УДК 004.94

ОБЗОР МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ СТАТИКО-ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Марков Д.М., Маркова И.В., Воронцов А.А.
Пензенский государственный технологический университет, Пенза, e-mail: Aleksander.Vorontsov@gmail.com

Статья посвящена обзору методов измерения статико-динамического давления. Подробно рассмотрен вопрос, связанный с разработкой датчика статико-динамического давления. Особое внимание в этой статье уделяется обзору датчиков давления. Также был проведен анализ состояния рынка производителей датчиков давления. Были рассмотрены основные способы формирования КНД-структур (то есть «кремний-на-диэлектрике») для использования их при изготовлении полупроводникового чувствительного элемента, далее ПЧЭ, датчиков давления. Особо затронули имплантационный метод, метод водородного переноса кремния с окислом, метод рекристаллизации поликремния на диэлектрике. Были проанализированы все преимущества и недостатки каждого из методов формирования КНД-структур. Было выяснено, что использование метода прямого сращивания без предварительной имплантации одной из пластин является наиболее удачной. (120) Были затронуты необходимые условия для данного метода. Для наглядности был произведен анализ существующих отечественных и зарубежных датчиков давления. Были подведены итоги анализа научно-технических источников информации.

Ключевые слова: датчик, давление, преобразователь, технология, погрешность.

REVIEW OF METHODS OF MEASUREMENT OF STATIC DYNAMIC PRESSURE

Markov D.M., Markova I.V., Vorontsov A.A.
Penza State Technological University, Penza, e-mail: Aleksander.Vorontsov@gmail.com

Article is devoted to the review of methods of measurement of statiko-dynamic pressure. The question connected with development of the sensor of statiko-dynamic pressure is in detail considered. Special attention in this article is paid to the review of sensors of pressure. Also the analysis of a condition of the market of producers of sensors of pressure was carried out. The main ways of formation of KND-structures (that is «silicon-on-dielectric») for their use at production of a semiconductor sensitive element, further PChE, pressure sensors were considered. Especially mentioned an implantation method, a method of hydrogen transfer of silicon with oxide, a method of recrystallization of polysilicon on dielectric. All advantages and shortcomings of each of methods of formation of KND-structures were analysed. It was found out that use of a method of direct merging without preliminary implantation of one of plates is the most successful. (120) Necessary conditions for this method were mentioned. The analysis of the existing domestic and foreign sensors of pressure was for descriptive reasons made. The results of the analysis of scientific and technical sources of information were summed up.

Keywords: sensor, pressure, converter, technology, error

При измерении давления находят применение следующие методы преобразования: тензометрический, пьезорезисторный, емкостной, резонаторный, индуктивный и ионизационный.

Проведенный анализ состояния рынка производителей датчиков давления показывает, что основным материалом, используемым для изготовления датчиков давления зарубежными фирмами, является кремний. Из кремния изготовляются плоские и профилированные мембраны, балки и другие детали чувствительных элементов давления. Чаще всего применяется кремний ориентации (001) и гораздо реже ориентации (111) [1, 2].

В зарубежной промышленности применяются датчики нового поколения, основанные на полупроводниковой микроэлектронике, разработанные фирмами «Kulite» (США), «Honeywell» (США), «Auxitrol» (Франция). Базовым техническим решением, применяемым данными фирмами в обеспечение высоких метрологических характеристик, является использование структур «кремний на диэлектрике» (КНД), когда полупроводниковый чувствительный элемент (ПЧЭ) с тензорезистивной мостовой измерительной схемой изготовлен на основе монокристаллических кремниевых тензорезисторов, изолированных от кремниевой мембраны пленкой двуокиси кремния. В настоящее время в нашей стране практически отсутствуют реальные разработки датчиков давления по отмеченному направлению. В тоже время применение в различных микроэлектронных приборах структур КНД обеспечивает работоспособность приборов в экстремальных условиях (повышенные и криогенные температуры, ионизирующее излучение и т.п.) и стабильность их параметров в процессе длительной эксплуатации [3–5].

В настоящее время существует множество способов формирования КНД-структур для использования их при изготовлении ПЧЭ датчиков давления; например, методы рекристаллизации, эпитаксиального на-

ращивания, анодного соединения. Но наиболее используемыми методами являются следующие:

1 имплантационный метод – Silicon-ImplantedbyOxygen – SIMOX, когда происходит внедрение в глубину кристалла ионов кислорода с последующим синтезом скрытого окисла при отжиге;

2 метод водородного переноса кремния с окислом – Smart-CutSOI, когда облученная водородом окисленная пластина кремния соединяется с опорной подложкой. Далее происходит почти полное удаление окисленной пластины путем ее скола имплантированным водородом;

3 метод рекристаллизации поликремния на диэлектрике.

Общим недостатком КНД-структур, полученных методами 1 и 2 применительно к изготовлению на их основе ПЧЭ датчиков давления, является их высокая стоимость, обусловленная применением сложного технологического оборудования и длительностью обработки, что является фактором, ограничивающим использование данных методов при производстве ПЧЭ на КНД-структурах. Кроме того, ПЧЭ, выполненные на SIMOX-КНД-структурах, неработоспособны при температурах выше 150°С из-за несовершенства структуры имплантированного (по сравнению с термическим) слоя двуокиси кремния, теряющего при повышенных температурах свои изолирующие свойства.

К недостаткам метода 3 относятся большие затраты времени на обработку одной пластины и тепловые потери, диффузия загрязняющих примесей, а также низкая временная стабильность из-за наличия дислокаций.

Для ПЧЭ на КНД-структурах было предложено использование метода прямого сращивания без предварительной имплантации одной из пластин, когда происходит соединение двух пластин – опорной и приборной.

Данная технология, не требующая применения специального дорогостоящего оборудования и реализуемая на стандартном оборудование предприятий, производящих изделия микроэлектронной промышленности, является наиболее приемлемой для создания ПЧЭ абсолютного давления на КНД-структурах и состоит из следующих операций:

• окисление кремниевых базовой и приборной пластин при температуре 1150°С до получения слоя окисла толщиной 0,2 мкм;

• фотолитография по формированию в слое окисла кремния знаков совмещения с обеих сторон приборной и базовой пластин;

• окисление кремниевых пластин при температуре 1150°С до получения слоя окисла толщиной 1,6 мкм;

• фотолитография по формированию окон в окисле кремния под тензорезисторы на приборной пластине;

• диффузия бора до получения необходимой величины *Rs,* удовлетворяющее условиям «стоп» – травления;

• «стоп» – травление приборной пластины на величину, соответствующую глубине тензорезисторов в растворе этилендиамина;

• «прямое сращивание» приборной и базовой пластин через слой диоксида кремния в диффузионной электропечи в течение 3 часов при температуре 1100°С;

• анизотропное травление кремния в растворе КОН при температуре 96°С на величину, равную разнице между толщиной пластины и двойной высотой тензорезисторов;

• выявление тензорезисторов в растворе этилендиамина;

• окисление кремниевых пластин при 950°С для формирования защиты монокремниевых тензорезисторов;

• осаждение слоя поликристаллического кремния в реакторе пониженного давления на планарную сторону пластин;

• фотолитография по формированию поликремниевого терморезистора;

• ионное легирование открытых участков поликремния;

• травление открытых участков поликремния;

• окисление кремниевых пластин при 950°С для формирования защиты поликремниевого терморезистора;

• фотолитография с непланарной стороны пластин по формированию профиля;

• анизотропное травление кремния растворе КОН до получения не обходимой толщины профиля;

• фотолитография с планарной стороны по формированию окон в окисле кремния под алюминиевую металлизацию;

• алюминирование термовакуумное;

• фотолитография по формированию алюминиевой металлизации;

• травление алюминия;

• разделение пластины на кристаллы.

Одним из необходимых условий для прямого сращивания пластин является минимальное количество механических частиц и других посторонних включений на поверхностях сращивания двух пластин, что достигается выполнением целого ряда задач, одной из которых является уменьшение вероятности попадания посторонних включений на поверхность сращивания пластин.

На основании полученных предварительных результатов можно сделать вывод, что разработанное технологическое решение формирования ПЧЭ позволяет изготавливать датчики давления нового поколения с ожидаемыми параметрами, не уступающими параметрам приборов таких известных фирм как "Kulite" и "Endevco".

В отечественной и зарубежной практике наибольшее распространение получили датчики давления, основанные на следующих принципах преобразования [1]:

• тензометрический;
• емкостный;
• индуктивный.

Датчики давления на основе тензометрического принципа преобразования являются наиболее распространенными и универсальными. Принцип действия тензорезисторных датчиков основан на преобразовании деформации упругого элемента (балка, мембрана) в изменение электрического сопротивления тензорезисторов с последующим преобразованием этого изменения в выходной сигнал (ток или напряжение). Общая тенденция современной тензометрии – иметь тензодатчик возможно меньших габаритов и веса, обеспечивающий повышенную точность и надежность. Особенностью датчиков, предназначенных для специфических условий, например, в космических и авиационных аппаратах, химических установках, является способность в течение заданного времени стабильно работать при высоких (или низких) температурах (от минус 250 до +350 °С).

В существующих тензорезисторных датчиках давления применяются следующие типы тензорезисторов:

• проволочные;
• фольговые;
• полупроводниковые;
• тонкопленочные.

Основным недостатком известных проволочных и фольговых тензорезисторных датчиков является наличие клеевой прослойки между резисторными элементами и подложкой, которая является одновременно изолятором и связующим. При температурах выше 200 °С наблюдается деструкция клея, резкое снижение адгезионной прочности, что сказывается на рабочих параметрах датчика.

Анализ показывает, что в настоящее время в ведущих зарубежных странах (США, Германия, Великобритания, Франция, Япония, Швейцария) и России основное внимание уделяется использованию кремния как конструктивного материала для упругих чувствительных элементов датчиков. Отличные упругие свойства и, главное, их сохранение при длительной эксплуатации делает кремний незаменимым материалом.

Монокристаллическая структура кремния полностью исключает такие отрицательные свойства металла, как гистерезис, релаксация, внутрикристаллическая коррозия, ползучесть (в ограниченном температурном диапазоне). Эти положительные свойства кремния сочетаются с большими технологическими возможностями его формообразования, основанной на технологии анизотропного травления и фотолитографии. Это конструктивно-технологическое направление в настоящее время оформилось в новую область техники – микромеханику.

Прекрасные упругие свойства кремния в конструкциях датчиков должны сочетаться с соответствующим преобразователем деформаций (напряжений) в соответствующее изменение электрического параметра – сопротивления, емкости, индуктивности. В настоящее время наибольшее распространение имеют пьезорезистивные преобразователи на основе кремниевых тензорезисторов, объединенных в мостовую схему. Второе место по применяемости имеют емкостные преобразователи, однако, из-за конструктивных особенностей, связанных с формированием конденсаторов с микронными зазорами, они пока применяются гораздо реже. Применение тензорезистивных преобразователей тем не менее связано с рядом недостатков, приводящих к ухудшению их долговременной стабильности. Основная причина заключается в наличии изолирующего «p-n» перехода. Изменение его изолирующих характеристик при температуре выше 100°С приводит к изменению сопротивлений тензорезисторов, изменению начального разбаланса мостовой схемы и изменению чувствительности датчика.

Список литературы

1. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка и исследование методики моделирования датчиков обобщенной силы на основе тензорезисторного эффекта, ориентированной на применении ЭВМ», Йошкар-Ола, 1984.

2. Cho M., Javidi B. Three-dimensional visualization of objects in turbid water using integral imaging // J. Disp. Technol. 6, 544–547 (2010).

3. Levoy M., Zhang Z., McDowall I. Recording and controlling the 4D light field in a microscope using microlens arrays // J. Microsc. 235, 144–162 (2009).

4. Yeom S., Javidi B., Watson E. Photon counting passive 3D image sensing for automatic target recognition // Opt. Express 13, 9310–9330 (2005).

5. DaneshPanah M., Javidi B. Profilometry and optical slicing by passive three-dimensional imaging // Opt. Lett. 34, 1105–1107 (2009).