

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

А.А. Гаврилов, А.Н. Шипунов

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ КРЕМНИЯ

ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА»

С целью повышения точности размерной обработки кремния в статье усовершенствован стандартный технологический процесс изготовления глубокопрофильных кремниевых структур. Описан групповой метод получения элементов кристаллических, являющихся основной частью чувствительного элемента в МЭМС датчиках. В качестве материала элементов кристаллических используется монокристаллический кремний. Приведены способы получения защитных пленок полупроводникового кремния, а также способы получения рельефных кремниевых структур. Описан стандартный процесс фотолитографии и его недостатки, а также процесс с использованием контрастного слоя, с помощью которого на этапе экспонирования повышается точность совмещения рисунка фотомаски с профилем кремниевой пластины, в результате чего увеличивается не только процент выхода годных чувствительных элементов, а также стабильность точностных характеристик МЭМС датчиков.

*Ключевые слова:* кремний, экспонирование, контрастный слой, защитный слой, чувствительный элемент.

В настоящее время в России и за рубежом создан широкий спектр датчиков физических величин, основанных на различных принципах.

По мере того, как растет применение электроники, все большее значение приобретают датчики, которые играют роль посредников между окружающим аналоговым миром и цифровыми системами обработки информации о признаках этого мира. Поэтому неудивительно, что изготовители датчиков, стараясь расширить возможности своих устройств, обращаются к технологии интегральных схем, т.е. к созданию полупроводниковых (ПП) (микроэлектронных) датчиков, которые со встроенными функциональными элементами становятся все более похожими на интегральные микросхемы.

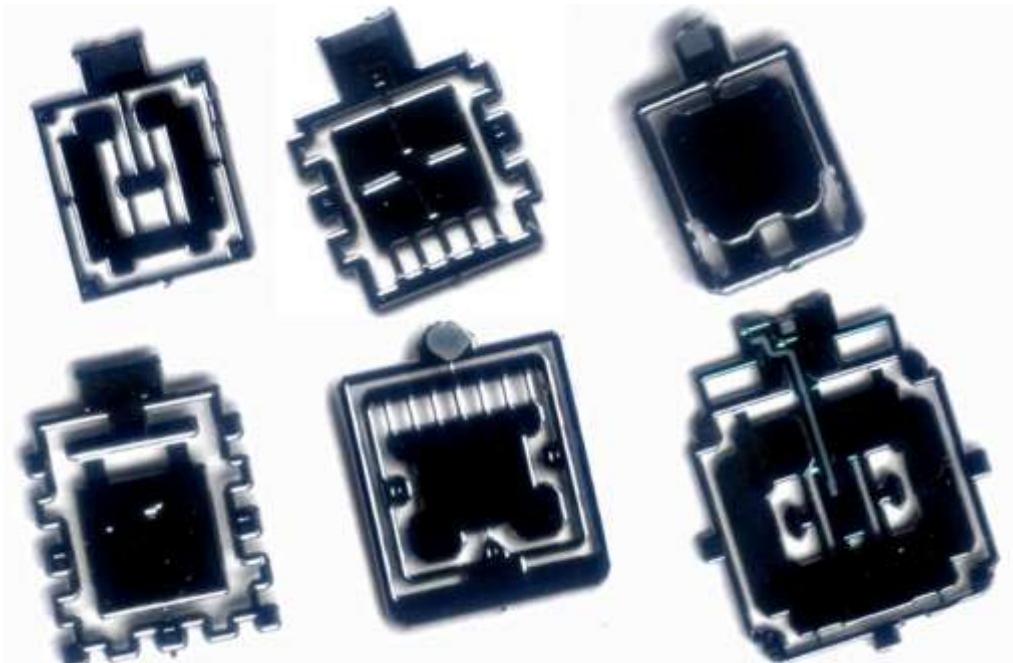
Датчики являются элементами технических систем, предназначенных для измерения, сигнализации, регулирования, управления устройствами или процессами. Датчики преобразуют контролируемую величину (давление, температура, расход, концентрация, частота, скорость, перемещение, напряжение, электрический ток и т. п.) в сигнал (электрический, оптический, пневматический), удобный для измерения, передачи, преобразования, хранения и регистрации информации о состоянии объекта измерений.

Исторически и логически датчики связаны с техникой измерений и измерительными приборами, например, термометры, расходомеры, барометры, прибор «авиагоризонт» и т.д. Обобщающий термин «датчик» укрепился в связи с развитием автоматических систем управления как элемент обобщенной логической концепции датчик - устройство управления - исполнительное устройство - объект управления. Специальный случай представляет использование датчиков в автоматических системах регистрации параметров, например в системах научных исследований.

Чувствительный элемент, преобразующий параметры среды в пригодный для технического использования сигнал, обычно электрический, хотя возможно и иной по природе, например пневматический сигнал; часть измерительного прибора или первичного измерительного преобразователя, с помощью которой воздействующая на элемент физическая величина преобразуется в некоторую другую величину, удобную для последующего использования в измерительных или управляющих устройствах.

В настоящее время при изготовлении чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков первичной информации (ДПИ) с целью увеличения их точности, надежности, уменьшения мас-

согабаритных параметров, снижения трудоёмкости используются технологии глубокого микропрофилирования полупроводниковых пластин. Чувствительные элементы ДПИ изготавливаются по групповой технологии, которая предполагает изготовление на одной полупроводниковой пластине нескольких десятков однотипных кристаллов и одновременную обработку партии таких пластин. После завершения цикла изготовления пластины разделяются на кристаллы (рис. 1), которые далее используются при сборке чувствительных элементов.



**Рис. 1. Чувствительные элементы**

В последнее время широкое распространение в качестве материала подложки получил монокристаллический кремний. Кремний обладает хорошими механическими свойствами: высоким значением модуля упругости, значительной жесткости (больше, чем, например, у стали), малой плотностью ( $2,3 \text{ г}/\text{см}^3$ ), низким ТКЛР ( $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), высокой коррозионной стойкостью, высокой теплопроводностью. Приборы, построенные на монокристаллическом кремнии, имеют высокую временную и температурную стабильность, отсутствие гистерезиса выходных характеристик.

Для выполнения размерной обработки на микрообъемах и микроплощадях в технологии применяется травление. Чтобы обеспечить избирательное травление, предварительно получают защитную пленку, а в ней вскрывают окна. Избирательное вскрытие окон в защитной пленке выполняют с помощью литографии.

В естественных условиях поверхность полупроводникового кремния покрыта слоем оксида, толщина которого составляет десятки мономолекулярных слоёв. Защитные свойства таких слоёв невелики, поэтому для их улучшения применяют искусственное окисление поверхности в окисляющих средах.

В качестве защитных покрытий используют слои диоксида  $SiO_2$  и нитрата  $Si_3N_4$  кремния. Эти слои должны соответствовать всем требованиям по качеству поверхности:

- иметь сплошную однородную структуру;
- быть свободными от примесей;
- иметь равномерную толщину по всей поверхности пластины;
- быть устойчивым к травителям кремния.

Существует несколько методов окисления полупроводникового кремния.

Высокотемпературное окисление в сухом кислороде – наиболее распространенный

способ окисления кремния, так как обеспечивает получение плёнок  $SiO_2$  с высокой маскирующей способностью. Температура в процессе окисления при атмосферном давлении обычно составляет 1050 °С. Время получения плёнок толщиной 0,5 мкм составляет примерно 30 ч. Расход кислорода – 40–80 л/ч. Окисление кремния происходит в однозонной диффузационной печи, имеющей три или шесть реакционных камер.

Окисление кремния в водяном паре: в реактор подаётся водяной пар, который под воздействием высокой температуры частично разлагается на кислород или водород. Качество оксидных плёнок ниже, чем при сухом способе окисления. Плёнки получаются более пористыми.

Окисление кремния во влажном кислороде – этот способ обеспечивает высокую скорость роста плёнки оксида.

Окисление в водяном паре при повышенном давлении – этот способ обеспечивает более высокую скорость роста оксида и повышение его прочности. Давление составляет до 2 МПа.

После завершения процесса получения защитных плёнок пластины контролируют пучком осветителя и под микроскопом на наличие проколов, а также качество поверхности (отсутствие матовости, светящихся точек, разводов и т. п.). Толщину плёнки измеряют при помощи цветового, интерференционного и эллипсометрического методов.

Для воспроизведения размеров и форм структур кремниевых приборов используется метод фотолитографии, обеспечивающий высокую точность изготовления.

Это наиболее широко используемый способ получения рельефного покрытия с изображением элементов ИИП. Неотъемлемой частью фотолитографии являются фотошаблоны. Фотошаблоны – стеклянные пластины или полимерные пленки, со сформированным на их поверхности рисунком элементов ИИП из материала не пропускающего активного излучения. Фотолитография состоит из ряда операций, которые выполняются в определённой последовательности.

Нанесение слоя резиста на пластину:

- обработка поверхности пластин с оксидной пленкой;
- нанесение фоторезиста.

Фоторезист – это полимерный материал, который под действием света изменяет прочность связи между молекулами. Для интегральной технологии используют жидкие фоторезисты. Фоторезист наносится методом полива с последующим центрифугированием, которое обеспечивает равномерность, сплошное распределение и минимальную толщину плёнки фоторезиста. Регулировка толщины слоя фоторезиста достигается подбором угловой скорости вращения центрифуги, которая обычно задаётся в пределах 2000–1000 об/мин. Для изменения толщины слоя фоторезиста можно варьировать его вязкость.

Для совмещения изображения широко используется метод визуального контактного и бесконтактного совмещения. В контактном методе, вследствие тесного контакта между шаблоном, резистом и кремниевой пластиной, легко воспроизводятся элементы размером до 1 мкм. К недостатку этого метода следует отнести наличие загрязнений, например пылинок, на поверхности кремниевой пластины. Эти загрязнения приводят к повреждению поверхности шаблона при соприкосновении его с пластиной. Следует отметить, что высокий уровень выхода годных кристаллов обеспечивается при плотности дефектов не более одного на 1 см<sup>2</sup> для каждого литографического процесса.

В методе бесконтактной печати ширина зазора между шаблоном и пластиной находится в пределах 10–25 мкм. Перенос изображения при этом происходит в дифракционной области Френеля. Разрешение в этой области пропорционально  $(\lambda g)^{1/2}$ , где  $\lambda$  – длина падающего света;  $g$  – ширина зазора между шаблоном и пластиной (составляет 2–4 мкм). Необходимо отметить, что указанный зазор между шаблоном и пластиной полностью не исключает возможность повреждения поверхности шаблона.

На основе перечисленных операций существует ряд стандартных технологических процессов изготовления глубокопрофильных кремниевых структур (рис. 2).

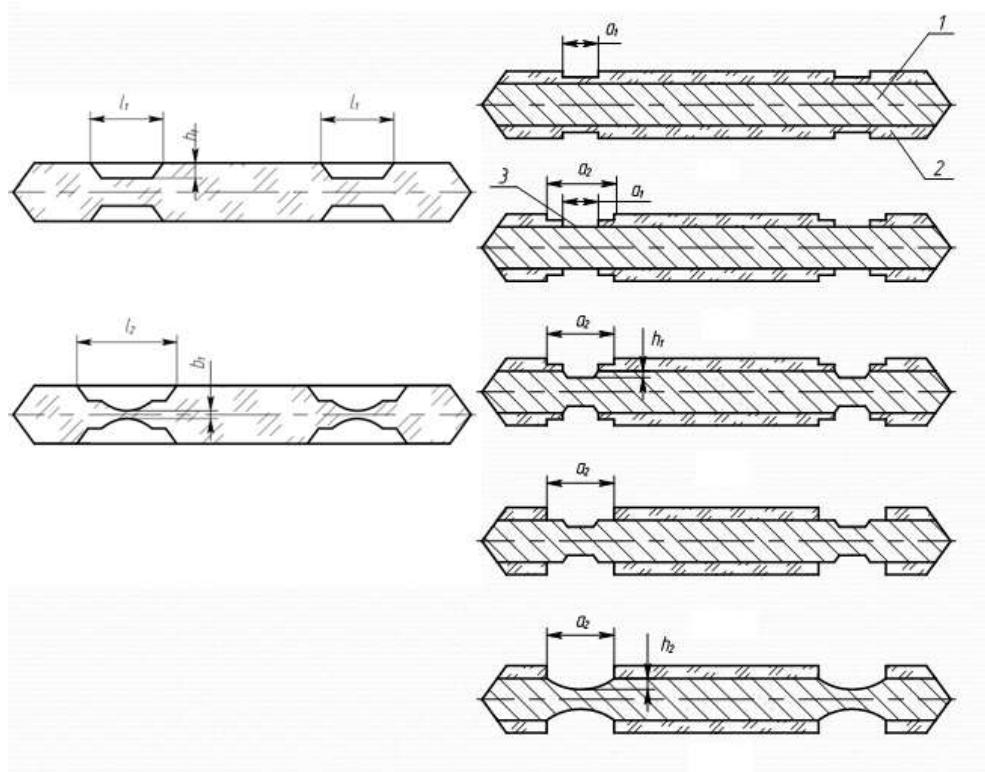


Рис. 2. Глубокопрофильная кремниевая структура

Известен способ изготовления глубокопрофилированных кремниевых структур, заключающийся в том, что на защитный слой кремниевой пластины наносят фоторезист, при помощи фотолитографии формируют контур в фоторезисте, удаляют защитный слой в контуре фоторезиста до появления кремния, вытравливают кремний до нужной глубины, после чего производят повторные операции до формирования в кремнии заданного профиля.

Недостатками такого способа являются:

- неравномерность нанесения пленки фоторезиста на полученную рельефную поверхность;
- разрывы пленки фоторезиста на острых кромках травленой поверхности;
- большая толщина в протравленных канавках.

Это приводит к большой трудоемкости проведения операции фотолитографии и большому количеству брака.

Существует способ изготовления глубокопрофилированных кремниевых структур, при котором формируют структуру заданного профиля в защитном слое при помощи последовательных операций фотолитографии и травления, создают заданный профиль в кремнии путем чередования операций травления защитного слоя и кремния.

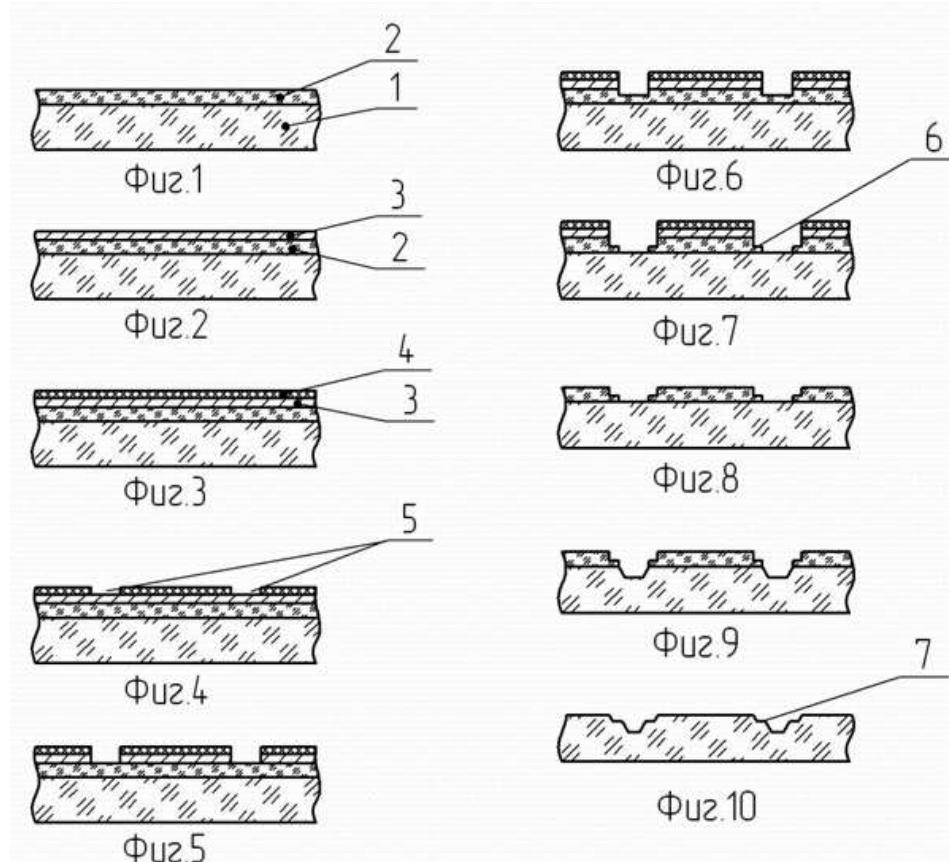
Недостатком такого способа является сложность и неточность совмещения фотошаблонов при второй и последующих операциях фотолитографии относительно контура, сформированного после первой фотолитографии. Трудности совмещения фотошаблонов возникает из-за недостаточной видимости контура через нанесенный фоторезист.

Данная проблема решается за счет того, что в способе изготовления глубокопрофилированных кремниевых структур, заключающемся в создании на кремниевой пластине защитного слоя, формировании в нем последовательными операциями фотолитографии и травления структуры заданного профиля до появления кремния в области максимальной глубины структуры и последующем чередовании травления кремния и оставшегося защитного слоя до получения в кремнии заданного профиля, после создания защитного слоя и перед первой

операцией фотолитографии на поверхности защитного слоя создают контрастный слой из материала, отличающегося от материала защитного слоя, а после каждой операции фотолитографии перед травлением защитного слоя стравливают контрастный слой.

Существенным отличием предложенного способа является создание контрастного слоя из материала, отличающегося от материала защитного слоя, в результате чего сформировавшийся контур в защитном слое после первой фотолитографии отчетливо виден на фоне контрастного слоя, что повышает точность создания глубокопрофилированных кремниевых структур путем уменьшения погрешности совмещения фотошаблонов.

На рис. 3 показана последовательность операций, применяемых для реализации предложенного способа. На кремниевой пластине 1 создают защитный слой 2, например, из пленки окисла кремния определенной толщиной (например, 2 мкм).



**Рис 3. Последовательность операций при фотолитографии**

На защитный слой 2 наносят контрастный слой 3, например, из пленки алюминия (см. фигуру 2).

Проводят операцию фотолитографии, заключающуюся в нанесении фоторезиста 4 на контрастный слой 3 (см. фигуру 3), экспонировании через фотошаблон, проявлении и термообработки фоторезиста 4.

На фигуре 4 изображены сформированные окна 5 в фоторезисте 4 после его проявления.

В местах сформированных окон 5 стравливают контрастный слой 3 до появления защитного слоя 2 (см. фигуру 5).

Затем вытравливают защитный слой 2 до нужной глубины (см. фигуру 6) и удаляют оставшуюся пленку фоторезиста 4 со всей пластины 1.

Последовательными операциями фотолитографии и травления формируют структуру 6 заданного профиля в защитном слое 2 кремниевой пластины 1 (см. фигуру 7) до появления

кремния в области максимальной глубины структуры 6 заданного профиля, после чего смыают фоторезист 4 и удаляют контрастный слой 3 (см. фигуру 8).

В травителях, не реагирующих или плохо реагирующих с защитным слоем 2, вытравливают кремний до нужной глубины (см. фигуру 9).

Затем, чередуя травление защитного слоя 2 до вскрытия следующего контура и травление кремния, получают заданный профиль 7 в кремнии, после чего удаляют весь защитный слой 2 с кремниевой пластины 1 (см. фигуру 10).

В результате применения предложенного способа повышается точность изготовления глубокопрофилированных кремниевых структур.

Микроэлектроника продолжает развиваться быстрыми темпами, как в направлении совершенствования полупроводниковой интегральной технологии, так и в направлении использования новых физических явлений.

---

1. Вавилов, В.Д. Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.

*Дата поступления  
в редакцию 18.04.2012*

**A.A. Gavrilov, A.N. Shipunov**

## **METHOD FOR IMPROVEMENT OF SILICON SHRINKAGE ACCURACY**

JSC ARPE «TEMP-AVIA», Arzamas

In order to improve silicon shrinkage accuracy, in this paper, advanced conventional method for manufacturing silicon structures having deep-etched profile, is represented. A batch method for producing single-crystalline elements, which are components of sensing element in MEMS sensor, is given. As example, components of sensing element are made from single-crystalline silicon. Both method for producing semiconductor film and method for producing relief silicon structures, are represented. Conventional photolithography method and its drawbacks are described. A production process with usage of contrast layer is also represented. Application of contrast layer during exposure increases shrinkage accuracy of photomask with respect to silicon wafer profile. As a result, both sensor yield in percent and accuracy performance stability of MEMS sensors are increased.

*Key words:* silicon, exposure, contrast layer, covering layer, sensing element.