

УДК 535.015

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗУЮЩИХ АКУСТИЧЕСКИХ СЛОЁВ ПРИ СОЗДАНИИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ АКУСТООПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

М.А. Максимкин, Л.Л. Пальцев, Ю.К. Калинин

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
yukk@vniiftri.ru

Аннотация. В данной работе расчётным моделированием подобран оптимальный импеданс, удовлетворяющий требованиям при создании широкополосного преобразователя. Экспериментально подобраны толщины акустически связующих слоёв серебра и индия, обеспечивающих импеданс и частотные характеристики широкополосного преобразователя.

Ключевые слова: акустооптическая ячейка, акустический импеданс, широкополосный преобразователь, акустически связующие слои, диаграмма Вольперта — Смита.

STUDY OF BINDING ACOUSTIC LAYERS WHEN CREATING WIDEBAND PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS FOR ACOUSTO-OPTICAL DEVICES

M.A. Maksimkin, L.L. Paltsev, Yu.K. Kalinnikov

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
yukk@vniiftri.ru

Annotation. In this work, the optimal impedance that meets the requirements for creating a broadband transducer is selected by calculation modelling. The thicknesses of the acoustically binding layers of silver and indium, which provide the impedance and frequency characteristics of the wideband transducer, are experimentally selected.

Key words: acousto-optic cell, acoustic impedance, wideband transducer, acoustically binding layers, Smith chart.

Акустооптические устройства активно используются в промышленности при создании различных приборов. Это, в частности, акустооптические фильтры для спектрометров и перестраиваемых лазеров, многоканальные диффлекторы, модуляторы лазерного излучения, оптические процессоры, обладающие возможностью параллельной обработки информации в реальном масштабе времени, высоким быстродействием, малыми габаритными размерами и массой, незначительной потребляемой мощностью и низкой стоимостью.

Оптические системы в большинстве случаев представляют собой специализированные процессоры для выполнения одно- и двумерного преобразований Фурье и вычисления корреляционных функций. Такие системы высокоэффективны и обладают большим быстродействием. Акустооптическая ячейка (АОЯ) является ключевым элементом любого акустооптического устройства.

Принцип действия АОЯ основан на дифракции света на бегущей ультразвуковой волне в оптически прозрачном материале (кристалле). Бегущую ультразвуковую волну создаёт пьезоэлектрический преобразователь, присоединённый к кристаллу. Благодаря появлению участков сжатия и растяжения, возникающих в кристалле и различающихся показателем преломления, в среде формируется дифракционная решётка. Световой пучок, дифрагируя на решётке, образует несколько выходных пучков (дифракционных порядков), разнесённых в пространстве под равными углами относительно друг друга. При помощи апертурной диафрагмы из всех выходных лучей выделяется первый максимум, который существует только при наличии звуковой волны в АОЯ, и блокируются все остальные [1].

Акустооптическая ячейка состоит из следующих компонентов:

- пьезопреобразователя,
- акустооптического кристалла (светозвукопровода),
- звукопоглотителя,
- корпуса.

Пьезопреобразователь определяет в основном достижимые характеристики: максимальную эффективность и широкополосность, быстродействие, стабильность и др.

При создании акустооптического (АО) устройства существует проблема согласования импеданса материала кристалла и материала пьезопреобразователя для того, чтобы улучшить передачу акустической энергии из преобразователя в кристалл.

К современным материалам при создании АО приборов относятся монокристаллы парателлуриата (TeO_2) и ниобата лития (LiNbO_3). Кристалл TeO_2 обладает большой величиной АО качества, прозрачностью в широком диапазоне длин волн света (от 0,35 до 5 мкм) и высокой лучевой стойкостью. Известно, что акустический импеданс для сдвиговых волн TeO_2 составляет $3,6 \text{ г}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$ [2], а материал излучателя (ниобат лития) имеет акустический импеданс $21 \text{ г}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$ [2].

Очевидно, что шестикратное различие акустических импедансов без акустического согласования не может обеспечить широкополосность преобразователя. Классическое решение проблемы заключается в использовании четвертьволнового промежуточного слоя с импедансом $Z_c = (Z_p Z_k)^{1/2}$ [2], т.е. необходим материал с импедансом $Z_c = 9,3 \cdot 10^5 \text{ г}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$.

Данная работа посвящена технологии формирования металлических связующих слоёв для согласования импедансов парателлуриата и ниобата лития при создании широкополосных АОЯ.

Первая часть данной работы связана с расчётным моделированием оптимального импеданса, удовлетворяющего требованиям для создания широкополосного преобразователя.

Вторая часть работы связана с экспериментальным подбором толщины связующих слоёв, обеспечивающих заданный импеданс и частотные характеристики широкополосного преобразователя.

Подбор оптимального импеданса при создании широкополосного преобразователя

Металлические связующие слои, сформированные определённым образом, могут привести к расширению полосы примерно до октавы и больше. Для согласования двух импедансов TeO_2 и LiNbO_3 необходимо подобрать металлические связующие слои так, чтобы их суммарный импеданс лежал в пределах между $4 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$ и $20 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$. Теоретически нужный нам импеданс с широкой полосой пропускания можно рассчитать, если воспользоваться специальным типом круглых диаграмм Вольперта — Смита.

Для определения частотной характеристики полосы пропускания металлических связующих слоёв необходимо задать импедансы кристаллов и металлических слоёв в модели акустической ячейки, затем в специальной программе Microwave Office построить диаграмму Вольперта — Смита для импедансов пьезопреобразователя. На полученной диаграмме найти наибольшее значение акустического сопротивления (R_{\max}) и выяснить значение частоты при R_{\max} . Частотной полосой пропускания преобразователя будет являться разность частотных характеристик при $R_{\max}/2$.

Были проведены расчёты и построены диаграммы Вольперта — Смита для импедансов 4, 20 и $9 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$. Данные характеристики приведены на рис. 1–3.

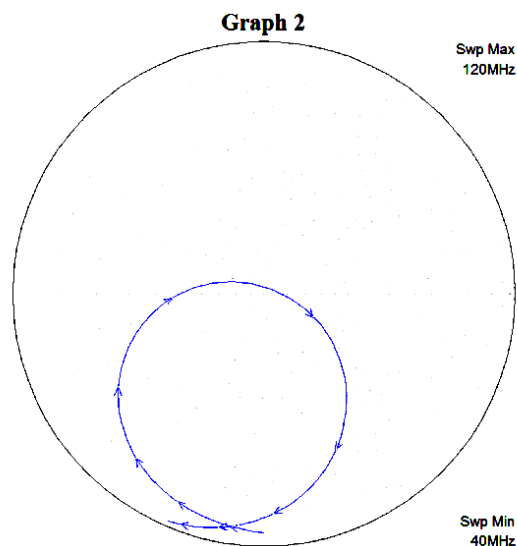


Рис. 1. Диаграмма Вольперта — Смита пьезопреобразователя с импедансом связующего акустического слоя $4 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$

В полученной диаграмме максимальное значение сопротивления равно 80 Ом, при частоте 86 МГц $R/2$ равняется 40 Ом, что соответствует двум частотам 91 и 80 МГц, таким образом, при импедансе металлического слоя $4 \text{ г}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$ преобразователь может иметь полосу пропускания 11 МГц, что является не лучшим показателем при создании широкополосного преобразователя.

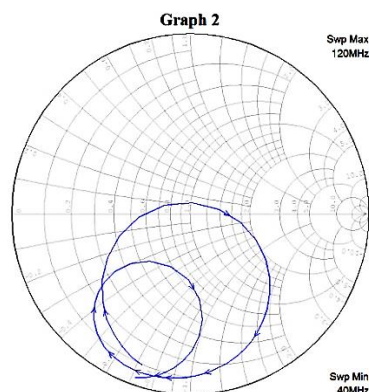


Рис. 2. Диаграмма Вольперта — Смита пьезопреобразователя с импедансом связующего акустического слоя $20 \text{ г}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$

При импедансе, равном $20 \text{ г}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$, диаграмма имеет 2 максимальных значения сопротивления — 36 и 100 Ом. Рассмотрим большую петлю с максимальным значением сопротивления 100 Ом при частоте 54 МГц. Таким значениям частот при 50 Ом будут соответствовать 51 и 58 МГц. Получается, что преобразователь, работающий в этом частотном диапазоне, будет иметь полосу пропускания 7 МГц. Если рассмотреть меньшую петлю с максимальным сопротивлением 36 Ом и частотой 108 МГц, то значения частот при сопротивлении 18 Ом будут 104 и 112 МГц. Следовательно, частота пропускания равна 8 МГц, то есть при импедансе, равном $20 \text{ г}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$, получаются две узкие полосы пропускания.

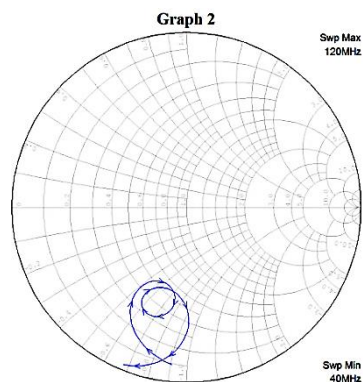


Рис. 3. Диаграмма Вольперта — Смита пьезопреобразователя с импедансом связующего акустического слоя $9 \text{ г}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$

В полученной диаграмме максимальное значение сопротивления равно 30 Ом, значит $R/2$ равняется 15 Ом, что соответствует частотам 105 и 52 МГц. Получаем, что при импедансе, равном $9 \text{ г}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$, преобразователь может иметь полосу пропускания 53 МГц, что является идеальным для создания широкополосного преобразователя.

Определение толщины связующих слоёв

Для достижения импеданса $9 \text{ г}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$ необходимо подбирать толщину металлически связующих слоёв индия и серебра, которые будут влиять на суммарный импеданс. По справочным данным индий имеет импеданс $5,5 \text{ г}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$, в качестве подслоя было выбрано серебро, т.к. его импеданс равен примерно $20 \text{ г}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$.

Существует ставшая общепринятой технология создания акустического контакта между LiNbO_3 и TeO_2 — холодная вакуумная сварка с помощью индия. Пластины LiNbO_3 значительной толщины полируют с одной стороны. Пластины и кристалл TeO_2 помещают в вакуумную камеру и на них наносят адгезионные слои и слой индия заданной толщины. Затем, не извлекая из камеры, совмещают пластину и TeO_2 и сдавливают их. В вакууме не образуются оксидные плёнки, происходит частичная диффузия серебра в индий. Данный процесс подробно описан в ранее опубликованной работе [3].

По данной технологии были изготовлены образцы с разными толщинами металлических слоёв индия и серебра, фотография одного из образцов представлена на рис. 4.



Рис. 4. Широкополосный преобразователь

Для проверки полученного акустического импеданса образцы подключили к прибору «Обзор-103», полученные данные отображены на рис. 5.

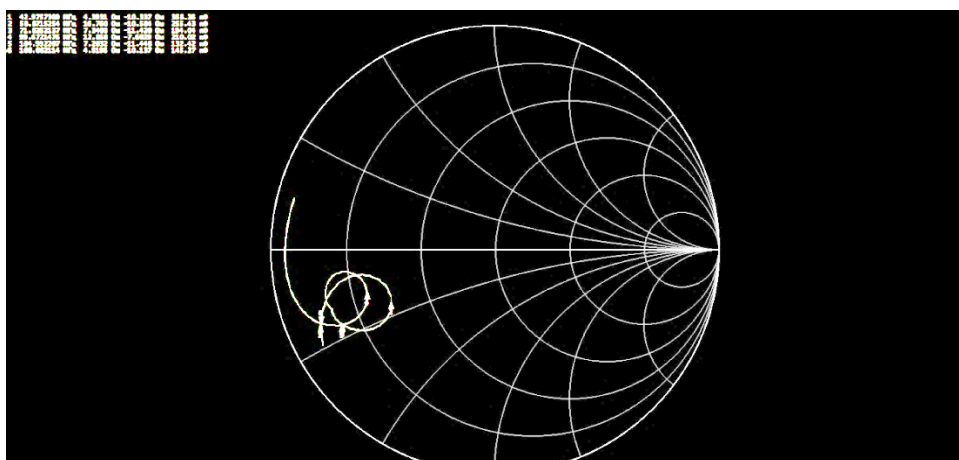


Рис. 5. Диаграмма Вольперта — Смита полученного преобразователя

При помощи программы Microwave Office была построена диаграмма, в которой подбирался акустический импеданс и толщина слоя, соответствующая фазовой задержке в слое, так, чтобы полностью имитировать полученную характеристику. Наилучшее совпадение характеристик модели и измеренного импеданса преобразователя получилось при значении акустического импеданса связующего слоя, равного $10,5 \text{ г/(с}\cdot\text{см}^2)$, и фазовой задержки в слое около 80° . Полученные значения отличаются от оптимальных $9 \text{ г/(с}\cdot\text{см}^2)$ и 90° , что отразилось на форме полученной характеристики. Аналогичные данные были получены на втором образце, с отличающейся вдвое резонансной частотой.

По полученным данным преобразователей составили таблицу зависимости толщин слоёв серебра и индия.

Таблица

Зависимость толщин напыляемых металлических слоёв широкополосных преобразователей для разных частот

Резонансная частота, мГц	Толщина слоя Ag, мкм	Толщина слоя In, мкм	Импеданс, $\text{г/(с}\cdot\text{см}^2)$
60	1	4	10,5
120	0,5	2	10,5

Из полученных данных видно, что импеданс сплава Ag и In одинаков при равном соотношении толщин, а суммарная толщина слоя металлов зависит от резонансной частоты.

Таким образом, был выполнен расчёт оптимального импеданса при создании широкополосных преобразователей. Для обоснования теоретических данных было изготовлено несколько сварных образцов с разными толщинами металлических связующих слоёв. Для достижения оптимального результата необходимо провести дальнейшие работы по уменьшению импеданса слоёв до оптимального $9 \text{ г}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$. Предположительно, этого можно добиться, меняя соотношение толщин слоёв серебра и индия. Результаты дальнейших исследований будут опубликованы в следующей работе.

Список литературы

1. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. М.: Советское радио, 1978.
2. Акустические кристаллы: справочник / под ред. М.П. Шаскольской. М.: Наука, 1982.
3. Максимкин М.А. Разработка процесса соединения кристаллических образцов в акустооптических ячейках // Альманах современной метрологии. 2019. № 4 (20). С. 60–68.

Статья поступила в редакцию: 12.10.2020 г.

Статья прошла рецензирование: 16.11.2020 г.

Статья принята в работу: 24.11.2020 г.