УДК 534.21

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН И ВОЛН ЛЭМБА НА СВЧ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ АЛМАЗА

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

 ^aΦГБНУ "Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов", ул. Центральная 7а, Москва, г.о. Троицк, 142190 Россия
 ^bСибирский федеральный университет, пр. Свободный 79, Красноярск, 660041 Россия *e-mail: genmih@yandex.ru
 **e-mail: bpsorokin1953@yandex.ru
 Поступила в редакцию 22.01.2020 г. После доработки 11.03.2020 г.
 Принята к публикации 07.07.2020 г.

Выполнено экспериментальное и теоретическое исследование распространения поверхностных акустических волн (ПАВ) – Рэлея, Сезавы и *SH*-мод, а также волн Лэмба в пьезоэлектрических слоистых структурах "Me-BШП/AlN/(100) алмаз" (Me = Pt, Al) с конфигурацией ПАВ резонатора. Идентифицированы типы мод и получены дисперсионные кривые фазовых скоростей и коэффициентов электромеханической связи для ПАВ и волн Лэмба. Экспериментально наблюдалось возбуждение волн Лэмба до частоты 7.3 ГГц. Резонансные кривые для волн Лэмба имеют более высокую добротность Q по сравнению с поверхностными акустическими волнами, распространяющимися на этих же подложках. Так, на частоте около 7 ГГц нагруженная добротность достигает значения 3400, при этом параметр качества составляет величину $Q \times f = 2.4 \times 10^{13}$ Гц. Отмечен необычный эффект значительного увеличения добротности волн Лэмба с ростом частоты от значения 760 при 1.5 ГГц до 3400 при 7 ГГц.

Ключевые слова: поверхностная акустическая волна, объемная акустическая волна, волна Лэмба, монокристаллический алмаз, нитрид алюминия, пьезоэлектрическая слоистая структура **DOI:** 10.31857/S0320791921010020

введение

Композитные ПАВ устройства на основе пьезоэлектрических слоистых структур (ПСС) продемонстрировали хорошие параметры в диапазоне 1–3 ГГц. Например, в работе [1] исследовано распространение ПАВ в ПСС "(Al,Sc)N/алмаз", где алмазная подложка была подготовлена методом химического осаждения из паровой фазы, а линия задержки была выбрана в качестве измерительного устройства. Было обнаружено, что такая ПСС имеет невысокое акустическое затухание даже в диапазоне 3 ГГц. В качестве перспективной альтернативы ПАВ можно рассматривать волны Лэмба (ВЛ), которые могут быть применены в акустоэлектронных устройствах и сенсорах. Теория распространения ВЛ в бесконечной изотропной пластине со свободными границами была разработана Лэмбом в 1917 году [2]. Викторов [3] предложил систематическое описание акустических свойств волн Лэмба, распространяющихся в изотропных пластинах, и их приложений в

технике, а в [4] рассмотрено применение ВЛ в дефектоскопии пластин. Результаты всестороннего исследования волноводного распространения нормальных волн в слоистых средах приведены в монографии Бреховских [5]. Волны Лэмба, а также другие волноводные моды в тонких пьезоэлектрических пластинах ниобата лития, танталата лития, ниобата калия и силикосилленита подробно исследованы в работах [6-15]. В частности, было отмечено, что коэффициенты электромеханической связи (КЭМС) волны Лэмба и поверхностно-поперечной (SH_n) волны могут быть существенно больше, чем для волн Рэлея в тех же кристаллах. 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. В работе [17] рассмотрена теоретическая основа распространения упругих волн в слоистой пьезоэлектрической структуре и в качестве примера получены результаты для алмазного волно-



Рис. 1. Схема ПАВ-резонатора со структурой "Ме-ВШП/AlN/алмаз". Распространение ПАВ – вдоль направления [110] в плоскости (001) алмаза. МПО – многополосковый отражатель.

вода "Me/ZnO/Me/алмаз". В последнее время активно изучаются волны Лэмба в тонких пленках для использования в устройствах частотного контроля и сенсорах [18]. Так. в работе [19] представлен пример "AlN/Si" микросенсоров на волнах Лэмба для измерения давления и гравиметрических измерений. В работе [20] представлены результаты по резонатору на тонкой пленке AlN, в котором ВЛ возбуждалась с помощью ВШП. Эти резонаторы использовались в качестве чувствительных сенсоров давления газа. Используя ВШП, авторы [21] исследовали ряд устройств на тонких пьезоэлектрических пластинах – резонаторы с брэгговским отражателем (в англоязычной литературе – Solidly Mounted Resonator, SMR) на основе 50° YX-среза LiTaO₃ (1) и X-среза LiNbO₃ (2), а также резонатора мембранного типа (3) на основе Z-среза LiNbO₃, чтобы получить возбуждение ПАВ и ВЛ. Было получено, что устройство типа (1) имело добротность Q = 1735 при резонансной частоте 3440 МГц в режиме моды SH₀, типа (2) Q = 565 при 4996 МГц в режиме моды Лэмба S_0 и типа (3) Q = 419 при 5444 МГц в режиме моды Лэмба А₁. По мнению авторов [21], устройства (1) и (2) типов продемонстрировали лучшие характеристики в диапазоне 3-5 ГГц.

Выбор подходящего материала подложки для композитных акустоэлектронных устройств СВЧ диапазона имеет решающее значение. Недавно было показано [22, 23], что применение монокристаллического алмаза в качестве подложки ПСС позволяет значительно увеличить рабочую частоту композитного многообертонного резонатора на объемных акустических волнах (ОАВ). В частности, возбуждение ОАВ в ПСС "Al/(001) AlN/Mo/(001) алмаз" и "Al/(Al,Sc)N/Mo/(001) алмаз" было получено на частотах до 20 ГГц с нагруженной добротностью ~13000. Таким образом, монокристалл алмаза должен представлять большой интерес в качестве перспективного материала подложек при изучении поверхностных акустических волн и волн Лэмба.

Целью данной работы является рассмотрение особенностей возбуждения и распространения ПАВ и волн Лэмба в ПСС "Ме-ВШП/AIN/(100) алмаз", в том числе дисперсионных характеристик их параметров в широком диапазоне СВЧ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАВ И ВОЛН ЛЭМБА НА СВЧ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЛОИСТОЙ СТРУКТРУРЕ "Ме-ВШП/AIN/(100) АЛМАЗ"

Возбуждение и регистрация поверхностных акустических волн и волн Лэмба может осуществляться различными способами, в том числе с помощью встречно-штыревого преобразователя, нанесенного на поверхность пьезоэлектрической среды. В настоящее время технология изготовления ВШП хорошо развита, что упрощает изучение и применение волн Лэмба в акустоэлектронных приборах и неразрушающем контроле. Практическое применение поверхностных акустических волн Рэлея (R) обычно ограничено частотами 2–3 ГГц вследствие взаимодействия с воздухом и значительного увеличения затухания. В этом смысле волны Лэмба, распространяющиеся преимущественно в объеме подложки, имеют меньшее затухание на более высоких частотах. По сравнению с SH_n- и *R*-волнами, волны Лэмба также могут иметь более высокие фазовые скорости.

В качестве экспериментальных образцов были использованы однопортовые ПАВ-резонаторы, включавшие в себя возбуждающий ВШП и два многополосковых отражателя (МПО) (рис. 1). Основные параметры экспериментальных образцов на основе пьезоэлектрических слоистых структур "Me-BШП/AlN/(100) алмаз" для исследования распространения ПАВ и ВЛ приведены в табл. 1. Например, в образце № 1 использовали неаподизированные эквидистантные ВШП с апертурой 350 мкм и периодом d = 18, 20 и 22 мкм для трех независимых ПАВ резонаторов. Количество штырей в отражающей решетке составляло 100, в ВШП имелось 50 пар штырей. Расстояние между ВШП и МПО равнялось промежутку между штырями. Частота синхронизма ВШП может быть вычислена по известной формуле:

$$f_0 = V/d \,, \tag{1}$$

где V – фазовая скорость волн Рэлея или Лэмба, и $d = \lambda (\lambda - длина волны Рэлея или Лэмба).$

В качестве материалов для электродов ВШП были выбраны Me = Pt, Al. Высококачественный синтетический монокристаллический алмаз типа IIa с низким содержанием азота (~60 ppb), использованный в качестве подложки, был выращен в Технологическом институте сверхтвердых

Номер образца	<i>d</i> , мкм	Направление распространения волны	Толщина ВШП, нм	Ориентация/толщина пленки AlN, нм	Ориентация/толщина алмазной подложки, мкм
	18				
1	20	[110]	Pt/156	(001)/5530	(001)/180
	22				
2	20	[110]	Al/135	(001)/4350	(001)/458

Таблица 1. Параметры экспериментальных образцов

и новых углеродных материалов методом градиента температуры в условиях высокого давления (5 ГПа) и высокой температуры (~1750 К) [24]. Шероховатость R_a алмазных подложек, измеренметодом атомно-силового микроскопа ная (АСМ), находилась в пределах 0.2-2 нм на плошалке 10×10 мкм. Все металлические и пьезоэлектрический слой AlN были нанесены с помощью магнетронного распылительного оборудования AJA Orion 8. Контроль кристаллической структуры и качество текстуры пленки AlN выполняли с помощью оборудования для рентгеновского дифракционного анализа Panalytical Empyrean. Наблюдались, в основном, дифракционные рефлексы (00.2), что указывает на хорошую ориентацию кристаллитов нитрида алюминия в пленке. Полная ширина на половине высоты кривой качания (00·2) составляла ~0.2°. Шероховатость пленки AlN была менее 3 нм на площадке 10 × 10 мкм.

Частотные характеристики экспериментальных образцов измеряли в диапазоне СВЧ от 0.1 до 8 ГГц с помощью векторного анализатора цепей E5071С и зондовой станции М-150. Электрическую добротность резонансных кривых ПАВ-резонатора вычисляли с помощью программных средств E5071С и стандартных методов расчета. Экспериментальная точность измерения частоты данным анализатором 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 ±0.1-0.2 мкм. Тем самым расчетное значение погрешности фазовой скорости ограничивалось практически значением ±1 м/с. В качестве основного был использован метод определения добротности на уровне -3 дБ относительно максимума модуля импеданса Z_{11e}, очищенного относительно фона. Подробно методика измерений и процедура расчета Z_{11e} описана ранее [25]. Были также использованы дополнительные методы, основанные на других характеристиках отклика резонатора. Например, при выборе измеряемого параметра "time delay, τ_d " добротность вычисляли из соотношения $Q = \pi f_p \tau_d$, где f_p – частота резонанса. Как правило, относительное расхождение величин Q, вычисленных разными способами, не превышало 10%.

При измерении амплитудно-частотной характеристики применяли развертку от 1001 до 1601 точки. На экране анализатора одновременно отображались следующие данные: комплексные характеристики коэффициента отражения S_{11} , полный Z_{11} и "очищенный" Z_{11e} импедансы, временная задержка τ_d и диаграмма Смита.

Обсудим экспериментально обнаруженные волны, идентифицированные как R_n - и SH_n -моды, чтобы сравнить их с волнами Лэмба. Важным обстоятельством является то, что одновременное наблюдение всех ПАВ и волн Лэмба оказалось возможным с помощью одного и того же ПАВ-резонатора. При детальном исследовании частотной зависимости действительной части импеданса $\text{Re}Z_{11e}$, полученной для экспериментальных образцов № 1 и 2, были обнаружены ПАВ-моды в диапазоне до 700 МГц (рис. 2). Так, в образце № 1



Рис. 2. Частотная зависимость действительной части импеданса Re Z_{11e} , полученная на экспериментальном образце № 1 (ПАВ-резонатор с периодом d = 18 мкм) в диапазоне 200–1000 МГц.

КВАШНИН и др.

	Мода	Длина волны, мкм	Резонансная частота $f_0, { m M} \Gamma$ ц	Нагруженная добротность <i>Q</i>	Фазовая скорость, м/с
1	SH ₀	18	319.57	250	5753
		20	301.27	_	6026
		22	287.55	_	6325
2	<i>R</i> ₀	18	364.17	350	6552
		20	347.01	_	6940
		22	332.15	_	7304
3	SH ₁	18	501.40	260	9018
		20	463.66	_	9274
		22	432.78	-	9522
4	<i>R</i> ₁	18	596.32	300	10728
		20	562.01	—	11240
		22	525.41	-	11559
5	<i>R</i> ₂	18	653.49	270	11772
		20	606.61	_	12132
		22	564.29	_	12408

Таблица 2. Результаты по распространению ПАВ, полученные на экспериментальном образце №1

три моды Рэлеевского типа – R_0 , R_1 (мода Сезавы) и R_2 , и две *SH*-типа (*SH*₀ и *SH*₁) наблюдались на трех независимых ПАВ-резонаторах, различающихся периодами ВШП. Конкретные результаты приведены в табл. 2. Следует обратить внимание на то, что моды R_n -типа продемонстрировали более высокую нагруженную добротность по сравнению с модами *SH*_n. Процедура идентификации мод рассматривается ниже.

Выше ~750 МГц и до ~7.3 ГГц в экспериментальных образцах № 1 и 2 наблюдалось большое количество почти эквидистантных максимумов ReZ_{11e}, связанных с резонансным возбуждением волн Лэмба различных порядков. С ростом частоты частотный интервал между максимумами $\text{Re}Z_{11e}$ (Space between Parallel Resonances, SPRF) асимптотически приближался к SPRF композитного многообертонного резонатора на ОАВ (в англоязычной литературе – High overtone Bulk Acoustic resonator, HBAR). В качестве примера на рис. 3 представлены частотные характеристики экспериментального образца № 2 в окрестности частот 2.3; 3.5; 5.0 и 7.3 ГГц. В дополнение к сильным пикам ВЛ наблюдали и более слабые сигналы, которые могут ассоциироваться с еще не идентифицированными модами.

Отметим, что резонансные кривые волн Лэмба показали значительно более высокую нагруженную добротность по сравнению с ПАВ модами, распространяющимися на той же подложке. Так, для образца № 2 добротность была равной Q = 760

при 1.5 ГГц, 1400 при 4 ГГц, 2800 при 6.1 ГГц и 3400 при ~7 ГГц. В последнем случае параметр качества был равен $Q \times f = 2.4 \times 10^{13}$ Гц. В результате был обнаружен необычный эффект значительного увеличения добротности пиков ВЛ с ростом частоты, что имеет большое практическое значение.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТИПОВ И ДИСПЕРСИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В СЛОИСТОЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЕ

Распространение акустических волн малой амплитуды различных видов в кристалле может быть описано волновыми уравнениями, электростатическими уравнениями и уравнениями состояния однородной пьезоэлектрической среды, принятыми в виде [26]:

$$\rho_0 \mathbf{U}_i = \tau_{ij,j}, \quad D_{k,k} = 0,$$

$$\tau_{ij} = C^E_{ijkl} \eta_{kl} - e_{nij} E_n, \quad \mathbf{D}_m = \varepsilon^{\eta}_{mn} E_n + e_{mij} \eta_{ij},$$

(2)

№ 1

2021

где ρ_0 – плотность кристалла; \mathbf{U}_i – вектор динамических упругих смещений; τ_{ij} – тензор термодинамических напряжений; \mathbf{D}_m – вектор электрической индукции; η_{ij} – тензор деформации; C^E_{ijkl}, e_{mij} и ε^{η}_{mn} – упругие, пьезоэлектрические и зажатые диэлектрические константы соответственно. Запятая после подстрочного индекса обозначает пространственную производную, а координаты латинских индексов изменяются от 1 до 3.



Рис. 3. Примеры частотной зависимости действительной части импеданса Re Z_{11e} , полученные на экспериментальном образце № 2 (ПАВ-резонатор с периодом d = 20 мкм) в окрестности частот: (а) -2.3 ГГц, (б) -3.5 ГГц, (в) -5.0 ГГц, (г) -7.3 ГГц.

Здесь и далее будет использоваться правило суммирования по повторяющимся индексам.

Пусть ось *Y* рабочей системы координат направлена вдоль внешней нормали к поверхности слоя, а ось *X* совпадает с направлением распространения волны. Распространение упругой волны в пьезоэлектрической слоистой структуре должно удовлетворять заданным граничным условиям. В частности, для структуры "Ме/пьезоэлектрическая пленка/подложка" следует потребовать:

(1) равенства нулю нормальных составляющих тензора напряжений на границах раздела "Ме/ва-куум" и "подложка/вакуум";

(2) непрерывности нормальных компонент тензора напряжений и векторов смещения на границах раздела "Ме/пьезоэлектрическая пленка" и "пьезоэлектрическая пленка/подложка";

(3) равенства нулю электрического потенциала, связанного с акустической волной, на границе раздела "Ме/пьезоэлектрическая пленка".

В результате для рассматриваемой задачи можно записать такие соотношения:

$$\begin{aligned} \tau_{2j}^{(1)}\Big|_{Y=h_{1}} &= 0, \quad \tau_{2j}^{(1)} = \tau_{2j}^{(2)}\Big|_{Y=h_{2}}, \\ \varphi^{(2)} &= 0\Big|_{Y=h_{2}}, \quad \mathbf{U}^{(1)} = \mathbf{U}^{(2)}\Big|_{Y=h_{2}}, \\ \tau_{2j}^{(3)} &= \tau_{2j}^{(2)}\Big|_{Y=0}, \quad \mathbf{U}^{(3)} = \mathbf{U}^{(2)}\Big|_{Y=0}, \\ \tau_{2j}^{(3)} &= 0\Big|_{Y=-h}. \end{aligned}$$
(3)

Нумерация в верхних индексах (1), (2) и (3) определяет такие компоненты структуры, как металлический слой, пьезоэлектрическая пленка и подложка с толщинами h_1 , h_2 и h соответственно. Необходимые решения, определяющие все параметры распространения ПАВ и волн Лэмба в ПСС "Ме/пьезоэлектрическая пленка/подложка", должны быть получены из равенства нулю определителя матрицы граничных условий (3), размер которой в случае трехслойной структуры



Рис. 4. Рассчитанные дисперсионные кривые (а) — фазовых скоростей и (б) — коэффициентов электромеханической связи поверхностных акустических волн в ПСС "Pt/AIN/(001) алмаз" (распространение ПАВ — вдоль направления [110] алмаза). Экспериментальные данные для образца № 1 обозначены квадратами. Аббревиатуры QL, QFS и R относятся к кривым фазовых скоростей ОАВ квазипродольного и квазисдвигового быстрого типа, и к ПАВ Рэлея в монокристалле алмаза соответственно.

был равен 22 × 22. Дальнейший ход решений принципиально не отличается от задачи для 4-хслойной пьезоэлектрической слоистой структуры "Me1/пьезоэлектрическая пленка/Me1/подложка", подробно рассмотренной в работе [25]. Для 1D-моделирования и численного анализа ПСС "Me/пьезоэлектрическая пленка/подложка" были использованы разработанные нами программные средства.

Процедура идентификации типов волн проводилась путем анализа проекций упругих смещений, точно соответствующих каждой моде. В данной задаче все моды были чистыми, т.е. векторы смещения 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 занимают весь объем подложки.

Результаты расчета дисперсионных зависимостей фазовых скоростей и КЭМС для волн поверхностного типа, распространяющихся в направлении [110] алмаза в ПСС "Pt/AlN/(001) алмаз" в полосе частот 0–1000 МГц, представлены на рис. 4 совместно с экспериментальными данными. Толщины слоев ПСС были выбраны равными соответствующим значениям в экспериментальном образце № 1. Параметры материальных свойств – плотности и упругие константы пленок и монокристаллического алмаза – были взяты из [27–29]. Экспериментальные данные по резонансным частотам и добротности мод поверхностного типа, а также идентификация их типа, приведены в табл. 2 (см. также рис. 2). Коэффициенты электромеханической связи (рис. 4б) были получены по известной формуле $K^2 = 2\Delta V/V$, где ΔV — изменение фазовой скорости ПАВ при наложении бесконечно тонкого проводящего слоя на свободную поверхность пьезоэлектрической среды. Следует отметить удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Естественно, что фазовая скорость фундаментальной моды R₀ в пьезоэлектрической слоистой структуре имеет меньшее значение, чем в случае недисперсионной *R*-моды, распространяющейся вдоль направления [110] по свободной (001) поверхности алмаза, и стремится к фазовой скорости *R*-моды на нулевой частоте. Отметим, что такие параметры для моды Сезавы R₁, как КЭМС (рис. 4б) и фазовая скорость (рис. 4а), имеют большие величины, чем аналогичные для моды R_0 . Поэтому мода Сезавы предпочтительнее с точки зрения практического применения. Моды рэлеевского типа также показывают более высокие добротности по сравнению с SH-модами. Несмотря на прогнозируемую низкую электромеханическую связь (рис. 4б), в эксперименте уверенно наблюдали возбуждение SH₀- и SH₁-волн (см. рис. 2). Как было показано нами ранее [30], максимальный КЭМС для SH-мод можно получить для ПСС "Me/(100) AlN/алмаз" при распространении поверхностных волн вдоль направления [010] в плоскости (100) нитрида алюминия. Поэтому возбуждение SH-волн в случае конфигурации "Me/(001) AlN/(001) алмаз" можно объяснить несовершенством текстуры пленки нитрида алюминия, вследствие которой оси некоторого





Рис. 5. (а) – Частотная зависимость действительной части импеданса ReZ_{11e}, полученная на экспериментальном образце № 2, и (б) – рассчитанные дисперсионные кривые фазовых скоростей волн Лэмба в ПСС "Al/AlN/(001) алмаз" в частотном диапазоне 1400–1550 МГц. Экспериментальные данные для образца № 2 обозначены квадратами.

количества кристаллитов отклонены от нормали к плоскости подложки.

Волны Лэмба относятся к одному из типов нормальных волн в акустических волноводах, а именно — в пластине со свободными границами [5]. Поэтому, во-первых, существование ветвей мод ВЛ различных порядков должно снизу ограничиваться определенными частотами среза и. во-вторых, должна иметь место частотная зависимость фазовых скоростей и других параметров распространения. Следует различать симметричные S_n и антисимметричные A_n волны Лэмба, где n = 0, 1, 2, 3, ... - номер дисперсионной ветви. Если считать, что распространение волны Лэмба происходит вдоль горизонтальной оси X, то в структуре смещений частиц будут существовать горизонтальная U_x и вертикальная U_v парциальные компоненты, а фазовый сдвиг между ними должен быть равен 90°, т.е. осциллирующие частицы движутся по эллипсу, который в случае чистых мод лежит в сагиттальной плоскости ХҮ. Точку "рождения" мод S_n или A_n при n > 1 на частоте среза определяют из условия, что фазовая скорость ВЛ обращается в бесконечность. Это соответствует стоячей волне вдоль вертикальной Уоси пластины. Ранее мы указывали [30] на необходимость различения таких мод, как S_{n,L} или $S_{n,T}$, а также $A_{n,L}$ или $A_{n,T}$, используя определение: какая из двух ОАВ мод – продольная L или сдвиговая Т, распространяясь в вертикальном направлении *Y*, преобразуется в волну типа Лэмба выше частоты среза, уникальной для данной моды. Детальная теория распространения ВЛ в пьезоэлектрической слоистой структуре была опубликована в главе монографии [30].

В качестве примера для более детального анализа был выбран частотный диапазон 1400-1550 МГц. Дисперсионные кривые фазовой скорости для волн Лэмба, рассчитанные для ПСС "Al/AlN/алмаз", представлены на рис. 5 совместно с экспериментальными данными. Размеры данной ПСС были выбраны близкими к таковым для экспериментального образца № 2. Можно говорить об удовлетворительном согласии расчетных и экспериментальных результатов. Однако, анализируя рис. 56, можно увидеть двойную структуру близко расположенных дисперсионных кривых. Это подтверждается и экспериментальными данными, представленными на рис. 5а. Объяснение такой особенности тонкой структуры наблюдаемых пиков требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований, поскольку анализ СВЧ мод Лэмба высоких порядков с точки зрения их идентификации достаточно сложен.

Обратимся к вопросу о необычном увеличении добротности пиков ВЛ с ростом частоты. Предварительные оценки показывают, что происходит изменение структуры волны Лэмба в виде уменьшения горизонтальной и увеличения вертикальной парциальной компоненты волны на более высоких частотах. Горизонтальная составляющая может быть связана с одной из парциальных компонент ПАВ. Как известно, затухание объемных акустических волн значительно меньше, чем у поверхностных. Таким образом, волны Лэмба высоких порядков будут стремиться с увеличением частоты к объемным акустическим волнам в алмазе, и можно предположить, что потери энергии ВЛ должны уменьшаться, а добротность будет увеличиваться.



Рис. 6. Примеры (а) — экспериментальной и (б) — рассчитанной частотной зависимости действительной части импеданса ReZ_{11e}, полученные на экспериментальном образце № 2 (ПАВ-резонатор с периодом d = 20 мкм) в окрестности частоты 4 ГГц.

2D моделирование процессов возбуждения и распространения волн Лэмба на примере ПСС "Al-ВШП/AlN/(100) алмаз" выполняли 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 с неаподизированными ВШП. На активные электроды (ВШП) подавали СВЧ сигнал с напряжением 1 В, а на отражающие электроды (МПО) накладывалось условие Floating Potential. Для предотвращения отражения акустических волн от боковых стенок образца использовали граничное условие идеального согласованного слоя (Perfect Matching Layer, PML).

На рис. 6 показаны экспериментальная и рассчитанная частотные зависимости действительной части импеданса $\text{Re}Z_{11e}$, полученные на экспериментальном образце № 2 (ПАВ-резонатор с периодом d = 20 мкм) в окрестности частоты 4 ГГц. Результаты расчета находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными.

На рис. 7 представлен расчет распределения *У*компоненты смещения по толщине экспериментального образца № 2 на частоте 3.968 ГГц (один из резонансных пиков, представленных на рис. 6). Можно видеть, что поле упругих смещений для данной моды занимает весь объем образца. Поскольку смещения на верхней и нижней поверхностях образца находятся в фазе, следует сделать вывод о том, что в данном случае реализуется антисимметричная мода ВЛ. Частотный интервал между максимумами Re Z_{11e} составил значение ~17 МГц, тогда как соответствующая величина для образца HBAR, реализованного на ПСС "Al/AlN/Mo/(100) алмаз" с теми же значениями толщин подложки и пленки AlN, равна ~19 МГц.

выводы и заключение

Детально исследовано распространение дисперсионных поверхностных акустических волн типов Рэлея, Сезавы и *SH*-мод в пьезоэлектрических слоистых структурах "Me-BШП/AIN/(100) алмаз" (Me = Pt, Al) с частотой до 1000 МГц. Получены дисперсионные кривые фазовых скоростей ПАВ и коэффициентов электромеханической связи, а также выполнена идентификация их типов. С точки зрения практического применения мода Сезавы R_1 предпочтительнее, так как имеет более высокую фазовую скорость и сравнительно большой КЭМС. Моды Рэлеевского типа показывают более высокую добротность по сравнению с *SH*-модами.

Возбуждение волн Лэмба на СВЧ в ПСС "Ме-ВШП/AlN/(100) алмаз", сконфигурированной в виде ПАВ-резонатора, было получено в диапазоне 750–7300 МГц. Продемонстрирована значительно более высокая добротность резонансных кривых волн Лэмба по сравнению с поверхностными акустическими волнами, распространяющимися на той же подложке. Так, на частоте ~7 ГГц нагруженная добротность имела значение ~3400, а параметр качества $Q \times f = 2.4 \times 10^{13}$ Гц. Эти параметры почти в десять раз превышают аналогичные данные, полученные недавно для резонато*Y*-смещение, X = 650 мкм, f = 3968 МГц



Рис. 7. Распределение *Y*-компоненты смещения по толщине экспериментального образца № 2 (ПАВ-резонатор с периодом d = 20 мкм) на частоте 3.968 ГГц.

ров с брэгговским отражателем и мембранных резонаторов на тонких пластинках ниобата лития, в которых использованы волны Лэмба, а рабочие частоты ограничены 5 ГГц [21]. Отметим также, что резонансы волн Лэмба в исследованных нами образцах наблюдались на более высоких частотах до 7.3 ГГц.

Авторы предполагают, что на основе экспериментальных результатов данной работы деталь-

АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 67 № 1 2021

ный анализ структуры СВЧ волн Лэмба с привлечением средств визуализации полей упругих смещений в Comsol Multiphysics будет сделан в следующей статье.

Полученные результаты могут оказаться полезными при разработке композитных CBЧ акустоэлектронных устройств и сенсоров.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-12-10293-П). Особая благодарность С.А. Терентьеву и М.С. Кузнецову (ФГБНУ ТИСНУМ) за подготовку алмазных монокристаллов и подложек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hashimoto K., Fujii T., Sato S., Omori T., Ahn Ch., Teshigahara A., Kano K., Umezawa H., Shikata S. High Q surface acoustic wave resonators in 2–3 GHz range using ScAlN/single crystalline diamond structure // Proc. of the 2012 IEEE Int. Ultrason. Symp. Dresden, Germany, October 7–10, 2012. P. 1926–1929.
- 2. *Lamb H*. On waves in an elastic plate // Proc. Roy. Soc. 1917. V. A93. P. 114–128.
- 3. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 170 с.
- 4. *Ghosh T., Kundu T., Karpur P.* Efficient use of Lamb modes for detecting defects in large plates // Ultrasonics. 1998. V. 36. P. 791–801.
- 5. *Бреховских А.М.* Волны в слоистых средах. М.: Издво АН СССР, 1957. 503 с.
- 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.
- 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.
- 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.
- 9. 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.
- 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.
- 11. *Klymko V., Nadtochiy A., Ostrovskii I.* Theoretical and experimental study of plate acoustic waves in ZX-cut lithium niobate // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2008. V. 55. № 12. P. 2726–2731.
- 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.

- Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Borodina I.A., Joshi S.G. Characteristics of acoustic plate waves in potassium niobate (KNbO₃) single crystal // Ultrasonics. 2001. V. 39. P. 51–55.
- Anisimkin V.I. The anisotropy of the basic characteristics of Lamb waves in a (001)-Bi₁₂SiO₂₀ piezoelectric crystal // Acoust. Phys. 2016. V. 62. № 2. P. 165–168.
- 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.
- 16. Анисимкин В.И., Воронова Н.В. Особенности генерации нормальных акустических волн // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 1. С. 3–7.
- 17. 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.
- 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.
- Choujaa A., Tirole N., Bonjour C., Martin G., Hauden D., Blind P., Pommier C. AlN/silicon Lamb-wave microsensors for pressure and gravimetric measurements // Sensors and Actuators A: Physical. 1995. V. 46. P. 179– 182.
- 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.
- 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.
- 22. 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 fre-

quencies up to 20 GHz // Ultrasonics. 2017. V. 78. P. 162–165.

- Сорокин Б.П., Новоселов А.С., Квашнин Г.М., Лупарев Н.В., Асафьев Н.О., Шипилов А.Б., Аксененков 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.
- Shvyd'ko Yu., Stoupin S., Blank V., Terentyev S. Near-100% Bragg reflectivity of X-rays // Nature Photonics. 2011. V. 5. P. 539–542.
- 25. Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Novoselov A.S., Burkov S.I., Shipilov A.B., Luparev N.V., Aksenenkov V.V., Blank V.D. Application of thin piezoelectric films in diamondbased acoustoelectronic devices / Piezoelectricity – organic and inorganic materials and applications / Ed. Vassiliadis S.G. and Matsouka D. Rijeka, Croatia: IntechOpen. 2018. P. 15–41.
- 26. Александров К.С., Сорокин Б.П., Бурков С.И. Эффективные пьезоэлектрические кристаллы для акустоэлектроники, пьезотехники и сенсоров. Т. 1. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2007. 501 с.
- Sotnikov A.V., Schmidt H., Weihnacht M., Chemekova T.Yu., Makarov Yu.N. Elastic and piezoelectric properties of AlN and LiAlO₂ single crystals // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 2010. V. 57. P. 808– 811.
- Сорокин Б.П., Квашнин 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.
- Macfarlane R.E., Rayne J.A., Jones C.K. Anomalous temperature dependence of shear modulus C₄₄ for platinum // Phys. Lett. 1965. V. 18. P. 91–92.
- Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Telichko A.V., Burkov S.I., Blank V.D. Piezoelectric layered structure based on the synthetic diamond / Piezoelectric materials. Ed. Ogawa T. Rijeka, Croatia: Intech. 2016. P. 161–199.