

МОНОЛИТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ СВЧ-ДИАПАЗОНА С ЧАСТОТОЗАДАЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

А.Галдецкий, Б.Калиникос,
А.Королев, В.Мальцев,
В.Мякинков, Ю.Рудый

Простые, надежные и недорогие частото задающие компоненты (фильтры, резонаторы, линии задержки) на основе поверхностных акустических волн (ПАВ) находят широкое применение во многих областях электронной техники. Действительно, сегодня ни один телевизор не обходится без одного или нескольких фильтров на ПАВ стоимостью каждый ~0,5 долл. Однако частотный диапазон этих компонентов не превышает 1 ГГц вследствие роста затухания поверхностной волны. Кроме того, при повышении частоты необходимо уменьшать период структуры электродов возбуждителя акустических волн до субмикронных размеров. А это значительно удорожает производство. Так, в периодической структуре фильтра на ПАВ на частоту 2,5 ГГц ширина “пальцев” в “гребешке” и расстояние между ними должно быть равно 0,35 мкм, и эти размеры следует выдерживать с точностью не менее 0,05 мкм. А потребность в СВЧ частото задающих элементах для средств радиолокации и связи очень высока, поскольку именно они определяют характеристики, влияющие на фазовые шумы, дальность действия, разрешающую способность радиосистемы в целом. Достаточно упомянуть такие области применения этих устройств, как оборудование беспроводных сетей стандарта 802.11a/b/g, рассчитанные на диапазоны частот 5,3 и 2,4 ГГц, соответственно, СВЧ-системы многоточечного доступа (LMDS) и многие другие гражданские и военные системы. По этим причинам интерес представляют частото задающие элементы на основе объемных акустических волн [1], рабочая частота которых не ограничена шагом системы электродов.

РЕЗОНАТОРЫ НА ОСНОВЕ ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Резонатор на основе высших типов объемных акустических волн (НВАР – high overtone bulk acoustic resonator) представляет собой подложку, называемую звукопроводом, с нанесенными на нее пленками пьезоэлектрика, например ZnO, и двух электродов. При подаче на электроды СВЧ-сигнала в пленке возбуждаются объемные акустические волны, которые распространяются в звукопроводе. Звукопровод толщиной ~100 мкм является высокочастотным резонатором Фабри-Перро с густым спектром резонансных частот (с шагом ~10 МГц) –

$$f_n = \frac{nv}{2d},$$

где v – скорость звука в подложке, d – ее толщина. Собственная добротность таких резонансов составляет 20000–60000 в зависимости от материала звукопровода. Важно отметить, что подложкой-звукопроводом может служить GaAs-пластина, что позволяет в едином технологическом цикле формировать как частото задающие элементы, так и схемы обработки СВЧ-сигнала (усилители, смесители, детекторы). В результате возможно компенсировать потери фильтров и создавать компактные, монолитные стабилизированные генераторы СВЧ-сигнала или целиком СВЧ-приемники.

Созданный по такой технологии резонатор имеет чередующиеся параллельные и последовательные резонансы. При последовательном включении в качестве фильтра (рис. 1) используется последовательный резонанс. Однако иногда удобнее использовать параллельный резонанс в копланарной конструкции монолитной интегральной схемы (МИС) (рис. 2).

Важный параметр подобных компонентов, используемых в качестве частото задающих элементов высокостабильных генераторов, – крутизна фазочастотной характеристики. Для повышения этого параметра можно применять комбинированные схемы включения резонаторов, в которых фазовые сдвиги отдельных резонаторов складываются (рис. 3).

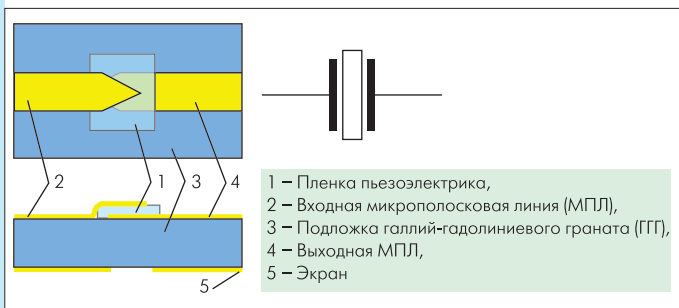


Рис. 1. Резонатор на основе НВАР и схема его включения

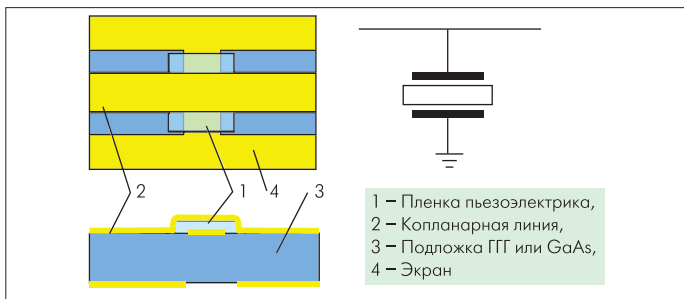


Рис.2. Резонатор на основе НВАР в копланарной конструкции МИС и схема его включения

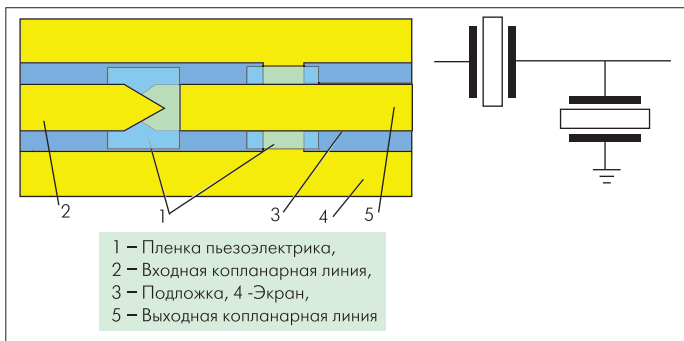


Рис.3. Двухкаскадный фильтр с повышенной крутизной ФЧХ и схема его включения

ОДНОЧАСТОТНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Резонаторы на основе объемных акустических волн с набором резонансов пригодны для применения в стабилизированных генераторах сетки частот, генераторах таймерных импульсов и т.п. Однако более интересны одночастотные резонаторы или фильтры. Одночастотный режим можно реализовать несколькими способами. Один из перспективных – комбинация многочастотного НВАР-резонатора и фильтра на основе магнитоэлектрических волн (МСВ) (рис.4) [2, 3]. При таком включении резонатор формирует сетку резонансов, а менее добротный фильтр выбирает из нее одну резонансную частоту. При этом рабочую частоту можно перестраивать в широких пределах, меняя уровень подмагничивания МСВ-элемента.

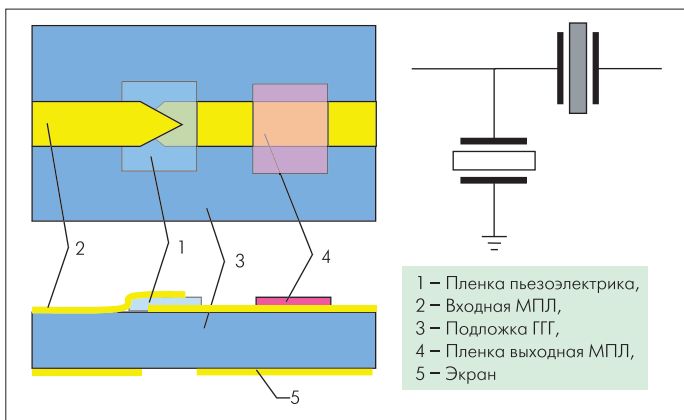


Рис.4. Резонатор на основе НВАР и фильтра на МСВ и схема его включения

Другой интересный способ получения одночастотного режима – использование связанных НВАР-резонаторов с разным шагом сетки частот (рис.5). Для этого на обратной стороне подложки под одним из резонаторов вытраивается углубление. Поскольку резонансные частоты резонаторов удовлетворяют соотношению

$$f_n = \frac{nv}{2d},$$

можно легко получить выражение для первой общей резонансной частоты

$$F = \frac{v}{\Delta d},$$

где Δd – глубина углубления. Заметим, что резонансная частота не зависит от толщины подложки.

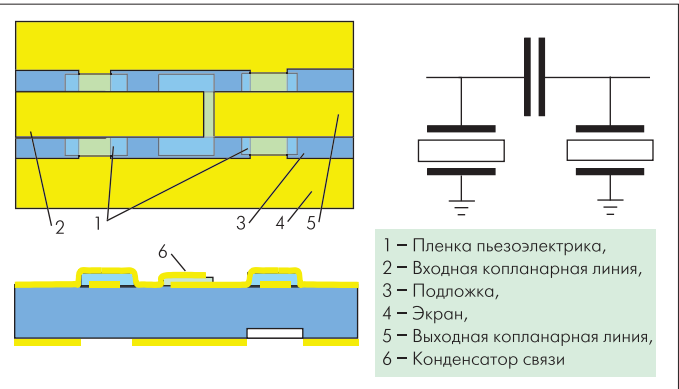


Рис.5. Двухкаскадный одночастотный НВАР-фильтр и схема его включения

Возможен и еще один способ изготовления одночастотного резонатора – с помощью МЭМС-технологии [4, 5]. Заключается он в следующем. На поверхность подложки наносятся нижний электрод, пьезоэлектрическая пленка и верхний электрод. Затем в подложке под резонатором вытраивается полость, позволяющая сформировать из пьезоэлектрической пленки подвешенную мембрану-звукопровод и обеспечивающая ее акустическую изоляцию (рис.6). Резонансные частоты определяются толщиной мембраны и при этом сильно разнесены.

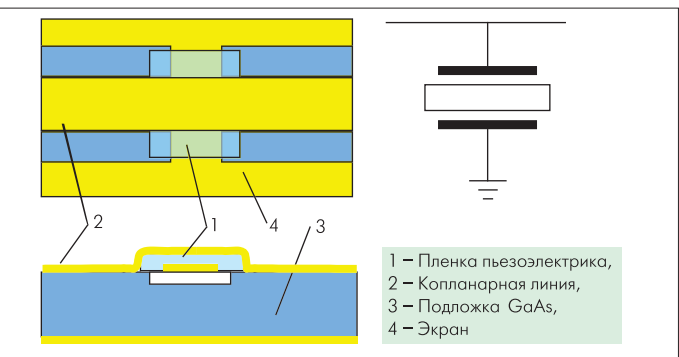


Рис.6. Резонатор на основе НВАР с подвешенным звукопроводом

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЗОНАТОРА НА ОСНОВЕ НВАР

Для анализа работы резонатора представим слои, составляющие резонатор, как совокупность электромеханических схем и опишем их работу на основе законов Кирхгофа. Это позволит интерпретировать влияние различных факторов на параметры резонатора в целом.

Эквивалентная схема плоскопараллельной пластины толщиной d с площадью сечения A имеет механический импеданс Z , равный $Z = \rho VA$, где ρ – плотность материала пластины, V – скорость акустической волны в ней. С другой стороны, акустический импеданс равен отношению силы

$$F = -AT \text{ к колебательной скорости } \dot{U} = \frac{\partial U}{\partial t},$$

где T – упругое напряжение, U – смещение.

Распространение акустической волны в пластине можно выразить соотношением

$$U = U_{\text{пад}} + U_{\text{отр}} = (ae^{-jkx} + be^{jkx})e^{j\omega t},$$

где a – амплитуда падающей волны, b – амплитуда отраженной волны, $k = k' - jk''$ – комплексный волновой вектор. Из выражений для скорости волны в сечениях $x_1 = 0$, $x_2 = d$ (рис.7) получаем амплитуды волн:

$$a = \frac{\dot{U}_1 e^{jkd} - \dot{U}_2}{j\omega(e^{jkd} - e^{-jkd})},$$

$$b = \frac{\dot{U}_2 - \dot{U}_1 e^{-jkd}}{j\omega(e^{jkd} - e^{-jkd})}.$$

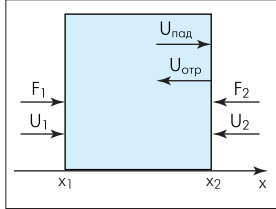


Рис.7. Модель акустических колебаний в плоскопараллельной пластине

В то же время, плоскопараллельную пластину можно охарактеризовать с помощью выражения для упругой силы:

$$F = CA \frac{\partial U}{\partial x} = -jCAk(ae^{-jkx} - be^{jkx}) = Z(j\omega ae^{-jkx} - j\omega be^{jkx}),$$

где C – модуль упругости материала пластины, Z – акустический импеданс. Таким образом, получим следующую систему уравнений сил:

$$F_1 = \frac{Z}{\Delta} [\dot{U}_1(e^{jkd} + e^{-jkd}) - 2\dot{U}_2],$$

$$F_2 = \frac{Z}{\Delta} [2\dot{U}_1 - \dot{U}_2(e^{jkd} + e^{-jkd})] \quad \Delta = (e^{jkd} + e^{-jkd}).$$

Если провести электромеханическую аналогию, сила соответствует напряжению, а скорость – току. Поэтому приведенной выше системе уравнений (описывающей непьезоэлектрический слой резонатора) соответствует эквивалентная схема (на рис.8), где

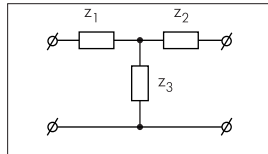


Рис.8. Эквивалентная схема пластины без пьезоэффекта

$$Z_1 = Z_2 = Z \frac{e^{jkd} - 1}{e^{jkd} + 1},$$

$$Z_3 = Z \frac{2}{e^{jkd} - e^{-jkd}}.$$

В эквивалентную схему пластины с пьезоэлектрическими свойствами добавляются электромеханический трансформатор с коэффициентом трансформации N и емкости C_0 (рис.9). При этом

$$C_0 = \epsilon\epsilon_0 \frac{nV}{2d},$$

$$N = \frac{C_0 l}{\epsilon\epsilon_0},$$

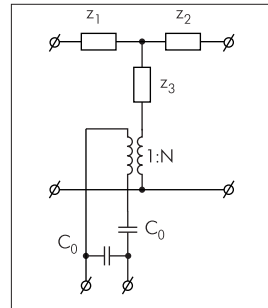


Рис.9. Эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя

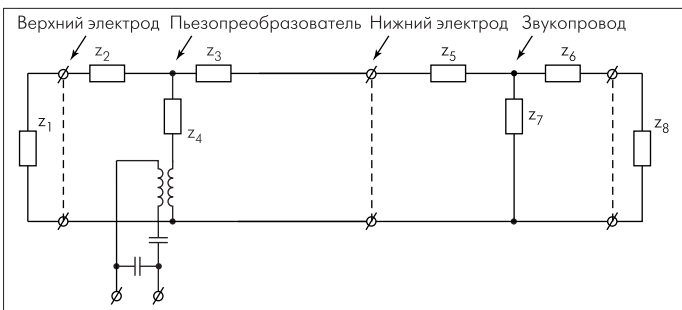


Рис.10. Эквивалентная схема акустического резонатора

где l – пьезоэлектрический модуль, а ϵ – диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрика. Таким образом, эквивалентная схема акустического резонатора может иметь вид, показанный на рис.10. Здесь

$$Z_1 = Z_B \frac{e^{2jk_B d_B} - 1}{e^{2jk_B d_B} + 1}, \quad Z_2 = Z_3 = Z_n \frac{e^{jk_n d_n} - 1}{e^{jk_n d_n} + 1},$$

$$Z_4 = Z_n \frac{2}{e^{jk_n d_n} - e^{-jk_n d_n}}, \quad Z_5 = Z_6 = Z_H \frac{e^{jk_H d_H} - 1}{e^{jk_H d_H} + 1},$$

$$Z_7 = Z_H \frac{2}{e^{jk_H d_H} - e^{-jk_H d_H}}, \quad Z_8 = Z_3 \frac{e^{2jk_3 d_3} - 1}{e^{2jk_3 d_3} + 1},$$

где k_B , k_n , k_H и k_3 – волновые числа верхнего электрода, пьезоэлектрика, нижнего электрода, звукопровода, соответственно; d_B , d_n , d_H , d_3 – толщины слоев; Z_B , Z_n , Z_H , Z_3 – импедансы слоев. Эта модель позволяет провести теоретический анализ акустического резонатора на высших типах объемных акустических волн: определить влияние толщины электродов, пьезоэлектрической пленки, площади их апертуры и т. п. на рабочую частоту, добротность и величину связи резонатора, а также определить оптимальные соотношения характеристик слоев.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ЧАСТОТЗАДАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Основная проблема при реализации частотозадающих элементов – обеспечение точной подгонки рабочей частоты и ее температурного коэффициента. Возможны несколько путей ее решения. Подгонка частоты обеспечивается прецизионным травлением нижней стороны подложки с контролем по резонансной частоте резонатора. Окончательную доводку можно осуществлять путем осаждения тонкого слоя диэлектрика на нижнюю сторону подложки.

Температурный коэффициент частоты резонатора определяется температурными уходами толщины подложки и скорости звука. Наиболее очевидный способ температурной стабилизации частоты – термостатирование подложки с использованием интегральных датчика температуры и микронагревателя. Однако это связано с дополнительным энергопотреблением. В качестве альтернативы можно использовать метод управления свойствами пьезоэлектрической пленки и/или подложки путем подачи на нее напряжения смещения. В этом случае энергопотребление отсутствует.

Рассмотренные конструкции частотозадающих элементов позволяют создавать на арсенидгаллиевой подложке в едином технологическом процессе высокостабильные СВЧ-генераторы или приемники в интегральном исполнении. При этом применяемые конструктивные решения пригодны для реализации температуростабильных, перестраиваемых устройств. Область использования таких монолитных схем чрезвычайно широка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев Ю.В., Мансфельд Г.Д. Резонаторы и фильтры сверхвысоких частот на объемных акустических волнах: современное состояние и тенденции развития. – Радиотехника, 2003, № 8, с.42–54.
2. Рудый Ю.Б., Ершов В.В., Мальцев В.А., Афанасьев А.И. Высокостабильные перестраиваемые миниатюрные СВЧ-генераторы на резонаторах, работающих на высших типах объемных акустических и магнитостатических волн. – Электронная техника. Сер. СВЧ-техника, 1998, вып.2(472), с.45–47.
3. АС СССР 1648233. Магнитоперестраиваемый СВЧ-резонатор/Афанасьев А.И., Рудый Ю.Б. М. Кл. Н 03 Н 9/00, 1989.
4. US patent #4320365, H03H 9/17 H03H 9/205, H03H 9/50, H03H 9/56. Fundamental longitudinal thickness mode bulk wave resonator. Black J.F., Courtney R.A. et al. 1982.
5. Stokes R.B., Crawford J.D. X-band thin film acoustic filters on GaAs. Digest IEEE MTT Symposium 1992, p.157–160.