

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 534.2

СЕЛЕКТИВНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МИКРОПРОБ ЖИДКОСТЕЙ АКУСТИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ТИПА

© 2019 г. В. И. Анисимкин¹, *, И. Е. Кузнецова¹¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 125009 Москва, ул. Моховая 11, стр. 7

*E-mail: anis@cplire.ru

Поступила в редакцию 05.03.2019 г.

После доработки 05.03.2019 г.

Принята к публикации 19.03.2019 г.

С использованием поверхностных акустических волн (ПАВ) разработаны прототипы высокочувствительных селективных датчиков температуры, работа которых не зависит от воздействия остальных физических параметров жидкостей. Для обеспечения селективности исключен физический контакт ПАВ с тестируемой пробой. Для повышения чувствительности увеличен путь пробега волны от излучателя до приемника и использована 5-я гармоника волны. Порог срабатывания прототипов снижен до 0.005...0.03°C.

DOI: 10.1134/S0033849419080011

ВВЕДЕНИЕ

Сенсорные устройства, основанные на изменении скорости (фазы) и/или амплитуды (поглощения) акустических волн в твердотельных структурах под действием жидких веществ, привлекательны по ряду причин. Они позволяют измерять все основные характеристики жидкостей, не требуют больших объемов проб (~100 мкл), имеют малые габариты (~100 мм³) и высокую точность [1–14]. Выходной сигнал (“отклик”) датчиков на внешнее воздействие может увеличиваться, уменьшаться и обращаться в нуль путем надлежащего выбора ориентации кристаллического звукопровода и направления распространения волны [15]. Дном кюветы таких датчиков служит тело самого устройства, что снижает искажение анализируемого вещества в процессе измерений.

Все сказанное справедливо, в частности, для микроакустических датчиков температуры жидкости, основными недостатками которых на современном этапе являются слабая селективность (нежелательная реакция не только на температуру) и невысокая чувствительность.

Цель данной работы – исследовать возможности повышения селективности и чувствительности микроакустических датчиков температуры жидкости за счет использования новых конструктивных решений.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Решение задачи проводилось с использованием двух прототипов, конструкции которых показаны на рис. 1. Они включали в себя звукопровод *I* (Si, Bi₁₂GeO₂₀ (BGO), LiNbO₃, кварц) с рабочей поверхностью *2*, два встречно-штыревых преобразователя *3* для возбуждения и приема поверх-

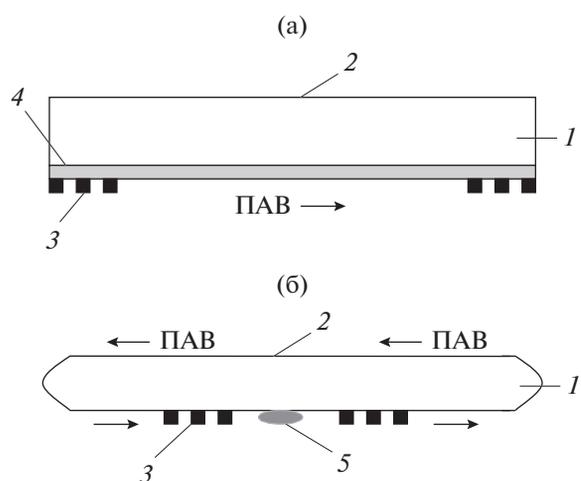


Рис. 1. Конструкции температурных датчиков на ПАВ: *I* – звукопровод, *2* – рабочая поверхность, приводимая в контакт с тестируемой жидкостью или иным объектом, *3* – встречно-штыревые преобразователи, *4* – пьезоэлектрическая пленка ZnO, *5* – полость.

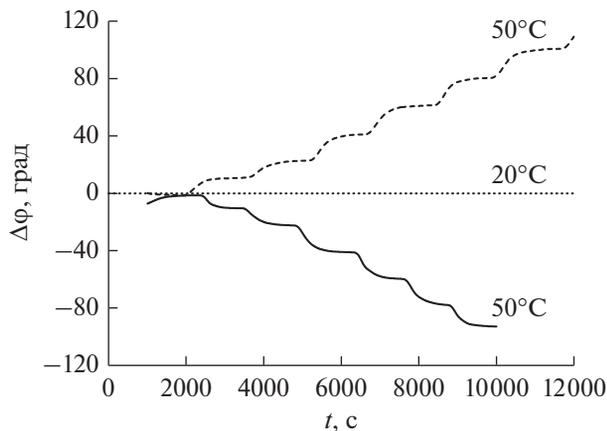


Рис. 2. Температурные изменения фазы ПАВ в $(001)\langle 110 \rangle$ -BGO ($\text{TKЗ} = +130 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) и YX-SiO_2 ($\text{TKЗ} = -20 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) при увеличении температуры от 20 до 50°C с шагом 5°C. Сплошная линия – BGO, $L = 7$ мм, $\lambda = 106$ мкм, пунктирная – кварц, $L = 20$ мм, $\lambda = 20$ мкм.

ностных акустических волн (ПАВ) на поверхности, противоположной рабочей, и пьезоэлектрическую пленку ZnO 4, которая обеспечивала электромеханическое возбуждение ПАВ в непьезоэлектрическом кремнии. Тестируемое вещество или иной объект, температуру которого измеряли, помещали на поверхность 2. Возникшее в результате изменение температуры этой поверхности передавалось за счет теплопроводности звукопровода на нижнюю поверхность и фиксировалось по изменению скорости (фазы) распространяющейся там ПАВ. Передача теплового потока зависела от теплопроводности звукопровода

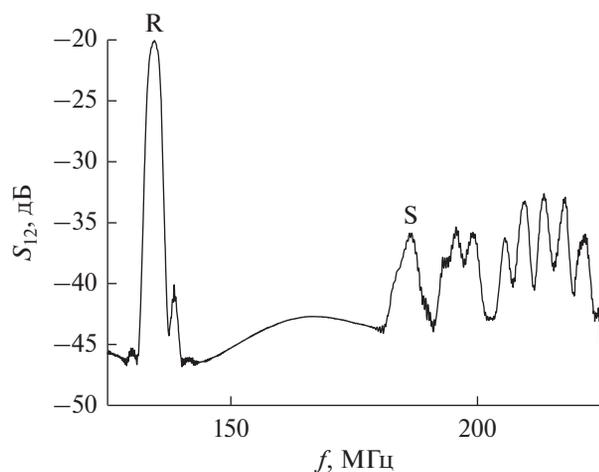


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика ПАВ-датчика на основе $\text{ZnO}/(001)\langle 110 \rangle$ -Si. Толщина ZnO 3 мкм, $L = 11$ мм, $\lambda = 32.1$ мкм, $\varphi_0 = 123365^\circ$, $f_R = 134.5$ МГц, $f_S = 186.32$ МГц.

и была наилучшей у кремния (1.56 Вт/см К). Высокая точность измерений обеспечивалась прецизионным измерением фазы φ (ошибка ± 0.1 град) и большой длиной пробега ПАВ L между излучающим и приемным преобразователями, увеличивающей полный набег фазы волны $\varphi_0 = 360^\circ L/\lambda$ до более чем 10^5 град (λ – длина волны). Нечувствительность ПАВ к плотности, вязкости, электрической проводимости и диэлектрической проницаемости жидкости (селективность температурных измерений) достигалась исключением физического контакта ПАВ, локализованной в слое ~ 20 мкм у нижней поверхности, с жидкостью, находящейся на верхней поверхности звукопровода, имеющего толщину 0.5...1 мм.

Измерения проводили с помощью анализатора четырехполюсников KEYSIGHT E5061B.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений представлены на рис. 2–7.

Рис. 2 демонстрирует последовательные изменения фазы ПАВ в материалах с положительным (BGO) и отрицательным (кварц) температурным коэффициентом задержки (TKЗ). Величины коэффициентов, определенные из этих изменений, совпадают с табличными значениями [16].

На рис. 3 показана амплитудно-частотная характеристика датчика на основе ZnO/Si (см. рис. 1а), на которой хорошо видны два сигнала разной частоты, соответствующие ПАВ Рэлея (R) и ПАВ Сезава (S). Фазы обеих волн в отсутствие жидкости меняются при изменении температуры по линейному закону (рис. 4), а значения TKЗ, определенные из наклонов этих зависимостей, близки друг

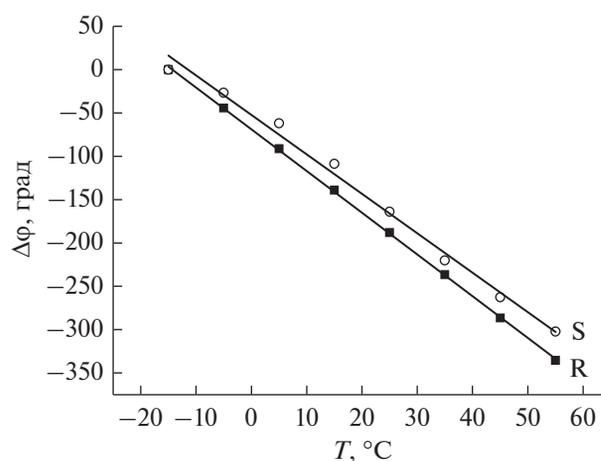


Рис. 4. Температурные характеристики ПАВ Рэлея (R) и Сезава (S), измеренные в звукопроводе $\text{ZnO}/(001)\langle 110 \rangle$ -Si на воздухе, точки – эксперимент, линии – подгонные кривые, полученные с помощью программы OriginPro8.

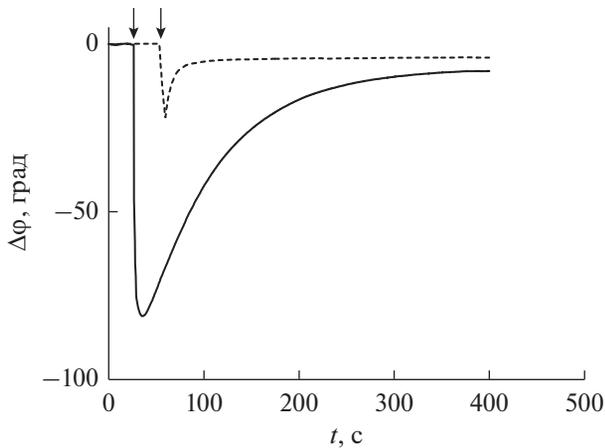


Рис. 5. Временные изменения фазы ПАВ Рэля при нанесении (стрелки) нагретого глицерина на звукопровод ZnO/(001)(110)-Si. Начальная температура звукопровода – 20°C; начальная температура глицерина +37°C (сплошная линия) и +24.6°C (штриховая).

другу и составляют $TKZ_R = 39 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ и $TKZ_S = 37 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$.

При нанесении жидкости, температура которой выше температуры звукопровода ($\Delta t > 0$), тепловой поток благодаря высокой теплопроводности кремния передается с верхней на нижнюю поверхность без каких-либо изменений [14]. В результате этого вначале происходит резкое повышение температуры нижней поверхности, на $\Delta t = 1/TKZ \times \Delta\phi/\phi_0$, и уменьшение фазы ПАВ $\Delta\phi$, а затем – постепенное понижение температуры Δt звукопровода и увеличение фазы $\Delta\phi$ до значения, соответствующего новому тепловому равновесию. С ростом объема жидкостной пробы и с увеличением различия между начальными температурами жидкости и звукопровода величина $\Delta\phi$, естественно, возрастает, а ее выход на равновесие замедляется (рис. 5). Поэтому измерение исходного значения Δt жидкости проводили по минимуму фазовой характеристики, следующему сразу за нанесением жидкости. Так, для примеров на рис. 5 значения Δt , определенные из минимума фазовой характеристики, составили 17 и 4.6°C, а равновесные – 1.7 и 0.9°C в соответствии с исходными значениями Δt , заданными в эксперименте. Минимальная величина Δt , детектируемая датчиком на основе ZnO/Si, равняется 0.03°C.

В отличие от датчика на ZnO/Si датчик на основе BGO (см. рис. 1б) обладает большей термочувствительностью ПАВ [16] (что позволяет детектировать более низкие значения Δt), более высоким коэффициентом электрохимической связи (что обеспечивает эффективное возбуждение ПАВ не только на основной частоте, но и на 5-й гармонике) и, к сожалению, более низкой теплопроводностью, которая приводит как к не-

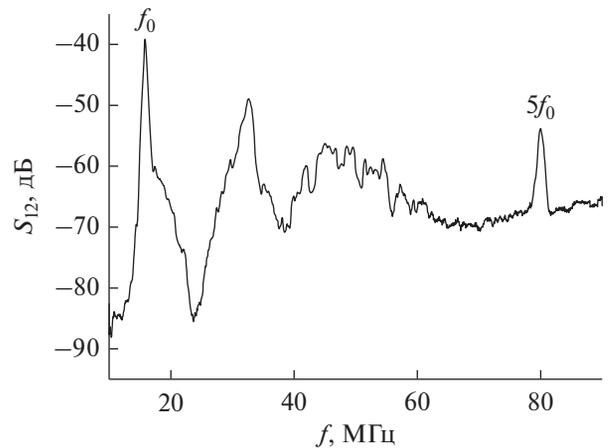


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика ПАВ-датчика на основе BGO.

однородности распределения теплового потока по толщине звукопровода [14], так и к различию температур верхней и нижней поверхностей. Для звукопровода BGO толщиной 1 мм это различие в минимуме фазовой характеристики составляет 0.1°C.

На рис. 6 показана амплитудно-частотная характеристика датчика на BGO, где видны сигналы ПАВ на основной частоте и 5-й гармонике. Фазы волн на обеих частотах меняются при изменении температуры по линейному закону (рис. 7). Значение ТКЗ в соответствии с [16] составляет $110 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$. Благодаря увеличению пути распространения за счет цилиндрических закруглений и использованию 5-й гармоники, увеличивающей полный набег фазы ПАВ в пять раз по сравнению с основной

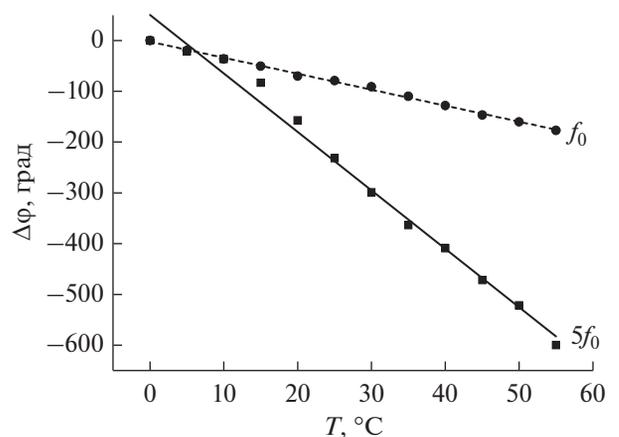


Рис. 7. Температурные изменения фазы ПАВ на основной частоте (штриховая) и частоте 5-й гармоники (сплошная линия), точки – эксперимент, линии – подгоночные кривые, полученные с помощью программы OriginPro8.

частотой минимальное значение Δt , регистрируемое датчиком, снижается до 0.005°C .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конструкции ПАВ датчиков, предложенные и исследованные в данной работе, позволили повысить селективность и чувствительность измерений температуры жидкостей. Датчик на основе ZnO/Si привлекателен возможностью прямого измерения температуры, но обладает сравнительно невысоким порогом срабатывания, а датчик на основе ВГО имеет более низкий порог срабатывания, но требует учета систематической ошибки из-за различия температуры верхней и нижней поверхностей звукопровода. Объединение достоинств и преодоление недостатков предложенных решений – предмет дальнейших исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания и частично за счет финансирования Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-07-00074-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ballantine D.S., White R.M., Martin S.J. et al.* Acoustic Wave Sensors. San Diego: Acad. Press, 1997. Ch. 3.
2. *Wang Y., Xu Z., Wang Y., Xie J.* // Sensors. 2017. V. 17. № 8. P. 1813.
3. *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G., Borodina I.A.* // IEEE Trans. 2001. V. UFFC-48. № 2. P. 627.
4. *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G.* // Technical Phys. 2001. V. 46. № 6. P. 767.
5. *Anisimkin V.I., Kuznetsova I.E., Kolesov V.V. et al.* // Ultrasonics. 2015. V. 62. № 9. P. 156.
6. *Di Pietrantonio F., Benetti M., Cannata D. et al.* // IEEE Trans. 2010. V. UFFC-57. № 5. P. 1175.
7. *Bugaev A.S., Pirozerskii W., Charnaya E.V. et al.* // Acoustical Phys. 2016. V. 63. № 3. P. 306.
8. *Anisimkin V.I.* // IEEE Trans. 2011. V. UFFC-60. № 10. P. 2204.
9. *Анисимкин В.И., Воронова Н.В.* // Нелинейный мир. 2011. Т. 9. № 2. С. 116.
10. *Kuznetsova I.E., Zaitsev B.D., Seleznev E.P., Verona E.* // Ultrasonics. 2016. V. 70. № 1. P. 34.
11. *Caliendo C., Hamidullah M.J.* // Phys. D - Appl. Phys. 2019. V. 52. № 15. P. 153001.
12. *Kustanovich K., Yantchev V., Olivefors A. et al.* // J. Microech. Microeng. 2019. V. 29. № 2. P. 024001.
13. *Guliy O.I., Zaitsev B.D., Borodina I.A. et al.* // Talanta. 2018. V. 178. P. 569.
14. *Анисимкин В.И., Земляничин М.А.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 9. С. 1029.
15. *Anisimkin V.I.* // IEEE Trans. 2014. V. UFFC-61. № 1. P. 120.
16. Акустические кристаллы / Под ред. Шаскольской М.П. М.: Наука, 1982.