

Экспериментальные исследования параметров SMR-BAW резонаторов на частоте 10 ГГц

При изготовлении тонкопленочных SMR-BAW резонаторов на высокие частоты возникают существенные сложности при их измерении и подгонки в частотный номинал, связанные с уменьшением толщин возбуждающих электродов и активной пьезопленки. Данная работа посвящена проблемам измерения и подгонки частоты в номинал SMR-BAW резонатора с рабочей частотой в 10 ГГц.

Ключевые слова: акустоэлектроника, СВЧ – измерения

Как известно [1, 2], SMR-BAW (SMR-BAW – solidly mounted resonator- bulk acoustic wave) резонатор, работающий на продольных объемных акустических волнах (ОАВ), состоит из тонкой пьезопленки (например, (0001)AlN), на верхней и нижней поверхностях которой расположены металлические электроды. Акустическая изоляция резонатора от подложки осуществляется за счет Брэгговского [3] отражателя, служащий для предотвращения акустического взаимодействия активной зоны резонатора с подложкой. Конструкция типичного SMR-BAW резонатора показана на рис.1.

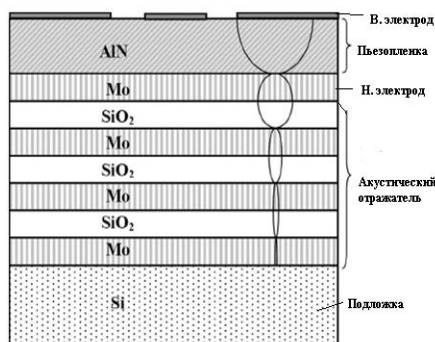


Рис.1.

В первом приближении центральная рабочая частота такого резонатора оценивается как $f = V/(2h)$, где V – скорость продольной ОАВ вдоль направления, перпендикулярного поверхности пьезоактивного слоя, h – толщина слоя. В общем случае центральная частота резонатора f определяется не только толщиной слоя AlN, но и толщиной и материалом верхнего и нижнего электродов и может быть определена с помощью модифицированной теории Новотного и Бенеша [4, 5].

В связи с этим при изготовлении SMR-BAW резонатора на высокие частоты, возникают существенные трудности, связанные прежде всего с уменьшением толщин пьезопленки и возбуждающих электродов. К примеру, толщина пьезопленки AlN резонатора с рабочей частотой в 10 ГГц составляет порядка 0.2 мкм, а толщины возбуждающих электродов – 0.05-0.07 мкм, при этом согласно расчетам небольшая погрешность в толщинах (на 0.001 мкм) существенно (на десятки МГц) сдвигает частоту резонатора.

Малая толщина электродов также затрудняет контроль электрических параметров такого резонатора, поскольку при измерении с помощью микрозонда возникает серьезная проблема, так как зонд может проколоть столь тонкую структуру и замкнуть верхний и нижний электроды. Кроме того, с ростом частоты существенно снижается добротность резонатора, а из-за омических потерь в тонких электродах можно добиться высокой добротности только на параллельном резонансе.

Поэтому при изготовлении резонатора с высокой рабочей частотой необходимо добиться уменьшения омичности контактов, избежать прокола структуры и принять меры к повышению добротности. На рис.2 показаны рисунок верхнего электрода и сделанная на электронном микроскопе фотография среза структуры удовлетворяющего данным требованиям резонатора с расчетной рабочей частотой в 10 ГГц, на рис.3 – его измеренные характеристики.

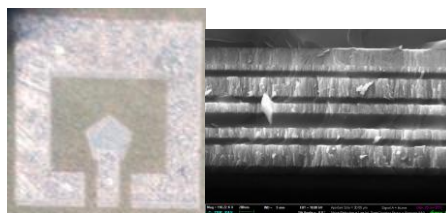


Рис.2

Опоясывающая земляная шина и подводящий к активной части резонатора полосок были выполнены из Al толщиной 0.4 мкм, что делает возможным постановку зонда без прокола пьезопленки. Нижний электрод и активная часть верхнего электрода были выполнены из Mo толщиной 0.065 мкм, поскольку этот материал имеет хорошие упругие свойства и также позволяет повысить добротность. Толщина пьезопленки AlN составляла 0.218 мкм.

Для повышения добротности в конструкции резонатора применен так называемый асимметричный Брэгговский отражатель. Согласно расчетам, применение такого отражателя позволяет добиться улучшения добротности в полтора-два раза за счет отражения энергии мод сдвиговых колебаний. В нашем случае асимметричный Брэгговский отражатель состоял из пар слоев SiO_2/Mo (LHL) (0.5H 2L 0.5H) (LHL), где L (Low) и H (High) – слои SiO_2 и Mo соответственно.

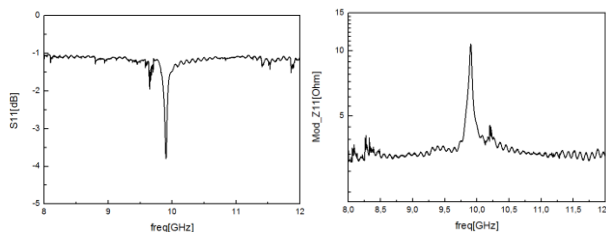


Рис.3

Как видно из экспериментальных характеристик, резонансная частота вместо расчетных 10 ГГц составила 9.902 ГГц. Рассчитанная по наклону фазовой характеристики добротность резонатора составила $Q=150$.

Таким образом, из-за погрешностей, возникших при напылении AlN и возбуждающих электродов, резонансная частота резонатора сместилась почти на

100 МГц. В связи с этим сразу же встает вопрос о подгонке такого резонатора в номинал, поскольку при производстве такие отклонения от заданных значений недопустимы.

Один из путей решения данной проблемы заключается в создании дополнительной массовой нагрузки на активную часть верхнего электрода слоем SiO_2 , что позволяет понизить резонансную частоту резонатора, что позволяет также решить проблему термокомпенсации резонатора [8]. При этом очевидно, что для подгонки на заданную частоту его изначальная резонансная частота должна быть выше номинальной. Для опыта по подгонке частоты с помощью слоя SiO_2 был изготовлен резонатор, чья резонансная частота должна быть выше номинальной на 500 МГц. Активная часть верхнего электрода была выполнена из Ni толщиной в 0.06 мкм, что позволяло поднять частоту до требуемых значений в 10.5 ГГц.

При измерении данного резонатора был получен неожиданный результат. Вместо расчетных 10.5 ГГц резонансная частота основного резонанса составила 13.428 ГГц (рис.4), на более низких частотах (~11 и 12 ГГц) наблюдались паразитные резонансы. Сдвиг резонансной частоты составил более 3 ГГц, что не может быть объяснено простым промахом в толщине верхнего электрода. При этом добротность получившегося резонатора снизилась втрое и составила величину $Q=50$.

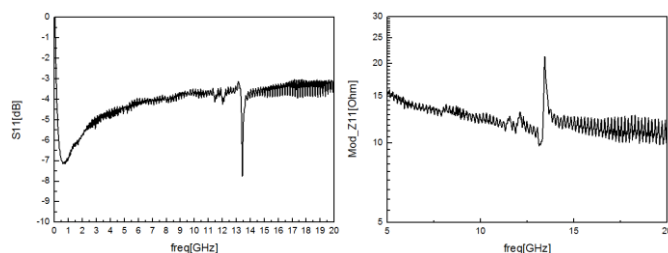


Рис.4

Проведенный анализ показал, что столь существенный сдвиг частоты произошел из-за неточностей в расчете и напылении асимметричного Брэгговского отражателя. Как оказалось, использование при расчете разных констант упругости для одного и того же материала дает существенно разный результат, и в случае ошибки в оценке свойств материалов уже на этапе расчета допускаются погрешности в толщинах отражательных слоев, которые в дальнейшем усугубляются неточностями при изготовлении устройств.

В результате возникших неточностей в асимметричном отражателе возникают переотражения, которые при небольшом промахе в напылении верхнего электрода приводят к возникновению на характеристике резонатора паразитных резонансных пиков на более высоких частотах относительно основного резонанса. При существенном промахе в толщине верхнего электрода паразитный резонанс увеличивается и начинает превалировать над основным, который в свою очередь из-за изменений условия отражения уменьшается, становясь паразитным, как это и наблюдается на снятых характеристиках.

Хотя из-за возникших неточностей не удалось изготовить резонатор на заданную частоту в 10.5 ГГц, полностью негативным возникший эффект назвать нельзя: поскольку резонансная частота повысилась на 3 ГГц, его можно использовать для изготовления резонаторов на более высокие частоты. Однако данный вопрос требует дальнейшего изучения.

В нашем же случае основной интерес представляла возможность подгонки устройств в номинал. Хотя рабочая частота изготовленного резонатора из-за описанного эффекта очень сильно ушла от расчетного значения, на нем было решено опробовать возможность подгонки частоты путем подпыления слоя SiO_2 .

На рис.5 показана характеристика резонатора после напыления слоя SiO_2 толщиной 0.02 мкм. Слой SiO_2 покрывал поверхность устройства полностью, включая возбуждающий электрод и подводящий полосок. Контакт с электродом осуществлялся путем прокола пленки зондом.

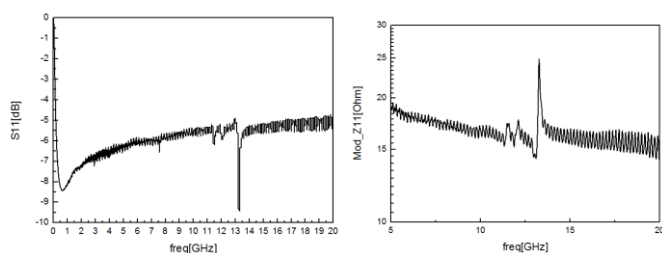


Рис.5

Как видно из полученных характеристик, создание дополнительной массовой нагрузки на верхний электрод слоем SiO_2 толщиной 0.02 мкм понижает резонансную частоту на 170 МГц.

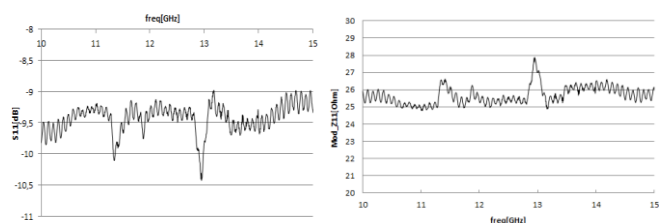


Рис.6

Характеристики резонатора после повторного напыления представлены на рис. 6. Как хорошо заметно, они значительно ухудшились, значительно выросли вносимые потери (зонд с трудом прокалывал слой SiO_2 толщиной 0.04 мкм), резонансная частота снизилась на 260 МГц.

Таким образом, подпыление слоя SiO_2 понижает резонансную частоту на значительную величину и годится лишь для грубой подгонки в номинал резонатора. При напылении слоя SiO_2 толщиной более 0.02 мкм необходимо использовать маску для защиты контактных площадок резонатора.

Библиографический список

1. Ruby Rich, San Jose. Review and Comparison of Bulk Acoustic Wave FBAR, SMR Technology // IEEE Ultrasonics Symposium. 2007. P.1029.
2. Lakin K.M.. A review of thin-film resonator technology // IEEE microwave magazine. Dec. 2003.
3. Allah M., Thalhammer R., Kaitila J., Herzog T., Weber W., et al. Solidly mounted BAW resonators with layer-transferred AlN using sacrificial Si surfaces // A Solid-State Electronics. 2010. V.54. P. 1041.
4. Nowotny H., Benes E.. General one-dimensional treatment of the layered piezoelectric resonator with two electrodes // J. Acoust. Soc. Am. August. 1987. V.82. No 2. P. 513.
5. Cherednick V. I., Dvoesherstov M. Y. Surface and Bulk Acoustic Waves in Multilayer Structures // Book WAVES IN FLUIDS AND SOLIDS. Edited by Rubén Picó Vila. September. 2011. Croatia. Chapter 3. P. 69.