

На пути к «архитектуре доменов»

Развитие нанотехнологий инициируется прежде всего стремлением к дальнейшей миниатюризации электронных приборов. Важное место среди таких задач принадлежит созданию новых носителей цифровой информации, обеспечивающих более плотную запись и длительное хранение данных. Перспективные кандидаты на эту роль – сегнетоэлектрические материалы. Подобно привычным магнитным носителям, в которых информация кодируется намагниченностью доменов, в сегнетоэлектриках информационным элементом тоже служит домен с определенным направлением момента, но уже не магнитного, а дипольного (электрического) – вектора поляризации. Если научиться получать регулярные структуры из сегнетоэлектрических доменов на микро- и наноскопическом уровне – строить «доменную архитектуру», – можно рассчитывать на запись информации с плотностью до 100 Гб/см². Такие материалы пригодятся и в области нелинейной оптики – для целей, связанных с преобразованием частот лазерного излучения.

При проведении таких изысканий атомно-силовая микроскопия (АСМ) оказывается вне конкуренции. Помимо обеспечения требуемого пространственного разрешения при исследованиях, АСМ позволяет локально воздействовать на поверхность. Именно зонд микроскопа, к которому прикладывается напряжение, становится тем инструментом, что создает доменную структуру с масштабом порядка радиуса зонда и изменяет поляризацию доменов. Но при изучении поверхности сегнетоэлектриков методом АСМ есть и свои сложности. Поскольку на движении зонда сказываются не только межмолекулярные силы, но и электростатическое взаимодействие, изображение формируется со смешанным контрастом. Нужно правильно разделять вклады в контраст со стороны топографического и «электрического» рельефов поверхности. Разработать методологию исследований удобнее на модельном объекте, роль которого с успехом играет хорошо изученный кристалл триглицинсульфата (ТГС). Он обладает спайностью по плоскости (010), перпендикулярной сегнетоэлектрической оси, при комнатной температуре находится в сегнетофазе, и домены имеют легко узнаваемую линзовидную и полосчатую форму.

В Секторе сканирующей зондовой микроскопии ИК РАН поверхность (010) естественного скола кристалла ТГС была изучена с помощью микроскопа Solver P47-SPM-MDT (НТ-МДТ) в контактном режиме (топография, боковые силы, отображение сопротивления растекания), прерывисто-контактном (топография, фазовый контраст), а также методами сканирующей микроскопии Кельвина, электростатической силовой

микроскопии и микроскопии пьезоотклика. Чтобы получить разноплановую информацию о микро- и нанорельефе и электростатической неоднородности поверхности, проводилась прицельная съемка одних и тех же участков в различных режимах работы с использованием микрозондов разного типа, рис.1, 2. Сопоставление изображений позволяет не только уверенно отделять друг от друга впадины в контраст рельефа поверхности и доменной структуры, но и распознавать реально существующие домены (способные к переполяризации) и морфологически схожие области «памяти» доменов. Эти области – «следы» доменов, существовавших ранее и трансформировавшихся в участки с электрически неоднородной объемной структурой; при расколе кристалла они могут фиксироваться на поверхности в виде линзовидных образований. Реально существующие в момент сканирования – «живые» – домены имеют противоположный знак заряда поверхности по отношению к матрице, в которой они расположены. Для областей «памяти» доменов знаки зарядов области и матрицы могут быть и одинаковы, но существует разница в абсолютной величине потенциала. Отличить «живые» домены от областей «памяти» легче всего с помощью сканирующей микроскопии Кельвина или микроскопии пьезоотклика, когда сигнал, формирующий изображение, отражает знак заряда поверхности, рис. 2,а,б. Электростатическое изображение фиксирует только факт смены знака, обладая контрастом лишь на границе домена, рис. 2,в. На топографических изображениях «живые» домены выявляются в прерывисто-контактном режиме, тогда как контактный режим способен обнаружить лишь области «памяти», рис.1. Как нам удалось установить, конфигурация реально существующих доменов может быть установлена также в режиме отображения сопротивления растекания, так как их границы обладают аномально высокой проводимостью.

Теперь, вооружившись надежными алгоритмами распознавания различных элементов сегнетоэлектрической поверхности и определения их характеристик, можно обратиться к задаче поиска среды – строительного материала для «архитектуры доменов». К сожалению, столь удобный в исследованиях триглицинсульфат не позволяет достаточно долго сохранять конфигурацию доменов. Подходящими характеристиками обладают ниобат и танталат лития, но эти кристаллы требуют очень высоких электрических полей для переполяризации (более 200 кВ/см), что создает технологические трудности. Многообещающими кандидатами выглядят кристаллы твердых растворов окислов ниобия-бария-стронция (НБС) – они имеют хорошую лучевую стойкость, высокие значения нелинейной восприимчивости и низкие коэрцитивные поля порядка 1-2 кВ/см, достижимые в стандартных приборах АСМ. И

действительно, нам удалось впервые произвести запись микродоменов в сегнетоэлектрических кристаллах НБС при помощи АСМ, рис.3. В выбранной точке поверхности к острию прикладывалось постоянное напряжение с заданными амплитудой из диапазона 1-10 В и длительностью импульса, после чего в режиме микроскопии пьезоотклика проводилось исследование данного участка поверхности. В ходе работы были установлены важные закономерности – как площадь доменов зависит от величины напряжения и времени его приложения, какова кинетика распада доменов после выключения поля. Характеристики динамики доменных стенок оказались неклассическими, что связано с неоднородным пространственным распределением поля зонда. В результате проведенной работы было доказано: кристаллы НБС – в самом деле перспективный объект для записи доменов на микро- и наноскопическом уровнях в полях зонда АСМ. Нам удалось реализовать запись регулярной доменной структуры с периодом 10 мкм, причем был обнаружен эффект увеличения времени хранения информации с уменьшением периода, что важно с практической точки зрения. Таким образом, мы предлагаем технологию получения поверхностной регулярной доменной структуры на базе НБС, которая послужит прототипом для дальнейших разработок «доменной архитектуры».

А.Л.Толстихина

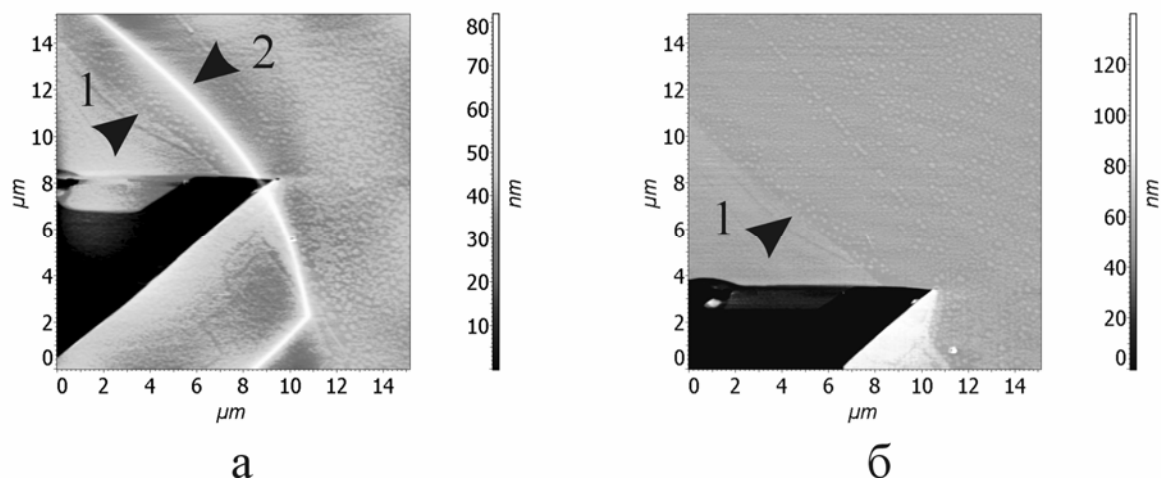


Рис.1. Топографические изображения одного и того же участка полярной поверхности скола ТГС, полученные в прерывисто-контактном (а) и контактном (б) режимах. В левой части обоих рисунков присутствует характерная остроугольная впадина, которая образовалась при расколе кристалла. Указаны границы реально существующего линзовидного домена (стрелка 2) и область «памяти» домена (стрелка 1). В прерывисто-контактном режиме доменные границы выявляются в виде ярких линий за счет дополнительного вклада электростатической компоненты силы. В контактном режиме доменная граница, вблизи которой отсутствует перепад высот, не видна.

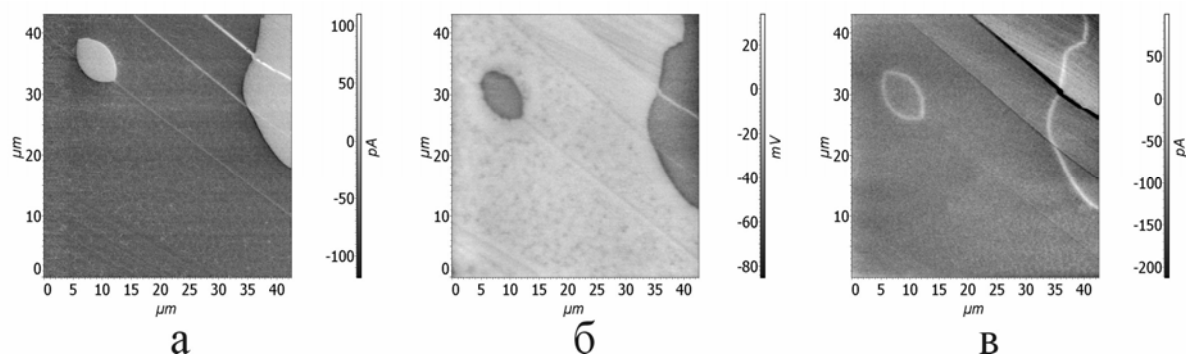


Рис.2. Изображения одного и того же участка полярной поверхности кристалла ТГС с реально существующими доменами, полученные методами микроскопии пьезоотклика (а), сканирующей микроскопии Кельвина (б), электростатической силовой микроскопии (в).

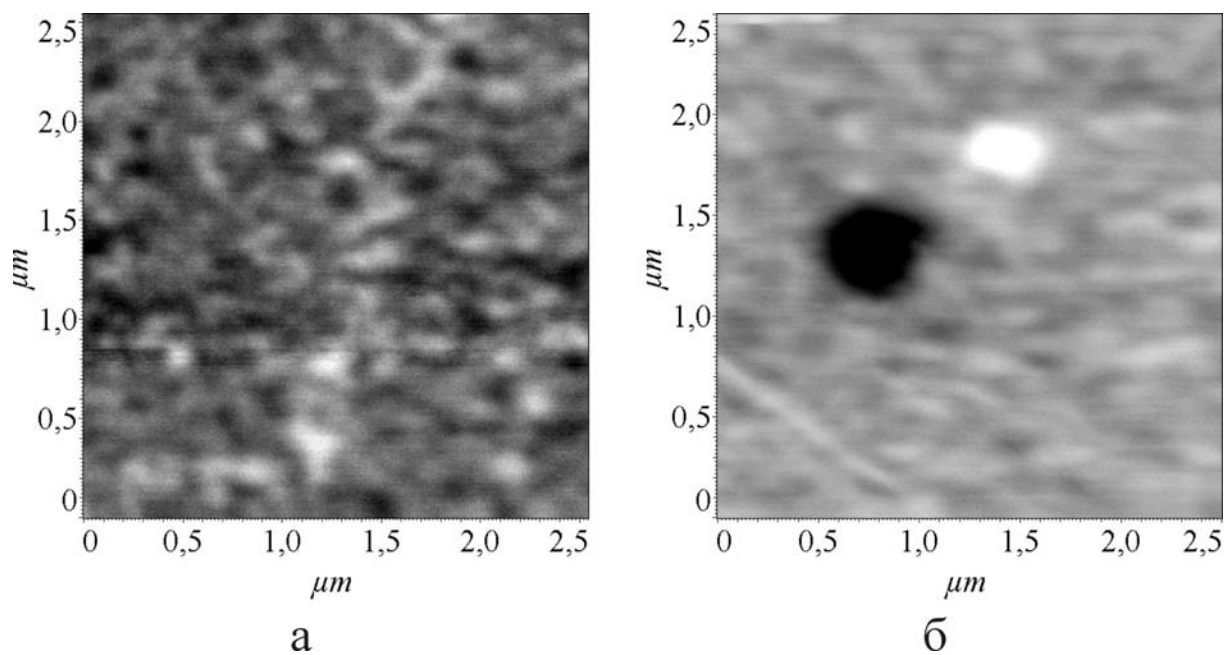


Рис.3. Исходное распределение поверхностного потенциала в полидоменном кристалле НБС (а) и изображение доменов, созданных в двух точках поверхности приложением к зонду напряжения ± 9 В в течение 5 минут (б). Различие площадей записанных доменов связано с исходной ориентацией поляризации в выбранных точках.