

---

# ФИЗИКА

© И.Г. СИМАКОВ, Ч.Ж. ГУЛГЕНОВ

*simakov-bsc@rambler.ru, gchj@rambler.ru*

УДК 534.28 + 532.62

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ НУЛЕВОГО ЗНАЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН**

*АННОТАЦИЯ. Разработана оригинальная измерительная ячейка, позволяющая задавать необходимое давление паров в зоне адсорбции, регулировать температуру подложки, проводить акустические измерения. Описаны чувствительный метод регистрации малых изменений скорости и амплитуда поверхностных акустических волн. Проведено экспериментальное исследование влияния влажной газовой среды на время задержки поверхностных акустических волн в системе «ниобат лития — адсорбированная вода». Показано, что во влажной газовой среде температурный коэффициент времени задержки (ТКЗ) поверхностных акустических волн в системе «ниобат лития — адсорбированная вода» принимает нулевое значение при определенной температуре. В исследуемой системе имеет место корреляция температуры нулевого значения ТКЗ с точкой росы. Предложено использовать зависимость температуры нулевого значения ТКЗ от давления пара для определения относительной влажности. Рассмотрены преимущества такого метода.*

*SUMMARY. There has been developed an innovative measuring cell that allows to set the required vapour pressure in the adsorption zone, to control the supporter temperature and carry out acoustic measurements. A sensitive method to register small velocity changes and amplitude of surface acoustic waves has been described. The effect of a wet gas environment on the delay of surface acoustic waves in the “Lithium niobate — adsorbed water” system has been experimentally studied. It is shown that in a wet gas environment the temperature coefficient of delay (TCD) of surface acoustic waves in the «lithium niobate — adsorbed water» system has a zero value at a certain temperature. In the system under study there is a correlation between zero temperature of the TCD and a dew point. A suggestion was made to use the dependence of zero temperature of TCD on the vapor pressure to determine the relative humidity. The advantages of this method are considered.*

*КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Определение влажности, поверхностные акустические волны, точка росы, коэффициент времени задержки.*

*KEYWORDS: Determination of humidity, surface acoustic waves, dew point, the coefficient of delay.*

Во влажной газовой среде на поверхности твердого тела образуется слой адсорбированной воды, параметры которого зависят от температуры и состояния твердой поверхности, температуры газовой среды, а также от степени влажности этой среды. Если в твердом теле распространяются поверхностные акустические волны (ПАВ), то наличие адсорбционного слоя вносит возмущение в условия их распространения. Исследуя влияние адсорбционного слоя на параметры ПАВ можно определить относительную влажность газовой среды.

ПАВ удобнее всего возбуждать в пьезоэлектрических подложках. Как правило, подложка в виде плоскопараллельной пластины изготавливается из пьезоэлектрического кристалла и имеет определенную ориентацию. На полированной поверхности подложки можно разместить два встречно-штыревых преобразователя (ВШП) для возбуждения и приема ПАВ [1-4]. Такое устройство образует линию задержки. Основными причинами, дестабилизирующими работу линии задержки, являются влияние температуры и воздействие влажности окружающей среды. Влияние адсорбционного слоя на параметры упругих поверхностных волн сводится к изменению амплитуды и скорости ПАВ [5-7].

В результате воздействия температуры (без учета влияния влажности) изменяется расстояние между ПАВ-преобразователями и скорость поверхностных волн, что приводит к изменению времени задержки акустического сигнала  $\tau$ . Комплексное воздействие температуры и влажности приводит к изменению амплитуды и фазы задержанного сигнала, соответственно изменяется время задержки.

Для акустоэлектронных устройств важной характеристикой ПАВ является температурный коэффициент времени задержки (ТКЗ)  $\zeta = \tau^{-1} \partial \tau / \partial T$  [8]. Наличие твердого или жидкого слоя на поверхности подложки может существенно увеличить или уменьшить ТКЗ [9]. Без учета влияния адсорбционного слоя ТКЗ включает в себя температурный коэффициент изменения скорости упругих поверхностных волн  $V_s^{-1} \partial V_s / \partial T$  и температурный коэффициент линейного расширения подложки  $\alpha = L^{-1} \partial L / \partial T$  [8] ( $T$  — температура,  $L$  — расстояние между преобразователями ПАВ)

$$\zeta = \frac{1}{\tau} \frac{\partial \tau}{\partial T} = \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} - \frac{1}{V_s} \frac{\partial V_s}{\partial T} = \alpha - \frac{1}{V_s} \frac{\partial V_s}{\partial T} \quad (1)$$

Влажность газовой среды определяется величиной относительного давления пара  $p/ps$ . В общем случае влажность зависит от температуры и влагосодержания газовой среды. Как уже отмечалось, во влажной газовой среде на поверхности твердой подложки адсорбируется слой воды. Влажность газовой среды и состояние твердой поверхности определяют условия формирования этого адсорбционного слоя. Таким образом, существует зависимость между влажностью окружающей газовой среды и параметрами адсорбционного слоя. Следовательно, имеет место зависимость между влажностью среды и параметрами упругих поверхностных волн, распространяющихся в слоистой системе «пьезоэлектрическая подложка — адсорбционный слой воды».

Для того чтобы выявить возможность определения влажности газовой среды по параметрам сигнала в акустическом тракте, необходимо было исследовать

изменение времени задержки в зависимости от влажности этой среды. Для этой цели была разработана измерительная ячейка (рис. 1 а). В конструкции измерительной ячейки была предусмотрена возможность задавать необходимое давление паров в зоне адсорбции, регулировать температуру подложки, и проводить акустические измерения. Необходимое давление пара в зоне адсорбции можно получить двумя способами. Во-первых, можно поддерживать заданную температуру подложки  $T_2$  и изменять температуру жидкости  $T_1$ , над которой расположена подложка. Во-вторых, можно варьировать температуру подложки  $T_2$ , оставляя неизменной температуру жидкости  $T_1$ . Относительное давление пара в зоне адсорбции связано с температурами  $T_1$  и  $T_2$  известным уравнением Клапейрона–Клаузиуса:

$$\ln \frac{p}{p_s} = -\frac{Q}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right), \quad (2)$$

где  $Q$  и  $R$  — теплота испарения (конденсации) и газовая постоянная воды.

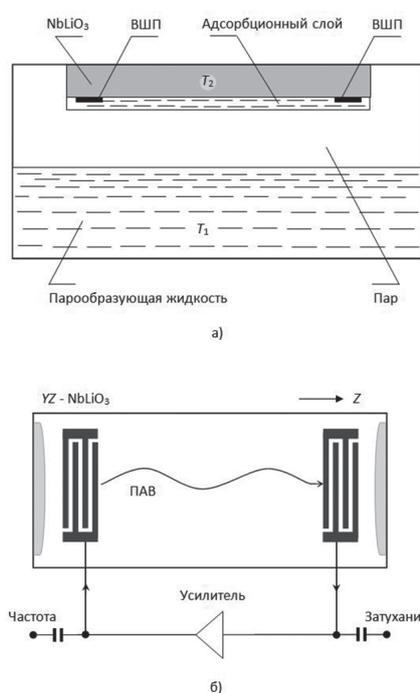


Рис. 1. а) Схема измерительной ячейки; б) Блок-схема измерительной установки

Кристалл ниобата лития с оптически полированной рабочей поверхностью  $YZ$ -среза предварительно очищался в тлеющем разряде и помещался над поверхностью дважды дистиллированной воды, в замкнутый термостатированный объем. Необходимое давление пара согласно уравнению (2) задавалось и контролировалось с точностью 0,1% изменением температуры дистиллированной воды  $T_1$  и температуры подложки  $T_2$ . Адсорбция молекул воды осуществлялась на рабочую поверхность кристалла между излучающим и приемным ПАВ-

преобразователями. Частота ПАВ была  $\sim 128$  МГц. Для устранения влияния отраженных от торцов подложки сигналов использовались поглощающие покрытия.

Основной измеряемой акустической величиной было изменение времени задержки ПАВ. В эксперименте использовался метод определения изменения времени задержки  $\Delta\tau$ , основанный на регистрации изменения частоты ПАВ-генератора  $\Delta f$ , образованного путем введения линии задержки на поверхностных акустических волнах в цепь обратной связи высокочастотного усилителя (рис. 1 б) [10].

Условия самовозбуждения ПАВ-генератора выполняются, если полные вносимые потери в петле обратной связи генератора меньше, чем коэффициент усиления усилителя и полный фазовый сдвиг в петле генератора  $\Psi_{\Sigma}$  кратен  $2\pi$ :

$$\Psi_{\Sigma} = \Psi = \Psi_E = 2\pi \cdot n$$

где  $n = 1, 2, 3 \dots$  — целое, определяющее моду колебания,  $\Psi_E$  — суммарный фазовый сдвиг в цепях усилителя, ПАВ-преобразователях и согласующих цепях,  $\Psi = \omega\tau$  — набег фазы при распространении ПАВ. Частота генерации определяется как

$$f = \frac{n - \Psi_E / 2\pi}{\tau}. \quad (3)$$

Мода генерации  $n$  определяется частотными характеристиками усилителя, входного и выходного ВШП. Поскольку фазовый наклон в ПАВ линии задержки  $d\Psi/d\omega$  значительно больше, чем фазовый наклон  $d\Psi_E/d\omega$  для других компонентов, а фазовый набег в линии задержки является преобладающим, частота и стабильность ПАВ-генератора зависят от условий распространения волн в акустическом тракте [10].

Любое изменение состояния поверхности и приповерхностной области подложки приведет к возмущению условий распространения ПАВ. В результате адсорбции пара на поверхность звукопровода изменяется скорость и амплитуда ПАВ, следовательно, меняется частота ПАВ-генератора. Ее новое значение регистрируется частотомером. Как следует из условия (3), изменение времени задержки связано с изменением частоты генерации выражением  $\Delta\tau/\tau = -\Delta f/f$ . Затухание определяется по величине изменения амплитуды сигнала на входе усилителя.

Реальная схема ПАВ-генератора включает устройства для согласования входного и выходного импедансов ПАВ-структуры с нагрузкой, аттенюатор для получения необходимого уровня мощности в петле генератора и развязывающее устройство для исключения влияния регистрирующего устройства (на рис. 1б не приведены).

В эксперименте влажность в зоне адсорбции задавалась изменением температуры подложки. Температура дистиллированной воды поддерживалась равной  $20^\circ\text{C}$ . Подложка прогревалась до установления термодинамического равновесия. При уменьшении температуры подложки от  $30^\circ\text{C}$  влажность в зоне адсорбции возрастала, соответственно увеличивалась толщина адсорбционного слоя. При некоторой толщине адсорбционного слоя изменение времени задержки, вызванное изменением линейного размера подложки и скорости по-

верхностной волны в зависимости от температуры, компенсируется уменьшением скорости ПАВ в результате воздействия слоя. В результате температурный коэффициент времени задержки становится равен нулю [5]. Температура  $t_m$  является температурой нулевого значения ТКЗ. При дальнейшем уменьшении температуры система достигает точки росы, т.е. температуры интенсивной конденсации влаги на поверхности подложки.

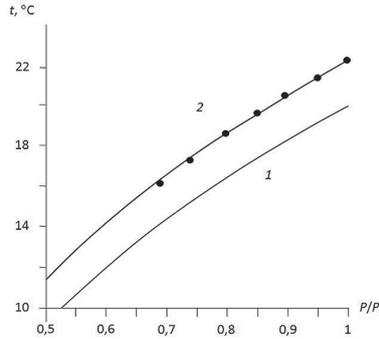


Рис. 2. Температурная зависимость частоты интерференционного минимума  
 1 —  $p/p_s = 0,9$ ; 2 —  $p/p_s = 0,96$ ; 3 —  $p/p_s = 1$ ;  $t = 20^\circ\text{C}$

Изменение влажности газовой среды приводит к изменению точки росы и соответствующему изменению температуры нулевого значения ТКЗ. При уменьшении относительной влажности газовой среды температура нулевого значения ТКЗ  $t_m$  должна уменьшиться. На рисунке 2 приведены зависимости изменения частоты ПАВ-генератора от температуры для разных значений давления пара воды в измерительной ячейке. Из рисунка следует, что характер кривых 1 — 3 ( $p_1 < p_2 < p_3$ ) практически не меняется. Температура нулевого значения ТКЗ уменьшается при понижении давления пара в ячейке в соответствии с уменьшением температуры точки росы. Вместе с тем увеличивается частоты экстремальных значений  $f_m$  кривых  $f(t)$ .

Точка росы зависит от влажности, при уменьшении относительного давления пара точка росы также уменьшается. Ее зависимость от относительного давления пара используется в гигрометрах точки росы. Из анализа экспериментальных и расчетных данных следует, что зависимости температуры нулевого значения ТКЗ и точки росы от относительной влажности хорошо коррелируют между собой (рис. 3).

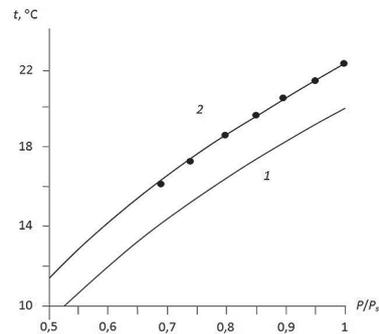


Рис. 3. Зависимость точки росы (1) и температуры нулевого значения ТКЗ (2) от относительного давления пара

Определение влажности по точке росы сводится к следующему порядку действий. Определяется точка росы. Температура рабочей поверхности гигрометра понижается до температуры интенсивной конденсации. Это и есть точка росы  $t_d$ . Относительную влажность воздуха  $p/p_s$  при температуре  $t$  можно найти, используя эмпирическое выражение:

$$\lg \frac{p}{p_s} = \frac{a(t_d - t)}{(1 + bt_d)(1 + bt)}, \quad (4)$$

где  $a = 3,156 \cdot 10^{-2}$ ;  $b = 4,19 \cdot 10^{-3}$ . Ошибка определения относительной влажности при использовании эмпирического выражения (4) не превышает 0,1%.

Необходимо заметить, что в гигрометрах точки росы в результате многократных циклов конденсации и испарения влаги, на рабочей поверхности остаются следы растворимых веществ. Растворимые загрязнения могут появляться в результате химических реакции между нерастворимыми частицами и примесями активных газов в воздухе. Серьезным источником загрязнений является осаждение ядер конденсаций из воздуха. Практически, на любой твердой поверхности конденсат осаждается при более высокой температуре, чем точка росы. В результате накопления растворимых загрязнений на рабочей поверхности гигрометра, точность регистрации точки росы заметно уменьшается.

Температура нулевого значения ТКЗ выше температуры конденсации влаги (в эксперименте на  $\sim 2,3^\circ\text{C}$ ). Следовательно, при достижении температуры нулевого значения ТКЗ конденсация влаги на поверхности звукопровода отсутствует и загрязнений не образуется. Следовательно, можно использовать зависимость температуры нулевого значения ТКЗ от давления пара для определения относительной влажности газовой среды.

Для этого необходимо определить точку росы по температуре максимума кривой  $f(t)$ , соответствующего нулевому значению ТКЗ, из условия, что разница температур  $\Delta t = t_m - t_d$  остается неизменной. Далее, относительная влажность газа при температуре  $t$  определяется из выражения (4), процедура определения аналогична описанной выше.

Таким образом, продемонстрировано, что при комплексном влиянии температуры и влажности температурный коэффициент времени задержки ПАВ изменяется от положительного значения до отрицательного. При некотором промежуточном значении влажности ТКЗ становится равным нулю. С учетом корреляции точки росы и температуры нулевого значения ТКЗ показано, что можно определять относительную влажность газа не понижая температуру подложки до точки росы, т.е. до температуры конденсации влаги. Следовательно, исключается загрязнение рабочей поверхности и последующая деградация гигрометра на ПАВ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колешко В.М., Мешков Ю.В. Микроэлектронные преобразователи информации на ПАВ // Зарубежная электронная техника. 1985. №9.
2. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1990. 416 с.

3. Вьюн В.А., Ржанов А.В., Яковкин И.Б. Акустоэлектронные методы исследования поверхности полупроводников / Под ред. С.В. Богданова. Новосибирск: ИФП СО АН СССР, 1987. 126 с.
4. Багдасарян А. С. Устройства на поверхностных акустических волнах в системах и средствах связи // CHIP NEWS. 2002. №8. С. 33-39.
5. Симаков И.Г., Гулгенов Ч.Ж. Влияние влажной газовой среды на температурный коэффициент времени задержки акустоэлектронного устройства // Вестник Тюменского государственного университета. 2011. № 7. Серия «Физико-математическая наука. Информатика». С. 94-98.
6. Доржин Г.Б., Симаков И.Г. Акустическое исследование адсорбированных слоев жидкостей // Акустический журн. 2002. Т. 48; № 4. С. 499-503.
7. Симаков И.Г., Гулгенов Ч.Ж. Влияние полимолекулярной адсорбции воды на параметры акустоэлектронных устройств // Вестник Бурятского государственного университета. 2009. Вып. 3. Химия. Физика. С. 171-175.
8. Материалы и их влияние на характеристики устройств / А. Слободник, мл. // Поверхностные акустические волны / под ред. А. Олинера. М.: Мир, 1981. С. 270-358.
9. Волноводы для поверхностных акустических волн / А. Олинер // Поверхностные акустические волны / под ред. А. Олинера. М.: Мир, 1981. С. 226-269.
10. Симаков И.Г., Гулгенов Ч.Ж. Регистрация изменения амплитуды и скорости рэлеевских волн на поверхности пьезоэлектрика // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2011. Вып. 3. С. 216-220.

## REFERENCES

1. Koleshko, V.M., Meshkov, Ju.V. Microelectronic Information Transducers on Surfactant. *Zarubezhnaja jelektronnaja tehnika — Foreign Electronic Engineering*. 1985. № 9. (in Russian).
2. Morgan, D. *Ustrojstva obrabotki signalov na poverhnostnyh akusticheskikh volnah* [Devices of signal's processing on superficial acoustic waves]. М.: Radio i svjaz', 1990. 416 p. (in Russian).
3. V'jun V.A., Rzhanov A.V., Jakovkin I.B. *Akustojelektronnye metody issledovaniya poverhnosti poluprovodnikov* [Acoustoelectronic methods of research of semiconductors surface] / Pod red. S.V. Bogdanova. Novosibirsk: IFP SO AN SSSR, 1987. 126 p. (in Russian).
4. Bagdasarjan, A.S. Surface Acoustic Wave Device in Systems and Means of Communication. *CHIP NEWS*. 2002. № 8, Pp. 33-39. (in Russian).
5. Simakov, I.G., Gulgenov, Ch.Zh. The Effect of Humid Gaseous Medium on Temperature Coefficient of Time Delay in Acoustoelectric Device. *Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta — Tyumen State University Herald*. 2011. № 7. Pp. 94-98. (in Russian).
6. Dorzhin, G.B., Simakov, I.G. Acoustic Investigation of Adsorbed Layers of Fluids. *Akusticheskij zhurn — Acoustic Journal*. 2002. Vol. 48. № 4. Pp. 499-503. (in Russian).
7. Simakov, I.G., Gulgenov, Ch.Zh. Vlijanie polimolekuljarnoj adsorbicii vody na parametry akustojelektronnyh ustrojstv. *Vestnik Burjatskogo gosudarstvennogo universiteta — Buryatia State University Herald*. 2009. № 3. Pp. 171-175. (in Russian).
8. Slobodnik, A. ml. Material and its Effect on Behaviour of Device // *Poverhnostnye akusticheskie volny* [Acoustic Surface Waves] / Edit. by A. Oliner. М.: Mir, 1981. Pp. 270-358. (in Russian).
9. Oliner, A. Volnovody dlja poverhnostnyh akusticheskikh voln // *Poverhnostnye akusticheskie volny* [Acoustic Surface Waves] / Edit. by A. Oliner. М.: Mir, 1981. Pp. 226-269. (in Russian).
10. Simakov, I.G., Gulgenov, Ch.Zh. Registracija izmenenija amplitudy i skorosti rjeleevskih voln na poverhnosti p'ezoelektrika. *Vestnik Burjatskogo gosudarstvennogo universiteta — Buryatia State University Herald*. 2011. №. 3. Pp. 216-220. (in Russian).