

УДК 621.391 822 4

## ФЛУКТУАЦИИ ТИПА $1/f$ И ДЕГРАДАЦИОННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ЧАСТОТЫ АВТОГЕНЕРАТОРОВ С РЕЗОНАТОРАМИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

*М. А. Кревский, А. В. Якимов*

Рассмотрены автогенераторы с резонаторами поверхностных акустических волн, выполненными с алюминиевыми и золотыми электродами. Исследованы два различных механизма деградации, на основе которых определены вид и уровень спектра фликкерных флукутаций частоты и деградационный дрейф ее среднего значения. Полученные результаты хорошо согласуются с известными экспериментальными данными.

Приборы на поверхностных акустических волнах (ПАВ) используются для генерации высокостабильных колебаний в области высоких частот. Эти приборы подвержены деградации, проявляющейся в необратимых изменениях частоты автогенераторов, выполненных на их основе [1-3]. Кроме того, частота автоколебаний подвержена фликкерным флукутациям [3, 4], обладающим спектром типа  $1/f$ , которые, согласно [5, 6], можно рассматривать как случайный процесс, сопровождающий деградационное изменение характеристик рассматриваемого прибора. Обоснованность такого подхода показана в [7] на примере анализа соответствующих изменений сопротивления точечных контактов.

В настоящей работе на основе физической модели фликкерных флукутаций [6] рассматривается возможность установления связи между характеристиками фликкерных флукутаций частоты и деградационным изменением (среднестатистического) значения частоты автоколебаний в генераторах с резонаторами ПАВ.

1. Считаем, что относительные вариации частоты  $\delta f(t)$  представляют собой пуассоновскую суперпозицию импульсов, имеющих прямоугольную форму с амплитудой  $(\delta f)_1$  и случайной длительностью  $\theta$ . Минимальное возможное значение длительности импульса составляет  $t_0$ . При  $\theta > t_0$  их распределение изменяется по закону  $\theta^{-2}$ . Средняя частота появления импульсов равна  $\nu$ .

В этом случае, согласно [6], дрейф среднестатистического значения частоты и спектр ее флукутаций определяются следующими соотношениями:

$$\langle \delta f(t) \rangle = A \ln(t/t_0), \quad t \geq t_0; \quad (1)$$

$$\langle \delta f^2 \rangle_F = B/F, \quad F \ll (2\pi t_0)^{-1}. \quad (2)$$

Здесь  $A = (\delta f)_1 \nu t_0$  — относительное изменение частоты за характерное время  $t_e = e t_0$ , где  $e$  — основание натурального логарифма. Параметр  $B = (\delta f)_1^2 \nu t_0$  численно равен величине спектра флукутаций на частоте анализа  $F = 1$  Гц. Для определения связи между соотношениями (1), (2) необходимо конкретизировать физические механизмы, приводящие к изменениям частоты, т. е. определить значения параметров  $(\delta f)_1$ ,  $\nu$  и  $t_0$ .

2. Рассмотрим автогенератор, у которого в цепь обратной связи усилителя включен резонатор ПАВ, содержащий два одинаковых электроакустических встречно-штыревых преобразователя (ВШП), разнесенных на расстояние  $L$ . Каждый ВШП составлен из  $n$  пар электродов, имеющих апертуру  $W$  и период  $d$ , равный половине длины акустической волны,  $d = \lambda/2$ . Акустическая волна возбуждается на поверхности подложки из пьезоэлектрического материала, обычно — кварца. Преобразователи выполняются методом напыления алюминия либо золота.

В качестве возможных механизмов, вызывающих флуктуации и деградиационное изменение частоты автоколебаний, проанализируем следующие:

- а) окисление (алюминиевых) преобразователей,
- б) диффузионное расплывание электродов ВШП.

*Окисление* алюминиевых преобразователей, как показано в [2], влияет на скорость ПАВ, приводя к деградиационному дрейфу частоты автоколебаний рассматриваемого генератора. Увеличение толщины окисной пленки, равно как и частоты, происходит пропорционально логарифму времени окисления  $t$ , т. е. в соответствии с (1). С точки зрения модели [6], данное обстоятельство означает, что количество атомов кислорода в пленке (и, следовательно, частота автоколебаний) флуктуирует фликкерным образом и характеризуется спектром (2).

Перейдем к определению параметров соотношений (1) и (2). Согласно рассматриваемому механизму, величина  $(\delta f)_1$  составляет относительное изменение частоты, соответствующее сорбции алюминиевой пленкой одного атома кислорода,  $t_0$  — среднее время жизни атома в сорбированном по поверхности состоянии,  $\nu$  — среднее число атомов, сорбируемых за единицу времени.

Для определения  $(\delta f)_1$  обратимся к экспериментальным данным [2]. В работе проведен контрольный эксперимент, в котором на 90% рабочей поверхности резонатора ПАВ напылялась алюминиевая пленка толщиной 2000 Å. Затем контролировалось изменение частоты автоколебаний, происходившее, как выяснилось, по закону (1) и оказавшееся пропорциональным толщине возникшего слоя.

Обозначим через  $(\delta f)_{h_0}$  относительное изменение частоты, соответствующее окислу толщиной  $h_0$ . Отсюда найдем относительное изменение частоты, возникающее при увеличении толщины окисной пленки на один монослой  $(\delta f)_M = (\delta f)_{h_0} (a_{ок}/h_0)$ , где  $a_{ок}$  — размер молекулы окиси алюминия. Теперь можно определить относительное изменение частоты, соответствующее хемосорбции алюминием одного атома кислорода,

$$(\delta f)_x = (\delta f)_M (a_{ок}/3)^2 / (LW)_{ок}. \quad (3)$$

Здесь учтено, что молекула окиси алюминия содержит три атома кислорода,  $(LW)_{ок}$  — площадь внешней поверхности окисла.

Примем во внимание, что не каждый атом кислорода, сорбированный окислом, может хемосорбироваться алюминием. Для этого предварительно физисорбированному атому необходимо преодолеть потенциальный барьер, имеющий высоту  $E_x$  [3]. Следовательно, с точки зрения настоящего рассмотрения, вклад каждого сорбированного атома в деградиационное изменение частоты (обусловленное ростом окисной пленки) в  $\exp(E_x/kT)$  раз меньше вклада во флуктуации частоты ( $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура). Поэтому (3) определяет величину  $(\delta f)_1 \equiv (\delta f)_x$ , характеризующую процесс деградации. Для флуктуаций, описываемых соотношением (2), следует считать

$$(\delta f)_1 \equiv (\delta f)_\Phi = (\delta f)_{h_0} [(a_{ок}^3/9)/h_0(LW)_{ок}] \exp(E_x/kT). \quad (4)$$

Перейдем к определению  $\nu$  и  $t_0$ , также имеющих в (1) и (2) различный физический смысл.

Атом кислорода до его хемосорбции алюминием находится в физисорбированном состоянии, характеризующемся энергией активации  $E_{\Phi}$  и временем жизни (см., например, [6], [9], гл. 3):

$$t_0 \equiv t_{\Phi} = \tau_0 \exp(E_{\Phi}/kT). \quad (5)$$

Здесь  $\tau_0 = a_k \sqrt{m_k/kT}$  — средний период тепловых колебаний,  $a_k$  и  $m_k$  — эффективный диаметр и масса атома кислорода.

Для определения средней частоты импульсов  $\nu$  допустим, что степень заполнения (см. [10]) поверхности преобразователей, имеющих площадь  $S_{\text{пр}}$ , равна единице. Иначе говоря, полное число атомов кислорода на внешней поверхности пленки составляет  $N_k = S_{\text{пр}}/a_k^2$ . Тогда среднее число атомов, физисорбируемых в единицу времени, равно

$$\nu = \nu_{\Phi} = 0,5 (N_k/\tau_0) \exp(-E_{\Phi}/kT). \quad (6)$$

Таким образом, при анализе флуктуаций частоты автоколебаний, обусловленных окислением алюминиевых ВШП, при конкретизации выражения для спектра (2) следует использовать параметры, определяемые соотношениями (4) — (6). При анализе деградационных уходов частоты (1) вместо (4) следует использовать (3). Соотношения (5), (6) заменяются аналогичными, но определяемыми через энергию активации хемосорбции,

$$t_x = \tau_0 \exp(E_x/kT), \quad \nu_x = 0,5 (N_k/\tau_0) \exp(-E_x/kT).$$

Произведение  $\nu t_0 \equiv \nu_{\Phi} t_{\Phi} = \nu_x t_x$ , входящее в соотношения (1) и (2), имеет смысл половины числа атомов кислорода  $N_k$  на внешней поверхности окисной пленки.

3. Перейдем к анализу деградации и флуктуаций, обусловленных *диффузионным расплыванием* электродов ВШП. Для золотых преобразователей данный механизм является единственно возможным из упомянутых в настоящей работе. Окисление алюминиевых преобразователей можно практически исключить путем тщательного вакуумирования резонатора ПАВ. Однако как применение золотых ВШП, так и вакуумирование не позволяют полностью избавиться от деградационных уходов частоты (см. [2]).

Деградационные изменения частоты рассматриваемых генераторов теоретически объяснены в [11] с помощью модели [6]. Вследствие самодиффузии атомов металла, из которого изготовлен ВШП, толщина преобразователя уменьшается во времени по логарифмическому закону (1). Из-за этого происходит аналогичное изменение частоты автоколебаний, для золотых ВШП — в сторону меньших, для алюминиевых — в сторону больших значений. Различие в знаках уходов частоты объясняется акустомеханическими свойствами используемых металлов. В отличие от рассмотренного выше окислительного механизма, где элементарный флуктуационный акт определялся сорбцией (с последующей за ней десорбцией) атома кислорода, теперь существенно диффузия атома металла по боковой поверхности ВШП. Поскольку изменения среднестатистического значения частоты имеют логарифмический характер (1), их спектр, согласно [6], должен иметь фликкерный характер (2). Разумеется, в этом случае смысл первичных параметров, определяющих (1) и (2), соответствует рассматриваемому диффузионному механизму деградации и флуктуаций.

Допустим, что отдельный электрод ВШП имеет ширину, равную  $d/8$ , и толщину  $h$ , причем  $h \ll \lambda$ . В этом случае, согласно [11], имеем

$$(\delta f)_i \equiv (\delta f)_d = (\Delta h)_i \kappa (b) \eta n \lambda^{-1},$$

$$vt_0 \equiv v_d t_d = Wh/a_m^2,$$

$$t_0 = t_d = a_m \sqrt{m_m/kT} \exp(E_d/kT).$$

Здесь  $(\Delta h)_1 = 8a_m^3/Wh$  — эффективное изменение толщины электрода при уходе с его поверхности одного атома металла (обладающего диаметром  $a_m$  и массой  $m_m$ ),  $\kappa(b)$  — модуляционная чувствительность, определяющая изменения частоты при вариациях параметра локального отражения  $b = \eta nh/\lambda$ ,  $\eta$  — феноменологическая постоянная, характеризующая соотношения акустомеханических свойств металла ВШП и пьезоэлектрической подложки. Время  $t_0$ , обозначенное здесь через  $t_d$ , определяет средний период диффузионных скачков атомов металла,  $E_d$  — энергия активации поверхностной самодиффузии. Перейдем к численным оценкам и обсуждению результатов.

4. Оценки деградационных уходов частоты сравнимы с данными [2], а флуктуационных характеристик — с [4]. В этих работах исследовались идентичные 401 МГц автогенераторы на линиях задержки ПАВ, характеризующихся следующими параметрами (некоторые из них носят оценочный характер).

Рабочая площадь прибора  $LW = 1,12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ ,  $n = 120$ . При толщине слоя окиси алюминия  $h_0 = 35 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ , покрывающей 90% рабочей площади прибора, относительный уход частоты составил  $(\delta f)_{h_0} = 1,1 \cdot 10^{-4}$ .

Согласно [3], энергию активации хемосорбции считаем равной  $E_\gamma = 0,21 \text{ эВ}$ ; из [8] имеем  $E_\phi = 0,167 \text{ эВ}$ . Учтем также, что  $a_{\text{ок}} = 3,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ,  $a_{\text{к}} = 2,4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ,  $m_{\text{к}} = 2,66 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ . На основании этих данных определим параметры, входящие в (1) и (2) (см. табл. 1). В табл. 1 приведены также данные экспериментов [2, 4]. Здесь время  $t_1 = 7,2 \cdot 10^6 \text{ с}$  (12 недель), как и в работе [10]. Из табл. 1 видно, что окислительный механизм качественно верно объясняет как величину деградационного дрейфа, так и уровень фликкерных флуктуаций частоты в генераторах с алюминиевыми ВШП.

Таблица 1

Материал ВШП	Алюминий			Золото	
	Окисление	Расплавляние	Эксперимент	Расплавляние	Эксперимент
$\langle \delta f \rangle_1, 10^{-17}$	5,42 (спектр)	4,71	—	9,8	—
$v t_0, 10^9$	$1,48 \times 10^{-3}$ (дегр.)	1,48	—	0,536	—
$\langle \delta f(t_1) \rangle, 10^{-6}$	2,57	2,2	1,5 — 13	-1,2	— (3 — 4)
$B, 10^{-20}$	1,43	$3,24 \cdot 10^{-4}$	1,6	$5,24 \cdot 10^{-4}$	—

Параметры соотношений (1) и (2) при диффузионном расплавлянии преобразователей (как алюминиевых, так и золотых) приведены в [11] и также сведены в табл. 1. Видно, что данный механизм качественно верно описывает деградационный дрейф частоты. Однако обусловленные им флуктуации оказываются на четыре порядка ниже наблюдаемых экспериментально.

Поскольку в литературе отсутствуют данные по уровню фликкерных флуктуаций частоты автогенераторов с приборами ПАВ, имеющими золотые ВШП, приводимую в табл. 1 для данного случая оценку следует рассматривать как минимально достижимый уровень флуктуаций.

На основе анализа приборов с алюминиевыми преобразователями можно сделать следующие выводы.

Тщательное вакуумирование резонатора позволит, по-видимому, добиться существенного снижения уровня фликкерных флуктуаций частоты, однако на значительное уменьшение ее дрейфа рассчитывать не следует.

Может возникнуть ситуация, когда основной вклад во флуктуации частоты дает окисление преобразователей, а в деградационный дрейф — их диффузионное распыление. Это связано с тем, что элементарные амплитуды  $(\delta f)_1$  (см. табл. 1 и соотношения (1), (2)) входят во флуктуационные и деградационные характеристики с различным весом. Кроме того, вклад сорбции кислорода во флуктуации частоты существенно превышает вклад в ее деградационное изменение.

Поэтому представляется перспективным одновременное исследование деградации и флуктуаций в конкретном приборе с целью выявления физических механизмов, лежащих в их основе.

Авторы признательны В. Н. Кулешову и М. С. Сандлеру за полезное обсуждение вопросов, затронутых в настоящей работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Shreve W R Aging in quartz SAW resonators — Proc. 1977 IEEE Ultrasonics Symp., IEEE Cat № 77CH1264-15U, p. 857
- 2 Parker T. E Aging characteristics of SAW controlled oscillators.— Proc. 1977 IEEE Ultrasonics Symp., IEEE Cat. № 77CH1264-15U, p. 862
- 3 Weglein R. D., Otto O. W Microwave SAW devices.— Proc. 1977 IEEE Ultrasonics Symp., IEEE Cat. № 77CH1264-15U, p. 913.
- 4 Parker T E — Electron Lett., 1979, 15, № 10, p. 296
- 5 Малахов А Н, Якимов А. В. — Радиотехника и электроника, 1974, 19, № 11, с 2436
6. Якимов А. В — Изв вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 2, с 238.
- 7 Якимов А В. — Изв вузов — Радиоэлектроника, 1983, 26, № 11, с. 68.
- 8 Де Бур Я Динамический характер адсорбции. — М ИЛ, 1962.
- 9 Болтакс Б И Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках — М: Наука, 1972
10. Курс физической химии /Под ред. Я. И Герасимова—М: Химия, 1970.
11. Кревский М А., Сандлер М. С., Якимов А В — Радиотехника и электроника (в печати).

Горьковский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
30 ноября 1982 г,  
после доработки  
28 июня 1983 г.

#### 1/f NOISE AND AGING IN THE FREQUENCY DRIFT OF SAW CONTROLLED OSCILLATORS

*M. A. Krevsky, A. V. Yakimov*

Oscillators with SAW resonators made on the basis of Al or Au transducers are considered Two mechanisms of aging are studied. That makes it possible to determine the shape and level of the flicker fluctuation spectrum and aging in the mean value of the frequency Results obtained are in a good agreement with the experimental data known.