

ЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых  
технологиях" при ФТИ им. А.Ф. Иоффе

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ  
МЕТОДОМ ВТОРИЧНО-ИОННОЙ МАСС-  
СПЕКТРОМЕТРИИ**

*Методические указания к лабораторным работам  
по диагностике материалов*

**Оглавление:**

Введение	3
Теория	3
Распыление	3
Параметры распыления	5
Разделение вторичных ионов по массам	7
Получаемая информация (виды анализа)	9
Качественный анализ	10
Количественный анализ.	10
Стандартные образцы.	13
Аппаратное оформление ВИМС	16
Прибор САМЕСА IMS-4F	17
Подготовка образцов к проведению измерений.	21
Контрольные вопросы	21

## Введение

При бомбардировке поверхности твердого тела пучком ускоренных частиц происходят различные процессы, приводящие, в частности, к эмиссии частиц различного вида: фотонов, электронов, нейтральных атомов, положительных и отрицательных ионов. Эмитированные частицы являются компонентами твердого тела и несут информацию о составе бомбардируемого образца.

Физическое явление, связанное с эмиссией ионизированных частиц образца и называемое вторичной ионной эмиссией (ВИЭ), лежит в основе метода вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС).

ВИМС – метод анализа состава и пространственного распределения элементов в твердых телах. ВИМС является одним из самых мощных аналитических методов. Метод универсален в отношении всех элементов периодической системы элементов, т.е. позволяет анализировать все элементы от водорода до урана. Важнейшим преимуществом ВИМС является сочетание низкого предела обнаружения примесей, достигающего  $10^{14}$  ат/см<sup>3</sup>, и малого объема анализируемой пробы (локальность). Благодаря наличию таких преимуществ ВИМС является основным методом исследования распределения легирующих атомов по толщине твердотельных, в том числе полупроводниковых, структур.

## Теория

### Распыление

Столкновение заряженной частицы (атома, молекулы или кластера) с твердым телом можно рассматривать в рамках классической нерелятивистской физики, так как скорости (энергии) частиц не столь велики, чтобы говорить об релятивистских эффектах.

При столкновении заряженной частицы с поверхностью твердого тела она проникает в него, постепенно передавая свою кинетическую энергию атомам мишени.

При столкновении первичной заряженной частицы с мишенью происходит передача энергии налетающей частицы атомам мишени, что приводит к выбиванию их из положений в кристаллической решетке образца. Те, в свою очередь, сталкиваются с соседними атомами мишени, передавая им часть полученной энергии и так же выбивая решеточные атомы из узлов решетки. В результате одна падающая заряженная частица образует каскад столкновений в

мишени. Причём, большинство столкновений в каскаде вызваны соударениями атомов мишени друг с другом, а не соударениями первичной частицы с ними. (Рис. 1.)

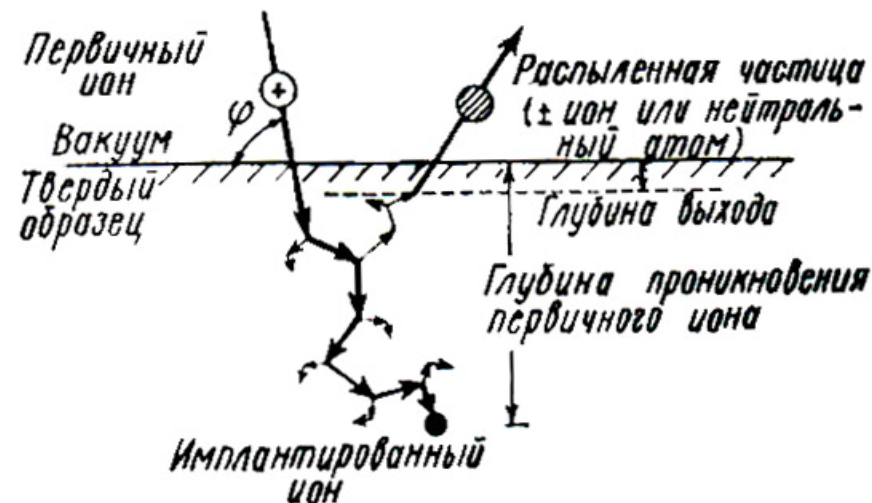


Рис. 1. Баллистический каскад столкновений.

Такой каскад называется баллистическим каскадом столкновений. Баллистический каскад затрагивает не все атомы мишени, попавшие в воображаемые границы каскада, а лишь несколько процентов атомов в «объеме» каскада.

Релаксация смещённых атомов ведет к тому, что часть выбитых из узлов атомов возвращается в узлы решетки. Поэтому вводится величина – пороговая энергия смещения: энергия, которую требуется сообщить атому, чтобы выбить его со своего места без возможности спонтанного возвращения на прежнее место. Эта энергия несколько больше энергии выбивания атома из своего положения в образце.

Распыление частиц из мишени происходит тогда, когда частица мишени получает необходимый импульс для преодоления энергии связи. Частицы покидают мишень из приповерхностного слоя, толщина которого определяется характеристиками баллистического каскада. Считают, что эмиссия из слоев решетки глубже третьего практически равна нулю.

Средняя кинетическая энергия выходящих частиц имеет величину около 10 эВ, но "хвост" распределения по энергиям простирается до одной тысячи электрон-вольт.

### Параметры распыления

Для описания процессов ионного распыления и ВИЭ и установления количественной взаимосвязи между их физическими характеристиками и характеристиками системы вводят ряд параметров.

Коэффициент распыления – количество выбитых (вторичных) частиц в расчёте на одну падающую (первичную) частицу.

$$Y_{tot} = \frac{J_s}{J_p} \quad (1)$$

где  $J_s$  – поток распыленных (вторичных) частиц;  $J_p$  – поток первичных частиц.

Этот коэффициент зависит от:

- кинетической энергии падающей частицы
- соотношения масс падающей частицы и атомов мишени
- угол падения первичной частицы
- природы и кристаллической структуры мишени и т.д.

Рассмотрим основные зависимости. Коэффициент распыления быстро растёт с ростом энергии падающей частицы, достигая максимума. Затем несколько спадает в связи с увеличением длины среднего пробега первичной частицы в мишени и, следовательно, более глубоким залеганием каскада инициируемого этой частицей. (Рис. 2.а).

Так же наблюдается сильная зависимость коэффициента ионного распыления от угла падения первичной частицы. Его максимум достигается при углах падения 60 - 70 градусов от нормали. (Рис. 2.б.)

Если необходимо определить количество выбитых частиц одного элемента одной первичной частицей, вводят парциальный коэффициент распыления:

$$Y_i = \frac{J_i}{J_p} \quad (2)$$

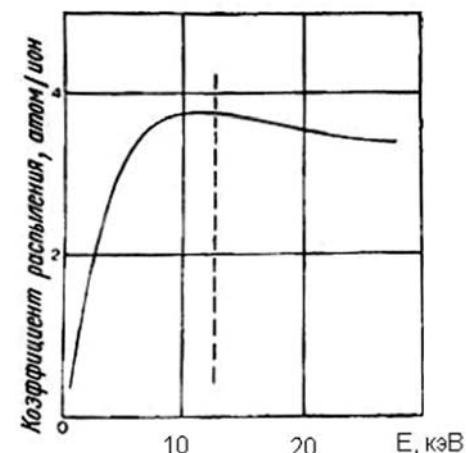


Рис. 2.а. Зависимость коэффициента распыления от энергии, падающей частицы

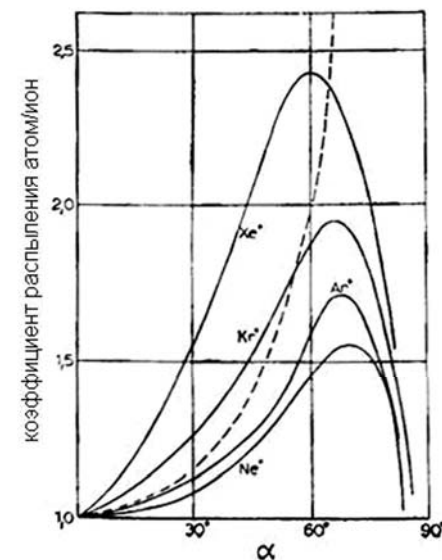


Рис. 2.б Зависимость коэффициента распыления от угла падающей частицы

Очевидно, что полный коэффициент распыления  $Y_{tot}$  будет суммой всех парциальных коэффициентов распыления:

$$Y_{tot} = \sum_{i=1}^n Y_i \quad (3)$$

Так как в методе ВИМС исследуются заряженные вторичные частицы, то вводится коэффициент ионизации – вероятность того, что выбитая частица при отлёте от поверхности мишени будет заряжена положительно или отрицательно.

Определение этого коэффициента представляет собой сложнейшую квантовомеханическую задачу, затрагивающую взаимодействие основных и возбуждённых состояний атома с электронными состояниями твёрдого тела и его поверхности. Кроме того, необходим учёт локального химического окружения в месте вылета вторичной частицы.

Выдвигались много различных гипотез об основных механизмах эмиссии ионов. Однако, явление оказалось столь сложным, что не построена даже полуколичественная теория, позволяющая рассчитать коэффициент ионизации положительных и отрицательных ионов для различных материалов.

### Разделение вторичных ионов по массам

Все ионизованные в процессе ионной бомбардировки фрагменты разделяются, в зависимости от отношения массы к заряду, в масс-спектрометре. Масс-спектрометры классифицируются по принципу, используемому для сепарации ионов. Кратко рассмотрим наиболее распространенные в приборах ВИМС – квадрупольные, времяпролетные и масс-анализаторы с секторным магнитом.

В магнитных масс-спектрометрах используют однородное магнитное поле. В источнике вторичных ионов под воздействием ускоряющего напряжения  $U$  ионы приобретают кинетическую энергию  $E = q \cdot U = \frac{1}{2} m \cdot V^2$ , где  $q$  – заряд иона,  $m$  – его масса,  $V$  – скорость. Отсюда

$$V = 2 \sqrt{\frac{Uq}{m}} \quad (4)$$

Ускоренные ионы попадают в масс-анализатор через входную щель  $S_1$  (см. Рис. 3.1), описывают траекторию радиуса  $r$ , фокусируются на

щель  $S_2$ . При этом, на ион действует центростремительная  $F_1 = HqV$ , где  $H$  – напряженность магнитного поля, и центробежная силы  $F_2 = \frac{mV^2}{r}$ .

Условием прохождения пучка ионов по траектории радиуса  $r$  является равенство центробежной и центростремительной сил  $HqV = \frac{mV^2}{r}$ , отсюда, учитывая (4):

$$H = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{2Um}{q}} \quad (5)$$

Таким образом, ион с массой  $m$  пройдет по заданной траектории радиуса  $r$  при определенном значении напряженности магнитного поля  $H$ .

В квадрупольных масс-спектрометрах разделение ионов осуществляется при прохождении ионного пучка вдоль оси между четырьмя параллельными стержнями, к которым одновременно приложено постоянное и переменное высокочастотное напряжение. (Рис. 3.2) Между стержнями создается поле с гиперболическим распределением потенциала. При фиксированных значениях частоты  $\omega$  и амплитуды  $U$  переменного поля только ионы с определенным значением  $m/q$  проходят через анализатор, попадая на коллектор ионов. При этом, выполняется соотношение

$$\frac{m}{q} = \frac{kU}{\omega^2} \quad (6)$$

где  $k$  – константа прибора.

Амплитуда колебаний ионов с другим отношением  $m/q$  нарастает по мере их движения между стержнями квадрупольного поля так, что эти ионы достигают стержней и нейтрализуются. Чтобы их зафиксировать, изменяют либо частоту, либо амплитуду высокочастотного переменного поля.

Во времяпролетном масс-спектрометре ионы очень короткими импульсами впрыскиваются в анализатор длиной  $L$ . Так как скорость ионов, имеющих разную массу, неодинакова, то и время пролета  $t$  через анализатор

$$t = L \sqrt{\frac{m}{2qU}} \quad (7)$$

определяется при постоянных  $L$  и  $U$  отношением  $m/q$ .

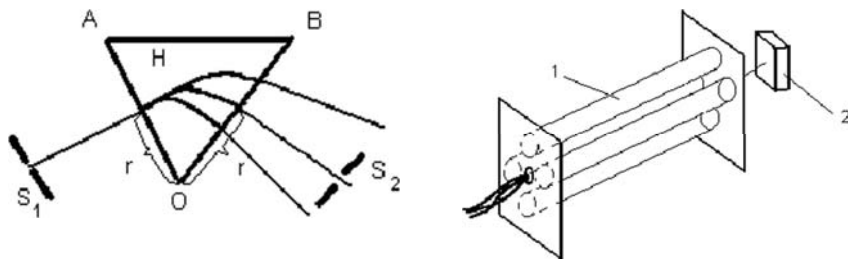


Рис. 3.1 Схема масс-спектрометра с магнитным масс-анализатором ( $OAB$  – масс-спектрометра: 1 - квадруполь; область однородного магнитного поля  $H$ ) 2 – коллектор ионов.

### Получаемая информация (виды анализа)

В зависимости от поставленной задачи исследования различают три вида информации, получаемой методом ВИМС.

Общий (валовый) анализ элементного состава образца, при котором записывается масс-спектр (зависимость интенсивности ионного тока от положения пика на шкале масс), характеризующий элементный состав мишени.

Послойный анализ – эрозионная способность первичного пучка используется для измерения концентрационных профилей: измеряется изменение интенсивности тока вторичных ионов данного отношения  $m/q$  в зависимости от времени распыления образца. Такая зависимость характеризует распределение примесей (или основных элементов) по глубине образца и позволяет контролировать процессы диффузии, ионной имплантации, эпитаксии и т.д.

Локальный анализ (режим ионных изображений) используется для определения топографии распределения элементов по поверхности образца.

### Качественный анализ

Элементный ВИМС анализ обычно получают в виде «развертки по массам», т. е. записи выходного тока детектора ионов в зависимости от параметра прибора, определяющего прохождение иона с заданным отношением  $m/q$  от источника до приёмника. Идентификация массовых пиков осуществляется с помощью таблиц массовых чисел, определяя отношения изотопов и сопоставляя измеренные отношения с таблицей естественных распространенностей изотопов.

Таким образом, расшифровав масс-спектр, мы получаем набор элементов, присутствующих в образце в виде основных компонентов и/или примесей. Следует заметить, что полученный результат будет объективен только для однородных по объему образцов.

### Количественный анализ.

Отсутствие адекватной теории вторично-ионной эмиссии, оставляет единственный путь проведения количественных измерений – использование образцов сравнения, в которых содержание элемента примеси надёжно установлено сертифицированными методами.

Пусть образец состоит из  $n$  элементов, атомная концентрация каждого из которых  $C_i^V$ ,  $i = 1 \dots n$  постоянна по всему объёму образца.

Полная концентрация атомов в образце  $C_{tot}^V$  будет:

$$C_{tot}^V = \sum_{i=1}^n C_i^V \quad (8)$$

До начала травления концентрация  $i$ -го элемента на поверхности образца не отличается от объёмной.

С началом травления под воздействием первичного пучка приповерхностные слои нарушаются, а фронт травления продвигается вглубь образца. Концентрация элементов и скорость травления в нарушенном слое меняются, пока через какое-то время  $t_{SS}$ , система не выйдет в стационарный режим распыления, которое характеризуется следующими важными свойствами:

- Скорость распыления  $v_{SS}$  постоянна и не меняется со временем.
- Профиль концентраций элементов в нарушенном слое сильно отличается от объёмного, так как помимо изменённой концентрации элементов образца присутствуют имплантированные первичные ионы

и адсорбированные на поверхности частицы из остаточной атмосферы.

▪ Структура нарушенного слоя не изменяется в процессе распыления, т.е. в каждый момент времени после перехода распыления в стационарный режим, его структура и характерная толщина  $d$  идентичны его структуре в любой последующий момент времени.

Рассмотрим два момента времени,  $t_1$  и  $t_2$ , в стационарном режиме распыления, т.е.  $t_{ss} < t_1 < t_2$  (см. Рис. 4.)

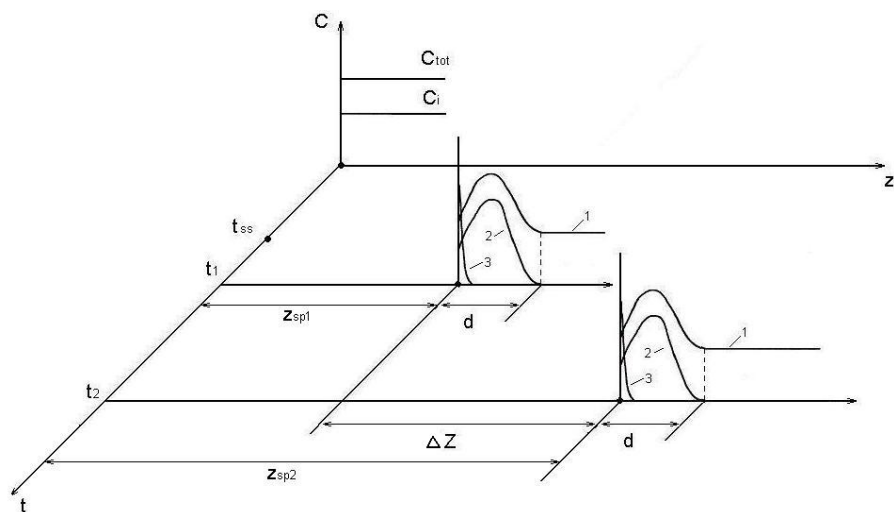


Рис. 4. Процесс травления образца: 1 – профиль концентрации  $C_i(z, t)$   $i$ -го элемента в процессе травления в момент времени  $t_1$  и  $t_2$ ; 2 – профиль концентрации имплантированных первичных ионов; 3 – профиль концентрации адсорбированных на поверхности частиц из остаточной атмосферы;  $d$  – характерная толщина нарушенного слоя.

За промежуток времени  $T = t_2 - t_1$  образец был стравлен на глубину  $\Delta Z$ , относительно положения в момент  $t_1$ . Поскольку нарушенный слой толщиной  $d$  транслировался без изменений, то очевидно, что потоки частиц распыляемого образца соответствовали концентрации этих элементов, содержащиеся в объеме образца. Другими словами, не смотря на то, что в каждый момент времени концентрация элементов

на травящейся поверхности отличается от изначальной, поток распыленных частиц соответствует объемной концентрации

$$\frac{J_i}{J_s} = \frac{C_i^V}{C_{tot}^V} \quad (9)$$

Именно этот факт дает возможность проведения количественного анализа, и определения значения объемной концентрации того или иного элемента. До момента установления стационарного режима травления происходят переходные процессы и получение количественной информации невозможно.

Нам интересны только те частицы образца, которые выходят заряженными положительно или отрицательно. Тогда их поток будет равен:

$$J_i^{ion} = J_i \beta_i^\pm \quad (10)$$

где  $\beta_i^\pm$  – коэффициент ионизации  $i$ -х частиц.

Но не все частицы достигают детектора, так как некоторые не проходят через ионно-оптическую систему прибора, энерго- и масс-анализаторы, и могут быть не зарегистрированы детектирующей системой.

Тогда поток вторичных частиц зарегистрированных детектором  $J_i^{reg}$  будет:

$$J_i^{reg} = J_i^{ion} \tau_i D_i = J_i \beta_i^\pm \tau_i D_i, \quad (11)$$

где  $\tau_i$  – трансмиссия – коэффициент пропускания оптической системы от поверхности образца до детектора;  $D_i$  – чувствительность детектора ионов.

С учетом (1) и (9) получаем из (11):

$$J_i^{reg} = J_p \frac{C_i^V}{C_{tot}^V} Y_{tot} \beta_i^\pm \tau_i D_i \quad (12)$$

В ВИМС - эксперименте непосредственно регистрируются токи частиц, поэтому получим:

$$I_i^{reg} = I_p \frac{C_i^V}{C_{tot}^V} Y_{tot} \beta_i^\pm \tau_i D_i \quad (13)$$

Это выражение, называется основной формулой для количественного анализа во вторично-ионной масс-спектрометрии.

В количественном анализе можно выделить 2 этапа расчёта, требующих дополнительных независимых измерений:

- Перевод полученного в зависимости от времени травления профиля, в координаты глубины.
- Перевод измеренных интенсивностей в концентрации определяемых компонентов.

Для определения скорости распыления образца осуществляют независимые измерения глубины кратера, образованного ионной бомбардировкой. Это можно осуществить, зная глубину полученного кратера, в предположении неизменности скорости распыления с глубиной отбора пробы. Её измеряют, используя профилометр или оптический интерференционный микроскоп. Погрешность измерения профилометра составляет 1%. Таким образом, скорость распыления есть измеренная глубина кратера, отнесенная ко времени записи профиля.

Для перевода аналитического сигнала в концентрацию определяемого элемента используют нормировку токов вторичных ионов на интенсивность элемента матрицы. Эта операция избавляет от влияния колебаний и дрейфа тока первичных частиц во времени.

Поскольку величина тока вторичных ионов пропорциональна вероятности ионизации вылетающих частиц, чувствительность метода существенно зависит как от природы химического элемента, так и от химического состава матрицы. В зависимости от химического состава матрицы изменение вероятности ионизации для одного и того же элемента, составляет  $\sim 10^3 - 10^6$  при анализе положительных ионов и  $\sim 10^1 - 10^4$  при анализе отрицательных. Этот эффект называется матричный эффект.

### Стандартные образцы.

Как упоминалось, влияние большого числа факторов, влияющих на вероятность ионизации эмитирующих частиц, не позволяет рассчитать концентрацию по измеренному сигналу из общих принципов. Поэтому количественный анализ при послойном анализе проводят с помощью образцов сравнения – стандартов. Т.к. в широком диапазоне концентраций (от 1 до  $10^{-8}$ % ат.) влияние примеси на химический состав матрицы пренебрежимо мало, ток вторичных ионов, образуемых атомами примеси, прямо пропорционален концентрации примеси. Для бинарной системы примесь – матрица отношение

ионных токов не зависит от тока первичного пучка и коэффициента распыления, тогда из (13) получаем:

$$\frac{I_I}{I_M} = \frac{C_I}{C_M} \frac{(\beta\tau D)_I}{(\beta\tau D)_M} \quad (14)$$

или:

$$C_I = \frac{I_I}{I_M} C_M \frac{(\beta\tau D)_I}{(\beta\tau D)_M} = \frac{I_I}{I_M} RSF \quad (15)$$

$$RSF = C_M \frac{(\beta\tau D)_I}{(\beta\tau D)_M} \quad (16)$$

где  $RSF$  – коэффициент относительной чувствительности. Как видно из (16) этот коэффициент имеет разное значение для каждой пары примесь – матрица, а так же зависит от параметров аналитической системы.

Для определения  $RSF$  используются эталонные образцы – образцы с близкой по составу к исследуемому образцу матрицей с заранее известной концентрацией исследуемого элемента.

К эталонам предъявляется ряд следующих требований:

- Однородность по поверхности
- Измерения параметров распределения примесей другими независимыми методами
- Широкий диапазон концентраций
- Информация о распределении концентрации по глубине

В настоящее время используются два типа стандартных образцов: однородно-легированные образцы и ионно-имплантированные образцы (Рис. 5). Последние имеют ряд специфических особенностей и преимуществ:

- Можно создать почти любую комбинацию компонентов примесь – матрица
- Возможность с достаточно малой погрешностью ( $\sim 10\%$ ) контролировать полное число введённых атомов примеси
- Можно создавать образцы с широким диапазоном концентраций
- Стандартный образец с имплантированной примесью позволяет получить в одном опыте градуировочную характеристику во всём диапазоне определяемых содержаний.

- По известной величине среднего проективного пробега возможна оценка скорости травления прямо в процессе профилирования
- По измеренному профилю распределения имплантированных атомов можно определить уровень фона, предел обнаружения и другие.

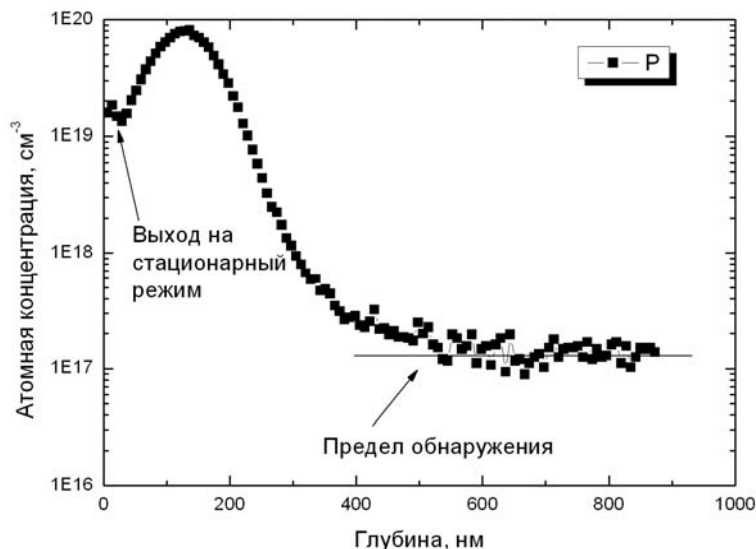


Рис. 5. ВИМС-профиль ионной имплантации P в Si с энергией имплантации 100 кэВ и дозой  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

Пределом обнаружения называют минимальную концентрацию элемента, уверенно определяемую в данном режиме анализа.

Переход к количественным измерениям с использованием ионно-имплантированного стандарта сводится к определению коэффициента пропорциональности между интенсивностью вторичных ионов и концентрацией примеси в соответствии с формулой

$$D = RSF \cdot \int_0^z \frac{I_{II}}{I_M} dz \quad (17)$$

где  $I_{II}$ ,  $I_M$  – интенсивности тока вторичных ионов примеси и матрицы соответственно;  $z$  – глубина залегания примеси,  $D$  – доза имплантации ( $\text{ат}/\text{см}^2$ ), которая задается при изготовлении эталона.

Зная коэффициент  $RSF$ , можно любое значение  $I_{II}(z)/I_M(z)$  сопоставить с величиной концентрации примеси.

### Аппаратное оформление ВИМС

Аппаратура ВИМС содержит три основных элемента (см. Рис. 6): источник первичных ионов с системой формирования (фокусировки) бомбардирующего пучка, камеру анализируемого объекта-мишени и масс-спектрометр, представляющий собой систему сбора, анализа и регистрации вторичных ионов.

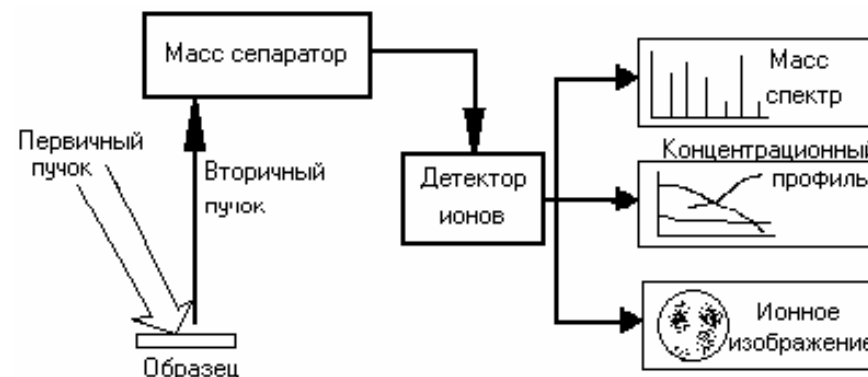


Рис. 6. Блок-схема масс-спектрометра вторичных ионов.

Прибор снабжается системой откачки для создания в ионопроводах высокого вакуума, электронными блоками и системой регистрации. Поддержание высокого вакуума в установке необходимо для предотвращения рассеяния анализируемых ионов на молекулах атмосферы остаточных газов, а так же для минимизации вклада адсорбированных атомов в поток вторичных частиц.

Пучок ионов из внешнего источника, системой электростатических линз и диафрагм формируется в пятно определённого диаметра на поверхности образца-мишени. Сфокусированный пучок определённого диаметра направляется на выбранную точку на



поверхности объекта. Первичные ионы данного сорта сепарируются из общего потока ионов первичного пучка, экстрагируемого из источника, с помощью системы со статическим секторным магнитным полем.

В масс-спектрометрах используют ионные пушки с ускоряющими напряжениями в диапазоне 1÷15 кэВ. С увеличением первичного напряжения повышается степень извлечения ионов и, соответственно, интенсивность тока зондирующего пучка.

Практика ВИМС анализа привела к необходимости установки двух источников ионов на приборах, а именно, плазменного источника газовых ионов – дуоплазматрона и источника ионов цезия, основанного на поверхностной ионизации паров цезия. В терминах работы выхода - пучок ионов кислорода, внедряясь в мишень, образует оксид в области эмиссии вторичных ионов, что повышает работу выхода и увеличивает вероятность ионизации положительных вторичных ионов. Внедрение в поверхность мишени атомов цезия напротив, понижают работу выхода, повышая выход отрицательных ионов. Таким образом, первичный пучок ионов кислорода используют для анализа электроположительных примесей (низкие потенциалы ионизации), цезиевый пучок позволяет получать низкие пределы обнаружения электроотрицательных элементов (с высоким сродством к электрону).

Сфокусированный пучок ионов любого сорта, разворачивается в растр со стороной квадрата от 0 (стационарный пучок) до 500 мкм, что позволяет достичь планарного травления, регулировать плотность тока, а значит и скорость распыления. Помещая в плоскость изображения диафрагму, дискриминирующую попадание в анализатор ионов с периферии кратера, добиваются минимизации "кратерного эффекта". В зависимости от поставленной задачи исследования различают три вида информации, получаемой методом ВИМС.

### Прибор CAMECA IMS-4F

Эксперимент проводится на приборе IMS-4F французской фирмы CAMECA (смотри Рис. 7). Прибор имеет два ионных источника: дуоплазматрон с холодным катодом и источник ионов цезия (источник с поверхностной ионизацией).

Дуоплазматрон с холодным катодом обладает наибольшей яркостью; он позволяет осуществлять зондирование мишени газовыми ионами, в том числе кислородом. В последнем случае на выходе могут быть получены как положительные, так и отрицательные ионы. Цезиевый источник обеспечивает ионный ток достаточно большой плотности и очень малого разброса ионов по энергиям (0.5 эВ).

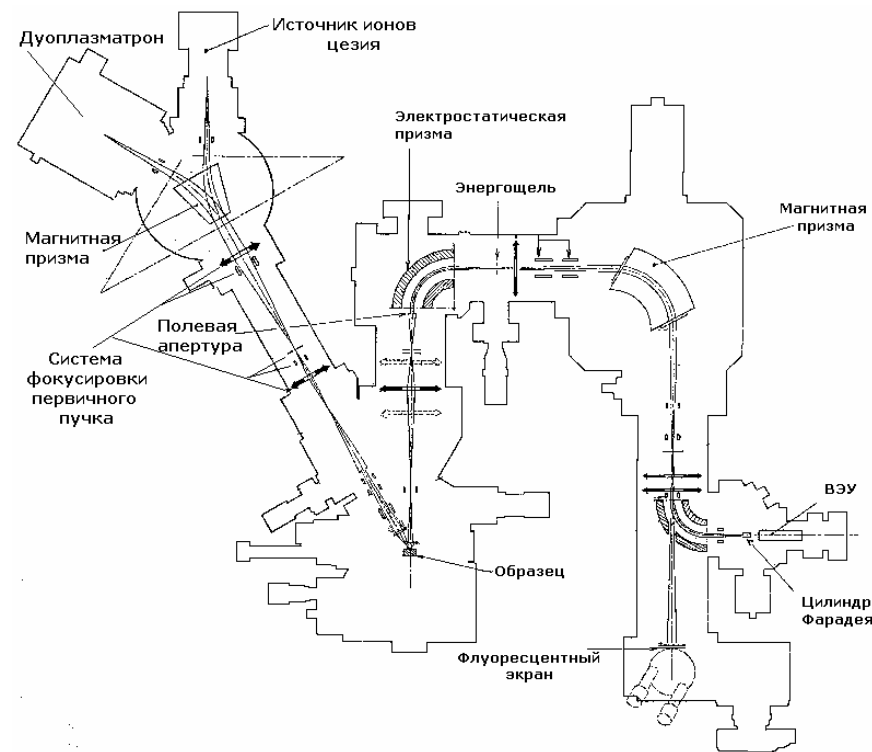


Рис. 7. Схема прибора Cameca IMS-4F

Система фокусировки первичных ионов содержит три линзы, отклоняющие системы для юстировки пучка, стигматор, диафрагмы и систему сканирования. Эта система позволяет получать пучки первичных ионов разного диаметра на мишени и, соответственно, разной интенсивности.

Сформированный трехлинзовой первичной оптической системой, пучок падает на мишень под углом около 42 градусов к нормали, если используется одноименная полярность первичных и вторичных ионов; и около 22 градусов в случае противоположной полярности.

Предоставление возможности варьировать напряжение, ускоряющее первичные ионы не случайно. С одной стороны, пучок ионов с большей энергией, получаемый из источника, имеет большую яркость, лучше поддается фокусировке. Это приводит к уменьшению кратерного эффекта. Суть последнего состоит в том, что вклад во вторичный пучок вносится, так же частицами, перераспыленными со стенок кратера травления, что приводит к искажению концентрационного профиля. (Рис. 8.)

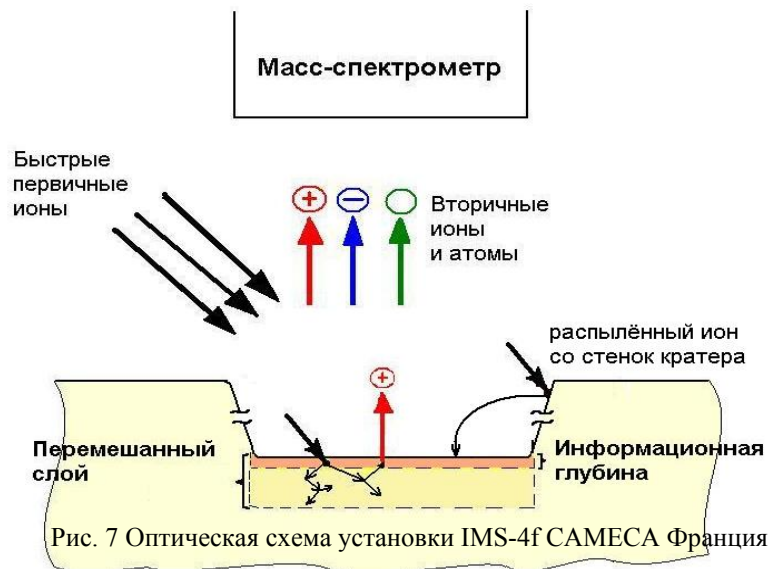


Рис. 8. Кратерный эффект

С другой стороны – увеличение энергии бомбардирующих ионов увеличивает глубину каскада столкновений, а значит, и толщину перемешанного слоя. Это приводит к ухудшению послойного разрешения. Этот показатель характеризуется уширением профиля резкой границы раздела двух различных слоёв в полупроводниковой структуре, т.е. степень отличия зависимости аналитического сигнала от времени (глубины) ионного травления от истинного распределения элементов и их концентраций в образце.

На мишень подается вторичное ускоряющее напряжение, придающее ионам энергию, необходимую для прохождения через оптическую систему и последующего анализа.

Первым элементом оптики вторичных ионов является иммерсионная линза, собирающая и фокусирующая вторичные ионы. Далее следуют три линзы, составляющие оптику переноса, которые обеспечивают получение различных размеров кроссовера, т.е. различного увеличения в плоскости входной диафрагмы – т. н. полевой апертуры. Последняя играет роль оптического ограничителя поля зрения, т.е. пропускает только те ионы, которые эмитируются из центра кратера, ограниченного диаметром апертуры.

Расположенная далее электростатическая призма сепарирует в пространстве ионы по начальным энергиям, и, стоящая за ней, энергощель выделяет из спектра определенную полосу пропускания вторичных ионов заданной ширины (до 130 эВ).

Перенос изображения и фокусировку в ахроматической плоскости магнитной призмы осуществляют с помощью спектрометрической линзы. Стигматическая магнитная призма обеспечивает фокусировку по отношению массы к заряду ионов определенного типа на выходную щель, образуя мнимое изображение. Превращение его в действительное производится двоянной электростатической проекционной линзой.

Отклоняющей системой это изображение направляется на микроканальную пластину, за которой расположен флуоресцентный экран, либо на приемники ионов – цилиндр Фарадея или ВЭУ.

Вся вторичная оптика работает в одном из двух режимов, определяющихся знаком заряда (полярностью) вторичных ионов.

Режим анализа выбирается с учетом эмиссионных свойств анализируемых ионов. Очевидно, что элементы с меньшим ионизационным потенциалом теряют электрон и приобретают заряд

со знаком «+» с большей вероятностью, чем более электроотрицательные элементы. И наоборот.

Одной из характеристик анализатора является масс-спектральное разрешение  $M/\Delta M$ , которое регулируется ширинами входной и выходной щелей и приводит к изменению ширины массового пика на спектре. Повышение масс-спектрального разрешения позволяет разделить изобарные массовые пики (например пики вторичных ионов  $^{31}\text{P}$  и  $^{30}\text{Si}^1\text{H}$ ). Однако при этом уменьшается коэффициент пропускания ионно-оптического тракта анализатора, т.е. снижается чувствительность определения элемента.

### **Подготовка образцов к проведению измерений.**

Образцам, предназначенным на ВИМС анализ, выдвигаются следующие требования:

1. Наличие плоской поверхности. (желательно зеркально плоской).
2. Размер не должен превышать 24 мм по максимальному измерению. Не желателен размер меньше, чем 2 x 2 мм – в этом случае монтаж образцов сильно затруднен.

При возможности образцам придают оптимальную форму и размер с помощью победитового или алмазного резца или скальпеля.

Подготовленный образец, в месте с необходимыми эталонами монтируются в держатель согласно инструкции.

### **Контрольные вопросы**

Дайте определения следующим терминам:

- стационарный режим;
- матричный эффект;
- кратерный эффект;
- предел обнаружения;
- послышное разрешение;
- масс-спектральное разрешение.