

МЭМС-РЕЗОНАТОРЫ ПРОЦЕСС ПОШЕЛ

В.Майская

Кварцевые резонаторы, появившиеся в 20-е годы прошлого столетия, с 1940-х годов поддерживают работу средств регулировки частоты бесчисленных электронных систем – от генераторов тактовых импульсов и обычных часов до радиостанций и мобильных систем связи, компьютеров и телекоммуникационных систем. Не имеющие себе равных по температурной стабильности кварцевые резонаторы до сих пор остаются последним критическим компонентом, который не интегрирован в кремниевую микросхему. С начала 1980-х годов специалисты в области микроэлектроники пытаются разработать пригодные для их замены резонаторы на основе МЭМС-технологии. Но создать МЭМС-резонаторы, не уступающие кварцевым элементам по температурной стабильности и рабочим характеристикам оказалось не просто. Не говоря уже о трудности их изготовления. В последние годы некоторые изготовители МЭМС-резонаторов смогли решить проблемы обеспечения высокой температурной стабильности и низкого энергопотребления, монтажа в корпус и интеграции с КМОП-схемами. И теперь можно ожидать, что МЭМС-резонаторы начнут активно заменять кварцевые элементы, реализуя такие преимущества, как малые габариты, низкая стоимость, высокие надежность, ударо- и вибропрочность.

Хотя потребность в МЭМС не столь велика как в полупроводниковых микросхемах, это не значит, что их технология не развивается. В середине первого десятилетия 21 столетия были разработаны и представлены на рынке разнообразные МЭМС-приборы, в результате чего МЭМС-сектор рынка электронных приборов пережил спад деловой активности конца десятилетия легче, чем полупроводниковый сектор. Согласно оценкам компании Yole Development, рынок МЭМС за период с 2009 по 2015 год возрастет с ~7,5 млрд. долл. до 19 млрд. И немалая его часть придется на долю МЭМС-резонаторов, применяющихся в блоках синхронизации, а также в химических и биологических сенсорах.

Росту продаж МЭМС-блоков синхронизации способствуют успешные усилия изготовителей

МЭМС-резонаторов по устранению их недостатков (влияние температуры на характеристики, в первую очередь на частоту и точность, сложность изготовления) и решению проблем, присущих системам на основе кварцевых резонаторов (в первую очередь уменьшение размеров и снижение стоимости). Но господствующие на рынке поставщики кварцевых резонаторов не уступят рынок без борьбы. И здесь возможна агрессивная война цен. Чтобы победить, изготовители МЭМС-резонаторов стремятся не столько снижать их стоимость, сколько улучшать характеристики, совершенствовать методы корпусирования и по возможности применять новые материалы.

До последнего времени высокое полное сопротивление МЭМС-резонаторов

с электростатическим преобразованием на частоту в диапазоне гигагерц препятствовало их широкому применению, несмотря на высокий фактор качества Q (показатель, характеризующий энергетические потери резонатора). Это связано с тем, что на высокой резонансной частоте полное сопротивление кремниевых МЭМС растет, и сигналы практически не регистрируются. С другой стороны, полное сопротивление пьезоэлектрических резонаторов мало, но фактор качества не удовлетворителен. Для решения проблем электростатических МЭМС-преобразователей либо уменьшается ширина зазора консоли при сохранении требуемого большого аспектного соотношения, либо зазор заполняется диэлектриком с высокой диэлектрической проницаемостью, либо вместо емкостного преобразования используется пьезоэлектрическое. Однако полное сопротивление и таких усовершенствованных резонаторов увеличивается с уменьшением их размеров. К тому же предлагаемые методы приводят к усложнению процессов изготовления и интеграции резонаторов со стандартными КМОП-схемами.

Тем не менее, на конференции IEDM 2007 специалисты компании NXP сообщили о разработке кремниевого пьезорезистивного МЭМС-резонатора на рекордную частоту 1,1 ГГц. Его работа основана на регистрации перемещений кремниевой консоли резонатора, возникающих под действием электростатического поля, с помощью пьезорезистивных свойств кремния [1]. Резонатор изготавливался реактивным ионным травлением пленки кремния n -типа толщиной 1,5 мкм, нанесенной на утопленный слой оксида. Консоль формировалась изотропным травлением утопленного оксида.

В результате последовательного четырехкратного масштабирования структуры резонатора были получены значения резонансной частоты 18, 74, 290 и 1,094 МГц. При этом, по утверждению разработчиков, эффективное полное сопротивление при резонансе было на несколько порядков меньше, чем у резонаторов с емкостным преобразованием. Таким образом, показана возможность реализации миниатюрных масштабируемых высокочастотных МЭМС-резонаторов и генераторов без существенного ухудшения их характеристик.

Интересные методы получения МЭМС-резонаторов с высоким Q и низким полным сопротивлением предложены исследователями Калифорнийского университета в Беркли [2]. Для создания электростатических резонаторов

с зазором между электродом и резонатором менее 30 нм, с приемлемым низким полным сопротивлением и высоким Q было предложено частично заполнять зазор диэлектриком с высокой диэлектрической постоянной, наносимым послойным атомным осаждением, или уменьшать его размер с помощью процесса формирования силицидов. Последний метод позволил формировать зазоры менее 30 нм с требуемым высоким аспектным соотношением путем отжига структуры в течение от нескольких секунд до нескольких минут независимо от горизонтальных размеров прибора. При формировании зазора путем силицидирования не нужно проводить процесс травления.

Еще два метода, разработанные в университете в Беркли, основаны на попытке обойти тот факт, что фактор качества тонкопленочных пьезорезистивных резонаторов на основе пленок нитрида алюминия меньше, чем у электростатических на ту же частоту. Проведенные исследования показали, что потери энергии связаны не столько с пьезоэлектриком, сколько с контактирующим с ним электродом. В результате был предложен так называемый емкостной пьезоэлектрический резонатор, в котором электроды отделены от консоли зазором в несколько нанометров. Такой зазор не нарушает требуемое для хорошей электромеханической связи электрическое поле, но устраняет потери, вносимые электродами. Утверждается, что Q такой структуры в девять раз больше, чем у обычных пьезоэлектрических AlN-резонаторов.

Согласно другому методу повышения фактора качества пьезоэлектрических резонаторов, AlN-консоль с нанесенным на нее электродом соединяется с «безэлектродной» консолью. В такой структуре общая энергия «повышает» Q резонатора с нанесенным на него электродом. Фактор качества емкостных пьезоэлектрических резонаторов

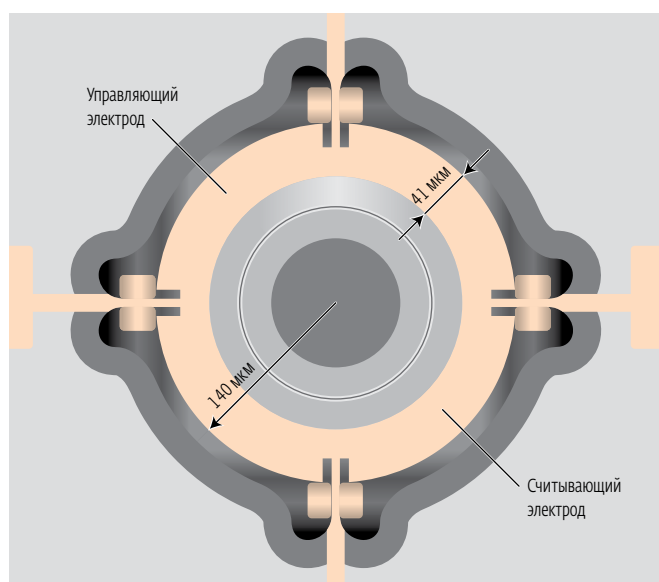


Рис.1. Фильтр с АIN МЭМС-резонатором

обоих типов превышал 10К. Экстраполяция данных измерений показала, что Q "безэлектродных" резонаторов лежит в диапазоне от 14040 до 15795.

По мнению разработчиков, МЭМС-резонаторы с предложенной структурой, характеризующиеся высоким фактором качества и малым полным сопротивлением, найдут применение в системах связи, в том числе и мобильных, а также в РЛС.

Разработку МЭМС-резонаторов для систем обеспечения национальной безопасности и для ядерного оружия ведут специалисты Национальной лаборатории в Сандиа Министерства энергетики США [3]. Ими создан пьезоэлектрический АIN-резонатор на частоту 1-3 ГГц (рис.1), который можно изготавливать с помощью оборудования и материалов, разработанных для формирования пленочных объемно-акустических резонаторов (Film Bulk Acoustic Resonators, FBARS). Подобно FBARS пьезоэлектрический механизм преобразования резонаторов позволяет создавать на их основе фильтры с низкими вносимыми потерями. Но в отличие от FBARS МЭМС-резонаторы могут изготавливаться на одной подложке с фильтром, поскольку их частота задается с помощью процесса литографии.

В технологии создания МЭМС-резонаторов предусмотрен разработанный специалистами лаборатории процесс изготовления сложных многослойных структур на основе упрочняющей пленки вольфрама. Он заключается в осаждении жертвенного слоя оксида, формировании рисунка, травлении оксида, нанесении в созданную форму методом химического осаждения из

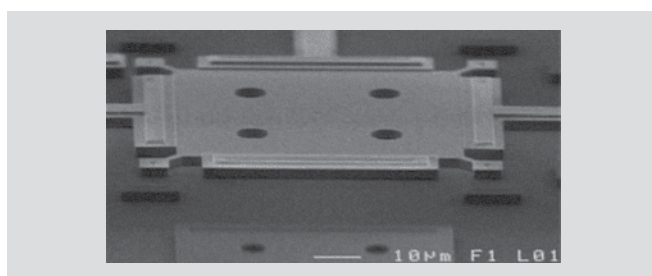


Рис.2. Поликристаллический ВЧ МЭМС-резонатор

паровой среды пленки вольфрама и в последующем удалении избыточного вольфрама. Этот процесс позволил создать МЭМС-резонаторы без нависающих над подложкой балок. Фактор качества ВЧ МЭМС-резонаторов составил ~5000, полное сопротивление — менее 300 Ом.

Для опорных генераторов с высоким Q и ПЧ-фильтров в лаборатории Сандиа создан поликристаллический МЭМС-резонатор с емкостным преобразованием (рис.2). Зазор между электродом и конденсатором не превышает 100 нм. Преимущества этого резонатора перед пьезоэлектрическим — высокий фактор качества (более 60К), малый дрейф характеристик, простота настройки и низкая чувствительность к вибрациям. Рассчитан резонатор на частоту до 200 МГц.

Первые кремниевые МЭМС-резонаторы были основаны на электростатическом, а не пьезоэлектрическом преобразовании традиционных кварцевых резонаторов. Однако кремниевые резонаторы менее стабильны, чем кварцевые, и их изготовителям приходится устанавливать достаточно дорогостоящие средства компенсации влияния температуры. Специалисты Центра электроники Швейцарии (Swiss Center for Electronics and Microtechnology, CSEM) решили проблему стабилизации работы кремниевых

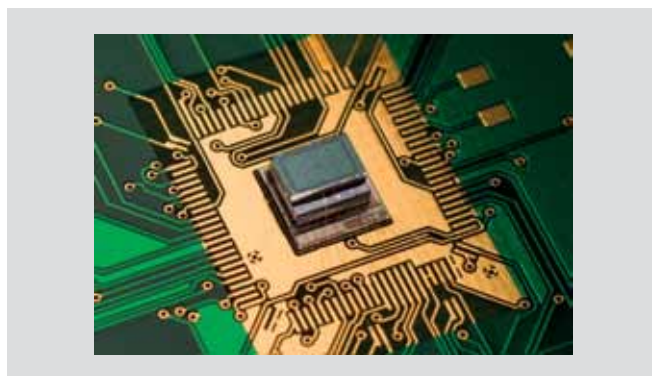


Рис.3. Поликристаллический ВЧ МЭМС-резонатор

МЭМС-резонаторов путем нанесения поверх выполненной на КНИ-пластине кремниевой консоли толщиной 20–100 мкм пленки нитрида алюминия толщиной 2 мкм и компенсации влияния температуры с помощью переключаемого конденсатора (рис.3). При подаче напряжения на резонатор пьезоэлектрик сжимается, и консоль колеблется синхронно с приложенным напряжением, т.е. он функционирует подобно обычному кварцевому резонатору. Таким образом специалистам центра удалось уменьшить потребляемую резонатором энергию на три порядка. Стабильность частоты разработанного ими пьезоэлектрического кремниевого резонатора составляет 5 ppm в диапазоне температур 0...50°C (против 15–30 ppm для обычных МЭМС-резонаторов) при потребляемом токе 3 мкА [4]. По мнению создателей резонатора, он весьма перспективен для применения в беспроводных датчиках.

Другой оригинальный метод компенсации влияния температуры предложила компания Silicon Clocks. Метод, получивший



Рис.4. Кремниевый МЭМС-резонатор SiT1052

название CMEMS-ZeroThermal (CMEMS – Standard CMOS + MEMS)*, заключается в обертывании резонатора запатентованным материалом, который при увеличении температуры создает механические напряжения, компенсирующие изменения его резонансной частоты. Указывается, что стабильность частоты резонатора такой конструкции составляла 0,5–1 ppm/°C в диапазоне температур не менее 100°C [5].

* В конце апреля 2010 года Silicon Clocks приобрела компания Silicon Laboratories, которая намерена использовать технологию CMEMS с тем, чтобы освоить массовое производство разработанных ею КМОП-систем генерации сигналов синхронизации бытовой электроники.

Еще одна причина того, что МЭМС-резонаторы, разрабатываемые уже более 30 лет, до сих пор не находили применения в коммерческих генераторах – трудности герметизации. Корпус должен обеспечивать очень чистую среду для МЭМС-резонатора, поскольку даже небольшое загрязнение его поверхности может привести к существенному изменению резонансной частоты. И к тому же, поскольку МЭМС-резонаторы зачастую предназначены для применения в системах, предъявляющих высокие требования к стоимости, корпус должен быть дешевым.

Эти задачи решены с помощью технологии вакуумной герметизации на уровне кремниевой пластины MEMS First, полученной SiTimes у компании Bosch [6] и позволяющей обойтись без дорогостоящих керамических корпусов. МЭМС-резонаторы компании первоначально герметизируют на пластине пленкой эпитаксиального поликремния толщиной 15 мкм, после чего пластины режут на кристаллы, которые совместно с электронной схемой управления (специализированной схемой на кристалле типа ASIC или ASSP) можно монтировать в стандартный пластмассовый корпус для полупроводниковых приборов. Эпитаксиальная пленка поликремния, осаждаемая при температуре 1100°C, "съедает" влагу и все загрязняющие примеси среды. Метод герметизации и монтажа в корпус не только дешев и "чист", но благодаря ему МЭМС-резонатор выглядит и ведет себя как обычный полупроводниковый прибор. А потребители получают возможность применять в своих работах малогабаритный компонент, сократить число требуемых компонентов и быстрее выйти на рынок с новым продуктом. При сообщении об используемой технологии сборки в корпус в январе 2009 года разработчики утверждали, что предложенный метод окажется пригодным для создания МЭМС-резонаторов широкого применения. И они не ошиблись.

В конце 2010 года компания SiTimes объявила о промышленном выпуске первого кремниевого МЭМС-резонатора в пластмассовом корпусе SiT1052 на частоту 32,768 кГц (рис.4) [7]. Стабильность частоты, обеспечиваемая резонатором, составляет ± 5 ppm, практически даже после пайки разброс характеристик нулевой. Это исключает проведение операций предварительной обработки, компенсации дрейфа характеристик и внутрисхемной калибровки, необходимых при производстве кварцевых резонаторов. Потребляемый ток не превышает 1 мкА, т.е. резонатор пригоден для применения в системах с жесткими требованиями

к потребляемой мощности. Ударопрочность МЭМС-резонатора составляет $5 \cdot 10^4$ g, вибростойкость – 70 g, что на порядок выше, чем у кварцевых резонаторов. Площадь резонатора – всего 0,5 мм², выход годных – 95%, т.е. при производстве больших партий он будет очень дешевым. Поставляется резонатор SiT1052 как заведомо бездефектный прибор. Предназначен для систем реального времени, блоков синхронизации, микропроцессоров, маломощных радиостанций, часов, смарткарт и других портативных электронных устройств.

Оригинальное решение на конференции IEDM 2008 представили специалисты лаборатории наноприборов Федерального института технологии Швейцарии – активный кремниевый МЭМС-резонатор на основе n-канального полевого транзистора на вибрирующей подложке (vibrating-body field effect transistor, VB-FET) [8]. VB-FET выполнен на КНИ-подложке с элементами микронных размеров. Зазор между вибрирующей подложкой и фиксированными затворами в горизонтальной плоскости равен ~150 нм. Работа такой гибридной структуры с полевым транзистором, интегрированным в резонансную МЭМС, основана на модуляции носителей канала, которая преобладает в структуре микронных размеров, и на пьезорезистивном эффекте подложки. Полевой транзистор колеблется в горизонтальной плоскости.

Основные достоинства активных МЭМС-резонаторов на полевых транзисторах с двумя или четырьмя затворами, работающих на частоте 2 и 71 МГц, соответственно – "встроенное" усиление, сверхнизкое сопротивление и возможность регулировки частоты постоянным напряжением смещения. Такой резонатор можно использовать в генераторе синхронизирующих сигналов без усилителя и тем самым уменьшить его энергопотребление и снизить стоимость.

Интерес представляют поиски новых материалов для изготовления МЭМС-устройств, в том числе и резонаторов. И здесь, возможно, перспективными окажутся открытые научно-исследовательской группой Йельского университета новые сплавы металлов, которые прочнее стали, но могут менять форму подобно пластмассе. Структуру сплавов, названных объемными металлическими стеклами (Bulk Metallic Glasses, BMG) формируют произвольно размещенные атомы в отличие от нормальной, кристаллической структуры обычных металлов.

Группа создала множество предметов сложных форм, включая литые металлические бутылки, корпуса часов, миниатюрные

резонаторы. Требуемую форму можно придать материалу менее чем за минуту, и при этом он не теряет высокую прочность. Звучит фантастически.

За длинную, почти 30-летнюю, историю исследований и разработок МЭМС-резонаторов появились малогабаритные и экономичные в изготовлении приборы. Активно развивавшаяся в последние несколько лет их технология позволила решить многие сложные технологические проблемы. Можно ожидать, что 2011 год станет переломным для коммерциализации МЭМС-резонаторов. Ведь начало уже положено!

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mokhoff N.** NXP claims piezoresistive silicon MEMS at 1.1 GHz. - www.eetimes.com/electronics-products/advanced-technology/4100625/NXP-claims-piezoresistive-silicon-MEMS-at-1-1-GHz.
2. **Nguyen C. and Li-Wen Hung.** High-Q Low-Impedance MEMS Resonators. - www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2011/EECS-2011-60.html.
3. RF MEMS Resonators and Filters - Sandia MEMS. - www.mems.sandia.gov/about/rf-mems.html.
4. **Johnson R. C.** Piezoelectric MEMS said to lower power consumption. - www.eetimes.com/electronics-news/4081373/Piezoelectric-MEMS-said-to-lower-power-consumption.
5. **Johnson R. C.** Solution proposed for MEMS temperature stability problem. - www.eetimes.com/electronics-products/passives/4110268/Solution-proposed-for-MEMS-temperature-stability-problem.
6. **Johnson R. C.** A pioneer charts MEMS' trajectory. - www.eetimes.com/electronics-news/4070417/A-pioneer-charts-MEMS-trajectory
7. All Silicon Device Sets a New Paradigm for Performance and Integration that Cannot be Matched by Quartz. - <http://www.sitime.com/news/239-sitime-enters-2-billion-resonator-market-with-worlds-first-mems-resonator-for-real-time-clock-and-time-keeping-applications>.
8. **Clarke P.** Swiss researchers to describe energy-efficient devices at IEDM. - www.eetimes.com/design/analog-design/4016908/Swiss-researchers-to-describe-energy-efficient-devices-at-IEDM
9. Stronger Than Steel, Novel Metals Are Moldable as Plastic. - opac.yale.edu/news/article.aspx?id=8304