



ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПАВ НА ОСНОВЕ ЗЕРКАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИИ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

SURFACE ACOUSTIC TEMPERATURE SENSOR BASED ON MIRROR TOPOLOGY DESIGNED FOR INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS

УДК 681.586.773

АНЦЕВ ИВАН ГЕОРГИЕВИЧ¹ANTSEV IVAN G.¹БОГОСЛОВСКИЙ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ¹BOGOSLOVSKY SERGEI V.¹

bogoslovsky_sv@radar-mms.com

bogoslovsky_sv@radar-mms.com

САПОЖНИКОВ ГЕННАДИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ¹SAPOZHNIKOV GENNADY A.¹ЖГУН СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ²ZHGOON SERGEI A.²

zhgoon@ieee.org

zhgoon@ieee.org

ШВЕЦОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ²SHVETSOV ALEXANDER S.²¹ АО «НПП «Радар ммс»¹ Research-and-production enterprise "Radar mms" JSC² Национальный исследовательский университет МЭИ² National Research University "MPEI"

Предложена новая конструкция датчиков температуры, реализующая зеркальную топологию чувствительного элемента. Применение линий задержки позволяет создавать пассивные устройства, работающие на больших дальностях. Предлагаемое решение расширяет область применения зеркальных топологий для измерений температуры.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны; датчик температуры; линия задержки.

A new design, which implements the mirror topology of the sensitive element of temperature sensors, has been proposed. The use of delay lines allows creating passive devices operating at long ranges. The proposed solution extends the field of application of mirror topologies for temperature measurements.

Keywords: surface acoustic waves; temperature sensor; delay line.

ВВЕДЕНИЕ

Пассивные беспроводные датчики на поверхностных акустических волнах (ПАВ) находят применение в системах мониторинга различного назначения. Датчик на ПАВ состоит из антенны и пьезоплаты, на которой сформированы преобразователь электромагнитной энергии в механическую энергию и рефлекторы, выполненные в виде канавок или штырей. Как правило, для выполнения преобразований электрических сигналов в поверхностные акустические волны и обратно используется встречно-штыревой преобразователь (ВШП). Далее на пьезоплате расположены отдельные рефлекторы. Отдельные рефлекторы располагают на поверхности датчика таким образом, чтобы получить требуемый вид импульсной характеристики. В совокупности рефлекторы образуют отражающие структуры (ОС).

Обычно в рефлекторах устройств на ПАВ используют достаточно много отражающих элементов. Рефлекторы реализуются при помощи системы металлизированных штырей на пьезоэлектрической подложке или системы канавок, которые формируют путем травления поверхности звукопровода. Число отражательных штырей или канавок в каждой ОС выбирается из условия получения необходимого коэффициента отражения при приемлемом уровне вносимых потерь.

Конструкция датчика в виде линии задержки (ЛЗ) с отражательными структурами обеспечивает получение наилучших значений параметров датчика:

- хорошее согласование с антенной и минимальные потери на рассогласование;
- возможность реализовать различный вид импульсной характеристики;
- регулируемый коэффициент отражения от каждого отражателя (изменением толщины металла или глубины канавок) и возможность выбрать его оптимальную величину для получения желаемой импульсной характеристики.

В системах с датчиками на ПАВ чувствительным элементом акустоэлектронного датчика могут служить резонаторы или линии задержки на ПАВ. Для измерений по принципу температурного смещения центральной частоты резонанса необходимы относительно малый температурный коэффициент линейного расширения и по возможности большой температурный коэффициент частоты. Это обусловлено необходимостью исключения внутренних напряжений в пьезоплате и высокими требованиями по чувствительности.

Выбор материалов для изготовления чувствительных элементов датчиков производится с учетом их свойств. Так, кварц стабилен и биологически совместим, но имеет малые значения коэффициента электромеханической связи. Ниобат лития обладает высокими значениями коэффициента электромеханической связи (КЭМС, обозначаемого K^2) и не является биологически совместимым материалом.

Поэтому наиболее подходящим материалом для изготовления инвазивного (имплантируемого) датчика температуры на основе резонатора является кварц.

Кварцевый резонансный датчик имеет несколько преимуществ. Во-первых, кварц является биологически совместимым материалом. Во-вторых, кварцевый резонатор будет иметь максимальную добротность, что увеличивает радиус действия всей системы. В-третьих, кварцевый резонатор представляет собой чрезвычайно стабильный прибор, который незначительно меняет свои характеристики в течение длительного срока эксплуатации.

В противоположность резонансному датчику, предназначенному для инвазивного применения, датчик на основе линии задержки требует обеспечения высокого значения КЭМС, а также большого значения температурного коэффициента частоты. Поэтому материалом для изготовления датчика температуры большой дальности выбран ниобат лития. Этот материал отличается высоким значением температурного коэффициента частоты (ТКЧ) или температурного коэффициента задержки (ТКЗ).

ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДАТЧИКОВ

Ниобат лития представляет собой материал с высокими акусто-электронными характеристиками (малое затухание и высокий КЭМС) и в то же время значительной величиной температурных коэффициентов времени задержки (ТКЗ) на разных срезах, ориентации которых описываются углами Эйлера (ϕ , θ , ψ). Поэтому был проведен теоретический анализ и моделирование распространения ПАВ в ниобате лития разных срезов в контексте температурной чувствительности. Проведен расчет ТКЗ ПАВ (скорость которых ниже скорости всех объемных акустических волн (ОАВ)), распространяющихся в различных направлениях на всевозможных срезах ниобата лития. Результаты расчета приведены на рис. 1–4.

Также проведен расчет коэффициента электромеханической связи (КЭМС) ПАВ, распространяющихся в различных направлениях на всевозможных срезах ниобата лития. Результаты расчета приведены на рис. 5–7.

Сравним наиболее употребительные срезы ниобата лития: Y-срез, 128°Y-срез, 41°Y-срез, 64°Y-срез и X-срез. Параметры ПАВ с максимальными и минимальными значениями ТКЗ на перечисленных срезах приведены в табл. 1. PFA — угол отклонения потока энергии.

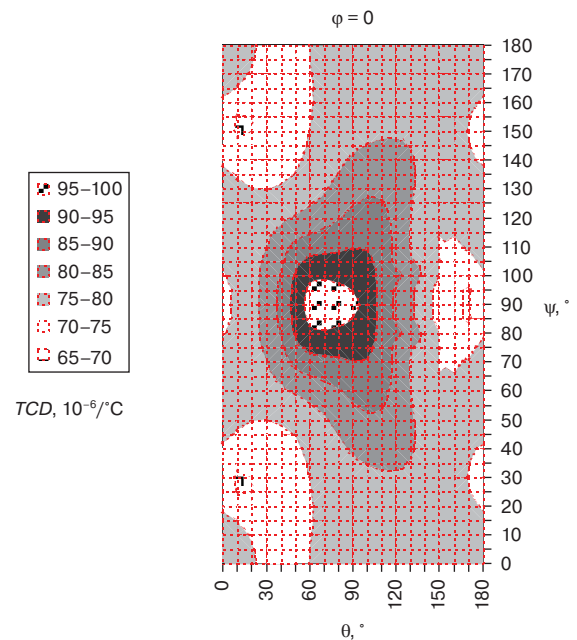


Рис. 1. Зависимость ТКЗ (TCD) от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированном значении первого угла Эйлера $\phi = 0$

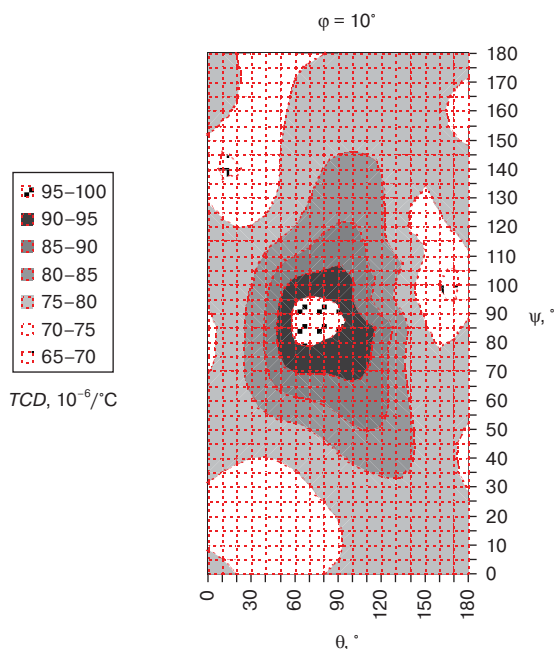


Рис. 2. Зависимость ТКЗ (TCD) от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированном значении первого угла Эйлера $\phi = 10^\circ$

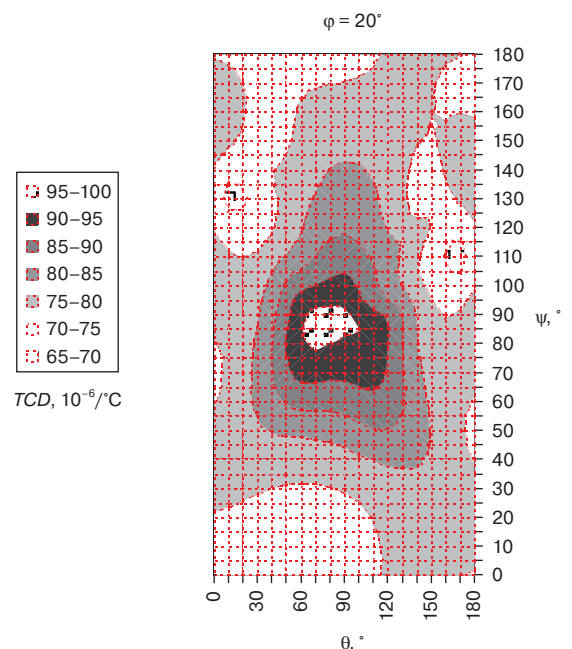


Рис. 3. Зависимость ТКЗ (TCD) от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированном значении первого угла Эйлера $\phi = 20^\circ$

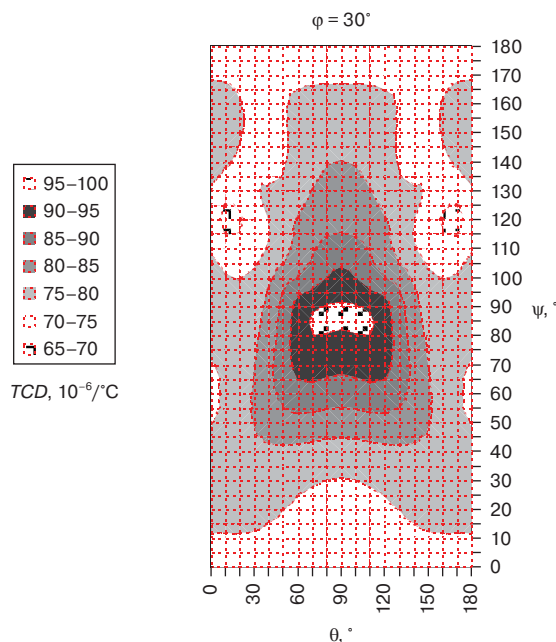


Рис. 4. Зависимость ТКЗ (ТКЗ) от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированном значении первого угла Эйлера $\varphi = 30^\circ$

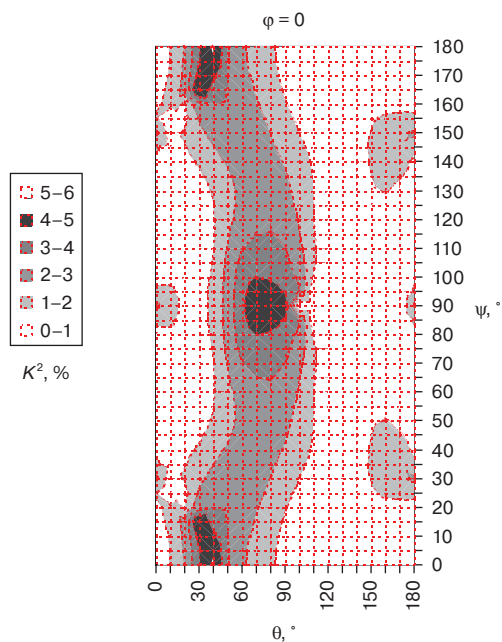


Рис. 5. Зависимость КЭМС (K^2) от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированном значении первого угла Эйлера $\varphi = 0$

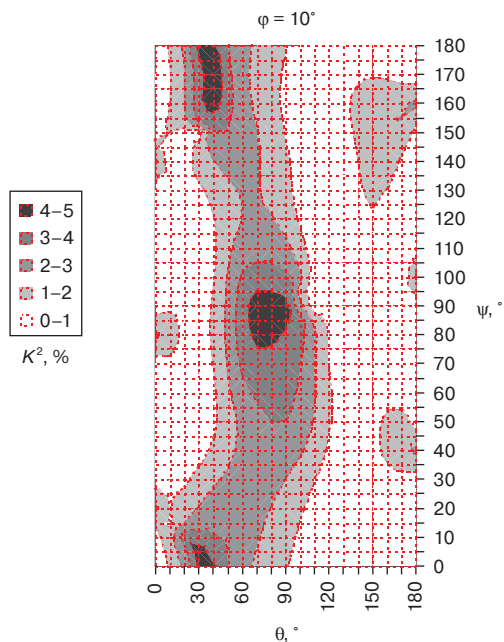


Рис. 6. Зависимость КЭМС (K^2) от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированном значении первого угла Эйлера $\varphi = 10^\circ$

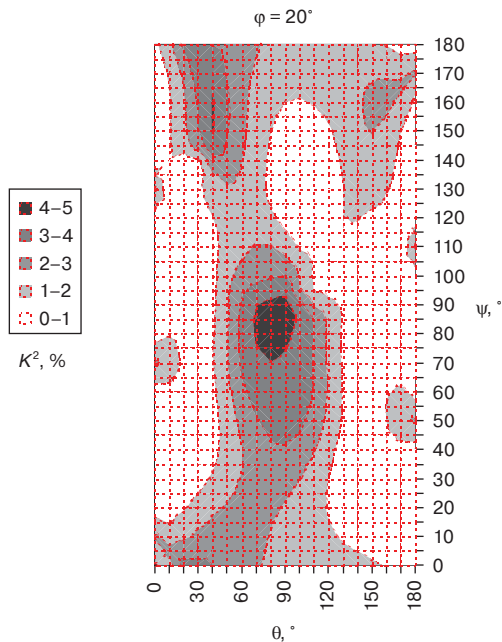


Рис. 7. Зависимость КЭМС (K^2) от второго угла Эйлера θ и третьего угла Эйлера ψ при фиксированном значении первого угла Эйлера $\varphi = 20^\circ$

Использование пары линий задержек, изготовленных на разных срезах (один из них — Y-срез с распространением волны вдоль оси Z или X-срез с распространением под углом 92° к оси Y, другой — 128° Y-срез с распространением вдоль оси X), позволяет получить разницу ТКЗ $25 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$ при КЭМС более 4% для каждой из них (при использовании невытекающих ПАВ). Вариант с использованием YZ-среза представляется предпочтительным из-за отсутствия отклонения потока энергии и близкого к минус 1 параметра дифракции, хотя ПАВ с максимальным ТКЗ на X-срезе свойственен немного более высокий КЭМС.

Использование пары линий задержек с разных срезов (один из них — Y-срез с распространением волны вдоль оси Z или X-срез с распространением под углом 92° к оси Y, другой — 64° Y-срез с распространением перпендикулярно оси X) позволяет получить разницу ТКЗ $29 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$. Используемая при этом ПАВ, распространяющаяся на 64° Y-срезе, отличается тем, что ее скорость выше скорости одной из ОАВ; такая ПАВ является невытекающей только при распространении, строго перпендикулярном к оси X.

X-срез позволяет получить среди указанных срезов наибольшую разницу ТКЗ при использовании единой подложки для пары



Таблица 1. Параметры ПАВ на различных срезах

Срез	ψ	V, м/с	PFA	K ²	ТКЗ, ×10 ⁻⁶ /°C	Разница ТКЗ (на одной подложке)
Y	90° (YZ)	3487	0	4,2 %	96	20 · 10 ⁻⁶ /°C
	0 (YX)	3718	0	0,74 %	76	
128°Y	90°	3673	0	1 %	85	14 · 10 ⁻⁶ /°C
	0	3979	0	5,5 %	71	
41°Y	ПАВ, скорость которых ниже скорости всех ОАВ:			не более 0,45 %	max 83	не более 7 · 10 ⁻⁶ /°C
					min 78	
	Невытекающая ПАВ, скорость которой выше скорости горизонтально-поперечной непьезоактивной ОАВ:					
	90°	4076	0	0,04 %	76	
	Вытекающая ПАВ (на свободной поверхности):					до 22 · 10 ⁻⁶ /°C*
0	4752	0	3,3 %	61		
64°Y	ПАВ, скорость которых ниже скорости всех ОАВ:			не более 1,4 %	max 78	не более 11 · 10 ⁻⁶ /°C
					min 71	
	Невытекающая ПАВ, скорость которой выше скорости горизонтально-поперечной непьезоактивной ОАВ:					
	90°	4428	0	1,5 %	67	
	Вытекающая ПАВ (на металлизированной поверхности):					не более 7 · 10 ⁻⁶ /°C*
0	4450	0	11 %	74		
X	92°	3479	—3°	4,4 %	96	23 · 10 ⁻⁶ /°C
	168°	3631	6°	1,9 %	73	

* Разница между ТКЗ вытекающей и невытекающей ПАВ

устройств, а также наибольшее значение меньшего среди пары направлений КЭМС. Срез 41°Y при использовании невытекающих ПАВ не представляет интереса по сравнению с другими рассмотренными срезами. Использование вытекающей ПАВ, распространяющейся с относительно слабым вытеканием на металлизированной поверхности 64°YX-среза, также не представляет интереса.

Наибольшую разницу ТКЗ среди рассмотренных вариантов, около $35 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, можно получить при использовании вытекающей ПАВ, распространяющейся с относительно слабым вытеканием на свободной поверхности 41°YX-среза, в сочетании с невытекающей ПАВ с высоким ТКЗ, распространяющейся на другом срезе (Y-срез с распространением волны вдоль оси Z или X-срез с распространением под углом 92° к оси Y).

Максимальный ТКЗ, согласно расчету, имеет величину $98 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и достигается при распространении ПАВ перпендикулярно к оси X на −20°Y-срезе. Данному направлению распространения соответствует значение КЭМС около 4,6 % (что близко к локальному максимуму и немного меньше глобального для невытекающих волн) и нулевые значения угла отклонения потока энергии. Близкими свойствами обладает ПАВ на YZ-срезе (ТКЗ ниже на $2 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и немного меньший КЭМС).

Минимальный ТКЗ среди невытекающих волн согласно расчета имеет величину $67 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ и достигается при

распространении ПАВ перпендикулярно к оси X на 66°Y-срезе. Данному направлению распространения соответствует значение КЭМС около 1,7 % и нулевые значения угла отклонения потока энергии. Практически таким же расчетным ТКЗ и немного меньшим КЭМС обладает ПАВ, распространяющаяся перпендикулярно к оси X на 64°Y-срезе. Выбирая срез с немного большим углом поворота, можно получить более высокий КЭМС при небольшом повышении ТКЗ; так, на 69°Y-срезе по расчету ТКЗ выше примерно на четверть $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, а КЭМС достигает значения 2 %; в локальном максимуме (около 80°Y-среза) КЭМС достигает значения 2,6 %, а ТКЗ значения $70 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Упомянутые ПАВ отличаются тем, что их скорость выше скорости одной из ОАВ; такие ПАВ являющиеся невытекающими только при распространении строго перпендикулярно к оси X.

Локальный минимум ТКЗ также существует в области ориентаций подложки, определяемых углами Эйлера (ϕ , 5,25°, 110,160°); минимальное значение ТКЗ в этой области составляет около $69 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. При этом наименьшим значениям ТКЗ (не превышающим $71 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) в этой области соответствуют значения КЭМС не более 1,5 %.

Еще один локальный минимум ТКЗ находится вблизи глобального максимума КЭМС, который достигается при распространении ПАВ вдоль оси X на 128°Y-срезе (ТКЗ $71 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, КЭМС 5,5 %).



Таким образом, использование пары линий задержек с разных срезов (при использовании невытекающих ПАВ) позволяет получить разницу ТКЗ до $27 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ при КЭМС более 4 % для каждой из них.

Если допустить КЭМС около 2 %, то можно достичь $31 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Однако, если при использовании ПАВ со скоростью, превышающей скорость одной из ОАВ, обнаружатся неприемлемые потери, то максимальная разность ТКЗ при использовании других волн составляет около $29 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, при условии что КЭМС будет иметь величину около 0,5 %.

Большую разность ТКЗ (при КЭМС не менее 4 %) позволяет получить использование вытекающих волн. В частности, до $37 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ можно получить при использовании вытекающей ПАВ, распространяющейся на 41°YX -срезе.

Максимум разности ТКЗ также существует в области ориентаций подложки, определяемых углами Эйлера (ϕ , $60, 90^{\circ}$, ψ). ПАВ с высоким ТКЗ ($95,98 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) распространяются в направлениях, соответствующих $\psi = 75,95^{\circ}$. ПАВ с низким ТКЗ ($72,75 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) распространяются в направлениях, соответствующих ψ от 0 до 25° .

Максимальное значение разности ТКЗ составляет около $24 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Возможно, при расчете с меньшим шагом по углам найдется значение, большее на $1,2 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Максимальная разность ТКЗ достигается при использовании двухповоротных срезов, используемые ПАВ имеют ненулевые значения угла отклонения потока энергии, в том числе превышающие 10° . КЭМС ПАВ с высоким ТКЗ принимает значения близкие к 4 %; КЭМС ПАВ с низким ТКЗ при максимальной разности ТКЗ составляет 2–2,3 %. Разность ТКЗ более $20 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ может быть получена, при условии что минимальное допустимое значение КЭМС составляет 2,5–3 %.

Близкую к максимальной разность ТКЗ в сочетании с близким к 2 % КЭМС (у ПАВ с низким ТКЗ) и умеренными значениями угла отклонения потока энергии можно получить при использовании X-среза. При использовании Y-среза можно получить разность ТКЗ примерно на 20 % ниже максимальной в сочетании с более низким КЭМС ПАВ с низким ТКЗ и нулевыми значениями угла отклонения потока энергии.

Таким образом, ниобат лития позволяет разработать локальный сенсор температуры на основе ПАВ чувствительного элемента.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ЛИНИЙ ЗАДЕРЖКИ

Датчик температуры реализован в соответствии с принципами, изложенными в [1]. В данном случае зеркальная топология реализуется на двух разных пьезоплатах. Датчик температуры представляет собой чувствительный элемент на ПАВ для измерения

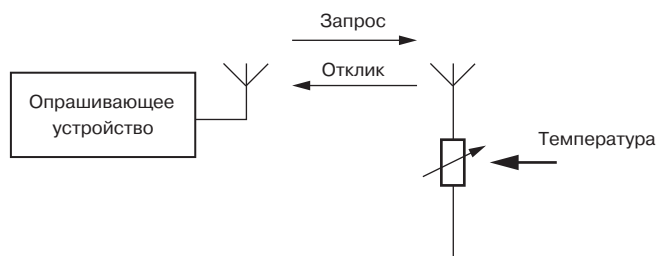


Рис. 8. Взаимодействие опрашивающего устройства с устройством на ПАВ

температуры, состоящий из двух пьезоплат разных срезов с различными температурными коэффициентами задержки, на поверхности каждой из них сформированы не менее одного встречно-штыревого преобразователя (ВШП) и не менее двух ОС, ОС расположены по обе стороны от ВШП, ВШП соединены параллельно. Такая топология соответствует зеркальной топологии, предложенной в [1]. Данное устройство планируется использовать для дистанционного мониторинга температуры. Для этого измеритель должен быть оснащен антенной, а оценка текущей температуры производится путем излучения запросных сигналов опрашивающим устройством (рис. 8).

На рис. 9 приведены импульсные характеристики пьезоплат.

На рис. 10 приведена структура чувствительного элемента на ПАВ для измерения температуры (параллельное соединение).

Чувствительный элемент на ПАВ для измерения температуры (рис. 9, рис. 10) состоит из двух пьезоплат: пьезоплаты (1) и пьезоплаты (2), на которых сформированы ВШП (3) и ВШП (4) и ОС (1а и 1б). ОС выполнены в виде периодической системы канавок.

На рис. 10 показано параллельное соединение пьезоплат.

Пьезоплаты выполнены из пьезоэлектрического материала: ниобат лития YZ-срез и ниобат лития 128°Y-X -срез.

При этом каждый срез обладает различными температурными коэффициентами задержки.

Для формирования ВШП использованы такие технологии, как фотолитография и травление. Канавки (отражающие структуры) сформированы травлением через маску.

Как показано на рис. 9, импульсные характеристики пьезоплат различны, а минимальные значения импульсной характеристики одной пьезоплаты во временной области соответствуют максимальным значениям импульсной характеристики другой пьезоплаты во временной области.

Под действием изменения температуры пьезоплаты изменяются геометрические размеры электродов ВШП (3) и ВШП (4), длина

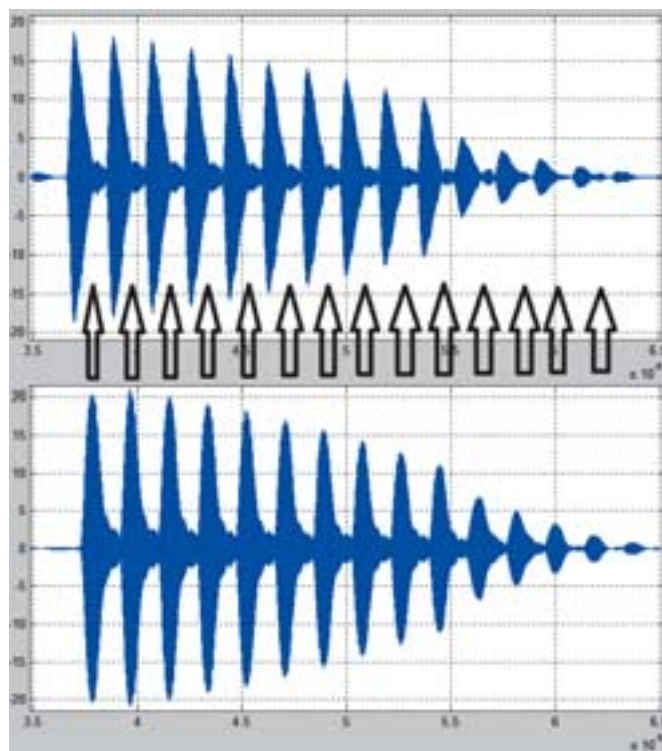


Рис. 9. Импульсные характеристики пьезоплат

звукпровода, параметры системы каналов ОС (1а и 1б) на пьезоплатах 1 и 2. Изменение геометрических размеров пьезоплаты приводит к изменению времени задержки ответного сигнала.

При поступлении запросного радиосигнала от опрашивающего устройства на ВШП (3) пьезоплаты 1 и ВШП (4) пьезоплаты 2 за счет обратного пьезоэлектрического эффекта возникает ПАВ, распространяющаяся от ВШП (3) пьезоплаты 1 и ВШП (4) пьезоплаты 2 к отражающим структурам (1а и 1б) пьезоплаты 1 и пьезоплаты 2 соответственно.

Дойдя до ОС (1а и 1б) пьезоплаты 1 и пьезоплаты 2, ПАВ отражается и возвращается на ВШП (3) и ВШП (4), соответственно.

Если измеряемая чувствительным элементом температура постоянна, то разница времен задержки запросного сигнала на различных пьезоплатах будет определяться направлением распространения ПАВ и будет пропорциональна разности температурных коэффициентов задержки.

Поскольку во временной области минимальные значения импульсной характеристики одной пьезоплаты соответствуют максимальным значениям импульсной характеристики другой пьезоплаты (рис. 9), то при изменении скорости ПАВ ответный сигнал будет иметь различную форму при различных температурах.

Различие времен задержки запросного сигнала различными пьезоплатами приведет к искажению формы сигнала, пришедшего на ВШП (3) пьезоплаты 1 и ВШП (4) пьезоплаты 2 от ОС (1а и 1б) пьезоплаты 1 и пьезоплаты 2.

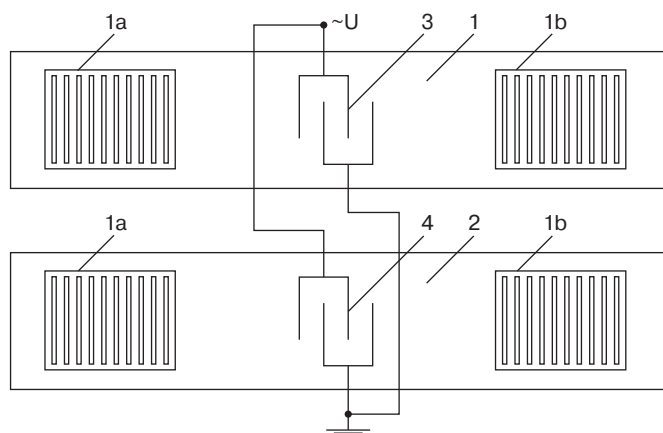


Рис. 10. Структура чувствительного элемента на ПАВ для измерения температуры (параллельное соединение)

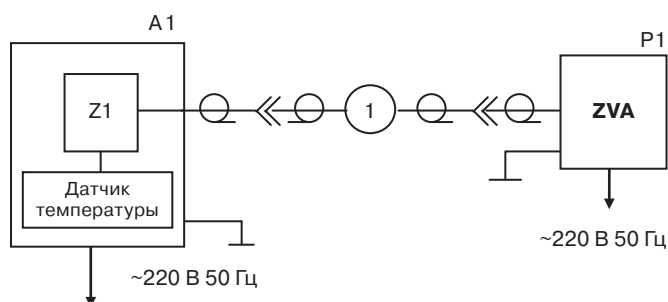


Рис. 11. Схема подключения для измерения импульсной характеристики при воздействии температуры: А1 — термокамера; Р1 — векторный анализатор цепей ZVA 24 ф. Rohde & Schwarz; Z1 — присоединение; 1 — кабель ф. Rohde & Schwarz ZV-Z93

Информационным сигналом является отраженный сигнал, обеспечивающий максимальное по амплитуде значение отклика датчика температуры.

Изменение формы сигнала может быть сопоставлено значению температуры. Для измерений используется градуировочная зависимость (форма — температура).

В устройстве реализуется свертка принятого запросного сигнала с импульсной характеристикой устройства, зависящей от текущей температуры. Сформированный таким образом отклик переизлучается в эфир и принимается опрашивающим устройством. Анализируя принятый отклик, можно произвести оценку температуры. Очевидно, что для синтеза оптимального запросного сигнала (или набора запросных сигналов), а также эффективной обработки принятого отклика в опрашивающем устройстве необходимо знание соответствия формы импульсной характеристики и переизлученного датчиком сигнала конкретной температуре.

Данное соответствие может быть установлено экспериментально путем последовательного достижения каждого значения из набора значений эталонной температуры и записи соответствующих импульсных характеристик и откликов датчика (свертки импульсной характеристики и запросного сигнала).

Для оценки импульсных характеристик устройства осуществляется непосредственное измерение комплексного сопротивления устройства при помощи анализатора цепей и дальнейший пересчет в импульсные характеристики посредством применения программной среды MATLAB.

В ходе проведенных экспериментов исследуемый образец подвергался воздействию положительных температур в диапазоне от 20 до 50 °С. Для анализа импульсных характеристик при воздействии температуры установленный образец помещался в термокамеру (рис. 11).

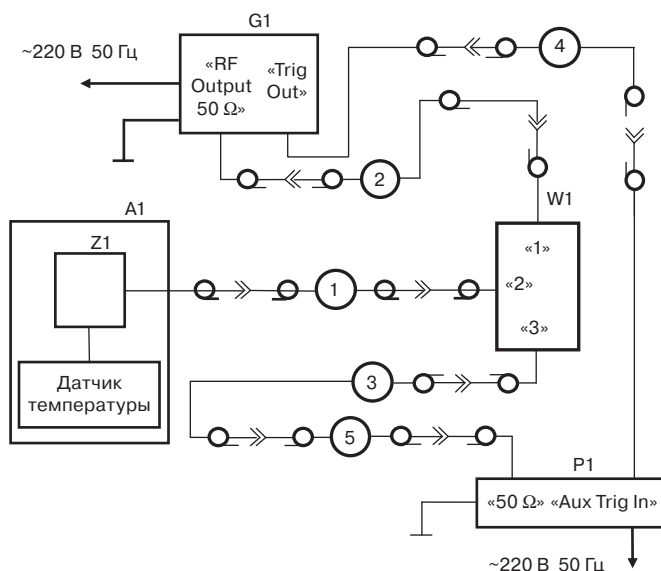


Рис. 12. Схема подключения для измерения вносимого затухания: А1 — термокамера; G1 — генератор Agilent N5181A; P1 — осциллограф Agilent DSO80304B; W1 — циркулятор Radiall C-UL-50-X/2; Z1 — приспособление ИСАТ.3990-3397.01.000; 1 — кабель Rosenberger N(m)-SMA(m) L72-449-1220; 2 — кабель Rosenberger N(m)-N(m) L72-450-915; 3 — кабель Rosenberger N(m)-SMA(m) L72-449-1220; 4 — кабель; 5 — переходник Agilent 54855-67604



Рис. 13. Макет экспериментальной установки для измерения импульсных характеристик



Рис. 14. Образец чувствительного элемента температуры

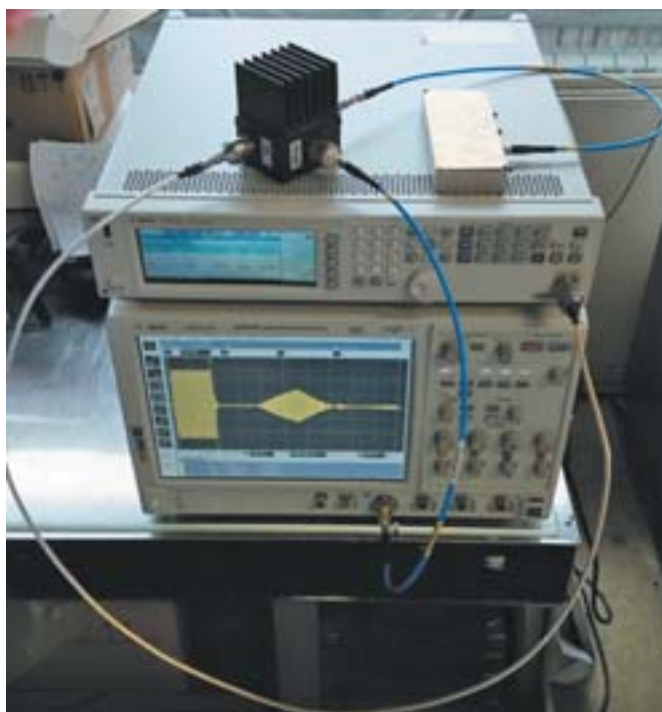


Рис. 15. Макет экспериментальной установки для измерения вносимого затухания

В каждом из проведенных экспериментов величина установленных температур менялась в диапазоне от 20 до 50 °С с шагом в 5°.

Была выполнена оценка S11 параметра устройства (коэффициента отражения) при помощи анализатора цепей Rohde&Schwarz ZVA 24.

Структура экспериментальной установки, использованной при проведении данных измерений, приведена на рис. 11–12.

S11 параметр регистрировался в диапазоне 200–600 МГц с шагом по частоте 10 кГц.

Оценка вносимого затухания была выполнена путем воздействия на устройство радиоимпульсами, с частотами несущей, обеспечивающими максимальную энергетическую эффективность [1], длительностью 1,8 мкс, сформированными стандартным аналоговым генератором сигналов Agilent.

Отклик устройства регистрировался и записывался в файл при помощи цифрового осциллографа Agilent. После измерения



Рис. 16. Осциллограмма отклика устройства

амплитуды отклика устройства вносимое затухание рассчитывается по формуле

$$a_{\text{вн}} = 20 \log \frac{U_2}{1000}, \quad (1)$$

где $a_{\text{вн}}$ — вносимое затухание, дБ; U_2 — амплитуда отраженного сигнала, В.

Вид экспериментальной установки, использованной при проведении измерений, приведен на рис. 13–16.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

1. Методология проектирования пассивных беспроводных датчиков на основе линий задержки на ПАВ;
2. Конструкция датчика температуры на ПАВ;
3. Зеркальная топология датчика температуры на ПАВ.

Актуальность работы определяется необходимостью измерения основных физических параметров в экстремальных условиях (низкие или высокие температуры, космическая радиация и т. д.).

Работа частично поддерживается Министерством образования и науки РФ, задание 8.6108.2017/6.7

ЛИТЕРАТУРА

1. Ivan Antsev, Sergei Bogoslovsky, Gennadiy Sapozhnikov, Sergei Zhgoon. SAW Force Sensor Based on Reflective Delay Line Quasi-Mirror Topology // 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings.