

## НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 534.63;534.86

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕНОРНЫХ ПЛЕНОК ИЗ МИЦЕЛИЯ БАЗИДИАЛЬНЫХ ГРИБОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО РЕЗОНАТОРА Me1/AlN/Me2/АЛМАЗ

© 2020 г. А. В. Смирнов<sup>а, \*</sup>, Н. О. Асафьев<sup>б</sup>, Б. П. Сорокин<sup>б</sup>, М. Ю. Зиангирова<sup>с</sup>, А. В. Гольшшин<sup>с</sup>, Л. М. Краснопольская<sup>с</sup>, И. Е. Кузнецова<sup>а, \*\*</sup>

<sup>а</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

<sup>б</sup>Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов,  
ул. Центральная, 7А, Москва, Троицк, 108840 Российская Федерация

<sup>с</sup>Научно-исследовательский институт по изысканию новых антибиотиков им. Г.Ф. Гаузе,  
ул. Большая Пироговская, 11, Москва, 119435 Российская Федерация

\*E-mail: andre-smirnov-v@yandex.ru

\*\*E-mail: kuziren@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.03.2020 г.

После доработки 05.03.2020 г.

Принята к публикации 10.04.2020 г.

В качестве сенсорных покрытий для акустических газовых датчиков на основе СВЧ акустического слоистого резонатора Me1/AlN/Me2/алмаз предложено использовать органические пленки на основе экстрактов биомассы штамма базидиального гриба *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst (*G. lucidum*). Проведено погруженное культивирование базидиомицета на подобранной жидкой питательной среде для получения биомассы, после чего получены экстракты биомассы с использованием двухкомпонентных систем растворителей (вода/этанол) с различными объемными соотношениями. Разработана базовая методика и созданы органические пленки на основе экстрактов биомассы базидиального гриба *G. lucidum* на поверхности резонатора. Морфологические свойства созданных пленок исследованы при помощи сканирующей микроскопии. Измерены добротность и резонансная частота разработанного СВЧ акустического слоистого резонатора Me1/AlN/Me2/алмаз. Проведен анализ влияния создаваемых органических пленок на параметры СВЧ акустического резонатора. Сделан вывод о возможности использования данных пленок в качестве сенсорных покрытий для соответствующего газового акустического датчика.

DOI: 10.31857/S0033849420110169

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время обеспечение экологической и биологической безопасности, предотвращение или минимизация последствий террористических атак, улучшение условий жизни человека, в том числе создание распределенных сенсорных систем, позволяющих в режиме реального времени проводить мониторинг состояния окружающей среды являются актуальными задачами. Для их решения необходимо дальнейшее развитие различных типов датчиков, в том числе повышение их чувствительности, селективности, надежности и технологичности исполнения. Эти датчики могут быть реализованы на различных физических принципах, включая акустоэлектронные технологии. В последние 25 лет было разработано большое количество акустических химических сенсоров, использующих разные методы и подходы,

которые позволяли исследовать газовые среды [1, 2]. В настоящее время существует большое количество статей, предлагающих использовать в качестве химических датчиков – пьезоэлектрические резонаторы [3] и линии задержки на поверхностных акустических волнах [4] или волнах в пластинах [5, 6]. Большинство всех предлагаемых акустоэлектронных сенсоров основаны на использовании специальных пленок, нанесенных на поверхность звукопровода. Если физические параметры такой пленки меняются под воздействием окружающей среды, то это приводит к изменению характеристик акустической волны, распространяющейся в такой структуре. Регистрация этих изменения дает информацию о присутствии химических агентов в окружающей среде. В качестве сенсорных пленок было предложено использовать такие материалы как ZnO, TeO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub> и

TiO<sub>2</sub> [7–9], полимерные материалы [10, 11], пленки из полипиролла [12], углеродные нанотрубки [13], графеноподобные материалы [14–16] и различные наночастицы [17]. Несмотря на большое количество работ по данной тематике проблема поиска чувствительных и селективных к различным газам пленок является по-прежнему актуальной. Одним из возможных подходов является использование экстрактов мицелия высших грибов для создания сенсорных пленок. Ранее экспериментально было показано, что экстракты некоторых грибов показывают высокую чувствительность к фенолу, парам воды [18, 19], аммиаку, парам формальдегида и этилацетата [20]. Однако работы в данном направлении находятся в самом начале своего развития. Для создания биосенсорных пленок, применимых к использованию в химических датчиках, необходимо разработать стандартную технологию их получения, исследовать физические и биохимические процессы, приводящие к селективной реакции различных типов грибов на отдельные газы.

В настоящее время в литературе практически отсутствуют сведения о характере взаимодействия грибных метаболитов с различными газами. Однако существуют большие перспективы их использования в качестве продуцентов метаболитов, обеспечивающих отклик органических пленок на целевые полярные и неполярные газы. Грибы обладают широкой субстратной специфичностью и способны продуцировать метаболиты различной химической природы, которые смогут обеспечить высокую селективность создаваемых сенсоров. Например, известно, что только базидиомицеты способны продуцировать такие окислительные ферменты, как лигнин-пероксидазы и марганец-пероксидазы [21]. Многие виды базидиальных грибов продуцируют уникальные соединения: *Ganoderma lucidum* является продуцентом тритерпенов [22–25], *Hericium erinaceus* – гериценонов и эринаценонов [26] и т.д. Погруженное культивирование базидиального гриба *Ganoderma lucidum* позволяет создавать условия для направленного биосинтеза целевых метаболитов, что в свою очередь приводит к упрощению задачи создания разрабатываемых органических сенсорных пленок в строго контролируемых стандартных условиях [27].

Как известно, резонансная частота объемных акустических резонаторов сильно зависит от изменения свойств окружающей среды [28]. Кроме того, чувствительность резонансных акустоэлектронных сенсоров растет с ростом частоты [29]. В последние годы появились работы, посвященные СВЧ акустическим резонаторам на основе пьезоэлектрической слоистой структуры Me1/AlN/Me2/алмаз, которые отличаются повышенными операционными частотами вплоть до 20 ГГц [30, 31]. Следует также отметить, что алмазная подложка является биологически инертной.

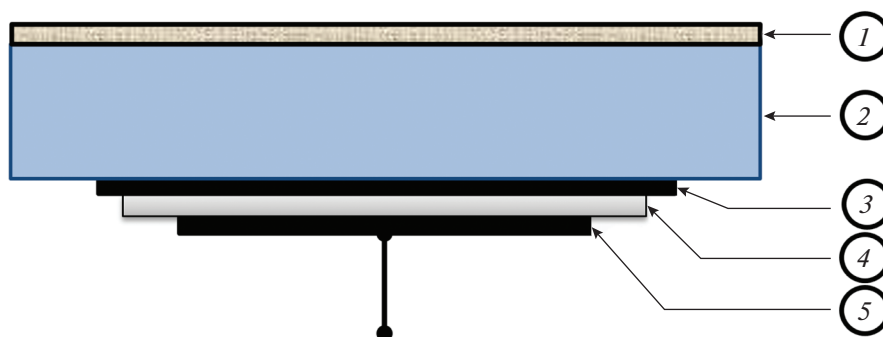
Таким образом, можно предположить, что использование высокочастотных акустических резонаторов с сенсорной пленкой из мицелия высших грибов позволит разработать газовый сенсор с более высокой чувствительностью и селективностью. Одним из основных вопросов при создании таких датчиков является степень влияния сенсорных пленок на характеристики СВЧ резонатора до воздействия целевых газов.

В данной работе рассмотрено влияние сенсорных пленок на основе мицелия базидиального гриба *Ganoderma lucidum*, полученных различными способами, на характеристики СВЧ акустического резонатора на основе пьезоэлектрической слоистой структуры Me1/AlN/Me2/алмаз.

## 1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

### 1.1. Получение биомассы базидиомицетов

В данной работе был использован штамм базидиального гриба *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst (*G. lucidum*) из коллекции лаборатории биосинтеза биологически активных веществ НИИ новых антибиотиков. Для получения мицелия гриба была подобрана рецептура жидкой ферментационной среды. Поставленной задачей создания акустических сенсоров отвечали только среды, представляющие собой раствор и соответствующие трофическим потребностям исследуемого штамма. Нерастворимые в воде ингредиенты были нежелательны, в связи со сложностью контроля их полного усвоения и, как следствие, отсутствием в получаемых пленках соединений негрибного происхождения. Таким образом, для погруженного культивирования базидиомицета была выбрана среда, содержащая глюкозу, дрожжевой экстракт (Serva) и минеральные соли. Рабочие культуры гриба *G. lucidum* хранили на скошенном картофельно-глюкозном агаре при 2°C. Жидкий посевной материал выращивали на неохмеленном пивном сусле (4° по Баллингу) в колбах Эрленмейера объемом 750 мл, содержащих 100 мл среды. Среда стерилизовали в автоклаве при 1.2 атм в течение 30 мин. Для засева колб с посевной средой использовали культуру, выращенную при 25°C в течение 7 сут в пробирках на скошенном картофельно-глюкозном агаре из расчета 1/4 пробирки на колбу. Выращивание жидкого посевного материала проводили на круговой качалке (230 об/мин) при температуре 26°C в течение 6 сут. Для накопления биомассы проводили погруженное культивирование гриба в колбах Эрленмейера объемом 750 мл, содержащих 100 мл ферментационной среды. Объем посевного материала составлял 10% объема ферментационной среды. Ферментационная среда содержала (г/л водопроводной воды): глюкоза безводная – 20.0; дрожжевой экстракт (Serva) – 10.0; дигидрофос-



**Рис. 1.** Схематическое изображение резонатора на объемных акустических волнах: 1 – пленка мицелия; 2 – подложка из (001) алмаза Па-типа; 3 – внутренний электрод (молибден); 4 – пьезоэлектрическая пленка AlN; 5 – внешний электрод (алюминий).

фат калия – 2.0 и сульфат магния – 0.2. Длительность процесса культивирования составляла 5 суток на круговой качалке (230 об/мин) при температуре 26°C. Выход воздушно-сухой биомассы на использованной питательной среде составил до 5.6 г/л.

Для получения экстрактов биомассы гриба *G. lucidum* использовали в качестве растворителя воду и двухкомпонентные системы растворителей (вода/этанол) с объемными соотношениями 1 : 1 и 1 : 4. Биомассу гриба отделяли от культуральной жидкости фильтрованием через лавсановую ткань и промывали дистиллированной водой, после чего лиофильно высушивали. Сухую биомассу гриба измельчали при помощи фарфоровой ступки и пестика до гомогенного состояния, соединяли с растворителем/ями в количестве 0.0125 г/мл и проводили экстракцию на водяной бане при температуре 80°C, после чего центрифугировали при 3500 об/мин в течении 5 минут и отделяли супернатант при помощи пипетки. Полученный супернатант экстрагированного мицелия в растворителе вода/этанол 1 : 4 лиофильно упаривали до уменьшения в объеме в 10 раз.

### 1.2. Резонатор на объемных акустических волнах

Схематическое изображение композитного многообертонового резонатора на объемных акустических волнах (далее – ОАВ-резонатор) (в англоязычной литературе HBAR – High overtone Bulk Acoustic Resonator) на основе алмаза представлено на рис. 1. В качестве базовой использовалась сенсорная пьезоэлектрическая слоистая структура “Al/AlN/Mo/(100) алмаз”. В качестве материала подложки был использован синтетический (100) монокристаллический алмаз Па типа, выращенный методом температурного градиента при высоких температурах и давлении (НРПТ – High Pressure High Temperature).

После изготовления ОАВ-резонатор размещали в корпусе с внешним SMA-разъемом; 3D-

модель корпусированного резонатора представлена на рис. 2.

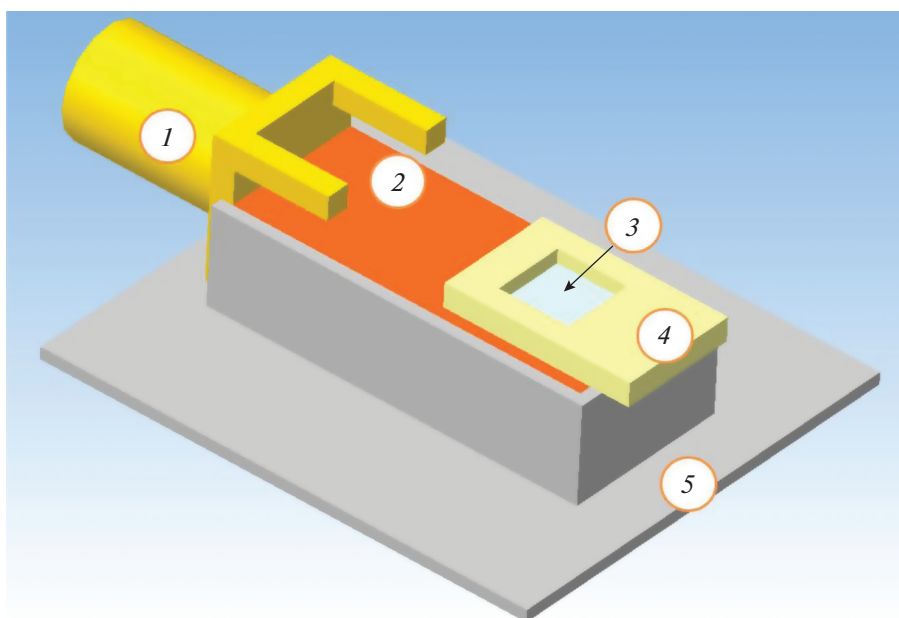
Микроволновые исследования акустических свойств резонатора проводились с помощью векторного анализатора цепей E5071C ENA Series с учетом сдвигов рабочих частот ряда обертонов, возбужденных вплоть до 3 ГГц, а также изменений добротности резонансных кривых при нанесении пленки. Рабочие частоты нескольких обертонов были выбраны по наибольшей добротности.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

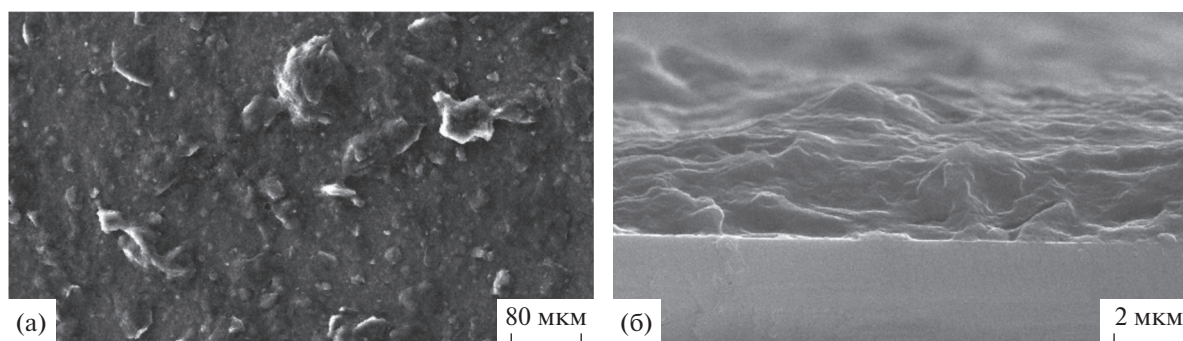
### 2.1. Получение органических пленок на основе экстрактов биомассы

В процессе исследования были предприняты попытки получения стойких к механическому воздействию пленок на основе метаболитов гриба *G. lucidum*. Было показано, что при смешении 1.5 мл водного экстракта биомассы *G. lucidum* с 10 мг измельченной биомассы *G. lucidum*, тщательном перемешивании и нанесении на подложку возможно получение тонкой равномерной пленки (рис. 3). Равномерные тонкие пленки были также получены при нанесении на подложку водного экстракта *G. lucidum*, водно-этанольных экстрактов *G. lucidum*. Однако такие пленки имели низкую механическую прочность, особенно в среде с высоким содержанием водяного пара, за счет набухания полисахаридов в ее составе.

Один из возможных путей получения пленок на основе метаболитов *G. lucidum* с необходимыми механическими свойствами для создания газового датчика является включение в состав пленок структурообразующих полимерных материалов. Анализ литературы показал, что перспективными для изучения в качестве возможных ингредиентов пленок могут выступать полимеры и сополимеры акриловой и метакриловой кислот, эпоксидные и фенолоформальдегидные смолы, а также природ-



**Рис. 2.** 3D модель резонатора, смонтированного в корпусе: 1 – SMA-разъем; 2 – микрополосковая линия на поверхности стеклотекстолита; 3 – свободная поверхность алмаза; 4 – ячейка с бортами для размещения сенсорных покрытий; 5 – корпус.



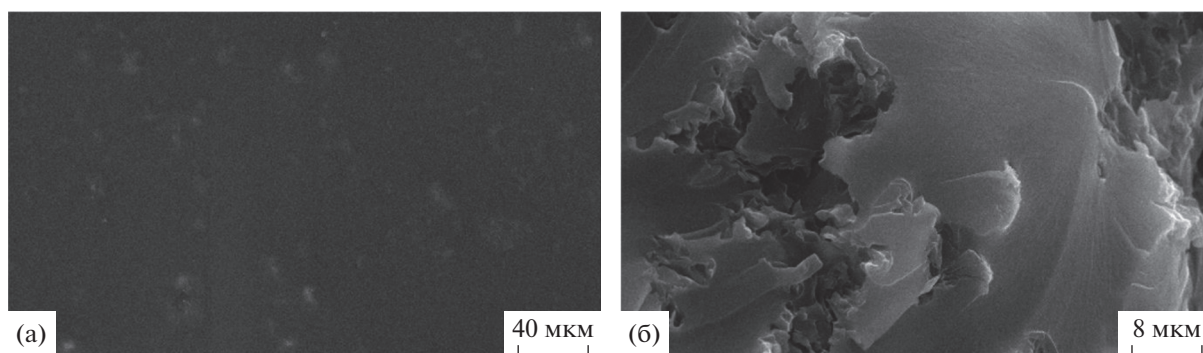
**Рис. 3.** Изображения поверхности (а) и скола (б) пленки на основе смеси водного экстракта биомассы и измельченного мицелия гриба *G. lucidum*, полученные сканирующим электронным микроскопом.

ные полимеры. Изучение было начато с полимеров акриловой кислоты. Нами были разработаны условия смешивания изучаемого полимера и экстрактов гриба *G. lucidum*, обеспечивающие однородность и механическую прочность получаемых пленок.

Полимеры акриловой кислоты широко выпускаются промышленностью и имеют большой спектр применения. Для работы были выбраны составы на основе этилгексилакрилата, метакриловой кислоты, фотоинициатора (гидроксиалкилфенон), растворенные в ацетоне. Пленка, получаемая при полимеризации состава, отличалась высокой пористостью и адсорбирующей способностью, высокой скоростью высыхания и полимеризации, а также высокой адгезионной способностью. В процессе исследования было показано, что при внесении в 1 мл отверждаемого раствора до фото-

инициации 40 мг сухой биомассы гриба *G. lucidum*, возможно получить равномерное распределение частиц биомассы, которое сохраняется при процессе полимеризации под действием ультрафиолета (УФ). Получаемая пленка имела высокую механическую прочность при сохранении высокой адгезионной способности и достаточной когезии (рис. 4).

Положительный результат был достигнут также при получении пленки на основе водно-этанольного (объемное соотношение 1 : 4) экстракта биомассы *G. lucidum*. Для этого смешивали 1 мл отверждаемого раствора до фотоинициации с 1 мл упаренного водно-этанольного экстракта. Перемешивали до получения стойкой мелкодисперстной эмульсии, наносили на подложку и фотоотверждали под действием УФ. Получаемая пленка обладала выраженной гомогенностью и эластичностью.



**Рис. 4.** Изображения поверхности (а) и скола (б) полимеризованной пленки на основе смеси этилгексилакрилата и метакриловой кислоты в ацетоне и измельченного мицелия гриба *G. lucidum*, полученные сканирующим электронным микроскопом.

## 2.2. Изучение влияния органических сенсорных пленок на параметры СВЧ акустического резонатора

В процессе эксперимента на свободную поверхность алмаза наносили различные образцы суспензии биомассы мицелия в объеме 6.5 мкл. После высыхания и образования пленки снимались амплитудно-частотные характеристики ОАВ-резонатора в виде зависимости реальной части импеданса  $Z_{11e}$  как функции частоты. Температура в процессе измерений фиксировалась на отметке 25°C. Измерение толщины полученных пленок мицелия осуществляли с помощью 3D профилометра Sensofar S lupx, для этого часть пленки удалялась с поверхности алмаза и средняя толщина оценивалась по высоте ступеньки. Средние толщины пленок над апертурой ОАВ-резонатора приведены в табл. 1.

При наличии пленки на свободной поверхности алмаза АЧХ сенсора изменялась. На рис. 5 представлены частотные зависимости добротности  $Q$  и параметра качества  $Qf$  ОАВ-резонатора ( $f$  – частота). Каждая точка соответствует одному из 15-ти референсных обертонов. В области 1.5...2.5 ГГц референсных обертонов нет в силу конструктивных особенностей сенсора.

Анализируя рис. 5а, 5б, можно сделать выводы относительно работоспособности тех или иных исследованных покрытий в составе акустоэлектронного газового сенсора. Так, даже при нанесении покрытий ~75 мкм (образец Р-Асryl + 80%) добротность для обертонов с частотами 2.75...3.0 ГГц лежала в диапазоне 8000...10000, что вполне приемлемо с точки зрения дальнейших приложений. Однако резкое уменьшение  $Q$  выше 3.0 ГГц, как и для образца H<sub>2</sub>O + Bio (2 мкм), ограничивает область операционных частот. Согласно предыдущим исследованиям [30], на частотах выше 1...2 ГГц в алмазе наблюдается изменение механизма акустического затухания от режима Ахизера к режиму Ландау–Румера. В последнем случае добротность остается не зависящей от дальнейшего роста частоты, а параметр качества должен возрастать пропорционально операционной частоте, что и наблюдается на рис. 5б. Поэтому наибольшие значения чувствительности ОАВ-резонатора как газового сенсора следует ожидать в области 2.75...3.1 ГГц. С этой точки зрения наиболее приемлемы образцы “Этанол 50%” (0.7 мкм), “Н<sub>2</sub>О” (1 мкм), “Этанол 80%” (0.7 мкм), “Р-Асryl + 80%” (75 мкм) и “Р-Асryl” (40 мкм).

Данные, приведенные на рис. 6 и 7, наиболее важны с точки зрения отбора образцов для даль-

**Таблица 1.** Средняя толщина пленки над апертурой

№	Полное название образца	Краткое название	Толщина пленок, мкм
1	Экстракт водно-этанольный 1 : 1	Этанол 50%	0.7
2	Экстракт водно-этанольный 1 : 4	Этанол 80%	0.7
3	Экстракт водный	H <sub>2</sub> O	1
4	Экстракт водный + сухая биомасса	H <sub>2</sub> O + Bio	2
5	Образец на основе этилгексилакрилата, метакриловой кислоты, фотоинициатора (гидроксиалкилфенон), растворенных в ацетоне	Р-Асryl	40
6	Образец на основе этилгексилакрилата, метакриловой кислоты, фотоинициатора (гидроксиалкилфенон) растворенные в ацетоне + упаренный водно-этанольный экстракт	Р-Асryl + 80%	75

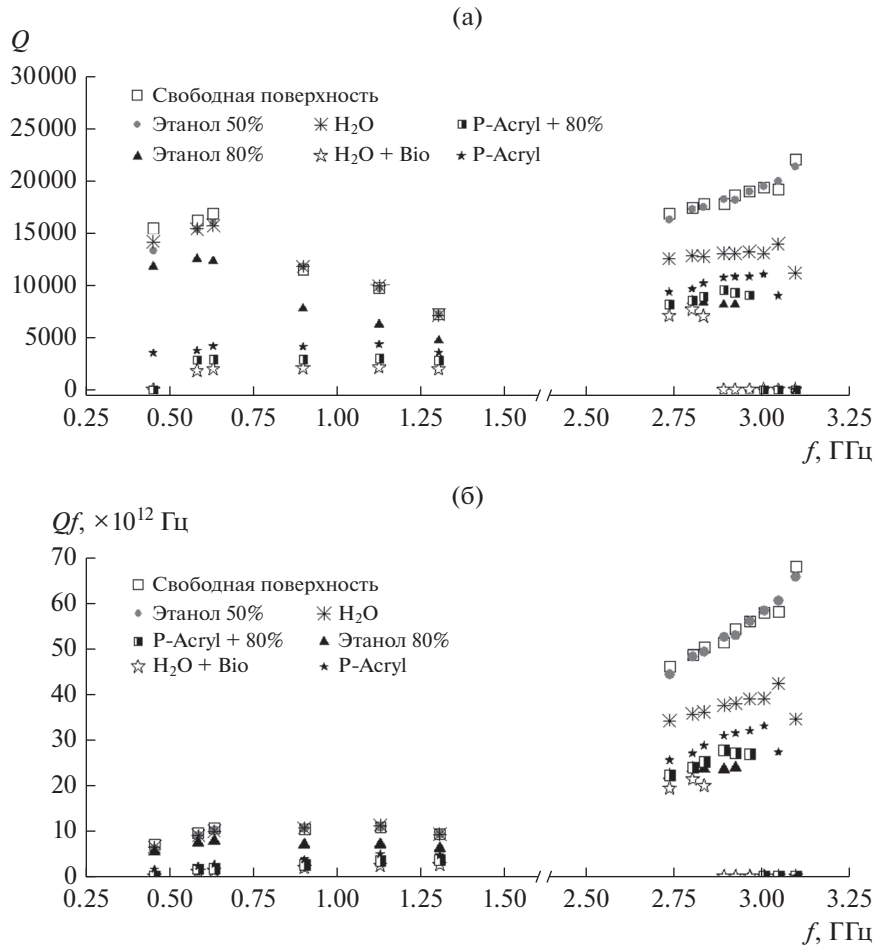


Рис. 5. Частотные зависимости добротности  $Q$  (а) и параметра качества  $Qf$  (б) для различных образцы покрытий ОАВ-резонатора.

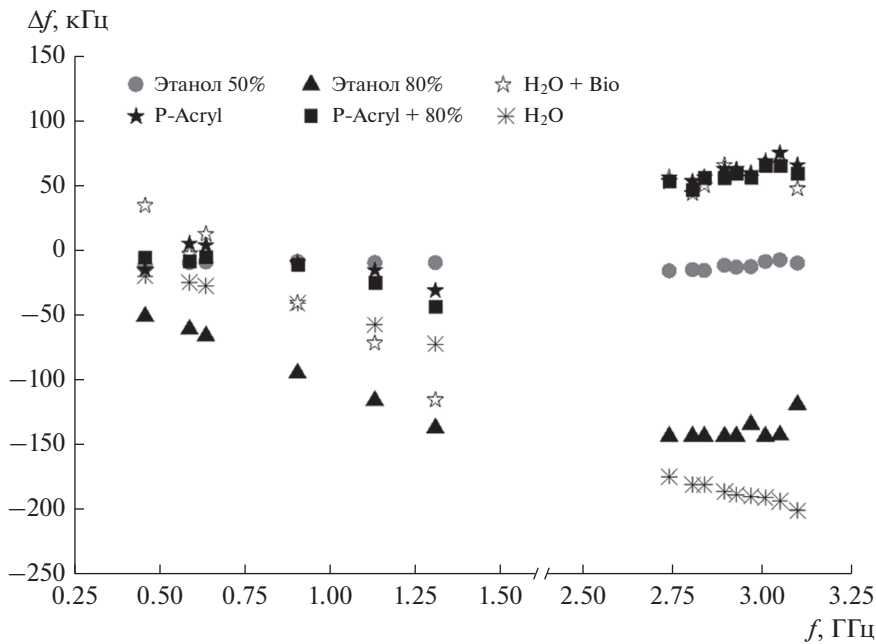


Рис. 6. Отклонение частоты обертонов резонатора от референсных значений вследствие нанесения покрытий.

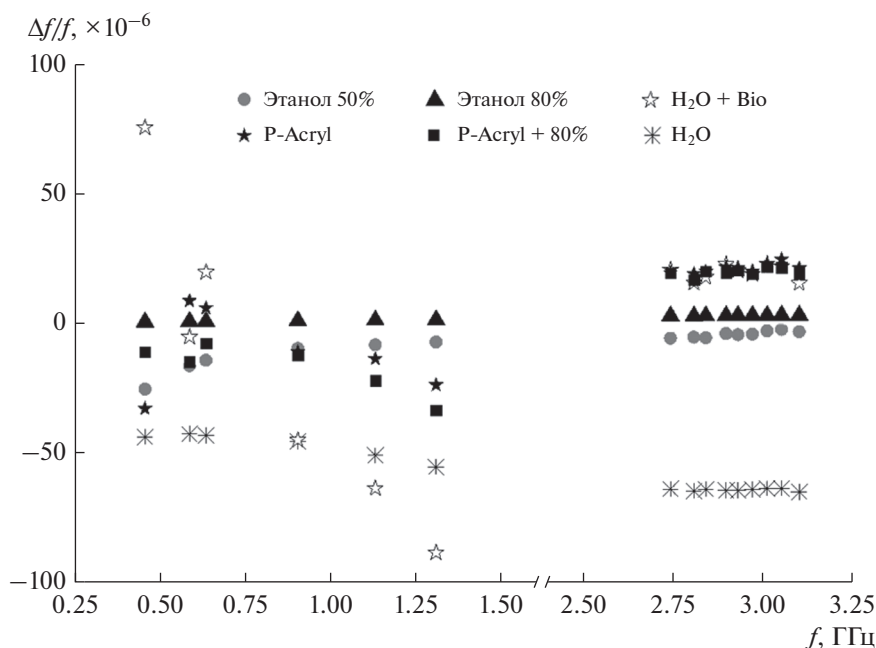


Рис. 7. Относительный сдвиг частот обертонов резонатора.

нейших исследований. Так, превышение частот обертонов в области 2.75...3.1 ГГц над референсными значениями (положительный сдвиг), полученное для образцов “P-Acryl + 80%”, “P-Acryl” и “H<sub>2</sub>O + Bio” является артефактом, поскольку измерения не вполне достоверны вследствие искажения формы резонансного пика и приводятся в справочном порядке. Тем самым предварительные исследования показали, что по сочетанию таких критериев, как высокая добротность и воспроизводимость результатов, наибольший интерес представляют образцы “Этанол 50%”, “H<sub>2</sub>O” и “Этанол 80%”.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружено, что нанесение суспензии биомассы мицелия на алмазную поверхность позволяет получить сенсорные покрытия, которые не оказывают существенного влияния на добротность ОАВ-резонатора на основе пьезоэлектрической слоистой структуре “Al/AlN/Mo/(100) алмаз” вплоть до операционных частот ~3.1 ГГц. Применение таких операционных частот позволит реализовать наибольшую относительную чувствительность акустоэлектронного газового сенсора. В результате исследований СВЧ-параметров ОАВ-резонатора показано, что наиболее перспективными являются образцы “Этанол 50%”, “H<sub>2</sub>O” и “Этанол 80%”, образующие относительно тонкие пленки.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-00173).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Balantine D.S., White R.M., Martin S.J. et al. Acoustic Wave Sensors: Theory, Design and Physico-Chemical Applications.* San Diego: Academic Press, 1996.
2. *Jones T.A., Walsh P. Sensors: A Comprehensive Survey.* V. 2. Chemical and Biological Sensors. Pt. 1 / Eds. by W. Göpel, T.A. Jones t, M. Kleitz et al. Weinheim: VCH, 1992. P. 529.
3. *Venema A., Nieuwkoop E., Vellekoop M.J. et al. // Sensors and Actuators.* 1986. V. 10. № 1–2. P. 47.
4. *Caliendo C., Verona E., D'Amico A. Gas Sensors / Ed. by G. Sberveglieri. L.: Kluwer Academic Publishers, 1992. P. 281.*
5. *Анисимкин В.И., Воронова Н.В., Кузнецова И.Е., Пятайкин И.И. // Изв. РАН. Сер. Физическая.* 2015. Т. 79. № 10. С. 1437.
6. *Анисимкин В.И. // РЭ.* 2015. Т. 60. № 9. С. 985.
7. *Nguyen D.C., Nguyen V.T., Vu V.Q. et al. // Sensors and Actuators B.* 2014. V. 201. P. 7.
8. *Raj V.B., Harpreet S., Nimal A.T. et al. // Sensors and Actuators B.* 2013. V. 178. P. 636.
9. *Анисимкин И.В., Гуляев Ю.В., Анисимкин В.И. // РЭ.* 2002. Т. 47. № 2. С. 253.
10. *Verma P., Yadava R.D.S. // Sensors and Actuators B.* 2015. V. 209. P. 751.
11. *Sothivelr K., Bender F., Josse F. et al. // ACS Sensors.* 2016. V. 1. № 1. P. 63.

12. *Penza M., Milella E., Anisimkin V.I.* // IEEE Trans. 1998. V. UFFC-45. № 5. P. 1125.
13. *De Luca A., Cole M. T., Hopper R.H. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2015. V. 106. № 19. P. 194101.
14. *Phan D.T., Chung G.S.* // Int. J. Hydrogen Energy. 2014. V. 39. P. 620.
15. *Xuan W., He X., Chen J. et al.* // Nanoscale. 2015. V. 7. № 16. P. 7430.
16. *Kuznetsova I.E., Anisimkin V.I., Gubin S.P. et al.* // Ultrasonics. 2017. V. 81. P. 135.
17. *Zhan B., Liu C., Shi H. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. № 23. P. 243704.
18. *Silina Y.E., Kuchmenko T.A., Korenman Y.I. et al.* // J. Analytical Chem. 2005. V. 60. № 7. P. 678.
19. *Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Krasnopolskaya L.M. et al.* // Sensors. 2020. V. 20. P. 2711.
20. *Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Shikhabudinov A.M. et al.* // Sensors and Actuators B. 2017. V. 243. P. 525.
21. *Kudo S., Harada A., Kubota H. et al.* // ACS Omega. 2017. V. 2. № 10. P. 7329.
22. *Hirotsani M., Furuya T., Shiro M.* // Phytochemistry. 1985. V. 24. № 9. P. 2055.
23. *Nishitoba T., Sato H., Oda K. et al.* // Agricultural and Biological Chemistry. 1988. V. 52. № 1. P. 211.
24. *Lindequist U., Jülich W.D., Witt S.* // Phytochemistry. 2015. V. 114. P. 102.
25. *Sudheer S., Alzorqi I., Manickam S., Ali A.* Bioactive Molecules in Food / Eds. by J.-M. Mérillon, K.G. Ramawat. Cham: Springer, 2018. P. 1863.
26. *Ma B.J., Shen J.W., Yu H.Y. et al.* // Mycology. 2010. V. 1. № 2. P. 92.
27. *Краснопольская Л.М., Белицкий И.В., Антимонова А.В., Соболева Н.Ю.* // Успехи медицинской микологии. 2004. Т. 3. № 3. С. 222.
28. *Кайно Г.* Акустические волны. Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. М.: Мир, 1990.
29. *Mujahid A., Afzal A., Dickert F.L.* // Sensors. 2019. V. 19. № 20. P. 4395.
30. *Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Novoselov A.S. et al.* // Ultrasonics. 2017. V. 78. P. 162.
31. *Сорокин Б.П., Теличко А.В., Квашигин Г.М. и др.* // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 6. С. 705.