

УДК 535.241.13 : 534

П.Ф. Поляков<sup>1</sup>, А.В. Бородин<sup>2</sup>, В.А. Хорунжий<sup>2</sup>, В.П. Поляков<sup>1</sup>, В.А. Антонова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники

## ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

*Проводится обзор элементов и устройств функциональной микроэлектроники. Приводится анализ их характеристик.*

*функциональная микроэлектроника, ПАВ-датчики, планарная технология*

### 1. Общая характеристика преобразователей

Перспективным направлением в области измерительных преобразователей физических величин в электрический сигнал является разработка датчиков на поверхностных акустических волнах (ПАВ) [1 – 6]. Это обусловлено двумя основными моментами: постепенно улучшаются электрические характеристики преобразователей на ПАВ, в

первую очередь их добротность, температурная и временная стабильность, расширяется диапазон рабочих частот; технология приборов ПАВ в значительной степени базируется на прогрессивных приемах, применяемых при производстве изделий микроэлектроники с использованием процессов **планарной технологии групповым методом**, что создает предпосылки для массового производства высококачественных преобразователей.

Реализация новых типов датчиков оказалась возможной вследствие высокой чувствительности скорости распространения ПАВ к физическим характеристикам приповерхностных зон исследуемого твердого тела [7]. ПАВ-датчики могут решать широкий круг задач благодаря их функциональному разнообразию. К настоящему времени на их основе создано большое количество приборов для измерения механических величин (давлений, усилий, деформаций, угловой скорости, линейного ускорения), тепловых приборов (термодатчиков), датчиков скорости потока, газоанализаторов, устройств для измерения влажности, микромасс, устройств идентификации подвижных объектов, приборов для экспериментальных исследований физических и химических свойств материалов. ПАВ-датчики обладают небольшими размерами, высокой надежностью и простотой изготовления. В последние десятилетия продемонстрированы возможности практической реализации ПАВ-датчиков, обладающих погрешностью измерения порядка сотых долей процента и менее, и порогом чувствительности  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  от верхнего предела измеряемой величины.

Область применения пьезорезонансных датчиков непрерывно расширяется. Они используются в производстве и научных исследованиях, авиации и ракетной технике, системах контроля окружающей среды и криогенике, метрологии и океанологии, медицине и других областях. В датчиках на ПАВ получили распространение два основных типа преобразователей - линии задержки (ЛЗ) и резонаторы. При этом важнейшим фактором является зависимость скорости распространения ПАВ от электрических условий на поверхности или вблизи нее. В основном применяются простейшие ЛЗ на плоских подложках с прямолинейным распространением ПАВ и постоянным по длине периодом решеток. В резонаторных датчиках стремятся сохранить высокую добротность резонаторов и идут на рассогласование преобразователей с внешними цепями.

Для изготовления ПАВ-датчиков преимущественно используется пьезокварц, а из сильных пьезоэлектриков – ниобат лития ( $\text{LiNbO}_3$ ). Перспективным представляется использование в качестве материалов подложек-звукопроводов для ПАВ-монокристаллического кремния; в этом случае для возбуждения ПАВ применяются пьезоэлектрические пленки  $\text{ZnO}$ .

## 2. Схемотехника ПАВ-датчиков

Основой большинства существующих конструкций датчиков служит ПАВ-генератор. ПАВ-датчики, построенные по генераторной схеме, обладают высокой точностью. Частота генераторного датчика является функцией измеряемой величины, что удобно для дальнейшей обработки информации. С целью повышения кратковременной стабильности ПАВ-генератора в качестве элемента частотной стабилизации используют ПАВ-резонаторы или ЛЗ с малыми вносимыми потерями. ПАВ-датчики стро-

ятся в основном по схеме с частотным выходом. Чаще используется дифференциальная схема с двумя автогенераторами и формирователем сигнала разностной частоты. В данном случае датчик предназначен для измерения давления в газе или жидкости, однако при соответствующей модификации он может быть использован и для измерения температуры, механической нагрузки и т.п. На общей подложке расположены две пространственно разнесенных ЛЗ – 1 и 2. Приложенное давление испытывает лишь участок звукопровода 3, на котором размещена одна из ЛЗ. Другая ЛЗ находится при той же температуре, но несущая ее диафрагма давления не испытывает. На базе этих ЛЗ выполнены два ПАВ-генератора. При одинаковом давлении на обе диафрагмы частоты генераторов  $f_1 = f_2$  и разностная частота  $\Delta f$ , выделяемая после смесителя равна нулю. При изменении давления на рабочую диафрагму частота соответствующего генератора  $f_2$  изменяется, а разностная частота  $\Delta f$  пропорциональна изменению давления  $\Delta p: |\Delta f| = f_0 \alpha_p \Delta p$ , где:  $f_0 = f_1 = f_2$  – частота при отсутствии давления;  $\alpha_p$  – чувствительность датчика к давлению.

Изменение температуры окружающей среды не приводит к изменению  $\Delta f$  в результате одновременного ухода  $f_1$  и  $f_2$ . Значение чувствительности при использовании диафрагмы из пьезокварца УХ-среза, например, составляет  $(3-70) \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$  (на частоте 100 МГц), отклонение характеристики от линейности менее 0,5 – 1,5%. Некоторое усложнение конструкции датчика, вызванное использованием двух генераторов, полностью оправдано выигрышем в термостабильности. В ряде применений ПАВ-датчики выполняются по схеме с фазовым выходом [3]. Простейшая схема на рис. 1, а содержит единственную линию задержки и генератор опорной частоты.

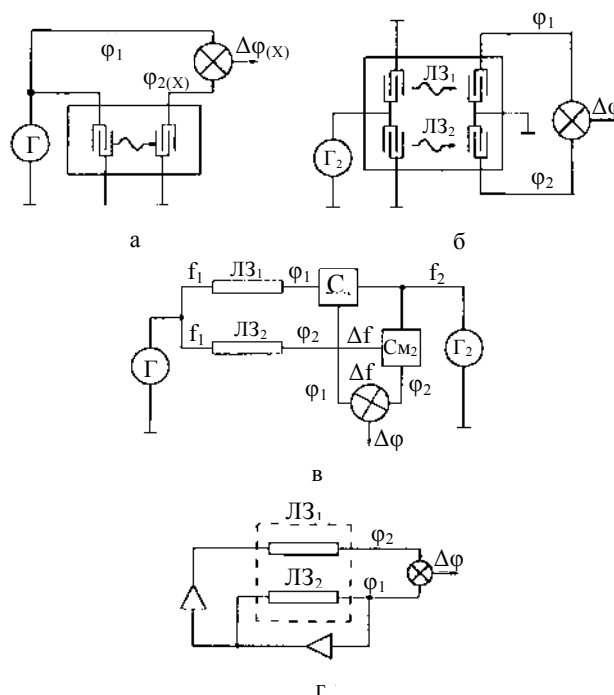


Рис. 1. Схема ПАВ датчика с фазовым выходом

Фазометр измеряет набег фазы  $\Delta\varphi$  между входом и выходом. Недостаток схемы – зависимость задержки и разности фаз  $\Delta\varphi$  не только от полезного воздействия на ЛЗ, но и от дестабилизирующих факторов, например, температуры. Этот недостаток в значительной мере устраняется в дифференциальных схемах (рис. 1, в). В схеме на рис. 1, б одна из ЛЗ является рабочей, перестраиваемой измеряемым воздействием, вторая – опорная. Благодаря тому, что ЛЗ размещены на одной подложке и коллинеарны, их реакция на температурные воздействия, приводящие к фазовым сдвигам, практически идентична.

По дифференциальному принципу построена и схема на рис. 1, в. Однако здесь сравнение фаз осуществляется для сигналов низкой частоты. Это дает заметное повышение в точности измерения фазы по сравнению с измерениями на ВЧ. Перенос сигналов в низкочастотную часть спектра осуществляется введением дополнительного генератора и смесителей  $С_{м1}$  и  $С_{м2}$ , выделяющих сигналы разностной частоты  $\Delta f = f_1 - f_0$ . В дифференциальной схеме на рис. 1, г исключены внешние задающие генераторы. Одна из ЛЗ, например, опорная ЛЗ<sub>1</sub> вместе с усилителем образует автогенератор, подключенный к входу рабочей ЛЗ<sub>2</sub>. Такое построение позволяет упростить схему датчика. Для оценки чувствительности фазовых ПАВ-датчиков учтем, что для ПАВ-приборов эффекты модуляции размеров и скоростей распространения лежат обычно в пределах в пределах 0,01 – 10%. В тех же пределах варьируется и длина волны ПАВ. Эффективная длина типичного ПАВ-преобразователя составляет несколько сотен длин волн. В результате набег фазы по длине ЛЗ, вызванный изменением ее параметров и пропорциональный числу длин волн, практически составляет единицы и десятки радиан, что при использовании современных цифровых фазометров позволяет реализовать измерения с погрешностью 0,1 – 1%.

ПАВ-датчики с амплитудным выходом практически не используются. Это связано со значительными собственными потерями ПАВ-приборов. В лучших из них потери составляют не менее 5 – 8 дБ, для большинства уровень потерь заметно выше и составляет 15 – 25 дБ. Имеется значительное число факторов, затрудняющих стабилизацию потерь в процессе эксплуатации, что создает принципиальные ограничения для реализации преобразователей с амплитудным выходом.

Автогенератор с частото задающим элементом на основе ЛЗ либо резонатора на ПАВ-основа частотных ПАВ-датчиков, которые строятся по дифференциальной схеме.

В генераторах с ЛЗ на ПАВ используется принцип рециркуляции. Схема генератора приведена на рис. 2. Для поддержания колебаний в такой схеме необходимо, чтобы на частоте генерации усилитель обладал коэффициентом передачи  $W_y(j, \omega)$ , достаточным для компенсации потерь в ЛЗ  $W_{ЛЗ}(j, \omega)$ , то условие генерации записывается как

$$|W_y W_{ЛЗ}| \geq 1. \tag{1}$$

Набег фазы разомкнутой цепочки ЛЗ-усилитель на частотах генерации должен быть равен или кратен  $2\pi$ :

$$\varphi_{ЛЗ} + \varphi_y = 2\pi n (n = 1, 2, \dots), \tag{2}$$

где  $\varphi_{ЛЗ}$  и  $\varphi_y$  – набег фаз в ЛЗ и усилителе соответственно. В общем случае условия генерации могут быть выполнены одновременно для нескольких частот. Стабилизирующая роль частото задающего элемента (здесь ЛЗ) определяется крутизной фазовой характеристики на частотах вблизи рабочей частоты этого генератора. Передаточная функция ЛЗ

$$|W_{ЛЗ}(j\omega)| = k \frac{\sin x_1}{x_1} \frac{\sin x_2}{x_2}. \tag{3}$$

Здесь  $k$  – коэффициент передачи ЛЗ;  $x_1 = \pi N_1(f - f_0)/f_0$ ;  $x_2 = \pi N_2(f - f_0)/f_0$ ;  $N_1$  и  $N_2$  – количество пар электродов в преобразователях. Рассматривая ЛЗ как элемент, вносящий запаздывание  $\tau$  в передачу сигнала с входного ВШП на выходной, можно записать его фазовую характеристику

$$\varphi_{ЛЗ} = -\omega\tau - \pi. \tag{4}$$

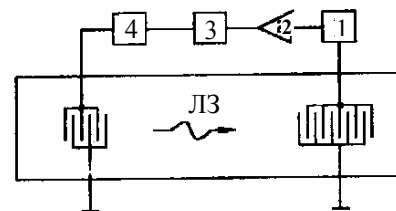


Рис. 2. Генератор с линией задержки на ПЛВ: 1, 4 – согласующие четырехполюсники; 2 – широкополосный усилитель; 3 – частотно-избирательная схема

Набор возможных частот колебаний в замкнутом контуре ЛЗ-усилителя

$$\omega_n = \frac{(2n - 1)\pi - \varphi_x}{\tau}. \tag{5}$$

Таким образом, спектр оказывается линейчатым. Расстояние между соседними спектральными линиями постоянно и равно

$$\Delta\omega = \omega_n - \omega_{n-1} = \frac{1}{\tau} = \frac{v}{l}. \tag{6}$$

В большинстве практических случаев необходимо обеспечивать одномодовый режим генерации, для чего нужно создать предпочтительные условия для поддержания незатухающих колебаний (рециркуляции) в системе на одной из частот. С учетом условия баланса амплитуд необходимо удовлетворить систему неравенств

$$\begin{aligned} KK_y \frac{\sin x_1}{x_1} \frac{\sin x_2}{x_2} &\geq 1; \omega = \omega_N; \\ KK_y \frac{\sin x_1}{x_1} \frac{\sin x_2}{x_2} &< 1; \omega = \omega_{n-1}; \omega \geq \omega_{N+1}. \end{aligned} \tag{7}$$

Совместное решение неравенств (7) определяет условие моночастотности ПАВ-генератора:

$$N_1 = N \text{ либо } N_2 = N. \quad (8)$$

Из соотношений (7) и (8) следует, что длина акустического пути должна удовлетворять условию

$$l = N \frac{2\pi v}{\omega} = N\lambda_0, \quad (9)$$

где  $\lambda_0$  – длина ПАВ на частоте генерации.

Таким образом, достаточным условием моночастотности является равенство протяженности одного из ПАВ-преобразователей длине акустического пути. В таком случае все остальные возможные генерации находятся в области нулевого коэффициента передачи структуры. Для компенсации фазовых сдвигов, вносимых усилителем и согласующими каскадами, необходимо выбирать длину акустического пути  $l$ , удовлетворяющую условию

$$l = N\lambda_0 - \Delta l; \quad \Delta l = \frac{(-\pi + \varphi\omega)V}{\omega_N}. \quad (10)$$

Кроме основных элементов – усилителя и ПАВ-ЛЗ (или ПАВ-резонатора) – в схему генератора могут входить согласующие четырехполосники и частотно-избирательные элементы, обеспечивающие модовую селекцию. Элементы согласования и селекции выполняются либо на пассивных компонентах, либо с использованием избирательных усилителей. Существуют схемы однорезонаторных ПАВ-генераторов с включением резонатора в цепи обратной связи, между коллектором и эмиттером, между базой и эмиттером с цепями нейтрализации статической емкости. Дифференциальные автогенераторные схемы ПАВ-датчиков содержат два автогенератора, смеситель и фильтр низких частот. Особенность схемных решений – применение тщательной развязки выходов автогенераторов с помощью дополнительных усилителей. В случае генераторов на ПАВ нестабильность усилителя примерно в равной степени варьирует частоту обоих плеч дифференциальной схемы, что снижает дрейф выходного сигнала. ПАВ-генераторы вследствие низкой добротности частотоподающих элементов в значительно большей степени дрейфуют из-за вариации параметров усилительных и согласующих каскадов. В этой связи требуется обеспечить высокую степень стабилизации питающих напряжений.

Для надежной реализации различных схемных решений необходим учет термочувствительности и тензочувствительности ПАВ-приборов.

В основе температурной чувствительности электрических характеристик ПАВ-приборов лежат эффекты изменения геометрических размеров, плотности и других свойств материалов звукопровода. Особенностью ПАВ-приборов является существенное влияние на температурные характеристики свойств пленочных преобразователей и неоднородностей, формируемых на поверхности подложки, что объясняется сосредоточиванием энергии ПАВ в основном вблизи границы раздела подложки и покрытий. Вклад от изменения свойств в этой зоне является определяющим.

В первом приближении температурный коэффициент времени задержки  $T_\tau$  определяется как

$$T_\tau = \frac{1}{\tau} \frac{\Delta \tau}{\delta t^0} = \alpha - T_U, \quad (11)$$

где  $\alpha = \frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\delta t^0}$  – ТКЛР в направлении длины ЛЗ, а

$T_U$  – температурный коэффициент скорости ПАВ.

Таким образом, для определения  $T_\tau$  необходимо знать температурную зависимость скорости ПАВ и величину  $\alpha$ . Если известны ориентация подложки ( $\varphi$ ,  $\theta$ ) и направление распространения, то определение  $\alpha$  не вызывает трудностей. Сложней обстоит дело с определением  $T_U$ . Как показали многочисленные исследования [1 – 3], температурная зависимость времени задержки для ЛЗ на ПАВ может быть представлена в виде полинома третьей степени

$$\tau(t) = \tau(t_0) \left[ 1 + \sum_{n=1}^3 T_\tau^{(n)} (t - t_0)^n \right]. \quad (12)$$

Аналогично для ПАВ-резонатора температурная зависимость частоты может быть представлена как

$$f(t) = f(t_0) \left[ 1 + \sum_{n=1}^3 T_f^{(n)} (t - t_0)^n \right]. \quad (13)$$

При разработке термостабильных ПАВ-приборов в требуемом диапазоне температур  $T_\tau$  и  $T_f$  должны обращаться в нуль. Имеется большое число срезов кварца, удовлетворяющих этим требованиям. Простейшим термостабильным является одноповоротный ST-срез кварца, у которого подложка развернута вокруг оси X на угол, близкий к  $42^\circ 30'$ , а волна распространяется вдоль оси X. Для ST-среза  $T_f^{(1)} = 0$ ;  $T_f^{(2)} = -39,6 \cdot 10^{-9} \text{ K}^{-2}$ ;  $T_f^{(3)} = -58,3 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-3}$ . В плоскости Y-среза имеются два направления распространения, для которых температурный коэффициент задержки равен нулю, однако практически они не используются из-за неудовлетворительных характеристик преобразователей при работе в этих направлениях. Между Y и ST-срезами имеется ориентация, развернутая примерно на  $+34^\circ$ , которая обладает важным свойством: для нее по двум взаимоперпендикулярным направлениям температурный коэффициент задержки равен нулю, а скорости ПАВ равны между собой. Этот срез представляет собой практический интерес при реализации дифференциальных датчиков механических величин.

Изменение параметров ПАВ при воздействии на подложку механических нагрузок порождаются, как и в случае температурных воздействий, изменением геометрических размеров подложек, а также упругих констант и плотности, ответственных за вариации скорости ПАВ.

Чувствительность ПАВ к механическим воздействиям оценивают коэффициентами силовой чувствительности  $K_\sigma$ , тензочувствительности  $K_\sigma$  и т.п. (для пьезокварца  $K_\sigma \cong (1 - 5) \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$ ).

Схема прямого нагружения ПАВ-преобразователя усилиями, лежащими в плоскости подложки,

используется редко, поскольку для получения девиаций 0,1% требуются значительные нагрузки. Тех же эффектов при меньших усилиях легко достичь применением консольных конструкций, обеспечивающих высокую линейность. Эффект от механического воздействия определяется ориентацией и формой подложек, направлением распространения волны, характером прикладываемой нагрузки. В датчиках механических величин чаще других используют ПАВ-приборы У и ST -среза.

### Выводы

Проведен обзор характеристик элементов и устройств микроэлектроники, на основе которого можно сделать следующие выводы:

1. Достаточным условием моночастотности является равенство протяженности одного из ПАВ-преобразователей длине акустического пути.
2. Для определения температурного коэффициента времени задержки  $T_{\tau}$  необходимо знать температурную зависимость скорости ПАВ и величину  $\alpha$ . Если известны ориентация подложки ( $\varphi$ ,  $\theta$ ) и направление распространения, то определение  $\alpha$  не вызывает трудностей.

### Список литературы

1. Малов В.В. Пьезорезонансные датчики. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
2. Материалы конференции „Акустоэлектронные устройства на поверхностных акустических волнах”. – Черкассы, 1990. – 120 с.
3. Рагульский К.М., Снитко В.Ю., Мизарена В.И. Виброизмерительные преобразователи на акустических волнах // Виброметрия. – М.: МДНТИ. – 1982. – С. 75-77.
4. Функціональна мікроелектроніка: Прилади із рядовими пакетами, циліндричні магнітні домени, давачі: Навч. посібник / Ю.О. Гордієнко, М.І. Сліпченко, В.А. Хорунжий та ін. – К.: ІСДО, 1966. – 152 с.
5. Како Н., Ямане Я. Датчики и микроЭВМ: Пер. с япон. / Под ред Т.Н. Горбунова. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 120 с.
6. Поляков П.Ф., Хорунжий В.А. Акустоэлектроника: Спр. пособие / Под ред П.Ф. Полякова. – Х., 2005. – 852 с.
7. Поверхностные акустические волны / Под. ред. А. Олинера. – М.: Мир, 1981. – 390 с.

Поступила в редколлегию 6.03.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. В.В. Поповский, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.