С.П.Тимошенков[1], В.В.Калугин[1], В.И.Графутин[2], Е.П.Прокопьев[2]
S.P.Timoshenkov[1], V.V.Kalugin[1],V.I.Grafutin[2], E.P.Prokop'ev[2]

# ПРОИЗВОДСТВО СТРУКТУР КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ И СЕНСОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ

# PROCESSING OF SOI STRUCTURES AND SENSORS ON THEIR BASIS

[1]Московский государственный институт электронной техники (технический университет)
[2]Москва, ГНЦ Институт теоретической и экспериментальной физики
[1]Moscow state institute of electron technology (technical university)
[2]Moscow, SSC institute of theoretical and experimental physics

It is shown, that offered method of synthesis of silicon wafer surface with given chemical composition, its activation and modification with usage of special heat treatment in wet conditions (including and possibility of chemical assembly of surface by method of molecular blanketing) allows to obtain high-quality SOI structures on process processing of gas pin together. The similar structures are necessary for processing new element basis of microelectronics, with the purpose of deriving integral chips for modern superdigital computers, special integrated circuits, semiconductor devices, microelectromechanical devices and sensors and also solar cells.

В данной работе была разработана модифицированная технология газового скалывания с использованием процесса сращивания пластин во влажных условиях (включая и метод молекулярного наращивания [1-6]). Согласно этой технологии в методе прямого сращивания вместо процессов шлифовки и травления для утончения одной из пластин предлагается использовать технологию отслаивания (скалывания) части рабочей пластины кремния в области слоя, легированного водородом при имплантации протонов на заданную глубину в пластину кремния. Микроструктура данного слоя включает в свой состав наполненные водородом нанопоры, вызывающие его объемные изменения. Вследствие этого в слое возникают напряжения, приводящие к скалыванию соответствующей толщины монокристаллической кремниевой пластинки, т.е. реализуется процесс «газового скалывания».

Используемая технология сращивания пластин состояла в сращивании двух окисленных поверхностей пластин кремния с заданными толщинами окисла $SiO_2$ на каждой из них. Первоначальной задачей является насыщение сращиваемых поверхностей ОН-группами на атомах кремния. Для связывания использовались полированные пластины Si(100) диаметром 150 мм. Гидрофильность реализовалась очисткой и активацией поверхности с применением методов аэрозольно-капельного распыления растворов. Гидрофильные кремниевые поверхности были покрыты тонким естественным слоем окисла $SiO_2$, который вырастал в процессе очистки пластин.

Одним из основных условий в процессе получения структур кни является чистота поверхности подложек. Подготовка поверхности пластин кремния является определяющим этапом не только с точки зрения качества изготовляемых структур кни, но и работоспособности созданных на их основе элементов. Загрязнения и геометрические несовершенства поверхности пластин кремния являются основными причинами брака при проведении операций термического сращивания пластин для получения структур кни. Первоочередной задачей в этих случаях является обеспечение условий чистых комнат в процессе развития высоких технологий производства структур кни и в производстве микроэлектромеханических изделий.

В процессе изготовления структур КНИ [1-3] применяются различные технологических операции, среди которых химическая обработка пластин, имплантация протонов, высокотемпературные операции и др. Надежность, качество получаемых структур КНИ, микроэлектронных изделий на их основе в значительной степени зависят от загрязнений, вызываемых, прежде всего механическими частицами в технологическом маршруте изготовления продукции. Присутствие инородных частиц на участках поверхности пластин кремния, подверженной ионной имплантации, приводит к рассеянию ионного пучка, при этом доза имплантированных ионов водорода будет отличной от средней дозы. Возникают локальные участки с отличающейся электропроводностью, которые являются причиной возрастания токов утечки или короткого замыкания с подложкой. При получении различных эпитаксиальных слоев наличие загрязнений приводит к дефектообразованию, проявляющегося в виде вздутий, бугорков, трещин, проколов. В процессах фотолитографии механические частицы приводят к искажению формируемого рисунка и, как следствие, к отказам в работе приборов из-за обрывов токоведущих дорожек и других причин. Наличие механических частиц на поверхности сращиваемых пластин приводит к образованию пор, возникновению напряжений в структуре и образованию области паразитной диффузии.

В результате проведенных исследований [1] выявлены причины, приводящие к браку структур КНИ, получаемых с использованием процесса сращивания пластин кремния. К этим причинам можно отнести: 1) загрязнения перед операцией имплантации ионов водорода, при соединении и сращивании пластин кремния; 2) шероховатость поверхности; 3) геометрическое несовершенство (прогиб, коробление, локальная неплоскостность). Загрязнения на поверхности полупроводниковых пластин перед проведением сращивания являются основной причиной брака. Ужесточение требований к чистоте и совершенству поверхности пластин необходимо не только для получения структур КНИ, но и для производства интегральных схем и микоэлектромеханических устройств на их основе.

На основании проведенных экспериментов и теории сращивания [4-6] приведем модель сращивания, основанную на предположении о наличии ОН-групп на поверхности сращиваемых пластин во влажных условиях. Модель, развитая в [3-5], различает различные стадии процесса сращивания в зависимости от температуры отжига. Первая стадия описывает поведение процесса сращивания при температурах ниже 110$^0$ С. На этой стадии пластины связываются через кластеры воды . На второй стадии при температуре ~ 150$^0$С и выше, согласно [4-6], силанольные группы реагируют на поверхности раздела по формальной брутто-реакции

$$\text{Si(1) - OH + HO - Si(2)} \xleftrightarrow{K_1} \text{Si(1) - O - Si(2) + } H_2O \qquad (1)$$

Эффективная констаета скорости реакции (1) имеет вид

$$k_1 = k_1^0 C_{H_2O} \quad , \qquad (2)$$

где $k_0$ в формуле (2) является «истинной» константой скорости реакции (1). Здесь Si(1) и Si(2) относятся к атомам кремния на поверхности двух пластин (1) и (2), соответственно. Отметим, что образующиеся молекулы воды диффундируют через каркас $SiO_2$ вдоль поверхности раздела наружу от пластин и перпендикулярно поверхности пластин через слой $SiO_2$, приводя к окислению кремния на границе разделов Si - $SiO_2$. Реакция (1) обратима до температуры T ≤ 425$^0$ С. От 150 до 800$^0$ С прочность связывания постоянна, если время отжига достаточно велико и ограничено размером контактирующего пространства. Выше 800$^0$ С связывание пластин полностью осуществляется через слой окисла. В этом случае получаются достаточно качественные структуры кремний на изоляторе, о чем говорят наши экспериментальные данные по электронномикроскопическим исследованиям рельефа границы сращивания. Отметим также, что предлагаемый способ получения поверхности с заданным химическим составом, ее активирования и модифицирования при этом в условиях влажной атмосферы может частично способствовать сглаживанию неоднородного рельефа поверхности сращиваемых пластин, что приводит к исчезновению пор, полостей и пустот вблизи границы сращивания. Все это и вышеизложенное нами позволяет применить методики низкотемпературного и высокотемпературного связывания и технологию Гёзеля-Тонга [7,8] для получения высококачественных структур кремний на изоляторе.

Согласно этой технологии в специально окисленную рабочую пластину кремния (толщина оксида несколько сотен ангстрем) вначале производилась имплантация протонов с дозой облучения порядка (1-8)$\cdot$ 10$^{16}$ см$^2$ и энергией 40-100 кэВ. Пленка $SiO_2$ представляла собой защитный слой при имплантации, уменьшающий количество дефектов и примесей в приграничной области. В дальнейшем она удалялась. Опорная пластина кремния подвергалась термическому окислению до толщины оксида (0,2-0,4 мкм), необходимого для производства конечной структуры КНИ. После очистки и активации в условиях влажной атмосферы поверхности пластин соединялись планарными сторонами друг к другу и прижимались в специально сконструированной установке мини-чистой комнате [7,8].

Пластины в ней устанавливались горизонтально в тефлоновой рамке полированными сторонами друг к другу. При этом пластины содержались раздельно с помощью прокладки тефлона, омывались потоком деионизованной воды и затем сушились с помощью центрифугирования. Термообработка этой пары приводила к сращиванию пластин кремния с одновременным отслаиванием по слою, где находился в нанопорах имплантированный водород. В таком процессе тонкая пленка кремния переходила с рабочей пластины на окисленную поверхность опорной пластины. В дальнейшем КНИ структура подвергалась кратковременному отжигу при 1100$^0$С, в результате чего удалялись созданные в процессе имплантации радиационные дефекты и водород. Полученный таким образом тонкий слой далее полировался. При отсутствии частиц на поверхности сращивания получались достаточно качественные КНИ структуры, что подтверждается данными электронномикроскопических исследований ее поперечного сечения.

Была показана возможность использования новых перспективных направлений в микроэлектронике [9,10], таких как модифицированная технология структур КНИ, для создания элементов микромеханических устройств, таких как акселерометры и датчики угловой скорости (гироскопы). Разработана технология формирования функциональных элементов и комплексная система подготовки технологических данных на основе математического моделирования технологического процесса анизотропного химического травления для разработки промышленной технологии изготовления многопрофильных микромеханических систем сложной конструкции с высокой точностью и с использованием типовых процессов микроэлектроники. Были проведены исследования технологических процессов на всех этапах создания микромеханических устройств, начиная от отбора и подготовки исходных материалов и кончая формированием чипа микромеханических устройств. В результате был изготовлен макетный образец датчика угловой скорости (гироскопа).


1. В.В.Калугин. Исследование и разработка процессов подготовки поверхности кремниевых пластин при изготовлении структур кремний на изоляторе. Автореф. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Москва: МИЭТ (ТУ), 2001.
2. А.Л.Суворов, В.И.Графутин, А.Г.Залужный, М.А. Козодаев, Е.П.Прокопьев, Б.Ю.Шарков, Ю.А.Чаплыгин, С.П.Тимошенков, В.Ф.Реутов. Атомная энергия. 2001. Т.91. Вып.4. С.255-263.
3. V.F.Reutov, A.L,Suvorov, A.G.Zaluzhnyi, V.I.Grafutin, S.P.Timoshenkov, E.P.Prokop`ev. Technology development and production of thin plates, membranes and silicon-on-insulator (SOI) structures by the bonding of silicon wafers using the radiation-induced gas-simulated splitting. Abstracts of 3rd International Conference NUCLEAR AND RADIATION PHYSICS (ICNRP 01). 4-7 June 2001. Almaty: Institute of Nuclear Physics, Republic of Kazakstan, 2001.P.186.
4. Е.П.Прокопьев, С.П.Тимошенков, А.Л.Суворов, Б.Ю.Шарков, А.Г.Залужный, В.И.Графутин, М.А.Козодаев. Особенности технологии изготовления КНИ структур прямым сращиванием пластин кремния и контроля их качества.Препринт ИТЭФ 24-00. М.,2000. 20 с.
5. А.Л.Суворов, Ю.А.Чаплыгин, С.П.Тимошенков, В.И.Графутин, С.А.Дьячков, А.Г.Залужный, В.В.Калугин, Е.П.Прокопьев, В.Ф.Реутов, Б.Ю.Шарков. Анализ преимуществ, перспектив применений и технологий производства структур КНИ. Препринт ИТЭФ 27 – 00. М., 2000. 51 с.
6. Прокопьев Е.П., Тимошенков С.П. Возможность прямого соединения пластин кремния с использованием химической сборки поверхности методом молекулярного наслаивания. Материаловедение. 1999. №4. С.49-51.
7. Tong Q.-Y., Gösele U. Wafer Bonding and Layer Splitting for Microsystem // Adv. Mater. 1999. Vol.11. №17. P.1409-1425.
8. Tong Q.-Y., Gösele U. Semiconductor Wafer Bonding: Science, Technology. Wiley, New York. 1988. 262 p.
9. Погалов А.И., Тимошенков В.П., Тимошенков С.П., Чаплыгин Ю.А. Разработка микрогироскопов на основе многослойных структур кремния и стекла // Микросистемная техника. 1999. №1. С. 36-40.
10. Петрова В.З., Погалов А.И., Тимошенков С.П. Оптимизация параметров многослойных структур микросенсоров // Известия вузов. Электроника. 1999. №3. С.41-44.