



АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ СЕНСОРНЫХ КРИСТАЛЛОВ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА

ANALYZING SENSORS SILICON CRYSTALS DEFECTS AND PRODUCTION TECHNOLOGIES

УДК 681.3

ВЛАСОВ АНДРЕЙ ИГОРЕВИЧ

К. т. н., доцент

VLASOV ANDREY I.

Ph.D, associate professor

МИЛЕШИН СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ

Ассистент

MILESHIN SERGEY A.

Assistant

ЦИВИНСКАЯ ТАТЬЯНА АНАТОЛЬЕВНА

Главный технолог НОЦ «Наносистемы»

TSIVINSKAYA TATYANA A.

Chief technologist of “Nanosistemy” SEC

МГТУ им. Н. Э. Баумана

105005, Москва, 2-я Бауманская 5, стр. 1

Тел.: +7 (499) 263-65-53

info@iu4.bmstu.ru

Bauman MSTU

bld. 1, 5 2nd Baumanskaya St., Moscow, 105005

Tel.: +7 (499) 263-65-53

info@iu4.bmstu.ru

В данной работе представлены возможные проблемы текущего производства кристаллов для создания чувствительных элементов систем датчиков из монокристаллического кремния. Показаны различные методы разработки с учетом настоящих технологических ограничений структур для высокоточных контрольно-измерительных приборов измерения физических величин. Проанализированы дефекты кристаллической решетки, появляющиеся при производстве чувствительных элементов, и их влияние на характеристики контрольно-измерительных сенсоров. Представлены типовые схемы производства сенсорных элементов.

Ключевые слова: монокристаллический кремний; кристаллическая решетка; микродефекты; контрольно-измерительный сенсор; упругие деформации; чувствительный элемент.

The paper presents possible problems of the current production of crystals for creating sensitive elements of systems of sensors from single-crystal silicon. It highlights various methods of development taking into account real technological restrictions of structures for high-precision instruments of physical quantities measurement. The defects of a crystal lattice appearing during sensitive elements production and their impact on characteristics of control and measuring sensors have been analyzed, and standard schemes of touch elements production have been considered.

Keywords: single-crystal silicon; crystal lattice; microdefects; control and measuring sensor; elastic deformations; sensitive element.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время ежегодные объемы продаж продуктов микроэлектроники превышают 250 млрд долл., компонентов на основе МЭМС — примерно 10 млрд долл. В настоящее время выручка от реализации продуктов электроники уже больше 250 млрд долларов, а с учетом МЭМС — 15 млрд включительно.

Согласно данным организации Yole Development из Франции, деятельностью которой является мониторинг и анализ текущего состояния и перспектив рынка инноватики в мире, мировой рынок МЭМС, включая и оборудование для его производства, будет уже скоро составлять более 15 млрд долларов.

Жан-Кристофер Элой (президент Yole Development) пояснил, что в следующие 5 лет средние темпы роста объема продаж МЭМС будут превышать 12%. Объем продаж в 2018 году достигнет 20 млрд долларов. Уже сегодня продаваемые на рынке компоненты характеризуются высоким уровнем технологии. Производство МЭМС-компонентов расширяется все дальше, появляются новые области применения, также в медицине и промышленности.

Ускоренное внедрение МЭМС-технологий в значительной мере объясняется их главными плюсами — компактностью,

функциональностью, прочностью, небольшим энергопотреблением, несложностью внедрения, востребованностью фактически целыми рынками электронного производства. МЭМС обретают наиболее обширное использование в рынках глобального спроса: автомобили, обычные гаджеты (сотовые телефонные аппараты, ноутбуки, нетбуки и др.), устройства особого назначения, выполняемые маленькими партиями: медицинская, армейская и аэрокосмическая техническая оснастка, индустриальные АСУ, техника прогноза метеоусловий.

Важное пожелание, требуемое от МЭМС при глобальном внедрении, — исполнение отношения «невысокая стоимость/кол-во штук произведенное за раз», а к устройствам особого назначения — лучшие характеристики из существующих.

МЭМС имеют все шансы стать неповторимым, легким продуктом для почти всех, до этого трудных задач диагностики и контроля благодаря их плюсам. Сейчас формирование технологий изготовления и испытания, а также возможность местного производства МЭМС, позволяет клиенту творить личные, неповторимые продукты в рамках собственной научно-технической базы. Глобально, под МЭМС понимаются разные механико-электрические

(воспринимающие) либо электромеханические актюаторы, размеры которых порядка 1 микрона. Смещение сменных частей МЭМС в данном случае никак не превосходит того же микрона.

Технология МЭМС выстроена на внедрении в кремниевой подложке микропроизводства микромеханических структур сенсоров, актюаторов (управляющих частей) и электрических приборов, исполняющих задачи сбора, разбора, контролирования, формирования управляющих сигналов. Данные технологии очень похожи на те, что используются для изготовления микросхем. Поэтому МЭМС-приборы гарантируют высочайшую степень функциональности, прочности, невысокую стоимость. Наверное, это является той причиной, которая обусловила их обширное использование, как и продуктов микроэлектроники. Несмотря на то, что оборудование особого назначения позволяет устанавливать сравнимо высокую стоимость, тот факт, что МЭМС-схемы разрешают добиться невысокой цены за штуку, существенно расширяет возможность развертывания сенсорных сетей, даже если интеграторам это могло показаться лишним. МЭМС-детекторы давления и перемещения (акселерометры, гироскопы) создают перемещения, характеристики которых мониторит МЭМС-конструкция. Передвигающаяся конструкция данных устройств

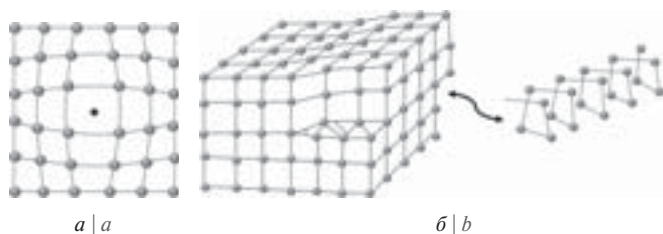


Рис. 1. Микродефекты кристаллической решетки: а) внедрение одиночного атома в междоузлие; б) swirl-картина объемного микродефекта

Fig. 1. Microdefects of a crystal lattice: a) introduction of single atom into an interstice; b) a swirl-picture of volume microdefect

никак не сопряжена с объектом, поэтому они маркируются как бесконтактные приборы. Если подвижная конструкция качественно спроектирована и вполне защищается корпусом, то маленький сенсор высоконадежен и имеет возможность работать в разных условиях среды и состояниях, с быстро изменяющимися температурами, ускорениями, при наличии ударов, влаги, загрязнений, электромагнитных нарушений, радиации. В этих условиях гарантируется достоверная и четкая работа в динамической системе, т.е. при около стремительном, скачкообразном, периодическом либо аperiodическом изменении характеристик.

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРУКТУР ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МЭМС-СЕНСОРОВ ДАВЛЕНИЯ

Компании в России, занимающиеся дизайном и созданием интегральных структур в монокристаллическом кремнии, в исследованиях и налаживании выпуска преобразователей давления, перенося напрямую опыт одной технологии в другую, никак не предусматривают одной характерной особенности в эксплуатации кристаллов: микросхемотехнические кристаллы действуют в системе передачи информации в отсутствие добавления к ним каких-либо нагрузок, и качество их работы никак не координируется с правильностью замера того или другого конкретного параметра, а преобразователи для сенсоров — наверное контрольно-замерное оборудование, основанное на преобразовании деформации вытравленной кремниевой мембраны в электрический сигнал [1–3].

Оригинальные качества упругости монокристаллического кремния обусловлены устройством кристаллической решетки. Из-за этого микродефекты кристаллической решетки, обусловленные примесями в виде O_2 , углерода и N_2 , чувствительны к введению единичных атомов в междоузлия кристаллической решетки (рис. 1а). Поскольку эти атомы прямо действуют на качества и свойства полупроводника, делая 3D-микродефекты (рис. 1б), и имеют форму спирали, они именуется swirl-лентой (от англ. swirl — воронка).

INTRODUCTION

Annual sales volumes of microelectronics products have recently exceeded 250 bln dollars, and those of components on the basis of MEMS are over 10 bln dollars. Today the proceeds of the sales of electronics products are more than 250 billion dollars, including 15 billions of MEMS sales.

According to the data of Yole Development, a French organization that monitors and analyzes the current state and prospects of the world innovatics market, the world MEMS market including the equipment for its production, will soon be over 15 billion dollars.

Jean-Christophe Eloy (the president of Yole Development) has explained that in the next 5 years average growth rates of MEMS sales volume will exceed 12%. In 2018 the sales volume will reach 20 bln dollars. Today the components sold in the market are characterized by high technological level. The production of MEMS components has been steadily

extending, new spheres of application appear, both in medicine and in industry.

The accelerated introduction of MEMS-technologies is mainly explained by their principal pluses, such as compactness, functionality, durability, low energy consumption, simplicity of introduction, a strong demand by actually whole markets of electronics products. And global demand for MEMS is still growing along with their new applications: cars, common gadgets (cellular phones, laptops, netbooks, etc.), the devices of special function which are manufactured in small lots: medical equipment, army and space technical usage, equipment for the weather forecast.

An important feature required for MEMS at global introduction is the execution of the relation “low cost / number of pieces per time unit”, and for devices of special function — to have the best possible characteristics.

Thanks to their pluses MEMS have every chance of becoming a unique, easy product for

almost all difficult problems of diagnostics and control that were unsolvable before. Currently, the formation of manufacturing and testing techniques, as well as a possibility of local production of MEMS, allows the client to create personal, unique products within their own scientific and technical base. Globally, MEMS are understood as different mechanic-electric (perceiving) or electromechanical actuators, whose size is about 1 micron. The shift of replaceable parts of MEMS does not exceed 1 micron.

The MEMS technology is built on introducing into a silicon substrate the microproduction of micromechanical structures of sensors, actuators (operating parts) and electric devices that collect, analyze, monitor and form the operating signals. These technologies have much in common with those used for the production of chips. That is why MEMS devices can guarantee the highest degree of functionality, durability, and low cost. These features



В течение всего цикла производства устройств на основе пластин из монокристаллического кремния исходные пластинки подвергаются влиянию больших температур около 1200 °С, и в итоге в некоторых витках спирали ускоряется распад твердых растворов с образованием различного вида примесных комплексов, кластеров точечных дефектов, дефектов упаковки и других структурных несовершенств. Возникающие изъяны имеют все шансы служить центрами осаждения избыточных растворов и других иных включений, которые способны образовать очаги одиночных дрейфующих микродефектов. Погрешность измерения увеличивается в пределах 1–2% и начинает проявляться дефект под названием «плывучесть сигнала», т. е. электрический сигнал разбалансировки измерительного моста после сброса нагрузки постоянно изменяет свое значение.

Вышеупомянутые дефекты [2] однозначно влияют на упругие свойства пластины монокристаллического кремния, так как в местах нахождения значительно увеличивается межатомное расстояние и поврежденные области оказывают дестабилизирующее действие на линейность электрического сигнала в зависимости от величины деформации слоя Si при начале и снятии механической нагрузки. Также, при температурных воздействиях увеличивается двигательная способность атомов в области дислокаций, и эти области имеют уже новую способность изменять конфигурацию и размеры, и как следствие, меняется структура кристаллической решетки (рис. 2), а значит, и упругой деформации, и величина электрического сигнала. В результате погрешность измерения увеличивается в пределах 1–2% и проявляется дефект под названием «плывучесть сигнала», т. е. электрический сигнал разбалансировки измерительного моста после сброса нагрузки постоянно меняет свое значение. После этого точность измерения и стабильность показаний результатов измерений новых приборов, на этом кристалле, зависит от свойств и структуры пластины из Si.

Конструкция ЧЭ состоит из крышки 1, трубки для подачи давления 2 и керамической подложки 3. На подложке 3 также расположены один или два операционных усилителя 4, выполненных на отдельных полупроводниковых пластинах, и мембранный ЧЭ

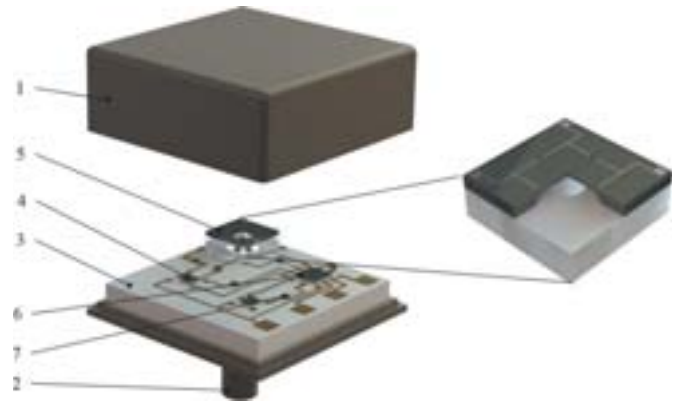


Рис. 2. Конструкция ЧЭ с кремниевой мембраной (1 — корпус, 2 — трубка, 3 — текстолитовая пластина, 4 — контактные площадки, 5 — кремниевая мембрана ЧЭ, 6 — микросхема обработки сигнала, 7 — терморезистор)

Fig. 2. SE design with a silicon membrane: 1 — cover, 2 — tube, 3 — textolite plate, 4 — contact platforms, 5 — silicon membrane of SE, 6 — chip of signal processing, 7 — thermoresistor

5, изготовленный в виде отдельного элемента, микроконтроллер 6 и необходимые для работы схемы пассивные элементы 7.

Качество поверхности пластины зависит от степени шероховатости, чистоты от включений инородных элементов и остатков от масок и растворителей и кристаллического совершенства поверхностных слоев. При любой как механической, так и химической обработке поверхности Si в верхнем слое кристаллическая решетка подвергается частичному разрушению и внедрению примесных атомов [4, 5]. Исследования поверхности методами электронной микроскопии показали, что поврежденный слой состоит как минимум из четырех слоев: первый — рельефный слой, имеющий выступы и неровности, характерные шероховатости после полировки, второй слой — дислокационные петли и сетки, микротрещины, точечные дефекты в зоне трещин, выходы дислокаций. Причем наличие трещин во втором слое приводит

explain their extensive use, as well as microelectronics products popularity. Though the equipment of special function allows setting comparatively high costs, due to the fact that MEMS-schemes allow achieving low cost per piece, it is possible to significantly expand touch networks, even if the integrators consider it superfluous. MEMS-detectors of pressure and movement (accelerometers, gyroscopes) create movements whose characteristics are monitored by MEMS-design. The moving design of these devices is not interfaced in any way with the object, so they are marked as contactless devices. If the mobile structure is qualitatively designed and is sufficiently protected by the cover, the small sensor is highly reliable and has an opportunity to work in different conditions of the environment and states, with quickly changing temperatures, accelerations, blows, moisture, pollution, electromagnetic violations, radiation. These conditions

guarantee the reliable and accurate operation in dynamic system, i.e. in case of near prompt, spasmodic, periodic or aperiodic change of characteristics.

ANALYZING THE REQUIREMENTS FOR USING STRUCTURES OF SENSITIVE ELEMENTS OF INSTRUMENTATIONS WHILE PRODUCING MEMS-SENSORS OF PRESSURE

Regretfully, Russia's companies engaged in design and creation of integrated structures in single-crystal silicon while researching and adjusting the release of converters of pressure, or transferring directly the experience of one technology to another, fail to take into account one characteristic feature of crystals operation: micro circuitry crystals work in the system of information transfer without any additional loadings, and the quality of their work is not

coordinated with the correctness of measurement of this or that concrete parameter in any way [1–3].

The original qualities of elasticity of single-crystal silicon are caused by the structure of a crystal lattice. This is why microdefects of a crystal grid caused by impurity in the form of O₂, carbon and N₂ are sensitive to the introduction of single atoms into interstices of a crystal grid (Fig. 1a). These atoms directly affect qualities and properties of the semiconductor, making 3D-microdefects (Fig. 1b), have a spiral form and are called a swirl-tape.

During the whole cycle of production of devices based on plates from single-crystal silicon, initial plates are exposed to high temperatures about 1200 °С, and as a result in some turns of the spiral the disintegration of solid solutions is faster, forming various types of impurity complexes, clusters of dot defects, defects of packing and other



к образованию в третьем слое напряжений и дислокаций, плотность которых становится меньше с глубиной. Третий слой, по сути, является переходным от аморфной структуры к чистому монокристаллу и может также содержать упругие или пластические деформации. В процессе изготовления на поверхности кремния интегральной схемы пластина подвергается многократному воздействию различных температур и химических реагентов, и в результате этого воздействия количество нарушений во втором слое увеличивается и тогда можно наблюдать картину выхода дислокаций на поверхность первого слоя и увеличения образований дислокаций в третьем слое, т. е. в объеме пластины происходит нарастание внутренних, неравномерно распределенных напряжений, которые при стремлении к равновесному состоянию начнут воздействовать на кристаллическую структуру измерительной мембраны и сбивать показания прибора. Нужно помнить, что пластина нарезается из слитка и, следовательно, поверхность ее характеризуется неплоскостностью и непараллельностью, а посему высокие требования предъявляются и к обратной стороне кристалла. Во-первых, разная обработка обеих сторон пластины приводит, как следствие, к дополнительным остаточным механическим напряжениям и деформации кристалла, что обуславливается изгибом пластины. Во-вторых, на обратной стороне вытравливается рабочая измерительная мембрана толщиной от 10 до 250 мкм при толщине кристалла 430 мкм, что вносит свою долю в величину остаточных механических напряжений.

В общем, параметры контроля качества пластин монокристаллического кремния и для изготовления полупроводниковых приборов и кристаллов для контрольно-измерительных приборов соответствуют одним критериям: толщина пластины, ее непараллельность, прогиб, неплоскостность, качество обработки поверхности, удельное сопротивление, макро- и микрогетерогенность по удельному сопротивлению, дефекты кристаллической решетки [6–8].

Но если при изготовлении полупроводниковых приборов данные параметры интересуют только с точки зрения формирования в поверхностном слое кремния структуры проводников

и диэлектриков в соответствии с требованиями конструкторской документации и проявления дислокаций, точечных микродефектов кристаллической решетки [8–12].

ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА

Технологии производства MEMS — часть спектра технологий производства, которые также включают традиционные процессы точной механической обработки. Традиционные процессы механической обработки могут использовать большое разнообразие материалов, изготавливать сложные трехмерные устройства и производить высокоточные устройства. Процессы производства MEMS обычно более ограничены в используемых материалах, но они могут произвести функциональные устройства с размерами меньше микрона. В табл. 1 представлено сравнение процессов производства MEMS и обычных процессов механической обработки.

Оценка процесса производства для продуктов требует взаимодействия многих факторов:

- критически минимальный размер, который может быть произведен;
- точность процесса (т. е. размерная точность или номинальный размер устройства);
- материалы, доступные для производства;
- требования к линии сборки, чтобы произвести функционирующее устройство;
- масштабируемость процесса (т. е. большие количества устройств могут быть произведены?);
- интегрируемость с другими процессами фальсификации (например, микроэлектроника).

Большой спектр процессов производства MEMS был разработан, и они могут быть сгруппированы в три большие категории, о которых написано ниже:

- Lithographie, Galvanoformung, Abformung (LIGA);
- грубая микромеханическая обработка;
- донорская поверхностная микромеханическая обработка.

Рис. 3 показывает фундаментальные понятия каждой категории производства.

structural imperfections. The arising defects have every chance of being the centers of sedimentation of excess solutions and other inclusions capable of forming the centers of single drifting microdefects. The error of measurement increases by 1–2% and there appears the so-called “deliquescence of a signal” defect, i.e. after load dumping the electric signal of the measuring bridge disbalance constantly changes its value.

Above-mentioned defects [2] unambiguously influence elastic properties of a plate of single-crystal silicon as in dislocations the interatomic distance considerably increases and the damaged areas destabilize linearity of an electric signal depending on the size of deformation of Si layer in the beginning and at mechanical load removal. Besides, due to temperature influences the atoms' motive ability in the field of dislocations increases, and these areas acquire a new ability to change

their configuration and size, and as a result, the structure of a crystal lattice changes (Fig. 2), as well as the values of elastic deformation and electric signal. As a result, the error of measurement increases within 1–2% and there appears the so-called “deliquescence of a signal” defect, i.e. the electric signal of the measuring bridge disbalance after load dumping constantly changes its value. After that the accuracy of measurement and the stability of indications of measurements results of new devices, on this crystal, depend on the properties and structure of a silicon plate.

The design of SE consists of a cover (1), a tube for supplying pressure (2) and a ceramic substrate (3). The substrate includes one or two operational amplifiers (4) executed on separate semiconductor plates and membrane SE (5) made in the form of a separate element, microcontroller (6) and passive elements (7) that are necessary for the circuit work.

The quality of a plate surface depends on the degree of its roughness, purity from inclusions of alien elements and the remains from masks and solvents, as well as on crystals perfection of blankets. Both during mechanical and chemical processing of a silicone surface top layer, the crystal lattice is exposed to partial destruction and introduction of impurity atoms [4, 5]. Researches of surface by methods of electronic microscopy have shown that the damaged layer consists of at least four layers: the first being a relief layer having ledges and dents, characteristic roughnesses after polishing, the second layer — dislocation loops and grids, microcracks, dot defects in a zone of cracks, exits of dislocations. The existence of cracks in the second layer leads to the formation in the third layer of tension and dislocations whose density is becoming less with depth. The third layer, in fact, is transitional from amorphous structure to a pure



Таблица 1. Сравнение процессов производства MEMS и обычных процессов механической обработки

Table 1. Comparison of processes of MEMS production and traditional processes of machining

Наименование Scalability	LIGA	Грубая микрообработка Bulk	Поверхностная микрообработка Surface	Традиционная микрообработка Traditional
Размер объекта Feature size	~3,5 мкм μm	~3,5 мкм μm	1 мкм μm	~10–25 мкм μm
Толщина Thickness	>1 мм mm	>1 мм mm	13 мкм μm	Несколько мм Several mm
Латеральные размеры Lateral size	>2 мм mm	>2 мм mm	2 мм mm	>10 м m
Относительная точность Relative tolerance	10^{-2}	10^{-2}	10^{-1}	$>10^{-3}$
Материалы Materials	Гальваническое осаждение металла или литой пластик Electroplated metals	Оч. ограниченное кол-во A few	Оч. ограниченное кол-во A few	Оч. большое кол-во A lot
Условия для сборки Assembly requirements	Требуются Yes	Требуются Yes	Как произведено так и выпущено As is	Требуются Yes
Масштабируемость Scalability	Ограничена Limited	Ограничена Limited	Да Yes	Да Yes
Интегрируемость с микроэлектроникой Microelectronic integrability	Нет No	Да Yes	Да Yes	Нет No
Геометрия устройства Device geometry	2D	2D	2D	3D
Обработка Processing	Параллельная на уровне подложки Parallel	Параллельная на уровне подложки Parallel	Параллельная на уровне подложки Parallel	Серийная обработка Serial

monocrystal, and may also contain elastic or plastic deformations. In the course of production of integrated circuit on a silicon surface the plate is exposed to repeated influence of various temperatures and chemical reagents, and as a result the number of violations in the second layer increases, and then it is possible to observe an exit of dislocations to the surface of the first layer and an increase in the dislocations formations in the third layer, i.e. in the plate volume there is an increase of the internal unevenly distributed tension that tending to an equilibrium state will start affecting crystal structure of a measuring membrane and influencing instrument readings. It is necessary to remember that the plate is cut from an ingot and therefore its surface is characterized by non-planarity and non-parallelism, and therefore the requirements to the reverse side of a crystal are strict. Firstly, different processing of both sides of the plate leads to additional residual mechanical tension and crystal's deformation that is caused by a plate bend. Secondly, on the reverse side the working measuring membrane is etched, the membrane

thickness being 10–250 microns, and that of the crystal — 430 microns, which contributes to residual mechanical tension.

Generally, parameters of quality control for single-crystal silicon plates and for production of semiconductor devices and crystals for instrumentations correspond to the same criteria: plate thickness, its non-parallelism, a deflection, non-planarity, quality of surface processing, specific resistance, macro and micro inhomogeneity by specific resistance, crystal lattice defects [6–8].

PRODUCTION TECHNOLOGIES

MEMS production technologies are part of a range of production technologies which also include traditional processes of exact machining. Traditional processes of machining can use a large variety of materials and make difficult three-dimensional and high-precision devices. As a rule, MEMS production processes are more limited in the materials being used, but they can make functional devices with sizes less than a micron. Table 1 presents a comparison of processes

of MEMS production and traditional processes of machining.

The assessment of the production process demands interaction of many factors:

- critical minimum size that can be made;
- the process accuracy (i.e. dimensional accuracy or nominal size of the device);
- materials available for production;
- requirements to an assembly line for making the functioning device;
- the process scalability (i.e. can large numbers of devices be made?);
- integrability with other processes of falsification (for example, microelectronics).

The wide range of MEMS production processes has been developed, and they can be grouped into three big categories that are described below:

- Lithographie, Galvanofornung, Abformung (LIGA), that is Lithography, Electroplating, and Molding);
- bulk micromachining;
- sacrificial surface micromachining.

Fig. 3 shows fundamental concepts of each category of production.

Грубая микромеханическая обработка и жертвенная поверхностная микромеханическая обработка часто базируются на кремнии и обычно очень сопряжены с ветвью производства микроэлектроники, так как они используют то же самое оборудование.

Грубая микромеханическая обработка использует влажные или сухие методы травления, чтобы произвести изотропический или анизотропный профиль в материале. Грубая микромеханическая обработка может создавать большие структуры MEMS (десятки микронов), которые могут использоваться для измерения расхода жидкости.

Коммерческое применение групповой микромеханической обработки было доступно с 1970-х. Эти решения включают в себя датчики давления, инерционные датчики и принтерные головки. Жертвенная поверхностная микромеханическая обработка (SSM) — прямой отпрыск процессов обработки из микроэлектронной промышленности, и самый используемый материал — кремний. У этой технологии было несколько коммерческих успехов в прошлом десятилетии, включая оптические массивы зеркала и инерционные датчики. Оба этих решения включают интегрированную микроэлектронику для измерений и функций управления. Эта технология обычно ограничена толщинами пленок 2–6 мм. Это дает технологии SSM значительное преимущество для решений, в которых задействовано большое количество устройств. Кроме того, у технологии SSM есть путь к интеграции из электроники со структурами MEMS, которые будут использоваться для функций контроля или измерения.

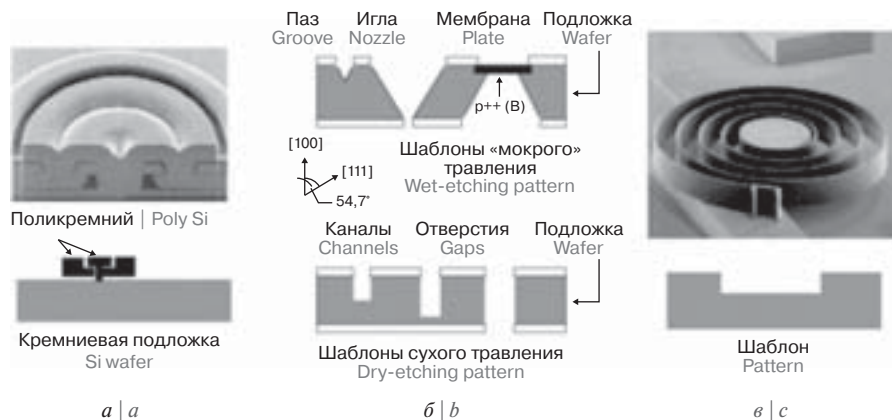


Рис. 3. Категории технологий производства МЭМС: а) LIGA; б) грубая микромеханическая обработка; в) донорская поверхностная микромеханическая обработка

Fig. 3. Categories of MEMS production technologies: a) LIGA; b) bulk micromachining; c) sacrificial surface micromachining

Технология LIGA была продемонстрирована в 1980-х. Эта технология может изготовить устройства с маленьким критическим измерением и высоким форматом толщины или ширины металлических материалов, на которые можно нанести слой металла гальваническим способом. Это обеспечивает преимущества в применениях, требующих широкого набора материалов. Однако сборка больших массивов устройств — проблема.

LIGA

Технология LIGA способна создавать сложные структуры гальванически осажденных металлов с очень высокими форматами пропорций и толщинами от нескольких до сотен микронов. Процесс LIGA использует рентгеновскую литографию, толстые резистивные слои

Bulk micromachining and sacrificial surface micromachining are often based on silicon and are usually interfaced with a branch of production of microelectronics as they use the same equipment.

Bulk micromachining uses processes of damp or dry etching to make isotropic or anisotropic profile in material. Bulk micromachining can create large structures of MEMS (tens of microns) which can be used for measuring the consumption of liquid.

Commercial application of group micromachining has been available since 1970s. These decisions include pressure sensors, inertial sensors and printer heads. Sacrificial surface micromachining (SSM) is a direct offspring of the microelectronic industry processing, silicon being the most widely used material. This technology had some commercial achievements in the last decade, including optical massifs of mirror and inertial sensors. Both of these decisions include integrated microelectronics for measuring and managing functions. As a rule, this technology is limited to the film thickness of 2–6mm. This gives

the SSM technology a considerable advantage of making decisions that involve a large number of devices. Besides, the SSM technology has a way to integration from electronics with MEMS structures which will be used for control or measurement functions.

The LIGA technology appeared in the 1980s. This technology can make devices with small critical measurement and a high format of thickness or width of metal materials that allow applying a metal layer by electroplating. This provides advantages as regards applications requiring a wide set of materials. However the assembly of big massifs of devices is a real challenge.

LIGA

The LIGA technology is capable of creating complicated structures of electroplated metals with very high formats of proportions and thicknesses of several to hundreds microns. The LIGA process uses X-ray lithograph, thick resistive layers, and electroplated metal layer. Since the radiation of an X-ray is used as an exposition source for LIGA, the mask

base is made of X-ray transparent materials (for example, silicon nitride, polysilicon). The corresponding layer with a mask drawing would have to be made of heavy material (such as gold).

Bulk micromachining uses damp and dry methods of etching to obtain isotropic and anisotropic features of etching in materials. To make products for practical application, many various aspects of the process have to be taken into account:

- the mask drawing;
- selectivity of etching depending on various crystallographic orientation;
- determining the moment of the etching start and end.

Damp etching is a chemical process that can be isotropic in amorphous materials, such as silicon dioxide, and directed in crystal materials, such as silicon. Pollutants and macroparticles in this type of process are just a functional of chemical purity. Agitation of a damp chemical bathtub is often used to help the movement of reagents and by-products to and from the surface. Agitation will

и гальванически нанесенный слой металла. Так как излучение рентгена используется как источник экспозиции для LIGA, основание маски сделано из рентгенопрозрачных материалов (например, нитрид кремния, поликремний). Соответствующий слой с рисунком маски должен был бы быть сделан из тяжелого материала (например, золото).

Грубая микромеханическая обработка использует влажные и сухие методы травления, чтобы достигнуть изотропических и анизотропных особенностей травления в материалах. Чтобы произвести продукты для практического применения, много различных аспектов процесса должны быть приняты во внимание:

- нанесение маски;
- избирательность травления при различной кристаллографической ориентации;
- определение момента начала и конца травления.

Влажное травление — просто химический процесс, который может быть изотропическим в аморфных материалах, таких как кремниевый диоксид, и направленным в кристалловых материалах, таких как кремний. Загрязнители и макрочастицы в этом типе процесса — просто функционал химической чистоты. Ажитация влажной химической ванны часто используется, чтобы помочь движению реагентов и побочных продуктов к и от поверхности. Ажитация также поможет однородности травления, т. к. побочные продукты могут быть в форме твердых частиц или газов, которые должны быть удалены. Современная влажно-химическая линейка обычно имеет ажитацию, средства контроля температуры и времени, как и фильтрация, чтобы удалить макрочастицы.

Донорская поверхностная микромеханическая обработка. У фундаментального понятия поверхностного процесса микромеханической обработки были свои корни еще в 1950-х и 1960-х с электростатическими массивами затворов и истоком резонирующего транзистора. Однако только в 1980-х поверхностная микромеханическая обработка и использование комплекта инструментов микроэлектроники получили значительное внимание. Хоу и Малер представили основное определение функций поликристаллической

also help get the uniformity of etching since by-products can be in the form of firm particles or gases that have to be removed. Besides, modern damp and chemical processing usually has agitation, temperature and time control devices as well as filtration to remove macroparticles.

Sacrificial/Donor surface micromachining. The fundamental concept of surface process of micromachining has its roots in 1950s and 1960s with electrostatic massifs of locks and the resounding transistor source. However only in 1980s surface micromachining and the use of a set of microelectronics tools received considerable attention. Howe and Mahler gave the principal definition of functions of polycrystalline silicon surface for micromachining. Surface micromachining is a production technology based on deposition, patterning, and etching of a set of materials on a wafer. Sacrificial material is removed in the end of a production cycle that is developed as the assembly mechanism.

Fig. 4 shows the sequence of production of a cantilever on structural layers and one sacrificial layer.

CONCLUSION

The research analyzes designing methods taking into account technological restrictions of integrated microstructures for ultraprecise instrumentations of physical quantities measurement.

The authors consider that the following provisions and results of the research are novel:

While implementing crystals of measuring elements it is necessary to take into account that they are exposed to external factors, which results in clusters of dot defects, defects of lattice packing and other structural imperfections. The formed defects in turn can serve as centers of sedimentation of excess solutions of other impurities capable of forming the centers of single drifting microdefects. As a result, this leads to an increase in an error of measurements within 1–2% and

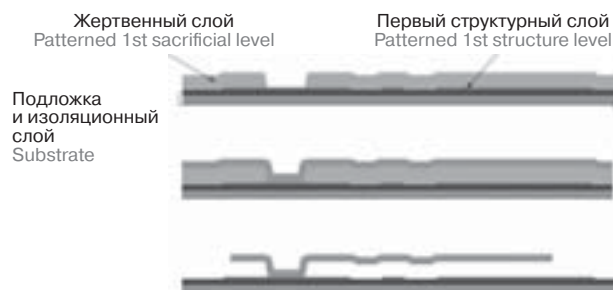


Рис. 4. Донорская поверхностная микромеханическая обработка
Fig. 4. Donor superficial micromachining

кремниевой поверхности для микромеханической обработки, и Фэн и иллюстрировали множество механических элементов булавка фиксированной оси соединяет, самоограничивая сопряжения булавки, и двигая элементы. Поверхностная микромеханическая обработка — технология производства, основанная на депозиции, шаблонировании, травлении набора материалов на подложку. Жертвенный материал убран в конец цикла производства, который выработан как механизм сборки.

На рис. 4 изображена последовательность изготовления кантилевера на структурных слоях и одном жертвенном.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были проанализированы методы конструирования с учетом технологических ограничений интегральных микроструктур для сверхточных контрольно-измерительных приборов измерения физических величин.

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты исследования:

При реализации кристаллов измерительных элементов необходимо учитывать, что они подвергаются внешним факторам, в результате чего образуются кластеры точечных дефектов, дефекты

the formation of the so-called “deliquescence of a signal” defect, i.e. after load dumping the electric signal of the measuring bridge disbalance constantly changes its value. The specified microdefects unambiguously influence elastic properties of a plate of single-crystal silicon as in places of dislocations the interatomic distance increases and defective areas destabilize rectilinear dependence of an electric signal on the size of deformation of silicon layer under mechanical loading and at its removal.

The recommendations of the report can be useful to developers of SE crystals for control and measuring sensors and to the enterprises of contract semiconductor manufacturing for adapting their technological processes to requirements imposed on sensitive elements of control and measuring sensors.

The work was carried out with partial financial support under Agreement No. 2.4176.2017/P.Ch.



упаковки решетки и другие структурных несовершенства. Образующиеся дефекты в свою очередь могут служить центрами осаждения избыточных растворов других примесей, которые способны образовывать очаги одиночных дрейфующих микродефектов. Это, как следствие, влечет за собой увеличение погрешности измерений в пределах 1–2% и формирование дефекта под названием «плывучесть сигнала», т. е. электрический сигнал разбалансировки измерительного моста после сброса нагрузки постоянно изменяет свое значение. Указанные микродефекты однозначно влияют на упругие свойства пластины монокристаллического кремния, так как в местах дислокаций увеличивается межатомное расстояние и дефектные области оказывают дестабилизирующее действие на прямолинейную зависимость электрического сигнала от величины деформации слоя кремния при воздействии и снятии механической нагрузки.

Рекомендации работы могут быть полезны для разработчиков кристаллов ЧЭ для контрольно-измерительных сенсоров и предприятий контрактного полупроводникового производства для адаптации своих технологических процессов к требованиям, предъявляемым к чувствительным элементам контрольно-измерительных сенсоров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Готра З. Ю. Технология микроэлектронных устройств — М.: Изд-во «Радио и связь». 1991. 528 с.
2. Марков В. Ф. Материалы современной электроники — Екатеринбург. Изд-во Урал. ун-та, 2014. 272 с.
3. Сергеева Н. А., Цивинская Т. А., Шахнов В. А. Контрольно-измерительный МЭМС с использованием малагабаритных чувствительных элементов из монокристаллического кремния // Датчики и системы. 2016. № 3 (201). — С. 32–39.
4. Тиняков Ю. Н., Милешин С. А., Андреев К. А., Цыганков В. Ю. Анализ конструкций зарубежных прототипов датчиков давления // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2011. № 9. — С. 4.
5. Андреев К. А., Власов А. И., Шахнов В. А. Кремниевые преобразователи давления с защитой от перегрузок // Датчики и системы. 2014. № 10. — С. 54–57.
6. Андреев К. А., Власов А. И., Камышная Э. Н., Тиняков Ю. Н., Лавров А. В. Автоматизированная пространственная оптимизация компоновки блока управления датчика давления по теплового критерию // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 6 (18). — С. 51.
7. Андреев К. А., Милешин С. А., Цивинская Т. А. Анализ методов электростатической сварки кремния и стекла при производстве высокоточных датчиков // Датчики и системы. 2013. № 2 (165). — С. 45–49.
8. Борзов А. Б., Лихоеденко К. П., Цыганков В. Ю., Власов А. И., Тиняков Ю. Н., Андреев К. А., Цивинская Т. А. Термокомпенсация измерительного канала датчика давления на основе полупроводниковых интегральных преобразователей // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2012. № 11. — С. 21.
9. Власов А. И., Цивинская Т. А., Шахнов В. А. Анализ влияния формы мембраны на механическую прочность и стабильность параметров МЭМС-сенсоров давления // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем (МЭМС). 2016. № 4. — С. 65–70.
10. Власов А. И., Маркелов В. В., Зотьева Д. Е. Управление и контроль качества изделий электронной техники. Семь основных инструментов системного анализа при управлении качеством изделий электронной техники // Датчики и системы. 2014. № 8 (183). — С. 55–66.
11. Андреев К. А., Тиняков Ю. Н., Шахнов В. А. Математические модели гибридных чувствительных элементов датчиков давления // Датчики и системы. 2013. № 9 (172). — С. 2–9.
12. Амирханов А. В., Гладких А. А., Глушко А. А., Макаrchук В. В., Новоселов А. С., Родионов И. А., Шахнов В. А. Разработка парадигмы проектирования СБИС с учетом результатов конструкторско-технологического моделирования // Датчики и системы. 2013. № 9 (172). — С. 38–51.

REFERENCES

1. Gotra Z. Yu. *Technology of Microelectronic Devices*, M.: "Radio i svyaz". 1991. 528 pages.
2. Markov V. F. *Materials of Modern Electronics, Yekaterinburg: The Urals University Publishing House*, 2014. 272 pages.
3. Sergeeva N. A., Tsivinskaya T. A., Shakhnov V. A. *Control and Measuring MEMS Using Small-sized Sensitive Elements from Single-crystal Silicon* // Sensors and Systems. 2016. No. 3 (201). PP. 32–39.
4. Tinyakov Yu. N., Mileshin S. A., Andreyev K. A., Tsygankov V. Yu. *Analysis of Designs of Foreign Prototypes of Sensors of Pressure* // Science and Education: the Scientific Publication of MGTU of N. E. Bauman. 2011. No. 9. P. 4.
5. Andreyev K. A., Vlasov A. I., Shakhnov V. A. *Silicon Converters of Pressure With Protection Against Overloads* // Sensors and Systems. 2014. No. 10. PP. 54–57.
6. Andreyev K. A., Vlasov A. I., Kamyshnaya E. N., Tinyakov Yu. N., Lavrov A. V. *The Automated Spatial Optimization of Configuration of the Control Unit of the Sensor of Pressure by Thermal Criterion* // the Engineering Magazine: Science and Innovations. 2013. No. 6 (18). P. 51.
7. Andreyev K. A., Mileshin S. A., Tsivinskaya T. A. *The Analysis of Methods of Electrostatic Welding of Silicon and Glass by Production of High-precision Sensors* // Sensors and Systems. 2013. No. 2 (165). PP. 45–49.
8. Borzov A. B., Likhoyedenko K. P., Tsygankov V. Yu., Vlasov A. I., Tinyakov Yu. N., Andreyev K. A., Tsivinskaya T. A. *Thermal Compensation of the Measuring Channel of the Sensor of Pressure on the Basis of Semiconductor Integrated Converters* // Science and Education: the Scientific Publication of MGTU of N. E. Bauman. 2012. No. 11. P. 21.
9. Vlasov A. I., Tsivinskaya T. A., Shakhnov V. A. *Analysis of Influence of a Form of a Membrane On Mechanical Durability and Stability of Parameters of MEMS-sensors of Pressure* // Problems of Development of Perspective Micro and Nanoelectronic Systems (MES). 2016. No. 4. PP. 65–70.
10. Andreev K. A., Vlasov A. I., Shakhnov V. A. *Silicon Pressure Transmitters With Overload Protection* // Automation and Remote Control. 2016. Vol. 77. № 7. PP. 1281–1285.
11. Andreyev K. A., Tinyakov Yu. N., Shakhnov V. A. *Mathematical Models of Hybrid Sensitive Elements of Sensors of Pressure* // Sensors and Systems. 2013. No. 9 (172). PP. 2–9.
12. Amir Khanov A. V., Gladkih A. A., Glushko A. A., Makarchuk V. V., Novoselov A. S., Rodionov I. A., Shakhnov V. A. *Development of a Paradigm of Design of SBIS Taking Into Account Results of Design-technology Modeling* // Sensors and Systems. 2013. No. 9 (172). PP. 38–51.