

Природа фрактальных образований на поверхности сегнетоэлектрических кристаллов с размытым фазовым переходом

© В.А. Исупов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступила в Редакцию 2 октября 1997 г.)

Обсуждается природа поверхностных фрактальных образований, обнаруженных при изучении малоуглового рассеяния света у сегнетоэлектрических перовскитов типа магнониобата свинца. Предполагается, что такие образования могут быть связаны со спиральными ступеньками роста на гранях кристаллов.

В работе [1] при исследовании кристаллов цинкониобата свинца $PbZn_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ (PZN), сегнетоэлектрика с размытым фазовым переходом, было обнаружено, что интенсивность малоуглового рассеяния света проходит через максимум вблизи $103^\circ C$ (несколько ниже температуры Кюри, приблизительно равной $140^\circ C$). Максимум наблюдался в тех случаях, когда кристаллы, поляризованные сильным электрическим полем (выше $20 kV/cm$) при охлаждении, нагревались в том же поле. Позднее аналогичное поведение было обнаружено также у кристаллов $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ (PMN) [2], $PbSc_{0.5}Nb_{0.5}O_3$ (PSN) [3] и $PbSc_{0.5}Ta_{0.5}O_3$ (PST) [4]. Все это сегнетоэлектрики с размытым фазовым переходом, подобные PMN — наиболее изученному сегнетоэлектрику этой группы. Максимумы рассеяния связываются авторами с перколяционными процессами, имеющими место при размытых фазовых переходах, где происходит слияние полярных областей под действием электрического поля и образование так называемого макродоменного состояния, а также процесс распада этого состояния при нагревании. Уже в работе [1] отмечается, что рассеивающая структура находится на поверхности кристалла, имеет микронные масштабы и является фрактальным объектом.

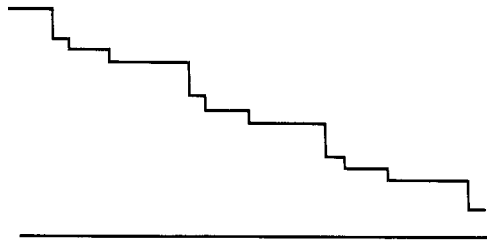
При исследовании интенсивности рассеяния I от угла рассеяния θ в случае кристалла PST с различной степенью упорядочения ионов скандия и тантала было найдено, что независимо от степени этого упорядочения при построении графиков зависимости $\lg I$ от $\lg \theta$ точки ложатся на прямую с наклоном $\alpha = 3.2$ [4]. Основываясь на этом, авторы делают вывод о том, что пространственно неоднородная структура фрактальна, по крайней мере в интервале размеров от 20 до $0.6 \mu m$, а не состоит из случайно расположенных трехмерных неоднородностей конечного масштаба (по-видимому, имеется в виду, что эта структура не состоит из скоплений хаотически расположенных полярных областей, характерных для размытых фазовых переходов в упомянутых веществах). Полученные авторами [4] результаты подтвердили сделанный ранее в [1–3] вывод о том, что рассеивающая структура относится к классу поверхностных фракталов. В качестве возможных кандидатов на роль таких фракталов предлагаются доменные и (или) межфазные границы. Появление фрактальности в расположении этих границ авторы связывают с пиннингом на дефектах.

К сожалению, многое остается непонятным. Во-первых, не ясно, появляется ли эта рассеивающая структура при температуре, близкой к температуре максимума $I(T)$, или же она существует при всех температурах, а проявляет себя в малоугловом рассеянии только при температуре максимума $I(T)$. Во-вторых, в случае пиннинга на дефектах периодичность и фрактальность доменных или межфазных границ могут существовать лишь в том случае, если имеются периодичность и фрактальность в структуре расположения дефектов. Данная работа имеет целью предложить вариант объяснения периодичности и фрактальности поверхностных дефектов на гранях кристаллов рассматриваемых сегнетоэлектриков.

Естественно, что все исследования малоуглового рассеяния, выполненные в работах [1–4], проведены на кристаллах. Это значит, что в процессе роста кристаллов при высоких температурах на их поверхности образовались и существуют при низких температурах ступеньки роста, расположенные спиралеобразно вокруг винтовых дислокаций. Очевидно, что каждую из этих ступенек можно рассматривать как поверхностный дефект. (При рассмотрении таких спиралеобразных ступенек роста обычно считают, что ширина всех ступенек одинакова, хотя, если говорить строго, в ширине разных ступенек есть некоторые отличия, и можно говорить только о средней величине этой ширины). Существование спиральных ступенек роста дает нам право говорить о периодичности в расположении этих поверхностных дефектов решетки. Периодичность осуществляется также в источниках Франка–Рида [5].

Ясно, что само наличие спиральных ступенек роста еще не обеспечивает фрактальности (фрактальной иерархии). Тем не менее в случае этих объектов (и источников Франка–Рида) иерархия имеется: по мере приближения к винтовой дислокации размер витков уменьшается. Это позволяет поставить вопрос: не может ли эта иерархия подменить фрактальную иерархию в малоугловом рассеянии света? Ответ на этот вопрос могут дать только теоретики.

Принято считать ступеньки гладкими, однако возможно, что это только упрощение. Если же допустить, что в результате взаимодействия винтовой дислокации с какими-либо дефектами решетки на крупной ступеньке



Схематическое изображение нескольких ступенек роста в их поперечном сечении.

могут появляться мелкие (т.е. низкие), но также спиралеобразные ступеньки, то можно ожидать, что соотношение ширин мелких ступенек будет одинаковым на каждой крупной ступеньке (см. рисунок). Это позволило бы говорить о фрактальной иерархии ступенек в определенном интервале размеров, а стало быть о фрактальности поверхностных дефектов. Однако сделанное предположение требует подробного изучения структуры ступенек роста.

Ступеньки роста как поверхностные дефекты могут осуществлять пиннинг доменных или межфазных границ. Более того, можно предположить, что они могут содействовать образованию доменных стенок.

Понятно, что при исследовании рассеяния света используются кристаллы с полированными гранями. Тогда спиралеобразные ступеньки роста сошлифованы и отсутствуют. Однако это не уничтожает их следов в кристалле. Винтовая дислокация сохраняется, так что остаются, так сказать, "подвальные этажи" витков спирали, а это значит, что спиралеобразные поверхностные дефекты сохраняются (по мере движения вдоль витка меняется высота "подвальных этажей"). На этих дефектах (периодических и по-своему иерархических) также может осуществляться пиннинг межфазных и доменных границ, о котором говорится в [4]. Следует отметить, что при этом масштабы хорошо соответствуют тем, которые найдены в [4].

В целом явление можно представить так. При охлаждении кристалла с размытым сегнетоэлектрическим фазовым переходом в сильном электрическом поле накапливающиеся при охлаждении полярные области размером в несколько нанометров сливаются и образуется один макродомен, простирающийся через весь кристалл. При нагревании в этом же поле в макродоме увеличивается число неполярных областей, "разбавляющих" полярную фазу в макродоме. При некоторой температуре на ступеньках (которые способствуют образованию доменных стенок в поверхностном слое) застревают или образуются доменные стенки, что содействует разбиению единственного макродомена на множество доменов размером в микроны. Этой температуре и соответствует максимум малоуглового рассеяния. При дальнейшем нагревании в этих доменах появляется все больше неполярных областей, "разбавляющих" полярную фазу

в имеющихся доменах и уменьшающих ее анизотропию. При этом роль доменных стенок все время уменьшается и рассеяние падает.

Таким образом, предполагается, что фрактальная (или родственная фрактальной) структура поверхности (в микронных масштабах) создается спиралеобразными ступеньками роста (или их "подвальными этажами"), существующими на поверхности кристалла при всех температурах, но проявляющими себя в малоугловом рассеянии только вблизи температуры распада макродоменного состояния, т.е. несколько ниже средней температуры Кюри размытого сегнетоэлектрического фазового перехода. Было бы полезно перед подготовкой кристаллов типа РМН к исследованию малоуглового рассеяния изучать строение спиралеобразных ступенек роста на их гранях.

Список литературы

- [1] Л.С. Камзина, Н.Н. Крайник, А.Л. Корженевский. Письма в ЖЭТФ **56**, 10, 532 (1992).
- [2] Л.С. Камзина, Н.Н. Крайник, О.Ю. Коршунов. ФТТ **37**, 9, 2765 (1995).
- [3] Л.С. Камзина, А.Л. Корженевский, О.Ю. Коршунов. ФТТ **36**, 2, 479 (1994).
- [4] А.Л. Корженевский, Л.С. Камзина, О.Ю. Коршунов. Письма в ЖЭТФ **61**, 3, 214 (1995).
- [5] Ч. Киттель. Введение в физику твердого тела. Наука, М. (1978). 792 с.