

ИССЛЕДОВАНИЯ СВЧ АКУСТИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА

Б.П. Сорокин, Г.М. Квашнин, Н.В. Лупарев, Н.О. Асафьев, Д.А. Щербаков

Борис Павлович Сорокин, Никита Олегович Асафьев, Денис Алексеевич Щербаков

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7А, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация, 141701

E-mail: bpsorokin1953@yandex.ru, asafev.no@phystech.edu, scherbakov.da@phystech.edu

Геннадий Михайлович Квашнин, Николай Викторович Лупарев *

Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов, ул. Центральная, 7А, Троицк, Москва, Российская Федерация, 108840

E-mail: genmih@yandex.ru, luparev@gmail.com*

Применяя магнетронное напыление тонких и ультратонких пленок Al, Sc и Mo, были исследованы сенсорные свойства СВЧ многообертоного резонатора, разработанного на основе пьезоэлектрической слоистой структуры “Al/AlN/Mo/(100) алмаз”, вплоть до частоты 8 ГГц. Благодаря повышенной добротности в СВЧ диапазоне, присущему данному типу резонаторов, удалось реализовать высокую чувствительность сенсорного элемента. Зависимости частотного сдвига данного обертона от толщины пленки могут качественно отличаться от линейно пропорциональных зависимостей в случаях напыления пленок различных металлов. Такие особенности объяснялись разницей акустического импеданса между пленками и алмазной подложкой. Точки перегиба кривых зависимостей частотного сдвига от толщины пленки могут быть использованы для определения фазовой скорости материала пленки. Экспериментальные результаты находятся в хорошем соответствии с модельными данными, полученными с помощью метода конечных элементов. Достигнутое значение реальной толщинной чувствительности сенсора около 5 нм фактически ограничено невозможностью более тонкой калибровки с применением современных средств измерения толщины. Опытные образцы сенсорных элементов имеют важные преимущества перед всеми другими типами акустоэлектронных сенсоров за счет применения операционных частот СВЧ диапазона, высокой химической и биологической инертности рабочей поверхности алмаза, стойкости к температурным нагрузкам, абразивной износостойкости, а также возможности многократного применения. Эффективная площадь сенсорного элемента может быть равна тысячам квадратных микрон или меньше, что делает его пригодным для локальных измерений. Исследуемая алмазная пятислойная пьезоэлектрическая структура должна рассматриваться как перспективная платформа для создания ряда сенсоров нового поколения.

Ключевые слова: многообертоный акустический резонатор, микроволновый диапазон, акустоэлектронный сенсор, осаждение тонких и ультратонких пленок, синтетический монокристаллический алмаз, нитрид алюминия

Для цитирования:

Сорокин Б.П., Квашнин Г.М., Лупарев Н.В., Асафьев Н.О., Щербаков Д.А. Исследования СВЧ акустических сенсоров на подложках из синтетического алмаза. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 12. С. 63–70

For citation:

Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Luparev N.V., Asafiev N.O., Scherbakov D.A. Studying microwave acoustic sensors based on synthetic diamond substrates. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 12. P. 63–70

STUDYING MICROWAVE ACOUSTIC SENSORS BASED ON SYNTHETIC DIAMOND SUBSTRATES

B.P. Sorokin, G.M. Kvashnin, N.V. Luparev, N.O. Asafiev, D.A. Scherbakov

Boris P. Sorokin, Nikita O. Asafiev, Denis A. Scherbakov

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

E-mail: bpsorokin1953@yandex.ru, asafev.no@phystech.edu, scherbakov.da@phystech.edu

Gennadiy M. Kvashnin, Nikolay V. Luparev*

Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Tsentralnaya st., 7a, Troitsk, Moscow, 108840, Russia

E-mail: genmih@yandex.ru, luparev@gmail.com*

Sensory properties of microwave diamond-based HBAR developed on the piezoelectric layered structure "Al/AlN/Mo/(100) diamond" were investigated by depositing the Al, Sc, and Mo thin and ultrathin films. Due to the increased quality factor in a microwave band inherent in this type of resonators, it is possible realizing a high sensitivity of the sensory element. The dependences of an overtone's frequency shift vs. a film thickness could be differed qualitatively from the linearly proportional ones. Such peculiarities were explained in terms of an acoustic impedance difference between the films and diamond substrate. The features in the dependences of a frequency shift vs a film thickness can be used to determine the phase velocity of a film material. Experimental results were in close accordance with Finite Element Modeling data. Real thickness sensitivity of about 5 nm is actually limited by the imperfection of modern thickness measurement tools. Prototypes of sensory elements have the important advantages over all other types of the acoustoelectronic sensors owing to the microwave operating frequencies up to 8 GHz, high chemical and biological inertness of the working diamond surface, resistance to the temperature load, abrasive wear resistance, and the possibility of a multiple-time application. Effective area of a sensory element can be equal to thousands of square microns or less, which makes it suitable for local measurements. Investigated diamond-based 5th layered piezoelectric structure should be considered as a prospective platform creating a number of new generation sensors.

Key words: HBAR, microwave band, acoustoelectronic sensor device, thin and ultrathin film deposition, synthetic diamond, aluminum nitride

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно развивается направление, связанное с разработкой акустоэлектронных сенсоров для различных приложений, включая биологию, тонкие физико-химические исследования, анализ газового состава атмосферы, обнаружение взрывчатых веществ и др. Современные сенсоры позволяют детектировать адсорбцию нескольких молекул на поверхности. Например, в работе [1] регистрировали концентрацию различных газов на уровне одной миллиардной доли. Такая высокая разрешающая способность была достигнута благодаря уникальным сенсорным свойствам графена. Сенсоры на основе микро- и наноэлектромеханических устройств (МЭМС, НЭМС) способны взвешивать вирусные

частицы массой в несколько фемтограмм (10^{-15} г) [2-4]. Одним из методов измерений является регистрация изменения резонансной частоты устройства, например, в колеблющейся пластинке или стержне-кантилевере из кремния микронных размеров, или в резонаторах на объемных акустических волнах (далее – ОАВ-резонатор). Рекордная чувствительность измерений массы в несколько аттограмм (10^{-18} г) была продемонстрирована в работах [5, 6]. Однако высокая точность измерений требует соблюдения специальных условий – высокой стабильности температуры, высокого вакуума, низких температур, специальной подготовки образцов и проч. Обычно рекордные показатели чувствительности сенсоров на основе МЭМС и НЭМС достигаются в уникальных экспериментах, где чувствительный элемент является

одноразовым. Поэтому, несмотря на достигнутые результаты, вопрос разработки высокочувствительных сенсоров массы остается актуальным.

Самым известным и хорошо исследованным на сегодня акустоэлектронным устройством для измерения массы и толщины тонких пленок являются кварцевые микровесы, принцип применения которых был обоснован в работе [7]. Это устройство представляет собой кварцевую пластинку с нанесенными на главные поверхности металлическими электродами, т.е. толщинный пьезоэлектрический резонатор на продольных или сдвиговых объемных акустических волнах. Приведенная массовая чувствительность таких устройств колеблется в пределах 10^8 - 10^{10} Гц·см²/г [8, 9]. Кварцевые микровесы используют для изучения процессов напыления металлических пленок, скорости травления гальванических сплавов, окисления металлических пленок, а также физических свойств межфазного слоя *in situ* [10]. Для измерения концентрации газов используют сенсоры на основе поверхностных акустических волн (ПАВ), где в области распространения ПАВ наносят адсорбционный слой, например, из Pd пленки. Массовая чувствительность таких сенсоров составляет около 10^9 Гц·см²/г [11].

В настоящее время большое внимание уделено разработке и исследованиям сенсоров на основе тонкопленочных (мембранных) ОАВ-резонаторов (в англоязычной литературе – Film Bulk Acoustic Resonator, FBAR) благодаря более высокой чувствительности $\sim 10^{11}$ Гц·см²/г и с возможностью регистрации удельной массы до 10^{-9} г/см². Например, масс-сенсор на основе мембранного ОАВ-резонатора, изготовленный по технологии МЭМС из нитрида кремния и работоспособный в парах и жидкостях, имел массовую чувствительность 726 см²/г, что примерно в 50 раз превышало чувствительность типичных кварцевых микровесов [12]. Однако добротность Q такого устройства на воздухе составляла около 200-300 на частоте 1 ГГц и падала до 40 на частоте 2 ГГц. Вероятно, обстоятельство должно приводить к снижению чувствительности сенсора. Масс-сенсор на основе пленки ZnO, имеющий FBAR-структуру, показал чувствительность к напылению Ti пленки с толщиной $\sim 1,6$ нм, достигнутую на операционной частоте ~ 2442 МГц [13]. В работе [14] была рассмотрена возможность применения тонкопленочного акустического резонатора с Брэгговской отражательной решеткой как сенсора органических пленок. Использовали операционные частоты 6-8 ГГц. Продемонстрирована воз-

можность исследовать пленки РММА с толщинами от 10 до 20 нм. Авторами [15] исследовано применение FBAR-сенсора со сдвиговой операционной модой для исследований свойств жидкостей. На резонансной частоте 1,25 ГГц в воде добротность резонатора снижалась до 150 от значения 300 на воздухе. Следует отметить, что как мембранные сенсоры, так и разработанные по технологии МЭМС или НЭМС, обладают одним общим недостатком – их нельзя использовать повторно.

Мансфельд и др. [16] предложили использовать многообертоновые ОАВ-резонаторы для спектроскопии свойств металлических пленок. Авторами [17] были изучены сенсорные свойства многообертоновых ОАВ-резонаторов на основе пьезоэлектрических слоистых структур (ПСС) AlN/SiO₂ и YXl/163° LiNbO₃/YXl/32° кварц, функционирующих на продольной (L) и сдвиговой (S) акустических модах соответственно. Основная цель состояла в повышении гравиметрической (массовой) чувствительности таких сенсоров. Таким образом, благодаря высокой добротности многообертонового ОАВ-резонатора на СВЧ можно получить повышение чувствительности с учетом более высокой операционной частоты, которая будет существенно превышать аналогичное значение в сенсорах на основе ПАВ- или мембранных ОАВ-резонаторов. Но такая возможность может быть реализована только в случае, если материал подложки будет обладать низким акустическим затуханием в микроволновом диапазоне частот. В качестве примера такого материала можно выделить синтетический монокристалл алмаза [18]. Его превосходные акустические свойства были исследованы в СВЧ диапазоне до 20 ГГц. Было показано, что добротность многообертонового ОАВ-резонатора на основе алмаза составляет значение ~ 12500 при ~ 20 ГГц и остается столь высокой только благодаря механизму Ландау-Румера микроволнового акустического затухания [19]. В работе [20] авторы исследовали влияние сенсорных пленок из мицелия базидиальных грибов на характеристики СВЧ многообертонового ОАВ-резонатора со структурой Me1/AlN/Me2/алмаз.

Основная цель данной работы связана с детальным изучением свойств многообертонового ОАВ-резонатора на алмазной подложке как сенсора тонких и ультратонких металлических пленок.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Схема многообертонового ОАВ-резонатора на алмазной подложке в качестве сенсора напыле-

ния пленок представлена на рис. 1. В качестве базовой использовали пьезоэлектрическую слоистую структуру Al/AlN/Mo/(100) алмаз. Технология изготовления таких резонаторов была ранее подробно описана в работах [21, 22]. В качестве материала подложки использовали синтетический монокристаллический алмаз Па типа с ориентацией (100), выращенный методом температурного градиента при высоких давлениях и температурах в ФГБНУ ТИСНУМ [23].

Важной особенностью выбранной схемы было то, что исследуемая пленка напылялась на свободную поверхность алмаза и не оказывала прямого влияния на тонкопленочный пьезоэлектрический преобразователь Al/AlN/Mo, возбуждающий в алмазе операционную L-моду. Исследуемые пленки Al, Mo и Sc высокой чистоты наносились на сенсорный элемент с помощью магнетронной установки реактивного распыления AJA Orion 8. Толщины пленок измеряли методом атомно-силовой микроскопии на установке Integra Prima (NT-MDT). СВЧ исследования акустических свойств сенсора проводили с помощью векторного анализатора цепей E5071C ENA, измеряя сдвиг рабочих частот ряда обертонов до 8 ГГц, а также вариаций их добротности в зависимости от толщины пленки. Детально исследованы частотные характеристики двух сенсоров на основе алмазов, различающихся толщиной пьезоэлектрических пленок и алмазных подложек. Использовали как корпусированный, так и бескорпусный лабораторный варианты сенсоров. С помощью последнего удалось повысить верхний предел операционных частот до 8 ГГц. Операционные частоты нескольких обертонов были выбраны исходя их наибольшей добротности. Основные параметры сенсоров указаны в таблице.

Таблица

Основные параметры сенсоров на алмазных подложках

Table. Main parameters of the sensors on diamond substrates

Номер сенсора	Структура	Толщины пленок (нм) и алмазных подложек (мкм)			
		Al	AlN	Mo	Алмаз
1	Al/AlN/Mo	130	1070	136	482
2	(100) алмаз	130	870	160	501

Для объяснения экспериментальных результатов были выполнены расчеты частотных сдвигов в зависимости от толщины пленки с помощью моделирования методом конечных элементов (МКЭ), используя программный пакет COMSOL Multiphysics.

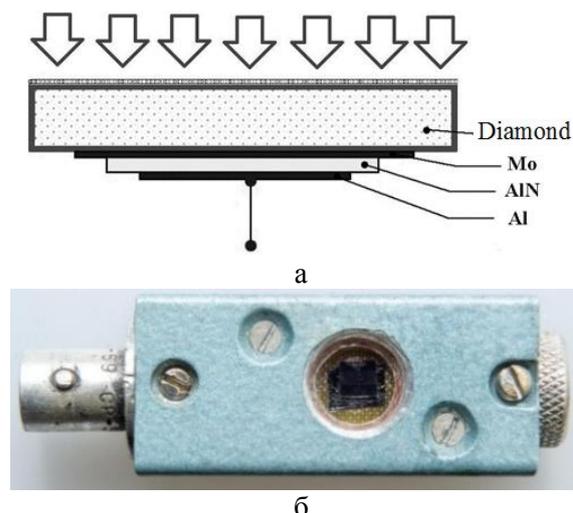


Рис. 1. Иллюстрация схемы напыления пленки на свободную поверхность алмаза (а) и пример корпусированного алмазного сенсора

Fig. 1. (a) Sketch of a film deposition on the free diamond surface of HBAR; (б) Example of a packaged diamond-based sensor

Частотные зависимости относительных сдвигов резонансных частот обертонов, взятые при различных толщинах пленки Al, показаны на рис. 2а. Можно сделать вывод, что при относительно малом массовом нагружении сенсора (толщина Al не более 355 нм и частоты менее 1,5 ГГц) зависимость от операционной частоты отсутствует, но при большей толщине пленки Al наблюдаются более сложные зависимости. Такое поведение отличает данный сенсор от обычных кварцевых микровесов. В результате осаждения пленки Mo наблюдалась только линейно пропорциональная зависимость относительного сдвига частоты от толщины пленки до ~400 нм для ряда операционных частот вплоть до 8 ГГц, как показано на рис. 2б. Измеренная зависимость оказалась достаточно близкой к прогнозу, полученному с помощью МКЭ-анализа.

На рис. 3 представлено сравнение модельных и экспериментальных данных о влиянии нанесения пленок Al и Mo на сдвиг частот обертонов как функции отношения h/λ , где h – толщина пленки, а λ – длина волны L-моды внутри пленки. Наблюдается отличное соответствие экспериментальных и модельных данных как для пленок Al, так и для Mo.

На рис. 4 представлены графики зависимости относительных сдвигов частоты от толщины пленки Sc вплоть до 500 нм для 3-х операционных частот. С учетом результатов рис. 3а, можно говорить о сходном характере зависимостей $\Delta f/f$ от толщины как для пленок Al, так и Sc, особенно при более высоких толщинах.

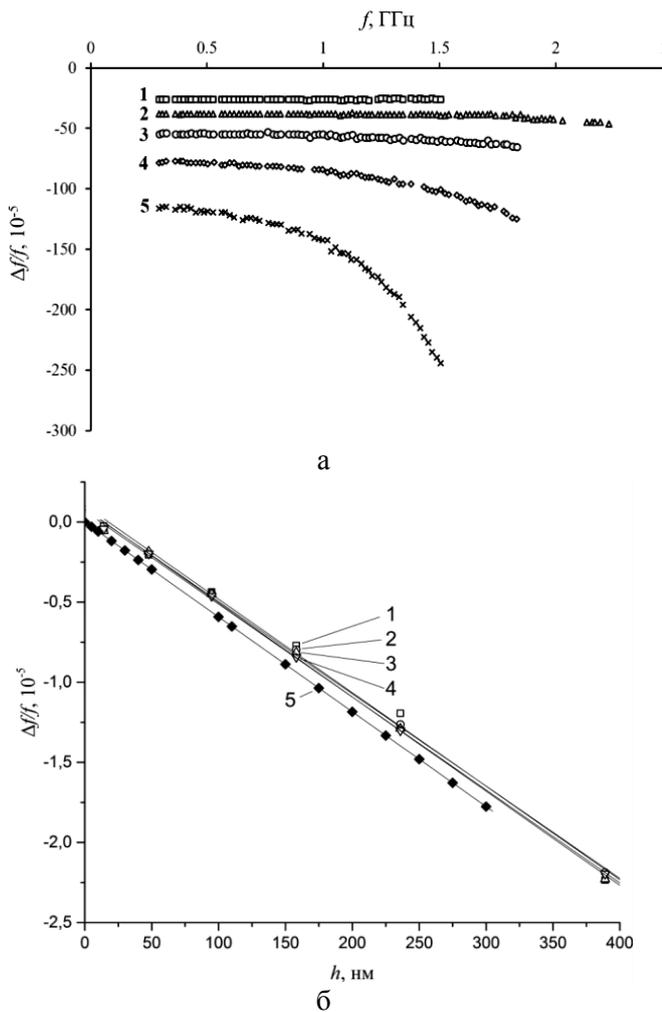


Рис. 2. (а) Частотная зависимость относительного сдвига $\Delta f/f$ обертонов сенсора при различных толщинах пленки Al h (нм): 1 – 160; 2 – 225; 3 – 355; 4 – 540; 5 – 780. (б) Зависимость $\Delta f/f$ от толщины пленки Mo на различных операционных частотах (1 – 0,4 ГГц; 2 – 2,0 ГГц; 3 – 4,0 ГГц; 4 – 8,0 ГГц) и модельный прогноз для операционной частоты 10 ГГц (5). Эксперимент (а) выполнен с помощью сенсора №1, эксперимент (б) – с помощью сенсора №2

Fig. 2. (a) Relative frequency shift $\Delta f/f$ vs. frequency at the different thicknesses of Al film h (nm): 1 – 160; 2 – 225; 3 – 355; 4 – 540; 5 – 780. (b) Relative frequency shift $\Delta f/f$ vs. the thickness of Mo film at different operational frequencies as 1 – 0.4 GHz; 2 – 2.0 GHz; 3 – 4.0 GHz; 4 – 8.0 GHz, and modeling prediction for the operational frequency of 10 GHz (5). Experiment (a) was executed by the sensor No 1, and experiment (b) – by the sensor No 2

Чтобы объяснить этот факт, следует сравнить акустические импедансы $Z = \rho V$ (ρ и V – плотность и фазовая скорость акустической волны материала), которые примерно одинаковы для пленок Al и Sc, но $Z_{Mo} \approx Z_{алмаз} \gg Z_{Al}, Z_{Sc}$. При таких условиях объемная акустическая волна будет в основном проникать из алмаза в пленку Mo, а затем отражаться от ее свободной поверхности. Фактически в этом случае можно говорить об удлинении пути распространения волны в состав-

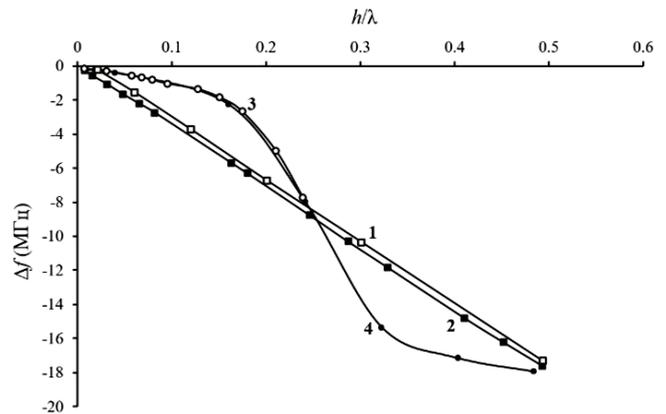


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и модельных данных влияния напыления пленок Al и Mo на сдвиг частот обертонов в зависимости от отношения h/λ : 1 – эксперимент по напылению Mo (выполнен с помощью сенсора № 2); 2 – моделирование влияния Mo; 3 – эксперимент по напылению Al (выполнен с помощью сенсора № 1); 4 – моделирование влияния Al

Fig. 3. Comparison of the model and experimental data on the influence of the Al and Mo film deposition on the overtone frequency shift vs. the h/λ ratio: 1 – experimental data on the Mo film deposition obtained by the sensor No 2; 2 – model data on the Mo film influence; 3 – experimental data on the Al film deposition obtained by the sensor No 1; 4 – model data on the Al film influence

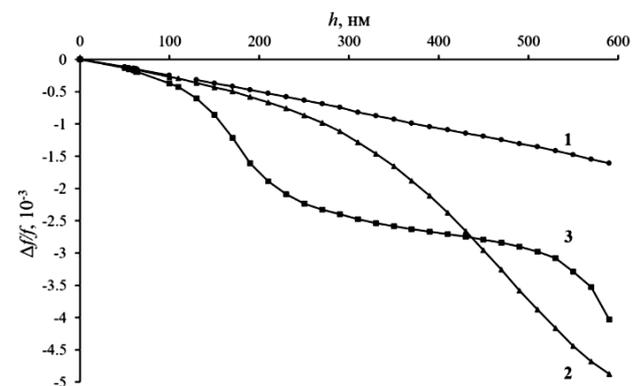


Рис. 4. Относительный сдвиг частоты в зависимости от толщины пленки Sc на различных операционных частотах: 1 – 0,7 ГГц; 2 – 2,7 ГГц; 3 – 6,6 ГГц. Эксперимент по исследованию напыления Sc выполнен с помощью сенсора № 1

ной структуре алмаз-Mo. Зависимость сдвига частоты от толщины в этом случае будет пропорциональной. Но если рассматривать нанесенные на поверхность алмаза пленки Al или Sc, то будут наблюдаться как отражение на границе раздела алмаз-пленка, так и проникновение волны в пленки Al или Sc, а также ее переотражение внутри них. В последнем случае будет наблюдаться сложная зависимость сдвига частоты от толщины пленок Al или Sc. Напыленные пленки с такими

акустическими импедансами по отношению к алмазу, как $Z_{\text{алмаз}} \gg Z_{\text{Al}}, Z_{\text{Sc}}$, следует рассматривать как импедансную нагрузку.

Точка перегиба кривой, наблюдаемая при соотношении $h = \frac{1}{4}\lambda$, может быть использована для расчета длины волны продольной объемной акустической волны, распространяющейся внутри пленки Sc, и, тем самым, определения ее фазовой скорости как $V = \lambda \cdot f$. Используя экспериментальные данные $h = 210$ нм и $f = 6,62$ ГГц, получим для данной частоты значения $\lambda = 840$ нм и $V = 5560$ м/с. Данное значение фазовой скорости находится в тесном соответствии с $V = 5590$ м/с, измеренным непосредственно на объемном образце Sc обычным ультразвуковым эхо-импульсным методом на частоте 30 МГц.

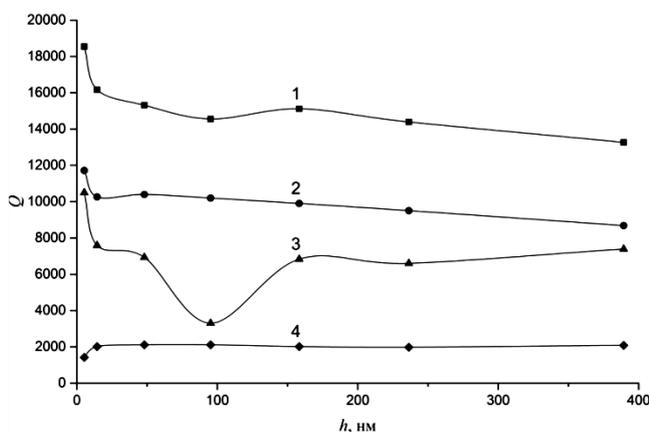


Рис. 5. Зависимость добротности Q многообертоного ОАВ-резонатора от толщины h пленки Al для различных операционных частот: 1 – 0,95 ГГц; 2 – 4,27 ГГц; 3 – 5,95 ГГц; 4 – 7,94 ГГц. Эксперимент по исследованию напыления пленки Al был выполнен с помощью сенсора № 1

Fig. 5. HBAR's quality factor dependence vs. the Al film thickness h at different operating frequencies as 1 – 0.95 GHz; 2 – 4.27 GHz; 3 – 5.95 GHz; 4 – 7.94 GHz. The experiment on the Al film investigation was executed by the sensor No 1

На рис. 5 показаны зависимости добротности многообертоного ОАВ-резонатора от толщины пленки Al, полученные для различных операционных частот. Для акустоэлектронных резонансных сенсоров важно, как достижение максимально возможных операционных частот, так и высокая добротность резонансных пиков. Послед-

ний фактор определяет точность измерения частотного сдвига и, следовательно, реальную чувствительность сенсора. Из анализа данного рисунка следует, что с увеличением частоты происходит закономерное уменьшение добротности, однако резонатор сохраняет достаточно высокую для целей эксперимента величину $Q \approx 2000$ даже на операционной частоте 8 ГГц. Уменьшение добротности с ростом толщины пленки является не слишком значительным вплоть до максимального значения ~ 400 нм, использованного в эксперименте.

ВЫВОДЫ

Выбранная сенсорная схема на основе многообертоного ОАВ-резонатора с алмазной подложкой предоставляет уникальную возможность исследования свойств тонких и сверхтонких (менее 10 нм) пленок в широком СВЧ диапазоне. Разработанные прототипы сенсорных элементов обладают важными преимуществами перед всеми другими типами акустоэлектронных сенсоров за счет возможности применять операционные частоты СВЧ диапазона до 8 ГГц при сохранении высокой добротности, высокой химической и биологической инертности рабочей поверхности алмаза, стойкости к температурным нагрузкам, абразивной износостойкости, возможности многократного применения. Эффективная площадь сенсорного элемента может быть равна тысячам квадратных микрон и менее, что делает его пригодным для локальных измерений. Превышение уже достигнутого уровня чувствительности порядка 5 нм фактически ограничивается несовершенством современных средств измерения толщины. Исследуемая алмазная пятислойная пьезоэлектрическая структура должна рассматриваться как перспективная платформа для создания ряда акустоэлектронных сенсоров нового поколения.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа была поддержана Российским научным фондом (проект № 16-12-10293-П).

This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 16-12-10293-P).

ЛИТЕРАТУРА

1. Schedin F., Geim A.K., Hill E.W., Blake P., Novoselov K.S. Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene. *Nat. Mater.* 2007. V. 6. N 9. P. 652–655. DOI: 10.1038/nmat1967.
2. Johnson L., Gupta A. K., Ghafoor A., Akin D., Bashir R. Characterization of vaccinia virus particles using microscale silicon cantilever resonators and atomic force microscopy.

REFERENCES

1. Schedin F., Geim A.K., Hill E.W., Blake P., Novoselov K.S. Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene. *Nat. Mater.* 2007. V. 6. N 9. P. 652–655. DOI: 10.1038/nmat1967.
2. Johnson L., Gupta A. K., Ghafoor A., Akin D., Bashir R. Characterization of vaccinia virus particles using microscale silicon cantilever resonators and atomic force microscopy.

- Sensors Actuators B. Chem.* 2006. V. 115. P. 189–197. DOI: 10.1016/j.snb.2005.08.047.
3. **Ilic B., Czaplewski D., Craighead H.G., Neuzil P., Campagnolo C., Batt C.** Mechanical resonant immunospecific biological detector. *Appl. Phys. Lett.* 2000. V. 77. P. 450–452. DOI: 10.1063/1.127006.
 4. **Lavrik N.V., Datskos P.G.** Femtogram mass detection using photothermally actuated nanomechanical resonators. *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82. P. 2697–2699. DOI: 10.1063/1.1569050.
 5. **Dantham V.R., Holler S., Kolchenko V., Wan Z., Arnold S.** Taking whispering gallery-mode single virus detection and sizing to the limit. *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 101. P. 043704. DOI: 10.1063/1.4739473.
 6. **Ekinci K.L., Huang X.M.H., Roukes M.L.** Ultrasensitive nanoelectromechanical mass detection. *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 84. P. 4469–4471. DOI: 10.1063/1.1755417.
 7. **Sauerbrey G.** Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung. *Zeitschrift für Physik.* 1959. B. 155. Z. 206–222. DOI: 10.1007/BF01337937.
 8. **Lu C.S., Lewis O.** Investigation of film-thickness determination by oscillating quartz resonators with large mass load. *J. Appl. Phys.* 1972. V. 43. N 11. P. 4385–4390. DOI: 10.1063/1.1660931.
 9. **Muratsugu M., Ohta F., Miya Y., Hosokawa T., Kurosawa S., Kamo N., Ikeda H.** Quartz crystal microbalance for the detection of microgram quantities of human serum albumin: relationship between the frequency change and the mass of protein adsorbed. *Anal. Chem.* 1993. V. 65. N 20. P. 2933–2937. DOI: 10.1021/ac00068a036.
 10. **Qiao X., Zhang X., Tian Yu, Meng Y.** Progresses on the theory and application of quartz crystal microbalance. *Appl. Phys. Rev.* 2016. V. 3. P. 031106. DOI: 10.1063/1.4963312.
 11. **Wen W., Shitang H., Shunzhou L., Minghua L., Yong P.** Enhanced sensitivity of SAW gas sensor coated molecularly imprinted polymer incorporating high frequency stability oscillator. *Sensors&Actuators B. Chem.* 2007. V. 125. N 2. P. 422–427. DOI: 10.1016/j.snb.2007.02.037.
 12. **Zhang H., Kim E.S.** Micromachined acoustic resonant mass sensor. *J. Microelectromech. Systems.* 2005. V. 14. P. 699–706. DOI: 10.1109/JMEMS.2005.845405.
 13. **Lin Re-Ching, Chen Ying-Chung, Chang Wei-Tsai, Cheng Chien-Chuan, Kao Kuo-Sheng.** Highly sensitive mass sensor using film bulk acoustic resonator. *Sensors Actuators A: Physical.* 2008. V. 147. P. 425–429. DOI: 10.1016/j.sna.2008.05.011.
 14. **Rey-Mermet S., Lanz R., Muralt P.** Bulk acoustic wave resonator operating at 8 GHz for gravimetric sensing of organic films. *Sensors Actuators B.* 2006. V. 114. P. 681–686. DOI: 10.1016/j.snb.2005.04.047.
 15. **Wingqvist G., Bjurström J., Liljeholm L., Yantchev V., Katardjiev I.** Shear mode AlN thin film electro-acoustic resonant sensor operation in viscous media. *Sensors Actuators B.* 2007. V. 123. P. 466–473. DOI: 10.1016/j.snb.2006.09.028.
 16. **Mansfeld G.D., Alekseev S.G., Kotelyansky I.M.** Acoustic HBAR spectroscopy of metal (W, Ti, Mo, Al) thin films. Proc. of the IEEE Ultrasonics Symp. Atlanta, USA. 2001. P. 415–418. DOI: 10.1109/ULTSYM.2001.991652.
 17. **Rabus D., Friedt J.M., Ballandras S., Baron T., Lebras-seur É., Carry É.** High-overtone bulk-acoustic resonator gravimetric sensitivity: Towards wideband acoustic spectroscopy. *J. Appl. Phys.* 2015. V. 118. P. 114505. DOI: 10.1063/1.4930032.
3. **Ilic B., Czaplewski D., Craighead H.G., Neuzil P., Campagnolo C., Batt C.** Mechanical resonant immunospecific biological detector. *Appl. Phys. Lett.* 2000. V. 77. P. 450–452. DOI: 10.1063/1.127006.
 4. **Lavrik N.V., Datskos P.G.** Femtogram mass detection using photothermally actuated nanomechanical resonators. *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82. P. 2697–2699. DOI: 10.1063/1.1569050.
 5. **Dantham V.R., Holler S., Kolchenko V., Wan Z., Arnold S.** Taking whispering gallery-mode single virus detection and sizing to the limit. *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 101. P. 043704. DOI: 10.1063/1.4739473.
 6. **Ekinci K.L., Huang X.M.H., Roukes M.L.** Ultrasensitive nanoelectromechanical mass detection. *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 84. P. 4469–4471. DOI: 10.1063/1.1755417.
 7. **Sauerbrey G.** Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung. *Zeitschrift für Physik.* 1959. B. 155. Z. 206–222. DOI: 10.1007/BF01337937.
 8. **Lu C.S., Lewis O.** Investigation of film-thickness determination by oscillating quartz resonators with large mass load. *J. Appl. Phys.* 1972. V. 43. N 11. P. 4385–4390. DOI: 10.1063/1.1660931.
 9. **Muratsugu M., Ohta F., Miya Y., Hosokawa T., Kurosawa S., Kamo N., Ikeda H.** Quartz crystal microbalance for the detection of microgram quantities of human serum albumin: relationship between the frequency change and the mass of protein adsorbed. *Anal. Chem.* 1993. V. 65. N 20. P. 2933–2937. DOI: 10.1021/ac00068a036.
 10. **Qiao X., Zhang X., Tian Yu, Meng Y.** Progresses on the theory and application of quartz crystal microbalance. *Appl. Phys. Rev.* 2016. V. 3. P. 031106. DOI: 10.1063/1.4963312.
 11. **Wen W., Shitang H., Shunzhou L., Minghua L., Yong P.** Enhanced sensitivity of SAW gas sensor coated molecularly imprinted polymer incorporating high frequency stability oscillator. *Sensors&Actuators B. Chem.* 2007. V. 125. N 2. P. 422–427. DOI: 10.1016/j.snb.2007.02.037.
 12. **Zhang H., Kim E.S.** Micromachined acoustic resonant mass sensor. *J. Microelectromech. Systems.* 2005. V. 14. P. 699–706. DOI: 10.1109/JMEMS.2005.845405.
 13. **Lin Re-Ching, Chen Ying-Chung, Chang Wei-Tsai, Cheng Chien-Chuan, Kao Kuo-Sheng.** Highly sensitive mass sensor using film bulk acoustic resonator. *Sensors Actuators A: Physical.* 2008. V. 147. P. 425–429. DOI: 10.1016/j.sna.2008.05.011.
 14. **Rey-Mermet S., Lanz R., Muralt P.** Bulk acoustic wave resonator operating at 8 GHz for gravimetric sensing of organic films. *Sensors Actuators B.* 2006. V. 114. P. 681–686. DOI: 10.1016/j.snb.2005.04.047.
 15. **Wingqvist G., Bjurström J., Liljeholm L., Yantchev V., Katardjiev I.** Shear mode AlN thin film electro-acoustic resonant sensor operation in viscous media. *Sensors Actuators B.* 2007. V. 123. P. 466–473. DOI: 10.1016/j.snb.2006.09.028.
 16. **Mansfeld G.D., Alekseev S.G., Kotelyansky I.M.** Acoustic HBAR spectroscopy of metal (W, Ti, Mo, Al) thin films. Proc. of the IEEE Ultrasonics Symp. Atlanta, USA. 2001. P. 415–418. DOI: 10.1109/ULTSYM.2001.991652.
 17. **Rabus D., Friedt J.M., Ballandras S., Baron T., Lebras-seur É., Carry É.** High-overtone bulk-acoustic resonator gravimetric sensitivity: Towards wideband acoustic spectroscopy. *J. Appl. Phys.* 2015. V. 118. P. 114505. DOI: 10.1063/1.4930032.

18. 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. DOI: 10.1016/j.ultras.2017.01.014.
19. Сорокин Б.П., Теличко А.В., Квашнин Г.М., Бормашов В.С., Бланк В.Д. Исследования СВЧ акустического затухания в многочастотном резонаторе на объемных акустических волнах на основе синтетического монокристалла алмаза. *Акустический журн.* 2015. Т. 61. № 6. С. 705–717. DOI: 10.7868/S0320791915050160.
20. Смирнов А.В., Асафьев Н.О., Сорокин Б.П., Зиангирова М.Ю., Гольшккин А.В., Краснопольская Л.М., Кузнецова И.Е. Исследование влияния сенсорных пленок из мицелия базидиальных грибов на характеристики сверхвысокочастотного резонатора Me1/AlN/Me2/алмаз. *Радиотехника и электроника*. 2020. Т. 65. № 11. С. 1137–1144. DOI: 10.31857/S0033849420110169.
21. Сорокин Б.П., Квашнин Г.М., Бормашов В.С., Волков А.П., Теличко А.В., Гордеев Г.И., Голованов А.В. Технология изготовления СВЧ пьезоэлектрических преобразователей на основе пленки AlN, нанесенной на подложку из синтетического монокристалла алмаза. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2014. Т. 57. Вып. 5. С. 17–21.
22. Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Telichko A.V., Burkov S.I., Blank V.D. Piezoelectric layered structure based on the synthetic diamond. In: *Piezoelectric Materials*. Ed. by T. Ogawa. Intech, Rijeka. 2016. P. 161–199. DOI: 10.5772/62630.
23. Shvyd'ko Yu., Stoupin S., Blank V., Terentyev S. Near-100% Bragg reflectivity of X-rays. *Nature Photonics*. 2011. V. 5. P. 539–542. DOI: 10.1038/NPHOTON.2011.197.
18. 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. DOI: 10.1016/j.ultras.2017.01.014.
19. Sorokin B.P., Telichko A.V., Kvashnin G.M., Bormashov V.S., Blank V.D. Investigations of microwave acoustic damping in a multifrequency resonator using bulk acoustic waves based on a synthetic diamond single crystal. *Akust. Zhurn.* 2015. V. 61. N 6. P. 705–717 (in Russian) DOI: 10.7868/S0320791915050160.
20. Smirnov A.V., Asafiev N.O., Sorokin B.P., Ziangiurova M.Yu., Golishkin A.V., Krasnopol'skaya L.M., Kuznetsova I.E. Investigation of the effect of sensor films prepared from the mycelium of basidium fungi on the characteristics of the Me1/AlN/Me2/diamond microwave resonator. *Radiotekh. Elektron.* 2020. V. 65. N 11. P. 1137–1144 (in Russian). DOI: 10.31857/S0033849420110169.
21. Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Bormashov V.S., Volkov A.P., Telichko A.V., Gordeev G.I., Golovanov A.V. Technology of manufacturing piezoelectric thin film transducer on substrate of synthetic diamond single crystal. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2014. V. 57. N 5. P. 17–21 (in Russian).
22. Sorokin B.P., Kvashnin G.M., Telichko A.V., Burkov S.I., Blank V.D. Piezoelectric layered structure based on the synthetic diamond. In: *Piezoelectric Materials*. Ed. by T. Ogawa. Intech, Rijeka. 2016. P. 161–199. DOI: 10.5772/62630.
23. Shvyd'ko Yu., Stoupin S., Blank V., Terentyev S. Near-100% Bragg reflectivity of X-rays. *Nature Photonics*. 2011. V. 5. P. 539–542. DOI: 10.1038/NPHOTON.2011.197.

Поступила в редакцию 07.10.2020
Принята к опубликованию 21.10.2020

Received 07.10.2020
Accepted 21.10.2020