Радиочастотные элементы и устройства на основе компонентов микросистемной техники

Н. НЕЧАЕВА, канд. техн. наук, г. Москва

Активно разрабатываемые перспективные компоненты, служащие основой различных устройств, — МСТ резонаторы. В общем случае такой резонатор содержит подвижную (резонирующую) часть и один или несколько электродов, на которые поступает переменное напряжение сигнала, а иногда и постоянное управляющее напряжение. Электростатические силы, создаваемые переменным электрическим полем, вызывают колебания подвижной части резонатора. Его резонансная частота определяется свойствами материала, формой и размерами. По своей конструкции МСТ резонаторы можно разделить на группы с радиальными, продольными и поперечными колебаниями подвижного элемента.

Конструкция кольцевого резонатора показана на **рис. 11** [10]. При внешнем диаметре кольца 192, ширине 29 и толщине 3,5 мкм его резонансная частота — приблизительно 100 МГц. Для частоты 1 ГГц эти размеры соответственно равны 61,9 и 3,5 мкм. Дисковый резонатор (**рис. 12**) состоит из диска, закреплённого на одном (центральном) держателе над подложкой на расстоянии 0,6 мкм, двух входных электродов (электроды 1 и 2 — на рис. 12), окружающих диск по его периметру, и одного выходного (электрод 3) [11]. Вследствие малого зазора между электродами и диском возбуждение резонатора реализовано с помощью электрического поля. Для диска диаметром 34 и толщиной 2 мкм резонансная частота равна 156 МГц, добротность — немногим более 9.

Широко распространены балочные МСТ резонаторы с поперечными или продольными колебаниями элемента (упрощённая конструкция одного из вариантов показана на **рис. 13** [12]). Основа такого резонатора — балка, концы которой закреплены на подложке. Под ней размещён электрод, он, как и балка, изготовлен из проводящего материала, например легированного кремния. На электрод подают постоянное и переменное напряжение, с помощью последнего возбуждаются механические колебания в балке. В такт с ними изменяется ёмкость между электродом и балкой, что приводит в свою очередь к возбуждению переменного тока в электроде. На **рис. 14** показан такой резонатор на частоту 8,6 МГц. Его размеры: толщина и ширина балки — 8 и 40 мкм соответственно, ширина электрода — 32 мкм, зазор между балкой и электродом — 0,01 мкм [12].

Окончание. Начало см. в "Радио", 2012, № 11

Ещё один вариант МСТ резонатора, но с двумя возбуждающими электродами, показан на **рис. 15** [11]. Здесь резонатор закреплён в двух точках на опорных балках, а с двух его сторон размещены "сигнальные" электроды. При длине резонатора 39,5, ширине 2 и высоте 3 мкм его резонансная частота — около 10,4 МГц. Существуют конструкции МСТ резонаторов, у которых закреплён только один конец балки, добротность таких приборов, как правило, больше.

Рис. 11

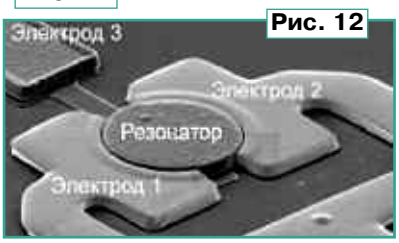

Рис. 12

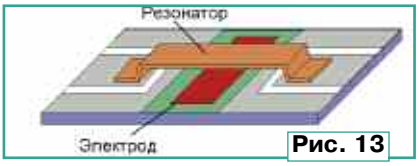

Рис. 13

Рис. 14

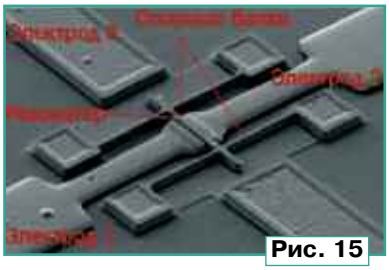

Рис. 15

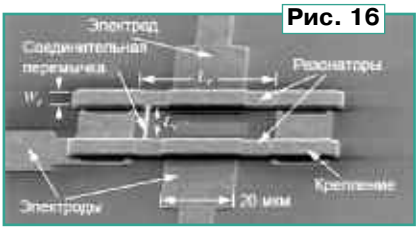

Рис. 16

Диапазон частот, в которых возможна реализация подобных резонаторов, — от нескольких мегагерц до 2 ГГц, причём на частотах более нескольких сотен мегагерц применяют резонаторы, работающие на кратных гармониках. На более высокой частоте (несколько десятков гигагерц) используют резонаторы на основе линии передачи или объёмные резонаторы. Очень важно, что подходящим материалом для таких элементов является кремний, поэтому их можно изготавливать в одном технологическом цикле с другими компонентами, используя стандартную полупроводниковую технологию. Малые размеры резонаторов позволяют существенно уменьшить габариты устройств, в которые они входят. Для повышения добротности резонаторы помещают в герметичные корпусы, заполненные газом с существенно пониженным (по сравнению с атмосферным) давлением.

Для построения генератора резонатор включают в цепь положительной обратной связи усилителя, а для реализации фильтра необходимо обеспечить электрическую или механическую связь между несколькими резонаторами. В качестве примера на **рис. 16** [13] показан двухрезонаторный фильтр с механической связью. Для резонаторов размерами 1,9×8×40 мкм и соединительной перемычки длиной 20,3 и шириной 0,75 мкм центральная частота фильтра равна 7,81 МГц, полоса пропускания — 18 кГц, вносимые потери — 1,5 дБ. На **рис. 17** показана АЧХ этого фильтра.

Первые образцы серийно выпускаемых генераторов на основе МСТ резонаторов отличались относительно низкой термостабильностью частоты и уступали по этому параметру генераторам с кварцевыми резонаторами. Однако в последние годы разработчикам удалось существенно повысить термостабильность, что в сочетании с существенно меньшими габаритами (**рис. 18**) сделало МСТ генераторы более перспективными для применения в различных областях электроники и систем связи.

Компания SiTime выпускает несколько серий программируемых МСТ генераторов различного назначения [14]. В их состав входят генератор образцовой частоты на МСТ резонаторе, система ФАПЧ с программируемым делителем частоты, узел температурной компенсации и некоторые вспомогательные узлы. Причём используются всего несколько видов резонаторов. Для некоторых типов генераторов на этапе производства, по желанию заказчика, возможна установка любой частоты F_0 (в диапазоне рабочих частот) с точностью $10^{-6}F_0$.

Микромощные генераторы серии SiT80xx (1...110 МГц) требуют для питания напряжение от 1,8 до 3,3 В при потребляемом токе 3,5 мА. Перестраиваемые генераторы серии SiT38xx изготавливают на частоты 1...625 МГц, их особенность — возможность изменения

Приём статей: mail@radio.ru
Вопросы: consult@radio.ru
тел. 608-83-05

РАДИО®

частоты F_0 с помощью внешнего управляющего напряжения. В зависимости от типа генератора перестройка может достигать $1{,}6\cdot10^{-3}F_0$. Уход частоты этих генераторов в интервале температуры –40...+85 °С не превышает $5\cdot10^{-5}F_0$. Термокомпенсированные генераторы серии SiT50xx (1...200 МГц) обладают повышенной стабильностью частоты — $10^{-6}F_0$ и возможностью её электронной подстройки в интервале до $5\cdot10^{-5}F_0$. Эти генераторы выпускают в корпусах размерами 0,75×2×2,5, 0,75×2,5×3,2, 0,75×3,2×5, 0,9×5×7 мм. Они отличаются малым джиттером (0,5...1 пс), высокой надёжностью — среднее время наработки на отказ достигает 500 млн ч — и долговременной стабильностью, например, для генератора SiT5302 нормируется уход частоты за 20 лет — он не превышает $\pm4{,}6\cdot10^{-6}F_0$, а также повышенной (по сравнению с кварцевыми генераторами) стойкостью к ударам и виброустойчивостью.

Во многом схожие по конструкции прецизионные синтезаторы частоты на основе МСТ резонаторов, принцип работы которых основан на пьезорезистивном эффекте, представила компания NXP Semiconductors (**рис. 19**) [15]. Компания Integrated Device Technology (IDT) разработала генераторы с МСТ резонаторами на основе пьезоэлектрического эффекта, для их обозначения даже зарегистрирована специальная торговая марка — pMEMS.

Среди других устройств, использующих МСТ компоненты, можно выделить микрофоны. Чаще всего они конденсаторные, чувствительный элемент в них — гибкая проводящая мембрана. Подобные МСТ микрофоны, обладающие хорошими параметрами, выпускают большими партиями. Один из самых миниатюрных — AKU230 компании Akustica [16]. Он относится к четвёртому поколению микрофонов на основе этой технологии. Собственно микрофон, а также аналоговые и цифровые узлы размещены на одном кристалле размерами 0,84×0,84 мм, а размеры всего прибора в корпусе LGA — 1,25×3,76×4,72 мм (**рис. 20**).

Интересный прибор, выполняющий функции теплового переключателя и сочетающий в себе принцип работы полевого транзистора с индуцированным каналом и механического коммутатора, разработали специалисты компании Honeywell [17]. Его назвали MAFET (Mechanically Actuated Field Effect Transistor — механически возбуждаемый полевой транзистор). Упрощённая конструкция такого транзистора показана на **рис. 21**. В отличие от контактных переключателей, например, на основе биметаллических пластин, в этом устройстве использовано электронное переключение. При изменении температуры пластина, изготовленная из материалов с различными коэффициентами линейного расширения и выполняющая функцию затвора, прогибается и при определённом напряжении на затворе притягивается к поверхности кристалла — в подложке между истоком и стоком возникает проводящий канал. Изменяя напряжение на затворе, можно регулировать температуру включения. Такой переключатель отличается надёжностью (до миллиона циклов включение/выключение), низкой ценой и небольшими размерами — его площадь менее 3 мм^2.

Дальнейшее развитие МСТ элементов идёт в сторону уменьшения размеров. Это привело к тому, что их стали измерять в нанометрах, а устройства на таких элементах называть NEMS — NanoElectroMechanical Systems. Здесь взамен традиционного кремния всё шире применяют органические соединения и углеродные нанотрубки. Однако разработки большинства подобных устройств находятся на стадии экспериментальных исследований.

В качестве примера можно привести конструкцию транзистора с механическим переносом электронов [18]. Размеры его активной части не превышают 1 мкм. Между электродами, которые можно условно назвать истоком и стоком, расположен механический маятник, частота колебаний которого определяется внешним переменным напряжением. Как только маятник касается истока, на его поверхность благодаря туннельному эффекту переносится один электрон, который затем аналогичным образом передаётся на сток.

Известный теоретик и популяризатор нанотехнологий Эрик Дрекслер предложил проект механокомпьютера, в котором все логические операции, хранение и обработка информации производятся с помощью последовательных движений системы микроскопических стержней [19]. Прототипом этого устройства является машина Бэббиджа. Дрекслер составил детальное описание компьютера на основе механотранзисторов, причём размеры подобного устройства всего 400×400×400 нм — в 10...15 раз меньше, чем красная кровяная клетка (эритроцит).

И это, конечно, не всё, но из-за ограниченного объёма статьи не удалось рассказать о многих МСТ компонентах и областях их применения. Дополнительную информацию по этой тематике можно найти в Интернете, например, на сайте "Русской ассоциации разработчиков, производителей и потребителей микроэлектромеханических систем" (**http://www.mems-russia.ru**).

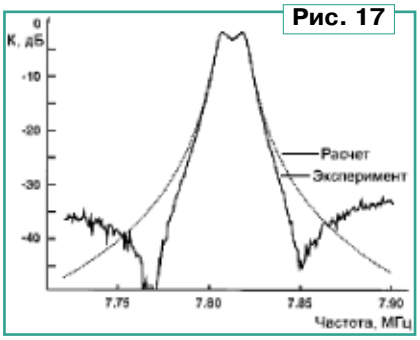

Рис. 17

Рис. 18

Рис. 19

Рис. 20

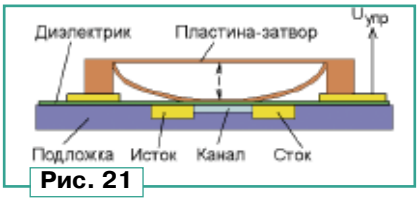

Рис. 21

ЛИТЕРАТУРА

10. **Lee Ki Bang, Ryder Steve, Lee Chih-Chen, Lin Liwei**. Design and fabrication of an annular high frequency resonator. — <**http://www.colorado.edu/engineering/MCEN/MEMSII/Papers/resonator_annular_IMECE.pdf**>.

11. **Hsu Wan-Thai, Clark John R., Nguyen Clark T.-C.** A sub-micron capacitive gap process for multiple-metal-electrode lateral micromechanical resonators. —<**http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.25.4152&rep=rep1&type=pdf**>.

12. **Lin Yu-Wei, Lee Seungbae, Ren Zeying, Nguyen Clark T.-C.** Series-Resonant Micromechanical Resonator Oscillator. — <**http://www.eecs.berkeley.edu/~ctnguyen/Research/ConferencePubs/2003/osc.iedm2003.ywlin.ctnguyen.pdf**>.

13. **Frank D. Bannon, John R. Clark, Clark T.-C. Nguyen**. High-Q HF microelectromechanical filters. — <**http://www.eecs.berkeley.edu/~ctnguyen/Research/ConferencePubs/2000/jssc.ctnguyen.april00.pdf**>.

14. SiTime. Products. Oscillators. — <**http://www.sitime.com/products/products-overview-mems-oscillators**>.

15. NXP demonstrates ultra-compact, high-precision MEMS frequency synthesizer. — <**http://www.nxp.com/news/press-releases/2012/01/nxp-demonstrates-ultra-compact-high-precision-mems-frequency-synthesizer.html**>.

16. Akustica's new AKU230 digital microphone is Bosch-built; includes world's smallest fully integrated MEMS device. — <**http://www.akustica.com/Files/Admin/PDFs/AKU230%20Final2%20%203-30.pdf**>.

17. **Сысоева С.** Введение в High-End сегменты применений МЭМС-технологии. Часть 1. — <**http://www.kit-e.ru/articles/elcomp/2010_10_15.php**>.

18. Наноэлектромеханический одноэлектронный транзистор с "механической рукой". — <**http://old.nanonewsnet.ru/index.php? module=pagesetter&func=viewpub&tid=9&pid=43**>.

19. Появление и развитие MEMS и NEMS-технологии. — <**http://www.galaxy797.net/htech/nano/4/16.htm**>.

тел. 608-83-05
Приём статей: mail@radio.ru
Вопросы: consult@radio.ru