

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПЬЕЗОМОДУЛЯ ПВДФ ПЛЕНОК МЕТОДОМ «ТРАНСФОРМАТОРА»

Э. Р. Исхакова, Д. П. Еманов, К. М. Моисеев, А. С. Осипков

АННОТАЦИЯ

Измерение пьезокоэффициентов является одним из основных этапов в исследовании свойств пьезоэлектрических материалов, к которым относятся пленки на основе поливинилиденфторида (ПВДФ). В работе рассмотрен метод «трансформатора», описаны измерительный стенд и методика измерения пьезокоэффициентов d_{31} и d_{32} , реализованные в лаборатории «Технологии полимерных сегнетоэлектриков» МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приведены и проанализированы данные, полученные в ходе измерений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ПВДФ, ИЗМЕРЕНИЕ ПЬЕЗОМОДУЛЯ, СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ, ПРЯМОЙ ПЬЕЗОЭФФЕКТ, ОБРАТНЫЙ ПЬЕЗОЭФФЕКТ

MEASUREMENT OF PVDF FILM PIEZOMODULE BY TRANSFORMER METHOD

E. R. Iskhakova, D. P. Emanov, K. M. Moiseev, A. S. Osipkov

ABSTRACT

The measurement of piezoelectric coefficients is one of the main stages in the study of the properties of piezoelectric materials, which include films based on polyvinylidene fluoride (PVDF). The article considers the «transformer» method, describes a measuring stand and the method for measuring piezoelectric coefficients d_{31} and d_{32} implemented in the laboratory of Polymer Ferroelectric Technology at Bauman Moscow State Technical University. The construction of stand for measuring piezo coefficients d_{31} and d_{32} of PVDF films is presented. The data obtained during the measurements are presented and analyzed.

KEYWORDS

PVDF, PIEZOELECTRIC COEFFICIENT MEASUREMENT, FERROELECTRICS, DIRECT PIEZOELECTRIC EFFECT, INVERSE PIEZOELECTRIC EFFECT

ВВЕДЕНИЕ

Пьезоэлектрический коэффициент – один из наиболее важных параметров, описывающих свойства сегнетоэлектрических материалов. Он характеризует механическую деформацию, возникающую под действием внешнего электрического поля. Все известные методы измерения пьезомодулей предполагают его косвенное измерение, кроме того, не существует универсального алгоритма действий. Поэтому описание методики для точного определения пьезокоэффициентов является актуальной задачей.

Метод «трансформатора» относится к динамическим методам измерения и позволяет с высокой точностью определить пьезомодуль ПВДФ пленки [1]. Его важным

преимуществом является простота реализации: он не требует сложного оборудования и может быть реализован в лабораторных условиях.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Метод «трансформатора» позволяет определять пьезокоэффициенты d_{31} и d_{32} . Он, как и все динамические методы, связан с возбуждением в образце упругих колебаний и распространением в нем акустических волн [2].

Образец для измерений должен иметь форму прямоугольной пластины. Для измерения d_{31} длинная сторона образца направлена вдоль оси ориентации, для измерения пьезомодуля d_{32} – перпендикулярно оси ориентации (рис. 1) [3].

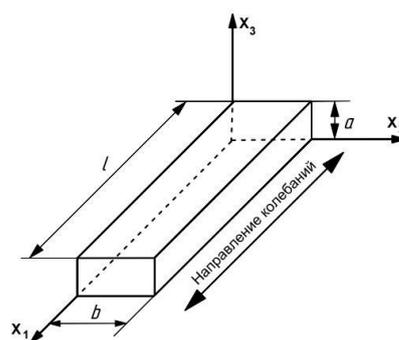


Рис. 1. Ориентация размеров образца

Предварительно необходимо поляризовать пленку и нанести на нее электроды. На одной стороне электрод занимает всю площадь пластины, на другой стороне образца он разделен на две части: электрод возбуждения и приемный электрод. Существует два варианта реализации: электроды занимают 50% и 15% всей площади или электроды имеют одинаковую площадь, расстояние между ними варьируется. Второй вариант является более оптимальным, так как в расчетах используется длина электрода, которая не может существенно изменяться в рамках одного измерения. Схема его реализации представлена на рис. 2.

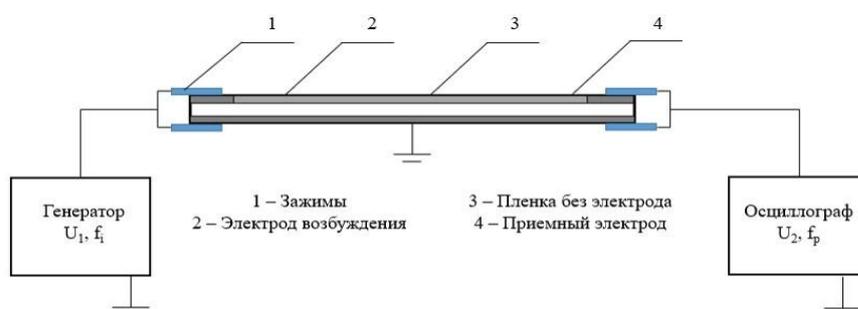


Рис. 2. Схема измерения пьезокоэффициентов d_{31} и d_{32} методом «трансформатора»

При подаче электрического напряжения U_1 с генератора сигналов на электрод возбуждения в образце возникают продольные колебания по длине, возникновение которых обусловлено обратным пьезоэлектрическим эффектом. На приемном электроде

вследствие прямого пьезоэлектрического эффекта возникает напряжение U_2 той же частоты [4].

Электрическое напряжение на генераторе изменяется в пределах от 1 до 10 В. Частота изменяется в пределах от 100 Гц до 100 кГц.

При поддержании постоянного значения U_1 и изменения частоты генератора в пределах заданного диапазона на резонансной частоте колебаний образца наблюдается максимум напряжения U_2 . Сигнал с приемного электрода передается на осциллограф в виде синусоиды, где значение U_2 фиксируется по амплитуде.

Затем на частоте $f < f_p$, где $f = 0,1 \dots 0,35 f_p$, фиксируются значения U_1 и U_2 . Полученные значения выходного напряжения и значения резонансных частот используются для дальнейших расчетов. Также, для обработки результатов необходимо знать емкость образца. Она определяется с помощью LCR-метра в области низких частот, обычно на 1 кГц [5].

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проводятся на предварительно поляризованных пленках Poly-K (США) толщиной 50 мкм и размерами 40x10 мм с нанесенными медными электродами. Заявленные производителем характеристики пленки: значение d_{31} от 25 до 32 пКл/Н, данные о d_{32} не указаны в паспорте и доступных источниках информации, поэтому его измерение необходимо для получения актуальных значений. Расстояние между электродами варьируется с шагом 4 мм в диапазоне от 2 до 16 мм.

Экспериментальный стенд, на котором измеряются образцы, представлен на рис. 3.



Рис. 3. Экспериментальный стенд

В стенде используются осциллограф UNI-T UPO1102CS (производитель Uni Trend Group (UNI-T), КНР), генератор сигналов UTG9322 (производитель Uni Trend Group (UNI-T), Китай). Для обеспечения ровной и плоской поверхности образец с двух сторон закрепляется на оснастке с помощью зажимов, расстояние между которыми можно регулировать в зависимости от длины образца.

Проведено несколько измерений при частотах от 100 Гц до 100 кГц, напряжение, подаваемое на образец, изменяется от 1 В до 10 В с шагом 2,5 В. Фиксация значений выходного напряжения в диапазоне частот от 100 до 1000 Гц происходит с шагом 100 Гц, в

диапазоне от 1 до 50 кГц – с шагом 1 кГц, в диапазоне от 50 до 100 кГц – с шагом 5 кГц. Вид сигнала представлен на рис. 4.

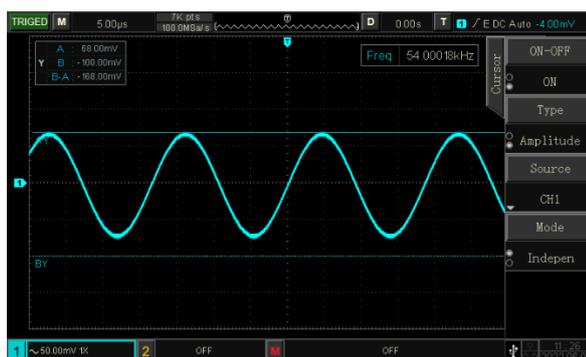


Рис. 4. Вид сигнала

Перед расчетом пьезокоэффициентов определяется относительная диэлектрическая проницаемость материала:

$$\varepsilon_{33} = \frac{C_{эл} \cdot t}{\varepsilon_0 \cdot S} \quad (1)$$

где: t – толщина образца, м;
 S – площадь электродов, м²;
 ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);
 $C_{эл}$ – емкость образца.

В нашем случае $\varepsilon_{33} = 12,85$, что незначительно отличается от паспортных значений, в которых диэлектрическая проницаемость материала $\varepsilon_{33} = 13,5$.

Далее определяется скорость упругих волн, возникающих вдоль оси ориентации материала:

$$V_i = 2lf_p \quad (2)$$

где: l – длина образца между зажимами креплений, м;
 f_p – резонансная частота, Гц.

По найденной величине скорости волн вычисляется модуль упругости:

$$c_i = \rho V_i^2 \quad (3)$$

где: ρ – плотность материала, кг/м³.

Значение коэффициента электромеханической связи k_{31} определяется по отношению напряжений:

$$k_{3i} = \left(\frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{1}{a} \right)^{1/2} \quad (4)$$

где: a – длина электрода возбуждения, м.

Пьезомодуль определяется по формуле (5):

$$d_{3i} = k_{3i} \left(\frac{\varepsilon_{33} \cdot \varepsilon_0}{c} \right)^{1/2}, \frac{\text{пКл}}{\text{Н}}. \quad (5)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

По полученным данным построены графики зависимости выходного напряжения от частоты, установленной на генераторе, для каждого входного напряжения. На рис. 5 приведен его вид при измерении d_{31} , на рис. 6 – при измерении d_{32} , так как общая картина резонансных пиков совпадает для образцов при измерении одного пьезомодуля при разных режимах.

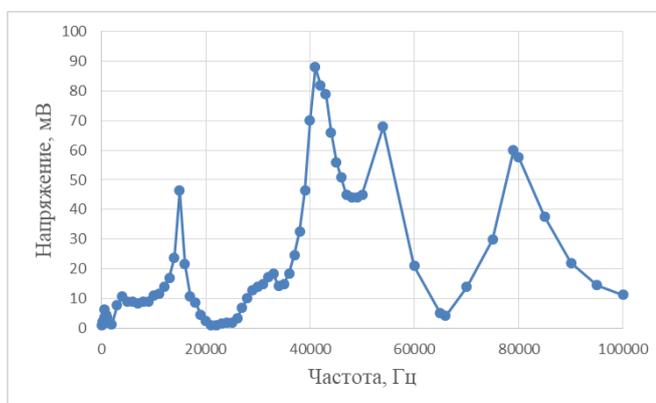


Рис. 5. График зависимости выходного напряжения от частоты при расстоянии между электродами 12 мм, $U_1=5$ В для d_{31}

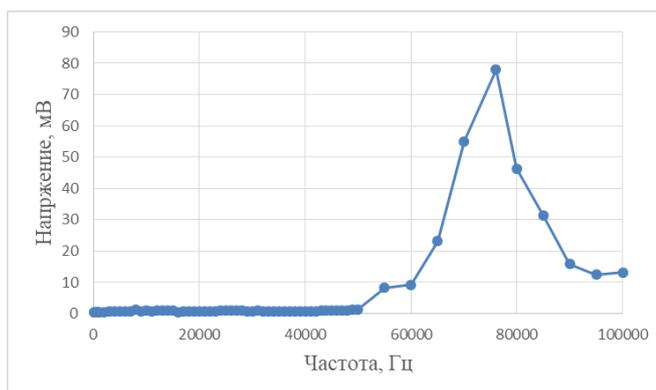


Рис. 6. График зависимости выходного напряжения от частоты при расстоянии между электродами 14 мм, $U_1=5$ В для d_{32}

Можно заметить, что количество локальных максимумов частот – резонансных пиков – отличается для образцов с d_{31} и d_{32} . При расчетах d_{31} используются частоты при четырех максимумах напряжений, а при расчете d_{32} используется единственный резонансный пик.

Результаты измерений представлены в виде графиков зависимости пьезомодуля от расстояния между электродами на верхней стороне пленки на рис. 7 и рис. 8 для пьезомодулей d_{31} и d_{32} соответственно.

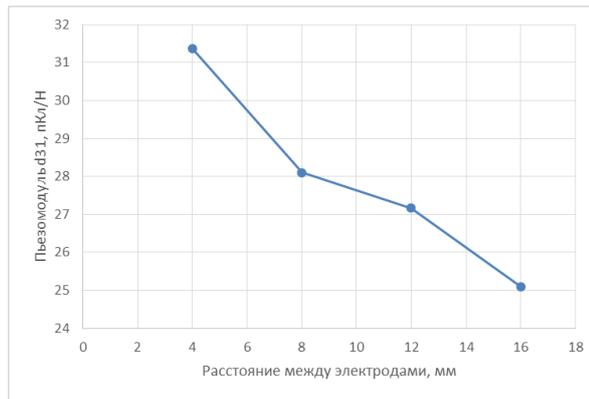


Рис. 7. График зависимости пьезомодуля d_{31} от расстояния между электродами

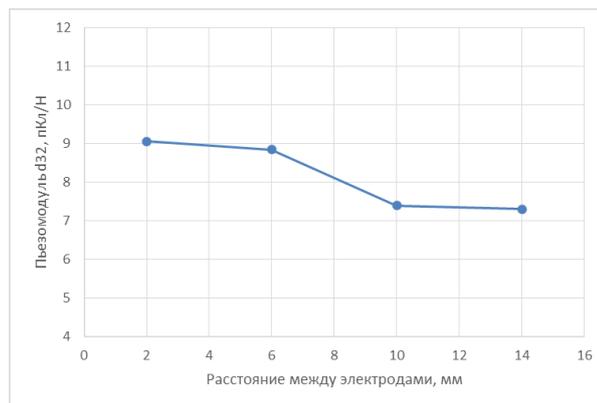


Рис. 8. График зависимости пьезомодуля d_{32} от расстояния между электродами

Анализируя полученные значения, можно заметить, что с увеличением расстояния между электродами пьезомодуль возрастает. Также видно, что расхождение экспериментально полученных значений и данных производителя мало. Однако необходимо, чтобы пьезомодуль при каждом выбранном режиме не отличался. Для этого требуется обеспечить более плотный контакт и изоляцию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы описана методика измерения пьезомодуля ПВДФ пленки методом «трансформатора», которая позволяет определять пьезокоэффициенты d_{31} и d_{32} . Полученные значения d_{31} и d_{32} имеют незначительные расхождения с паспортными значениями, что подтверждает работоспособность методики. Методика и измерительный стенд внедрены и используются в лаборатории «Технологии полимерных сегнетоэлектриков» МГТУ им. Н. Э. Баумана для определения пьезокоэффициентов d_{31} и d_{32} ПВДФ пленок.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSN-2022-0007).

ЛИТЕРАТУРА

1. Cady W. Piezoelectricity and its practical application: Textbook. – М.: Foreign Literature Publishing House, (1949). – P. 721.

2. Старченко И.Б., Вишнеvский В.Ю. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Измерительные преобразователи и электроды». Часть 1: Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 44 с. УДК 539.1.078: 629.12(031).
3. Акопьян В.А. Методы и алгоритм определения полного набора совместимых материальных констант пьезокерамических материалов / В.А. Акопьян, А.Н. Соловьев, С.Н. Швецов. – Изд-во ЮФУ, 2008. – С. 144.
4. Rezvani B., Linvill J.G. «Measurement of piezoelectric parameters versus bias field strength in polyvinylidene fluoride (PVF2)». Applied Physics Letters 34.12, (1979). – P. 828-830.
5. Kepler R.G., Anderson R.A. «Ferroelectric polymer». Advance in Physics 41.1 (1992). – P. 1-57.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Еманов Данила Петрович – студент 4 курса (ORCID: 0009-0003-7798-9785). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: emanov2001@yandex.ru

Исхакова Эльвина Рустамовна – студентка 4 курса (ORCID: 0009-0000-7139-8667). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: elvina.cool2222@yandex.ru

Моисеев Константин Михайлович – кандидат технических наук, доцент (ORCID: 0000-0002-8753-7737). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: k.moiseev@bmstu.ru

Осипков Алексей Сергеевич – кандидат технических наук (ORCID: 0000-0003-3603-2621). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: osipkov@bmstu.ru