

НАНОСТРУКТУРЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ В КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ - II**Аннотация**

Макалада жогорку окуу жайында өтүлүүчү жалпы физика курсунда азыркы кезде бардык өлкөлөрдө дүркүрөп осуп жаткан илимдин жана өндүрүштүн келечектүү тармагы - нанотехнология сунуш кылынат. Бул сунуш жалпы физика курсунун электр жана магнетизм, оптика жана атомдук физика бөлүмдөрүнө тиешелүү. Механика жана молекулалык физика бөлүмдөрүнө тиешелүү макала КУУнун 2006 жылы чыккан Жарчысында жарык көргөн. Макалада ошондой эле, Россия жана Кыргызстан тарабынан глобалдуу нанотехнологиялык проблемага активдүү катышуунун маанилүүчаралары иштелип жаткандыгы жөнүндө да айтылат.

Аннотация

В статье рекомендуются для изложения в курсе общей физики в вузах отдельные сведения о проблемах нанотехнологии - бурно развивающейся во всем мире перспективной области науки и производства. Рекомендации касаются разделов электричества и магнетизма, оптики, атомной физики общего курса. Разделам механики и молекулярной физики была посвящена статья, опубликованная в Вестнике КНУ в 2006 г. Отмечены важные мероприятия, проведенные в России и в Кыргызстане, для обеспечения активного участия государств в решении глобальных нанотехнологических проблем.

Summary

In the given article some information about problems of nanotechnology - promising area of science and manufacture thriving all over the world - is recommended to be stated in course of general physics. Recommendations concern such sections of general course as electricity, magnetism, optics, and nuclear physics. An article published in Vestnik of KNU in 2006 was devoted to mechanics and molecular physics sections. Important events, carried out in Russia and Kyrgyzstan in order to provide active participation of states in solving global nanotechnological problems were emphasized.

Прошел год с момента публикации аналогичной статьи в нашем Вестнике [1]. В течение этого года нанотехнологии во всем мире продолжали бурно разрабатываться, осваиваться и развиваться. Сейчас государственные программы развития нанотехнологии реализуют более 50 государств. Глобальные инвестиции в этой сфере возросли с 1997 года по настоящее время более чем в 6 раз и превысили 8 млрд долларов. По предварительным оценкам экспертов, стоимость мирового рынка нанотехнологической продукции составит через 10 лет 1 трлн долларов.

В апрельском (2007 года) послании Федеральному собранию Президента России [2] особо подчеркнута необходимость создания эффективной системы исследований и разработок в области нанотехнологии, основанных на атомном и молекулярном конструировании. Утверждена стратегия развития nanoиндустрии, определяющая главные приоритеты и организационно-правовые механизмы создания инфраструктуры. На ее реализацию в бюджете запланировано около 180 млрд рублей. Сформированы структуры, отвечающие за nanoиндустрию [3]. Генеральным директором Российской корпорации нанотехнологии назначен глава инвестиционно-финансовой корпорации "Алемар" Л.Меламед. Председателем наблюдательного совета корпорации утвержден министр образования и науки А.Фурсенко. На первом заседании правительственного Совета по нанотехнологиям в июне 2007 года отмечалось, что утвержденный проект "Стратегия развития nanoиндустрии", по мнению специалистов, ученых, даст России больше, чем все атомные и космические проекты Советского Союза вместе взятые. Учитывая масштабность и уникальность работ по нанотехнологиям, Президент В. В. Путин предложил

принять в них участие всем странам СНГ. Совместные разработки могли бы стать объединяющим наши страны взаимовыгодным и направленным в будущее проектом.

Чтобы не отставать от мировых держав в научно-техническом прогрессе, Кыргызстан поддержал предложение В.В.Путина. Премьер-министр Алмазбек Атамбаев подписал постановление правительства о развитии нанотехнологии в Кыргызской Республике. Образован Совет по развитию нанотехнологии, возглавляемый премьер-министром. Рабочим органом Совета стал Центр нанотехнологии КРСУ, сотрудничающий с Россией. Аналогичные центры создаются в Национальной академии наук, Национальном университете, других учреждениях и предприятиях. В число приоритетных направлений их деятельности включено развитие образовательных структур с целью подготовки специалистов нового поколения в области физики, химии, биологии, материаловедения. Не дожидаясь разработки соответствующих образовательных стандартов, учебных планов и программ, преподаватели физики должны уже сейчас знакомить студентов с наиболее существенными особенностями нанотехнологических проектов, исследуемыми проблемами, полученными результатами. В предыдущей статье [1] рекомендовались для изложения или упоминания в курсе общей физики такого рода вопросы механики (I) и молекулярной физики (II). Продолжая рекомендации, приведем примеры возможного рассмотрения нанотехнологической тематики в других разделах общего курса.

III. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

При рассмотрении зонной теории проводимости твердых тел следует обратить внимание на электронные свойства наночастиц, существенно зависящие от их структуры. Особенно это заметно у углеродных нанотрубок. В зависимости от ориентации графитовой плоскости при ее сворачивании в трубку, они могут обладать металлической или полупроводниковой проводимостью с разными значениями ширины запрещенной зоны [4].

Другой важной особенностью этих удивительных объектов является взаимозависимость их электронных и механических характеристик [5]. Механическая нагрузка на нанотрубку вызывает ее деформацию, что, в свою очередь, изменяет такие электронные свойства как проводимость, ширина запрещенной зоны, концентрация носителей и др. И наоборот, подача электрического напряжения на трубку изменяет ее атомную структуру, вызывая появление внутренних механических напряжений, которые могут привести к деформации. Таким образом, нанотрубка представляет собой миниатюрный преобразователь электрического сигнала в механическое перемещение и наоборот. Следовательно, ее можно использовать в качестве исполнительного элемента в наноэлектромеханических системах будущих сверхминиатюрных устройств обработки и хранения информации. Уже имеются разработки и описания таких систем.

Нанотехнологии позволили создать новый тип **транзисторов** из углеродных нанотрубок, разветвленных в форме буквы **Y** [6]. Размер транзистора 100 мк. Это примерно в 100 раз меньше компонентов современных микропроцессоров. Движением электронов по "рукавам" транзистора можно управлять, подавая напряжение на "стебель". Положительный заряд, приложенный к "стеблю", увеличивает поток электронов в "рукавах", а при изменении полярности движение электронов останавливается. Такая бинарная логика - основа почти всех транзисторов. При описании транзисторов можно упомянуть еще "спинтронный транзистор" [7], в котором используется квантовое свойство электрона - его спин. Более подробно на этом остановиться следует в атомной физике.

Электропроводность компактных нанокристаллических металлов и сплавов отличается от электропроводности крупнозернистых материалов. Это объясняется тем, что чрезвычайно развитые границы раздела между нанозернами и высокая концентрация дефектов обуславливают уменьшение средней длины свободного пробега и интенсивное рассеяние электронов. Значительное повышение удельного электросопротивления обнаружено у нанокристаллических

железа, никеля, меди, палладия и различных сплавов [8]. Например, у меди оно увеличивается до 20 раз!

Высокотемпературная сверхпроводимость обнаружена не только у купратов, но и у фуллеритов С₆₀. Для них последовательно удалось получить критические температуры 18, 80 и 117 К. Рекордной температуры 117 К удалось достичь путем допирования фуллерита С₆₀ молекулами трибромметана Вг₃СН. Находясь в пространстве между молекулами фуллерена, молекулы Вг₃СН увеличивают параметр кристаллической решетки с 1,415 нм до 1,445 нм и вызывают рост критической температуры до значения, характерного для высокотемпературных сверхпроводников [9]. Выявлена сверхпроводимость также у допированных фуллеритов С₇₀, но им свойственна критическая температура всего 7 К. Для углеродных нанотрубок зарегистрирована сверхпроводимость при температуре ниже 20 К [9].

Магнитные свойства компактных нанокристаллических материалов изучены в основном на ферромагнитных металлах и сплавах. Для никеля и кобальта в нанокристаллическом состоянии установлена повышенная коэрцитивная сила. Это обусловлено неравновесным состоянием межзеренных границ и малым размером зерен.

Уникальными магнитными свойствами обладают нанокристаллические сплавы с размерами зерен 8-20 нм, полученные путем кристаллизации аморфных сплавов - "металлических стекол". Последние получают путем сверхбыстрого охлаждения и затвердевания жидких расплавов на основе железа или кобальта с добавками ниобия, меди, кремния, бора и некоторых других элементов. После нанокристаллизации такие сплавы оказываются мягкими магнитными материалами с очень малой коэрцитивной силой ($\sim 0,5 \text{ А}\cdot\text{м}^{-1}$), высокими магнитным насыщением ($\sim 1,5 \text{ Т}$) и магнитной проницаемостью (до $\sim 40\,000$). Они являются идеальным материалом для использования, например, в записывающих магнитных головках. Путем изменения состава сплавов и их структуры оказывается возможным получение у них и магнитно-жестких характеристик со значениями коэрцитивной силы до $\sim 10\,000 \text{ А}\cdot\text{м}^{-1}$.

обелевской премии по физике в 2007 году удостоены Альберт Фер (Франция) и Петер Грюнберг (Германия) за открытие явления супермагниторезистивности или **гигантского магнетосопротивления** (ГМС). Оно заключается в том, что слабые изменения напряженности магнитного поля приводят к очень большим изменениям электрического сопротивления находящейся в этом поле системы из чередующихся тонких ферромагнитных и немагнитных слоев металла. Причиной является искривление траекторий носителей тока в магнитном поле под действием силы Лоренца.

Впервые влияние магнитного поля на величину электрического тока в проводниках наблюдал 150 лет тому назад Кельвин. Но явление ГМС первыми открыли и исследовали Фер и Гринберг независимо друг от друга в 1988 году. Оно было внедрено уже в 1997 году для изготовления головки, считывающей информацию с жестких дисков в компьютерах. Эти диски хранят информацию с помощью микроскопических структурных элементов, векторы остаточной намагниченности которых ориентированы в строго определенных направлениях. Данные снимаются считывающей головкой, сканирующей поверхность диска и регистрирующей изменения магнитного поля. Чем компактнее диск, тем мельче магнитные частицы, меньше их намагниченность и слабее создаваемые ими магнитные поля. ГМС позволило создать головки высокой чувствительности. Это сразу позволило существенно миниатюризировать жесткие диски для компьютеров, музыкальных плееров и других устройств. Явление ГМС используется также в различных сверхчувствительных датчиках. При этом все последующие модификации считывающей техники являются дальнейшим развитием ГМС-технологий.

Эффект ГМС был открыт благодаря новым технологиям, разработанным в 1970-е годы для получения тончайших слоев различных материалов. Толщина каждого слоя составляет всего несколько атомов. Следовательно ГМС - один из первых примеров широкого применения на практике нанотехнологии и первое нанотехнологическое открытие, удостоенное Нобелевской премии.

IV. ОПТИКА

Проявление размерных эффектов в **оптических свойствах** существенно для наночастиц, размеры которых меньше длины волны излучения и не превышают 10-15 нм [8]. Рассеяние и поглощение света такими частицами имеет ряд особенностей. Экспериментально они наиболее отчетливо проявляются при изучении большого числа частиц, обычно не менее 10^{10} , и обусловлены различием диэлектрических проницаемостей (для металлов - комплексных) наночастиц и массивных образцов. Экспериментально установлены зависимости от размера частиц ширины полосы поглощения, формы низкочастотного края полосы поглощения, смещения резонансного пика поглощения света.

В последние годы интенсивно исследуются размерные эффекты на оптических и люминесцентных свойствах полупроводников и диэлектриков. Такие исследования позволяют получать сведения об атомных и электронных дефектах, зонной структуре веществ. Так при исследовании люминесцентных свойств щелочно-галогидных кристаллов установлен ряд особенностей радиационно- и термо-стимулированных явлений у волоконных и нанокристаллических фторидов лития и натрия по сравнению с массивными кристаллами [10]. К числу таких особенностей относятся повышенная радиационная стойкость, другая кинетика термостимулированной экзоелектронной эмиссии, меньшая энергия активации процессов дефектообразования, смещение полос оптического ослабления и др.

Поскольку фуллерены являются полупроводниками со сравнительно небольшой шириной запрещенной зоны, равной 1,5 эВ для C_{60} , они проявляют свойство **фотопроводимости** при облучении видимым светом. В этом процессе электроны в полупроводнике переводятся из валентной зоны в зону проводимости. Такое явление наблюдалось, например, при облучении пленки поливинилкарбазола, насыщенной смесью фуллеренов C_{60} и C_{70} , растворенных в толуоле. По своим фотопроводящим свойствам этот материал оказался одним из лучших среди органических соединений. Фуллериты C_{60} являются перспективным оптическим материалом для удвоения и утроения частоты падающего излучения, а также для ограничения интенсивности лазерного излучения в качестве оптических затворов. Проявляющиеся при этом нелинейные оптические свойства фуллеренов стали основой для создания на их базе и других специальных оптических элементов, используемых в оптических цифровых процессорах и для защиты оптических сенсорных датчиков от интенсивного облучения.

V. ФИЗИКА АТОМА И АТОМНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Фундаментальное отличие свойств наноструктур от свойств массивных материалов заключается в наличии у них **пространственного квантования** энергии электронов. Пространственное квантование создает хорошо выраженные дискретные энергетические уровни в структурах размером менее ~ 10 нм. Такие трехмерные структуры называют **квантовыми точками**. Если же структуры имеют наноразмеры только в двух или в одном измерении, то их называют **квантовыми проволоками** или **квантовыми ямами**, соответственно. На их основе создаются резонансно-туннельные диоды, лазеры, оптические модуляторы и другие устройства.

При описании **туннельного эффекта** в качестве примера его проявления обычно называют радиоактивный процесс выбрасывания ос-частиц из атомного ядра. Проявление этого эффекта наблюдается также в явлении **автоэлектронной эмиссии**, протекающем при воздействии на (обычно) заземленный проводник внешнего электрического поля. При этом электроны проводимости, находящиеся в потенциальной яме, граничащей на поверхности с потенциальным барьером, формируемым ионной решеткой проводника и внешним полем, могут выйти за пределы проводника вследствие квантового туннелирования. При достаточно высокой напряженности поля возникает электронная эмиссия, ток которой является резко возрастающей функцией приложенного напряжения. Если в качестве проводника используется углеродная нанотрубка, то у ее острого конца напряженность электрического поля возрастает в сотни раз по сравнению с напряженностью у плоской поверхности. В результате эмиссионные свойства нанотрубок

проявляются при существенно меньших значениях приложенного напряжения по сравнению с традиционно используемыми авто-эмиссионными металлическими катодами. Это позволило разработать ряд электронных приборов с холодными катодами на основе нанотрубок. В их числе электронные дисплеи, рентгеновские трубки, катодолюминесцентные осветительные лампы и экраны. Они обладают рядом преимуществ перед традиционными приборами, в частности, повышенными энергосберегающими характеристиками. Например, осветительные лампы с углеродными нанотрубками и люминесцирующими покрытиями поглощают в 4-5 раз меньше электроэнергии, а служат в 10 раз дольше обычных ламп с вольфрамовыми нитями при одной и той же светоотдаче. Только их стоимость пока высока.

Практическое применение туннельного эффекта следует обязательно иллюстрировать использованием его в сканирующем туннельном микроскопе (СТМ). Об этом уже было упоминание в механике [1]. Здесь уместно показать схему устройства микроскопа, подчеркнуть его высокую разрешающую способность и возможность с его помощью не только изучать морфологию поверхностей металлов и полупроводников, но и использовать для прямого получения наноразмерных структур. В обзоре [11] приведены многочисленные примеры создания на окисленной поверхности кремния с помощью зонда СТМ таких структур германия и кремния в виде островков и окон шириной ~ 10 нм, а также линий толщиной ~ 5 нм. Это позволяет использовать СТМ в качестве инструмента нанолитографии.

Литература

1. Тузов Л. В. Наноструктуры и нанотехнологии в курсе общей физики // Вестник КНУ им. Ж. Баласагына. -2006. -Сер. 3. -Вып. 3. С. 209 - 214.
2. Послание Федеральному собранию Российской Федерации Президента России Владимира Путина // Российская газета. -2007. -№ 90 (4353). -29 апреля. -С. 3 -5.
3. Крымова С. О кадрах решили все. Сформированы структуры, отвечающие за nanoиндустрию // Поиск. -2007. - № 37 (955). -14 сентября. -С. 3.
4. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // УФН. -2007. Т. 172. - №4.
5. Елецкий А. В. Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // УФН. -2007. -Т. 177. -№ 3. -С. 233 - 274.
6. Мембрана.ру. На ветвях углеродного дерева вырос небывалый транзистор //Общественный рейтинг. -2005. -№31 (253). -19 августа. С. 6.
7. Беляева С. Куда спешат швейцарские часы? Альпийская республика включилась в наногонку // Поиск. -2007. -№ 29-30 (947-948). -20 июля. С. 21.
8. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии.- М.:Физматлит, 2005.
9. Science, 293,2432 (2001). /Щит. по УФН -2001. -Т. 171. -№ 10. -С. 1116.
10. Люминесценция объемных, волоконных и наноразмерных кристаллов LiF и NaF / А. Н. Черепанов, В. Ю. Иванов, Т. С. Королева, Б. В. Шульгин.- Екатеринбург: Уральский гос. технич. университет, 2006.
11. Шкляев А.А., Ичикава М. Создание наноструктур Ge и Si с помощью зонда сканирующего туннельного микроскопа // УФН. -2006. -Т. 176. -№ 9. -С. 913 - 930.