

Лабораторная работа 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Цели работы: исследование поляризации диэлектрика под действием механических напряжений (прямой пьезоэффект) и определение пьезомодуля продольных колебаний в пьезокерамике.

Приборы и принадлежности: установка для исследования пьезоэлектрического эффекта. Данная установка (рис. 6.1), состоит из операционного усилителя ОУ, включенного по схеме интегратора, измерительных электродов Э₁ и Э₂, подключенных к входу операционного усилителя, вольтметра *V*, измеряющего напряжение на выходе операционного усилителя и рычажного устройства РУ, позволяющего регулировать силу нагрузки *F* на исследуемый пьезоэлектрик ПЭ, который помещается между измерительными электродами.

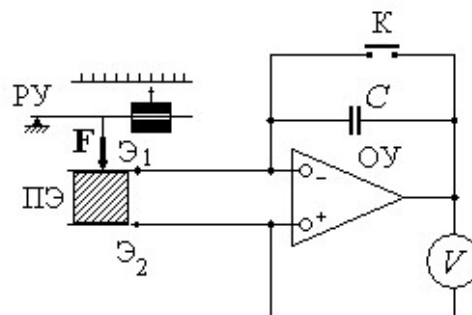


Рис. 6.1

Пьезоэлектрик цилиндрической формы нагружается силой *F*, которая меняется за счет перемещения груза вдоль рычага. Отсчет силы производится по шкале. Силу *F* можно сделать равной нулю, слегка приподнимая вверх рычаг с грузом.

Поскольку потенциалы электродов Э₁ и Э₂ равны (см. описание операционного усилителя), то обусловленный действием силы *F*, связанный заряд на поверхности ПЭ равен индуцированному на электродах Э₁ и Э₂ заряду. Если силу сделать равной нулю, то заряды, индуцированные на электродах, нейтрализуются. Измерение протекшего при нейтрализации заряда *Q* осуществляется операционным усилителем ОУ с конденсатором *C* в цепи обратной связи. При снятии нагрузки *F* весь заряд *Q* перейдет на конденсатор *C* и напряжение *U* на конденсаторе (т. е. на выходе ОУ)

$$U = \frac{Q}{C} = \sigma \frac{S}{C}, \quad (6.1)$$

где σ – поверхностная плотность связанных (поляризационных) зарядов; *S* – площадь торцевой поверхности ПЭ.

Задание по подготовке к работе

1. Изучить описание работы и ответить на контрольные вопросы.
2. Подготовить отчет по лабораторной работе с титульным листом, краткое описание исследуемых закономерностей, задачи эксперимента, описание (схема или эскиз) лабораторной установки и методики проведения эксперимента, а так же протокол наблюдений с соответствующими таблицами.

Исследуемые закономерности

Пьезоэлектрический эффект. В некоторых кристаллах поляризация возникает не только под действием внешнего электрического поля, но и при механической деформации. Это явление, названное пьезоэлектрическим эффектом, было открыто в 1880 г. Пьером и Жаком Кюри. Пьезоэлектрическими свойствами могут обладать только ионные кристаллы. Если кристаллические решетки положительных и отрицательных ионов, из которых построены такие кристаллы, под действием внешних сил деформируются по-разному, то в противоположных местах на поверхности кристалла выступают электрические заряды разных знаков. Это и есть прямой пьезоэлектрический эффект.

Пьезоэлектриками являются природные или выращенные искусственно монокристаллы – кварц, сегнетова соль и т. п., а также поликристаллические твердые растворы, подвергнутые предварительной поляризации в электрическом поле, – так называемые пьезокерамики.

Чтобы обнаружить, использовать или измерить пьезоэлектрические заряды, на определенные грани пьезоэлектрика накладывают электроды. При деформации на разомкнутых электродах появляется разность потенциалов. Если электроды замкнуты, на них образуются индуцированные заряды, равные по значению и противоположные по знаку поляризационным зарядам. Если деформацию убрать, то пьезоэлектрические заряды исчезнут, а между электродами пройдет суммарный заряд, который можно измерить. Этот заряд равен пьезоэлектрическому заряду.

Количественной характеристикой пьезоэффекта служит совокупность модулей, т. е. коэффициентов пропорциональности в соотношениях между механическими и электрическими величинами. Например, поляризация P , возникающая в пьезоэлектрике под действием однородного механического напряжения T , выражается соотношением

$$P = dT, \quad (6.2)$$

где d – один из пьезомодулей.

Для продольных колебаний в пьезокерамике значение коэффициента d порядка 10^{-10} Кл/Н. Учитывая, что модуль поляризации P равен поверхностной плотности поляризационных зарядов σ , получим, что при механическом напряжении на пьезоэлектрике в 1 Н/м^2 на его поверхности образуется заряд с плотностью $\sigma = 10^{-10} \text{ Кл/м}^2$.

Поскольку $P = \sigma$ и $T = F/S$, получаем

$$Q = UC = \sigma S = dTS = dF,$$

т. е. выражение, аналогичное формуле (6.2), а именно:

$$Q = dF. \quad (6.3)$$

Прямой пьезоэффект используется в устройствах для восприятия акустических сигналов и преобразования их в электрические с целью измерения, передачи, воспроизведения, записи или анализа.

Указания по проведению наблюдений

1. Включить измерительную установку.
2. Перемещением груза установить по шкале значения силы F_i , начав с наименьшего. Записать установленные значения в протокол наблюдений.
3. Нажатием кнопки К разрядить конденсатор C .
4. Снять нагрузку с ПЭ, для чего поднять вверх рычаг с грузом и записать максимальное значение изменения выходного напряжения U_i .
5. Наблюдения по пп. 2–4 выполнить для разных значений F_i (не менее 10 значений, более или менее равномерно распределенных по шкале).

Задание по обработке результатов

1. Рассчитать значения связанных поляризационных зарядов на исследуемом образце, воспользовавшись измеренными значениями U_i . Емкость конденсатора C указана на панели установки.
2. Определить значение пьезомодуля d из наклона прямых, которые могут быть построены по выражениям (6.2) или (6.3). Обработка экспериментальных результатов, соответствующих линейным зависимостям, обычно проводится по методу наименьших квадратов. В данном случае

обработка результатов сводится к поиску параметров прямой вида $y = kx + b$, для которой значение k находится из условия минимума суммы квадратов отклонений экспериментальных значений от проводимой прямой, а b является смещением прямой, обусловленным предварительной поляризацией диэлектрика. Для этого минимизируется соотношение вида

$$\sum_i (y_i - kx_i - b)^2, \quad (6.4)$$

из которого прямым дифференцированием по k и b находится условие искомого минимума суммы квадратов отклонений.

В работе рекомендуется построить график зависимости связанных поляризационных зарядов от приложенной силы, проведя через полученные экспериментальные значения прямую $Q = dF + Q_0$, угловым коэффициент которой и будет искомым значением пьезомодуля. Среднее значение пьезомодуля может быть найдено согласно методу наименьших квадратов как:

$$\bar{d} = \frac{\sum (F_i - \bar{F})(Q_i - \bar{Q})}{\sum (F_i - \bar{F})^2},$$

где $\bar{F} = \frac{1}{N} \sum_i F_i$, $\bar{Q} = \frac{1}{N} \sum_i Q_i$.

Величина $\bar{Q}_0 = \bar{Q} - \bar{d}\bar{F}$ представляет собой остаточный заряд на поверхности пьезоэлектрика после снятия механического напряжения, связанный с предварительной поляризацией диэлектрика.

Полная погрешность определения пьезомодуля $\overline{\Delta d}$ совпадает с его случайной погрешностью Δd и оценивается из выражения

$$\overline{\Delta d} = \Delta d = \frac{t_{P, N-1}}{\sqrt{N-2}} \sqrt{\frac{\sum_i (Q_i - \bar{Q})^2}{\sum_i (F_i - \bar{F})^2} - \bar{d}^2},$$

где N – число наблюдений; $t_{P, N-1}$ – коэффициент Стьюдента, выбранный по таблице для $N - 1$ измерения.

Контрольные вопросы

1. Что такое прямой пьезоэлектрический эффект?
2. Начертите зависимость возникающего на поверхностях

пьезоэлектрика заряда Q от нагрузки F .

3. Покажите на изображенной зависимости значение пьезомодуля d .

4. Докажите, что индуцированный на электродах \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 заряд равен связанному заряду на поверхностях пьезоэлектрика.

5. Как изменится выходное напряжение U , если емкость конденсатора C увеличить в 2 раза? Почему?

6. В чем состоит сущность метода наименьших квадратов? Получите из выражения (6.4) формулу для вычисления углового коэффициента k .

ПРОТОКОЛ НАБЛЮДЕНИЙ
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ЭФФЕКТА

« ____ » _____ 20__ г.

Выполнил: студент группы _____
(Фамилия И.О.) (Подпись)

Проверил: преподаватель _____
(Фамилия И.О.) (Подпись)

Измерение связанных поляризационных зарядов

Измеряемая величина	Номер наблюдения									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_i , мВ										
F_i , Н										
Q_i , нКл										
Результаты вычислений										
$Q_i F_i$, нКл.Н										
$(F_i)^2$, Н ²										
$(Q_i)^2$, нКл ²										
$\Sigma Q_i F_i =$										$d =$
$\Sigma (F_i)^2 =$										$\Delta d =$
$\Sigma (Q_i)^2 =$										

Емкость конденсатора

$C =$