

THE ELECTRET EFFECT AND ITS APPLICATION

Yu. A. GOROKHOVATSKII

The definition of the electret effect is given. The role of the physical analogy in the acquisition of new knowledge as shown by the history of electret discovery is discussed. The reasons leading to origin and the prolonged life of external electret fields are explained. The summary of the main techniques of producing of electrets and of their application is also given.

Дано определение электретного эффекта. Обсуждается роль физической аналогии при получении новых знаний на примере истории открытия электретов. Вскрываются причины, приводящие к появлению и длительному существованию внешних полей электретов. Приводится сводка основных методов получения электретов и областей их применения.

ЭЛЕКТРЕТНЫЙ ЭФФЕКТ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Ю. А. ГОРОХОВАТСКИЙ

Российский государственный педагогический университет
им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург

ВВЕДЕНИЕ

Электреты – электрические аналоги постоянных магнитов – в настоящее время нашли широкое применение. Диапазон их использования простирается от бытовой техники (широко известны высококачественные электретные микрофоны) до техники специального назначения (например, электретные дозиметры, электретные гидрофоны и т.п.). Практическая потребность получения электретов с заданными свойствами стимулировала и продолжает стимулировать физические исследования достаточно сложных явлений, лежащих в основе так называемого электретного состояния диэлектриков. Свидетельством повышенного интереса у научного сообщества к исследованию электретов является регулярное проведение международных симпозиумов по электретам (последний, девятый симпозиум состоялся в сентябре 1996 года в Шанхае).

Физика электретного состояния диэлектриков весьма непростая и до конца не изучена. Поэтому автор не считает возможным претендовать в данной статье на изложение, даже популярное, более или менее законченной и последовательной теории электретного эффекта. Также невозможно теперь уже по причине ограниченного объема статьи подробно описать методы получения различных электретов, принципы действия и технические характеристики приборов и устройств на основе электретов. Этим вопросам посвящены монографии и тематические сборники статей, некоторые из них упомянуты в списке литературы. Поэтому задачей статьи автор считает, во-первых, познакомить непосвященного читателя с сутью и историей открытия электретного эффекта, во-вторых, показать на примерах сложность физики электретного состояния и неправомерность некоторых упрощенных подходов при описании этого состояния и, в-третьих, дать читателю сводку основных методов получения электретов (включая самые современные), а также наметить основные области их применения. Автор надеется, что статья может оказаться полезной тем, кто интересуется современными достижениями науки и техники, а также тем, кто выбрал в качестве предмета своего исследования электрофизику диэлектриков.

СУТЬ И ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ ЭЛЕКТРЕТНОГО ЭФФЕКТА

Электретом называется диэлектрик, длительное время сохраняющий поляризованное состояние после снятия внешнего воздействия, которое привело к поляризации (или заряджению) этого диэлектрика, и создающий в окружающем пространстве квазипостоянное электрическое поле.

Таким образом, электрет является электрическим аналогом постоянного магнита. В истории науки известны случаи, когда проведение некоторых аналогий между различными по своей природе, но имеющими формальное внешнее сходство явлениями способствовало открытию новых эффектов. Особенно большое внешнее сходство наблюдается в поведении различных веществ в постоянных магнитном и электрическом полях. Ярким примером такой аналогии являются ферромагнетики и сегнетоэлектрики. Подобно ферромагнетикам, сегнетоэлектрики обладают спонтанной поляризацией (в ферромагнетиках спонтанное намагничивание), характеризуются наличием гистерезиса (зависимостью свойств от предыстории образца), фазовых переходов при изменении температуры и т.п. Важно подчеркнуть, что такое сходство существует несмотря на различную природу веществ (ферромагнетики – металлы, сегнетоэлектрики – диэлектрики).

Постоянные магниты были известны человечеству еще в глубокой древности. Сегодня мы знаем, что постоянные магниты – это ферромагнетики с остаточной намагниченностью, благодаря которой они и создают вокруг себя постоянное магнитное поле. Может возникнуть вопрос: почему ученые не искали электрический аналог постоянному магниту? Почему вопрос об электрическом аналоге постоянного магнита был сформулирован лишь только в конце XIX века, а сам электрет открыт лишь в начале XX столетия?

Можно назвать несколько причин этого. Следует отметить, что диэлектрические свойства вещества стали изучаться намного позднее магнитных свойств. К концу XIX века магнитные свойства ряда веществ были изучены уже достаточно хорошо. Особенно много ученые знали о свойствах постоянных магнитов. Диэлектрики же были исследованы в значительно меньшей степени. Сам термин “диэлектрик” был введен М. Фарадеем лишь в 1839 году. И только в 1896 году из общих соображений английский физик О. Хевисайд высказал предположение о том, что, подобно постоянным магнитам, в природе должны существовать постоянно заполяризованные диэлектрики. Именно Хевисайд предложил для обозначения такого состояния диэлектрика термин “электрет” и дал его первое определение. Согласно Хевисайду, под электретом следует понимать постоянный поляризованный диэлектрик с разноименными полюсами, обладающий внешним электрическим полем [1]. Определение, предложенное

Хевисайдом, близко к современному и только не учитывает возможность создания электретного состояния путем заряджения диэлектрика зарядом одного знака (так называемое моноэлектретное состояние), но об этом мы поговорим несколько позднее.

Пользуясь все той же аналогией, можно было ожидать, что, подобно постоянным магнитам, электреты можно изготавливать только из диэлектриков, обладающих спонтанной поляризацией. Однако все оказалось гораздо сложнее. Как потом выяснилось [2], сегнетоэлектрики, как правило, не обладают электретными свойствами, хотя и имеют остаточную поляризацию. К тому же несегнетоэлектрические диэлектрики обнаруживают электретные свойства. Исследуя электрические свойства именно несегнетоэлектрического вещества – карнаубского воска (смола пальмы Карнауба, растущей в Южной Америке) японский физик Мототоро Егучи в 1920 году впервые экспериментально обнаружил электретный эффект. Отличительной особенностью карнаубского воска является малая электропроводность при сравнительно низкой температуре плавления. Прикладывая постоянное электрическое поле к расплавленному карнаубскому воску и охлаждая его, не снимая электрического поля вплоть до затвердевания, М. Егучи получил первый в мире электрет. Почему для изготовления первого электрета был выбран именно карнаубский воск, остается загадкой. По-видимому, это явилось делом случая. Однако выбор Егучи оказался очень удачным. В дальнейшем карнаубский воск зарекомендовал себя как отличный материал для изготовления электретов.

Таким образом, аналогия между постоянными магнитами и электретами является неполной. Различие проявляется даже в уравнениях Максвелла, в которых нашло отражение то обстоятельство, что в природе нет свободных магнитных зарядов, в то время как свободные электрические заряды существуют. Это в конечном счете ведет к тому, что внутреннее электрическое поле, созданное в диэлектрике искусственно (в процессе электретирувания, то есть приготовления электретного состояния) либо существовавшее в нем спонтанно (в сегнетоэлектриках), будет экранироваться свободными электрическими зарядами, находящимися внутри диэлектрика или в окружающей его среде. В результате этого процесса наэлектризованное состояние исчезает или по крайней мере маскируется. Именно поэтому электретное состояние наблюдается только в диэлектриках с весьма низкой удельной проводимостью (10^{-10} – 10^{-15} Ом⁻¹ · см⁻¹ и меньше) [2]. Как следует из уравнений электростатики, характерное время экранирования внутреннего электрического поля свободными носителями заряда (так называемое время максвелловской релаксации τ_{μ}) определяется произведением диэлектрической проницаемости на удельную проводимость среды и составляет

для некоторых высокоомных материалов величину порядка нескольких лет.

Итак, следование формальной аналогии привело бы нас к неверному направлению поиска электретов в ряду сегнетоэлектриков, которые, однако, имея сравнительно малое максвелловское время релаксации, таковыми, как правило, не являются. Но, как известно, любое правило сильно исключениями. Сравнительно недавно был получен полимерный материал поливинилидефторид (ПВДФ), который, с одной стороны, обладает сегнетоэлектрическими свойствами, а с другой – благодаря низкой собственной проводимости – хорошими электретными свойствами. В настоящее время электреты на основе ПВДФ нашли очень широкое применение на практике [3].

Что же на самом деле происходит в диэлектрике при его электретировании? Под действием электрического поля E_0 , как правило, при наличии способствующего фактора (нагрева до высокой температуры, освещения, воздействия радиации и т.д.) в диэлектрике происходят преимущественная ориентация полярных структурных элементов – диполей по полю (рис. 1, а) и, кроме того, пространственное разделение и последующий захват носителей зарядов обоих знаков на глубоких ловушках (рис. 1, б). Возможна ситуация, когда носители заряда привносятся в диэлектрик извне, например: при облучении электронным пучком (рис. 1, в), при помещении в область коронного разряда и т.д. В этом случае возможно нарушение электронейтральности диэлектрика, то есть он может не только поляризоваться, но и заряжаться. После снятия электрического поля и действия способствующих факторов поляризованный или/и заряженный таким образом диэлектрик оказывается в метастабильном состоянии. Для того чтобы перейти в равновесное состояние (неполяризованное, электронейтральное), носителям заряда – диполям в диэлектрике необходимо преодолеть некоторый потенциальный барьер, а значит, время релаксации поляризованного (заряженного) состоя-

ния может оказаться весьма длительным. На самом деле в электрете происходят два самосогласованных процесса: разориентация диполей (разрушение объемной поляризации) с характерным временем τ_d и нейтрализация внутреннего электрического поля за счет либо внутренней проводимости диэлектрика, либо электропроводности окружающей среды (последнее происходит, если электрет находится, например, во влажной атмосфере). Характерное время существования электрета τ определяется самым быстрым из названных процессов ($\tau \leq \tau_d, \tau_u$). Подбирая материал с малоподвижными (при комнатной температуре) диполями, глубокими ловушками для носителей заряда и малой собственной электропроводностью, можно получить на его основе электрет со временем существования поляризованного состояния в несколько лет [2].

ПОЧЕМУ СУЩЕСТВУЕТ ВНЕШНЕЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРЕТА?

Интерес к электретам продиктован теми уникальными возможностями, которые открывает применение электретов в технике. Поскольку электреты могут создавать постоянные, сравнительно высокие электрические поля без каких-либо дополнительных источников питания и высоковольтных преобразователей, то это открывает возможность создания на их основе весьма миниатюрных электроакустических преобразователей – электретных микрофонов, размеры которых измеряются миллиметрами [3]. В основе действия таких электроакустических преобразователей заложено наличие внешних электрических полей электретов. А между тем сам факт наличия и длительность (речь идет о годах) существования внешних электрических полей электретов совсем не очевидны.

В отличие от моноэлектрета, наличие внешнего электрического поля у которого не вызывает вопросов, электронейтральный электрет на первый взгляд вообще может не иметь внешних электрических полей. Действительно, если рассмотреть

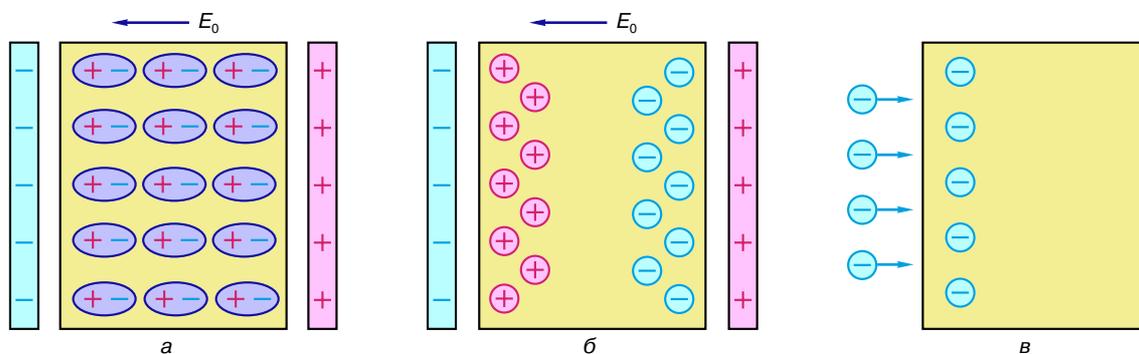


Рис. 1. Основные механизмы образования электретного состояния диэлектрика: а – дипольная поляризация; б – объемно-зарядовая поляризация; в – зарядение электронным лучом

плоскопараллельный электронейтральный электрет, планарные размеры которого намного превышают толщину (например, поляризованная полимерная пленка), и предположить, что связанные заряды на его поверхностях (обусловленные ориентационной или объемно-зарядовой поляризацией диэлектрика) распределены однородно, то мы неизбежно приходим к выводу, что электрическое поле за пределами электрета должно быть равно нулю (если, конечно, пренебречь краевыми эффектами) [2]. С позиции электростатики эта задача эквивалентна задаче расчета полей за пределами плоскопараллельного заряженного конденсатора. Однако экспериментальное исследование пленочных электронейтральных электретов показывает, что вблизи их поверхностей тем не менее имеются существенные электрические поля. Объяснение этого парадоксального явления кроется в том, что поверхностный связанный заряд у реальных электретов распределен неоднородно (рис. 2, а). Эта неоднородность обусловлена реальной макроскопической неоднородностью самого диэлектрика и фактической неоднородностью условий электретирования. Соответствующий расчет показывает, что толщина слоя вблизи поверхности электронейтрального электрета, в пределах которого электрическое поле существенно не равно нулю (рис. 2, б), соизмерима с характерным размером планарной неоднородности связанного заряда на поверхности электрета. Эксперименты по созданию искусственной планарной неоднородности поляризации диэлектрика подтвердили правильность указанных предположений и расчетов [4].

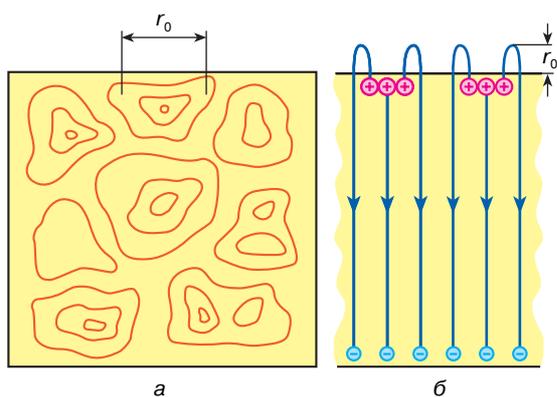


Рис. 2. а – планарное распределение поверхностного заряда электрета и б – вид силовых линий электрического поля у электретов с планарной неоднородностью заряда. Замкнутые линии соответствуют различным фиксированным значениям поверхностной плотности заряда (r_0 – характерный размер планарной неоднородности заряда и области существования внешнего электрического поля)

До сих пор, говоря о внешних полях электрета, мы учитывали экранирующее влияние свободных носителей заряда, которые могут находиться как внутри диэлектрика, так и в окружающей среде. Если время экранирования внутренней поляризации за счет проводимости диэлектрика или окружающей среды много больше характерного времени спада остаточной поляризации τ_d , $\tau_\mu \gg \tau_d$, то влиянием указанного экранирования можно действительно пренебречь (такая ситуация на практике реализуется для электретов на основе высокоомных диэлектриков при низкой влажности окружающей среды). В этом случае время жизни электрета полностью определяется параметрами диполей (ловушек для носителей заряда) в диэлектрике (то есть $\tau \approx \tau_d$) (рис. 3, а).

Если же диэлектрик характеризуется не очень высоким удельным сопротивлением или он помещен во влажную среду ($\tau_\mu < \tau_d$), то его внешнее электрическое поле должно постепенно экранироваться свободными носителями заряда. То же самое должно происходить и с внешним электрическим полем моноэлектрета (то есть униполярно заряженного диэлектрика). Казалось бы, что уж в этих случаях время жизни электрета должно быть равно максвелловскому времени τ_μ (то есть $\tau = \tau_\mu$). Однако на самом деле картина поведения внешнего поля электрета оказывается более сложной, чем это представляется на первый взгляд.

Во-первых, если решить уравнения, описывающие кинетику релаксации остаточной поляризации и свободного экранирующего заряда (эти процессы оказываются самосогласованными, то есть влияющими друг на друга), то оказывается, что после стадии быстрого спада внешнего поля электрета (этот спад действительно характеризуется временем τ_μ) происходит инверсия знака поля и появляется стадия медленного спада внешнего поля электрета с характерным временем τ_d (рис. 3, б) [5]. Можно

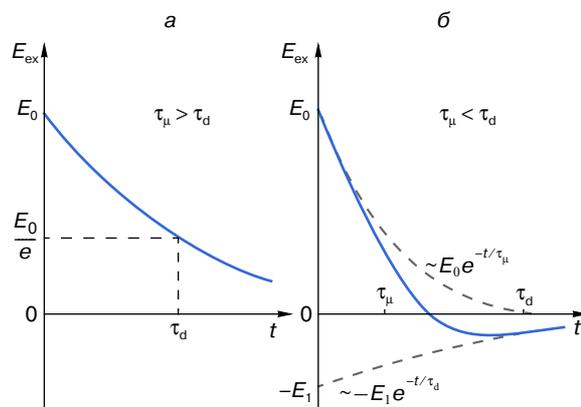


Рис. 3. Характер спада внешнего электрического поля у электретов с $\tau_\mu > \tau_d$ (а) и $\tau_\mu < \tau_d$ (б)

показать, что между амплитудами быстрой и медленной компоненты внешнего электрического поля электрета (обозначим их как E_0 и E_1 соответственно) имеет место простая связь:

$$E_1 \tau_d = E_0 \tau_\mu. \quad (1)$$

Таким образом, благодаря тому что остаточная поляризация электрета медленно изменяется со временем (а не остается постоянной, как в сегнетоэлектрике), внешнее электрическое поле электрета продолжает существовать в течение времени, значительно превышающего максвелловское время релаксации (речь, конечно, идет о ситуации, когда $\tau_\mu < \tau_d$).

Итак, электреты преподнесли нам еще один парадокс: длительное существование внешнего электрического поля электрета оказывается обусловлено не стабильностью, а именно нестабильностью электрета.

Во-вторых, имеются экспериментальные свидетельства того, что время жизни некоторых электретов оказывается существенно больше максвелловского времени релаксации в этих материалах ($\tau \gg \tau_\mu$), но при этом никакой инверсии знака внешнего электрического поля (знака зарядов на поверхностях электрета) не наблюдается [5]. Более того, в этих материалах были обнаружены релаксационные токи короткого замыкания и без предварительной поляризации (то есть без электретирования) образцов. Для того чтобы объяснить этот удивительный факт (диэлектрик ведет себя как электрическая батарейка), пришлось отказаться от традиционной (электростатической) модели электретного состояния. Как известно, в рамках электростатических представлений релаксация изначально приготовленной поляризации электрета сопровождается появлением как внутри диэлектрика, так и во внешней цепи (если ее замкнуть) релаксационного тока. В традиционной модели релаксационный ток отождествляется с временной производной от релаксационной поляризации ($j_r = dP/dt$). Легко убедиться, что для аномальных электретов (у которых $\tau \gg \tau_\mu$) такая интерпретация релаксационных токов непригодна. Действительно, при достаточно больших временах наблюдения, когда в диэлектрике устанавливается равновесие между встречными омическим (λE) и релаксационным (dP/dt) токами, внутри диэлектрика должно было бы возникнуть электрическое поле (E_{in}):

$$E_{in} = -\frac{1}{\lambda} \frac{dP}{dt} = \frac{1}{\epsilon \epsilon_0} \left(\frac{\tau_\mu}{\tau} \right) P(t), \quad (2)$$

где $\epsilon \epsilon_0$ — диэлектрическая проницаемость материала; τ — время жизни электрета ($P(t) = P_0 \exp(-t/\tau)$).

Поскольку у аномальных электретов $\tau \gg \tau_\mu$, то для объяснения экспериментально наблюдаемых значений внутренних электрических полей приходится допускать наличие в электрете поляризации, по величине превышающей всякие разумные значе-

ния (то есть D должно быть даже больше значений спонтанной поляризации пирозлектриков).

Для выхода из этого затруднительного положения была предложена модель аномального электретного эффекта, в основе которой лежит утверждение о возможной независимости релаксационного тока и релаксационной поляризации (то есть $j_r \neq dP/dt$). Допущение о независимости j_r и P автоматически устраняет трудности прежней теории применительно к аномальным электретам, поскольку абсурдные значения для P получались именно из предположения $j_r = dP/dt$. Какова возможная природа релаксационных токов, для которых $j_r \neq dP/dt$? В средах без центра симметрии стационарный или квазистационарный электрический ток может существовать и при отсутствии электрических полей или пространственной неоднородности [6]. Если среда (диэлектрик) обладает собственным полярным направлением, то для существования электрического тока достаточно ее неравновесности. Только в полном термодинамическом равновесии в соответствии со вторым началом термодинамики ток обращается в нуль. В реальном диэлектрике всегда происходят сложные релаксационные процессы, связанные с неравновесностью, возникающей в процессе изготовления образца, его отжига, легирования, механической обработки и т.д. Как правило, структурные перестройки, связанные с переходом в равновесное состояние, сопряжены с преодолением значительных потенциальных барьеров и поэтому могут происходить очень медленно. В течение всего этого времени релаксации неравновесная полярная среда ведет себя как генератор тока. Процесс релаксации приводит не к уничтожению имеющихся электрических зарядов, а к появлению и поддержанию такого разделения. На базе таких представлений о релаксационном токе можно легко объяснить электрическую релаксацию в диэлектриках, возникновение электрических токов (полей) без предварительной поляризации и после деполяризации изначально приготовленного электретного состояния. Таким образом, аномальный электрет черпает энергию на создание и поддержание внешнего электрического поля из внутренней неэлектростатической энергии, запасенной при изготовлении этого электрета.

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРЕТОВ

Электретное состояние может возникнуть в диэлектрике в результате действия на него электрического поля, освещения, нагрева, облучения, трения, механической деформации, лазерного луча и т.п., а также различных комбинаций этих факторов. Общим при этом является то, что диэлектрик в результате указанных воздействий поляризуется и/или заряжается. Возможных комбинаций воздействия, а следовательно, и методов получения электретного состояния достаточно много. Ограничимся кратким

описанием лишь тех методов получения электретов, которые нашли наибольшее применение.

Метод термоэлектретирования сводится к помещению диэлектрика в электрическое поле при некоторой повышенной температуре с последующим охлаждением в этом поле. Первоначально считалось, что полученный таким способом **термоэлектрет** имеет только дипольную (в крайнем случае объемно-зарядовую) остаточную поляризацию. Дальнейшие исследования показали, что при использовании сравнительно высоких поляризующих электрических полей возможны либо пробой воздушных зазоров между прижимными электродами и диэлектриком, либо инжекция носителей заряда из напыленных электродов в диэлектрик.

В основе **метода коронного разряда** лежит перенос заряда из области электрического разряда в воздушном (газовом) зазоре на поверхность диэлектрика. При этом ионы либо передают свой заряд диэлектрику и возвращаются обратно в воздух, либо проникают в приповерхностную область диэлектрика, где фиксируются ионными ловушками. Понятно, что при изготовлении короноэлектретов в принципе может нарушаться электронейтральность диэлектрика. Преимуществом коронного электретирования являются простота аппаратуры и высокая производительность (имеются установки непрерывного электретирования полимерной пленки, перематывающейся с одной катушки на другую). Метод коронного разряда на сегодняшний день является наиболее распространенным в производстве пленочных электретов [3].

Метод электретирования электронным пучком. Воздействие на диэлектрик электронного пучка приводит к инжекции электронов внутрь материала с образованием отрицательно заряженных слоев. Облучение электронным пучком фторсодержащих полимеров позволяет получать на их основе так называемые **радиоэлектреты** со временем жизни электретного состояния, достигающим при комнатной температуре десятков лет [3]. Радиоэлектреты, полученные описанным способом, как правило, являются моноэлектретами. Несомненным преимуществом метода является возможность создания необходимого поверхностного распределения заряда электрета путем сканирования электронного пучка. Специальный рисунок поверхностного распределения заряда электрета, во-первых, позволяет, как отмечалось ранее, регулировать толщину области внешних электрических полей электретов и, во-вторых, создавать нужную конфигурацию планарного распределения заряда в электроакустических преобразователях с заданной диаграммой направленности.

Для создания **фотоэлектретов** материалы, обычно фотопроводящие, покрывают с одной или обеих сторон прозрачными электродами (например, тонкие пленки золота или окиси олова) и облучают ультрафиолетовым (иногда видимым) светом в присут-

ствии электрического поля. После выключения света и снятия напряжения в диэлектрике обнаруживается сохраняющаяся со временем поляризация [2, 3]. Выделяют два основных механизма образования фотоэлектретного состояния. Первый — генерация носителей заряда светом за счет перехода электронов из одной разрешенной зоны в другую и их пространственное разделение по толщине диэлектрика под действием внешнего электрического поля. Второй механизм образования фотоэлектретного состояния обусловлен фотоинжекцией носителей заряда из электродов в диэлектрик и их последующий захват на глубокие ловушки.

В последние годы получил развитие новый метод создания фотоэлектретного состояния в диэлектрике путем воздействия лазерным лучом, причем при отсутствии внешнего электрического поля. Суть этого метода заключается в том, что в результате нелинейных эффектов (из-за большой интенсивности света в области действия лазерного луча) в диэлектрике наряду с основной гармоникой электромагнитных колебаний появляется постоянная составляющая электрического поля (так называемое оптическое детектирование). Таким образом, при помощи лазерного луча можно создавать электретное состояние в диэлектрике. Имеются сведения о том, что лазероэлектретное состояние по своей стабильности не уступает короноэлектретному состоянию.

Каковы основные области применения электретов?

Прежде всего необходимо упомянуть электроакустические преобразователи, то есть приборы, позволяющие звук преобразовывать в электрический сигнал и наоборот. К ним относятся электретные микрофоны, сурдотелефоны (головные телефоны для слабослышащих), гидрофоны и т.д. Кроме того, на основе электретов изготавливают электроакустические преобразователи (электретные звукосниматели, сенсорные переключатели, ударные датчики и т.д.), электретные воздушные фильтры (искробезопасные, что важно при их использовании, например, в шахтах или деревообрабатывающих цехах). Процессы создания или, наоборот, нейтрализации электретного состояния нашли использование в электрофотографии (например, в ксерографии), электростатической записи информации, электретной дозиметрии (о поглощенной дозе ионизирующего излучения судят по спаду поверхностного электрического заряда электрета). Неожиданное применение электретный эффект нашел в медицине. Оказалось, что искусственные сосуды, если их не обработать в электрическом поле, приводят к повышенной свертываемости крови. Если же внутреннюю поверхность искусственных сосудов зарядить отрицательно (то есть электретировать сосуды), то вероятность тромбоза крови уменьшается. Более того, оказалось, что многие ткани живого

организма находятся в электретном состоянии, то есть являются **биоэлектретами**.

Как мы видели, электреты могут применяться в самых различных областях науки и техники. Трудно назвать такую область техники, где бы электреты не могли найти применения. Везде, где требуется наличие электрических полей, небольшой вес и размеры приборов и устройств, надежность и простота конструкции, можно успешно использовать электреты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мяздриков О.А., Манойлов В.Е. Электреты. М.; Л.: Госкомэнергоиздат, 1962. 99 с.
2. Губкин А.Н. Электреты. М.: Наука, 1978. 192 с.
3. Электреты / Пер. с англ. под ред. Г. Сесслера. М.: Мир, 1983. 487 с.
4. Ерашкин Г.В. Модель электрета с дискретным поверхностным зарядом // Электротехника. 1985. № 7. С. 52–54.

5. Гороховатский Ю.А., Бордовский Г.А. Термоактивная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. М.: Наука, 1991. 248 с.

6. Стурман Б.И., Фридкин В.М. Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии и родственные явления. М.: Наука, 1992. 208 с.

* * *

Юрий Андреевич Гороховатский, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой общей и экспериментальной физики РГПУ им. А.И. Герцена и руководитель научной лаборатории электрофизики в том же университете. Один из организаторов международных конференций по электрической релаксации в высокоомных материалах и по физике в системе современного образования. Автор и соавтор более 140 научных публикаций, в том числе двух монографий.