АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2002, том 48, № 2, с. 195–199

УДК 548.53+534.22

ОТРАЖЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ТОНКИХ ПЛАСТИНАХ ОТ РЕШЕТКИ С ПЕРИОДИЧЕСКИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ

© 2002 г. С. Г. Джоши*, Б. Д. Зайцев, И. Е. Кузнецова

Институт радиотехники и электроники РАН,
410019 Саратов, ул.Зеленая 38
E-mail: zaitsev@ire.san.ru
**Department of Electrical and Computer Engineering, Marquette University*
Milwaukee, Wisconsin 53201-1881, USA

Поступила в редакцию 29.12.99 г.

Теоретически и экспериментально исследовано отражение нормальных акустических волн нулевого порядка, распространяющихся в тонкой пьезоэлектрической пластине, от системы проводящих полосок конечной толщины. Анализ показал, что эффекты электрического закорачивания и упругой нагрузки действуют на отношение импедансов соседних участков в противоположных направлениях. Действия указанных эффектов могут быть соизмеримы и для каждого типа волн существует определенное значение толщины полосок, при которой коэффициент отражения становится равным нулю. Экспериментальные результаты, полученные для нормальной акустической волны с горизонтально-поперечной поляризацией (SH_0 волна), распространяющейся в пластине ниобата лития, находятся в хорошем соответствии с теорией и подтверждают возможность применения для анализа подобных отражателей модели, основанной на эквивалентных схемах.

Отражатель нормальных акустических волн является полезным и зачастую незаменимым компонентом для многих практических применений [1, 2]. Такие отражатели используются в резонаторах, однонаправленных преобразователях поверхностных волн, линиях задержки с малыми паразитными сигналами, направленных ответвителях, фильтрах различного назначения и т.д. Несколько типов отражательных решеток, основанных на использовании электрических и механических нагрузок, а также на протравленных в подложке канавках, были успешно применены для разработки отражателей поверхностных акустических волн (ПАВ).

В последнее время нормальные акустические волны в тонких пластинах стали предметом пристального внимания ввиду ряда их уникальных особенностей, которые позволяют разрабатывать перспективные датчики и устройства обработки сигналов, а также изучать свойства материалов [3]. Очевидно, что перечисленные выше типы отражателей ПАВ могут быть также применены и для отражения акустических волн в пластинах. Теоретическое и экспериментальное исследование отражения нормальной акустической волны нулевого порядка с горизонтально-поперечной поляризацией (SH_0 волна) от системы тонких проводящих электродов, нанесенных на поверхность Y–X ниобата лития, было проведено в [4]. Полученные результаты показали, что отражение нормальных акустических волн в пластинах более эффективно, чем в случае ПАВ, распространяющихся в том же самом материале. Это связано с большей электромеханической связью волн в пластинах по сравнению с ПАВ. Физические представления позволяют сделать предположение, что решетки с периодической механической нагрузкой будут также более эффективными для волн в пластинах. В данной статье представлены первые результаты исследования отражения нормальных акустических волн нулевого порядка от решетки с периодической механической нагрузкой.

Для расчета характеристик такого отражателя использовалась эквивалентная схема, состоящая из чередующихся отрезков звукопроводов с различными волновыми импедансами. Теоретический анализ показал, что эффективное отражение нормальных акустических волн нулевого порядка может быть достигнуто решеткой со сравнительно небольшим числом элементов. Экспериментальное исследование отражателя SH_0 волны на основе полосок из серебра, нанесенных на тонкую пластину ниобата лития, показало хорошее соответствие с выводами теории. Это подтвердило возможность применения используемой модели для анализа отражения акустических волн в пьезоэлектрических пластинах, обусловленного чисто механической нагрузкой.

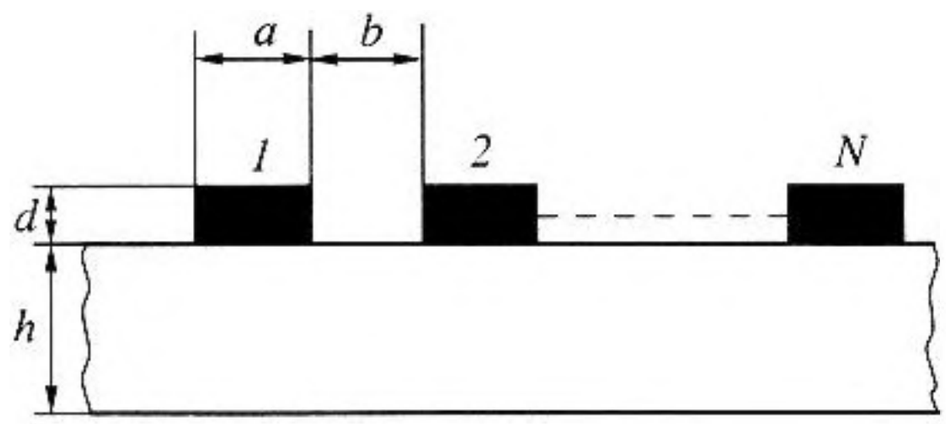

Рис. 1. Структура отражателя волн в пластине с N отражательными элементами.

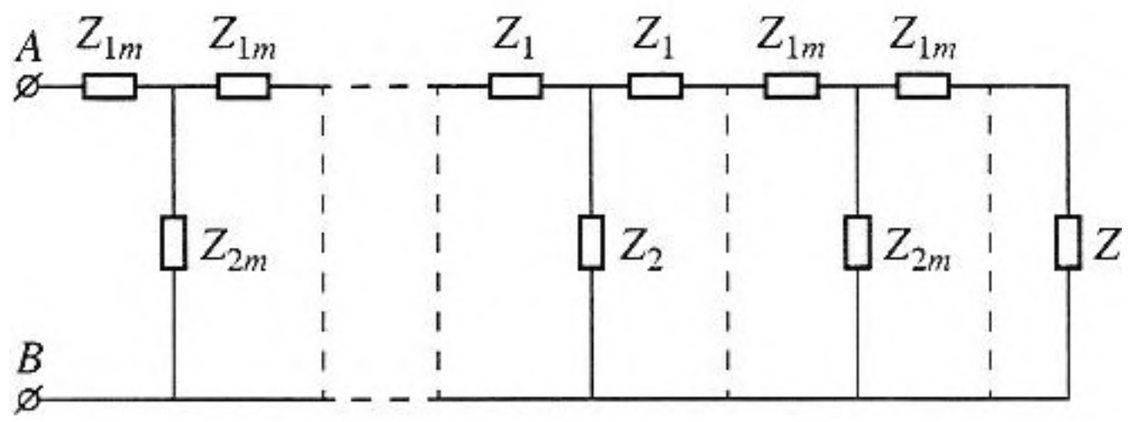

Рис. 2. Эквивалентная схема отражателя с механической нагрузкой.

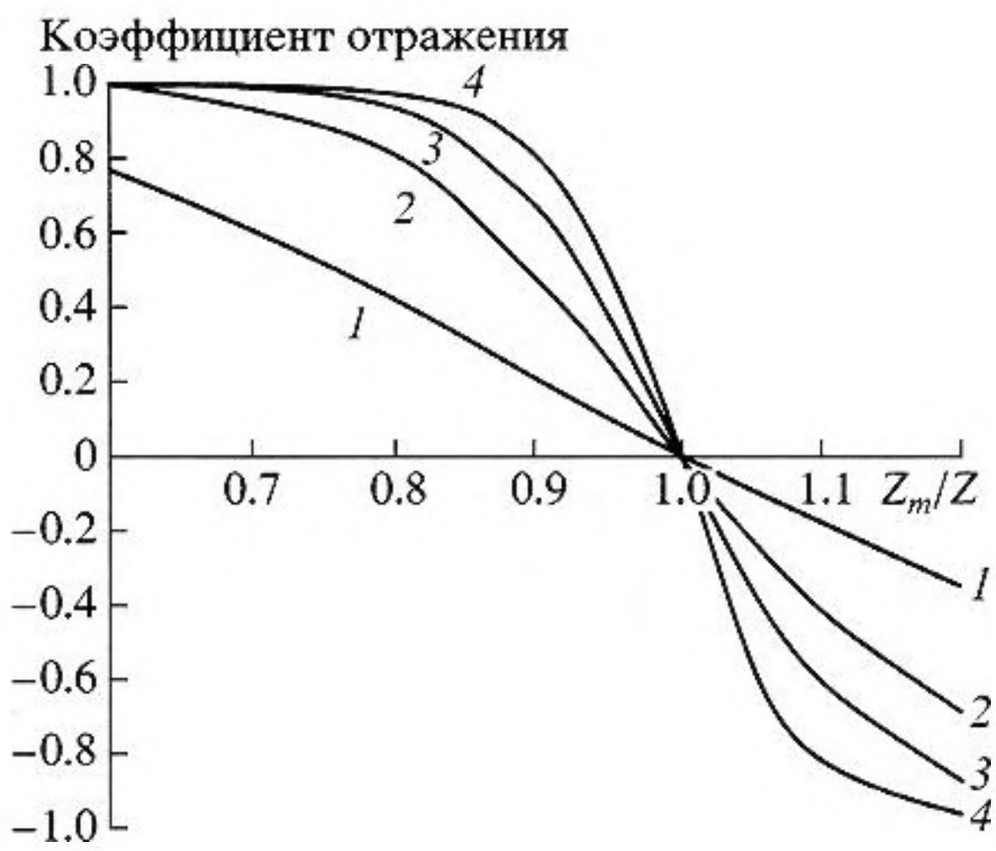

Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от отношения импедансов Z_m/Z на центральной частоте для различного числа полосок N в отражательной решетке: $N = 2$ (*1*), 5 (*2*), 8 (*3*), 12 (*4*).

Рассмотрим теоретическую модель отражателя с механической нагрузкой. Структура отражателя с механической нагрузкой показана на рис. 1. Он представляет собой решетку из полосок конечной толщины, которые нанесены на поверхность пластины. Соседние участки имеют различные акустические импедансы и поэтому распространяющаяся волна, отражаясь от каждой полоски, создает результирующую отраженную волну. Работа такого отражателя с учетом многократных внутренних переотражений может быть проанализирована с помощью эквивалентной схемы, традиционно используемой для поверхностных акустических волн [5]. Эта схема была модифицирована для описания отражения акустических волн в пластинах системой тонких проводящих электродов [4]. В модифицированной схеме отсутствуют электромеханические трансформаторы, поскольку указанные электроды не соединены между собой. Эта модифицированная схема, используемая в данной работе, представлена на рис. 2. Каждый элемент решетки представлен T-образным звеном и значения элементов схемы определяются как

$$Z_1 = iZ\mathrm{tg}(kb/2), \tag{1}$$

$$Z_2 = -iZ/\sin(kb), \tag{2}$$

$$Z_{1m} = iZ_m\mathrm{tg}(k_m a/2), \tag{3}$$

$$Z_{2m} = -iZ_m/\sin(k_m a). \tag{4}$$

Здесь a и b – длины участков отражателя (см. рис. 1) с механической нагрузкой и без нее, соответственно, а $Z = v\rho S$ и k означают полный механический импеданс и волновое число в пластине без нагрузки, где ρ – плотность, v – скорость волны, а S – площадь поперечного сечения акустического волновода. Что касается $Z_m = v_m\rho_m S_m$ и k_m, они означают те же самые величины для механически нагруженных участков, где ρ_m и S_m эффективные значения плотности и поперечного сечения двуслойного волновода. Смысл этих двух величин будет раскрыт позже. Полный коэффициент отражения R всей решетки можно определить из соотношения $R = (Z - Z_{in})/(Z + Z_{in})$, где Z_{in} – это полный входной импеданс всего отражателя. В целом, эквивалентная схема, показанная на рис. 2, позволяет рассчитать коэффициент отражения, как функцию частоты и числа отражательных элементов, для различных значений отношения импедансов соседних участков Z_m/Z. Очевидно, что отражение акустической волны возникает благодаря скачку волновых характеристик элементов решетки, а именно, когда отношение $Z_m/Z \neq 1$. При этом коэффициент отражения тем больше, чем сильнее величина Z_m/Z отличается от 1. Характерные зависимости коэффициента отражения от отношения Z_m/Z на центральной частоте для различного числа полосок в решетке показаны на рис. 3.

Оценим теперь отношение импедансов Z_m/Z для отражателя с механической нагрузкой. В случае тонких проводящих электродов без учета их массы $Z_m/Z = v_m/v$ [4]. В случае решетки с периодической механической нагрузкой ситуация усложняется, поскольку прилегающие участки отличаются не только скоростью, но также плотностью и поперечным сечением. В качестве эффективной плотности для механически нагруженного участка решетки использовалось усред-

ненное по поперечному сечению волновода значение, т.е. отношение плотностей определялось формулой $\rho_m/\rho = [\rho h + \rho_1 d)]/\rho(h + d)$, где ρ_1 и d – это плотность и толщина слоя, соответственно. Отношение площадей определялось как $S_m/S = (h + d)/h$.

Для нахождения скоростей v и v_m был проведен строгий анализ нормальных акустических волн нулевого порядка, распространяющихся в однослойных и двуслойных волноводах на основе ниобата лития. Предполагалось, что толщина подложки намного меньше, чем длина волны λ, т.е. отношение $h/\lambda \ll 1$. При таком условии в пластине могут распространяться только две нормальные волны Лэмба (антисимметричная A_0 и симметричная S_0 волны), а также нормальная волна SH_0 с поперечно-горизонтальной поляризацией. Для каждой из этих волн срез, направление распространения и толщина пластины выбирались исходя из условия максимума коэффициента электромеханической связи K. Для ниобата лития эти ситуации для каждой моды являются следующими [6]: $Y + 128°$ – срез, X-направление распространения и $h/\lambda = 0.25$ для A_0 волны; Y-срез, $X + 50°$ – направление распространения и $h/\lambda = 0.1$ для S_0 волны; и Y-срез, X-направление распространения и $h/\lambda = 0.1$ для SH_0 волны.

В качестве механических нагрузок использовались металлические слои, отличающиеся простотой технологии нанесения и широким выбором значений акустического импеданса. Вначале определялась скорость волны v для выбранной толщины пластины h/λ. В этом случае использовался метод, описанный ранее в [7]. Для нахождения скорости v_m анализировалось распространение акустических волн в двуслойной структуре, содержащей пьезоэлектрическую подложку и идеально проводящий упругий слой конечной толщины. Для этого использовались стандартные уравнения движения для обеих упругих сред, уравнение Лапласа для пьезопластины и вакуума, а также соответствующие уравнения состояния. Что касается механических и электрических граничных условий, мы использовали: (I) непрерывность механических напряжений и механического смещения, а также равенство нулю потенциала на границе раздела двух упругих сред, (II) непрерывность электрического потенциала и нормальной компоненты электрического смещения, а также равенство нулю механического напряжения на границе пьезоэлектрика с вакуумом, и (III) равенство нулю механического напряжения на границе слоя с вакуумом. Теоретический анализ позволил найти зависимость скорости от нормализованной толщины h/λ_m для заданного отношения d/h. Затем для нахождения скорости v_m и

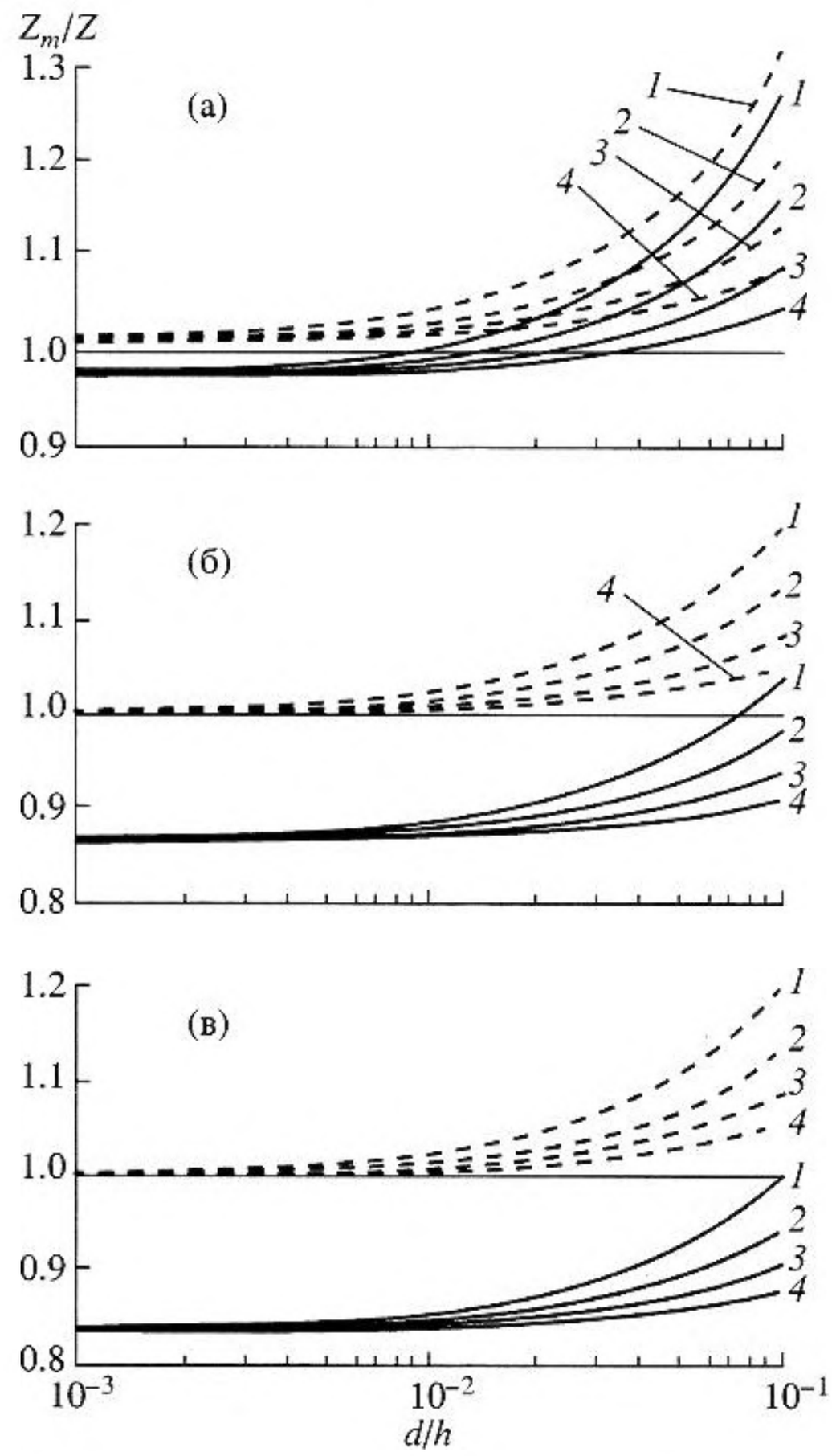

Рис. 4. Зависимость отношения импедансов Z_m/Z от d/h для A_0 (а), S_0 (б) и SH_0 (в) волн для слоев из золота (*1*), серебра (*2*), титана (*3*) и алюминия (*4*). Участки между полосками являются электрически открытыми (сплошные линии) и электрически закороченными тонкой проводящей пленкой (пунктир).

нормализованной толщины пластины h/λ_m применялось условие

$$(h/\lambda_m)v_m = (h_1/\lambda_1)v, \tag{5}$$

которое означает, что частота волны, распространяющейся внутри и вне нагруженных участков одна и та же.

Рассчитанные зависимости отношения импедансов как функции d/h представлены на рис. 4 для A_0 (а), S_0 (б) и SH_0 (в) волн, соответственно. В качестве материалов для механической нагрузки были использованы золото, серебро, титан и алюминий, имеющие различные значения плотности: 19.31, 10.5, 4.5 и 2.7 г/см^3, соответственно. Плотность ниобата лития составляла 4.628 г/см^3. На рис. 4 представлены результаты для двух ситу-

аций: участки между полосками являются электрически открытыми (сплошные линии) и электрически закороченными тонкой проводящей пленкой (пунктир).

В первом случае присутствуют два эффекта: механическая нагрузка поверхности и электрическое ее закорачивание. При этом электрическое закорачивание поверхности уменьшает акустический импеданс, в то время как механическая нагрузка с ростом толщины слоя увеличивает его. Таким образом, указанные эффекты действуют как бы в противоположных направлениях, т.е. для определенных значений d/h, отношение акустических импедансов становится равным единице. Это соответствует случаю, когда электрический и механический эффекты компенсируют друг друга и полный коэффициент отражения становится равным нулю.

Когда участки между полосками электрически закорочены, скачок электрических граничных условий отсутствует и имеет место отражение, обусловленное только механической нагрузкой.

Эти зависимости позволяют оптимизировать ситуацию, когда отношение импедансов достаточно для получения эффективного отражателя, обусловленного чисто механической нагрузкой.

В соответствие с результатами, представленными выше, был проведен эксперимент по отражению SH_0 волны от решетки с чисто механической нагрузкой. Акустический волновод был выполнен на основе пластины из ниобата лития Y среза, направление распространения волны было выбрано вдоль оси X. Для возбуждения акустической волны на рабочей частоте 3 МГц использовался встречно-штыревой преобразователь с периодом 1.2 мм и 2 парами штырей. Чтобы уменьшить отражение акустической волны от преобразователя и снизить уровень сигналов многократного переотражения, преобразователь был выполнен на основе расщепленных электродов. Электрическая емкость преобразователя была скомпенсирована соответствующей индуктивностью, а его согласование с линией передачи осуществлялось с помощью согласующего трансформатора. Отражатель, состоящий из 5 полосок серебра толщиной 10 мкм, с периодом 0.6 мм был нанесен на поверхность пластины вакуумным напылением. Чтобы получить хорошую адгезию отражательных полосок вначале была нанесена сплошная тонкая пленка хрома. Она закорачивала тангенциальные компоненты электрического поля, сопровождающего волну на ненагруженных участках и таким образом, отражение возникало только благодаря чисто механической нагрузке. Измерение амплитуд падающей $A_п$ и отраженной $A_о$ волн было выполнено в импульсном режиме с помощью электростатического зонда [4]. Этот зонд представлял собой отрезок коаксиальной линии, центральный проводник которой оканчивался тонкой вольфрамовой иглой диаметром 100 мкм. Противоположный конец коаксиальной линии с помощью кабеля подключался непосредственно к измерительному осциллографу. Зонд касался вольфрамовой иглой поверхности пьезоэлектрика и с помощью прецизионного механизма мог плавно перемещаться от преобразователя к отражателю. При распространении импульса акустической волны на выходе зонда появлялся электрический сигнал, пропорциональный напряженности пьезоэлектрического поля, сопровождающего волну. Изменение положения зонда позволяло получить на экране осциллографа четкое разделение во времени импульсов, соответствующих падающей и отраженной волнам. После измерения их амплитуд коэффициент отражения R вычислялся как $R = A_о/A_п$. Чтобы изучить отражение акустических волн при различных значениях величины d/h, толщина пластины была уменьшена путем ее полировки с обратной стороны. Для этой цели использовался специальный стеклянный блок для закрепления исследуемой пластины, описанный ранее в [8]. Такая технология позволила уменьшить толщину пластины от ее начального значения 500 мкм до конечной толщины 100 мкм и измерить характеристики отражателя для нескольких промежуточных значений d/h. Коэффициент отражения, полученный из эксперимента, и рассчитанный с учетом электрического закорачивания поверхности представлен на рис. 5 как функция толщины пластины. Видно хорошее

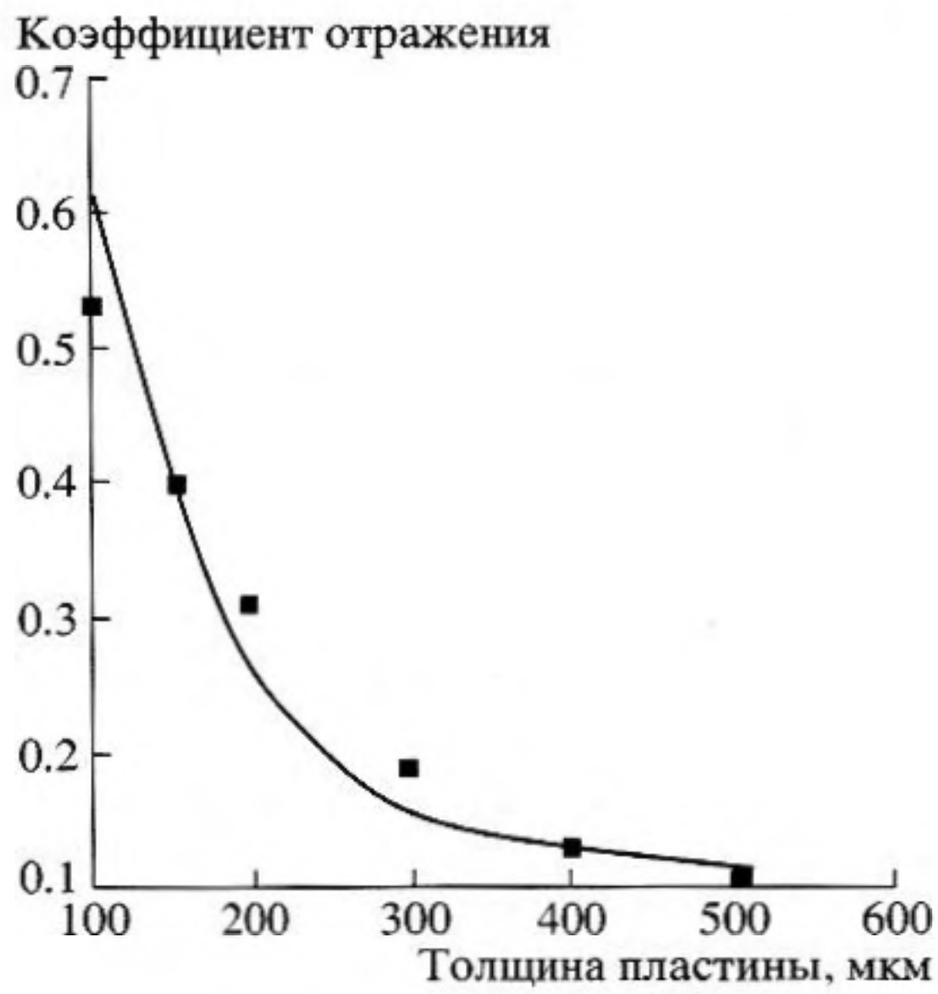

Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от толщины пластины для SH_0 волны, распространяющейся в пластине ниобата лития Y – среза вдоль оси X. Сплошная линия соответствует теоретической зависимости, квадраты – эксперименту.

совпадение экспериментальных и теоретических зависимостей.

В заключение отметим, что теоретический анализ показал, что для отражателя, основанного на системе проводящих полосок конечной толщины, эффекты электрического закорачивания и упругая нагрузка действуют на отношение импедансов соседних участков в противоположных направлениях. Было показано, что эффективность отражателя акустических волн в пластинах вследствие механической нагрузки и электрического закорачивания поверхности соизмеримы. Поэтому для каждого типа волн существует определенное значение толщины полосок, при которой коэффициент отражения становится равным нулю. Этот вывод имеет важное практические значение для разработки отражателя с регулируемым коэффициентом отражения. Полученные экспериментальные результаты находятся в хорошем соответствии с теорией и подтверждают возможность применения для анализа подобных отражателей модели, основанной на эквивалентных схемах. Данная работа выполнена при финансовой поддержке гранта Национального Научного Фонда США.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Campbell C.K.* Surface acoustic wave devices for mobile and wireless communications // San Diego, Academic Press, 1998.
2. *Williamson R.C.* Reflection grating filters // Surface wave filters / Ed. Matthews H. New York: Wiley. Ch. 9. 1977.
3. *Ballantine D.S., White R.M., Martin S.J., Ricco A.J., Zellers E.T., Frye G.C., and Wohltjen H.* Acoustic wave sensors. San Diego: Academic Press, 1997.
4. *Zaitsev B.D., Joshi S.G.* Reflection of ultrasonic Lamb waves produced by thin conducting strips // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., and Freq. Contr. 1999. V. 46. № 5. P. 1539–1544.
5. *Smith W.R.* Circuit – model analysis and design of interdigital transducers for surface acoustic wave devices. In Physical Acoustics. V. 15. New York, Academic Press, 1981.
6. *Бородина И.А., Джоши С.Г., Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е.* Исследование акустических волн в пластинах ниобата лития // Акуст. журн. 2000. Т. 46. № 1. С. 62–66.
7. *Joshi S.G. and Jin Y.* Propagation of ultrasonic Lamb waves in piezoelectric plates // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. P. 4113–4120.
8. *Zaitsev B.D., Joshi S.G. and Kuznetsova I.E.* Propagation of QSH (quasi – shear – horizontal) acoustic waves in piezoelectric plates // IEEE Trans. on Ultras., Ferroel., and Freq. Contr. 1999. V. 46. № 5. P. 1298–1302.

Reflection of Normal Acoustic Waves in Thin Plates from a Grating with a Periodically Distributed Mechanical Load

S. G. Joshi*, B. D. Zaitsev, and I. E. Kuznetsova

Institute of Radio Engineering and Electronics, Russian Academy of Sciences, Saratov Branch, ul. Zelenaya 38, Saratov, 410019 Russia

e-mail: zaitsev@ire.san.ru

** Department of Electrical and Computer Engineering, Marquette University, Milwaukee, WI 53201, USA*

Reflection of zero-order normal acoustic waves excited in a thin piezoelectric plate from a set of conducting strips of a finite thickness is studied both theoretically and experimentally. The analysis shows that the effects produced by the short-circuiting of the plate surface and by the elastic load on the impedance ratio of adjacent plate segments are in opposition to each other. These effects can be commensurable, and, hence, for each wave type, there is a certain value of the strip thickness at which the reflection coefficient becomes equal to zero. The experimental results obtained for a shear horizontal normal wave (an SH_0 wave) propagating in a lithium niobate plate are in good agreement with the theory and justify the use of the equivalent-circuit model in analyzing the properties of reflectors of the type under study.