

08;12

## Нелинейный сдвиг частоты резонатора на поверхностных акустических волнах, работающего в режиме газового датчика

© Р.Г. Крышталь, А.В. Медведь

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН,  
141190 Фрязино, Московская область, Россия  
e-mail: avm@ms.ire.rssi.ru

(Поступило в Редакцию 26 июля 2007 г.)

Приведены результаты исследования сдвига резонансной частоты двухвходового кварцевого резонатора на поверхностных акустических волнах (ПАВ), работающего в режиме газового датчика без селективного слоя, в зависимости от мощности ПАВ, возбуждаемой в резонаторе. На рабочих частотах резонатора  $\approx 389$  МГц в атмосфере протекающего газообразного азота, содержащего пары воды, обнаружен аномально большой положительный сдвиг резонансной частоты при увеличении мощности ПАВ  $> 1$  мВт, на порядок величины превышающий сдвиг, обусловленный известным для кварцевых ПАВ-резонаторов амплитудно-частотным нелинейным эффектом. Проанализированы возможные физические механизмы наблюдаемого явления, приведены результаты, свидетельствующие о том, что такой сдвиг не является следствием прямого разогрева звукопровода сравнительно мощной ПАВ, а происходит из-за влияния мощной ПАВ на сорбционные процессы на активной поверхности резонатора.

PACS: 43.25.Dc, 85.50.Gk

### Введение

Резонаторы на поверхностных акустических волнах (ПАВ) используются в качестве частотно-селективных элементов в современных радиоэлектронных устройствах и системах различного назначения, в частности, в сенсорных устройствах (химические и биологические датчики, датчики физических величин).

Резонатор в сенсорных устройствах обычно используется в качестве чувствительного частото задающего элемента автогенератора, состоящего из транзисторного усилителя и этого резонатора в цепи обратной связи. Выходным сигналом — откликом датчика является сдвиг частоты генерируемого синусоидального сигнала, обусловленный сдвигом резонансной частоты резонатора под действием внешних возмущений: адсорбции тех или иных молекул на поверхности резонатора — в химических датчиках, изменения температуры подложки резонатора — в датчиках температуры, упругой деформации подложки — в датчиках давления, ускорения и т. д.

Для достижения максимально большого значения „сигнал/шум“ в устройстве мощности генерируемого сигнала должна быть достаточно высокой. Однако в существующих публикациях, посвященных исследованию датчиков на ПАВ, нелинейные явления не рассматривались, и о значениях мощности ПАВ и мощности генерируемых сигналов даже не упоминается. Исключение составляют работы [1,2], в которых, насколько нам известно, впервые сообщалось об обнаружении зависимости величины отклика газового датчика, использующего резонатор на ПАВ, от мощности ПАВ.

Нелинейные явления, приводящие к зависимости резонансной частоты от амплитуды ПАВ, так называемый амплитудно-частотный эффект (АЧЭ), даже для широко распространенных кварцевых ПАВ-резонаторов и безот-

носителю к их сенсорным применениям, в экспериментальном плане рассматривались лишь в работе [3], в большинстве опубликованных экспериментальных работах изучалось явление генерации второй гармоники (см., например, [4,5]).

Так как в датчиках на основе ПАВ-резонаторов формат выходного сигнала (отклика) представляет собой сдвиг частоты, то исследование нелинейных явлений, приводящих к сдвигу частоты резонатора, имеет особое значение. Несомненно, такие исследования представляют интерес и для разработчиков частотно-селективных элементов на ПАВ, предназначенных для использования в телекоммуникационной и другой радиоэлектронной аппаратуре.

В настоящей работе приводятся некоторые результаты исследования нелинейного сдвига резонансной частоты в резонаторе на ПАВ с центральной частотой  $\approx 389$  МГц, изготовленного на подложке из кварца *ST*-среза и используемого в газовом ПАВ-датчике без селективных слоев.

### Методика эксперимента

В эксперименте использовались двухвходовые кварцевые резонаторы, состоящие из двух отражательных структур и двух встречно-штыревых преобразователей (ВШП), содержащих 34 пары расщепленных электродов с периодом  $8 \mu\text{m}$ . Отражательные структуры представляли собой периодические решетки из 500 алюминиевых электрически закороченных полосок шириной  $2 \mu\text{m}$  и периодом  $4 \mu\text{m}$ . Все элементы топологии изготавливались литографическим способом по алюминиевой пленке толщиной  $2000 \text{ \AA}$ . Апертуры отражательных структур и ВШП равнялись  $640 \mu\text{m}$ . Размеры

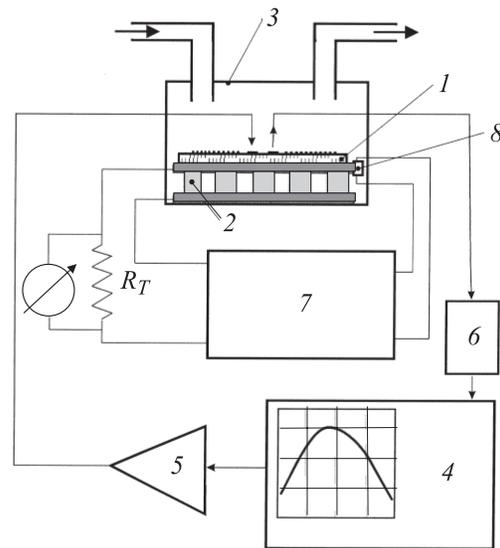
подложки (чипа) составляли  $6 \times 5 \times 0.4$  mm. Параметры таких резонаторов, используемых в наших экспериментах, были следующими: центральная частота при температуре  $20^\circ\text{C}$  —  $389.46$  MHz, вносимые потери в 50-омном измерительном тракте  $7-9$  dB, нагруженная добротность  $2900-3100$ .

Исследуемый резонатор с помощью теплопроводящей пасты монтировался на рабочей поверхности термоэлектрического элемента Пельтье (ТЭЭ). Размер рабочей поверхности равнялся  $7 \times 7$  mm. ТЭЭ с резонатором помещался в измерительную камеру с патрубками для ввода и вывода газа. Мертвый объем камеры равнялся  $0.75$  cm<sup>3</sup>. Через измерительную камеру можно было пропускать газ с постоянной регулируемой скоростью потока. Подводящие газовые трубки и сама камера помещались в термостатированные боксы, температура внутри которых поддерживалась постоянной с точностью  $0.1^\circ\text{C}$ .

Экспериментально исследовалось влияние мощности электромагнитного сигнала, подаваемого на входной ВШП резонатора (мощности ПАВ, возбуждаемой в резонаторе), на сдвиг резонансной частоты при протекании в измерительной камере газа-носителя (азота) с примесью паров воды при различных значениях температуры подложки резонатора. Примесь паров воды в большинстве экспериментов была обусловлена „ненулевой“ влажностью используемого газа (точка росы соответствовала температуре  $-65^\circ\text{C}$ ). При желании содержание воды в газе можно было увеличить, используя методику с диффузионной трубкой, как это делалось в [1].

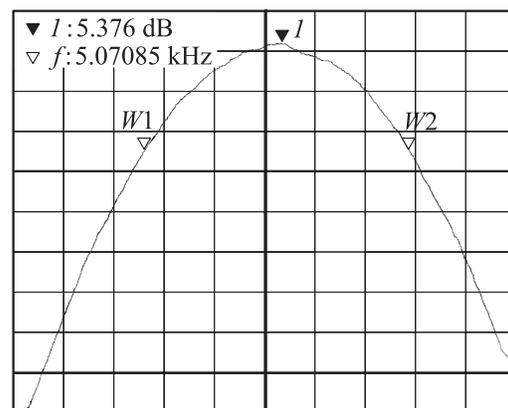
Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Для увеличения диапазона изменения мощности, подаваемой на резонатор, между выходом прибора для измерения электрических параметров четырехполюсников и входом резонатора был включен усилитель с коэффициентом усиления  $20$  dB. Это позволило проводить измерения в диапазоне мощностей электромагнитного сигнала от  $-55$  до  $+20$  dBm. Следует отметить, что в данной установке можно было измерять потребляемую электрическую мощность ТЭЭ при изменении входной мощности электромагнитного сигнала на ходе резонатора. Для этого в цепи питания ТЭЭ был включен резистор  $R_T$  и вольтметр для изменения напряжения на этом резисторе.

Центральная (резонансная) частота резонатора при различных мощностях сигнала измерялась следующим образом. В измерителе параметров четырехполюсников, работающем в режиме измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), при выбранной мощности входного сигнала устанавливались такие значения начальной и конечной частот свипирования, чтобы можно было визуально наблюдать центральную часть колоколообразной АЧХ и чтобы эта центральная часть АЧХ располагалась в центре экрана прибора, а амплитуды АЧХ на крайних частотах свипирования отличались бы от амплитуды центральной части АЧХ не более чем на  $-0.02$  dB (рис. 2). Далее измерялась ширина полосы



**Рис. 1.** Блок-схема экспериментальной установки: 1 — исследуемый ПАВ-резонатор; 2 — термоэлектрический элемент Пельтье (ТЭЭ); 3 — измерительная камера; 4 — прибор для измерения амплитудно-частотных характеристик; 5 — усилитель; 6 — аттенюатор; 7 — блок управления системой термостабилизации; 8 — датчик температуры.

частот АЧХ по уровню  $-0.005$  dB по отношению к максимуму АЧХ, и за центральную (резонансную) частоту принималась частота, находящаяся посередине этой частотной полосы (см. рис. 2). Время развертки по частоте выбиралось достаточно большим, на порядки величин превышающее время между последовательными развертками и превышающее времена релаксации АЧХ при изменении мощности сигнала, подаваемого на резонатор. Отметим, что время тепловой релаксации АЧХ при изменении входной мощности можно было контролировать также, измеряя во времени мощность,



**Рис. 2.** Пример фрагмента АЧХ-резонатора. Цена деления по горизонтальной оси  $1$  kHz, по вертикальной —  $0.002$  dB. Маркер „1“ указывает резонансную частоту  $389.372\ 288\ 5$  MHz. Маркеры „W1“ и „W2“ — ширину полосы частот АЧХ по уровню  $-0.005$  dB.

потребляемую термостабилизирующей системой. При таких параметрах развертки прибора можно считать, что измерение резонансной частоты происходит при постоянной мощности ПАВ (изменение мощности за время развертки не превышает 0.02 dB). Для увеличения точности измерений проводилось усреднение не менее чем по 12 последовательным разверткам. Для контроля правильности измерений центральной частоты такая процедура при каждом значении мощности проводилась несколько раз. Приемлемыми параметрами расстройки прибора для измерения АЧХ считались такие, при которых полученные значения центральной частоты при фиксированной мощности в разных циклах измерений отличались не более чем на 100 Hz.

При проведении измерений АЧХ при различных мощностях ПАВ измерялась и мощность, потребляемая термостабилизирующим ТЭЭ при заданной температуре его рабочей поверхности. В режиме термостабилизации температура рабочей поверхности поддерживается постоянной в пределах  $\pm 0.005^\circ\text{C}$  в течение не менее чем 30 min. Потребляемая мощность ТЭЭ зависит от тепловой энергии, подводимой (отводимой) к рабочей поверхности ТЭЭ. Как только поток этой энергии изменяется, например за счет рассеяния энергии ПАВ в подложке резонатора, прикрепленной к рабочей поверхности ТЭЭ, изменяется и потребляемая мощность ТЭЭ так, чтобы поддержать температуру рабочей поверхности на прежнем уровне. Эти измерения позволяют оценить тепловую энергию, выделяемую ПАВ в резонаторе, и в первом приближении оценить изменение температуры поверхности резонатора при изменении мощности ПАВ. Однако эти оценки могут оказаться весьма грубыми, так как распределение акустического поля и, следовательно, мощности ПАВ, в подложке резонатора существенно неоднородно, и учесть это на данном этапе наших исследований не представлялось возможным.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены результаты измерения зависимости сдвига резонансной частоты резонатора и изменения потребляемой мощности ТЭЭ от мощности, подаваемой на входной ВШП резонатора, при фиксированной температуре рабочей поверхности ТЭЭ, равной  $62.6^\circ\text{C}$ , и скорости потока газа-носителя  $V = 6 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Температура термостабилизированного бокса, в который помещалась измерительная камера с резонатором, равнялась  $35 \pm 0.1^\circ\text{C}$ . Отметим, что температуру бокса можно было определить из зависимости потребляемой мощности ТЭЭ от температуры рабочей поверхности при неработающем резонаторе. Температура внутри бокса будет равна температуре рабочей поверхности, при которой потребляемая мощность ТЭЭ стремится к нулю (рис. 4). Измерение резонансной частоты проводилось по методике, изложенной в предыдущем разделе, при

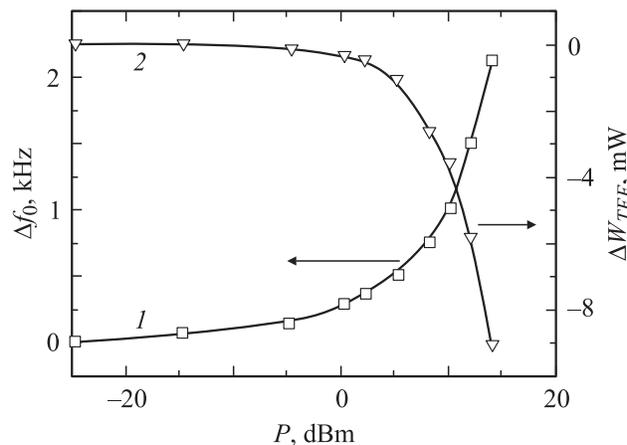


Рис. 3. Измеренные зависимости сдвига резонансной частоты  $\Delta f_0$  (кривая 1) и изменения потребляемой мощности ТЭЭ  $\Delta W_{TEE}$  (кривая 2) от мощности электромагнитного сигнала  $P$ , подаваемого на входной ВШП резонатора.

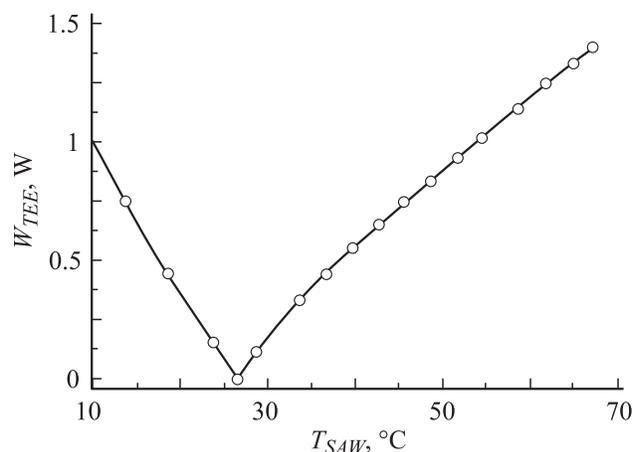


Рис. 4. Зависимость потребляемой мощности системы термостабилизации с элементом Пельтье  $W_{TEE}$  от установленной температуры рабочей поверхности ТЭЭ  $T_{SAW}$ .

этом на анализаторе электрических цепей Rohde & Schwartz ZVRE, который использовался в качестве прибора для измерения АЧХ, были установлены следующие параметры: ширина полосы свипирования 10 kHz, время развертки 20 s, количество периодов развертки для усреднения — 12. Для проверки достоверности результатов проводились измерения резонансной частоты и при инверсном свипировании частоты. Полученные результаты совпали с результатами при прямом свипировании (с точностью  $\pm 100 \text{ Hz}$ ). Также проводилась проверка влияния на сдвиг частоты резонатора возможных нелинейных эффектов в усилителе. Для этого в цепь между усилителем и резонатором включался аттенуатор 25 dB, и вновь измерялась резонансная частота резонатора при изменении мощности сигнала, подаваемого на вход усилителя. В этом случае сдвига частоты резонатора не наблюдалось.

Рассмотрим наиболее вероятные причины, которые могут приводить к сдвигу центральной частоты резонатора.

1. Упругая нелинейность, приводящая к известному амплитудно-частотному эффекту (АЧЭ) в резонаторах [3]. Сдвиг частоты  $\Delta f$  при увеличении мощности (квадрата тока  $I^2$ , протекающего во входном ВШП резонатора) имеет положительный знак и описывается выражением [3]:

$$\Delta f = k f_0 I^2, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности,  $f_0$  — центральная частота резонатора. Для резонаторов на ПАВ, изготовленных на подложке из кварца  $ST$ -среза, значение этого коэффициента определено экспериментально в [3].

2. Разогрев подложки резонатора за счет рассеяния энергии ПАВ. Измерение температуры звукопровода приводит к изменению резонансной частоты на величину  $\Delta f$ :

$$\Delta f = \left( \frac{\partial f}{\partial T} \right)_{T_0} \Delta T. \quad (2)$$

В тех случаях, когда зависимость частоты от температуры можно считать линейной, вводится понятие температурного коэффициента частоты  $\alpha_f$ . Сдвиг резонансной частоты  $f_0$  при изменении температуры на  $\Delta T$  находится из выражения  $(\Delta f)_T = f_0 \alpha_f \Delta T$ .

3. Адсорбция (десорбция) молекул на активной поверхности резонатора. При адсорбции скорость распространения акустической волны в звукопроводе уменьшается, следовательно, уменьшается и резонансная частота резонатора, при десорбции — наоборот, скорость и частота возрастают. Это явление лежит в основе принципа действия всех твердотельных акустических датчиков гравиметрического типа. Для резонатора на ПАВ изменение резонансной частоты из-за сорбции описывается выражением (см. например, [6]):

$$\Delta f = -C f_0^2 \frac{\Delta m}{S}, \quad (3)$$

где  $\Delta m$  — масса, в граммах, адсорбированная на активной поверхности резонатора,  $S$  — эффективное значение активной поверхности, (в  $\text{cm}^2$ ),  $C$  — константа, равная  $1.3 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s/g}$ , для резонатора на подложке из кварца  $ST$ -среза.

(Под эффективной поверхностью резонатора понимается площадь, равная произведению апертуры резонатора на эффективную длину резонаторной полости. За эффективную длину резонаторной полости обычно принимается расстояние между центрами отражательных структур. Под активной поверхностью сенсора будем понимать площадь резонатора, на которой происходит взаимодействие ПАВ и адсорбируемых молекул. Вообще говоря, величины активной и эффективной поверхностей могут и не совпадать, и, строго говоря, первая должна несколько превышать последнюю.)

Все эти три механизма сдвига частоты могут работать одновременно, а механизм 2 может оказывать влияние и на механизм 3, так как сорбционные процессы являются функцией температуры, которая, в свою очередь, зависит от мощности ПАВ, распространяющейся в подложке резонатора. Можно предположить, что изменение мощности ПАВ может оказать и непосредственное влияние на равновесие сорбционных процессов (а не только через разогрев).

Оценим, какой из этих трех механизмов сдвига резонансной частоты при увеличении мощности ПАВ в количественном отношении является главным.

### Упругая нелинейность (АЧЭ)

Коэффициент нелинейности в (1) для ПАВ-резонатора на подложке из  $ST$ -кварца, согласно [3], равняется  $k = 1.1 \cdot 10^{-3} 1/A^2$  (здесь  $A$  — Ампер). В нашем эксперименте также использовался резонатор с кварцевой подложкой  $ST$ -среза, поэтому при оценках будем пользоваться этим же значением нелинейного коэффициента. В работе [3] рассматривался резонатор с добротностью 26 000, в нашем случае добротность резонанса была  $\approx 3000$ , поэтому коэффициент нелинейности, по крайней мере, не должен превышать этого значения и даже может быть несколько меньше, чем в [3].

При максимальной мощности +15 dBm, которая в экспериментах подавалась на входной ВШП, и импедансе резонатора  $\approx 50 \Omega$  из (1) получаем значение сдвига частоты резонатора в нашем эксперименте  $\Delta f \leq 430 \text{ Hz}$ .

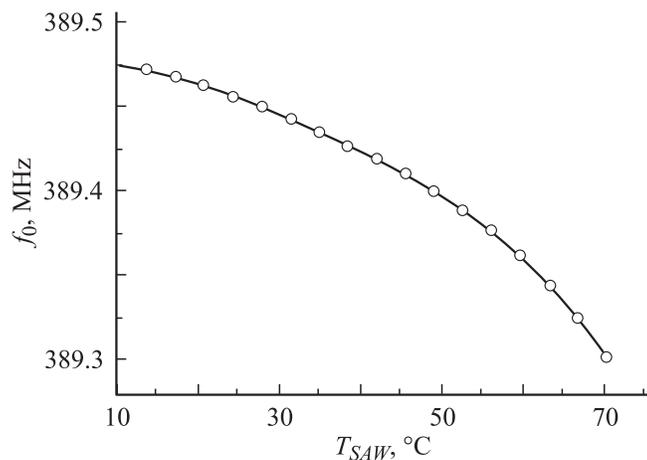
Таким образом, максимальный сдвиг частоты за счет АЧЭ в нашем эксперименте не превышает 430 Hz, т.е. в пять раз меньше измеренного на рис. 3.

### Изменение температуры

При увеличении мощности входного сигнала (и мощности ПАВ) происходит разогрев кварцевой подложки, что должно приводить к сдвигу резонансной частоты в соответствии с (2).

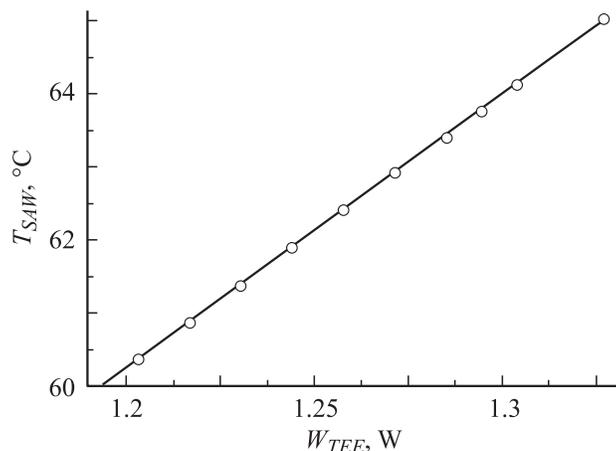
На рис. 5 представлена измеренная зависимость резонансной частоты от температуры подложки используемого в эксперименте резонатора. Измерения проводились при сравнительно малой мощности входного сигнала  $P < -20 \text{ dBm}$ , когда разогрев подложки акустической волной был пренебрежимо мал и не было протекания газа через камеру. Из рис. 5 видно, что температурный коэффициент частоты для значения температуры  $T_0 = 62.66^\circ\text{C}$ , при которой измерялись зависимости, представленные на рис. 3, имеет отрицательный знак и, следовательно, разогрев подложки при увеличении входной мощности должен приводить к уменьшению резонансной частоты. В нашем эксперименте с ростом входной мощности всегда имело место возрастание резонансной частоты.

Величину разогрева приповерхностной области подложки резонатора можно оценить, используя результаты



**Рис. 5.** Измеренная зависимость резонансной частоты  $f_0$  от температуры подложки  $T_{SAW}$  для исследуемого резонатора при  $P < -20$  dBm.

измерений, представленные на рис. 3 (кривая 2) и измеренную зависимость температуры рабочей поверхности ТЭЭ от величины потребляемой мощности ТЭЭ (рис. 6) при малой постоянной мощности электромагнитного сигнала  $P < -20$  dBm. Изменение потребляемой мощности ТЭЭ на  $\approx 10$  mW, как это имело место при больших входных мощностях резонатора  $P > 10$  dBm (см. рис. 3), должно было бы привести к изменению температуры рабочей поверхности, как видно из рис. 6, не более чем на  $0.37^\circ C$ . Таким образом, термостабилизирующая система с ТЭЭ изменяет потребляемую мощность, чтобы скомпенсировать дополнительную тепловую энергию, поступающую к рабочей поверхности от подложки резонатора при возрастании входной мощности  $P$  резонатора. Поэтому можно оценить изменение температуры подложки, которое произошло бы при возрастании мощности  $P$ , если бы не было термостабилизирующей



**Рис. 6.** Зависимость температуры рабочей поверхности ТЭЭ от потребляемой мощности  $W_{TEE}$  при выключенном резонаторе в окрестности температуры, при которой проводились измерения, представленные на рис. 3.

системы — это те же  $0.37^\circ C$ . В первом приближении будем считать, что на такую величину изменяется и температура активной поверхности резонатора, хотя в действительности эта температура может оказаться больше, так как активная поверхность занимает лишь часть поверхности подложки, а энергия ПАВ сильно неоднородна даже в пределах активной поверхности.

Отметим, что изменение потребляемой мощности ТЭЭ при изменении мощности  $P$  входного сигнала наблюдалось лишь на частоте сигнала вблизи резонансной частоты. При отстройке частоты, с уменьшением амплитуды возбуждаемой ПАВ изменения потребляемой мощности ТЭЭ практически не происходит. Это свидетельствует о том, что разогрев подложки резонатора происходит за счет потерь энергии ПАВ, а не за счет джоулева тепла в подводящих проводниках. Отметим также, что результаты измерений не зависели от местоположения датчика температуры (6) (рис. 1) на рабочей поверхности ТЭЭ.

Таким образом, исходя из полученной оценки изменения температуры поверхности резонатора под действием мощной ПАВ, используя измеренную зависимость рис. 5, получим, что резонансная частота в условиях эксперимента под действием нагрева мощной ПАВ должна уменьшиться на  $1.8$  kHz. Даже если истинное изменение температуры в силу приведенных ранее соображений окажется выше оцененного значения, резонансная частота за счет „чистого“ разогрева подложки может только уменьшиться. В эксперименте, как видно из рис. 3, наблюдается существенное увеличение резонансной частоты.

Для объяснения anomalously большого положительного сдвига резонансной частоты следует привлечь механизм, связанный с сорбционными процессами на активной поверхности резонатора, т.е. предположить, что отрицательная величина  $(\Delta f)_m$  (см. выражение (3)), обусловленная адсорбцией, при увеличении мощности ПАВ каким-то образом уменьшается. На возможность существования такого механизма указывалось ранее в [1,2].

Рассмотрим возможные причины, которые могут приводить к зависимости  $(\Delta f)_m$  от  $P$ . Прежде всего, можно было бы ожидать, что при начальных равновесных условиях, при которых резонансная частота равнялась  $f_0$  (при малой мощности), при разогреве активной поверхности резонатора под действием сравнительно мощной ПАВ, резонансная частота должна уменьшиться на  $(\Delta f)_T$ , а следовательно, должна уменьшиться и  $(\Delta f)_m$ , согласно формуле (3), на величину

$$C[f_0^2 - (f_0 - (\Delta f)_T)^2] \frac{\Delta m}{S} \approx 2f_0 C (\Delta f)_T \frac{\Delta m}{S}. \quad (4)$$

Для того чтобы общий сдвиг частоты стал положительным, нужно чтобы значение  $2f_0/(\Delta f)_T/C(\Delta m/S)$  было сравнительно большим, чтобы в сумме со сравнительно малой величиной  $(\Delta f)_N$  превзойти отрицательный чисто температурный сдвиг резонансной частоты  $(\Delta f)_T$ . Это может произойти при условии

$$\frac{1}{f_0} \leq 2C \frac{\Delta m}{S}. \quad (5)$$

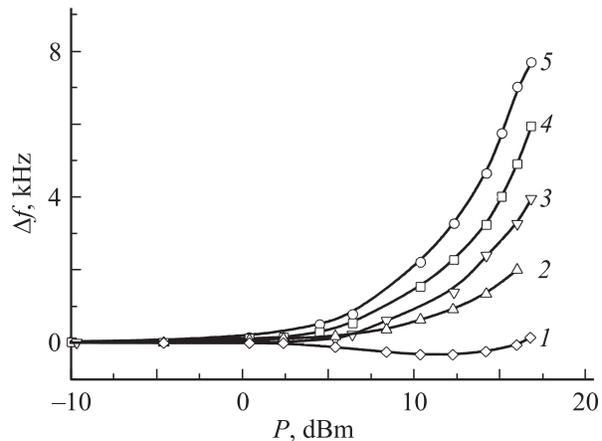
Исходя из реальных данных экспериментов и из других публикаций (см., например, [1,6]) величина  $\Delta m/S$  обычно не превышает  $10^{-5} \text{ g/cm}^2$ , и условие (5) выполняется лишь для частот ПАВ в несколько десятков гигагерц. Таким образом, в условиях нашего эксперимента такой эффект не должен иметь места. Это подтверждается и экспериментально, когда повышение температуры подложки достигалось не за счет повышения мощности ПАВ, а устанавливалось самой термостабилизирующей системой. При установившемся сорбционном равновесии повышение температуры подложки резонатора всегда приводило лишь к понижению резонансной частоты.

При увеличении температуры подложки (в нашем случае за счет разогрева ПАВ) количество адсорбированных на ней молекул должно снизиться, т.е.  $\Delta m$  должно уменьшиться, что должно привести к положительному сдвигу частоты (см., например, [7]).

В нашем случае, однако, повышение температуры по оценкам, приведенным ранее, весьма небольшое (десятые доли градуса) и не может вызвать сколь угодно заметного изменения количества адсорбированных молекул. Даже если предположить, что нагрев неоднороден и в некоторых областях поверхность резонатора разогревается сильнее, все равно это не смогло бы привести к положительному сдвигу частоты, так как при этом на большее значение произошел бы и температурный отрицательный сдвиг частоты. Это опять подтверждает эксперимент с повышением температуры резонатора при малой мощности ПАВ. Положительного сдвига частоты таким путем получить не удается.

Нельзя исключить вероятность вклада в положительный сдвиг резонансной частоты возможного изменения (при большой мощности ПАВ) коэффициента  $C$  (см. выражение (3)). Его указанное значение для кварцевого резонатора [3] справедливо, по-видимому, для малых мощностей ПАВ.

Наиболее вероятной причиной этого явления представляется влияние мощности ПАВ на  $\Delta m/S$ . Действительно, хорошо известно влияние мощных ПАВ на физические и химические процессы (см., например, [8,9]), поэтому можно предположить, что и в нашем случае сравнительно мощная ПАВ может оказать воздействие на сорбционные процессы, происходящие на активной поверхности резонатора. Так как акустическое поле ПАВ на активной поверхности резонатора весьма неоднородно, то неоднородным может оказаться и перераспределение под действием ПАВ адсорбированной массы на этой поверхности, что может привести и к изменению величины активной поверхности  $S$ . Экспериментальным подтверждением того, что положительный сдвиг частоты резонатора при увеличении мощности ПАВ обусловлен сорбционными процессами, могут служить результаты измерения сдвига частоты, полученные при различной массе адсорбированного вещества на поверхности. Результаты таких измерений представлены на рис. 7. Эти измерения проводились при различных температурах подложки резонатора и при увеличении содержания



**Рис. 7.** Зависимости сдвига резонансной частоты  $\Delta f$  от входной мощности  $P$  при различных условиях адсорбции на поверхности резонатора паров воды: 1 —  $T_{\text{SAW}} = 68.78$ ,  $f_0 = 389.31$ ,  $V = 12$ ; 2 —  $62.66$ ,  $389.338$ , 6; 3 —  $57.73$ ,  $389.365$ , 25; 4 —  $25.58$ ,  $389.43$ , 6; 5 —  $57.75^\circ\text{C}$ ,  $f_0 = 389.18$  МГц,  $25 \text{ cm}^3/\text{min}$  с дополнительным увлажнением диффузионной трубкой.

паров воды в газе с помощью диффузионной трубки [1], когда больше молекул осаждается на поверхности. Как видно из рис. 7, сдвиг частоты резонатора при  $P \approx 15 \text{ dBm}$  тем больше, чем ниже температура резонатора ( $0.2 \text{ kHz}$  — кривая 1;  $2$  — 2;  $3.95$  — 3;  $5.94$  — 4) и чем больше содержится воды в газе-носителе ( $7.7 \text{ kHz}$  — кривая 5).

## Заключение

Исследовано влияние мощности ПАВ, возбуждаемой в двухвходовом резонаторе, на величину резонансной частоты. Для этого предложена методика прецизионного измерения резонансной частоты в широком диапазоне мощностей входного электромагнитного сигнала от  $-55$  до  $20 \text{ dBm}$ , позволившая использовать стандартный цифровой векторный анализатор цепей ZVRE фирмы Rhode & Schartz. Обнаружен аномально большой положительный сдвиг резонанса с увеличением мощности ПАВ свыше  $-5 \text{ dBm}$  при адсорбции молекул воды на поверхности резонатора с центральной частотой  $\approx 389 \text{ MHz}$ , работающего в термостабилизированных условиях в диапазоне температур  $10$ – $65^\circ\text{C}$ . Проанализированы возможные физические причины этого явления, выполнен ряд экспериментов и измерений, которые свидетельствуют о приоритетной роли в сдвиге частоты влияния мощной ПАВ на сорбционные процессы на поверхности резонатора.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке резонаторов на ПАВ и сенсорных устройств на их основе.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант РФФИ № 07-07-00110.

## Список литературы

- [1] *Медведь А.В., Крышталъ Р.Г., Богдасаров О.Е.* // РИЭ. 2005. Т. 50. № 6. С. 1.
- [2] *Kryshtal R.G., Medved A.V.* / J. Electroceram. 2006. Vol. 17. N 2–4. P. 987.
- [3] *Planat M., Hauden D., Gros Lambert J., Gagnepain J.J.* // Proc. 34th Annual Freq. Control. Symp. Philadelphia, Pa., Electronic Industries Association, Washington, D.C., 1980. P. 255.
- [4] *Gibson J.W., Meijer P.* // J. Appl. Phys. 1974. Vol. 45. N 8. P. 3288.
- [5] *Alippi A., Palma A., Palmieri L., and Socino G.* // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48. N 6. P. 2182.
- [6] *Grate J.W., and Klusty M.* // Anal. Chem. 1991. Vol. 63. N 9. P. 1719.
- [7] *Гуляев Ю.В., Земляков В.Е., Крышталъ Р.Г., Медведь А.В., Шемет В.В., Ван Фонг Х.* // Акустич. журн. 2001. Т. 47. Вып. 1. С. 52.
- [8] *Nashiyama H. and Inoue Y.* // Surface Sci. 2005. Vol. 594. N 1–3. P. 156.
- [9] *Tseng W.K., Lin Jr.-L., Sung W.C., Chen S.H., and Lee G.-B.* // J. Micromech. Microeng. 2006. Vol. 16. N 3. P. 539.