

УДК 534.21

АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЧ ВОЛН ЛЭМБА В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ АЛМАЗА

© 2021 г. Г. М. Квашнин^{a, **}, Б. П. Сорокин^{a, *}, С. И. Бурков^b

^aТехнологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов,
ул. Центральная 7а, Москва, Троицк, 108840 Россия

^bСибирский федеральный университет, Свободный пр. 82А, Красноярск, 660041 Россия

*e-mail: bpsorokin1953@yandex.ru

**e-mail: genmih@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.02.2020 г.

После доработки 26.07.2021 г.

Принята к публикации 03.08.2021 г.

Выполнено 1D и 2D моделирование возбуждения и распространения волн Лэмба в пьезоэлектрических слоистых структурах “Al/AlN/(100) алмаз” и “Al-ВШП/AlN/(100) алмаз” (с конфигурацией ПАВ-резонатора) соответственно. Рассчитано распределение упругих смещений в волнах Лэмба различных порядков, идентифицированы типы мод и исследованы дисперсионные зависимости фазовых скоростей, включая возбуждение на сверхвысоких частотах. Значения фазовых скоростей, вычисленные из 1D и 2D моделей, находятся в хорошем соответствии с найденными из эксперимента. Показано, что выше частоты синхронизма ВШП в этих структурах возникают резонансы, связанные с возбуждением волн Лэмба в подложке. Добротность этих резонансов гораздо выше, чем у резонансов на поверхностных акустических волнах, что подтверждено экспериментальными данными. Рассчитанные из 2D модели амплитудно-частотные характеристики и частотные зависимости добротности находятся в хорошем соответствии с экспериментом.

Ключевые слова: метод конечных элементов, фазовая скорость, добротность, поверхностная акустическая волна, объемная акустическая волна, волна Лэмба, монокристаллический алмаз, нитрид алюминия, пьезоэлектрическая слоистая структура

DOI: 10.31857/S0320791921060058

ВВЕДЕНИЕ

Композитные акустоэлектронные устройства на основе пьезоэлектрических слоистых структур (ПСС) имеют ряд преимуществ, если сравнивать их с традиционными компонентами на поверхностных (ПАВ) или объемных (ОАВ) акустических волнах, в которых используют объемные пьезоэлектрические монокристаллы. Практическое применение ПАВ обычно ограничено частотами 2–3 ГГц вследствие взаимодействия с воздухом и значительного увеличения акустического затухания. Устройства на ОАВ, в которых используются такие пьезоэлектрики, как кварц, ниобат и танталат лития, лангасит, к настоящему времени реализованы на частотах от единиц МГц до 5–6 ГГц. Благодаря использованию высокодобротных монокристаллических подложек в сочетании с эффективными пьезоэлектрическими пленками нитрида алюминия AlN или нитрида алюминия-скандия (Al_{1-x}Sc_x)N (ASN) возбуждение объ-

емных акустических волн в композитном многообертоном резонаторе с алмазной подложкой было получено в широком диапазоне частот от 0.3 до 20 ГГц с нагруженной добротностью ~13000 [1–3]. Однако по сравнению с ОАВ-устройствами, применение ПАВ позволяет получить более разнообразный спектр акустоэлектронных компонентов благодаря применению встречно-штыревых преобразователей (ВШП) различного дизайна. В качестве перспективной альтернативы ПАВ можно рассматривать волны Лэмба (ВЛ), которые могут быть применены в акустоэлектронных устройствах и сенсорах, поскольку такие волны, распространяющиеся преимущественно в объеме подложки, имеют меньшее затухание на более высоких частотах. При этом возбуждение ВЛ можно также осуществить посредством ВШП [4]. Теория распространения ВЛ в бесконечной изотропной пластине со свободными границами была разработана Лэмбом в 1917 г. [5]. Викторов [6]

предложил систематическое описание акустических свойств волн Лэмба, распространяющихся в изотропных средах. В работе [7] рассмотрена теоретическая основа распространения упругих волн в пьезоэлектрической слоистой структуре, и в качестве примера получены результаты для волноводной структуры “Me/ZnO/Me/алмаз”. Волны Лэмба, а также другие волноводные моды в тонких пьезоэлектрических пластинах ниобата лития, танталата лития, ниобата калия и силикосилленита подробно исследованы в работах [8–15]. В работе [16] исследовано большое количество ПСС на основе пластин *ST*-среза кварца, покрытых пленками ZnO и AlN, и вариантов возбуждения SH-волн и ВЛ посредством ВШП на частотах в десятки МГц. В последнее время активно изучаются волны Лэмба в тонких пленках для использования, например, в устройствах частотного контроля и сенсорах [17]. Используя ВШП для возбуждения ПАВ и ВЛ, авторы [18] исследовали ряд СВЧ устройств на тонких пьезоэлектрических пластинах – резонаторы с брэгговским отражателем на основе 50° *YX*-среза LiTaO₃ и *X*-среза LiNbO₃, а также резонатор мембранного типа на основе *Z*-среза LiNbO₃. Рассмотренные устройства были исследованы на частотах до 2–3 ГГц. В работе [19] исследовано распространение волн Лэмба в слоистой структуре ZnO/SiC, предназначенной для композитного мембранного резонатора, и показана возможность создания микро-сенсора давления с высоким разрешением. В статье [20] авторы рассмотрели возбуждение СВЧ волн Лэмба в тонкой пластинке *ZY*-LiNbO₃ с помощью ВШП. В работе [21] рассмотрены некоторые особенности возбуждения СВЧ волн Лэмба с помощью ПАВ-резонатора на ПСС “Al/AlN/(100) алмаз”. В частности, обсуждаются условия возбуждения волн Лэмба вследствие дифракции ОАВ на периодической решетке ВШП, нанесенной на поверхность ПСС с подложкой толщиной *h*.

Однако, несмотря на значительное количество публикаций по исследованиям волн Лэмба, совершенно недостаточно изучен вопрос о распространении ВЛ в композитных пьезоэлектрических слоистых структурах, включая микроволновые частоты.

Целью данной работы является моделирование распространения, анализ структуры и идентификация СВЧ волн Лэмба в ПСС “Al-ВШП/AlN/(001) алмаз”. Статья логически увязана с работой, где опубликованы результаты экспериментальных исследований возбуждения СВЧ поверхностных акустических волн и волн Лэмба в пьезоэлектрической слоистой структуре на основе алмаза [22].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЛЭМБА НА СВЧ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ “Al-ВШП/AlN/(100) АЛМАЗ”

Возбуждение и регистрация как волн поверхностных типов, так и волн Лэмба может осуществляться различными способами, в том числе с помощью встречно-штыревого преобразователя, нанесенного на поверхность пьезоэлектрической среды. В настоящее время хорошо развита технология изготовления ВШП, что упрощает изучение и применение волн Лэмба в акустоэлектронных приборах и неразрушающем контроле.

2D моделирование процессов возбуждения и распространения волн Лэмба на примере ПСС “Al-ВШП/AlN/(100) алмаз” выполнено с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics в приближении Plane Strain. При моделировании методом конечных элементов использовали сетку Free Triangular, максимальный размер ячейки которой не превышал 1/20 длины волны звука в исследуемом материале. Исследовали модель ПСС, показанную на рис. 1, с неаподизированными ВШП с различным периодом *d*. На активные электроды (ВШП) подавали СВЧ сигнал с напряжением 1 В, а на отражающие электроды (многополосковый отражатель, МПО) накладывалось условие Floating Potential. Для предотвращения отражения акустических волн от боковых стенок образца использовали граничное условие идеального согласованного слоя (Perfect Matching Layer, PML).

Частоту синхронизма ВШП вычисляли по известной формуле

$$f_0 = V/d, \quad (1)$$

где *V* – фазовая скорость волны Рэлея (R) или Лэмба, а *d* = λ (λ – длина волны мод R или ВЛ). Поперечные размеры и толщины ВШП, пьезоэлектрической пленки и алмазной подложки соответствовали экспериментальному образцу однопортового ПАВ-резонатора, в состав которого входили активный ВШП и два многополосковых отражателя. Количество штырей в отражающей решетке составляло 100, в ВШП имелось 50 пар штырей. Толщина Al ВШП составляла 135 нм, пленки AlN – 4.35 мкм и алмазной подложки – 458 мкм. Пленка AlN имела ориентацию (00·1). Параметры материальных свойств – плотности, упругие константы пленок и монокристаллического алмаза – были взяты из [23–25]. Подробно результаты эксперимента описаны в нашей работе [22]. Экспериментальная точность измерения частоты векторным анализатором цепей E5071C

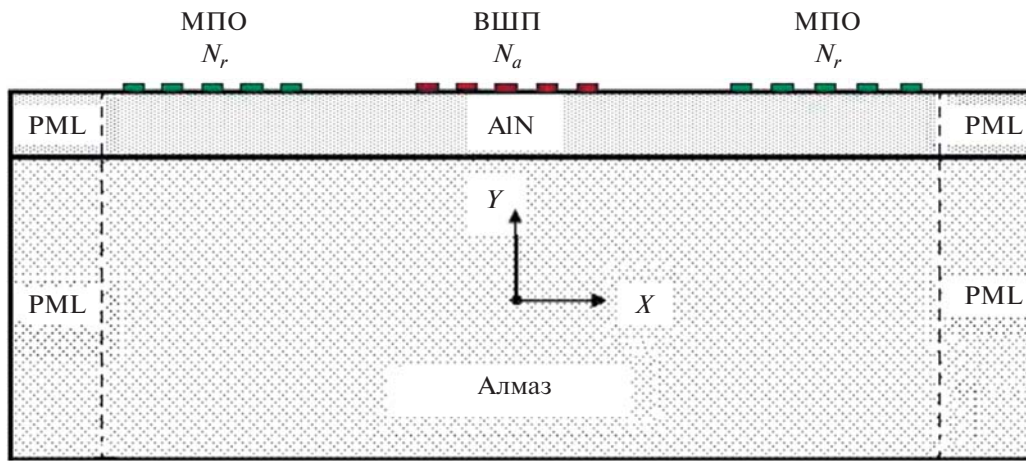


Рис. 1. 2D модель ПАВ-резонатора со структурой “Al-ВШП/AlN/алмаз”. Распространение ПАВ и волн Лэмба – вдоль направления $X \parallel [110]$ в плоскости (001) алмаза. МПО – многополосковый отражатель. N_a и N_r – количество пар электродов в активной (ВШП) и отражающей (МПО) областях соответственно. Идеальный согласованный слой (Perfect Matching Layer, PML) выбран с целью устранения отражения упругих волн от боковых границ резонатора.

составляла ± 0.1 кГц и лучше при увеличении числа точек. В измерениях ПАВ-резонатора для целей данной работы была достаточной точность ± 10 кГц. Надо также иметь в виду, что точность определения периода ВШП составляла $\pm 0.1\text{--}0.2$ мкм. Тем самым расчетное значение погрешности фазовой скорости ограничивалось практически значением ± 1 м/с.

Идентификация антисимметричного (A_n) или симметричного (S_n) типов волн Лэмба в ПСС “Al-ВШП/AlN/(001) алмаз”, а также установление их порядков n осуществлялись путем определения числа узлов и пучностей стоячей волны в пределах толщины структуры, а также относительного положения Y -компонент упругих перемещений на верхней и нижней поверхностях пластины. Так, в качестве примера на рис. 2 представлена картина упругих смещений, связанных с симметричной модой Лэмба S_{31} . Темные области обозначают движение частиц в вертикальном направлении вниз, светлые – движение вверх соответственно. Кроме того, векторы упругих смещений показаны в виде стрелок. Как следует из рис. 2б, Y -смещения сверху и снизу, рассматриваемые относительно заданного вертикального направления, происходят в противофазе. Поэтому данную моду следует классифицировать как симметричную волну Лэмба. Соответствующее данной моде число длин волн, укладываемых на толщине структуры, равно 30.5. Следовательно, порядок моды Лэмба S_{31} равен $n = 31$ (табл. 1), а соответствующая фазовая скорость составляет значение ~ 29270 м/с.

На рис. 3 показан профиль распределения Y -компоненты смещений по толщине, включая пленку AlN, для моды A_{31} , возбуждаемой на частоте 1437 МГц. Легко видеть, что на толщине структуры укладывается число длин волн $n = 31$, а смещения на нижней границе алмазной подложки и на верхней поверхности пленки AlN происходят в одном направлении, что соответствует антисимметричной моде A_{31} (см. также табл. 1).

На рис. 4 представлено сравнение экспериментальных и расчетных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) действительной части импеданса ПАВ-резонатора $\text{Re } Z_{11e}$ в полосе 1420–1520 МГц, в которой были рассмотрены 8 мод Лэмба. Результаты МКЭ моделирования и экспериментальные данные находятся в хорошем согласии. Однако на экспериментальной зависимости наблюдаются особенности в виде расщепления резонансных пиков, а также менее интенсивных неидентифицированных осцилляций, которые не зафиксированы в МКЭ расчете. Поэтому для дополнительного анализа распространения волн Лэмба в ПСС “Me/пьезоэлектрическая пленка/подложка” (Me = Al) были также использованы разработанные нами программные средства. В данной 1D модели принято, что латеральные размеры структуры бесконечны, а Al пленка – сплошная. Толщины Al и AlN пленок и алмазной подложки были взяты такими же, что и для МКЭ модели ПАВ-резонатора. Процедура идентификации типов волн проводилась путем анализа проекций упругих смещений, точно соответствующих каждой моде. В рассмотренной задаче все моды были чистыми, т.е. векторы сме-

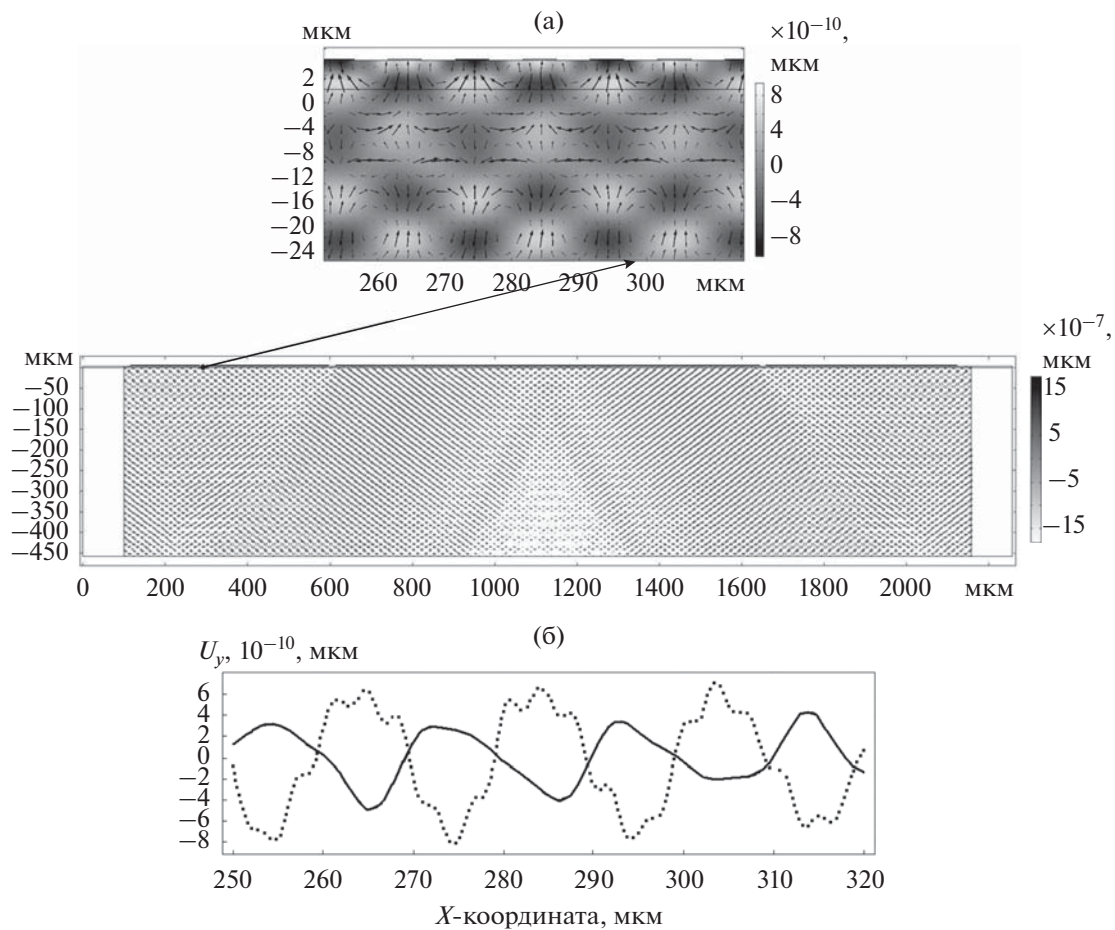


Рис. 2. Y -компоненты упругих смещений для моды Лэмба S_{31} (1450.2 МГц) в YX -сечении ПАВ-резонатора со структурой “Al-ВШП/AlN/алмаз”: (а) — общий вид и крупномасштабная вставка профиля Y -смещений вблизи верхней поверхности подложки, включая пленку AlN (толщина 4.35 мкм); (б) — профили Y -смещений, относящиеся к моде S_{31} , на верхней поверхности пленки AlN (пунктирная линия) и на нижней поверхности алмаза (сплошная линия).

щения с компонентами $(U_1, U_2, 0)$ и $(0, 0, U_3)$ были связаны с модами Рэлея и SH-типа соответственно. Отметим, что условие существования этих мод предполагает экспоненциальное затухание парциальных компонент при углублении в алмазную подложку. Напротив, поля смещений мод Лэмба занимали весь объем подложки, что следовало и из МКЭ анализа. Анализ дисперсионных кривых фазовых скоростей дал возможность определить фазовые скорости волн Лэмба в указанном диапазоне частот (крайний правый столбец табл. 1). Результаты расчета для сплошной металлизации поверхности пленки AlN были получены в рамках 1D-моделирования. Отличия в значениях рассчитанных из 1D и 2D моделей фазовых скоростей ВЛ составляли ~ 200 м/с (табл. 1). Отличия в значениях резонансных частот ВЛ, полученных в эксперименте, и рассчитанных исходя из 2D модели, лежали в пределах до 2 МГц. Таким образом, максимальная разница между фазовыми скоростями

ми, найденными из эксперимента и 2D модели, составляла 40 м/с, что указывает на лучшую точность вычислительного эксперимента по 2D-модели по сравнению с 1D. Однако расчет на СВЧ с помощью 2D моделирования требует значительных вычислительных ресурсов во временном масштабе, при этом 1D моделирование дает достаточно точную общую картину. Следует также отметить, что рассчитанные из 1D модели дисперсионные кривые волн Лэмба представляли собой совокупность близко расположенных пар, поэтому для них были получены два значения фазовых скоростей. Тонкая структура полученных в эксперименте АЧХ также указывает на такое удвоение (рис. 4). Объяснение такой особенности тонкой структуры наблюдаемых пиков требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

На рис. 5 показаны рассчитанные из 2D модели частотные зависимости действительной части

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные данные по резонансным частотам и фазовым скоростям волн Лэмба в образце ПАВ-резонатора “Al-ВШП/AlN/(001) алмаз” с периодом ВШП 20 мкм

	f_0 , МГц		Δf , МГц	V , м/с	Число длин волн, укладываемых на толщине ПСС	Мода	V^* , м/с
	Эксперимент	2D модель (МКЭ)					
1	1422	1423.8	—	28480	29.5	S_{30}	28424 28230
2	1435	1436.8	13.0	28740	30	A_{30}	28525 28720
3	1448	1450.2	13.4	29000	30.5	S_{31}	28824 29023
4	1461	1463.4	13.2	29270	31	A_{31}	29136 29333
5	1475	1476.2	12.8	29520	—	—	29375 29590
6	1489	1488.8	12.6	29780	31.5	S_{32}	29854 29622
7	1502	1501.8	13	30040	32	A_{32}	30186 29930
8	1515	1515.4	13.6	30300	32.5	S_{33}	30525 30243

* Фазовые скорости волн Лэмба вычислены из дисперсионных кривых, полученных в 1D модели.

“очищенного” импеданса $Re Z_{11e}$ и добротности для ПАВ-резонатора со структурой “Al-ВШП/AlN/(001) алмаз” в диапазоне 200–1000 МГц, полученные для 3-х значений периода ВШП 18, 20 и 22 мкм. Добротность рассчитывали в соответствии с соотношением:

$$Q = 2\pi f \frac{\sum W_s}{\sum Q_h}, \quad (2)$$

где W_s – плотность запасенной упругой энергии слоя, Q_h – плотность мощности энергии диссипации каждого слоя. Фактор механических потерь в алмазе принят равным 4.5×10^{-5} . В пьезоэлектрике факторы механических и диэлектрических потерь выбирались равными 0.001 и 0.01 соответственно. Резонансы в окрестности 400–500 МГц соответствовали ПАВ-моду R_0 , в полосе 550–620 МГц – моду R_1 . Анализируя рис. 5а, можно сделать вывод о закономерном смещении АЧХ в область более

низких частот как для ПАВ-мод, так и для волн Лэмба при увеличении периода ВШП. Из рис. 5б следует, что на частотах выше 700 МГц добротность ВЛ должна значительно увеличиваться с ростом частоты, что хорошо коррелирует с экспериментально обнаруженным увеличением добротности от значения 760 при 1.5 ГГц до 3400 при ~7 ГГц [22].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны 1D и 2D модели пьезоэлектрических слоистых структур “Al/AlN/(100) алмаз” и “Al-ВШП/AlN/(100) алмаз” (с конфигурацией ПАВ-резонатора) соответственно. В 2D модели латеральные размеры, толщины пьезоэлектрической и металлической пленок и подложки, как и дизайн ВШП, соответствовали экспериментальным образцам. Выполнено 1D и 2D моделирова-

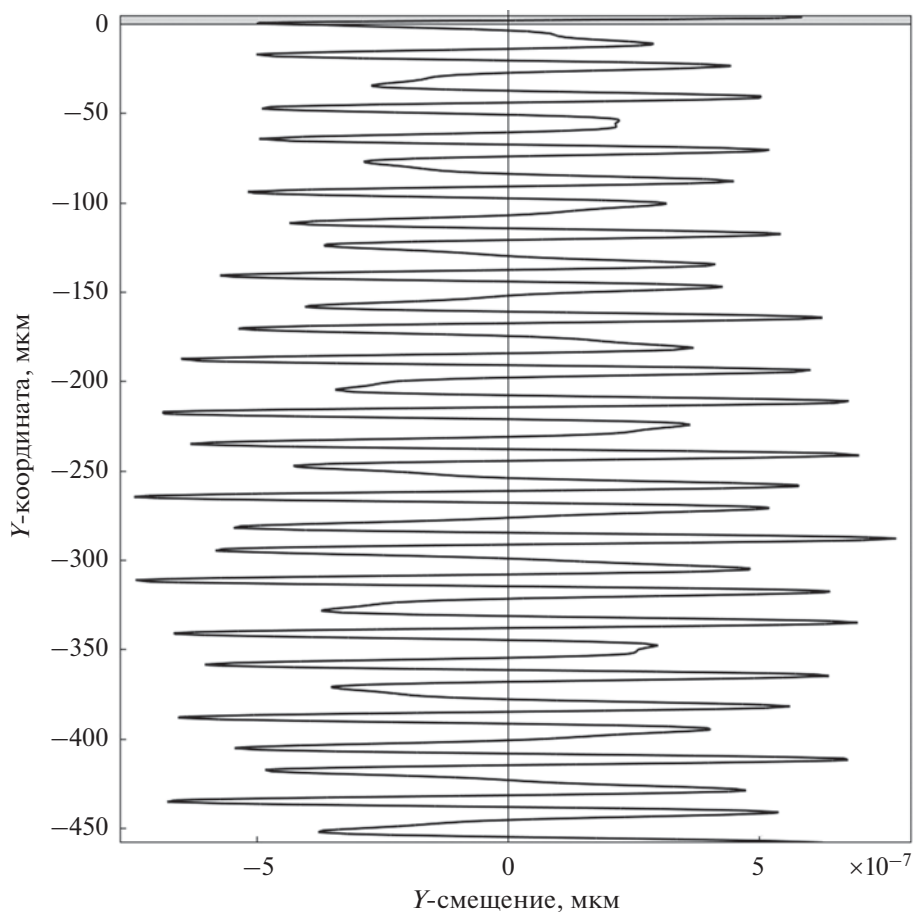


Рис. 3. Распределение Y -компоненты смещений моды A_{31} по толщине структуры “Al-ВШП/AlN/(001) алмаз” на частоте 1437 МГц. Вверху серым цветом показана пьезоэлектрическая пленка AlN (4.35 мкм). Толщина алмазной подложки 458 мкм.

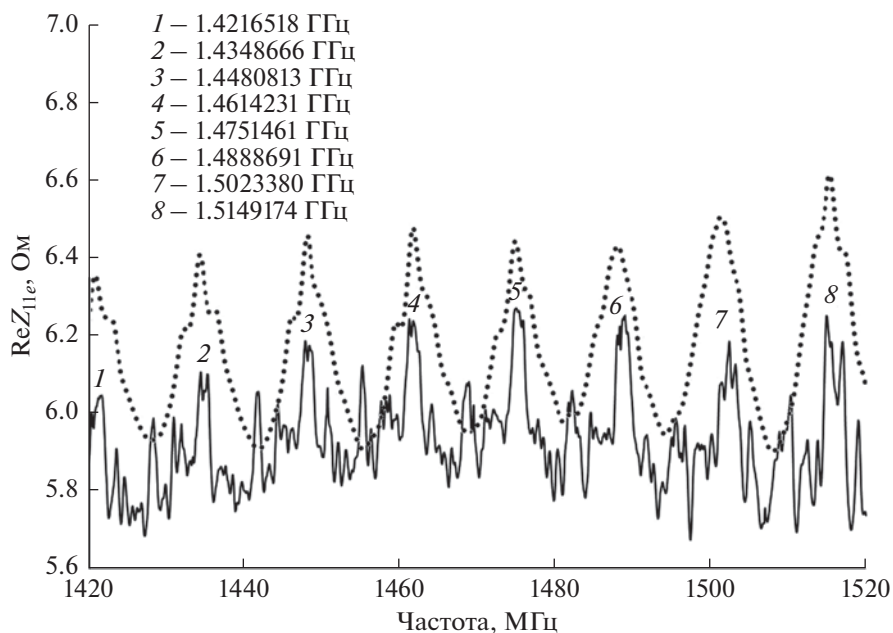


Рис. 4. Экспериментальная (сплошная линия) и расчетная (пунктир) частотные зависимости действительной части импеданса $\text{Re } Z_{11e}$ для ПАВ-резонатора (период $d = 20$ мкм) со структурой “Al-ВШП/AlN/(001) алмаз” в диапазоне 1420–1520 МГц.

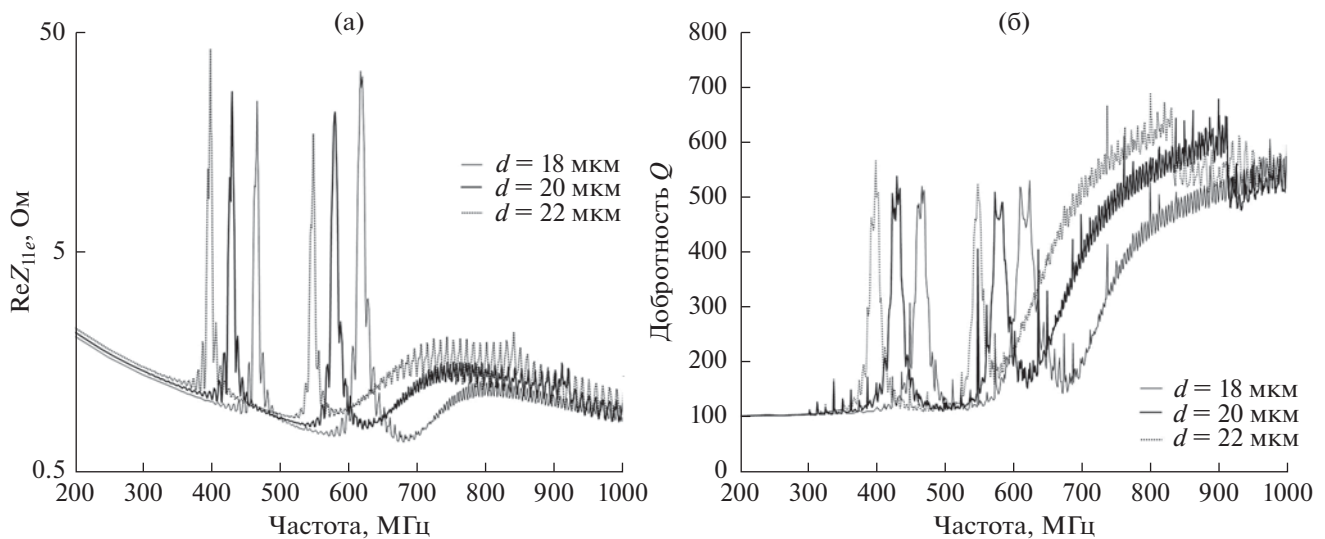


Рис. 5. (а) – Частотные зависимости действительной части импеданса $\text{Re } Z_{11e}$ и (б) – добротности для ПАВ-резонатора со структурой “Al-ВШП/AlN/(001) алмаз” в диапазоне 200–1000 МГц, рассчитанные для 3-х значений периода ВШП 18, 20 и 22 мкм.

ние возбуждения и распространения волн Лэмба: рассчитано распределение упругих смещений в волнах Лэмба различных порядков, идентифицированы типы мод и исследованы дисперсионные зависимости фазовых скоростей, включая возбуждение на сверхвысоких частотах. Значения фазовых скоростей, вычисленные с помощью 1D и 2D моделей, находятся в хорошем соответствии с экспериментом. С помощью 2D моделирования показано, что, по сравнению с поверхностными акустическими волнами, резонансы, связанные с участием волн Лэмба, имеют более высокую добротность, увеличивающуюся с ростом частоты, что подтверждено экспериментальными данными. Увеличение добротности резонансов ВЛ происходит вследствие уменьшения угла дифракции потока упругих волн, излучаемых ПАВ-структурой в объем подложки, с ростом частоты [26], что приводит к увеличению вертикальной компоненты скорости волны Лэмба и, соответственно, к перераспределению ее энергии от горизонтальной к вертикальной компоненте. Чем выше частота, тем более плотно распределение смещений занимает объем подложки. Это сопровождается при увеличении частоты ростом запасенной объемной упругой энергии в высокодобротной алмазной подложке и, соответственно, увеличением добротности резонатора на волнах Лэмба, выполненного на базе ПСС “Al-ВШП/AlN/(001) алмаз”. Более подробно процесс дифракции упругих волн на периодической решетке ВШП рассмотрен в нашей статье [21].

Полученные результаты могут быть полезными при разработке композитных СВЧ акусто-электронных устройств и сенсоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокин Б.П., Квашинин Г.М., Теличко А.В., Гордеев Г.И., Бурков С.И., Бланк В.Д. Исследования многочастотных СВЧ акустических резонаторов на основе слоистой пьезоэлектрической структуры “Me1/AlN/Me2/(100) алмаз” // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 4. С. 464–476.
2. Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Novoselov A.S., Bormashov V.S., Golovanov A.V., Burkov S.I., Blank V.D. Excitation of hypersonic acoustic waves in diamond-based piezoelectric layered structure on the microwave frequencies up to 20 GHz // Ultrasonics. 2017. V. 78. P. 162–165
3. Сорокин Б.П., Новоселов А.С., Квашинин Г.М., Лунарев Н.В., Асафьев Н.О., Шипилов А.Б., Аксёненко В.В. Разработка и исследование композитных акустических резонаторов со структурой “Al/(Al,Sc)N/Mo/алмаз” с высокой добротностью на СВЧ // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 3. С. 325–331.
4. Anderås E., Katardjiev I., Yantchev V. Lamb wave resonant pressure micro-sensor utilizing a thin-film aluminum nitride membrane // J. Micromechanics and Microengineering. 2011. V. 21. P. 85010–85016.
5. Lamb H. On waves in an elastic plate // Proc. Roy. Soc. 1917. V. A93. P. 114–128.
6. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 170 с.
7. Burkov S.I., Zolotova O.P., Sorokin B.P., Turchin P.P., Talismanov V.S. Features of acoustic wave propagation in the Me/ZnO/Me/diamond waveguide structure // J. Acoust. Soc. Am. 2018. V. 143. P. 16–22.

8. *Jin Y., Joshi S.G.* Characteristics of ultrasonic Lamb waves in 128° rotated *Y*-cut lithium niobate // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 1994. V. 41. P. 279–283.
9. *Jin Y., Joshi S.G.* Propagation of quasi-shear-horizontal acoustic wave in *Z-X* lithium niobate plates // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 1996. V. 43. P. 491–494.
10. *Borodina I.A., Joshi S.G., Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E.* Acoustic waves in thin plates of lithium niobate // Acoust. Phys. 2000. V. 46. № 1. P. 33–37.
11. *Joshi S.G., Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E.* SH acoustic waves in a lithium niobate plate and the effect of electrical boundary conditions on their properties // Acoust. Phys. 2001. V. 47. № 3. P. 282–285.
12. *Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Joshi S.G., Borodina I.A.* Investigation of acoustic waves in thin plates of lithium niobate and lithium tantalite // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2001. V. 48. P. 322–328.
13. *Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Borodina I.A., Teplyh A.A., Shurygin V.V., Joshi S.G.* Investigation of acoustic waves of higher order propagating in plates of lithium niobate // Ultrasonics. 2004. V. 42. P. 179–182.
14. *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Borodina I.A., Joshi S.G.* Characteristics of acoustic plate waves in potassium niobate (KNbO_3) single crystal // Ultrasonics. 2001. V. 39. P. 51–55.
15. *Анисимкин В.И.* Анизотропия основных характеристик волн Лэмба в пьезоэлектрическом кристалле $(001)\text{-Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 2. С. 163–166.
16. *Anisimkin V.I., Verona E., Kuznetsova A.S., Osipenko V.A.* Acoustic wave propagation along piezoelectric plate coated with piezoelectric films // Acoust. Phys. 2019. V. 65. № 2. P. 171–177.
17. *Yantchev V., Katardjiev I.* Thin film Lamb wave resonators in frequency control and sensing applications: a review // J. Micromechanics and Microengineering. 2013. V. 23. P. 043001.
18. *Kimura T., Omura M., Kishimoto Y., Hashimoto K.* Comparative study of acoustic wave devices using thin piezoelectric plates in the 3–5-GHz range // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2019. V. 67. P. 915–921.
19. *Laidoudi F., Boubenider F., Mebarki M., Medjili F., Bettine F.* Numerical investigation of quasi-Lamb modes in *c* tilted ZnO/SiC composite membrane for high performance pressure micro-sensor // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 3. С. 253–262.
20. *Plessky V., Yandrapalli S., Turner P.J., Villanueva L.G., Koskela J., Hammond R.B.* 5 GHz laterally-excited bulk-wave resonators (XBARS) based on thin platelets of lithium niobate // Electron. Lett. 2019. V. 55. № 2. P. 98–100.
21. *Kvashnin G., Sorokin B., Burkov S.* Peculiarities of microwave Lamb wave excitation in composite SAW resonator based on diamond substrate // Proc. 2020 Joint Conf. of the IEEE Int. Frequency Control Symp. and Int. Symp. on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF). Keystone, Colorado, USA. 2020. P. 1–4.
22. *Квашнин Г.М., Сорокин Б.П., Бурков С.И.* Возбуждение поверхностных акустических волн и волн Лэмба на СВЧ в пьезоэлектрической слоистой структуре на основе алмаза // Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 1. С. 1–10.
23. *Sotnikov A.V., Schmidt H., Weihnacht M., Chemekova T.Yu., Makarov Yu.N.* Elastic and piezoelectric properties of AlN and LiAlO_2 single crystals // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2010. V. 57. P. 808–811.
24. *Mansfeld G.D., Alekseev S.G., Kotlyansky I.M.* Acoustic HBAR spectroscopy of metal (W, Ti, Mo, Al) // Proc. IEEE Ultrason. Symp. Atlanta, Georgia, USA. 2001. P. 415–418.
25. *Гордеев Г.И., Квашнин Г.М., Кузнецов М.С., Сорокин Б.П., Теличко А.В.* Упругие свойства монокристалла синтетического алмаза // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. 2013. Т. 56. № 7. С. 50–52.
26. *Дьелесан Э., Руайе Д.* Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов. М.: Наука, 1982. 424 с.