

рических сенсоров с различающимися параметрами, реализует линейные характеристики преобразования в широком диапазоне и для нескольких входных факторов путем выбора и объединения перекрывающихся линейных участков характеристик преобразования разных фотоэлектрических сенсоров, входящих в состав преобразователя. При этом достигается увеличение динамического диапазона энергетической характеристики не менее, чем в два раза по логарифмической шкале интенсивности излучения, с соответствующим увеличением разрядности кода результата преобразования. Расширение спектральной характеристики чувствительности происходит на величину от десятых долей до шести мкм, в зависимости от материала основного полупроводника и многозарядной примеси.

УДК 681.586.48

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Дедович Н. Н., Романов А. Ф.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлены результаты оптимизации характеристик элементов пьезоэлектрического преобразователя для работы в газовой среде. С помощью моделирования методом конечных элементов получены значения собственных резонансных частот пьезоэлектрического преобразователя и требования к материалу согласующего слоя пьезопреобразователя.

Ключевые слова: ультразвук, пьезокерамический элемент, согласующий слой, метод конечных элементов.

OPTIMIZATION OF DESIGN ELEMENTS OF A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Dedovich N., Romanov A.

*Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The results of optimization of characteristics of elements of piezoelectric transducer for operation in gas environment are presented. The values of natural resonance frequencies of piezoelectric transducer and requirements for material of matching layer of piezoelectric transducer are obtained by means of modeling by finite element method.

Key words: ultrasound, piezoceramic element, matching layer, finite element method.

*Адрес для переписки: Романов А. Ф., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: ramana@bsu.by*

Общая конструкция пьезоэлектрического преобразователя (ПП) для времяимпульсного метода измерений состоит из трех элементов: демпфер, пьезокерамический элемент (ПЭ) и согласующий слой [1].

Материал, тип и геометрия ПЭ определяются необходимостью получить направленный ПП с максимальной площадью взаимодействия со средой для повышения эффективности электроакустических преобразований. Для газовой среды, как правило, используют низкочастотные ультразвуковые волны, чтобы минимизировать потери при распространении ультразвуковых

Литература

1. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / О. К. Гусев [и др.] под общ. ред. О.К. Гусева – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.
2. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. I. Vorobey [et al.] // *Devices and Method of Measurements*, – 2021, № 2. – P. 108–116
3. Многопараметрические измерительные преобразователи систем оптической диагностики на основе функциональных датчиков / Р. И. Воробей [и др.] // *Не разрушающий контроль и диагностика* – 2023, № 1. – С. 37–45.
4. Бурункова, Ю. Э. Сенсорные системы и материалы / Ю. Э. Бурункова, Е. О. Самуйлова. – СПб: Университет ИТМО, 2023. – 117 с.
5. Масол, И. В. Информационные нанотехнологии / И. В. Масол, В. И. Осинский, О. Т. Сергеев – Киев: изд-во Макрос, 2011. – 560 с.

волн в среде. Наиболее подходящим типом геометрии ПЭ является диск. Диапазон ультразвуковых частот от 100 кГц до 200 кГц соответствует радиальной моде колебаний диска. Для моделирования ПЭ выбран диск диаметром 14 мм с толщиной 2,1 мм [2].

Применение ПП в газообразной среде накладывает наиболее жесткие условия эксплуатации из-за большой разницы акустических сопротивлений среды и ПЭ. Для эффективного излучения и приема ультразвуковых волн требуется наличие согласующего слоя с промежуточным значением акустического импеданса.

Расчет и оптимизация согласующего слоя выполнен с помощью пакета программного обеспечения COMSOL Multiphysics [3] на основе двумерной осесимметричной модели с целью снижения вычислительных затрат (рисунок 1).

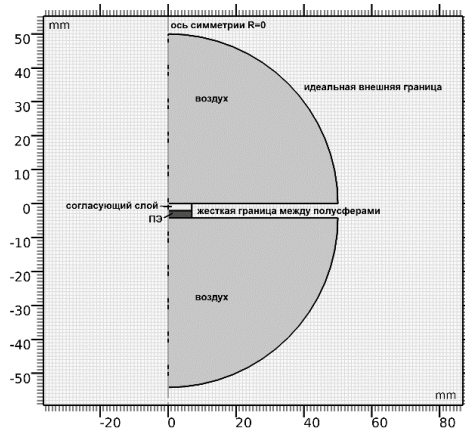


Рисунок 1 – Модель ПЭ

ПЭ расположен между двумя полусферами с воздухом при атмосферном давлении и комнатной температуре. На первом этапе выполнялась оценка уровня излучения ПЭ, а затем был добавлен согласующий слой и выполнена оптимизация характеристик материала слоя.

В результате поиска собственных резонансных частот получено значение резонансной частоты 143159 Гц, что дает хорошее соответствие результатам аналитических расчетов и измерениям образцов. На рисунке 2 представлены уровень излучения ПЭ без согласующего слоя и характеристика направленности излучения. ПЭ одинаково излучает в обе стороны и максимальное излучение на частоте соответствующей радиальной моде.

Геометрия согласующего слоя повторяет геометрию ПЭ. Характеристики материала рассчитаны из требований к значению акустического импеданса для согласующего слоя [4, 5].

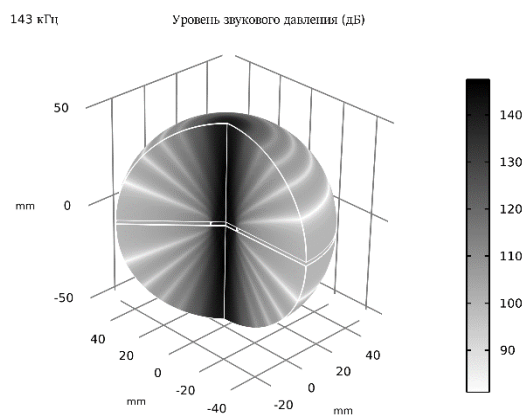


Рисунок 2 – Характеристика излучающей способности ПЭ

Применение согласующего слоя позволило увеличить энергию излучения со стороны согласования, но расчетные значения не являются оптимальными. Модуль оптимизации пакета COMSOL Multiphysics дает возможность решить задачу оптимизации плотности материала и модуля Юнга с требованием незначительного изменения удельного акустического сопротивления согласующего слоя. Уровень излучения ПЭ с оптимальным согласованием одной стороны ПЭ значительно повышается со стороны согласования ПЭ (рисунок 3).

59.357 кг/м³, 143 кГц Уровень звукового давления (дБ)

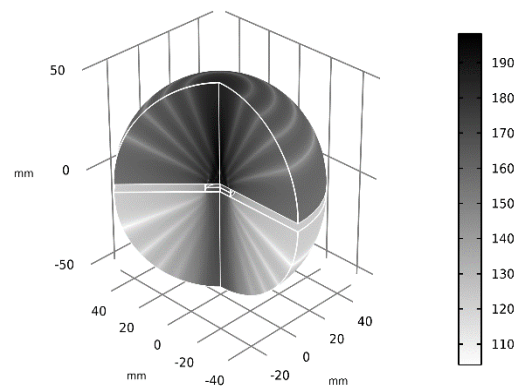


Рисунок 3 – Характеристика излучающей способности ПЭ после оптимизации согласующего слоя

Для сравнительных оценок характеристики излучения построены графики значений звукового давления на расстоянии 1 м от ПЭ по оси излучения в зависимости от частоты. На рисунке 4 собраны графики, иллюстрирующие результат повышения излучающей способности ПЭ благодаря согласованию ПЭ с рабочей средой и оптимизации характеристик согласующего слоя.

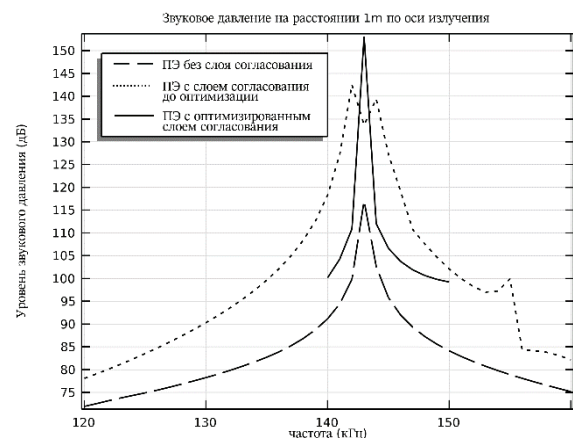


Рисунок 4 – Эволюция значения звукового давления на расстоянии 1 м

В результате были получены требования к материалу согласующего слоя. В качестве резуль-

тата можно отметить очень низкое значение плотности материала для согласующего слоя (около 60 кг/м^3). Из известных сегодня твердых материалов с низкой плотностью можно рассматривать пенопласт, пенополиуретан, пенополистирол. Возможным решением для снижения жестких требований к материалам является использование нескольких слоев согласования или получение активного элемента с низким акустическим сопротивлением путем использования композитных материалов. При этом описанный выше подход к расчету, моделированию и оптимизации конструктивных элементов позволяет сократить затраты при проектировании сложных устройств.

УДК 681.586.48

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Дедович Н. Н., Романов А. Ф.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлены результаты расчета элементов пьезоэлектрического преобразователя с учетом реальных условий эксплуатации в газовой среде. Моделирование пьезоэлектрического элемента методом конечных элементов показало хорошее совпадение с результатами натуральных измерений.

Ключевые слова: конструкция, пьезоэлектрический преобразователь, пьезокерамический элемент, метод конечных элементов.

MODELING OF STRUCTURAL ELEMENTS OF A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER BY THE FINITE ELEMENT METHOD

Dedovich N., Romanov A.

*Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The results of calculation of piezoelectric transducer elements are presented taking into account real operating conditions in a gas environment. Modeling of a piezoelectric element by the finite element method showed good agreement with the results of natural measurements.

Key words: design, piezoelectric transducer, piezoceramic element, finite element method.

*Адрес для переписки: Романов А. Ф., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: ramanau@bsu.by*

Как правило пьезоэлектрические преобразователи (ПП) содержат пьезокерамический элемент (ПЭ), который обеспечивает обратимость преобразований и позволяет использовать преобразователь как в качестве излучателя, так и в качестве приемника ультразвуковых волн. Для эффективного излучения и приема ультразвуковых волн требуется наличие слоев с промежуточным значением акустического импеданса. В то же время на другой стороне ПЭ для устранения эффекта реверберации необходимо установить слой с акустическим импедансом близким к акустическому импедансу ПЭ (демпфер). Материал корпуса ПП должен обеспечить механическую и электромагнитную защиту многослойного преобразователя. Общая конструкция ПП показана на рисунке 1 [1].

Широкий диапазон избыточного давления (от 0,2 МПа до 2,5 МПа) и температур (от минус

Литература

1. Богуш, М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электроупругих моделей. М.: Техносфера, 2014. – 312 с.
2. APC International, Ltd. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.americanpiezo.com>. – Data of access: 2.12.2023.
3. COMSOL Multiphysics® version 6.1 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.comsol.com>. – Data of access: 11.09.2023.
4. Голямина, И. П. Ультразвук: Маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
5. Исакович, М. А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. – 496 с.

50 °С до 100 °С) измеряемой среды приводит к тому, что наилучшее согласование обеспечивается только в ограниченной области диапазонов, так как расчетное значение акустического импеданса газа меняется в 10 раз (от $689 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$ до $6560 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$) [2, 3]. Следовательно, диапазон акустического импеданса согласующего слоя должен быть от $1,04 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$ до $3,22 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$ [4, 5].

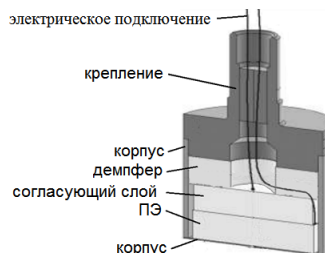


Рисунок 1 – Конструкция ультразвукового ПП