

УДК 621.373.826

Д. П. Лукьянов, С. Ю. Шевченко, Е. П. Филиппова, А. С. Кукаев, Д. В. Сафронов, А. В. Иванов Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Применение кварцевого корпусирования для упаковки микромеханических акселерометров на поверхностных акустических волнах

Рассматривается применение технологии кварцевого корпусирования для улучшения характеристик микромеханических акселерометров (ММА) на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Исследуются возможности лазерной подстройки частоты ПАВ-резонатора в герметизированном устройстве и одновременного нанесения резонаторных структур на противоположные стороны консоли с помощью системы прецизионной лазерной маркировки.

Кварцевое корпусирование, поверхностная акустическая волна, микромеханический акселерометр, лазерная подстройка частоты

Применение металлических корпусов для упаковки микроакселерометров на ПАВ имеет существенные недостатки (плохая термоизоляция корпуса от окружающей среды, невозможность подстройки частоты резонаторов в корпусированном устройстве), которые негативно влияют на точностные характеристики приборов. Использование кварцевого корпуса весьма перспективно, так как позволяет устранить перечисленные недостатки. В данной статье рассматриваются технологии кварцевого корпусирования и способы улучшения с его помощью характеристик ММА на ПАВ.

Недостатки применения традиционных металлических корпусов. На рис. 1 представлен вид микроакселерометра на ПАВ, разработанного на кафедре ЛИНС. Микроакселерометр упакован в стандартный металлический корпус.

Упаковка микроакселерометра на ПАВ в металлический корпус имеет следующие недостатки:

1. Разный коэффициент температурного расширения у корпуса и чувствительного элемента.

2. Плохая термоизоляция металлического корпуса от окружающей среды.

3. После сборки микроэлектронного элемента корпус запаивается, следовательно, доступ к чув-

ствительному элементу схемы становится невозможным. Тем самым исключается возможность подстройки частоты.



Puc. 1

Большой интерес представляют методы упаковки с использованием корпуса, выполненного из оптически прозрачного материала (например, кварца) [1], [2], так как он обладают следующими преимуществами:

1. Материал корпуса оптически прозрачен для лазерного излучения, что может быть использовано для устранения технологических дефектов ПАВ-структуры. 2. Возможна подстройка частоты ПАВрезонатора.

Технология корпусирования WLP (Wafer Level Package). Корпусирование – завершающая стадия микроэлектронного производства, в процессе которой полупроводниковый кристалл устанавливается в корпус. Обычно корпусирование состоит из этапов прикрепления кристалла на основание или носитель кристалла, электрического соединения контактных площадок кристалла с выводами корпуса и герметизации корпуса [3].

Технология корпусирования на уровне пластины (WLP) используется при производстве МЭМС около 10 лет. Основной идеей упаковки типа WLP является соединение «подложка– подложка». Эта технология позволяет изготавливать, тестировать и запаковывать все устройства на единой, не разрезанной на части подложке, одновременно [4].

В качестве примера на рис. 2 изображен упакованный ПАВ-резонатор. Он представляет собой две присоединенных друг к другу подложки. Одна из них образует крышку резонатора с внутренней свободной полостью, а вторая является подложкой резонатора с нанесенной электродной структурой.





Технология упаковки ПАВ-устройств на уровне подложки объединяет преимущества бескорпусного исполнения, обеспечивая наименьшие размеры, и достоинства корпусированных устройств, обеспечивая защиту активной поверхности с электродной структурой. Процесс упаковки одновременно с этапом изготовления позволяет значительно уменьшить размеры и стоимость готовых изделий и делает возможной дальнейшую модульную интеграцию ПАВ-устройств [4].

Структура и принцип действия микроакселерометра на ПАВ. На рис. 3 представлена структурная схема ПАВ-акселерометра. Чувствительный элемент акселерометра состоит из пьезоэлектрической консоли *1*, один конец которой нагружается инерционной массой *m*. На противоположных сторонах консоли размещены два ПАВ-резонатора 2, образующих дифференциальную схему. ПАВ-резонаторы являются частотозадающими элементами автогенераторов 3 с частотами f_1 и f_2 соответственно. Их выходные сигналы поступают на входы смесителя 4, где формируются сигналы комбинационных частот $f_1 - f_2$ и $f_1 + f_2$, выделяющиеся фильтрами 5 и 6 соответственно. Разностная частота оказывается пропорциональной действующему ускорению, а суммарная может быть использована для уменьшения влияния дестабилизирующих факторов, и прежде всего температуры, через канал автоподстройки частот генераторов.



Для возбуждения и детектирования ПАВ в пьезоэлектриках применяют системы из двух вложенных одна в другую металлизированных гребенок – встречно-штыревых преобразователей (ВШП), изображенных на рис. 4. С их помощью осуществляется как преобразование электрического сигнала в акустическую волну, так и её обратное преобразование в электрический сигнал. Каждая из решеток электродов характеризуется периодом (шагом) *d*, шириной *a* и длиной *L* электродов. В общем случае эти параметры могут меняться по длине решетки [5].



Необходимым условием высокой точности микроакселерометров на ПАВ является обеспечение температурной стабильности. Для снижения температурной чувствительности микроакселерометра необходимо, чтобы начальный разнос частот ПАВ-генераторов, расположенных на оппозитных сторонах консоли, был минимален [6].



При современном уровне технологий массового производства изготовление однотипных ПАВ-резонаторов возможно с точностью не более ±50 кГц [7], а при их напылении на оппозитные стороны консоли эта погрешность может значительно увеличиться.

Данную проблему можно решить при помощи подстройки частоты одного из резонаторов лазерным излучением. При использовании кварцевого корпуса можно подстраивать частоту в загерметизированном устройстве, чего невозможно добиться при существующих технологиях подстройки частоты.

Использование кварцевого корпусирования для лазерной подстройки частоты резонатора. Метод кварцевого корпусирования позволяет выполнить подстройку частоты ПАВ-резонаторов в герметизированном устройстве. Подстройку частоты разделяют на грубую и точную (рис. 5). В первом случае активное излучение распыляет материал, нанесенный на прозрачную крышку резонатора. При этом распыленный материал оседает на резонаторе, что меняет его свойства и приводит к изменению частоты. Способ точной подстройки заключается в том, что узкосфокусированное лазерное излучение сквозь прозрачный кварцевый корпус снимает часть металлизации с ВШП и отражателей при помощи перемещения луча в двух направлениях. Это приводит к изменению длины волны ПАВ и, как следствие, к изменению ее частоты.

Для примера реализации лазерной подстройки частоты используется система прецизионной лазерной маркировки «МиниМаркер 2» (рис. 6) [8]. В состав системы входит волоконно-оптический излучатель фирмы «IPG». Он генерирует лазерное излучение на длине волны 1.064 мкм. Пе-

ремещение луча осуществляется сканирующей системой на базе сканаторов VM2500+ с точностью 2.5 мкм. Излучение фокусируется специальным объективом, который позволяет сохранить фокусное расстояние на поле маркировки размером 50×50 мм.



В таблице приведены основные характеристики системы прецизионной лазерной маркировки «МиниМаркер 2».

Характеристика	Значение
Мощность излучения, Вт	10/20/50
Частота следования импульсов, кГц	20100
Длина волны излучения, мкм	1.064
Диаметр пучка в фокусе, мкм	25
Плотность мощности (для 10 Вт), Вт/мм ²	$0.02 \cdot 10^{6}$
Точность позиционирования пучка, мкм	1.25

На рис. 7, а изображен ВШП, который является составной частью резонатора. Предположим, что нужно изменить частоту ПАВ-резонатора.

Резонансная частота невозмущенного резонатора определяется по формуле

$$f_0 = u_0 q / (2l),$$

где u_0 – невозмущенное значение фазовой скорости ПАВ; q >> 1 – целое число; l – расстояние между центрами ВШП.



Лазерное излучение с высокой точностью убирает часть металлизации с «пальцев» ВШП. На рис. 7, б представлен ВШП с измененными геометрическими свойствами. Увеличение межэлектродного расстояния ВШП приводит к изменению частоты ПАВ-резонатора.

Одновременное нанесение резонаторных структур на противоположные стороны консоли. Обеспечить минимальный начальный разнос частот ПАВ-генераторов можно с помощью одновременного нанесения топологии резонаторов на противоположные стороны консоли с помощью лазерного излучения.

На рис. 8 показана структура ВШП, сформированная одновременно на верхней (рис. 8, а) и нижней (рис. 8, б) частях пластины из плавленого кварца с посеребрением.



Для изучения полученных результатов был использован измерительный микроскоп «МИР-2», представленный на рис. 9.



С помощью микроскопа измерялись расстояния между электродами ВШП на обеих сторонах пластины. На рис. 10 представлены результаты измерений. Если размеры, указанные на рис. 10, умножить на коэффициент увеличения микроскопа, то получим значения ширины каждого из штырей структуры ВШП и расстояния между ними. По результатам измерений оппозитные ПАВрезонаторы оказались смещены на ±18 мкм.



Для оценки возможности подстройки частоты и нанесения структуры ВШП в герметизированном устройстве пластина из плавленого кварца была закреплена в стеклянном корпусе (рис. 11). Пластина имитировала консоль ММА.





После сборки макета было выполнено нанесение структуры ВШП. Данный опыт подтвердил, что корпус, выполненный из оптически прозрачного материала, не препятствует подстройке частоты в упакованном устройстве.

Кварцевое корпусирование открывает широкие перспективы для производства навигационных сенсоров на ПАВ и позволяет в полной мере использовать их потенциальные возможности. Благодаря кварцевому корпусу все элементы датчика имеют одинаковый коэффициент линейного расширения, что повышает его температурную стабильность. Прозрачность кварцевого корпуса позволяет подстраивать частоту ПАВ-резонаторов в корпусированном и герметизированном устройстве, чего нельзя добиться с помощью традиционных технологий. За счет точного позиционирования лазерного луча можно корректировать то-

.....

пологию ПАВ-резонаторов любой сложности и наносить топологию ПАВ-резонатора одновременно на обе стороны консоли. Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук, шифр МК – 6435.2014.8, договор № 14.Z56.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Greer J. A., Montress G. K., Parker T. E. Applications of laser-trimming for all quartz package, surface acoustic wave devices // Ultrasonics Symposium 1989. Raytheon Research Division, 131 Spring Street, Lexington, Massachusetts, 1989. P. 179–184.

2. Parker T. E., Callerame J., Montress G. K. A new all quartz package for SAW devices // 39th Annual Frequency Control Symposium. Raytheon Research Division, 131 Spring Street, Lexington, Massachusetts, 1985. P. 519–525.

3. Бер А. Ю., Минскер Ф. Е. Сборка полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: учеб. для сред. ПТУ. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986. 279 с.

4. Балышева О. Л. Фильтры на поверхностных акустических волнах: возможности миниатюризации и функциональной интеграции // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 12. С. 1512–1523.

5. Карпеев Д. В., Макаров В. М., Малов В. В. Частотные датчики механических величин на ПАВструктурах // Сегнето- и пьезоматериалы и их применение: материалы семинара МДНТП. М., 1978. С. 59–62.

6. Шевченко С. Ю. Анализ возможностей снижения термочувствительности микроакселерометра на поверхностных акустических волнах // Материалы VIII конф. молодых ученых "Навигация и управление движением". СПб.: Навигация и управление движением, 2007. С. 90–97.

7. Лукьянов Д. П. Разработка и оптимизация схемы построения микроакселерометра на поверхностных акустических волнах. Ч. 2 // Гироскопия и навигация. 2007. № 3 (58). С. 62–76.

8. МиниМаркер 2 // Лазерный Центр [Электронный pecypc]. URL: http://www.newlaser.ru/laser/lc/ minimarker2.php.

D. P. Lukyanov, S. Yu. Shevchenko, E. P. Filippova, A. S. Kukaev, D. V. Safronov, A. V. Ivanov Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

THE USE OF QUARTZ PACKAGING FOR ENCAPSULATION OF MICROMECHANICAL ACCELEROMETERS ON SURFACE ACOUSTIC WAVES

The use of technology of quartz packaging for improving of characteristics of micromechanical accelerometers (MMA) on surface acoustic waves (SAW) is considered. The possibility of the laser frequency trimming of SAW- resonator in a sealed device and simultaneous application of resonator structures on the opposite side of the console with the help of system of high-precision laser marking is investigated.

Quartz packaging, surface acoustic wave (SAW), micromechanical accelerometer (MMA), laser frequency trimming

УДК 681.51, 531.383

Чан Танг Дык, Дао Ван Ба, Ле Ван Чанг Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Оптимизация алгоритмов инерциальной навигационной системы надводных объектов

Рассмотрен алгоритм курсовертикали (КВ) для решения задачи управления движением скоростного судна с глубоко погруженными подводными крыльями. Приведены результаты исследования КВ в среде MATLAB. Исследованы погрешности параметров управления по имитационным данным.

Курсовертикаль, управление движением, скоростные суда, волоконно-оптический гироскоп, акселерометр, магнитометр, оптимальный фильтр Калмана, спутниковая навигационная система

Для решения задачи управления движением объекта с необходимой точностью параметров управления была разработана КВ на волоконнооптическом гироскопе (ДУС), трех акселерометрах (БА) и трех магнитометрах (БМ) [1]. Исследование влияния инструментальных погрешно-