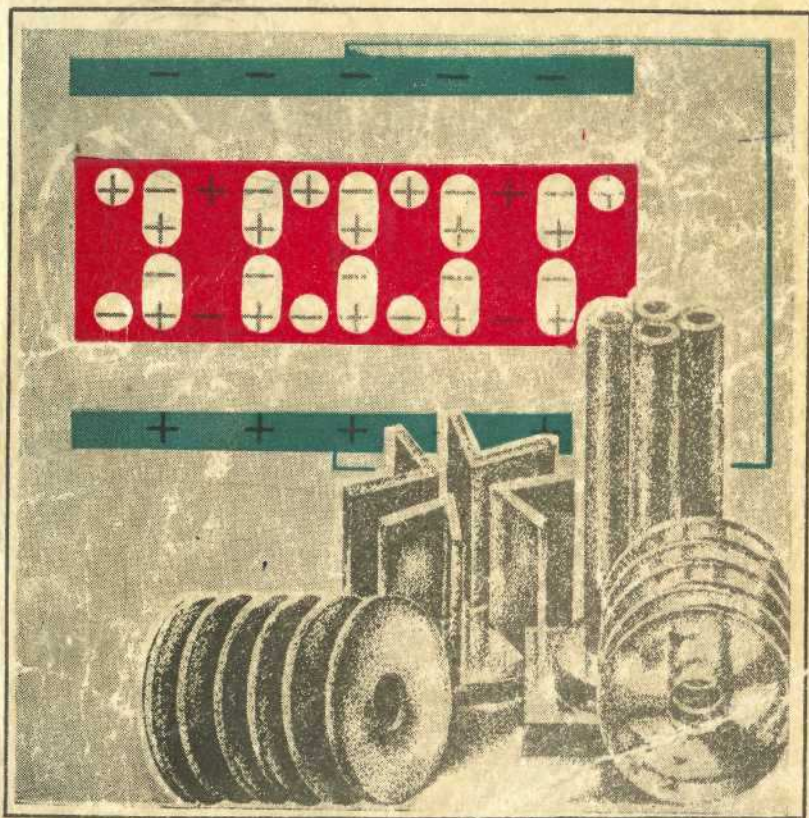




22.34

А. Н. ГУБКИН
ЭЛЕКТРЕТЫ



ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА

537
Г933

22.34

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Серия
«Наука и технический прогресс»

А. Н. ГУБКИН

ЭЛЕКТРЕТЫ

ЭЛЕКТРЕТНЫЙ ЭФФЕКТ
В ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

693.46
924.869



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1978

Г 93. Губкин А. Н. Электреты. — М.: Наука, 1978. — 192с.

Электрет — это постоянно наэлектризованный диэлектрик, несущий на одной стороне положительный заряд, а на другой — отрицательный и способный создавать электрическое поле в окружающем его пространстве. В последние годы электреты находят все большее применение в технике.

В книге дается описание методов изготовления электретов из разных диэлектриков и измерения их поверхностного заряда, свойств электретов, теорий электретного эффекта, принципов работы различных электретных приборов. Обсуждаются новые направления технического применения электретов.

17.4.4.

Ответственный редактор

В. В. КРАСНОЛЕВЦЕВ

ВВЕДЕНИЕ

Электретный эффект, открытый в 20-х годах нашего столетия, начал особенно интенсивно изучаться в последние тридцать лет. Ежегодно издается много работ по электретам как в Советском Союзе, так и за рубежом. Выпущен также ряд монографий и научно-популярных книг, посвященных электретному эффекту. Среди них пользуются известностью такие книги, как монография В. М. Фридкина и И. С. Желудева «Фотоэлектреты и электрофотографический процесс» (М., 1960), книга О. Я. Мяздрикова и В. Е. Манойлова «Электреты» (М., 1962), монография Г. А. Луцкейкина «Полимерные электреты», (М., 1976) и др. Издаются также сборники статей по электретам (например, труды Московского института электронного машиностроения — МИЭМ), проводятся конференции и симпозиумы (например, конференция во Флориде, США, в 1972 г., симпозиум в Бразилии в 1975 г., ежегодные конференции в МИЭМ).

Автором в 1961 г. была издана книга «Электреты», переведенная на несколько иностранных языков. Однако к настоящему времени, несмотря на то, что некоторые основные вопросы, изложенные там, остаются справедливыми и не требуют пересмотра, она значительно устарела.

В новой книге автор стремился дать картину современного состояния учения об электретном эффекте. В книге в основном рассматривается «классический» электретный эффект, который возникает тогда, когда для изготовления электретов применяется поляризация в электрическом поле с нагреванием. Полученные таким образом термоэлектреты изучены наиболее полно. Именно термоэлектреты были впервые изготовлены в Японии. Остальные разновидности электретов, такие, как фото-, радио-, коронно-, механо-, магнетоэлектреты и др., подробно не обсуждаются, при-

водятся только их характеристики. Преимущество имеют фотоэлектреты, которым уделено больше внимания.

Такой подход обусловлен тем, что автор ставил своей задачей осветить главным образом физические основы электретного эффекта, а они лучше всего проявляются у термоэлектретов. На примере термоэлектретов легче понять физическую природу электретного состояния. В ряде случаев при изложении материала автор не делает разницы между электро-, короно-, радио- и другими электретами, с одной стороны, и термоэлектретами — с другой, так как полученные разными способами электреты имеют одни и те же свойства. Тем более, что основные выводы феноменологической теории электретов, рассмотренной в этой книге, применимы ко всем видам электретов.

Книга имеет четыре части. Первая часть является вводной. Во второй изложена история открытия электретов и дана общая картина электретного состояния. Эта часть может служить для первоначального знакомства с электретами. Третья и четвертая части посвящены современным представлениям об электретном эффекте и его практическим применениям.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

1. ПОЛЯРИЗАЦИЯ И СТРУКТУРА ДИЭЛЕКТРИКОВ

1. Понятие о поляризации диэлектриков

Все известные в природе вещества в соответствии с их способностью проводить электрический ток могут быть разделены на три основных класса: *диэлектрики, полупроводники, проводники*. Если удельная проводимость проводников составляет $10^5 - 10^8 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$, то у диэлектриков она достигает $10^{-10} - 10^{-15} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ и меньше. Полупроводники занимают промежуточную область: их удельная проводимость лежит в пределах $10^5 - 10^{-10} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$.

Поместив диэлектрик в постоянное электрическое поле, мы наблюдаем появление электрического тока. Благодаря ничтожно малой электропроводности диэлектриков величина этого тока крайне мала. Это не только отличает диэлектрики от проводников и полупроводников, но именно благодаря этому обстоятельству диэлектрики имеют возможность поляризоваться в электрическом поле. *Способность к поляризации является основным свойством диэлектриков.*

Электрическое поле смещает связанные заряженные частички, входящие в состав диэлектрика, относительно тех положений, которые они занимали в отсутствие поля. Так, например, если диэлектрик состоит из нейтральных атомов, то в присутствии поля их электронные оболочки смещаются относительно положительно заряженных ядер. Если кристаллическая решетка твердого тела состоит из положительно и отрицательно заряженных ионов, как, например, решетка NaCl, то в электрическом поле ионы разных знаков смещаются относительно друг друга. В результате смещения каждой пары зарядов образуется система, обладающая некоторым дипольным моментом, или так называемый элементарный диполь, а весь диэлектрик поляризуется (рис. 1).

Поляризация диэлектрика численно характеризуется дипольным моментом единицы объема, который равен произведению числа N элементарных диполей, содержа-

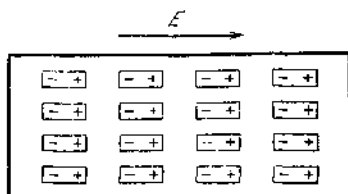


Рис. 1. Элементарные диполи при поляризации

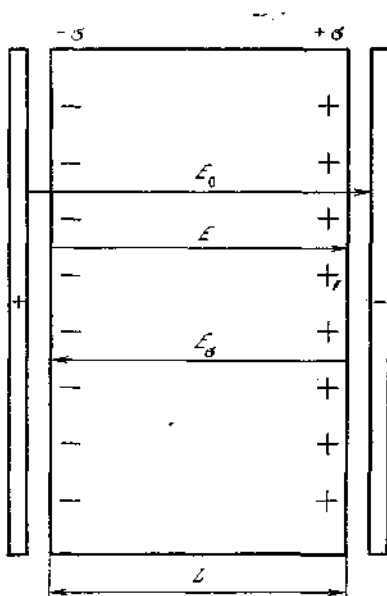


Рис. 2. Электрические поля при поляризации диэлектрика

щихся в единице объема вещества, на величину момента p элементарного диполя

$$P = Np. \quad (1.1)$$

В результате поляризации на внешних поверхностях диэлектрика, прилегающих к электродам, появятся заряды, противоположные зарядам электродов. Это хорошо видно на рис. 1 и 2. Действительно, заряды диполей, расположенных внутри диэлектрика, взаимно компенсируют друг друга, так как каждому плюсу найдется соответствующий минус; заряды же диполей у поверхности не компенсированы.

Из рис. 2 следует, что весь образец в целом приобретает дипольный момент, равный $qL = \sigma SL$, где σ — поверхностная плотность зарядов диэлектрика, образовавшихся в результате поляризации, а S — площадь положительно или отрицательно заряженной поверхности образца. С другой стороны, дипольный момент всего образца равен $PV = PSL$, где V — объем диэлектрика, так как по определению P представляет собой

дипольный момент единицы объема. Приравнявая две одинаковые величины друг другу, получим

$$P = \sigma. \quad (1.2)$$

Следовательно, дипольный момент единицы объема диэлектрика численно равен поверхностной плотности заряда, возникшего вследствие поляризации. Чем сильнее

поляризован диэлектрик, тем больше его «поляризационный» заряд.

Итак, на поверхности диэлектрика, помещенного в электрическое поле, появляются связанные заряды, противоположные по своему знаку зарядам на соответствующих электродах.

Если заряженные частички диэлектрика упруго связаны друг с другом, то величина смещения l под действием электрического поля будет пропорциональна смещающей силе (закон Гука), которая в данном случае равна qE , где E — напряженность электрического поля внутри диэлектрика. Следовательно, величины элементарного диполя и поляризации пропорциональны E , т. е. $p = \alpha E$ и

$$P = \sigma = pN = N\alpha E = \kappa E. \quad (1.3)$$

Коэффициент пропорциональности κ называют диэлектрической восприимчивостью, а α — поляризуемостью. Согласно этому закону поляризация¹ диэлектрика P и его связанные заряды тем больше, чем сильнее электрическое поле внутри диэлектрика.

Напряженность электрического поля внутри диэлектрика не равна напряженности поля E_0 в отсутствие диэлектрика. Действительно, рассмотрим рис. 2, где показано направление электрических полей в диэлектрике. Благодаря поверхностным связанным зарядам внутри диэлектрика будет действовать обратное поле $E_\sigma = 4\pi\sigma$. Поэтому действующее в диэлектрике поле E будет меньше, чем поле E_0 в отсутствие диэлектрика:

$$E = E_0 - E_\sigma = E_0 - 4\pi\sigma. \quad (1.4)$$

Из формулы (1.4) следует, что чем больше поляризация P и равная ей σ , тем меньше поле E . Отношение

$$\frac{E_0}{E} = \epsilon \quad (1.5)$$

характеризует способность вещества к диэлектрической поляризации. Величину ϵ называют диэлектрической проницаемостью. Она имеет вполне определенное значение для каждого диэлектрика.

¹ Для удобства изложения дипольный момент единицы объема будем называть просто поляризацией, помня, что поляризация — это особое состояние вещества, а P — его численная характеристика.

2. Виды поляризации диэлектриков.

Упругая поляризация

Будем подразделять поляризацию в зависимости от того, какие и на какое расстояние смещаются вызывающие ее частицы. Все частицы диэлектрика, способные смещаться или ориентироваться под действием внешнего электрического поля, можно отнести к двум видам: упруго связанные (сильно связанные) и слабо связанные.

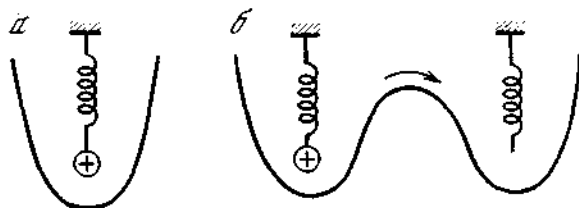


Рис. 2. Модель упруго связанной частицы (а) и слабо связанной частицы (б). Показаны два равновесных положения в глубокой потенциальной яме

Процессу смещения упруго связанных частиц препятствует упругая сила. Упруго связанная частица имеет одно положение равновесия, около которого она совершает тепловые колебания (рис. 3, а). Под действием внешнего электрического поля частица смещается из этого положения равновесия на небольшое расстояние. Это ведет к поляризации. Упругие силы, или лучше сказать квазиупругие, связывают электронную оболочку и ядро в атомах, атомы в молекулах, положительно и отрицательно заряженные ионы в кристаллах, дипольные молекулы в твердых телах.

В отличие от упруго связанных частиц слабо связанные частицы имеют несколько положений равновесия, в которых они в отсутствие внешнего электрического поля могут находиться с определенной вероятностью. Переход из одного положения равновесия в другое осуществляется под действием флуктуации энергии теплового движения. Частица колеблется около положения равновесия, затем через некоторое время скачком меняет это положение равновесия на другое. В новом положении равновесия она также испытывает тепловые колебания до тех пор, пока под действием флуктуации не изменит его (рис. 3, б). Время ожидания, время колебаний в определенном положении равновесия зависит от высоты потенциального

барьера между равновесными положениями и от температуры диэлектрика. Во внешнем электрическом поле энергия частицы в равновесных состояниях изменяется, так что частица занимает их с другой вероятностью, чем в отсутствие поля. В результате положительно заряженные частицы смещаются относительно отрицательно заряженных (как правило, на большие расстояния, чем при упругом смещении). Появляется асимметрия в распределении заряженных частиц, т. е. поляризация. Основную роль в этом процессе играет тепловое движение. Именно оно направленно перебрасывает частицы в присутствии внешнего электрического поля и возвращает их к хаотическому распределению после удаления поля. Тепловое движение не только «помогает», но и «мешает» (противодействует) смещающимся частицам как можно больше сместиться или повернуться в направлении внешнего поля.

Соответственно с изложенной картиной поляризацию разделяют на *упругую* и *релаксационную* (или *тепловую*). Термин «релаксационная поляризация» происходит от более общего понятия релаксационного процесса. В статистической физике под релаксационным процессом понимают явление установления равновесного состояния в системе, состоящей из множества частиц, находящихся в тепловом движении. Релаксационная поляризация является частным видом релаксационного процесса.

В зависимости от того, какие частицы смещаются, упругая и релаксационная поляризация подразделяются на несколько видов (рис. 4).

Существует четыре вида упругой поляризации. Наиболее распространенной является *электронная упругая поля-*

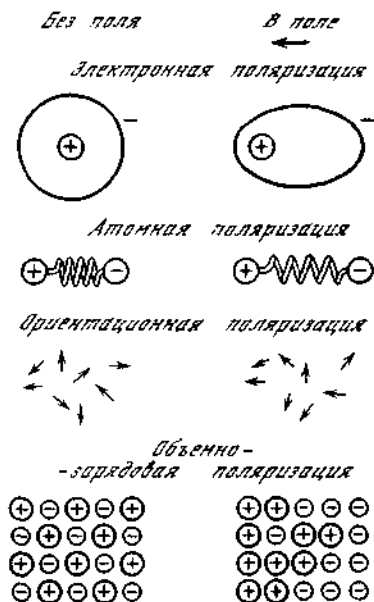


Рис. 4. Механизмы поляризации

ризация. При электронной поляризации происходит смещение электронных оболочек атомов (ионов) относительно тяжелых, «неподвижных» ядер. Так как в конечном счете все вещества состоят из атомов (ионов) или молекул (которые, в свою очередь, также состоят из атомов), то электронная поляризация наблюдается у всех диэлектриков в любом агрегатном состоянии. Время ее установления составляет 10^{-14} — 10^{-15} с.

Следующим видом упругой поляризации является *атомная поляризация*. При атомной поляризации происходит смещение атомов, составляющих молекулу, друг относительно друга в электрическом поле. Это возможно потому, что при образовании любой молекулы из отдельных атомов происходит, как правило, перераспределение электронов между атомами, из которых построена молекула. Электроны переходят от одних атомов к другим. Поэтому одни атомы в молекуле оказываются заряженными более положительно, а другие более отрицательно относительно их нейтрального состояния в изолированном виде. Разумеется, что в электрическом поле внутри такой молекулы произойдет смещение атомов друг относительно друга, т. е. возникнет индуцированный дипольный момент. Частным случаем атомной поляризации является *ионная упругая поляризация* молекул и кристаллов, обусловленная смещением положительно и отрицательно заряженных ионов от их равновесных положений в электрическом поле. Такого рода поляризация наблюдается в ионных кристаллах, например в каменной соли. Время установления атомной поляризации больше, чем электронной, так как в этом случае смещаются более тяжелые частицы. Смещение атомов (ионов), а следовательно, и установление атомной поляризации происходит за время 10^{-11} — 10^{-13} с. Наконец, иногда в молекулярных кристаллах, состоящих из дипольных молекул, наблюдается *упругое вращение дипольных молекул* при условии, если они не могут изменять свои первоначальные равновесные ориентации под действием флуктуаций теплового движения. Если представить себе, что молекула-диполь упруго связана в решетке кристалла, то в электрическом поле на нее будет действовать пара сил, и молекула упруго поворачивается, изменяя свою первоначальную ориентацию.

Релаксационная поляризация также разделяется на

несколько видов в зависимости от того, какие частицы релаксируют и на какие расстояния. Если слабо связанными релаксирующими частицами являются дипольные молекулы газов, жидкостей и твердых тел, способные ориентироваться под действием внешнего электрического поля, то релаксационная поляризация называется *дипольной*, или *ориентационной*, *поляризацией*. Если релаксируют слабо связанные ионы, то релаксационная поляризация называется *ионной тепловой поляризацией* (в отличие от ионной упругой поляризации). Слабо связанный ион в отличие от упруго связанного иона способен не только совершать тепловые колебания относительно некоторого положения равновесия в кристаллической решетке, но и скачком изменять свое равновесное положение на другое под действием флуктуаций энергии теплового движения. При этом он остается в пределах некоторого микрообъема, представляющего собой глубокую потенциальную яму. Появление слабо связанных ионов, а также и электронов обусловлено дефектами кристаллической решетки. Аналогично ионам слабо связанными частицами могут быть электроны. В этом случае релаксационная поляризация называется *электронной тепловой поляризацией* (в отличие от электронной упругой поляризации).

Помимо рассмотренных видов релаксационной поляризации, в твердых диэлектриках часто наблюдается еще одна ее разновидность, тесно связанная с электропроводностью. Впервые на возможность поляризации этого типа указал академик А. Ф. Иоффе. В его работах объемно-зарядовая, или как ее часто называют высоковольтная, внутрислойная или приэлектродная поляризация была тщательно исследована. Впоследствии под термином *объемно-зарядовая* поляризация стали понимать ряд явлений, сходство между которыми состоит в том, что они вызывают поляризацию в диэлектрике за счет образования в нем объемных зарядов. Сущность объемно-зарядовой поляризации заключается в следующем. При движении носителей заряда через диэлектрик под действием электрического поля может случиться, что они не полностью доходят до электродов, или подходят к электродам, но не разряжаются. Тогда в диэлектрике образуются объемные заряды — положительный у катода и отрицательный у анода. Заряды в диэлектрике окажутся смещенными, но не на микрорасстояния, как при обычных видах

поляризации, а на макрорасстояния. Причины этих явлений до сих пор еще полностью не выяснены. Продвижению свободных зарядов могут мешать дефекты кристаллической решетки, которые способны в некоторых случаях захватывать электроны и ионы. Иногда ионы, дошедшие до электродов, по какой-либо причине не успевают полностью разрядиться за то время, в течение которого к электродам подходят новые ионы, а электроны, дойдя до электродов, перейти в металл. Это ведет к образованию приэлектродных объемных зарядов. Последний случай может наблюдаться и в жидких диэлектриках. Накоплению объемных зарядов мешает тепловое движение, которое старается разбросать заряды; электрическое поле стремится создать объемный заряд, а тепловое движение путем диффузии — его уничтожить. Поэтому объемно-зарядовую поляризацию можно считать разновидностью релаксационной поляризации. К этому же виду относится поляризация, возникающая в том случае, если диэлектрик содержит макровключения. На поверхностях раздела неоднородностей такого диэлектрика в электрическом поле могут накапливаться заряды и вызывать поляризацию. Поляризация этого вида часто играет существенную роль в электроизоляционной технике, где имеют дело с неоднородными диэлектриками.

3. Поляризация и дефекты структуры

В кристаллических диэлектриках могут наблюдаться дефекты двух видов: собственные, или равновесные (температурные), и примесные дефекты. Дефекты первого вида образуются в результате теплового движения. Флуктуации теплового движения нарушают упорядоченное расположение частиц в кристалле. При каждой данной температуре на фоне упорядоченного расположения частиц имеется некоторый беспорядок. Чем выше температура, тем больше нарушается порядок в расположении частиц.

Рассмотрим наиболее характерный и простой случай ионных кристаллов. Решетка ионных кристаллов построена из положительных и отрицательных ионов. Электростатическое (кулоновское) притяжение положительных и отрицательных ионов создает устойчивость кристаллической решетки. Ионы разных знаков распо-

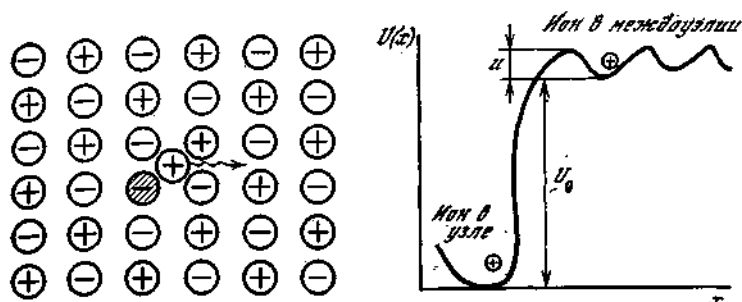


рис. 5. Образование и движение дефекта «по Френкелю»

ложены в определенном порядке, образуя так называемый дальний порядок в кристалле.

Собственные, или равновесные (температурные), дефекты в ионных кристаллах бывают двух видов. Дефекты «по Френкелю» образуются вследствие отрыва иона (обычно это положительный ион, так как он имеет меньший диаметр) из узла кристаллической решетки и перехода его в междоузлие. В узле остается пустое место — вакансия, имеющая эффективный заряд, противоположный заряду ушедшего иона. Пара: ион в междоузлии и вакансия представляют собой дефект «по Френкелю» (рис. 5).

Дефекты «по Шоттки» возникают за счет ухода под действием теплового движения положительных и отрицательных ионов из объема кристалла на поверхность, где они образуют новые узлы кристаллической решетки. В объеме кристалла остаются пустые узлы — вакансии, имеющие заряды, противоположные зарядам ушедших ионов. Пара вакансий противоположного знака — дефект «по Шоттки».

Чем выше температура кристалла, тем чаще возникают достаточно большие флуктуации теплового движения и тем больше концентрация собственных дефектов.

Дефекты «по Френкелю» и «по Шоттки» хаотически перемещаются — диффундируют по кристаллу вследствие теплового движения. При этом они преодолевают потенциальные барьеры, отделяющие одно положение равновесия от другого (см. рис. 5). При помещении кристалла во внешнее электрическое поле возникает электрический ток, связанный с направленным движением равновесных

дефектов — междоузельных ионов и вакансий, — собственная электропроводность кристаллов.

Если температура кристалла недостаточно велика, то междоузельный ион и соответствующая вакансия противоположного знака, а также пара вакансий противоположного знака могут притянуться друг к другу кулоновскими силами и образовать квазидиполи. При повышении температуры флуктуации энергии теплового движения

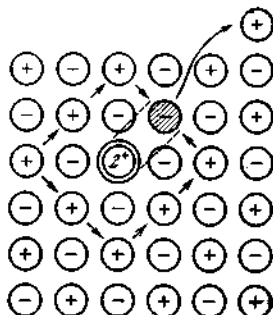


Рис. 6. Механизм образования вакансии и квазидиполя

Возможные переходы ближайших ионов в вакантное место указаны стрелками. Двойной кружок — примесный ион; заштрихованный кружок — вакансия

разрывают электростатические связи, и квазидиполи распадаются на ионы и вакансии.

Такие квазидиполи ведут себя как обычные дипольные молекулы. Когда внешнего электрического поля нет, ориентации квазидиполей хаотически меняются, например, за счет перескока двух вакансий противоположного знака из одних положений равновесия в другие относительно друг друга. В присутствии внешнего электрического поля квазидиполи будут стараться сориентироваться вдоль поля, что приведет к релаксационной поляризации кристалла.

Квазидиполи могут также взаимодействовать друг с другом, образуя более сложные дипольные комплексы.

Слабо связанные ионы могут возникать также за счет примесного дефекта. Так, наличие примесного иона в решетке, заряд которого превышает заряд основных ионов, вызывает появление вакансий противоположного знака. Это необходимо для соблюдения электрической нейтральности кристалла. Если примесный ион заряжен дважды, а основные ионы решетки однозарядны, то возникает одна вакансия, противоположная по знаку заряду примесного иона, так как для сохранения электрической

нейтральности один ион решетки того же знака, что и примесный ион, должен покинуть кристалл (рис. 6). Пара: примесный ион и пустое место — вакансия могут при не очень высоких температурах взаимодействовать электростатически, образуя квазидиполь. Квазидиполь «примесный ион — вакансия» может занимать различные ориентации в пространстве за счет перескоков соседних ионов соответствующего вида в вакантное место (этот процесс удобнее рассматривать как перескок вакансии). В присутствии внешнего электрического поля квазидиполь «примесный ион — вакансия» будет ориентироваться вдоль поля.

Наличие собственных и примесных дефектов кристаллической решетки обуславливает появление слабо связанных ионов (вакансий), участвующих в релаксационной поляризации.

Рассмотрим более подробно релаксационную поляризацию диэлектриков, так как именно она играет основную роль в электретоном эффекте.

II. РЕЛАКСАЦИОННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ

1. Дипольная, ионная и электронная релаксационные поляризации

Кроме веществ, способных только к упругой электронной или ионной поляризации (неполярные диэлектрики), существует еще большой класс так называемых *дипольных*, или *полярных*, диэлектриков, молекулы которых и без внешнего электрического поля обладают дипольным моментом. Постоянный дипольный момент могут иметь многие молекулы, у которых центры симметрии составляющих их положительных и отрицательных зарядов не совпадают друг с другом (молекулы воды, аммиака, спиртов и др.).

При наложении электрического поля на дипольный газобразный или жидкий диэлектрик его молекула-диполь под действием электрического поля стремится повернуться и занять такое положение, чтобы ее ось совпала с направлением силовой линии поля. Однако стремлению полярных молекул к определенной ориентации препятствует хаотическое тепловое движение частиц вещества, которое стре-

мится разбросать молекулы и привести их в беспорядочное состояние. В результате борьбы этих двух факторов, действия поля и теплового движения, устанавливается равновесие, при котором полярные молекулы приобретают в среднем некоторую направленную ориентацию. Весь же диэлектрик благодаря этому приобретает дипольный момент в направлении поля, т. е. поляризуется (рис. 7).

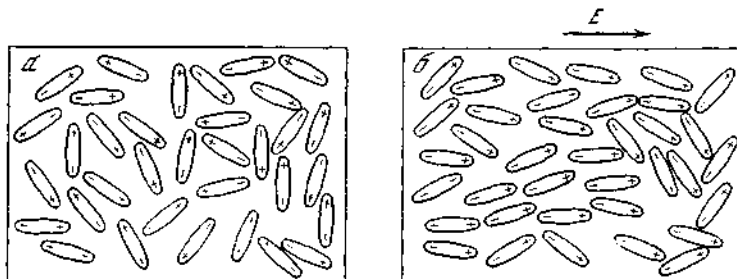


Рис. 7. Поляризация диэлектрика, содержащего полярные молекулы

В составе твердых тел, как и в жидкостях и газах, также могут находиться полярные молекулы, способные ориентироваться под действием электрического поля. Так, лед является типичным представителем полярного диэлектрика, т. е. диэлектрика, содержащего в своем составе полярные молекулы, способные к ориентации. При охлаждении соляной кислоты и превращении ее в твердое состояние можно наблюдать возникновение релаксационной поляризации, так как твердая соляная кислота также содержит полярные молекулы, способные к вращению.

У дипольного кристалла без внешнего электрического поля молекулы-диполи распределены хаотически, т. е. имеют различные ориентации, хотя и занимают вполне определенные положения в кристаллической решетке. После наложения электрического поля молекулы-диполи будут стремиться расположиться вдоль поля. Через некоторое время установится равновесное состояние. В равновесном состоянии молекулы-диполи не располагаются строго вдоль поля, так как этому мешает тепловое движение, а имеют лишь некоторую преимущественную ориентацию вдоль поля. При снятии электрического поля тепловое движение дезориентирует молекулы-диполи и опять устанавливается равновесное состояние, которое в данном

случае соответствует хаотической ориентации дипольных молекул.

Релаксационная поляризация наблюдается у ряда полимеров, например у полиметилметакрилата (органическое стекло) и др. В состав полимеров входят длинные «цепочечные молекулы». Однако ориентационной способностью, как правило, обладает не вся такая молекула, а часто ее отдельные звенья или другие полярные группы, входящие в ее состав.

Релаксационная поляризация наблюдается также в твердых диэлектриках, не содержащих в своем составе полярных молекул. Первоначально этот вид поляризации был найден у некоторых стекол, а затем и у других материалов, например у поликристаллических неорганических диэлектриков (керамические диэлектрики).

В последнее время была обнаружена релаксационная поляризация и у монокристаллических диэлектриков, не содержащих полярных молекул (щелочно-галогидные монокристаллы, окислы некоторых металлов, такие, как двуокись титана — рутил, окись алюминия — корунд, двуокись кремния — кварц, закись марганца и др.). Появление релаксационной поляризации в этих случаях связано с наличием заряженных дефектов, образующих квазидиполи. Последние играют ту же роль, что и полярные молекулы.

2. Процесс установления релаксационной поляризации.

Время релаксации

Посмотрим теперь, как протекает процесс установления релаксационной поляризации. После наложения электрического поля поляризация устанавливается не сразу, так как ориентирующему воздействию поля противодействует тепловое движение частиц диэлектрика. Время установления релаксационной поляризации, или, как его называют, *время релаксации*, зависит от структуры вещества, в частности от электрического взаимодействия его частиц.

Если вещество содержит релаксирующие частички (диполи, ионы, электроны) только одного сорта, то его поляризация устанавливается по экспоненциальному закону, который можно записать следующим образом:

$$P(t) = P(\infty) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right). \quad (2.1)$$

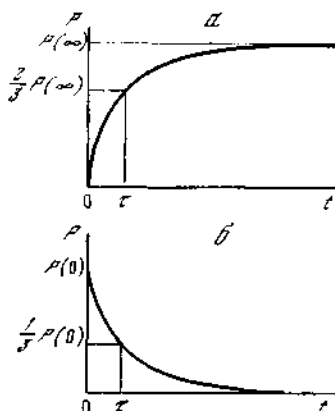


Рис. 8. Процессы установления и разрушения релаксационной поляризации:
а — поле приложено; б — поле снято

Здесь t — время протекания процесса, τ — время релаксации, а $P(\infty)$ — значение установившейся поляризации. В начальный момент $t = 0$ поляризация $P(0) = 0$, в момент $t = \tau$ получим:

$$P(t) = P(\infty) \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \cong \frac{2}{3} P(\infty).$$

Таким образом, время нарастания поляризации от 0 до $2/3 P(\infty)$ будет временем релаксации диэлектрика. При бесконечно долгом наложении поля $t \rightarrow \infty$ и $P(t) \rightarrow P(\infty)$. Графически процесс установления релаксационной поляризации изображен на рис. 8, а.

Если после установления поляризации внешнее электрическое поле убрать, то процесс пойдет в обратном направлении, т. е. тепловое движение дезориентирует дипольные молекулы, и поляризация исчезнет. Математически это можно представить так:

$$P(t) = P(0) e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (2.2)$$

В начальный момент $t = 0$, когда поле только что снято, $P = P(0)$, по прошествии времени $t = \tau$ поляризация уменьшится примерно в 3 раза, т. е.

$$P(t) = \frac{P(0)}{e} \approx \frac{P(0)}{3}.$$

В этом случае, следовательно, время релаксации соответствует времени уменьшения поляризации примерно в 3 раза. При $t \rightarrow \infty$ получим: $P(\infty) \rightarrow 0$, т. е. при достаточно большом времени выдержки образца без поля его поляризация практически исчезнет. Графически процесс *деполяризации* изображен на рис. 8, б.

Зависимости типа (2.1) и (2.2) характерны для всех релаксационных процессов. Отсюда и поляризация рас-

смотренного нами вида получила свое название релаксационной поляризации.

До сих пор мы рассматривали формальную картину процесса установления релаксационной поляризации. Постараемся теперь описать процесс релаксации с молекулярной точки зрения. Для этого разберем, что происходит с дипольными частичками диэлектрика без внешнего электрического поля. Обратимся сначала к полярной жидкости.

Без внешнего электрического поля дипольные молекулы жидкости совершают хаотическое тепловое движение. Некоторое время молекула колеблется около какого-то положения равновесия, которое определяется взаимодействием данной молекулы с ее соседями, а затем скачком переходит в другое положение. Само положение равновесия также все время меняется.

В случае твердых тел, содержащих полярные молекулы, все происходит аналогичным образом, но положение равновесия остается неизменным, так как молекулы твердого тела закреплены в определенных местах решетки.

В отличие от полярных молекул квазидиполи, образуемые слабо связанными ионами или электронами, меняют свои ориентации за счет перескоков ионов или электронов из одних равновесных положений в другие. Ион (электрон) колеблется в некотором положении равновесия, а затем скачком смещается в другое положение равновесия. Время от одного такого перескока до другого и есть время релаксации частиц диэлектрика.

При повышении температуры вещества интенсивность теплового движения его частиц усиливается. Дипольная молекула или заряженная частица теперь чаще колеблется около своего положения равновесия, поэтому вероятность перехода в другое положение равновесия повышается, соответственно время релаксации уменьшается.

Без внешнего электрического поля число дипольных частичек, перебрасываемых за счет теплового движения, во всех направлениях одинаково и диэлектрик в целом не имеет никакого дипольного момента.

После наложения поля на каждую дипольную частичку будет действовать дополнительная сила. Поэтому за время релаксации τ тепловое движение перебросит большее количество частиц по направлению поля, чем в противоположном направлении, и диэлектрик приобретет некоторый дипольный момент, т. е. поляризуется.

3. Модель для описания релаксационной поляризации в твердых диэлектриках

Основные закономерности, наблюдающиеся при релаксационной поляризации, могут быть описаны с помощью следующей модели [1]. Предположим что взаимодействие дипольных частичек твердого тела таково, что частичка может находиться только в двух положениях равновесия расположенных по направлению внешнего поля. Это эквивалентно тому, что потенциальная энергия частички если ее рассматривать как функцию координаты смещения имеет два минимума. Изобразим два возможных положения равновесия дипольной частички (рис. 9). Отложим по оси абсцисс величину смещения слабо связанного иона², а по оси ординат — величину его потенциальной энергии. Согласно этой модели движение иона вправо и влево ограничено высокими потенциальными барьерами, которые образуют одну глубокую потенциальную яму. Внутри ямы потенциальная энергия имеет два минимума, разделенные сравнительно невысоким потенциальным барьером u_0 .

Без внешнего поля вероятность нахождения иона в каждом из этих двух положений одинакова. Ион некоторое время (время релаксации) совершает тепловые колебания в одной из ям, затем вследствие флуктуации его энергии резко возрастает, и он перебрасывается в другое положение равновесия, после чего (через время τ) перебрасывается обратно и т. д. (рис. 9,а).

При наличии поля рассматриваемая картина несколько видоизменяется, так как на ион действует сила поля и он приобретает дополнительную энергию Δu ; его энергия в направлении поля уменьшится. Это приведет к тому, что яма 2 (рис. 9,б) станет глубже, чем яма 1, на $2\Delta u$, и иону труднее из нее перейти в яму 1, чем остаться в яме 2. Вследствие этого часть ионов за время релаксации τ перейдет из ям типа 1 в ямы типа 2 и установится динамическое равновесное состояние, при котором число ионов, перебрасываемых в единицу времени из ям 1 в ямы 2 и из ям 2 в ямы 1, станет одинаковым. Таким образом,

² Для простоты здесь говорится только о слабо связанном ионе (или электроны). Для полярной молекулы нужно было бы отложить угол поворота диполя относительно направления поля.

в каждый данный момент в ямах 2 будет находиться больше ионов, чем в ямах 1. Благодаря этому заряды диэлектрика будут смещены, а диэлектрик поляризован.

Математический расчет приводит к следующей формуле для времени релаксации τ :

$$\tau = \frac{1}{2\nu} e^{\frac{u_0}{kT}}, \quad (2.3)$$

где ν — частота собственных (тепловых) колебаний иона в положениях равновесия. Согласно формуле (2.3) время релаксации тем больше, чем выше потенциальный барьер u_0 и меньше температура диэлектрика. Величина ν слабо зависит от температуры.

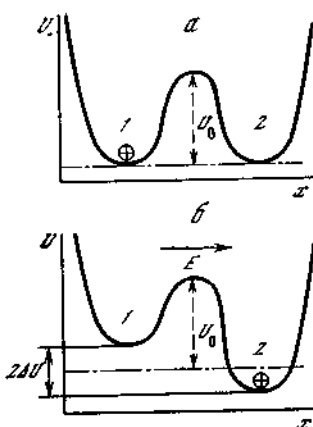


Рис. 3. Энергетическая модель для описания релаксационной поляризации

Глубокая потенциальная яма с двумя минимальными значениями потенциальной энергии: а — без поля; б — в поле

4. Объемно-зарядовая поляризация твердых диэлектриков

Релаксационная поляризация этого вида отличается от случаев, разобранных выше, тем, что здесь не происходит ни вращения диполей, ни смещения слабо связанных ионов и электронов. Объемно-зарядовая поляризация возникает за счет направленного смещения (миграции) свободных зарядов, которые всегда в небольшом количестве присутствуют в твердых диэлектриках. В процессе установления этой поляризации участвуют те же самые свободные ионы и электроны, так называемые *носители заряда*, которые обуславливают электропроводность твердых диэлектриков в постоянном поле. Они смещаются на макрорасстояния и затем закрепляются.

В случае объемно-зарядовой поляризации, как и вообще при релаксационной поляризации, ток, протекающий через диэлектрик, спадает со временем. Этот уменьшающийся со временем ток называют *абсорбционным током*.

В процессе объемно-зарядовой поляризации накапливаются объемные заряды и возникает обратное поле, умень-

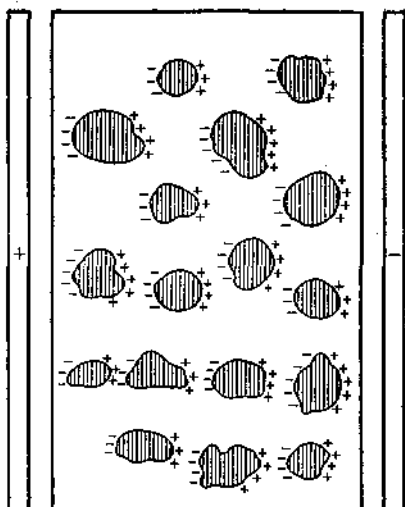
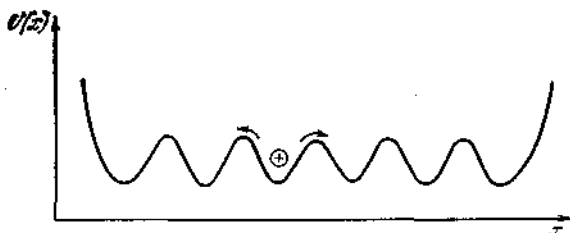


Рис. 10. Макроскопические области в кристалле, в пределах которых происходит образование объемных зарядов

Рис. 11. Глубокая потенциальная яма с равновесными положениями для объемно-зарядовой поляризации нонного типа



шающее поле в диэлектрике, которое смещает свободные заряды. В результате этого абсорбционный ток спадает до нуля и наступает динамическое равновесие между количеством зарядов, нагоняемых полем, и количеством зарядов, рассасывающихся вследствие диффузии. При этом через диэлектрик протекает остаточный ток.

Свободные заряды могут накапливаться как у электродов (отсюда термин «приэлектродная поляризация»), так и внутри диэлектрика, если он состоит из областей, границы которых не пропускают свободных зарядов (отсюда термин «внутрислоевая поляризация», рис. 10). В связи с этим можно считать, что либо весь кристалл, либо эти отдельные области представляют собой глубокие потенциальные ямы.

В этом случае модель для описания релаксационной поляризации будет несколько отличаться от модели, предложенной выше (см. рис. 9) для обычных видов релаксационной поляризации. Она будет представлять собой глубокую потенциальную яму с большим числом положений равновесия (рис. 11). Эта модель применима как к ионам, так и к электронам. Для ионов она отвечает обычному механизму ионной проводимости. Иону, если он, например, находится в междоузлии кристаллической решетки («междоузельный ион»), приходится «продираться» сквозь основные ионы решетки, что соответствует прохождению через потенциальные барьеры. Для электронов эта модель связана с частным случаем электронной проводимости, когда электроны «перепрыгивают» от одного дефекта к другому, преодолевая потенциальные барьеры («прыжковая проводимость»).

Для свободных электронов может быть использована еще одна модель — потенциальный «ящик» с электронным «газом». В электрическом поле произойдет смещение облака свободных электронов к положительному электроду, что вызовет поляризацию диэлектрика. Последний случай особенно характерен для диэлектриков с заметной электронной проводимостью и полупроводниковых кристаллов с широкой запрещенной зоной (алмаз, кремний и др.).

Внешне объемно-зарядовая поляризация проявляется таким же образом, как и другие виды поляризации, т. е. ведет к увеличению диэлектрической проницаемости.

5. «Внешняя» релаксационная поляризация (инжектированный заряд)

Расскажем о явлении, которое часто сопровождает процесс поляризации диэлектриков. Это явление никак нельзя назвать поляризацией в общепринятом смысле этого слова, но условно мы назовем его «внешней» поляризацией. Обычная, или «внутренняя», поляризация в ее классическом понимании — это процесс возникновения дипольного момента у диэлектрика, помещенного в электрическое поле. Макроскопическим (внешним) проявлением этой поляризации служит появление связанных (поляризационных) зарядов разных знаков на поверхностях диэлектрика и соответствующего им электрического поля, противоположного по своему направлению полю поляризации (так

называемого обратного поля поляризации). Молекулярным (внутренним) проявлением поляризации является смещение зарядов или ориентация диполей, входящих в состав диэлектрика.

При поляризации диэлектрика на границе между металлическим электродом и диэлектриком может возникнуть сильное электрическое поле. В результате этого из

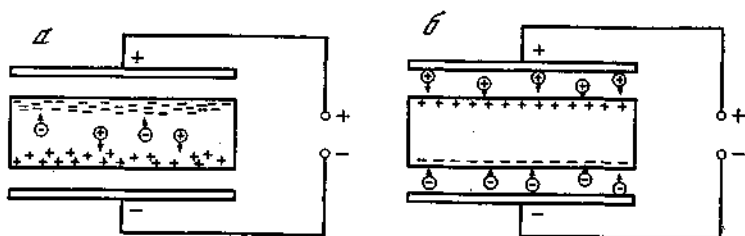


Рис. 12. Процесс образования объемно-зарядовой остаточной поляризации (а) и «внешней» остаточной поляризации (инжектированного заряда) (б)

металлического электрода в диэлектрик будет инжектироваться (переходить) заряд того же знака, какой имеет поляризующий электрод. Если поляризация проводится так, что прямого контакта металлического электрода с диэлектриком нет, то инжекция заряда осуществляется за счет пробоя воздуха в зазоре, при котором образуется лавина ионов и электронов, оседающих на поверхности диэлектрика.

Заряд в диэлектрике может быть инжектирован и другими способами, например путем коронного разряда или облучением поверхности образца электронами и ионами.

Этот инжектированный заряд, как правило, захватывается ловушками, которых на поверхности твердого тела всегда много. Для освобождения захваченного ловушками заряда требуется определенная флуктуация энергии теплового движения.

Поведение захваченного инжектированного заряда похоже на поведение ионов и электронов, захваченных при релаксационной объемно-зарядовой поляризации. И здесь, и там для быстрого уничтожения заряда требуется нагревание. При объемно-зарядовой релаксационной поляризации заряженные частицы захватываются ловушками у электродов, при этом отрицательно заряженные

частицы находятся у анода, а положительно заряженные частицы — у катода. В результате весь кристалл становится как бы макродиполем.

В случае инжектированного заряда все происходит наоборот. На поверхности или вблизи поверхности диэлектрика у катода будет располагаться связанный отрицательный заряд, а у анода — связанный положительный. Внутри будет действовать электрическое поле противоположного направления.

Таким образом, мы имеем формальное сходство между обычной, ее можно назвать «внутренней» остаточной поляризацией, и инжектированным зарядом. Поэтому явление инжектирования заряда в диэлектрик удобно рассматривать как «внешнюю» поляризацию диэлектриков. Рис. 12 пояснит сказанное.

Это относится только к связанному заряду, захваченному ловушкой. Свободный инжектированный заряд рассасывается по закону максвелловой релаксации (см. гл. XIV).

III. ДРУГИЕ ВИДЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

1. Поляризация диэлектриков в сильном электрическом поле

Как уже отмечалось, с увеличением внешнего электрического поля поляризация диэлектрика возрастает. При этом наблюдается *линейная зависимость* P от E , что выражается формулой (1.3). Однако такая простая связь этих двух величин справедлива только до определенного значения поля, выше которого линейность нарушается.

У таких нелинейных диэлектриков диэлектрическая проницаемость в сильных полях зависит от величины поля, чего не наблюдается в слабых полях. Это является одним из основных признаков нарушения линейных свойств.

Большинство твердых диэлектриков никаких нелинейных свойств не имеет, так как раньше, чем они могут проявиться, происходит разрушение диэлектрика под действием поля, так называемый *пробой диэлектриков*.

2. Спонтанная поляризация

Помимо упругой и релаксационной поляризации, у некоторых твердых диэлектриков наблюдается *спонтанная*, или *самопроизвольная*, поляризация. В этом случае внутри диэлектрика, без какого бы то ни было воздействия внешнего поля, самопроизвольно возникают однородно поляризованные области (так называемые *домены*).

В отсутствие внешнего поля направления дипольных моментов этих областей различны. При наложении поля происходит «ориентация» доменов, и весь диэлектрик поляризуется. Так как каждый домен имеет большой дипольный момент, то диэлектрическая проницаемость *сегнетоэлектриков*, а так называют диэлектрики со спонтанной поляризацией, обычно велика.

Типичным представителем сегнетоэлектриков является сегнетова соль, от которой они и получили свое название. В 1944 г. Б. М. Вулом был открыт и изучен новый сегнетоэлектрик — титанат бария.

Если после наложения на сегнетоэлектрик сильного электрического поля уменьшить величину поля до нуля, то поляризация полностью не исчезнет, так как часть доменов сохранит свою первоначальную ориентацию вдоль поля. Чтобы разрушить эту *остаточную поляризацию*, нужно приложить поле в обратном направлении. Тогда при соответствующей величине обратного поля остаточная поляризация исчезнет, а при дальнейшем увеличении поля образуется новая остаточная поляризация, для разрушения которой надо приложить поле опять в первоначальном направлении, и т. д. Это явление получило название диэлектрического гистерезиса.

Остаточная поляризация сегнетоэлектриков определяет их пьезоэлектрические свойства: при прикладывании к образцу механического давления остаточная поляризация изменяет свою величину, а поверхностный заряд, связанный с нею, будет соответственно увеличиваться или уменьшаться. Это явление называется *пьезоэффектом*.

Сама остаточная поляризация сегнетоэлектриков способна сохраняться в течение многих лет без какого бы то ни было заметного уменьшения своей величины.

ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЭЛЕКТРЕТОВ. ПЕРВЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРЕТНОМ ЭФФЕКТЕ И ВОЗМОЖНОСТЯХ ЕГО ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

IV. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЭЛЕКТРЕТОВ

1. Ранние гипотезы

В истории науки известны случаи, когда проведение некоторых аналогий между различными по своей природе, но имеющими формальное внешнее сходство явлениями способствовало открытию новых эффектов. Особенно большое внешнее сходство наблюдается в поведении различных веществ в постоянном магнитном поле и в постоянном электрическом поле. В магнитном поле некоторые вещества, так называемые *магнетики*, намагничиваются, т. е. приобретают магнитный момент. Величины, характеризующие это явление, очень похожи на величины, характеризующие диэлектрическую поляризацию.

Намагничивание

Магнитный момент единицы объема, или намагниченность I

Магнитная восприимчивость χ_m

Магнитная проницаемость μ

Поляризация

Дипольный момент единицы объема, или поляризация P

Диэлектрическая восприимчивость χ

Диэлектрическая проницаемость ε

Все магнетики можно разбить на три класса, представители которых по-разному ведут себя в магнитном поле. Это диамагнетики ($\mu < 1$), парамагнетики ($\mu > 1$) и ферромагнетики ($\mu \gg 1$).

Для парамагнетиков¹ аналогию с электрическим полем можно продолжить. Атомы парамагнетиков обладают

¹ К парамагнетикам относятся некоторые газы, щелочные и щелочноземельные металлы, алюминий, магний, платина и др.

постоянными магнитными моментами и ориентируются во внешнем магнитном поле, преодолевая противодействующее влияние теплового движения. Формально это явление напоминает ориентационную поляризацию дипольных диэлектриков в постоянном электрическом поле. Недаром Дебай в 1912 г. распространил теорию намагничивания парамагнетиков Лавжеева на случай дипольных молекул. Формально аналогия между магнитными и электрическими явлениями отражена в известных уравнениях электромагнитного поля Максвелла [2].

Однако следует всегда иметь в виду, что хотя представление о магнитных диполях и помогает объяснить многие свойства парамагнетиков, на самом деле никаких магнитных диполей (как и магнитных зарядов) не существует. В действительности намагничивание («магнитная поляризация») парамагнетиков в отличие от поляризации дипольных диэлектриков вызывается не ориентацией «магнитных диполей», а молекулярными электрическими токами, т. е. движением электрических зарядов. С этим связано то, что у намагниченного парамагнетика поле внутри вещества больше, чем в пустоте, а не меньше, как у поляризованного диэлектрика. В самом деле, если ориентация диполей диэлектрика приводит к появлению обратного электрического поля, уменьшающего внешнее поле, то при намагничивании парамагнетика происходит ориентация молекулярных контуров с токами, которые, как известно, стремятся расположиться так, чтобы их магнитное поле было направлено вдоль внешнего поля.

Несмотря на различную природу парамагнетиков и дипольных диэлектриков, существующее формальное сходство между поведением веществ в электрическом и магнитном полях имело и имеет большое положительное значение. В последнее время находят новые подтверждения этой формальной аналогии. Так, сегнетоэлектрики, которые сейчас очень интенсивно изучаются, имеют много общего с ферромагнетиками. Это нашло свое отражение и в терминологии: в иностранной литературе сегнетоэлектрики называются ферроэлектриками. Подобно ферромагнетикам сегнетоэлектрики обладают спонтанной поляризацией, зависимость их поляризации от электрического поля характеризуется петлей гистерезиса, они переходят из одной модификации в другую (фазовые переходы, точки Кюри и т. д.). Такое сходство существует, несмотря на различную физи-

ческую природу этих веществ (ферромагнетики — металлы², сегнетоэлектрики — диэлектрики).

При изучении магнетизма человек еще в глубокой древности сталкивался с так называемыми постоянными магнитами, которые обычно являются ферромагнетиками с остаточной намагниченностью, благодаря которой они способны создавать вокруг себя магнитное поле.

В то же время аналогия между магнитными и электрическими явлениями также была известна давно, задолго до создания Максвеллом своей теории. Естественно возникают вопросы. Почему ученые не искали электрический аналог постоянному магниту? Почему электрический аналог постоянному магниту был открыт только в 20-х годах нашего столетия?

Отвечая на них, можно назвать несколько причин. Одна из них состоит в том, что в отличие от магнитных явлений и особенно постоянных магнитов, диэлектрические свойства вещества начали изучаться сравнительно недавно. К концу XIX в. магнитные свойства ряда веществ были изучены уже достаточно хорошо. Особенно много ученые знали о свойствах постоянных магнитов. Диэлектрики же были исследованы еще плохо.

Впервые термин «диэлектрик» ввел Фарадей в 1839 г., для того «чтобы определить такое вещество, сквозь или поперек которого действуют электрические силы». Определение Фарадея говорит о том, что в диэлектрике в отличие от проводника имеются не свободные, а связанные заряды, которые под действием внешнего электрического поля не могут смещаться на большие расстояния. Поэтому внутри диэлектрика, находящегося во внешнем электрическом поле, всегда будет действовать некоторое поле, чего никогда не наблюдается в проводниках.

Фактически со времен Фарадея началось изучение диэлектрических свойств вещества. При этом широко использовалась аналогия между магнитными и электрическими явлениями.

Исходя из этой аналогии, английский физик Оливер Хевисайд в 1896 г. высказал предположение о том, что, подобно постоянным магнитам, в природе должны существовать «постоянно заполяризованные диэлектрики». Хевисайд назвал такие диэлектрики *электретами* [3].

² Классическим представителем ферромагнетиков является железо.

В английском языке термину *electret* (электрет) соответствует термин *magnet* (магнит). По-русски более правильно было бы называть их «электритами» по аналогии с термином «магнит». Хевисайд не только предположил возможность существования постоянно поляризованных диэлектриков, обладающих в связи с этим поверхностными зарядами (постоянные магниты имеют также поверхностный «магнитный заряд»), но и теоретически рассмотрел некоторые их свойства.

Можно было ожидать, что, подобно постоянным магнитам, электреты могут быть изготовлены только из диэлектриков, обладающих спонтанной поляризацией. Причем для изготовления электретов можно использовать тот же самый способ, который применяется при изготовлении постоянных магнитов. Остаточное намагничение в ферромагнетике создается с помощью внешнего магнитного поля. Аналогичным образом в сегнетоэлектриках можно образовать остаточную поляризацию, выдерживая их в сильном электрическом поле. После снятия внешнего поля поляризации сохраняется в течение длительного времени.

Однако все оказалось гораздо сложнее. Как потом выяснилось, сегнетоэлектрики, как правило, не обладают электретными свойствами, хотя имеют остаточную поляризацию и обусловленные ею остаточные поляризационные заряды. С другой стороны, многие несегнетоэлектрические диэлектрики после поляризации их в электрическом поле электризуются и способны долгое время сохранять это наэлектризованное состояние. При этом большинство из них имеет остаточную поляризацию несегнетоэлектрического вида и соответствующие ей остаточные поляризационные заряды.

Таким образом, аналогия между постоянными магнитами и электретами является неполной. Это можно было бы предугадать с самого начала, рассмотрев уравнения Максвелла. В самом деле, эти уравнения отражают тот факт, что в природе нет свободных магнитных зарядов, в то время как свободные электрические заряды существуют. Это приводит к тому, что внутреннее электрическое поле, созданное в диэлектрике искусственно или существующее в нем спонтанно, будет экранироваться свободными электрическими зарядами, находящимися внутри диэлектрика или вне его, в результате чего наэлектризованное состояние исчезнет. Как будет показано ниже, это сооб-

ражение действительно надо учитывать при объяснении устойчивости электретов.

Явление остаточного заряда, тесно связанное с электретным эффектом, было впервые обнаружено в середине прошлого века, т. е. задолго до открытия замечательных свойств первого сегнетоэлектрика — сегнетовой соли (1918 г.).

2. Явление остаточного заряда

Явление остаточного заряда заключается в следующем: если зарядить конденсатор, металлические обкладки которого непосредственно соприкасаются с промежуточным диэлектриком, например лейденскую банку, и разрядить его, соединив между собой обкладки, то через некоторое время окажется, что обкладки вновь заряжены, так что можно получить вторую разрядную искру, после этого, через некоторое время — третью и т. д. Очевидно, что при первом закорачивании металлических электродов конденсатор разрядился не полностью, часть заряда где-то осталась; затем этот остаточный заряд, постепенно освобождаясь и переходя в свободное состояние, даст возможность произвести второй разряд и т. д.

Многие известные ученые, в том числе Фарадей и Максвелл, пытались объяснить явление остаточного заряда. Так, Фарадей предполагал, что остаточные заряды образуются за счет проникновения зарядов в диэлектрик во время его поляризации, при этом с положительно заряженного электрода проникает положительный заряд, а с отрицательно заряженного — отрицательный. После разряда они постепенно выходят из диэлектрика на электроды. Однако эта точка зрения не нашла последователей, так как осталась неясной причина обратного движения зарядов.

Поэтому больше сторонников привлек к себе другой взгляд на происхождение остаточного заряда, согласно которому остаточный заряд образуется не за счет внешних зарядов, а вследствие поляризации диэлектрика, т. е. остаточные заряды являются поляризационными зарядами. Эта точка зрения основана на том, что поляризация диэлектрика во внешнем электрическом поле возникает не мгновенно, но постепенно достигает своего наибольшего значения;

аналогично этому она и не исчезает мгновенно после удаления внешнего электрического поля. Иначе говоря, после закорачивания металлических электродов диэлектрик остается до некоторой степени поляризованным. Эта поляризация удерживает на металлических электродах некоторые заряды, которые постепенно освобождаются по мере того, как исчезает поляризация диэлектрика. Эта теория, основанная на остаточной поляризации диэлектриков, нашла подтверждение в ряде опытов и сохранила свое значение до наших дней.

В дополнение к этому Максвелл пришел к заключению, что остаточная поляризация, вызывающая остаточный заряд, обусловлена неоднородностью диэлектрика.

3. Открытие электретов М. Егучи

Первый электрет был изготовлен в 20-х годах нашего века японским физиком Егучи³ из смеси равных частей карнаубского воска и канифоли и небольшого количества пчелиного воска. Карнаубский воск представляет собой смолу, собираемую с пальмы Карнауба, которая растет в Южной Америке. Почему для изготовления электретов была выбрана именно такая смола, существенным компонентом которой является карнаубский воск, остается загадкой. По-видимому, это явилось делом случая. Егучи, должно быть, воздействовал постоянным электрическим полем на различные вещества с малой электропроводностью и низкой температурой плавления; случайно ему попался карнаубский воск, который как раз является одним из таких диэлектриков.

Однако выбор Егучи был очень удачным. В дальнейшем карнаубский воск зарекомендовал себя как классический материал для получения электретов. Большинство ранних работ по исследованию электретного эффекта было выполнено на электретах из карнаубского воска.

³ Мототоро Егучи (1879—1926) окончил в 1905 г. университет в Токио, профессор физики. Им опубликовано большое число статей по диэлектрикам. Работы по электретах были выполнены в Токио и опубликованы в 1920, 1921, 1923 и 1925 гг.

4. Открытие фотоэлектретов Г. Наджаковым

В 1937 г. болгарский физик Г. Наджаков⁴ изготовил электрет из серы несколько необычным способом. Вместо того чтобы расплавить диэлектрик и затем дать ему застыть в сильном электрическом поле, он освещал пластинку фотопроводящей серы светом, одновременно воздействуя на нее электрическим полем. После удаления света электрическое поле снималось. Полученный таким образом электрет обладал зарядами, которые исчезали на свету. В темноте же заряд сохранялся в течение нескольких месяцев.

Таким образом, роль нагревателя здесь играл свет. В связи с этим Г. Наджаков назвал полученные им электреты *фотоэлектретами* [4] в отличие от электретов Егучи, которые могут быть названы *термоэлектретами*.

V. ПЕРВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРЕТОВ

1. Изготовление электретов по Егучи

Для получения электрета надо поместить образец диэлектрика в сильное электрическое поле. Именно этим способом изготавливаются постоянные магниты: образцы из ферромагнетика выдерживаются в сильном магнитном поле. Но одного этого мало. Как оказалось, для получения электретов необходимо, чтобы диэлектрик был подвергнут действию поля в нагретом состоянии и чтобы электрическое поле не отключалось, пока диэлектрик не охладится до комнатной температуры.

Первый электрет был изготовлен Егучи именно таким образом [41]. Сильное электрическое поле прикладывалось к расплавленной восковой смеси, нагретой до температуры 130° С, и поле не снималось до тех пор, пока воск полностью не затвердевал и не охлаждался до комнатной температуры.

Схема установки, использованной Егучи для приготовления электретов, представлена на рис. 13. Основной

⁴ Георгий Наджаков родился в 1896 г., работал в Сорбонне (Париж), президент Болгарской Академии наук и председатель Болгарского комитета по мирному использованию атомной энергии, имеет много работ по фотоэлектрическим свойствам диэлектриков.

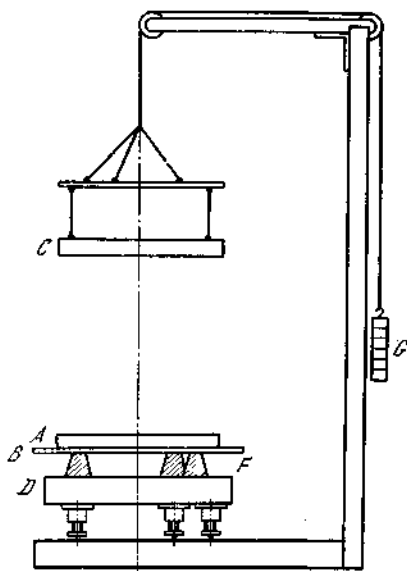
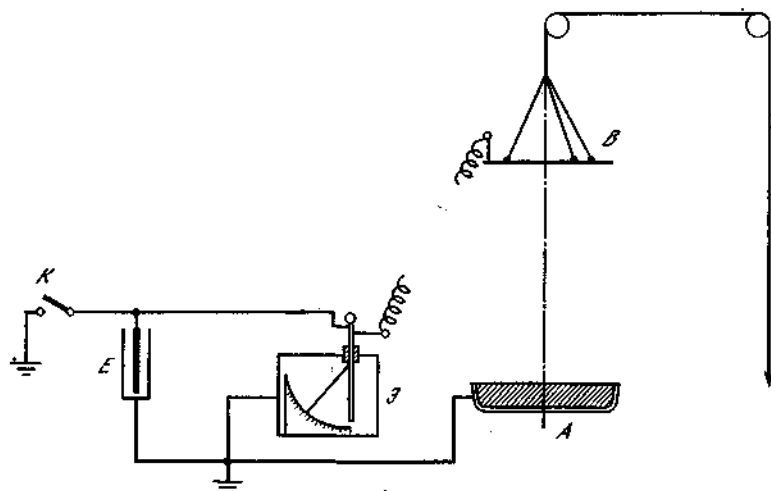


Рис. 13. Схема установки Егучи (1925) для изготовления электретов на карнаубского воска

Рис. 14. Схема установки Егучи (1925) для измерения заряда электретов на карнаубского воска



частью установки является круглая металлическая ванночка *A* высотой 1 см и диаметром 20 см, в которую заливается расплавленный воск. Электрод *C* удерживается грузиками *G* в приподнятом положении. Ванночка *A* уста-

наливается на втором электроде *B*, который изолирован от деревянного основания *D* стойками из серы *F*. Основание *D* устанавливается строго горизонтально с помощью винтов. После того как расплавленный воск залит в ванночку, электрод *C* опускается до касания с поверхностью воска. Затем к электродам *B* и *C* подводится напряжение, и воск застывает в постоянном электрическом поле. Дно ванночки *A* хорошо отшлифовывается и, кроме того, покрывается тонкой металлической фольгой. Металлической фольгой покрывается также верхний электрод *C*. После застывания воска электрет с фольгой можно легко отделить от электродов, а затем снять фольгу с готового диска.

2. Метод измерения поверхностного заряда электретов, предложенный Егучи

У полученного таким образом электрета наблюдаются на противоположных сторонах диска заряды различного знака. Каким же образом удалось убедиться в этом? Как измерить заряд электрета?

Для измерения поверхностного заряда уже готового электрета Егучи предложил метод, основанный на явлении электростатической индукции. Это явление, как известно, заключается в том, что в проводнике, если его поднести к какому-нибудь заряженному телу, наводятся (индуцируются) заряды разных знаков. На ближайшей к заряженному телу поверхности проводника возникает заряд, противоположный по знаку заряду тела, а на другой стороне — одинакового знака.

Схематическое изображение установки Егучи для измерения поверхностного заряда электретов показано на рис. 14.

Процесс измерения протекает так. Ключ *K* замыкается на землю, верхний электрод *B* опускается до полного контакта с заполяризованным диэлектриком. Затем ключ размыкается, т. е. система отсоединяется от земли, и верхний электрод поднимается до тех пор, пока не исчезнет влияние электрического поля электрета на электрод *B*. Расстояние, на которое надо поднять верхний электрод, составляет приблизительно 5—10 см. При этом электрометр *Э* заряжается. Если обозначить отклонение электро-

метра, который в данном случае измеряет напряжение, через U , емкость системы через C , то заряд, приобретенный электрометром, будет

$$q = CU. \quad (5.1)$$

Из этого выражения можно легко определить заряд конденсатора, зная его емкость и напряжение на обкладках. Если емкость C измеряется в пикофарадах ($1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$), а U в вольтах, то заряд $q = CU \cdot 10^{-12}$ будет измеряться в кулонах.

Возникает вопрос, откуда появился этот заряд. Заряд пришел с верхнего электрода B , который, в свою очередь, получил его путем индукции от электрета.

Емкость C , входящая в формулу (5.1), равна

$$C = C_0 + C_Э + C_B,$$

где C_0 — емкость шунтирующего конденсатора E , $C_Э$ — емкость электрометра $Э$, C_B — емкость электрода B , причем $C \approx C_0$. Зная C_0 и U , можно определить заряд q , который индуцирует одна из заряженных поверхностей электрета на электроде. Аналогичным образом можно измерить заряд другой поверхности электрета.

Присоединяя к отклоненному электрометру заряженное тело с известным знаком заряда и наблюдая, какое оно окажет действие (увеличит или уменьшит отклонение), можно определить знак индуцированного заряда.

Плотность поверхностного заряда σ электретов вычислялась делением величины заряда на площадь S электрода B , если она меньше или равна площади электрета:

$$\sigma = \frac{q}{S}. \quad (5.2)$$

3. Опыты Егучи по исследованию физической природы электретных зарядов

В первых опытах Егучи было показано, что плотность поверхностного заряда электретов, как правило, больше $1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$, но меньше $1 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$. Заряды на противоположных сторонах диска различны по своему знаку, но близки по абсолютной величине. Первое время после поляризации на стороне, обращенной к аноду, распола-

гался отрицательный заряд, а на противоположной стороне — положительный, но затем эти первоначальные заряды уменьшились в течение нескольких дней до нуля с последующим образованием вторичных зарядов противоположного знака. Эти вторичные заряды, отрицательные на стороне, которая была обращена к катоду при поляризации, и положительные на стороне, обращенной к аноду, остаются практически постоянными; за три года не было обнаружено их уменьшения. Для сохранения постоянства зарядов и улучшения результатов измерений обе стороны электрета должны быть закорочены (электрет обертывался металлической фольгой), подобно тому, как это делается с магнитами.

Какова же природа этих зарядов? Может быть, это просто поверхностные заряды, которые обычно возникают при натирании воска мехом или суконкой? Егучи подробно исследовал этот вопрос. Он рассуждал таким образом. Известно, что поверхностный заряд, образованный трением, можно уничтожить, воздействуя на поверхность диэлектрика рентгеновскими лучами, пламенем, водой, спиртом и т. д. Если заряд электрета расположен только на поверхности диэлектрика, то его также можно нейтрализовать указанными способами. Егучи проделал все эти опыты. Заряд электрета, действительно, сначала уменьшался при воздействии на него указанными агентами и часто даже исчезал совсем, но потом, спустя некоторое время после высушивания диска или прекращения облучения, полностью восстанавливался. Отсюда следует, что заряд электрета расположен не только на его поверхности, т. е. что он по своей природе не тождествен поверхностному заряду, возникающему при трении.

Другой опыт, который выполнил Егучи, более непосредственно доказывал, что заряды электрета распределены по всему объему диэлектрика. Егучи соскабливал слой воска с поверхности электрета заземленным скребком. Если бы заряды электрета располагались только на поверхности, то, соскабливая поверхностный слой вещества, можно было бы снять вместе с ним и заряд. Но этого не наблюдалось.

Кроме того, Егучи обнаружил следующее. Если электрет разрезать пополам вдоль плоскости, параллельной его заряженным поверхностям, то получатся два электрета. Это также имеет место в случае постоянных магни-

тов. Расплавление воска ведет к уничтожению электретных зарядов.

Поверхностными зарядами нельзя объяснить и тот факт, что электрет всегда имеет на своих противоположных сторонах заряды различного знака. Зато этот факт соответствовал предположению об объемном характере распределения зарядов электрета.

Все это позволило утверждать, что заряды у электрета объемные, что образование зарядов у электрета связано с определенными процессами, которые протекают внутри него во время поляризации.

4. Краткий обзор работ других ученых

После работ Егучи наступил некоторый перерыв. Вплоть до 1935 г. особенно серьезных исследований электретов не проводилось. За этот период было опубликовано всего 13 работ. Рассмотрим наиболее важные из них.

Сато (1922) повторил опыты Егучи. Венгерский физик Микола (1925)⁵ изучал возможность приготовления электретов из различного рода диэлектриков. В его работе приведена таблица, из которой следует, что полярные диэлектрики (вторая графа таблицы) могут иметь как гетерозаряд, так и гомозаряд (см. с. 39), в то время как неполярные диэлектрики (неполярные углеводороды, парафиновый воск и др.) не обладают электретным эффектом. Несмотря на то, что есть вещества, отклоняющиеся от этого правила (пчелиный воск — неполярный диэлектрик, цетиловый спирт — полярный и др.), Микола сделал вывод о том, что полярность диэлектрика является необходимым условием образования устойчивого электрета. Микола также показал, что вещества с большой проводимостью по преимуществу обнаруживают гетерозаряд (1-я графа таблицы).

Адамс (1927) впервые обнаружил пьезоэлектрический эффект в электретах из смеси карнаубского и пчелиного воска. Однако Наката (1927) пьезоэффекта у электретов не обнаружил.

Эвинг (1930—1935) определил внутреннюю поляризацию электретов путем удаления верхнего слоя вещества

⁵ Александр Микола (1871—1945) — профессор физики и математики в Будапеште, автор книги о философии физики и большого числа работ по истории физики и физики диэлектриков.

Различные диэлектрики, исследованные Миколо на электретный эффект

| Вещества, обнаруживающие электретный эффект | | Вещества, не обнаруживающие электретного эффекта | |
|---|---|--|--------------------------------------|
| Обнаруживающие только гетерозаряд | Обнаруживающие как гетерозаряд, так и гомозаряд | Обнаруживающие только поверхностный заряд | Не обнаруживающие постоянного заряда |
| Вещества с кислотными группами | Карнаубский воск | Цетиловый спирт | Парафиновый воск |
| Стекло | Пчелиный воск | Цетиловый пальметат | Пальмитиновая кислота |
| Смолы | Полярные углеводороды | Неполярные углеводороды | Стеариновая кислота |
| Сера | Спирты | | Динитронафталин |

и изучал электреты с помощью рентгеновских лучей. Беннет (1931) продолжил опыты Эвинга по изучению электретов с помощью рентгеновских лучей и показал, что после поляризации восковые электреты приобретают анизотропные свойства. Беннет установил, что углеводородные цепочечные молекулы ориентируются под действием электрического поля и углеводородное вещество становится, подобно восковой смеси, анизотропным. Аналогичное явление наблюдается и при кристаллизации парафина в присутствии электрического поля. Джонсон и Карр (1932) сообщили о возможности приготовления электрета из расплавленной серы (такой электрет имел гетерозаряд).

Егер (1934) провел первые количественные исследования объемного распределения электретных зарядов в пчелином воске. Им был использован метод срезания тонких слоев вещества, перпендикулярных направлению поляризации, и измерения заряда отдельных слоев (предложенный Егучи); Егер получил кривую распределения объемного заряда внутри образца и тем самым подтвердил вывод Егучи об объемном распределении электретных зарядов. Свойства электретов изучались также Фарланом (1930), Тикку (1932) и др.

5. Исследования А. Геманта

В 1935 г. А. Гемант⁶ опубликовал фундаментальную работу [43], в которой проверил проведенные до него исследования по электретному эффекту и дополнил их своими результатами. Гемант указывает, что цель его работы состоит в том, чтобы проверить данные Егучи, выяснить физическую природу электретного эффекта и установить, насколько важны электреты в практическом отношении.

Гемант для изготовления электретов использовал способ, предложенный Егучи, немного модернизировав его. На рис. 15 показан конденсатор Геманта для поляризации восковых электретов. Плоская латунная ванночка *a* имеет внутренний диаметр 40 мм, верхний электрод *в* представляет собой латунный диск диаметром 25 мм с закругленными краями. Верхний электрод установлен на трех стойках *С* из эбонита. Расстояние между дном ванночки и верхним электродом равно 1,6 мм. В ванночку помещается расплавленный воск *е*. Сама ванночка может подогреваться газовой горелкой. Фольга *г* служит для того, чтобы легко вынуть и отделить от электродов затвердевший образец. В опытах Геманта использовалось поляризующее поле $E_n = 11 \text{ кВ/см}$, температура расплавленного воска, при которой прикладывалось поле, составляла 100–120° С. Время поляризации, равное времени затвердевания воска и охлаждения его до комнатной температуры, — 1 час.

Установка для измерения заряда (рис. 16) также мало отличалась от установки Егучи. Правда, Гемант указывает, что его измерительная аппаратура проще. Электрет *е* помещается на тонкий металлический электрод *К*, который, в свою очередь, покоится на парафиновой подставке *а*. В качестве верхнего электрода служит фарфоровый цилиндр *С*, на нижней стороне которого приклеена металлическая пластинка. Верхний цилиндр *С* может опускаться или подниматься при помощи устройства *d* — *a* — *d* — *г*. Нижний электрод соединен с электрометром *в*, который шунтирован конденсатором *h*. Процедура измерения заряда не отличалась от предложенной Егучи.

⁶ Андрей Гемант родился в 1895 г. По национальности венгр. Работал в Германии, Англии и США. Автор двух книг (по физике диэлектриков и физике жидких диэлектриков) и большого числа статей по диэлектрикам.

Рис. 15. Схема ячейки Геманта (1935) для поляризации восковых электретов

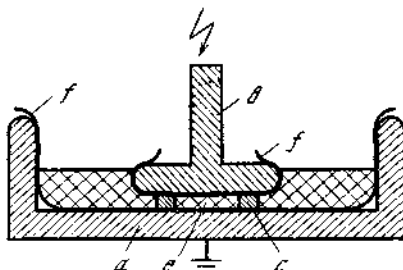
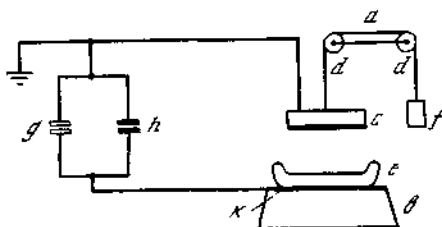


Рис. 16. Схема установки Геманта (1935) для измерения заряда электретов



Для определения знака заряда электрометр после опускания верхнего электрода и снятия закорачивания заряжался от батареи до 18 В положительным электричеством. После поднятия верхнего электрода показания электрометра в зависимости от знака заряда электрода либо увеличиваются, либо уменьшаются. Это позволяет судить о знаке заряда измеряемой поверхности электрета. Гемант указывает на важность измерения общего суммарного заряда электрета в цилиндре (сетке) Фарадея.

Гемант исследовал электреты, изготовленные из чистого карнаубского воска, пчелиного воска и канифоли. Кроме того, ряд веществ, таких, как карнаубский воск, пчелиный воск, канифоль, асфальт и др., он растворял в 15%-ном парафине, который не обладает электретными свойствами, и исследовал полученные растворы. Им также изучались смеси карнаубского воска и канифоли, карнаубского и пчелиного воска и др. Он указывает, что наблюдал два вида зарядов у этих материалов. У одних материалов сразу же после поляризации на поверхностях электрета возникают заряды, противоположные по знаку полярности поляризующих электродов. Такие заряды Гемант назвал *гетерозарядами* (от английского heterogeneous — разнородный). У других материалов элект-

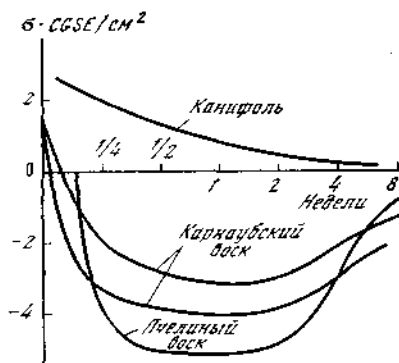


Рис. 17. Зависимость заряда восточных электретов от времени после поляризации (по Геманту, 1935)

рифмическом масштабе). Заряд измерялся на поверхности электрета, которая была обращена при поляризации к отрицательно заряженному электроду. Видно, что электреты из канифоли приобретают гетерозаряд, а у остальных электретов наблюдается переход от гетерозаряда к гомозаряду. В целом Гемант делает вывод о том, что все материалы, обладающие большой удельной проводимостью, имеют гетерозаряд. В противоположность этому у материалов с незначительной ионной удельной электропроводностью наблюдается или гомозаряд, или переход гетерозаряда в гомозаряд.

Гемант отмечает, что электретные заряды, в частности гомозаряды, распределены по всему объему электрета и что это можно доказать соскабливанием поверхностного слоя электрета. Гемант проводит различие между зарядами, образованными трением, и электретными зарядами. В первом случае заряды — поверхностные и поэтому они не могут долго существовать, во втором — объемные, поэтому они существуют долго. Гемант подчеркивает также, что заряд электрета не спадает только до тех пор, пока электрет закорочен, т. е. завернут в фольгу. Как только закорачивание снимается, заряд быстро уменьшается. Гемант наблюдал сильную зависимость электретных зарядов от относительной влажности воздуха. С увеличением влажности величина заряда уменьшается. Закороченные элект-

ретные заряды совпадают по знаку с зарядами поляризующих электродов. Такие заряды им были названы гомозарядами (от английского homogeneous — однородный). Часто, но не всегда гетерозаряд в течение нескольких дней спадает до нуля, после чего возникает гомозаряд, который некоторое время возрастает, а потом остается практически неизменным.

На рис. 17 представлена зависимость заряда от времени для чистых диэлектриков (время отложено в логарифмическом масштабе).

реты сохраняют заряды только до тех пор, пока относительная влажность не достигнет 80%. Поэтому электреты должны храниться в эксикаторах с осушителем (CaCl_2 и др.).

Гемант обратил внимание на то, что электреты не являются источниками тока (батареями). Электреты — источники постоянного поля, но не тока. Поэтому они не могут, например, служить для зарядки сетки лампы и для других подобных целей. О практическом использовании электретного эффекта на ранних стадиях изучения электретов будет рассказано ниже.

VI. РАННИЕ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРЕТНОГО ЭФФЕКТА

1. Теории Егучи, Сато, Наката

Первое объяснение электретного эффекта предложил Егучи (1920—1925). Исходя из экспериментально доказанного факта, что заряды электрета являются объемными, Егучи связал образование электретного состояния с определенными процессами, которые протекают внутри диэлектрика во время поляризации. Егучи объясняет возникновение электретного эффекта так: «Когда к расплавленному веществу прикладывается электрическое поле, сложные молекулы, обладающие дипольным моментом, ориентируются в направлении поля. При затвердевании вещества молекулы сохраняют свою ориентацию, обуславливая тем самым наличие в диэлектрике постоянной электрической поляризации».

Таким образом, согласно Егучи, в расплавленном карнаубском воске, который является слабо полярным диэлектриком, полярные молекулы приобретают возможность ориентироваться под действием поля. При застывании смеси в присутствии поля молекулы теряют способность к вращению и остаются в ориентированном состоянии. Упорядоченное расположение дипольных молекул может сохраняться долго. Ориентированные диполи-молекулы как бы «вмерзают» в вещество. Поэтому в затвердевшем воске после выключения внешнего электрического поля наблюдается остаточная поляризация, а на поверхности располагаются связанные (поляризационные) заряды.

Недостаток этого объяснения состоит в том, что оно ничего не говорит о возможности образования гомозаряда. Поляризационные заряды по своему знаку соответствуют гетерозаряду.

В противоположность Егучи другой японский физик Сато (1922) утверждал, что наэлектризованность электретов обусловлена замораживанием ионов. В расплавленной смеси, электропроводность которой сравнительно велика, положительные ионы под действием электрического поля смещаются к катоду, а отрицательные — к аноду. После застывания смеси при наличии внешнего электрического поля ионы остаются смещенными, так как электропроводность воска в твердом состоянии значительно уменьшается. Эта точка зрения объясняет также происхождение только гетерозаряда.

Наката (1927) первый пытался объяснить происхождение гомозаряда. Он связывал его появление с контактными явлениями на границе металл—диэлектрик.

2. Теория Адамса

Адамс (1927) развил дальше точку зрения Егучи и дал ей математическую интерпретацию [42]. Адамс полагал, что гетерозаряд электрета обусловлен остаточной поляризацией, возникающей в диэлектрике вследствие ориентации дипольных молекул в сильном электрическом поле. После застывания и охлаждения смеси ориентированные дипольные молекулы приобретают большое время релаксации, которое определяет время жизни электрета. Такие диэлектрики с остаточной поляризацией напоминают пироэлектрики. Последние также имеют остаточную поляризацию, которая в отличие от электретной остаточной поляризации со временем не уменьшается. Пироэлектрики обладают термодинамически устойчивой спонтанной поляризацией⁷.

Гомозаряд, по Адамсу, обусловлен свободными зарядами, которые стремятся компенсировать связанные (поляризационные) заряды вследствие омической проводимости материала электрета. Полной компенсации никог-

⁷ Пироэлектричество — явление возникновения электрических зарядов на поверхности кристаллических диэлектриков при их нагревании или охлаждении. Появление зарядов связано с изменением существующей внутри пироэлектрика спонтанной поляризации при нагревании кристалла.

да не наступает, так как остаточная поляризация сама изменяется со временем. У пьезоэлектриков, остаточная поляризация которых постоянна, гетерозаряд всегда нейтрализован свободным зарядом. Поэтому электретный эффект у пьезоэлектриков не наблюдается.

Адамс считал, что в начальный момент ($t = 0$) после поляризации гетерозаряд полностью нейтрализован свободным зарядом, так что полный заряд электрета равен нулю

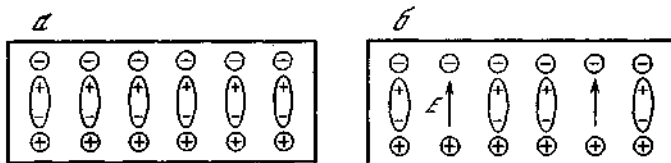


Рис. 18. Природа электретного состояния по Адамсу (1927):

а — в начальный момент после поляризации гетерозаряд полностью нейтрализован свободным гомозарядом; б — через некоторое время после поляризации гомозаряд превышает гетерозаряд

(рис. 18, а). Затем остаточная поляризация начинает уменьшаться, и на поверхности электрета проявляется свободный заряд, совпадающий по знаку с гомозарядом (рис. 18, б). Этот свободный заряд сначала возрастает, потом возрастание прекращается, так как свободный заряд начинает спадать в появившемся внутреннем поле электрета. Наступает динамическое равновесие между числом свободных зарядов, образовавшихся в результате уменьшения остаточной поляризации, и числом свободных зарядов, нейтрализующихся во внутреннем поле электрета вследствие омической проводимости. На поверхности электрета будет располагаться гомозаряд, равный по величине разности между свободным и связанным зарядом.

Теория Адамса получила дальнейшее развитие, и многие ее черты сохранились в современных феноменологических теориях электретного эффекта.

Адамс рассчитал величину начальной остаточной поляризации

$$P_0 = N_0 p = 10^{23} \cdot 10^{-17} = 10^6 \text{ CGSE} \cong 10^{-4} \text{ Кл/см}^2.$$

Здесь $N_0 \cong 10^{23} \text{ 1/см}^3$ — число дипольных молекул в 1 см^3 , $p = 10D$ — средний дипольный момент молекулы⁸. При

⁸ $1D$ (Дебай) = $1 \cdot 10^{-18}$ CGSE.

этом предполагается, что все диполи полностью ориентированы в одном направлении. Такое значение P_0 необходимо для длительного существования электрета.

Таким образом, по теории Адамса на поверхности электрета располагается гомозаряд, причем первоначальное значение этого заряда равно нулю. Теория не предполагает, что поверхностный заряд электрета может соответствовать гетерозаряду, который со временем может перейти в гомозаряд.

На другой недостаток теории Адамса указал Гемант. Он заключается в неоправданно большой величине остаточной поляризации, которая вряд ли может быть достигнута в реальных диэлектриках, так как для этого требуется, чтобы все молекулы имели довольно большой дипольный момент и были бы точно ориентированы вдоль поля. Однако сама мысль Адамса о существенной роли ориентированных диполей в процессе образования электретного состояния нашла подтверждение в других работах.

3. Теория Геманта

В опытах Егучи, а также Геманта и других ученых было обнаружено, что очень часто первоначальный гетерозаряд электрета спадает до нуля, и затем превращается в гомозаряд, который сохраняется в течение длительного времени (рис. 19). Исчезновение гетерозаряда дало возможность Геманту предположить, что он образуется в процессе поляризации за счет смещения ионов под действием электростатического поля; после поляризации, когда внешнее поле удалено, ионные заряды рассасываются. Таким образом, гетерозаряд обусловлен объемно-зарядовой поляризацией ионного типа. Сами же ионы в диэлектрике появляются вследствие электролитической диссоциации молекул. При этом в расплавленном состоянии, когда подвижность ионов велика, объемно-зарядовая поляризация устанавливается довольно быстро, после затвердевания вещества его проводимость уменьшается и нейтрализация ионных зарядов происходит гораздо медленнее.

Для проверки своей теории Гемант использовал U -образную стеклянную трубку, заполняемую расплавленным воском, которая помещалась в масляную ванну и медленно охлаждалась. В трубку были вставлены четыре платиновые проволоочки (рис. 20). К двум крайним проволооч-

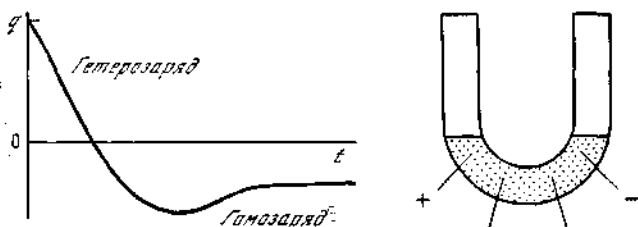


Рис. 19. Зависимость заряда электретов от времени после поляризации

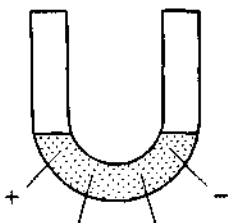


Рис. 20. Схематическое изображение устройства Геманта (1935) для исследования распределения заряда в объеме электрета

кам прикладывалось высокое напряжение. Предварительно проводилась градуировка прибора: в трубку заливалась жидкость (смесь спирта с бензином), у которой объемные заряды отсутствуют, и измерялось распределение потенциала.

В результате этих опытов было показано, что распределение потенциала у расплавленного и твердого воска отличается от распределения у жидкости, не содержащей ионов. Это обусловлено объемными зарядами, образующимися вследствие смещения ионов в электрическом поле. При этом у анода и катода плотность заряда была различной, что объясняется различной подвижностью анионов и катионов.

Зная удельную проводимость воска и его диэлектрическую проницаемость, Гемант подсчитал время релаксации ионного заряда после удаления внешнего поля; оно совпало с экспериментальным значением.

Образование гомозаряда и его устойчивость во времени Гемант объясняет пьезоэлектрическими свойствами кристаллов, которые входят в состав восковой смеси. Пьезоэффект возникает в результате деформации кристаллов при застывании смеси.

Если теория образования гетерозаряда Геманта нашла дальнейшие подтверждения, то гипотеза о возникновении гомозаряда не подтвердилась. Ученые не обнаружили зависимости величины гомозаряда от скорости охлаждения воска, т. е. от величины возникавших деформаций.

Позднее, в 1949 г., Гемант предложил другую теорию электретного эффекта, которая по-новому объяснила образование гомозаряда и обращение знака заряда в электретах.

Согласно этой теории после удаления поляризующего поля электрет обладает внутренней остаточной поляризацией, которая образована объемным зарядом (объемно-зарядовая остаточная поляризация) и ориентированными диполями (дипольная остаточная поляризация). В поле этого гетерозаряда происходит миграция ионов, ведущая к нейтрализации ионов гетерозаряда и переориентации диполей. В результате этих двух процессов гетерозаряд уменьшается и появляется гомозаряд. Последний возникает за счет переориентированных во внутреннем поле электрета диполей. Эти заново ориентированные диполи образуют домены и закрепляются в новом положении.

Казалось бы, теорию Геманта легко проверить. Для этой цели, как указывал сам Гемант, нужно оставить внешнее поляризующее поле на несколько дней, чтобы структура вещества стабилизировалась, тогда диполи образуют устойчивые домены без переориентации; электрет будет иметь долго сохраняющийся гетерозаряд (гетероэлектрет). Переориентация диполей не произойдет и в том случае, если электрет сразу после изготовления закоротить, т. е. свести к нулю внутреннее поле.

Насколько нам известно, эта новая теория Геманта детально не проверялась. Вопрос о наличии доменов в структуре воскообразных электретов, хотя и обсуждался в литературе, но до сих пор не решен.

4. Гипотеза Б. Гросса

о двух видах зарядов электрета.

Начало современного периода
в изучении электретного эффекта

В 1944 г. Б. Гросс [45] высказал новое предположение о природе электретного эффекта. Он отказался от молекулярного рассмотрения механизма образования гетеро- и гомозарядов электретов. Согласно Гроссу, гетерозаряд («внутренняя» поляризация) может быть образован с помощью одного из трех механизмов: «вмерзания» ориентированных диполей после остывания диэлектрика, «вмерзания» сместившихся в электрическом поле ионов, «застывания» зарядов, образованных на макронеоднородностях диэлектрика.

Благодаря одному из этих механизмов или нескольким сразу может образоваться остаточная поляризация. При

этом Гросс не рассматривает причины «вмерзания» зарядов или диполей, считая, что это дело дальнейшего изучения, а лишь указывает на возможные механизмы их образования.

Гомозаряд, по Гроссу, образуется за счет переходов зарядов из электродов в диэлектрик в процессе поляризации, причем основную роль здесь играют местные пробое воздуха в промежутке электрет—электроды. При каждом таком пробое образуется лавина ионов и электронов, которые осаждаются на поверхности электрета, а электрическое поле втягивает их внутрь диэлектрика.]

Механизм образования гетеро- и гомозарядов различен, поэтому может быть различной и природа этих зарядов. Так, гомозаряд всегда образуется за счет «чужих» («внешних») ионов или электронов, а гетерозаряд — путем ориентации или смещения «собственных» (внутренних) диполей и ионов диэлектрика с последующим их «вмерзанием».]

Теория Гросса объясняет двойственную природу заряда электретов, а также связанное с ней обращение знака заряда. Сам Гросс указывал, что впервые идею о двух видах зарядов электретов высказал Адамс в 1927 г. (см. гл. VI, п. 2).

Двухзарядовая теория электретов Гросса в настоящее время считается общепризнанной. Она обсуждалась и проверялась в ряде работ. С гипотезы Гросса начинается новый современный период в изучении электретного эффекта.

В качестве примера применения гипотезы Гросса рассмотрим одну из попыток создания молекулярной теории электретного эффекта, которую предпринял Гемант в 1953 г. Согласно Геманту, гетерозаряд образован смещением ионов и ориентацией диполей при поляризации, а гомозаряд возникает за счет переходов ионов из воздушного промежутка в диэлектрик. Здесь налицо гипотеза Гросса. Переход гетерозарядов в гомозаряды происходит вследствие нейтрализации смещенных к электродам ионов ионами проводимости. При этом часть гетерозаряда исчезает, и число внедрившихся или инжектированных ионов, противоположных по знаку смещенным ионам, начинает превышать число связанных диполей. Результирующий заряд электрета по знаку соответствует гомозаряду, т. е. произошло обращение знака заряда. Длительность сохранения наэлектризованного состояния объясняется тем, что инжектиро-

ванные ионы притягиваются к диполям, а последние образуют устойчивую доменную структуру. Таким образом, по Геманту, хотя электреты и имеют длительно существующий результирующий гомозаряд, электретное состояние связано с устойчивой остаточной дипольной поляризацией; именно она играет главенствующую роль в электретном эффекте.

VII. ПЕРВЫЕ ПОПЫТКИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРЕТОВ

1. Общие соображения о возможностях практического применения электретов

Первое указание о возможности практического применения электретов в качестве пьезодатчиков было сделано Адамсом (1927).

Наиболее детально этот вопрос исследован Гемантом (1935). Гемант впервые обратил внимание на то, что электрет не является источником тока. В то же время им можно заряжать конденсатор, совершая при этом необходимую работу по поднятию металлического электрода. На этом основан метод измерения заряда электрета, предложенный Егучи (см. рис. 14).

Классическим примером этого является приспособление для получения искры, которое приводит Гемант в своей работе (1935 г.). Оно изображено на рис. 21. Электрет *c* покоится на металлической пластине *a*. Металлическая станина *a* с иглой опускается на электрет. После этого к ней приближается вторая игла *d*, соединенная проводником с пластиной, и на расстоянии примерно 1 мм наблюдается искра. Механизм этого явления крайне прост. При опускании станины *a* на нижней ее части индуцируется заряд, противоположный заряду электрета, а на верхней собирается заряд того же знака. Этот заряд и дает искру при поднесении иглы *d*, на которой индуцирован заряд противоположного знака. Повторяя эту процедуру, можно получить искру большое число раз.

Такое устройство может быть использовано для изготовления зажигалок, а также воспламенения горючей смеси в двигателях внутреннего сгорания.

Таким образом, электреты могут служить в качестве источников постоянного электрического поля. Для их практического использования надо оценить величину поля и

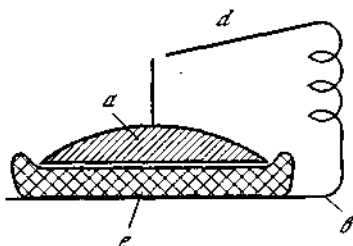


Рис. 21. Устройство для получения искры с помощью электретов (по Геманту, 1935)

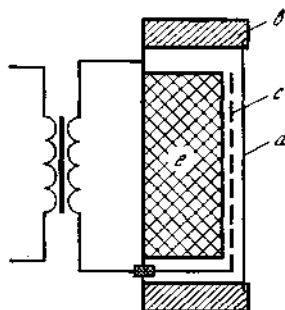


Рис. 22. Схематическое изображение электретного микрофона (по Геманту, 1935)

его стабильность во времени. Гемант приводит следующие цифры. За три года заряд электретов из карнаубского воска и его смесей практически не меняется (данные Егучи). Сам Гемант не наблюдал изменения заряда в течение года, если электрет хранился в сухой атмосфере. Во влажной среде происходит уменьшение заряда. Величина поля вблизи электрета составляла 24 кВ/см и не могла быть больше пробивной прочности воздуха (33 кВ/см). Последняя является наибольшим возможным полем для свободной поверхности электрета.

2. Первая модель электретного микрофона

Опишем конструкцию электретного микрофона, предложенную Гемантом (рис. 22). Электрет e обращен своей свободной поверхностью к металлической сетке c и металлической мембране d . Сетка изолирована от металлического корпуса $б$. При колебаниях мембраны величина поля в воздушном зазоре изменяется и на металлической сетке индуцируются переменные заряды, вызывающие появление тока во внешней цепи.

3. Электрометры на электретах

Постоянное поле электретов может быть использовано для создания различного рода электрометров, работающих без внешних источников питания. Впервые электрометры подобного типа были описаны Гемантом в 1940 г. [44].

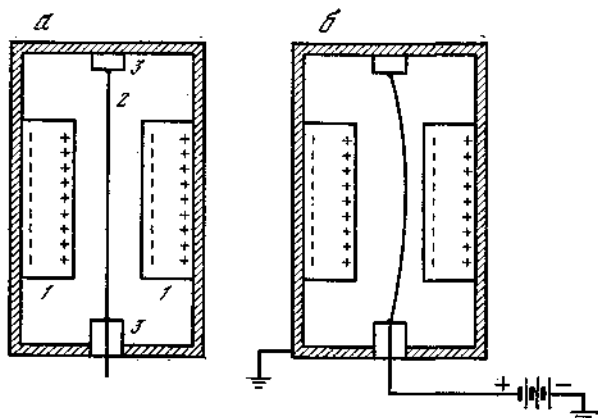


Рис. 23. Схема струнного электрометра с двумя электретами (по Геманту, 1940):
1 — электреты, 2 — металлическая нить, 3 — изолирующие прокладки

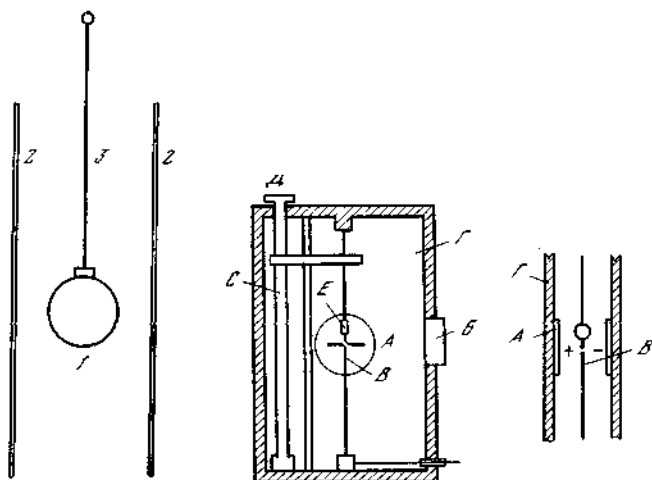


Рис. 24. Схема электрометра с подвешенным электретом (по Геманту, 1940)
1 — электрет, 2 — металлические пластины, на которые подается напряжение, 3 — упругая нить

Рис. 25. Схема вибрационного гальванометра на электретах (по Геманту, 1940):
А — электрет, В — диполь-вибратор, Г — металлическая рама, Е — зеркальце, Б — стеклянное окошко, С — Д — приспособление для изменения момента инерции колеблющейся системы

Струнный электрометр. Тонкая упругая металлическая нить, помещенная между электретом и металлическим электродом или между электретами, обращенными друг к другу своими противоположно заряженными сторонами, будет отклоняться в ту или другую сторону, если на нее подать напряжение от какого-либо источника (рис. 23). По величине отклонения нити можно судить о разности потенциалов батарей.

Электрометр с подвешенным электретом. Этот прибор (рис. 24) аналогичен магнитоэлектрическому гальванометру с подвижным магнитом. Диск электрета 1 поворачивается во внешнем поле, которое создается разностью потенциалов на пластинах 2, присоединенных к измеряемому источнику напряжения.

Прикрепляя к упругой нити маленькое зеркальце и отражая от него световой луч на шкалу, можно измерять угол поворота нити с большой точностью. В статье Геманта описан один из приборов такого типа, чувствительность которого была равна $3,5 \text{ мВ}$.

Вибрационный гальванометр на электретах. Для измерения переменных напряжений и токов часто используют вибрационные гальванометры.

Электретный вибрационный гальванометр, схематическое изображение которого дано на рис. 25, имеет много общего с магнитоэлектрическим. Здесь напряжение от внешнего источника подается на диполь-вибратор В, укрепленный на упругой металлической нити. Диполь-вибратор расположен между двумя электретами А, обращенными друг к другу своими противоположно заряженными сторонами.

При включении переменного напряжения на концах диполя появляются заряды то одного, то другого знака, которые будут взаимодействовать с постоянным полем электретов. Вследствие этого диполь-вибратор придет в колебание.

С упругой нитью, на которой подвешен диполь, жестко связано зеркальце Е. Луч света через окошко В падает на зеркальце, отражается от него и попадает на шкалу, не показанную на рисунке. При колебаниях диполя на шкале прочерчивается светлая полоса, ширина которой пропорциональна измеряемому напряжению.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРЕТНОМ ЭФФЕКТЕ

VIII. ОБЩИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРЕТОВ

1. Виды электретов.

Термо-, фото-, электро-, радио-, коронно-, магнето-, механо- и другие электреты

Существует несколько методов изготовления электретов. Можно нагреть диэлектрик до соответствующей температуры, а затем охладить в электрическом поле. Расплавление диэлектрика, как показали многочисленные опыты, необязательно. Достаточно, чтобы диэлектрик был нагрет до температуры, возможно более близкой к температуре плавления. Изготовленные этим методом электреты называются *термоэлектретами*.

В другом методе вместо нагревания применяется освещение. Полученные таким методом электреты называются *фотоэлектретами*. Изготовление электретов этим способом возможно только из фотопроводящих материалов, таких, как сера, сульфид цинка, кадмия, антрацен и др.

В третьем способе существенную роль играет только электрическое поле. Здесь не применяют ни нагревания, ни освещения. Электреты, полученные таким способом, по аналогии с термо- и фотоэлектретами, названы *электроэлектретами* [3]. Известны электроэлектреты из керамического диэлектрика — титаната кальция и других диэлектриков.

Электретный эффект можно вызвать и без приложения электрического поля. Если в полимерах (например, полиметилметакрилате — органическом стекле) вызвать механические деформации, то на их поверхности появляются заряды. Изготовленные таким способом электреты называют *механоэлектретами*.

Электретное состояние возникает при воздействии на некоторые вещества радиоактивным излучением (α -, β -, γ -лучами).

Полученные двумя последними способами искусственные электреты иногда называют *псевдоэлектретами*, так как они получены без воздействия электрического поля.

При радиоактивном облучении диэлектрика, поме-

щенного в электрическое поле, возникает стабильный электретный эффект. Такие электреты называют *радиоэлектретами*. При этом существенно, чтобы толщина диэлектрика была меньше длины свободного пробега электронов в данном веществе. В последнее время термин «радиоэлектреты» распространен и на случай возникновения электретного состояния под действием облучения без электрического поля.

Стабильный электретный эффект наблюдается у ряда материалов при заряджении их поверхности в поле коронного разряда. Такие электреты носят название *коронноэлектретов*.

В Индии исследуются так называемые *магнетозлектреты*. Это электреты, изготовленные с помощью нагревания, как и термоэлектреты, но при воздействии не электрического поля, а магнитного.

Электретное состояние также может наблюдаться, если диэлектрик наэлектризован трением. Такие *трибоэлектреты* имеют довольно устойчивые заряды разных знаков. Подчеркиваем «разных знаков», хотя нанесен заряд только одного знака и на одну поверхность электрета. Подобное наблюдается и у коронноэлектретов.

Болгарскими учеными описан способ получения электретов при застывании раствора органического растворителя и смолы на подложке из полимера в электрическом поле. Такие электреты получили название *криоэлектретов*. Электретный эффект может наблюдаться в тонкой пленке диэлектрика, образующейся на аноде при электролизе. Такие электреты получили название *анодноэлектретов*.

Можно еще указать ряд разновидностей электретов, например *автофотозлектреты* (диэлектрик с электретными зарядами, возникающими под действием света и внутреннего поля), *сегнетоэлектреты* (электретный эффект у сегнетоэлектриков), *биоэлектреты* (электретное состояние вызвано спонтанной поляризацией дипольных комплексов в тканях живого организма).

2. Изготовление электретов различного вида.

Изготовление термоэлектретов

Принципиальная схема установки для приготовления термоэлектретов изображена на рис. 26. Электрет помещается между металлическими электродами В и С, причем

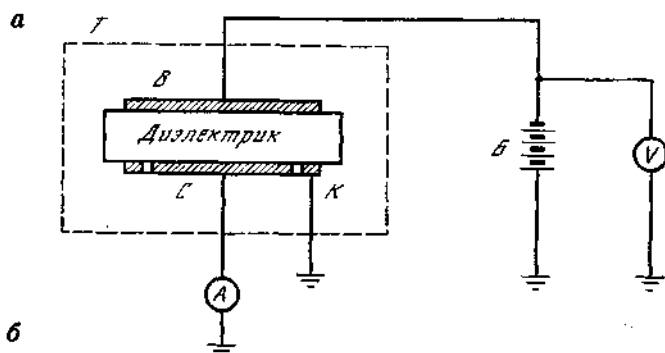


Рис. 26. Установка для изготовления термоэлектретов:

а — принципиальная схема, б — внешний вид, В и С — электроды, К — охранное кольцо, Б — источник высокого напряжения, А — усилитель постоянного тока, V — вольтметр, Т — термостат

электрод С снабжен охранным кольцом К. В качестве источника напряжения Б используется батарея или стабилизированный высоковольтный выпрямитель. Для измерения малых токов служит усилитель постоянного тока А. Штрихом показан термостат, куда помещается образец электродов.

Режим поляризации обычно задают следующий: обра-

Рис. 27. График режима поляризации при изготовлении термоэлектретов

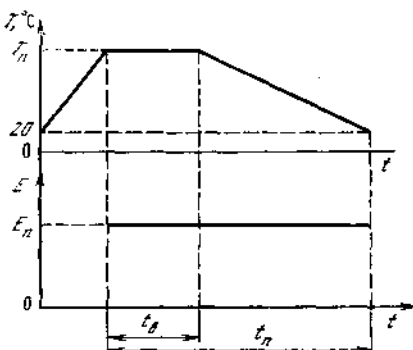


Рис. 28. Гетеро- и гомозаряд электретов

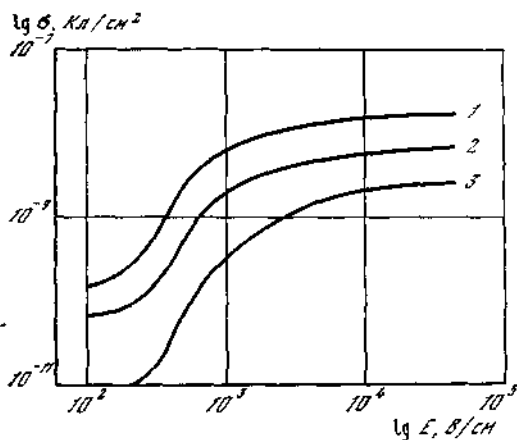
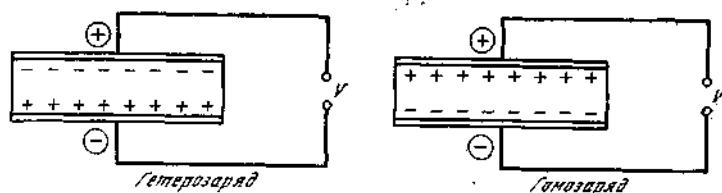


Рис. 29. Зависимость заряда керамического электрета из титаната кальция от напряженности электрического поля при поляризации (по Губину и Скалави, 1961):

1 — заряд измерен сразу после поляризации, 2 — через 10 дней после поляризации, 3 — через 1 месяц после поляризации

зец нагревается до определенной температуры — температуры поляризации T_p без включения электрического поля, затем включается поле, и образец выдерживается при температуре поляризации определенное время (время выдержки t_b), после чего температура медленно понижается до комнатной, а поле остается включенным. На рис. 27 режим поляризации представлен в виде графика: в верхней части рисунка показано, как изменяется температура образца при поляризации во времени, а в нижней — как зависит от времени напряженность электрического поля — поля поляризации $E_p = U/L$, где L — толщина диска, а U — напряжение источника. Часто поле прикладывают в самом начале процесса, и образец нагревается при одновременном действии на него внешнего поля.

В зависимости от сорта диэлектрика температура поляризации T_p может быть весьма различной. Так, для восков T_p не превышает $60-80^\circ\text{C}$. Для полиметилметакрилата — 150°C , для керамических диэлектриков T_p может достигать 300°C .

Время выдержки t_b также может быть весьма различным, но обычно оно равно нескольким часам. Весь процесс поляризации занимает, как правило, 4–8 часов ($t_p = 4-8$ ч).

В зависимости от величины поля поляризации E_p электреты имеют или гетерозаряды или гомозаряды. Рис. 28 поясняет разный характер зарядов у электретов.

На рис. 29 показано, как изменяется плотность поверхностного заряда электрета из керамического диэлектрика титаната кальция (CaTiO_3) от величины поля поляризации. Опыт производился следующим образом. Электреты поляризовались при разных напряженностях поля от 100 В/см до 50 кВ/см , каждый электрет при одной определенной напряженности поля. Затем измерялись их заряды — сразу после поляризации, через 10 дней и через месяц (приведены заряды, соответствующие той стороне электрета, которая была обращена к плюсу поляризующего напряжения).

Из рис. 29 следует, что электрет из CaTiO_3 при любой напряженности поля поляризации имеет гомозаряд, величина которого тем больше, чем сильнее поле поляризации. Со временем заряд электрета несколько уменьшается, но характер его зависимости от поля не изменяется.

На рис. 30 аналогичные зависимости представлены для

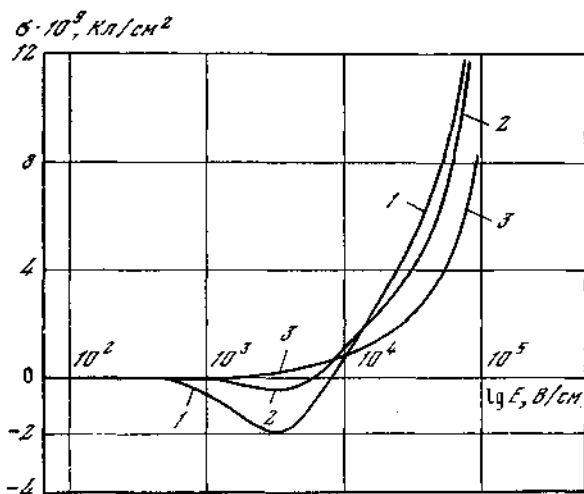


Рис. 30. Зависимость заряда керамического электрета из титаната магния от напряженности электрического поля при поляризации (по Губкину и Сканини, 1961):

1 — заряд измерен сразу после поляризации, 2 — через 10 дней после поляризации, 3 — через 1 месяц после поляризации

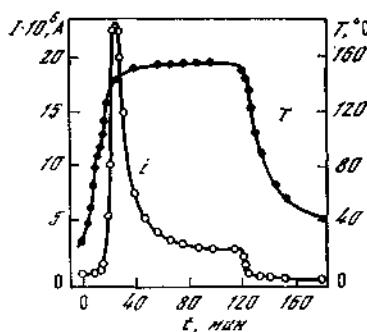


Рис. 31. Электрические токи при поляризации электрета из полиметилметакрилата (плексигласа) (по Видеру и Кауфману, 1953)

электрета из другого керамического диэлектрика — титаната магния (MgTiO_3), отличающегося от первого меньшей величиной диэлектрической проницаемости (для CaTiO_3 $\epsilon = 150$, а для MgTiO_3 $\epsilon = 15$). Здесь уже при малых полях наблюдается гетерозаряд, который со временем может исчезнуть совсем или превратиться в гомозаряд. Величина же гомозаряда, так же как и у электрета из CaTiO_3 , весьма сильно зависит от напряженности поляризующего поля.

На рис. 31 показано, как изменяется ток при поляризации полиметилметакрилата от температуры и времени. Здесь изображены две кривые, одна из которых соответствует изменению температуры со временем, а другая изменению тока. Мы видим, что при 150°C величина тока проходит через резкий максимум, а затем начинает изменяться в соответствии с изменением температуры. Американские ученые, получившие эти результаты, справедливо связывают появление максимума тока с образованием остаточной поляризации диэлектрика.

По площади, заключенной между кривой тока и осью времен, можно определить заряд, остающийся в диэлектрике. При этом надо из общей площади вычесть площадь, которая соответствует омической проводимости диэлектрика и не связана с образованием остаточной поляризации.

Изготовление фотоэлектретов. Как уже отмечалось, для получения фотоэлектретов необходимо освещение. Роль источника тепла здесь играет свет. Схематическое изображение установки для изготовления фотоэлектретов представлено на рис. 32. Верхний электрод *B* делается из легкой металлической сетки, которая хорошо пропускает лучи света, или из полупроводящего стекла.

В этом случае применяется следующий режим поляризации: диэлектрик, помещенный в сильное электрическое поле, освещается светом в течение нескольких минут, затем после удаления источника света напряжение выключается. Например, Г. Наджаков при изготовлении фотоэлектретов из серы в одном из своих опытов прикладывал к образцу напряжение 470 В/см и после трехминутной выдержки в темноте освещал светом в 6000 лк от обычной лампы накаливания в течение 12 мин.

В отличие от термоэлектретов у фотоэлектретов, как правило, наблюдаются только гетерозаряды, которые при хранении образца в темноте медленно уменьшаются со временем.

Величина заряда фотоэлектретов существенно зависит от времени поляризации. В этом случае, как и у термоэлектретов, процесс протекает не мгновенно, а требует некоторого времени для своего развития (рис. 33).

Опыты с фотоэлектретами показали, что величина их равновесного заряда определяется главным образом напряженностью поляризующего поля. От интенсивности же света зависит только время поляризации: чем меньше интенсивность света, тем дольше должен образец находиться в электрическом поле, чтобы приобрести тот же самый за-

Рис. 32. Схематическое изображение установки для изготовления фотоэлектретов:

B и *C* — электроды, *K* — охранный диск, *A* — усилитель постоянного тока, *B* — источник высокого напряжения, *V* — вольтметр

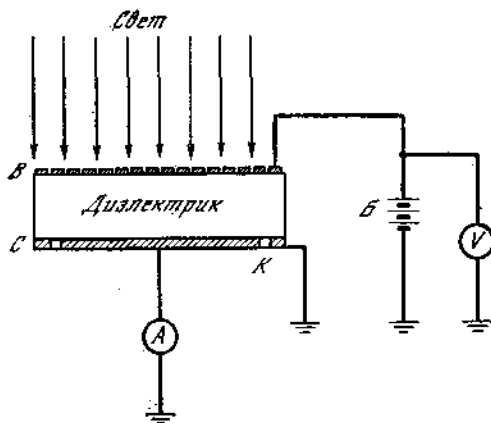
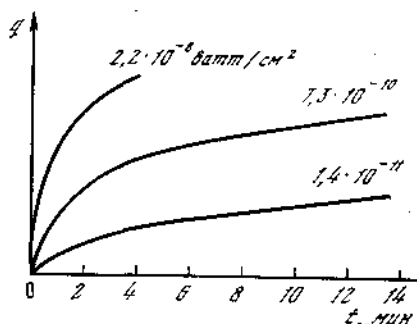


Рис. 33. Зависимость заряда фотоэлектрета из антрацена от времени поляризации и интенсивности ультрафиолетового света (по Фридкину и Желудеву, 1960)



ряд, как и при большой интенсивности света. В каждый данный момент времени величина заряда фотоэлектрета определяется не интенсивностью света или временем поляризации, а только их произведением. Это свойство фотоэлектретов, обнаруженное впервые В. М. Фридкиным и И. С. Желудевым в 1957 г. [4], называют законом взаимозаместимости для процесса образования фотоэлектретного состояния.

Изготовление электроэлектретов. Изготовление электроэлектретов осуществляется таким же образом, как и термоэлектретов (см. рис. 26). Однако нагревание диэлектриков здесь не производится. Термостат служит только для поддержания постоянства температуры, которая обычно выбирается равной комнатной. Напряженность поляризирующего поля в этом случае, как правило, больше, чем средняя напряженность поля при поляризации термоэлектретов.

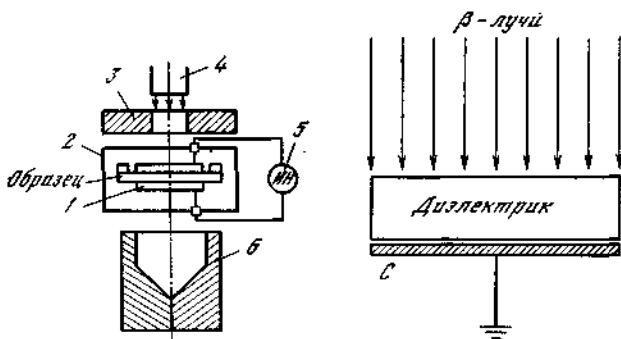


Рис. 34. Принципиальная схема получения радиоэлектретов проникающими пучками электронов:

1 — тонкие электроды, 2 — измерительная ячейка, 3 — коллиматор, 4 — выходное окно ускорителя, 5 — источник постоянного напряжения, 6 — цилиндр Фарадея

Рис. 35. Схематическое изображение опыта для получения радиоэлектретов при облучении электронами, застревающими в веществе

Изготовление радиоэлектретов. Принципиальная схема установки для получения радиоэлектретов не отличается от установки для получения фотоэлектретов (рис. 32). Только вместо света применяется радиоактивное излучение. В случае β -облучения энергия электронов подбирается такой, чтобы они проходили сквозь вещество, не застревая в нем (рис. 34).

Рассмотрим более подробно, как изготавливают радиоэлектреты без применения электрического поля. Схематическое изображение опыта для получения искусственных электретов под действием β -лучей показано на рис. 35. Здесь C — металлический заземленный электрод, второй электрод отсутствует. Б. Гросс (1957) в качестве исходного диэлектрика использовал образец боросиликатного стекла толщиной 1,75 см и диаметром 4,4 см. Электронный пучок с энергией 2 МэВ был получен с помощью ускорителя Ван-дер-Граафа. Электроны, попадая в вещество, тормозились в нем и застревали на расстоянии 0,4 см от верхней поверхности диска.

После облучения на верхней поверхности радиоэлектрета образуется отрицательный заряд, а на нижней — положительный. Это связано с тем, что электроны, проходя максимально возможный путь, зависящий от их

Рис. 36. Расположение зарядов в диэлектрике после облучения его β -лучами

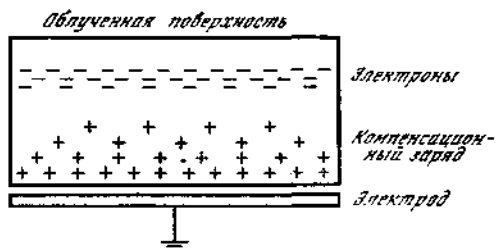
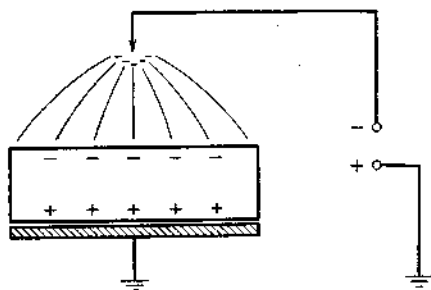


Рис. 37. Схематическое изображение установки для изготовления короноэлектретов



энергии и структуры вещества, застревают на ловушках¹ вблизи облученной стороны диэлектрика; образуется отрицательный заряд. Затем, так как в этом опыте диэлектрик всегда располагается на металлическом заземленном основании, электрическое поле образованного заряда будет действовать на металлический электрод. Под действием поля на электроде индуцируется положительный заряд, а на границе диэлектрик—металл будет действовать сильное электрическое поле. Все это приведет к тому, что на поверхности диэлектрика образуется положительный заряд за счет перехода зарядов из металла в диэлектрик и местных пробоев воздуха в промежутке электрод — диэлектрик (рис. 36).

Изготовление короноэлектретов. При изготовлении короноэлектретов образец диэлектрика помещается в поле коронного разряда (рис. 37). Коронирование достигается с помощью одного металлического острия (иглы), нескольких металлических игл, струн, натянутых вдоль поверхности образца, и других устройств, на которые подается высокое напряжение. Сам образец диэлектрика располагается на заземленном металлическом электроде.

¹ Ловушкой называют то или иное нарушение кристаллической решетки, способное захватывать электрон.

При коронировании образуется лавина электронов и ионов, которые осаждаются на поверхности диэлектрика и создают гомозаряд. Эти электроны и ионы могут быть захвачены глубокими ловушками, образовать «внешнюю» остаточную поляризацию или остаться в «свободном» состоянии и участвовать в процессе электропроводности.

Изготовление механоэлектретов. Для получения механоэлектретов советские физики В. Е. Гуль и Г. А. Лушнейкин (1963) помещали таблетки толщиной 1 мм из различных полимеров между обогреваемыми плитами пресса (давление 100 атм., температура 110° С) [7].

Возникшая поляризация медленно спадает со временем. Так, у органического стекла заряд уменьшается за месяц примерно в 2—3 раза. Однако в отличие от обычных электретов у механоэлектретов заряд распределен по поверхности сложным образом. На каждой поверхности образца имеются области с различными по величине и знаку зарядами, но всегда заряду одного знака соответствует заряд другого знака и той же величины на противоположной поверхности образца.

✓ 3. Электретные материалы

Мы уже упоминали, что из разных диэлектриков получают различные по своим качествам электреты. Теперь рассмотрим более подробно вопрос о том, из каких диэлектриков вообще возможно получение электретов, а из каких нет, и как зависят свойства электретов от исходного материала.

Немного истории. Первые электреты были получены из карнаубского воска и из смеси примерно равных частей этого воска, канифоли и небольшого количества пчелиного воска. В дальнейшем к карнаубскому воску стали добавлять и другие компоненты, которые улучшали свойства электретов и делали их менее хрупкими. Так, в одной из работ сообщается, что стабильные электреты с достаточно большой поверхностной плотностью заряда получены из смеси 45% (весовых) карнаубского воска, 45% гидрогенизированной смолы и 10% этилцеллюлозы.

В 1953 г. было изготовлено большое количество электретов из другого класса органических веществ — полимеров [48]. Электреты получены из полиметилметакрилата,

найлона, люцита и других полимеров. Позднее исследование в этой области продолжались, и количество полимеров, из которых стали получать достаточно стабильные электреты, возросло.

В это же время термоэлектреты изготавливались и из других диэлектриков (нафталин, сера, эбонит, канифоль), а также продолжались поиски материалов, пригодных для получения фотоэлектретов.

В 1957 г. в СССР А. Н. Губкину и Г. И. Сканави [11] удалось изготовить электреты из большой группы керамических диэлектриков. В отличие от восков, смол и полимеров керамические электреты обладают большой механической прочностью, жаростойкостью, а также рядом специальных свойств.

Первые исследователи, основываясь на опытах Егучи, считали, что электреты можно получить только из дипольных диэлектриков, обладающих малой электропроводностью (10^{-16} — 10^{-18} Ом⁻¹см⁻¹). Эта точка зрения была распространена довольно долго, так как воски, смолы и полимеры, из которых стали изготавливать электреты, действительно представляют собой полярные или слабополярные диэлектрики с малой электропроводностью.

Так, например, Гемант (1935) и Паджетт (1949) на основе многочисленных опытов пришли к выводу, что электреты могут быть получены только из таких веществ, которые содержат полярные группы (—ОН, —СООН и др.). Согласно этой точке зрения парафин для изготовления электретов не пригоден, а карнаубский воск является наиболее подходящим материалом.

Позднее было обнаружено, что в электретах из карнаубского воска наблюдаются большие остаточные заряды, располагающиеся по всему объему диэлектрика. При этом предполагалось, что эти заряды состоят из ионов. Введение в карнаубский воск ионных добавок (Мэрфи, 1968), а в пчелиный воск канифоли (Гемант, 1935; Пик, 1965), которая увеличивает ионную проводимость, улучшает свойства электретов. Поэтому многие стали думать, что в электретном эффекте определяющую роль играют не полярные группы, а объемные заряды, образующиеся при ионной электропроводности расплавленного воска.

В дополнение к этому были получены электреты из ряда неорганических диэлектриков, имеющих ионную электропроводность (например, из некоторых сортов сте-

кол), что также указывало на определенную роль, которую играют ионы в процессе образования электретов.

Таким образом, стали считать, что электретный эффект обусловлен или «вмерзанием» ориентированных полей полярных групп, или «вмерзанием» сместившихся под действием поля ионов, т. е. может наблюдаться в диэлектриках, содержащих либо полярные молекулы, либо обладающих ионной электропроводностью.

В 40-х годах XX в. бразильский ученый Гросс высказал еще одно предположение о причине образования электретов. Он обратил внимание на известный факт образования остаточной поляризации в диэлектриках, содержащих инородные включения макроскопических размеров, и предположил о возможности создания электретов из таких материалов. Согласно этим представлениям электреты могут быть изготовлены из неоднородных диэлектриков.

Однако после открытия фотоэлектретов и особенно после того, как были получены термоэлектреты из неполярных керамических диэлектриков, обладающих в основном достаточно большой ($10^{-10} - 10^{-14} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$) электронной электропроводностью, все эти точки зрения пришлось дополнить.

В настоящее время можно считать установленным, что электретное состояние может быть вызвано любым видом «внутренней» релаксационной поляризации (дипольной, ионной и электронной тепловой, объемно-зарядовой), а также захваченным инжектированным зарядом («внешней» поляризацией).

Несколько замечаний о материалах, применяемых для изготовления электретов. Некоторые исследователи приводили в своих работах таблицы различных веществ, из которых они пытались получить электреты. Эти данные, как правило, отличаются друг от друга и часто противоречат друг другу. В качестве примера приведем сравнительную оценку веществ, применяемых для изготовления электретов, которую дал немецкий физик Антенен в 1953 г. в одной из своих работ (см. с. 67).

В дальнейшем данные Антенена были существенно уточнены и дополнены. В частности, показано, что некоторые вещества обладают хорошими электретными свойствами, если их использовать в виде тонких пленок (например, политетрафторэтилен).

| <i>Очень хорошие</i> | <i>Средние</i> | <i>Плохие</i> |
|---|-----------------------|-----------------------------|
| Полиметилметакрилат | Титанат бария | Полистирол |
| Поливинилацетат | Пальмитиновая кислота | Полиэтилен |
| Полиамидная смола | Сахар | Политетрафторэтилен |
| Смесь (1:1) канцфолн с карнаубским воском | Полиэфир | |
| | Борное стекло | Оконное стекло |
| | Парабромфенол | Парафин |
| | Парагидроксидифенил | |
| | Параметоксидифенил | Ацетилизированная целлюлоза |
| | Сера | |

Ниже, в главе XIII, будут подробно обсуждаться свойства диэлектриков, у которых обнаружен термоэлектретный эффект. Там будут перечислены все известные электретные материалы.

4. Стабильность заряда электретов

Как мы уже знаем, основным свойством электретов является наличие у них поверхностных зарядов. Величина этих зарядов может быть легко измерена на опыте. Электрет тем и отличается от других диэлектриков, что способен нести на своих противоположных сторонах заряды различного знака, которые могут сохраняться в течение весьма длительного времени.

Гетеро- и гомозаряд электретов. Как же ведет себя поверхностный заряд электретов после поляризации? Проведем такой опыт. Заполяризуем электрет и будем затем каждый день измерять плотность его поверхностного заряда, например, методом электростатической индукции.

На рис. 38 показано, что мы можем получить в этом случае. На оси абсцисс отложено время, на оси ординат — плотность поверхностного заряда, соответствующая той стороне электрета, которая была обращена к положительному полюсу внешнего источника при поляризации.

Как видно из рис. 38, можно наблюдать четыре различных случая. В первом из них (рис. 38,а) гетерозаряд

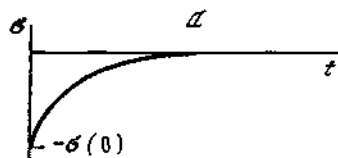


Рис. 38. Характерные зависимости заряда электретов от времени после поляризации

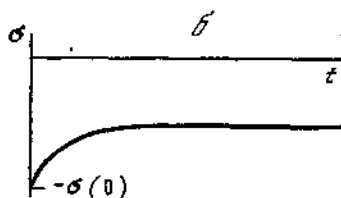
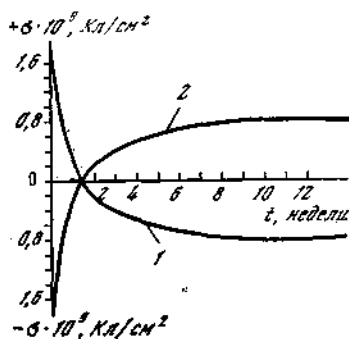
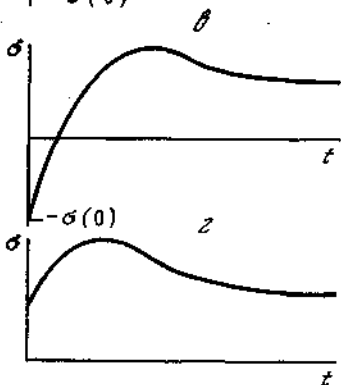


Рис. 39. Экспериментально наблюдаемое обращение знака заряда у керамических электретов на титаната магния (по Губкину и Сканэви, 1958): 1 — сторона электрета, обращенная к минусу поляризующего напряжения, 2 — к плюсу



электрета (здесь именно гетерозаряд, так как σ имеет отрицательный знак) в течение нескольких недель уменьшается до нуля. Во втором случае (рис. 38, б) гетерозаряд сначала несколько спадает, а затем практически не меняется; в третьем случае (рис. 38, в) гетерозаряд быстро (часы, дни) спадает до нуля, а затем превращается в гомозаряд. Величина гомозаряда сначала растет, потом переходит через максимум, а затем практически не меняется. В четвертом случае (рис. 38, г) у электрета сразу же после поляризации наблюдается гомозаряд, который переходит через максимум, а затем мало изменяется со временем.

Тот или иной случай будет наблюдаться в зависимости от величины поляризующего поля и диэлектрических свойств материала электрета. Так, для электретов, у ко-

торых диэлектрическая проницаемость невелика (воск, смолы, полимеры, некоторые сорта керамики и др.), могут наблюдаться все четыре случая. Решающую роль здесь играет напряженность поля поляризации.

На основе многочисленных опытов принято считать, что если напряженность поля $E_n < 5 \text{ кВ/см}$, то поведение электретов описывается по преимуществу первым и вторым случаями, если $E_n > 10 \text{ кВ/см}$, — четвертым. Если же E_n лежит в промежутке между этими значениями, то может быть третий случай, т. е. обращение знака заряда.

В качестве иллюстрации на рис. 39 приведена экспериментальная зависимость заряда керамического электрета из MgTiO_3 от времени после его поляризации при 5 кВ/см .

Некоторые электреты имеют гомозаряд при любом значении поля поляризации, другие — только гетерозаряд, сохраняющийся длительное время.

Так, у керамических электретов с повышенной диэлектрической проницаемостью (свыше 50) при любой величине поля наблюдается только гомозаряд, хотя у них, как показывают опыты по деполяризации, имеется большая остаточная поляризация.

Время жизни электретов. Время жизни электретов, т. е. время, в течение которого они сохраняют свои заряды, может быть весьма различным.

Величина поверхностного заряда электретов, как правило, изменяется ото дня ко дню. Колебания заряда больше, если его измерять методом электростатической индукции, и меньше, если его измерять с помощью вибратора. По-видимому, основную роль здесь играют контактные явления, а также относительная влажность воздуха, так как при малой влажности заряд изменяется незначительно при любом способе измерения.

При нагревании термоэлектретов величина их заряда начинает изменяться. Соответственно время жизни электретов резко уменьшается. Если время жизни керамических электретов при комнатной температуре составляет годы, то при 200° оно равно всего нескольким суткам, а при температуре 300° — несколькими часам.

Интересно отметить, что время жизни электретов при повышенной температуре зависит от температуры поляризации образца. Чем выше температура поляризации, тем дольше «живет» электрет при высокой температуре;

если керамический электрет был поляризован при 300° , то он может храниться при 400° в течение 20 ч, тогда как в случае поляризации при 200° он хранится при 350° только 30 мин.

В настоящее время трудно установить время жизни электретов, так как оно сильно зависит от внешних условий. Однако можно сказать, что есть электреты, например из титаната кальция, из пленки политетрафторэтилена (фторопласт-4), заряд которых заметно не меняется в течение нескольких лет.

5. Роль закорачивания в электретном эффекте

Электреты во многих отношениях аналогичны постоянным магнитам. Мы встречались уже с одним из свойств электретов, которое наблюдается также и у постоянных магнитов. Постоянные магниты хранятся обычно в закороченном состоянии, т. е. их полюсы замыкают магнитопроводящим материалом (например, железом). В противном случае они могут потерять свою намагниченность.

Аналогично этому некоторые электреты также необходимо закорачивать, т. е. соединять их полюсы электропроводящим материалом — металлом. Если этого не делать, то электреты из некоторых материалов (например, из воска) теряют свои заряды.

Что же происходит при закорачивании электретов? В результате закорачивания поле внутри электрета становится весьма малым, а вне электрета вообще не будет никакого поля. Первое обстоятельство предохранит электрет от разрядки за счет его внутренней проводимости, а второе — за счет проводимости окружающего электрет газа.

Закорачивание не только увеличивает время жизни электретов, но и затягивает все процессы, связанные с омической проводимостью электретов. В частности, время перехода от гетеро- к гомозаряду может стать таким большим, что гомозаряд не проявится.

6. Остаточная поляризация электретов.

Двойственная природа заряда электретов

Внутренняя остаточная поляризация. При поляризации диэлектрика, способного к электретированию, происходит смещение зарядов или ориентация диполей. Энергия,

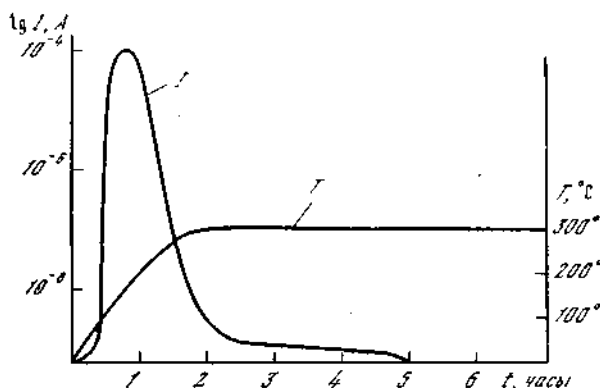


Рис. 40. Зависимость тока термодеполяризации и температуры от времени для керамических электретов из титаната кальция (по Губинну, 1960)

необходимая для этого, поступает из внешнего источника напряжения. Если теперь попытаться каким-то образом уничтожить возникшую поляризацию, то произойдет выделение энергии. При этом, если электрет расположен между электродами, соединенными между собой проводником, по цепи пойдет ток деполяризации, который может быть измерен. По величине этого тока можно судить об "остаточной" поляризации диэлектрика.

Каким же образом можно разрушить поляризацию электрета, деполяризовать его? При поляризации действуют два фактора: электрическое поле и теплота (свет в случае фотоэлектретов). Роль поля сводится к смещению зарядов, а теплоты (света) — к образованию зарядов, способных смещаться под действием электрического поля. Нагревая термоэлектрет или освещая фотоэлектрет без приложения внешнего поля, мы разрушаем его поляризацию, так как под действием тепла или света сместившиеся во время поляризации заряды будут отрываться от связывающих их центров и релаксировать во внутреннем поле электрета. Это приведет к уничтожению поляризации.

На рис. 40 приведены данные по термодеполяризации керамического электрета из CaTiO_3 . Здесь на одном рисунке построены сразу два графика: зависимость тока термодеполяризации и температуры термодеполяризации от времени. Температура термодеполяризации не превы-

шала 200°. Если же деполяризовать электрет также при 200°, то процесс продлится очень долго, свыше 80 час.

По площади, заключенной между кривой тока и осью времени, можно определить заряд, запасенный в электрете. При этом поверхностная плотность заряда численно равна остаточной поляризации (см. формулу 1.2).

Как показали опыты, плотность поверхностного заряда электретов из карнаубского воска, определенная этим методом, приблизительно равна 10^{-7} Кл/см², а у керамических электретов она еще больше и может достигать до 10^{-5} — 10^{-4} Кл/см². Знаки зарядов, определенные по направлению токов деполяризации, соответствуют гетерозаряду.

Два вида зарядов у электретов. Возникает вопрос, почему же заряды электретов, обусловленные остаточной поляризацией, так велики, тогда как заряды, измеренные методом электростатической индукции, гораздо меньше (10^{-9} — 10^{-8} Кл/см²) и, как правило, имеют другие знаки. Это можно легко объяснить, вспомнив гипотезу Б. Гросса (см. гл. VI, п. 4) о том, что, кроме зарядов поляризации, в электрете имеются заряды другой природы, знак которых противоположен поляризационным зарядам.

Почему эти заряды должны быть обязательно другой природы? Да потому, что в противном случае они нейтрализуют заряды поляризации и при деполяризации электрета такого большого заряда не будет.

На рис. 41, а дано схематическое изображение диэлектрика с «внутренней» остаточной поляризацией, которая условно представлена в виде ориентированных диполей. Так как по величине остаточная поляризация весьма велика, то внутри и вне электрета будет действовать сильное электрическое поле. Это приведет вследствие проводимости материала электрета и окружающего его газа к появлению электрического тока, который будет стремиться уменьшить вызвавшее его поле. В результате поляризационные заряды частично заэкранируются свободными зарядами диэлектрика, электронами и ионами воздуха. Кроме этого, заряды могут проникать (инжектироваться) в диэлектрик в процессе поляризации из междуэлектродных промежутков и из электродов. Все эти заряды противоположны по своему знаку поляризационным зарядам и соответствуют гомозаряду (кружки на рис. 41, б).

Рис. 41. Схематическое изображение зарядов и электрических полей электрета:

- а — электрет имеет только «внутреннюю» остаточную поляризацию (гетерозаряд),
б — электрет имеет и гетеро- и гомозаряд

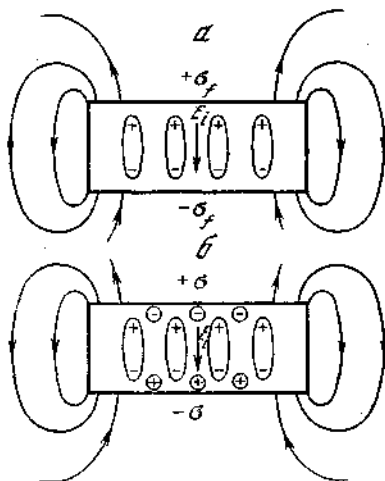
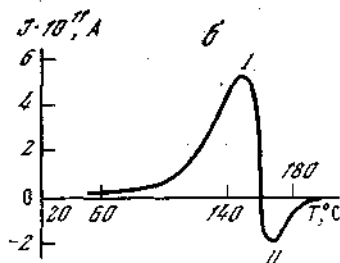
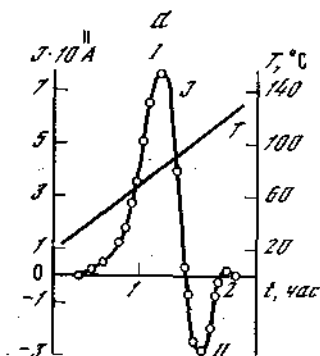


Рис. 42. Зависимость тока термодеполяризации от температуры для электретов из полиметилметакрилата (а) (по Губкину и Оглобину, 1973) и из поликарбоната (б) (по Лущейкину, 1976):

- I — максимум, соответствующий разрушению гетерозаряда,
II — гомозаряда



Гомозаряды могут находиться в свободном и связанном состояниях. Связанный гомозаряд удобно рассматривать как «внешнюю» остаточную поляризацию (см. гл. II, п. 5).

В некоторых случаях гомозаряды можно наблюдать при термодеполяризации. Например, деполаризуя электрет из полиметилметакрилата (рис. 42,а) и поликарбоната (рис. 42,б), получают два максимума тока, один из которых (I) соответствует разрушению остаточной поляризации, а другой (II) — разрушению гомозаряда.

Мы уже отмечали, что у электретов может наблюдаться обращение знака заряда. Так, если сразу после поля-

ризации электрета имеет гетерозаряд, то спустя некоторое время он может превратиться в гомозаряд, а затем практически остаться без изменения. Гетерозаряд у электрета наблюдается в том случае, когда его поляризационный заряд больше экранирующего гомозаряда, а гомозаряд — в противоположном случае. Переход заряда электрета через нуль и обращение знака заряда связано с тем обстоятельством, что его гетеро- и гомозаряды не постоянны, а находятся все время в состоянии изменения.

Для электретов характерно объемное распределение зарядов. Какие же это заряды? Сначала рассмотрим, получим ли мы два электрета при разрезании диэлектрика, содержащего только «внутреннюю» остаточную поляризацию, если экранирующий ее гомозаряд отсутствует?

«Внутренняя» остаточная поляризация может быть образована либо «вмерзанием» дипольных молекул и слабо связанных ионов, либо «вмерзанием» сместившихся к электродам ионов и электронов. В первом случае при разрезании одного электрета всегда получают два (рис. 43,а).

Во втором случае, как видно из рис. 43,б, в момент после разрезания можно получить кусок, содержащий заряды только одного знака, неравномерно распределенные по толщине электрета. Но впоследствии благодаря действию сильного электрического поля в объем диэлектрика может втянуться из электродов или воздуха заряд противоположного знака.

Однако у реальных электретов «внутренняя» остаточная поляризация заэкранирована зарядами другой природы. В этом случае все происходит более сложно, но всегда при разрезании одного электрета получают два.

Вспомним, как еще Егучи в первых работах пытался доказать, что заряды электрета не являются просто поверхностными. Впоследствии это было доказано другими.

Опыт ставился следующим образом. С поверхности электрета снимался слой вещества и при этом измерялся его поверхностный заряд. Затем снимался следующий слой, и опять измерялся заряд и т. д. На восковых электретах это сделать несложно. По измеренному заряду можно было судить о распределении зарядов внутри диэлектрика. Таким способом ученым удалось найти распределение гетеро- и гомозарядов отдельно.

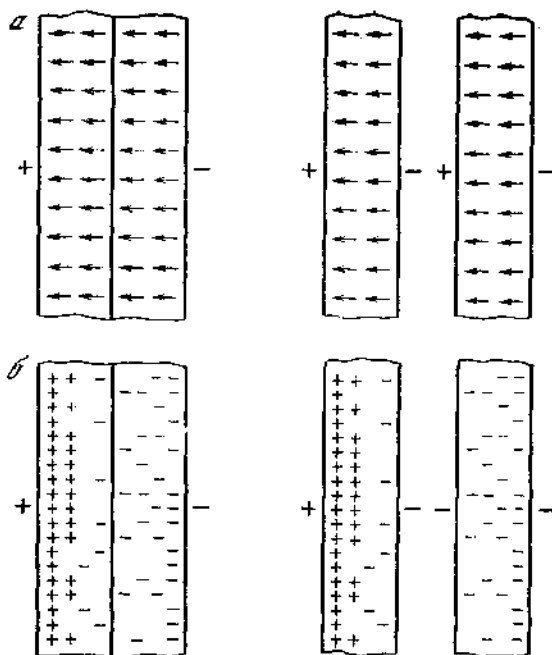


Рис. 43. Образование двух электретов из одного:

а — в случае однородной поляризации; б — в случае неоднородного распределения зарядов

На рис. 44 показано распределение зарядов у электретов из карнаубского воска. Для электретов из других материалов получены аналогичные результаты. В верхней части рисунка изображен поперечный разрез электрета и указана ось, в направлении которой производилось сближение поверхностных слоев диэлектрика.

Из рис. 44 следует, что у электретов, имеющих только «внутреннюю» остаточную поляризацию без экранирующего ее гомозаряда, заряды располагаются по всему объему диэлектрика. При этом, как и следовало ожидать, к катоду прилежит положительный объемный заряд, а к аноду — отрицательный (рис. 44,а). Такое распределение характерно как для сместившихся на макрорасстояния ионов и электронов, так и для диполей и слабо связанных ионов, если последние неравномерно распределены по толщине

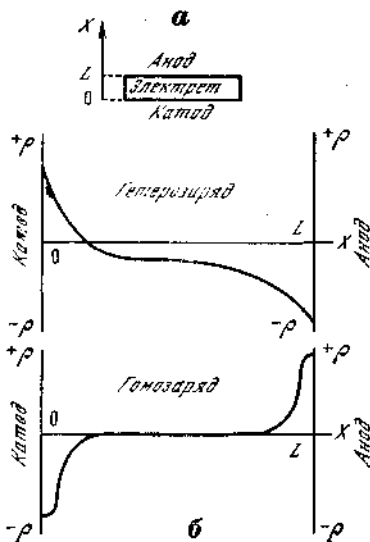


Рис. 44. Распределение зарядов внутри электрета из карнаубского воска (по Тиссену, Винкелю и Герману, 1936)

электрета. В случае равномерного распределения ориентированных диполей или слабо связанных ионов такого распределения не получится.

Надо думать, что в образовании гетерозаряда электретов из карнаубского воска принимают участие как ионы и электроны, образующие объемные заряды у электродов, так и дипольные молекулы. Поэтому и получается неравномерное распределение зарядов по объему.

У электретов, не имеющих «внутренней» остаточной поляризации, всегда образуется только гомозаряд. В противоположность рассмотренному случаю гомозаряды предполагаются в тонких приэлектродных слоях (рис. 44, б).

Разумеется, в обычном электрете имеется как гетерозаряд, так и экранирующий его гомозаряд, а поэтому распределение зарядов в этом случае будет иметь более сложный характер. Его можно найти по кривым распределения, приведенным на рис. 44, а и 44, б.

Был проделан и другой опыт, доказывающий объемное распределение зарядов у электретов, изготовленных из различных материалов. Тонкие диски из органического стекла склеивались клеем из этого же материала, затем вся стопка поляризовалась (Видер и Кауфман, 1953). После поляризации диски отделялись один от другого и измерялся их заряд. Оказалось, что каждый диск является электретом. Аналогичный опыт проделан и с керамическими диэлектриками (А. Н. Губкин и Г. И. Сканами, 1958). В этом случае стопка состояла из 10 дисков, точно пришлифованных друг к другу, диаметром 60 мм и толщиной 1 мм.

Помимо метода срезов или склеивания, объемное распределение зарядов у электретов можно установить с помощью деполяризации. Гросс и Морис (1962) разрезали

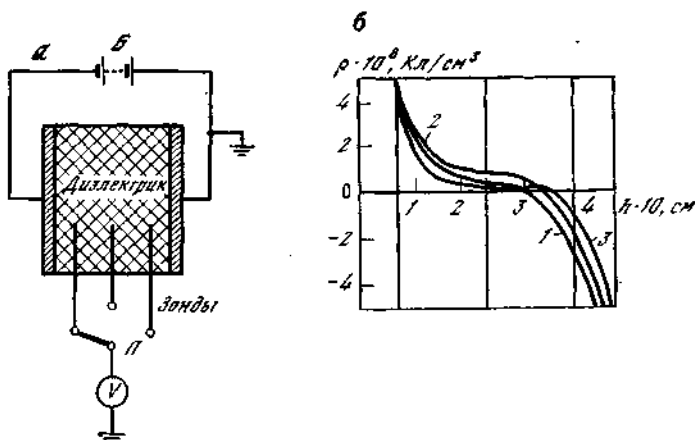


Рис. 45. Методика зондовых измерений (а) и распределение заряда внутри образца из полиметилметакрилата в процессе поляризации (б) (по Губкину и Кашняной, 1972):

1 — $T_{\text{п}} = 125^{\circ}\text{C}$, время выдержки в поле $t_{\text{в}} = 5$ мин; 2 — $T_{\text{п}} = 50^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в}} = 1,5$ часа; 3 — $T_{\text{п}} = 25^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{в}} = 2$ часа

уже готовый электрет из карнаубского воска параллельно его поверхностным плоскостям на отдельные секции и затем термодеполяризовали их. Измеряя ток термодеполяризации, можно было определить суммарный заряд, содержащийся в каждой отдельной секции. При этом было обнаружено, что секционные заряды одинаковы. Это говорило о том, что электреты из карнаубского воска имеют однородное распределение заряда. Полученные данные противоречат результатам других ученых и требуют объяснения.

В последнее время для изучения заряда электретов стал широко использоваться метод зондов. Впервые зондирование большой группы диэлектриков, находящихся в электрическом поле, осуществили в 20-годах академик А. Ф. Иоффе и его ученики. С целью выяснения причин образования гетеро- и гомозарядов И. В. Курчатов и К. Д. Синельников (1927) измерили распределение потенциала методом зондов у всех диэлектриков, обследованных на электретный эффект Егучи и Микола. В дальнейшем зондированию были подвержены электреты из полимеров и льда. Во всех случаях обнаружено объемное распределение заряда.

Недостатком всех этих опытов является то, что распределение заряда измерялось не у готового электрета, а у диэлектрика, помещенного в электрическое поле, т. е. в процессе изготовления электрета (рис. 45). Поэтому остается открытым весьма важный вопрос о том, насколько долго сохраняются возникшие в процессе поляризации заряды после удаления внешнего электрического поля, т. е. какую роль они играют в электретном эффекте. В настоящее время стоит задача применить зондовый метод для изучения зарядов уже готового электрета.

7. Краткая сводка основных свойств, присущих всем электретам

Перечислим основные свойства, присущие всем электретам: длительное сохранение заряда при сравнительно малом времени максвелловой релаксации², обращение знака (от гетеро- к гомозаряду); наличие «внутренней» и «внешней» остаточных поляризаций; два различных направления тока термодеполяризации. Всем электретам присуща двойственная природа заряда: гетерозаряд возникает за счет собственных зарядов диэлектрика, а гомозаряд, как правило, за счет «чужих» зарядов, инжектированных из электродов или из межэлектродных промежутков. У всех электретов обычно наблюдается объемное распределение гетеро- и гомозаряда.

Помимо этого, можно указать еще на следующие общие закономерности электретного эффекта, которые будут подробно рассмотрены в главах IX и XII. Деполяризационное разрушение электретов сопровождается шумами типа шумов Баркгаузена. Все электреты характеризуются анизотропией в отношении диэлектрической и магнитной проницаемости и коэффициента преломления видимого света. Радиоактивное облучение, как правило, снижает заряд электретов. Переменное электрическое поле и ультразвук большой интенсивности ускоряют процесс деполяризации электретов. Атмосферное давление, температура и влажность окружающей среды оказывают существенное влияние на поведение, величину и стабильность заряда электретов.

² Максвеллово время релаксации — время разрядки наэлектризованного тела за счет омической проводимости.

IX. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ И ГЕОМЕТРИИ ОБРАЗЦОВ НА СВОЙСТВА ЭЛЕКТРЕТОВ

1. Зависимость заряда электретов от атмосферного давления

Электрет создает сильное электрическое поле в окружающем его пространстве. Максимальная величина этого поля $E = 4\lambda\sigma$ (см. гл. X, п. 1).

Подсчитаем величину поля E в практической системе единиц, если поверхностная плотность заряда электрета σ равна $2,92 \cdot 10^{-9}$ Кл/см²:

$$E = k\sigma = 1,13 \cdot 10^{13} \text{ В} \cdot \text{см/Кл} \cdot 2,92 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2 = 33 \text{ кВ/см.}$$

Здесь k — коэффициент пересчета единиц, равный $1,13 \cdot 10^{13}$ В·см/Кл.

Известно, что в однородном электрическом поле, например между двумя металлическими шарами большого диаметра, воздух пробивается при напряженности поля $E_{\text{пр}} = 33 \text{ кВ/см}$. С другой стороны, напряжение, прикладываемое к электродам при пробое газа, является функцией от произведения атмосферного давления p на расстояние l между электродами:

$$V_{\text{пр}} = f(pl) \text{ — закон Пашена.}$$

Таким образом, при неизменном расстоянии между электродами напряжение и напряженность пробивного поля $E_{\text{пр}}$ зависят от атмосферного давления. При уменьшении давления $E_{\text{пр}}$ уменьшается, переходит через минимум, а затем начинает увеличиваться. Положение точки минимума определяется расстоянием между электродами.

Мы видим, что если плотность поверхностного заряда электрета будет больше $2,92 \cdot 10^{-9}$ Кл/см², то максимальная напряженность его поля E будет больше 33 кВ/см , т. е. больше $E_{\text{пр}}$ при нормальном атмосферном давлении. В том месте, где $E > E_{\text{пр}}$ (а поле свободного электрета различно в разных местах пространства), произойдет пробой, т. е. проскочит искра, и заряд электрета уменьшится. Пробой будут происходить до тех пор, пока заряд электрета не станет меньше $2,92 \cdot 10^{-9}$ Кл/см², а его поле меньше 33 кВ/см .

При изменении атмосферного давления $E_{\text{пр}}$ меняется, в соответствии с этим будет меняться и заряд электрета.