

Д.А. Цимбал, А.С. Швецов, С.А. Жгун

ПОВЕДЕНИЕ НИЗШИХ МОД ВОЛНЫ ЛЭМБА В ТОНКИХ ПЛАСТИНАХ ЛАНГАСИТА

Рассмотрено поведение низших мод волны Лэмба в пластине из кристалла лантангаллиевого силиката. Представлено поведение амплитуды и фазы компонент смещения для симметричной и антисимметричной мод волны Лэмба. Произведено моделирование бесконечного встречно-штыревого преобразователя (ВШП) в пакете Comsol Multiphysics, которое, в том числе, показало наличие естественной однонаправленности у волн Лэмба. Рассмотрено поведение волн при изменении вязкости слоя, находящегося на противоположной ВШП стороне подложки.

Ключевые слова: волны Лэмба, Comsol Multiphysics, лангасит, LGS, моделирование, профиль волны, естественная однонаправленность.

Введение. Кристалл лантангаллиевого силиката ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$, лангасит) – один из многообещающих материалов для изготовления устройств на объемных и поверхностных акустических волнах. Это связано с отсутствием фазовых переходов до температуры плавления (составляет 1470°C). По этой причине данный материал успешно используется в качестве основы фильтров на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и датчиков давления, а также датчиков, чувствительных к внешним силам, применяемых при повышенных температурах. Кроме того, лангасит интересен для применения в области датчиков механических свойств жидких сред и датчиков концентрации газов, имеющих применение в химической отрасли. Дополнительные возможности открывает использование подложек, толщина которых сравнима с длиной волны. Отличительной чертой таких датчиков является использование противоположной ВШП стороны подложки для непосредственного контакта со средой, имеющей высокую вязкость (жидкость или полимер, свойства которого чувствительны к определенному газу). При этом датчик имеет высокую чувствительность к параметрам этой среды одновременно с возможностью избежать слишком сильного поглощения акустической волны вязким материалом. Акустические волны в таких подложках заметно отличаются от характерных для полубесконечного пространства волн Рэлея и проявляют свойства характерных для пластин волн Лэмба.

Волны Лэмба в пластине лангасита. Волны Лэмба делятся на симметричные и антисимметричные. В данной работе рассматриваются две низшие моды волны Лэмба, симметричная и антисимметричная. При толщине пластины, много меньшей длины волны, для фазовых и групповых скоростей мод волн Лэмба низшего

порядка, распространяющихся в тонкой, однородной, изотропной пластине, применимы следующие приближенные соотношения [1]:

$$V_{gs} = V_{ps} = \sqrt{E\rho(1-\nu^2)},$$

$$V_{ga} = 2V_{pa} = \sqrt[4]{E3\rho(1-\nu^2)}\sqrt{\omega d},$$

где V_{gs} – групповая скорость симметричной волны, V_{ps} – фазовая скорость симметричной волны, V_{ga} – групповая скорость антисимметричной волны, V_{pa} – фазовая скорость антисимметричной волны, E – модуль Юнга, ρ – плотность, ν – коэффициент Пуассона, ω – циклическая частота, d – толщина пластины.

Таким образом, в очень тонкой пластине скорость симметричной моды (S0) значительно выше скорости волны Рэлея и практически не зависит от частоты и толщины пластины, а скорость антисимметричной моды (A0) имеет дисперсионный характер и прямо пропорциональна толщине пластины, отнесенной к длине волны. С ростом толщины пластины скорость симметричной моды монотонно убывает, оставаясь при этом выше скорости волны Рэлея; а скорость антисимметричной моды монотонно возрастает, оставаясь при этом ниже скорости волны Рэлея. При толщине пластины много большей длины волны, скорости низших мод близки к скорости волны Рэлея.

Благодаря программному пакету, предоставленному проф. Адлером (университет Макгилла, Канада), рассчитаны дисперсионные характеристики волн Лэмба. Графики скоростей низших мод симметричной и антисимметричной волн для пластины из лангасита (срез $\text{ухлт}/148,5^\circ/26,5^\circ$) приведены на рисунке. 1. В общих чертах зависимость скоростей волн Лэмба от толщины пластины такая же, как и в случае изотропной среды.

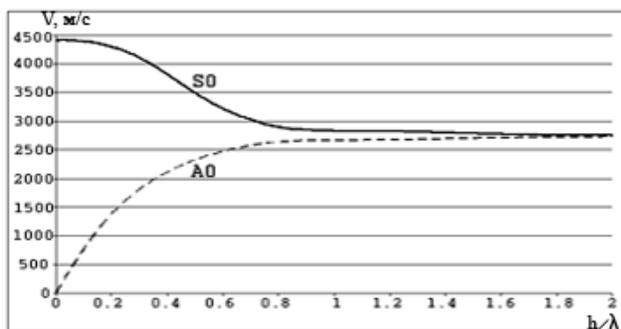


Рисунок 1 – Зависимость фазовой скорости V низших мод симметричной (S_0) и антисимметричной (A_0) волн Лэмба от толщины пластины лангасита h , отнесенной к длине волны λ

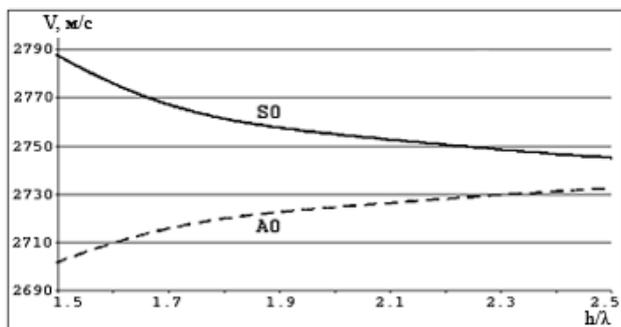


Рисунок 2 – Зависимость фазовой скорости V низших симметричной (S_0) и антисимметричной (A_0) волн Лэмба от толщины пластины лангасита h , отнесенной к длине волны λ , для h , близких к 2λ

С помощью программного пакета Адлера построены профили распределения акустических полей для подложки, толщина которой составляет $2,2\lambda$ (рисунки 3-6). Толщина подложки выбрана, исходя из уже существующих экспериментальных образцов со сходной толщиной [3]. Скорости волн Лэмба при такой толщине подложки уже достаточно близки к скорости волны Рэлея и отличаются друг от друга менее чем на 1%. Частотная зависимость скоростей волн Лэмба в этой области толщин пластины приведена на рисунке 2.

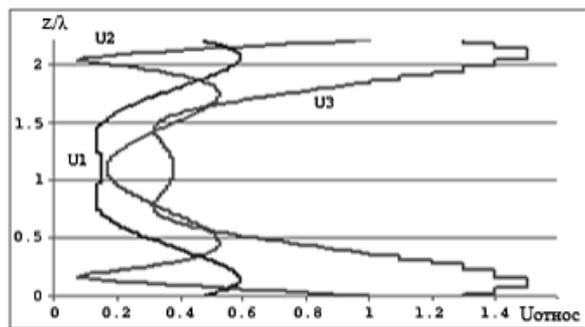


Рисунок 3 – Профили модулей компонент смещения антисимметричной низшей моды волны Лэмба (ось абсцисс – нормированное смещение $U_{\text{относ}}$, ось ординат – расстояние от нижней границы пластины z , отнесенное к длине волны λ)

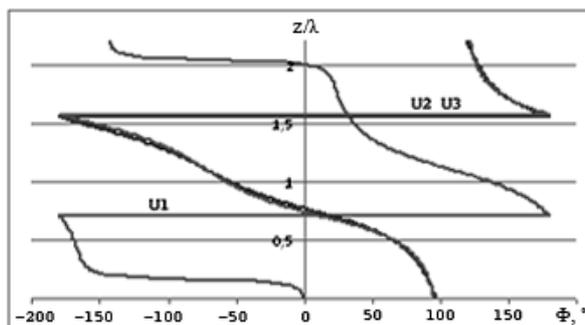


Рисунок 4 – Профили фаз компонент смещения антисимметричной низшей моды волны Лэмба (ось абсцисс – фаза Φ , ось ординат – расстояние от нижней границы пластины z , отнесенное к длине волны λ)

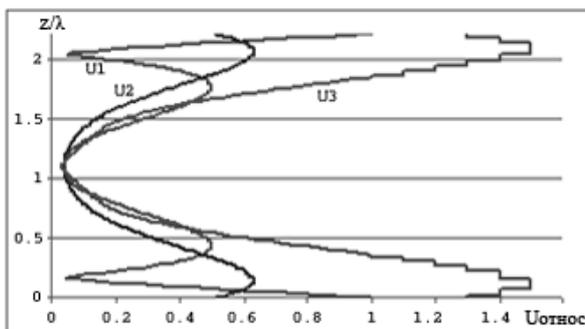


Рисунок 5 – Профили модулей компонент смещения симметричной низшей моды волны Лэмба (ось абсцисс – нормированное смещение $U_{\text{относ}}$, ось ординат – расстояние от нижней границы пластины z , отнесенное к длине волны λ)

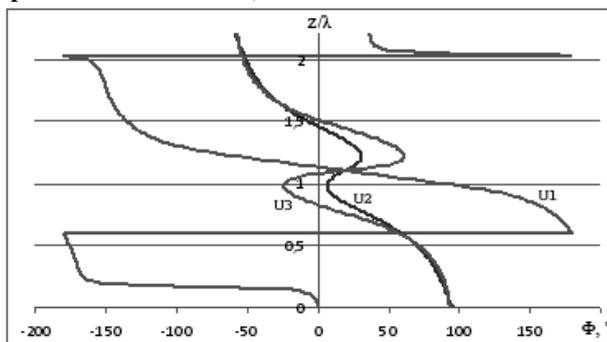


Рисунок 6 – Профили фаз компонент смещения симметричной низшей моды волны Лэмба (ось абсцисс – фаза Φ , ось ординат – расстояние от нижней границы пластины z , отнесенное к длине волны λ)

Рассматривая профили мод Лэмба низшего порядка (рисунки 3-6), можно убедиться, что одна мода имеет антисимметричный, а другая симметричный характер. На графиках отображены три компонента смещения, соответствующие осям подложки. Компонента смещения U_1 направлена вдоль направления распространения волны. Компонента смещения U_3 направлена по нормали к пластине. Компонента смещения U_2 лежит в плоскости пластины перпендикулярно к направлению распространения волны.

Для более медленной моды Лэмба, профиль которой изображен на рисунках 3, 4, имеем наибольшую по амплитуде компоненту U_3 . Вследствие анизотропии материала не наблюдается строго синфазных или строго противофазных колебаний границ пластины, как в изотропном случае. В данном случае движение границ пластины в направлении компоненты U_3 близко к синфазному, что характерно для антисимметричной волны. Компонента U_2 ведет себя почти так же, как и U_3 , но имеет сравнительно малую амплитуду. Наличие этой компоненты связано с анизотропией материала пластины (в изотропном случае она отсутствует).

Профиль более быстрой моды Лэмба изображен на рисунках 5, 6. Для компонент U_2 и U_3 разность фаз между верхней и нижней границами пластины приближается к 180° . Амплитудное распределение симметрично относительно центральной оси подложки. Таким образом, смещение подложки по координатам U_2 и U_3 происходит с одинаковой амплитудой, но в противоположных направлениях. Следовательно, данная волна относится к симметричным модам. Как и в предыдущем случае, разность фаз компонент U_1 и U_3 на границах подложки близка к $\pm 90^\circ$, то есть траектории движения частиц близки к эллипсам.

При толщине $2,2\lambda$, в отличие от толщин пластины менее длины волны, у профилей волн Лэмба наблюдается экспоненциальное затухание амплитуды смещения при удалении от поверхности подложки, что характерно для волн Рэлея.

Моделирование возбуждения волн Лэмба встречно-штыревым преобразователем Акустическое поле, создаваемое встречно-штыревым преобразователем, расположенным на верхней стороне пластины, представляет собой линейную комбинацию волн Лэмба. При этом смещения симметричной и антисимметричной мод складываются в фазе на верхней стороне и в противофазе на нижней стороне. В результате такая комбинация волн Лэмба может быть интерпретирована как модифицированная рэлеевская волна, распространяющаяся вблизи верхней стороны подложки [2]. На нижней стороне подложки может распространяться аналогичная волна. Вследствие разницы скоростей симметричной и антисимметричной мод на некотором расстоянии от ВШП разность фаз между ними меняется на 180° , и их комбинация выглядит уже, как модифицированная рэлеевская волна, распространяющаяся вблизи нижней стороны подложки. Таким образом, распространение волн сопровождается перекачкой энергии с

одной стороны подложки на другую. При толщине подложки, значительно превышающей длину волны, смещения в модах Лэмба затухают экспоненциально к центру пластинки. По этой причине волны Рэлея, распространяющиеся на противоположных плоскостях, практически не связаны друг с другом.

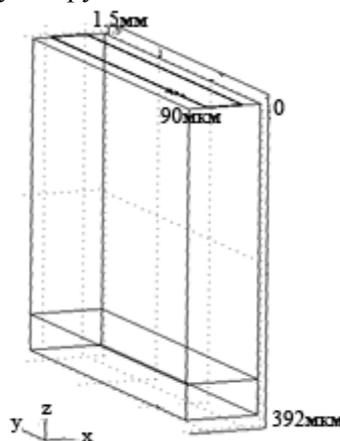


Рисунок 7 – Периодическая структура, моделируемая в пакете Comsol Multiphysics

Моделирование проводилось в программном пакете Comsol Multiphysics. В качестве модели выбрана бесконечная в направлении распространения волны периодическая структура (рисунок 7). Достаточно широкие возможности пакета Comsol Multiphysics позволили учесть наличие электродов, возбуждающих волны, и промоделировать процесс распространения волн в бесконечной периодической системе из этих электродов.

Частотная зависимость проводимости ВШП приведена на рисунке 8. Сдвоенные резонансные пики — характерный признак наличия естественной однонаправленности. Это явление связано с тем, что фаза отражения волны от электродов отличается от фазы возбуждения волны. Наличие естественной однонаправленности для рэлеевской волны на данном срезе лангасита описывается во многих публикациях, например в [4]; для волн Лэмба оно описывается впервые. Для подтверждения того факта, что сдвоенные пики обусловлены отражением, была промоделирована структура, в которой использовались расщепленные электроды с шириной штырей и зазоров, равной $1/8$ от периода ВШП. В такой структуре волны, отраженные парой штырей расщепленного электрода, складываются в противофазе, в итоге отражение от электродов отсутствует. Результат моделирования демонстрирует одиночный пик для каждой моды, что подтверждает данное предположение и тем самым подтверждает эффект естественной однонаправленности и для лэмбовских волн.

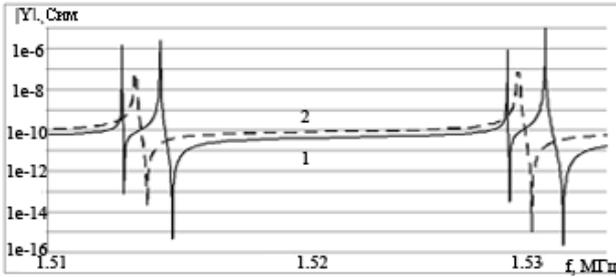


Рисунок 8 – Зависимость модуля проводимости $|Y|$ от частоты f ; 1 – бесконечная периодическая структура ВШП, 2 – бесконечная периодическая структура ВШП с расщепленными электродами

Моделирование влияния поглощающего слоя. Поглощающий слой расположен на стороне подложки, обратной ВШП. Модули упругости и плотность материала этого слоя в данной модели не отличаются от модулей упругости и плотности материала подложки. Величина акустических потерь в поглощающем слое задавалась путем изменения коэффициента потерь η_s и варьировалась от малых значений, вносящих незначительный вклад, до значений затухания, при которых происходило качественное изменение волн, распространяющихся в данной структуре.

При увеличении коэффициента потерь до величины 0,01 сохраняются симметричная и антисимметричная моды Лэмба (рисунок 9); при этом снижается добротность резонансов, причем левые пики каждой из мод подавляются сильнее правых, что говорит об изменении фазы коэффициента отражения, соответствующего снижению однонаправленности.

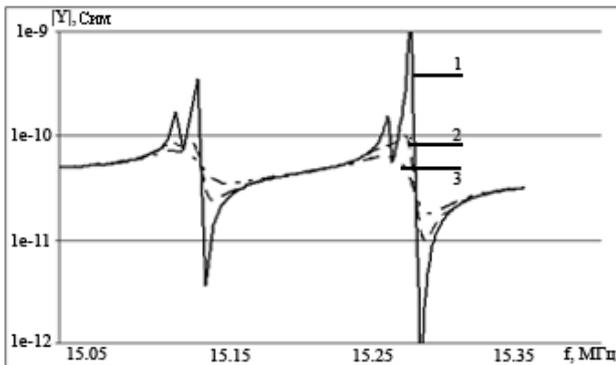


Рисунок 9 – Зависимость модуля проводимости $|Y|$ от частоты f при наличии поглощающего слоя с различными значениями коэффициента потерь η_s : $\eta_s = 0,001$ (1), $\eta_s = 0,005$ (2), $\eta_s = 0,01$ (3)

При изменении коэффициента потерь в диапазоне от 0,01 до 0,1 происходит очень сильное снижение добротности соответствующих волн Лэмба резонансов вплоть до полного их исчезновения и появляется новая волна, скорость которой близка к скорости релеевской волны (рисунок 10).

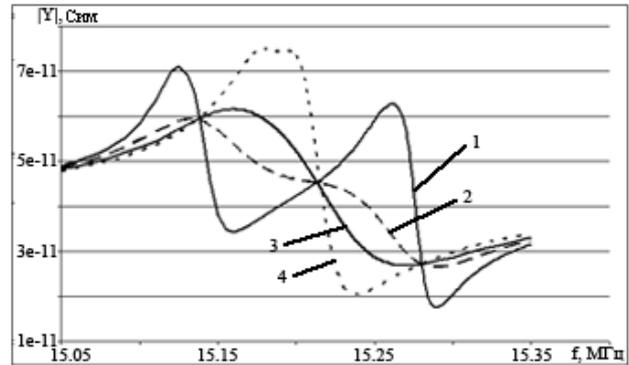


Рисунок 10 – Зависимость модуля проводимости $|Y|$ от частоты f при наличии поглощающего слоя с различными значениями коэффициента потерь η_s : $\eta_s = 0,01$ (1), $\eta_s = 0,03$ (2), $\eta_s = 0,05$ (3), $\eta_s = 0,1$ (4)

При дальнейшем увеличении коэффициента потерь в поглощающем слое происходит увеличение добротности резонанса и раздвоение пика проводимости (рисунок 11). Это связано с усилением отражения волны от границы между подложкой и поглощающим слоем, приводящим к тому, что только малая часть энергии волны проникает в поглощающий слой. В результате можно получить достаточно добротный резонанс, несмотря на высокие потери в поглощающем слое. При этом граничные условия на нижней границе существенно отличаются от граничных условий на свободной поверхности; соответственно в такой структуре распространяется иная волна, отличная от волн Лэмба.

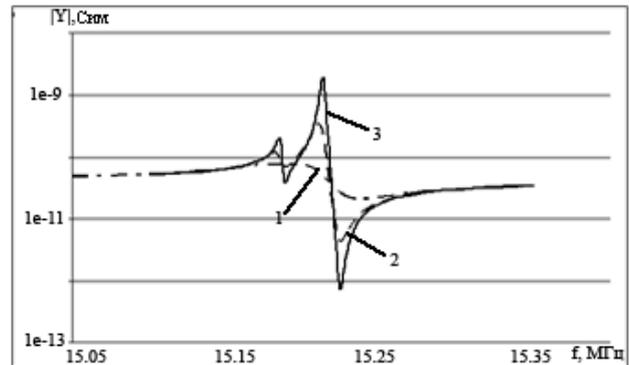


Рисунок 11 – Зависимость модуля проводимости $|Y|$ от частоты f при наличии поглощающего слоя с различными значениями коэффициента потерь η_s : $\eta_s = 0,1$ (1), $\eta_s = 0,5$ (2), $\eta_s = 2$ (3)

Заключение. В статье впервые показывается наличие естественной однонаправленности у низших мод волны Лэмба на кристалле лантангаллиевого силиката. Возможности изучения данного явления существенно расширяются благодаря развитию программных средств расчета методом конечных элементов, позволяющих производить расчет для пластин из нескольких слоев анизотропных материалов с электро-

дами произвольной формы. Показано влияние на волны Лэмба слоя с высокими акустическими потерями, находящегося на противоположной ВШП стороне пластины, при наличии естественной однонаправленности. Результаты представляют практический интерес с точки зрения возможности построения датчиков.

Библиографический список

1. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэля и Лэмба в технике. – М.: Наука, 1966. – 199 с.

2. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 416 с.

3. S. Zhgoon, D. Tsimbal, A. Shvetsov, K. Bhattacharjee. 3D Finite Element Modeling of Real Size SAW Devices and Experimental Validation // 2008 IEEE Ultrasonics Symp. – P. 1932-1935.

4. R. Fachberger, E. Riha, E. Born, W. Ruile, U. Wolff, P. Pongratz, S. Kronholz. NSPUDT resonator on langasite // 2002. IEEE Ultrasonics Symp. – P. 484-487.