BULLETIN OF NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
ISSN 1991-3494
Volume 54, Number 357 (2015), 37 – 47

STUDING THE HIGH-TEMPERATURE SENSOR ELEMENT AND THE STRUCTURE OF MEASURING TRANSDUCERS

K. A. Ozhikenov[1], P. G. Mikhailov[2], E. A. Tuleshov[1], R. S. Ismagulova[1], G. D. Aitzhanova[1]

[1]Kazahsky National Technical University. K. I. Satpaev, Almaty, Kazakhstan,
[2]Penzensky State Technological University, Penza, Russia.
E-mail: kas_ozhiken@mail.ru, pit_mix@mail.ru, toleshov@gmail.com, irauzya@mail.ru, a.gulnara70@mail.ru

Key words: converter, sensor elements, monocrystalline silicon, sensor, polycrystalline silicon.

Abstract. In this paper we investigate the high-temperature sensor elements and structure of the transducers. Results of the study on the choice of materials resistant to high temperatures with the identification of the physical principles that allow to expand the temperature range of the measurement showed that the most promising in terms of proximity to the electrophysical characteristics of monocrystalline silicon structures are PKK-SiO_2-monocrystalline silicon, in which the film is separated from the silicon recrystallized main material SiO2 layer thickness of 0.1-0.2 microns. This structure allows to profile the structure using alkaline or acidic etching agents, receiving the sensing elements to the desired measuring range. To conduct research as a basic compact design was chosen acoustic sensor on the basis of which was decided to create a miniature sensor elements with strain gauges polysilicon mesa. Created technological route for the formation of the sensing elements from the polycrystalline silicon strain gauges. Conducted experimental work on ion doped polycrystalline silicon on Si wafers at different doses and temperatures distillation impurities. It was being developed experimental technology of formation of compensatory payments with polysilicon resistors and multilayer pads. The topology of the board provides for the manufacture of compensation elements on both sides of the board, which were presented fragment of board design. Ratings were measured polysilicon - resistors and the dependence of their resistance to temperature. To increase the sensitivity and parametric and temporal stability of components and systems with polycrystalline silicon - strain gauges, conducted experiments on the laser recrystallization of polycrystalline silicon - films. Obtained as a result of the experimental studies of polycrystalline silicon and modification of films in relation to the elements and structures of microelectronic transducers results give reason to believe developed technology for forming polysilicon sensor elements and structures to high-temperature microelectronic transducers perfectly acceptable and reproducible. Based on experimental data obtained in the study of processes of modification polycrystalline silicon films by ion implantation have been developed MM, will optimize the electrical characteristics of the sensor elements and structures of high microelectronic transducers.

УДК 621.865.8

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СЕНСОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И СТРУКТУР ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

К. А. Ожикенов[1], П. Г. Михайлов[2], Е. А. Тулешов[1], Р. С. Исмагулова[1], Г. Д. Айтжанова[1]

[1]Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан,
[2]Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

Ключевые слова: преобразователь, сенсорные элементы, монокристаллический кремний, чувствительный элемент, поликристаллический кремний.

Аннотация. В работе исследуется высокотемпературные сенсорные элементы и структуры измерительных преобразователей. Результаты исследования по выбору материалов, устойчивых к высоким температурам с выявлением физических принципов, позволяющих расширить температурный диапазон измерения

показало, что наиболее перспективными с точки зрения близости к электрофизическим характеристикам монокристаллического кремния являются структуры РПК-SiO_2-монокристаллического кремния, в которых пленка рекристаллизованного кремния отделена от основного материала слоем SiO_2 толщиной 0,1-0,2 мкм. Такая структура позволяет профилировать структуры с помощью щелочных или кислотных травителей, получая чувствительных элементов на необходимый диапазон измерения. Для проведения исследовательских работ в качестве базовой была выбрана конструкция малогабаритного акустического датчика, на основе которой была решена задача создания миниатюрного чувствительных элементов с поликремниевыми мезатензорезисторами. Создан технологический маршрут по формирование чувствительных элементов с поликристаллическим кремний тензорезисторами. Проводились экспериментальные работы по ионному легированию поликристаллического кремния на Si пластинах при различных дозах и температурах разгонки примеси. Велась разработка экспериментальной технологии формирования компенсационных плат с поликремниевыми резисторами и многослойными контактными площадками. Топология платы предусматривает изготовление элементов компенсации с двух сторон платы, которые были представлены фрагментом конструкции платы. Были замерены номиналы поликристаллического кремния – резисторов и зависимость их сопротивления от температуры. Для повышения чувствительности и параметрической и временной стабильности элементов и систем с поликристаллическим кремнии – тензорезисторами, проводились экспериментальные работы по лазерной рекристаллизации поликристаллический кремний – пленок. Полученные в итоге проведенных экспериментальных работ по исследованию и модификации поликристаллический кремний пленок применительно к элементам и структурам микроэлектронных измерительных преобразователей результаты, дают основание считать разработанную технологию формирования поликристаллический кремний сенсорных элементов и структур для высокотемпературных микроэлектронных измерительных преобразователей вполне приемлемой и воспроизводимой. Основываясь на экспериментальных данных, полученных при исследовании процессов модификации поликристаллический кремний пленок методом ионного легирования, были разработаны ММ, позволившие оптимизировать электрофизических характеристик сенсорных элементов и структур высокотемпературных микроэлектронных измерительных преобразователей.

Введение. При создании высокотемпературных микроэлектронных измерительных преобразователей (МЭИП) основными направлениями исследований являются [1, 2]:

1. Выбор и исследование материалов (особенно функциональных) устойчивых к высоким температурам.

2. Выявление физических принципов, позволяющих расширить температурный диапазон измерения.

3. Разработка маршрутной технологии и технологических режимов формирования высокотемпературных сенсорных элементов и структур (СЭС).

Обзор и анализ высокотемпературных полупроводниковых материалов для СЭС МЭИП. Следует отметить, что основным недостатком монокристаллического кремния (МК), как материала для чувствительных элементов (ЧЭ) МЭИП является его недостаточная температурная стабильность, которая объясняется в основном его сравнительно узкой запрещенной зоной, составляющей 1,1 эВ при 300^0К, что не позволяет использовать кремний при больших температурах и значительных уровнях электромагнитных и радиационных воздействий. Последнее объясняется тем, что энергии теплового возбуждения кристаллической решетки, а также энергии фотонов и элементарных частиц бывает вполне достаточной чтобы инициировать переходы электронов и дырок через потенциальные барьеры в полупроводниковых структурах. Рост количества дефектов (термических, радиационных) порожденных термоударами, радиацией и механическими деформациями приводит к нестабильности характеристик МЭИП. Указанных явлений можно избежать, используя в качестве функциональных материалов широкозонные полупроводники и полупроводниковые соединения.

Единственным представителем широкозонных монокристаллических полупроводников является алмаз, у которого ширина запрещенной зоны составляет 5,5эВ при 300^0К.

К другой группе относятся двойные и тройные полупроводниковые соединения:

– карбид кремния (β - политип) - β - SiC, Eg=2,4эВ;

– арсенид галлия (GaAs), Eg=1,43эВ;

– фосфид галлия (GaP), Eg=2,24эВ;

– фосфат цинка (ZnP_2), Eg=2,05эВ (тетрагональная фаза);

– $MgSiP_2$, Eg=3,1эВ;

– $ZnSiAs_2$, Eg=2,15эВ;
– $CdSiP_2$, Eg=2,2эВ.

Из всех вышеперечисленных материалов практический интерес для использования в МЭИП представляют только алмаз, карбид кремния и арсенид галлия. Остальные материалы представляют для МЭИП больше научный, чем практический интерес из-за значительных технологических трудностей получения кристаллов достаточной площади, малой технологичности процессов формирования СЭС и т.п. Поэтому в основном они используются в качестве источников и приемников оптических излучений [3-6].

Что касается арсенида галлия, имеющего кроме широкой запрещенной зоны еще и высокую подвижность дырок и электронов, позволяющих получать приборы с высокими граничными частотами и температурами, то следует отметить, что технология формирования GaAs структур в значительной степени отличается от кремниевой: она более сложная, менее управляемая и дорогая. Кроме того, в отличие от МК, на поверхности GaAs невозможно создать самопассивирующие окисные пленки, а при термообработке он может выделять соединения мышьяка и галлия, которые являются даже в очень малых дозах чрезвычайно опасными для человека. Нейтрализация отходов, травителей и газов, получаемых в процессе проведения технологических процессов обработки GaAs, является весьма сложной задачей и пока не решена в должной мере на практике. Указанные технологические, организационные и иные технические трудности привели к тому, что в настоящее время GaAs используется исключительно для создания быстродействующих полупроводниковых приборов (СВЧ диоды и транзисторы) и интегральных схем. Попытки создания МЭИП на основе GaAs ограничились пока экспериментальными образцами.

Перспективным материалом для высокотемпературных и работающих в агрессивных условиях МЭИП, несомненно, является синтетический алмаз [3]. Но в настоящее время пока еще не получены алмазные пластины достаточной площади, да и сама технология получения даже небольших кристаллов остается очень сложной и дорогостоящей. Но благодаря таким свойствам, как высокая теплопроводность, термостабильность и стойкость практически к любым агрессивным средам и радиоактивным излучениям, возможно создание различных приборов с уникальными характеристиками, недостижимыми для аналогичных приборов, изготовленных из МК и GaAs. В частности, радиационная стойкость алмаза к нейтронам в 100 раз выше, чем у МК, рабочая температура может достигать $1000 \div 1200^0$C, рабочее напряжение до 1кВ, а теплопроводность выше, чем у Si в 14 раз [7, 8].

Основными трудностями проведения технологических операций и процессов в алмазе является его природная инертность, в том числе по отношению к термодиффузионным процессам. Поэтому для легирования кристаллов алмаза используется исключительно ионная имплантация пучками больших энергий (от 100 кэВ до 1 МэВ). Имплантация ионов He+, N+, O+, Ne+, Si+, Ni+, Cr+, Zn+, C+, B+ и др. позволяет создавать слои и области с p и n типами проводимости.

В последнее время ускоренно развивается направление синтеза тонких алмазных пленок на поверхности различных материалов, в том числе на кремнии и на металлах. Поликристаллические алмазные пленки получают методом газофазного осаждения различных углеродосодержащих газов (метана в смеси с водородом, ацетилена, бензола и ряда других). Активация процесса синтеза пленок осуществляется тлеющим или СВЧ разрядами. Принципиально возможным способом модификации алмазных пленок является легирование их различными примесями, что позволяет создавать тонкопленочные активные и пассивные электронные приборы, а также ЧЭ на основе поликристаллических алмазных пленок. По мере совершенствования технологии легирования монокристаллического алмаза и поликристаллических пленок, нанесения на них контактной металлизации, профилирования пластин, а также получения пластин достаточной площади и приемлемой цены будут, несомненно, разрабатываться и МЭИП на основе алмаза.

Еще одним перспективным функциональным материалом для высокотемпературных и радиационно-устойчивых МЭИП является карбид кремния (SiC). Значительная энергия связи между Si и C обеспечивает высокую термическую, радиационную и химическую стойкость как самому материалу, так и приборов на его основе. Карбид кремния имеет несколько основных (четыре) политипов (модификаций), различающихся строением кристаллической ячейки (а всего известных форм SiC более сотни). Наиболее используемым в датчиках политипом является 6H (или β-SiC). Из

SiC изготовляют высокотемпературные (рабочая температура 600^0C и выше) термометры сопротивления, тензорезисторы, транзисторы и диоды. Как и для алмаза, для SiC традиционная кремниевая технология практически не пригодна, поэтому для него необходима разработка новых технологий формирования СЭС. Так, для диффузии примесей используется ионная имплантация, а для формирования диэлектрических и проводящих пленок - газофазное осаждение и термовакуумное испарение и т.д. При этом в ограниченной мере возможно легирование и создание "p-n" переходов термодиффузией при высокой температуре и только при использовании диффузиантов бора и бериллия. Весьма перспективна технология ионного легирования (ИЛ) ионами Al^+. Одной из особенностей SiC является то, что из-за своей высокой твердости он способен обрабатываться только алмазом или карбидом бора, но при этом на его поверхности возникают микротрещины, которые могут быть удалены химическим или плазмохимическим травлением во фторсодержащей кислородной плазме. Химическое травление проводится или в газовой смеси хлор – кислород при температуре свыше 1000^0C либо в расплавах щелочей при температуре свыше 400^0C. В отличие от кремния SiC в любых щелочных и кислотных травителях не травится. Очевидными недостатками, ограничивающими использование SiC в МЭИП, являются недостаточная отработанность ТП формирования микроструктур, дороговизна и сложность получения монокристаллического SiC. Несмотря на указанные недостатки, SiC является перспективным материалом для МЭИП, которые работают в экстремальных условиях. Поэтому по мере отработки технологии он будет все больше использоваться в качестве функционального материала для МЭИП.

Альтернативой указанным материалам могут быть структуры на основе кремния типа КНД (кремний на диэлектрике) и КНК (кремний на кремнии). Дело в том, что максимальная рабочая температура МК, как силового материала, при которой ухудшаются его ЭФХ, составляет (600-700)^{0}C (температура плавления кремния 1412^0C). При использовании же МК в качестве функционального материала, в котором формируются различные примесные структуры, рабочая температура становится значительно меньше, так как с позиций термодинамики более сложные системы являются менее устойчивыми.

Основным материалом из группы КНД, который наиболее широко используется в МЭИП, является кремний на сапфире (КНС), в которых слой кремния легируется необходимой примесью как изначально (при газофазной эпитаксии), так и в процессе формирования СЭС ЧЭ (термодиффузией или ИЛ). Выбирая необходимый уровень легирования и соответствующую примесь, получают высоколегированные (низкоомные) и низколегированные (высокоомные) области. Для тензоструктур используют, как правило, высоколегированные структуры, которые имеют минимальный ТКС и эффект автокомпенсации. Структуры КНС являются основой для изготовления ЧЭ датчиков механических параметров. Достоинствами КНС структур являются [9, 10]:

- высокая температура эксплуатации, вплоть до 300-350^{0}C без охлаждения;
- возможность достижения при определенных уровнях легирования кремниевой пленки эффекта самокомпенсации температурных погрешностей (ТКС равен ТКЧ, но противоположен по знаку при питании стабилизированным током);
- стойкость к агрессивным средам и радиации.

Основными недостатками КНС структур являются их дороговизна, практическая невозможность их профилирования и значительный уровень структурных напряжений в Si – пленке из-за значительной разницы в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) кремния и сапфира. Кроме того, у МЭИП с ЧЭ на основе КНС присутствует нестабильность характеристик во времени из-за релаксационных процессов, происходящих в пленке Si в процессе эксплуатации датчика. Все эти недостатки сужают область применения таких МЭИП, а также не позволяет выпускать их в массовом количестве по приемлемым ценам.

Значительный интерес для высокотемпературных МЭИП представляет поликристаллический кремний (ПК), который в отличие от МК изотропен по своим ЭФХ [4]. Изотропия электрофизических свойств ПК объясняется тем, что ориентация кристаллов (зерен) в объеме ПК – произвольная, поэтому основные характеристики ПК определяются межзеренными границами (МЗГ) и объемным зарядом, образующемся в области МЗГ. Основным преимуществом ПК по сравнению с МК является возможность формирования из него ЧЭ, не содержащих "*p-n*" - переходы, что позволяет повысить рабочую температуру датчиков до 200…250^{0}C. Изменяя концентрацию

легирующих примесей в ПК (модификация ПК) [5, 6, 11-13], можно получить практически нулевое значение ТКС резисторов. Проводимость ПК регулируется технологическими методами путем изменения дозы легирующей примеси, а также энергией легирующих ионов и температурой подложки. Таким образом, модифицируя ПК путем легирования различными примесями и дозами, термообработкой, рекристаллизацией и т.д. можно получить области и СЭС, имеющие значительную разницу в ЭФХ. На одной подложке можно сформировать, например, тензо- и терморезисторы, фото- и магниточувствительные СЭС, проводящие шины, контактные группы, изолирующие области. Таким образом, элементом модификации ПК являются специальные технологические процессы и операции. Рассмотрим основные СЭС из ПК и технологии их модификации.

При легировании ПК пленок до концентрации $10^{19} \div 10^{20}$см$^{-3}$ их удельное сопротивление снижается до 0,01 Ом·см. Для сравнения: у Si марки КЭФ 4,5 ρ=4,5 Ом·см, а у пленки Al-Mn $\rho=0{,}6\cdot10^{-3}$Ом·см. Аморфная структура легированных ПК пленок дает возможность формировать из них коммутационные шины микронных и субмикронных размеров. После термообработки ПК-шин на них формируется пленка SiO_2 с высокими изоляционными свойствами, которая позволяет формировать второй слой коммутации. Недостаток ПК-шин – разница в ТКЛР с кремнием: у ПК $\alpha=3{,}82\cdot10^{-6}$, у МК $\alpha=2{,}33\cdot10^{-6}$, что не так существенно для интегральных схем, работающих в нормальных условиях, но критично для МЭИП, эксплуатирующихся в широком диапазоне температур. Важным свойством ПК пленок является возможность модификации структуры с помощью лазерного излучения, при воздействии которого происходит рекристаллизация пленки [14].

Структура ППК сильно зависит от вида легирующей примеси, температуры осаждения и термообработки пленки после формирования. Пленки поликристаллического кремния, осаждаемые при температуре менее 575^0С – аморфные, а при температуре более 625^0С становятся поликристаллическими и имеют столбчатую структуру. Кристаллизация и рост зерен ПК происходит при термоотжиге аморфного или столбчатого ПК. Важным ТП формирования высокотемпературных поликремниевых МЭИП является перекристаллизация ПК, которая происходит при нагреве структур. При этом обнаружено, что температура кристаллизации сильно зависит от легирующих примесей, которые вносятся в ПК в процессе газофазного осаждения пленок [15, 16]. Изменяя состав и концентрацию примесей, можно управлять свойствами ППК. Обнаружено, что примеси O_2, N_2, С стабилизируют аморфное состояние ППК до $t_{отж} > 1000^0$С, а мышьяк обеспечивает устойчивую столбчатую структуру до 990^0С. ППК, легированная фосфором до высоких концентраций и отожженная при 900-1000^0С в течение 20 мин. имеет средний размер зерна около 1 мкм. ППК, осажденная при 600-650^0С имеет зерна, ориентированные в основном по направлению<100>, но при этом структура пленок неоднородна и содержит значительное число зерен, ориентированных по направлениям <110>, <111>, <311>, <331>. Легирующие добавки и примеси также оказывают влияние на предпочтительную ориентацию зерен ППК.

Для МЭИП силовых параметров, действие которых основано на пьезорезистивном эффекте, экспериментально измерены коэффициенты тензочувствительности для различных политипов кремния.

Так для тензоструктур, легированных бором до концентраций 10^{20}см$^{-3}$, значения продольного (π_l) и поперечного (π_t) пьезорезистивных коэффициентов составляют:

- π_l для МК = 60, для ПК = 30, для РПК = 40;
- π_t для МК = 60, для ПК = минус 4, для РПК = минус 6.

Фундаментальные пьезорезистивные коэффициенты для ПК, легированного бором до $1{,}8\cdot10^{20}$, имеют следующие значения:

$\pi_{11}=+11{,}8\cdot10^{-11}$Па, $\pi_{12}=-6{,}7\cdot10^{-11}$Па, $\pi_{44}=+18{,}6\cdot10^{-11}$Па.

Для ППК, легированных фосфором, тензорезисторы обладают только геометрическим тензоэффектом, а пьезорезистивная составляющая эффекта отсутствует.

Таким образом, наиболее перспективными с точки зрения близости к ЭФХ МК, являются структуры РПК-SiO_2-МК, в которых пленка рекристаллизованного кремния отделена от основного материала слоем SiO_2 толщиной 0,1-0,2 мкм. Такая структура аналогична выше рассмотренной КНС - структуре, но, в отличие от последней, позволяет профилировать структуры с помощью щелочных или кислотных травителей, получая ЧЭ на необходимый диапазон измерения [17]. Рабочая температура МЭИП с использованием ПК рекристаллизованного лазерным лучем,

составляет 250…270^{0}С. Достигнутая на практике тензочувствительность РПК структур, составляет от 70 до 80% от тензочувствительности МК. Используя в процессе лазерной рекристаллизации окисную маску, защищающую выбранные элементы от нагрева, можно получить гибридные структуры: РПК-ПК, поликремниевые элементы которых могут служить высокоомными резисторами, подгоночными элементами и термокомпенсационными элементами [18]. Использование такой технологии позволяет изготовить полностью кремниевый МЭИП, в котором силовые, функциональные и регулировочные элементы, а также защитные материалы (вплоть до корпуса) изготовлены из модификаций кремния (МК и ПК) и его соединений (SiO_2, Si_3N_4). Такое конструктивно-технологическое решение приводит к резкому снижению тепловых деформаций благодаря идентичности применяемых материалов.

Разработка технологий формирования поликремниевых элементов и структур МЭИП. В результате проводившихся исследований была разработана технологии формирования меза-поликремниевых тензорезисторов на монокристаллических кремниевых подложках.

Для проведения исследовательских работ в качестве базовой была выбрана конструкция малогабаритного акустического датчика, на основе которой была решена задача создания миниатюрного ЧЭ с поликремниевыми меза-тензорезисторами. При этом в базовой конструкции ЧЭ в соответствии с выбранными материалами были достигнуты следующие технические характеристики [19]:

- удельное поверхностное сопротивление резисторов из поликремния: ρ_s = (30–100) Ом/□;
- номиналы поликремниевых тензорезисторов R_{1-4} = (200–1000) Ом;
- толщина мембраны в профиле кристалла (5–20) мкм;
- ТКС поликремниевых тензорезисторов ТКС < 0,05 %/°С.

Фрагменты конструкции ЧЭ с поликремниевыми тензорезисторами представлены на рисунке 1,а.

Формирование ЧЭ с ПК тензорезисторами проводилось по следующему технологическому маршруту (указаны только основные технологические операции):

1. Профилирование Si заготовки и профилирование ЧЭ с использованием в качестве защитной маски слоя SiO_2;

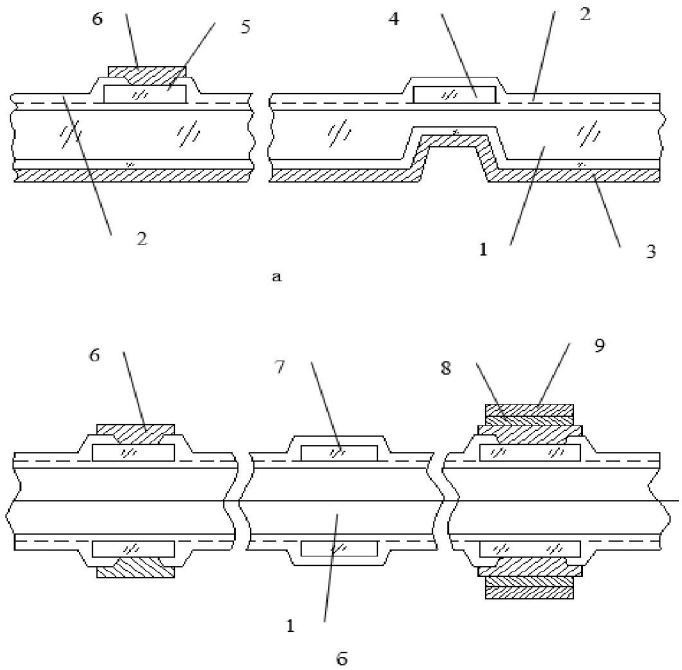

Рисунок 1 – Фрагменты конструкций ЧЭ (а) и компенсационной платы (б) изготовленных с использованием поликремниевой технологии: 1 - подложка из МК; 2 - изолирующая пленка из SiO_2; 3 - Al - экран; 4 - ПК пьезорезистор; 5 - ПК коммутационная шина; 6 - Al – контактная площадка; 7 - ПК резистор; 8 - подслой ванадия; 9 - Ni контактная площадка

2. Травление SiO_2 с обеих сторон пластины;

3. Окисление пластин с целью создания слоя SiO_2, выполняющего роль изолятора между ПК тензорезисторами и подложкой из МК;

4. Нанесение пленки ПК толщиной 0,6±0,2 мкм в диффузионной печи СДО 125/3-15 (оснащенной реактором пониженного давления - РПД) по режимам: температура 630^0С, время 90 мин; рабочий газ – 5% смесь моносилана с аргоном;

5. Загонка бора в пленку ПК термической диффузией из нитрида бора при температуре 950°С при последовательной выдержке в потоке аргона в течение 12 мин и потоке кислорода в течение 5 мин, величина удельного поверхностного сопротивления находится в пределах ρ_s = (67-74) Ом/□;

6. Фотолитография по формированию меза-тензорезисторов в пленке ПК;

7. Активация примеси бора в пленке ПК при режимах: температура 1150^0С, пластины выдерживают в потоке кислорода – 20 мин, потоке аргона – 10 мин, величина удельного поверхностного сопротивления находится в пределах ρ_s =(38-46) Ом/□;

8. Фотолитография по формированию слоя из SiO_2 над профилем с непланарной стороны;

9. Фотолитография по формированию окон под контакт с Al – металлизации с планарной стороны;

10. Термовакуумное напыление Al - металлизации;

11. Фотолитография по формированию Al - металлизации;

12. Вжигание алюминия;

13. Контроль электрических параметров ЧЭ;

14. Напыление металлических защитных пленок на обе стороны пластины;

15. Фотолитография по формированию зон разделения в металлической пленке с планара;

16. Плазмохимическое разделение пластин на отдельные кристаллы (ЧЭ);

17. Отжиг ЧЭ с целью имитации процесса электростатики;

18. Контроль внешнего вида ЧЭ;

19. Контроль адгезии Al - металлизации;

20. Окончательный контроль параметров и внешнего вида разделенных ЧЭ.

Проводились экспериментальные работы по ионному легированию ПК на Si пластинах при различных дозах и температурах разгонки примеси (рисунок 2).

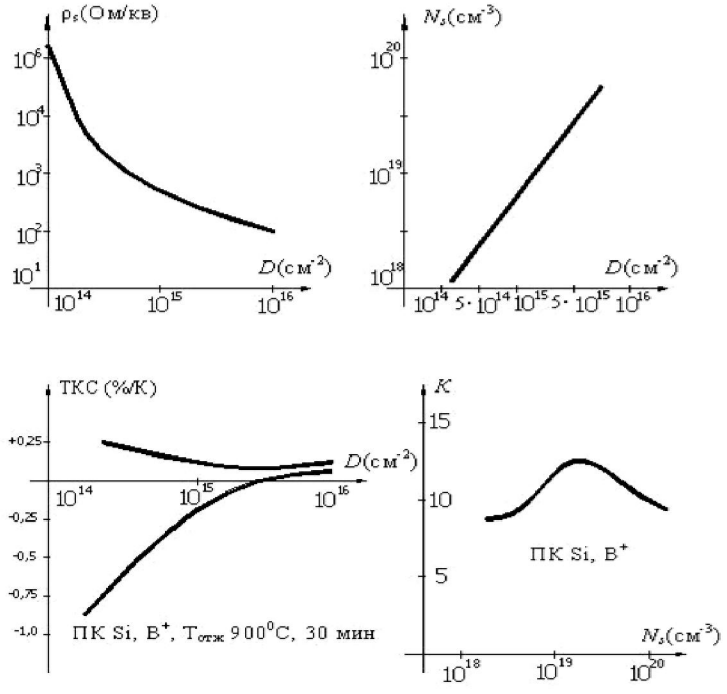

Рисунок 2 – Зависимости основных электрофизических характеристик (ρ_s, ТКС, K, N_S) поликремниевых пьезорезисторов от дозы легирования (D) и концентрации (N_S) примеси

Первый режим загонки бора – доза 110 000 импульсов, ускоряющее напряжение 70 кэВ. Разгонка (активация) примеси с окислением при 1150^{0}С, выдержка в потоке O_2 20 мин. и в потоке Ar 10 мин.

Величина удельного поверхностного сопротивления ПК для первого режима была получена в пределах ρ_s = (25-26) Ом/□.

Второй режим загонки бора – доза 90000 импульсов, ускоряющее напряжение 70 кэВ. Разгонка (активация) примеси с окислением при 1150^{0}С, выдержка в потоке O_2 20 мин. и в потоке Ar 10 мин.

Величина удельного поверхностного сопротивления ПК для второго режима была получена в пределах ρ_s = (53-57) Ом/□.

Велась разработка экспериментальной технологии формирования компенсационных плат с поликремниевыми резисторами и многослойными контактными площадками.

Топология платы предусматривает изготовление элементов компенсации с двух сторон платы. Фрагменты конструкции платы представлены на рисунке 1,б.

ТП изготовления компенсационной платы состоит из следующих основных технологических операций (в перечне не указаны операции очистки) [20]:

- окисление пластин на глубину (0,6 – 0,8) мкм;
- нанесение пленки ПК толщиной 0,6±0,2 мкм в диффузионной печи СДО 125/3-15 с РПД по режимам: температура 630^{0}С, время 90 мин; рабочий газ – 5% смесь моносилана с аргоном;
- диффузионная загонка бора в пленку ПК с обеих сторон при температуре 950^{0}С в потоке аргона 12 мин., потоке кислорода – 5 мин., величина R_S находится в пределах ρ_s =(63-81) Ом/□;
- фотолитография по формированию меза-тензорезисторов в пленке ПК с двух сторон;
- разгонка примеси бора в пленке ПК, режимы: температура 1150^{0}С, пластины выдерживают в потоке кислорода – 20 мин, потоке аргона – 10 мин, ρ_s =(35-45) Ом/□;
- фотолитография по формированию окон под контакт с Al - металлизации с обеих сторон пластины;
- термовакуумное напыление Al-металлизации с двух сторон пластины;
- фотолитография по формированию Al-металлизации;
- вжигание алюминия;
- замер электрических параметров платы (выборочный);
- проверка адгезии ИЛ алюминиевой металлизации;
- двухстороннее напыление структуры молибден-никель масочным методом;
- разделение алмазным диском кремниевых пластин на платы;
- контроль функционирования и разбраковка плат.

Были замерены номиналы ПК – резисторов и зависимость их сопротивления от температуры. Величина ТКС находится в пределах (0,06 – 0,07) %/^{0}С.

Для повышения чувствительности и параметрической и временной стабильности элементов и систем с ПК – тензорезисторами, проводились экспериментальные работы по лазерной рекристаллизации ПК – пленок.

Формирование ПК – резисторов проводилось по следующей технологической схеме:

1. На окисленные Si – пластины (толщина SiO_2-0,04мкм) газофазным методом в реакторе пониженного давления осаждался слой нитрида кремния Si_3N_4 толщиной 0,04мкм
2. В реакторе пониженного давления осаждается пленка ПК толщиной 2 мкм
3. Осаждение на поликремний слоя SiO_2-0,6 мкм;
4. Ионное легирование ПК – пленки бором различными дозами: $1\cdot10^{14}$, $2\cdot10^{14}$, $5\cdot10^{14}$, $1\cdot10^{15}$ при 100 кэВ;
5. Активация внедренной примеси осуществлялась термоотжигом при 900^{0}С в течение 30 мин в диффузионной печи типа СДО 125/3-15;
6. Формирование окисной пленки толщиной 0,07 мкм и 0,2 мкм на ПК – резисторах путем окисление слоя ПК – пленки в диффузионной печи;
7. Лазерная рекристаллизация ПК – пленки;
8. Измерение ЭФХ образцов в диапазоне температур (минус 50…+150)^{0}С.

Нитрид кремния под слоем ПК выполнял функции смачивающего агента во время лазерной рекристаллизации ПК, а окисел, сформированный на пленке ПК, выполнял функции противоотражающего покрытия и защитного слоя, предотвращающего попадание примесей в пленку во время рекристаллизации.

Рекристаллизация ПК – пленки осуществлялась аргоновым лазером с длиной волны 0,5145 мкм, работающим в непрерывном режиме: мощность излучения лазера варьировалась от 3 до 9 Вт, скорость сканирования – 0,5 см/с, размер сфокусированного лазерного пятна 20 мкм, шаг сканирования – 10 мкм. Температура подложки изменялась от комнатной до $+400^0$С.

После замеров удельного сопротивления резисторов, сформированных с различной дозой легирования и различной мощностью лазерного излучения, вычислялись: ТКС, концентрация примеси, временной дрейф сопротивления (рисунок 2).

На основе анализа экспериментальных результатов формирования ПК пьезорезисторов можно сделать следующие выводы:

1. Факторами, управляющими ЭФХ СЭС на основе ПК, являются доза легирования, мощность лазерного излучения, и в меньшей мере - температура подложки;

2. ПК – резисторы, имеющие защитную окисную пленку, имеют и большую стабильность, при этом оптимальная толщина пленки лежит в диапазоне 0,1 - 0,2мкм;

3. Варьируя дозой легирования, можно изменять ТКС ПК – пленок от отрицательных до практически нулевых значений;

4. При увеличении дозы легирования одновременно с уменьшением ТКС, уменьшается удельное поверхностное сопротивление слоев;

5. На одном ЧЭ, изменяя дозу легирования, можно сформировать термо- и пьезорезистивные элементы, что позволяет получать совмещенные датчики.

Выводы. Полученные в итоге проведенных экспериментальных работ по исследованию и модификации ПК пленок применительно к элементам и структурам МЭИП результаты, дают основание считать разработанную технологию формирования ПК СЭС для высокотемпературных МЭИП вполне приемлемой и воспроизводимой.

Основываясь на экспериментальных данных, полученных при исследовании процессов модификации ПКП методом ионного легирования, были разработаны ММ, позволившие оптимизировать ЭФХ СЭС высокотемпературных МЭИП.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Михайлов П.Г. Исследования по созданию высокотемпературных сенсорных элементов и структур. Микросистемная техника. 2004. №8. С. 38-44.

[2] Михайлов П.Г., Мокров Е.А., Скотников В.В. Чувствительные элементы высокотемпературных датчиков давления. Материалы и технологии изготовления. Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 4. С. 204–213.

[3] Михайлов П.Г., Сергеев Д. А., Соколов А. В. Высокотемпературные функциональные материалы для датчиков физических величин. Сборник трудов I Межд. научно-практической конф. «Инновационные технологии в машиностроительном комплексе». Пенза, Изд-во ПГУ. 2012. С. 289-291.

[4] Михайлов П.Г., Сергеев Д.А., Соколов А.В. Моделирование поликремневых пленочных структур высокотемпературных датчиков физических величин. Современные информационные технологии: Труды МНТК. Выпуск 14. Пенза: ПГТА, 2011. С. 209-214.

[5] Михайлов П.Г. Управление свойствами материалов сенсорных элементов микроэлектронных датчиков. Микросистемная техника. 2003. №5. С. 10-13.

[6] Михайлов П.Г. Модификация материалов микроэлектронных датчиков. Приборы и Системы. Управление, Контроль, Диагностика. 2003. № 5. С. 43-46.

[7] Ожикенов К.А., Михайлов П.Г., Касимов А.О., Скотников В.В. Использование обратных преобразователей в микроэлектронных датчиках, Вестник НАН РК, №6, 2014, С. 41-46.

[8] Ожикенов К.А., Михайлов П.Г., Касимов А.О. Петрин В.А., Маринина Л.А. Общие вопросы моделирования компонентов и структур микроэлектронных датчиков, Вестник НАН РК, №6, 2014, С. 62-71.

[9] Ожикенов К.А., Михайлов П.Г., Касимов А.О., Баянбай Н., Куатканова Ж. Совмещенные датчики физических величин. Вестник НАН РК, №3. 2015. С. 51-60.

[10] Ожикенов К.А., Михайлов П.Г., Рахимжанова П., Абдикулова З. Вопросы обеспечения временной стабильности датчиков физических величин. Известия НАН РК. Серия физико-математическая. 2015 г. №3. С. 191-198.

[11] Ожикенов К.А., Михайлов П.Г., Касимов А.О., Аналиева А.У. Узлы и компоненты микроэлектронных датчиков / Известия Южного федерального университета. Технические науки. № 3(164) 2015 С. 184-193.

[12] Михайлов П.Г., Чернецов М.А., Зубков А.Ф. Неразъемные соединения в измерительных модулях полупроводниковых датчиков силовых параметров Надежность и качество. Труды международного симпозиума. Пенза. ПГУ. 2011.

[13] Михайлов П.Г., Мокров Е.А., Байдаров С.Ю. Изготовление неразъёмных узлов микроэлектронных датчиков. Контроль. Диагностика. № 6. 2011.

[14] Михайлов П.Г., Юрков Н.К., Лапшин В.И. Байдаров С.Ю. Технические измерения в технологии и производстве радиоэлектронной аппаратуры и измерительных систем Учебное пособие с грифом УМО. Пенза. Издательство ПГУ, 2012. С.148.

[15] Михайлов П.Г., Байдаров С.Ю, Мокров Е.А. Технологические процессы в приборостроении. Измерение и контроль геометрических параметров деталей и узлов измерительных приборов. Учебное пособие. Пенза. Издательство ПГУ. 2011. С. 112.

[16] Михайлов П.Г., Соколов А.В. Моделирование чувствительных элементов датчиков механических напряжений в строительных конструкциях. Региональная архитектура и строительство. 2012. №3. С.110-117.

[17] Михайлов П.Г., Сергеев Д.А., Соколов А.В. Измерение и контроль геометрических параметров и узлов датчиков физических величин Труды МНТК Датчики и системы: технологии получения и обработки измерительной информации (Датчики и системы 2012). Пенза Издательство ПГУ. 2012. С. 122-128.

[18] Михайлов П.Г., Байдаров С. Ю., Мокров Е. А. Неразъемные соединения в узлах датчиков физических величин Сб. тр. I Межд. научно-практической конф. «Инновационные технологии в машиностроительном комплексе» Пенза Изд-во ПГУ. 2012. С. 277-279.

[19] Михайлов П.Г., Байдаров С. Ю., Мокров Е. А. Методы неразъемного соединения деталей измерительных модулей микроэлектронных датчиков Сборник трудов I Межд. научно-практической конф. «Инновационные технологии в машиностроительном комплексе» Пенза Изд-во ПГУ. 2012. С. 269-271.

[20] Михайлов П.Г., Сергеев Д.А., Соколов А.В., Чернецов М.А. Метрологическое обеспечение процесса производства датчиков давления Современные информационные технологии: Труды МНТК. Выпуск 14. Пенза: ПГТА. 2011. С. 204-209.

REFERENCES

[1] Mikhailov P.G., Research on high-temperature sensor elements and structures, Microsystems technology, 2004, 8, pp. 38-44 (in Russ.).

[2] Mikhailov P.G., Mokrov E.A., Skotnikov V.V., Sensitive elements of high-temperature pressure sensors. Materials and manufacturing technology. Southern Federal University. Technical science, 2014, 4, pp. 204-213 (in Russ.).

[3] Mikhailov P.G., Sergeev D.A., Sokolov A.V., High functional materials for sensors of physical quantities, Proceedings of I between, Scientific-Practical Conference, "Innovative technologies in machine-building complex", Penza Publ, PNU, 2012, pp. 289-291 (in Russ.).

[4] Mikhailov P.G., Sergeev D.A., Sokolov A.V., Modeling polysilicon film structures of high physical quantity sensors, Modern information technologies: Proceedings of the IRTC, Issue 14, Penza: PSTA, 2011, pp. 209-214 (in Russ.).

[5] Mikhailov P.G., Management of material properties of sensory elements of microelectronic sensors, Microsystems technology, 2003, 5, pp. 10-13 (in Russ.).

[6] Mikhailov P.G., Modification of the materials microelectronic sensors, Instruments and systems, Control, monitoring, diagnostics, 2003, 5, pp. 43-46 (in Russ.).

[7] Ozhikenov K.A., Mikhailov P.G., Kasimov A.O., Skotnikov V.V., The use of inverters in microelectronic sensors, Bulletin of National Academy of Sciences of Kazakhstan, 2014, 6, pp. 41-46 (in Russ.).

[8] Ozhikenov K.A., Mikhailov P.G., Kasimov A.O., Petrin V.A., Marinina L.A., Common questions of modeling components and structures microelectronic sensors, Bulletin of National Academy of Sciences of Kazakhstan, 2014, 6, pp. 62-71 (in Russ.).

[9] Ozhikenov K.A., Mikhailov P.G., Kasimov A.O., Bayanbay N., Kuatkanova J., Combined sensors of physical quantities, Journal of National Academy of Sciences of Kazakhstan, 2015, 3, pp. 51-60 (in Russ.).

[10] Ozhikenov K.A., Mikhailov P.G., Rakhimzhanova P., Abdikulov Z., The issues of temporal stability of sensors of physical quantities. Proceedings of National Academy of Sciences of Kazakhstan. A series of physical and mathematical, 2015, 3, pp. 191-198 (in Russ.).

[11] Ozhikenov K.A., Mikhailov P.G., Kasimov A.O., Analieva A.U., Parts and components of microelectronic sensors, Southern Federal University, Technical science, 2015, 3(164), pp. 184-193 (in Russ.).

[12] Mikhailov P.G., Tchernetsov M.A., Zubkov A.F., Permanent connections in semiconductor sensors measuring modules power parameters Reliability and quality, Proceedings of the International Symposium, Penza, PNU, 2011 (in Russ.).

[13] Mikhailov P.G., Mokrov E.A., Baydarov S.Y., Production of one-piece assemblies of microelectronic sensors control, Diagnosis, 6, 2011 (in Russ.).

[14] Mikhailov P.G., Jurkov N.K., Lapshin V.I., Baydarov S.Y., Performance measurement technology and production of electronic equipment and measuring systems manual is stamped UMO, Penza, Publisher PNU, 2012, p.148 (in Russ.).

[15] Mikhailov P.G., Baydarov S.Y., Mokrov E.A., Processes in instrument. Measurement and control geometric parameters of parts and components instrumentation Textbook Penza, Publisher PNU, 2011, p. 112 (in Russ.).

[16] Mikhailov P.G., Sokolov A.V., Simulation of the sensor element of stress in structures Regional architecture and engineering, 2012, 3, pp. 110-117 (in Russ.).

[17] Mikhailov P.G., Sergeev D.A., Sokolov A.V., Measurement and control of geometrical parameters and units of physical quantities sensors Proceedings IRTC sensors and systems: technologies for obtaining and processing measurable-nary information (Sensors and Systems in 2012), Penza Publisher PNU, 2012, pp. 122-128 (in Russ.).

[18] Mikhailov P.G., Baydar S.Y., Mokrov E.A., Permanent connection to the nodes of sensors of physical quantities Coll. tr. I Int. Scientific-Practical Conference. "Innovative technologies in machine-building complex", Penza Publisher PNU, 2012, pp. 277-279 (in Russ.).

[19] Mikhailov P.G., Baydar S.Y., Mokrov E.A. Methods permanent connection pieces measuring modules microelectronic sensors Proceedings of I between. Scientific-Practical Conference. "Innova-Technologies in Machine Building Complex", Penza Publisher PNU, 2012, pp. 269-271 (in Russ.).

[20] Mikhailov P.G., Sergeev D.A., Sokolov A.V., Tchernetsov M.A., Metrological assurance of the production process of pressure sensors, Modern information technologies: Proceedings of the IRTC, Issue 14, Penza: PSTA, 2011, pp. 204-209, (in Russ.).

ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫ СЕНСОРЛЫ ЭЛЕМЕНТТЕРІНІҢ ЖӘНЕ ӨЛШЕУІШ ТҮРЛЕНДІРГІШТЕР ҚҰРЫЛЫМЫН ЗЕРТТЕУ

Қ. Ә. Өжікенов[1], П. Г. Михайлов[2], Е. А. Төлешев[1], Р. С. Исмагулова[1], Г. Д. Айтжанова[1]

[1]Қ. И. Сәтбаев ат. Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы, Қазақстан.
[2]Пенза мемлекеттік технологиялық университеті, Пенза, Ресей

Тірек сөздер: түрлендіргіш, сенсорлы элементтер, монокристаллды кремний, сезімтал элемент, поликристаллды кремний.

Аннотация. Жұмыста біз жоғары температурадғы сенсорлы элементтер мен датчиктерді құрылымы зерттелді және жасалынды. Өлшем температура диапазоны кеңейтуге мүмкіндік физикалық принциптерін анықтаумен, жоғары температураларға төзімді материалдарды таңдау зерттеу нәтижелері, электрофизикалық сипаттамаларына жақын тұрғысынан бұл ең тиымды екенін көрсетілді.

Зерттеу жұмыстарын жүргізу барысында базалық жоба ретінде шағын акустикалық датчиктің құрылысы таңдалды, қойылған шарттарға байланысты поликремнийлі меза-тензорезистірлі миниатюрлы сезімтал элементтерді құрастыруды көздедік. Поликристаллды кремнийлі және тензорезисторлы сезімтал элементтерді қалыптастырудың технологиялық жолы жасалды. Поликристаллды кремнийді иондық қоспалау әдісімен Si пластиналарына әр-түрлі мөлшерлемелермен және де қоспалардың температуралық жылдамдықтарын өзгерте отырып көптеген тәжірибелік жұмыстар өткізілді. Поликремнилі резисторлы және көпқабатты байланыс ауданымен өтемдік тақташаларды жасап шығару жөнінде тәжірибелік технологиясы қарастырылды.

Поступила 02.10.2015 г.