

РАЗДЕЛ 2

МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, МЕХАНИЗМЫ В ТЕХНИКЕ

УДК 531.781.2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СЕЛЕКТИВНОГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЛАСТИН ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Ф. А. Абдуллин, В. Е. Пауткин, Е. А. Печерская, А. В. Печерский

APPLICATION OF METHODS OF SELECTIVE DRYING OF SILICON FOR ESTIMATION OF QUALITY OF PLATES AT THE MANUFACTURE MICROMECHANICAL SENSORS

F. A. Abdullin, V. E. Pautkin, E. A. Pecherskaya, A. V. Pecherskiy

Аннотация. *Актуальность и цели.* Кремний является одним из основных материалов при изготовлении современных компонентов и устройств функциональной электроники. Качество изготовления кремниевых пластин определяет параметры качества изделий. Цель исследования – анализ поверхностей кремниевых пластин, подвергнутых селективному химическому травлению для определения дефектов, приводящих к растравливанию рабочей поверхности и нарушению геометрии формируемых структур при операциях анизотропного травления. *Материалы и методы.* В статье на основе использования методов селективного травления приведены результаты оценки параметров качества кремниевых пластин, используемых при изготовлении микромеханических датчиков. *Результаты.* Изложены методики выявления свирлевых дефектов и дислокаций. В основу методики определения свирлевых дефектов положено различие скорости травления областей кремниевой пластины, содержащей микродефекты по сравнению с кристаллографически совершенными областями. Методика выявления дислокаций основана на том, что на месте пересечения дислокаций и поверхности пластин скорость травления кремния выше, вследствие чего дислокации выявляются в виде ямки травления. Представлены фотографии поверхности пластин с выявленными типами дефектов. *Выводы.* Применение методов селективного травления кремния позволило экспериментально выявить два рода дефектов кремниевых пластин: свирлевые дефекты (микродефекты) и дислокации, которые имеют разные причины возникновения, приведенные в статье. Представленные методики могут быть практически использованы при входном контроле качества кремниевых пластин.

Ключевые слова: кремниевые пластины, свирлевые дефекты, дислокации, селективное травление, микромеханические датчики.

Abstract. *Background.* Silicon is one of the main materials in the manufacture of modern components and devices of functional electronics. The quality of manufacturing silicon wafers determines the quality parameters of products. The purpose of the study is to

establish the causes of silicon rupture during anisotropic etching and to disrupt the geometry of the structures to improve the quality parameters of the manufacturing process for micromechanical sensors. *Materials and methods.* In the article, based on the use of selective etching methods, the results of evaluating the quality parameters of silicon-grade plates that are used in the manufacture of micromechanical sensors are presented. *Results.* Methods for revealing swirl defects and dislocations are outlined. The difference in the etching rate of the regions of a silicon wafer containing microdefects in comparison with the crystallographically perfect regions is based on the method for determining the swirl defect. The method for detecting dislocations is based on the fact that at the intersection of dislocations and the surface of the plates the etching rate of silicon is higher, as a result of which dislocations are revealed in the form of an etching pit. Images of plates with revealed types of defects are presented. *Conclusions.* The use of selective silicon etching methods made it possible to experimentally reveal two kinds of silicon wafer defects: swirl defects (microdefects) and dislocations, which have different causes of occurrence, described in the article. The presented methods can be practically used in the output control of the quality of silicon wafers.

Key words: silicon plates, swirl defects, dislocations, selective etching, micromechanical sensors.

Введение

Актуальность. Кремний является базовым материалом микроэлектроники. На его основе изготавливается огромное множество самых разнообразных устройств, позволяющих регулировать, усиливать, переключать, стабилизировать токи и напряжения, обрабатывать и хранить информацию. В датчиках кремний служит преобразователем, основное назначение которого – превращать измеряемое физическое или химическое воздействие в электрический сигнал. Функции кремния в датчиках оказываются значительно более широкими, чем в обычных интегральных схемах. Это обуславливает некоторые специфические особенности технологии изготовления кремниевых чувствительных элементов. Для воспроизведения размеров и форм структур кремниевых приборов используется метод фотолитографии, обеспечивающий высокую точность изготовления.

При изготовлении современных миниатюрных полупроводниковых, в частности кремниевых микромеханических датчиков, применяют не идеальный бездефектный монокристалл, а реальный кристалл, в котором присутствуют разного рода дефекты. Различные термические и механические процессы, которые используются в технологических процессах, могут как приводить к дефектам, так и менять их природу. При росте кристаллов кремния с очень низкой плотностью дислокаций возникает новый тип дефектов, которые характерны исключительно для полупроводниковых кристаллов и в настоящее время интенсивно исследуются. Из-за малого размера подобные дефекты называют микродефектами, для их наблюдения в данной статье рассмотрен метод избирательного травления. Для исследования причин, влияющих на дефекты кремниевых пластин, могут применяться методы контроля качества, например диаграмма Исикавы, диаграмма Парето [1, 2]. Применение метода избирательного травления позволит выявлять именно те дефекты, которые приводят к отбраковке кристалла, прогнозировать их наибольший риск появления, определять их потенциальные причины и вырабатывать корректирующие действия по их устранению.

Среди современных методов выявления дефектов в различных кремниевых структурах выделяют оптические, электронные, рентгеновские варианты микроскопии, топографии и томографии, спектроскопии. Рассматриваемый в настоящей работе метод отличается высокой чувствительностью, широкой распространенностью и простотой реализации. Широкое применение настоящего метода объясняется целым рядом причин. Как правило, плотность структурных дефектов в кремнии невелика, что позволяет надежно идентифицировать отдельные дефекты, выявленные травлением. Как известно, суть этого метода заключается в получении информации о дефектном составе пластин путем визуального и микроскопического анализа особенностей рельефа его поверхности, обработанных в специальных растворах – травителях, предназначенных для выявления дислокаций (травитель Дэша, Сиртла-Адлера, Секко). В результате такой обработки формируется рельеф, состоящий из холмиков и ямок – следов от микродефектов, бывших в стравленном слое пластины.

К ограничениям метода следует отнести невозможность определения детальной структуры дефекта и идентификации примесей, связанных с дефектом, а также недостаточно высокое разрешение, не позволяющее исследовать тонкую структуру кристалла. Однако чередование микроскопического исследования с травлением образца иногда позволяет получить информацию о распределении дефектов по глубине образца [3–5].

Условия экспериментальных исследований

Объект исследования – пластины из кремния марки ЭКЭС-0,01-12-ак₁ мс₁ ГОСТ 19658–81, комплектуемые для изготовления кристаллов микромеханических датчиков. Эксперимент проводился на 10 партиях пластин (в состав каждой партии входит по 5 пластин).

На 6 партиях пластин наблюдался растрав поверхности при формировании упругих элементов кристалла (анизотропное травление кремния, рис. 1). Для получения фотографий поверхности использовался инспекционный микроскоп *Nikon ECLIPSE LV100ND* и видеоизмерительный микроскоп *HIROX KH-7700*.

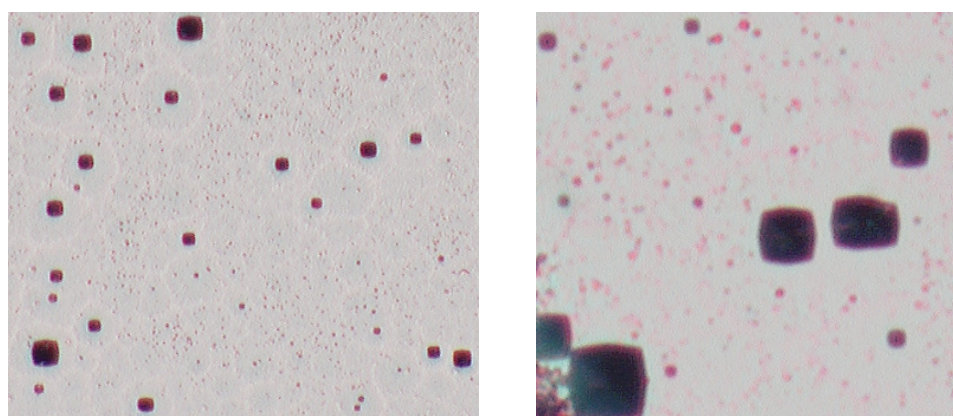


Рис. 1. Растрав поверхности упругого элемента кристалла

На трех партиях кроме нарушения поверхности кремния наблюдалось несоответствие геометрии боковых граней кристалла – отклонение от прямоугольной геометрии структур (рис. 2).



Рис. 2. Отклонение от прямоугольной геометрии структур

За период времени, в течение которого проводился эксперимент, средства технологического оснащения, технологические режимы, используемые основные и вспомогательные материалы не изменялись.

Методики выявления дефектов

Выявление свирлевых дефектов

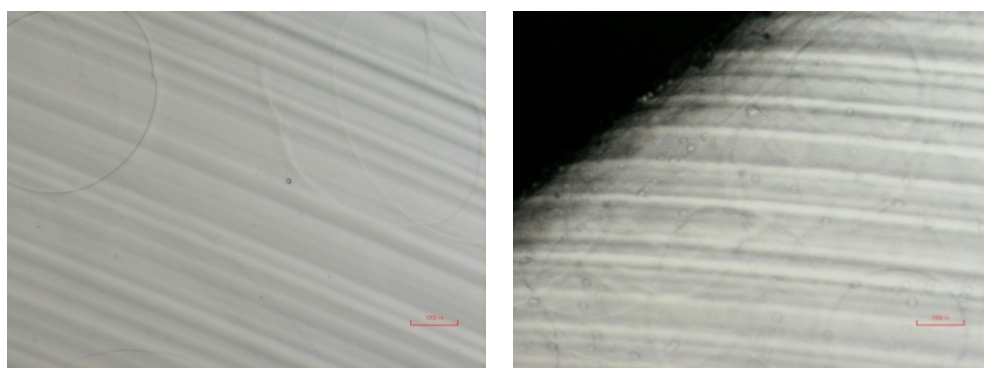
Методика определения свирлевых дефектов основана на различии скорости травления областей кремниевой пластины, содержащей микродефекты по сравнению с кристаллографически совершенными областями. В местах расположения микродефектов скорость травления изменяется, благодаря чему область микродефекта выявляется в виде плоскодонной ямки, геометрия которой определяется ориентацией исследуемой плоскости и типом микродефектов [6, 7].

Полировка пластин:

Раствор $\text{HF}:\text{HNO}_3 = 1:3$. Продолжительность полировки 4 мин.

Для выявления свирлевых дефектов использован раствор HF : водный раствор CrO_3 (1200 г/л) = 1:4. Продолжительность травления 25 мин.

Фотографии исследуемых пластин со свирлевыми дефектами представлены на рис. 3 и 4.



а)

б)

Рис. 3. Свирл-распределение дефектов исследуемых пластин ($\times 200$)

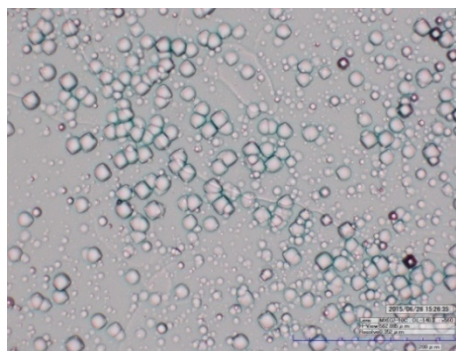


Рис. 4. Ямки травления, соответствующие микродефектам, образующим свирл-картину ($\times 800$)

Выявление дислокаций

Методика основана на различии в скорости травления областей слитка с дислокациями и без них. В месте пересечения дислокаций и поверхности пластин скорость травления кремния выше, вследствие чего дислокации выявляются в виде ямки травления [8].

Для полировки пластин использован раствор $\text{HF}:\text{HNO}_3 = 1:3$. Продолжительность полировки составляет 4 мин.

Для выявления дислокаций использован раствор HF : водный раствор CrO_3 (300 г/л): $\text{H}_2\text{O} = 5,5:1:3,5$. Продолжительность травления 25 мин.

Фотографии дислокационных дефектов исследуемых образцов представлены на рис. 5, а–е.

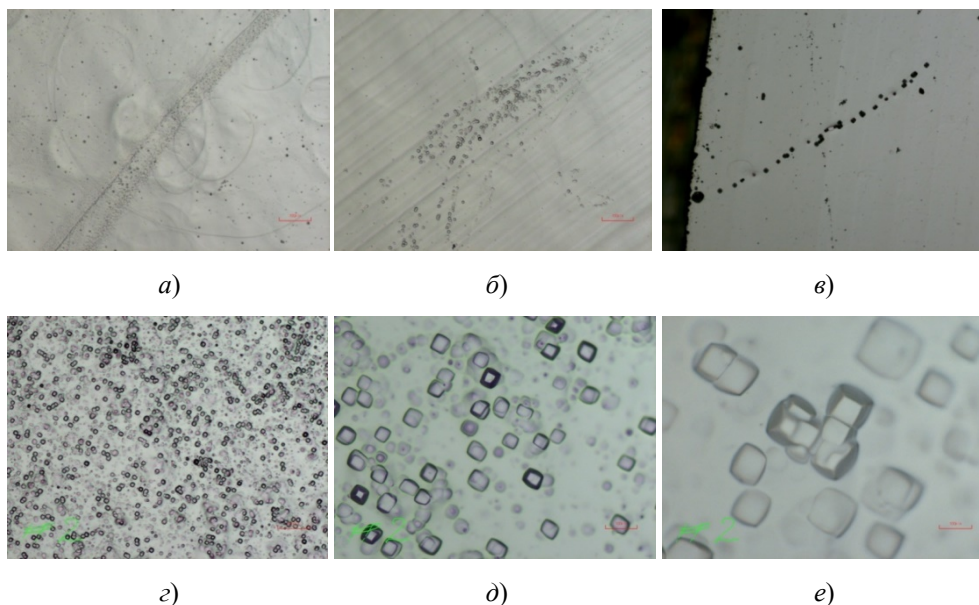


Рис. 5. Дислокационные картины травления, полученные при разном увеличении

Как видно из рис. 5, на плоскости наблюдаются квадратные плоскодонные ямки травления. Однако при отклонении поверхности от плоскости

(100) форма фигур травления меняется, и ямки могут принимать ромбовидные или пирамидальные очертания. Длительное травление увеличивает размеры ямок травления, не влияя на их форму. Таким образом, наблюдая под микроскопом форму ямок травления, можно сделать заключение о кристаллографической ориентации исследуемых образцов.

Результаты исследований

Выводы по выявлению свирл-дефектов

Картина распределения свирлевых микродефектов в поперечном сечении пластины имеет вид замкнутой спирали, как показано на рис. 6 (отсюда и название дефектов – от англ. *swirl* – спираль).



Рис. 6. Поверхность пластин кремния после избирательного травления

Такой характер распределения дефектов обусловлен ростом слитка кремния. Комплексы точечных дефектов, образующих свирл-картину, выявляются в виде плоскодонных некристаллографических ямок травления. Эти ямки имеют плоское дно и обусловлены вытравливанием локализованных дефектов. В свою очередь, характер распределения микродефектов связан с условиями роста слитка кремния [9].

Таким образом, характер растрова кремниевых пластин определяется изначальными условиями выращивания слитка. На фотографиях свирл-распределения дефектов (см. рис. 3,а,б) отчетливо видны полосы, образующие свирл-распределение дефектов. При этом у некоторых образцов полосы выходят за край пластины (см. рис. 3,б). Анализ распределения дефектов позволяет сделать вывод, что пластины были изготовлены из слитка большего диаметра путем механической обработки, что привносит дополнительные механические напряжения в изготавливаемые пластины. При этом напряжения распространяются по всему слитку, соответственно, в каждой пластине имеют место внутренние напряжения.

Выводы по выявлению дислокаций

Дислокации – дефекты кристалла, представляющие собой линии, вдоль которых нарушена симметрия атомных плоскостей. Рис. 5 демонстрирует подобное распределение линий дислокаций по поверхности пластины. Вдоль данных линий нарушено энергетическое состояние кристаллографических плоскостей (например, внутренняя и поверхностная энергия), что приводит к несоблюдению геометрии вытравливаемых структур [6].

Заключение

Применение методов селективного травления кремния позволило экспериментально выявить два рода дефектов кремниевых пластин: свирлевые дефекты и дислокации, которые имеют разные причины возникновения.

Свирлевые дефекты имеют место при росте кристаллов кремния с очень низкой плотностью дислокаций. Дислокации возникают при росте кристаллов в процессе затравливания [10]. Целесообразно выделить три основные причины возникновения дислокаций:

1) термомеханические напряжения. Одной из причин возникновения дислокаций является наличие переменных градиентов температур, существующих в кристалле во время роста. Любое отклонение от постоянного градиента температуры на фронте кристаллизации вызывает неоднородное термическое расширение, приводящее к внутренним напряжениям в затвердевающем кристалле и, как следствие, к образованию дислокаций. Благодаря возникновению дислокаций внутренние напряжения в кристалле уменьшаются;

2) компенсация точечных дефектов. Если в растущем кристалле концентрация собственных точечных дефектов превышает равновесную, то при охлаждении слитка избыточные точечные дефекты (вакансии и межузельные атомы) будут объединяться, образуя агломераты. В тех случаях, когда это энергетически выгодно, происходит перестройка с образованием дислокационных петель в плотноупакованных плоскостях;

3) сегрегация примесей. Предполагается, что если кристаллы содержат примеси (либо специально вводимые, так называемые легирующие примеси, либо неконтролируемые), микроскопическая неоднородность в распределении этих примесей обуславливает локальные изменения параметра решетки кристалла, приводящее к образованию дислокаций [11, 12].

Проанализированные виды дефектов оказывают влияние на качество микромеханических датчиков, а следовательно, они должны быть выявлены после получения кремниевых пластин до начала их использования в дальнейших технологических операциях, чему способствуют методики, рассмотренные в данной статье.

Библиографический список

1. Печерская, Е. А. К вопросу об эффективности измерений в технологических процессах / Е. А. Печерская, Р. М. Печерская, Д. В. Рябов, О. Кузнецова // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 98–99.
2. Печерская, Е. А. Применение методологии функционального и метрологического анализа к качеству исследования материалов микро- и нанoeлектроники / Е. А. Печерская // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2007. – Т. 7. – № 2. – С. 94–98.
3. Пшеничников, Ю. П. Выявление тонкой структуры кристаллов : справочник / Ю. П. Пшеничников. – М. : Металлургия, 1974. – 528 с.
4. Юхневич, А. В. Некоторые особенности атомной структуры монокристаллов кремния / А. В. Юхневич // Избранные научные труды Белорусского государственного университета. – Минск : БГУ, 2001. – Т. 5. – С. 89–122.

5. Шифрин, С. С. Проекционное травление как метод исследования дефектов структуры кристаллов полупроводников / С. С. Шифрин, М. Г. Мильвидский, В. Б. Освенский // Кристаллография. – 1982. – Т. 27, № 4. – С. 712–721.
6. ГОСТ 19658-81 Кремний монокристаллический в слитках. Технические условия.
7. Рейви, К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии : пер. с англ. / К. Рейви. – М. : Мир, 1984.
8. Технология полупроводникового кремния / Э. С. Фалькевич и др. – М. : Металлургия, 1992. – 408 с.
9. Сангвал, К. Травление кристаллов: теория, эксперимент, применение : пер. с англ. / К. Сангвал. – М. : Мир, 1990. – 492 с.
10. Voronkov, V. V. The mechanism of swirl defects formation in silicon / V. V. Voronkov // Journ. Cryst. Growth. – 1982. – Vol. 59, № 3. – P. 625.
11. Billing, E. Proc. Roy. Soc., A 235, 37 (1956). – М., 1960. – С. 131–162].
12. Tiller, W. A. In: The Art and Science of Growing Crystals, John Wiley and Sons. New York, 1965. Chap. 15.

Абдуллин Фархад Анварович

аспирант,
Пензенский государственный университет
E-mail: farhad_58@mail.ru

Abdullin Farhad Anvyarovich

postgraduate student,
Penza State University

Пауткин Валерий Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный университет
E-mail: pve1976@ya.ru

Pautkin Valery Evgenyevich

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of nano-
and microelectronics,
Penza State University

Печерская Екатерина Анатольевна

доктор технических наук, профессор,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный университет
E-mail: peal@list.ru

Pecherskaya Ekaterina Anatolyevna

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of nano-
and microelectronics,
Penza State University

Печерский Анатолий Вадимович

доктор технических наук, профессор,
кафедра нано- и микроэлектроники,
Пензенский государственный университет
E-mail: ura258@yandex.ru

Pecherskiy Anatoly Vadimovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of nano-
and microelectronics,
Penza State University

УДК 531.781.2

Абдуллин, Ф. А.

Применение методов селективного травления кремния для оценки качества пластин при изготовлении микромеханических датчиков / Ф. А. Абдуллин, В. Е. Пауткин, Е. А. Печерская, А. В. Печерский // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2018. – № 1 (25). – С. 72–79.