

ПРИРОДА

№ 8, 2002 г.

Ю. И. Головин, Р.Б. Моргунов

МАГНИТОРЕЗОНАНСНОЕ РАЗУПРОЧНЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

© “Природа”

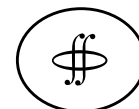
Использование и распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”
(грант РФФИ 00-07-90172)

vivovoco.nns.ru
vivovoco.rsl.ru
www.ibmh.msk.su/vivovoco

Магниторезонансное разупрочнение кристаллов



Ю.И.Головин, Р.Б.Моргунов

Проблемы прочности и пластичности твердых тел занимают человечество на протяжении тысячелетий. За прошедшее время на смену интуитивным представлениям об этих свойствах пришли глубокие физические знания, раскрывающие их природу на атомарном или даже электронном уровне рассмотрения. Эволюцию знаний в этой области можно представить в виде схемы (см. таблицу), построенной по принципу углубления в микромир и понимания микроскопических явлений, формирующих физико-механические свойства.

Вездесущие дислокации

В прошлом веке одним из наиболее значимых и важных шагов развития физики пластичности стало обнаружение дислокаций — линейных дефектов, которые можно моделировать путем удаления одной кристаллографической полуплоскости и «склеивания» разрезанной части кристалла (рис.1). Наибольшие искажения, создаваемые таким дефектом в кристаллической решетке, имеются в узкой (~1 нм) области вблизи края сохранившейся атомной полуплоскости (экстраплоскости). Эта область из-за искажения электронных оболочек атомов и высоких механических напряжений существенно отличается от бездефектной части кристалла по физическим и химическим свойствам и называется ядром дислокации. Перемещение дислокации от одной поверхности до другой вызывает необратимое изменение относительного расположения верхней и нижней половинок кристалла (их сдвиг на расстояние, близкое к параметру решетки).

© Ю.И.Головин, Р.Б.Моргунов



Юрий Иванович Головин, доктор физико-математических наук, профессор, директор Института физики, информатики и математики при Тамбовском государственном университете им.Г.Р.Державина. Заслуженный деятель науки России. Область научных интересов — электромагнитные явления и процессы самоорганизации в физике пластической деформации.



Роман Борисович Моргунов, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института физики твердого тела РАН (Черноголовка). Исследует электронные свойства дефектов и спин-зависимые процессы в твердых телах.

ких напряжений существенно отличается от бездефектной части кристалла по физическим и химическим свойствам и называется ядром дислокации. Перемещение дислокации от одной поверхности до другой вызывает необратимое изменение относительного расположения верхней и нижней половинок кристалла (их сдвиг на расстояние, близкое к параметру решетки).

Поскольку в кристалле дислокаций обычно бывает очень много (~ 10^6 — 10^{11} дислокационных петель в 1 см^3), их перемещение приводит к макроскопическим (видимым невооруженным глазом) деформациям. Следовательно, изменяя подвижность этих дефектов, можно управлять пластической деформацией кристаллов.

Многие важные особенности

Таблица

Ретроспектива знаний о природе пластической деформации

Макроскопический уровень изучения пластичности — XIX век

Сравнение твердости минералов методом «кто кого» (шкала Мооса), склерометрические испытания, создание испытательных машин для растяжения и сжатия, получение и качественный анализ кривых деформирования.

**Развитие мезоскопического подхода к исследованию пластичности — первая половина XX века**

Исследование скачкообразного деформирования, обнаружение «волн» пластичности, развитие представлений о самоорганизации пластического течения

**Атомарные представления о пластической деформации — вторая половина XX века**

Экспериментальные подтверждения существования дислокаций — элементарных носителей пластической деформации в кристаллах. Применение термоактивационного анализа к исследованию пластичности. Развитие атомарных представлений о механизмах движения дислокаций.

**Электронные и спиновые процессы в пластичности — последняя четверть XX века**

Радиационное упрочнение и фотопластический эффект, рекомбинация электронов на оборванных связях в дислокационном ядре, магнитопластичес-

пластической деформации удается анализировать на атомарном уровне, т.е. без привлечения представлений о роли электронных оболочек атомов. Однако физика пластичности продолжает свое проникновение в микромир — сейчас уже исследуется роль внутренних степеней свободы электронов и атомных ядер в формировании пластических свойств [1]. Дислокация, изображенная на рис.1, не более

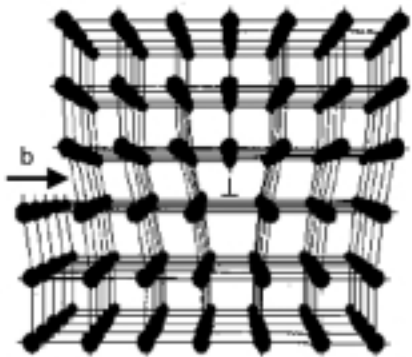


Рис.1. Кристаллическая решетка, содержащая краевую дислокацию (\perp — ядро дислокации, \mathbf{b} — вектор Бюргерса, характеризующий искажение решетки

чем идеализация, а реальное атомарное строение ядра дислокации значительно сложнее. Достоверно установлено, что край экстраплоскости «изрезан» ступеньками и перегибами. Такие особенности лишают дислокацию однородности и создают на ней локальные участки, в которых энергетически выгодно образование парамагнитных центров — локализованных электронов (или дырок) с неспаренным спином. Это может происходить как за счет захвата парамагнитных примесных атомов на дислокацию, так и в результате искажения зонной структуры в ядре дислокации. Широко известны случаи, когда дислокации оказывались ферромагнитными областями в парамагнитном кристалле, проводящими объектами в кристалле с высоким электрическим сопротивлением, химически активными образованиями в твердых телах, не вступающих в реакции, и т.п. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев магнитные и другие свойства ядер дислокаций отличаются от свойств бездефектных областей решетки.

Спин и пластичность: ошибка в прогнозах

Одна из фундаментальных характеристик микрочастиц (в том числе и тех неспаренных электронов, которые присутствуют в ядре дислокации) — собственный вращательный момент, или спин. Проявляет себя он главным образом через взаимодействие с магнитным полем. Отсчет систематическим исследованиям спиновых степеней свободы дефектов в физике пластичности, по-видимому, нужно начинать с открытия магнитоластических эффектов в ферромагнетиках. Коллективное поведение больших совокупностей упорядоченных спинов в ферромагнетиках, как известно, приводит к сильному взаимодействию этих твердых тел с внешним магнитным полем. Так, в магнитном поле в результате переориентации спинов происходит движение доменных стенок, упругое взаимодействие которых с дислокациями порождает разнообразные эффекты в пластичности — упрочнение или разупрочнение кристаллов. Физическая природа подобного влияния на пластичность магнитоупорядоченных твердых тел более или менее понятна.

Ферромагнетики, хотя и составляют заметную часть окружающих нас твердых тел, все же остаются в меньшинстве. Подавляющее большинство материалов (ионные кристаллы, в том числе обычная соль, сахар, дерево, вода и т.п.) диамагнитны, т.е. в отсутствие дефектов в них нет и неспаренных спинов. Единственный их отклик на приложение внешнего магнитного поля — прецессия электронов заполненных оболочек атомов вокруг направления поля. Это приводит к очень небольшому (порядка $10^{-3}\%$) уменьшению результирующего поля в образце. Правда, в реальных твердых телах всегда есть примеси, каждый атом которых обладает неспаренным магнитным моментом. Даже малого количества таких примесных атомов бывает достаточно, чтобы превратить диамагнетик в парамагнетик. Парамагнетики — это класс веществ, в ко-

торых неспаренные спины хотя и присутствуют (например, их несколько в одной элементарной ячейке медного купороса безо всяких дефектов), но разупорядочены по направлениям при комнатной температуре из-за термических флуктуаций. В итоге намагниченность во внешнем поле (а следовательно, величины сил, действующих со стороны магнитного поля на дефекты) на много порядков меньше, чем у ферромагнетиков.

Возможно ли влияние магнитного поля на пластичность диа- и парамагнетиков? В принципе, пользуясь соображениями *равновесной термодинамики*, можно оценить, какое поле для этого требуется. Для значительной переориентации спинов в решетке парамагнетика или в примесных парамагнитных дефектах диамагнетика нужно, чтобы энергия их взаимодействия с магнитным полем превышала среднюю энергию термических флуктуаций. Другими словами, в условиях, когда спины частиц не связаны между собой обменным взаимодействием, необходимо, чтобы энергия зеемановского расщепления (разница в энергиях частицы при противоположных направлениях ее спина) превышала или хотя бы была сопоставима с kT (k — постоянная Больцмана, T — температура). Оценка дает, что при комнатной температуре эти условия требуют гигантских полей с индукцией $B \sim 100\text{--}1000$ Тл, а в лабораторных полях $1\text{--}10$ Тл — понижения температуры до $\sim 1\text{--}10$ К. Сопоставив упомянутые энергии с типичными энергетическими барьерами, которые приходится преодолевать дислокациям при движении, обнаружим еще более катастрофическую нехватку энергии для магнитного инициирования пластичности при температурах, близких к комнатной (рис.2). Поэтому настоящее удивление и даже недоверие специалистов вызвал магнитопластический эффект, обнаруженный первоначально в ионных кристаллах при комнатной температуре в постоянном поле с $B = 0.3$ Тл [2]. На рис.3, позаимствованном нами из работы [3], представлена фотография по-

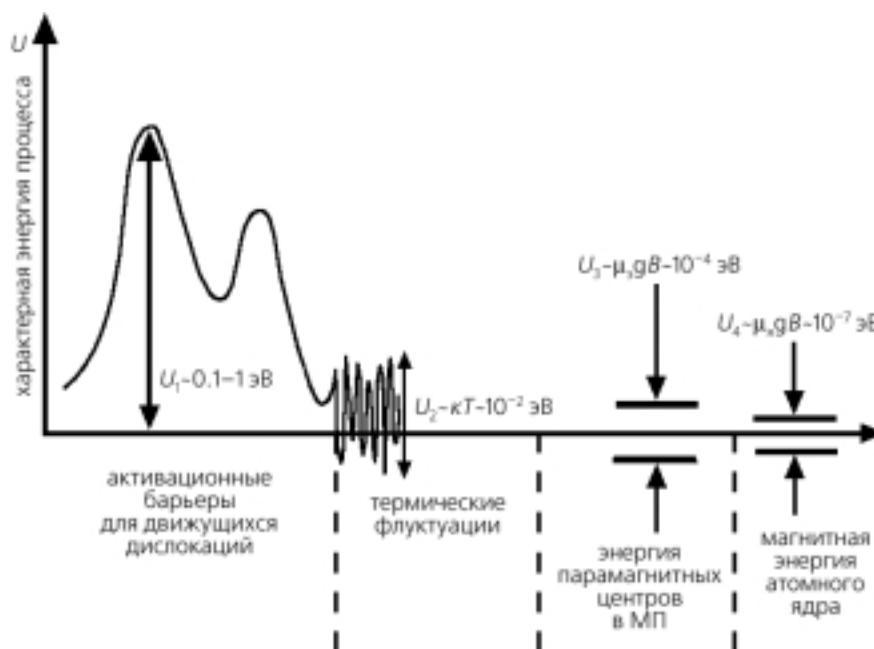


Рис.2. Типичные энергии: потенциальных барьеров при движении дислокаций (U_1), термических флуктуаций при комнатной температуре (U_2) и взаимодействия спинов электронов (U_3) и ядер (U_4) с магнитным полем индукции ~ 1 Тл.

верхности кристалла NaCl с ямочками, выявленными химическим травлением. Эти ямки соответствуют выходу дислокаций на поверхность кристалла (подобная точка на рис. 1,а отмечена значком \perp).

Разумеется, каждая такая ямка огромна по сравнению с диаметром ядра дислокации, а возникает она вследствие аномально высокой растворимости материала вблизи ядра. Небольшой первоначальный зародыш растворения стимулирует искривление поверхности и дальнейший рост ямки. Это делает возможным обнаружение таких микроскопических объектов, как дислокации, с помощью обычного оптического микроскопа.

Смещение дислокаций в магнитном поле, показанное на рисунке стрелкой, эквивалентно дополнительной механической нагрузке кристалла $\sim 0.1\text{--}0.3$ МПа. Такие механические напряжения не могли возникнуть в ионном кристалле под действием магнитного поля. Кооперативных спиновых эффектов в ионных (диамагнитных!) кристаллах быть тоже не могло. Это было

проверено спектральным анализом, который продемонстрировал отсутствие примесей, способных агрегироваться в ферромагнитные комплексы. Упомянутые критерии равновесной термодинамики, будучи примененными для оценки влияния поля на состояние отдельных дефектов (примесных атомов, оборванных связей на дислокациях и пр.), показывают, что доля пара-

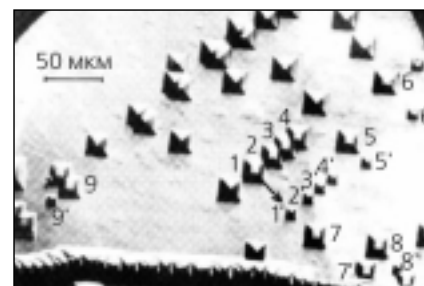


Рис.3. Смещение дислокаций из исходных позиций (плоскостные ямки) в конечные (острые пирамидки) в результате трехминутной экспозиции кристаллов в магнитном поле с индукцией 0.5 Тл при комнатной температуре.

магнитных центров, изменивших свое состояние в таком поле в равновесных условиях, не превышает 10^{-3} . Следовало бы ожидать, что такого же порядка величины будут и изменения макроскопических свойств кристаллов, в том числе и характеристик пластичности. Это находится в явном противоречии с данными рис.3, на котором пробеги дислокаций в несколько раз превышают аналогичные значения в контрольных образцах.

Между тем подобные, парадоксальные на первый взгляд, эффекты были обнаружены практически во всех типах ионных кристаллов группы A_nB_{mV} , в полупроводниковых соединениях A_nB_{mV} и $A_{III}B_{mV}$, в Si, Se, полимерах, металлах и полуметаллах (см. обзор [4]). Набор экспериментальных данных, полученных более чем десятью независимыми коллективами в России и за рубежом, заставил исследователей отбросить скепсис и серьезно заняться выяснением причин, по которым равновесная термодинамика не дает адекватных предсказаний, и физической природой аномально высокой чувствительности пластических свойств диамагнетиков к слабому магнитному полю.

Как объяснить невероятное?

Первый прорыв в понимании упомянутых явлений удалось сделать в 1991 г. профессорам В.И.Альшицу и М.И.Молоцкому. Предложенный ими подход был перенесен из спиновой химии, в которой исследуют влияние магнитного поля на протекание химических реакций с участием исходно диамагнитных веществ, см., например, обзор [5]. Главная идея заключалась в отказе от использования равновесной термодинамики при подсчете энергии термических флуктуаций. Суть в том, что использованная нами оценка этой энергии величиной kT справедлива в среднем для кристалла, который исследуется в течение интервала времени, более длительного по сравнению с временами жизни парамагнитных частиц и их возбуж-

денных промежуточных состояний. Если развитие пластической деформации протекает через столь короткие спин-зависимые стадии, что длительность их оказывается меньше среднего времени спиновой релаксации, то термические флуктуации «не успевают» смешивать различные спиновые состояния дефектов. При этом, как и в спиновой химии [5], исходные реагенты и конечные продукты могут быть диамагнитны (в макроскопическом смысле), а их магнито-чувствительные парамагнитные состояния возникают лишь на короткое время (т.е. являются промежуточными). В этой ситуации, например, в паре взаимодействующих дефектов, обладающих спинами, наличие магнитного поля имеет решающее значение для взаимной ориентации спинов и, как следствие, для вероятности образования химической (ковалентной) связи между дефектами. Действительно, из-за строгих ограничений, накладываемых законом сохранения спинов в элементарном акте взаимодействия частиц, в любой химической реакции при отсутствии магнитного поля могут образовываться только те продукты, суммарный спин которых равен сумме спинов исходных частиц. Поле может менять ориентацию спинов и тем самым открывать или закрывать тот или иной канал для химической реакции, не сообщая спинам больших энергий (сопоставимых, например, с потенциальными барьерами реакции). Образно говоря, оно играет роль стрелочника, который небольшими усилиями способен изменять траекторию движения многотонного поезда. Какое отношение все это может иметь к пластической деформации?

Темп пластической деформации кристаллов под действием механической нагрузки во многих случаях определяется подвижностью дислокаций, смещение которых на один параметр решетки служит своего рода квантом пластической деформации. Движение дислокации (а следовательно, и развитие пластической деформации) может сдерживаться либо

потенциальным рельефом, который образуется благодаря межатомному взаимодействию периодически расположенных атомов (рельефом Пайерлса), либо встречающимися на пути дислокации точечными дефектами, создающими упругое искажение кристаллической решетки и тормозящими ее скольжение. В обоих случаях преодоление препятствий дислокацией может сопровождаться образованием и разрывом ковалентных связей и, следовательно, изменением спинового состояния дефектов. Например, в монокристаллах Si и Ge смещение дислокаций в соседнюю долину Пайерлса может произойти только в том случае, если будут разорваны уже имеющиеся ковалентные связи в ядре дислокации и установятся новые. Процесс разрыва и установления ковалентной связи — реакция спин-зависимая. Обычно в системе двух парамагнитных частиц устойчивая ковалентная связь образуется при антипараллельной ориентации их спинов — за счет обменного взаимодействия, в данном случае обеспечивающего притяжение. При параллельной ориентации этому препятствует то же обменное взаимодействие, но приводящее уже к отталкиванию. Следовательно, научившись управлять ориентацией спинов в магнитном поле, можно таким способом воздействовать и на пластичность. Отметим, что спин-зависимые явления способны влиять на пластичность и в тех кристаллах, в которых межатомная связь в бездефектных областях не ковалентная и практически не зависит от спинов. Так, в ионных кристаллах NaCl, LiF, KCl и др. рельеф Пайерлса очень «мелкий» и смещение дислокаций сдерживается их взаимодействием с точечными дефектами.

Какова природа этого взаимодействия? Долгое время считалось, что оно возникает в результате упругих искажений решетки вблизи дефектов. Однако можно представить, что в окрестности ядра дислокации, там, где электронные оболочки атомов сильно искажены, существуют неспаренные

спины, локализованные на перегибах или ступеньках. Образование ковалентной связи между этими участками дислокаций и парамагнитными точечными дефектами, например примесными атомами, — дополнительный к упругому взаимодействию фактор торможения дислокаций. Можно сказать, что пластическая деформация сопровождается многократными актами образования и разрыва ковалентной связи между дислокациями и точечными стопорами, т.е. своего рода многократно повторяющимися химическими реакциями между дефектами в микрореакторах. Это приводит к удивительному выводу о том, что, регистрируя изменение размеров деформируемого образца во времени, мы получаем возможность следить за кинетикой внутрикристаллической химической реакции между дефектами. (По-видимому, до сих пор еще никто не пробовал измерять скорость химической реакции линейкой!)

За доказательством — к опыту

Опишем эксперименты, подтверждающие эту точку зрения для ионных кристаллов. Поскольку речь пойдет об электронном парамагнитном резонансе (ЭПР), сначала кратко напомним основные сведения о классическом эксперименте по обнаружению и исследованию ЭПР (подробнее см. [6]). Будем обсуждать поведение парамагнитной частицы (например, дефекта) со спином $1/2$ в скрещенных постоянном и сверхвысокочастотном (СВЧ) магнитных полях. Как известно, проекция спина такой частицы на направление вектора индукции постоянного поля \mathbf{B}_0 может принимать всего два дискретных значения: $+1/2$ и $-1/2$. Частицы, характеризующиеся этими проекциями спина, имеют и разную энергию в соответствии с тем, что направление магнитного момента (которое для электрона противоположно направлению спина) вдоль \mathbf{B}_0 энергетически выгоднее. По представлениям классической физики, СВЧ-поле с индукцией \mathbf{B}_1 «стремится опроки-

нуть» траекторию, по которой прецессирует спин в постоянном поле (рис.4). Наиболее эффективное «опрокидывание» возникает только при взаимно перпендикулярной ориентации векторов \mathbf{B}_0 и \mathbf{B}_1 и совпадении энергии кванта СВЧ-поля $h\nu$ (h — постоянная Планка, ν —

частота СВЧ-поля) с разностью энергий μB_0 (μ — магнитный момент частицы) между уровнями, соответствующими проекциям спина $+1/2$ и $-1/2$ на направление \mathbf{B}_0 . Это явление и называют электронным парамагнитным резонансом, а равенство $\mu B_0 = h\nu$ — условием тако-

го резонанса. В термодинамически равновесной системе (с большей заселенностью нижнего уровня) энергия СВЧ-поля будет поглощаться только при определенном значении B_0 , зависящем от величины μ (или в результате расщепле-

ния уровней под действием внутрикристаллических полей — при нескольких дискретных значениях). Чтобы зафиксировать факт возбуждения ЭПР, со времен открытия эффекта Е.К.Завойским в 1944 г. регистрируют поглощение СВЧ-квантов парамагнитными частицами при их переходе между состояниями с различной проекцией спина. Об этом поглощении судят либо по уменьшению амплитуды электромагнитной волны, проходящей через образец, либо по изменению отраженного сигнала (рис.4). В такой постановке опыта ЭПР используется как средство пассивного контроля за микроскопическим состоянием образца и процессами, происходящими в электронной подсистеме, т.е. предполагается, что сами изучаемые процессы протекают так же, как если бы парамагнитный резонанс не возбуждался.

Создавая условия для возникновения резонанса, а именно по-

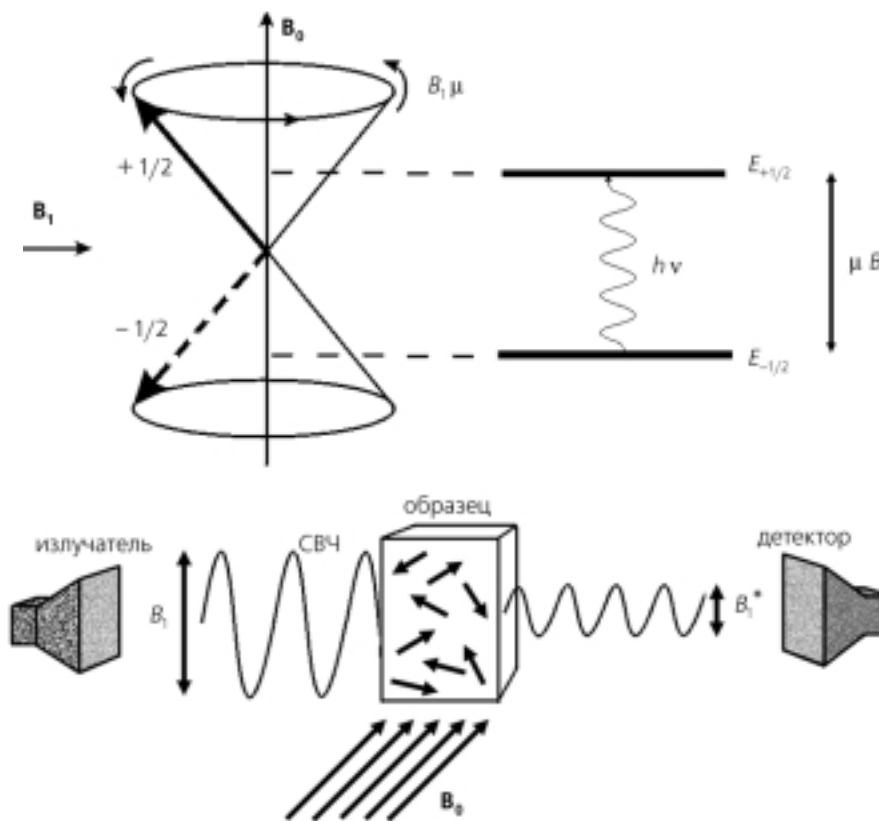


Рис.4. Электронный парамагнитный резонанс. а — возможные ориентации спина частицы, прецессирующего в постоянном магнитном поле, и соответствующие им уровни энергии в постоянном поле. Волнистой линией показан переход между уровнями, инициируемый СВЧ-полем; б — схема типичного эксперимента по обнаружению ЭПР в парамагнитном образце.

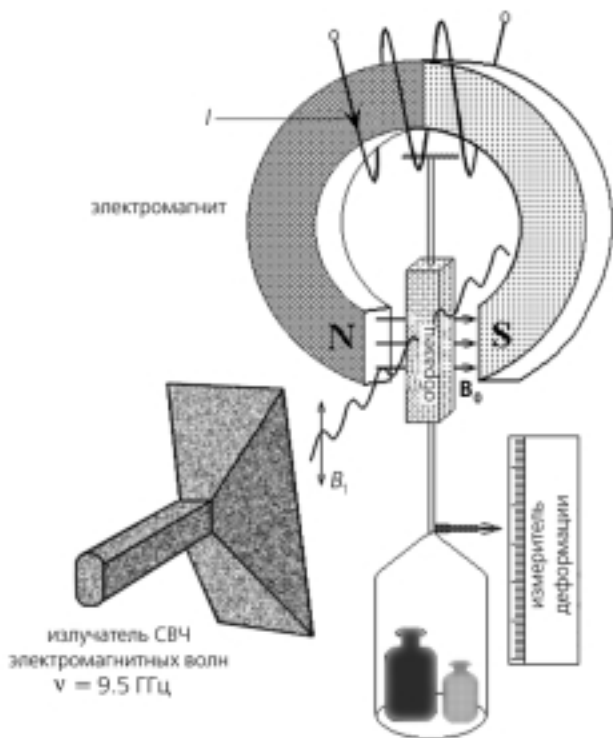


Рис.5. Методика регистрации ЭПР в структурных дефектах на основе изменения пластических свойств кристаллов.

меща образец в постоянное и СВЧ магнитные поля, удовлетворяющие указанным выше критериям, мы изменяем взаимную ориентацию спинов частиц, от которой в силу запрета Паули зависит возможность их взаимодействия. Следовательно, возбуждение ЭПР в системе таких частиц в принципе способно оказаться способом влияния на их поведение и изучаемый процесс в целом. В наших экспериментах при деформировании кристаллов NaCl в постоянном и СВЧ магнитных полях регистрировались скорость изменения их размеров (рис.5) и другие параметры пластической деформации. Например, смещение индивидуальных дислокаций за фиксированное время или микротвердость H (рис.6). Для измерения микротвердости под действием строго определенной нагрузки в кристалл вдавливаются алмазная пирамидка правильной формы (индентор), затем определяется сторона отпечатка a . Значение микротвердости находят по формуле $H = k_i P/a^2$, где k_i — постоянный коэффициент, за-

висящий от формы индентора. В наших опытах H измеряли до помещения кристалла в скрещенные магнитные поля и после этой процедуры. Разница ΔH служила индикатором влияния внешних полей на магниточувствительные реакции между дефектами и пластичность кристаллов.

Было обнаружено [7, 8], что при нескольких дискретных значениях B_0 пластичность ионных кристаллов с парамагнитными дефектами резко возрастает, а сопротивление деформированию (микротвердость) падает (рис.6). Зависимости с экстремумами наблюдались и при исследовании других характеристик пластичности. Найденные значения B_0 соответствовали условию ЭПР для частиц с магнитным моментом, приблизительно равным или кратным магнетону Бора, т.е. магнитному моменту электрона. Так с помощью довольно грубых приспособлений (деформирующей машины, алмазного индентора и т.п.) был измерен магнитный момент мик-

родефектов, которые участвуют в магнитоэластическом эффекте. Вид полученного спектра, детектируемого по изменению пластичности, зависел от типа примеси в кристалле и даже совпадал со спектром ионов Eu^{2+} , полученным в обычном ЭПР-спектрометре при очень сильном легировании кристаллов, когда чувствительности прибора хватало для обнаружения поглощения электромагнитной волны (рис.6). Важно, что максимумы разупрочнения, подобные приведенным на рисунке, наблюдались только в том случае, когда векторы индукции постоянного и СВЧ полей были взаимно перпендикулярны. При параллельной их ориентации разупрочнение кристаллов отсутствовало для всех используемых значений индукции. Это служило критерием возникновения именно парамагнитного резонанса, а не циклотронного или других.

Наш эксперимент позволил решить сразу несколько проблем физики пластичности: 1) доказать существенную роль спиновых состояний дефектов в формировании пластических свойств «немагнитных» кристаллов и показать, что это взаимодействие влияет на пластичность даже в отсутствие внешних магнитных полей; 2) установить, что магнитоэластический эффект в диамагнитных кристаллах вызывается влиянием поля на спин-зависимые химические реакции между дефектами; 3) зарегистрировать и исследовать очень короткоживущие (~ 10 нс) парамагнитные дефекты, о роли которых в пластическом течении ранее ничего не было известно. Появилась возможность анализировать процесс пластической деформации в пределах меньших временных интервалов, чем обычно.

Польза или вред?

Кратко коснемся возможных практических аспектов обнаруженного эффекта магниторезонансного изменения механических свойств. В первую очередь необходимо отметить, что применение

полученных (на примере ионных кристаллов) знаний в области пластичности металлов позволит развить новые методы обработки последних. Уже сегодня электрические и магнитные поля используются в металлургии и при дальнейшей обработке металлов давлением. Однако известно, что в условиях резонанса можно добиться более резких изменений прочностных свойств. Кроме того, изготовление ряда полимеров осуществляется их продавливанием через фильеры, и энергозатраты привязаны к пластическим свойствам веществ. Учитывая гигантские объемы полимерного производства в мире, можно смело сказать, что изменение пластических характеристик полимеров всего на несколько процентов позволит получить огромную экономию энергии. Это побуждает развивать исследования по расширению круга материалов, пластичностью которых можно было бы управлять в условиях магнитного резонанса.

Еще один плюс: магнитное поле, будучи способным инициировать релаксацию внутренних механических напряжений в кристаллах, может быть использовано в ситуациях, когда необходимы нетермические методы управления такими процессами, которые стартуют вблизи неоднородностей, дефектов и т.п. Например, в азидатах тяжелых металлов (солях азотсодержащей азотсодородной кислоты), используемых в качестве инициирующего взрывчатого вещества, цепная реакция начинается именно вблизи дислокаций. Уже получены первые экспериментальные результаты, свидетельствующие о том, что экспозиция этих кристаллов в постоянном магнитном поле приводит к релаксации и стабилизации неравновесной дислокационной структуры и способна сильно затруднить возникновение взрыва. Еще одним примером служат лекарственные вещества, биологическое действие которых также сильно зависит от количества дислокаций в них, а процессы растворения начинаются именно вблизи выхода дислокационных ядер на поверхность кристалла. Совсем недавно

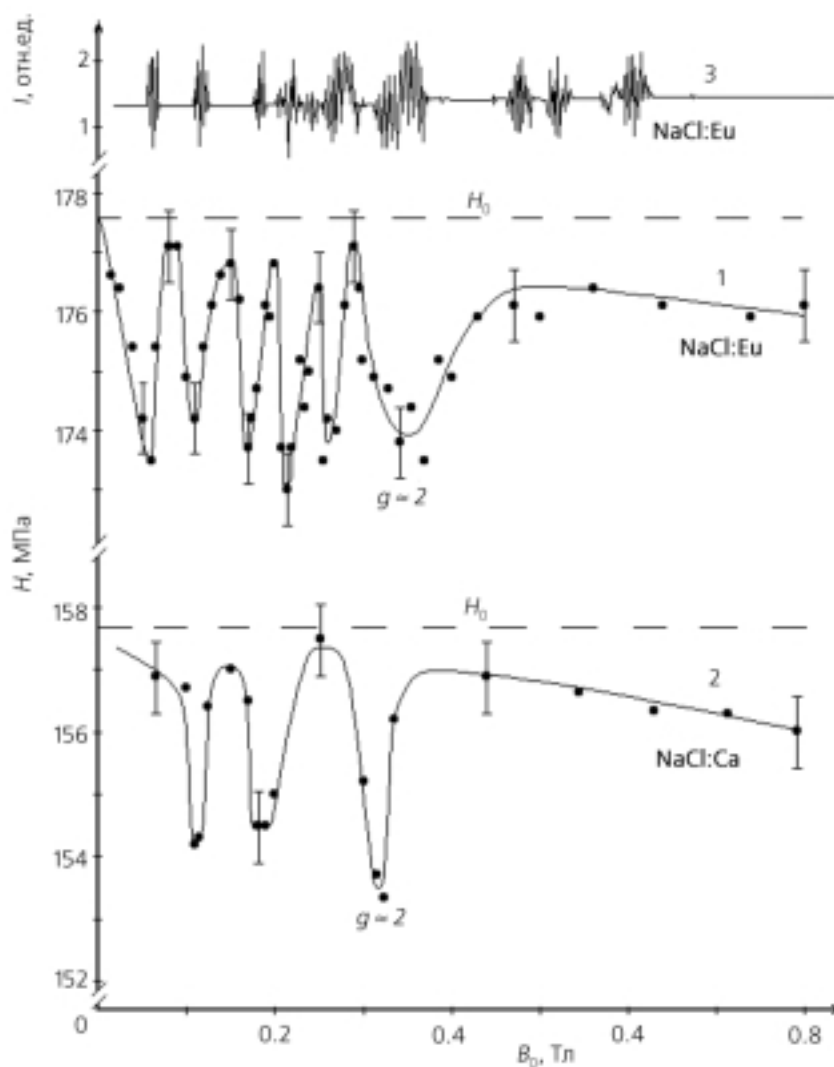


Рис.6. Результаты исследования пластичности кристаллов в условиях ЭПР. Приведена зависимость микротвердости H при комнатной температуре от индукции постоянного магнитного поля B_0 в кристаллах хлорида натрия, легированных европием (1) и кальцием (2). Микротвердость измерена после 15-минутной экспозиции кристаллов в скрещенных постоянном и СВЧ магнитных полях ($\nu = 9.5$ ГГц) (пунктиром показаны соответствующие значения микротвердости H_0 в кристаллах, не подвергавшихся действию магнитных полей). Вверху показана зависимость интенсивности сигнала стандартного ЭПР спектрометра I от B_0 , полученная на закаленных кристаллах NaCl:Eu (3).

новосибирские ученые обнаружили, что под действием магнитного поля происходит перемещение дислокаций в монокристаллах парацетамола. Поскольку большинство лекарственных препаратов легкоплавкие и «не терпят» термической обработки, магнитное поле способно дать эффективный способ воздействия на их лекарственные свойства. Большое значение

имеет наличие дефектов в кристаллах Si и других полупроводниковых кристаллах, используемых в электронной промышленности. Одна из главных проблем здесь — неуправляемое самопроизвольное «старение» кристаллов, приводящее к изменению электрофизических свойств микросхем и обусловленное релаксацией дефектной структуры. Обнаружение магнито-

ФИЗИКА

пластического эффекта в полупроводниках позволяет надеяться, что и в этой области магнитное поле может быть применено для стабилизации свежеприготовленных полупроводниковых структур, как известно, не допускающих нагрева и других «грубых» вмешательств.

Неожиданно выяснилось, что полученные результаты весьма важны для решения актуальной мировой проблемы, связанной с обеднением озонового слоя. В качестве дозиметров ультрафиолетового излучения сегодня широкое применение находят кристаллы NaCl:Eu. Возбуждение люминесценции в них происходит как раз в той области солнечного излучения, которая наиболее чувствительна к толщине озонового слоя. Совсем недавно в ИФТТ РАН (г.Черноголовка) было обнаружено, что магнитное поле, изменяя степень агрегирования примеси европия, влияет не только на пластичность кристаллов, но и на их люминесценцию.

Однако «портрет» магнитоэлектрического эффекта будет неполным, если изображать его только в позитивном свете — к сожалению, все имеет свою оборотную сторону. Зададимся вопросом, какова вероятность случайного возбуждения ЭПР, например, в горных породах или несущих конструкциях различных сооружений (небоскребов, мостов и т.д.)? Для постоянного магнитного поля Земли с индукцией $\sim 10^{-5}$ Тл резонансной является электромагнитная волна с частотой ~ 1 МГц, что соответствует радиодиапазону средних волн, в море которых купается наша цивилизация. Флуктуации самого поля Земли также содержат резонансные частоты в своем спектре. Очевидно, при наличии постоянных или квазистационарных магнитных полей промышленного происхождения с иными индукциями резонансными могут оказаться и волны других диапазонов. Так, по данным ученых-гигиенистов из МГУ магнитное поле, возникающее на платформе при отправлении электропоезда метро, достигает 10^{-4} Тл, а в самом вагоне оно во много раз больше. Еще бо-

льшие значения полей создаются вблизи работающего пылесоса, сварочного трансформатора, электродвигателя и т.д. Эти значения постоянного или низкочастотного полей вполне могут оказаться резонансными для радиоволн ВЧ- и СВЧ-диапазонов, в частности излучаемых сотовыми телефонами и микроволновыми печами. Таким образом, в принципе возможен ЭПР, ведущий к разнообразным биологическим эффектам, тектоническим сдвигам пород или деформированию и разрушению строительных конструкций (часто возведенных, кстати, на силикатной основе, образцы которой обнаруживают сильную чувствительность к магнитному полю). Это должно настоятельно ражывать, и не исключено, что многие факторы, расцениваемые сегодня в гео- и биофизике как случайные, в скором времени смогут получить свое объяснение на основе экспериментов, подобных нашим.

* * *

Подводя итоги, подчеркнем главные общие черты вышеописанных ситуаций, в которых использовалась идея детектирования ЭПР по изменению пластичности. Во-первых, магнитные взаимодействия не влияют силовым образом на сами процессы — они не изменяют траектории движения частиц, потенциальных поверхностей взаимодействия и т.д. Роль магнитных полей заключается в том, что они, подобно стрелочнику, переключают пути релаксации термодинамически неравновесной системы. В результате передачи ничтожной (по сравнению с барьерами реакций) энергии в неравновесной системе могут происходить значительные изменения кинетики реакции, ее типа, а также количества конечных продуктов. Во-вторых, поглощение СВЧ-мощности в парамагнитных частицах становится возможным только при определенном значении частоты СВЧ-поля (для данного значения постоянного магнитного поля). Поэтому можно считать, что мы имеем дело с селективным (частотно-настро-

енным) химическим приемом радиоволн дефектами. Другими словами, некоторые дефекты представляют собой своего рода микроскопические приемники, настройка которых на определенную «радиостанцию» приводит к драматическим последствиям для их дальнейшего поведения и пластичности кристаллов. Регулируя эту «настройку» постоянным магнитным полем, можно по отдельности изучать вклад разных дефектов в механические свойства материалов. В-третьих, частотный спектр измеряемого «механического» отклика на резонанс эквивалентен спектру поглощения парамагнитных дефектов, т.е. их спектру ЭПР. Это поможет преодолеть различные трудности, обусловленные сравнительно низкой чувствительностью стандартных ЭПР-спектрометров, при исследовании объектов с невысокой концентрацией парамагнитных центров.

Описанные в статье эксперименты представляют собой лишь первые, но вполне уверенные шаги в новую область естествознания, находящуюся на стыке спиновой химии и физики пластичности. Полученные результаты показывают, что для дальнейшего ее развития необходимо целенаправленно обеспечивать специфические условия спин-зависимого взаимодействия дефектов в твердых телах. Желаемые ситуации, по-видимому, могут реализоваться в кристаллах с большим количеством неспаренных спинов и при более высоких значениях индукций постоянного и СВЧ магнитных полей. Трудно переоценить практические выгоды, которые даст в перспективе понимание элементарных актов пластичности на уровне спиновых взаимодействий. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 01-02-16094 и 01-02-06307.

Литература

1. *Осипьян Ю.А., Бредихин С.И., Кведер В.В. и др.* Электронные свойства дислокаций в полупроводниках / Под ред. Ю.А.Осипьяна. М., 2000.
2. *Альшиц В.И., Даринская Е.В., Перекалина Т.М., Урусовская А.А.* // ФТТ. 1987. Т.29. №2. С.467—470.
3. *Alshits V.I., Darinskaja E.V., Kazakova O.L. et al.* // J. of Alloys and Compounds. 1994. V.211/212. P.548—553.
4. *Головин Ю.И., Моргунов Р.Б.* // Материаловедение. 2000. №3. С.2—9; №4. С.2—7; №5. С.2—5; №6. С.2—9.
5. *Зельдович Я.Б., Бучаченко А.Л., Франкевич Е.Л.* // Успехи физ. наук. 1988. Т.155. №1. С.3—45.
6. *Блюменфельд Л.А., Тихонов А.Н.* // Сорос. образоват. журн. 1997. №9. С.86—95.
7. *Головин Ю.И., Моргунов Р.Б.* // ЖЭТФ. 1999. Т.115. №2. С.605—621.
8. *Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Иванов В.Е., Дмитриевский А.А.* // ЖЭТФ. 2000. Т.116. №2. С.1080—1093.

В развивающихся странах из-за употребления загрязненной воды погибает много детей, основная причина их смерти — диарея. М.Вежлен (M.Wegelin; Научно-технический институт окружающей среды, Швейцария) предложил использовать для очищения воды... пластиковые бутылки. Процедура проста: воду разливают по бутылкам, одна сторона которых окрашена в черный цвет. Бутылки кладут окрашенной стороной на землю и пять часов выдерживают на солнце. От сильного нагрева и ультрафиолетовых лучей погибает множество патогенных мик-

роорганизмов, включая холерный вибрион. Этим методом получения небольших объемов чистой воды с успехом воспользовались в Боливии, Буркина Фасо, Китае, Колумбии, Индонезии, Таиланде и Того.

Science et Vie. 2001. №1009. P.40 (Франция).

Президент США А.Линкольн славился своим терпеливым характером, однако иногда у него наблюдались приступы раздражительности и вспыльчивости. Американские исследователи объяс-

няют это тем, что в определенные периоды Линкольн, желая избавиться от посещавшей его меланхолии, принимал небольшие синие пилюли. Анализ показал, что содержание в них ртути превышало допустимую дозу в 40 раз. Отравление и приводило к неврологическим расстройствам и, как следствие, — к резким сменам настроения.

Sciences et Avenir. 2001. №654. P.28 (Франция).

Коротко