

УДК 539.186:537; 539.19

СТРУКТУРНЫЕ ДЕФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ КРЕМНИИ

Четверикова Дарья Константиновна, студент, специальность 04.05.01 Фундаментальная и прикладная химия, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: dasha_chetver@mail.ru

Клепикова София Михайловна, студент, специальность 04.05.01 Фундаментальная и прикладная химия, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: gosusksm@yandex.ru

Дадашов Эльнур Дахилевич, студент, направление подготовки 04.03.01 Химия, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: dadashov9000@gmail.com

Научный руководитель: **Каныгина Ольга Николаевна**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры химии, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: onkan@mail.ru

***Аннотация.** В настоящее время полупроводниковые пластины из монокристалла кремния нашли широкое применение в создании солнечных фотоэлектрических систем (ФЭС), систем прямого преобразования световой энергии солнечного излучения в электричество. Производство солнечных ФЭС является одним из наиболее перспективных направлений «зеленой» энергетики и растет быстрыми темпами во многих странах. Однако на данный момент времени ФЭС не способны полностью удовлетворить потребности человечества в энергии, ведь пластины монокристалла кремния заполняются дефектами и дислокациями, которые, в свою очередь, оказывают огромное влияние на электропроводные свойства кремния.*

Таким образом, выявление дислокаций необходимо осуществить до начала использования пластин, однако данный дефект может быть использован на производстве – разработан метод структурирования кремниевых подложек с помощью дислокаций, нашедший широкое применение в микроэлектронике [7].

***Ключевые слова:** кремниевые пластины, монокристаллы, дислокации, травление, микросхемы, плотность дислокаций.*

***Для цитирования:** Четверикова Д. К., Клепикова С. М., Дадашов Э. Д. Структурные дефекты в полупроводниковом кремнии // Шаг в науку. – 2024. – № 1. – С. 22–26.*

STRUCTURAL DEFECTS IN SEMI-CONDUCTOR SILICON

Chetverikova Darya Konstantinovna, student, specialty 04.05.01 Fundamental and Applied Chemistry, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: dasha_chetver@mail.ru

Klepikova Sofia Mikhailovna, student, specialty 04.05.01 Fundamental and Applied Chemistry, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: gosusksm@yandex.ru

Dadashov Elnur Dakhilevich, student, training program 04.03.01 Chemistry, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: dadashov9000@gmail.com

Research advisor: **Kanygina Olga Nikolaevna**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Chemistry, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: onkan@mail.ru



Abstract. Currently, semiconductor wafers made from single crystal silicon are widely used in the creation of solar photovoltaic systems (PVS), systems for directly converting the light energy of solar radiation into electricity. The production of solar PV is one of the most promising areas of «green» energy and is growing rapidly in many countries. However, at this point in time, FES are not able to fully satisfy humanity's energy needs, because single-crystal silicon wafers are filled with defects and dislocations, which in turn have a huge impact on the electrically conductive properties of silicon.

Thus, the identification of dislocations must be carried out before the wafers are used, but this defect can be used in production - a method for structuring silicon substrates using dislocations has been developed, which has found wide application in microelectronics [7].

Key words: silicon wafers, single crystals, dislocations, etching, microcircuits, dislocation density.

Cite as: Chetverikova, D. K., Klepikova, S. M., Dadashov, E. D. (2024) [Structural defects in semi-conductor silicon]. *Shag v nauku* [Step into science]. Vol. 1, pp. 22–26.

Основным методом получения кремниевых пластин является выращивание монокристаллического кремния методом Чохральского (рисунок 1). Очищенный поликристаллический кремний расплавляют в тигле из кварца, вводят монокристаллическую за-

травку, после оплавления медленно поднимают и вращают. При резке кремниевых полупроводниковых пластин для элементов солнечных батарей до 50% слитка уходит в опилки, которые находят применение как сырье для синтеза нитрида кремния [2].

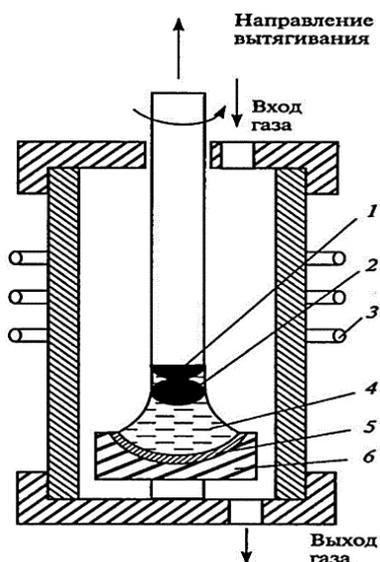


Рисунок 1. Выращивание монокристалла кремния из расплава

Источник: взято из [2]

Как видно из рисунка 1, устройство состоит из заправки (1), монокристалла (2), высокочастотного редуктора (3), расплава (4), тигля из кварца (5), графитового нагревателя (6).

Однако при выращивании монокристалла кремния в его кристаллической решетке могут появиться линейные дефекты – дислокации.

Дислокации – точечные дефекты кристалла – линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла расположение атомных плоскостей.

Существует большое количество методов наблюдения дислокаций, но наиболее распространённым

из них является метод избирательного травления. Его суть заключается в подборе реактива, в результате воздействия которого на поверхности кристалла образуются мелкие ямки травления. Однако этот метод применим лишь для кристаллов с плотностью дислокаций меньше, чем 10^6 см^{-2} .

Более наглядным и более сложным является метод декорирования, в котором дислокации делаются видимыми в результате осаждения чужеродных частиц. При использовании данного метода дислокация наблюдается как на поверхности, так и внутри структуры. Поля напряжений, которые создают дислокации,

можно наблюдать благодаря явлению фотоупругости. Поля напряжений в них фиксируются по возникающему двойному лучепреломлению.

Как известно, кристаллическая решетка кремния имеет вид решетки алмаза, состоящей из двух взаимопроникающих ГЦК решеток (рисунок 2) [6]. В кремнии дислокация представлена в виде винтовой дислокации вектором Бюргерса. При этом есть два варианта дислокаций – «скользящего набора» и «перетасованного набора». Для каждого варианта характерна своя структура ядра, причем ядра дислокации должны

содержать одномерные цепочки оборванных связей. Благодаря данным электронной микроскопии высокого разрешения, установлено, что большая часть дислокаций в кремнии расщеплена на две параллельные частичные дислокации с лентой дефекта упаковки между ними. В кремнии преобладает дислокация скользящего набора [3].

Некоторое количество оборванных связей остаётся незамкнутым, что вызывает «дефекты реконструкции», от которых можно избавиться отжигом при температуре выше 900 °С [4].

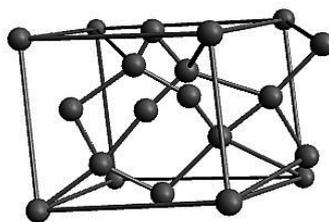


Рисунок 2. Кристаллическая решетка кремния

Источник: разработано авторами

Дислокация может оказывать влияние на электропроводность и хрупкость вещества, создавать дырочную проводимость. Таким образом, вводимые примеси должны отвечать высоким требованиям чистоты полупроводниковых материалов и их кристаллической структуре с наименьшей концентрацией несовершенств.

Дислокации также воздействуют на прочность и пластические свойства кристаллов. Даже при содержании небольшого числа дислокаций происходит снижение их прочности по сравнению с теоретическими данными на несколько порядков. Одним из путей решения проблемы является получение кри-

сталлов с идеально бездефектным строением – идеальных кристаллов или усюв. Их прочность почти совпадает с теоретическими возможностями и достигает сотни тысяч МПа [1].

Объектом экспериментального исследования являлись пластины монокристалла кремния марки КДБ12 с легирующей примесью бора. Эксперимент ставился на одной партии пластин (в состав одной партии входит 4 пластины). До начала травления, с целью выявления механических повреждений, все образцы были сфотографированы на микроскопе с увеличением X 200 крат (рисунок 3).



Рисунок 3. Пластина монокристалла кремния; X 200

Источник: разработано авторами

Механические повреждения при данном увеличении на поверхности образцов обнаружены не были. За период времени, в течение которого проводился эксперимент, средства технологического оснащения, технологические режимы, используемые основные и вспомогательные материалы не изменялись.

Для непосредственного выявления дислокацион-

ной картины использован водный раствор, содержащий HF и CrO_3 в отношении 1:1 к 7 соответственно. Эксперимент проводился тремя параллельными сериями в течение 10, 20 и 30 минут. Результаты являются идентичными, дислокационные дефекты выражены достаточно явно. На рисунке 4 представлено изображение одного из исследуемых образцов.

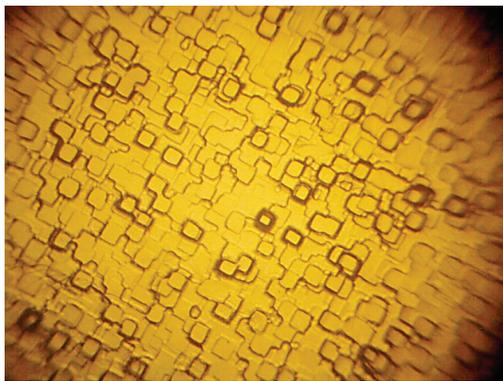


Рисунок 4. Дислокационная картина травления; X 200

Источник: разработано авторами

На рисунке 4 наблюдаются квадратные плоскодонные ямки травления, что соответствует (100) кристаллографической ориентации монокристаллов кремния. Для такой ориентации характерна малая плотность атомов в решетке. Однако существует методика получения пирамидальных скоплений [5].

Вдоль данных линий дислокаций нарушено энергетическое состояние кристаллографических плоскостей, что приводит к формированию определённой геометрии вытравливаемых структур.

Плотность дислокаций была рассчитана по формуле:

$$p = \frac{i_{\text{ср}} \cdot M}{S},$$

где

$i_{\text{ср}}$ – среднее значение ямок травления;

M – увеличение микроскопа;

S – площадь квадрата, см^2 .

Необходимые графические элементы для расчёта приведены на рисунке 5.

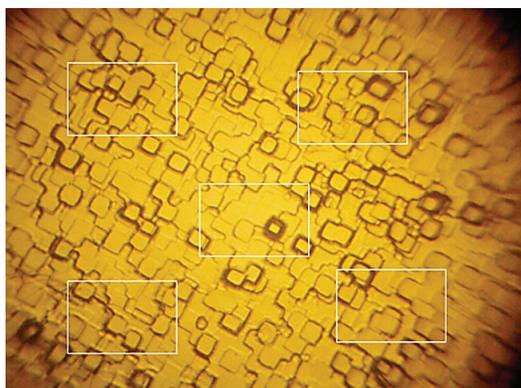


Рисунок 5. Графические элементы для расчёта дислокаций; X 200

Источник: разработано авторами

Рассчитанная плотность дислокаций в образце монокристалла кремния составила $2,61 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$, что в 2,61 раза превышает норму плотности дислокаций в пластинках кремния.

Применение методов селективного травления кремния позволило экспериментально выявить дислокации в его кристаллической структуре. Одной из причин образования дислокаций может быть сегрегация примесей, например, бора. Предполагается, что, если кристаллы содержат примеси, микроскопиче-

ская неоднородность этих примесей обуславливает локальные изменения параметра решетки кристалла, приводящее к образованию дислокаций.

Рассчитанная плотность превысила норму в 2,61 раза, поэтому исследованные пластины непригодны для создания технологических компонентов и оборудования, так как из-за слишком большого скопления дислокаций повреждена кристаллическая структура, а следствием этого является ухудшение электрических и полупроводниковых свойств кремния.

Литература

1. Артемьев С. Р., Белан С. В. Свойства и основные способы получения нитевидных кристаллов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 5, № 1(65). – С. 22–25.
2. Ашиккалиева К. Х., Каныгина О. Н., Васильченко А. С. Модификации поверхности монокристаллического кремния при изотермическом и лазерном отжигах // Вестник ОГУ. – 2012. – №9 (145). – С. 96–100.
3. Горюшенко В. Ф., Тиванов М. С., Залесский В. Б. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов // Альтернативная энергетика и экология. – 2009. – №1. – С. 59–124.
4. Мельников В. В. Структура и спектральные свойства малых молекул и примесных центров молекулярного типа в кристаллических материалах: теория и приложения : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Томск, 2018. – 208 с.
5. Способ обработки поверхности монокристаллического кремния ориентации (111): пат. 2501057 Рос. Федерация. № 201212418912; заявл. 09.06.12; опубл. 10.12.13, Бюл. №34. – 6 с.
6. Хорошева М. А. Взаимодействия дислокаций с примесями и дефектами в кремнии и их влияние на электронные свойства кремния: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Черноголовка, 2015. – 135 с.
7. Юхневич А. В. Некоторые особенности атомной структуры монокристаллов кремния // Изб. науч. труды Белорусского гос. ун-та.: в 7 томах. – Минск: БГУ, 2001. – Т. 5. – С. 89–122.

Статья поступила в редакцию: 25.05.2023; принята в печать: 06.03.2024.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.