УДК 534.6.086

**измерениЕ коэффициента электроакустического преобразования**

**В.В. Насыров 1, 2, В.В.Савченко 1, 2**

**1** *Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических  
 измерений (г. Хабаровск)*

**2** *Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск),  
000612*[*@togudv.ru*](mailto:n@gmail.com)

*Описывается методика измерения коэффициента электроакустического преобразования пьезоизлучателей с использованием модифицированного интерферометра Линника. Экспериментальная установка применяется для поверки и калибровки высокочастотных пьезоэлектрических преобразователей.*

Пьезоэлектрические излучатели нашли широкое применение в акустооптических системах, медицинской диагностике, неразрушающем контроле и подводной акустике. Ключевым параметром, определяющим эффективность таких устройств, является коэффициент электроакустического преобразования , характеризующий соотношение между приложенным электрическим напряжением и амплитудой генерируемых механических колебаний. Традиционные методы измерения (импедансный анализ, калориметрия) обладают ограниченной точностью на высоких частотах ( кГц) и сложны в реализации для микроразмерных образцов.

Оптические интерферометрические методы предлагают высокую пространственную разрешающую способность, но требуют сложной юстировки и стабилизации рабочей точки. В данной работе представлена модернизация интерферометра Линника, сочетающая низкочастотную модуляцию опорного плеча и импульсное возбуждение исследуемого образца. Такой подход позволяет регистрировать амплитуды колебаний нанометрового диапазона в широком частотном диапазоне ( 50 кГц – 1,5 МГц).

Оптическая схема установки (рис. 1) представляет собой модернизированный интерферометр Линника со следующими особенностями:

**Опорное плечо.** Зеркало М1, закреплённое на электроакустическом преобразователе ПЭ1, совершает низкочастотные синусоидальные колебания

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

**Измерительное плечо.** Пьезоизлучатель ПЭ2 возбуждается высокочастотным радиоимпульсом

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

**Регистрация.** Сигнал снимается с фотодиода (ФД) и передаётся на осциллограф (GW Instek GDS-7102B) и анализатор спектра (Rigol DSA815-TG).

Интенсивность света на выходе интерферометра может быть представлена в виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

где – разность фаз, определяемая движениями отражающих поверхностей в обоих плечах интерферометра.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 1. Оптическая схема установки. |

Полезный сигнал установки — напряжение , снимается с нагрузочного резистора, включенного в цепь фотодиода. Ток, создаваемый фотодиодом ФД, в линейном режиме работы пропорционален его облучённости, поэтому напряжение на фотодиоде пропорционально интенсивности света:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

где , – составляющие напряжения от опорного и измерительного пучков. Напряжение [(5)](#Uosc) подается на осциллограф и спектрометр. На рис. [2](#fig:oscillographt), a показан экспериментальный сигнал, на рис. [2](#fig:oscillographt), б – его математическая модель, построенная по формулам [(1)](#ls) – (4):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

В формуле модельного сигнала [(6)](#Um) подобраны следующие параметры: смещение опорной поверхности ; смещение измерительной поверхности ; частота колебаний опорной поверхности ; частота колебаний измерительной поверхности ; напряжение, которое могло бы быть получено при облучении фотодиода только пучком, отраженным от ПЭ1 ; напряжение, которое могло бы быть получено при облучении фотодиода только пучком, отраженным от ПЭ2 .

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис. 2. Сигнал на осциллографе: a) экспериментальный сигнал; б) математическая модель (5). | |

Введем – чувствительность интерферометра (В/рад):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

Зависимость чувствительности для модельного сигнала показана на рис.3. Максимальная чувствительность достигается вблизи рабочей точки , в области "линейного отклика" функции :

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | (7) | |
|  | |
| Рис. 3. Зависимость чувствительности интерферометра. | |

Экспериментальная чувствительность , определённая по размаху сигнала (рис. [2](#fig:oscillographt)), составляет 0,93 B/рад, чувствительность для модельного – 0,953 B/рад. Расхождение в 2,1 % свидетельствует о достаточном качестве предлагаемой модели процесса.

Разложим напряжение (4) в ряд Тейлора в окрестности рабочей точки:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (8) |

Обозначим — амплитуду напряжения радиоимпульса на частоте , приложенное к пьезоизлучателю ПЭ2. Примем, что максимальное смещение поверхности пьезоизлучателя ПЭ2 определяется его коэффициентом электроакустического преобразования :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |

Одной из особенностью предлагаемого метода является то, что, используемый в составе установки анализатор спектра, работает в режиме «HoldMax». Это позволяет фиксирует максимальные изменения напряжения, соответствующие наибольшей чувствительности интерферометра (в момент прохождению рабочей точки в процессе «качания» опорного зеркала), поэтому амплитудное напряжение , фиксируемое анализатором спектра, будет определяться:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (10) |

Для измерения амплитуд напряжения радиоимпульса генератор импульсов отдельно подключается к анализатору спектра. На рис. 4 показан экран анализатора спектра Rigol DSA815-TG с рассматриваемым сигналом.

Коэффициент электроакустического преобразования можно выразить из (10), учитывая (7):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (11) |

где – размах напряжения, – постоянную интерферометра.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 4. Анализатора спектра. Зависимость амплитуды напряжения от частоты. |

Таким образом, для измерения коэффициент электроакустического преобразования , необходимо: 1) зафиксировать размах напряжения по осциллографу; 2) измерить амплитуду напряжений и при помощи анализатора спектра; 3) выполнить расчет по формуле (11). Характерный вид амплитудно-частотной характеристики коэффициента приведен на рис. 5.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 5. АХЧ коэффициента электроакустического преобразования. |

Представленная методика позволяет выполнять измерения коэффициента электроакустического преобразования пьезоизлучателей с расширенной неопределенностью результата измерений ~ 20 %. Установка позволяет определять амплитуды колебаний от 20 нм c абсолютной погрешностью ~5 нм, выполнять калибровку пьезоэлементов для ультразвуковой диагностики.

**Л И Т Е Р А Т У Р А**

1. Smith W.A. The role of piezocomposites in ultrasonic transducers // IEEE Ultrason. Symp., 1989.

2. Gurkov A.S. Interferometric methods in acoustics // Measurement Science, 2017.

3. Rigol Technologies // DSA800 Series Spectrum Analyzer User’s Guide. 2019.

4. GW Instek // GDS-7000 Series Digital Oscilloscope User Manual. 2020.