

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

**МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ
ИЗУЧЕНИЕ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Учебно-методическое пособие

Составители:
Л.А. Битюцкая,
Е.В. Богатилов,
А.Н. Шебанов

Издательско-полиграфический центр
Воронежского государственного университета
2013

Утверждено научно-методическим советом физического факультета 5 июля 2013 г., протокол № 7

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры физики твердого тела и наноструктур ВГУ А.Н. Лукин

Учебно-методическое пособие подготовлено на кафедре физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета.

Рекомендуется при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Основы технологии интегральных схем», «Основы технологии электронной компонентной базы» и для самостоятельной работы студентов 3–4 курсов дневного отделения физического факультета ВГУ, обучающихся по программе высшего профессионального образования.

Для направления 210100 – Электроника и нанoeлектроника

1. Основные типы дефектов

Любое отклонение от периодической структуры кристалла называют *дефектом*.

Дефекты классифицируют по числу измерений, в которых нарушения кристалла простираются на расстояния, превышающие характерный параметр решетки. Выделяют точечные, линейные, поверхностные и объемные дефекты.

1.1. Точечные (нульмерные) дефекты

Размеры точечных дефектов во всех трех измерениях не превышают одного или нескольких межатомных расстояний. К ним относят вакансии, атомы в междоузлиях, атомы примесей в узлах или междоузлиях, а также сочетания примесь – вакансия, примесь – примесь, двойные и тройные вакансии и др.

Различают дефекты по Френкелю (рис.1а) и дефекты по Шоттки (рис.1б). Дефекты по Френкелю являются парными (вакансия – атом в междоузлии) и легче возникают в кристаллах, имеющих относительно рыхлые структуры (полупроводники со структурой алмаза - Ge,Si; вюрцита - CdS, CdSe, CdTe; сфалерита - GaAs,GaP,InSb).

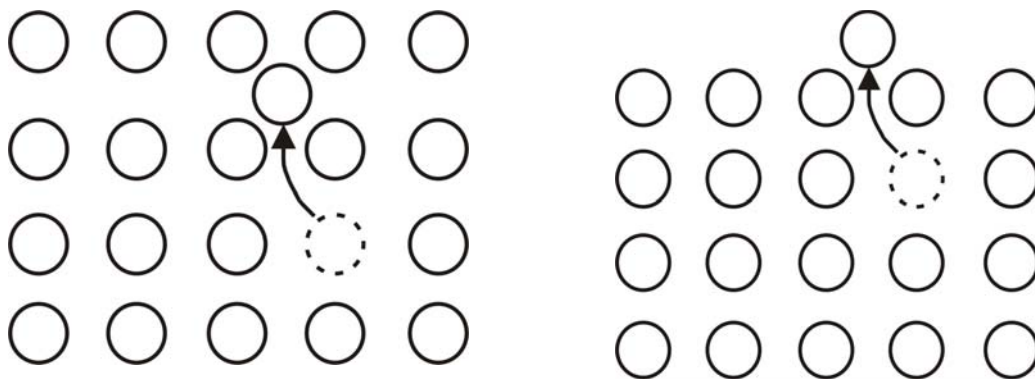


Рис.1. Точечные дефекты: а) Френкеля; б) Шоттки.

Дефекты по Шоттки преобладают в кристаллах с плотной упаковкой атомов (Mg, Be, Zn, Cd, Cu), где образование междоузельных атомов энергетически не выгодно. Они образуются, когда атомы из приповерхностного слоя выходят из кристалла на поверхность, а образовавшаяся вакансия мигрирует по объему кристалла.

Вакансии являются равновесными дефектами, т.е. они всегда присутствуют в кристалле и их концентрация определяется термодинамическими условиями. $A \in \alpha$

Равновесная концентрация пар Френкеля равна

$$n = \sqrt{N \cdot N'} \exp(-E_f/2kT), \quad (1.1)$$

где N, N' - число атомов и междоузлий в единице объема, E_f – энергия образования пары.

Равновесная концентрация дефектов по Шоттки равна

$$n = N \exp(-E_v/kT), \quad (1.2)$$

где E_v – энергия образования вакансий.

В общем случае кристалл содержит и дефекты по Френкелю и дефекты по Шоттки. Однако преобладают те нарушения, для образования которых требуется меньшая энергия.

1.2. Линейные дефекты (дислокации)

Различают два основных типа дислокаций – краевую и винтовую. Промежуточные случаи можно считать комбинацией двух основных типов.

На рис.2 приведен пример *краевой (линейной) дислокации*. Дислокация образуется в результате сдвига верхней части кристалла относительно нижней части вдоль *плоскости скольжения xz*. В результате сдвига на один период решетки атомная плоскость верхней

части кристалла не находит себе продолжения в нижней. Линия EE , являющаяся краем этой прерванной атомной плоскости внутри кристалла, называется *краевой дислокацией*.

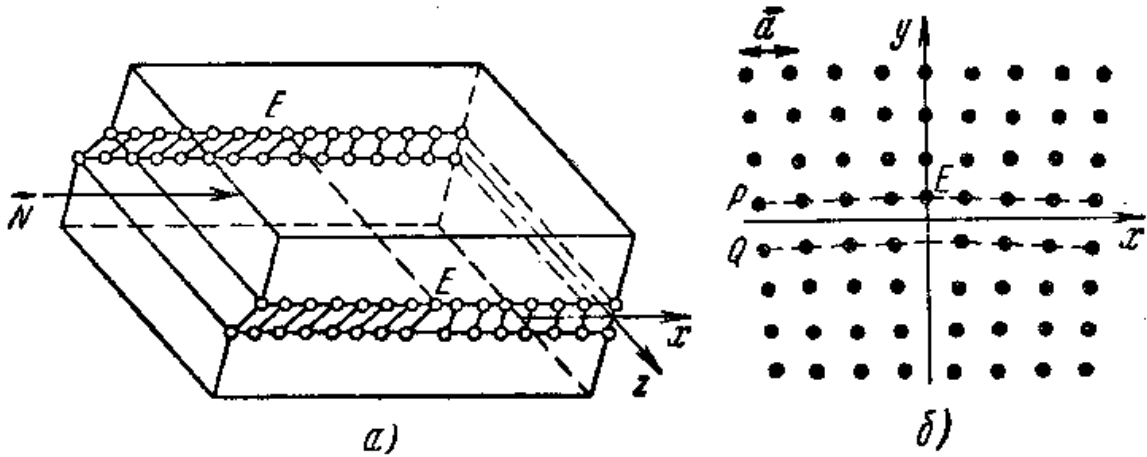


Рис.2. Линейная дислокация: а) образование; б) структура.

Винтовые дислокации (дислокации Бюргерса) образуются, когда скольжение происходит параллельно линии дислокации (рис.3). Линией дислокации, или осью винтовой дислокации, является линия EE (рис.3в).

Одной из важнейших характеристик дислокации является вектор смещения – вектор Бюргерса \vec{b} , определяемый следующим образом. Рассмотрим две кристаллические решетки: одну реальную, содержащую дефекты различного типа, и другую – идеальную, не содержащую никаких дефектов. Любую область реального кристалла, где можно установить взаимно однозначное соответствие с идеальным кристаллом, называют *областью хорошего кристалла*. Участки, где такое соответствие установить нельзя, называют *областью плохого кристалла*.

Контуром Бюргерса \vec{b} называют замкнутый контур произвольной формы, построенный в реальном кристалле так, что от атома к атому переходят последовательно, не выходя из области хорошего кристалла. Если в реальном кристалле контур проведен вокруг дислокации (рис.4а, рис.5а), то соответствующий контур в идеальном кристалле оказывается

разомкнутым (рис.4б, рис.5б). Вектор, замыкающий контур в идеальном кристалле, называют вектором Бюргера. Вектор Бюргера всегда является одним из векторов трансляций решетки. Поэтому его модуль и направление ограничены рядом дискретных значений, определяемых структурой кристалла.

Между дислокациями существует сильное упругое взаимодействие. Дислокации, находящиеся на расстоянии $\sim (10^3 \div 10^4)b$, могут начать скольжение, вызванное полем упругих напряжений, которое создается вокруг дислокаций.

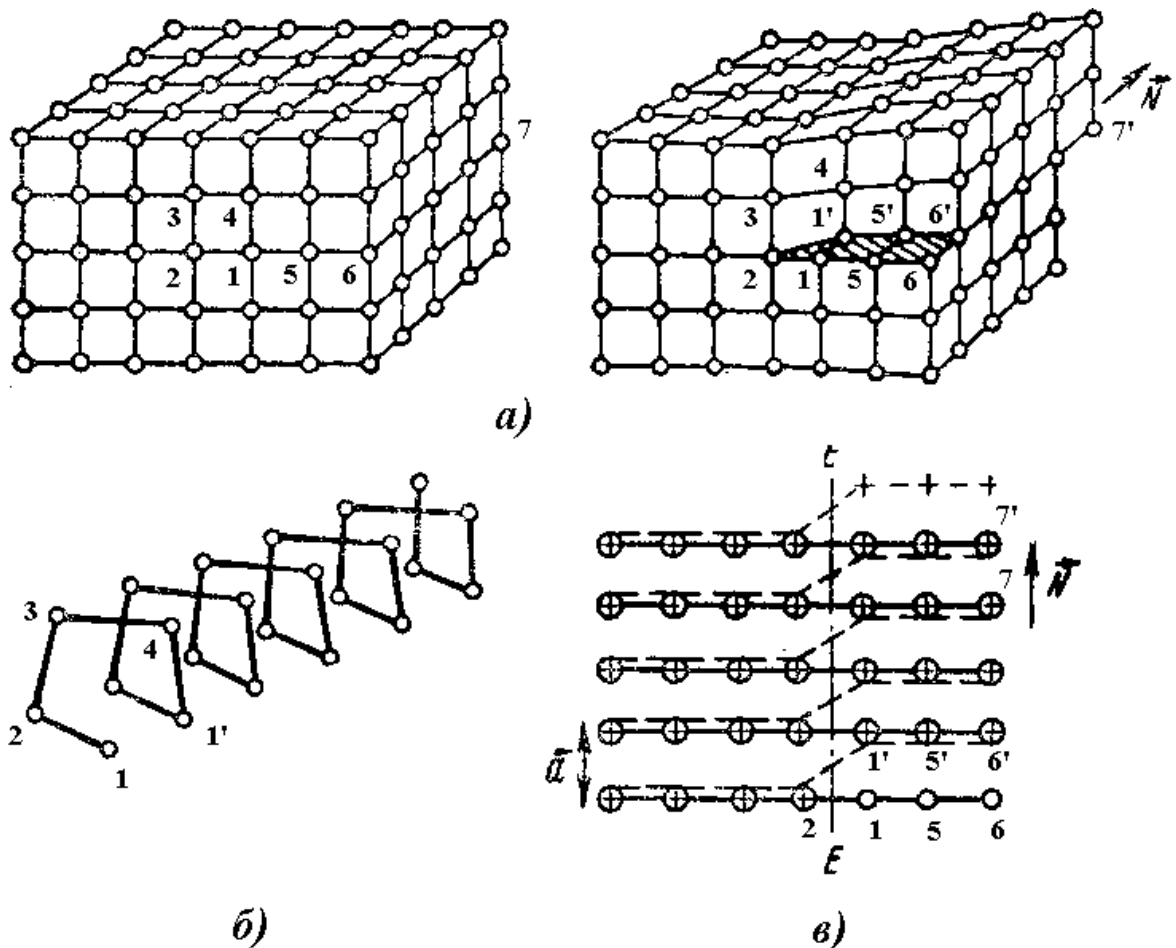


Рис.3. Винтовая дислокация: а) образование; б) структура вдоль оси дислокации; в) структура в плоскости сдвига: “о”, “+” – атомы нижележащей и вышележащей плоскостей, соответственно; “- - -” –

атомный ряд, изогнутый при образовании дислокации

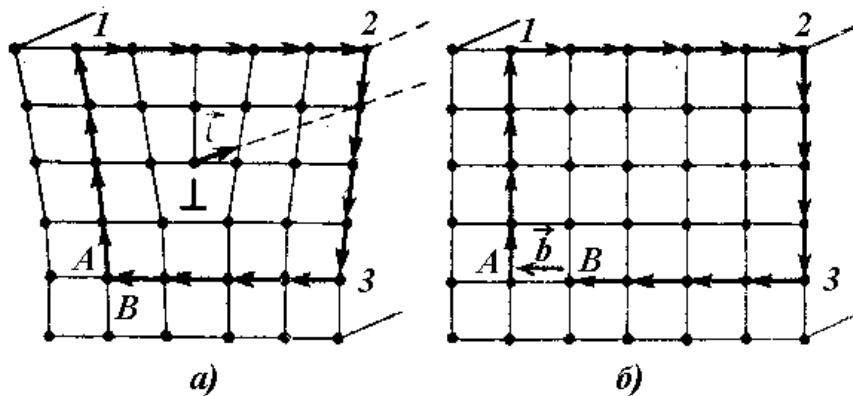


Рис.4 Контур Бюргера в кристалле с краевой дислокацией (а) и в исходном идеальном кристалле (б).

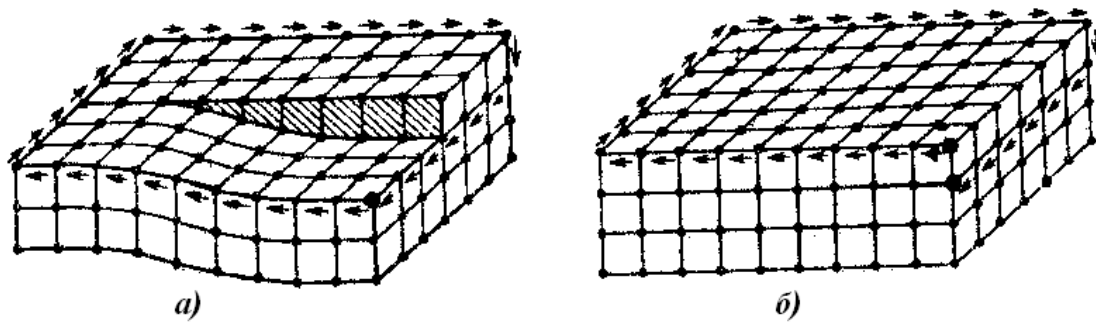


Рис.5 Контур Бюргера в кристалле с винтовой дислокацией (а) и в исходном идеальном кристалле (б).

Энергия дислокации зависит от вектора Бюргера по квадратичному закону:

$$E_d^{(винт)} = \frac{Gb^2l}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0}, \quad E_d^{(линь)} = \frac{Gb^2l}{4\pi(1-\nu)} \ln \frac{R}{r_0}, \quad (1.3)$$

где G – модуль сдвига, R – внешний радиус дислокационной трубки ($\sim 10^4 b$), r_0 – радиус ядра дислокации ($\sim b$), ν – коэффициент Пуассона.

Количество дислокаций не зависит от температуры так как энергия образования дислокаций очень велика. Плотность дислокаций в

кристалл зависит в основном от его предшествующей истории, т.е. метода выращивания, способа и степени легирования, термической и механической обработок.

2. Процессы дефектообразования в кремнии

Кремний в операциях технологического цикла при изготовлении п/п приборов и схем подвергается целому ряду операций, каждая из которых вносит свой вклад в дефектообразование: выращивание кристаллов, окисление, диффузия, эпитаксия, ионная имплантация (ионное легирование).

2.1. Выращивание кристаллов

При выращивании кристаллов из расплава происходит зарождение таких дефектов как дислокации и конденсация точечных дефектов вплоть до возникновения кластеров микродефектов или сегрегации примесей. Можно выделить следующие причины возникновения дефектов:

1) Переменный градиент температур, существующий в кристалле во время роста.

Любое отклонение $\delta\Delta T$ от постоянного градиента температуры на фронте кристаллизации вызывает неоднородное термическое расширение, приводящее к внутренним напряжениям в затвердевшем кристалле и, как следствие, к образованию дислокаций. Плотность ростовых дислокаций выражается формулой:

$$\rho = \frac{\alpha \cdot \delta\Delta T}{a}, \quad (2.1)$$

где $\alpha = 1/a(da/dt)$ - коэффициент термического расширения, a - период решетки.

2) Высокая скорость охлаждения кристалла от температуры кристаллизации.

Если имеются подходящие источники дислокаций, быстрое и неравномерное охлаждение кристалла может привести к образованию большого количества дислокаций.

Если в растущем кристалле концентрация собственных точечных дефектов превышает равновесную, то при охлаждении слитка избыточные точечные дефекты (вакансии и междоузельные атомы) будут объединяться, образуя агломераты.

3) Высокая концентрация примесей.

Обычно невозможно вырастить бездислокационные кристаллы, если концентрация легирующей примеси близка к пределу растворимости (например, более 10^{20}см^{-3} в случае фосфора). Подавляющее большинство кристаллов легируются умеренно (до удельных сопротивлений 1-10 Ом×см) и поэтому образование дислокаций в них происходит благодаря наличию других быстро диффундирующих примесей, например углерода, кислорода.

Отметим, что даже в бездислокационных или малодислокационных ($N_D < 10^2 - 10^3 \text{ л/см}^2$) кристаллах были обнаружены очень мелкие дислокационные петли. Это новый тип дефектов, характерный исключительно для полупроводниковых кристаллов. Из-за малого размера (800–30000Å) их называют микродефектами: более крупные - А тип, мелкие – В тип. Картина распределения микродефектов в поперечном сечении слитка обычно имеет вид спирали, и ее часто называют свирл-картиной.

2.2.Окисление

Термическое окисление кремния часто приводит к появлению в пластине термических, механических и химических напряжений, вызывающих образование кристаллографических дефектов. Процессы образования дефектов, связанные с окислением, можно разделить на две категории. Первая связана с влиянием термических напряжений, вторая – с химическими факторами, возникающими вследствие протекания окислительно-восстановительных реакций на поверхности пластины.

2.3.Диффузия

Для создания в кремниевых приборах p-n переходов используются примеси элементов 3 – 5 групп (B, P, As).

Диффузия легирующей примеси, а также металлов, кислорода и углерода обычно вызывает искажения решетки кремния вследствие следующих факторов:

1) Диффузия приводит к изменению равновесной концентрации точечных дефектов, поскольку движение атомов примеси происходит при участии собственных точечных дефектов (вакансий и межузельных атомов Si).

2) Введение чужеродных атомов в решетку вызывает напряжение внутри кристалла и, как следствие, изменение параметра решетки.

3) Образование выделений примеси (преципитатов) обычно в виде соединения примеси с кремнием. Такие преципитаты могут создавать достаточно большие напряжения, приводящие к образованию новых дефектов.

Дислокации, вводимые при диффузии, обычно образуют плоскую сетку, параллельную фронту диффузии и, следовательно, p-n переходу.

Существенную роль в изменении структуры дефектов в кремнии играют быстродиффундирующие примеси, такие как медь, золото и железо. Они влияют на морфологию, распределение и плотность существующих в структуре дефектов, изменяя концентрацию точечных дефектов в их окрестности и образуя собственные выделения. Быстрое уменьшение растворимости меди в твердом состоянии (от 10^{18} 1/см³ при 1200°C до 2×10^{15} 1/см³ при 600°C), а также высокий коэффициент диффузии в той же температурной области обуславливает гетерогенное выделение этих примесей на кристаллографических дефектах.

2.4.Ионная имплантация

Ионной имплантацией называют процесс внедрения в мишень ионизированных атомов с энергией достаточной для проникновения ее в приповерхностные области. Наиболее общим применением ионной имплантации является процесс ионного легирования кремния при изготовлении п/п приборов. Однако ионная имплантация – это технологический процесс, в котором происходит интенсивная генерация дефектов в кремниевой подложке. Она определяется первичными и вторичными столкновениями имплантируемых ионов с атомами исходного кристалла, при которых возникает высокая концентрация точечных дефектов, в основном, дефектов Френкеля. При высоких дозах имплантируемых ионов ($> 10^{13}$ 1/см³) поверхность кремниевой пластины становится аморфной, а кристаллическая структура разрушается, появляются многочисленные разупорядоченные области. Поэтому для восстановления кристаллической структуры и уменьшения плотности дефектов необходим отжиг при температуре 600-1100°C.

3. Влияние дефектов на электрические свойства полупроводников

Дислокации в кремнии могут сильно влиять на электрические свойства кристалла за счет двух основных эффектов:

1) Вокруг дислокаций существуют упругие напряжения, которые простираются на значительные расстояния от ядра дислокации.

2) На дислокациях существуют оборванные, или ненасыщенные, связи, образование которых обусловлено нарушением периодичности атомной решетки в окрестности дислокации. Это приводит к появлению неспаренных электронов, которые могут захватывать электроны из зоны проводимости и образовывать «пары на оборванных связях». Вследствие этого дислокация заряжается отрицательно.

На рис.21 показана энергетическая зонная диаграмма кремния в окрестности дислокации. В материале n-типа электрон, захваченный оборванной связью, будет иметь энергетический уровень внутри запрещенной зоны вблизи валентной зоны. Таким образом, дислокации в кристаллах n-типа проявляют акцепторное действие.

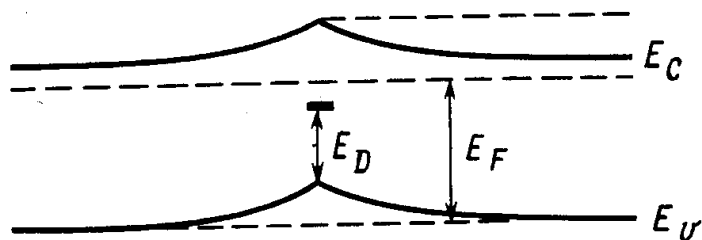


Рис.6. Зонная диаграмма для окрестности дислокации в кремнии. Зоны искажены вокруг ядра дислокации; вблизи центра запрещенной зоны вводится уровень.

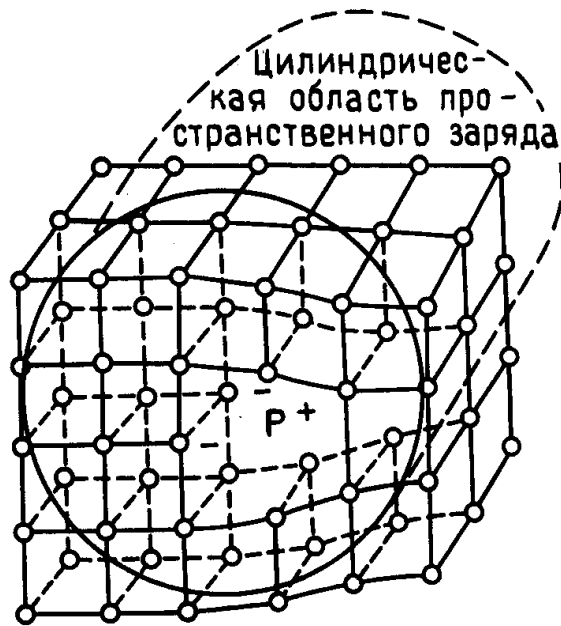


Рис.7.Схема цилиндрической области пространственного заряда вокруг краевой дислокации.

В материале р-типа дислокации оказывают донорное действие. В этом случае дислокация будет заряжена положительно.

Ввиду того, что в кристалле должно выполняться условие электронейтральности, отрицательно заряженная дислокация в материале n-типа будет притягивать к себе ионизованные атомы доноров. В результате около дислокации происходит образование «заряженной трубки» - облака положительного пространственного заряда цилиндрической формы – и возникает потенциальный барьер, простирающийся вплоть до края этой области пространственного заряда (рис.7.).

В кристаллах р-типа положительно заряженная дислокация окружена облаком отрицательного пространственного заряда.

3.1.Проводимость

Когда дислокации в кристалле ориентированы преимущественно в каком-либо направлении, проводимость кристалла становится сильно анизотропной относительно этого направления.

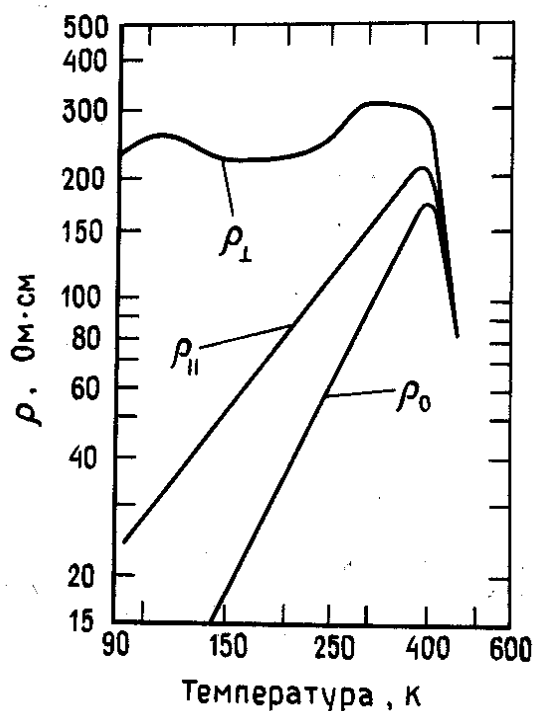


Рис.8. Температурные зависимости удельного сопротивления кристалла в случаях, когда направление электрического поля при измерениях сопротивления было перпендикулярно и параллельно направлению дислокаций ($D=1,2 \times 10^{-7} \text{ см}^{-2}$).

Образование цилиндрической области пространственного заряда вокруг дислокации сопровождается захватом основных носителей. Эта “экстракция” носителей приводит к уменьшению проводимости материала в случае, когда поток носителей перпендикулярен линиям дислокаций, в то время как в случае потока, параллельного линиям дислокаций, проводимость не изменяется (рис.8).

Справедливы следующие выражения:

$$\frac{\sigma_{\parallel}}{\sigma_0} = \frac{\rho_0}{\rho_{\parallel}} = 1 - \varepsilon, \quad \frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_0} = \frac{\rho_0}{\rho_{\perp}} = \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon}, \quad (3.1)$$

где σ_0 - проводимость бездислокационного кристалла; $\varepsilon = \pi R^2 D$ - доля объема кристалла, занимаемая цилиндрическими областями пространственного заряда; R - радиус цилиндра пространственного заряда; D - плотность дислокаций.

4. Кремний

4.1. Кристаллическая структура

Кремний обладает алмазоподобной кубической кристаллической решеткой, которая может быть представлена в виде двух взаимопроникающих гранецентрированных решеток, сдвинутых друг относительно друга на $\frac{1}{4}$ телесной диагонали (рис.9).

Главные кристаллографические плоскости в кремнии представлены рис.10. Для их обозначения применяют *индексы Миллера*, обратно пропорциональные отрезкам, которые отсекают соответствующие плоскости на кристаллографических осях.

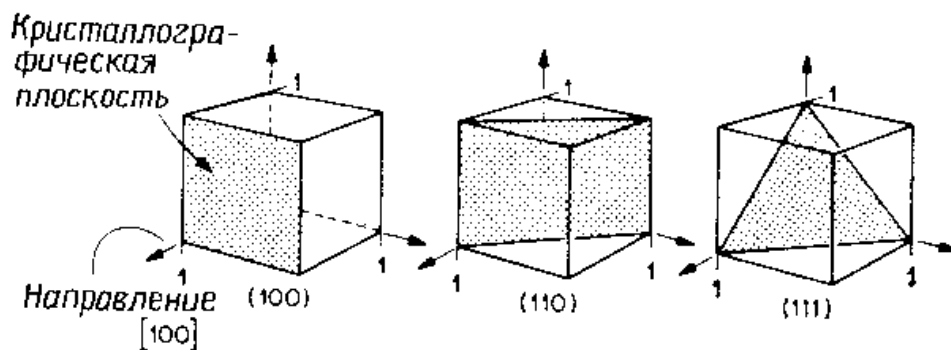


Рис.10. Схематическое представление плоскостей с различными индексами Миллера в кубической решетке.

Свойства кремниевых подложек (предел прочности, модуль упругости, скорость травления, плотность поверхностных состояний и др.) зависят от кристаллографической ориентации подложки. Традиционно биполярные схемы формируют на подложках с ориентацией $\{111\}$, а МОП-приборы – на подложках с ориентацией $\{100\}$.

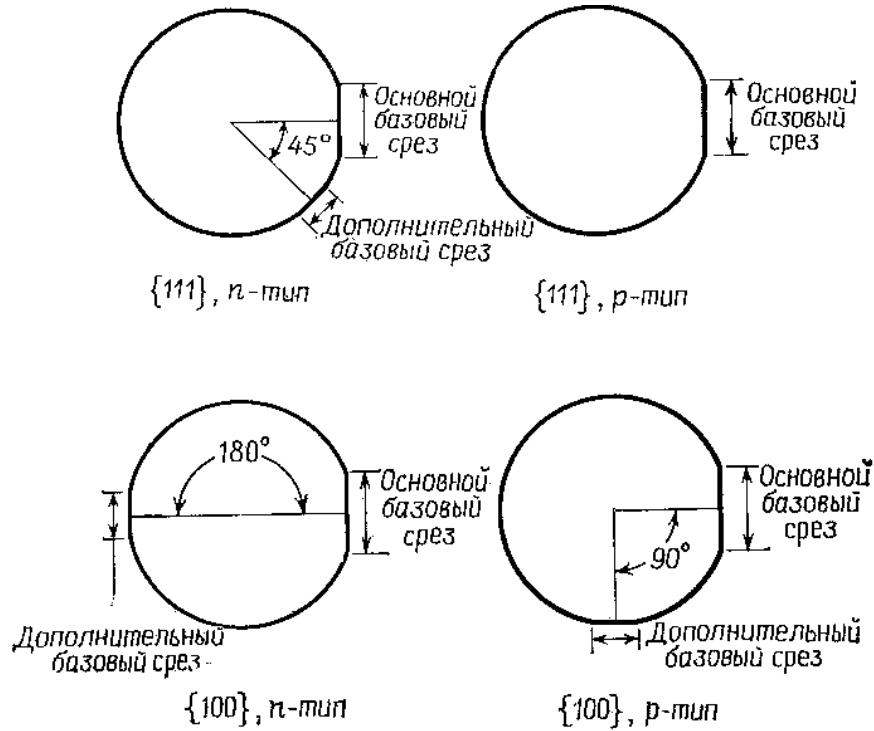


Рис.11. Маркировка кремниевых подложек с помощью основного и дополнительных базовых срезов, стандарт SEMI.

Для распознавания ориентации и типа проводимости кремниевых пластин на кристаллах формируют один или несколько базовых срезов (рис.11).

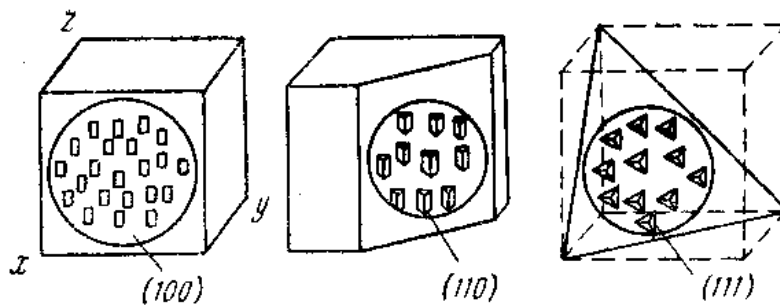


Рис.12. Фигуры травления для плоскостей (100), (110), (111).

Ориентацию монокристалла кремния можно определить также по *фигурам травления* (рис.12). При продолжительном травлении в слабом травителе на гранях кристалла образуются правильные фигуры различной внешней формы, которые легко наблюдаются под микроскопом. Фигуры травления на различных кристаллографических плоскостях различны, и по форме в какой-то степени соответствуют сечениям, образованным соответствующими кристаллографическими плоскостями с элементарной ячейкой.

4.2. Основные марки

Монокристаллический кремний получают путем выращивания из расплава методом Чохральского или методом бестигельной зонной плавки. Основные марки монокристаллического кремния:

- *кремний моносилановый* шести марок КМД-1, КМД-2, ..., КМД-6 (К-кремний, М-моносилановый, Д – электропроводность дырочного типа, цифра – удельное сопротивление в кОм·см), плотность дислокаций $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, содержание кислорода $< 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

- *кремний для силовых вентиляей* одиннадцати марок КЭ2А, КЭ2Б, КЭ2В, КЭ2Г, КЭ2Д, БКЭ2А, БКЭ2Б, БКЭ2В, БКЭ2Г, БКЭ2Д, БКД2Е (Э – электропроводность электронного типа, Д – дырочного типа; удельное сопротивление для КЭ2А, БКЭ2А – 26-45 Ом·см, для КЭ2В, БКЭ2В – 40-75 Ом·см, для КЭ2Г, БКЭ2Г – 50-140 Ом·см, для КЭ2Д, БКЭ2Д – 100 Ом·см, для БКД2Е – 500-2000 Ом·см), плотность дислокаций $< 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$

- *кремний общего назначения* пятнадцати групп с различными допустимыми диапазонами удельного сопротивления (в Ом·см) 1А (1-15), 1Б (1-20), 2А (15-25), 2Б (25-45), 2В (40-75), 2Г (50-140), 2Д (100-250), 2Е (500-2000), 3А (0.005-1.0), 3Б (0.008-1.0), 3В (0.005-0.1), 4А (0.02-0.2), 5А (3-18), 5Б (20-40), 5В (40-120). Группы 1А, 1Б, 3А

легированы фосфором или бором, 2А-2Д – фосфором, 2Е – бором, 3Б,3В – сурьмой, 4А – алюминием, 5А-5В – фосфором и золотом. Плотность дислокаций от $2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$ до $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$.

- кремний электронный марок КЭМ-0.003, КЭМ-0.004 (К – кремний, Э – электронная проводимость, М – легирован мышьяком, цифры – удельное сопротивление в Ом·см), плотность дислокаций $< 10^3 \text{ см}^{-2}$.

- кремний для осаждения эпитаксиальных слоев марок ЭКДБ-10-1, ЭКЭС-0.01-5 (Э – эпитаксиальное наращивание, К – кремний, Д/Э – дырочная/электронная проводимость, Б/С – легирующая примесь бор/сурьма; первая цифра - удельное сопротивление, вторая цифра – марка кремния), плотность дислокаций – 10 см^{-2} (для марки 1) и 100 см^{-2} (для марки 2).

- эпитаксиальные структуры кремния имеют дырочную проводимость с удельным сопротивлением 0.5-2.0 Ом·см, плотность дислокаций $1 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, толщина эпитаксиального слоя 8-15 мкм, пример обозначения $25 \frac{8\text{КДБ} - 0.5}{200\text{КЭС} - 0.01}$ (цифра перед дробью – диаметр структуры, первая цифра в числителе – толщина эпитаксиального слоя, в знаменателе – толщина пластины).

Кремниевая подложка должна удовлетворять ряду требований к геометрическим размерам (табл.1).

Таблица 1. Спецификация геометрических параметров подложек кремния диаметром 100 и 125 мм

Диаметр подложки, мм	100±1	125±0.5
Основной базовый срез, мм	30-35	40-45
Дополнительный базовый срез, мм	16-20	25-30
Толщина подложки, мм	0.50-0.55	0.60-0.65

Геометрический прогиб, мкм	60	70
Неплоскостность, мкм	50	60
Ориентация поверхности	$(100) \pm 1^\circ$ Разориентированная от (111)	Та же Та же

5. Выявление структурных дефектов кристалла металлографическим способом

Металлографический метод состоит в выявлении дислокаций путем химического воздействия на поверхность кристалла специально подобранным травителем. Скорость травления в местах выхода дислокаций гораздо больше, чем в других точках кристалла. В результате, в месте выхода дислокации на шлифе после травления образуется ямка. Форма основания ямки травления зависит от ориентации плоскости, где идет травление.

В отличие от фигур травления ямки травления не покрывают всю поверхность шлифа, а располагаются только в местах выхода дислокаций (рис.13). Количество ямок травления на шлифе не должно зависеть от времени травления.

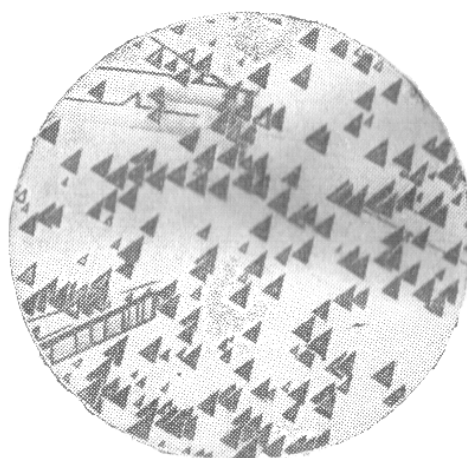


Рис.13. Выход дислокаций на плоскость (111).

Методом химического травления выявляются не все дислокации, а лишь те, которые перпендикулярны шлифу. Поэтому плотность дислокаций, рассчитанная по количеству ямок травления, всегда является несколько заниженной. Металлографический метод эффективен при плотности дефектов $<10^6 \text{ см}^{-2}$.

Процесс химического травления кремния определяется двумя основными реакциями: окислением кремния и растворением образовавшегося окисла. Поэтому в состав травящих растворов для кремния обычно входит какой-либо сильный окислитель в сочетании с плавиковой кислотой, растворяющей окислы кремния.

6. Основы теории образования изображения в микроскопе

6.1. Принципиальная схема микроскопа

Микроскоп представляет собой комбинацию двух увеличивающих оптических систем – объектива и окуляра (рис.14). Объект I располагается вблизи передней фокальной плоскости объектива 2 , который дает промежуточное изображение I' . Изображение I' является действительным, увеличенным и обратным. Оно расположено вблизи передней главной фокальной плоскости окуляра 3 . Промежуточное изображение увеличивается окуляром, который дает мнимое, прямое по отношению к промежуточному изображению и обратное по отношению к объекту изображение I'' .

Общее увеличение микроскопа N равно произведению увеличения объектива $N_{об}$ и окуляра $N_{ок}$:

$$N = N_{об} \cdot N_{ок} \quad (6.1)$$

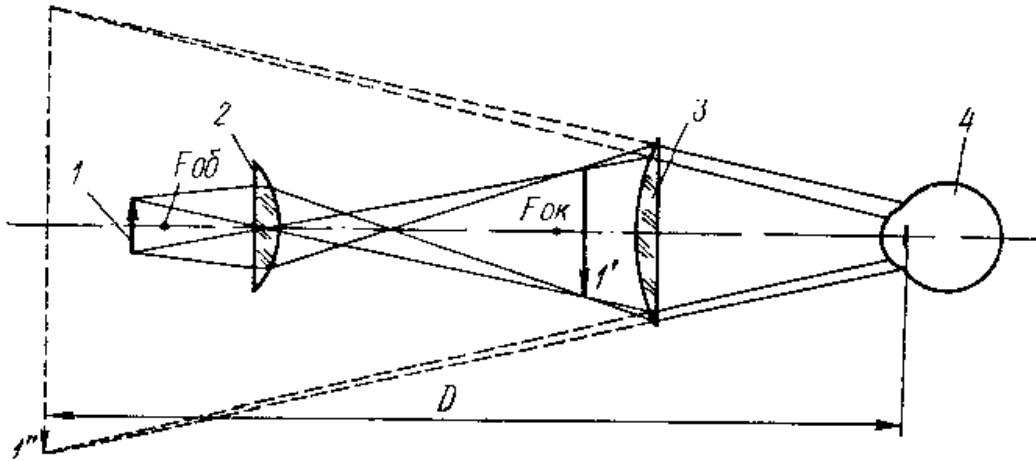


Рис.14. Принципиальная оптическая схема микроскопа

Обычно рабочее увеличение микроскопа находится в пределах $70 \div 2000$ и ограничено длиной световой волны. Увеличение объектива и окуляра всегда указывается на их корпусе.

6.2. Разрешающая способность

Разрешающая способность оптического прибора – величина, обратная минимальному расстоянию между двумя точками объекта, дающими раздельные изображения.

В оптическом микроскопе в образовании изображения участвует не вся сферическая волна, выходящая из осевой точки предмета, а только ее часть, определяемая наименьшей оправой или диафрагмой системы (апертурной диафрагмой). Из всех лучей, испускаемых исследуемым объектом, в систему попадут только те, которые находятся внутри конуса, опирающегося на апертурную диафрагму. Половина угла при вершине этого конуса называется апертурным углом и обозначается α . Следующую величину называют числовой апертурой A :

$$A = n \sin \alpha, \quad (6.2)$$

где n – коэффициент преломления среды, находящейся между объектом и объективом.

Обычно наименьшей оправой является объектив. Апертура объектива всегда указывается на его корпусе.

Апертурный угол определяет разрешающую способность световой оптики. Изображение, формируемое оптической системой, представляет результат интерференции лучей, проходящих через эту систему. Объекты с деталями структуры около 1 мкм можно рассматривать как дифракционные решетки. Свет параллельным пучком падает на дифракционную решетку, дифрагирует на ее деталях и распространяется под углами $\phi_m = \arcsin m\lambda / d$, где λ – длина световой волны, m – порядок дифракции, d – период решетки. Для получения видимого изображения необходимо, чтобы в объектив попадали лучи хотя бы двух порядков дифракции (с $m=0,1$). Возможный диапазон углов дифракции лучей, попадающих в объектив, определяется апертурным углом α .

Минимальное разрешаемое расстояние определяется соотношением

$$d_{\min} = \frac{\lambda}{n \sin \alpha} = \frac{\lambda}{A}. \quad (6.3)$$

6.3. Методы повышения разрешающей способности оптики

1) В соответствии с формулой (6.3) уменьшение длины световой волны повышает разрешающую способность.

2) Для увеличения разрешающей способности можно увеличить апертуру, поместив между объектом и объективом *иммерсионную жидкость* (например, кедровое масло), которая имеет показатель преломления $n > 1$.

3) Использование косоугольного освещения по методу *темного поля* позволяет вдвое увеличить разрешающую способность. Темное поле

создается, когда в объектив микроскопа проходят лишь рассеянные (диффузно отраженные) от объекта лучи или лучи, отраженные элементами поверхности, имеющими надлежащий наклон по отношению к оптической оси объектива. Вследствие этого поверхность объекта представляется более или менее темной по сравнению с ярко освещенными определенными деталями на ней.

6.4.Глубина резкости изображения

При наблюдении объемного объекта одновременно резко видны его детали, расположенные не в одной плоскости, а в пространстве, имеющем некоторую протяженность по глубине. Эту протяженность называют *глубиной резкости*. Глубина резкости – это наибольшее допустимое перемещение объектива, не приводящее к ухудшению качества изображения. Справедлива следующая формула:

$$T \approx \frac{250}{N^2} + \frac{1}{7AN} + \frac{n\lambda}{2A^2} . \quad (6.4)$$

6.5.Методы микроскопии с применением дополнительных оптических средств

1) Исследование в поляризованном свете. Применяется для изучения объектов, обладающих оптической анизотропией (т.е. объектов, у которых оптические свойства не одинаковы по различным направлениям)

2) Метод фазового контраста. Применяется для изучения объектов, у которых отдельные элементы структуры не отличаются по показателю отражения, однако имеют различный показатель преломления. Такие объекты не изменяют *амплитудный рельеф* отраженной от них световой

волны и не могут быть изучены обычным способом. Метод фазового контраста позволяет преобразовать *фазовый рельеф*, который создают такие объекты, в амплитудный.

7. Инструкция по работе с большим универсальным исследовательским микроскопом NU 2E

Микроскоп NU 2E предназначен для наблюдения и фотографирования микроструктуры в проходящем и отраженном свете в светлом и темном поле, в поляризованном свете, а также для работы методом фазового контраста. При визуальном наблюдении обеспечивается увеличение от 32 до 2500.

7.1. Включение прибора

Микроскоп NU2E может использовать в качестве источников света лампу накаливания или ксеноновую лампу сверхвысокого давления. Включение осветителей производится при помощи переключателей, расположенных на передней панели выдвижного ящика с электрооборудованием (рис.15).

Для включения лампы накаливания (1' - рис.16) необходимо:

- перевести переключатель *I* в положение I (нормальная нагрузка) или I' (повышенная нагрузка, долговечность лампы сокращается);
- включить питание тумблером 2.

Для включения ксеноновой лампы (1 – рис.16) необходимо:

- перевести переключатель *I* в положение II;
- рукоятку 3 перевести в положение, отмеченное символом Y;
- произвести поджиг лампы коротким нажатием на кнопку 4.

- если лампа не зажигается, поворачивать рукоятку 3 вправо дальше, пока не получится зажигание лампы при нажатии кнопки 4;
- после зажигания лампы ваттметр должен показывать 100 Вт, регулировка производится рукояткой 3.

После включения осветителя ручку 3 (рис.16) необходимо перевести в положение, которое соответствует включенному осветителю. Ручкой 2 выбрать направление освещения (в проходящем свете/в отраженном свете/смешанное освещение). Включить защитный светофильтр (4 – рис.16), обозначенный знаком «•» (светофильтр предназначен для защиты от ультрафиолетового излучения)

7.2. Порядок работы

1) Установить следующее положение тяг: тяга 8 (рис.16) – выдвинута, тяга 4 (рис.17) – выдвинута, тяга 2 (рис.17) – выдвинута, тяга 3 (рис.17) – выдвинута.

2) Установить объектив (5 - рис.16) с подходящим увеличением. Объектив является разборным, увеличение указано на корпусе под внешним кожухом. Объектив устанавливается по направляющим до упора.

3) Поместить изучаемый образец на предметный столик 7. Вертикальное перемещение столика осуществляется ручкой 1 (рис.17).

4) При помощи ручки 1 (рис.17) приблизить предметный столик к образцу на расстояние несколько меньшее фокусного расстояния установленного объектива (чем больше увеличение, тем ближе к объективу располагается образец). Затем, наблюдая изображение в окуляре 6 (рис.17), медленно удалять предметный столик от объектива до появления четкого изображения.

ВНИМАНИЕ! Не производите фокусировку, приближая образец к объективу и наблюдая при этом в окуляр. Вы можете раздавить образец или объектив, приведя их в соприкосновение.

7.3. Измерение отрезков объекта

Измерение производится при помощи винтового окулярного микрометра ZAK 15x, который содержит штриховую пластинку и винтовой микрометр. Порядок действий при измерении отрезков объекта следующий:

1) Определение цены деления для данного объектива.

Производится при помощи масштабной линейки. Способом, описанным в разд.6.2. производится фокусировка на масштабную линейку. Микрометрическим винтом измеряется соответствие интервалов шкалы винта и делений масштабной линейки (цена делений линейки указана на ее корпусе). Например, 0.1 мм соответствует 100 делений. Тогда цена деления окуляра составляет $0.1(\text{мм})/100=0.001$ (мм).

2) Измерение отрезков объекта.

Производится фокусировка на измеряемый объект и измерение требуемых деталей структуры в единицах окулярного микрометра. Полученное значение умножается на цену деления, полученную на шаге 1.

ПРИМЕЧАНИЕ: При смене объектива необходимо заново определить цену деления.

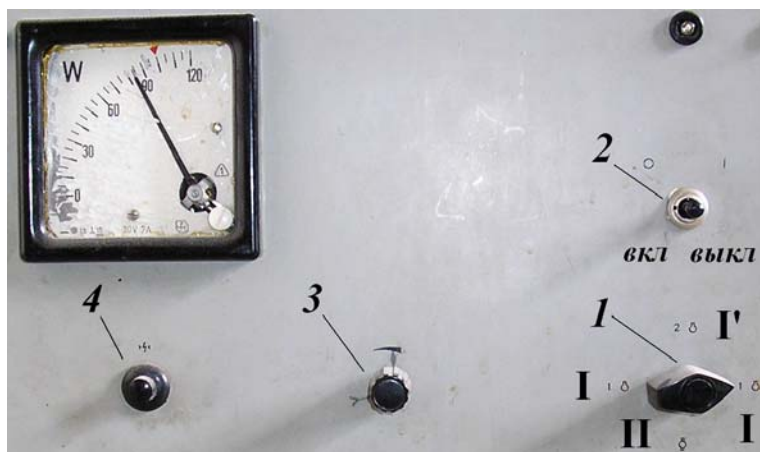


Рис.15. Панель управления микроскопа NU2E

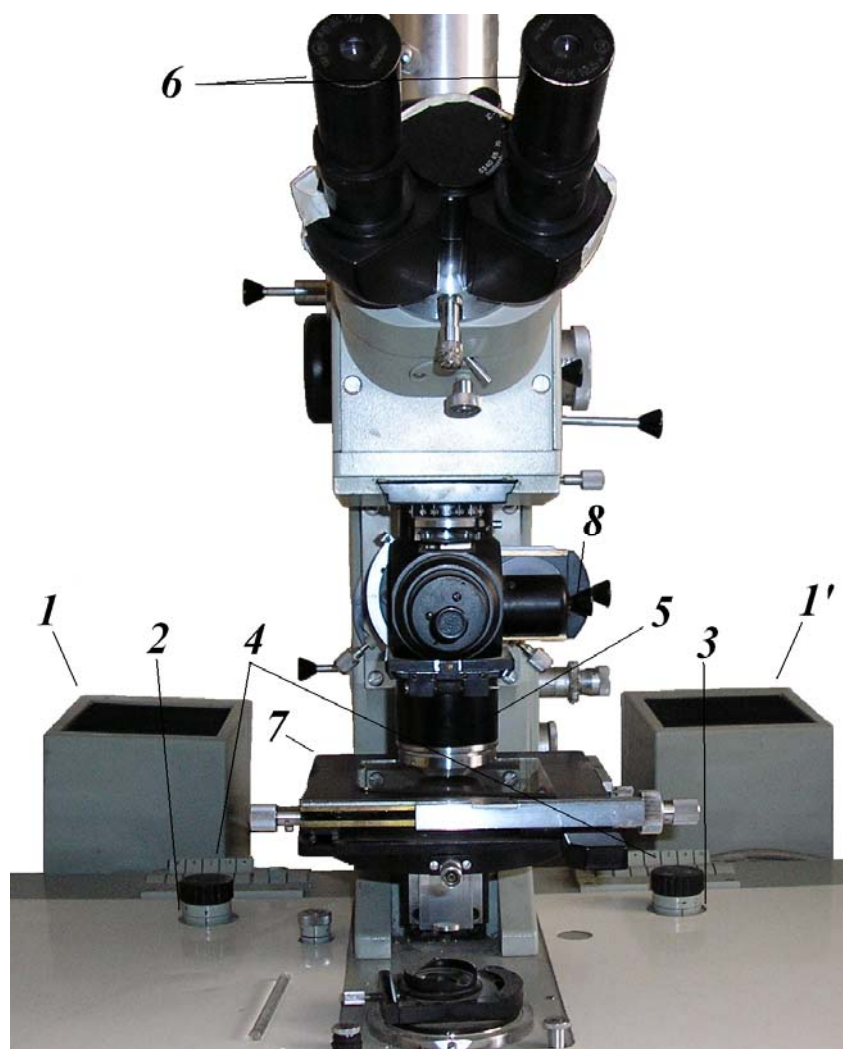


Рис.16. Микроскоп NU2E



Рис.17. Микроскоп NU2E

Лабораторная работа

Цель работы: определение ориентации пластин кремния по фигурам травления и определение плотности дислокаций металлографическим методом.

Задание №1.

При помощи микроскопа NU2E по форме фигур травления определить ориентацию пластин кремния, выданных преподавателем.

Замечание: в качестве осветителя использовать лампу накаливания.

Задание №2.

Определить ориентацию пластин кремния по положению базовых срезов;

Задание №3.

Определить плотность дислокаций на пластине кремния, выданной преподавателем. Для этого:

- выбрать наиболее подходящее увеличение микроскопа;
- подсчитать количество ямок травления в поле зрения;
- измерить диаметр видимого поля зрения;
- определить плотность дислокаций;
- повторить процедуру для 5 точек (1 – в центре пластины, 4 – по краям пластины).

Контрольные вопросы:

1. Что такое дефект по Френкелю и дефект по Шоттки?
2. Какой тип точечных дефектов преобладает в кремнии?
3. Что такое «равновесные дефекты»?
4. Являются ли дислокации равновесными дефектами?
5. Назовите основные типы дислокаций и их главные отличия.
6. Объясните принцип построения вектора Бюргерса.
7. Какой физический параметр дислокации характеризует вектор Бюргерса?
8. При каких условиях дислокация может начать движение?
9. Что такое «ростовые дислокации» и чем определяется их плотность?
10. Что такое преципитация?
11. К образованию каких дефектов приводит ионная имплантация?
12. Как влияют дислокации на зонную структуру кремния?
13. Как дислокации влияют на проводимость?
14. Какой тип решетки имеет кремний?
15. Изобразите основные кристаллографические плоскости в кремнии.
16. Какие фигуры травления соответствуют основным кристаллографическим плоскостям в кремнии?
17. Расшифруйте название марки кремния «КДБ-12».
18. Чем отличаются фигуры травления от ямок травления?
19. Чему равно увеличение микроскопа, если известны увеличения объектива и окуляра?
20. Каково максимальное увеличение в оптической микроскопии?
21. Что такое апертура и на какие характеристики микроскопа она влияет?
22. Назовите основные способы повышения разрешающей способности микроскопа.

23. Что такое глубина резкости?

24. Как при помощи микроскопа измерить изучаемый объект?

Литература:

1. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии / К. Рейви. – М.: Мир, 1984. – 472 с.
2. Павлов П.В. Физика твердого тела / П.В. Павлов, А.Ф. Хохлов.– М.: Высшая школа, 2000. – 493 с.
3. Физика твердого тела: лабораторный практикум. Т.1. Методы получения твердых тел и исследования их структуры / под ред. А.Ф.Хохлова. – Нижний Новгород, 2000. – 360 с.
4. Бублик В. Т. Методы исследования материалов и компонентов электронной техники: Учеб. пособие для практ. занятий студентам спец. 20.02 / В. Т. Бублик , А. Н. Дубровина.–М.: МИСИС, 1991. – 157 с.
5. Практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам / под ред. К.В.Шалимовой. – М.: «Высшая школа», 1968. – 463 с.
6. Технология СБИС. Т.1 / под. ред. С.Зи. – М.: «Мир», 1986. – 404 с.
7. Скворцов Г.Е. Микроскопы / Г.Е. Скворцов, В.А. Панов, Н.И. Поляков. – Л.:Машиностроение, 1969. – 510 с.

Содержание

1. Основные типы дефектов.....	3
1.1. Точечные (нульмерные) дефекты.....	3
1.2. Линейные дефекты (дислокации).....	4
2. Процессы дефектообразования в кремнии.....	8
2.1. Выращивание кристаллов.....	8
2.2. Окисление.....	10
2.3. Диффузия.....	10
2.4. Ионная имплантация.....	11
3. Влияние дефектов на электрические свойства полупроводников.....	12
3.1. Проводимость.....	14
4. Кремний.....	15
4.1. Кристаллическая структура.....	15
4.2. Основные марки.....	17
5. Выявление структурных дефектов кристалла металлографическим способом.....	19
6. Основы теории образования изображения в микроскопе.....	20
6.1. Принципиальная схема микроскопа.....	20
6.2. Разрешающая способность.....	21
6.3. Методы повышение разрешающей способности оптики.....	22
6.4. Глубина резкости изображения.....	23
6.5. Методы микроскопии с применением дополнительных оптических средств.....	23
7. Инструкция по работе с большим универсальным исследовательским микроскопом NU 2E.....	24
7.1. Включение прибора.....	24
7.2. Порядок работы.....	25
7.3. Измерение отрезков объекта.....	26

Лабораторная работа.....	28
Контрольные вопросы.....	30
Литература.....	31

Учебное издание

**МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ
ИЗУЧЕНИЕ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

Учебно-методическое пособие

Составители:

Битюцкая Лариса Александровна,
Богатиков Евгений Васильевич,
Шебанов Александр Николаевич

В авторской редакции

Подп. в печ. 13.12.2013. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 2,0. Тираж 25 экз. Заказ 1303.

Издательско-полиграфический центр
Воронежского государственного университета.
394000, г. Воронеж, пл. им. Ленина, 10. Тел. (факс): +7 (473) 259-80-26
<http://www.ppc.vsu.ru>; e-mail: pp_center@ppc.vsu.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии
Издательско-полиграфического центра
Воронежского государственного университета.
394000, г. Воронеж, ул. Пушкинская, 3. Тел. +7 (473) 220-41-33