

**DIELECTRIC MATERIALS  
WITH METASTABLE  
ELECTRIC POLARIZATION**

S. A. GRIDNEV

*New dielectric materials for technical applications are considered. In these materials an electrical polarization does not arise spontaneously but as a result of preliminary effect of electrical field or mechanical stress. The materials with metastable polarization such as piezoelectric ceramics, electrets, electrostrictor ceramics and others have high values of piezoelectric modulus, electrostriction coefficients and other unique properties.*

**Рассмотрены новые диэлектрические материалы для технических применений, в которых электрическая поляризация не возникает самопроизвольно, а является результатом предварительного воздействия внешнего электрического поля. Такие материалы с метастабильной поляризацией обладают огромными величинами пьезоэлектрических модулей, коэффициентов электрострикции и другими уникальными свойствами.**

© Гриднев С.А., 1997

**ДИЭЛЕКТРИКИ  
С МЕТАСТАБИЛЬНОЙ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ**

С. А. ГРИДНЕВ

Воронежский государственный технический университет

**ВВЕДЕНИЕ**

Сегодня уже никого не удивляет широкое использование диэлектрических кристаллов и материалов хотя и некристаллического строения, но обладающих интересными для практики электрическими свойствами в различных отраслях техники: в радио- и электронной технике, измерительной технике и автоматике, ядерной и космической технике и др. Нарастающая тенденция использовать такие материалы в современной технике ставит перед физиками-материаловедами задачу повышения качества уже существующих материалов и получения новых диэлектрических материалов с совершенно новыми свойствами. Поэтому интенсивные экспериментальные и теоретические исследования веществ с электрическим упорядочением (сегнетоэлектрики, антисегнетоэлектрики, сегнетиэлектрики и пр.) проводятся в лабораториях разных стран мира, и уже получены впечатляющие успехи.

Ранее [7] мы рассмотрели явления, происходящие в дипольных кристаллах без центра симметрии или обладающих выделенными полярными направлениями (пьезоэлектриках, пироэлектриках и сегнетоэлектриках), и обсудили особенности их свойств, такие, как наличие спонтанной поляризации, доменной структуры, диэлектрической нелинейности, прямого и обратного пьезоэффекта и др., обусловившие широкое практическое применение этих кристаллов. Однако имеется также большое число разнообразных бездипольных диэлектрических материалов, в которых при отсутствии внешнего электрического поля поляризация отсутствует, но которые приобретают свойства, сходные со свойствами дипольных кристаллов, в том числе и остаточную поляризацию, после предварительного воздействия постоянного электрического поля. Их называют *материалами с метастабильной электрической поляризацией*.

Мы рассмотрим вещества с метастабильной электрической поляризацией, в которых внешним электрическим полем можно индуцировать поляризацию и которая будет сохраняться хотя бы частично после снятия внешнего поля. Широкая категория материалов с метастабильной поляризацией включает в себя как кристаллические, так и аморфные

или стеклоподобные диэлектрики, поляризация которых может возникать вследствие вызванного электрическим полем выстраивания диполей в направлении поля или из-за захвата ионов и электронов локальными центрами в процессе электрической поляризации. К таким веществам относятся электреты, пьезоэлектрическая керамика, пьезоэлектрические полимеры (которые могут обладать пьезоэлектрическими и сегнетоэлектрическими свойствами), жидкие кристаллы, аморфные сегнетоэлектрические материалы, пьезокомпозиты, дипольные стекла и др. Однако из-за ограниченного объема статьи в ней будут рассмотрены не все перечисленные выше материалы, а только некоторые из них.

### ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КЕРАМИКА

В 1947–1949 годах А.В. Ржанов в СССР, а также Р. Адлер и В. Мэзон в США обнаружили, что керамический сегнетоэлектрик титанат бария  $\text{BaTiO}_3$  под действием электрического поля приобретает остаточную поляризацию и пьезоэлектрическую активность, значительно превосходящую пьезоактивность хорошо известного в то время и широко используемого в электронной технике пьезоэлектрика — монокристалла кварца. В дальнейшем были открыты и другие керамические материалы, способные длительное время сохранять поляризованное состояние. Сегнетокерамические материалы стали принципиально новыми пьезоэлектрическими материалами, поскольку обладают довольно большим пьезоэффектом, хотя и не являются монокристаллами. Они получили название *сегнетоэлектрической пьезокерамики* или просто *пьезокерамики*. В этих терминах приставка *пьезо* (от греч. “пиезо” — давлению) указывает на то, что этому виду керамики присуще особое свойство — пьезоэлектрический эффект, то есть способность материала приобретать электрическую поляризацию под действием внешнего механического напряжения (прямой пьезоэффект) или, наоборот, деформироваться под действием внешнего электрического поля (обратный пьезоэффект). Ранее мы отмечали, что таким свойством обладают только кристаллы (20 классов), в структуре которых отсутствует центр симметрии.

Разумеется, для изучения фундаментальных свойств веществ желательно иметь большие однородные монокристаллы. Однако для практических применений, где определяющими факторами являются геометрические размеры и форма пьезоэлементов, воспроизводимость рабочих характеристик, простота технологии и невысокая стоимость изготовления, гораздо чаще используют керамические материалы. Это нетрудно понять, так как пьезоэлектрическую керамику изготовить легче, чем монокристалл соответствующего состава, в то время как во многих случаях керамика обладает сегнето-

электрическими свойствами, очень близкими к свойствам монокристаллов.

Что же представляет собой пьезокерамика в отличие от монокристалла? Керамика — это поликристаллическое тело, состоящее из множества беспорядочно ориентированных монокристаллических зерен (кристаллитов) размером в несколько микрометров, разделенных межзеренными границами. Таким образом, керамический материал является многофазной системой, в которой различают кристаллическую, стекловидную и газовую фазы. Кристаллическая фаза состоит из кристаллитов определенного химического состава, причем состав и структура кристаллитов определяют основные свойства керамического материала. Стекловидная фаза представляет собой аморфную прослойку (межзеренные границы), связывающую между собой кристаллиты. Чем выше ее содержание, тем менее выражены характерные свойства кристаллической фазы. Газовая фаза заполняет поры керамики. При высокой пористости снижаются основные технические характеристики материала. Пространственное распределение фаз или микроструктура керамики зависит от способа ее получения, марки сырьевых материалов, кинетики фазовых превращений и режимов спекания.

Приготовление керамики начинается с синтеза сегнетоэлектрического соединения выбранного состава при высокой температуре (800–1200°C), в процессе которого в хорошо перемешанных порошках исходных компонентов происходит химическая реакция в твердом состоянии. Порошок, полученный в результате реакции, размалывается в шаровой мельнице для увеличения однородности и реакционной способности частиц. Затем из него прессуют заготовки заданной формы и размера, которые обжигают при высокой температуре (1000–1300°C), в результате чего происходит спекание керамики, плотность которой составляет 96–98% плотности монокристалла.

Керамика, изготовленная из сегнетоэлектрического вещества, не обладает пьезоэлектрическими свойствами, так как составляющие ее кристаллиты (зерна) разделены на домены, то есть области, в каждой из которых электрические дипольные моменты направлены одинаково, но отдельные домены имеют разные направления поляризации, поэтому полидоменные кристаллиты не поляризованы, и в целом поляризация керамического образца равна нулю. Более того, если даже каждый отдельный кристаллит не был бы разбит на домены, а следовательно, имел бы отличную от нуля спонтанную поляризацию и обладал сильным пьезоэффектом, то все равно керамика и в этом случае не была бы пьезоэлектрической, так как поляризация в кристаллитах направлена по разным направлениям случайным образом и вклады отдельных кристаллитов в

общую поляризацию образца взаимно компенсируются.

Чтобы сделать керамику пьезоэлектрической, необходимо приложить к ней сильное электрическое поле (30–60 кВ/см), которое монодоменизирует каждый кристаллит и переориентирует полярные оси кристаллитов по направлениям, разрешенным симметрией и вместе с тем наиболее близким к направлению электрического поля (рис. 1). Под действием поля домены в каждом кристаллите ориентируются преимущественно в одном направлении, а после снятия поля сохраняется остаточная поляризация  $P_{\text{ост}}$  в направлении поля. В результате проведения процесса поляризации керамика ведет себя как пьезоэлектрический материал, так как теперь имеет отличную от нуля поляризацию  $P$  и проявляет линейную реакцию на приложенное электрическое поле  $E$  или механическое напряжение  $\sigma$ . Уравнение прямого пьезоэлектрического эффекта имеет очень простой вид:

$$P = d\sigma. \quad (1)$$

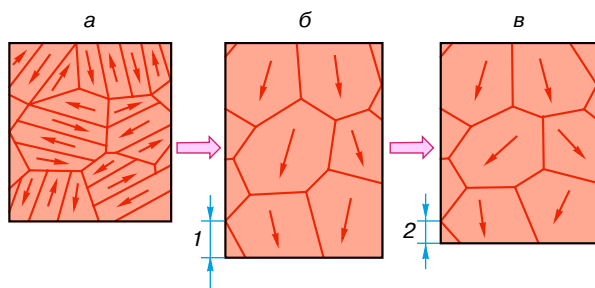
Здесь  $d$  – пьезоэлектрический модуль, который численно равен заряду, возникающему на единице поверхности образца при приложении к нему единицы давления. Иными словами, пьезомодуль  $d$  показывает, какая доля приложенного механического усилия превращается в электрическое напряжение.

Пьезоэлектрический эффект обратим. При обратном пьезоэффекте происходит изменение размеров диэлектрика (деформация) в зависимости от напряженности электрического поля  $E$  по линейному закону:

$$u = dE, \quad (2)$$

где  $d$  – пьезоэлектрический модуль, а  $u$  – деформация образца.

Поляризованное состояние керамики является неравновесным и метастабильным. Со временем остаточная поляризация постепенно уменьшается по экспоненциальному закону из-за разориентации



**Рис. 1.** Процесс поляризации сегнетоэлектрической керамики: а – исходное состояние, б – приложено электрическое поле, в – после снятия электрического поля, 1 – деформация, вызванная полем, 2 – остаточная деформация

направлений поляризации и изменения доменной структуры в кристаллитах:

$$P_{\text{ост}} = P_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (3)$$

где  $P_0$  – остаточная поляризация в момент времени  $t = 0$ , а  $\tau$  – постоянная времени релаксации поляризации. Время релаксации  $\tau$  у современных сегнето-керамических материалов составляет несколько десятков лет.

Эффект изменения параметров пьезоэлектрического материала со временем известен как старение. В общем случае в керамике со временем могут происходить как необратимые, так и обратимые изменения. Необратимые процессы, которые можно либо полностью исключить, либо свести к минимуму, включают в себя химические и структурные изменения диэлектрика со временем. Обратимое или электрическое старение является специфическим свойством сегнетоэлектриков, оно-то в основном и определяет временные изменения параметров пьезоэлектрики. Это старение обусловлено изменением со временем доменной структуры сегнетоэлектриков и объясняется перемещением доменных стенок в новые, более равновесные положения и постепенным их закреплением дефектами кристаллической решетки, которые диффузионно перемещаются по образцу и накапливаются на доменных стенках. Подробности механизма старения еще не изучены достаточно хорошо, но известно, что состав материала и термообработка образцов сильно влияют на старение. Легкость перемещения доменных стенок (их подвижность) зависит от остаточных механических напряжений, возникающих при фазовом переходе и в процессе поляризации. В керамике переориентация доменов и кинетика доменных стенок в значительной мере зависят также от размера зерен, присутствия примесей и пор, препятствующих движению доменных стенок, от напряжений, возникающих при взаимодействии с окружающими зернами, от структуры границ зерен, а также наличия частиц второй фазы. С повышением температуры скорость старения резко возрастает, что связано с облегчением обратных поворотов части доменов в исходное, существующее до поляризации положение и увеличением вклада этого процесса в остаточную поляризацию.

Наибольшее распространение получили керамические материалы на основе титаната бария  $\text{BaTiO}_3$ , ниобатные керамики на основе ниобата бария свинца  $(\text{PbBa})\text{Nb}_2\text{O}_6$  и керамики на основе системы цирконат–титанат свинца  $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ . Введение модифицирующих добавок позволило, например, в последней системе получить гамму пьезоэлектрических материалов с необходимыми для практики свойствами. Материалы этой системы характеризуются высокими значениями пьезомодулей ( $d \approx (300–1000) \cdot 10^{-12}$  Кл/Н, в то время как у

монокристалла кварца  $d \approx 3 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н), диэлектрической проницаемости, большой механической прочностью, технологичностью и малой стоимостью при массовом производстве.

Из пьезокерамики изготавливают пьезоэлементы, применяющиеся в телефонах, микрофонах, звукоснимателях, сейсмоприемниках, гидролокаторах, системах зажигания двигателей внутреннего сгорания, плоских видеоскренах, высоковольтных трансформаторах, аппаратах медицинской диагностики, устройствах звуковидения, гироскопах и других устройствах. Малые габариты пьезокерамических элементов позволяют успешно решать вопросы микроминиатюризации деталей и компонентов электронной аппаратуры.

### МАТЕРИАЛЫ С ГИГАНТСКОЙ ЭЛЕКТРОСТРИКЦИЕЙ

Электрострикция состоит в деформации (относительном изменении длины) образца  $u$ , пропорциональной квадрату приложенного электрического поля  $E$ :

$$u = \frac{\Delta l}{l} = ME^2. \quad (4)$$

Здесь  $M$  – электрострикционный коэффициент,  $l$  – длина образца,  $\Delta l$  – удлинение образца в электрическом поле.

Электрострикцию следует отличать от обратного пьезоэффекта, который также является результатом воздействия внешнего электрического поля, но является эффектом, линейным по полю, в то время как электрострикция – эффект, квадратичный по полю. Это означает, в частности, что знак электрострикционной деформации (то есть расширяется или сжимается образец диэлектрика под действием поля) от направления поля не зависит и в переменном электрическом поле частоты  $f$  диэлектрик деформируется с частотой  $2f$ . В случае же пьезоэффекта изменение направления поля на противоположное меняет знак деформации.

Электрострикция обусловлена смещением под действием поля атомов и молекул, из которых состоит диэлектрик, и присуща всем твердым и жидким диэлектрикам независимо от их симметрии и структуры. В отличие от электрострикции пьезоэффект имеет место только в нецентросимметричных кристаллах. Обычно электрострикционная деформация очень мала, намного меньше, чем пьезоэлектрическая. Однако в некоторых сегнетокерамических материалах из-за добавочного вклада в деформацию, обусловленного переориентацией доменов в измерительном электрическом поле, электрострикционная деформация может достигать огромных значений, соизмеримых с пьезоэлектрической деформацией. В этом случае доменный вклад в электрострикцию по существу определяется обратным пьезоэффектом за счет двукратной за период поля переориентации до-

менов. Приложение к такому материалу постоянного поляризующего поля наряду с переменным приводит к выключению доменного механизма и уменьшению электрострикции.

Наилучшими электрострикционными свойствами обладает сегнетокерамика с сильно размытым фазовым переходом, который происходит не при одной строго определенной температуре (обычный четкий фазовый переход), а занимает широкую область температур, достигающую 100–150°C и более. Во всей этой области температур вещество представляет собой двухфазную систему в виде сложной совокупности полярных и неполярных областей разного размера, которые могут объединяться, образуя соответственно полярные и неполярные кластеры. Такие материалы называют релаксорами (от англ. relaxor). Поскольку в области размытого фазового перехода структура материала неоднородная, рыхлая, мобильная, то под действием поля в таком диэлектрике довольно легко индуцируется большая деформация. Так, например, керамические материалы на основе магнониобата свинца  $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$  и особенно твердые растворы магнониобата свинца с титанатом свинца  $PbTiO_3$  и скандониобатом свинца  $PbSc_{1/2}Nb_{1/2}O_3$  имеют электрострикционную деформацию, которая на 2–3 порядка больше, чем электрострикция линейных диэлектриков, и достигает величины  $u \sim 10^{-3}$  в поле  $E = 10^6$  В/м при комнатной температуре. Согласно современным представлениям, электрострикционная деформация в них связана с обратимым изменением формы, размера и числа полярных областей и кластеров и их переориентацией под действием поля.

В настоящее время электрострикционная сегнетокерамика в основном применяется в исполнительных механизмах для создания точных перемещений. Такого типа приводы обеспечивают стабильное перемещение до 80 мкм при управляющем напряжении до 800 В (рис. 2). По сравнению с магнитоэлектрическими и пьезоэлектрическими управляющими приводами электрострикционные устройства выгодно отличаются малым электромеханическим гистерезисом, отсутствием старения, экономичностью

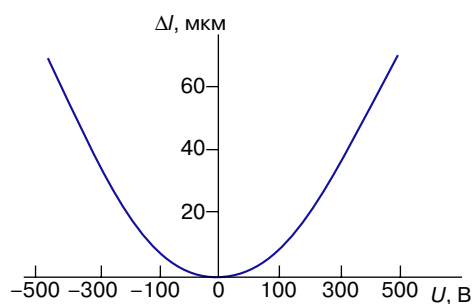


Рис. 2. Зависимость удлинения  $\Delta l$  электрострикционной керамики от управляющего напряжения

и безынерционностью и могут применяться для создания различных исполнительных устройств и механизмов, используемых в адаптивной оптике, точной механике и электронике.

## ЭЛЕКТРЕТЫ

*Электреты* – это аморфные и поликристаллические диэлектрики, длительно сохраняющие поляризованное состояние после снятия внешнего электрического поля, вызвавшего поляризацию диэлектрика, и создающие электрическое поле в окружающем пространстве. Из этого определения следует, что электрет является заполяризованным диэлектриком, точно так же, например, как и поляризованная сегнетокерамика, то есть пьезокерамика. Последняя, однако, состоит из кристаллитов или зерен, которые заполяризованы спонтанно, самопроизвольно, в то время как электрет – это диэлектрик, заполяризованный внешним полем принудительно и сохраняющий эту поляризацию длительное время. Казалось бы, электрет можно рассматривать как электрический аналог постоянного магнита. Однако на самом деле аналогия эта неполна и формальна, что обусловлено различной природой магнетизма и электрических явлений.

Впервые предположение о том, что, подобно постоянным магнитам, в природе должны существовать постоянно заполяризованные диэлектрики, высказал в 1896 году английский физик Оливер Хевисайд. Он назвал такие диэлектрики *электретами* и предсказал некоторые их свойства. Лишь в 1920 году появилось сообщение о первом электрете, изготовленном японским физиком М. Егучи из смеси карнаубского воска, канифоли и пчелиного воска, затвердевающей в присутствии сильного электрического поля.

Для получения электретов диэлектрик, помещенный в электрическое поле, подвергают определенному внешнему воздействию, которое способствует процессу миграции заряженных частиц (электронов и ионов). Такими воздействиями могут быть нагревание, освещение, магнитное поле, механическое напряжение, радиоактивное облучение и др. Поэтому в зависимости от способа изготовления различают термоэлектреты, фотоэлектреты, магнитоэлектреты, радиоэлектреты и др.

Наибольшее распространение получили термоэлектреты. В основе способа их получения лежит представление о том, что в нагретом до высокой температуры веществе электрическое поле легко поворачивает существующие или создает и ориентирует новые структурные электрические диполи, которые затем замораживаются в ориентированном положении при охлаждении вещества в электрическом поле.

Длительное время термоэлектреты изготавливали только из таких органических веществ, как смолы, пчелиный воск, канифоль. В 1953 году были

получены первые электреты из полимеров: полиметилметакрилата (плексигласа), нейлона и др. Несколько позднее появились электреты из серы, нафталина, эбонита, и только в 1956 году А.Н. Губкин и Г.И. Сканави получили первые электреты из неорганических не сегнетоэлектрических керамических материалов ( $\text{CaTiO}_3$ ,  $\text{MgTiO}_3$  и др.).

Если считать, что электрет получен путем ориентации существующих в материале постоянных электрических диполей в приложенном электрическом поле  $E$  и охлаждением материала от температуры, при которой диполи свободно вращаются, до температуры  $T_3$ , при которой диполи заморожены в тех или иных положениях, то величину остаточной поляризации  $P$  можно оценить из формулы Дебая для дипольной поляризации

$$P = \frac{Np^2E}{3kT_3}, \quad (5)$$

где  $N$  – концентрация полярных молекул, каждая из которых обладает дипольным моментом  $p$ ,  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

Эта формула является приближенной и справедливой только для системы свободных вращающихся диполей, на вид этого выражения будут существенно влиять любые дефекты материала, препятствующие вращению диполей. Поэтому поляризация  $P$ , оцененная по формуле (5), будет значительно меньше, чем поляризация, соответствующая полностью выстраиванию всех диполей в направлении поля  $E$ . Измерения поверхностного заряда различных электретов показали, что значения  $P$  для электретов из карнаубского воска составляют величину порядка  $10^{-5} - 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>, а для керамических электретов 0,1–1 Кл/м<sup>2</sup>.

При такой остаточной поляризации  $P$  внутри электрета создается сильное электрическое поле

$$E = \frac{P}{\epsilon\epsilon_0} = 10^6 - 10^8 \text{ В/м}. \quad (6)$$

Здесь  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость материала электрета, а  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная.

Если электрет имеет вид плоской пластины с линейными размерами электродов, много большими, чем расстояние между ними, то поле вне электрета равно нулю. Другое дело, когда толщина и другие линейные размеры электрета не сильно отличаются друг от друга. В этом случае поле вне электрета не везде равно нулю, имеется поле рассеяния (рис. 3), которое у краев образца может достигать значений, соизмеримых с полем внутри электрета. Поэтому часто говорят о способности электрета создавать поле в окружающем пространстве.

Большой интерес представляет также электрет с воздушным зазором между одним из электродов и поверхностью диэлектрика, в то время как второй

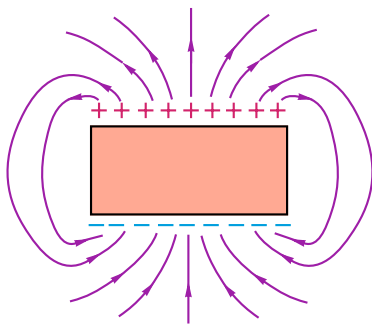


Рис. 3. Электрическое поле, созданное остаточной поляризацией электрета

электрод нанесен непосредственно на поверхность электрета. Когда зазор достаточно узок, то на удаленном от поверхности электроде будет индуцирован заряд, поверхностная плотность которого близка к величине  $P$ . В этом случае напряженность поля внутри зазора может достигать больших значений, близких к оцененным по формуле (5). Здесь также можно говорить о сильном поле, созданном вне электрета.

Исследования показали, что поляризация электретов имеет объемный характер. Если разрезать электрет на пластины, перпендикулярные оси остаточной поляризации, то каждая из пластин также будет электретом. Объемный характер поляризации электретов может быть обусловлен как замораживанием электрических диполей по всему объему, так и закреплением смещенных полей ионов в новых энергетически выгодных позициях. Систематическое изучение свойств электретов позволило установить, что в электретах обычно имеются два типа поляризации: один обусловлен *гомозарядом*, имеющим тот же знак, что и знак заряда на прилегающих электродах, используемых для поляризации, другой вызван *гетерозарядом*, знак которого противоположен знаку заряда на прилегающих электродах. Гомозаряд создается зарядами у поверхности диэлектрика, которые перешли из металлического электрода или воздушного зазора в поверхностные слои твердого диэлектрика (рис. 4, а). Гетерозаряд возникает в результате поляризации объема диэлектрика в электрическом поле, при которой происходят ориентация существующих диполей или разделение зарядов и образование диполей (рис. 4, б).

Гомо- и гетерозаряды взаимосвязаны, и изменение одного из них приводит к изменению другого. Результирующий заряд на поверхности диэлектрика определяется алгебраической суммой гетеро- и гомозарядов. Сразу после окончания поляризации преобладает гетерозаряд, а спустя некоторое время, когда тепловое движение разориентирует диполи, преобладающим становится гомозаряд (рис. 5). Опыты показывают, что гомозаряды сохраняются в

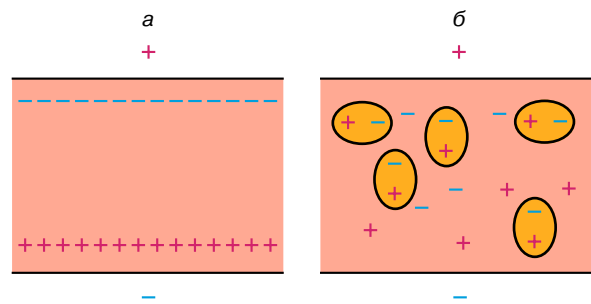


Рис. 4. а – модель гомополярного электрета, б – модель гетерополярного электрета

течение более длительного времени по сравнению с гетерозарядами.

Поскольку поляризация электретов индуцирована внешним полем и не является равновесным свойством твердых тел, она будет уменьшаться (релаксировать) со временем. Время релаксации или время жизни  $\tau$  некоторых электретов при комнатной температуре может достигать десятков лет, однако оно сильно зависит от внешних условий, таких, как температура, ионизирующее излучение, влажность и др. В частности, оно быстро уменьшается с повышением температуры:

$$\tau = \frac{L}{\mu E} e^{U/kT}, \quad (7)$$

где  $L$  – толщина образца электрета,  $\mu$  – подвижность носителей заряда,  $E$  – напряженность поля в слое, через который мигрируют носители заряда,  $U$  – высота потенциального барьера, преодолеваемого носителями заряда,  $k$  – постоянная Больцмана.

На практике определять времена жизни электрета, достигающие нескольких десятков лет, затруднительно, поэтому его оценивают по формуле (7), используя температурную зависимость времени релаксации  $\tau$ .

Для этого строят зависимость  $\ln \tau$  от  $1/T$  при повышенных температурах, когда времена релаксации  $\tau$  невелики и легко измеряются в эксперименте,

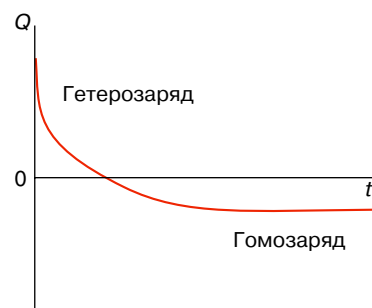


Рис. 5. Зависимость заряда  $Q$  электретов от времени  $t$  после поляризации

а затем экстраполируют полученную прямую к комнатной температуре и таким образом оценивают время жизни электрета. Оказалось, например, что время жизни пленочного электрета из фторопласта-4 превышает 100 лет, а время жизни электрета из поликарбоната составляет примерно 1000 лет.

В настоящее время наибольшее практическое применение находят электреты на основе полимерных пленок политетрафторэтилена, поликарбоната, полиметилметакрилата и др. Их используют для изготовления микрофонов и телефонов с очень широким частотным диапазоном ( $10^{-3}$ – $3 \cdot 10^4$  Гц), для бесконтактного измерения скорости вращения и механических вибраций, в качестве дозиметров радиации, пылеуловителей, в ксерографии и электрографии и многих других случаях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные выше примеры практических применений материалов с метастабильной электрической поляризацией показывают, что они весьма перспективны. В ряде технических приложений отсутствует альтернатива диэлектрическим материалам с метастабильной поляризацией, в других случаях эти материалы обладают несомненными преимуществами перед конкурирующими с ними материалами. В то же время следует помнить, что мы схематично коснулись лишь некоторых этапов пройденного пути и малой части важных приложений. Вполне очевидно, что поиск и исследование новых материалов с особыми электрическими

свойствами представляют собой одно из важных направлений современной физики твердого тела.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Лайнс М., Гласс А.* Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. М.: Мир, 1981.
2. *Барфут Дж., Тейлор Дж.* Полярные диэлектрики и их применения. М.: Мир, 1981.
3. *Губкин А.Н.* Электреты. М.: Наука, 1978.
4. Электреты / Под ред. Г. Сесслера. М.: Мир, 1983.
5. *Пасынков В.В., Сорокин В.С.* Материалы электронной техники. М.: Высш. шк., 1986.
6. *Смоленский Г.А., Исупов В.А., Юшин Н.К.* Электрострикторная сегнетокерамика и ее применения // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1987. Т. 51, № 10. С. 1742–1747.
7. *Гриднев С.А.* Электрические кристаллы // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 7. С. 99–104.

\* \* \*

Станислав Александрович Гриднев, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твердого тела физико-технического факультета Воронежского государственного технического университета. Физик-экспериментатор. Область научных интересов – механизмы релаксационных явлений в сегнетоэлектриках, сегнетоэластиках и материалах с метастабильной поляризацией. Автор 21 изобретения, соавтор более 200 статей и обзоров.