

журнал© Квант МАЙ 2008 №3 ИЮНЬ

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЙ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1970 ГОДА

В номере:



Учредители — Российская академия наук, Фонд поддержки фундаментальной науки и образования (Фонд Осипяна), ИФТТ РАН

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ
РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Ю.А.Осипьян

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

С.С.Кротов

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.Я.Белов, Ю.М.Брук, А.А.Варламов, А.Н.Виленин, В.И.Голубев, С.А.Гордюнин, Н.П.Долбильин (заместитель главного редактора), В.Н.Дубровский, А.А.Егоров, А.В.Жуков, А.Р.Зильберман, В.В.Кведер (заместитель председателя редколлегий), П.А.Кожевников, В.В.Козлов (заместитель председателя редколлегий), С.П.Коновалов, А.А.Леонович, Ю.П.Лысов, В.В.Произволов, Н.Х.Розов, А.Б.Сосинский, А.Л.Стасенко, В.Г.Сурдин, В.М.Тихомиров, В.А.Тихомирова, В.М.Уроев, А.И.Черноуцан (заместитель главного редактора)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

А.В.Анджанс, В.И.Арнольд, М.И.Башмаков, В.И.Берник, В.Г.Болтянский, А.А.Боровой, Н.Н.Константинов, Г.Л.Коткин, С.П.Новиков, Л.Д.Фаддеев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
1970 ГОДА

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

И.К.Кикоин

ПЕРВЫЙ ЗАМЕСТИТЕЛЬ
ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

А.Н.Колмогоров

Л.А.Арцимович, М.И.Башмаков, В.Г.Болтянский, И.Н.Бронштейн, Н.Б.Васильев, И.Ф.Гинзбург, В.Г.Зубов, П.Л.Капица, В.А.Кириллин, Г.И.Косоуров, В.А.Лешковцев, В.П.Лишевский, А.И. Маркушевич, М.Д.Миллиончиков, Н.А.Патрикеева, Н.Х.Розов, А.П.Савин, И.Ш.Слободецкий, М.Л.Смолянский, Я.А.Сморodinский, В.А.Фабрикант, Я.Е.Шнайдер

Бюро Квантум

© 2008, РАН,
Фонд Осипяна, «Квант»

- 2 К 100-летию И.К.Кикоина
6 Из истории газовых центрифуг. *С.Романов*
6 Нанотехнологии: когда размер имеет значение. *К.Богданов*
13 Хроматические числа. *А.Райгородский, О.Рубанов, В.Кошелев*

ЗАДАЧНИК «КВАНТА»

- 23 Задачи М2086–М2095, Ф2093–Ф2102
25 Решения задач М2066–М2069, Ф2078–Ф2087

К М Ш

- 31 Задачи
34 Нет предела совершенству! *И.Акулич*

КАЛЕЙДОСКОП «КВАНТА»

- 32 Распространение звука

ШКОЛА В «КВАНТЕ»

- 37 Урок близился к завершению... *М.Бондаров*
38 Ракета на водяном паре, или Как студент с Луны улетал. *А.Стасенко*
39 Можно ли в микроскоп молекулу разглядеть? *А.Стасенко*

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ КРУЖОК

- 41 О двух велосипедистах и вишневого косточке. *В.Протасов*

ЛАБОРАТОРИЯ «КВАНТА»

- 45 О поющих проводах, или Загадки пружины. *А.Сергеев, Н.Жданова, И.Сергачев, Р.Стрюнгис, А.Пятаков*

ПРАКТИКУМ АБИТУРИЕНТА

- 47 Гидростатика в стакане. *А.Черноуцан*
50 Объем тетраэдра и его частей. *Л.Ерганжиева, В.Мирошин*

ОЛИМПИАДЫ

- 53 XVI Международная олимпиада «Интеллектуальный марафон»
56 Всероссийская студенческая олимпиада по физике

ИНФОРМАЦИЯ

- 57 Заочная школа СУНЦ НГУ
59 Ответы, указания, решения
Вниманию наших читателей (22, 30, 36)

НА ОБЛОЖКЕ

- I Иллюстрация к статье *К.Богданова*
II «Невозможные» объекты
III Шахматная страничка
IV Коллекция головоломок



В праздновании 100-летнего юбилея академика
И.К.Кикоина финансовое участие принимает
ОАО «ТЕХНАБЭКСПОРТ»

К 100-ЛЕТИЮ И.К.КИКОИНА

Из истории газовых центрифуг

С. РОМАНОВ

НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ЯДЕРНОГО ПРОЕКТА предполагалось, что атомную бомбу можно изготовить из природного урана, обогащенного легким изотопом ^{235}U (так было и в США, и в СССР). Задача состояла в том, чтобы поднять содержание этого изотопа от 0,07% в природном уране до величины порядка 90%. О возможности получить в «урановом котле» плутоний, изотоп которого ^{239}Pu делится подобно ^{235}U , еще не было известно. В первых документах по советскому Урановому проекту, датированных 1942 годом, ставится задача «возобновить работы по исследованию осуществимости использования атомной энергии путем расщепления ядра урана». Ни о плутонии (или эка-осмии, как его тогда называли), ни о реакторах («урановых котлах») в документах ничего не говорится. И.В.Курчатов впервые докладывает руководству страны о возможности изготовления бомбы из плутония в марте 1943 года: «Если в действительности эка-осмий обладает такими же свойствами, как и уран-235, его можно будет выделить из «уранового котла» и употребить в качестве материала для эка-осмиевой бомбы. Бомба будет сделана, следовательно, из «неземного» материала, исчезнувшего на нашей планете. Как видно, при таком решении всей проблемы отпадает необходимость разделения изотопов урана, который используется и как топливо, и как взрывчатое вещество».

Тем не менее, проблема разделения изотопов была и осталась первоочередной в атомном проекте. Даже после того как пришло понимание возможности изготовления плутониевой бомбы, все равно проект развивался по двум основным направлениям – разделение изотопов и ядерные реакторы. Не было уверенности в том, какое из направлений раньше приведет к успеху. Курчатов меньше верил в возможность осуществить в промышленном масштабе разделение изотопов урана, с тем чтобы получить достаточные его количества для изготовления бомбы. Всю свою энергию и талант он направил на то, чтобы построить ядерный реактор для получения плутония. За проблему разделения изотопов урана в СССР отвечали Лев Андреевич Арцимович и Исаак Константинович Кикоин. Арцимович занимался электромагнитным разделением изотопов, а молекулярно-кинетическими методами занимался Кикоин.¹

¹ Несколько подробнее о различных методах разделения изотопов написано в Приложении к статье. (Прим. ред.)



И.К.Кикоин и Л.А.Арцимович

Первоначально наиболее подходящим для осуществления в промышленном масштабе считался метод центрифугирования. Однако потом, в значительной степени из-за полученных разведывательных данных, предпочтение было отдано газодиффузионному методу разделения изотопов урана. Им и занимался И.К.Кикоин. Окончательный выбор в пользу газодиффузионного метода был сделан в 1945 году. А до того была еще советская миссия «Алсос», когда в военной форме в чине полковников Кикоин, Арцимович, Харитон, Флеров и другие физики исследовали поверженную Германию. Команде, как ее называл Курчатов, советских физиков удалось обнаружить около 300 тонн урана, найти и пригласить или вывезти в СССР (как угодно или кого как) немецких ученых и немецкое оборудование и выяснить, что было сделано в Германии по немецкому Урановому проекту. По крайней мере, появилась уверенность в том, что немцы были далеки от создания ядерного оружия. Не было у немцев и больших успехов в решении проблемы разделения изотопов. Кикоин вспоминал, что они обнаружили в Институте кайзера Вильгельма в Берлине «наивную установку для разделения изотопов... использовать всерьез такую технологию не представляется возможным».

С 1945 года И.К.Кикоин был полностью поглощен работой по газодиффузионному методу разделения

изотопов урана. Работы велись с нарастающим темпом. В 1947 году в Лаборатории №2 (так вначале назывался Институт атомной энергии) в Кикоинском отделении был запущен экспериментальный каскад диффузионных машин. Было показано, что принципиально задачу обогащения урана до необходимого содержания изотопа ^{235}U решить можно. В 1949 году на Урале заработал первый газодиффузионный завод (Комбинат №813). После серии неудач завод стал выдавать оружейный уран, и второе испытание атомного оружия в СССР в 1951 году проводилось с изделием, начиненным этим продуктом.

После того как была полностью освоена газодиффузионная технология и построены предприятия, обеспечивавшие необходимое количество оружейного урана, И.К.Кикоин возвращается к исследованиям центрифужной технологии. Перевод разделительной промышленности на центрифуги смог бы многократно уменьшить колоссальное энергопотребление, необходимое для газовой диффузии. Наверное, имела место и естественная неудовлетворенность настоящего ученого, который, по существу, пошел по пути, уже пройденному американцами. Да и теория указывала, что для разделения изотопов урана более подходит именно центрифужная технология. А что до громадных технических трудностей ее осуществления, так и газовая диффузия далась не просто.

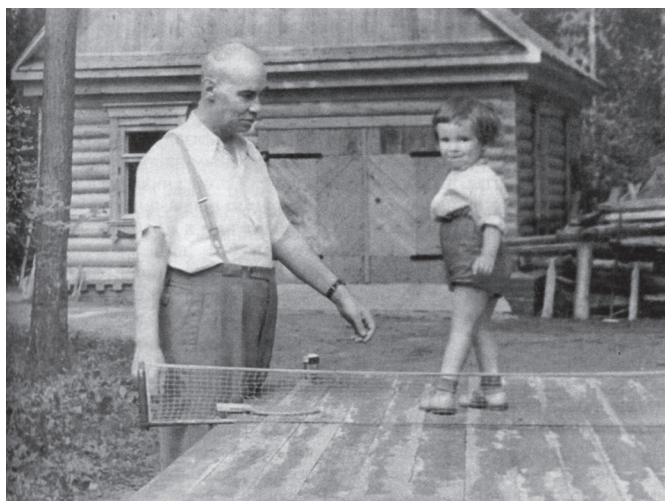
Работы по созданию газовых центрифуг начались в конце 1946 года группой сотрудников Института «А» в Сухуми. Группу возглавлял немецкий физик Макс Штеенбек. Его разыскали летом 1945 года в лагере для военнопленных в Польше и привезли в СССР. Сначала Штеенбек предлагал сделать центрифугу с 10-ти метровым ротором, линейная скорость вращения на периферии должна была быть 250 м/с. Спустя шесть лет, в 1952 году Штеенбек работал с центрифугой с 6-ти метровым ротором диаметром 58 мм. Ротор был гибкий, состоял из десяти коротких труб с девятью сильфонными соединениями. Скорость вращения была 1200–1400 об/с, что соответствует линейной скорости на периферии ротора 220–240 м/с. Передавать вещество из центрифуги в центрифугу предполагалось с помощью конденсации/испарения (так называемый метод передачи через твердую фазу), что создавало почти непреодолимые трудности при соединении центрифуг в каскад, а каскада, как известно, Штеенбек так и не создал. Правда, в экспериментах с гексафторидом урана на центрифуге Штеенбека эффект разделения составлял 50% от теоретического. Но главное, что придумал Штеенбек, – это конструкция опорного узла ротора центрифуги. Ротор вращался, опираясь на тонкую стальную иглу, а верхний конец ротора удерживался с помощью постоянного магнита.

В 1951 году сотрудник И.К.Кикоина, талантливый инженер Е.М.Каменев выдвинул идею центрифуги с коротким жестким тонкостенным ротором и нижней игольчатой опорой. Это позволяло заметно повысить скорость вращения ротора. Решающую роль сыграло предложение И.К.Кикоина о введении неподвижных отборных трубок по концам ротора в периферийный уплотненный слой газа. Высокое газодинамическое

давление в этом слое позволяло создавать необходимые потоки легкой и тяжелой фракций с передачей их в каскаде из центрифуги в центрифугу по газовой фазе. Одновременно взаимодействие вращающегося газа с неподвижными отборными трубками обеспечивало возникновение противоточной циркуляции внутри ротора с необходимыми скоростями. В апреле 1953 года на такую центрифугу был выдан патент, а в июле того же года был получен еще один патент – на гидродинамический способ (с помощью неподвижных трубок) передачи газа из центрифуги в центрифугу. Ясно, что оба патента были закрытыми.

Далее дела пошли так. В 1953 году Минсредмаш принимает решение об освоении центрифужных технологий в промышленном масштабе. В 1954 году были созданы первые образцы машин, а 10 октября 1955 года Совет Министров принимает решение о строительстве опытного центрифужного завода на Урале (на Комбинате №183). Этот завод был построен и смонтирован в 1956–57 годы, всего на нем было установлено 2432 центрифуги. Пуск завода был осуществлен 2–4 ноября 1957 года. Следует отметить, что это был первый в мировой практике успешный опыт промышленного использования центрифужной технологии.

В целом, опыт эксплуатации опытного центрифужного завода оказался весьма успешным. 5 мая 1958 года на НТС Минсредмаша под председательством И.В.Курчатова было принято решение о переходе к промышленному использованию центрифужного метода разделения изотопов урана, и 22 августа 1960 года приказом Минсредмаша было утверждено проектное задание на строительство первого в мире промышленного завода газовых центрифуг. А 4 ноября 1962 года был осуществлен пуск первой очереди завода (пуск предприятия в целом осуществлялся в несколько этапов в 1962–64 годы). Само производство поражает. Цех завода имеет длину почти километр, в нем установлено 700000 центрифуг, соединенных в каскады. Работают они практически бесшумно. Людей в цехе нет. От специалистов, в частности зарубежных, хозяева произ-



И.К.Кикоин на даче с внуком Сережей (Романовым) (1961 г.)

водства слышали восторженный отзыв: «Это техническое хулиганство!»

К настоящему времени всего создано девять поколений газовых центрифуг. Вся разделительная промышленность РФ основана на центрифужной технологии. Последний газодиффузионный завод был закрыт в 1992 году, а с 1988 года полностью прекращено производство высокообогащенного урана для военных целей. Сейчас разделительная промышленность работает для производства низкообогащенного урана для атомной энергетики, для производства стабильных изотопов, а также для переработки высокообогащенного урана ядерных боеголовок в низкообогащенный уран для энергетических реакторов.

В итоге имеем следующее. В СССР под научным руководством И.К.Кикоина впервые в мире создана промышленность разделения изотопов, основанная на центрифужной технологии. Но об этом в мире никто не знает. Промышленность отлично работает, более того, это единственная отрасль в СССР, которая получает сырье из развитых индустриальных держав, а назад отправляет высококачественный готовый продукт. (На Западе могли думать, что разделение производится газодиффузионным методом.) Немецкие специалисты, которые после поражения Германии работали в СССР над созданием центрифуги, уезжают из СССР и, оказавшись на Западе, регистрируют патент на центрифугу. Зарегистрировано именно то изделие, которое было создано в СССР. Протеста не последовало, хотя советской стороне было хорошо известно об этом шаге. Автор патента Гернот Циппе (он, как и Штеенбек, попал в Институт «А» будучи военнопленным и работал в группе Штеенбека) становится весьма богатым человеком благодаря этому патенту. Так он сам позже рассказывал российским коллегам, встречаясь с ними на международных конференциях. Циппе носит титул «отца» центрифужного метода разделения изотопов урана, центрифуга называется «центрифугой Циппе»

и так далее. Русские, обладая лучшей технологией и промышленностью (отставание Запада было, по крайней мере, лет на 20), не могут представить центрифуги на цивилизованном международном рынке. Остаются контакты только с такими странами, как Китай и Ирак. В целом, весьма печальная история.

Наверное, невозможно дать однозначные оценки действий советского руководства, засекретивших на многие десятилетия все работы по разделению изотопов настолько, что не было никакой возможности не только утвердить приоритет страны и разработчиков передовых технологий, но и успешно действовать на цивилизованном рынке. Вряд ли кто-нибудь подсчитывал связанный с этим экономический ущерб. С другой стороны, возможно, что такая секретность вместе с общей закрытостью советской системы служила серьезным препятствием к распространению потенциально опасных технологий. Ведь по сути отлаженное центрифужное производство есть наиболее эффективный способ накопления делящихся материалов для изготовления атомной бомбы. По-видимому, сегодня и не может быть сделано однозначного вывода обо всех этих событиях.

Однако эта история наводит на следующие тревожные мысли. Мы знаем, что создатели ядерного оружия и в СССР и в США – выдающиеся ученые и глубокие мыслители – ясно понимали возможные политические последствия обладания таким оружием. Они использовали свой немалый авторитет для того, чтобы донести до правительств и международного сообщества идеи недопустимости ядерной войны, идеи о необходимости принять международные законы о нераспространении ядерного оружия, о контроле за ядерными материалами и технологиями. Все эти идеи остаются актуальными и сегодня. Более того, по мере роста общего технологического уровня в современном мире требуются и новые усилия для недопущения распространения ядерного оружия.

Приложение

Изотопы – разновидности химического элемента с различным числом нуклонов в ядрах. Поскольку они являются одним и тем же химическим элементом, то у них одинаковое число атомных электронов, а значит, и ядерных протонов. Различны у них числа нейтронов в ядрах. Все изотопы одного элемента находятся в одной клеточке периодической системы, отсюда их название: «изо» – одинаковый, «топос» – место. Самые известные изотопы – это изотопы водорода дейтерий и тритий. В настоящее время известно около 1400 изотопов, 357 из них – природные изотопы 92 химических элементов, остальные изотопы получены искусственным путем в различных ядерных реакциях.

Многие изотопы радиоактивны и используются в самых разных областях науки и техники (так называемые меченые атомы). Поэтому задача разделения изотопов возникла еще в 30-х годах прошлого века. Из-за одинаковости химических свойств изотопов одного элемента возникает необходимость использовать различие в физических свойствах изотопов и их соединений, вытекающее из различия в массах их ядер. Чем больше отношение масс ядер, тем легче разделить

изотопы. Например, относительно легко производится разделение обычной и тяжелой воды, молярные массы которых относятся как $18:20 = 1,11$. А вот отношение молярных масс гексафторида урана – единственного газообразного соединения урана – для двух его изотопов ^{238}U и ^{235}U составляет всего лишь 1,0086. Если учесть, что в природном уране доля изотопа ^{235}U равна 0,72%, то для получения этого изотопа в достаточно чистом виде необходимо многократное повторение одной и той же операции, в которой одна часть исходного вещества становится чуть-чуть богаче нужным изотопом. В ядерной урановой бомбе чистота изотопа ^{235}U должна быть очень высокой, поэтому число повторений может достигать сотен и даже тысяч. Для ядерных реакторов требуется меньшая чистота (используется так называемый «обогащенный уран»), поэтому число повторений может быть гораздо меньше (несколько десятков).

Для разделения изотопов урана используются два метода (из одиннадцати применяемых в различных областях науки и техники) – молекулярно-кинетический метод газовой диффузии и метод центрифугирования. На начальной стадии ядерного проекта в нашей стране велись работы и по исполь-

зованию электромагнитного метода, в котором разделение изотопов происходит благодаря различию траекторий их ионов в магнитном поле. Этот метод широко используется для разделения небольших количеств изотопов, но для промышленного разделения изотопов урана он оказался очень труден и неэкономичен.

Вплоть до 70-х годов прошлого века использовался метод газовой диффузии через пористые перегородки. При достаточно низких давлениях, когда длина свободного пробега молекул много больше диаметров пор, скорость диффузии определяется только средней скоростью теплового движения. Небольшая разница в массах молекул дает небольшое различие в скорости. Газ гексафторида урана, прошедший перегородку, становится чуть беднее тяжелым изотопом и чуть богаче – легким. При последовательном процессе прохождения через сотни перегородок на выходе можно получить газ, достаточно обогащенный легким изотопом. Первая порция ядерного уранового «горючего» была получена в СССР только в 1950 году и использовалась для испытания уран-плутониевой бомбы в 1951 году.

В методе центрифугирования в цилиндр (или в трубку) помещается гексафторид природного урана, и трубка приво-

дится в быстрое вращение. Во вращающемся газе устанавливается равновесное распределение концентрации молекул по расстоянию от оси вращения, точно так же, как оно устанавливается в зависимости от высоты в земной атмосфере. Только во вращающейся трубке роль силы тяжести играет центробежная сила инерции, направленная по радиусу от оси вращения. Возрастание концентрации при удалении от оси вращения происходит быстрее для частиц большей массы, поэтому во внешней части трубки отношение концентраций тяжелых и легких частиц оказывается больше, чем вблизи оси вращения. Для получения заметной разницы концентраций необходима огромная скорость вращения – порядка 1000 об/с.

Главная трудность в этом методе заключалась не столько в обеспечении высокой скорости вращения, сколько в осуществлении передачи обогащенной смеси из одной центрифуги в другую без остановки вращения. Все эти вопросы были успешно решены к 1974 году, в основном, благодаря экспериментальному и организационному таланту одного из руководителей этих работ – Исаака Константиновича Никойна.

Л. Белопухов

КОЛЛЕКЦИЯ ГОЛОВОЛОМОК

Психологический «Завиток»

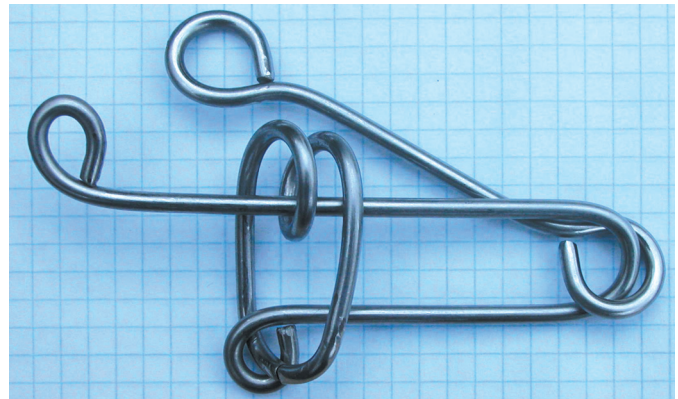
(Начало см. на 4-й с. обложки)

В начале августа 2008 года в Праге состоится 28-й Всемирный съезд любителей головоломок. Из десятков стран мира в Чехию привезут сотни «умных» игрушек, а затем знатоки головоломок из Европы, Америки и Японии оценят их и назовут лучшие изобретения года.

Среди новых головоломок будет и «Завиток» москвича Кирилла Гребнева. Благодаря своей оригинальности он наверняка привлечет внимание любителей головоломок, тем более что на предыдущем съезде в Австралии среди лучших изобретений 2007 года были названы две головоломки Кирилла. Это был второй случай за всю историю съездов, когда в число победителей вошли две головоломки одного автора.

Новая головоломка Кирилла Гребнева изображена на рисунке. Чтобы изготовить «Завиток» самостоятельно, возьмите три куска стальной или медной проволоки диаметром 3–4 мм. Для показанного здесь варианта головоломки берут отрезки проволоки длиной 25, 22 и 14,5 см. На самом длинном, предназначенном для скобы, отмечают точку, делящую его на отрезки 9 и 13 см. Зажав проволоку круглогубцами в этой точке, сгибают концы проволоки так, чтобы расстояние между ними было 12 мм. Затем на концах скобы загибают кольца. Фотография головоломки позволяет использовать изображение как шаблон: постепенно изгибать проволоку круглогубцами, а затем прикладывать детали к фотографии для проверки правильности размеров.

Решение головоломки обычно начинается с того, что ее берут в руки: левой рукой – за скобу, а правой – за ручку. После этого, держась за конец ручки, начинают двигать ее вдоль скобы, пытаясь просунуть кольцо через завиток и отцепить ручку от скобы. Собственно говоря, ничего



другого и сделать-то нельзя – слишком мало разрешенных конструкцией движений. Сразу предупредим, что из этих попыток ни одна не приблизит вас к решению. Первая ошибка всех, кто начинает разгадывать эту головоломку, заключается в том, что они берутся правой рукой (речь идет о правшах) не за тот конец ручки. Эта остроумная психологическая уловка специально придумана изобретателем, чтобы увести вас в сторону от правильного решения, заставить безрезультатно двигать ручку туда-сюда вдоль скобы, пытаясь просунуть ее в завиток.

Правильный путь состоит в том, чтобы не кольцо двигать к завитку, а конец ручки, за который вы так упорно держитесь, отпустить и просунуть через петлю завитка. Если это движение выполнить правильно, то дальнейшее решение вы сможете найти самостоятельно с помощью двух фотографий на 4-й странице обложки, на которых показаны промежуточные этапы, ведущие к решению головоломки.

Желаем вам успеха!

А. Калинин



К 100-ЛЕТИЮ И.К.КИКОИНА

Нанотехнологии: когда размер имеет значение

К.БОГДАНОВ

Вы можете произнести слово «птица» на самых разных языках, но, сделав это, вы все равно ничего нового о птицах не узнаете. Не лучше ли сначала просто взглянуть на любую птицу и задуматься над тем, что это такое!.. Существует большая разница между знанием названия чего-нибудь и знанием того, как это работает.

Р.Фейнман

НА НАШИХ ГЛАЗАХ ФАНТАСТИКА СТАНОВИТСЯ реальностью – люди научились перемещать отдельные атомы и складывать из них, как из кубиков, устройства и механизмы необычайно малых размеров и поэтому невидимые обычным глазом. Появилась целая отрасль науки – НАНОТЕХНОЛОГИЯ, впитавшая в себя самые новые достижения физики, химии и биологии. Ученые-нанотехнологи работают с ничтожно малыми объектами, размеры которых измеряются в нанометрах. Нанотехнология – не просто количественный, а качественный скачок от работы с веществом к манипуляции отдельными атомами.

В переводе с греческого слово «нано» означает карлик. Один нанометр (нм) – это одна миллиардная часть метра (10^{-9} м). Нанометр во столько же раз меньше одного метра, во сколько раз толщина пальца меньше диаметра Земли. Размеры объектов, с которыми имеют дело нанотехнологи, лежат в диапазоне от 0,1 до 100 нм. Большинство атомов имеют диаметр от 0,1 до 0,2 нм, толщина нитей ДНК – около 2 нм, диаметр эритроцитов – 7000 нм, а толщина человеческого волоса – 80000 нм.

Ученые утверждают, что в наступившем XXI веке стержнем новой технической революции станут материалы, лекарства, устройства, средства связи и доставки, сделанные с использованием нанотехнологий.

С чего все начиналось

Идея о том, что вполне возможно собирать устройства и работать с объектами, которые имеют наноразмеры, впервые прозвучала в выступлении лауреата Нобелевской премии Ричарда Фейнмана в 1959 году в Калифорнийском технологическом институте. Лекция называлась «Там, внизу, полно места!» Слово «внизу» в названии лекции означало в «мире очень малых размеров». Тогда Фейнман сказал, что когда-нибудь, например в 2000 году, люди будут удивляться тому,

что до 1960 года никто не относился серьезно к исследованиям наномира. По словам Фейнмана, человек очень долго жил, не замечая, что рядом с ним живет целый мир объектов, разглядеть которые он не в состоянии. Ну, а если мы не видим эти объекты, то мы не можем и работать с ними.

Тем не менее, наши клетки – кирпичики, из которых состоит наш организм, – прекрасно научились работать с нанообъектами. Клетка всю свою жизнь собирает из различных атомов молекулы сложных веществ. Собрав эти молекулы, клетка размещает их в различных частях – одни оказываются в ядре, другие – в цитоплазме, а третьи – в мембране. Представьте себе возможности, которые откроются перед человечеством, если оно овладеет такими же нанотехнологиями, которыми уже владеет каждая клетка человека.

Фейнман так описывает последствия нанотехнологической революции для компьютеров: «Если, например, диаметр соединяющих проводов будет составлять от 10 до 100 атомов, то размер любой схемы не будет превышать нескольких тысяч ангстрем. Каждый, кто связан с компьютерной техникой, знает о тех возможностях, которые обещает ее развитие и усложнение. Если число используемых элементов возрастет в миллионы раз, то возможности компьютеров существенно расширятся. Они научатся рассуждать, анализировать опыт и рассчитывать собственные действия, находить новые вычислительные методы и т. п. Рост числа элементов приведет к важным качественным изменениям характеристик ЭВМ».

Позвав ученых в наномир, Фейнман сразу же предупреждает о тех препятствиях, которые их там ожидают, на примере изготовления микроавтомобиля длиной всего 1 мм. Так как детали обычного автомобиля сделаны с точностью 10^{-5} м, то детали микроавтомобиля следует изготавливать с точностью в 4000 раз выше, т.е. $2,5 \cdot 10^{-9}$ м. Таким образом, размеры деталей микроавтомобиля должны соответствовать расчетным с точностью ± 10 слоев атомов.

Наномир не только полон препятствий и проблем. Нас в наномире ожидают и хорошие новости – все детали наномира оказываются очень прочными. Происходит это из-за того, что масса нанообъектов уменьшается пропорционально третьей степени их размеров, а площадь их поперечного сечения – пропорционально второй степени. Значит, механическая нагрузка на

каждый элемент объекта – отношение силы тяжести элемента к площади его поперечного сечения – уменьшается пропорционально размерам объекта. Таким образом, пропорционально уменьшенный наностол обладает в миллиард раз более толстыми наноножками, чем это необходимо из соображений прочности.

Фейнман считал, что человек сможет легко освоить наномир, если создаст робота, способного делать уменьшенную, но работоспособную копию самого себя. Пусть, например, мы научились делать робота, который может без нашего участия создавать свою уменьшенную в 4 раза копию. Тогда этот маленький робот сможет сделать копию первоначального, уменьшенную уже в 16 раз, и так далее (рис.1). Очевидно, что десятое поколение таких роботов будет создавать роботов, размеры



Рис.1. Иллюстрация концепции Р.Фейнмана о том, чтобы роботы научились автономно делать свои уменьшенные копии

которых будут в миллионы раз меньше первоначальных.

Конечно, по мере уменьшения размеров мы будем постоянно сталкиваться с весьма необычными физическими явлениями. Ничтожный вес деталей наноробота приведет к тому, что они будут прилипать друг другу под действием сил межмолекулярного взаимодействия, и гайка, например, не будет отделяться от болта после откручивания. Однако известные нам законы физики не запрещают создавать объекты «атом за атомом». Манипуляция атомами, в принципе, вполне реальна и не нарушает никаких законов природы. Практические же трудности ее реализации обусловлены лишь тем, что мы сами являемся слишком крупными и громоздкими объектами, вследствие чего нам сложно осуществлять такие манипуляции.

Чтобы как-то стимулировать создание микрообъектов, Фейнман обещал заплатить 1000 долларов тому, кто соорудит электромоторчик размером 1/64 дюйма (1 дюйм $\approx$ 2,5 см). И совсем скоро такой микромоторчик был создан. С 1993 года ежегодно присуждается

премия имени Фейнмана за выдающиеся достижения в области нанотехнологий.

В своей лекции Фейнман говорил и о перспективах нанохимии. Сейчас химики используют для синтеза новых веществ сложные и разнообразные приемы. Как только физики создадут устройства, способные оперировать отдельными атомами, многие методы традиционного химического синтеза могут быть заменены приемами «атомной сборки». При этом, как считал Фейнман, физики действительно могут научиться синтезировать любое вещество, исходя из записанной химической формулы. Химики будут заказывать синтез, а физики – просто «укладывать» атомы в предлагаемом порядке. Развитие техники манипуляции на атомарном уровне позволит решить многие проблемы химии и биологии.

Машины созидания

Нанотехнология стала самостоятельной областью науки и превратилась в долгосрочный технический проект после детального анализа, проведенного американским ученым Эриком Дрекслером в начале 1980-х годов, и публикации его книги «Машины созидания: грядущая эра нанотехнологий».

По определению Дрекслера, нанотехнология – «ожидаемая технология производства, ориентированная на дешевое получение устройств и веществ с заранее заданной атомарной структурой». Как считают многие специалисты, в течение следующих 50 лет многие устройства станут такими маленькими, что тысяча таких наномашин вполне смогут разместиться на площади, занимаемой точкой в конце этого предложения.

Чтобы собирать наномашин, необходимо:

- 1) научиться работать с одиночными атомами – брать их и ставить на нужное место;
- 2) разработать сборщики – наноустройства, которые могли бы соответствующим образом работать с одиночными атомами по программам, написанным человеком, но без его участия;
- 3) разработать репликаторы – устройства, которые бы изготавливали наносборщики, так как их понадобится очень и очень много.

Что такое нанопроволоки и почему они такие прочные?

Нанопроволоками называют проволоки с диаметром несколько десятков и менее нанометров, изготовленные из металла, полупроводника или диэлектрика. Длина нанопроволок часто может превышать их диаметр в 1000 и более раз. Нанопроволоки часто называют одномерными структурами, а их чрезвычайно малый диаметр (около 100 размеров атома) дает возможность проявляться различным квантово-механическим эффектам. Поэтому нанопроволоки иногда называют «квантовыми проволоками». Уникальные электрические и механические свойства нанопроволок создают предпосылки для их использования в будущих нанoeлектронных и нанoeлектромеханических приборах, а также в качестве элементов новых композитных материалов и биосенсоров.

В природе нанопроволок не существует. В лабораториях нанопроволоки чаще всего получают методом эпитаксии, т.е. ориентированного роста одного монокристалла на поверхности другого, когда кристаллизация вещества происходит только в одном направлении. Например, нанопроволоку из кремния можно вырастить так, как изображено на рисунке 2 слева. Наноча-

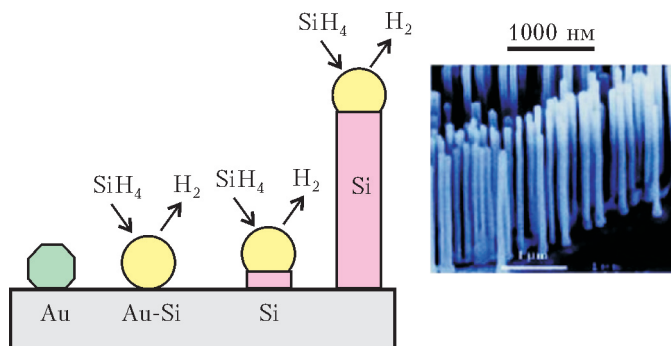


Рис.2. Получение кремниевой нанопроволоки методом эпитаксии с помощью золотой наночастицы

стицу золота помещают в атмосферу газа силана (SiH_4), и эта наночастица становится катализатором реакции распада силана на водород и жидкий кремний. Жидкий кремний скатывается с золотой наночастицы и кристаллизуется под ней. Если концентрация силана вокруг наночастицы поддерживается неизменной, то процесс эпитаксии продолжается, и все новые слои жидкого кремния кристаллизуются на его уже затвердевших слоях. В результате нанопроволока из кремния растет, приподнимая наночастицу золота все выше и выше. При этом, очевидно, размер наночастицы определяет диаметр нанопроволоки. Справа на рисунке 2 показан «лес» из ZnO-нанопроволок, полученных аналогичным образом.

Как известно, прочность – это свойство твердых тел сопротивляться разрушению (разделению на части), а также необратимому изменению формы под действием внешних нагрузок. Когда цилиндрический образец с площадью поперечного сечения S растягивают силой F , он деформируется сначала обратимо, т.е. упруго – его механическое напряжение $\sigma = F/S$ растет прямо пропорционально относительному удлинению $\varepsilon = (L - L_0)/L_0$ (рис.3, область O), затем пластически, т.е. необратимо (рис.3, область II). При дальнейшей деформации структурные неоднородности образ-

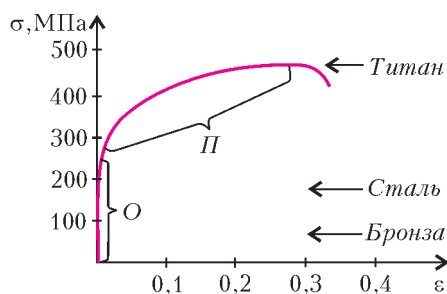


Рис.3. Взаимосвязь между механическим напряжением и относительной деформацией образца. Стрелками указаны пределы прочности для некоторых материалов

ца (дефекты кристаллической решетки, или дислокации) начинают двигаться и, сталкиваясь с другими, образуют микротрещины. При этом чем больше будет этих дислокаций и чем быстрее они смогут двигаться по образцу, тем больше будет микротрещин. Когда растягивающее напряжение достигает предела прочности, соседние микротрещины, соединяясь друг с другом, достигают критического размера, и образец разрушается.

Нанопроволока – это монокристалл, в кристаллической решетке которого практически отсутствуют дефекты (дислокации). При этом отношение площади поверхности к объему для нанопроволок гораздо больше, чем для образцов обычных размеров. Поэтому поверхность нанопроволок легко «поглощает» выходящие наружу дислокации без образования микротрещин. Кроме того, поверхность нанопроволоки, имеющая чрезвычайно малый радиус кривизны (около 10 нм), сильно сжата и поэтому препятствует движению дислокации наружу, т.е. образованию микротрещины. Все это приводит

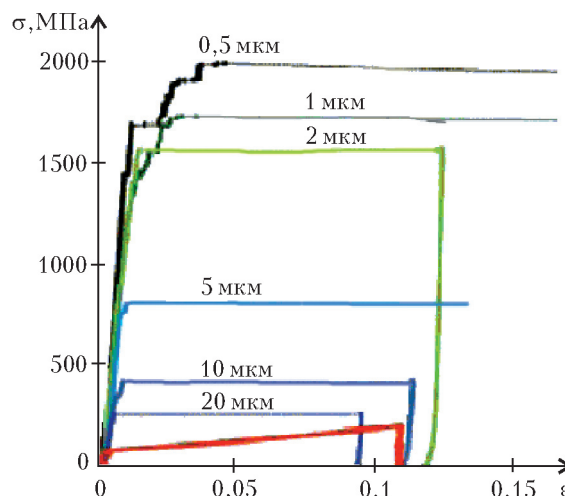


Рис.4. Зависимость механического напряжения от относительной деформации для микрообразцов из никеля и его сплавов разного диаметра. Для сравнения красным показана эта зависимость для поликристаллического макрообразца

к тому, что у нанопроволок почти отсутствует пластическая деформация, а предел прочности в десятки раз выше, чем у обычных образцов (рис.4).

Почему наночастицы плавятся при низкой температуре?

При уменьшении размеров частиц изменяются не только механические свойства, но и термодинамические характеристики. Так, температура плавления становится гораздо ниже, чем у образцов обычного размера. На рисунке 5 представлена экспериментальная кривая падения температуры плавления наночастиц алюминия с уменьшением размеров частицы. При этом температура плавления частицы размером 4 нм уменьшается на 140 °С по сравнению с температурой плавления образца алюминия обычных размеров.

Зависимости, аналогичные той, которая показана на рисунке 5, были получены для многих металлов. Так, при уменьшении диаметра наночастиц из олова до 8 нм

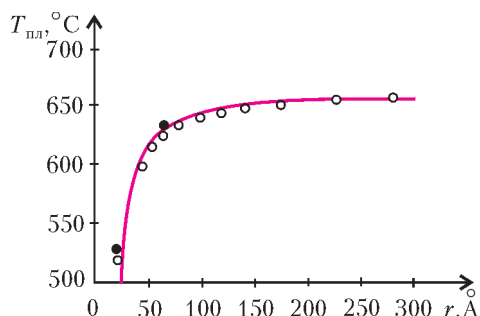


Рис.5. Зависимость температуры плавления алюминиевых наночастиц от их радиуса

их температура плавления падает на 100 °C. При этом самое большое падение температуры плавления (более чем на 500 °C) было обнаружено у наночастиц золота.

У наночастиц почти все атомы — на поверхности. Причиной понижения температуры плавления у наночастиц служит то, что атомы на поверхности всех кристаллов находятся в особых условиях, а доля таких поверхностных атомов у наночастиц становится очень большой. Сделаем оценку этой поверхностной доли для алюминия.

Легко вычислить, что в 1 см³ алюминия содержится примерно $6 \cdot 10^{22}$ атомов. Для простоты будем считать, что атомы находятся в узлах кубической кристаллической решетки, тогда расстояние между соседними атомами будет около $4 \cdot 10^{-8}$ см. Значит, плотность атомов на поверхности составит $6 \cdot 10^{14}$ см⁻². Теперь возьмем кубик из алюминия с ребром 1 см. Число поверхностных атомов у него $36 \cdot 10^{14}$, а число атомов внутри $6 \cdot 10^{22}$. Таким образом, доля поверхностных атомов у такого алюминиевого кубика «обычных» размеров составляет всего $6 \cdot 10^{-8}$.

Если сделать такие же вычисления для кубика из алюминия размером 5 нм, то окажется, что на поверхности такого «нанокубика» находится уже 12% всех его атомов. Ну, а на поверхности кубика размером 1 нм вообще находится больше половины всех атомов! Зависимость поверхностной доли α от числа атомов N показана на рисунке 6.

На поверхности кристалла порядка нет. С начала 60-х годов прошлого века ученые считают, что атомы, расположенные на поверхности кристаллов, пребыва-

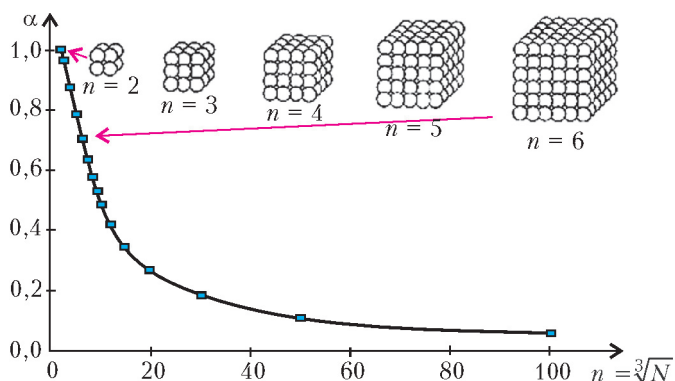


Рис.6. Зависимость поверхностной доли атомов от их числа в кубике кристаллического вещества

ют в особых условиях. Силы, заставляющие их находиться в узлах кристаллической решетки, действуют на них только снизу. Поэтому поверхностным атомам (или молекулам) ничего не стоит «уклониться от советов и объятий» молекул решетки. И если это происходит, то к такому же решению приходят сразу несколько поверхностных слоев атомов. В результате на поверхности всех кристаллов образуется пленка жидкости. Кстати, кристаллы льда не являются исключением (рис.7), поэтому лед и скользкий.

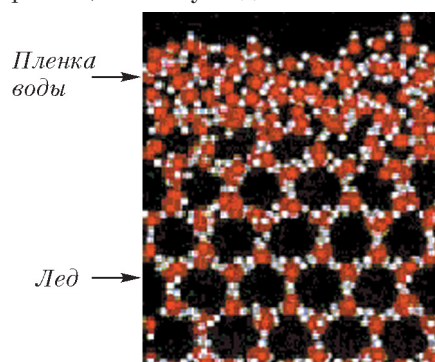


Рис.7. Схематическое изображение поперечного сечения среза льда. Красные кружки — атомы кислорода, белые — водорода

Толщина жидкой пленки на поверхности кристалла растет с температурой, так как более высокая тепловая энергия молекул вырывает из кристаллической решетки больше поверхностных слоев. Теоретические оценки и эксперименты показывают, что как только толщина жидкой пленки на поверхности кристалла начинает превышать 1/10 размеров кристалла, кристаллическая решетка разрушается.

Очевидно, что «легкоплавкость» наночастиц следует учитывать на любых нанопроизводствах. Известно, например, что размеры современных элементов электронных микросхем находятся в нанодиапазоне. Поэтому понижение температуры плавления кристаллических нанообъектов накладывает определенные ограничения на температурные режимы работы современных и будущих микросхем.

Закон Ома для углеродных нанотрубок

В наном мире изменяются не только механические свойства и температуры плавления веществ, но и их электрические характеристики. Оказывается, сопротивление R цилиндрического резистора наноразмеров нельзя вычислять по известной формуле $R = \rho L/S$, где L — длина, S — площадь поперечного сечения, а ρ — удельное сопротивление материала резистора. Мало того, сопротивление R_0 нанорезисторов вообще не зависит от их размеров и вещества, из которого они сделаны, а определяется только двумя фундаментальными физическими константами:

$$R_0 = \frac{h}{2e^2} = 12,9 \text{ кОм},$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона, а $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж/с — постоянная Планка. Величину R_0 назвали квантом электрического сопротивления,

имея в виду, что в наномире сопротивления всех резисторов одинаковы.

Квантование электрического сопротивления – не единственная особенность проводимости в наномире. Оказалось, что в нанорезисторе при прохождении тока не выделяется джоулево тепло. Эту необычную проводимость в наномире, независимую от размеров и материала резистора и не сопровождающуюся выделением тепла, назвали баллистической. В переводе с греческого «баллио» означает бросаю; соответственно, баллистика – наука о движении артиллерийских снарядов, пуль и т.п. Названием проводимости в наномире «баллистической» его авторы хотели подчеркнуть, что электроны, как искусно запущенные снаряды, движутся через нанорезистор, не сталкиваясь с его атомами, находящимися в узлах кристаллической решетки.

Углеродные нанотрубки – квантовые резисторы. Примером нанорезисторов, обладающих баллистической проводимостью, являются углеродные нанотрубки – протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров. Углеродные нанотрубки – это каркасные структуры или гигантские молекулы, состоящие только из атомов углерода. Такую нанотрубку легко себе представить, если вообразить, что вы сворачиваете в трубку один из молекулярных слоев графита – графен (рис.8). Способ сворачивания нанотрубок – угол между направлением оси нанотрубки по

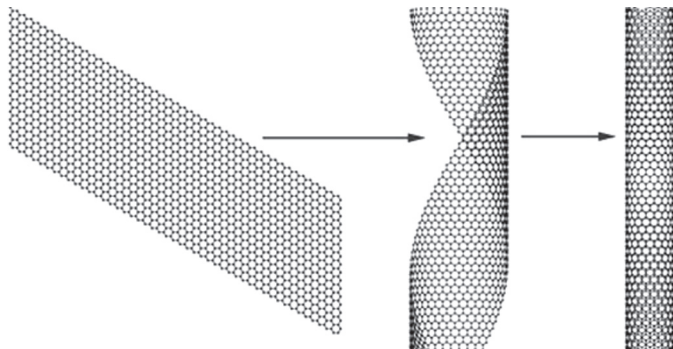


Рис.8. Один из способов воображаемого изготовления нанотрубки из молекулярного слоя графита

отношению к осям симметрии графена (угол закручивания) – во многом определяет ее свойства.

Конечно, никто не изготавливает нанотрубки, сворачивая их из графитового листа. Нанотрубки образуются сами, например – на поверхности угольных электродов при дуговом разряде между ними. При разряде атомы углерода испаряются с поверхности и, соединяясь между собой, образуют нанотрубки самого различного вида – однослойные, многослойные и с разными углами закручивания. В зависимости от угла закручивания нанотрубки могут обладать высокой, как у металлов, проводимостью, а могут иметь свойства полупроводников. Дальше речь пойдет только о нанотрубках с высокой проводимостью.

Открытие квантовой проводимости углеродных нанотрубок было сделано, когда измеряли зависимость их сопротивления от длины, погружая их в ртуть.

Диаметр нанотрубок составлял от 1,4 до 50 нм, а длина – от 1 до 5 мкм. Но несмотря на такой большой разброс в размерах сопротивление ВСЕХ нанотрубок составляло 12,9 кОм.

Почему электричество в наномире превращается в оптику? Ток переносится в проводнике электронами, образующими так называемый электронный газ. Среднеквадратичный импульс $\bar{p}$ одного из таких электронов можно найти из соотношения для среднеквадратичной энергии $\bar{E}$ частицы идеального газа:

$$\bar{E} = \frac{\bar{p}^2}{2m_e} = \frac{3}{2}kT,$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона. Подставляя сюда $T = 300$ К, получаем $\bar{p} = 10,6 \cdot 10^{-26}$ кг · м/с.

Известно, что каждую частицу можно представить в виде волны де Бройля с длиной волны $\lambda = h/p$. Для электрона проводимости в металле получаем $\lambda = 6,2$ нм. Это значит, что для углеродных нанотрубок диаметром несколько нанометров или меньше электрон проводимости будет проявлять главным образом волновые свойства. Через такие нанотрубки электроны будут проходить, как световые волны проходят через световоды. Таким образом, электричество в наномире превращается в оптику, а джоулево тепло рассеивается только на границах наномира, где, например, нанотрубка соединяется с проводником обычных размеров.

Чему равен квант сопротивления R_0 ? Попробуем вывести «на пальцах» упомянутую выше красивейшую формулу, связывающую квант сопротивления с фундаментальными физическими константами. Так как нанотрубка обладает баллистической проводимостью, а значит джоулево тепло в ней не выделяется, можно считать, что ее длина меньше длины свободного пробега электрона проводимости. Пусть между сечениями A и B нанотрубки приложено напряжение U , а сила тока в ней равна I . Поскольку энергия не рассеивается, изменение энергии ΔE электрона между сечениями A и B составляет $\Delta E = eU$. Это изменение энергии произошло за интервал времени Δt , равный времени пролета электрона между сечениями A и B . Соотношение неопределенностей Гейзенберга накладывает определенные ограничения на изменения ΔE и Δt :

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx h,$$

откуда следует, что

$$U \approx \frac{h}{e\Delta t}.$$

Оценим теперь силу тока в нанотрубке. Нанотрубка – одномерная квантовая структура. В ней, как в атоме гелия, могут уживаться только два электрона, обладающие разными значениями спина. Это означает, что ток I между сечениями A и B нанотрубки равен

$$I = \frac{2e}{\Delta t}.$$

Из двух последних соотношений легко найти формулу для сопротивления R_0 между сечениями A и B нано-

трубки:

$$R_0 = \frac{U}{I} = \frac{h}{2e^2}.$$

Кстати, эту формулу можно вывести и с помощью теории размерностей, считая, что квант сопротивления может зависеть только от двух мировых констант – элементарного заряда и постоянной Планка.

Так как нагрев у нанотрубок отсутствует, они способны пропускать токи огромной плотности – более 10^7 А/см². Если бы у углеродных нанотрубок была обычная (не баллистическая) проводимость, то при токах аналогичной плотности их температура выросла бы до 20000 К, что гораздо выше температуры их сгорания (700 К).

Существование баллистической проводимости дает зеленый свет инженерам, старающимся еще и еще уменьшить размеры электронных микросхем: уменьшайте элементы микросхем до наноразмеров, и схемы перестанут нагреваться!

Почему цвет наночастицы может зависеть от размера?

Нас окружают предметы обычных размеров, и мы привыкли к тому, что цвет предмета зависит только от оптических свойств вещества, из которого он сделан, или красителя, которым покрашен. В наном мире такое представление оказывается несправедливым, и это отличает нанооптику от обычной.

Лет 10–15 тому назад нанооптики вообще не существовало. Да и как она могла быть, если из курса обычной оптики следует, что свет не чувствует нанообъекты, поскольку их размеры существенно меньше длины волны света $\lambda = 400 - 800$ нм. Согласно волновой теории света, нанообъекты не должны иметь тени и свет от них не может отражаться. Сфокусировать видимый свет на площади, соответствующей нанообъекту, тоже нельзя. Значит, и увидеть наночастицы невозможно.

Однако, с другой стороны, световая волна, как и любое электромагнитное поле, все-таки должна действовать на нанообъекты. Например, свет, упав на полупроводниковую частицу, может своим электрическим полем оторвать от ее атома один из валентных электронов. Этот электрон на некоторое время станет электроном проводимости, а потом опять вернется «домой», испустив при этом квант света, соответствующий ширине так называемой запрещенной зоны – минимальной энергии, необходимой для того, чтобы валентному электрону стать свободным (рис.9).

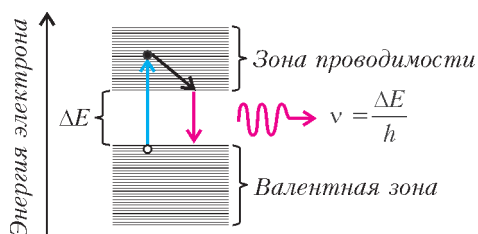


Рис.9. Схематическое изображение уровней энергии и энергетических зон электрона в полупроводнике

Таким образом, полупроводники даже наноразмеров должны чувствовать падающий на них свет, испуская при этом свет меньшей частоты. Другими словами, полупроводниковые наночастицы на свету могут становиться флуоресцентными, испуская свет строго определенной частоты, соответствующей ширине запрещенной зоны.

Светиться в соответствии с размером! Флуоресцентная способность полупроводниковых наночастиц была обнаружена в самом конце прошлого века. И, самое интересное, оказалось, что частота света, испускаемого этими частицами, уменьшается с увеличением размеров частиц.

Как видно из рисунка 10, цвет взвеси наночастиц зависит от их диаметра. Зависимость цвета флуоресценции, т.е. ее частоты ν , от размера наночастицы

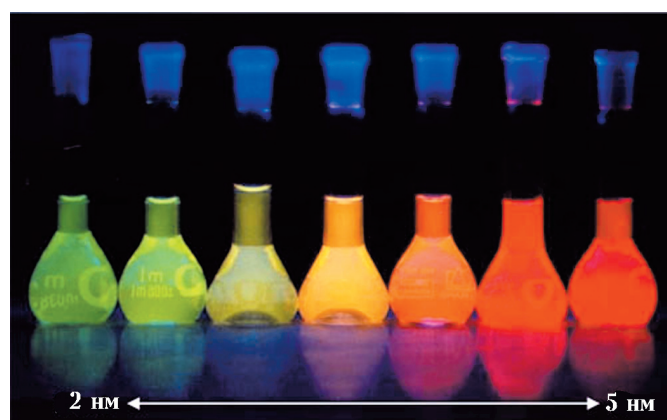


Рис.10. Флуоресценция взвесей коллоидных частиц различных размеров (от 2 до 5 нм). Сверху все колбы освещаются одним и тем же синим светом, содержащим ультрафиолетовую составляющую

означает, что от размера частицы зависит также и ширина запрещенной зоны ΔE . Глядя на рисунок 10, можно утверждать, что при увеличении размеров наночастиц ширина запрещенной зоны ΔE должна уменьшаться, так как $\Delta E = h\nu$. Такую зависимость можно объяснить следующим образом.

«Оторваться» легче, если вокруг много соседей. Минимальная энергия, необходимая для отрыва валентного электрона и перевода его в зону проводимости, зависит не только от заряда атомного ядра и положения электрона в атоме. Чем больше вокруг атомов, тем легче оторвать электрон – ведь ядра соседних атомов тоже притягивают его к себе. Этот же вывод справедлив и для ионизации атомов.

На рисунке 11 показано, как меняется среднее число ближайших соседей n у атома платины при увеличении диаметра частицы D . Когда число атомов в частице невелико, значительная их часть расположена на поверхности, а, значит, среднее число ближайших соседей гораздо меньше того, которое соответствует кристаллической решетке платины (11). При увеличении размеров частицы среднее число ближайших соседей приближается к пределу, соответствующему данной кристаллической решетке. Из рисунка следует, что ионизовать (оторвать электрон) атом