

ОТ ЯВЛЕНИЙ ОПТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ К СТРУКТУРЕ МАТЕРИАЛОВ НА НАНОМАСШТАБАХ

В. К. МАЛИНОВСКИЙ



К началу 70-х годов прошлого века необычайно резко возрос объем информации в различных областях науки и техники. Научные и социологические прогнозы предсказывали и дальнейшее увеличение информационных потоков. Во многих странах (в том числе и в СССР) встал вопрос о необходимости создания систем хранения и обработки информации с качественно новыми показателями как по объему памяти, так и по динамическим характеристикам. Электронные лампы - основа тогдашней вычислительной техники, ограничивали дальнейший рост параметров, полупроводниковые микросхемы были еще на «детской» стадии развития и никто в те годы даже не мог представить себе, что через каких-то 30 лет ЭВМ на их основе станут повседневным атрибутом даже в сельских школах.

В АН СССР исследователи обратились к оптике и новым физическим принципам записи для реализации систем чрезвычайно большой емкости, упрощения связей между элементами за счет нейтральности фотонов, создания оперативных систем с высоким быстродействием. Для участия в этом процессе в ИАиЭ СО АН СССР по инициативе его директора Ю.Е. Нестерихина в 1973 г. была создана лаборатория

голографических методов измерений, которая существует в Институте до сих пор (название ее, правда, изменилось - теперь это лаборатория физической электроники). На разных этапах численность и квалификационный состав сотрудников колебались в широких пределах.

Одна из центральных проблем, которую необходимо было решить при разработке оптических вычислительных устройств, связана с поиском и синтезом материалов, пригодных для записи информации.

Попробуем разобраться в специфике функций носителя информации (материала или среды, как его еще часто называют) в устройствах оптической обработки. При записи информации световой луч, модулированный по какому-либо закону, воздействует на материал, изменяя его оптические свойства (коэффициент преломления, поглощения и т.д.). Считывающий луч реагирует на изменение свойств материала и восстанавливает закодированную информацию в виде изменения интенсивности или фазы прошедшего или отраженного света. Фактически речь идет об управлении параметрами одного светового луча (считывающего) с помощью другого (записывающего), а носитель информации (материал) - промежуточное звено, позволяющее осуществить эффективное взаимодействие двух (или нескольких) световых пучков.

Один из простейших способов записи - прожигание отверстий в тонкой пленке металла, нанесенной на прозрачную подложку. Луч лазера, сфокусированный до размера 1 квадратный микрон, вызывает испарение участка металлической пленки. Эта операция повторяется многократно с некоторым шагом, причем каждая последующая точка прожигается или нет в зависимости от того, записывается «1» или «0». На плоскости образуется ряд прозрачных и непрозрачных участков, в системе чередования которых закодирована некоторая информация. Этот способ записи такой же, как пробивка перфокарт в первых вычислительных устройствах, но разница заключается в том, что использование оптики позволяет резко увеличить плотность записи (до 10^8 бит на каждом квадратном сантиметре материала).



Профессор Франсон из Парижа и часть оптиков Института (В.П. Коронкевич, О.И. Потатуркин, Е.С. Нежевенко, Б.И. Спектор, В.К. Малиновский, В.Г. Жданов, В.А. Соколов).

Недостаток способа записи на металлические пленки очевиден - на световой луч возложены все энергетические затраты. Избежать этого можно при использовании фотопластинок. Совместные усилия ученых разных специальностей за последние 100 лет привели к созданию весьма совершенных фотопленок и пластинок, обладающих высокой чувствительностью (приблизительно 10^{-5} Дж/см²) и хорошей разрешающей способностью (более 1000 л/мм). В отличие от предыдущего способа записи требования к интенсивности лазерного пучка значительно снижены, поскольку в процессе проявления осуществляется усиление изображения в $10^6 - 10^{10}$ раз! Надо отметить здесь, что процесс проявления необязательно связан с обработкой пластинок в специальных растворах. К настоящему времени разработаны фоточувствительные композиции, проявляемые «сухим» способом, например, за счет подогрева.

В начале 70-х годов в научный мир была вброшена мысль - серебро кончается, для массовых применений нужны новые бессеребряные фоточувствительные материалы. Это стимулировало развитие нового научного направления в материаловедении. Существует целый ряд материалов (например, пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников, некоторые сегнетоэлектрические кристаллы, окислы переходных металлов), в которых при взаимодействии со светом записывается фазовый рельеф - прозрачность материала на длине волны считывающего луча практически не изменяется, но в соответствии с

интенсивностью засветки меняется показатель преломления. Такие материалы используются при записи информации голографическими методами - восстанавливающий луч дифрагирует на изменениях показателя преломления в объеме голограммы. Их чувствительность значительно ниже, чем у фотопластинок. Механизм записи не ясен. Эмпирически установлено, что запись и стирание могут осуществляться многократно.



С.И. Деменко и В.А. Гусев обсуждают эксперимент. Вверху картина путь к познанию.

Многочисленные попытки исследователей увеличить фоточувствительность не приносили успеха - не было «ключа», а голый эмпиризм не давал быстрых результатов. Кстати и теперь, тридцать лет спустя, исследователи, судя по публикациям, часто повторяют ошибки тех времен.

В начале 70-х годов усилия сотрудников лаборатории сосредоточились на решении проблем, связанных с выяснением физических механизмов взаимодействия света с веществом, исследованием возможности улучшения энергетических характеристик процесса, направленным синтезом материалов с необходимыми параметрами.

К 1980 г. в лаборатории были исследованы голографические характеристики широкого круга материалов: пленок MnBi, негативных и позитивных резистов, детизонатов металлов, халькогенидных пленок, фотохромных стекол, пленок VO₂, кристаллов ниобата лития и др. Из полученных данных были сделаны выводы о предельно достижимых параметрах материалов и возможности использования характеристических кривых для выбора режимов записи и считывания. При получении технических требований от разработчиков новой техники стало возможным выбрать необходимый материал и организовать процесс записи - хранения - считывания.

Главное, что удалось установить на этом этапе работ - для проявлений памяти о световом воздействии структура материалов должна быть пространственно неоднородна на наномасштабах. Идеальные кристаллы «помнят» о воздействии света только очень короткое время - до акта рекомбинации фотовозбужденного электрона. В кристаллах с примесями, несовершенствами структуры, в аморфных телах и стеклах память может сохраняться достаточно долго.



А.М. Пугачев и И.Ф. Канаев у стенда с импульсными лазерами.

Из экспериментальных результатов и привлечения косвенных данных с известной долей достоверности был сделан вывод о том, что в окрестности любой точки аморфного тела или стекла можно выделить упорядоченные нанодомены ($\langle v \rangle \sim 10^{-22}$ см³), похожие по структуре на свои кристаллические прототипы. Это позволило нам (см. первые публикации: Малиновский В. К., Жданов В. Г., 1976-1981) предложить новый механизм фотопревращений: при безызлучательной релаксации фотовозбужденного электрона его энергия передается малой ($\langle v \rangle \sim 10^{-22}$ см³) области решетки. Фононы локализируются в этой области, что эквивалентно существенному повышению ее температуры. Последующее остывание (закалка) приводит к структурной перестройке нанодомена и окружающей сетки стекла. Изменения оптических свойств закаленного нанодомена и образца в целом определяются степенью нарушения порядка в расположении атомов.

Итак, было сделано эпохальное открытие - для запоминания необходима пространственная неоднородность на нанометровых масштабах. Добавим, что в то время мы, возможно первыми, ввели в обиход термин «нанометровый масштаб» и стали прокладывать путь в этом новом, практически не известном направлении.

Как же устроен мир в твердом теле на нанометровых масштабах? Оказывается, ответить на этот вопрос ничуть не проще, чем на многие фундаментальные вопросы астрофизики и физики элементарных частиц. Дело в том, что исследователь вступает в этом случае в термодинамически неравновесный мир, где объем и поверхность элемента состоят приблизительно из одинакового числа атомов и где взаимодействия многих частиц определяют отклик на внешнее воздействие.

Хорошо известно, что из всех состояний вещества своим геометрическим порядком в расположении атомов на достаточно больших расстояниях резко выделяется только кристаллическое состояние. Это позволило достичь крупных успехов в познании кристаллического состояния экспериментальными методами и создать прекрасные теоретические модели. Однако некристаллические материалы (а это огромное множество окружающих нас аморфных тел, стекол и жидкостей) не обладают такой упорядоченностью, если подходить к ним с «кристаллическими» мерками. Создается ощущение, что никакой универсальности в их строении нет, и единственное, что можно сделать - изучать каждое вещество, пытаться построить модель его структуры и

найти индивидуальные признаки для управления свойствами. Подход этот явно не физический, и мы (Малиновский В.К., Новиков В.Н., Соколов А.П.) принялись за поиски того, что могло бы быть объединяющим, общим, универсальным в этом неупорядоченном мире некристаллов. Сложность задачи обусловлена отсутствием хороших методов исследования структуры вещества на масштабах в несколько нанометров. Из традиционных структурночувствительных методик одни уже не работают на таких масштабах, другие еще плохо работают, третьи могут сказать что-то о поверхности, но не об объемных свойствах и т.д. В связи с этим был разработан и применен к широкому ряду аморфных, стеклообразных, полимерных и жидких материалов новый метод - низкочастотная спектроскопия неупругого рассеяния света.

Идея метода проста: характерная частота колебаний структурных фрагментов обратно пропорциональна их размеру, и, если опуститься по частоте на один-два порядка от характерной частоты колебаний одной молекулы, то можно изучать колебательный спектр фрагментов структуры, состоящих из нескольких десятков или сотен атомов. С помощью этого метода мы исследовали низкоэнергетические колебательные возбуждения и релаксационные процессы в стеклообразных и аморфных телах.

Результаты этих измерений несут информацию о структуре неупорядоченных тел на масштабах 1-10 нм, так как именно такую длину имеют квазилокальные колебания в исследуемой области спектра. Характерным для низкочастотных спектров в стеклообразных и аморфных телах является так называемый бозонный пик, лежащий в области частот акустических колебаний и отсутствующий в спектрах

неупругого рассеяния света соответствующих кристаллов. Аналогичная особенность видна и в спектрах неупругого рассеяния нейтронов. Мы установили, что спектральная форма бозонного пика является универсальной для стеклообразных материалов самого различного состава - силикатных, халькогенидных, металлических и даже низкомолекулярных органических (таких, как спирт и глицерин). В совокупности с другими экспериментальными данными это свидетельствует об универсальном характере строения стекол на масштабах среднего порядка: наличии упорядоченных нанообластей (кластеров) размером 1-2 нм, распределение которых по размерам описывается универсальной функцией, а средний размер зависит от конкретного материала.

Та же самая универсальность была обнаружена и в стеклообразующих жидкостях. Оказалось, что характерная для стекол закономерность в расположении атомов на нанометровых масштабах существует уже в расплаве и при дальнейшем охлаждении, вплоть до образования твердого стекла меняется лишь степень упорядоченности наноструктуры, амплитуда различных флуктуаций, но характерный пространственный масштаб упорядоченности, его статистическое распределение и остальные закономерности не изменяются. Отсюда становится понятной универсальность наноструктуры стекол: она связана с единым процессом их получения (охлаждением расплава) и формируется еще в жидком состоянии.

Анализ низкочастотных колебательных спектров аморфных полупроводников показал, что здесь нет универсальности, характерной для стекол, но можно разбить изученные на сегодня материалы на две группы: первая (селеноподобные полупроводники), близкая к стеклам, с достаточно плавными статистическими свойствами упорядоченности и вторая (кремниеподобные полупроводники) - с резкими обрывами структурных корреляций. При этом оказалось, что две этих группы материалов относятся к двум разным классам аморфных полупроводников, разделенным ранее по различию в их свойствах, в частности, по наиболее важному для полупроводников свойству - возможности легирования. Полученные результаты позволили объяснить различие ряда свойств этих классов аморфных полупроводников и связать их с различием в характере накопления структурной разупорядоченности на нанометровых масштабах.

Интересные особенности имеет наноструктура полимеров, аэрогелей и других фрактальных систем. Длинные молекулы в полимерах образуют клубки, обладающие фрактальными

свойствами, и мы показали, что метод низкочастотной спектроскопии дает возможность измерить ряд нетривиальных фрактальных параметров этих сред - размер клубков, фрактальную и спектральную размерность (последняя характеризует степень взаимодействия между различными цепочками), закон локализации колебательных возбуждений и другие. Сами фрактальные свойства полимеров оказались зависящими от термической обработки и от вариаций химического состава. Выяснилось также, что эти полимеры далеки от идеального линейного разупорядоченного полимера: между цепями существует сильное взаимодействие, и возбуждения в полимерах далеко не одномерны. Было также показано, что особенности наноструктуры ведут к сильной, значительно более резкой, чем в обычных аморфных телах, пространственной локализации возбуждений во фрактальных кластерах.

Интересно, что метод НЧ-спектроскопии, работающий на передовых рубежах фундаментальной науки, может также использоваться для приложений. В частности, он позволяет легко и быстро измерять размер и концентрацию малых (1 - 20 нм) частиц в ультрадисперсных системах.

Таким образом, комплекс проведенных в лаборатории исследований (методами низкочастотной спектроскопии неупругого рассеяния света, рассеяния нейтронов и малоуглового рассеяния) показал, что на нанометровых масштабах существуют вполне определенные закономерности в структуре неупорядоченных материалов. Они различаются в разных классах веществ. Для того, чтобы понять эти закономерности, требуется развитие теоретических подходов к описанию аморфных структур. К сожалению, в настоящее время нет ясных представлений, что должно быть положено в основу этих подходов.

На основе данных о структуре аморфных и стеклообразных тел, полученных как из наших экспериментов, так и экспериментов других исследователей, в начале 80-х годов была построена модель структуры стекла.

Согласно нашей модели, стеклообразные материалы состоят из упорядоченных кластеров, содержащих от нескольких десятков до сотни атомов. При этом материал остается рентгеноаморфным. Отсутствие дальнего порядка вызвано большой плотностью линейных топологических дефектов - дисклинаций. Характерное расстояние между ними - порядка нескольких межатомных расстояний - определяет радиус корреляции структуры. В континуальном пределе аморфное тело описывается в терминах неевклидова пространства. Радиус

кривизны такого пространства равен радиусу корреляции структуры стекла.

Наша модель объединяет в себе как кристаллитные воззрения на структуру стекол, так и модель непрерывной сетки, которые являются ее предельными случаями. Таким образом, нами внесен важный вклад в разрешение более чем полувекового спора о том, что такое стекло: смесь кристаллитов или непрерывная сетка?

В том хаосе, с каким обычно связывалась структура аморфных тел и стекол, есть специфический характерный масштаб - параметр порядка, присущий стеклам различной природы (диэлектрическим, полупроводниковым, металлическим). Он может сыграть столь же важную для теории стеклообразного и жидкого состояния роль, какую играла элементарная ячейка для теории кристаллов. Локализация возбуждений принципиально изменяет кинетику процесса передачи энергии и определяет механизм структурных перестроек в реальных кристаллах, аморфных телах и стеклах. Единичный квант света может перестроить структуру материала в пределах нескольких координационных сфер - это наше открытие (1975 - 1980 гг.) способно принести много новых идей в химию, катализ и смежные области. Работа «Структура и релаксационные явления в неупорядоченных материалах на нанометровых масштабах» (авторы: Малиновский В.К., Новиков В.Н., Соколов А.П.) стала лауреатом конкурса фундаментальных работ Сибирского отделения АН СССР в 1990 г.

Нанонеоднородности обнаруживают себя и в экспериментах по токопереносу, которыми активно занялись Гудаев О.А., Малиновский В.К., Пауль Э.Э., Трещихин В.А.. Обычно температурная зависимость проводимости имеет вид плавной кривой с уменьшающейся при понижении температуры величиной энергии активации. Как правило, это интерпретируется несколькими экспоненциальными участками, соответствующими известным механизмам переноса заряда: по зоне делокализованных состояний; по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми и по состояниям выше уровня Ферми материала. Мы провели анализ многочисленных как своих, так и опубликованных в литературе экспериментальных данных. Выяснилось, что всегда температурная зависимость проводимости аморфного материала может быть представлена не суммой двух, трех или более экспонент с разными энергиями активации, а совсем иначе, в виде обратного закона Аррениуса. Феноменологически обратный закон Аррениуса для температурной зависимости проводимости может быть получен, если учесть



4 поколения докторов, выросших в лаборатории (А.П. Соколов, В.К. Малиновский, В.Н. Новиков, Н.В. Суровцев).

флуктуации потенциала и пространственные флуктуации подвижности. Тогда, рассмотрев задачу о проводимости сильно неоднородной среды в рамках теории протекания, найдем, что в проводимости эффективно участвуют лишь носители, расположенные в узком энергетическом интервале кТ вблизи уровня протекания E_c , соответствующего возникновению критического проводящего кластера. Все необходимые вычисления и эксперименты выполнены нами в 1985 - 2000 гг.



Все лучшее из измерительной техники, что создавалось в Институте, использовалось в научных экспериментах (И.Ф. Канаев, Э.А. Фомин).

За описание токопереноса в неупорядоченных телах N.Mott получил Нобелевскую премию по физике. Наша трактовка экспериментов получена на более обширном экспериментальном материале, обладает предсказательной силой и вскрывает новые закономерности переноса зарядов.

Обратный закон Аррениуса был известен для температурной зависимости интенсивности фотолюминесценции в неупорядоченных материалах, в частности, для аморфного кремния и халькогенидов. Объясняют этот закон конкуренцией излучательного и безизлучательного каналов рекомбинации. Мы показали, что перенос заряженных носителей и их рекомбинация в неупорядоченных твердых телах тесно связаны между собой (2000 - 2003 гг.).

Параллельно с изучением физических процессов, приводящих к записи информации (как в архивной, так и реверсивной), был исследован вопрос о том, возможно ли построение оптических процессоров (Косцов Э.Г., Потапов А.Н., Егоров В.М. и др.). Для этого был проведен анализ особенностей работы оперативного носителя информации. Оказалось, что оптимальны с точки зрения схемотехнических решений материалы и комбинированные струк-

туры, в основу действия которых положены фотоэлектрическое преобразование энергии при записи и электрооптический эффект при считывании. На луч света необходимо возложить только информационные функции, энергетические затраты покрываются за счет внешних источников питания. Была предложена модель элементарной ячейки оперативной памяти и рассмотрена возможность ее реализации на непрерывных и дискретных элементах. Экспериментальный макет дискретного порогового оптического элемента с использованием кристалла ниобата лития в качестве модулятора света, а лавинного транзистора в качестве фотоэлектрического преобразователя успешно прошел лабораторные испытания.

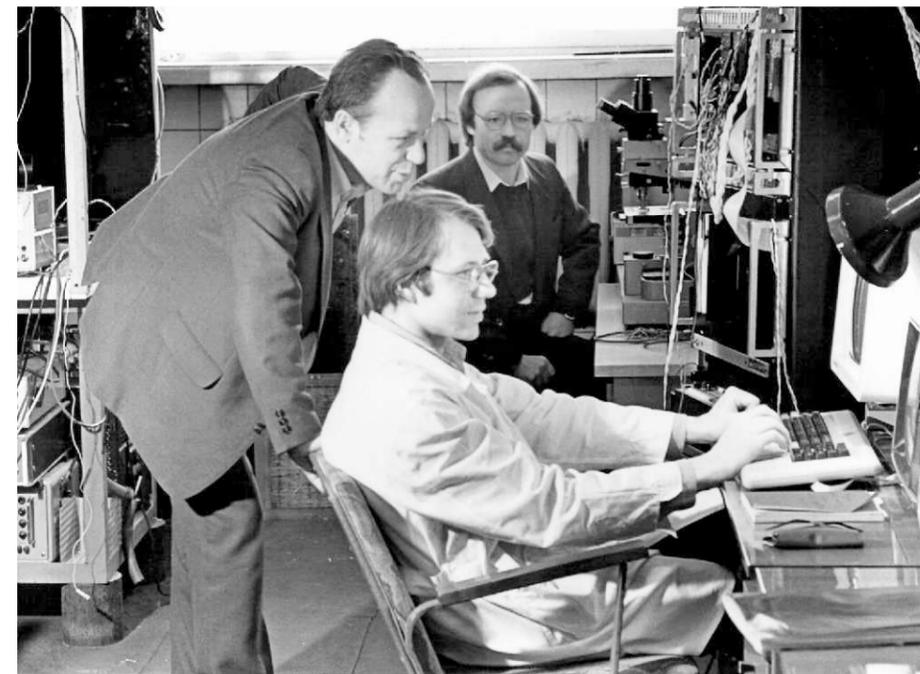
Принцип-принципом, а для реальной конструкции необходимо интегральное исполнение. И уже в 1974 г. в лаборатории была начата работа по синтезу пленок ниобата стронция бария. О создании электрооптических пленок для модуляторов света было доложено на международной конференции по сегнетоэлектрикам в 1978 г.

В начале 90-х годов идея о создании вычислительных комплексов с использованием оптики была практически похоронена. Основанием для этого стали крупные успехи в микроэлектронике, за 20 лет проделавшей громадный ослепительный путь. Из нашей лаборатории выделился коллектив под руководством Э.Г.Косцова и образовалась лаборатория тонких сегнетоэлектрических пленок.

Остальные сотрудники на время оставили поиск новых фундаментальных закономерностей в физическом мире и (в связи с перестройкой и наступившим безденежьем) попытались применить накопленные знания для того, чтобы заработать деньги.

Одна из работ - узкополосные голографические фильтры (Канаев И.Ф., Пугачев А.М., Суровцев Н.В.). При исследовании фоторефрактивных и фотогальванических явлений в сегнетоэлектриках мы (еще в 1980 г.) обнаружили и объяснили эффекты фотоиндуцированного отражения и просветления кристаллов (Канаев И.Ф., Малиновский В.К., Стурман Б.И.). Это позволило разработать и экспериментально реализовать новую технологию создания узкополосных перестраиваемых фильтров на кристаллах ниобата лития. Получены очень хорошие характеристики фильтра: область спектра 500 - 800 нм; полоса пропускания $\delta\lambda \leq 0,01$ нм; область перестройки ≈ 10 нм; подавление фона $\approx 10^3$; эффективность использования света до 70 %.

Физики одними из первых использовали достижения институтских автоматизаторов (В.К. Малиновский, О.А. Гудаев, Э.Э. Пауль).



Другой пример - использование рассеяния для обогащения алмазных руд (Канаев И.Ф., Гудаев О.А., Суровцев Н.В., Пугачев А.М., Трещихин В.А., Аникин А.А. - 1998-2003 гг.). Мы предложили использовать упругое рассеяние для выделения из руды прозрачных объектов. Физический принцип предложенного способа основан на особенностях отражения света от прозрачных и частично прозрачных (матовых) веществ по сравнению с непрозрачными. При падении на образец светового пучка на его поверхности за счет диффузного и зеркального отражения формируется источник света размером со световое пятно и диаграммой направленности, близкой к сферической. При попадании света на прозрачный образец за счет многократного переотражения от внутренних граней происходит перераспределение света внутри образца, что приводит к свечению образца как целого. С помощью специальной оптической схемы можно отделить изображение светящегося объема от изображения светового пятна, диффузно и зеркально отраженного от поверхности, и тем самым отличить прозрачные объекты от непрозрачных.

Известно, что каждому веществу соответствует свой набор волн - фоновый спектр, который в настоящее время широко используется для идентификации веществ. В спектральном анализе фоновый спектр играет роль отпечатков пальцев в дактилоскопии. Измеряя спектр рассеяния света как функцию отстройки частоты можно измерить фоновый спектр исследуемого материала. В комбинационном (или рамановском) рассеянии света алмаза проявляются только оптические фоно-

ны одной частоты (1332 см^{-1} - единственная линия в спектре). Как правило, интенсивность линии КР для алмазов значительно (иногда на порядки) превышает интенсивность КР на других материалах.

Мы предложили новую технологию выборки алмазов из руды: совместное использование «релеевского» и «рамановского» сепараторов. Экономичный высокопроизводительный «релеевский» сепаратор алмазов обеспечивает предварительное обогащение исходного материала, доводя ее до концентрата, содержащего лишь прозрачные ингредиенты. «Рамановский» сепаратор обеспечивает окончательную доводку концентрата, выделяя лишь алмазы. Метод лазерной сепарации алмазов по принципу упругого (без сдвига частоты) рассеяния света не имеет аналогов и защищен авторским свидетельством. Метод сепарации алмазов по методу рамановского рассеяния впервые реализован в ОИАиЭ СО РАН. Макеты сепараторов испытаны в компании «Алроса».

Но все-таки стремление к поиску новых знаний, видимо генетически заложенное в умах сотрудников лаборатории, взяло вверх над суровой правдой жизни. В последнее время выполнен ряд опережающих мировой уровень работ по физике стекла (Суровцев Н.В., Новиков В.Н., Малиновский В.К.). Так, синтезированы гиперплотные кварцевые стекла высокого оптического качества с предельно достижимыми параметрами уплотнения. На полученных образцах впервые в мире установлено сильное подавление (в 7 раз) интенсивности быстрой релаксации. Это позволило обнаружить (также



В. А. Гусев Н. В. Суровцев Ю. А. Данькин А. М. Пугачев. В. А. Трещихин А. А. Аникин



Стоят (слева направо): В.А. Гусев, А.М. Пугачев, Н.В. Суровцев, А.А. Аникин, В.А. Трещихин.
Сидят: (слева направо): Ю.А. Данькин, В.К. Малиновский.



Теоретики и зав.лаб. на субботнике
(В.К. Малиновский, Б.И. Стурман, В.Н. Новиков, В.И. Белиничер).



впервые в мире) квадратичную зависимость фотон-фононного коэффициента связи в спектральной области ниже позиции максимума бозонного пика на значительном спектральном участке, превышающем один порядок по интенсивности. Новые экспериментальные данные позволили предложить усовершенствованную модель колебательных возбуждений, составляющих бозонный пик. В этой модели волновая функция совмещает в себе свойства диффузно распространяющегося и локализованного колебательного возбуждения.

Новиков В.Н., Соколов А.П. (2002 - 2004 гг.) установили, что характер нарастания вязкости материалов при переходе «жидкость - стекло» (индекс фрагильности) определяется степенью направленности межатомного взаимодействия, которое может быть количественно охарактеризовано отношением объемного и сдвигового модулей упругости (отношением Пуассона). Полученные результаты подтверждают справедливость развитых нами ранее модельных представлений о том, что амплитуду бозонного пика и индекс фрагильности определяют неоднородности на нанометровых масштабах. Структура нанонеоднородностей зависит от типа связей: стекла с ковалентными направленными связями (сильные стекла) на наномасштабах похожи на своих кристаллических прародителей, в них преобладают колебательные возбуждения и регистрируется мощный бозонный пик, в то время как в стеклах с ненаправленными связями (ионными или Ван-дер-Ваальсовскими) преобладающим типом атомного движения является релаксация, а амплитуда бозонного пика мала (фрагильные стекла).

Удивительное открытие в 2001 - 2003 гг. сделано в физике кристаллов (Суровцев Н.В., Малиновский В.К.). Кристаллы фуллерита состоят из молекул фуллерена и при некоторой температуре переходят из кристаллической фазы в фазу пластического кристалла: молекулы фуллерена занимают правильные кристаллические позиции, но их ориентация становится случайной и изменяющейся во времени. Мы обнаружили, что на частотах более высоких, чем характерные частоты вращения молекул, фуллерит ведет себя как неупорядоченное твердое тело: в терагерцовой области появляется избыточная по сравнению с дебаевской плотность состояний. Такое возможно, когда в каждый момент времени существуют кластеры из молекул с упорядоченной взаимной ориентацией. Из наших измерений получено, что размер таких ориентационно упорядоченных кластеров составляет около 4 нм. В отличие от статического распределения нанокластеров в объеме,

характерного для обычных аморфных материалов, локальный порядок в фуллерите - динамический и не проявляется на больших временах (более 10^{-11} сек).

Открытое явление в корне меняет представление об элементарных актах ориентационного движения в пластических кристаллах и жидкостях: на молекулярном уровне осуществляется скоррелированное изменение взаимной ориентации ансамбля молекул, а не индивидуальное вращение.

Наступила очередь проверки фундаментальных теорий, описывающих фазовые переходы в кристаллах. Суровцев Н. В., Пугачев А. М., Кузнецов А. Г. (2002 - 2005 гг.) впервые в широком температурном интервале получили релаксационные спектры сегнетоэлектрических кристаллов LiTaO_3 и LiNbO_3 . Установлено, что релаксационная восприимчивость следует предсказаниям теории Ландау - Гинзбурга - Девоншира только в узком температурном

диапазоне $\frac{T - T_c}{T_c} \leq 0,1$. За

пределами этого интервала температур коллективные флуктуации параметра порядка (спонтанной поляризации), которые рассматриваются в теории Ландау - Гинзбурга - Девоншира как основа для описания фазового перехода, играют меньшую роль по сравнению с локальными флуктуациями.

Так, из такой сугубо практической задачи, как создание новых фоточувствительных композиций, мы пришли к кардинальным выводам о структуре неупорядоченных твердых тел и жидкостей на нанометровых масштабах. Значимость этих результатов особенно велика в свете большого интереса в настоящее время к нанотехнологиям и возможностям создания наноструктур.

Многое осталось, как говорят, за кадром. Это и большая деятельность по фотогальваническому эффекту в средах без центра симметрии (работа «Фотогальванический эффект и оптическая память в кристаллах без центра симметрии» - лауреат конкурса фундаментальных работ СО РАН 1984 г., авторы: Нестерихин Ю.Е., Белиничер В.И., Канаев И.Ф., Малиновский В.К., Стурман Б.И.), цикл работ по силленимам и эвлитинам (Монография «Фотоиндуцированные явления в силленимах» авторы: Малиновский В.К., Гудаев О.А., Гусев В.А., Деменко С.И.), большой цикл работ по фуллеренам (Гудаев О.А., Трещихин В.А., Суровцев Н.В. и др.).

Сотрудники лаборатории подготовили много дипломников НГУ и НЭТИ. За прошедшие годы в лаборатории выросли 13 кандидатов и 7 докторов наук.