АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2010, том 56, № 4, с. 472–478

ФИЗИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 621.382(075)

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ НА КВАЗИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

© 2010 г. В. Ф. Дмитриев, А. Н. Носков

Открытое акционерное общество "Научно-производственное предприятие "Радар-ммс". 197375 Санкт-Петербург

E-mail: vf_dmitriev@rambler.ru

Поступила в редакцию 2.09.09 г.

На основе модифицированных уравнений для связанных мод развита теория для устройств, использующих квази поверхностные акустические волны. Проведено сопоставление результатов расчета с результатами эксперимента. Выполнено экспериментальное исследование долговременной стабильности резонаторов на квази поверхностных акустических волнах.

1. ВВЕДЕНИЕ

Помимо рэлеевских волн, имеющих преимущественно вертикальную поляризацию вектора механического смещения, широкое распространение в устройствах получили также поверхностные акустические волны (ПАВ) с преимущественно горизонтальной поляризацией вектора механического смещения (ПАВ *SH*-типа). Этот тип ПАВ, называемый также сдвиговыми поверхностными волнами (СПВ) [1, 2], наряду с рядом других[1], можно отнести к так называемым, "квази" (или "псевдо") поверхностным акустическим волнам [5]. Квази ПАВ локализованы вблизи поверхности, но имеют "утечку" энергии даже в отсутствие потерь в среде распространения. Утечка энергии обусловлена недостаточной связью волны с поверхностью, в результате которой волна, по мере распространения вдоль поверхности, частично трансформируется в объемные типы волн [6].

Резонаторы на основе ПАВ *SH*-типа широко используются при создании устройств для обработки сигналов, например, в генераторах в качестве частотно-задающих элементов [7].

Теоретический анализ процесса распространения ПАВ *SH*-типа основан на рассмотрении волнового процесса в структуре в виде периодической решетки металлических электродов или выступов, расположенных на поверхности пьезоэлектрика [8–12]. В [9] был предложен метод анализа дисперсионных характеристик ПАВ *SH*-типа, основанный на использовании разложения поля акустической волны, распространяющейся вдоль периодически возмущенной поверхности, по пространственным гармоникам (разложение Флоке). Дальнейшим развитием идей работы [9] явился вывод в [10] аналитического дисперсионного соотношения для поверхностных поперечно сдвиговых волн существующих в периодической решетке электродов. Этот тип квази ПАВ получил специальное название surface transverse wave (*STW*).

Некоторым неудобством при практическом использовании дисперсионного соотношения [10] является необходимость экспериментального определения двух параметров этого уравнения. Другим неудобством в использовании дисперсионного соотношения [10] является его несовместимость с уравнениями связанных волн или *COM* (coupling mode) уравнениями для рэлеевских волн. Последнее из упомянутых неудобств было преодолено авторами работ [11] и [12].

Наиболее важной задачей при проектировании устройств, использующих *STW* тип квази ПАВ (например, резонаторов), является задача определения входного адмитанса. В работе [11] развит метод, позволяющий использовать *COM* формализм ПАВ рэлеевского типа [13] для моделирования адмитанса *STW* резонаторов. В работе [14] на основе метода расчета адмитанса, предложенного в [15], и дисперсионного соотношения, представленного в работе [10], развит метод моделирования устройств, использующих квази ПАВ в виде сдвиговых ПАВ с горизонтальной поляризацией (*SH* типа).

В данной работе развит теоретический метод расчета устройств на квази поверхностных ПАВ, основанный на уравнениях связанных волн, полученных в [16]. Экспериментальная проверка метода выполнена на примере резонатора, использующего квази поверхностные акустические волны *STW* типа. Проведено исследование ухода

[1] Помимо ПАВ *SH*-типа к квази поверхностным можно также отнести продольные вытекающие поверхностные волны (*LLSAW*) [3], локализованные вблизи поверхности и также имеющие утечку энергии при распространении как по свободной поверхности, так и в электродной структуре. Этот тип волн называют также быстрые вытекающие ПАВ (*FLSAW*) [4].

резонансной частоты *STW* резонаторов со временем, вызванное процессами старения.

2. ДИСПЕРСИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАВ SH-ТИПА

Ранее были рассмотрены методы проектирования устройств на ПАВ на основе уравнений связанных волн [17]. Эти уравнения хорошо зарекомендовали себя при проектировании устройств на ПАВ рэлеевского типа. Для того, чтобы применить полученные ранее уравнения для проектирования устройств на основе квази поверхностных волн, необходимо учесть особенности возбуждения и распространения этих волн в электродных структурах.

Существенны несколько особенностей *SH*-типа ПАВ. Первая – это наличие утечки энергии в глубь пьезоэлектрика по мере распространения волны, что приводит к необходимости вводить в постоянную распространения волны слагаемое, учитывающее дополнительное затухание. Следует отметить, что утечка волны существенно зависит от состояния поверхности. Возможны следующие состояния поверхности: свободная поверхность, металлизированная поверхность, решетка электродов на поверхности, канавки (или выступы) на поверхности. Вторая особенность – это частичное преобразование квази ПАВ в объемные типы волн при прохождении волны через электрод ВШП или решетки. Наконец, третья особенность – это зависимость комплексного коэффициента отражения квази ПАВ от электрода ВШП или полоски решетки от относительной частоты падающей ПАВ. Важным обстоятельством является тот факт, что в случае *SH*-типа ПАВ необходимо учитывать частотную зависимость как действительной, так и мнимой части коэффициента отражения волны от электрода или полоски. Последняя особенность поведения *SH*-типа ПАВ в решетке электродов приводит к несколько иной форме частотной характеристики резонатора в области частот выше полосы заграждения. Наконец, последняя особенность, связанная с возбуждением ПАВ, – это зависимость коэффициента электромеханической связи от толщины электродов. Эта особенность наиболее существенна в материалах с сильной пьезоэлектрической связью.

Дисперсионное уравнение, учитывающие особенности ПАВ *SH*-типа, распространяющихся в бесконечно протяженной решетке металлических электродов, и допускающее его использование в *COM* модели, имеет вид [11]:

$$q(\Delta) = \sqrt{(\kappa_{SH} - \pi/p)^2 - r_R(\Delta) r_S(\Delta)}, \qquad (1)$$

где κ_{SH} – невозмущенное волновое число ПАВ *SH*-типа; $r_R(\Delta)$ и $r_S(\Delta)$ нормированные коэффициенты отражения; в отсутствие потерь $r_R(\Delta)$ и $r_S(\Delta)$ комплексно сопряжены;

$$\Delta = \omega/V_B - \pi/p, \qquad (2)$$

V_B – скорость поверхностной приповерхностной волны (*SSBW*) и p – период решетки электродов.

Волновое число ПАВ *SH*-типа, распространяющейся в решетке электродов, вблизи резонанса или возмущенное волновое число, есть

$$\beta_P = \pi/p \pm q(\Delta). \qquad (3)$$

Невозмущенное волновое число ПАВ *SH*-типа κ_{SH} и нормированные коэффициенты отражения $r_R(\Delta)$ и $r_S(\Delta)$ имеют вид [10]:

$$\kappa_{SH} = \omega/V_B - \Delta_V + 2|\kappa_B| \cdot v(\Delta), \qquad (4)$$

$$r_R = \kappa_\varepsilon + 2\kappa_B v(\Delta), \qquad (5)$$

$$r_S = (\kappa_\varepsilon)^* + 2(\kappa_B)^* v(\Delta), \qquad (6)$$

$$\Delta_V = -\eta^2/2, \qquad (7)$$

где функция $v(\Delta)$ учитывает ослабление и частотную дисперсию скорости ПАВ, которые обусловлены рассеянием ПАВ *SH*-типа (например, *STW*) в сдвиговые объемные моды, и равна

$$v(\Delta) = \frac{\eta/2 + |\varepsilon|}{\sqrt{\Delta_B - \Delta} + \eta/2 + |\varepsilon|}, \qquad (8)$$

параметр κ_ε описывает взаимодействие между ПАВ и равен

$$\kappa_\varepsilon = \pm|\varepsilon|\frac{2\eta + |\varepsilon|}{2}, \qquad (9)$$

параметр κ_B учитывает влияние объемных волн и равен

$$\kappa_B = \mp\frac{|\varepsilon|^2}{2}\frac{\eta}{\eta + 2|\varepsilon|}. \qquad (10)$$

Частота среза Δ_B или нижняя граница полосы заграждения для преобразования ПАВ *SH*-типа в объемные моды при распространении волны в решетке электродов задается равенством [11]:

$$\Delta_B = \left(2|\varepsilon|^2 - \eta^2\right)/4. \qquad (11)$$

Волновое число $q(\Delta)$ в (1) имеет как действительную, так и мнимую части, претерпевающие сильные изменения в области полосы заграждения. Пример расчета дисперсионной характеристики в виде частотной зависимости скорости *STW* под решеткой электродов, используемой в составе резонатора, будет представлен в разделе 4.

Дисперсионное соотношение (1) с учетом (2)–(11) требует два параметра: η и ε, которые могут быть определены экспериментально или теоретически. Параметр η учитывает влияние глубины локализации *STW*. Параметр ε учитывает влияние эффективности отражения ПАВ и эффективности преобразования ПАВ в объемные типы волн.

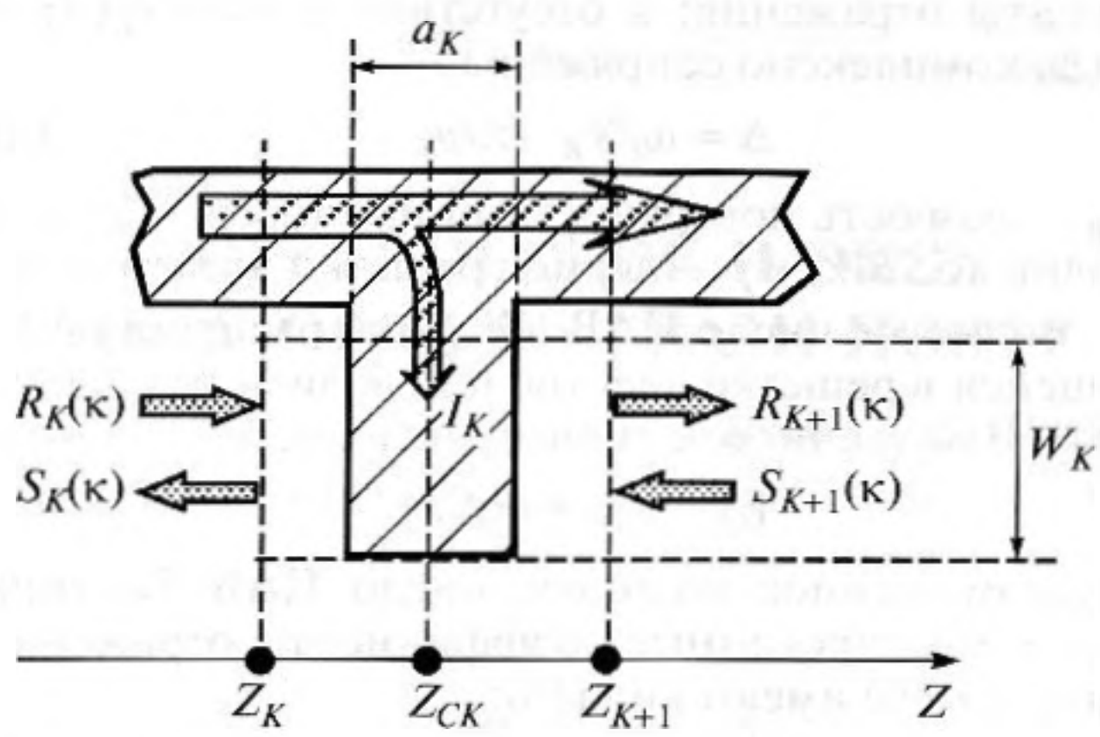


Рис. 1. k-й электрод структуры на поверхности пьезоэлектрической среды, в которой распространяется ПАВ SH-типа.

Теперь рассмотрим вопрос об использовании дисперсионного уравнения (1) совместно с *COM* уравнениями [16]. Дисперсионное соотношение для ПАВ рэлеевского типа в обычной *COM* модели, имеет вид [14]:

$$q = \sqrt{\delta^2 - |r|^2}, \tag{12}$$

где $\delta = \kappa - \pi/p$, где κ – невозмущенное волновое число ПАВ релеевского типа и r – нормированный коэффициент отражения ПАВ. В соответствии с видом дисперсионных уравнений (1) и (12) для использования (1) в *COM* уравнениях [16], применительно к волнам SH-типа, необходимо произвести замену:

$$\begin{cases} \kappa \Rightarrow \kappa_{SH}, \\ |r|^2 \Rightarrow r_R(\Delta) r_S(\Delta). \end{cases} \tag{13}$$

Тогда первое слагаемое в подкоренном выражении (1) будет квадратом смещенного волнового числа ПАВ SH-типа и для его использования в уравнениях [16] необходимо произвести замену:

$$\kappa \to \kappa_{SH} = \omega/V_B - \Delta_V + \{2|\kappa_B|\, v(\Delta)\}^*, \tag{14}$$

где κ_{SH} – модифицированное волновое число, учитывающее дисперсионные свойства, связанные с замедлением волны вследствие нагрузки массой электродов и возбуждения объемных волн. Кроме того, κ_{SH} учитывает потери, связанные с утечкой энергии волны при распространении ее в решетке.

Аналогично, поскольку второе слагаемое в (1) является квадратом коэффициента отражения, получим:

$$r \to r_{SH} = \pi[\kappa_\varepsilon + 2\kappa_B\, v(\Delta)], \tag{15}$$

где r_{SH} – коэффициент отражения для ПАВ SH-типа.

Пример расчета частотных зависимостей нормированного волнового числа и коэффициента отражения для периодической решетки алюминиевых электродов толщиной $h \approx 0.045$ мкм и периодом $p = 2.08$ мкм приведен в разделе 4.

3. *COM* УРАВНЕНИЯ

Дисперсионное уравнение вида (1) позволяет лишь анализировать характеристики волн SH-типа, распространяющихся в решетке металлических электродов. Вместе с тем, для анализа частотных характеристик устройств, использующих квази ПАВ SH-типа, необходимо рассчитать входную проводимость устройств. Данную задачу позволяют решить *COM* уравнения, например, полученные в [16], и связывающие комплексные амплитуды падающих волн $R_K(\kappa)$, $S_{K+1}(\kappa)$ и прошедших волн $S_K(\kappa)$, $R_{K+1}(\kappa)$ справа и слева от k-го электрода (рис. 1).

Уравнения, полученные в [16], позволяют, зная комплексные амплитуды волн на входе ВШП (или ОС), вычислить комплексные амплитуды волн на выходе ВШП (или ОС) и входную проводимость устройства. Для формализации процесса вычисления удобно использовать матричную форму уравнений [16]:

$$\begin{vmatrix} S_K(\kappa) \\ R_{K+1}(\kappa) \\ I_K(\kappa) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} P^{(K)}(1,1) & P^{(K)}(1,2) & P^{(K)}(1,3) \\ P^{(K)}(2,1) & P^{(K)}(2,2) & P^{(K)}(2,3) \\ P^{(K)}(3,1) & P^{(K)}(3,2) & P^{(K)}(3,3) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} R_K(\kappa) \\ S_{K+1}(\kappa) \\ U_0 \end{vmatrix}, \tag{16}$$

где

$$P^{(K)}(1,1) = r_K \eta_{1K} \exp(-j\kappa p_K);$$

$$P^{(K)}(1,2) = \bar{r}_K \eta_{1K} \exp(-j\kappa p_K);$$

$$P^{(K)}(1,3) = \eta_{2K} \bar{I}_K \xi_K^-(\kappa) \exp(-j\kappa p_K/2);$$

$$P^{(K)}(2,1) = \eta_{1K} \bar{r}_K \exp(-j\kappa p_K);$$

$$P^{(K)}(2,2) = r_K \eta_{1K} \exp(-j\kappa p_K);$$

$$P^{(K)}(2,3) = \eta_{2K} \bar{I}_K \xi_K^+(\kappa) \exp(-j\kappa p_K/2);$$

$$P^{(K)}(3,1) = \eta_{2K} \bar{I}_K [\xi_{K0}^+(\kappa) + r_K \xi_{K0}^-(\kappa)] \times \times \exp(-j\kappa p_K/2);$$

$$P^{(K)}(3,2) = \eta_{2K} \bar{I}_K [\xi_{K0}^-(\kappa) + r_K \xi_{K0}^+(\kappa)] \times \times \exp(-j\kappa p_K/2);$$

$$P^{(K)}(3,3) = \eta_{2K} \left[y_K^+(\kappa) + y_K^-(\kappa) \right] + j\omega\, W_K C_2/2.$$

Здесь

$$y_K^+(\kappa) = 0.5\kappa_{\text{эм}}^2 W_0 \omega \varepsilon_{\text{эф}}^\infty \frac{1}{I_K^2} \int_{a_K}^{b_K} \int_z^{b_K} J^*(z,\kappa) J(z_0,\kappa) \times \times \exp[+j\kappa(z_0 - z)]\, dz_0 dz, \tag{17}$$

$$y_K^-(\kappa) = 0.5\kappa_{ЭМ}^2 W_0 \omega \varepsilon_{эф}^{\infty} \frac{1}{I_K^2} \int_{a_K}^{b_K} \int_{a_K}^{z} J^*(z,\kappa) J(z_0,\kappa) \times \tag{18}$$

$$\times \exp[-j\kappa(z_0 - z)] dz_0 dz,$$

$$\xi_{K0}^{\pm}(\kappa) = jW_0 \omega \varepsilon_{эф}^{\infty} \left\{ J_K^{\mp}(\kappa\alpha_K/2) \right\}^*, \tag{19}$$

$$\xi_K^{\pm}(\kappa) = -j\frac{\kappa_{ЭМ}^2}{2} J_K^{\pm}(\kappa\alpha_K/2). \tag{20}$$

r_K – комплексный коэффициент отражения от k-го электрода, $\bar{r}_K = \sqrt{1 - |r_K|^2}$; $p_K = z_{K+1} - z_K$, $\eta_{1K} = W_{1K}/W_0$, W_0 – максимальная апертура, $W_{1K} = W_0$ в случае, если используются холостые электроды и $W_{1K} = W_K$, если холостые электроды не используются, W_K – перекрытие k-го и $k+1$-го электродов, $\eta_{2K} = W_{2K}/W_0$; $\kappa_{ЭМ}^2$ – квадрат коэффициента электромеханической связи, $\varepsilon_{эф}^{\infty}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрика при $\kappa \to \infty$. Коэффициент $\bar{I}_K$ учитывает направление тока в электродах, причем $\bar{I}_K = +1$ для электродов, подключенных к верхней шине ВШП и $\bar{I}_K = -1$ для электродов, подключенных к нижней шине ВШП.

При вычислениях входной проводимости по приведенным выше соотношениям требуется знание распределения тока $J(z,\kappa)$ на электродах ВШП. Отметим, что в приближении "однородного" распределения тока по ширине каждого электрода α_K ВШП можно получить:

$$\mathrm{Re}\left\{ y_K^{\pm}(\kappa) \right\} \approx y_0 \frac{1}{2} \{ \sin c[\kappa\alpha_K/2] \}^2, \tag{21}$$

$$\mathrm{Im}\left\{ y_K^{\pm}(\kappa) \right\} \approx j\frac{y_0}{\kappa\alpha_K} \left\{ \frac{\sin(\kappa\alpha_K)}{\kappa\alpha_K} - 1 \right\}, \tag{22}$$

где $y_0 = \frac{\kappa_{ЭМ}^2}{2} W_0 \omega \varepsilon_{эф}^{\infty}$,

$$J_K^{\pm}(\kappa\alpha_K/2) \approx \sin c(\kappa\alpha_K/2). \tag{23}$$

Вычислив элементы P-матрицы для каждого электрода ВШП и используя рекуррентные соотношения [17], можно определить входную проводимость устройства и рассчитать частотные характеристики устройства.

4. РАСЧЕТ *STW*-РЕЗОНАТОРОВ НА ОСНОВЕ *COM* УРАВНЕНИЙ

Для использования приведенных выше соотношений необходимо знание *COM* параметров, которые определяются экспериментально-расчетным образом для каждого конкретного материала, среза, направления распространения ПАВ [18].

В качестве примера использования изложенного подхода приведем результаты расчета и измерений частотной характеристики резонатора, выполненного на кварце $Y + 36°$ среза и использующего поверхностную акустическую волну *SH*-типа под решеткой металлических полосок (*STW*), при направлении распространения $X + 90°$. Условный вид топологии резонатора представлен на рис. 2. Были выбраны следующие параметры резонатора на частоту ~1222 МГц: число электродов в ВШП $N_I = 121$, число электродов в каждой отражательной структуре $N_R = 900$, число электродов в замедляющей решетке $N_D = 25$, толщина алюминиевых электродов $h = 0.045$ мкм, апертура резонатора $W = 100\ \lambda_0$, период отражательных структур $p = 2.08$ мкм, $a/p = 0.5$.

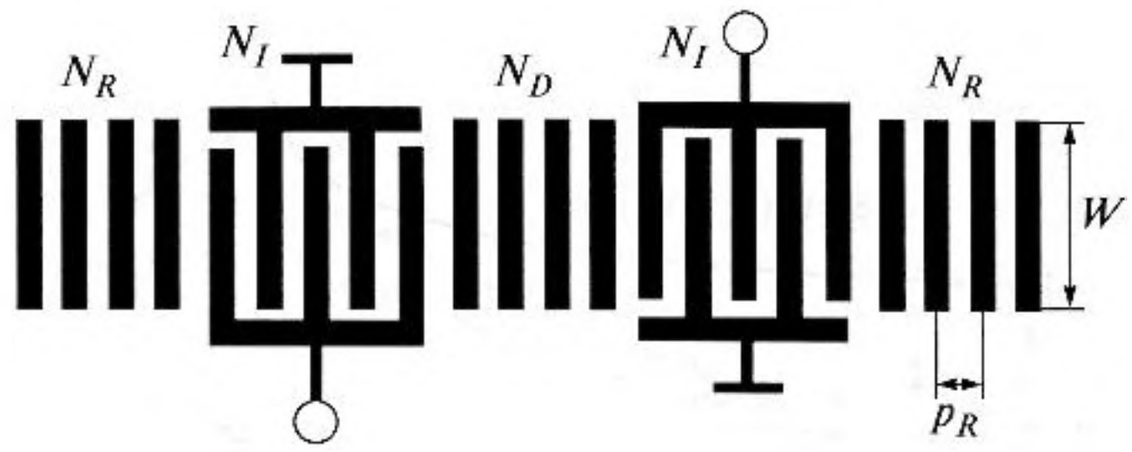


Рис. 2. Условный вид топологии резонатора, использующего ПАВ *STW*-типа.

Для расчета частотных характеристик резонатора воспользуемся экспериментально определенными аналитическими аппроксимациями параметров для кварца $Y + 36°$ среза, $X + 90°$ направления распространения, приведенными в [11]:

$$\eta \approx 3.4(h/p)(a/p)\sqrt{\pi/p}, \tag{24}$$

$$|\varepsilon| \approx 2.2\sin(\pi a/p)(\hat{h}p)\sqrt{\pi/p}, \tag{25}$$

$$\Delta v/v \approx 0.00285(a/p)\tanh(0.085 + 17(h/p)), \tag{26}$$

где h – толщина Al пленки. Рассчитанные на основе соотношений (14), (15), (24), (25) частотные зависимости параметров *COM* уравнений (16) приведены на рис. 3 и рис. 4.

Можно выделить две основные особенности. Первая – постоянная распространения квази ПАВ в решетке имеет мнимую составляющую, обусловленную утечкой энергии волны в глубь кристалла. Причем эта мнимая составляющая имеет сильную частотную зависимость в области частот полосы заграждения решетки. Вторая особенность состоит в том, что у коэффициента отражения ПАВ появляется дополнительная мнимая составляющая, которая также имеет сильную частотную зависимость в области частот полосы заграждения решетки. Обе упомянутые составляющие зависят от относительной толщины электродов решетки h/λ_0.

Результаты расчета частотной характеристики резонатора приведены на рис. 6, а, а результаты

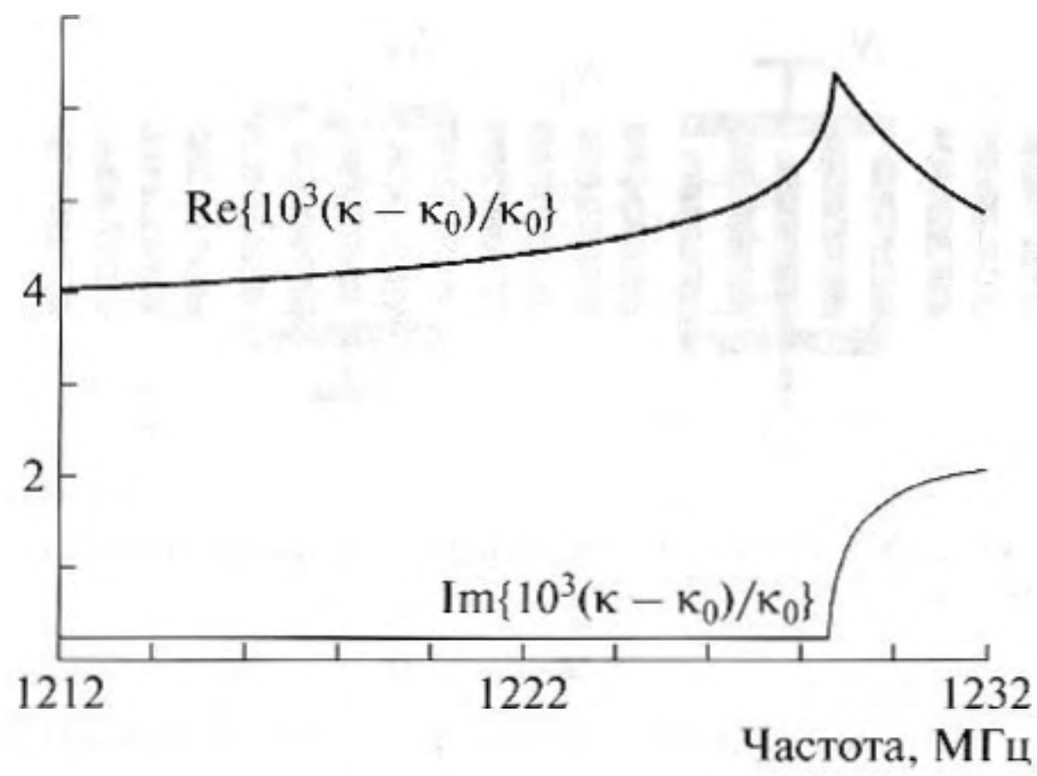


Рис. 3. Действительная и мнимая части нормированной постоянной распространения *STW* под решеткой электродов на кварце $Y + 36°$ среза, при направлении распространения $X + 90°$ и $h/p = 2.18\%$, $p = 2.08$ мкм, $\kappa_0 = \omega/V_B$.

измерения на рис. 6, б и демонстрируют хорошее соответствие. Отметим, что расчет на основе соотношений работы [11], и расчет на основе соотношений (16)–(23) дают практически совпадающие результаты.

Таким образом, для моделирования устройств, использующих квази поверхностные волны (например, *STW*) вполне пригодны соотношения, полученные для ПАВ рэлеевского типа.

5. СТАБИЛЬНОСТЬ И СТАРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ *STW*

Стабильность технологических и конструктивных параметров является основным фактором, влияющим на резонансную частоту *STW*-резонаторов. В основе стабильности лежат применяемые материалы и технология изготовления устройств. Для большинства *STW*-резонаторов основными показателями стабильности являются:

– температурный уход частоты, вызванный изменением температуры окружающей среды,

– изменение частоты резонатора в течение длительного времени (старение).

Наиболее распространенным термостабильным материалом для *STW*-резонаторов является пьезокварц, для которого температурная зависимость частоты имеет вид перевернутой параболы.

Обычно старение *STW*-резонаторов обусловлено загрязнением поверхности кварцевых подложек на различных стадиях изготовления. Изменение состояния поверхности сопровождается адсорбцией и десорбцией частиц с поверхности подложки [19], дегазацией материалов применяемых для крепления кварцевой пластины в корпусе, а также конструкцией корпуса и его натеканием со временем [20, 21]. Большое влияние на старение оказывают напряжения в структуре кварца при его монтаже, а также изменения свойств металлической пленки ВШП и отражательной структуры, вследствие взаимодействия остаточных газов и металлической пленки после герметизации корпуса, что приводит к изменению резонансной частоты кварцевых резонаторов [22]. Этот процесс особенно характерен для алюминиевых электродов, которые используют при изготовлении *STW*-резонаторов.

Для определения изменения резонансной частоты резонаторов со временем (в результате "старения") были изготовлены *STW*-резонаторы с резонансной частотой $f_0 \sim 1222$ МГц. Все тополо-

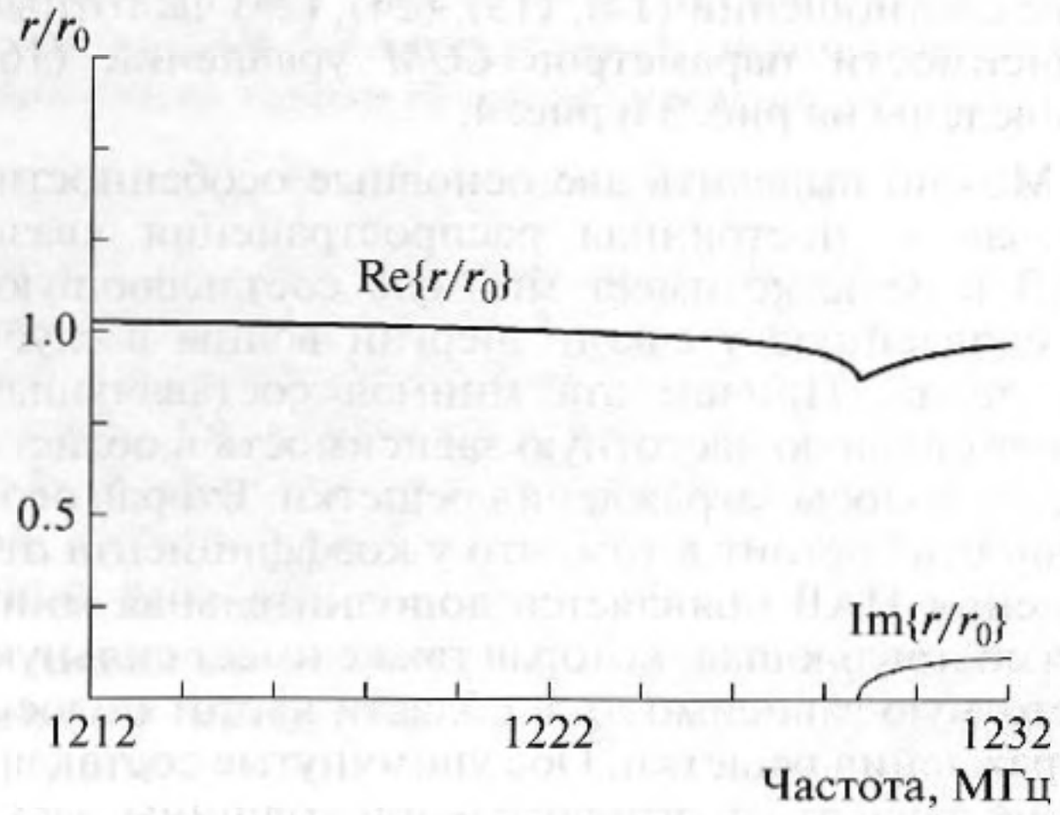


Рис. 4. Действительная и мнимая части коэффициента отражения ПАВ от одного электрода на кварце $Y + 36°$ среза, при направлении распространения $X + 90°$ и $h/p = 2.18\%$, $p = 2.08$ мкм, $r_0 = 0.0096$.

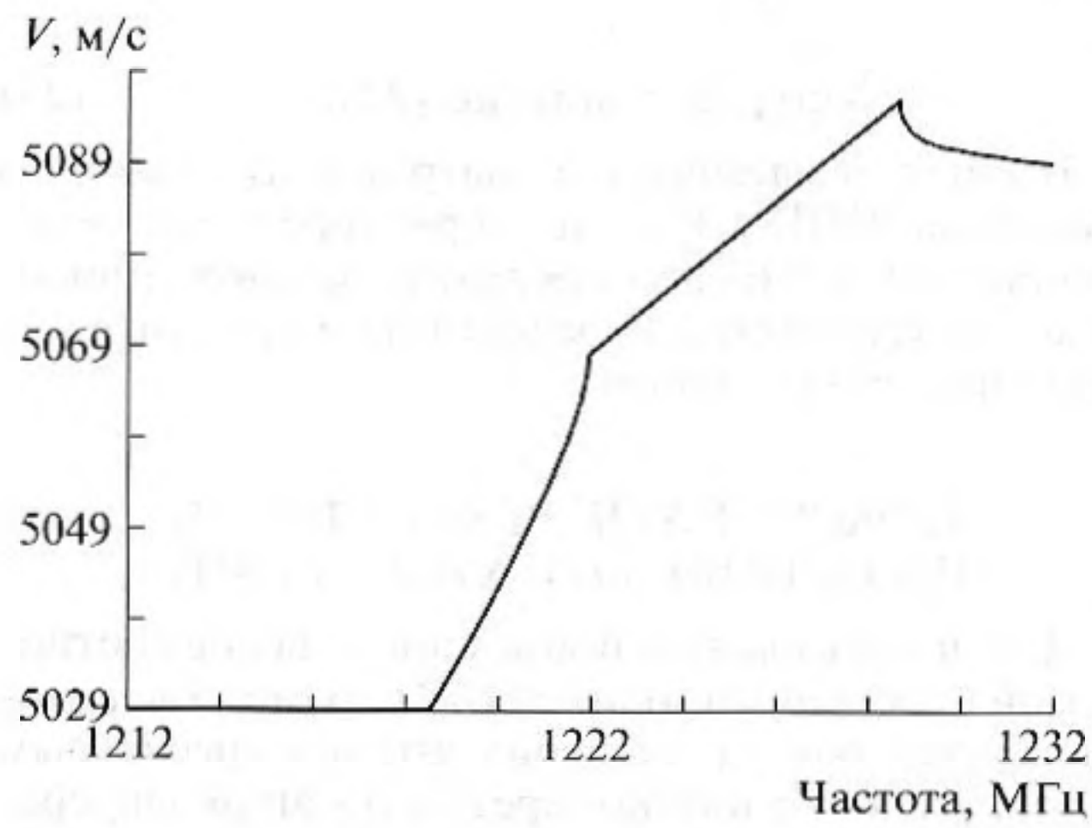
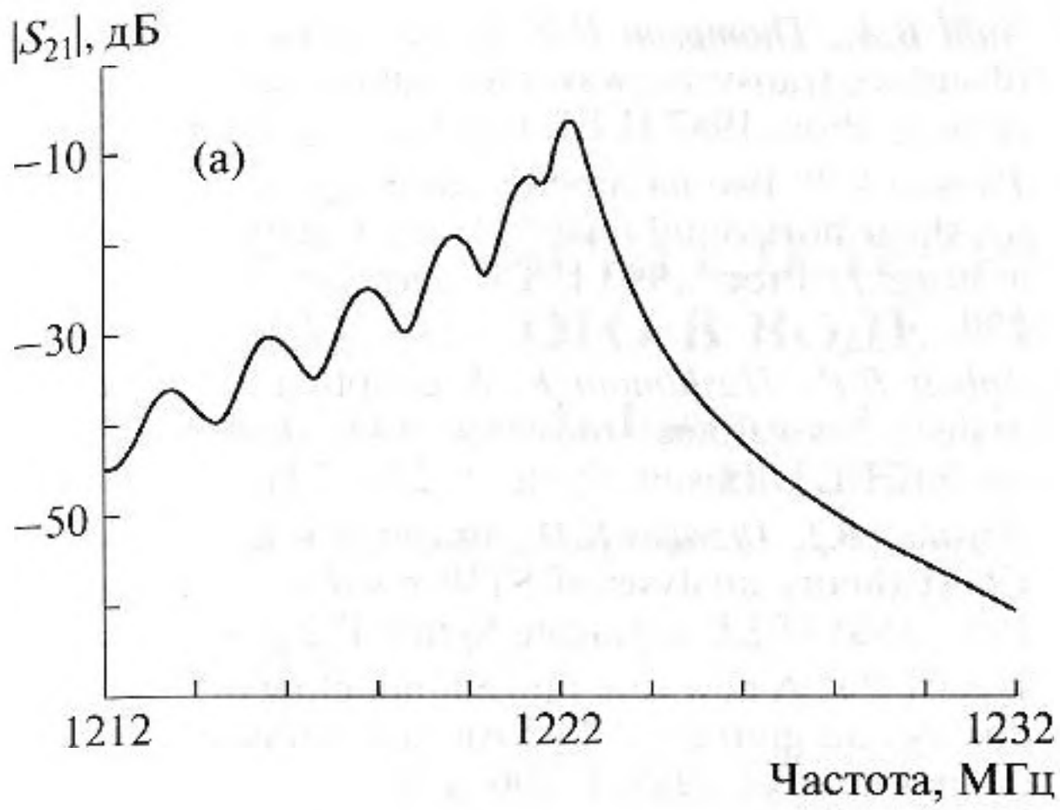


Рис. 5. Скорость STW под решеткой электродов на кварце $Y + 36°$ среза, при направлении распространения $X + 90°$ и $h/p = 2.18\%$, $p = 2.08$ мкм.



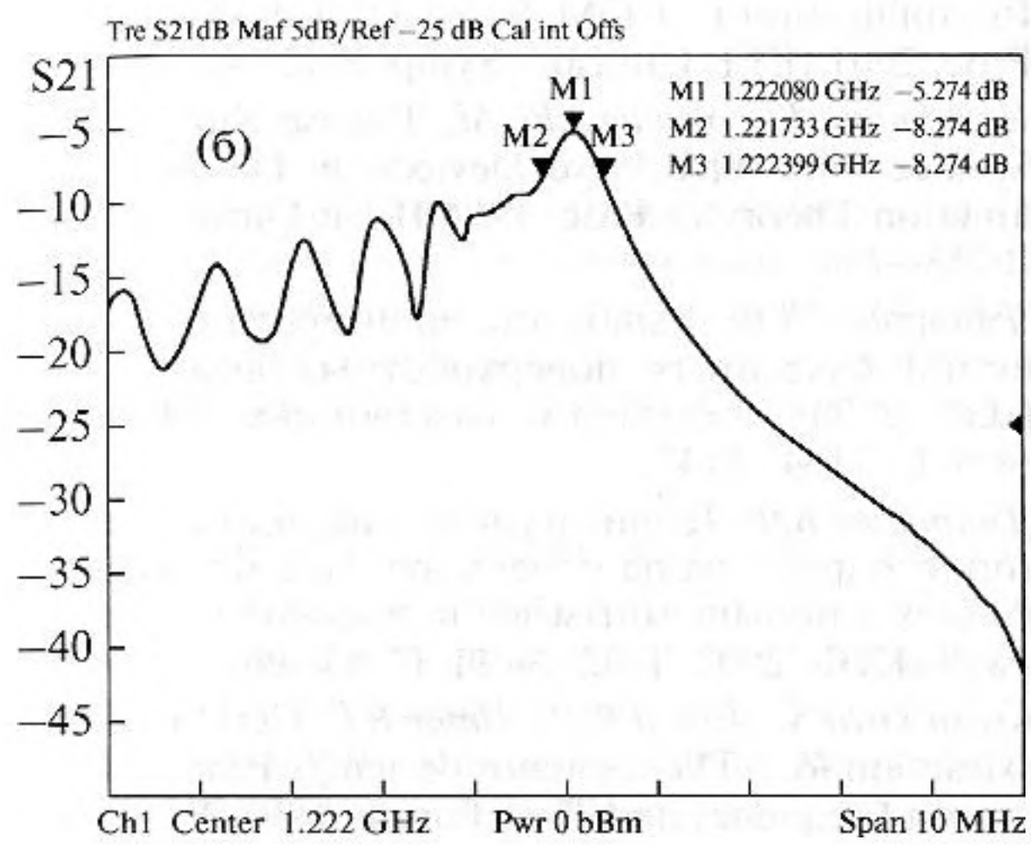


Рис. 6. Результаты расчета (а) и измерения (б) частотной характеристики *STW* резонатора. Результаты расчета на основе соотношений работы [11] и на основе соотношений (16)–(23) совпадают.

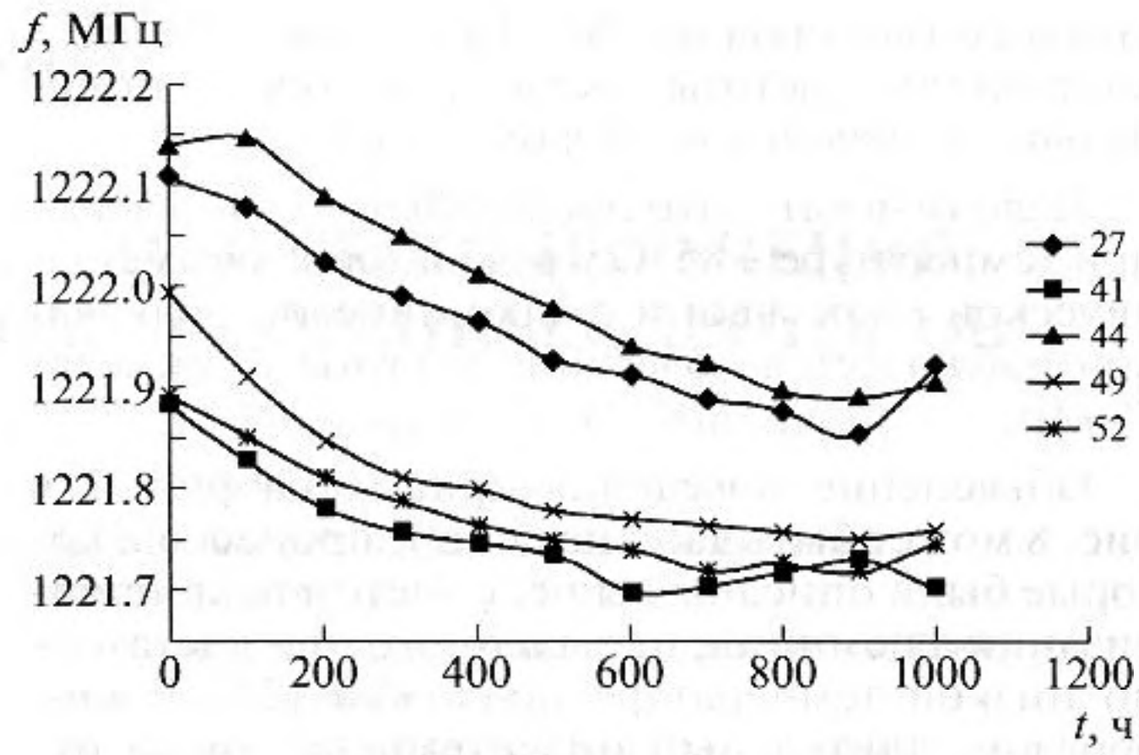


Рис. 7. Зависимость частоты резонатора от времени выдержки при температуре +85°С.

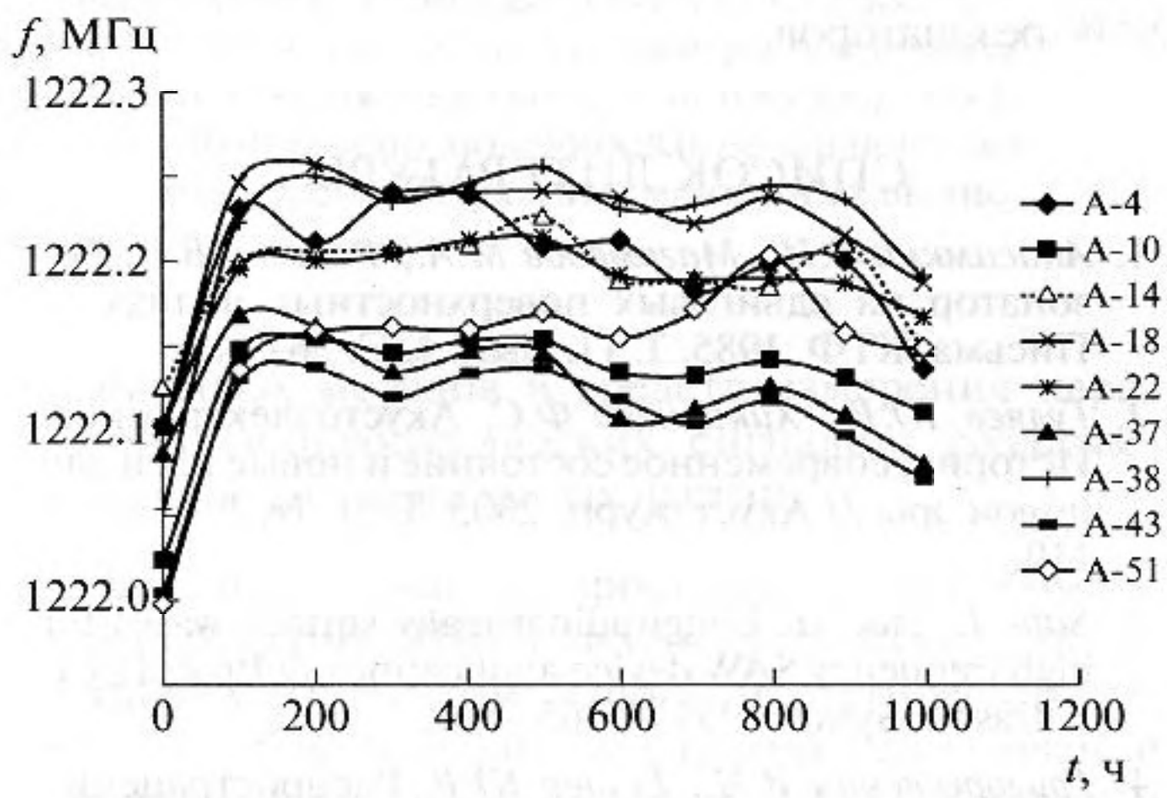


Рис. 8. Зависимость частоты резонатора с прокладкой от времени выдержки при температуре +85°С.

гические параметры резонаторов, а также срез и направление распространения волны приведены в разделе 4, а характерный вид частотной характеристики на рис. 6, б.

Резонаторы были изготовлены методами электронно-лучевого распыления алюминия в вакууме, обратной фотолитографии и плазмо-химического травления. В результате были изготовлены резонаторы с ВШП и отражающей структурой в виде металлических полосок на поверхности кварца. После резки платы устанавливали в корпус ТО-39. Крепление плат проводили как непосредственно на основании корпуса, так и способом, предложенным в [23]. Данный способ увеличения термостабильности *STW*-резонаторов основан на изменении расстояния между ВШП путем деформации кристаллической решетки пьезоэлектрической подложки. В рамках данного метода на обратной стороне пьезоэлектрической подложки крепилась пластина из материала с термическим коэффициентом линейного расширения, превышающим данную величину пьезоэлектрической подложки. Герметизация корпуса ТО-39 проводилась в среде осушенного азота методом конденсаторной сварки.

Исследования на долговременную стабильность частоты резонаторов проводили при повышенной рабочей температуре прибора, равной +85°С в течение 1000 часов (рис. 7 и рис. 8). После первых 100 часов выдержки при данной температуре происходило незначительное снижение резонансной частоты для резонаторов без металлической подкладки (рис. 7) и резкое увеличение резонансной частоты для резонаторов с алюминиевой прокладкой (рис. 8). Дальнейшая выдержка приводила к снижению резонансной ча-

стоты резонаторов на 250 кГц в первом случае и колебаниям частоты около некоторого номинального значения во втором случае.

Надо отметить, что после 600 часов выдержки при температуре +85°С у резонаторов без металлической подкладки и с алюминиевой подкладкой наблюдается колебание частоты в пределах 38 кГц.

Объяснение поведения кривых на рис. 7 и рис. 8 может быть дано на основе процессов, которые были описаны выше, с учетом рекристаллизации алюминия, напыленного при достаточно низкой температуре подложки [24]. Таким образом, длительный низкотемпературный отжиг приводит к изменению первоначальной частоты резонаторов и его можно рассматривать как дополнительную технологическую операцию, необходимую для повышения стабилизации резонансной частоты резонаторов. Данное обстоятельство необходимо учитывать при изготовлении *STW*-резонаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимкин В.И., Магомедов М.А., Федосов В.И.* Резонатор на сдвиговых поверхностных волнах // Письма ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 1. С. 56–61.
2. *Гуляев Ю.В., Хикирнелл Ф.С.* Акустоэлектроника: История, современное состояние и новые идеи для новой эры // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 1. С. 101–110.
3. *Sato T., Abe H.* Longitudinal leaky surface waves for high frequency SAW device applications // Proc. IEEE Ultrason. Symp. 1995. P. 305–315.
4. *Григорьевский В.И., Гуляев Ю.В.* Распространение быстрой волны утечки в системе металлических электродов на поверхности кристалла тетрабората лития // Акуст. журн. 2000. V. 46. № 4. P. 475–479.
5. *Lim T.C., Farnell G.W.* Character of pseudo surface-waves on anisotropic crystals // J. Acoust. Soc. Amer. 1969. V. 41. P. 845–851.
6. *Балакирев М.К., Горчаков А.В.* Рассеяние волн Гуляева-Блюстейна на экране, щели, электроде // Акуст. журн. 1984. Т. 30. № 2. С.149–153.
7. *Avramov I.D.* Analysis and design of negative resistance oscillators using surface transverse wave-based single port resonator // IEEE Trans. on UFFC. 2003. V. UFFC-50. № 3. P. 220–229.
8. *Danicki E.J.* Propagation of transverse surface acoustic waves in rotated Y-cut quartz substrates under heavy periodic metal electrodes // IEEE Trans. on SU. 1983. V. SU-30. P. 304–312.
9. *Auld B.A., Thompson D.F.* Temperature compensation of surface transverse waves for stable oscillator applications // Proc. 1987 IEEE Ultrason. Symp. P. 305–312.
10. *Plessky V.P.* Two parameter coupling-of-modes model for shear horizontal type SAW propagation in periodic gratings // Proc. 1993 IEEE Ultrason. Symp. P. 195–200.
11. *Abbott B.P., Hashimoto K.* A coupling-of-modes formalism for surface transverse wave devices // Proc. 1995 IEEE Ultrason. Symp. P. 239–241.
12. *Boyanov B.I., Djordjev K.D., Strashilov V.L., Avramov I.D.* COM theory analysis of STW resonator structures // Proc. 1995 IEEE Ultrason. Symp. P. 317–320.
13. *Wright P.V.* A new generalized modeling of SAW transducers and grating // 43rd Annual symposium on frequency control. 1989. P. 596–601.
14. *Hashimoto K.Y., Omori T., Yamaguchi M.* Modeling of Shear- Horizontal-Type Surface Acoustic Waves and Its Application to COM Based Device Simulation // Proc. 2001 IEEE Ultrason. Symp. P. 127–132.
15. *Hashimoto K., Yamaguchi M.* Precise Simulation of Surface Transverse Wave Devices by Discrete Green function Theory // Proc. 1994 IEEE Ultrason. Symp. P. 253–258.
16. *Дмитриев В.Ф.* Вывод модифицированных уравнений связанных поверхностных акустических волн // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 9. С. 1134–1143.
17. *Дмитриев В.Ф.* Теория и расчет гибридного резонаторного фильтра на поверхностных акустических волнах с повышенным внеполосным подавлением // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 11. С. 83–90.
18. *Krasnikova S., Abbott B.P., Almar R.C.* COM parameter extraction for STW resonator design // Proc. 11th European Frequency and Time Forum. 1997. P. 440–444.
19. *John R.V.* Vig Introduction to Quartz Frequency Standards // Technical Report SLCET-TR-92-1. Army Research Laboratory. Electronics and Power Sources Directorate. October 1992.
20. *Filler R.L.* The amplitude-frequency effect in SC-cut resonators // Proc. 39th Ann. Symp. on Frequency Control. 1985. P. 311–316.
21. *Vig J.R., Lebus J.W., Filler R.L.* Filler R.L. Chemically Polished Quartz // Proc. 31th Ann. Symp. on Frequency Control. 1977. P. 131–143.
22. *Грузиненко В., Миленин П.* Некоторые аспекты производства Высокостабильных пьезоэлектрических резонаторов // Наноиндустрия. 2007. № 1. С. 24–25.
23. *Корж И.А.* Способ повышения температурной стабильности узкополосного прибора на ПАВ // Патент RU, 2260902, C2, H 03 H9/64, 2005.
24. *Смолин В.К.* Особенности применения алюминиевой металлизации в интегральных схемах // Микроэлектроника. 2004. Т. 33. № 1. С. 10–16.