

Взаимосвязь точки росы с температурным коэффициентом времени задержки поверхностных акустических волн в системе адсорбированная вода–ниобат лития

И. Г. Симаков,^{*} Ч. Ж. Гулгенов[†]

Институт физического материаловедения СО РАН. Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6

(Статья поступила 06.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Показано, что во влажной газовой среде температурный коэффициент времени задержки (ТКЗ) акустоэлектронного устройства имеет нулевое значение при некоторой величине тепловой энергии (температуры). Имеет место взаимосвязь 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.

PACS: 43.35.+d.

УДК: 534.6 + 532.13.

Ключевые слова: датчик влажности воздуха, акустоэлектронные устройства.

Для измерения относительной влажности газовой среды используются гигрометры. Существует несколько типов гигрометров (весовой, волосной, плёночный и другие), действие которых основано на различных принципах. Одним из распространенных типов гигрометров является гигрометр точки росы (конденсационный гигрометр). Точка росы – это температура, до которой должен охладиться воздух, чтобы содержащийся в нём пар достиг состояния насыщения и начал конденсироваться в росу. Точка росы зависит от степени влажности парогазовой среды, при уменьшении относительного давления пара она также уменьшается. Конденсационный гигрометр определяет точку росы по температуре охлаждаемого металлического зеркала в момент появления на нём следов воды (или льда), конденсирующейся из окружающего воздуха [1]. Конденсационный гигрометр состоит из устройства для охлаждения зеркала, оптического или электрического устройства, фиксирующего момент конденсации, и термометра, измеряющего температуру зеркала.

Необходимо отметить, что в гигрометрах точки росы в результате многократных циклов конденсации и испарения влаги, на поверхности металлического зеркала 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. В результате накопления на рабочей поверхности гигрометра растворимых загрязнений, точность регистрации точки росы уменьшается. Практически, на любой твердой поверхности после нескольких циклов «конденсация–испарение» влага осаждается при более высокой температуре, чем точка росы.

В настоящей работе предлагается в качестве рабочей поверхности гигрометра использовать поверхность звукопровода акустоэлектронного устройства. Основным

элементом акустоэлектронных устройств является линия задержки, представляющая собой подложку, вырезанную из пьезоэлектрического кристалла, на полированной поверхности которой нанесены два (или более) встречно-штыревых преобразователя.

В парогазовой среде на поверхности звукопровода в результате адсорбции образуется тонкий полимолекулярный слой воды, параметры которой зависят от температуры. Влияние слоя на параметры поверхностных акустических волн сводится к возмущениям условий распространения этих волн. Это приводит к изменению амплитуды и скорости ПАВ [2].

Влажность парогазовой среды определяется величиной относительного давления пара p/p_s . В общем случае влажность зависит от температуры и влагосодержания парогазовой среды. Влажность газовой среды и состояние твердой поверхности определяют условия формирования адсорбционного слоя воды. Таким образом, существует прямая зависимость между влажностью газовой среды и параметрами слоя. Следовательно, существует зависимость между влажностью среды и параметрами упругих поверхностных волн, распространяющихся в слоистой системе «пьезоэлектрическая подложка–слой адсорбированной воды».

Совместное влияние температуры и влажности вносят изменения в условия распространения поверхностных акустических волн, что выражается в изменении такой важной характеристики акустоэлектронного устройства, как температурный коэффициент времени задержки (ТКЗ). 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 $\alpha_T = L^{-1} \partial L / \partial T$ [3] (T – температура, L – расстояние между преобразователями ПАВ, $\tau = L/V_s$ – время задержки)

$$\zeta = \frac{1}{\tau} \frac{\partial \tau}{\partial T} = \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} - \frac{1}{V_s} \frac{\partial V_s}{\partial T} = \alpha_t - \frac{1}{V_s} \frac{\partial V_s}{\partial T}.$$

Для того чтобы выявить возможность определения влажности газовой среды по параметрам сигнала в акустическом тракте, необходимо было исследовать изменение времени задержки в зависимости от

^{*}E-mail: sigfizik@mail.ru

[†]E-mail: chingisbarga@gmail.com

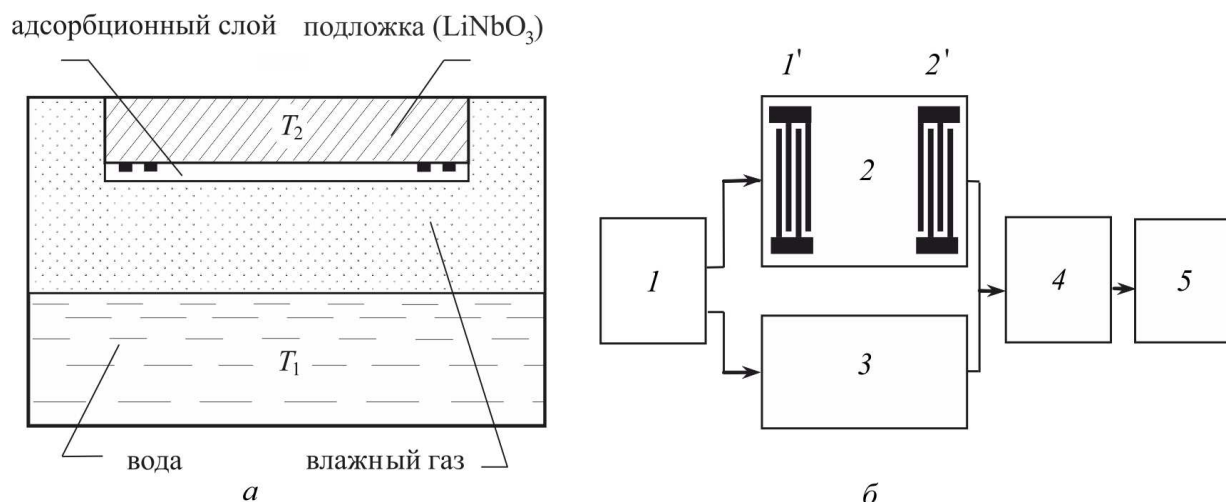


Рис. 1: а — Схема измерительной ячейки; б — Блок-схема измерительной установки

влажности этой среды. Необходимое давление пара у поверхности твердого тела можно получить, изменяя температуру подложки T_2 (следовательно, адсорбционного слоя) и температуру парообразующей жидкости T_1 , над которой она расположена (рис. 1,а). Для определения относительного давления пара можно воспользоваться уравнением Клапейрона–Клаузиуса:

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

где p/p_s — относительное давление пара, Q и R — теплота конденсации и газовая постоянная воды. Данный способ позволял регулировать относительное давление пара в зоне адсорбции с точностью 0,1%.

В эксперименте использовался метод определения изменения времени задержки [4], основанный на интерференции ПАВ. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1,б. На излучающий преобразователь 1' линии задержки подается сигнал с выхода генератора высокой частоты 1. Задержанный сигнал с приемного преобразователя 2' поступает на вход усилителя 4. Одновременно на вход усилителя подается сигнал, опорный сигнал с аттенюатора 3, амплитуда которого уменьшена до амплитуды задержанного сигнала. Прямой и задержанный сигналы интерферируют. Суммарный сигнал, пройдя усилитель 4, попадает на вход осциллографа или другого регистрирующего устройства 5 (рис. 1,б). В результате интерференции величина суммарного сигнала зависит, как от соотношения фаз взаимодействующих сигналов, так и соотношения их амплитуд. Баланс амплитуд достигается регулировкой опорного сигнала аттенюатором, а баланс фаз перестройкой частоты генератора. Генератор настраивается на частоту интерференционного минимума.

Любое изменение состояния поверхности и приповерхностной области подложки приведет к возмущению условий распространения ПАВ. В общем слу-

чае изменяется скорость и амплитуда ПАВ, следовательно, меняется частота интерференционного минимума. Её новое значение регистрируется частотомером. Изменение времени задержки определяется из условия $\Delta\tau/\tau = -\Delta f/f$. Затухание определяется по величине остаточного сигнала, измеренного после подстройки частоты минимума. Величина изменения затухания компенсируется аттенюатором.

На рис. 2 приведены зависимости изменения частоты интерференционного минимума от температуры для разных значений давления пара воды в области адсорбции. Из рисунка следует, что характер кривых 1–3 ($p_1 < p_2 < p_3$) практически не изменяется. При понижении давления пара температура максимума кривой t_m уменьшается и увеличиваются частоты сопоставимых между собой точек кривых 1–3. Изменения времени задержки ПАВ и частоты интерференционного минимума взаимосвязаны $\Delta\tau/\tau = -\Delta f/f$, поэтому для разных значений давления пара имеет место смещение по температуре соответствующих кривых изменения времени задержки.

По определению ТКЗ является производной по температуре от относительного изменения времени задержки $\partial \ln \tau / \partial T$, следовательно, в точках экстремума кривых 1–3 ТКЗ исследуемой слоистой системы принимает нулевое значение.

Из анализа экспериментальных и расчетных данных следует, что зависимости температуры нулевого значения ТКЗ t_m и точки росы t_d от влажности парогазовой среды хорошо коррелируют между собой (рис. 3). Коэффициент корреляции Пирсона равен 0,87. Температура нулевого значения ТКЗ выше температуры конденсации влаги (в эксперименте на $\sim 2,3^\circ\text{C}$). При достижении температуры нулевого значения ТКЗ влага на рабочей поверхности звукопровода не конденсируется, следовательно, растворимые загрязнения не образуются и не накапливаются. Предлагается использовать зависимость температуры нулевого значения ТКЗ от

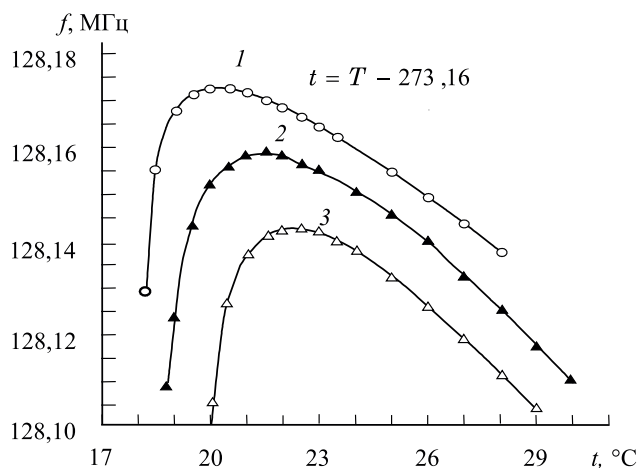


Рис. 2: Температурная зависимость частоты интерференционного минимума 1 – $p/p_s = 0.9$, 2 – $p/p_s = 0.96$, 3 – $p/p_s = 1$, $t_1 = 20^\circ\text{C}$

давления пара для определения относительной влажности газовой среды.

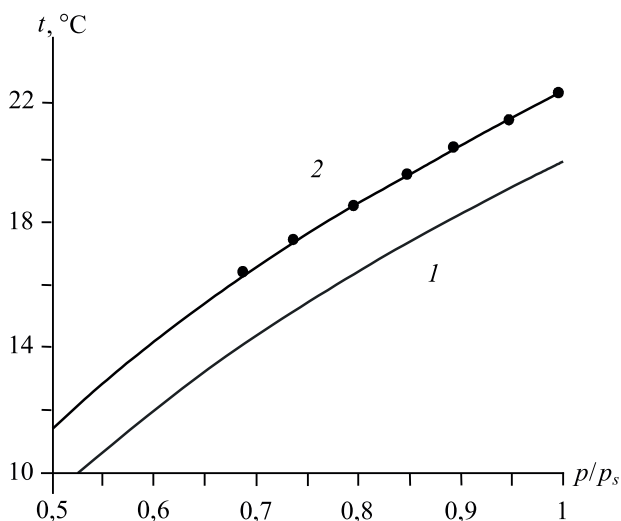


Рис. 3: Зависимость точки росы (1) и температуры нулевого значения ТКЗ (2) от относительного давления

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 . Относительная влажность воздуха p/p_s при температуре t_0 можно определить, используя эмпирическое выражение [5]:

$$\lg \frac{p}{p_s} = \frac{a(t_d - t)}{(b + t_d)(b + t)},$$

где $a = 1797.5$; $b = 238.568$; t — температура в $^\circ\text{C}$. Ошибка определения относительной влажности при использовании этого эмпирического выражения не превышает 0,1%.

Определение влажности парогазовой среды по температуре нулевого значения ТКЗ сводится к следующему порядку действий. Акустоэлектронным методом регистрируется температура нулевого значения ТКЗ t_m . Определяется точка росы из условия, что разница температур $\Delta t = t_m - t_d$ остается неизменной. Далее, относительная влажность газа при температуре t определяется по описанной выше эмпирической формуле.

Таким образом, продемонстрировано, что во влажной газовой среде ТКЗ акустоэлектронных устройств при некоторой температуре t_m может принимать нулевое значение. Имеет место хорошая корреляция между температурой нулевого значения ТКЗ и точкой росы. С учетом корреляции температуры нулевого значения ТКЗ и точки росы показано, что можно определять относительную влажность газа, не понижая температуру рабочей поверхности до точки росы, т.е. до температуры конденсации влаги. Следовательно, исключается загрязнение рабочей поверхности и последующая деградация гигрометра на поверхностных акустических волнах. Проведенные исследования позволяют использовать выявленную закономерность в гигрометрах для определения относительной влажности газовой среды.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ № 16-32-00599 мол_а.

- [1] Берлинер М. А. Измерение влажности. 2-е изд. Энергия. М., 1973.
 [2] Симаков И. Г., Гулгенов Ч. Ж. Вестн. Тюменского гос. ун-та. 2009. № 6. С. 52.
 [3] Олинер А. Поверхностные акустические волны. Мир. М., 1981.

- [4] Симаков И. Г., Гулгенов Ч. Ж. Вестн. Бурятского гос. ун-та. Вып. 3. Химия. Физика. 2011. С. 216.
 [5] Кикоин И. К. Таблицы физических величин. Справочник. Атомиздат. М., 1976.

The interrelation between dew point and temperature coefficient of delay of surface acoustic waves in the adsorbed water–lithium niobate system

I. G. Simakov^a, Ch. Zh. Gulgenov^b

Institute of physical materials science of SB RAS, Russia, 670047, Ulan-Ude
E-mail: ^asigfizik@mail.ru, ^bchingisbarga@gmail.com

It was shown that in a humid gas environment at a certain value of the thermal energy (temperature), the temperature coefficient of delay (TCD) of the acoustoelectronic device has a zero value. There is an interrelation between the temperature of zero value of TCD and the dew point. It was suggested that dependence of Zero value of TCD of vapor pressure be used for determination relative humidity. Advantages of this method are considered.

PACS: 43.35.+d.

Keywords: air humidity sensor, acoustoelectronic devices.

Received 06 July 2017.

Сведения об авторах

1. Симаков Иван Григорьевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: тел.: (3012) 43-22-82, e-mail: sigfizik@mail.ru.
2. Гулгенов Чингис Жаргалович — канд. тех. наук, науч. сотрудник; тел.: (3012) 43-22-82, e-mail: chingisbarga@gmail.com.