

Интересные данные получены при изготовлении пленочных электретов при малых временах поляризации. В работе американских ученых Лилли, Хендерсона и др. (1970) показано, что при приложении коротких импульсов напряжения (800 кВ/см, от микросекунд до 10 с) пленка майлара с напыленными электродами приобретает гомозаряд за счет инжектирования зарядов с электродов. При этом остаточная поляризация (гетерозаряд) не образуется. При приложении более низкого напряжения (до 240 кВ/см) в течение длительного времени (45 мин) и повышенной температуры ($T_n = 142^\circ \text{C}$) пленка майлара с напыленными электродами приобретает только «внутреннюю» остаточную поляризацию (гетерозаряд). Ряд данных говорит о том, что последняя, возможно, связана с ориентацией диполей.

В работах А. Н. Губкина и С. М. Липаева (1971—1973) показано, что стабильные электреты из пленок ПЭТФ и Ф-4 (толщина от 20 до 100 мк) могут быть получены при поляризации в импульсах высокого напряжения (от 0,5 до 2 кВ) длительностью от 100 до 10^{-7} с при комнатной температуре. При этом свойства электретов, полученных при кратковременной поляризации, мало отличаются от свойств электретов, полученных при длительной поляризации (порядка 10^4 с).

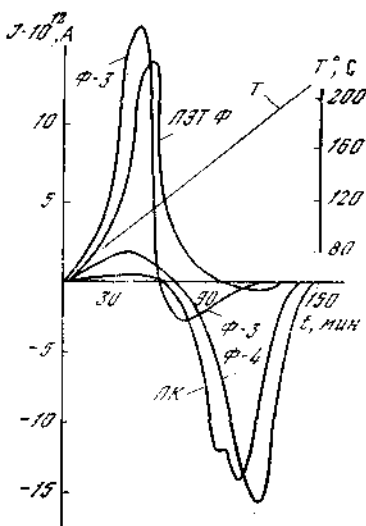


Рис. 72. Токи термодеполяризации электретов из различных полимерных пленок (Ф-4 — фторопласт-4; Ф-3 — фторопласт-3, ПЭТФ — полиэтилентерефталат, ПК — поликарбонат) (по Губкину, Егоровой и др., 1970)

3. Электреты из керамических диэлектриков

Краткие сведения о керамических диэлектриках. Керамические диэлектрики представляют собой трехфазную систему. Основная фаза — это хаотически разбросанные

кристаллические зерна, вторая — стекловидная или аморфная прослойка и третья — поры. В зависимости от вида керамики, способа ее изготовления, вводимых добавок и т. п. поликристаллическая фаза может занимать больший или меньший объем, а кристаллические зерна иметь большие или малые размеры. Как правило, размеры кристаллических зерен составляют несколько микрон (и меньше).

Диэлектрические свойства керамических диэлектриков определяются как свойствами поликристаллической фазы, так и свойствами аморфной прослойки. При этом диэлектрическая проницаемость связана в основном с процессами, происходящими в кристаллических зернах, а проводимость материала — с процессами в аморфной прослойке.

Керамические диэлектрики — это неорганические материалы; в их составе нет дипольных молекул, но могут быть квазидиполи, образованные примесными ионами и вакансиями разных знаков (см. гл. I, п. 3). Благодаря своей трехфазной структуре керамические диэлектрики имеют повышенное число дефектов, например, за счет наличия границ между поликристаллической и аморфной фазами.

Электреты из титанатов щелочноземельных металлов. Электреты из поликристаллических неорганических диэлектриков — керамические электреты впервые были получены А. Н. Губкиным и Г. И. Сканами в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР в 1957 г. До этого времени считалось, что электретный эффект наблюдается только у органических материалов, содержащих дипольные молекулы. Открытие электретного эффекта у неполярных неорганических диэлектриков заставило по-иному взглянуть на природу электретов.

В работах [11; 15] было показано, что устойчивые электреты, свойства которых не связаны с сегнетоэлектричеством, могут быть получены из целого ряда керамических диэлектриков на основе рутила TiO_2 : титаната магния (MgTiO_3); кальция (CaTiO_3), стронция (SrTiO_3), цинка (ZnTiO_3) и др.

Поскольку о керамических электретах довольно много говорилось выше (например, при изложении общих свойств электретов в главе VIII в качестве примера использовались в основном керамические электреты), то здесь остановимся

только на некоторых основных характеристиках электретоного состояния керамических диэлектриков.

Все электреты из керамических диэлектриков на основе рутила имеют устойчивый гомозаряд, хотя у них имеется большая по величине «внутренняя» остаточная поляризация. Все они достаточно стабильны во времени. Лучшими свойствами обладают электреты из титаната кальция (CaTiO_3). В течение 5 лет заряд этих электретов почти не изменился, через 10 лет величина заряда составляла примерно $5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$. У электретов из титаната магния (MgTiO_3) наблюдается обращение знака заряда. Зависимости заряда электретов из титанатов магния и кальция от напряженности поляризующего поля и времени после поляризации приведены на рис. 29 и 30.

Для проверки гипотезы Б. Гросса об образовании гомозаряда за счет локальных пробоев воздуха в зазорах электрет—электроды проводилась поляризация керамических образцов в кремнийорганической жидкости. В этом случае воздушного зазора нет и казалось, что у электрета гомозаряд будет отсутствовать. Опыт показал, что и при таком способе поляризации образуются достаточно стабильные электреты с гомозарядом. В то же время в работе А. Н. Губкина, О. С. Поповой и др. (1976) показано, что при поляризации титаната кальция с диэлектрическими прокладками (из Ф-4) между электродами и поверхностями диэлектрика можно получить гетероэлектреты.

В керамических электретах, как правило, наблюдается один ярко выраженный максимум тока ТДП, соответствующий разрушению «внутренней» остаточной поляризации (рис. 40). Сама «внутренняя» остаточная поляризация весьма стабильна, за 12 месяцев не наблюдалось заметного уменьшения ее. Поверхностный гомозаряд исчезал только после разрушения «внутренней» остаточной поляризации.

К особенностям электретного эффекта в керамических диэлектриках относятся следующие: 1) у керамических диэлектриков с большой ϵ всегда наблюдается гомозаряд; 2) при термодеполяризации керамических электретов, как правило, наблюдается только один максимум тока, соответствующий разрушению гетерозаряда, хотя они имеют и гомозаряд; 3) керамические электреты не требуют закорачивания при хранении.

Нами подробно исследованы также пьезоэффект в керамических электретах (гл. XII, п. 5) и влияние климатических условий на свойства керамических электретов (гл. IX).

О физической природе гетеро- и гомозаряда керамических электретов. Керамические электреты интересны тем, что материалы, из которых они изготавливаются, имеют сравнительно большую удельную проводимость ($\gamma \approx 10^{-12} - 10^{-13} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$). Поэтому с первого взгляда кажется, что керамические диэлектрики не могут долго сохранять наэлектризованное состояние. Сам факт, что у диэлектриков с достаточно большой удельной проводимостью наблюдается устойчивый электретный эффект, кажется аномальным и требует особого рассмотрения. Мы объясняем это явление тем, что электретное состояние керамических диэлектриков связано с устойчивой «внутренней» остаточной поляризацией, которая велика по величине и медленно уменьшается со временем, а свободный заряд, участвующий в электропроводности, играет экранную роль [14]. Мы обсудим это подробно в следующей главе, где будет рассмотрена феноменологическая теория электретов.

Н. П. Богородицкий с сотрудниками (1964—1965) предлагают объяснять электретный эффект керамических диэлектриков инжекцией электронов и дырок с электродов в диэлектрик в процессе поляризации с последующей локализацией их на поверхностных дефектах структуры, т. е. «внешней» остаточной поляризацией [8, 18]. При этом не учитывается ни возможное наличие «внутренней» остаточной поляризации, ни сравнительно большая омическая проводимость материала, из которого изготовлен электрет. В следующей главе мы покажем, что это предположение о природе электретного эффекта в керамических диэлектриках недостаточно обосновано.

О физической природе гетерозаряда керамических электретов можно сказать следующее. Экспериментально наблюдаемая зависимость «внутренней» остаточной поляризации от напряженности поляризующего поля и температуры поляризации указывает на объемно-зарядовый механизм гетерозаряда. В то же время все исследуемые титанаты имеют электронную проводимость. Поэтому надо думать, что образование гетерозаряда связано с захватом электронов глубокими локальными уровнями при их перемещении к электродам в процессе сквозной электро-

проводности. При этом миграция электронов происходит, по-видимому, лишь в пределах кристаллических зерен, а захват осуществляется глубокими локальными уровнями, расположенными на границах зерен. Однако не исключено, что захват электронов происходит вблизи электродов, где структура керамики особенно искажена.

Отметим также, что в 1970 г. М. М. Некрасов и др. [23] предприняли интересную попытку связать электретные свойства керамических диэлектриков с их электронным строением и физико-химическими свойствами кристаллов.

4. Электреты из стекол и ситаллов

Краткие сведения о стеклах и ситаллах. Стекла представляют собой некристаллические диэлектрики. В отличие от кристаллов у них нет так называемого дальнего порядка в расположении атомов и ионов, атомы и ионы образуют строгий порядок только с близлежащим окружением (ближний порядок). Стекла имеют неоднородный, гетерогенный состав, они состоят из двух или нескольких различных фаз. Поэтому стекла отличаются повышенным содержанием дефектов различного рода. Помимо этого, в стеклах могут содержаться микронеоднородности — ликвации, капли другой фазы, размеры которых составляют доли микрона или несколько микрон.

Ситаллы (стеклокристаллические диэлектрики) занимают промежуточное положение между стеклами и керамикой. В отличие от стекол они содержат поликристаллическую фазу или состоят из стекла и какой-либо чужеродной примеси. От керамики они отличаются способом получения. Ситаллы получают, как и стекла, путем плавления, а керамические диэлектрики — путем спекания.

Свойства электретов из стекол и ситаллов. Впервые об электретах из стекол упоминает Микола в 1925 г. Немецкий физик Антенен (1955) относит стекла к плохим электретным материалам. А. Н. Губкин и Г. И. Сканава (1958) исследовали электреты из обычного стекла, стекла пирекс и плавленого кварца. Систематическое изучение электретного эффекта в стеклах и ситаллах началось после работы Е. И. Медниковой и Е. Т. Шарнопольской (1963), в которой приведены данные об устойчивых электретах из некоторых стекол и ситаллов [17]. Американский физик Буччи (1966) обнаружил два максимума тока ТДП

у аморфного и кристаллического кварца. При этом диэлектрическая релаксация у аморфного кварца оказалась более интенсивной, чем у кристаллического.

А. Н. Губкин с сотрудниками (1970—1976) исследовали электреты из малощелочных боросиликатных стекол с ликвацией кордиеритных ситаллов, стеклофарфоров, шлакоситаллов, а также стекол и ситаллов других составов. Одной из целей исследования являлось установление роли, которую играет гетерогенность (неоднородность) структуры материала в электретном эффекте.

В результате было установлено, что электреты из стекол и ситаллов по своим общим свойствам не отличаются от известных воскообразных и керамических электретов. Они имеют обращение знака заряда, величина их установившегося поверхностного заряда составляет в среднем $5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/см}^2$, время жизни достигает трех и более лет, ток ТДП имеет два максимума, соответствующих разрушению гетеро- и гомозаряда, «внутренняя» остаточная поляризация значительно превышает поверхностный заряд (у сложных стекол и ситаллов «внутренняя» остаточная поляризация обусловлена набором релаксационных процессов).

Проведенные исследования показали, что электретный эффект более ярко выражен у стекол, содержащих ликвации, и в ситаллах, содержащих достаточно большие по размеру микрокристаллические агрегаты (примерно $0,5 - 10 \text{ мк}$). Замечено также, что электретные свойства лучше у ситаллов, чем у соответствующих по составу стекол; с увеличением гетерогенности материала электретные свойства улучшаются. Однако в дальнейшем было обнаружено, что и у гомогенных стекол наблюдается стабильный электретный эффект. Этот же факт был установлен и Е. С. Кутуковой и Ю. Н. Рождественской (1975) при исследовании гомогенного прозрачного и гетерогенного непрозрачного борофосфатного стекла.

О физической природе электретного эффекта в стеклах и ситаллах. При анализе имеющихся в настоящее время экспериментальных данных об электретных свойствах стекол и ситаллов бросаются в глаза два противоречивых факта. С одной стороны, улучшенные электретные свойства наблюдаются у стекол и ситаллов с ярко выраженной неоднородностью, с другой, — стабильный электретный эффект обнаружен и в некоторых гомогенных стеклах.

В гетерогенном материале имеются границы между фазами, а на границах раздела разных фаз образуется особенно много дефектов. Среди этих дефектов могут быть и такие, которые отличаются глубокими уровнями захвата. При сквозной электропроводности эти уровни захватывают носители заряда, что ведет к образованию устойчивой «внутренней» остаточной поляризации.

Постараемся ответить теперь и на второй вопрос, почему же и у гомогенного стекла может наблюдаться стабильный электретный эффект? По-видимому, принципиальную роль в образовании электретного состояния играет не гетерогенность структуры, а наличие определенных дефектов, которые могут быть и у чистого гомогенного материала. Гетерогенность может только «помочь» в образовании дефектов, создающих глубокие уровни захвата, увеличить их число, но они могут находиться и у гомогенного материала.

5. Электреты из легкоплавких органических диэлектриков

Краткие сведения об исследуемых материалах. К легкоплавким органическим диэлектрикам мы относим большую группу из 30 органических поликристаллических диэлектриков, имеющих температуру плавления от 42 до 217° С. В своем большинстве (24 из 30) эти материалы относятся к ароматическим соединениям.

Наименьшую удельную проводимость из этих материалов имеет бензойная кислота ($\gamma \approx 10^{-10} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$), наибольшую — лимонная кислота ($\gamma > 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$), у большинства материалов $\gamma \approx 10^{-12} - 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$.

Свойства электретов из легкоплавких органических диэлектриков. Наиболее изученным из этой группы материалов является нафталин. Немецкий физик Балдус впервые показал (1954), что в неполярном нафталине может быть получено электретное состояние. Электреты из нафталина имеют как «внутреннюю» остаточную поляризацию (гетерозаряд), так и гомозаряд, у них наблюдается обращение знака заряда (от гетеро- к гомозаряду). Гомозаряд образуется за счет инжекции зарядов из металлических электродов. Это доказано путем поляризации с диэлектрическими прокладками (при этом гомозаряд не возникает) и видно из анализа токов ТДП, которые зависят от материала электродов.

Предполагается, что гетерозаряд образуется вследствие смещения электронов в молекуле нафталина (два «чистых» бензольных кольца) во внешнем электрическом поле. Механизм «змерзания» смещенных электронов не рассматривается.

В. М. Фридкин, И. С. Желудев и др. термодеполаризовали электреты из нафталина (1958), обладающие гетерозарядом, путем освещения ртутно-кварцевой лампой ПРК-4. Установлено, что освещение полностью разрушает «внутреннюю» остаточную поляризацию. На основании этого делается вывод, что остаточная поляризация образована пространственно локализованными электронами. К этому же выводу приходит Ф. И. Половиков (1963). Американские физики Кампос, Ферейра, Маскаренос наблюдали (1968—1971) несколько максимумов тока ТДП, соответствующих разрушению гетерозаряда, у электретов из чистого нафталина и из нафталина с примесями. Эти максимумы связываются с захватами электронов дефектами решетки и примесями.

Сравнительное исследование электретного эффекта у всей группы легкоплавких органических диэлектриков показало следующее [19]. Электретными свойствами обладают 16 из 30 исследуемых материалов, но их заряды нестабильны. Сравнительно стабильный электретный эффект (время жизни более 10 суток) имеют только семь соединений, у которых удельная проводимость $\gamma < 10^{-13} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$. Наиболее устойчивые электреты получены из бензойной кислоты ($t_0 > 360$ сут), имеющей $\gamma \approx 10^{-19} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$. Электреты из нафталина, по нашим данным, имеют время жизни около 10 суток. Полярность материала не оказывает существенного влияния на электретные свойства, зато наблюдается некоторая зависимость времени жизни электретов от величины удельной проводимости: чем меньше удельная проводимость, тем больше время жизни. В остальном полученные электреты ведут себя так же, как и известные ранее электреты.

6. Электреты из монокристаллических диэлектриков

Общие соображения об электретном эффекте в монокристаллических диэлектриках. В настоящее время известно большое число электретов, изготовляемых из различного вида органических и неорганических диэлектриков.

В большинстве своем это аморфные и поликристаллические материалы гетерогенного (неоднородного) состава. Так, «классический» электретный диэлектрик — карнаубский воск — сложное органическое вещество, состоящее из поликристаллической и аморфной фазы. Аналогичным образом в состав керамических электретов наряду с поликристаллической фазой входит стекловидная или аморфная прослойка.

Возникает естественный вопрос, можно ли получить стабильные электреты из «чистых» гомогенных (однородных) материалов? Какую роль играет гетерогенность диэлектрика в электретном эффекте?

Частично мы уже ответили на этот вопрос, рассматривая электретные свойства стекол и ситаллов. Однако полностью на этот вопрос можно ответить лишь исследуя электретное состояние «чистых» монокристаллических диэлектриков.

Электреты из монокристаллического титаната стронция. По-видимому, впервые электретный эффект у монокристаллов наблюдали американские ученые Ламберт и Вейк (1963—1964). Они показали, что монокристаллические образцы титаната стронция при поляризации в поле $E_n = 30$ кВ/см (комнатная температура) приобретают гетерозаряд. Рентгенограмма электретированных монокристаллов свидетельствует об искажении структуры. Расчет поля позволяет сделать вывод, что в искаженной решетке возможны положения, где внутреннее поле минимально. Захват смещенных ионов этими потенциальными ямами ведет к образованию остаточной поляризации.

Электреты из щелочно-галлоидных монокристаллов. В щелочно-галлоидных монокристаллах методом ТДП обнаружены два максимума тока, соответствующие разрушению «внутренней» — остаточной поляризации (гетерозаряда). Томские ученые Г. М. Малофиев, Ю. М. Анненков и В. А. Чернышев (1970) связывают появление высокотемпературного максимума тока ТДП (расположен между 430 и 620° К) с объемно-зарядовой поляризацией. Высказывалось предположение (Янузи, Маскаренос, 1968), что низкотемпературный максимум обусловлен явлениями на границах диэлектрик — электроды.

Весьма перспективными оказались исследования ЦГК в области температур ниже 0° С. Образцы выдерживались в электрическом поле, затем температура понижалась

и электрическое поле отключалось. После этой процедуры кристалл нагревался и измерялся ток ТДП. Этим методом обнаружены два релаксационных процесса, связанных с ориентацией квазидиполей, «примесный ион + катионная вакансия» (в хлористом калии с примесями), и с миграцией междоузельных ионов (в галогенидах серебра).

Таким образом, электретное состояние в ЦГК может быть обусловлено как собственными, так и примесными дефектами: миграцией ионов или их вакансий и ориентаций квазидиполей.

В работах А. Н. Губкина и В. А. Головой (1972—1976) подробно изучено собственно электретное состояние монокристаллического фтористого лития (LiF). Показано, что монокристаллы LiF обладают обычным электретным эффектом, т. е. их электретные свойства не отличаются от электретных свойств немонокристаллических диэлектриков. Это очень устойчивые электреты с большим временем жизни (больше года). При небольших поляризующих полях получены гетероэлектреты, а при больших — гомоэлектреты. «Внутренняя» остаточная поляризация образуется за счет миграции к электродам катионных вакансий.

Электреты из монокристаллов рутила и корунда. Впервые токи термодеполяризации монокристаллического рутила исследовал американский физик Кардон (1962). Причиной возникновения гетерозаряда он считает накопление электронов и их захват у положительного электрода.

А. Н. Губкин, Н. Н. Романовская и Г. Н. Тяпкин (1972—1976) обнаружили типичные электретные свойства у монокристаллического рутила и корунда. Время жизни рутилового гомоэлектрета составляет примерно месяц. Показано, что главную роль в электретном эффекте рутила, по-видимому, играет «внешняя» остаточная поляризация, связанная с инжекцией электронов из электродов или из промежутков электрет—электроды. Корундовые электреты могут иметь как гетерозаряд, так и гомозаряд.

Электреты из монокристаллического льда. В ряде работ изучались электретные свойства монокристаллического и поликристаллического льда. Лед — полярный кристалл, у него возможна примесная ионная проводимость. Установлено, что электреты из льда имеют те же свойства, что и обычные электреты (при температуре ниже 0°C).

Американские ученые Гелин и Стаббс (1965) подавали сильное электрическое поле на полученный из дистиллированной воды образец льда, и образец охлаждался (от $T = -15^\circ$ до $T = -196^\circ \text{C}$). После этого было обнаружено, что ток ТДП имеет один максимум, отвечающий гетерозаряду. Как показал Маскаренос (1968), величина этого максимума растет при введении примеси HF.

Американские физики Гелин, Стаббс, Маскаренос и Кросс (1965—1968) предполагают, что в образовании «внутренней» остаточной поляризации монокристаллического и поликристаллического льда принимают участие и дипольные группы, и мигрирующие ионы, а гомозаряд — это «внешний» заряд, захваченный ловушками на поверхности образца.

Электреты из монокристаллического кварца и других монокристаллических диэлектриков. Г. М. Коваленко (1970) в ФИАНе получил электреты из монокристаллического кварца, вырезанного перпендикулярно и параллельно оптической оси. Электретный эффект у монокристаллов первого вида гораздо сильнее, чем у второго. Г. М. Коваленко наблюдал стабильный эффект у монокристаллов кальцита.

Термоэлектретное и фотоэлектретное состояние изучалось также в поли- и монокристаллической сере.

Краткое заключение. Мы видим, что из монокристаллических диэлектриков можно получить «обычные» достаточно устойчивые электреты. При этом гетерогенность материала не играет принципиальной роли. Электретный эффект в монокристаллических диэлектриках обусловлен собственными или примесными дефектами структуры, создающими глубокие уровни захвата для электронов или глубокие потенциальные ямы для ионов или диполей.

7. Общие замечания об электретных материалах

Возникает вопрос, какие же материалы следует относить к электретным материалам? В каких материалах возможен электретный эффект?

Никакой классификации веществ по их способности к электретному состоянию, по-видимому, провести нельзя. Электреты получены из самых разнообразных по своей структуре и свойствам диэлектриков. Дипольность молекул, проявляющаяся в переменном электрическом поле,

не является необходимым условием электретного состояния. Удельная проводимость также не определяет электретные свойства, хотя в некоторых случаях влияет на стабильность электретных зарядов.

Электретный эффект, по-видимому, в той или иной степени наблюдается у всех диэлектриков. Его интенсивность и стабильность зависят от числа и энергии активации уровней захвата для электронов и потенциальных ям для ионов и дипольных молекул.

Можно считать, что электретный эффект — такое же общее явление, как поляризация, проводимость и другие явления. Действительно, в каждом диэлектрике обязательно имеются собственные и примесные дефекты структуры и возникают соответствующие релаксационные процессы. Если при обычных комнатных температурах время релаксации этих процессов невелико, т. е. диэлектрик не имеет устойчивой остаточной поляризации, не является электретом (а является, как мы говорим, релаксатором), то при низких температурах время релаксации резко возрастает и диэлектрик приобретает электретные свойства.

ХIV. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ЭЛЕКТРЕТНОГО ЭФФЕКТА ПО ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

1. Основные положения феноменологической теории

Еще в 1927 г. американский физик Адамс [42] сформулировал основные положения феноменологической теории электретов (см. гл. VI, п. 2). Феноменологическая (от греческих *phainomenon* — являющееся и *logos* — учение) теория, в отличие от молекулярной, рассматривает происходящие в электрете явления с общих позиций, не вдаваясь в их молекулярную сущность. Адамс предположил, что в электретах имеется дипольная остаточная поляризация, которая медленно изменяется со временем вследствие дезориентирующего действия теплового движения. Свободные заряды, участвующие в электропроводности, перемещаются во внутреннем поле электрета. Присутствие двух зарядов различной природы, изменяющихся со временем по различным законам, дает возможность объяснить основные свойства электретов.

В дальнейшем феноменологическая теория электретов была развита Свэнном в США (1950—1953) [47; 53] и автором этой книги (1957—1976) [10; 32; 35; 36; 40; 53]. Рассмотрим основные положения феноменологической теории в том виде, как это принято сейчас.

Будем считать, что электрет имеет остаточную поляризацию, а также свободный заряд, происхождение которых нас пока не должно интересовать (феноменологическая теория!). В отличие от Адамса и Свэнна предположим, что остаточная поляризация электретов состоит из «внутренней» и «внешней» остаточных поляризаций.

«Внутренняя» остаточная поляризация может быть создана за счет ориентированных полей диполей и квазидиполей и за счет смещенных к электродам ионов и электронов. «Внешняя» остаточная поляризация возникает вследствие перехода зарядов из электродов или междуэлектродных промежутков в диэлектрик с последующим закреплением их на глубоких ловушках. Кроме этого, в электрете имеются свободные заряды, обуславливающие его электропроводность. Электрет может иметь также начальный свободный заряд, например, за счет пробоев воздуха в зазорах электрет—электроды во время поляризации.

В общем случае как «внутренняя», так и «внешняя» остаточные поляризации могут быть разного вида. Например, «внутренняя» остаточная поляризация может одновременно создаваться и диполями, и ионами.

У готового электрета остаточная поляризация («внутренняя» и «внешняя») не остается постоянной. Тепловое движение постоянно выбрасывает заряженные частицы из ловушек, в которые они были захвачены во время поляризации. Кроме этого, остаточная поляризация и свободный заряд, возникшие во время поляризации, будут создавать сильное внутреннее электрическое поле. Поэтому у готового электрета будет наблюдаться движение свободных носителей заряда во внутреннем поле электрета, а также образование релаксационной поляризации под действием внутреннего поля.

Наличие остаточных поляризаций и свободного заряда приведет к тому, что электрет будет создавать электрическое поле в окружающем его пространстве, а на поверхности электрета будет располагаться эффективный поверхностный заряд (см. гл. XI, п. 6).

Все указанные выше процессы, а именно изменение со временем остаточной поляризации («внутренней» и «внешней»), миграция свободных зарядов и образование релаксационной поляризации во внутреннем поле электрета, будут задавать закон изменения эффективного заряда электрета от времени после поляризации. Все эти процессы должна учитывать феноменологическая теория.

Ниже будут изложены основные положения феноменологической теории электретов, разработанной автором этой книги.

2. Современная модель электрета

Готовый электрет в общем случае имеет как медленно уменьшающуюся остаточную поляризацию $P_s(t)$, так и свободный заряд $\sigma_r(t)$. Следовательно, поверхностный заряд $\sigma(t)$ электрета является разностью ⁸:

$$\sigma(t) = \sigma_r(t) - P_s(t). \quad (14.1)$$

Медленно уменьшающаяся остаточная поляризация складывается из двух частей: из остаточной поляризации $P_{sa}(t)$ и из медленно устанавливающейся релаксационной поляризации $P_{sb}(t)$, которая возникает во внутреннем электрическом поле электрета, т. е.

$$P_s(t) = P_{sa}(t) + P_{sb}(t). \quad (14.2)$$

В свою очередь, остаточная поляризация $P_{sa}(t)$ состоит из «внутренней» остаточной поляризации $P'_{sa}(t)$ и «внешней» остаточной поляризации $P''_{sa}(t)$:

$$P_{sa}(t) = P'_{sa}(t) + P''_{sa}(t). \quad (14.3)$$

Каждый молекулярный процесс разрушения остаточной поляризации происходит по экспоненциальному закону. Таким образом, как «внутренняя», так и «внешняя» остаточные поляризации представляют собой суммы экспонент:

$$P'_{sa}(t) = \sum_i P'_{sa i}(0) e^{-\frac{t}{\tau_{sa i}}}, \quad (14.4)$$

⁸ Именно разность, так как свободный заряд стремится заэкранировать поляризационные заряды.

$$P_{sa}^*(t) = \sum_j P_{saj}(0) e^{-\frac{t}{\tau_{saj}}} \quad (14.5)$$

Здесь τ_{sai} и τ_{saj} — соответствующие времена релаксации молекулярных процессов.

Медленно устанавливающаяся релаксационная поляризация $P_{sb}(t)$ описывается интегральным выражением, так как она возникает во внутреннем поле электрета и пропорциональна этому полю (см. формулу (1.3)), а величина поля у готового электрета непрерывно изменяется. Каждому значению внутреннего поля соответствует определенная величина поляризации. Поляризация в данный момент представляет собой сумму (суперпозицию) поляризаций, возникших в более ранние времена t' :

$$P_{sb}(t) = \int_0^t E(t') \frac{d\kappa_{sb}(t-t')}{dt} dt' \quad (14.6)$$

Здесь $\kappa_{sb}(t)$ — переменная диэлектрическая восприимчивость. Момент $t = 0$ означает начало существования электрета (момент отключения поляризующего поля). Выражение для $P_{sb}(t)$ может быть также представлено в виде суммы экспонент, отвечающих числу молекулярных процессов, вызывающих возникновение этой поляризации.

Будем считать, что свободный заряд электрета и окружающего электрета газа изменяется по закону Ома: $j = \gamma E$; j — плотность тока, γ — электропроводность материала электрета или окружающей его среды, E — напряженность поля электрета. В общем случае свободный заряд электрета уменьшается по трем каналам: за счет тока j_i внутри электрета, направление которого совпадает с направлением внутреннего поля E_i , токов j_e , текущих в зазорах электрет—электроды, направленных вдоль внешнего поля E_e , и наконец, тока j' , обусловленного «краевым» полем E . Рис. 73 поясняет направление токов, которые ведут к уменьшению свободных зарядов.

Таким образом, уменьшение свободного заряда в единицу времени, т. е. величина $-\frac{d\sigma_r(t)}{dt}$ будет равна

$$-\frac{d\sigma_r(t)}{dt} = j_i(t) + j_e(t) + j'(t) \quad (14.7)$$

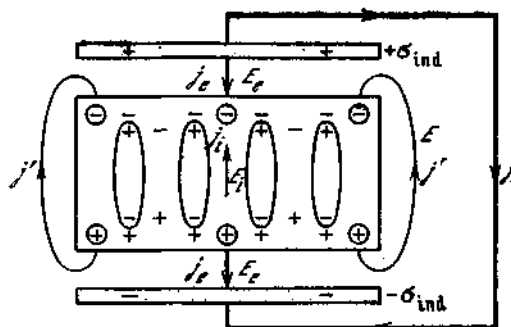


Рис. 73. Расположение зарядов и направление электрических полей и токов в слабо замкнутом электрете (электрет имеет результирующий гомо заряд). Диполи условно изображают связанный гетерозаряд («внутреннюю» остаточную поляризацию), кружки — связанный или экранированный гомозаряд («внешнюю» остаточную поляризацию), плюсы и минусы — свободный заряд

Заметим, что свободный заряд уменьшается только в том случае, если он больше поляризационных связанных зарядов, в противном случае он будет увеличиваться. Именно первый случай изображен на рис. 73. Во втором случае источником поля будет являться не свободный заряд, а поляризационные заряды, свободный заряд будет увеличиваться, стремясь заэкранировать поляризационные заряды.

3. Общее уравнение, описывающее процесс изменения заряда электретов со временем

Рассмотрим выражение (14.7), описывающее изменение свободного заряда электрета. Пренебрежем последним слагаемым j' , так как проводимость в «краевом» поле при достаточно больших размерах (диаметре) электрета незначительна. Полагаем, что справедлив закон Ома:

$$\begin{aligned} j_i'(t) &= \gamma_i E_i(t), \\ j_e(t) &= \gamma_e E_e(t), \end{aligned} \quad (14.8)$$

где γ_i — электропроводность материала электрета, а γ_e — электропроводность окружающей среды. В согласии

с формулами (10.4) и (10.5) поле внутри электрета

$$E_i(t) = 4\pi K_i \sigma(t),$$

а поле в зазорах электрет—электроды

$$E_e(t) = 4\pi K_e \sigma(t),$$

где характеристики закорачивания K_i и K_e равны

$$K_i = K_e \frac{l}{L}, \quad (14.9)$$

$$K_e = \frac{1}{\frac{el}{L} + 1}. \quad (14.10)$$

Подставляя выражения для полей E_i и E_e в (14.8), а затем полученные соотношения в уравнение (14.7) найдем

$$-\frac{d\sigma_r(t)}{dt} = 4\pi(K_i\gamma_i + K_e\gamma_e)\sigma(t). \quad (14.11)$$

Помня, что суммарный заряд электрета является разностью $\sigma(t) = \sigma_r(t) - P_s(t)$ (см. (14.1)), будем иметь

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} + 4\pi(K_i\gamma_i + K_e\gamma_e)\sigma(t) + \frac{dP_s(t)}{dt} = 0. \quad (14.12)$$

Наконец, расшифровывая с помощью формул (14.2) и (14.3) величину $P_s(t)$, окончательно получим

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} + 4\pi\Gamma\sigma(t) + \frac{dP'_{sa}(t)}{dt} - \frac{dP''_{sa}(t)}{dt} + \frac{dP_{sb}(t)}{dt} = 0. \quad (14.13)$$

Здесь мы для удобства ввели обозначение

$$\Gamma = K_i\gamma_i + K_e\gamma_e. \quad (14.14)$$

Очевидно, величина Γ эквивалентна эффективной (внутренней и внешней с учетом закорачивания) электропроводности.

Уравнение (14.13) с учетом выражений (14.4)—(14.6) является общим уравнением, описывающим процесс изменения заряда электретов со временем.

В уравнении (14.13) учитываются все процессы, ведущие к изменению эффективного заряда электрета $\sigma(t)$. Второе слагаемое этого уравнения отвечает процессу релаксации свободных носителей тока во внутреннем поле элект-

рета. Третье и четвертое характеризуют спад заряда за счет разрушения тепловым движением «внутренней» и «внешней» остаточных поляризаций. Пятое описывает процесс возникновения медленно устанавливающейся релаксационной поляризации во внутреннем поле электрета. Учтено также, что изменение заряда $\sigma(t)$ может быть вызвано любым числом молекулярных процессов (см. выражения (14.4) и (14.5)).

4. Решение общего уравнения.

Частные модели электретного эффекта

Решение общего уравнения можно осуществить с помощью преобразования Лапласа. В результате будет определен закон, по которому изменяется со временем после поляризации эффективный поверхностный заряд электрета. В принципе решение можно провести в общем виде. Однако для этого, надо знать много параметров, характеризующих молекулярные релаксационные процессы, отвечающие за процесс изменения заряда электрета, и ряд других характеристик электрета. В настоящее время таких сведений не имеется.

Поэтому рассмотрим частные случаи уравнения, каждый из которых будет соответствовать определенной физической модели электрета.

(а) *Случай электрета, имеющего «внутреннюю» остаточную поляризацию и свободный заряд.* Этот случай впервые рассмотрел А. Н. Губкин в 1957 г. [10]. Суть вопроса мы подробно обсудим ниже, в п. 5 этой главы. Здесь опишем только модель электрета, которая отвечает этому случаю.

Электрет имеет «внутреннюю» (обычную) остаточную поляризацию $P'_{sa}(t)$, но не имеет «внешней» остаточной поляризации $P''_{sa}(t)$ (инжектированного связанного заряда). Предполагается также, что не происходит образования медленно устанавливающейся поляризации $P_{sb}(t)$ во внутреннем поле электрета. В соответствии со сказанным основное уравнение (14.13) примет вид

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} + 4\pi\Gamma\sigma(t) + \frac{dP'_{sa}(t)}{dt} = 0. \quad (14.15)$$

Заряд электрета изменяется вследствие двух процессов: уменьшения «внутренней» остаточной поляризации

$P'_{sa}(t)$ за счет теплового движения и релаксации свободного заряда во внутреннем поле электрета.

Рассматриваемый случай наиболее характерен для термоэлектретов. Основную, определяющую, роль в электретном эффекте здесь играет «внутренняя» остаточная поляризация диэлектрика. Как будет показано ниже (п. 5 этой главы), этот случай правильно объясняет наблюдавшееся на опыте обращение (инверсию) знака заряда у электретов (от гетеро- к гомозаряду).

(б) *Случай электрета, имеющего «внешнюю» остаточную поляризацию и свободный заряд.* В этом случае в противоположность предыдущему имеется «внешняя» остаточная поляризация $P'_{sa}(t)$ (инжектированный связанный заряд), которая убывает вследствие теплового движения. Медленно устанавливающаяся поляризация $P_{sb}(t)$, возникающая во внутреннем поле электрета, отсутствует. Заряд электрета изменяется за счет уменьшения «внешней» остаточной поляризации и миграции свободного заряда во внутреннем поле электрета. В уравнении (14.15) в этом случае третий член будет иметь противоположные знаки. Как показывает анализ, это должно привести к необычному обращению знака заряда: от гомо- к гетерозаряду, чего на опыте не наблюдается. Эта модель подробно не обсуждалась.

(в) *Случай электрета, имеющего свободный инжектированный гомозаряд, в поле которого образуется медленно устанавливающаяся релаксационная поляризация.* Этот случай впервые рассмотрен американскими учеными Перлманом и Менье (1965) [53]. Электрет сразу после поляризации имеет только свободный заряд, образовавшийся вследствие инжекции извне. В поле этого заряда развивается медленно устанавливающаяся поляризация $P_{sb}(t)$.

Общее уравнение (14.13) примет вид

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} + 4\pi\Gamma\sigma + \frac{dP_{sb}(t)}{dt} = 0. \quad (14.16)$$

Перлман и Менье решили это уравнение с учетом выражения (14.6) для $P_{sb}(t)$ и с учетом того, что $P_{sb}(t)$ представляет собой сумму экспонент, и проверяли результаты решения на опыте. Для этой цели были специальным способом (кратковременная поляризация без нагревания)

изготовлены электреты из карнаубского воска, имеющие только свободный гомозаряд. Было получено хорошее согласие экспериментальных и теоретических данных.

(г) *Случай электрета, не имеющего инжектированного связанного заряда.* В этом случае, впервые рассмотренном американским ученым Тилли (1967—1968), изменение заряда электрета осуществляется за счет уменьшения «внутренней» остаточной поляризации $P_{sa}(t)$ вследствие теплового движения, а также релаксации свободного заряда и развития медленно устанавливающейся поляризации $P_{sb}(t)$ во внутреннем поле электрета. В общем уравнении (14.13) отсутствует четвертое слагаемое. Тилли решил основное уравнение для этого случая при весьма искусственном предположении о том, что температура поляризации электрета равна температуре его хранения.

(д) *Случай электрета, не имеющего «внутренней» остаточной поляризации.* Этот случай противоположен предыдущему. Заряд электрета изменяется вследствие уменьшения «внешней» остаточной поляризации (инжектированного связанного заряда) под действием теплового движения, а также за счет релаксации свободного заряда и развития медленно устанавливающейся поляризации $P_{sb}(t)$ во внутреннем поле электрета. Эта модель в литературе не обсуждалась.

(е) *Случай электрета, имеющего только «внешнюю» остаточную поляризацию и бесконечно малую электропроводность.* Этот довольно интересный случай весьма подробно обсуждался в работах Н. П. Богородицкого и его сотрудников (1964—1967). Электретное состояние целиком определяется инжектированным связанным гомозарядом. Внутренняя остаточная поляризация $P'_{sa}(t)$ и медленно устанавливающаяся поляризация $P'_{sb}(t)$ отсутствуют. Электропроводность электрета предполагается бесконечно малой. Гомозаряд электрета уменьшается только вследствие разрушения «внешней» остаточной поляризации под действием теплового движения. Согласно этой модели электрет не должен иметь инверсии знака заряда.

(ж) *Случай электрета, имеющего только свободный инжектированный заряд.* Это тривиальный случай. Электретное состояние целиком определяется свободным зарядом, который убывает вследствие электропроводности

по закону максвелловой релаксации:

$$\sigma_r = \sigma_r(0) e^{-\frac{t}{\tau_m}}, \quad (14.17)$$

где $\tau_m = \frac{\epsilon}{4\pi\gamma_i}$ — максвеллово время релаксации.

5. Случай электрета, имеющего «внутреннюю» остаточную поляризацию и свободный заряд

Этот случай впервые рассмотрел Адамс в 1927 г. (гл. VI, п. 2) в предположении, что «внутренняя» остаточная поляризация обусловлена ориентированными дипольными молекулами, начальный заряд электрета равен нулю и электрет находится в свободном состоянии (не закорочен). Затем американский физик Свэнн (1950—1953) дополнил теорию Адамса, допустив, что электрет может иметь начальный свободный гомозаряд.

А. Н. Губкин в 1957 г. дальше развил теорию Адамса — Свэнна, считая, что «внутренняя» остаточная поляризация может быть создана любой релаксационной поляризацией (дипольной, ионной и электронной тепловой — квазидипольной, объемно-зарядовой), и учтя эффект закорачивания электретов.

Основное уравнение. Основное дифференциальное уравнение, описывающее поведение заряда электрета в этом случае, получено и рассмотрено в предыдущем параграфе (см. уравнение (14.15)). Теперь запишем его в виде, удобном для решения. Для этой цели предположим, что «внутренняя» остаточная поляризация $P'_{\text{вн}}(t)$ уменьшается со временем по экспоненциальному закону, т. е. имеется только один молекулярный процесс, ведущий к разрушению $P'_{\text{вн}}(t)$:

$$P'_{\text{вн}}(t) = P'_{\text{вн}}(0) e^{-\frac{t}{\tau_f}},$$

где τ_f — время релаксации. Предположим также, что электрет находится в воздухе, электропроводностью которого по сравнению с электропроводностью материала электрета можно пренебречь, т. е. $\gamma_e = 0$. Введем обозначение $P'_{\text{вн}}(t) =$

$= \sigma_f(t)$. Тогда уравнение (14.15) примет вид

$$-\frac{d\sigma(t)}{dt} + 4\pi K_i \gamma_i \sigma(t) - \frac{\sigma_f(0)}{\tau_f} e^{-\frac{t}{\tau_f}} = 0. \quad (14.18)$$

Решая дифференциальное уравнение (14.18), найдем

$$\sigma(t) = \frac{\beta \sigma_f(0)}{\beta - 1} e^{-\frac{t}{\tau_f}} - \left[\frac{\beta \sigma_f(0)}{\beta - 1} + \sigma(0) \right] e^{-\frac{t}{\tau_r}}. \quad (14.19)$$

Получено основное исходное соотношение. Здесь введены следующие обозначения: $\beta = \tau_r/\tau_f$, где τ_f — время релаксации остаточной поляризации, $\tau_r = \frac{1}{4\pi K_i \gamma_i}$ — время релаксации свободного заряда; $\sigma_f(0)$ — начальная плотность гетерозаряда, а $\sigma(0) = \sigma_r(0) - \sigma_f(0)$ — начальная плотность суммарного заряда.

Формула (14.19) дает зависимость поверхностного заряда электрета от времени.

Анализ основного соотношения. Время жизни электретов. Из основного соотношения (14.19) можно получить ряд чрезвычайно важных следствий.

1. Пусть время релаксации свободного заряда намного больше времени релаксации остаточной поляризации.

Тогда $\beta = \frac{\tau_r}{\tau_f} \gg 1$. Этот случай осуществляется, например, у диэлектриков, в которых не может быть создана достаточно длительно сохраняющаяся остаточная поляризация, а сами диэлектрики имеют очень малую электропроводность. К таким диэлектрикам относятся органические неполярные вещества.

Согласно (14.19) имеем

$$\sigma(t) = \sigma_f(0) e^{-\frac{t}{\tau_f}} - \sigma_r(0) e^{-\frac{t}{\tau_r}}. \quad (14.20)$$

На графике выражение (14.20) изобразится в виде двух экспоненциальных кривых, соответствующих временам релаксации τ_f и τ_r . Результирующая кривая, являющаяся их разностью, будет характеризовать зависимость суммарного заряда электрета σ от времени (рис. 74, где $A = \sigma_f(0)$, $B = \sigma_r(0)$).

Спустя некоторое время ($t > \tau_f$), первая экспонента

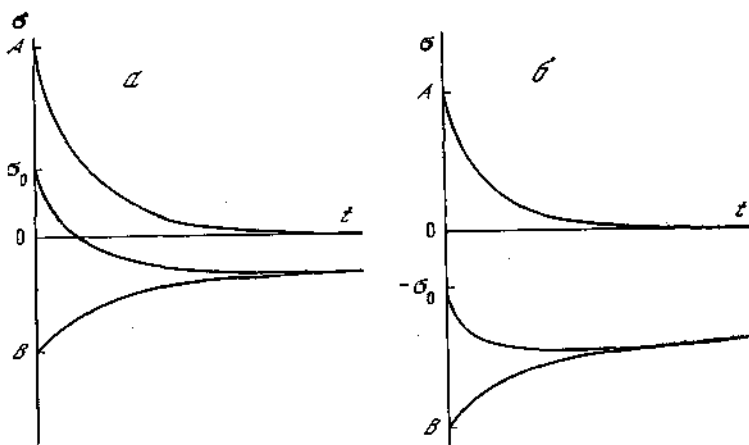


Рис. 74. Теоретическая зависимость заряда электрета от времени: а — $A > B$; б — $A < B$

исчезнет, и суммарный заряд электрета будет изменяться по закону

$$\sigma(t) = -\sigma_f(0) e^{-\frac{t}{\tau_r}}, \quad (14.21)$$

а его время жизни $\tau_r = \frac{1}{4\pi K_i \gamma_i}$ будет определяться электропроводностью материала электрета и условиями его закорачивания. Если электропроводность электрета γ_i мала или он хорошо закорочен, т. е. множитель K_i мал (см. (14.9)), то время жизни электрета τ_r может быть достаточно велико. Обращение знака заряда будет наблюдаться тогда, когда $|\sigma_f(0)| > |\sigma_r(0)|$ (см. рис. 74, а).

Если начальный свободный заряд электрета больше $\sigma_f(0)$, то обращение знака заряда наблюдаться не будет. В этом случае суммарный заряд, обратный по знаку заряду остаточной поляризации, достигнет максимума, а затем будет изменяться по формуле (14.20) (рис. 74, б).

2. Рассмотрим теперь второй, более сложный случай. Пусть время релаксации остаточной поляризации намного больше времени релаксации свободного заряда. Это условие выполняется, например, если электрет обладает сравнительно большой проводимостью и длительно сохраняющей остаточной поляризацией. Тогда $\beta = \frac{\tau_r}{\tau_i} \ll 1$ и из

(14.19) получим

$$\sigma(t) = -\beta\sigma_f(0)e^{-\frac{t}{\tau_f}} + [\beta\sigma_f(0) - \sigma(0)]e^{-\frac{t}{\tau_r}}. \quad (14.22)$$

Так как $\tau_r \ll \tau_f$, функция $e^{-\frac{t}{\tau_r}}$ убывает быстрее, чем $e^{-\frac{t}{\tau_f}}$ (рис. 74, где $A = \beta\sigma_f(0) - \sigma(0)$, $B = \beta\sigma_f(0)$).

Поэтому по прошествии некоторого времени заряд электрета будет изменяться по закону

$$\sigma(t) = -\beta\sigma_f(0)e^{-\frac{t}{\tau_f}}, \quad (14.23)$$

а его время жизни будет равно τ_f , т. е. времени сохранения остаточной поляризации.

Если начальный свободный заряд электрета $\sigma_r(0)$ меньше $\sigma_f(0)$, то $\sigma(0) = \sigma_r(0) - \sigma_f(0) < 0$ и $|\beta\sigma_f(0) - \sigma(0)| > |\beta\sigma_f(0)|$, т. е. начальное значение первой экспоненты в (14.22) по абсолютной величине меньше, чем второй. А это, согласно рис. 74, а, даст обращение знака заряда.

Если же в начальный момент времени свободный заряд электрета превышает заряд поляризации, то обращения знака заряда наблюдаться не будет. Суммарный заряд электрета, который по знаку совпадает с гомозарядом, будет со временем увеличиваться, перейдет через некоторый максимум, а затем начнет медленно уменьшаться (рис. 74, б).

Рассмотренный случай $\beta = \frac{\tau_r}{\tau_f} \ll 1$ (его можно назвать случаем «остаточной поляризации») физически более интересен. Именно он характерен для собственно электретного эффекта. В начальный момент после поляризации электрет будет иметь «внутреннюю» остаточную поляризацию, а на его поверхности будут располагаться заряды, пришедшие с электродов. Для простоты допустим, что этих излишних зарядов очень мало ($\sigma_r(0) = 0$). Со временем величина остаточной поляризации уменьшается, но в отличие от первого случая очень медленно. Поэтому внутри электрета будет действовать сильное электрическое поле и «нагонять» свободные заряды к поверхности электрета (рис. 75, а). Так как время релаксации свободных зарядов гораздо меньше, чем время релаксации остаточной

поляризации, то они через некоторое время полностью заэкранируют остаточную поляризацию и заряд электрета упадет до нуля (рис. 75, б). Однако после этого остаточная поляризация будет продолжать уменьшаться вследствие дезориентирующего теплового движения частиц диэлектрика. Это приведет к тому, что количество свободных зарядов станет больше, чем связанных, и внутри электрета снова возникнет электрическое поле, но противоположного направления (рис. 75, в). Свободный заряд начнет также уменьшаться. А так как время релаксации свободного заряда не равно нулю, то всегда будет наблюдаться некоторое отставание релаксации экранирующего остаточную поляризацию свободного заряда от спада этой остаточной поляризации. Именно благодаря этому обстоятельству стабильный заряд электрета будет отличаться от нуля.

Стабильный заряд электрета соответствует динамическому равновесию между числом связанных и свободных зарядов, релаксирующих в единицу времени. Величина этого установившегося заряда будет определяться произведением $\beta \sigma_f(0)$, а время спада — τ_f . Чем больше отношение $\frac{\tau_r}{\tau_f} = \beta$ и величина $\sigma_f(0)$, тем больше стабильный заряд электрета.

Численная проверка результатов теории. Оценим время жизни керамических электретов, имеющих сравнительно большую электропроводность.

Первый случай: $\tau_r/\tau_f \gg 1$. В согласии с формулой (14.21) время жизни $\tau_0 = \tau_r = \frac{1}{4\pi K_i \gamma_i} = \frac{1}{k K_i \gamma_i}$, где $k = 1,13 \cdot 10^{13} \text{ В} \cdot \text{см} / \text{Кл}$. Пусть $\gamma_i \cong 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ $\varepsilon \cong$

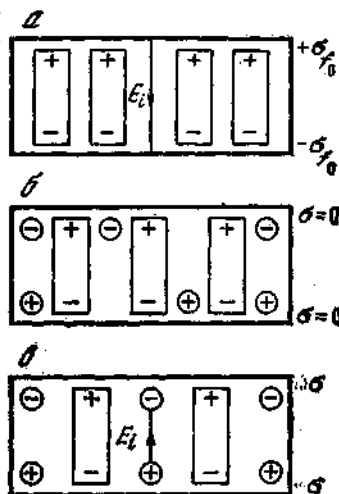


Рис. 75. Изменение остаточной поляризации и свободного заряда от времени для случая $\frac{\tau_r}{\tau_f} \ll 1$

Цирколы условно изображают «внутреннюю» остаточную поляризацию (гетерозаряд), а кружки — свободный заряд

$\cong 100$ и толщина электрета $L = 10^{-2}$ см. Тогда для незакороченного ($l = \infty$, $K_i = 1/\epsilon$) и закороченного ($l = 10^{-3}$ см, $K_i = 5 \cdot 10^{-3}$) электрета $\tau_0 \approx 10^3$ с (около 30 мин). Это значение τ_0 не соответствует опыту. Время жизни керамических электретов исчисляется годами.

Второй случай $\frac{\tau_r}{\tau_f} \ll 1$. В согласии с формулой (14.23) $\tau_0 = \tau_f$, т. е. время жизни электретов определяется временем сохранения «внутренней» остаточной поляризации. Нам не известна точная величина τ_f . Известно только, что у керамических электретов она достаточно велика. Примем ее равной 10^8 с (10 лет). Тогда $\beta = \tau_r/\tau_f \approx 10^{-5}$. Если теперь принять, согласно опытным данным, что у керамических электретов $\sigma_f(0) = 10^{-4}$ Кл/см², то величина заряда $\beta\sigma_f(0)$, которая может характеризовать установившийся заряд электрета, будет равна 10^{-9} Кл/см².

Полученное значение находится в хорошем соответствии с экспериментом.

Мы исходили из опытных данных (см. гл. XIII, п. 3) о том, что керамические электреты имеют большую по величине и медленно спадающую со временем «внутреннюю» остаточную поляризацию и свободный гомозаряд, связанный в основном со сравнительно большой электропроводностью керамических диэлектриков. Вообще у диэлектриков с повышенной электропроводностью гомозаряд может быть образован путем миграции свободных зарядов во внутреннем поле уже готового электрета, т. е. гомоэлектрет можно получить и в том случае, если исключить всякую инъекцию зарядов извне (см. рис. 75).

6. Теория токов термодеполяризации

Общее выражение для плотности тока $j(t)$ термодеполяризации (ТДП) — тока, протекающего во внешней цепи при нагревании электрета, — следует из уравнения

$$-\frac{d\sigma_{\text{ind}}}{dt} = j(t) + j_e(t), \quad (14.24)$$

согласно которому изменение индуцированного на электродах заряда $\sigma_{\text{ind}}(t)$ происходит за счет тока $j(t)$ во внешней цепи и тока $j_e(t) = \gamma_e E_e(t)$ в зазорах электрет—электроды. Именно только этим путем индуцированный заряд может уйти с электродов или прийти на электроды (см. рис. 73).

Подставляя в (14.24) выражение (10.6) для σ_{ind} , а также учитывая соотношение $E_e = 4\pi K_e \sigma$ и формулу (14.10), получим общее уравнение для тока ТДП

$$j(t) = K_e \frac{d\sigma(t)}{dt} + \frac{1}{\tau_e} \sigma(t), \quad (14.25)$$

где

$$\tau_e = \frac{1}{4\pi K_e \gamma_e} \quad (14.26)$$

— время релаксации заряда через промежутки электрета—электроды.

Для того чтобы получить явное выражение для тока ТДП, надо знать временную зависимость $\sigma(t)$, которая, в свою очередь, определяется из общего уравнения (14.13). Таким образом, в принципе задача нахождения функции $j(t)$ может быть решена. Однако, как мы указывали выше, в настоящее время общее уравнение (14.13) решено только для некоторых частных моделей электретного состояния.

Рассмотрим наиболее важный случай (а), который мы подробно обсудили в п. 5 этой главы. Для этой модели можно определить ток ТДП. Подставляя выражение (14.19) для $\sigma(t)$ в (14.25) и предполагая, что ТДП осуществляется путем равномерного нагревания электрета, т. е. $T = bt$, где b — постоянная, можно найти функцию $j(t)$. Она имеет достаточно сложный вид и мы не будем ее приводить. Укажем только, что эта функция в общем случае имеет два температурных максимума по знаку тока, соответствующих разрушению гетеро- и гомозаряда, т. е. правильно отвечает эксперименту (рис. 67).

При этом, согласно полученным нами формулам (1972), энергия активации гетерозаряда не меньше, а больше, чем гомозаряда. И это, несмотря на то, что максимум для гомозаряда следует за максимумом для гетерозаряда. Это обстоятельство отражает тот факт, что гомозаряд является свободным зарядом и существует лишь до тех пор, пока имеется «внутренняя» остаточная поляризация. Процессы релаксации «внутренней» остаточной поляризации и свободного гомозаряда не являются независимыми. Свободной гомозаряд релаксирует во внутреннем поле электрета, которое, в свою очередь, создается как свободными, так и связанными зарядами. Простой расчет энергии активации по начальному участку тока ТДП (см. гл. XII,

п. 3) здесь не пригоден, так как им можно пользоваться в случае независимых монорелаксационных процессов.

В электретах с повышенной диэлектрической проницаемостью проводимость воздушного промежутка электрет—электроды может быть достаточно велика (за счет коронирования). Тогда функция $j(t)$ будет иметь один максимум, соответствующий разрушению гетерозаряда. Это, по-видимому, имеет место у керамических электретов (см. рис. 40).

7. Общие замечания о физической природе электретного состояния

Рассмотренная выше феноменологическая теория позволяет сделать несколько общих замечаний о физической природе электретного эффекта.

Остановимся на трех экспериментальных фактах, наиболее полно характеризующих электретное состояние: длительность существования зарядов, обращение знака заряда, два максимума тока ТДП, соответствующих разрушению гетерозаряда и гомозаряда (первый максимум наблюдается при более низкой температуре, чем второй). Оценим с точки зрения этих опытных данных различные модели (а) — (ж) электретов.

Модель (а) соответствует этим данным. Согласно этой модели гомозаряд является свободным зарядом, т. е. обуславливает процесс электропроводности при комнатной температуре (температура хранения электрета). В пользу этого предположения говорит тот факт, что максимум тока ТДП для гомозаряда всегда следует за максимумом тока ТДП для гетерозаряда. В противном случае (связанный гомозаряд) трудно объяснить, почему энергия активации гомозаряда всегда больше, чем гетерозаряда. Модель (а), как и модель (г), отвечает термоэлектретам, т. е. электретам, у которых основную роль играет «внутренняя» остаточная поляризация (гетерозаряд).

Модель (б) должна дать противоположное обращение знака заряда: от гомо- к гетерозаряду. У термоэлектретов этого не наблюдается. Модель (б), как и модели (г), (д), (е), (ж), должна описывать свойства электретов, у которых главную роль играет инжектированный заряд (связанный или свободный), т. е. свойства радиоэлектретов, короноэлектретов, трибоэлектретов, анодоэлектретов.

Конечно, у термоэлектретов может наблюдаться и общий случай, когда электрет одновременно имеет и «внутреннюю», и «внешнюю» остаточные поляризации. В этом смысле термоэлектреты наиболее полно характеризуют электретный эффект. Однако в указанном общем случае ток ТДП (при учете свободного заряда) должен иметь по меньшей мере три максимума.

Магнетоэлектреты, как и фотоэлектреты, не имеют инжектированного заряда, т. е. описываются моделями (а) и (з).

Подбирая диэлектрики с малой удельной проводимостью и получая электреты путем коронирования или облучением электронами, можно осуществить модель (е) электрета.

Феноменологическая теория детально проверена применительно к электретам из монокристаллического LiF (А. Н. Губкин, В. А. Голова, 1974) и из полиметилметакрилата (А. Н. Губкин и В. А. Оглоблин, 1976). Показано, что электретный эффект в этих диэлектриках отвечает модели (з), причем «внутренняя» остаточная поляризация в LiF обусловлена одним релаксационным процессом, а в ПММА — двумя.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРЕТОВ

XV. ВОЗМОЖНЫЕ ОБЛАСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРЕТОВ

1. Электрет — источник постоянного электрического поля

Основным свойством электретов является способность создавать практически постоянное электрическое поле в окружающем пространстве.

Иногда встречаются неправильные представления о том, что электреты являются источниками постоянного тока. Еще А. Гемант в 1935 г. указывал на то, что электрет — источник постоянного поля, но не тока (см. гл. V, п.5). Электрет — электрический аналог постоянного магнита. Он может быть кратковременным источником емкостного тока только при деполяризации. В остальных случаях при присоединении электрета с установившимся зарядом к внешней цепи никакого тока не обнаруживается.

Иногда, правда, у некоторых керамических диэлектриков сразу же после поляризации наблюдаются кратковременные токи, обусловленные разрушением неустойчивых зарядов. Однако после установления стабильного, долго сохраняющегося заряда эти токи исчезают, но могут возникнуть снова при искусственной деполяризации, например при нагревании диэлектрика (термодеполяризация).

2. Как применяют электреты в технике

Электреты могут найти, и в ряде случаев уже нашли, широкое применение в различных областях техники в качестве источников постоянного электрического поля.

Действительно, электрет всегда окружен электрическим полем. У «свободного» электрета электрическое поле сложным образом распределено в пространстве (см. рис. 55); поле закороченного электрета сосредоточено в

воздушном зазоре между поверхностью электрета и металлическими электродами (см. рис. 57).

Постоянное поле электрета можно использовать либо непосредственно, либо косвенным образом, путем индуцирования переменного тока в поле электрета. Большинство известных применений электретов — это так называемые электретные датчики сигналов или электретные преобразователи различного рода. Их работа основана на индуцировании переменного тока в поле электрета. Ниже (см. гл. XVI) будут рассмотрены некоторые электретные датчики, такие, как электретные микрофоны, вибродатчики, тахометры и др.

Электростатическое поле электрета можно использовать также непосредственно. На основе этого работают такие приборы, как фильтры для газов, электретные электрометры и вольтметры, фокусирующие и сортирующие системы и другие приборы и устройства. О них будет сказано в главе XVII.

Кроме этого, электреты в силу своих особенностей могут иметь и другие разнообразные применения, о которых мы также расскажем ниже (см. гл. XVIII).

XVI. ЭЛЕКТРЕТНЫЕ МИКРОФОНЫ И ДРУГИЕ ДАТЧИКИ СИГНАЛОВ

При колебании металлических электродов в поле электрета в цепи, соединяющей эти электроды, потечет переменный ток. Большое количество приборов, работающих с применением электретов, основано именно на этом принципе, на индуцировании переменного тока в электрическом поле электрета.

Физическая сущность этого явления была разобрана в главе XI, п. 2. Теперь обратим внимание на приборы, действие которых основано на этом принципе. Существенная особенность всех этих приборов состоит в том, что они не нуждаются в источниках питания.

1. Электретные микрофоны

Схематическое изображение электретного микрофона было приведено на рис. 22.

Микрофон работает достаточно хорошо при присоединении к обычному высокоомному телефону. Такой микрофон может служить телефоном. В этом случае на мембрану подается переменное напряжение от микрофона, и она начинает колебаться в постоянном поле электрета.

Электретные микрофон-телефоны впервые были изготовлены в Японии еще до второй мировой войны. Электреты изготавливались там из смеси восков, составной частью которых был карнаубский воск.

С применением электретных микрофонов и телефонов связан интересный эпизод. Во время второй мировой войны американцы захватили один из японских военных кораблей. Изучая оборудование этого корабля, они обнаружили, что телефонная связь на нем работает без источников питания. При этом они не нашли в японских микрофонах ни обмоток, ни постоянных магнитов. Это привело их в недоумение, и они никак не могли догадаться, как же работают японские микрофоны. Позднее было выяснено, что связь на захваченном корабле осуществля-

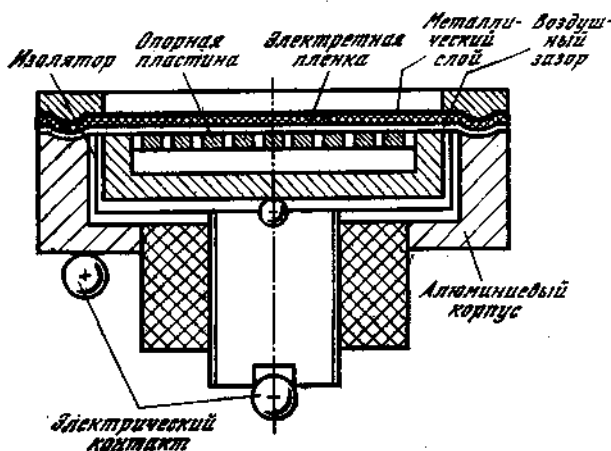


Рис. 76. Схематическое изображение плоского электретного микрофона (по Сесселеру и Весту, 1946)

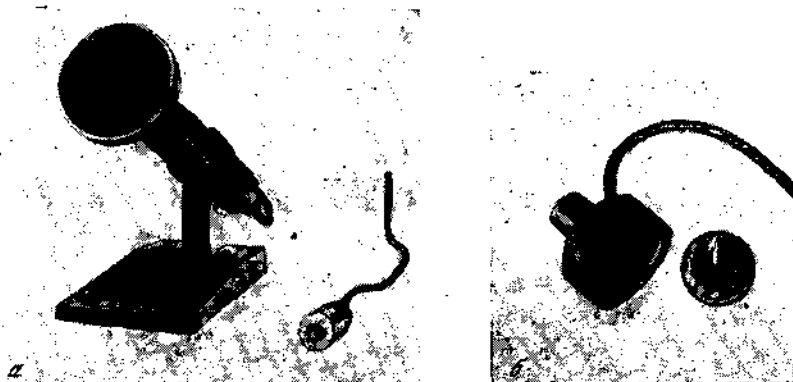


Рис. 77. Фотографии современных пленочных электретных микрофонов, выпускаемых фирмой «Сони» в Японии (а) и в СССР (б)

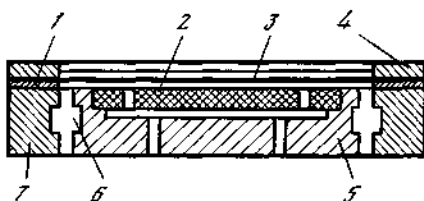


Рис. 78. Фронтальная часть капсулы с керамическим электретом (по Горелуку, Губкину, Ефашкину, 1971):

1 — прокладка толщиной 40 мкм; 2 — электрет; 3 — мембрана; 4 — прижимное кольцо; 5 — вкладыш; 6 — изоляционное кольцо; 7 — корпус

лась с помощью микрофонов и телефонов, работающих с применением электретов.

Впервые в Советском Союзе электретные микрофоны были разработаны А. Н. Губкиным и В. Д. Копаневым (1959). В этих микрофонах использовались керамические электреты из титаната кальция. Электретные микрофоны устроены очень просто. По сути дела, микрофон имеет только две основные детали: электрет с металлическим основанием — электродом и мембрану, укрепленную в корпусе. Остальные детали играют вспомогательную роль. Никаких обмоток, являющихся необходимой принадлежностью электродинамического микрофона, здесь нет. Электрет имеет отверстия для того, чтобы воздух при колебании мембраны не препятствовал ее движению.

Подобный микрофон развивал от человеческого голоса средней громкости напряжение в несколько вольт на входном сопротивлении 1 МОм.

После того как были получены и исследованы электреты из тонких полимерных пленок, конструкция электретного микрофона еще более упростилась. На рис. 76 представлена схема микрофона с тонкой полимерной пленкой. Существенно, что здесь сам электрет одновременно является мембраной. Конструкция микрофона фактически свелась к двум деталям: тонкой подвижной полимерной пленке—электрету, имеющей с одной стороны напыленный слой металла, и металлическому основанию.

Микрофоны на керамических электретах также модернизированы. Керамический электрет стал более компактным, его диаметр уменьшился до 1—3 см.

В настоящее время в США, Японии и других странах большинство микрофонов работают с применением электретов (рис. 77). Наша промышленность также выпускает как пленочные электретные микрофоны, так и микрофон, использующий керамический электрет из титаната кальция. Последний был разработан в лабораториях Московского института электронного машиностроения и Научно-исследовательского кинофотоинститута (рис. 78). Из пленочных микрофонов можно отметить электретный микрофон для слухового аппарата, разработанный А. П. Лучниковым в МИЭМ совместно с Московским заводом слуховых аппаратов (1972), а также малогабаритный электретный микрофон, разработанный в Рязанском радиотехническом институте под руководством П. Т. Орешкина в 1972 г. (рис. 77, б).

2. Генераторы переменного тока

Аналогичный принцип может быть положен в основу работы маломощных генераторов переменного тока на электретах. Здесь колебания подвижного электрода происходят за счет какого-либо другого внешнего источника энергии (воды, ветра и т. п.).

Как показывает расчет, мощность такого генератора, работающего с одним электретом, невелика (не превышает 10^{-6} Вт). Однако, увеличивая число электретов, можно значительно повысить мощность электретного генератора.

3. Вибродатчики на электретах

Если во втором случае практического применения электретов колебания подвижного электрода возникали за счет энергии воды, ветра, то в случае, на котором мы сейчас остановимся, подвижный электрод совершает колебания относительно электрета за счет вибраций какого-либо объекта.

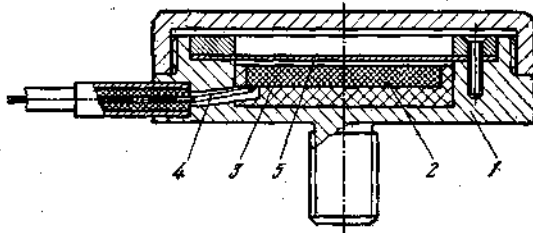


Рис. 79. Схема электретного вибродатчика (по Губянову, Сергисенко, Трофименко, 1961):

1 — корпус вибродатчика, 2 — электрет, 3 — прокладка (изолятор)
4 — отвод к внешней цепи, 5 — металлическая мембрана

Вибродатчики на электретах устроены так (рис. 79). Электрет 2 жестко закрепляется в корпусе 1 с помощью прокладки из изолятора 3. Над электретом располагается металлическая мембрана 5, упруго связанная с корпусом вибродатчика. Вторая поверхность электрета посеребрена, к ней припаивается отвод к внешней цепи 4. Корпус датчика жестко соединяется с вибрирующим предметом (деталь машины, работающий мотор и др.) и колеблется вместе с ним. При этом мембрана совершает перемещения относительно корпуса датчика и жестко связанного с ним электрета.

При колебаниях мембраны во внешней цепи возникает ток, частота которого будет равна частоте вибраций детали. Чем интенсивнее вибрирует деталь, тем большая величина тока зафиксируется во внешней цепи. По измеренной величине тока можно определить силу вибраций системы.

4. Электретные тахометры

Как мы видели выше (п.1—3 этой главы), индуцирование переменного тока в электростатическом поле электрета может быть осуществлено различными способами. Пе-

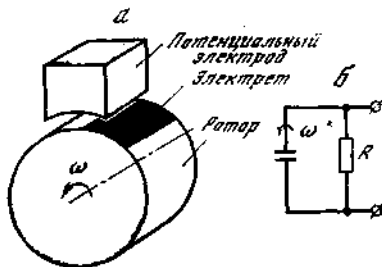


Рис. 80. Схематическое изображение электретного тахометра (а) и его эквивалентная схема (б) (по Губкину и Реминой, 1973)

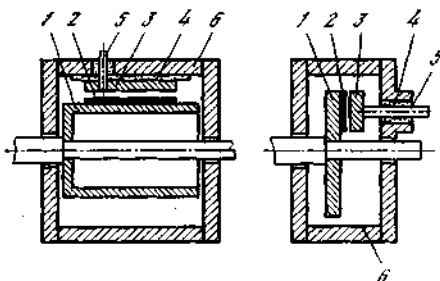


Рис. 81. Модели электретных тахометров (по Губкину и Реминой, 1973):

- 1 — ротор,
- 2 — электрет,
- 3 — потенциальный электрод,
- 4 — изоляционная прокладка,
- 5 — вывод,
- 6 — корпус

ременный ток индуцируется тогда, когда имеются перемещения электрода в поле электрета. Представим себе теперь, что периодически перемещается не электрод относительно электрета, а электрет относительно электрода. Этот принцип лежит в основе электретного тахометра — прибора для измерения скорости или частоты вращения.

В разработанной модели тахометра (1973) [34] электрет, наклеенный на вращающуюся деталь или ротор машины, проходя мимо неподвижного электрода, индуцирует на ней заряд (рис. 80). Этот заряд в виде импульса напряжения или тока снимается с выхода тахометра и подается на измерительное или регистрирующее устройство. Скорость вращения может определяться или по величине выходного напряжения, или по частоте индуцируемых импульсов.

У изготовленных макетов тахометров электрет прикреплялся на боковой (рис. 81, а) или на торцевой (рис. 81, б) поверхности ротора.

Электретный тахометр может быть выполнен в виде отдельного прибора или совмещен с механизмом, скорость которого необходимо измерить. Во втором случае ротором

служит любая вращающаяся деталь или вал механизма. В качестве электрета используется полимерная пленка толщиной в несколько десятков микрон, которая не может дать какой-либо заметной нагрузки.

Достоинством электретного тахометра является то, что он работает без внешних источников питания и весьма прост по своему устройству (не имеет обмоток), а также позволяет использовать в качестве ротора вал машины или любую вращающуюся деталь.

5. Электретные датчики давления

При изменении воздушного зазора электрет—электроды (см. рис. 57) во внешней цепи, соединяющей электроды, наблюдается импульс тока. На этой основе работают электретные датчики давления. Давление прикладывается к мембране, изготовленной в виде электретной пленки (обычно это фторопласт-4).

Американские ученые Сесслер и Вест (1971) описали два вида электретных датчиков давления. Первый выполнен в виде микрофона с полимерной пленкой и рассчитан на измерение инфразвуковых колебаний (10^{-3} — 10^2 Гц). Второй состоит из ряда клавишей, расположенных над электретной пленкой. При давлении на одну из клавишей воздушный зазор между кнопкой и электретной пленкой изменяется, и во внешней цепи появляется импульс тока.

В МИЭМ совместно с Институтом источников тока (1974) также разработан электретный датчик давления микрофонного типа для измерения инфразвуковых колебаний (инфрабарограф).

А. С. Стальцев в г. Таганроге (1976) разработал электретный приемник акустических волн в жидкости и применил его для разведки под водой земных недр.

Авторы [20] (1967—1968) разработали электретный датчик давления микрофонного типа для оптико-акустического газоанализатора (рис. 82). Работа оптико-акустического газоанализатора основана на измерении разности давлений в сравнительной камере и в рабочей камере, где находится исследуемый газ, при освещении последнего инфракрасным светом.

Электретные датчики этого вида имеют ряд преимуществ перед емкостными: не требуют внешнего стаби-

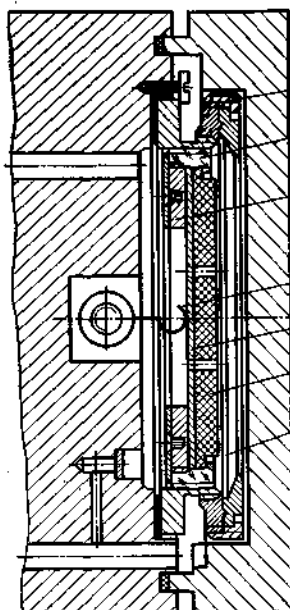
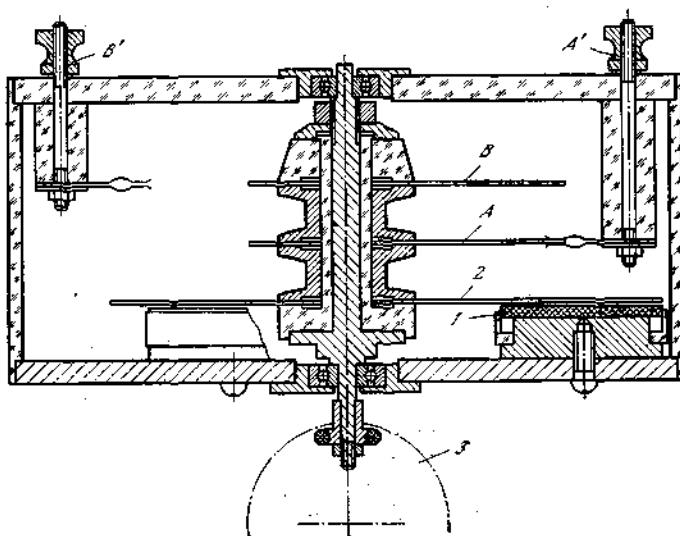


Рис. 82. Схема электретного датчика для оптико-акустического газоанализатора (по Губкину и Чукареву, 1968):

- 1 — мембрана,
- 2 — электрет,
- 3 — неподвижный электрод,
- 4 — контакт,
- 5 — гайка,
- 6 — обойма,
- 7 — гайка

Рис. 83. Схема генератора высокого напряжения на электретах (по Губкину и Кошаневу, 1960):

- 1 — электрет,
- 2 — металлические лопасти-электроды,
- 3 — привод к двигателю,
- А и В — подвижные контакты переключателя,
- А' и В' — клеммы, соединяющие систему с конденсатором



лизированного напряжения, у них не наблюдается «за-
липания» мембраны, так как не происходит пробоев
воздуха между металлической мембраной и поверхностью
электрета, и т. д.

6. Генераторы высокого напряжения

С помощью электретов можно изготовить высоковольтный
генератор постоянного напряжения. Принцип его дей-
ствия заключается в следующем.

При измерении заряда электрета методом электро-
статической индукции (см. гл. XI, п. 1) один из электродов,
между которыми находится электрет, делается подвиж-
ным. Измерение осуществляется отрывом подвижного
электрода от электрета. При этом заряды, индуцирован-
ные на электродах, переходят на конденсатор. Необ-
ходимым условием для выполнения этого процесса явля-
ется кратковременное заземление подвижного электрода
(если второй электрод заземлен), когда он находится
в контакте с электретом, и затем отключение его от земли
перед отрывом от электрета.

Повторяя эту операцию много раз подряд, можно
зарядить конденсатор, на который стекает заряд, до
большого потенциала, равного разности потенциалов
между поверхностями «свободного» электрета. При плот-
ности заряда 10^{-2} Кл/см² эта разность потенциалов может
достигать 10 кВ.

На рис. 83 дано схематическое изображение генератора
высокого напряжения на электретах. Генератор работает
следующим образом.

Над поверхностями трех электретов 1 вращаются три
металлические лопасти 2. Электреты расположены таким
образом, что между ними остается пустое пространство,
равное по своей площади площади электретов. Когда
лопасти при своем движении располагаются над электре-
тами, подвижные контакты, например А, соединяют их
с землей (нижние электроды, на которых лежат электреты,
соединены с землей). В это время на лопастях-электродах
индуцируются заряды, противоположные зарядам электре-
та. Как только лопасти начнут располагаться над пустым
пространством, контакт А отсоединит их от земли, а другой
контакт В присоединит к высоковольтному конденсатору.
Когда лопасти целиком расположатся над пустым про-

странством, электрическое поле электрета перестанет удерживать индуцированный заряд, и он полностью стечет на конденсатор.

Таким способом можно зарядить конденсатор за короткое время до высокого потенциала. Действующая модель генератора (рис. 83) заряжала небольшую емкость до 5 кВ в течение 1 мин.

Электретные маломощные генераторы, работающие на полимерных пленках, удобны для применения в космических аппаратах. Они легки, просты по устройству и надежны при работе в вакууме. В США по заказу ВВС в 1962 г. был изготовлен электретный генератор, который давал ток силой в несколько микроампер и развивал мощность около 10^{-4} Вт.

В одной из работ (Мэттью, 1962) подробно описан электростатический генератор на электретах. Экспериментальная модель генератора давала ток в 1,5 мкА при мощности 200 мкВт (оптимальное входное сопротивление 100 МОм). Указано, что можно достигнуть лучших показателей: ток 1 мА, мощность 1 Вт.

Электретный генератор малой мощности может служить для возбуждения более мощных электростатических генераторов (Б. А. Пономарев, 1968).

ХVII. ПРИМЕНЕНИЯ, ОСНОВАННЫЕ НА НЕПОСРЕДСТВЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРЕТА

1. Фильтр для газов

Между поверхностью электрета и закорачивающими его электродами действует сильное электрическое поле. Максимальная величина этого поля может составлять 33 кВ/см, т. е. быть равной пробивной прочности окружающего электрет воздуха.

Если пропускать газ, содержащий заряженные частицы, через зазор электрет—электроды, то частицы, заряженные одним знаком, будут осаждаться на электроде, а противоположным — на поверхности электрета. После пропускания определенной порции газа поверхности электрета и электрода должны очищаться от прилипших к ним

частичек, так как в противном случае последние полностью заэкранируют поверхностный заряд электрета, и электростатическое поле в зазоре перестанет действовать.

На этом принципе электреты могут быть использованы в фильтрах для очистки газа. Следует напомнить, что этот прибор, как и другие электретные приборы, работает без внешних источников питания.

2. Дозиметр проникающей радиации на электретах

Мы уже знаем (см. гл. IX, п. 2), что облучение электретов α -, β - и γ -лучами снижает их заряд. Проникающее излучение ионизирует воздух вокруг электрета. Возникшие ионы движутся в электрическом поле электрета, осаждаются на его поверхностях и экранируют заряд. В этом случае происходит точно такой же процесс, как и в разобранном выше электретном фильтре для газа. Чем больше степень ионизации воздуха, тем больше заэкранирован заряд электрета, т. е. тем меньше измеряемый заряд электрета. На этом принципе можно использовать электреты в качестве дозиметров проникающей радиации, работающих без внешних источников питания.

Измеряя заряд электрета до внесения его в зону облучения, а затем в зоне облучения, можно по степени уменьшения заряда судить об интенсивности радиации.

Проникающая радиация способна не только ионизировать окружающий электрет воздух, но и вызывать необратимые изменения в материале электрета. Это также надо учитывать при использовании электретов в качестве чувствительных элементов дозиметров.

3. Управление электронным лучом с помощью электретов

Заряженные частицы способны смещаться в электрическом поле электрета (см. гл. XI, п. 3). Следовательно, электреты можно использовать для управления электронным лучом. На рис. 84 изображена такая фокусирующая система с четырьмя электретами.

Пучок электронов из электронной пушки Π попадает в первую отклоняющую систему электрод—поверхность электрета $\mathcal{E}_1$, которая способна смещать электронный

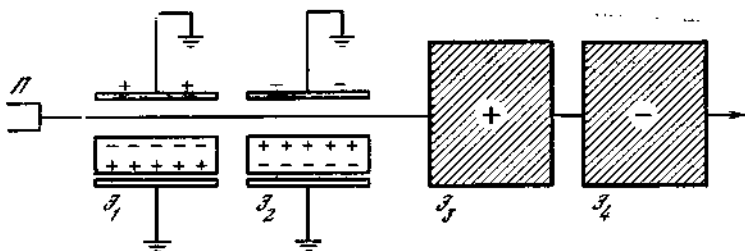


Рис. 84. Фокусировка электронного пучка с помощью электретов

луч вертикально вверх. Затем он попадает во вторую систему $\mathcal{E}_2$, смещающую электронный пучок вертикально вниз. Третья и четвертая системы $\mathcal{E}_3$ и $\mathcal{E}_4$ смещают пучок соответственно вправо и влево в горизонтальном направлении.

Увеличивая или уменьшая величину зазоров между поверхностью электретов и электродами, можно регулировать величину смещения, т. е. управлять электронным лучом.

4. Измеритель атмосферного давления на электретах

Говоря о свойствах электретов, мы указали, что измеряемый заряд электрета зависит от давления окружающего его газа (см. гл. IX, п. 1). Поэтому по величине заряда электрета можно судить об атмосферном давлении окружающего электрет воздуха.

Следует учитывать «инерционность» электретных барометров. При резком изменении атмосферного давления заряд электрета не сразу приходит к определенному значению, а спустя некоторое время. Время установления заряда больше, если давление растет, и меньше, если оно понижается.

5. Гигрометр на электретах

Величина заряда электретов зависит от относительной влажности окружающего воздуха (см. гл. IX, п. 3).

Гигрометр на электретах по принципу своего устройства не отличается от измерителя атмосферного давления,

только здесь, во-первых, не нужна герметизация и, во-вторых, прибор должен быть устроен так, чтобы его показания не зависели от атмосферного давления. Последнее достигается подбором зазора электрет—электроды.

6. Электростатические электрометры и вольтметры на электретах

В главе VII подробно рассмотрены различные виды электретных гальванометров и электрометров, предложенных А. Гемантом в 1940 г. Не известно, были ли внедрены эти приборы в промышленность.

В 1959 г. в ВНИИЭП (Ленинград) Е. М. Иоффе и Г. Г. Цветковой была сделана попытка использовать электреты в электростатических вольтметрах для усиления постоянного поля. В присутствии электретов к электрическому полю, возникающему за счет внешнего источника, добавляется поле электрета, и поэтому чувствительность прибора возрастает.

Схематическое изображение прибора такого типа с горизонтально расположенными электретами показано на рис. 85. Здесь подвижный электрод — тонкий металлический диск *B* движется между поверхностями двух электретов *A*, обращенных друг к другу своими одноименно заряженными сторонами.

Испытания показали, что в приборах с керамическими электретами может быть получена сравнительно высокая чувствительность: 5—6*B* постоянного напряжения на 130 мм шкалы.

7. Фокусирующие и сортирующие системы на электретах

Электростатическое поле свободного электрета неоднородно и целиком определяется формой электрета. Электростатическое поле электрета в виде плоского диска сосредоточено в основном на краях диска, в остальной области оно имеет небольшую величину (см. рис. 55). Поэтому практический интерес имеют электреты более сложной формы (в виде кольца, ножа, конуса, трубки и т. д.), электростатические поля которых характеризуются большой величиной и значительным градиентом (большой неоднородностью).

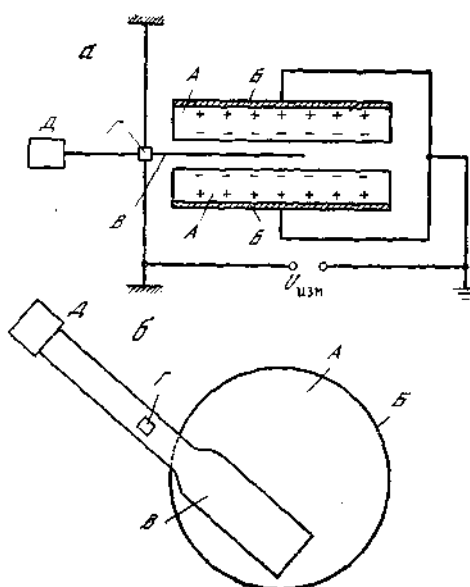


Рис. 85. Схематическое изображение электростатического вольтметра, работающего с применением электретов: вид спереди (а) и вид сверху (б) (по Иоффе и Цветковой 1959):

А — электреты,
Б — неподвижные электроды,
В — подвижный электрод,
Г — упругая металлическая нить,
Д — противовес

Впервые В. Е. Манойлов и Д. А. Таирова (1962) показали, что электреты из титаната кальция в виде кольца могут служить в качестве электростатической линзы, т. е. способны фокусировать пучок электронов.

Исследования на эту тему продолжались. Было ясно, что замена обычных источников электростатического поля в действующих приборах и устройствах на электретные системы открывает большие перспективы. Действительно, электретные системы не требуют специальных источников питания, а это существенно уменьшает вес и габариты действующих приборов и устройств, что весьма важно в ряде областей техники (например, в космической технике, в микроэлектронике и т. д.). В 1961 г. А. М. Оравский в своей монографии «Молекулярные генераторы» писал: «Большие возможности упрощения конструкции генератора связаны с разработкой электретов, пригодных для создания сортирующих систем и не требующих внешнего источника напряжения».

На пути к осуществлению этой задачи встретился один интересный случай. В 1961 г. немецкий инженер Симон опубликовал статью, в которой описывалась кон-

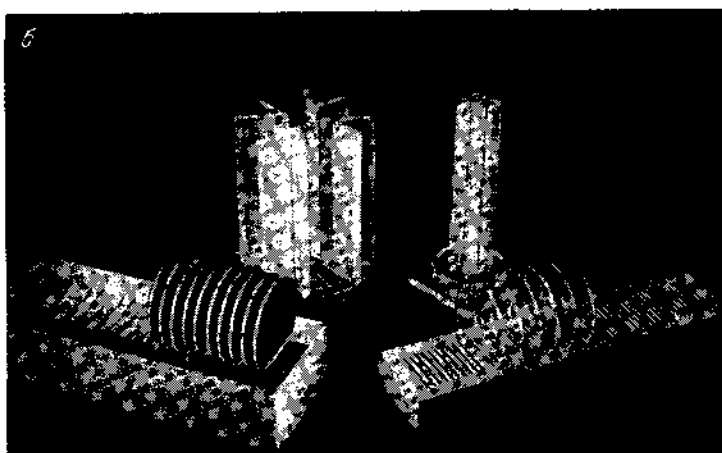
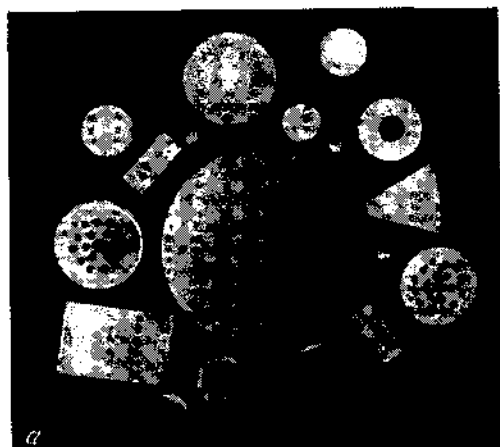


Рис. 86. Виды отдельных электретов (а) и электретных систем (б) (по Губкину и Новак, 1969)

струкция электронной линзы на электретах и был схематически изображен электронный микроскоп с электретными линзами. Однако больше публикаций на эту тему не было. Это связано с тем обстоятельством, что электретные приборы, предложенные Симоном, не работали.

Симон неправильно понял суть электретного эффекта. Он думал, что электреты являются источниками тока, т. е. могут служить в качестве обычной высоковольтной батареи. Поэтому, прикладывая к электрету металлические наконечники любой формы, можно с их помощью создавать электростатические поля любой конфигурации. В то же время мы знаем, что, напротив, металлические тела экранируют электрическое поле электрета.

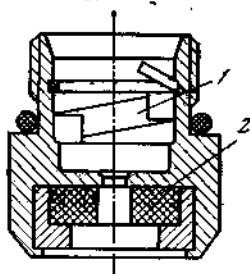
А. Н. Губкин и М. М. Новак (1969—1972) с целью разработки электретных систем для практического применения исследовали конфигурации электростатических полей электретов различной формы, изготовленных из разных диэлектриков (рис. 86). Для этой цели использовался метод зондирования поля электрета. Было показано, что, действительно, с помощью электретов сложной формы можно создавать неоднородные электростатические поля практически любой конфигурации и что электрические поля конусного и ножевого электретов обладают фокусирующими свойствами. Затем были исследованы системы электретов различной формы. В результате сделан вывод о том, что электретные системы из ножевых и кольцевых электретов могут заменить существующие системы для создания электростатического поля на металлических электродах в молекулярных генераторах.

8. Электретная форсунка

При добыче угля в шахтах с использованием угольных комбайнов образуется большое количество тонкодисперсной пыли. Эта пыль особенно вредна для здоровья человека. Проблема пылеочистки в угольных шахтах до настоящего времени полностью не решена. Одним из распространенных методов пылеочистки является метод орошения пыли из водяных форсунок. Эффект пылеподавления существенно зависит от степени электрической заряженности водяных капель, которые приобретают электрический заряд за счет трения при прохождении воды через форсунку, а также вследствие соударений в момент распыления. Заряженность водяной пыли может быть увеличена искусственно, если заставить жидкость проходить через сильное электрическое поле. Обычно для этой цели используют плоский конденсатор, присоединенный к источнику высокого напряжения.

Рис. 87. Электретная форсунка (по Губкину, Степанову и др., 1970):

- 1 — спиральный канал форсунки,
- 2 — втулка из керамического диэлектрика — электрета



Однако этот способ имеет существенные недостатки. Главный недостаток — это возможность электрического пробоя воздушных промежутков. Это обстоятельство ограничивает применение указанного способа в шахтах, опасных по взрыву пыли или метана. Кроме того, этот способ требует громоздких источников высокого напряжения.

В МИЭМ совместно с Гипроуглемашем (1970) разработана и испытана в шахтах электретная форсунка для распыления воды, в которой используется эффект зарядки водяных капель при взаимодействии струи воды с заряженной поверхностью электрета (рис. 87). Применение электретной форсунки повышает эффективность пылеочистки и позволяет избавиться от указанных недостатков метода искусственной подзарядки водяных капель.

XVIII. ДРУГИЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРЕТОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

1. Запись информации на электретах

При поляризации электретов на их поверхностях образуются постоянные заряды. Обычно при поляризации используют электроды, покрывающие всю поверхность диска. Но что будет, если электроды определенной формы располагаются не по всей поверхности электрета, а только на ее части? Очевидно, в этом случае заряды образуются только в тех местах поверхности, которые находились под электродами, т. е. электрет как бы запоминает форму электродов. Вот это свойство электретов и лежит в основе их использования в электрозапоминающих системах.

Как же «прочитать» записанный потенциальный рельеф? Это можно сделать с помощью одного из тех методов измерения заряда электретов, которые были описаны выше, например, можно применить вибрирующую металлическую головку (гл. XI, п. 2). Обходя поверхность диэлектрика такой головкой, мы «нащупаем» заряженные участки по величине тока индукции. Можно также посыпать поверхность диэлектрика заряженным порошком (гл. XI, п. 4).

В принципе электретные материалы могут «запоминать» любое сложное расположение электродов, а также знак потенциала электрода.

В МИЭМ совместно с НИКФИ в течение 1969—1975 гг. проводились специальные исследования, чтобы выяснить, можно ли использовать тонкие полимерные пленки для быстрой записи информации. Так, в частности, было установлено (гл. XIII, п. 2), что устойчивое электретное состояние у пленок из фторопласта-4 и лавсана возникает при кратковременной (микросекунды) поляризации в сильном электрическом поле (порядка сотен kB/cm). Следовательно, такие пленки пригодны для электретной записи, так как частота записи может достигать $10^5—10^6$ Гц. Было установлено также, что при диаметре пишущих электродов 20—100 $m\mu$ плотность записи составляет от 1 до 10^{-1} $m\mu$. Для проявления записи использовался отрицательно заряженный порошок.

2. Электрофотография на фотоэлектретах

До сих пор говорилось в основном о применении термоэлектретов, хотя многое из сказанного справедливо и для фотоэлектретов при условии, если они используются в темноте. Но, кроме этого, фотоэлектреты имеют одно специфическое применение, связанное с их принципиальным отличием от термоэлектретов, а именно чувствительность фотоэлектретов к свету может быть использована для электрофотографии.

Спроектируем на поверхность фотоэлектрета какое-либо световое позитивное изображение и выдержим его определенное время. Тогда на тех участках поверхности, которые освещены сильнее, зарядов исчезнет больше, чем на тех, которые освещены слабее. После снятия светового изображения его скрытая проекция сохранится.

Теперь требуется «проявить пластинку», т. е. сделать невидимое изображение видимым.

Для этого готовят смесь двух порошков. При трении друг о друга частички одного порошка заряжаются отрицательно, а второго — положительно. Посыпая такой смесью поверхность пластинки, мы проявляем ее. Поверхность пластинки окрасится, при этом интенсивность окраски будет ярче в тех местах, где зарядов больше. С помощью этого метода можно передать и полутона оригинала.

Методику электрофотографии на фотоэлектретах разработал В. М. Фридкин (50-е годы) [5]. На алюминиевые пластины напыляется в вакууме слой поликристаллической серы толщиной 50 мк (сера является фотоэлектретом). Этот слой поляризуется во внешнем электрическом поле при непрерывном освещении через полупрозрачный электрод. Затем на полученный таким образом фотоэлектрет проектируется позитивное изображение. Для проявления скрытого изображения используется смесь двух порошков: поваренной соли и асфальта.

3. Электродвигатели на электретах

Пластина электрета вследствие взаимодействия ее поля с электрическим полем плоского конденсатора способна втягиваться в зазор между обкладками, если заряды на ее поверхностях противоположны зарядам на прилегающих к ним пластинках конденсатора, и выталкиваться в противоположном случае. На этом принципе основано устройство электродвигателей на электретах.

В ФИАНе (1960) было разработано несколько моделей электродвигателей на электретах. Схематическое изображение одного из таких электродвигателей с двумя электретами представлено на рис. 88.

Две электретные пластинки *В* скреплены друг с другом таким образом, что они могут совершать круговые движения в плоскости, совпадающей с их поверхностями. На пути этих пластинок помещены два плоских конденсатора *С*. Пластины при своем вращении то входят в зазор между обкладками конденсатора, то выходят из него. К оси, которая вращается вместе с электретами, прикреплены скользящие контакты переключателя *Д*, изменяющие заряды на пластинках конденсатора.

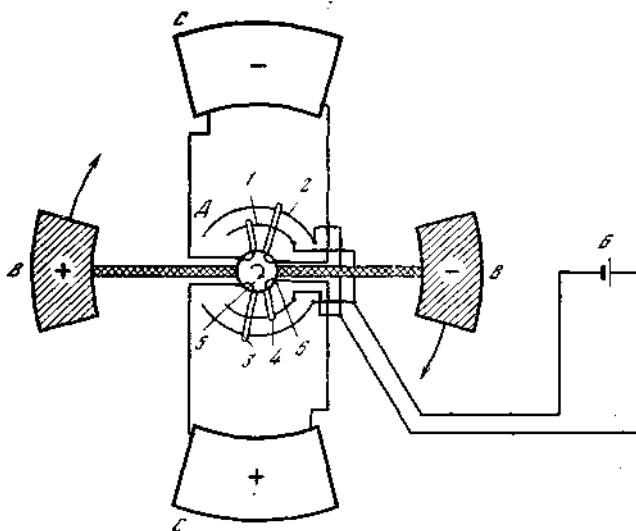


Рис. 88. Схематическое изображение электродвигателя на двух электретах (вид сверху) (по Губкину и Копанёву, 1960):

В — электрет, С — плоский конденсатор, Б — батарея, Д — переключатель полярности;

1 и 2 — клеммы, 3 и 4 — скользящие контакты, 5 — ось, 6 — другие скользящие контакты

При приближении пластинок к конденсатору его обкладки принимают такой знак, при котором пластинка втягивается в зазор. В тот же момент, когда пластинка полностью втянулась в конденсатор, заряды на его обкладках меняются на обратные, и пластинка выталкивается из зазора. При приближении к следующему конденсатору все повторяется сначала. Таким образом достигается непрерывное вращение электретов и связанной с ними оси.

Для того чтобы электретный двигатель работал, на обкладки конденсаторов необходимо подавать высокое напряжение (1000 В) от маломощного источника напряжения (например, можно пользоваться набором анодных батарей). При этом расход энергии чрезвычайно мал, скорость же вращения может быть большой.

В. Е. Манойлов и О. А. Мяздриков (1961) предложили конструкцию электретного синхронного двигателя, пи-

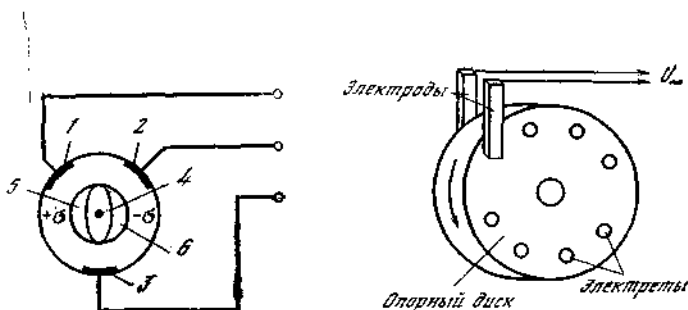


Рис. 89. Принципиальная схема электретного синхронного двигателя (по Маноилову и Мяздринову, 1961)

1, 2, 3 — электроды, 4 — диск-ротор, 5, 6 — электреты

Рис. 90. Схема электретного генератора и электродвигателя (по Карбо, 1968)

таемого трехфазным переменным напряжением (рис. 89). Очевидно, что схема обратима, т. е. может рассматриваться как синхронный электретный генератор.

Изображенная на рис. 90 схема электретного генератора также обратима, т. е. может быть схемой электретного двигателя.

4. Применение электретов в качестве кратковременных источников тока и пьезоэлементов

Электреты — кратковременные источники постоянного тока. Уже говорилось, что электрет при своей деполяризации способен выделить во внешнюю цепь некоторое количество электричества, величина которого зависит от материала электрета и условий его изготовления. В отдельных случаях она может достигать 10^{-4} Кл/см², а ток во внешней цепи — 10^{-6} А. Составляя батарею из многих электретов, можно создать источники кратковременного тока достаточно большой мощности.

Представим себе, что парашютисту-геологу, выброшенному на изучаемую территорию, требуется передать кратковременную радиоинформацию. Он раскладывает костер, нагревает электретную батарею, которая питает его радиопередатчик, и передает нужные сведения. Затем оставляет разрядившуюся батарею и продолжает выполнять задание.

Применение электретов в качестве пьезоэлементов. При наложении механической нагрузки на систему электрет — электроды во внешней цепи фиксируется некоторый импульс тока (см. гл. XII, п. 5). Это позволяет использовать электреты в качестве датчиков давления.

В ряде случаев электретные пьезодатчики могут иметь преимущество по сравнению с известными пьезоэлементами в связи с тем, что они термостойки, обладают большим удельным сопротивлением, механически прочны.

5. Применение электретов в медицине

Весьма важной задачей современной медицины является создание искусственных сосудов и искусственного сердца. В качестве искусственных сосудов используются трубки, изготовленные из различных полимерных диэлектриков. Отрезок такой трубки может заменить вышедший из строя по тем или иным причинам «живой сосуд». Однако на пути решения этой задачи встречается весьма принципиальная трудность. Дело в том, что в таком искусственном сосуде наблюдается повышенная свертываемость крови. По-видимому, стенки «живого сосуда» обладают особыми свойствами, предохраняющими от тромбоза крови.

Аналогичная трудность встречается при хранении крови — кровь быстро свертывается.

В 1968 г. в американской печати (А. Р. Гарднер) появилось сообщение, что отрицательные заряды электретов уменьшают вероятность тромбоза у собак, а положительные увеличивают. Таким образом, если сделать искусственный сосуд из трубчатого полимерного электрета, внутренняя поверхность которого заряжена отрицательно, то свертываемость крови уменьшится. Аналогичным образом можно увеличить срок хранения крови, если сосуд, где она хранится, будет электретом, внутренняя поверхность которого несет отрицательный заряд.

Исследования подобного рода ведутся в настоящее время в МИЭМ совместно с НИИ хирургии и трансплантации органов.

6. О некоторых специальных применениях электретов и перспективах их дальнейшего использования

Есть сведения, что, кроме указанных выше областей применения, электреты могут быть использованы для специальных целей. Так, имеется сообщение, что в Японии (1972) разработаны электретные звукоусилители для стереоусилителей.

В. А. Андриященко (1960) предложил конструкцию электростатического реле на электретах (рис. 91), которое

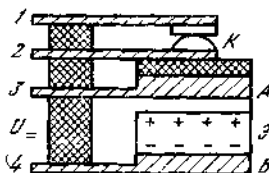


Рис. 91. Электростатическое реле на электретах (по Андриященко, 1960)

работает следующим образом. При подаче некоторого постоянного напряжения на клеммы 3 и 4 верхний электрод А притянется к электрету Э, который находится на неподвижном электроде В. Это повлечет за собой размыкание контактов К; реле будет размыкать или замыкать (в зависимости от конструкции) вторичную цепь, присоединенную к клеммам 1 и 2. Имеются сведения (1977), что электретные реле с весьма хорошими характеристиками изготовлены за рубежом.

Перспективно использовать электреты в сепарирующих устройствах. Там они заменят внешние источники напряжения. Схема электретного сепаратора изображена на рис. 92. В неоднородном поле электрета происходит разделение частиц минерала.

В. А. Седин и Г. П. Яровой (1974) изготовили шариковые и линейные электреты с монополярным зарядом и применили их для целей моделирования. В одной из американских работ (1968) приведена схема электретного измерителя скорости пули (рис. 93). При пролете пули электрические поля между металлической пластиной и электретами изменяются. Моменты влета и вылета пули фиксируются прибором. Зная путь, который прошла пуля, и время полета, определяют ее скорость.

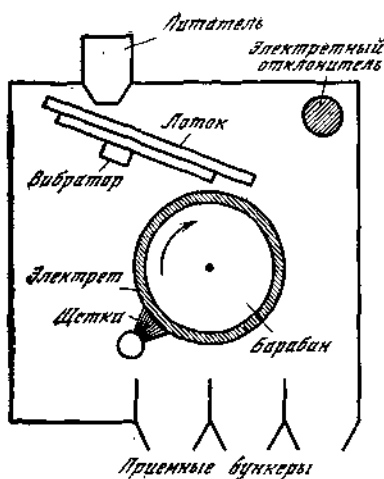


Рис. 92. Схема сепаратора на электретах (по Плавену, Олафинскому и др., 1967)

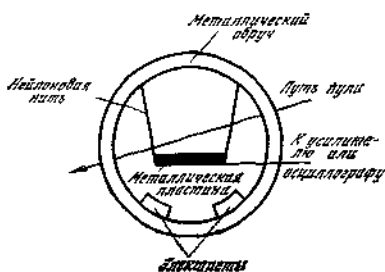


Рис. 93. Электретный измеритель скорости пули (по Карбо, 1968)

Высказывается предположение (В. В. Цетлин и др., 1976), что радиоэлектреты могут найти интересное применение для защиты космических аппаратов от радиоактивного облучения. Для этой цели следует нанести на поверхность космического корабля тонкую радиоэлектретную пленку. Электрическое поле и заряд этой пленки будут затруднять проникновение радиоактивных частиц внутрь космического корабля.

Как мы видели выше, электреты могут применяться в самых различных областях техники. Трудно назвать такую область техники, где бы электреты не нашли применения. Можно ли все-таки указать наиболее перспективные направления использования электретов? Ответить на этот вопрос непросто. Можно легко ошибиться и высказать субъективное мнение. Действительно, каждый специалист может считать, что именно в его области использование электретов наиболее перспективно.

Нам кажется, что электреты найдут широкое применение в тех областях техники, в тех приборах и устройствах, где главным требованием являются небольшой вес, надежность, простота конструкции, способность работать в вакууме.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Остановимся на некоторых особенностях электретного эффекта и путях его практического использования.

Во-первых, подчеркнем еще раз (см. главу XIII, п. 7), что электретное состояние твердых диэлектриков представляет собой явление, присущее всем диэлектрикам. В этом смысле электретный эффект не отличается от таких хорошо известных явлений, как поляризация диэлектриков, электропроводность и диэлектрические потери. Все реальные диэлектрики имеют собственные и примесные дефекты структуры (см. главу I, п. 3). Поэтому в них есть ловушки для диполей и заряженных частиц. При помещении диэлектриков во внешнее электрическое поле у них возникает релаксационная поляризация. Слабо связанные диполи или дипольные комплексы в полярных диэлектриках, а также квазидиполи в неполярных кристаллах ориентируются под действием поля и закрепляются в потенциальных ямах. Свободные носители заряда смещаются к электродам и захватываются на ловушках в процессе миграции. Диэлектрик поляризуется. Если поляризация такого диэлектрика происходит при повышенной температуре, то время установления релаксационных процессов становится сравнительно небольшим, так что поляризация развивается полностью. При понижении температуры диэлектрика время релаксации резко увеличивается и, если электрическое поле не отключается до окончательного понижения температуры, захваченные диполи и заряженные частицы закрепляются на ловушках («замораживаются в диэлектрике»). Образовавшаяся остаточная поляризация обуславливает электретное состояние термоэлектретов (у электроэлектретов нагревание не играет такой большой роли).

Если в диэлектрике при некоторой, например повышенной, температуре время установления релаксационных

процессов составляет доли секунды (от 10^{-12} с и меньше), то подобный диэлектрик будет *релаксатором*; входящие в его состав диполи (или квазидиполи) и свободные носители заряда успевают ориентироваться или смещаться под действием переменного электрического поля (частота которого 10 Гц и больше). Такой диэлектрик обладает дисперсией диэлектрической проницаемости ϵ ; у него наблюдается максимум тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ [2; 8]. Зависимости $\epsilon(\omega)$ и $\operatorname{tg} \delta(\omega)$ (ω — угловая частота переменного поля) в простейшем случае (один релаксационный процесс) имеют вид дебаевских кривых [8]. В более сложных случаях формулы для $\epsilon(\omega)$ и $\operatorname{tg} \delta(\omega)$ можно найти, зная функцию $P_z(t)$, которую мы ввели выше (см. главы II и XIV).

Если понизить температуру релаксатора, то время релаксации диполей (или квазидиполей) и мигрирующих частиц резко возрастет и он превратится в электрет.

Таким образом, диэлектрик, обладающий релаксационной поляризацией в переменном электрическом поле при повышенных температурах, т. е. являющийся релаксатором, превращается в электрет при более низких температурах. Нет принципиальной разницы между релаксаторами и электретами. Все диэлектрики, имеющие дефекты, являются либо релаксаторами, либо электретами в зависимости от того, при какой температуре их рассматривать.

Исходя из сказанного, можно предложить общую методику для изучения релаксационных процессов в диэлектриках.

Для выяснения физической природы релаксационной поляризации нужно провести два цикла исследований. Первый цикл — это измерение ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ при разных температурах и разной частоте электрического поля и измерение удельной проводимости γ при разных температурах в постоянном электрическом поле. Второй цикл — это определение «электретных» характеристик — таких как зависимость эффективного поверхностного заряда σ от времени t и тока термодеполяризации от температуры.

В результате проведенных исследований можно дать наиболее полную характеристику тем молекулярным процессам, которые обуславливают релаксационные и электретные свойства диэлектриков.

«Электретная» методика (например, измерение токов

ТДП) в ряде случаев более чувствительна, чем классическая диэлектрическая методика (например, измерение $\lg \delta$). Однако только комплексное использование этих двух методов позволит наиболее полно охарактеризовать релаксационные процессы в диэлектриках.

Для электретов других видов, отличных от термо- и электроэлектретов, рассмотренная методика может быть дополнена. Так, томские ученые (А. А. Воробьев, Е. К. Завадовская, Ю. М. Анненков, С. Г. Боев, Г. И. Сигаев и др.) весьма успешно (методом зондирования) определяют распределение объемного заряда у радиоэлектретов, накопленного в результате электронного облучения.

До настоящего времени задача ученых, изучающих электреты, заключалась в основном в том, чтобы выявить молекулярную природу электретного состояния (с помощью изложенной выше методики) и попытаться изготовить электреты, обладающие достаточно большим и стабильным зарядом. Чем дольше сохраняется заряд электрета, чем меньше он меняется со временем, тем лучше электрет; его удобнее использовать в приборах и устройствах. Эта основная проблема еще не решена полностью. Если даже в некоторых случаях на практике и получены достаточно стабильные электреты, то удовлетворительно го объяснения этому явлению не имеется не только на молекулярном, но и на феноменологическом уровне. Здесь практика опережает теорию.

Однако в последнее время возникла весьма важная противоположная проблема — проблема защиты от статического электричества. Статическое электричество наводится на твердых диэлектриках в результате трения, радиоактивного облучения, абсорбции и десорбции ионов и электронов, при коронировании электродов и в других случаях. Хорошие диэлектрики (особенно органические полимеры) весьма долго сохраняют наэлектризованное состояние. Статическое электричество может привести к ряду нежелательных явлений: отказу в работе диэлектрических и полупроводниковых приборов и устройств, изменению параметров покрытий ракет в космосе, взрыву горючих материалов и т. д. Особое внимание приобретает здесь защита от статического электричества в случае радиоэлектретного эффекта.

Поэтому ученые, занятые созданием новых стабильных электретов, должны обратить внимание и на решение

противоположной задачи: как избавиться от стабильных статических электретных зарядов. Знание закономерностей электретного состояния поможет решить эту задачу. Если ученый овладел способами получения стабильных электретов, он может дать рекомендации и для избавления от статической электризации.

Большое значение при исследовании электретного эффекта и особенно для практического применения электретов имеет своевременный аналитический обзор теоретических работ и патентной литературы.

Так, аналитический обзор патентной ситуации по проблеме разработки электретных акустических преобразователей (С. С. Альмухаметов, А. Н. Губкин, Н. В. Петский, А. П. Савельев; ВНИИТ, МИЭМ, 1978) показал, что во всех ведущих странах мира ведется активное исследование электретов. Наибольшее количество патентов приходится на долю США и Японии. По данным на 1973 г., около трети всех микрофонов стало выпускаться в электретном исполнении. Большое внимание при разработке электретных преобразователей уделяется их стабильности и миниатюризации. Кроме традиционных методов электретирования полимерных пленок, заключающихся в нагревании пленки и приложении поляризующего напряжения, применяется ряд других методов (коронирование, облучение электронами и др.) или совокупность различных методов.

Изучив патентную документацию, можно определить тенденцию и основные направления в развитии учения об электретном эффекте и его практическом применении.

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Книги

1. *Сканави Г. И.* Физика диэлектриков. (Область слабых полей). М.— Л., ГИТТЛ., 1949.
2. *Губкин А. Н.* Физика диэлектриков. Т. 1. М., «Высшая школа», 1971.
3. *Губкин А. Н.* Электреты. М., Изд-во АН СССР, 1961.
4. *Фридкин В. М., Желудев И. С.* Фотоэлектреты и электрофотографический процесс. М., Изд-во АН СССР, 1960.
5. *Фридкин В. М.* Физические основы электрофотографического процесса. М.— Л., «Энергия», 1966.
6. *Ковальский П. Н., Шнейдер А. Д.* Фотоэлектретный эффект в полупроводниках. Львов, «Высшая школа», 1977.
7. *Луцкейкин Г. А.* Полимерные электреты. М., «Химия», 1976.
8. *Богородицкий Н. П., Волокобинский Ю. М., Воробьев А. А. и Тареев Б. М.* Теория диэлектриков. М.— Л., «Энергия», 1965.
9. *Маздриков О. А., Манойлов В. Е.* Электреты. М.— Л., Госэнергоиздат, 1962.

Статьи

10. *Губкин А. Н.* К вопросу о феноменологической теории электретов.— «Журнал технической физики», 1957, т. 27, вып. 9, с. 1954—1968.
11. *Губкин А. Н., Сканави Г. И.* Получение и свойства новых электретов из неорганических диэлектриков.— «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1958, т. 22, № 3, с. 330—342.
12. *Губкин А. Н., Митрошина В. С., Сергаченко В. Ф., Субботин М. И.* Методы измерения заряда электретов.— «Приборы и техника эксперимента», 1959, № 4, с. 115—118.
13. *Губкин А. Н., Сорокин В. С.* Пьезоэффект в электретах.— «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1960, т. 24, № 2, с. 246—252.
14. *Губкин А. Н., Мильшина Е. А.* О роли остаточной поляризации в электретном эффекте.— «Физика твердого тела», 1961, т. 3, вып. 11, с. 3376—3382.
15. *Губкин А. Н., Сканави Г. И.* К вопросу о неорганических электретах.— «Физика твердого тела», 1961, т. 3, вып. 1, с. 297—304.
16. *Губкин А. Н., Мацонашвили Б. Н.* К вопросу о физической природе электретного эффекта в карнаубском воске.— «Физика твердого тела», 1962, т. 4, вып. 5, с. 1196—1205.
17. *Медникова Е. И., Шарнопольская Е. Т.* Электреты на основе стекол.— «Стекло и керамика», 1963, № 4, с. 11—13.

18. Богородицкий Н. П., Таурова Д. А., Сорокин В. С. Роль свободных носителей зарядов в образовании электретного состояния в поликристаллических диэлектриках.— «Физика твердого тела», 1964, т. 6, вып. 8, с. 2301—2306.
19. Губкин А. Н., Колесников А. М. Электреты из легкоплавких органических поликристаллических диэлектриков.— «Журнал физической химии», 1968, т. 42, № 8, с. 2106—2108.
20. Губкин А. Н., Цукарев Е. Ф. Электретный датчик сигналов.— «Приборы и техника эксперимента», 1968, № 3, с. 124—127.
21. Губкин А. Н., Ослоблин В. А. Электреты из полиметилметакрилата.— «Высокомолекулярные соединения», 1969, т. 116, № 2, с. 154—157.
22. Губкин А. Н., Егорова Т. С., Кокорин Л. М., Зицер Н. Е. Электреты из полимерных пленок.— «Высокомолекулярные соединения», 1970, т. 12А, № 3, с. 602—609.
23. Некрасов М. М., Прядко Л. Ф., Храмов Ю. А. Электретные свойства диэлектриков.— «Полупроводниковая техника и микроэлектроника», 1970. Киев, Изд-во АН УССР, вып. 4, с. 169—180.
24. Губкин А. Н., Каштанова А. М., Варшав Б. Г., Машкович М. Д., Осанова Т. Н. Исследование заряда электретов из стекла и ситалла системы $MgO-CaO-SiO_2-Al_2O_3$.— «Стеклообразное состояние», Ереван, Изд-во АН АрмССР, 1970, т. 5, вып. 1, с. 318—322.
25. Губкин А. Н., Новак М. М. Фокусирующее электростатическое поле системы ножевых электретов.— «Журнал технической физики», 1971, т. 41, вып. 8, с. 1697—1701.
26. Насынков В. В., Сейсян Е. Л., Таурова Д. А., Тауров В. Н. Процесс образования электретного состояния в некоторых органических пленках.— «Электронная техника. Сер. 8. Радиодетали», 1971, вып. 1(22), с. 57—65.
27. Заев Н. Е., Кузьмина Р. П. Зависимость плотности поверхностного заряда гомоэлектретов от температуры.— «Труды Всесоюз. НИИ электромеханики», 1971, т. 35, с. 200—209.
28. Губкин А. Н., Попова О. С., Каштанова А. М., Новак М. М. Зависимость заряда электретов от температуры и влажности.— «Электронная техника. Сер. 6. Материалы», 1972, вып. 2, с. 113—116.
29. Борисова М. Э., Койков С. Н., Кириллова Е. В., Парибок В. А., Фомин В. А. Пленочные электреты из политетрафторэтилена, изготовленные электронной бомбардировкой и в коронном разряде.— «Труды Моск. ин-та электронного машиностроения», 1972, вып. 27, с. 92—101.
30. Губкин А. Н., Романовская Н. Н. Электретный эффект в монокристаллах рутила.— «Труды Моск. ин-та электронного машиностроения», 1972, вып. 27, с. 118—125.
31. Губкин А. Н., Новак М. М., Холодова Г. К. Свойства электростатического поля системы кольцевых электретов и возможности его использования для фокусировки в молекулярных генераторах.— «Журнал технической физики», 1972, т. 42, № 4, с. 866—870.
32. Губкин А. Н. О физической природе электретного эффекта.— «Труды Моск. ин-та электронного машиностроения», 1972, вып. 27, с. 6—28.

33. Губкин А. Н., Голова В. А. Электреты из щелочно-галогидных монокристаллов.— «Изв. вузов СССР. Физика», 1973, № 8, с. 132—134.
34. Губкин А. Н., Ремина Л. В. Электретный тахометр.— «Измерительная техника», 1973, № 2, с. 43—44.
35. Губкин А. Н. Современная модель электрета.— «Физика и химия твердого тела», 1973, вып. 3, с. 43—49.
36. Губкин А. Н. О роли релаксационной поляризации в электретном эффекте твердых диэлектриков.— «Материалы радиоэлектроники», 1975, вып. 73, с. 59—71.
37. Губкин А. Н., Новак М. М., Голова В. А., Пономарев В. А., Романовская Н. Н., Тютнев А. П., Шарова Г. Г., Костюков Н. С. Радиоэлектретный эффект в стеатитовой керамике.— «Труды Моск. ин-та электронного машиностроения», 1976, вып. 34, с. 206—213.
38. Ежелин М. И., Орешкин П. Т., Перельгина Т. К., Старченко Б. К., Гилмофеев Т. К. Исследование электретов из полимерных пленок и изготовление мембран для электретных микрофонов.— «Труды Моск. ин-та электронного машиностроения», 1976, вып. 34, с. 22—29.
39. Борисова М. Э., Койков С. Н., Парибок В. А., Фомин В. А. Основные параметры электрета, их экспериментальное определение и связь с распределением заряда по толщине.— «Труды Моск. ин-та электронного машиностроения», 1976, вып. 34, с. 11—17.
40. Губкин А. Н. Общая феноменологическая теория электретного эффекта.— «Труды Моск. ин-та электронного машиностроения», 1976, вып. 34, с. 193—205.
41. Eguchi M. On the Permanent Electret.— «Philosophical Magazine», 1925, v. 49, p. 178—192.
42. Adams E. On Elektrets.— «Journal Franklin Institut», 1927, v. 204, p. 469—486.
43. Gemant A. Recent Investigations on Electrets.— «Philosophical Magazine», 1935, v. 20, N 136, p. 929—952.
44. Gemant A. The Use of Electrets in Electrical Instruments.— «Review Sciencs Instruments», 1940, v. 11, N 2, p. 65—71.
45. Gross B. Experiments on Electrets.— «Physical Review», 1944, v. 66, p. 26—28.
46. Gutmann F. The Electret.— «Reviews of Modern Physics», 1948, v. 20, N 3, p. 457—472.
47. Swann W. F. G. Certain Matters Pertaining to Electrets.— «Journal Franklin Institutes», 1950, v. 250, p. 219—248.
48. Wieder H. H., Kaufman Sol. Plastic electrets and their applications.— «Electrical Engineering», 1953, v. 72, N 6, p. 511—514.
49. Wiseman G. G., Feaster G. R. Experiments on the polarisation and decay of electrets.— «The Journal of Chemical Physics», 1957, v. 26, N 3, p. 524—527.
50. Sessler G. M., West J. E. Foil-Electret Microphone.— «The Journal of the Acoustical Society of America», 1966, v. 40, N 6, p. 1433—1440.
51. Vassilev T., Lyudskanov V., Kartalov P., Donchev D. Investigating the Role of Dipole Orientation the Forming of Electret State in Polymethyleacrylate.— «Ecole Normale Supericure Plovdiv-Bulgarie, Natura», 1967, t. 1, fasc. 1, p. 15—18.

52. *Carbauch V. A. J.* Electrets-Applications. Unlimited? — «Electrochemical Technology», 1968, v. 6, N 1—2, p. 3—6.
53. *Perlman M. M.* Review of Phenomenological Theories of Electrets. — «Electrochemical Technology», 1968, v. 6, N 3—4, p. 95—97.
54. *Palala F. L., Catlin A.* Electret Behavior at Low Pressure. — «The Journal of Chemical Physics», 1970, v. 32, N 7, p. 3651—3654.
55. *Людсканов В. Г., Зеленева Ю. В.* Изследване остатъчната поляризация в електрети от полимери по метода на термодеполяризацията. — «Высш. педагогически институт — Пловдив. Научни трудове. Физика», 1970, т. 8, кн. 2, с. 67—76.
56. *Sessler G. M., West J. E.* Electret transducers: a review. — «The Journal of the Acoustical Society of America», 1973, v. 53, N 6, p. 1589—1600.
57. *Gross B., Sessler G. M., West J. E.* Charge dynamics for electron-irradiated polymer-foil electrets. — «Journal of Applied Physics», 1974, v. 45, N 7, p. 2841—2851.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Поляризация диэлектриков	
I. Поляризация и структура диэлектриков	5
II. Релаксационная поляризация	15
III. Другие виды поляризации диэлектриков	25
История открытия электретов. Первые представления об электретном эффекте и возможностях его практического использования	
IV. История открытия электретов	27
V. Первые исследования электретов	33
VI. Ранние теории электретного эффекта	43
VII. Первые попытки практического применения электретов.	50
Современные представления об электретном эффекте	
VIII. Общие свойства электретов	54
IX. Влияние внешних условий и геометрии образцов на свойства электретов	79
X. Электрические поля электретов	90
XI. Методы измерения заряда электретов	95
XII. Исследование молекулярной природы гетеро- и гомозаряда электретов	106
XIII. Электретное состояние у разных диэлектриков	120
XIV. Физическая природа электретного эффекта по феноменологической теории	140
Практическое применение электретов	
XV. Возможные области практического применения электретов	158
XVI. Электретные микрофоны и другие датчики сигналов	159
XVII. Применения, основанные на непосредственном использовании электростатического поля электрета	168
XVIII. Другие практические применения электретов и перспективы их дальнейшего использования	175
Заключение	183
Основная литература	187

Алексей Николаевич Губкин

ЭЛЕКТРЕТЫ

**Утверждено к печати редколлегией
серии научно-популярных изданий
Академии наук СССР**

**Редактор В. А. Никифоровский
Редактор издательства Е. М. Кляус
Художник А. В. Пушкарный
Художественный редактор И. В. Разина
Технический редактор Ф. М. Хенох
Корректоры А. А. Лебедева, Л. В. Лукинская**

ИБ № 4218

**Сдано в набор 17.1.78г.
Подписано к печати 17.05.78г.
Формат 84×106¹/₁₆. Бумага типографская № 1
Гарнитура обыкновенная
Почать высокая
Усл. печ. л. 10,08. Уч.-изд. л. 9,7
Тираж 25600. Т-00227. Тип. зак. 113
Цена 65 коп.**

**Издательство «Наука»
117425, Москва, В-425, Профсоюзная ул., 94-а
2-я типография издательства «Наука»
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10**