

УДК 534.21

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

© 2021 г. Г. М. Квашнин<sup>а, \*</sup>, Б. П. Сорокин<sup>а, \*\*</sup>, С. И. Бурков<sup>б</sup>

<sup>а</sup>ФГБНУ “Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов”, ул. Центральная 7а, Москва, г.о. Троицк, 142190 Россия

<sup>б</sup>Сибирский 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-VШП/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.

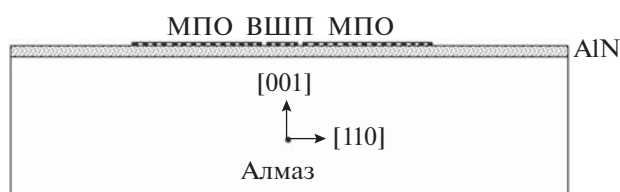
**Ключевые слова:** поверхностная акустическая волна, объемная акустическая волна, волна Лэмба, монокристаллический алмаз, нитрид алюминия, пьезоэлектрическая слоистая структура

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  $ST$ -срезы 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 – многослойный 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  $50^\circ$  УХ-среза LiTaO<sub>3</sub> (1) и Х-среза LiNbO<sub>3</sub> (2), а также резонатора мембранного типа (3) на основе Z-среза LiNbO<sub>3</sub>, чтобы получить возбуждение ПАВ и ВЛ. Было получено, что устройство типа (1) имело добротность  $Q = 1735$  при резонансной частоте 3440 МГц в режиме моды  $SH_0$ , 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  $A_1$ . 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  $\sim 13000$ . 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/AlN/(100) алмаз”, в том числе дисперсионных характеристик их параметров в широком диапазоне СВЧ.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАВ И ВОЛН ЛЭМБА НА СВЧ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ “Ме-ВШП/AlN/(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 многослойных отражателя (МПО) (рис. 1). Основные параметры экспериментальных образцов на основе пьезоэлектрических слоистых структур “Ме-ВШП/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:

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

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 Па с низким содержанием азота ( $\sim 60$  ppb), использованный в качестве подложки, был выращен в Технологическом институте сверхтвердых

**Таблица 1.** Параметры экспериментальных образцов

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

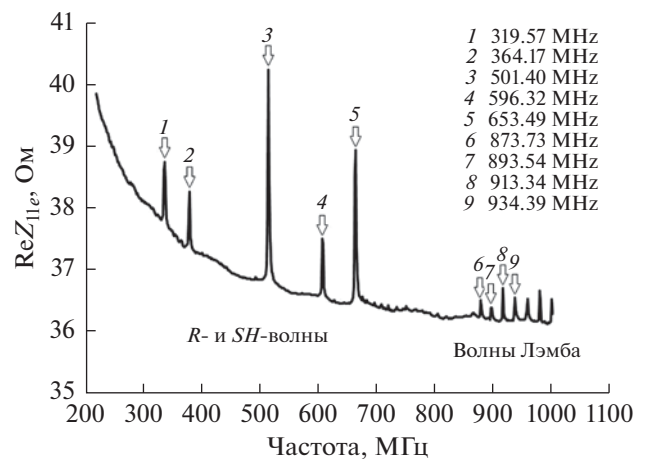
и новых углеродных материалов методом градиента температуры в условиях высокого давления (5 ГПа) и высокой температуры (~1750 К) [24]. Шероховатость  $R_a$  алмазных подложек, измеренная методом атомно-силового микроскопа (АСМ), находилась в пределах 0.2–2 нм на площадке  $10 \times 10$  мкм. Все металлические и пьезоэлектрический слой AlN были нанесены с помощью магнетронного распылительного оборудования AJA Ogiou 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  $10 \times 10$  мкм.

Частотные характеристики экспериментальных образцов измеряли в диапазоне СВЧ от 0.1 до 8 ГГц с помощью векторного анализатора цепей E5071C и зондовой станции M-150. Электрическую добротность резонансных кривых ПАВ-резонатора вычисляли с помощью программных средств E5071C и стандартных методов расчета. Экспериментальная точность измерения частоты данным анализатором составляла  $\pm 0.1$  кГц и лучше при увеличении числа точек. В измерениях ПАВ-резонатора для целей данной работы была достаточной точность  $\pm 10$  кГц. Надо также иметь в виду, что точность определения периода ВШП составляла  $\pm 0.1$ – $0.2$  мкм. Тем самым расчетное значение погрешности фазовой скорости ограничивалось практически значением  $\pm 1$  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 изме-

ряемого параметра “time delay,  $\tau_d$ ” 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  $\tau_d$  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  $Re Z_{11e}$ , 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.

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

	Мода	Длина волны, мкм	Резонансная частота $f_0$ , МГц	Нагруженная добротность $Q$	Фазовая скорость, м/с
1	$SH_0$	18	319.57	250	5753
		20	301.27	—	6026
		22	287.55	—	6325
2	$R_0$	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	$R_1$	18	596.32	300	10728
		20	562.01	—	11240
		22	525.41	—	11559
5	$R_2$	18	653.49	270	11772
		20	606.61	—	12132
		22	564.29	—	12408

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  $\sim 750$  МГц и до  $\sim 7.3$  ГГц в экспериментальных образцах № 1 и 2 наблюдалось большое количество почти эквидистантных максимумов  $ReZ_{1le}$ , связанных с резонансным возбуждением волн Лэмба различных порядков. С ростом частоты частотный интервал между максимумами  $ReZ_{1le}$  (Space between Parallel Resonances, SPRF) асимптотически приближался к SPRF композитного многообертоного резонатора на ОАВ (в англоязычной литературе — High overtone Bulk Acoustic resonator, НВАР). 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  $\sim 7$  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]:

$$\begin{aligned} \rho_0 \ddot{U}_i &= \tau_{ij,j}, \quad D_{k,k} = 0, \\ \tau_{ij} &= C_{ijkl}^E \eta_{kl} - e_{nij} E_n, \quad \mathbf{D}_m = \varepsilon_{mn}^n E_n + e_{mij} \eta_{ij}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\rho_0$  — плотность кристалла;  $U_i$  — вектор динамических упругих смещений;  $\tau_{ij}$  — тензор термодинамических напряжений;  $\mathbf{D}_m$  — вектор электрической индукции;  $\eta_{ij}$  — тензор деформации;  $C_{ijkl}^E$ ,  $e_{mij}$  и  $\varepsilon_{mn}^n$  — упругие, пьезоэлектрические и затятые диэлектрические константы соответственно. Запятая после подстрочного индекса обозначает пространственную производную, а координаты латинских индексов изменяются от 1 до 3.

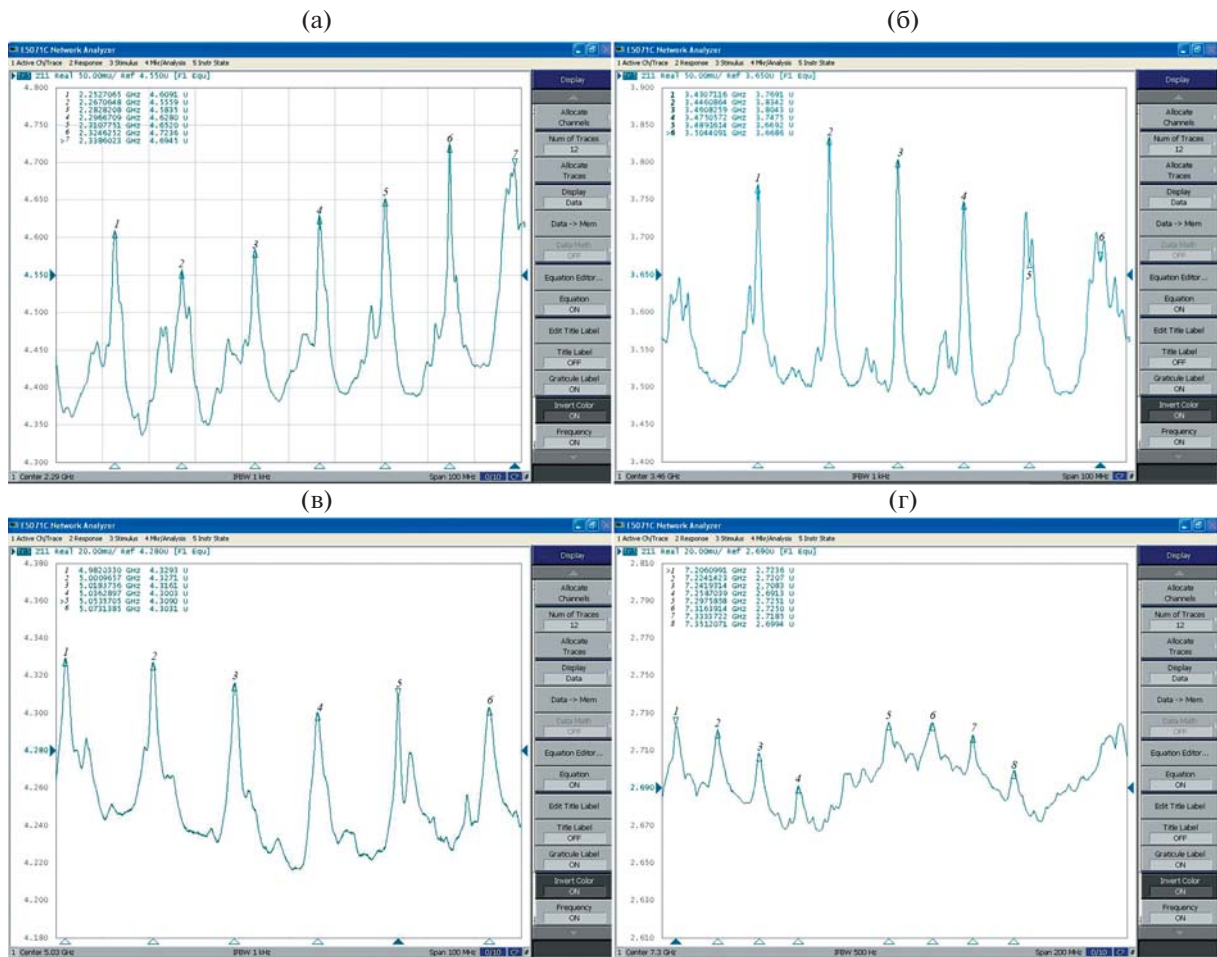


Рис. 3. Примеры частотной зависимости действительной части импеданса  $Re Z_{11e}$ , полученные на экспериментальном образце № 2 (ПАВ-резонатор с периодом  $d = 20$  мкм) в окрестности частот: (а) – 2.3 ГГц, (б) – 3.5 ГГц, (в) – 5.0 ГГц, (г) – 7.3 ГГц.

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:

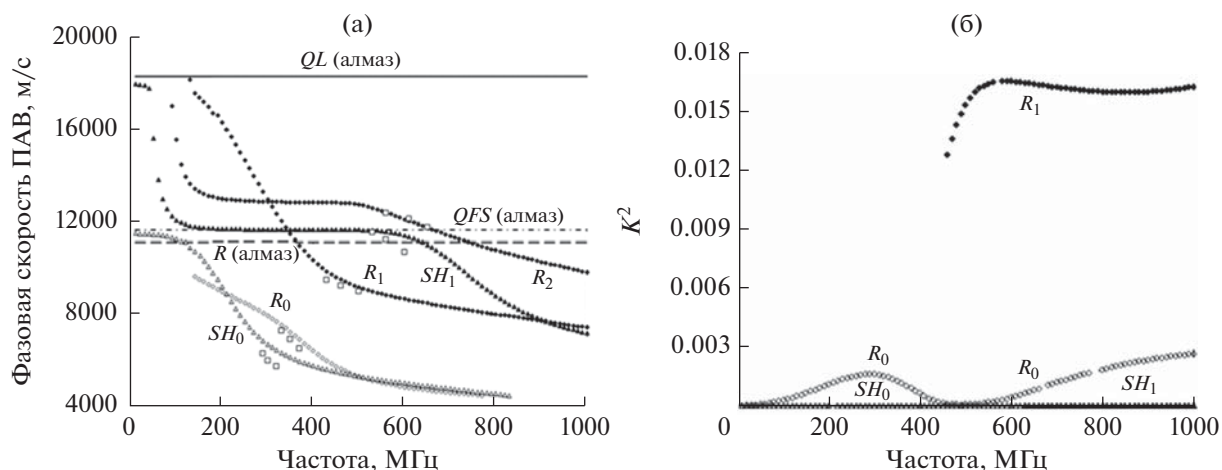
- (1) равенства нулю нормальных составляющих тензора напряжений на границах раздела “Ме/вакуум” и “подложка/вакуум”;
- (2) непрерывности нормальных компонент тензора напряжений и векторов смещения на границах раздела “Ме/пьезоэлектрическая пленка” и “пьезоэлектрическая пленка/подложка”;
- (3) равенства нулю электрического потенциала, связанного с акустической волной, на границе раздела “Ме/пьезоэлектрическая пленка”.

В результате для рассматриваемой задачи можно записать такие соотношения:

$$\begin{aligned}
 \tau_{2j}^{(1)}|_{Y=h_1} &= 0, & \tau_{2j}^{(1)} &= \tau_{2j}^{(2)}|_{Y=h_2}, \\
 \varphi^{(2)} &= 0|_{Y=h_2}, & \mathbf{U}^{(1)} &= \mathbf{U}^{(2)}|_{Y=h_2}, \\
 \tau_{2j}^{(3)} &= \tau_{2j}^{(2)}|_{Y=0}, & \mathbf{U}^{(3)} &= \mathbf{U}^{(2)}|_{Y=0}, \\
 \tau_{2j}^{(3)} &= 0|_{Y=-h}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

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/AlN/(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  $22 \times 22$ . 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). Коэффи-

циенты электромеханической связи (рис. 4б) были получены по известной формуле  $K^2 = 2\Delta V/V$ , где  $\Delta V$  – 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  $R_0$  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  $R_1$ , 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  $SH_0$ - и  $SH_1$ -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

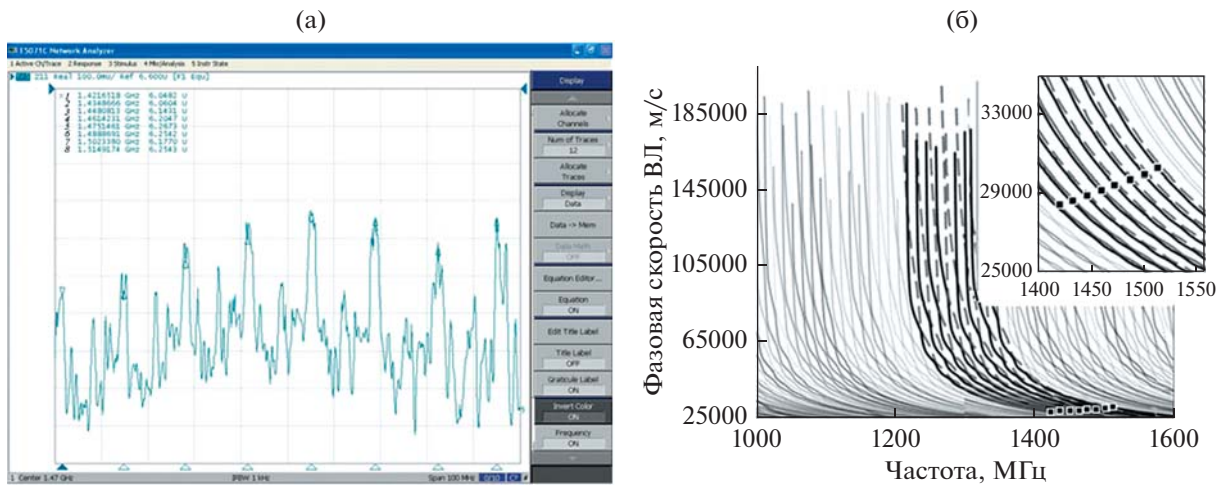


Рис. 5. (а) – Частотная зависимость действительной части импеданса  $\text{Re}Z_{11e}$ , полученная на экспериментальном образце № 2, и (б) – рассчитанные дисперсионные кривые фазовых скоростей волн Лэмба в ПСС “Al/AlN/(001) алмаз” в частотном диапазоне 1400–1550 МГц. Экспериментальные данные для образца № 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  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  – 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  $U_y$  парциальные компоненты, а фазовый сдвиг между ними должен быть равен  $90^\circ$ , т.е. осциллирующие частицы движутся по эллипсу, который в случае чистых мод лежит в сагиттальной плоскости  $XU$ . 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  $Y$  оси 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  $T$ , 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. 5б, 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.

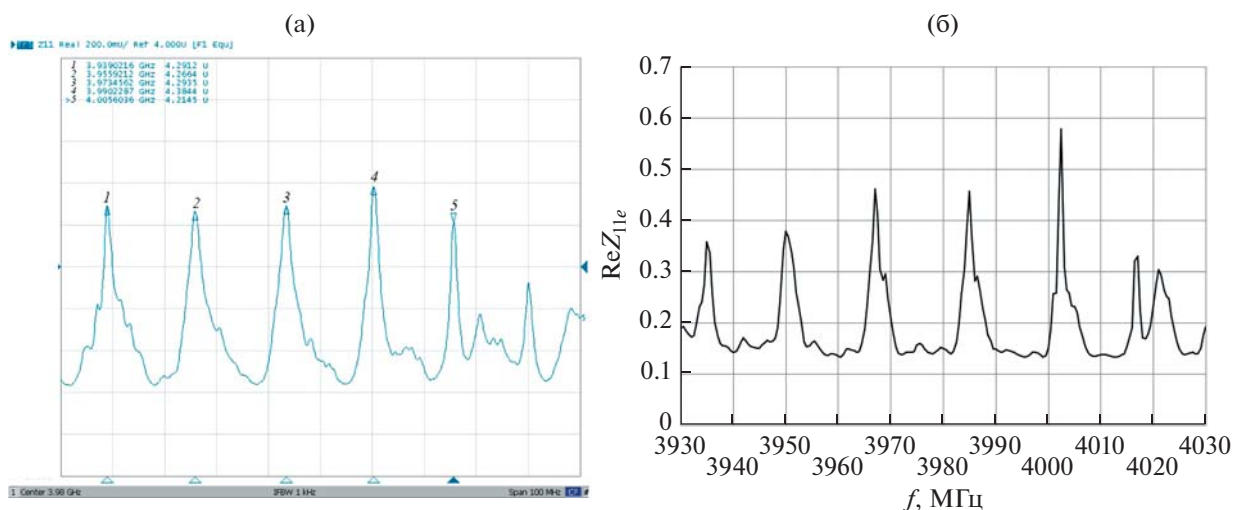


Рис. 6. Примеры (а) – экспериментальной и (б) – рассчитанной частотной зависимости действительной части импеданса  $\text{Re}Z_{11e}$ , полученные на экспериментальном образце № 2 (ПАВ-резонатор с периодом  $d = 20$  мкм) в окрестности частоты 4 ГГц.

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  $Y$ -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  $\text{Re} Z_{11e}$  составил значение  $\sim 17$  МГц, тогда как соответствующая величина для образца НВАР, реализованного на ПСС “Al/AlN/Mo/(100) алмаз” с теми же значениями толщин подложки и пленки AlN, равна  $\sim 19$  МГц.

## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детально исследовано распространение дисперсионных поверхностных акустических волн типов Рэлея, Сезавы и  $SH$ -мод в пьезоэлектрических слоистых структурах “Me-ВШП/AlN/(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 “Me-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  $\sim 7$  ГГц нагруженная добротность имела значение  $\sim 3400$ , 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-



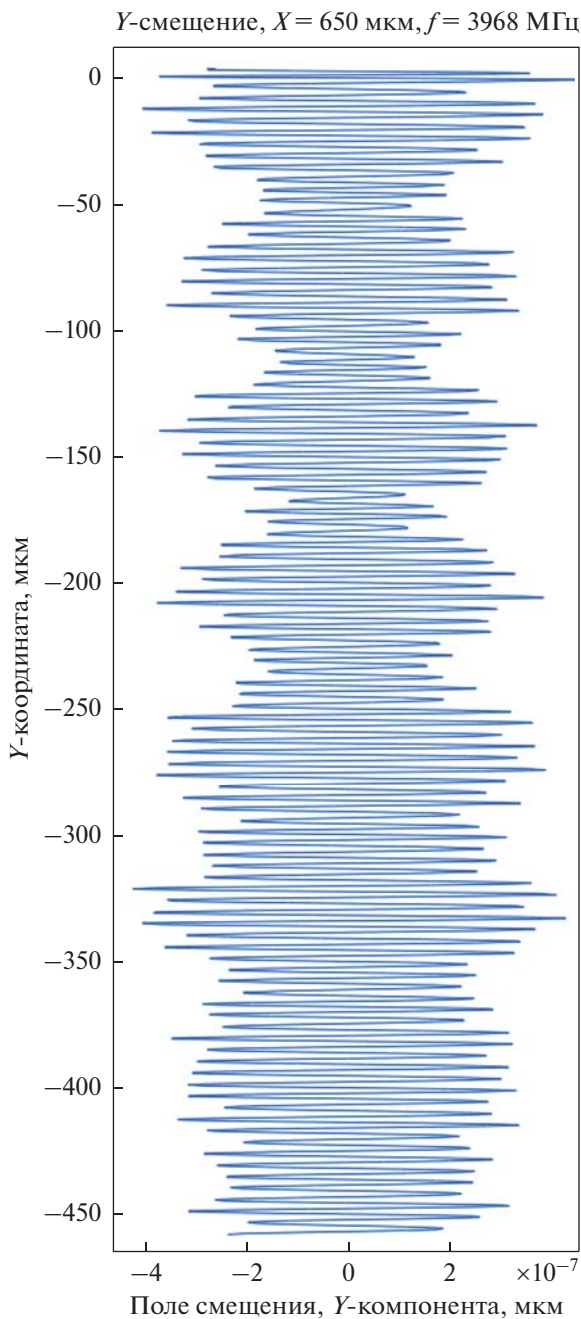


Рис. 7. Распределение Y-компоненты смещения по толщине экспериментального образца № 2 (ПАВ-резонатор с периодом  $d = 20$  мкм) на частоте 3.968 ГГц.

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-

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 СВЧ 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

1. 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.: Изд-во АН СССР, 1957. 503 с.
6. Jin Y., Joshi S.G. Characteristics of ultrasonic Lamb waves in  $128^\circ$  rotated Y-cut lithium niobate // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 1994. V. 41. P. 279–283.
7. 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.
8. 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.
10. 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., Nadochiy 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.
12. 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.

13. *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Borodina I.A., Joshi S.G.* Characteristics of acoustic plate waves in potassium niobate (KNbO<sub>3</sub>) single crystal // *Ultrasonics*. 2001. V. 39. P. 51–55.
14. *Anisimkin V.I.* The anisotropy of the basic characteristics of Lamb waves in a (001)-Bi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub> piezoelectric crystal // *Acoust. Phys.* 2016. V. 62. № 2. P. 165–168.
15. *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.
18. *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.
19. *Choujaa A., Tirole N., Bonjour C., Martin G., Hauden D., Blind P., Pommier C.* AlN/silicon Lamb-wave micro-sensors for pressure and gravimetric measurements // *Sensors and Actuators A: Physical*. 1995. V. 46. P. 179–182.
20. *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.
21. *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 frequencies up to 20 GHz // *Ultrasonics*. 2017. V. 78. P. 162–165.
23. *Сорокин Б.П., Новоселов А.С., Квашнин Г.М., Лупарев Н.В., Асафьев Н.О., Шупилов А.Б., Аксененков В.В.* Разработка и исследование композитных акустических резонаторов со структурой “Al/(Al,Sc)N/Мо/алмаз” с высокой добротностью на СВЧ // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65. № 3. С. 325–331.
24. *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 diamond-based 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.
27. *Sotnikov A.V., Schmidt H., Weihnacht M., Chemekova T.Yu., Makarov Yu.N.* Elastic and piezoelectric properties of AlN and LiAlO<sub>2</sub> single crystals // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*. 2010. V. 57. P. 808–811.
28. *Сорокин Б.П., Квашнин Г.М., Теличко А.В., Гордеев Г.И., Бурков С.И., Бланк В.Д.* Исследования многослойных СВЧ акустических резонаторов на основе слоистой пьезоэлектрической структуры “Me1/AlN/Me2/(100) алмаз” // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. № 4. С. 464–476.
29. *Macfarlane R.E., Rayne J.A., Jones C.K.* Anomalous temperature dependence of shear modulus C<sub>44</sub> for platinum // *Phys. Lett.* 1965. V. 18. P. 91–92.
30. *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.