

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ЛЕКЦИОННЫЕ ДЕМОНСТРАЦИИ ПО СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСТВУ
В КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ****К. Н. Кармен**

Возрастающий интерес к сегнетоэлектрикам еще далеко не нашел должного отражения в вузовских курсах общей физики^{1,2}. Существующие монографии и большое число статей по этому вопросу мало доступны широкому кругу студентов младших курсов, которым читается общая физика. Предлагаемые демонстрации должны способствовать более глубокому пониманию сегнетоэлектрических явлений.

Среди известных в настоящее время сегнетоэлектриков наиболее пригодным для лекционных демонстраций является сегнетовая соль. Резко выраженная нелинейность зависимости поляризации от электрического или механического напряжения в сегнетоэлектрической области, легко достижимый в смысле продолжительности нагревания переход в несегнетоэлектрическое состояние, высокое значение диэлектрической проницаемости ϵ_x и пьезоэлектрического модуля d_{14} делают этот сегнетоэлектрик незаменимым для указанных целей.

В связи с тем, что для понимания обсуждаемых демонстраций требуется знание законов переменного тока, желательно детальное изучение сегнетоэлектриков проводить в конце раздела «Электричество» после предварительного беглого рассмотрения этого вопроса в электростатике.

Образцы, используемые при проведении демонстраций, имеют форму прямоугольных параллелепипедов, боковая поверхность, нормальная к кристаллографической оси x , должна иметь размеры 2×2 см и толщину 3–5 мм. Пластина вырезывается из монокристалла так, что ее меньшие грани перпендикулярны биссектрисе угла между осями y и z . В качестве электродов на большие грани наносятся мягким карандашом слой графита. Неплохие результаты получаются также и с электродами из сусального золота³. Хранение изготовленных образцов можно проводить без особых предосторожностей, пока относительная влажность не превышает 60–70%. Наиболее благоприятная влажность для проведения демонстраций 40–50%. Просушивание образцов в замкнутых сосудах, содержащих осушитель, не должно быть продолжительным, так как вызванная чрезмерной просушкой потери кристаллизационной воды влечет за собой значительное снижение сегнетоэлектрических эффектов.

В качестве универсального держателя предлагается использовать прибор, изображенный на рис. 1а. Как видно из рисунка, демонстрируемый образец помещается на нижнюю площадку, жестко связанную с верхней. Хорошо притертые края последней обеспечивают поддержание желаемой влажности внутри стакана. С этой целью после соприкосновения образца с влажным воздухом в стакан на нижнюю площадку вблизи образца помещается небольшой стеклянный сосуд, содержащий измельченный хлористый кальций. Через некоторое время, которое нетрудно установить по изменению поверхностной проводимости образца, сосуд с хлористым кальцием быстро удаляется из стакана. Для наблюдения за изменением поверхностной проводимости образец, помещенный в держатель с осушителем, присоединяется через зеркальный гальванометр чувствительностью около 10^{-9} а/мм к батарее элементов, ЭДС которой порядка 200–300 в. Гальванометр предварительно необходимо зашунтировать, так как у «отсыревшего» образца эффективная проводимость может оказаться значительной. Просушку следует считать оконченной после того, как ток уменьшится до 10^{-2} – 10^{-3} микроампера. Необходимое для этой цели количество хлористого кальция составляет несколько десятых долей грамма. Просушка в этих условиях занимает 10–15 мин.

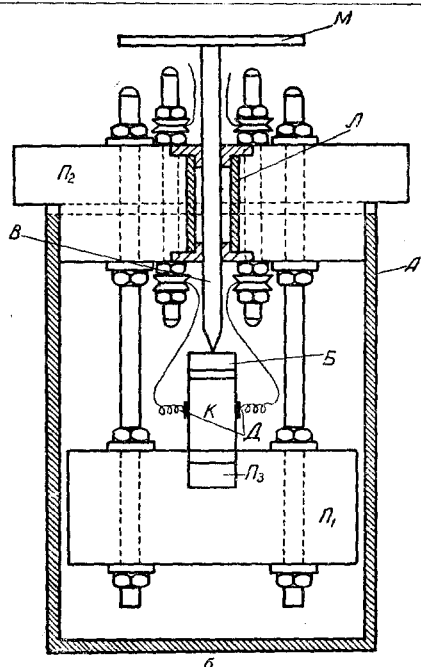
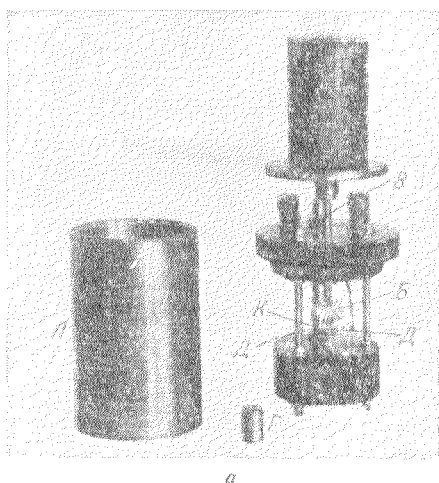


Рис. 1а. Универсальный держатель с прессом. А — латунный стакан, в который помещается держатель. При демонстрациях, не требующих постоянного механического напряжения, стальной пресс В удаляется, на стержень В, изготовленный из высококачественной стали, надевается муфта Г, препятствующая соприкосновению стержня с кристаллом. В последнем случае образец, слегка зажатый между пружинами Д, практически не подвергается внешним механическим напряжениям.

Рис. 1б. Разрез универсального держателя со стаканом в $1/2$ натуральной величины. П₁ и П₂ — эбонитовые площадки, жестко связанные между собой. Площадка П₂ в своей верхней части хорошо притерта к стакану А. В середине нижней площадки П₁ «утоплен в эбоните» стальной подкладкой П₃, над которым устанавливается образец. Для избежания закорачивания пресс со стороны, обращенной к кристаллу, скрепляется с тонкой эбонитовой пластинкой. Для более надежного контакта между Д и электродами образца имеются свинцовые пластинки размером $4 \times 4 \times 1$ мм, скрепленные с пружинами Д. Стержень В пропущен через втулку К, вделанную в эбонитовую площадку П₂. Для получения желаемых механических напряжений на М накладываются железные цилиндры различной массы. Один из таких цилиндров изображен на рис. 1а.

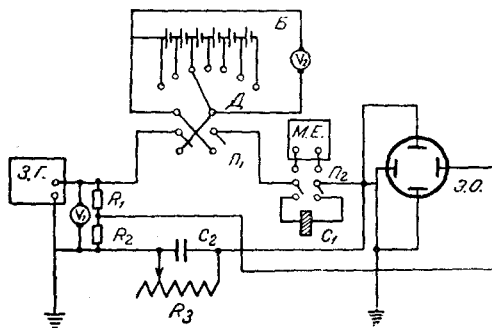


Рис. 2. Схема установки для демонстрации сегнетоэлектрических явлений. Б — батарея, V₁ и V₂ — вольтметры. М. Е. — магазин емкостей, З. Г. — звуковой генератор, Э. О. — электронный осциллограф, П₁ и П₂ — переключатели, С₁ — сегнетоэлектрический конденсатор, С₂ — конденсатор емкостью $5 \mu\text{F}$, R₁, R₂, R₃ — сопротивления.

Демонстрация гистерезиса осуществляется по схеме, изображенной на рис. 2. Векторная диаграмма этой схемы показана на рис. 3. Как видно из диаграммы, искажение петли гистерезиса, вызванное сдвигом фаз напряжений, поданных на входы осциллографа, может быть сведено до минимума при соблюдении равенства:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{R_2}{R_1}, \quad (4)$$

где C_1 — емкость сегнетоэлектрического конденсатора, R_1 — его активное сопротивление, C_2 — емкость второго конденсатора, включенного последовательно сегнетоэлектрическому, и R_2 — переменное шунтирующее сопротивление. Минимальный сдвиг фаз легче всего достигнуть увеличением C_2 , насколько это позволяет коэффи-

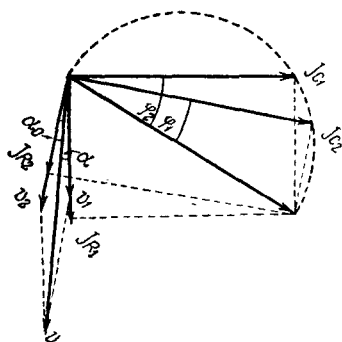


Рис. 3. Векторная диаграмма. J_{c1} — реактивный ток через сегнетоэлектрический конденсатор, J_{c2} — реактивный ток через линейный конденсатор, J_{R1} — активный ток сегнетоэлектрического конденсатора, J_{R2} — ток в шунтирующем сопротивлении, v_1 и v_2 — напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 , v — напряжение на клеммах генератора, α_0 — сдвиг фаз между напряжениями, поданными на входы осциллографа.

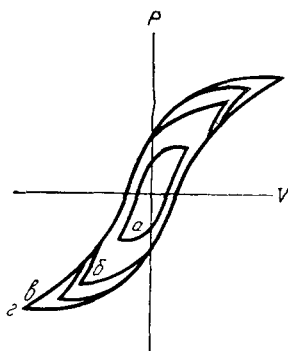


Рис. 4. Кривые гистерезиса при различных напряжениях: a — 50, $б$ — 100, $в$ — 150 и $г$ — 185 в, $\nu = 50$ гц, $t = 18^\circ \text{C}$.

циент усиления осциллографического усилителя. Так как активное сопротивление R_1 практически обусловлено поверхностной проводимостью и гистерезисными потерями, то изменение напряжения, частоты и влажности может вызвать искажение, которое первоначально в других условиях не имело места. Наличие переменного шунтирующего сопротивления R_2 дает возможность легко устранить эти искажения.

Серия кривых на рис. 4, помимо самого гистерезиса, иллюстрирует основные диэлектрические свойства сегнетоэлектриков, в частности нелинейность. Для оценки емкости сегнетоэлектрического конденсатора и сопоставления на место первого конденсатора включается слюдяной магазин емкостей.

Существование верхней точки Кюри легко показать, вынув держатель из стакана и установив его так, чтобы середина меньшей грани была параллельна спирали 75 вт лампы, укрепленной на штативе в 5—8 см от образца. (В этом случае благодаря нагреванию влажность не имеет существенного значения.) Нагревание этим способом обеспечивает за несколько минут полный переход в несегнетоэлектрическое состояние, знаменуемое появлением на экране осциллографа прямой линии. После выключения лампочки приблизительно на тот же промежуток времени гистерезисная кривая постепенно восстанавливается.

Для демонстрации влияния постоянного смещающего поля на процесс поляризации используется та же схема; переключатель Π_1 и движок D (рис. 2) дают возможность менять знак и величину постоянного напряжения, приложенного к сегнетоэлектрическому конденсатору. Получаемые характерные кривые показаны на рис. 5. Замещение сегнетоэлектрического конденсатора магазином емкостей, в отношении которого любое значение смещающего поля не вызывает каких-либо изменений прямой на экране осциллографа, убедительно оттеняет глубокое различие между диэлектриком и сегнетоэлектриком.

Все описанные опыты проводятся при обычной для исследования сегнетоэлектриков частоте 50 гц. Увеличение частоты до 10^4 гц при эффективном напряжении 130—150 в вызывает следующее: 1) вначале петля, одновременно укорачиваясь и расширяясь, принимает вид, показанный на рис. 6, 2) через некоторое время

начинается сужение, завершающееся вырождением петли в прямую, 3) переход к частоте 50 гц вначале не вызывает изменения прямой на экране осциллографа, но с течением времени вновь появляется петля, постепенно принимающая свою первоначальную форму. Описываемые явления, вызванные нагреванием образца за счет потерь, могут быть без особых затруднений разъяснены с помощью ранее описанной векторной диаграммы.

Наличие прямого пьезоэффекта в статическом режиме можно продемонстрировать при помощи схемы, состоящей из образца с держателем, клеммы которого непосредственно приключены к баллистическому гальванометру, замкнутому на критическое сопротивление. При наложении груза на площадку M наблюдают отброс в одну сторону, при ее удалении возникает отброс в противоположную. Из-за гистерезиса эти отбросы, вообще говоря, не равны между собой. Последовательное наложение нагрузок от 0,5 до 5,0 кг позволяет наблюдать насыщение пьезоэлектрической поляризации. Сопоставление отбросов при наложении одной и той же нагрузки на образец до и после поворота на 90° вокруг оси x дает наглядное представление об униполярности образца. Следует отметить, что при указанных размерах большинство образцов униполярны, тем не менее в тех случаях, когда хотят продемонстрировать значительную униполярность, образец предварительно необходимо поляризовать полем напряженностью 200—300 в/см на протяжении целой недели. У таких предварительно заполяризованных образцов униполярность проявляется очень резко. Необходимо отметить, что для большинства описанных демонстраций следует пользоваться образцом с минимальной униполярностью. Если случайно такого образца не окажется, то всегда за несколько суток электрическим

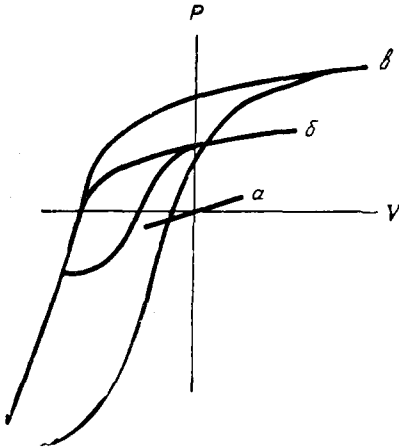


Рис. 5. Кривые гистерезиса, искаженные постоянным смещающим полем $V = 80$ в, при различных значениях переменного напряжения: $a - 50$, $b - 100$, $c - 185$ в, $\nu = 50$ гц, $t = 18^\circ \text{C}$.

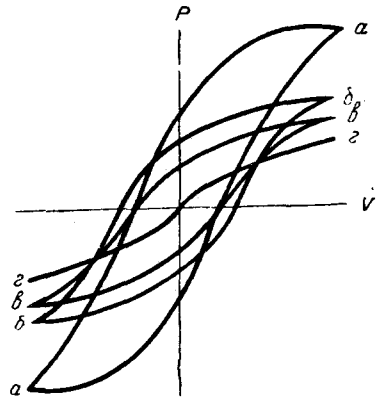


Рис. 6. Увеличение гистерезисных потерь при изменении частоты от 50 до 10^4 гц: a — начальное состояние, $\nu = 50$ гц; b — гистерезисная петля через 30 сек. после перехода к частоте 10^4 гц; c и d — то же соответственно через 2 и 5 минут с момента переключения на частоту 10^4 гц.

полем той же напряженности, но обратного знака (по отношению к знаку поля, которое вызывает усиления униполярности) можно достигнуть практически ее полного исчезновения. Наличие прямого пьезоэффекта можно продемонстрировать, также не прибегая к гальванометру. Для этого пользуются схемой, изображенной на рис. 2; при постоянном поле $E = 0$ подбирают такое значение переменного поля, чтобы величина амплитуды E_0 достигала значения, необходимого для насыщения. Затем последовательно накладываются и удаляются с площадки M грузы от 0,5 до 5 кг. Идентичность осциллограмм, наблюдаемых при наложении постоянных электрических и механических напряжений, убеждает в наличии самого эффекта и позволяет установить соотношение между электрическим и механическим напряжением, вызывающим одну и ту же поляризацию. С этой целью после наложения постоянного поля образец деформируется нагрузкой, величина которой подбирается так, чтобы характерная асимметричная кривая приняла свою обычную форму гистерезисной петли.

Пьезоэффект в динамическом режиме удобно показать, непосредственно приключая клеммы держателя к осциллографу. Подбирая постоянную нагрузку (около

1,5—2 кг), можно достигнуть области наиболее крутого роста пьезоэлектрической поляризации. Удары деревянного молоточка по площадке, на которой располагается нагрузка, вызывают вибрации, обуславливающие периодические изменения пьезоэлектрической поляризации. При некотором навыке на экране осциллографа можно получить синусоиду с медленно убывающей вследствие затухания амплитудой. Эта схема при дополнительной экранировке держателя (что дает возможность использовать значительное усиление осциллографического усилителя) весьма чувствительна и позволяет на экране осциллографа фиксировать вибрации, вызванные легкими ударами по экспериментальному столу, шагами проходящего вблизи человека и т. д.

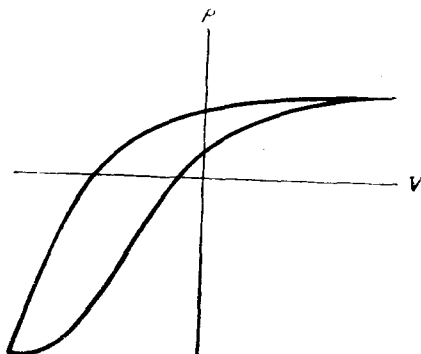


Рис. 7. Кривая гистерезиса при одностороннем сжатии, позволяющая по аналогии с кривой ϵ на рис. 5 демонстрировать наличие пьезоэлектрической поляризации — прямой пьезоэффект.

Обратный эффект демонстрируется переключением образца с той же постоянной нагрузкой к входу звукового генератора. Отчетливое звучание имеет место уже при частоте 200—400 гц. Это звучание особенно резко усиливается при резонансе. Плавное изменение частоты на всем диапазоне звукового генератора позволяет вы-



Рис. 8. Зависимость напряжения от времени на обкладках вибрирующей сегнетоэлектрической пластинки.

делить значения некоторых гармоник образца. Сместив образец несколько в сторону от центра нижней площадки, можно добиться заметного его перемещения, обусловленного обратным пьезоэффектом.

Число возможных демонстраций при желании может быть значительно увеличено. Однако даже описанные демонстрации дают возможность раскрыть основные направления разнообразных применений сегнетоэлектриков: малогабаритные конденсаторы, преобразователи, датчики и т. д.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. К. А. Путилов, Курс физики, т. II, Гостехиздат, М., 1954 г.
2. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева, Курс общей физики, т. II, Гостехиздат, М.—Л., 1956 г.
3. У. Кэди, Пьезоэлектричество, ИЛ, М., 1949 г.