

МАГНИТОПЛАСТИЧНОСТЬ ДИАМАГНИТНЫХ КРИСТАЛЛОВ В МИКРОВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ

*А. Л. Бучаченко**

*Институт химической физики Российской академии наук им. Н. Н. Семенова
119991, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 18 мая 2006 г.

Сформулированы физические механизмы влияния микроволновых полей на магнитоупругость и микротвердость диамагнитных кристаллов. Они основаны на взаимодействии микроволнового поля, как резонансного, так и нерезонансного, со спиновым нанореактором. В ионных кристаллах нанореактор рождается при переносе электрона в системе «стопор + плененная им дислокация», в ковалентных кристаллах он появляется при встрече дислокаций со свободными валентностями. В первом случае микропластичность увеличивается, во втором случае происходит магнитнорезонансное упрочнение кристалла. Физические следствия механизмов сопоставлены с экспериментальными наблюдениями.

PACS: 61.72.Nh

1. ВВЕДЕНИЕ

Влияние магнитного поля на микромеханику, прочность и пластичность диамагнитных кристаллов — явление необычное, надежно установленное экспериментально, но не принадлежащее к разряду предсказанных. Необычность его очевидна: энергия взаимодействия диамагнитного кристалла и его атомных элементов с магнитным полем пренебрежима, и потому ее вклад в высокоэнергетические процессы перемещения дислокаций, ответственных за пластичность, ничтожен. Ясно, что дело тут не в энергии, а в угловом моменте электрона — его спине, которым управляет магнитное поле.

Как в открытии, так и в экспериментальном обосновании магнитоупругости ведущая роль принадлежит научным школам Института кристаллографии [1–7], Института физики твердого тела [8, 9] и Тамбовского университета [10, 11]. В работах [1–11] была сформулирована и доказана главная идея: движение дислокаций, определяющее механику и пластичность, связано с рождением в деформируемом кристалле парамагнитных электронно-спиновых состояний, спин которых каким-то образом управляет системой «стопор + плененная им дислокация».

В системе «дислокация + стопор» за счет пе-

реноса электрона между партнерами рождается спин-селективный и потому магнитоупругий нанореактор — два неспаренных электрона, один из которых «сидит» на дислокации, другой — на стопоре [12]. Перенос электрона от дислокации к стопору, рождая спиновый нанореактор, «выключает» в нем кулоновское взаимодействие, которое удерживает дислокацию на стопоре. Этот спиновый нанореактор находится в синглетном состоянии, поэтому в нем возможен обратный перенос электрона, который сокращает время жизни спинового нанореактора с выключенным кулоновским потенциалом. Магнитное поле переключает синглетное состояние в триплетное, в котором обратный перенос электрона запрещен по спину. В результате магнитное поле увеличивает время жизни состояния с выключенным кулоновским взаимодействием, освобождая дислокацию и увеличивая ее подвижность.

Существенным элементом работы [12] является идея о том, что спиновый нанореактор рождается в чисто диамагнитном кристалле, без всяких парамагнитных примесных ионов; это обстоятельство значительно расширяет границы магнитоупругости как универсального явления.

Прямые экспериментальные доказательства существования спинового нанореактора получены в работах [13, 14]. В них же было показано, что механика и пластичность диамагнитных кристаллов за-

*E-mail: abuchach@chph.ras.ru

висят не только от статических магнитных полей, но и от микроволновых электромагнитных полей (последние, кстати, действуют совместно с постоянным полем спектрометра ЭПР). Цель настоящей статьи — сформулировать физические механизмы, по которым микроволновое поле управляет спиновым нанореактором, контролируя подвижность дислокаций и пластичность кристаллов.

2. НЕРЕЗОНАНСНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ ПОЛЯ

Время жизни спинового нанореактора в системе «стопор + плененная дислокация» определяется скоростями двух конкурирующих процессов — обратного переноса электрона и диссоциации нанореактора (открепление дислокации); как правило, оно составляет 10^{-9} – 10^{-8} с. Этому временному интервалу соответствуют скорости спиновых процессов в нанореакторе в области 10 – 10^3 МГц, поэтому все электромагнитные поля, осциллирующие с меньшими частотами, воспринимаются нанореактором как поля статические, а их воздействие оказывается таким же, как и влияние постоянного, неосциллирующего магнитного поля. Источником магнитопластичности ионных кристаллов в постоянных полях является увеличение подвижности дислокаций, их ускорение. Возможно, что старение сплавов и их упрочнение (например, бериллиевой бронзы [15]) в магнитном поле также связано с увеличением подвижности дислокаций и ускорением процессов «созревания» с формированием микрофазной структуры.

Влияние низкочастотных электромагнитных полей на пластичность ионных кристаллов почти не исследовано, хотя здесь также следует ожидать появления магнитопластичности (как и в статических полях). Имеется, однако, огромное количество работ, в которых обнаруживается значительное влияние низкочастотных (от десятков до десятков тысяч кГц) электромагнитных полей небольшой мощности на процессы кристаллизации чистых металлов и сплавов [16], на структуру и пластичность металлов [17], на затвердевание бетона и других вязких материалов [18]. Эти работы, как правило, подвергаются критике за отсутствие надежной метрологии, за неопределенность физико-химических условий и, самое главное, за отсутствие какого-либо физически разумного объяснения наблюдаемых эффектов и убедительных механизмов их появления. Результаты этих работ воспроизводимы и достаточно надежны, так что вряд ли их следует игнориро-

вать. Похоже, что их физической основой является влияние магнитного поля на подвижность (ускорение) дислокаций, как и в явлении магнитопластичности ионных кристаллов. И хотя отмеченные выше эффекты электромагнитных низкочастотных полей уже используются в практических технологиях материалов, нужны новые, физически более строгие исследования их происхождения и масштаба.

Отметим еще один необычный аспект влияния низкочастотных электромагнитных полей на движение дислокаций — воздействие на очаг землетрясения. В нем, как в гигантском механохимическом реакторе, запасается огромная механическая энергия, которая при достижении критического порога высвобождается в катастрофическом явлении — землетрясении [19]. Причиной запасаения энергии является дислокационное упрочнение. Воздействуя на очаг землетрясения низкочастотными электромагнитными (даже малоамплитудными) полями, можно стимулировать открепление дислокаций, увеличение их подвижности и хотя бы частичное снятие дислокационного упрочнения, т. е. снижение пороговой мощности катастрофы. Смысл проблемы в том, чтобы через магнитопластичность стимулировать медленную релаксацию механической энергии очага и в пределе предотвратить ее мгновенный, катастрофический сброс. Конечно, это лишь идея, которая следует из фундаментального явления магнитопластичности; она требует самостоятельной физико-механической и физико-технической разработки.

3. РЕЗОНАНСНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ ПОЛЯ: ИОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ

Резонансными будем называть поля, совпадающие по частоте с электронно-спиновыми (зеemanовскими) переходами в спиновом нанореакторе; они прямо действуют на электронный спин, изменяя спиновые состояния нанореактора и управляя магнитопластичностью через кулоновское взаимодействие. Как и в работе [12], физику явления обсудим на примере ионного кристалла NaCl с примесью Ca^{2+} (в следующем разделе мы обсудим атомно-ковалентные кристаллы).

Систему «стопор + плененная дислокация» на атомном уровне представим парой ($\text{Cl}_d^- \text{Ca}^{2+}$), где Cl_d^- обозначает ионный элемент дислокации, взаимодействующий со стопором Ca^{2+} . Схема превращения пары в постоянном магнитном поле представлена на рис. 1. Она включает генерацию спинового нанореактора в синглетном состоянии S и его кон-

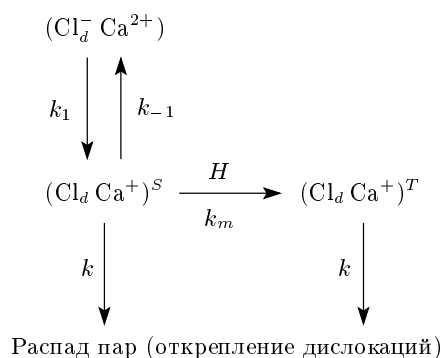


Рис. 1. Схема превращений пары в постоянном магнитном поле (k_1 и k_{-1} — константы скорости соответственно генерации и аннигиляции спинового нанореактора, k_m и k — константы скорости соответственно спиновой конверсии и открепления дислокаций)

версию в триплетное состояние T , стимулированную магнитным полем H .

В синглетной паре $(\text{Cl}_d \text{Ca}^+)^S$, образованной переносом электрона от дислокации к стопору, кулоновское взаимодействие выключено, стопор теперь уже не удерживает дислокацию, и она может освободиться. Но вероятность этого события невелика, так как время жизни синглетного спинового состояния мало, поскольку обратный перенос электрона снова регенерирует исходную систему «стопор + плененная дислокация».

Магнитное поле переводит синглетную пару в триплетную, в которой кулоновское взаимодействие остается выключенным, но обратный перенос электрона запрещен по спину. Это означает, что в магнитном поле увеличивается время жизни нанореактора с выключенным кулоновским потенциалом. В результате увеличиваются вероятность открепления дислокаций и скорость их пробег в кристалле.

Энергетические уровни и спиновые состояния нанореактора показаны на рис. 2а, взаимное положение двух электронных спинов в этих состояниях — на рис. 2б. В магнитном поле триплетное состояние расщепляется на три подсостояния, T_0 , T_+ и T_- , с проекциями электронного спина соответственно 0, +1 и -1 (рис. 2б). Здесь уместно напомнить, что спиновая конверсия $S-T_0$ происходит как расфазирование двух спинов, прецессирующих с зеемановскими частотами $g_1\beta H$ и $g_2\beta H$ (β — магнетон Бора). Скорость расфазирования равна $\Delta g\beta H$, где $\Delta g = g_1 - g_2$ — разность g -факторов (рис. 2в).

В отсутствие микроволнового поля населены только состояния S и T_0 . При феноменологическом

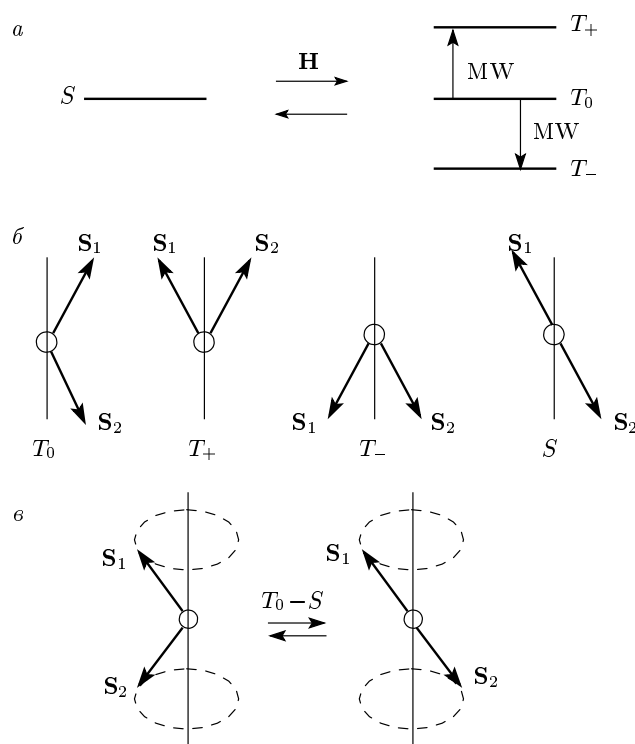


Рис. 2. Энергетические уровни двухспинового нанореактора в синглетном S и триплетных (T_0 , T_{\pm}) состояниях (а), взаимное положение спинов в этих состояниях (б) и схема перехода $S-T_0$ как спинового расфазирования (в); H — магнитное поле; MW — микроволновое поле; жирные стрелки обозначают электронные спины S_1 и S_2 каждого из партнеров нанореактора

обсуждении магнитопластичности мы учитывали только прямые переходы из S в T_0 . На самом деле имеет место и обратная спиновая конверсия из T_0 в S , так что оба состояния оказываются заселенными. Резонансное микроволновое поле переориентирует электронные спины, переводя пару из состояния T_0 в состояния T_+ и T_- (рис. 2а), опустошая частично уровень T_0 , который теперь дополнительно заселяется за счет переходов $S-T_0$. Прямые переходы из состояний T_+ и T_- в состояние S и обратно запрещены полностью. Это означает, что микроволновое поле дополнительно увеличивает время жизни спинового нанореактора в триплетном состоянии; при этом вероятность открепления дислокации растет. Другими словами, микроволновая накачка на зеемановских переходах с частотами $g_1\beta H$ (или $g_2\beta H$) должна резко увеличивать время жизни триплетного нанореактора с выключенным кулоновским взаи-

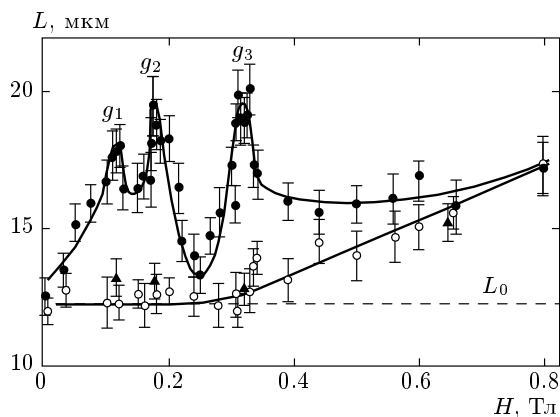


Рис. 3. Увеличение длины пробега дислокаций в резонансных полях при частотах $g_1\beta H$ ($g_1 \approx 6$), $g_2\beta H$ ($g_2 \approx 4$) и $g_3\beta H$ ($g_3 \approx 2$). Светлые точки и нижняя кривая — пробег дислокаций в отсутствие микроволнового поля; L_0 — стартовый пробег в отсутствие постоянного и микроволнового полей

модействием. В результате при этой частоте должны возрасти как пробег дислокаций, так и магнитоупругость.

Экспериментальные исследования [13] влияния резонансных микроволновых полей на пробег дислокаций в кристаллах $\text{NaCl}(\text{Ca}^{2+})$ обнаружили резкое ускорение дислокаций на зеемановских частотах $g\beta H$ при трех значениях g : $g_1 = 5.7 \pm 0.7$; $g_2 = 3.8 \pm 0.3$; $g_3 = 2.1 \pm 0.2$ (рис. 3).

В этих условиях движение дислокаций стимулировалось не механической деформацией кристалла, а магнитным полем (чистая магнитоупругость). Феноменологически наблюдаемые микроволновые эффекты относятся к «магнитной памяти» (см. ниже разд. 5), однако для понимания спиновой динамики нанореактора это обстоятельство несущественно.

Масштаб микроволнового эффекта значителен: увеличение пробега дислокаций в этих резонансных полях достигало 50–70%. В этих же полях происходило уменьшение микротвердости [14]. Таким образом, эффект резонансного микроволнового поля уверенно детектируется как по пробегу дислокаций, так и по микротвердости кристаллов. Заметим, что этот эффект обнаружен также и в скорости деформирования кристалла [13].

Три резонансных частоты $g\beta H$ соответствуют трем типам спиновых нанореакторов. Природа их пока не ясна. Возможно, они различаются локальной структурой и неравновесными кристаллически-

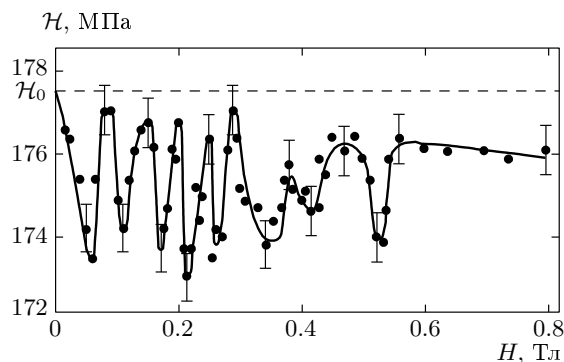


Рис. 4. Микротвердость кристалла $\text{NaCl}(\text{Eu}^{2+})$ как функция постоянного магнитного поля в условиях микроволновой накачки. На кривой отчетливо видны восемь резонансных провалов; H_0 — микротвердость в нулевом поле

ми полями, кластерными образованиями и т. д. (об этом подробнее в разд. 5). Известно лишь, что после длительной термообработки кристалла резонансные переходы с g_1 и g_2 исчезают; остается лишь зеемановский переход с $g_3 = 2.1 \pm 0.2$, соответствующий классическому, чисто спиновому нанореактору. Микроволновая накачка увеличивает в нем пробег дислокаций примерно на 40% [13]. Отметим, что все микроволновые эффекты появляются лишь при условии, что переменное поле \mathbf{H}_1 перпендикулярно постоянному полю \mathbf{H} , и эти эффекты отсутствуют, если \mathbf{H}_1 параллельно \mathbf{H} . Это является надежным свидетельством того, что микроволновое поле действительно управляет спином и спиновой эволюцией нанореактора.

В кристаллах $\text{NaCl}(\text{Eu}^{2+})$ обнаружены восемь резонансных частот, при которых происходит резкое уменьшение микротвердости кристалла (рис. 4). Происхождение их не вполне ясно. Возможно, каждая из частот относится к индивидуальному спиновому нанореактору с разными орбитально-зеемановскими уровнями. Не исключено также, что они возникают из-за того, что ядерный спин $5/2$ европия вызывает сверхтонкое расщепление зеемановских электронных уровней и «умножает» число электронно-спиновых резонансных переходов. Бесспорно лишь одно: микроволновая накачка влияет на спиновую эволюцию нанореактора и через нее контролирует поведение дислокаций и микротвердость. Другие примеры микроволновых эффектов в микротвердости кристаллов при радиационных и фотостимулированных процессах содержатся в обзоре [9].

4. РЕЗОНАНСНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ ПОЛЯ: КОВАЛЕНТНЫЕ КРИСТАЛЛЫ

В ковалентных кристаллах (алмаз, кремний, германий) идеальная, классическая дислокация представляет собой цепочку атомов с оборванными химическими связями. Так, в кремнии это цепочка атомов кремния, каждый из которых несет неспаренный валентный электрон в sp^3 -гибридизации. В реальной дислокации оборванные связи соседних атомов могут замыкаться, давая двойные связи (в химии кремния такое известно), так что дислокация представляется как цепочка атомов, несущих как двойные связи, так и свободные валентности. Образование двойных связей требует перегибридизации и связанной с этим деформации углов и длин связей, что энергетически невыгодно, и потому образование двойных связей Si=Si в дислокациях маловероятно. Этот вывод подтверждается расчетами [20].

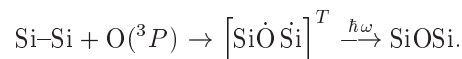
В любом случае дислокация в ковалентных кристаллах обязательно несет один или несколько неспаренных электронов, и при встрече двух дислокаций может создаваться спиновый нанореактор. В простейшем случае двух спинов (по одному на каждой дислокации) в нанореакторе имеются четыре спиновых состояния, S , T_0 , T_+ , T_- , каждое со статистическим весом $1/4$. Можно полагать, что в синглетном состоянии S происходит рекомбинация валентностей и дислокации останавливаются, сцепившись химической связью Si-Si. Рекомбинация в триплетных состояниях T_+ и T_- запрещена по спину полностью, а для рекомбинации в состоянии T_0 требуется спиновая конверсия из состояния T_0 в S . Так как изотропные g -факторы обоих партнеров тождественны, переход из T_0 в S индуцируется электронной релаксацией — продольной с характеристическим временем T_1 и поперечной с временем T_2 . Их совместное действие обеспечивает спиновую конверсию $T_0 \rightarrow S$ в нанореакторе. Последующая рекомбинация в состоянии S останавливает дислокации. (Заметим, что если учесть анизотропию g -фактора, то переход $T_0 \rightarrow S$ может происходить и по обычному механизму с частотой $\Delta g \beta H$, где Δg — разность анизотропных g -факторов партнеров.)

Микроволновое резонансное поле индуцирует переходы из состояний T_+ и T_- в состояние T_0 , которое затем релаксирует в состояние S , где происходит рекомбинация дислокаций. Таким образом, спиновая конверсия в нанореакторе происходит в направлении, обратном тому, которое имеет место в ионных кристаллах. Микроволновое поле должно стимулировать зацепление дислокаций и индуцировать дис-

локационное упрочнение ковалентных кристаллов.

Магнитнорезонансное упрочнение в кремнии наблюдалось экспериментально в работе [21]: замедление пробега дислокаций, индуцированное микроволновым полем, достигало 30–40 % и имело резонансный характер. Еще более яркий результат получен в работе [22]: стартовое напряжение, необходимое для того, чтобы стимулировать движение плененной дислокации, увеличивалось почти на 40 % под действием микроволнового резонансного поля при $g \approx 2.0$. Оба упомянутых эффекта демонстрируют дислокационное упрочнение, стимулированное микроволновым полем.

Вопрос об атомной структуре спин-селективного нанореактора как приемника микроволнового облучения остается открытым. Ни в одной из работ по дислокациям в кремнии он даже не обсуждался (см., например, [23]). Однако в работах [21, 22, 24] убедительно показано, что в монокристаллах кремния, выращенных по методу Чохральского, магнитопластичность и спин-резонансное упрочнение связаны с присутствием кислорода в дислокациях. Кислород в решетке кремния может находиться в форме O^{2-} , O^- или O . Наиболее вероятной является атомарная форма диффундирующего в междоузлиях кислорода $O(^3P)$. Возможный путь образования спин-селективного нанореактора — реакция внедрения триплетного атома кислорода $O(^3P)$ по связи Si-Si в кристалле (длина связи 2.35 Å, энергия связи 1.8 эВ):



В этой реакции спин сохраняется, так что рожденная в реакции пара радикалов $\text{Si}\dot{O}$ и $\dot{\text{S}}\text{i}$ является триплетной (другие химические связи при кремнии опущены; точка обозначает неспаренный электрон). Рекомбинация этой пары стимулируется резонансным микроволновым облучением на зеемановской частоте ω при $g \approx 2.0$. Образование более объемного фрагмента SiOSi закрепляет дислокацию и увеличивает стартовое напряжение сдвига (в согласии с экспериментом [22]).

5. ОБ ЭФФЕКТАХ «МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ»

Эти эффекты обнаруживаются в диамагнитных кристаллах, которые выдерживались в магнитном поле, а затем, уже в отсутствие поля, подвергались механическим испытаниям (на пробег дислокаций, микротвердость, скорость деформации). Эти эффекты разнообразны [2], хотя и не всегда однозначны.

Однако игнорировать их нельзя, они имеют надежные физические причины, которые мы кратко обсудим.

Существование эффектов магнитной памяти связывают с неравновесными метастабильными состояниями дефектов — предшественников спиновых нанореакторов. Выдерживание дефектных кристаллов в магнитном поле сопровождается структурно-химической эволюцией дефектов: «рассасыванием» кластеров, изменением локальных кристаллических полей, снятием механических напряжений, изменением баланса узловых и межузельных дефектов и т. д. При этом магнитное поле никак не влияет на энергетику этих процессов (напомним, что магнитная энергия пренебрежимо мала), но оно оказывает влияние на спиновые состояния нанореакторов, рождающихся на дефектах. Эволюция метастабильных дефектов однозначно проявляется в судьбе рожденных ими спиновых нанореакторов. Роль поля сводится к тому, что оно управляет спиновым состоянием нанореакторов и через спиновые запреты — их реакциями, которые включают или выключают кулоновское взаимодействие, ускоряют или замедляют дислокации. Понимание физики этих процессов открывает путь к осмысленному использованию эффектов магнитной памяти в физике и технике диамагнитных кристаллов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменения в микромеханике диамагнитных кристаллов, стимулированные микроволновыми полями, появляются как результат взаимодействия этих полей с двухспиновыми нанореакторами. В ионных кристаллах нанореактор с выключенным кулоновским взаимодействием рождается за счет электронного переноса в системе «стопор + плененная дислокация». По закону сохранения спина стартовое спиновое состояние нанореактора является синглетным. Микроволновое резонансное поле индуцирует его конверсию из синглетного в долгоживущее триплетное состояние и продлевает жизнь нанореактора с выключенным кулоновским взаимодействием, облегчая открепление и пробег дислокаций и увеличивая пластичность кристалла. В чистых ковалентных кристаллах дислокации несут оборванные химические связи (свободные валентности). Их встреча с атомными дефектами рождает спиновый нанореактор с триплетным стартовым состоянием. Микроволновое резонансное поле стимулирует триплет-синглетную конверсию нанореактора и за-

крепляет дислокацию, создавая магнитнорезонансное упрочнение кристалла. В допированных ковалентных кристаллах возможны оба типа спиновых нанореакторов, «ионных» и «ковалентных».

Заметим, что нерезонансные микроволновые поля, как и магнитные статические поля, вызывают спиновую конверсию только из состояния S в состояние T_0 (и обратно), т. е. они изменяют полный спин. Резонансные микроволновые поля индуцируют только зеемановские переходы, приводят к спиновой конверсии нанореактора из состояния T_0 в состояние T_+ или T_- (и обратно). Эти переходы изменяют лишь проекцию электронного спина, но не могут изменить полный спин. Ясно, что путем выбора условий и режимов воздействия статических и осциллирующих магнитных полей можно контролируемо управлять движением дислокаций и магнитопластичностью диамагнитных кристаллов.

В магнитопластичности ключевая проблема — структура и динамика дефектов, которые создают спиновые нанореакторы. Обсуждаемые в этой работе механизмы магнитопластичности в постоянных и в осциллирующих полях позволяют объяснить физику процессов по конечному результату. Однако важна и обратная задача — по наблюдаемым эффектам в магнитопластичности и их механизмам делать заключения (хотя и не всегда однозначные) о стартовых ключевых дефектах, ответственных за магнитопластичность. В этом смысле магнитопластичность — не просто явление, но еще и средство исследования.

Автор признателен Ю. А. Осипьяну, В. В. Кведеру и В. И. Альшицу за внимание к работе и стимулирующие дискуссии и благодарит Министерство науки и образования РФ (грант № НШ-5236.2006.3) за финансовую поддержку.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Т. М. Перекалина, А. А. Урусовская, ФТТ **29**, 467 (1987).
2. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, М. В. Колдаева, Е. А. Петржик, Кристаллография **48**, 826 (2003).
3. А. А. Урусовская, В. И. Альшиц, А. Е. Смирнов, Н. Н. Беккауер, Кристаллография **48**, 855 (2003).
4. В. И. Альшиц, Н. Н. Беккауер, А. Е. Смирнов, А. А. Урусовская, Изв. РАН, сер. физ. **67**, 775 (2003).

5. А. А. Урусовская, В. И. Альшиц, А. Е. Смирнов, Письма в ЖЭТФ **65**, 470 (1997).
6. В. И. Альшиц, Н. Н. Беккауер, А. Е. Смирнов, А. А. Урусовская, ЖЭТФ **111**, 951 (1999).
7. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Е. А. Петржик, ЖЭТФ **118**, 1 (2006).
8. В. В. Кведер, Ю. А. Осипьян, Изв. АН СССР, сер. физ. **51**, 626 (1987).
9. Р. Б. Моргунов, УФН **174**, 131 (2004).
10. Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, ЖЭТФ **115**, 605 (1999).
11. Ю. И. Головин, ФТТ **46**, 769 (2004).
12. А. Л. Бучаченко, ЖЭТФ **129**, 909 (2006).
13. Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, В. Е. Иванов и др., Письма в ЖЭТФ **68**, 400 (1998).
14. Yu. Golovin, R. Morgunov, and A. Baskakov, Mol. Phys. **100**, 1291 (2002).
15. Ю. В. Осинская, А. В. Покоев, Физика и химия обработки материалов № 3, 18 (2003).
16. В. И. Зарембо, О. Л. Киселева, А. А. Колесников и др., Metallurgia и машиностроение № 1, 11 (2005).
17. В. И. Зарембо, А. А. Колесников, Е. В. Иванов, Нанотехника № 3, 120 (2005).
18. В. И. Зарембо, О. Л. Киселева, А. А. Колесников и др., Хим. промышленность **80**, 35 (2003).
19. А. Л. Бучаченко, Хим. физика **24**, 81 (2005).
20. N. Lehto, S. Marklund, and W. Yong-Liang, Sol. St. Comm. **92**, 987 (1994).
21. Ю. А. Осипьян, Р. Б. Моргунов, А. А. Баскаков и др., Письма в ЖЭТФ **79**, 158 (2004).
22. M. V. Badylevich, V. V. Kveder, V. I. Orlov, and Yu. A. Ossipyun, Phys. Stat. Sol. (c) **2**, 1869 (2005).
23. S. Senkader, A. Giannattasio, R. Falster, and P. Wilshaw, J. Phys.: Condens. Matter **14**, 13141 (2002).
24. М. В. Бадылевич, Ю. Л. Иунин, В. В. Кведер и др., ЖЭТФ **124**, 664 (2003).