



Время летит быстро, и 2020 год – это не так уж и далеко. Как бы то ни было, наиболее рациональный подход к прогнозу – это представить себе то, что действительно может быть нужно людям, а не пытаться ответить на вопрос о том, что можно изобрести и сделать.

От магнитной подушки до фотонной ловушки

Сделать сейчас можно практически всё то, что не запрещено законами природы. Вопрос только в том, нужно ли это и сколько это будет стоить. Вторая оговорка к моей попытке прогноза – это то, что я – профессиональный учёный в области физики твёрдого тела, электроники, наноэлектроники, но отнюдь не являюсь специалистом в таких важнейших областях, как медицина, биофизика, биохимия и т.д. Поэтому мой прогноз, безусловно, будет частичным.

Начнём с общего

В известном смысле мерилom качества жизни в технической цивилизации является потребление энергии на душу населения. В современной России, несмотря на более суровый климат, этот показатель в два раза ниже, чем в Северной Америке. Для того чтобы выйти на уровень энергопотребления США, судя по опыту других стран и по нынешним темпам роста, нам потребуется 60 лет. Надо, однако, помнить про истощение запасов нефти и других углеводородов, истощение запасов урана и связанный со всем этим энергетический голод, прогнозируемый на 2030–2050 гг. (см. статью В. Бурдакова,

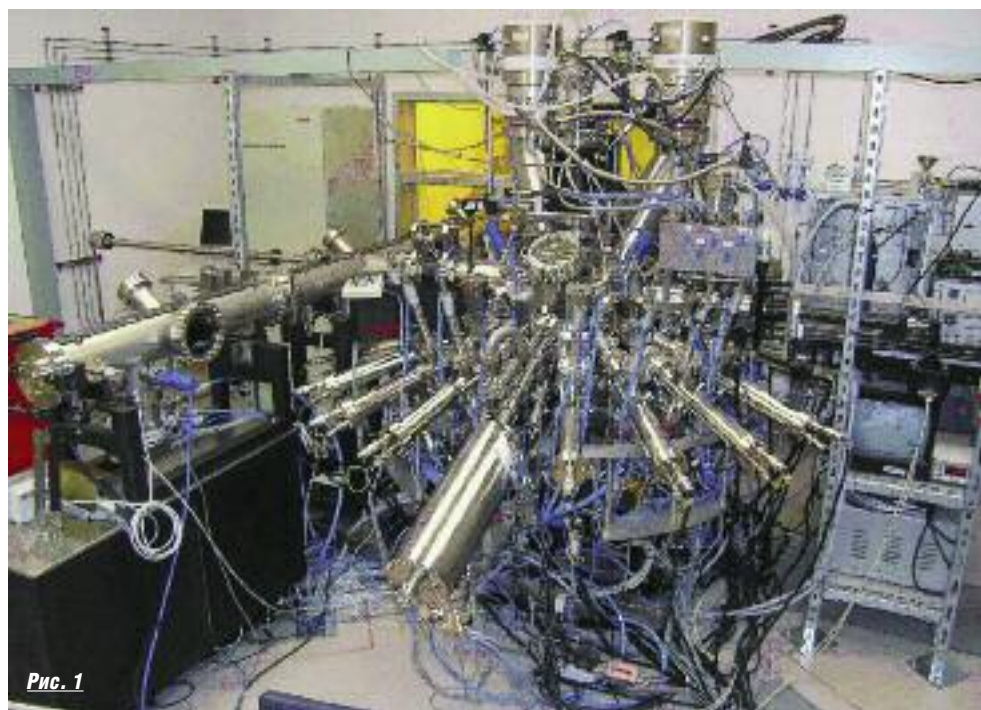


Рис. 1

в «ТМ», №1 за 2007 г., с.16). Таким образом, нынешний путь развития за счёт строительства новых электростанций является тупиковым не только для России, но и глобально.

В этих условиях на первый план выходит другой путь – экономия энергии.

В дачном поселке, где я живу, имеется обычная воздушная линия электропередачи длиной около 2 км. Так вот, в начале этой линии напряжение составляет 380/220 В, а в конце – 350/200 В. То есть, на длине линии происходит 10-процентное падение

напряжения. Эти проценты падают на проводах из-за их сопротивления, а выделяемая мощность идёт на нагревание атмосферы.

Теперь представим себе линии электропередач, трансформаторы, промышленные электроустановки, судовые электродвигатели, генераторы, электропоезда, электромобили и т.п. – и всё без ненужных потерь. Если это удастся реализовать, то экономия энергии даст примерно тот же эффект, что строительство новых электростанций в обычных для сегодняшнего дня темпах.

Почти 100 лет назад (1911) голландский физик Камерлинг-Оннес открыл явление сверхпроводимости – исчезновения до нуля электрического сопротивления металлов при охлаждении их ниже критической температуры.

Физическая основа этого явления состоит в том, что одинаково заряженные электроны, вместо того чтобы отталкиваться друг от друга согласно классическому закону Кулона, благодаря квантовомеханическим эффектам взаимодействия начинают притягиваться и образуют так называемые куперовские пары. Все спаренные электроны становятся подобными одной когерентной волне и приобретают одинаковую фазу.

Камерлинг-Оннес первым построил машину для ожижения гелия и, откачивая его пары, даже достиг температур около -272°C , всего на градус выше абсолютного нуля. Охлаждая чистую ртуть, он заметил, что сопротивление твёрдого металла вначале плавно уменьшается, а затем скачком падает до нуля при температуре около -269°C .

Охлаждение до столь низкой температуры требует сложной и дорогой техники ожижения гелия, поэтому на протяжении столетия физики и химики интенсивно трудились над повышением критической температуры сверхпроводящих (СП) материалов T_c . На сегодняшний день наивысшую критическую температуру удалось довести до $T_c = 138\text{ K } (-135^{\circ}\text{C})$ в оксидном керамическом соединении довольно сложной структуры $\text{Hg}_{12}\text{Tl}_3\text{Ba}_{30}\text{Ca}_{45}\text{Cu}_{125}\text{O}_{125}$ (заметим, что за открытие купратных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) двум швейцарским учёным была присуждена Нобелевская премия в 1987 г.).

Поиск и создание новых сверхпроводников не прекращается; в 2008 г. открыт новый класс ВТСП материалов, не содержащих меди. Эта работа идёт с помощью самой современной техники, почти на грани искусства.



Рис. 2

Учёные из Брукхэвенской национальной лаборатории США научились создавать сверхпроводниковые материалы, точно контролируя атомный состав последовательно наносимых индивидуальных монослоёв желаемых элементов. На рис. 1 показана используемая ими сложная техника.

Прогресс в повышении критической температуры даёт надежды на достижение T_c порядка комнатной температуры, и теоретических препятствий этому нет. Трудно предсказать время этого грандиозного события, но, во всяком случае, **к 2020 г. можно ожидать очень значительного повышения критической температуры и критических магнитных полей, а также создания и промышленного выпуска дешёвых ВТСП материалов для самых разнообразных применений в технике.**

Электроэнергетика

Уже сейчас существуют материалы, в которых сверхпроводящее состояние достигается при охлаждении жидким азотом с температурой кипения всего $77\text{ K } (-196^{\circ}\text{C})$. Это революционное достижение вывело ВТСП из стен лаборатории на просторы промышленных применений.

На рис. 2 показаны несколько примеров ВТСП кабелей. Как видно, они имеют довольно сложное многослойное устройство и охлаждаются жидким азотом. Во многих странах инженеры про-

водят испытания отрезков таких кабелей длиной несколько сот метров, включённых в энергосети с вполне «практическими» характеристиками, например с напряжением 138 кВ при передаваемой мощности 574 МВА . ВТСП кабели идеально сочетаются с другими необходимыми устройствами энергетики – ВТСП трансформаторами, токоограничителями и накопителями электроэнергии, образцы которых разрабатываются и испытываются во многих странах. **Можно прогнозировать, что в течение 2015–2020 гг. заметная доля энергоценой и силовых электроустройств в крупных городах многих стран, включая Россию, будет переведена на ВТСП кабели, что приведёт к значительной экономии электроэнергии.**

ВТСП кабели также успешно применяются в сверхпроводящих моторах и генераторах. На рис. 3 показан внешний вид электродвигателя мощностью $36,5\text{ МВт}$, построенного в США для применения в составе судовых систем электродвижения.

Транспорт

Помимо исчезновения электрического сопротивления, сверхпроводники проявляют другое замечательное свойство – они являются идеальными диамагнетиками, т.е. выталкивают из себя внешнее магнитное поле. Благодаря этому, сверхпроводник отталкивается от магнита сильнее любых других диамагнетиков.

На рис. 4 показано, как таблетка из обычного магнитного материала левитирует над кусочком ВТСП материала, охлаждаемого жидким азотом, благодаря балансу между силой тяжести и силой отталкивания магнита от сверх-



Рис. 3

проводника. На этом физическом эффекте основаны поезда на магнитной подушке. Из-за отсутствия контакта колёс с рельсами исчезает связанное с этим трение качения, в результате поезд развивает скорости более 500 км/ч (ограничивается в основном сопротивлением воздуха). Различные конструкции подобных поездов испытываются в Японии, Китае, Германии, Англии, США.



Рис. 4

В заставке статьи показан поезд под названием JR-Maglev (сокращение от слов «магнитная левитация»). Поезд курсирует в Японии в испытательном режиме с 2003 г., перевёз уже 100 тыс. пассажиров. В днище вагонов установлены охлаждаемые жидким азотом ВТСП магниты, благодаря которым они поднимаются над поверхностью. Поезд приводится в движение линейным электромотором и способен развивать скорость до 581 км/ч. Строительство таких поездов довольно дорого, но эксплуатация дешёва и удобна, и ещё – хорошо совместима с городскими требованиями. Экономически на расстояниях до 1000–1500 км он более выгоден, чем самолёт, к тому же менее шумен и не загрязняет среду. **Очень вероятно, что к 2020 г. часть недлинных, но напряжённых желез-**

нодорожных линий (например, сообщения из города с аэропортом), а также часть коротких авиалиний и автобусных маршрутов будет заменена скоростными поездами на магнитной подушке.

Нанопизика и наноэлектроника

«Мозг» сегодняшнего компьютера – микропроцессор – содержит десятки и сотни миллионов транзисторов. Мало кого устроит увеличение производительности компьютера за счёт увеличения его размеров. Поэтому конструкторы вынуждены всё время уменьшать размеры элементарных компонентов на чипе микропроцессора. Сегодня эти размеры составляют малые доли микрона. Что же будет далее, и бесконечен ли этот процесс?

В современном процессоре фирмы «Интел» минимальный размер элемента составляет 45 нм; компания «Chartered» в 2009 г. планирует запустить технологические процессы с 32- и 28-нм элементами. Ясно, что в этой линии развития микропроцессорной техники предел задан «размером атома» кремния (0,2 нм) и длиной волны электрона в полупроводнике (3–10 нм). Кроме того, работа традиционного транзистора основана на движении электронов как носителей заряда, и поэтому, помимо размера, существуют ограничения по выделяемому джоулевому теплу и по скорости переноса заряда.

На помощь в преодолении этих препятствий приходит квантовая механика электронов и фотонов. Помимо заряда и массы, электроны имеют спин – собственный момент количества движения микрочастицы, имеющий квантовую природу и не связанный с движением частицы как целого. Спин не «прикреплён» к массе; поэтому, если бы им удалось управлять, то «спиновый» компьютер был бы намного быстрее и потреблял бы меньше мощности.

Учёные пытаются решить эту проблему, комбинируя ферромагнетики и полупроводники в одном транзисторе, и учатся управлять переносом спинов так же просто, как и зарядов. Возможно, через десяток лет им удастся преодолеть основные трудности и **создать работоспособный «спиновый» транзистор как основу микропроцессоров.**

Другая надежда – использование волновой природы электрона, особенно в комбинации с квантами света – фотонами. В типичных полупроводниках волновые свойства электрона становятся значимыми на расстояниях порядка 5–10 нм, которые, как мы видим, уже не за горами.

И здесь очень важным оказалось то, что с помощью света можно управлять движением электронов с разным спином. В одном из устройств поляризованный лазерный свет заставляет электроны со спином, направленным вверх, двигаться направо, а со спином, направленным вниз, – налево. Поскольку одинаковое число электронов движется в противоположных направлениях, то полное переносимое количество заряда и суммарный электрический ток равны нулю. То есть создаётся ток спинов без движения зарядов. Такой эффект получен впервые: в устройствах спинтроники, исследовавшихся до сих пор, перенос спина всегда сопровождался током электронов.

Эти первые результаты только показывают пути решения проблемы. Но они позволяют надеяться на то, что **управляемый светом «спиновый» транзистор будет создан через 3–5 лет.**

Ещё один путь построения принципиально новых, «неэлектронных» вычислительных устройств – использование фотонов вместо электронов. Фотоника сейчас развивается столь

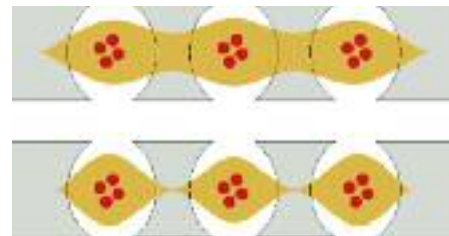


Рис. 5

бурно, что в ближайшие 10 лет физики могут научиться обращаться с частицами света так же хорошо, как с электронами: полностью останавливать их, поштучно контролировать перемещение с места на место.

На рис. 5 изображён кристалл кремния, в котором сделаны цепочки микро-

скопических полостей. Обычно фотоны свободно распространяются вдоль такой цепочки и пролетают без затруднения друг сквозь друга, поскольку не взаимодействуют (верхняя часть рисунка). Однако если в полость вставить некоторые атомы, электронные оболочки которых возбуждаются светом, то фотоны можно заставить взаимодействовать. В то время как полость без атома может вмещать сколько угодно фотонов, полость с атомом «пустит в себя» только один фотон и будет блокировать попытки проникновения других его собратьев. В цепочке полостей (нижняя часть рисунка) фотоны «прыжками» перемещаются от полости к полости, так как не могут остановиться в той, где уже «сидит» другой фотон. Таким образом, движение фотонов имитирует движение электронов; им можно управлять и использовать для вычислений.

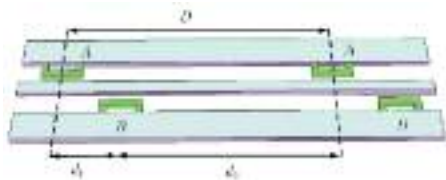


Рис. 6

Однако вернёмся к технологиям, использующим явление сверхпроводимости. Недавно была предложена схема устройства, позволяющего останавливать фотоны в распределённых линиях сверхвысоких частот, сделанных с использованием ВТСП технологии.

Устройство состоит из периодической цепочки одинаковых блоков длиной D (рис. 6) Каждый из блоков содержит два Q -бита, они обозначены буквами A и B . (Q -бит – это квантовый разряд или наименьший элемент для хранения информации в квантовом компьютере). A и B – сверхпроводниковые квантовые ячейки, так называемые «ящики куперовских пар» с нанометровыми размерами. Когда сверхвысокочастотные электромагнитные волны, т.е. фотоны сантиметрового диапазона, распространяются вдоль сверхпроводящих полосок (на рисунке их три), то из-за периодичности расположения квантовых ячеек возникает сильное взаимодействие фотонов с Q -битами, которое может остановить или даже реверсировать распространение фотонов.

Подобные и многие другие эксперименты, как можно надеяться, приведут к тому, что **в ближайшие 10–12 лет будет найден способ построения компьютера на основе манипулирования**

квантовыми состояниями фотонов вместо манипулирования классическими состояниями электронов.

Сверхпроводниковая электроника «в чистом виде»

Вообще же варианты с использованием сверхпроводниковых Q -битов являются одними из самых перспективных среди многочисленных исследуемых способов построения элементов вычислительных и информационных систем на квантовых ячейках. Совсем недавно японскими и российскими физиками был создан методами нанотехнологии лазер, который соединил в себе искусственный атом на основе сверхпроводникового элемента размерами 100 нм, связанный со сверхпроводящим резонатором и полосковой линией, тоже сверхпроводящей. Схема устройства показана на рис. 7, а на рис 8 – изображение искусственного атома, сделанное сканирующим электронным микроскопом; весь его масштаб – около 1 мкм. Лазер излучает электромагнитные волны на частоте 10 ГГц (длина волны 3 см).

Быстрое развитие работ в области сверхпроводниковой наноэлектроники позволяет прогнозировать, что в сравнительно близком будущем на основе сверхпроводниковых элементов и искусственных атомов **будут созданы не только лабораторные, но уже промышленные устройства электроники терагерцевого диапазона, в тысячи раз более быстродействующие, чем**

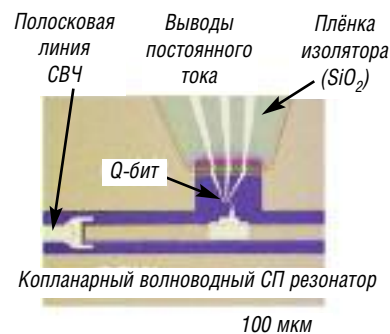


Рис. 7

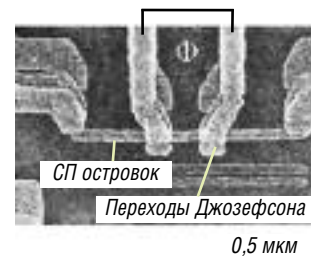


Рис. 8

используемые сейчас. Лазерные и сверхпроводниковые приборы смогут освоить этот диапазон частот, промежуточный между светом и радиоволнами и очень востребованный в медицине, технике для борьбы с терроризмом и т.п. Рост значения критической температуры ВТСП материалов сделает возможным самое широкое их применение в наноэлектронике. **™**

В.М. Пудалов, д.ф.-м.н.,
зав. лабораторией ФИАН
им. П.Н. Лебедева