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*

*Описывается методика измерения коэффициента электроакустического преобразования* $k\_{f}$ *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 $k\_{f}$, характеризующий соотношение между приложенным электрическим напряжением и амплитудой генерируемых механических колебаний. Традиционные методы измерения $k\_{f}$ (импедансный анализ, калориметрия) обладают ограниченной точностью на высоких частотах ($>100$ 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

|  |  |
| --- | --- |
| $ΔL\_{медл}\left(t\right)=Asin\left(2πf\_{ПЭ1}t\right), T\_{ПЭ1}=300 с, f\_{ПЭ1}=3,33 мГц.$  | (1) |

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

|  |  |
| --- | --- |
| $ΔL\_{быстр}\left(t\right)=\sum\_{f}^{​}δ\_{0}^{f}sin\left(2πf\_{ПЭ2}t\right), f\_{ПЭ2}=50 кГц – 1,5 МГц.$  | (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:

|  |  |
| --- | --- |
| $I=I\_{1}+I\_{2}+2\sqrt{I\_{1}I\_{2}}cos\left(Δϕ\right),$  | (3) |

где $Δϕ=Δϕ\_{медл}+Δϕ\_{быстр}$ – разность фаз, определяемая движениями отражающих поверхностей в обоих плечах интерферометра.

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

Полезный сигнал установки — напряжение $U\_{фд}$, 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:

|  |  |
| --- | --- |
| $U\_{фд}=U\_{1}+U\_{2}+2\sqrt{U\_{1}U\_{2}}cos\left(Δϕ\right),$  | (4) |

где $U\_{1}$, $U\_{2}$ – 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):

|  |  |
| --- | --- |
| $$U\_{фд}^{m}=5,74+0,95cos\left[11,31cos\left(0,021t+2,51\right)+0,063cos\left((9,43t+1,13)⋅10^{8 }\right)+1,85\right]$$ |  (5) |

В формуле модельного сигнала [(6)](#Um) подобраны следующие параметры: смещение опорной поверхности $A=0,9λ≈569,52 нм$; смещение измерительной поверхности $δ\_{0}^{f}=0,04λ≈25,31 нм$; частота колебаний опорной поверхности $f\_{ПЭ1}=3,33 мГц$; частота колебаний измерительной поверхности $f\_{ПЭ2}=1,5 МГц$; напряжение, которое могло бы быть получено при облучении фотодиода только пучком, отраженным от ПЭ1 $U\_{1}=5,7 В$; напряжение, которое могло бы быть получено при облучении фотодиода только пучком, отраженным от ПЭ2 $U\_{2}=0,04 В$.

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

Введем $S$ – чувствительность интерферометра (В/рад):

|  |  |
| --- | --- |
| $S=\left|\frac{dU\_{фд}}{d\left(Δϕ\right)}\right|=2\sqrt{U\_{1}U\_{2}}\left|sin\left(Δϕ\right)\right|.$  | (6) |

Зависимость чувствительности для модельного сигнала показана на рис.3. Максимальная чувствительность достигается вблизи рабочей точки $Δϕ\_{0}=\frac{π}{2}$, в области "линейного отклика" функции $sin\left(Δϕ\_{0}\right)$:

|  |  |
| --- | --- |
| $S\_{max}=2\sqrt{U\_{1}U\_{2}}=\frac{U\_{фд}^{max}-U\_{фд}^{min}}{2}.$  | (7) |
|  |
| Рис. 3. Зависимость чувствительности интерферометра.  |

Экспериментальная чувствительность $S\_{max}$, определённая по размаху сигнала $ΔU\_{фд}$ (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:

|  |  |
| --- | --- |
| $U\_{фд}≈U\_{1}+U\_{2}+S\_{max}⋅\left(\frac{4π}{λ}ΔL\_{быстр}\left(t\right)\right)$  | (8) |

Обозначим $U\_{имп}^{f}$ — амплитуду напряжения радиоимпульса на частоте $f$, приложенное к пьезоизлучателю ПЭ2. Примем, что максимальное смещение поверхности пьезоизлучателя ПЭ2 $δ\_{0}^{f}$ определяется его коэффициентом электроакустического преобразования $k\_{f}$:

|  |  |
| --- | --- |
| $δ\_{0}^{f}=k\_{f}U\_{имп}^{f}.$ | (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 $U\_{фд}^{f}$, фиксируемое анализатором спектра, будет определяться:

|  |  |
| --- | --- |
| $U\_{фд}^{f}=S\_{max}⋅\left(\frac{4π}{λ}k\_{f}U\_{имп}^{f}\right).$ | (10) |

Для измерения амплитуд напряжения радиоимпульса $U\_{имп}^{f}$ генератор импульсов отдельно подключается к анализатору спектра. На рис. 4 показан экран анализатора спектра Rigol DSA815-TG с рассматриваемым сигналом.

Коэффициент электроакустического преобразования $k\_{f}$ можно выразить из (10), учитывая (7):

|  |  |
| --- | --- |
| $k\_{f}=G\frac{U\_{фд}^{f}}{ΔU\_{фд}⋅U\_{имп}^{f}},$  | (11) |

где $ΔU\_{фд}=U\_{фд}^{max}-U\_{фд}^{min}$ – размах напряжения, $G=\frac{λ}{2π}=100,71⋅10^{-9 }м$ – постоянную интерферометра.

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

Таким образом, для измерения коэффициент электроакустического преобразования $k\_{f}$, необходимо: 1) зафиксировать размах напряжения $ΔU\_{фд}$ по осциллографу; 2) измерить амплитуду напряжений $U\_{фд}^{f}$ и $U\_{имп}^{f}$ при помощи анализатора спектра; 3) выполнить расчет по формуле (11). Характерный вид амплитудно-частотной характеристики коэффициента $k\_{f}$ приведен на рис. 5.

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

Представленная методика позволяет выполнять измерения коэффициента электроакустического преобразования $k\_{f}$ 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.