

Физика конденсированных сред (2007 г.)

В области теории твердого тела построена теория сверхпроводящего состояния, характеризующегося сосуществованием на части контура Ферми спаривания с большим импульсом, обусловленного кулоновским взаимодействием, и куперовского спаривания с нулевым импульсом на другой части контура Ферми, обусловленного электрон-фононным взаимодействием. Этим сосуществованием удалось объяснить: 1) отсутствие изотоп-эффекта для критической температуры T_c купратов и нормальный изотоп-эффект для сверхтекучей плотности при $T \ll T_c$; 2) природу малой щели, наблюдаемой при $T \ll T_c$. Предсказывается исчезновение при $T \ll T_c$ и низких частотах $\omega \ll T_c$ друдевского вклада в оптическую проводимость, наблюдаемую в сверхпроводящем состоянии купратов, (ФИАН).

В рамках феноменологической двухжидкостной модели вычислен эффект Керра для сверхпроводника со спонтанным нарушением симметрии по отношению к обращению времени. Показано, что этот эффект, недавно обнаруженный в Sr_2RuO_4 , связан с появлением спонтанной намагниченности в сверхпроводящем состоянии, (ИТФ РАН).

Теоретически предсказано и описано новое физическое явление – коллапс резонансов в полупроводниковых гетероструктурах, представляющий собой слияние при изменении параметров системы двух резонансов единичной прозрачности в один резонанс с прозрачностью меньшей единицы. В точке коллапса в геометрически симметричной системе возникает асимметрия распределения электронной плотности. Параметр асимметрии ведет себя подобно параметру порядка при фазовом переходе второго рода, (ФИАН, МИЭТ).

В области физики металлов и сплавов разработан новый класс объемных композиционных материалов, имеющих градиентную структуру ламинатного типа (включая слои аморфные или нано - и субмикро-кристаллические), на основе интерметаллидов титана или никеля с термоупругими мартенситными превращениями. Обнаружено, что данные материалы обладают высокообратимыми эффектами многократной спонтанной памяти формы, которые регулируются температурой, величиной и типом внешних или внутренних напряжений, или величиной и направлением внешнего магнитного поля, (ИФМ УрО РАН).

Получены многослойные композиты Cu-Nb и Nb-(Nb-50\%Ti) в виде ленты толщиной 0,3 мм, состоящий из 64000 слоев меди и ниобия и ниобия и сплава Nb-(Nb-50\%Ti) со средней толщиной слоев 5 нм. Показано, что в обоих композитах при толщине слоев менее 100 нм, рост твердости при деформировании прокаткой хорошо описывается зависимостью Холла-Петча, в которой роль размера зерна исполняет толщина слоев, изменяющаяся в процессе прокатки, (ИФТТ РАН).

В рамках дислокационно-кинетического подхода разработана теория формирования поверхностного рельефа в деформируемых металлах при возникновении в них ячеистой и фрагментированной дислокационной структуры микро - и наномасштаба. Установлено, что основной вклад в высокую низкотемпературную прочность меди дает деформационное упрочнение, а титана – температурное. В прочность же армко-железа существенный вклад вносят оба вида упрочнения, (ФТИ РАН).

Рассмотрен ряд вопросов, которые являются новой ступенью в развитии представлений о природе фазовых превращений, происходящих при термической обработке сталей. Показано влияние магнитного поля на образование кристаллов атермического мартенсита разной морфологии, изменение механических свойств структурных составляющих при такой обработке, зависимость величины критического поля от размера зерна, влияние постоянных магнитных полей на изотермическое мартенситное, бейнитное и перлитное превращения, (ИФМ УрО РАН).

В области образования и структуры кристаллов разработаны и созданы жидкокристаллические материалы, на которых впервые показана возможность усиления излучения микролазера на жидком кристалле с помощью тонких планарных слоев, в том числе и ориентированных слоев жидких кристаллов. В случае жидкокристаллического усилителя была продемонстрирована анизотропия коэффициента усиления, что открывают новые возможности управления лазерным излучением с помощью электрического поля, (ИКАН).

Впервые в мире создана фторидная лазерная керамика на основе фторида лития с центрами окраски, фторида кальция с иттербием и трехкомпонентного фторида кальция, стронция с иттербием. Механическая прочность керамики в три раза превосходит прочность монокристаллов. При диодной лазерной накачке получен дифференциальный КПД до 80%, (Научный центр лазерных материалов и технологий ИОФАН)

Создан новый энергонасыщенный материал – кристаллический полимерный азот с кубической структурой *cg-N* (*cubic gauche*), который обладает рекордным запасом химической энергии, на порядок превышающей существующие источники энергии, такие как взрывчатые вещества, топливо ракет, автомобильное топливо и другие, (ИКАН, Институт химии общества им. Макса-Планка, Германия)

Осуществлен направленный поиск и синтез новых сцинтилляционных материалов на основе оксидов молибдатов и вольфраматов. Направленный синтез осуществлен по выявленным кристаллохимическим критериям - выводам об определяющем влиянии сайт-симметрии, координационного числа и расстояний между активными ионами на сцинтилляционные свойства кристаллов, (ИНХ СО РАН).

Установлена пространственная структура бактериальной L-аспарагиназы *Erwinia carotovora* и ее комплексов с природными лигандами – аспаратом и глутаматом, (ИКАН).

Проведен комплекс теоретических исследований по проблеме высокотемпературных мономолекулярных наномагнитов – единичных молекул с эффектом магнитной памяти. Разработана новая стратегия создания высокотемпературных мономолекулярных магнитов, позволяющая повысить их рабочую температуру с достигнутых к настоящему времени 3-4 К до нескольких десятков кельвин, (ИКАН).

Впервые методы интерпретации данных малоуглового рассеяния, изначально предназначенные для исследования монодисперсных растворов белков, были успешно применены для полимерных образцов с наночастицами различной природы, (ИКАН).

Определены кристаллические и молекулярные структуры 40 новых соединений, в том числе функциональных оксидных и аноксидных материалов, (ИНХ СО РАН).

В области физики высоких давлений при фазовом переходе из «молекулярного» металла в «нормальный» металл в металлическом галлии при высоких давлениях обнаружено аномальное понижение модулей сдвига и сжатия и рост коэффициента Пуассона от типичных «полупроводниковых» величин до «металлических». Это свидетельствует о существенном различии характера межчастичного взаимодействия в «молекулярном» и «нормальном» металлах, (ИФВД РАН).

Экспериментально установлено рекордное падение вязкости расплава Se в 500 раз при росте давления до 4 ГПа, что свидетельствует о фазовом переходе в жидком Se из полупроводникового в металлическое состояние, (ИФВД РАН).

Синтезирована композиционная керамика на основе кубического нитрида бора методом пропитки алюминием порошка c-BN при высоких давлениях и температурах. Керамика выдерживает контактные напряжения свыше 50 ГПа без разрушения и остаточной деформации, что создает предпосылки для разнообразных практических применений, (ИФВД РАН).

Установлено, что под давлением водорода 70 кбар и температуре 450°C графит образует ранее неизвестное соединение состава CH, устойчивое в вакууме до 550–600°C. Образование соединения сопровождается увеличением параметра элементарной ячейки графита на 40% вдоль гексагональной оси, (ИФТТ РАН, ИПХФ РАН).

Обнаружено, что при ударном сжатии графита в направлении, параллельном базисным плоскостям, давление превращения графит–алмаз на 5-10% больше, а скорость в несколько раз меньше, чем при сжатии перпендикулярно базисным плоскостям. Таким образом, показано, что сдвиги в базисных плоскостях затрудняют превращение графит–алмаз, (ОИВТ РАН).

Изучены объемный и тепловой эффекты превращения между гидратами метана с кубической КС-I и гексагональной ГС-III структурой при высоких давлениях. Эти эффекты существенны для природных процессов образования клатратов на Земле и спутниках планет-гигантов, (ИГМ СО РАН).

Введен в строй новый специализированный дифрактометр для исследования микрообразцов при высоких давлениях на экспериментальной станции «Медиана». Проведена серия экспериментов по изучению фазовых переходов в различных кристаллах до давлений 200-300 кбар в алмазных наковальнях, (РНИЦ "Курчатовский институт", ЛНФ ОИЯИ).

В области физики магнитных явлений создан спиновый инжекционный мазер, управляемый внешним магнитным полем и работающий в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн. В основе его работы лежит эффект инжекции спин-поляризованных электронов через контакт между полупроводником типа InSb и ферромагнитными материалами с высокой степенью поляризации электронов проводимости, приводящий к появлению электромагнитной эмиссии лазерного типа за счёт переходов между зеемановскими уровнями. Накачка активной среды в мазере осуществляется с использованием технологий спиновой элек-

троники. Рабочий диапазон лазера лежит в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн, недоступном другим твердотельным источникам излучения, и управляется внешним магнитным полем, (ИФМ УрО РАН).

При исследовании наноразмерных частиц оксидов железа (гамма- Fe_2O_3 и Fe_3O_4) методом электронного магнитного резонанса обнаружены дополнительные спектральные линии на основной и кратных частотах, характерные для многоспиновых кластеров. Это свидетельствует о проявлении квантовых эффектов в магнитных наноматериалах, представляющих собой переходную область между квантовыми и классическими объектами, (ИРЭ РАН).

Выявлены особенности магнитного упорядочения квазиодномерных фрустрированных гейзенберговских магнетиков со спином $1/2$ $\text{Li}_2\text{CuZrO}_4$ и LiCuVO_4 на основе комплексного исследования их магнитных, термодинамических и магниторезонансных свойств. В поведении теплоемкости $\text{Li}_2\text{CuZrO}_4$ при сверхнизких температурах обнаружена большая линейная по температуре составляющая, что указывает на близость этого соединения к квантовой критической точке. Методами электронного спинового резонанса и ядерного магнитного резонанса изучены магнитные свойства антиферромагнитного LiCuVO_4 в магнитоупорядоченном состоянии и предложены магнитные фазы, описывающие весь комплекс имеющихся к настоящему моменту экспериментальных данных, (ИФП РАН, МГУ, ИРЭ РАН).

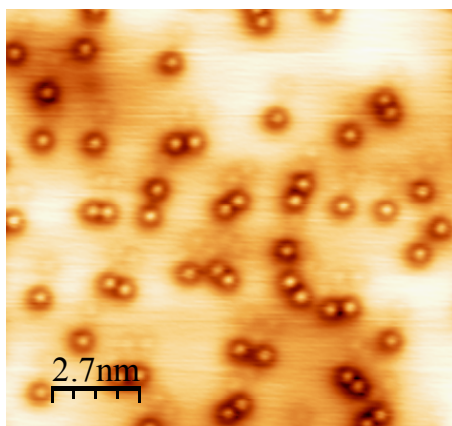
С использованием усовершенствованного электрохимического метода формирования контактов атомарных размеров между двумя металлическими пленками, разделенными непроводящим зазором, были получены наноконтакты никеля с гигантским магнитосопротивлением (ГМС) до 210%. При определенных режимах электрохимического формирования наноконтактов в них было зарегистрировано квантование проводимости, которое является свидетельством баллистического транспорта электронов. Проведенные численные оценки размеров наноконтакта в этом случае показали, что его поперечный размер не превышает 1 нм. В большинстве экспериментов величина скачков проводимости была кратна кванту проводимости для ферромагнетиков, а число каналов проводимости в процессе формирования наноконтакта менялось от 1 до 40. Проведенные вольтамперметрические исследования позволили подобрать необходимые условия для формирования наноконтактов с ГМС, а также выявить возможную причину отсутствия магнитосопротивления в некоторых электрохимически сформированных наноконтактах, (КФТИ КазНЦ РАН).

В области физики сегнетоэлектриков и диэлектриков на основе теории среднего поля Гинзбурга-Ландау и с учетом “mismatch” граничных условий сделан вывод о том, что не имеется принципиальных ограничений на критический размер l_{cr} в сегнетоэлектриках, что экспериментально подтверждено обнаружением спонтанной поляризации P_s и аномалий диэлектрической проницаемости в температурной области фазового перехода в сегнетоэлектрических полимерных пленках P[VDF-TrE] толщиной 1–0.5 нм, полученных методом Лэнгмюра-Блоджетт, (ИКАН).

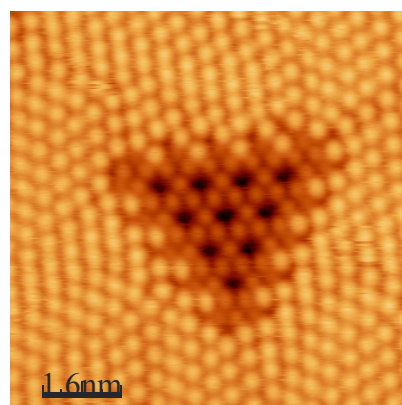
В кристаллах ниобата лития обнаружен эффект фотоиндуцированного возникновения самоорганизованных нанодоменных структур («лучей») с ориентацией, определяемой симметрией кристалла. Предложенная модель, учитывающая

вклад процессов экранирования в кинетику переполаризации, предсказывает возможность направленного формирования двумерных наноструктур такого типа, (НИИ ФПМ УрГУ, Екатеринбург).

В области физики поверхности на примере системы Cl/Ag(111), показано, что применение низкотемпературного сканирующего туннельного микроскопа открывает новую страницу в исследовании систем галоген/металл. Полученные результаты позволяют пересмотреть ряд структурных моделей, предложенных ранее на основании ДМЭ и EXAFS данных, а также предложить новые механизмы фазовых переходов в двумерных адсорбированных слоях. В частности, установлено, что на начальной стадии атомы хлора декорируют атомные ступени. В диапазоне покрытий $\theta < 1/3$ ML на атомных террасах формируются атомные цепочки, в которых атомы хлора заполняют как г.ц.к., так и г.п.у. центры. При степени покрытия $1/3$ ML на поверхности формируется соразмерная решетка хлора $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$. Дальнейшее увеличение степени покрытия приводит к сжатию решетки адсорбата. Установлено, что на первом этапе сжатия формируются локальные объекты с повышенной плотностью атомов (краудионы). На втором этапе сжатие становится одноосным – происходит формирование линейных доменных стенок, разделяющих антифазные домены со структурой $(\sqrt{3} \times \sqrt{3})R30^\circ$. При степени покрытия 0.38 ML начинается заполнение поверхности новой фазой (3×3) . Интересной особенностью роста является формирование однотипных островков структуры (3×3) размером 25–30 Å. При насыщении поверх структуры (3×3) происходит формирование кластеров серебра размером ≈ 10 –15 Å, необычные свойства которых, по нашему мнению, могут быть причиной высокой каталитической активности данной системы, (ИОФ РАН).



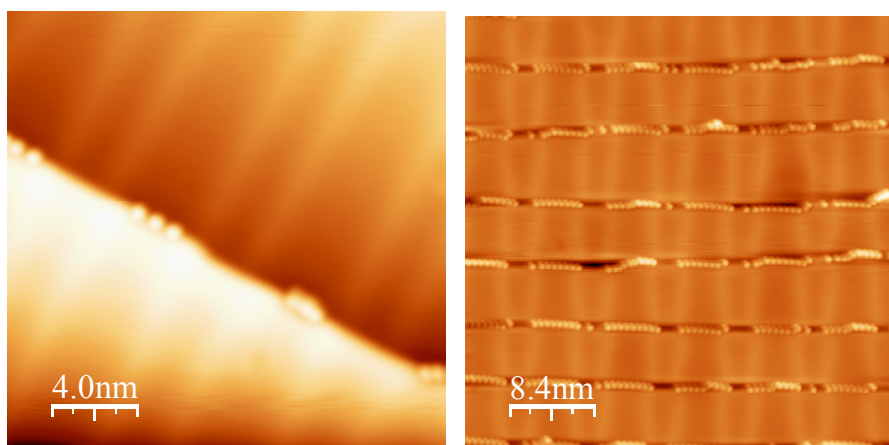
Отдельные атомы хлора на поверхности Ag(111). Начало формирования цепочек.



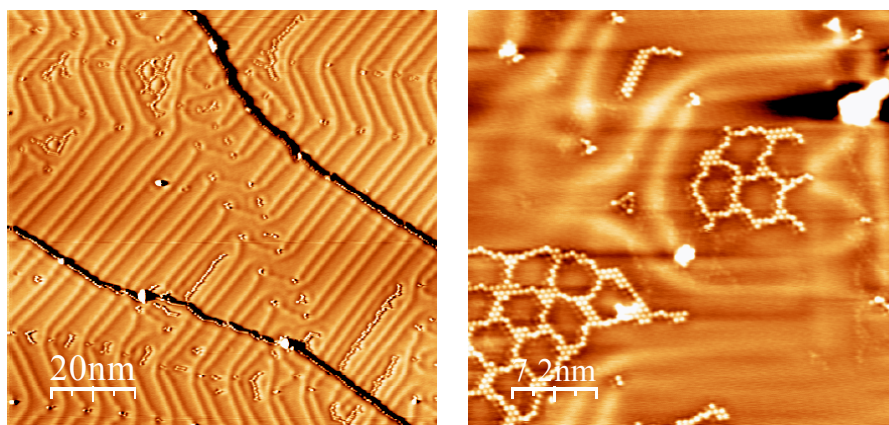
Сосуществование фаз линейных доменных стенок и структуры 3×3 .

При взаимодействии хлора с реконструированной поверхностью Au(111) при $T < 150$ К атомы хлора начинают заполнять адсорбционные центры на атомных ступеньках, причем первыми заполняются места в г.ц.к. доменах. При увеличении степени покрытия происходит разрушение реконструкции поверхности Au(111) и формирование сложной квазипериодической сверхструктуры, которая представляет собой связанные кольца из атомов хлора со средним периодом ≈ 40

Å. Было установлено, что ближайшие атомы разделены расстоянием 5 Å, что соответствует расстоянию в соразмерной структуре $(\sqrt{3}\times\sqrt{3})R30^\circ$, (ИОФ РАН).



СТМ изображения поверхности Au(111) на начальной стадии адсорбции хлора. Температура поверхности при измерениях 5 К.



СТМ изображения второй стадии адсорбции хлора на поверхность Au(111) – разрушение реконструкции и зародышеобразование «колец». Температура поверхности при измерениях 5 К.

С помощью сверхвысоковакуумной сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) с атомным разрешением проведены исследования эффектов электронной структуры игл и поверхностей при формировании СТМ-изображений поверхностей Cu(410)-O, Cu(100)-O, W(100)-O, Si(111)-(7×7). Наиболее интересные результаты связаны с наблюдением субатомных особенностей в изображениях реконструированных поверхностей. Впервые показана экспериментальная возможность разрешения отдельных атомных орбиталей в СТМ-изображениях реконструированных поверхностей металлов. Проведенные эксперименты с использованием парамагнитных (W) и антиферромагнитных (MnNi) зондов показали, что симметрия СТМ изображений реконструированных поверхностей металлов существенно зависит как от атомной структуры зонда, так и от параметров туннелирования, в частности, от расстояния между острием и поверхностью. Расчеты плотности электронных состояний для различных орбиталей атомов поверхностей и игл раз-

личной геометрии показали, что для исследованных систем (Cu-O, W-O) реализуются ситуации, при которых решающий вклад в туннельный ток обеспечивают электронные состояния определенной симметрии. Изменение расстояния между зондом и образцом приводит к смене атомных орбиталей, дающих наибольший вклад в туннельный ток. Показано, что возможно экспериментально подобрать такие параметры туннелирования, при которых определенные электронные состояния атомов иглы и поверхности дают наибольший вклад в туннельный ток. В этом случае изображения несут специфическую информацию об электронной структуре исследуемых атомов, (ИФТТ РАН).

Обнаружено, что добавление субмонослойных концентраций атомов Ge приводит к радикальной перестройке поверхностной фазы Si(111)4×1-In и изменению ее периодичности с 4×1 на 7×3 при этом структура по-прежнему имеет квазиодномерный характер и металлические свойства. Предполагается, что изменение параметра решетки при добавлении атомов германия не только предоставляет возможность исследовать роль поверхностных напряжений при формировании реконструкций, но и открывает новые возможности для управления реконструкцией поверхности, (ИАПУ ДВО РАН).

Подemonстрирована возможность модификации магических кластеров Si₇In₆ на поверхности Si(100) атомами свинца. Теоретические расчеты показали, что замена центрального атома кремния атомом свинца приводит к образованию атомного кластера Si₆In₆Pb и понижению его энергии на 0,3 эВ, что позволяет создать массив почти полностью (до 95%) состоящих из Pb-модифицированных кластеров. Данные сканирующей туннельной спектроскопии показывают, что Pb-модифицированный кластер является полупроводником с шириной запрещенной зоны немного больше, чем у обычного кластера, (ИАПУ ДВО РАН).

С помощью сканирующей туннельной микроскопии установлено, что слой таллия моноатомной толщины на поверхности Ge(100)2×1 обладает уникальными свойствами. Присутствие таллия приводит к формированию антифазных доменных границ, которое происходит путем переключения димеров Ge подложки под слоем таллия. Такое явление не наблюдается ни на чистых поверхностях Si(100) и Ge(100), ни на поверхности Si(100), покрытой таллием. С использованием расчетов из первых принципов получена энергия формирования антифазных доменных границ атомарно чистых поверхностей Si(100) и Ge(100) и систем Tl/Si(100) и Tl/Ge(100). Показано, что только для Tl/Ge(100) формирование АДГ является энергетически выгодным процессом, (ИАПУ ДВО РАН).

В области неразрушающих физических методов контроля установлено, что лазерное детектирование акустических полей с длиной упругой волны порядка нескольких миллиметров позволяет выявить наличие в металле совокупности микродефектов, размеры каждого из которых много меньше длины упругой волны. Параметры пространственного распределения акустических шумоподобных сигналов могут быть использованы для разработки новых методик ультразвукового неразрушающего контроля и визуализации микродефектов в сталях, (ИФМ УрО РАН).

В области исследования конденсированных сред ядерно-физическими методами получены количественные характеристики влияния на поляронное сужение зоны проводимости микронапряжений в решетке и объемной доли мезоскопических ферро- и антиферромагнитных кластеров в сложных магнитных оксидах марганца. Обнаружен хорошо выраженный провал в температуре перехода в упорядоченное магнитное состояние и подавление всех типов дальнего магнитного порядка вблизи точки перехода металл – изолятор, что указывает на ключевую роль химического беспорядка в структуре на формирование фазово-расслоенного состояния на мезоскопическом масштабе размеров, (ЛНФ ОИЯИ).

Широко используемый в медицине антибиотик (амфотерицин В) (АмВ) изучался с помощью малоуглового рассеяния нейтронов, рентгеновской дифракции и Фурье спектроскопии. Результаты экспериментов показали, что АмВ преимущественно локализуется вблизи головных групп мембраны при концентрациях ниже одного мольного процента. При концентрации выше этого уровня происходит процесс агрегации. Появляется эффект ассоциации и происходит встраивание антибиотика в гидрофобную мембранную часть, (ЛНФ ОИЯИ).

В кобальтитах $R\text{BaCo}_2\text{O}_{5.5}$ имеет место эффект колоссального магнетосопротивления и наблюдается переход металл-диэлектрик, обусловленные изменением спинового состояния ионов Co^{3+} . Методом рентгеновской дифракции экспериментально доказано, что с понижением температуры в $R\text{BaCo}_2\text{O}_{5.5}$ происходят два структурных перехода: первый совпадает с переходом металл-изолятор и является второродным, а второй – первородным. При этом симметрия кристалла меняется и отличается от общепринятой $R\text{mmm}$. Методом дифракции поляризованных нейтронов получено пространственное распределение спиновой плотности в $\text{DyBaCo}_2\text{O}_{5.5}$, позволяющее определить спиновое состояние Co^{3+} ионов, которое обсуждается в многочисленных публикациях в рамках $R\text{mmm}$ симметрии, (ПИЯФ РАН).

Методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии изучено строение псевдоморфной наноразмерной гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$. Использование методики одновременного анализа кривых дифракционного отражения от кристаллографических плоскостей (004) и (113) позволило установить размытие гетерограниц квантовой ямы InGaAs и спейсерного слоя AlGaAs . Показано, что электрофизические характеристики этих материалов непосредственно связаны со структурным качеством наноразмерных эпитаксиальных слоёв и состояния интерфейсов в этих структурах, (Курчатовский центр синхротронного излучения и нанотехнологий).

В области физики прочности и пластичности установлено, что в процессе интенсивной пластической деформации (ИПД) при $e > 1$ обязательно должны быть эффективно реализованы дополнительные (помимо пластической деформации) каналы диссипации упругой энергии. Структурные изменения при ИПД характеризуются определенной циклическостью. Конкретный маршрут структурных перестроек при ИПД определяется рядом факторов: температурой, величиной барьера Пайерлса дислокаций и их способностью к диффузионным перестройкам, разностью свободных энергий кристаллического и аморфного состояний. Протекание ИПД вовсе не гарантирует образования нанокристаллического состояния с размером

кристаллитов менее 100 нм, разделенных высокоугловыми или межфазными границами. Например, в чистых металлах с высокой дислокационной подвижностью это практически исключено. Важным фактором образования наноструктур при ИПД является протекание фазовых превращений мартенситного и диффузионного типа, а также переход в аморфное состояние. Стимулируя фазовые превращения путем варьирования температуры и химического состава материалов, имеется возможность получить наноструктуры различного типа. Отличительным признаком ИПД является существование дополнительных эффективных каналов диссипации упругой энергии. Таких каналов, по нашему мнению, четыре (если исключить процессы механического разрушения): динамическая рекристаллизация, дисклинационные перестройки, фазовые превращения (включая переход в аморфное состояние) и выделение скрытой теплоты деформационного происхождения. При обычных (макропластических) деформациях происходит накопление упругой энергии, и лишь на стадии ИПД включаются мощные диссипативные процессы, (ИМФМ ЦНИИЧермет, ИМЕТ РАН, МИСиС).

Обнаружено явление нанокристаллизации при интенсивной пластической деформации аморфных сплавов. Частицы нанокристаллов возникают однородно по всему объему аморфных сплавов на основе железа, никеля, кобальта и титана, но не достигают размеров свыше 50 нм, оставаясь нанокристаллическими, при этом наблюдается аномальное измерение ряда физико-механических свойств. Предложен новый структурный механизм интенсивной пластической деформации, ведущий к нанокристаллизации, (ИМФМ ЦНИИЧермет, ИМЕТ РАН, ИФТТ РАН, ИФМ УрО РАН, Уфимский авиационно-технологический Университет).

Председатель Научного совета РАН
по физике конденсированных сред,
академик

Ю.А.Осипьян