

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

539.2

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА И ЕЕ РОЛЬ В НАУКЕ И ПРАКТИКЕ

А. М. Прохоров

Торжества в связи с 250-летним юбилеем Академии наук СССР вылились во всенародный праздник. Глубокое впечатление произвела на всех яркая речь Леонида Ильича Брежнева на торжественном заседании членов Академии наук и советской общественности, которую он произнес при вручении Академии второго ордена Ленина. В этой речи Л. И. Брежнев показал, чего ждет от ученых партия, идя навстречу своему XXV съезду, — все более глубокого и смелого исследования новых процессов и явлений, активного вклада в дело научно-технического прогресса, вдумчивого анализа возникающих проблем, ответственных рекомендаций о наилучших способах их решения в интересах укрепления мощи страны, улучшения жизни народа, в интересах построения коммунизма.

Советским ученым оказано высокое доверие и оно обязывает нас еще лучше, еще эффективнее решать фундаментальные проблемы, коренным образом влияющие на научно-технический потенциал нашей страны. Ученые должны иметь ясную перспективу по важнейшим направлениям научных исследований и уметь оценивать их значение для научно-технического прогресса страны. Одним из таких направлений является физика твердого тела. Именно этой проблеме и был посвящен доклад «Физика твердого тела» на Юбилейном заседании Академии наук СССР.

Научно-технический прогресс базируется на достижениях современной науки. Но если в наши дни промышленность не может успешно развиваться без науки, то и наука в не меньшей степени зависит от промышленности. Чем больше промышленность оказывает помощь науке, тем выше практическая значимость исследований. Можно без преувеличения сказать, что темп научно-технического прогресса во многом зависит от уровня промышленного приборостроения и выпуска новых материалов, а этот уровень, в свою очередь, определяется прогрессом физики твердого тела; следовательно, в современной технике физика твердого тела играет первостепенную роль, являясь фундаментом научно-технического прогресса.

В нашей стране исследования в области физики твердого тела начали интенсивно развиваться после Великой Октябрьской социалистической революции, особенно в Ленинградском физико-техническом институте, организованном в 1918 г. Этот институт воспитал плеяду талантливых физиков, работы которых получили широкую известность. Ныне мы располагаем целой армией высококвалифицированных специалистов в этой важной отрасли науки — сотрудников академических учреждений, высших учебных заведений и институтов промышленности.

© Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука»,

Ученые Академии наук СССР занимают ведущее положение в развитии фундаментальных исследований по физике твердого тела. К сожалению, из-за недостатка места здесь невозможно перечислить академические институты и упомянуть персонально исследователей, внесших существенный вклад в разработку проблем, о которых пойдет речь.

Сравнительно недавно квантовая теория физики твердого тела была вотчиной лишь физико-теоретиков. Сейчас положение коренным образом изменилось, поскольку квантовые свойства твердого тела широко используются при создании электронных приборов, играющих существенную роль в технике. Прежде всего это относится к электронно-вычислительным машинам. Первые ЭВМ на электронных лампах, появившиеся около 20 лет назад, были громоздкими, не очень надежными, потребляли много электроэнергии. Они могли выполнять всего несколько тысяч операций в секунду и применялись главным образом в качестве быстродействующих арифмометров. Колоссальный прогресс в изучении квантовых свойств твердого тела позволил создать новую элементную основу вычислительных машин. ЭВМ третьего поколения базируются на твердотельной микроэлектронике с малой степенью интеграции, а четвертого — электронике со значительной степенью интеграции. Переход к микроэлектронным схемам дал возможность повысить быстродействие машин до нескольких миллионов операций в секунду, а в многопроцессорных ЭВМ оно достигает сотен миллионов операций в секунду.

Для выполнения логических операций и для хранения информации машина должна иметь память. Чем мощнее память, тем эффективнее можно использовать ЭВМ. Память современных машин рассчитана на хранение огромных массивов информации. Если эту информацию напечатать, то она займет миллионы страниц типографского текста. Переход к новой элементной базе привел к резкому уменьшению габаритов ЭВМ, а также значительно снижению затрат энергии на одну операцию.

Элементы, на которых строятся ЭВМ, должны быть не только быстродействующими и потреблять мало энергии, но и обладать высокой надежностью. Переход к твердотельной микроэлектронике решил и этот вопрос. Следует сказать, что разительные успехи в разработке интегральных схем высокой надежности дались отнюдь не легко и просто. Начавшееся в 50-х годах бурное развитие физики твердого тела было связано с крупными достижениями полупроводниковой техники — созданием электронных элементов — транзисторов, заменивших электронные лампы в ЭВМ второго поколения. Первые транзисторы имели малый срок службы, и для них был характерен значительный разброс параметров. Глубокое изучение протекающих в транзисторах процессов помогло преодолеть эти трудности.

Сейчас в области физики твердого тела трудится большое число теоретиков и экспериментаторов. Вооруженные современными приборами и оборудованием, они изучают свойства полупроводниковых пленок, толщина которых зачастую много меньше длины световой волны. Работа начинается с нанесения на подложку пленок, каждая из которых должна иметь определенную толщину, состав и быть монокристаллической. При этом надо тщательно следить, чтобы не происходило загрязнения пленок, ибо даже ничтожное количество посторонних примесей существенно изменяет их свойства. Для пленок требуются сверхчистые исходные вещества. Сама технология получения пленок с нужными характеристиками весьма сложна. Поэтому человек, занимающийся микроэлектроникой, должен сочетать в себе качества хорошего физика и хорошего технолога. К сожалению, ученые, создавшие новые уникальные элементы микроэлектроники, часто остаются в тени, хотя на базе именно таких элементов сооружаются многие важные системы. Все дело в том, что

система способна наглядно продемонстрировать свои достоинства, а элементы, из которых она состоит, часто удается разглядеть только с помощью микроскопа, и объяснения в этом случае мало помогают.

В наше время техника развивается столь бурными темпами, что обсуждается возможность создания автоматов или роботов, которые могли бы выполнять не только физическую, но и творческую работу. Ставится даже вопрос о том, будут ли ЭВМ иметь совесть, мораль и т. п.

Не вдаваясь в детальное рассмотрение этих проблем, замечу, что существует коренное различие между современными ЭВМ и человеческим мозгом. Оно начинается с самой основы, самого фундамента этих систем, а именно с их элементной базы, следовательно, с принципов построения логических операций, работы памяти, методов распознавания образов. Здесь-то и кроется главное отличие искусственного интеллекта от живого. Интересно, что были попытки использовать некоторые принципы, заложенные в живой материи, для построения ЭВМ. Это направление получило название «бионики». Однако оно пока еще не дало ощутимых практических результатов. Поэтому развитие ЭВМ идет своим путем, и на ближайшее будущее эта тенденция сохранится. ЭВМ на твердотельных электронных элементах и в дальнейшем не смогут охватить все стороны деятельности мозга, хотя будут хорошо имитировать многие его черты. Но ценность ЭВМ заключается прежде всего в том, что они обладают богатой памятью и могут производить сложные расчеты с колоссальной быстротой. Если говорить, например, об управляющих системах, то ЭВМ на основе входящих данных способна принять сложное решение за ничтожный отрезок времени, что совершенно недоступно человеку.

Несмотря на выдающиеся успехи в создании и совершенствовании ЭВМ, их третье поколение уже не удовлетворяет современным требованиям в отношении быстродействия и объема памяти. За счет чего можно увеличить быстродействие? Для этого необходимо, чтобы, наряду с повышением быстродействия самих логических элементов, передача сигнала от одного элемента к другому занимала бы меньше времени. Это время зависит только от расстояния между элементами. Чтобы его сократить, нужно расположить логические элементы очень близко друг к другу или, как говорят, увеличить уровень интеграции логических схем. Но увеличение уровня интеграции влечет за собой повышение выделения тепла элементами при работе, что приводит к преждевременному выходу их из строя. Следовательно, необходимо создавать логические элементы, потребляющие мало энергии. Имеются разные пути решения этой задачи. Один из них — переход ЭВМ на работу при низких температурах. Однако данный путь потребует перестройки элементной базы, что связано с крупными затратами. Другой путь — создание новых логических элементов, которые бы потребляли меньше энергии и, кроме того, выдерживали сравнительно тяжелый рабочий режим. На такой основе можно будет сооружать мощные интегральные схемы, надежно функционирующие при обычных температурах. Надо подчеркнуть, что чем мощнее ЭВМ, тем более надежными должны быть ее элементы.

Память, как уже говорилось, является существенной частью ЭВМ и составляет 60—80% стоимости всей машины. Память должна быть быстродействующей и обладать большой емкостью. В одном устройстве этого пока достигнуть не удалось. Поэтому создана иерархия запоминающих устройств, начиная от сверхбыстродействующих малой емкости и кончая медленными большой емкости. В настоящее время память базируется главным образом на магнитных свойствах твердых тел, только для быстродействующих устройств используются полупроводниковые интегральные схемы. Наличие иерархии в запоминающих устройствах усложняет ЭВМ.

Над задачей создания быстродействующей памяти работает огромное число физиков во всем мире. Новые системы памяти должны быть малогабаритными и иметь невысокую стоимость при массовом изготовлении. Остановлюсь только на трех типах памяти, которые мне кажутся перспективными: оптической — с использованием голографии, магнитной — на цилиндрических магнитных доменах, полупроводниковой.

В создании голографических запоминающих устройств одна нерешенная проблема — среда, в которой ведется запись и считывание голограмм. Среда должна допускать многократную перезапись, быть надежной, потреблять мало энергии и т. д. Если бы мы имели среду с нужными характеристиками, голографические запоминающие устройства нашли бы самое широкое применение в ЭВМ. В этих целях изучаются различные фотохромные, фотопластичные и термопластичные материалы, магнитные пленки и сегнетоэлектрики. Но пока еще ни один из исследованных материалов не удовлетворяет выдвинутые требования.

Настоящий переворот в электронной технике могут произвести цилиндрические магнитные домены. Они требуют на один бит информации рекордно малой энергии — 10^{-13} дж. Память на магнитных доменах можно использовать, например, в телефонных аппаратах, в вычислительных минимашинах, в устройствах ассоциативной памяти и аналоговых запоминающих устройствах. Благодаря большой стойкости к радиации они найдут широкое применение в электронной аппаратуре космических кораблей.

Продолжается интенсивная разработка полупроводниковых запоминающих устройств различных типов. Среди них очень перспективна память с зарядовой связью. Исследования в этом направлении, начавшиеся сравнительно недавно, окажут влияние на развитие не только вычислительной техники, но и радиоэлектроники в целом. В таких устройствах носителями информации служат небольшие по радиусу области объемного заряда, которые передвигаются под действием электрического поля.

Кроме названных направлений отметим возможность создания памяти ЭВМ на основе сравнительно недавно открытого фотоферромагнитного эффекта и так называемого эффекта Джозефсона.

Нет оснований сомневаться, что в ближайшем будущем появятся машины, перерабатывающие большие массивы информации, которая должна поступать в ЭВМ по линиям связи с высокой пропускной способностью. Для этого необходимо от современной системы кабельной связи перейти к наиболее перспективным оптическим линиям связи. Уже существуют световоды с малыми потерями — на расстоянии 1 км пути интенсивность распространяющегося света уменьшается всего лишь в два раза. Эти световоды представляют собой стеклянные нити толщиной около 0,1 мм, — для них не нужен дорогой и дефицитный цветной металл. Кроме того, оптические линии связи устойчивы к электрическим помехам. В качестве излучателей здесь могут быть с успехом использованы недавно созданные полупроводниковые гетеролазеры. Здесь уместно отметить, что созданные впервые советскими учеными электронные приборы на гетеропереходах играют большую роль в электронной технике. Кроме излучателей, нужны еще и другие устройства: фотоприемники, ретрансляторы, преобразователи, коммутаторы и т. п. Сейчас на базе интегральной оптики разрабатываются различные высоконадежные приборы для оптических линий связи с тем, чтобы все элементы этих линий работали безотказно в течение многих лет. Когда лазерная связь станет массовой, каждый сможет иметь у себя дома небольшой вычислительный комплекс, который будет выполнять функцию видеотелефона и телевизора, а также позволит соединяться с мощной ЭВМ для получения нужной информации. Развитие исследований в области твердого тела произвело переворот в радио-

электронной промышленности, где сейчас совершается переход от вакуумных электронных приборов к твердотельным. Например, успешно ведутся работы по созданию твердотельных экранов для телевидения и видеотелефонии с целью уменьшения веса и габаритов этих устройств. Твердотельные приборы в настоящее время играют большую роль в силовой полупроводниковой преобразовательной технике. Уже созданы устройства для линии электропередачи на 1,5 млн. в на постоянном токе. Это имеет первостепенное значение для передачи электроэнергии на большие расстояния.

Развитие квантовой электроники также во многом зависит от уровня работ по физике твердого тела. Так, квантовые усилители радиодиапазона, в которых роль активных элементов выполняют кристаллы рубина, обладают рекордной чувствительностью. Эти усилители широко применяются для связи с космическими кораблями.

Мощные лазеры на неодимовом стекле используются для исследований в области термоядерного синтеза. С помощью именно таких лазеров в ближайшем будущем предполагается осуществить управляемую термоядерную реакцию. Это перспективное направление в работах по проблеме управляемого термоядерного синтеза могло возникнуть только благодаря огромным успехам в разработке твердотельных лазеров с наносекундной и пикосекундной длительностью импульсов. Однако не следует думать, что если удастся доказать возможность получения термоядерной энергии с помощью лазеров, можно будет сразу построить энергетическую установку.

Существующие лазеры пока не обладают нужными характеристиками. Здесь нужны новые идеи. Промышленная лазерная установка должна дать около 100 млн. импульсов без выхода из строя, и компоненты ее не только должны выдержать этот режим работы, но, что не менее важно, сохранить свои высокие оптические качества. Коэффициент полезного действия лазера должен быть более 10%, и лазерный импульс должен допускать точное управление формой импульса во времени.

Сейчас результаты машинных экспериментов, т. е. сложных расчетов на ЭВМ, породили значительный оптимизм в отношении возможности применения лазеров для управляемого термоядерного синтеза. Этот оптимизм связан с тем, что лазерное излучение предполагают использовать не просто для нагрева плазмы, как мыслилось вначале, а осуществить двухступенчатый процесс. В начале дейтеротритиевая мишень в форме небольшого шарика будет сильно сжиматься под действием реактивного давления, возникающего в результате испарения вещества с поверхности этого шарика при всестороннем лазерном облучении, в конце процесса произойдет быстрый нагрев мишени до 100 млн. градусов, что обеспечит условия для зажигания термоядерной реакции. Весь процесс займет всего лишь одну миллиардную долю секунды. В качестве мишени предполагается использовать полые многослойные шарики, с помощью которых можно, в принципе, получить высокие коэффициенты усиления (отношение выделений термоядерной реакции к поглощенной мишенью лазерного излучения). Однако неустойчивость не дает возможность получить высокий коэффициент усиления. Я остановился на этом процессе также для того, чтобы показать, как с помощью лазерного обжатия, в принципе, можно получать вещество очень большой плотности (в данном случае, предположительно 1 кг/см^3). Это открывает перед физикой твердого тела новые возможности, которые значительно расширятся, если мы сумеем получать еще большие плотности. Здесь поле деятельности теоретически неограничено, — ведь вещество нейтронных звезд имеет плотность, равную сотням миллионов тонн в одном кубическом сантиметре.

Трудно сказать, смогут ли физики когда-либо осуществить такое уплотнение вещества в лабораторных условиях. Сейчас плотность веществ

повышают путем высоких давлений. Расчет показывает, что водород, который является твердым только при ~~сверх~~низких температурах с плотностью около $0,1 \text{ г/см}^3$, под давлением в несколько миллионов атмосфер перейдет в металлический твердый водород с плотностью 10 г/см^3 и, возможно, будет обладать сверхпроводимостью. Неясно только, сохранит ли он устойчивость при обычных условиях. Эксперименты по получению металлического водорода уже проводятся, и получены первые результаты.

Давления более низкие, чем упомянутые, тоже позволяют изменять характеристики твердого тела. Например, всестороннее сжатие при давлении свыше 10 тыс. атмосфер существенно повышает пластичность веществ, что представляет не только теоретический, но и большой практический интерес. Дело в том, что многие материалы из-за хрупкости не годятся для применения в современной технике. Отсюда идея создания новой прогрессивной технологии с использованием больших давлений для получения материалов, обладающих улучшенными свойствами. Эта проблема была решена благодаря творческому содружеству физиков, технологов и конструкторов. Новая технология, получившая название гидроэкструзии, не только позволяет придавать материалам нужную форму, но, изменяя их внутреннюю структуру, существенно повышает их прочность, ударную вязкость, пластичность, коррозионную стойкость, магнитные свойства и др. Специалисты в области физики твердого тела много внимания уделяют синтезу новых кристаллов и соединений с самыми различными характеристиками. Современная техника не может обойтись без сверхтвердых материалов. В их создании достигнут большой прогресс. Крупные поликристаллические алмазы и кубический нитрид бора выпускаются нашей промышленностью и используются в самых разнообразных инструментах. Синтез этих материалов идет под высоким давлением. Сейчас давление начинают применять для получения многих других кристаллов и соединений с улучшенными свойствами. Так, синтез при давлениях в сотни атмосфер резко повышает качество ряда полупроводников, причем значительно улучшается производительность самого процесса.

Качество материала зависит не только от чистоты исходных веществ, но и от его однородности. Особенно трудно выполнить указанные условия в случае синтеза высокотемпературных материалов, в частности, из-за того, что при расплаве в тигле они загрязняются материалом самого тигля. Совсем недавно эти трудности были преодолены благодаря разработанному советскими физиками крайне перспективному методу плавления в холодном контейнере. Этот метод в сочетании с большими давлениями позволяет создать новый широкий класс материалов для самых передовых отраслей промышленности. Производство ряда таких материалов уже осваивается. Этот короткий и неполный обзор, в котором не рассматривались многие важные разделы физики твердого тела, ставил своей главной целью показать не только разнообразие, но и важность фундаментальных исследований в данной области. Имеется в виду открытие не новых законов, а новых свойств и явлений на базе квантовой теории твердого тела. Для этого требуются, как правило, сверхчистые материалы и тонкая оригинальная технология, разработка которой часто может занимать многие годы. Однако без таких исследований невозможно дальнейшее развитие физики твердого тела. Открытия же новых законов, углубления понятия о пространстве и времени следует ожидать от физики элементарных частиц и астрофизических исследований. Но в основе прогресса этих областей науки также лежат достижения физики твердого тела.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
АН СССР