19] A. Eliseev, L. Yashina, M. Kharlamova, *et al.*, *In-Tech*, 2011, Chap. 8, pp. 127–156.
- [20] A.A. Tonkikh, E.D. Obraztsova, E.A. Obraztsova, *et al.*, *Phys. Status Solidi B* **249** (12), 2454 (2012).
- [21] A.A. Tonkikh, V.I. Tsebro, E.A. Obraztsova, *et al.*, *Carbon* **94**, 768 (2015).
- [22] V.I. Tsebro, A.A. Tonkikh, D.V. Rybkovskiy, *et al.*, *Phys. Rev. B* **94**, 245438 (1–10) (2016).
- [23] P.V. Fedotov, V.A. Eremina, A.A. Tonkikh, *et al.*, *Phys. Status Solidi B* **253** (12), 2400 (2016).

# Вращение одиночных молекул туннельным током

С.Г. Тиходеев

Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова и Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

В лекции будет рассказано об управлении движением адсорбированной на поверхности металла молекулы (или атома) с помощью неупругого туннельного тока электронов. Предполагается, что туннельный ток пропускается через адсорбированную молекулу через иглу туннельного микроскопа, остановленную над молекулой. В зависимости от приложенного между иглой и подложкой напряжения, неупруго туннелирующие через молекулу электроны могут возбуждать различные колебательные степени свободы адсорбированной молекулы и вызывать ее передвижение по поверхности, например, вращение, или десорбцию, диссоциацию или химическую реакцию с другой молекулой. Будут проанализированы различные механизмы передачи возбуждения от туннелирующих через молекулу электронов к колебательным степеням свободы, как напрямую вследствие электрон-фононного взаимодействия, так и через ангармонизм колебательных степеней свободы. Для теоретического описания скоростей процессов передачи возбуждения и возникающих в результате неравновесных распределений возбуждений по степеням свободы будет использована диаграммная техника Келдыша для неравновесных процессов [1,2]. В качестве примера будет рассмотрено вращение единичной молекулы ацетилена  $C_2H(D)_2$  на поверхности меди  $Cu(001)$  [3,4].

## Литература

- [1] Л.В. Келдыш, *ЖЭТФ* **47**, 1515 (1964).
- [2] S.G. Tikhodeev and H. Ueba, Ch. 20 in *Problems of condensed matter physics. Quantum coherence phenomena in electron-hole and coupled matter-light systems*, eds. A.L. Ivanov and S.G. Tikhodeev, Oxford University Press, 2008.
- [3] Y.E. Shchadilova, S.G. Tikhodeev, M. Paulsson, and H. Ueba, *Phys. Rev. Lett* **111**, 186102 (2013).
- [4] Y.E. Shchadilova, S.G. Tikhodeev, M. Paulsson, and H. Ueba, *Phys. Rev. B* **89**, 165418 (2014).

# Топология в физике конденсированных сред: от перехода Березинского–Костерлица–Таулесса до топологических изоляторов

И.С. Бурмистров

ИТФ им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Московская обл., Россия

В докладе будет дан краткий обзор основных идей, связанных с существованием топологического порядка в физике конденсированных сред, за последние 30 лет, начиная от перехода Березинского–Костерлица–Таулесса до современной классификации топологических изоляторов и сверхпроводников. Более детально ознакомится с топологическими идеями в физике конденсированных сред можно в следующих книгах и обзорах.

## Литература

- [1] В.Л. Березинский, *Низкотемпературные свойства двумерных систем с непрерывной группой симметрии*, ФИЗМАТЛИТ 2007.
- [2] J. M. Kosterlitz, *Rep. Prog. Phys.* **79**, 026001 (2016).
- [3] X.-L. Qi and S.-C. Zhang, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 1057 (2011).
- [4] M.Z. Hasan and C.L. Kane, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 3045 (2010).
- [5] F. Evers, A.D. Mirlin, *Rev. Mod. Phys.* **80**, 1355 (2008).

## Optical properties of BN for UV emission

B. Gil

Université de Montpellier-Place Eugène Bataillon Montpellier, France

While discovering in 1986 that the growth of a low temperature buffer layer at the interface with the sapphire substrate was improving the performances of GaN, Nobel Prizes Isamu Akasaki and Hiroshi Amano, as well as their handsome collaborators of Nagoya probably did not realize how impacting would be this discovery. A couple of years later, after that they had managed to control both p-type and n-type dopings, they realized this GaN-AlGaN light emitting diode (LED) that is still visible in a photograph at the first-floor museum of the Akasaki Research Center. Hundreds of different devices derive from their pioneering works at the Meijo and Nagoya universities. The opto-electronic market now overlaps with

the huge market of solid state lighting, based on the utilization of blue light emitters coupled to yellow light emitting phosphors.

Although the yield of such LEDs is very good in the blue, the supremacy of the nitride technology is more difficult to establish at both sides, namely in the green and ultraviolet (UV) wavelength regions. The reasons for these difficulties have different origins. In case of devices that would fill the green gap, it is mandatory to grow very high quality indium-rich alloys so that non radiative recombination rates are almost eradicated and no longer compete against the radiative recombination rate. Regarding the deep UV, the dominating issue is the control of the p-type doping of aluminium-rich AlGaIn alloys and their valence band physics.

Boron nitride is an alternate for realizing hole injection. Realizing optoelectronic devices that combine wurtzitic nitrides with a hexagonal crystal is however a multiple hurdle race. Researchers are facing many challenges but the recent growth of h-BN films by metal-organic vapour epitaxy (MOVPE) (*Appl. Phys. Lett.* **108**, 052106, 2016) indicates that scientists are probably on the good way.

In this communication we demonstrate the indirect nature of the band gap of h-BN using one-photon and two-photon cw photoluminescence, photoluminescence excitation spectroscopy and time-resolved photoluminescence in the 8–300 K range, using bulk h-BN crystals commercialized by hqgraphene<sup>1</sup>. We demonstrate the specificity of the indirect band gap (valence band maximum at K point of the first Brillouin zone, and conduction band minimum at M) and we identify different phonon-assisted transitions and their overtones. The indirect exciton binding energy is found to be about 130 meV (*Nature Photonics* 10.1038/nphoton.2015.277). We demonstrate that the strong, lower energy (about 5.5 eV) luminescence lines result of a cascade of TO(K) phonon-assisted intervalley scattering processes stimulated by defects of the crystal (*Phys. Rev. B* **93**, 035207, 2016).

This permits us to claim quantitatively, based on our study that the absence of such PL at 5.5 eV in the MOVPE crystals referred above is an indicator of a really very good quality. This indicates, we believe, the following: (i) that the quality of h-BN epilayers is now mastered, and (ii) that it is interesting, and (iii) that this material is in its way for application in the UV. Time has now come for it to be more deeply investigated, in particular by device growers.

In my talk, I will detail the optical properties of H-BN in the range from low to high temperatures.

Acknowledgements: We are grateful to the help of Pierre Valvin, Guillaume Cassabois, and Christian L'hénoret at many stages of that work. We acknowledge

---

<sup>1</sup>[www.hqgraphene.com](http://www.hqgraphene.com)

edge financial support by the Government of Russian Federation (Project No. 14.W03.31.0011) and GANEX (ANR-11-LABX-0014).

## **Микро- и наносистемы для медико-биологической экспресс диагностики**

В.В. Лучинин

СПбГЭТУ «ЛЭТИ», С.-Петербург, Россия

В «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации», утвержденной президентом России 1 декабря 2016 года, в качестве приоритетов научно-технологического развития России определены:

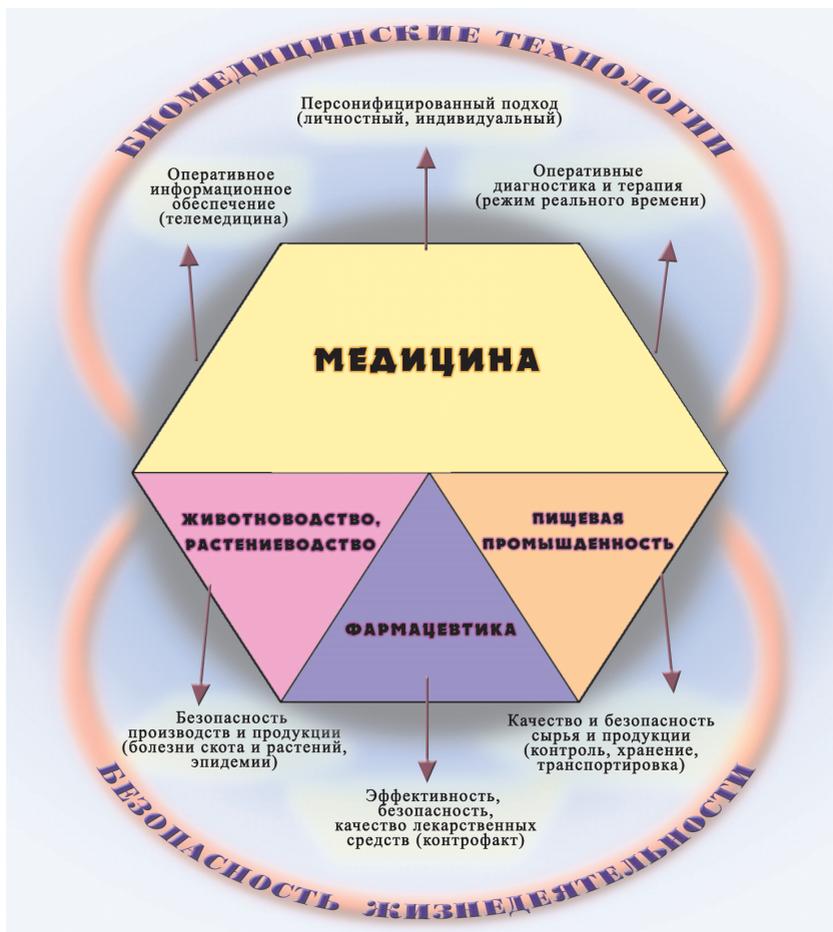
- переход к персонализированной и прогностической медицине, противодействие новым возвращающимся «исчезнувшим» инфекциям, готовность к новым демографическим и социальным условиям;
- профилактическая направленность и персонализация биомедицинского мониторинга, вплоть до домашних условий, а также спрос на неинвазивные технологии и методы диагностики с достижением возможности высокой избирательности терапевтического воздействия.

Востребованность технологий избирательной молекулярной сенсорики и «адресной» доставки лекарств определили развитие микро- и нанотехнологии диагностикумов «*in vitro*» (лаборатории-на-чипе), «*in vivo*» (кластеры, наночастицы).

В данном сообщении представлены результаты разработок Центра микротехнологии и диагностики Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») [1,2] в области интенсивно развивающегося мультидисциплинарного научно-технического направления, обеспечивающего создание микро- и наноразмерных систем, выполняющих функции миниатюрных экспресс диагностикумов при решении задач безопасности человека в ряде социально-ориентированных технологий: медицина, фармацевтика, пищевая промышленность, животноводство, растениеводство.

В основе процессов создания гетерогенных и гибридных аналитико-диагностических систем лежат современные микро-, нано-, био-, и информационные технологии [3,4], включая:

- культивирование колоний бактерий на наноразмерных матрицах;
- секвенирование участков генома с помощью миниатюрных термоциклирующих ПЦР модулей;



**Рис. 1.** Направления развития социально-ориентированных биомедицинских технологий и обеспечение безопасности жизнедеятельности.

- электрофоретический микрочиповый анализ с использованием флуоресцентного детектирования;
- автоматическое распознавание и идентификация микробиообъектов с помощью оптоэлектронных матриц различных спектральных диапазонов;
- синтез инкапсулированных коллоидных магнитных наночастиц для избирательной доставки лекарственных препаратов.

**Таблица 1.** Матрица востребованности исследований и разработок для медико-биологической практики

Социально-ориентированные биомедицинские технологии	Направления медико-биологических исследований и разработок				
	Биомолекулярный дизайн	Молекулярная экспресс-диагностика <i>in vitro</i> (лаборатория на чипе)	Молекулярная диагностика и терапия <i>in vivo</i> (коллоиды)	Искусственные органы, биотехнические гибридные микросистемы	«Умная одежда» — интеллектуальный текстиль
Профилактика социально-значимых заболеваний	+	+	+	+	+
Персонализированная медицина	+	+	+	+	+
Замещение утраченных органов и функций	+	+	+	+	+
Расширение функциональных возможностей человека	0	+	0	+	+

Представленная ниже таблица отражает матрицу востребованности микро- и нанотехнологических исследований и разработок для медико-биологической практики.

Показано, что для реализации аналитико-диагностических микроустройств методами интегрально-групповых технологий с учетом обеспечения массовости продукции и ее экономической доступности, наибольший интерес представляют цифровые микропроизводства типа «фабрики на столе» [5]. Кроме того, учитывая необходимость работы с наноразмерными объектами неорганической, органической и биоорганической природы представлен анализ базовых положений, определяющих опасность работы с объектами и процессами нанотехнологий [6].

## Литература

- [1] В. Кутузов, В. Лучинин, З. Юлдашев *Наноиндустрия*, 7 (53), 42 (2014).
- [2] В.В. Лучинин, И.К. Хмельницкий, *Биотехносфера*, 6, 80 (2014).
- [3] В.А. Карасев, В.В. Лучинин *Введение в конструирование бионических наносистем*. М. Физматлит, 2009, 464 стр.

- [4] Т.М. Зими́на, А.В. Соловьёв, Ю.А. Гвоздев и др. *Биотехносфера*, **5** (41), 3 (2015).  
[5] В.В. Лучинин. *Наноиндустрия*, **8** (70), 84 (2016).  
[6] В.В. Лучинин, И.К. Хмельницкий. *Нано- и микросистемная техника*, **12** (185), 3 (2015).

## Сила света: от атомов до космического корабля

А.А. Богданов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Фотоны, как и механические частицы, обладают энергией, импульсом и моментом импульса. При столкновении с материальными объектами фотон может полностью или частично передавать их. Говоря простым языком, свет может оказывать давление на материальные объекты или даже заставлять их двигаться.

В докладе кратко будет представлена история развития оптомеханики: от Иоганна Кеплера, который впервые предположил, что солнечный свет может оказывать давление на хвосты комет, до современных космических аппаратов с солнечным парусом. Будут объяснен принцип действия оптического пинцета [1], изобретенного А. Ашкиным, и широко применяющемся сегодня для удержания наночастиц, клеток и даже отдельных атомов. Будет рассказано, каким образом изобретение оптического пинцета привело к Нобелевской премии по физике 1997 года [2].

Особое внимание в докладе будет уделено так называемым оптическим силам притяжения. Дело в том, что со времен опытов Лебедева [3] считалось, что свет может только оказывать давление на предметы, то есть толкать их в направлении от источника света и оптический луч, притягивающий предметы, до недавнего времени оставался исключительно фантастическим явлением. Однако в 2010 году ученым удалось теоретически обосновать и продемонстрировать это необычное явление [4,5]. В докладе будет дан его анализ и рассмотрены возможные приложения в биологии, химии и медицине.

### Литература

- [1] A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.* **24** (4), 156 (1970).  
[2] [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1997](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1997)  
[3] P. Lebedew, *Annalen der Physik*, **311** (11), 433 (1901).  
[4] V.G. Shvedov, A.V. Rode, Y.V. Izdebskaya, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **105** (11), 118103 (2010).  
[5] S. Sukhov and A. Dogariu, *Optics Lett.*, **35**, 3847 (2010).

# Оптомеханические резонаторы в атомно-силовой микроскопии

П.А. Алексеев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В последнее десятилетие активно развиваются исследования в области физических свойств [1] и разработки приборов [2] на базе оптомеханических резонаторов. Оптомеханический резонатор представляет собой оптическую полость, границы которой имеют механическую степень свободы [3]. Например, если в резонаторе Фабри–Перо, состоящем из двух зеркал, одно из зеркал закреплено на механической пружине, то в нём можно реализовать сильную связь между оптическими и механическими модами. Действительно, при накачке такого резонатора оптическим излучением на подвижное зеркало будет действовать сила радиационного давления, пропорциональная плотности оптической энергии запасённой в резонаторе. При смещении подвижного зеркала оптическая добротность резонатора будет уменьшаться. Изменение оптической добротности приведёт к уменьшению плотности оптической энергии в резонаторе и соответственно силы действующей на подвижное зеркало. Зеркало вернётся в первоначальное положение. Таким образом, происходит связывание степеней свободы оптического и механического резонатора. Поскольку сила, действующая на зеркало, зависит от его положения, то градиент этой силы будет приводить к изменению эффективной жёсткости «пружины», на которой закреплено подвижное зеркало, а также к изменению резонансной частоты. Стоит отметить, что к сдвигу механической резонансной частоты может приводить не только давление света, но и тепловой нагрев вследствие поглощения оптического излучения [4].

В оптомеханических резонаторах с высокой добротностью, при изменении положения подвижного зеркала, сила, действующая на него, меняется не мгновенно, а с некоторым временем запаздывания, из-за медленного утекания света из высокодобротного резонатора. Зависимость величины силы от координаты подвижного зеркала представляет собой лоренциан [5]. Если зеркало совершает колебательные движения на возрастающем участке лоренциана, то радиационная сила будет совершать отрицательную работу и демпфировать механические колебания зеркала. Следовательно, подвижное зеркало будет «охлаждаться» [6] на резонансной частоте колебаний. На спадающем участке

лоренциана амплитуда колебаний зеркала будет возрастать. Данный эффект называется динамическим обратным влиянием (backaction) поскольку световое поле оказывает влияние на механический резонатор после того как резонатор изменил поле [7].

Оптомеханическое охлаждение активно используется в резонаторах различной конфигурации. Основной мотивацией подобных исследований являлось охлаждение механического резонатора до основного квантового состояния. Для достижения этой цели энергия тепловых шумов резонатора « $kT$ » не должна превышать энергию основного состояния. Недавно эта цель была достигнута [8]. Кроме того, оптомеханические резонаторы позволяют достигнуть стандартного квантового предела в измерении положения подвижного зеркала и даже обойти этот предел с помощью состояний «сжатого» света [9].

В атомно-силовой микроскопии (АСМ) для получения информации о рельефе поверхности используется зонд, который представляет собой прямоугольную балку (кантилевер) на свободном конце которой закреплена острая пирамида. Типичная ширина кантилевера составляет  $\sim 30$  мкм, длина 100–300 мкм. Отклонение кантилевера, покрытого отражающим слоем, как правило, регистрируется оптическими методами. Коммерчески доступные АСМ кантилеверы стали одними из первых наномеханических резонаторов, на которых было продемонстрировано оптомеханическое охлаждение [4], позволившее достигнуть снижения эффективной температуры зонда на три порядка [10]. При этом оптомеханическое связывание происходило за счёт теплового нагрева зонда, а не давления света. Были предложены различные схемы оптомеханического связывания, позволяющие существенно повысить чувствительность АСМ кантилеверов [11,12].

Стоит отметить, что для создания оптомеханического резонатора на базе АСМ зонда, в качестве неподвижного зеркала используют полупрозрачное оптическое волокно, через которое в резонатор заводят оптическое излучение, а также считывают информацию о его состоянии. Недавно нами было показано, что в качестве неподвижного зеркала можно использовать зеркало полупроводникового лазера с резонатором Фабри–Перо [13] или вертикально-излучающего лазера с распределённым брэгговским отражателем. При этом для случая вертикально-излучающего лазера оптомеханическое связывание может приводить к контролируемой перестройке длины волны лазера [14]. Для лазера с резонатором Фабри–Перо было показано оптомеханическое связывание с коммерчески-доступными АСМ зондами, не только в вакуумных условиях с высокой механической добротностью, но и при атмосферном давлении. Было показано снижение эффективной температуры зонда до  $\sim 100$  К. Кроме того, использование атомно-силовых микроскопов позволяет опреде-

лять длину волны лазера без применения спектрометра, а также оценивать степень монохроматичности.

В работе принимали участие В.А. Шаров и М.С. Дунаевский. Работа поддержана грантом Президента РФ МК-7001.2016.2.

## Литература

- [1] M. Aspelmeyer, T.J. Kippenberg, F. Marquardt, *Rev. Mod. Phys.* **86** 1391–1452 (2014).
- [2] M. Metcalfe, *Appl. Phys. Rev.* **1** 031105 (2014).
- [3] I. Favero and K. Karrai, *Nat. Photonics* **3**, 201–205 (2009).
- [4] C. H. Metzger and K. Karrai, *Nature* **432**, 1002–1005 (2004).
- [5] F. Marquardt and S.M. Girvin, arXiv:0905.0566v1 (2009).
- [6] A. Sawadsky, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **114** 043601 (2015).
- [7] T.J. Kippenberg and K.J. Vahala, *Science* **321** 1172–1176 (2008).
- [8] J. Chan, *et al.*, *Nature* **478**, 89–92 (2011).
- [9] J.B. Clark, *et al.*, *Nature* **541**, 191–195 (2017).
- [10] D. Kleckner and D. Bouwmeester, *Nature* **444**, 75–78 (2006).
- [11] Y. Liu, *et al.*, *Opt. Express* **20**, 18268–18280 (2012).
- [12] A. Yoshinaka, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 133103 (2011).
- [13] M. Dunaevskiy, P. Alekseev, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **106**, 171105 (2015).
- [14] W. Yang, *et al.*, *Sci. Rep.* **5**, 13700 (2015).

## Механизмы усиления фототока в полупроводниковых наноструктурах

О.С. Кен

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

На современном этапе развития физики твердого тела основными объектами исследования в большей степени становятся не объемные полупроводниковые кристаллы, а низкоразмерные структуры: тонкие пленки, многослойные тонкопленочные структуры, нитевидные нанокристаллы, наночастицы. Если размеры этих объектов в каком-либо направлении сравнимы с длиной волны де Бройля, происходит изменение энергетического спектра носителей заряда — он становится дискретным в направлении, вдоль которого движение ограничено. Такое «размерное» квантование существенно влияет на физические свойства наноструктур и приводит к появлению уникальных свойств, отличных от свойств объемных кристаллов.

Исследования фотоэлектрических свойств полупроводниковых наноструктур, кроме фундаментального интереса, представляют и чисто прикладной.

Ведется работа над тем, чтобы использовать наноструктуры для создания чувствительных фотодетекторов, способных регистрировать очень слабые световые сигналы, а также т.н. «третьего поколения» солнечных элементов с высоким КПД. Может ли быть квантовый выход фотодетектора больше единицы? Оказывается, что да: для этого нужны структуры с внутренним усилением, причем получить усиление в наноструктурах иногда гораздо проще, чем в объемных полупроводниках. В лекции будут рассмотрены основные механизмы внутреннего усиления фототока, которые могут быть реализованы в фотодетекторах и солнечных элементах как на основе объемных, так и низкоразмерных полупроводниковых структур: ударная ионизация горячими фотоносителями, мультиэкситонная генерация (*multiple exciton generation*), фототранзисторный эффект, усиление фотопроводимости и плазмонное усиление.

Особое внимание будет уделено структурам с наночастицами кремния, ведь кремний остается основным материалом для производства микро- и оптоэлектронных устройств. Для создания фотодетекторов и солнечных элементов нужны массивы (ансамбли) кремниевые наночастицы. Из массива наночастиц может быть сформирована  $i$ -область  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов, наночастицы могут быть встроены в область объемного заряда в элементах с барьером Шоттки или мелким  $p$ - $n$ -переходом. При этом наночастицы должны быть электрически связаны друг с другом. В трехмерном массиве наночастицы сохраняют часть своих квантово-размерных свойств, но в некоторой степени должны проявляться и коллективные, дальнедействующие эффекты, характерные для твердых тел. Например, в упорядоченном массиве близко расположенных кристаллических наночастиц может появляться сильное электронное взаимодействие между наночастицами и делокализация носителей, аналогично тому, как это происходит в сверхрешетках из связанных квантовых ям.

В последнее время большое внимание уделяется композитным системам, состоящим из полупроводниковых и металлических наночастиц. Взаимодействие света со свободными электронами металлов приводит к возбуждению поверхностных плазмонных мод. Этот процесс характеризуется сильным рассеянием и возрастанием электрического поля вблизи металлических наночастиц. Взаимодействие между металлическими и полупроводниковыми наночастицами при возбуждении плазмонных резонансов приводит к увеличению поглощения света, а значит, может способствовать увеличению квантовой эффективности фототока композитной структуры. Особенности фотоэлектрических свойств композитных структур также будут рассмотрены в лекции.

# Оптические пинцеты: принцип работы и применения

Г.С. Соколовский

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Оптический захват частиц малых и сверхмалых размеров при помощи лазерного луча основан на силах, связанных с давлением света. Причиной возникновения этих сил является сохранение импульса, присущего фотонам, при поглощении, отражении и преломлении света на микрочастице [1]. Способность основанных на этом эффекте оптических пинцетов манипулировать отдельными клетками сделала их незаменимыми при сортировке частиц в коллоидных растворах и популяции живых клеток за счет использования разницы в размере и показателе преломления [2,3]. Оптические пинцеты применяются для зондирования цитоскелета и изучения мобильности клеток и позволяют целенаправленно доставлять наночастицы в определённую область внутри живой клетки и проводить внутриклеточные операции [4]. Оптические пинцеты также применялись для наблюдения пошагового движения моторных белков, таких, как например, кинезин [5] и миозин [6], что продемонстрировало возможности передвижения подобных моторов на сотни шагов [7]. К сожалению, широкое применение оптических пинцетов сдерживается применением в них в качестве источников света громоздких и дорогих твердотельных и газовых лазеров. Использование в подобных устройствах дешёвых и компактных полупроводниковых лазеров в настоящее время сдерживается низким пространственным совершенством их излучения. На решение этой проблемы направлены усилия по генерации т.н. бесселевых лучей и сверхфокусировке излучения полупроводниковых лазеров [8], что в перспективе позволит практически на порядок снизить конечную стоимость оптических пинцетов и, что особенно важно, серьёзно продвинуться в сторону компактизации и удешевления прототипов устройств типа «лаборатория на чипе».

## Литература

- [1] A. Ashkin, J.M. Dziedzic, *Science* **235**, 1517 (1987).
- [2] K. Ladavac, K. Kasza, D. Grier, *Phys. Rev. E* **70**, 010901 (2004).
- [3] M.P. MacDonald, G.C. Spalding, K. Dholakia, *Nature* **426**, 421 (2003).
- [4] C. McDougall, D.J. Stevenson, Brown *et al.*, *J. of Biophotonics* **2** 12, 736 (2009).
- [5] K. Svoboda, C.F. Schmidt, B.J. Schnapp, *et al.*, *Nature* **365**, 721 (1993).
- [6] J.T. Finer, R.M. Simmons, J.A. Spudich, *Nature* **368**, 113 (1994).
- [7] C.L. Asbury, A.N. Fehr, S.M. Block, *Science* **302**, 2130 (2003).
- [8] G.S. Sokolovskii, V.V. Dudelev, S.N. Losev *et al.*, *Progress in Quantum Electronics*, **38**(4), 157 (2014).

# Наномеханика графена

В.Ю. Качоровский

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Графен представляет собой знаменитый пример двумерной кристаллической мембраны толщиной в один атомный слой. Это чрезвычайно прочный, легкий и хорошо проводящий материал из семейства углеродных соединений. Графен был впервые создан и подробно исследован Константином Новоселовым и Андреем Геймом. В 2010 году за эти работы была присуждена Нобелевская премия по физике.

Настоящий доклад посвящен анализу уникальных упругих свойств графена. Эти свойства тесно связаны с вопросом о термодинамической устойчивости двумерных систем. На самом деле, уже сам факт существования двумерной кристаллической мембраны чрезвычайно удивителен, так как противоречит хорошо известному утверждению о нестабильности двумерных кристаллов [1]. Действительно, тепловые флуктуации стремятся изогнуть мембрану и разрушить дальний порядок в системе. Существует, однако, конкурирующий эффект, благодаря которому мембрана может остаться термодинамически стабильной. Оказывается, что сильное ангармоническое взаимодействие между изгибными и продольными колебательными модами мембраны стремится стабилизировать двумерный кристалл [2]. Таким образом, ангармонические эффекты в графене проявляют себя крайне необычно по сравнению с другими материалами. В частности, благодаря ангармонизму, изгибная жесткость чистой изолированной мембраны,  $\kappa$  возрастает степенным образом по мере увеличения размера системы  $L$  с некоторым показателем  $\eta$ :  $\kappa \sim L^\eta$ . Более того, изолированные пленки графена могут демонстрировать ряд критических явлений (см. работы [3–5] и ссылки в этих работах), в том числе два фазовых перехода — переход из плоского в скомканное состояние [crumpling transition (СТ)] и переход, связанный с потерей устойчивости плоской фазы под действием внешнего сжатия [buckling transition (ВТ)]. Критические индексы этих переходов выражаются через показатель  $\kappa$ , отвечающий за ангармонические эффекты.

Оказывается, что СТ в значительной степени аналогичен переходу магнетика в ферромагнитное состояние. При этом, в полной аналогии с магнетиком, происходит спонтанное нарушение симметрии: сферически симметричная «скомканная фаза» переходит в плоское состояние с некоторой произ-

вольной ориентацией плоскости. Удивительным образом, эффекты, связанные с СТ, существенно меняют упругие свойства пленок даже вдали от точки перехода, глубоко в плоской фазе. Наиболее интересно СТ проявляется в коэффициенте теплового расширения. Последний оказывается отрицательным и с хорошей точностью постоянным вплоть до экстремально малых температур [4]. В настоящее время неизвестен материал, который обладал бы таким необычным свойством. Не менее необычными являются проявления ВТ. В частности, оказывается, что обычный линейный закон Гука для кристаллической мембраны не выполняется [5]. Растяжение изолированного листа графена растет с приложенным напряжением степенным образом, причем показатель степени является критическим индексом ВТ. Существенно, что этот индекс различен для чистого и сильно разупорядоченного графена, в котором существуют статические изгибные деформации, так называемые рипплы (ripples) [5].

До полного понимания физики данных явлений еще далеко и они в настоящее время интенсивно исследуются теоретически. Принципиальным моментом является наличие существенной экспериментальной базы для таких исследований. Буквально в последние годы появились новые яркие эксперименты и численные расчеты, однозначно указывающие на критическое поведение упругих свойств графена.

В частности, экспериментально [6] и численно [7] был проверен нелинейный закон Гука, причем результаты находятся в очень хорошем согласии с теорией [5].

Также в ряде недавних экспериментов [8–9] и численных расчетов [10] было изучено образование периодических доменных упругих структур в графене на подложке из бор-нитрида. Сама по себе возможность образования периодических структур в слоистой системе с разными постоянными решетки хорошо известна. Принципиально новым результатом, который в настоящее время не имеет теоретического объяснения, является то, что начиная с некоторого критического размера периода структуры, эффективная модуляция упругих констант приобретает вид доменов с четко выраженными стенками. Этот результат, скорее всего, имеет прямое отношение к ВТ, так как потеря устойчивости мембраны под действием сжимающей силы происходит начиная с некоторого критического размера области, к которой приложена сила (при заданной величине силы). Построение последовательной теории такой структуры чрезвычайно важно и для транспортных свойств системы, так как известно, что сильные статические деформации могут приводить к возникновению гигантских псевдомагнитных полей в графене [11].

Имеется также значительная экспериментальная активность в изучении

пузырьков, возникающих при «приклеивании» графена к подложке (см. [12] и ссылки в этой работе). Свойства таких пузырьков определяются балансом между упругими силами и силами Ван-дер-Ваальса. Существующая в настоящее время теория (представленная в той же работе [12]), не учитывает критическое поведение графенной мембраны и потому может давать не только количественно, но и качественно неправильные ответы.

Помимо экспериментов, описанных выше, существует также ряд других чрезвычайно интересных экспериментальных и численных результатов, которые пока остаются не вполне понятными. Например, до сих пор неясно, чему равен для графена один из важнейших параметров любого материала — коэффициент Пуассона (отношение поперечного сжатия при продольном растяжении). Теория, описывающая критическое поведение мембраны, предсказывает универсальное, отрицательное значение  $-1/3$ . Этот результат не подтверждается численными расчетами [13], которые показывают, что коэффициент может быть как положительным, так и отрицательным, в зависимости от размера системы и приложенного напряжения. Детальные экспериментальные измерения этой величины также отсутствуют. Построение теории, позволяющей объяснить такое поведение, представляется очень важной задачей, так как коэффициент Пуассона, с одной стороны, отражает критические свойства мембраны, а с другой, его существенно проще измерить, чем критические индексы.

В настоящем докладе будет представлен обзор описанных выше экспериментов, а также недавних теоретических работ, посвященных описанию критического поведения кристаллических мембран на основе графена.

## Литература

- [1] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, *Статистическая физика*, Часть 1, М., Наука, Физ.-мат. лит., (1976).
- [2] D. Nelson, T. Piran, and S. Weinberg (Eds.) *Statistical Mechanics of Membranes and Surfaces* (Singapore, World Scientific, (1989).
- [3] I.V. Gornyi, V.Yu. Kachorovskii, and A.D. Mirlin, *Phys. Rev. B* **92**, 155428 (2015).
- [4] I.S. Burmistrov, I.V. Gornyi, V.Yu. Kachorovskii, *et al.*, *Phys. Rev. B* **94**, 195430 (2016).
- [5] I.V. Gornyi, V.Yu. Kachorovskii, and A.D. Mirlin *2D Materials* **4**, 011003 (2017)
- [6] R.J.T. Nicholl, H.J. Conley, N.V. Lavrik, *et al.*, *Nat. Commun.* **6**, 8789 (2015).
- [7] J.H. Los, A. Fasolino, and M.I. Katsnelson, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 015901 (2016).
- [8] C.R. Woods, L. Britnell, A. Eckmann, *et al.*, *Nat. Physics* **10**, 451 (2014).
- [9] M.M. van Wijk, A. Schuring, M.I. Katsnelson, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 135504 (2014).
- [10] C.R. Woods, F. Withers, M.J. Zhu, *et al.*, *Nat. Commun.* **7**, 10800 (2016).

- [11] N. Levy, S.A. Burke, K.L. Meaker, *et al.*, *Science* **329**, 544 (2010).  
[12] E. Khestanova, F. Guinea, L. Fumagalli, *et al.*, *Nat. Commun.* **7**, 12587 (2016).  
[13] J.H. Los, M.I. Katsnelson (private communication).

## Экситоны в двумерных полупроводниках

М.М. Глазов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В последние годы особый интерес исследователей привлекают атомарно-тонкие — двумерные-полупроводники. С такими системами связывают, в частности, перспективы создания ван-дер-ваальсовых гетероструктур, в которых двумерные слои располагаются один над другим наподобие элементов в конструкторе «лего» [1]. Наиболее ярким представителем двумерных полупроводников является графен, монослой атомов углерода, расположенных в узлах гексагональной решетки. Электрические, транспортные и оптические свойства графена активно исследуются уже более десяти лет. Другим известным примером двумерного материала является монослой гексагонального нитрида бора. В последние годы семейство двумерных полупроводников пополнилось мономолекулярными слоями дихалькогенидов переходных металлов:  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WS}_2$ , и  $\text{WSe}_2$ , а также некоторыми соединениями на основе теллура.

Монослои дихалькогенидов переходных металлов занимают особое место в ряду двумерных полупроводников. В отличие от графена, ширина запрещенной зоны  $E_g$  которого равна нулю, и от гексагонального нитрида бора с  $E_g \sim 5$  эВ, ширина запрещенной зоны дихалькогенидов переходных металлов составляет примерно 2 эВ. Это делает соединения, подобные  $\text{MoS}_2$ , особенно привлекательными для исследования оптических эффектов.

Ключевую роль в оптических свойствах дихалькогенидов переходных металлов играют экситоны — электрон-дырочные пары, связанные кулоновским взаимодействием [2]. Энергия связи основного состояния экситона составляет сотни мэВ, а серия возбужденных состояний заметно отличаются от водородоподобной [3]. Это связано главным образом с достаточно большими (порядка половины массы свободного электрона) эффективными массами электронов и дырок, а также со специфической экранировкой, присущей двумерным и квазидвумерным системам [4]. В лекции будет дан обзор экситонных эффектов в монослоях дихалькогенидов переходных металлов.

### План лекции

1. Введение. Зонная структура монослоев дихалькогенидов переходных металлов.

2. Задача об экситоне в двумерном полупроводнике [3].
3. Тонкая структура экситонных состояний, обменное взаимодействие между электроном и дыркой [5]. Спиновая и долинная динамика экситонов [6].
4. Смешивание экситонных состояний разной четности и нелинейная оптика на экситонах в монослоях дихалькогенидов переходных металлов [7,8].
5. Перспективы и открытые вопросы.

## Литература

- [1] A.K. Geim and I.V. Grigorieva, *Nature* **499**, 419–425 (2013)
- [2] Keliang He, Nardeep Kumar, Liang Zhao, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 026803 (2014).
- [3] A. Chernikov, T.C. Berkelbach, H.M. Hill, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 076802 (2014).
- [4] Л.В. Келдыш, *Письма ЖЭТФ* **29**, 716 (1979).
- [5] M.M. Glazov, T. Amand, X. Marie, *et al.*, *Phys. Rev. B* **89**, 201302 (2014).
- [6] M.M. Glazov, E.L. Ivchenko, G. Wang, *et al.* *phys. status solidi (b)* **252**, 2349–2362 (2015).
- [7] G. Wang, X. Marie, I. Gerber, *et al.*, *em Phys. Rev. Lett.* **114**, 097403 (2015).
- [8] M.M. Glazov, L.E. Golub, G. Wang, *et al.*, *Intrinsic exciton states mixing and non-linear optical properties in transition metal dichalcogenide monolayers*, arXiv: 1610.06780 (2016).

## Сходство и различие в организации неживой материи и материи живого организма и в теоретическом подходе к их описанию

Л.Н. Галль

ИАП РАН, Санкт-Петербург, Россия

То, что теория является важнейшим элементом любой науки — общеизвестно и никем не подвергается сомнению. Один из основных признаков научной теории — предсказание неизвестных явлений. Образцом идеально организованной науки является физика, где все атрибуты теории занимают свои «правильные» места: и исходные постулаты, не имеющие прямых доказательств, но имеющих проверяемые следствия (явления), предсказанные исходя из этих постулатов, и логико-математический аппарат, позволяющий обосновывать эти и последующие следствия, и далее — объяснение явлений (результатов), уже происходивших, т.е. объектов теории: экспериментов.

В отличие от физики, современная молекулярная биология, биохимия и биофизика, своей предсказательной теорией не имеют. Этому есть много причин, из них две главные. Первая — невероятная сложность процессов, происходящих в живом, во много раз превышающая сложность процессов, имеющих место в объектах неживой материи. Вторая — историческая. В начале прошлого века, когда физикой были сформулированы основные базовые представления и началось интенсивное её развитие в сторону прикладных направлений: твердого тела, плазмы, нанофизики и т.д., биология еще была во власти экспериментально-описательного подхода. Сейчас, когда в биологии накопилось множество необъясненных экспериментальных данных, и она обратилась к современной ей сегодняшней физике, та уже далеко ушла от своих истоков. Для понимания же *сущности первичных механизмов, участвующих в трансформациях энергии в живом организме*, необходимой для построения теоретической биологии, необходимо вернуться именно к исходным постулатам физики, являющимся фундаментом как теоретической физики неживой материи, так и теоретической физики материи живого.

Пять главных постулатов — основополагающие принципы строения материи вообще, а, значит, и материи живого организма.

1. 1900 г. Макс Планк: элементарный квант действия  $\hbar$  с размерностью «энергия  $\times$  время».

2. 1905 г. Альберт Эйнштейн: «Если тело отдает энергию  $E$  в виде излучения, то его масса уменьшается на величину  $E/c^2$ », т.е.  $E = mc^2$ .

3. 1913 г. Нильс Бор: существование стационарных состояний и излучательных переходов между ними в соответствии с представлениями Планка о квантовании.

4. 1924 г. Вольфганг Паули: «принцип запрета» и понятие магнитности частицы — ее «спина»: чисто квантовое свойство, внутренне присущее электрону (а также многим другим элементарным частицам) и не имеющее аналогов в макромире.

5. 1927 г. Поль Дирак: физическая модель квантовой физики: «В атомной теории у нас есть поля, и есть частицы. Поля и частицы — это не два различных объекта, а два способа описания одного и того же объекта, две различных точки зрения на один и тот же объект. Мы используем тот или другой способ описания, руководствуясь соображениями удобства. Как правило, второй подход более удобен для задач, включающих лишь небольшое число частиц. Он обычно используется в задачах элементарного характера. Когда же приходится иметь дело с большим числом одинаковых частиц, более удобен первый подход, т.е. полевая точка зрения».

Между материей неживой и материей живого организма имеется пол-

ное субстанциональное сходство и радикальное качественное различие: обе формы материи одинаково состоят из вещества и энергии, они различаются принципиально в том, что для материи живого организма определяющими являются нелинейные процессы самоорганизации.

Физика неживой материи, длительное время занимаясь ее иерархическими уровнями, в XX веке окончательно создала стройную систему ее системно-структурной организации: газ, твердое тело, жидкость, плазма. Последовательные состояния для неживой материи характеризуются причинно-следственными связями между единицами вещества — атомами и молекулами, и энергией их взаимодействия, причем процессы организации объектов неживой материи и изменения ее состояния отвечают предсказаниям ее физической теории и объясняются ею.

Признанной теории физики живой материи, обладающей предсказательной силой для живого, в настоящее время не существует. Однако, опираясь на основополагающие постулаты материи и построенные на их основе более частные модели, учитывающие специфику строения биополимеров, можно изложить основные принципы функционирования материи живого организма. Это: 1) преобразование химической (или другой) энергии, вызвавшей колебание участка цепи биополимера, прилегающей к атомной группе — линейному осциллятору, в квант энергии — солитон, переносящий энергию по цепи биополимера (А. Давыдов, 1973 г.). Этот эффект позволяет назвать биополимеры живого организма «энергетическими машинами», производящими отрицательную энтропию. В живом организме «солитоны Давыдова» определяют потоки «биохимической» энергии, определяющей его энергетику. 2) На границе биополимер–вода солитоны, поляризуя (структурируя) воду переходят на эти водные структуры (E. DelGiudice, 1985 г.), причем в этом процессе создаются новые осцилляторы из связей N-H, O-H, «натянутых» водородными связями (Alexander, 1986 г.). 3) Молекулы воды, стремящиеся к самоорганизации, образуют в присутствии потоков внешней энергии фрактальные энергонапряженные кристаллы, повторяющимся элементом которых является кристаллическая нить «спираль 30/11» (Н. А. Бульенков, 1991 г.). Образование такого кристалла требует затраты внешней энергии. Эти водные структуры, являющиеся транспортными магистралями для солитонов между биополимерами, предположительно, обладают магнитностью. Потоки солитонов между биополимерами (миграция энергии) являются в живом организме управляющими. Резонансное поглощение управляющих солитонов определяет специфичность управления межмолекулярными процессами в живом организме.

Процессы самоорганизации, ярко представленные в живой материи, имеют место и в процессах, происходящих в неживом — в водных растворах

биополимеров и сходных с ними по структуре молекул, однако количественно отличаются от первых, поскольку потоки преобразуемой энергии в обоих случаях различаются на много порядков. Тем не менее, сформулированные здесь принципы функционирования элементарных ячеек живого позволяют дать физически обоснованные объяснения множества экспериментально наблюдаемых явлений и фактов, в настоящее время, как правило, именуемых лженаучными из-за невозможности дать им объяснения исходя из физических принципов неживой материи. К таковым относится биологическое действие ЭМП в области низких и сверхнизких частот, биологическое действие космофизических факторов, бимодальный биологический эффект водных растворов биоактивных веществ в зависимости от изменения их концентрации, «магнетизм живой материи», излучение при делении клеток и много других, менее известных эффектов. Всем этим эффектам не только может быть дано объяснение, но могут быть предложены новые эксперименты для изучения свойств «живой материи».

Считая, что физическая теория неживой материи блестяще развивается, на сегодня главным следует считать развитие физической теории живой материи исходя из изложенных принципов, где первым этапом должна быть разработка математически обоснованной модели, описывающей магнитные свойства спиновой системы атомов, сформированных в нанотрубку, аналогичную спирали 30/11.

## Литература

- [1] Макс Планк. *Единство физической картины мира*. М., Наука, 1966. М. Planck. *Annalen der Physik*, **4**, 553, (1901).
- [2] А. Эйнштейн. *Зависит ли масса тела от содержащейся в нем энергии?* М., Наука, 1965–1967, т. 1, с. 36–38.
- [3] В. Паули. *Труды по квантовой теории*. Том 1. *Квантовая теория. Общие принципы волновой механики*. Статьи 1920–1928. Под редакцией Я.А. Смородинского, М., Наука, 1975.
- [4] П.А.М. Дирак. *Лекции по квантовой теории поля*. М., МИР, 1971, 244 с.
- [5] А.С. Давыдов *Солитоны в молекулярных системах*. Киев, Наукова думка, 1988, 304 с.
- [6] E. DelGiudice, S. Doglia, M. Milani, *et al.*, *Nuclear Physics*, **B 251**, 375 (1985).
- [7] Н.А. Бульбенков, *Биофизика*, **36**, 181 (1991).
- [8] Л.Н. Галль, Н.Р. Галль, *Биофизика*, **54**, 563 (2009).
- [9] Л.Н. Галль. *Физические принципы функционирования материи живого организма*. СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2014, 400 с.
- [10] Л.Н. Галль, Н.Р. Галль. *Доклады АН*, **461**, 673 (2015).
- [11] Л.Н. Галль. *Материя и жизнь*. СПб, «Амфора», 2015, 320 с.

# Электронные свойства двумерных топологических изоляторов

М.В. Дурнев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

Топологические изоляторы — это класс физических объектов, которые являются изоляторами электрического тока в своей толще, однако проводят ток по границе. Проводимость осуществляется по краевым электронным состояниям в случае двумерных топологических изоляторов или по поверхностным состояниям, если речь идет о трехмерных топологических изоляторах. Появление электронных состояний на границе топологических изоляторов определяется только свойствами толщи изолятора и никак не связано со структурой границы, в отличие от хорошо известных в физике конденсированных сред таммовских граничных состояний, наличие или отсутствие которых обусловлено видом потенциала вблизи границы. Другими словами, проводящие состояния в топологических изоляторах не могут быть устранены изменением структуры границы: они являются устойчивыми по отношению к рассеянию на дефектах, изменению формы границы и ее химической пассивации [1,2].

Ключевым условием для реализации топологического изолятора является особенная структура электронных состояний, вызванная сильным спин-орбитальным взаимодействием в материале. Таким свойством обладают, например, квантовые ямы определенной толщины на основе соединений HgTe/CdTe [3,4] и InAs/GaSb [5] (двумерные топологические изоляторы), объемные кристаллы  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  [6], напряженные слои HgTe [7] (трехмерные топологические изоляторы).

В докладе будут рассмотрены электронные свойства двумерного топологического изолятора на основе квантовой ямы HgTe/CdHgTe, в котором были впервые экспериментально обнаружены топологические краевые состояния. Будут освещены результаты исследований структуры энергетического спектра краевых состояний [3,8,9], электронного транспорта в краевых проводящих каналах [4] и генерации краевых токов под действием излучения терагерцового диапазона [10].

## Литература

- [1] M.Z. Hasan and C.L. Kane, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 3045 (2010).
- [2] X.-L. Qi and S.-C. Zhang, *Rev. Mod. Phys.* **83**, 1057 (2011).

- [3] B. A. Bernevig, T. L. Hughes, and S.-C. Zhang, *Science* **314**, 1757 (2006).
- [4] M. König *et al.*, *Science* **318**, 766 (2007).
- [5] I. Knez, R.-R. Du, and G. Sullivan, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 136603 (2011).
- [6] Y. Xia *et al.*, *Nat. Phys.* **5**, 398 (2009).
- [7] C. Brüne *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 126803 (2011).
- [8] S.A. Tarasenko *et al.*, *Phys. Rev. B* **91**, 081302 (2015).
- [9] M.V. Durnev and S.A. Tarasenko, *Phys. Rev. B* **93**, 075434 (2016).
- [10] K.-M. Dantscher *et al.*, *Photogalvanic probing of helical edge channels in 2D HgTe topological insulators*, arXiv:1612.08854 (2016).

## Электро- и магнитомеханика полупроводниковых систем

Н.А. Поклонский

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

В лекции термины электро- и магнитомеханика используются в узком смысле в применении к полупроводниковым пара- и диамагнетикам с разупорядоченной магнитной структурой. Под электромеханикой понимаются явления, возникающие в полупроводниковых системах при сочетании электрического и механического воздействия на них. Под магнитомеханикой понимаются механические явления (изменение пластичности, диспергирование и др.), возникающие в полупроводниковых системах [содержащих собственные (спиновые) магнитные дипольные моменты электронов в синглетном и триплетном состояниях], находящихся во внешнем магнитном поле при воздействии на них электромагнитных или акустических волн.

Представлен небольшой обзор расчетов и измерений электромеханических и магнитомеханических параметров полупроводниковых систем и устройств на их основе. При обсуждении конкретных результатов исследований высказываются рабочие гипотезы [1].

Рассмотрены [2] инверсионные переходы молекулы фталоцианина олова на графене. (Энергетический барьер для инверсионного перехода  $\approx 2.5$  eV). Обсуждается измерение кванта проводимости во время размыкания точечного электрического контакта между двумя упругими тонкими металлическими проволоками с током [3]. Рассматривается схема и принципы работы электромеханической ячейки памяти, основанной на изгибе многослойной графеновой мембраны под действием электростатической силы [4]. Эта ячейка характеризуется двумя стабильными состояниями: 1) электрически непроводящее состояние с плоской мембраной, 2) проводящее состояние с изогнутой

мембраной, удерживаемой на противоположном электроде силами Ван-дер-Ваальса. (В работе [5] выполнен расчет сил Казимира при взаимодействии графенового листа с ферромагнитной металлической плоскостью в вакууме.)

Далее, в терминах разрыва напряженных химических связей между атомами (радикалами) в кристаллах (NaCl, ZnO и др.) различного структурного совершенства обсуждается изменение их магнитоэластичности в схеме регистрации электронного спинового резонанса во внешних магнитных полях (см. [6–9] и цитируемую там литературу). Обсуждаются также внезапные выбросы каменного угля при его добыче. В шахтах иногда происходят внезапные выбросы угольной пыли (т.н. «бешеной муки») и газа из пласта в выработку [10–12]. Отметим, что явление выброса анализируется [13] не в рамках концепции электронного спинового парамагнитного резонанса, а в рамках акустического парамагнитного резонанса, который возникает в угле, содержащем большую концентрацию электронных спинов как в синглетном, так и в триплетном состояниях. Акустический парамагнитный резонанс (АПР) — резонансное поглощение и/или испускание акустических волн (или фононов) парамагнитным материалом (парамагнетиком), содержащим нескомпенсированные собственные (спиновые) магнитные дипольные моменты электронов и находящимся во внешнем постоянном магнитном поле. АПР обусловлен изменением ориентации вектора магнитного момента электрона относительно направления вектора индукции внешнего магнитного поля под действием акустического фонона на окружение электрона в матрице парамагнетика. Резонанс наступает при совпадении энергии фонона с разностью уровней энергии магнитного момента электрона во внешнем магнитном поле. АПР — аналог электронного парамагнитного (или спинового) резонанса (ЭПР), однако в АПР разрешены практически все квантовые переходы между уровнями энергии электрона с различными направлениями его магнитного момента, а в ЭПР — только магнитные дипольные переходы под действием магнитной компоненты электромагнитной волны. Ясно, что при добыче каменного угля звуковые волны в магнитном поле Земли могут вызывать АПР угля с большой концентрацией спиновых моментов, сопровождающийся переходом связанных макромолекул угля из связывающего синглетного состояния в антисвязывающее триплетное состояние с последующим разрывом напряженных химических связей. Так, из стандартного условия резонанса  $h\nu_r = g\mu_B B$  в магнитном поле Земли  $B = 25\text{--}65 \mu\text{T}$ , получаем резонансную частоту акустической (ультразвуковой) волны  $\nu_r = g\mu_B B/h = 0.7\text{--}1.8 \text{ МГц}$ , где  $h = 2\pi\hbar$  — постоянная Планка,  $g \approx 2$  — модуль  $g$ -фактора электрона,  $\mu_B$  — магнетон Бора. Здесь отметим, что магнитно-зависимые химические процессы наблюдаются также в биологии и медицине [14].

В работе [15] наблюдалось ступенчатое увеличение длины тонкой проволоки (сплав свинца с оловом) при постоянной механической нагрузке (растяжении). Это явление обсуждается в рамках диффузионного перемещения атомов в поле механических напряжений [16], а также разрыва напряженных химических связей [17]. Заметим, что при переходе металлов и сплавов в сверхпроводящее состояние их пластичность заметно увеличивается [18] (см. также [19]). Эта концепция не противоречит идее, что сверхпроводимость может наблюдаться в микрообластях объемных материалов [20] (см. также [21]). Рассматривается немонотонное изменение веса песочных часов при пересыпании песка из верхнего резервуара в нижний в поле тяготения Земли [22]. Далее анализируются внезапные выбросы зерна в зернохранилищах [23] в рамках концепции спиновой микромеханики взаимодействия зерен. Отметим, что зерна злаковых в результате уборки и засыпки в хранилища получают в приповерхностных областях механические повреждения, содержащие большие концентрации радикалов, которые являются активными в электронном спиновом и акустическом парамагнитном резонансах.

Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований «Конвергенция» Республики Беларусь.

## Литература

- [1] Н.А. Поклонский, *Наука и инновации* **8**, 64–69 (2016).
- [2] N.A. Poklonski, S.A. Vyrko, S.V. Ratkevich, et al., *Proc. of the Int. Conf. Nanomeeting-2017*, Minsk, 30 May–2 June 2017. Eds. V.E. Borisenko et al. (World Scientific, Singapore, 2017) [in press].
- [3] F. Ott, J. Lunney, *Europhys. News* **29**, 13–16 (1998).
- [4] A.I. Siahlo, A.M. Popov, N.A. Poklonski, et al., *Physica E* **84**, 348–353 (2016).
- [5] A.D. Phan, N.A. Viet, N.A. Poklonski, et al., *Phys. Rev. B* **86**, 155419 (2012).
- [6] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева и др., *Письма в ЖЭТФ* **104**, 362–373 (2016).
- [7] А.Л. Бучаченко, *ЖЭТФ* **132**, 673–679 (2007).
- [8] Р.Б. Моргунов, *УФН* **174**, 131–153 (2004).
- [9] Ю.И. Головин, *ФТТ* **46**, 769–803 (2004).
- [10] L. Yuan, J. Rock, *Mech. Geotech. Eng.* **8**, 559–567 (2016).
- [11] А. Гликман, *Основы спектральной сейсморазведки* (LAP, Saarbrücken, 2013).
- [12] А.Д. Алексеев, Е.В. Ульянова, Т.А. Василенко, *УФН* **175**, 1217–1232 (2005).
- [13] Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, О.Н. Поклонская и др., *Журн. прикл. спектр.* **80**, 379–384 (2013).
- [14] А.Л. Бучаченко, *Успехи химии* **83**, 1–12 (2014).
- [15] R.D. Peters, M. Le Berre, Y. Pomeau, *Phys. Rev. E* **86**, 026207 (2012).
- [16] Я.Е. Гегузин, *УФН* **149**, 149–159 (1986).
- [17] А.И. Слуцкер, А.И. Михайлин, И.А. Слуцкер, *УФН* **164**, 357–366 (1994).

- [18] В.И. Старцев, В.Я. Ильичев, В.В. Пустовалов, *Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах*, М., Металлургия, 1975.
- [19] М.И. Каганов, В.Д. Нащик, *Природа* **5**, 22–34 (1976); **6**, 131–139 (1976).
- [20] Е.К. Завойский, *УФН* **121**, 737–743 (1977).
- [21] J.D. Maynard, *Rev. Mod. Phys.* **73**, 401–417 (2001).
- [22] F. Tuinstra, B.F. Tuinstra, *Europhys. News* **41**, 25–28 (2010).
- [23] B. Andreotti, Y. Forterre, O. Pouliquen, *Granular Media. Between Fluid and Solid* Cambridge University Press, 2013.

**Международная зимняя школа  
по физике полупроводников  
2017**

**Научная программа и тезисы докладов**

ISBN 978-5-?????-???-?

---

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт»  
188350, Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща  
Зак. ??, тир. 150, уч.-изд. л. 2.5, 13.02.2017 г.