

ELECTRIC CRYSTALS

S. A. GRIDNEV

This article discusses whether or not an electric analog for permanent magnets exists. It also discusses the question whether there are any dielectric materials with spontaneous polarization which could create an electric field in its surroundings. The unusual electric properties of such materials as piezoelectrics, pyroelectrics and ferroelectrics, and methods of their manufacturing and their different uses are discussed.

Существуют ли электрические аналоги постоянных магнитов – спонтанно поляризованные диэлектрики, которые создают в окружающем пространстве электрическое поле? Ответ на этот и другие вопросы можно найти в данной статье, где речь идет о материалах с исключительно интересными электрическими свойствами: пьезоэлектриках, пироэлектриках и сегнетоэлектриках и особенностях их применения.

© Гриднев С.А., 1996

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КРИСТАЛЛЫ

С. А. ГРИДНЕВ

Воронежский государственный технический университет

ВВЕДЕНИЕ

Нас окружает огромный мир разнообразных материалов, без которых невозможно представить себе ни жизнь отдельного человека, ни успешное развитие всего общества. Широкое использование на практике новых материалов всегда приводило к более быстрому прогрессу в создании орудий труда, разработке предметов быта, новой техники и обычно характеризовало уровень цивилизации общества. Недаром целые этапы в жизни общества связаны с названиями материалов: каменный век, бронзовый век, железный век и т.д. Да и в более позднее время именно материалы (полупроводники, сверхпроводники, магнитные и диэлектрические материалы) стали ключевым звеном, определяющим успехи в космической технике, электронике, атомной технике и др.

Потребности современной техники (компьютерные информационные сети, спутниковая радиосвязь и телевидение, оптоволоконные линии передачи информации и пр.) стимулируют поиск, открытия и исследования новых материалов с улучшенными или новыми свойствами или их сочетаниями. Всем этим занимается наука, которая называется физическим материаловедением и которая является частью физики твердого тела. Не удивительно поэтому, что примерно половина всех физиков планеты работает в различных областях физики твердого тела, а половина всех научных публикаций в области физики посвящена проблемам физики твердого тела. Это значит, что физика твердого тела и физическое материаловедение составляют половину всей современной физики!

Вот почему более или менее основательное знакомство с достижениями физики твердого тела стало теперь необходимым не только научным работникам, но и любому современному человеку.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Любой диэлектрик, помещенный в электрическое поле, поляризуется: в нем под действием поля происходят процессы смещения или перемещения электрических зарядов. Поскольку заряды разных знаков смещаются в поле в противоположных направлениях, то происходит пространственное разделение зарядов, которое приводит к возникновению электрических диполей. Простейший диполь представляет собой два равных по величине, но противоположных по знаку точечных заряда q , расположенных на расстоянии r друг от друга.

Электрический момент диполя d называется дипольным моментом:

$$d = qr. \quad (1)$$

Дипольный момент d есть вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному и численно равный произведению qr .

В диэлектрике находятся разные электрические заряды, которые в электрическом поле создают различные типы диполей. Если просуммировать все дипольные моменты, то полученная величина будет характеризовать степень поляризованности диэлектрика. В качестве такой величины используют параметр P , который называют поляризацией. Чтобы величина P не зависела от размеров образца, берут удельную величину — суммарный дипольный момент единицы объема V материала:

$$P = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n d_i. \quad (2)$$

Нетрудно убедиться, что поляризация P измеряется в кулонах на m^2 (Кл/ m^2). Из формулы (2) видно, что для численного определения P необходимо найти полную сумму всех отдельных дипольных моментов. Это задача чрезвычайно трудная.

В ряде случаев гораздо удобнее рассматривать поляризованный образец диэлектрика не как совокупность большого числа простейших диполей, а как один большой эквивалентный диполь с зарядами разного знака на противоположных гранях образца. Величину эквивалентного дипольного момента системы зарядов в образце при таком подходе можно рассчитать как произведение суммарного заряда одного знака на расстояние между “центрами тяжести” положительных и отрицательных зарядов:

$$d = R \sum_{i=1}^n q_i^+, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots$ — индекс суммирования,

$$R = \frac{\sum_i q_i^+ r_i^+}{\sum_i q_i^+} - \frac{\sum_i q_i^- r_i^-}{\sum_i q_i^-}. \quad (4)$$

Очевидно, что если в отсутствие внешнего электрического поля в элементарной ячейке кристалла “центры тяжести” всех положительных и отрицательных зарядов совпадают, то есть $R = 0$, то все дипольные моменты такой структуры равны нулю и эквивалентный дипольный момент также равен нулю. Кристаллы подобного типа называются бездипольными. С симметричной точки зрения такие кристаллы должны обладать центром симметрии. В отличие от них дипольными называются такие кристаллы, в которых имеется асимметрия в распределении электрических зарядов из-за несовпадения

центров тяжести положительных и отрицательных зарядов, а стало быть, есть дипольные моменты.

В соответствии с типом создаваемого дипольного момента поляризацию P можно представить в виде суммы четырех составляющих, каждой из которых присущ свой механизм возникновения:

$$P = P_{эл} + P_{ион} + P_{ор} + P_{миг}. \quad (5)$$

Электронная поляризация $P_{эл}$ возникает в атомах в результате смещения электронного облака относительно положительно заряженных ядер. Ионная поляризация $P_{ион}$ возникает в связи со смещениями противоположно заряженных ионов из своих положений при воздействии электрического поля. Если диэлектрик содержит постоянные диполи, которые в нормальном состоянии беспорядочно ориентированы, а под действием поля приобретают преимущественную ориентацию, то возникает ориентационная поляризация $P_{ор}$. Четвертая составляющая — миграционная поляризация $P_{миг}$ — является результатом накопления электрического заряда в местах неоднородностей диэлектрика с низким удельным сопротивлением. Во всех перечисленных случаях диэлектрик в целом, макроскопически, оказывается поляризованным, причем чем больше напряженность электрического поля E , тем больше поляризация вещества:

$$P = \epsilon_0 \chi E. \quad (6)$$

Здесь χ — диэлектрическая восприимчивость, характеризующая способность вещества к электрической поляризации, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная.

Для многих диэлектриков χ является величиной постоянной, не зависящей от E . В этом случае наблюдается однозначная линейная зависимость P от E , а после снятия внешнего электрического поля поляризация диэлектрика становится равной нулю. Такие диэлектрики называются линейными, а поляризация — индуцированной поляризацией. В отличие от них диэлектрики, в которых χ зависит от поля E , а значит, зависимость между P и E не является линейной, называются нелинейными диэлектриками.

СПОНТАННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ

Ученые давно уже задавались вопросом: нельзя ли получить такой материал, в котором электрическая поляризация создавалась бы не под действием поля E , а возникала самопроизвольно (спонтанно) и существовала в отсутствие внешнего электрического поля? Тем более, что магнитные материалы со спонтанной намагниченностью (ферромагнетики) хорошо известны, и представление о постоянном магните стало вполне привычным. А могут ли существовать электрические аналоги постоянных магнитов — постоянные “поляриты”, то есть материалы, которые создавали бы в окружающем их пространстве электрическое поле, так же как создает его заряженный электрический конденсатор? На

основе формальных аналогий между намагниченностью и электрической поляризацией, казалось бы, нельзя ожидать, что в природе найдутся материалы, обладающие спонтанной электрической поляризацией, поскольку возникновение ферромагнетизма связано с упорядочением в расположении элементарных магнитных моментов электронов, в то время как частицы, из которых состоят диэлектрики (электроны, протоны), не имеют элементарных электрических моментов — диполей. Тем не менее материалы со спонтанной электрической поляризацией в природе далеко не редкость, хотя о них известно гораздо меньше, чем о ферромагнетиках.

Несмотря на то, что в диэлектриках нет заранее заготовленных элементарных диполей отдельных частиц, электрическую поляризацию можно получить посредством упорядоченного расположения заряженных частиц противоположных знаков — диполей. Если в структуре диэлектрика имеются такие электрические диполи, обусловленные смещениями электронных оболочек или ионов друг относительно друга и, кроме того, если диполи ориентированы в одном направлении, то кристалл будет спонтанно поляризованным.

Различают два типа спонтанно поляризованных диэлектриков: пироэлектрики и сегнетоэлектрики.

Пироэлектрики — это кристаллические диэлектрики, обладающие спонтанной электрической поляризацией во всей температурной области существования кристалла вплоть до температуры плавления. Электрические диполи всех элементарных ячеек кристалла ориентированы в одном направлении. Изменить это направление внешним полем невозможно без разрушения кристаллической структуры, поскольку асимметричное расположение ионов в элементарной ячейке, ответственное за спонтанную поляризацию, возникает в момент образования кристалла при его выращивании. По этой причине в пироэлектриках поляризация P линейно зависит от величины поля E , то есть пироэлектрики являются линейными диэлектриками.

В отличие от пироэлектриков, в сегнетоэлектриках спонтанно поляризованное состояние существует в ограниченной области температур, оно исчезает при некоторой критической температуре, называемой точкой Кюри. К характерным особенностям сегнетоэлектрика относится его фундаментальное свойство, заключающееся в том, что направление спонтанной поляризации в полярной фазе может быть изменено внешним электрическим полем. Поскольку восприимчивость χ сегнетоэлектриков зависит от величины поля E , то зависимость между P и E нелинейная и, значит, сегнетоэлектрики — это нелинейные диэлектрики.

Из изложенного выше следует, что понятие “пироэлектрик” является более общим, чем “сегнетоэлектрик”. Можно сказать, что сегнетоэлектрики есть пироэлектрики с реориентируемой внешним полем поляризацией.

Таким образом, казалось бы, можно считать, что кристаллы со спонтанной электрической поляризацией являются электрическими аналогами магнитных кристаллов, обладающих спонтанной намагниченностью. Заряды на металлизированных поверхностях сегнетоэлектриков и пироэлектриков, обусловленные спонтанной поляризацией, создают в окружающем пространстве внешнее электрическое поле — формально мы имеем электрический аналог постоянного магнита. Однако на этом аналогия кончается. Не говоря уж о разной природе спонтанно поляризованного и спонтанно намагниченного состояний, есть и другие различия. Внешнее электрическое поле, создаваемое полярными кристаллами, не может существовать сколь угодно долго, так как довольно быстро связанные заряды спонтанной поляризации на поверхности кристаллов оказываются скомпенсированными свободными зарядами, имеющимися в атмосфере или в объеме кристалла.

Направление, вдоль которого в кристалле возникает электрическая поляризация, называется полярным направлением, или полярной осью. По наличию или отсутствию в кристаллах полярных направлений все кристаллы можно разделить на три группы: неполярные, полярные и полярно-нейтральные кристаллы.

Дипольные кристаллы полярных и полярно-нейтральных классов могут иметь одну или несколько полярных осей и, следовательно, обладать особыми электрическими свойствами, поэтому их называют электрическими кристаллами. К электрическим кристаллам тесно примыкают также некоторые анизотропные диэлектрические некристаллические среды, которые имеют свойства, сходные со свойствами электрических кристаллов: это электроеты, пьезокерамические материалы, пироэлектрические полимеры. Их можно объединить в одну общую группу: материалы с метастабильной электрической поляризацией.

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

Немного истории

Центральное место среди электрических кристаллов принадлежит сегнетоэлектрикам. Наука о сегнетоэлектричестве сравнительно молода, правда, необычные электрические свойства некоторых диэлектриков наблюдались давно, задолго до того, как в науку был введен термин “сегнетоэлектричество”.

Около двухсот лет тому назад Франц Эпинус заметил, что драгоценный камень турмалин становится электрически заряженным (электризуется) при нагревании, что изменение температуры поляризует турмалин примерно так же, как внешнее электрическое поле поляризует диэлектрик. В турмалине и многих других кристаллах (даже кристаллах обычного сахара) тепловое воздействие вызывает электрический эффект, который теперь называется пироэлектрическим.

В 1880 году братья Пьер и Жак Кюри открыли еще один любопытный эффект, присущий многим кристаллам. Оказалось, что, например, кристаллы кварца и сегнетовой соли можно электрически поляризовать с помощью механического давления. При сдавливании или растяжении определенным образом вырезанных пластинок таких кристаллов на их поверхности появляется электрический заряд. Этот эффект получил название пьезоэлектрического от греческого слова “пьеzo”, означающего “давить”.

Однако и пьезоэлектрический, и пьезоэлектрический эффекты сначала рассматривали лишь как курьезные и любопытные физические явления. В то время о сегнетоэлектриках ничего не было известно и даже не было ясно, может ли быть электрический аналог ферромагнетиков. Термин “сегнетоэлектричество” происходит от названия кристалла “сегнетова соль”, имеющего формулу $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, в котором в 1921 году чешский ученый Дж. Валашек впервые обнаружил нелинейные электрические свойства, аналогичные нелинейным магнитным свойствам ферромагнетиков. По-видимому, от этой даты и следует отсчитывать начало науки о сегнетоэлектричестве. Большой вклад в развитие физики сегнетоэлектриков внес русский физик И.В. Курчатова. Он создал в 30-х годах первую теорию сегнетоэлектричества, да и сами термины “сегнетоэлектрики” и “сегнетоэлектричество” были введены И.В. Курчатовым. В сороковых годах Г. Буш и П. Шерер открыли сегнетоэлектрические свойства кристалла дигидрофосфата калия KH_2PO_4 , явившегося родоначальником большой группы родственных кристаллов с такой же структурой.

Мощный толчок развитию основных представлений о природе сегнетоэлектричества дало открытие в 1945 году советскими учеными Б.М. Вулом и И.М. Гольдманом представителя нового класса сегнетоэлектриков – титаната бария BaTiO_3 . Далее развитие этой области науки шло быстрыми темпами: на основе теоретических представлений, созданных трудами В.Л. Гинзбурга (СССР), А.Ф. Девоншира (Англия), Дж.С. Слейтера (США), В. Кокрена (Англия) и др., предлагались эксперименты, которые в свою очередь подтверждали теории. Успехи следовали один за другим, и это позволило создать новую область физики твердого тела. Благодаря работам многих коллективов ученых в разных странах (России, США, Англии, Японии, Чехословакии и др.) было обнаружено большое число новых сегнетоэлектриков с различными структурами и разным химическим составом. В настоящее время известно уже несколько сотен сегнетоэлектриков, то есть они представляют собой обширный класс полярных веществ.

Особенности сегнетоэлектрических кристаллов

Интерес к сегнетоэлектрическим материалам не случаен. Во многом он определяется тем особым положением, которое занимают сегнетоэлектрики среди других диэлектрических кристаллов. Среди

32 кристаллических классов есть 20 классов (полярные и полярно-нейтральные кристаллы), которые поляризуются под действием механических напряжений, то есть являются пьезоэлектриками. Из этих 20 классов кристаллов, без центра симметрии и имеющих полярные оси, можно выделить 10 классов, обладающих особенными полярными направлениями – пьезоэлектрические кристаллы. Сегнетоэлектрики – это подгруппа пьезоэлектриков с переключаемой внешним электрическим полем поляризацией. Таким образом, сегнетоэлектрики обязательно обладают пьезоэлектрическими и пьезоэлектрическими свойствами.

Суммируя изложенное выше, перечислим основные характерные особенности сегнетоэлектрических кристаллов:

- 1) наличие спонтанной поляризации P_s в определенном диапазоне температур, ограниченном температурой Кюри T_K (рис. 1);
- 2) нелинейная гистерезисная зависимость поляризации P от поля E (рис. 2);
- 3) диэлектрическая проницаемость ϵ в полярной фазе и вблизи T_K достигает огромных величин, вплоть до $10^4 - 10^5$ (рис. 3);
- 4) величина диэлектрической проницаемости ϵ сильно зависит от напряженности электрического поля E (рис. 4).
- 5) наличие доменной структуры при температурах ниже T_K ;
- 6) высокие значения пьезоэлектрических коэффициентов;
- 7) большие величины пьезоэлектрических модулей.

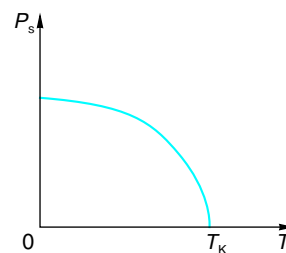


Рис. 1. Зависимость спонтанной поляризации P_s от температуры T вблизи точки Кюри T_K сегнетоэлектрика.

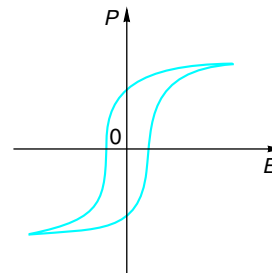


Рис. 2. Петля диэлектрического гистерезиса $P(E)$.

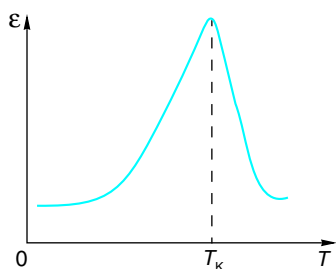


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ сегнетоэлектрика от температуры T . Точка соответствует точке Кюри T_K .

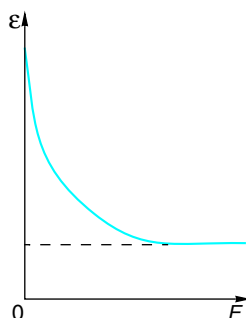


Рис. 4. Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ сегнетоэлектрика от величины приложенного электрического поля E .

Домены

К фундаментальным особенностям сегнетоэлектриков относится их способность в полярной фазе (ниже точки Кюри) разбиваться на большое число крошечных областей с постоянной, возникающей самопроизвольно электрической поляризацией, называемых доменами. Однако при обычных условиях направления поляризации в отдельных доменах различны, и поэтому во всем образце дипольные моменты доменов компенсируют друг друга и суммарная поляризация равна нулю. Образец становится поляризованным лишь после того, как внешнее электрическое поле выстроит домены в определенном направлении.

Домены отделены друг от друга доменными стенками — переходными областями, в которых электрические дипольные моменты изменяют свое направление, характерное для одного домена, на направление в другом.

Что управляет образованием и структурой доменов? Если бы образец сегнетоэлектрика был полностью поляризован и представлял собой один большой домен, то он создавал бы сильное внешнее поле, направленное противоположно поляризации и называемое деполяризующим полем (рис. 5а).

Разделение сегнетоэлектрика на домены приводит к уменьшению деполяризующего поля. Если, например, образец сегнетоэлектрика состоит из двух доменов с противоположно направленной по-

ляризацией (рис. 5б), то требуемая энергия была бы намного меньше, чем в первом случае, однако она еще значительно больше возможного минимума. Можно представить себе еще более стабильную структуру, в которой имеется четыре противоположно поляризованных домена (рис. 5в). В результате деполяризующее поле существенно уменьша-

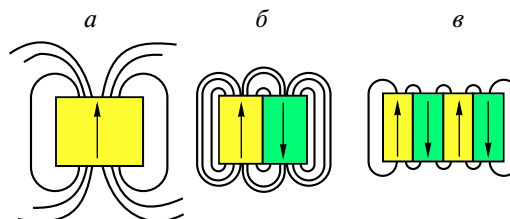


Рис. 5. Возникновение деполяризующего электрического поля и его последовательное уменьшение при разбивании кристалла на домены.

ется и деполяризации кристалла не происходит. Однако процесс разбиения на домены не может идти беспредельно, так как на образование доменных стенок, то есть границ между доменами, затрачивается определенная энергия. По-видимому, равенство энергии деполяризующего поля и энергии доменных стенок ставит предел дальнейшему разбиению образца на домены и определяет равновесный размер доменов.

Когда мы помещаем образец сегнетоэлектрика во внешнее электрическое поле, то в нем происходит перемещение доменных стенок, увеличивающее те домены, в которых направление спонтанной поляризации наиболее близко к направлению внешнего поля. Домены эти растут за счет доменов с менее выгодно ориентированным дипольным моментом, и последние сокращаются.

ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛЯРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Чтобы получить представление о возможностях и перспективах использования электрических материалов, уместно вспомнить их особенности и основные физические свойства: диэлектрические, пьезоэлектрические и оптические.

Высокая диэлектрическая проницаемость электрических материалов (100 – 20000) делает их весьма подходящими для использования в конденсаторах. Чаще всего в качестве материала используют сегнетокерамику на основе BaTiO_3 или $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$, так как они обладают малыми потерями, обеспечивают надежно воспроизводимые свойства и экономичны в изготовлении. Для получения конденсаторов очень большой емкости изготавливают многослойные структуры, состоящие из параллельно соединенных тонких слоев. Такой конденсатор, например, из 100 слоев, толщиной по 18 мкм каждый, обладает емкостью 2 – 5 мкФ.

Зависимость ϵ сегнетоэлектриков от величины электрического поля дает возможность создавать конденсаторы переменной емкости, управляемые приложенным напряжением; диэлектрические усилители; частотные модуляторы; перестраиваемые фильтры; умножители частоты и пр.

Пироэлектрические свойства сегнетоэлектриков обуславливают возможность их применения для регистрации тепловых потоков в широком спектральном интервале: от области далекого инфракрасного излучения до коротковолнового рентгеновского и γ -излучения. При поглощении лучистой энергии температура полярного материала повышается, вследствие чего изменяется спонтанная поляризация, то есть происходит изменение заряда на гранях кристалла и, следовательно, напряжения, которое затем регистрируется электронной схемой. Отсюда ясно, что пироприемники позволяют измерять как интенсивность падающего на них излучения, так и весьма малые изменения температуры. Промышленные образцы пирометров на кристаллах триглицинсульфата характеризуются разрешающей способностью $\sim 0,1^\circ\text{C}$ в диапазоне температур от -20 до 2000°C и позволяют проводить измерения на расстоянии от объекта.

Очень интересно применение пироэффекта в пироэлектрических видикопах — передающих электронно-лучевых трубках для получения двумерного теплового изображения как неподвижных, так и движущихся тепловых объектов.

Наиболее широко в промышленном масштабе производятся различные устройства, действие которых основано на **прямом и обратном пьезоэффектах**. Способность диэлектрика деформироваться под действием электрического поля (обратный пьезоэффект) используется, например, в различных звуковоспроизводящих устройствах (громкоговорители, наушники, будильники и электронные часы, звуковые платы в ЭВМ); излучателях ультразвука (гидроакустические локаторы, дефектоскопы, ванны для ультразвуковой очистки деталей); моторах для лазерных проигрывателей; позиционерах для подстройки СВЧ антенн, для автоматического фокусирования в фотоаппаратах, для точечных матричных принтеров; ультразвуковых сверлах и хирургических ножах и др. Широко используются также устройства на прямом пьезоэффекте: стереозвукосниматели, микрофоны, датчики быстропеременных давлений и акселерометры.

Большое значение начинают приобретать элементы и устройства, основанные на эффекте двойного преобразования: пьезоэлектрические фильтры, генераторы, трансформаторы, линии задержки, а также устройства на поверхностных акустических волнах (корреляторы, кодирующие и декодирующие устройства, волноводы, ответвители), медицинская диагностическая аппаратура и др.

Электрооптические и акустооптические свойства ряда сегнетоэлектриков, например LiNbO_3 , LiTaO_3 ,

KD_2PO_4 , успешно используются для создания оптических модуляторов и дефлекторов лазерного излучения.

В последние годы большое внимание уделяется различным **гибридным** структурам на основе сегнетоэлектриков: сегнетоэлектрик-люминофор, сегнетоэлектрик-полупроводник, сегнетоэлектрик-сверхпроводник и др., на которых автор не может остановиться подробнее. Однако даже из того, что сказано ранее, можно заключить, что электрические кристаллы являются, несомненно, перспективными материалами новой техники и заслуживают пристального к себе внимания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вот и закончилось краткое путешествие в мир материалов с интересными электрическими свойствами. Автор, увы, не мог рассказать подробно обо всем, было выбрано лишь немного, твердо установленное и хорошо изученное. К сожалению, остались в стороне те трудности и нерешенные проблемы, над которыми работает наука об электрических кристаллах в наши дни. Здесь и неполностью упорядоченные сегнетоэлектрики: кристаллы с несоизмерными фазами, со стеклоподобными состояниями, с сильно размытыми фазовыми переходами. Здесь и чрезвычайно важные вопросы сосуществования сегнетоэлектричества и ферромагнетизма, сегнетоэлектричества и сверхпроводимости, а также сегнетоэлектрических и сегнетоэластических явлений в кристаллах. Все это очень интересно! Поэтому для получения более подробной информации читателю следует обращаться к многочисленным книгам и статьям, в частности и к тем, которые приведены в списке литературы к этой статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смоленский Г.А., Крайник Н.Н. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. М.: Наука, 1968.
2. Желудев И.С. Электрические кристаллы. М.: Наука, 1969.
3. Струков Б.А. Сегнетоэлектричество. М.: Наука, 1979.
4. Барфут Дж., Тейлор Дж. Полярные диэлектрики и их применения / Пер. с англ. под ред. Л.А. Шувалова. М.: Мир, 1981.
5. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы / Пер. с англ. под ред. В.В. Леманова и Г.А. Смоленского. М.: Мир, 1981.
6. Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике. М.: Радио и связь, 1989.

* * *

Станислав Александрович Гриднев, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела Физико-технического факультета Воронежского государственного технического университета. Физик-экспериментатор. Основные работы посвящены механизмам релаксационных явлений в сегнетоэлектриках, сегнетоэластиках и материалах с метастабильной поляризацией. Вместе с учениками и сотрудниками опубликовал более 200 статей и обзоров, автор 21 изобретения.