



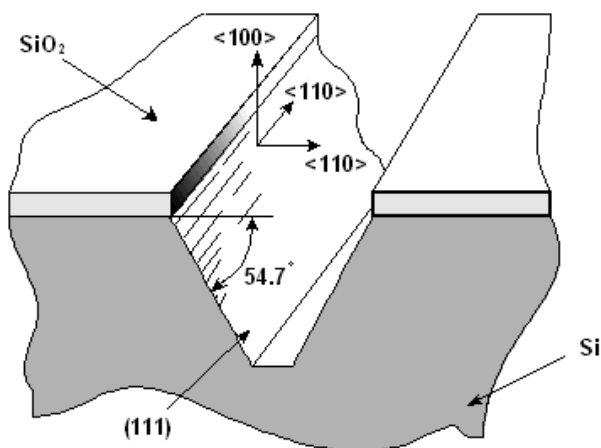
Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Интеллектуальные системы»

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СЕНСОРНЫХ СТРУКТУР

Лабораторные работы



Минск 2009

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Интеллектуальные системы»

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
И ТЕХНОЛОГИЯ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
СЕНСОРНЫХ СТРУКТУР

Лабораторные работы для студентов специальности
1-55 01 02 «Интегральные сенсорные системы»

Минск 2009

УДК 004.925+004.94+681.586 (076.5)

ББК 32.97я7

М 34

Составители:

А.В. Сергейченко, А.А. Шевченко

Рецензенты:

В.В. Баркалин, В.В. Нелаяев

М 34 Материаловедение и технология тонкопленочных сенсорных структур: лабораторные работы для студентов специальности 1-55 01 02 «Интегральные сенсорные системы» / сост.: А.В. Сергейченко, А.А. Шевченко. – Минск: БНТУ, 2009. – 80 с.

ISBN 978-985-525-200-0.

Курс лабораторных работ имеет своей целью сформировать у студентов теоретические знания по материаловедению сенсорных структур; обучить математическому расчету и компьютерному моделированию процессов микропрофилирования полупроводниковых материалов; обучить компьютерному моделированию микроантилеверов с помощью программного комплекса ANSYS 5.7ED. Выполнение работ позволит студентам лучше разобраться в принципах микропрофилирования. Все этапы моделирования содержат подробное описание выполняемых операций, что позволит выполнять работу самостоятельно.

Курс предназначен студентам специальности 1-55 01 02 «Интегральные сенсорные системы» и рассчитан на 17 часов занятий в компьютерной лаборатории сенсорных систем.

УДК 004.925+004.94+681.586 (076.5)

ББК 32.97я7

ISBN 978-985-525-200-0

© БНТУ, 2009

ТЕХНОЛОГИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МЭМС, ПОЛУЧАЕМЫХ МИКРОПРОФИЛИРОВАНИЕМ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Цель работы: изучить процессы планарной технологии монокристаллического кремния; рассчитать геометрию элементов микроэлектромеханических систем (МЭМС); изучить программный пакет моделирования технологии микрообработки полупроводниковых материалов ACES и провести моделирование процессов микропрофилирования монокристаллического кремния.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Анизотропия свойств монокристаллических полупроводниковых материалов

Традиционно монокристаллический кремний используется в микроэлектронике для производства микросхем и других полупроводниковых приборов, а также для изготовления микросенсоров и элементов МЭМС [1]. В технологических процессах их производства применяются различные способы обработки: жидкостное и сухое микропрофилирование, с использованием маскирующих покрытий и без них [2].

С появлением и развитием МЭМС кремний, по причине своих уникальных физических характеристик, стал широко применяться для изготовления чувствительных элементов микросенсоров, исполнительных элементов микроактюаторов и т.д.

Кристаллическая решетка кремния относится к структуре типа алмаза и обладает анизотропией. Элементарная ячейка такой решетки представляет собой куб (рис. 1.1). Атомы расположены по вершинам куба, в центрах его граней и в центрах его четырех несмежных октантов. Каждый атом кристалла находится в центре правильного тетраэдра и окружен четырьмя атомами.

Основным свойством кристаллической решетки является ее трансляционная симметрия, характеризуемая тремя базисными векторами. Это значит, что при смещении всего кристалла на вектор решетки совместится сама с собой.

$$\mathbf{a}_n = n_1 \mathbf{a}_1 + n_2 \mathbf{a}_2 + n_3 \mathbf{a}_3,$$

где \mathbf{a}_1 , \mathbf{a}_2 , и \mathbf{a}_3 – базисные векторы;
 n_1 , n_2 , и n_3 – любые целые числа.

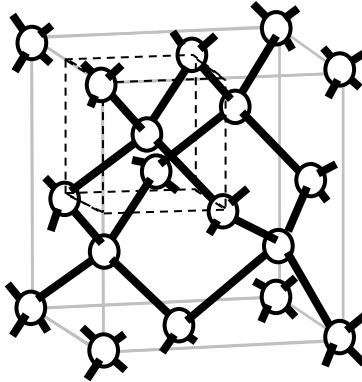


Рис. 1.1. Элементарная ячейка кристаллической структуры кремния

Сказанное также относится и к любой физической величине, однозначно определяемой расположением атомов в объеме: электростатическому потенциалу, электронной плотности и т. д. Таким образом, монокристаллический кремний обладает зависимостью свойств от направления в кристалле, т. е. анизотропией.

Анизотропия свойств полупроводниковых материалов имеет большое значение в технологии изготовления интегральных схем и МЭМС. В прямой зависимости от анизотропии находятся электронные свойства планарных приборов, плотность их упаковки на подложке, а изготовление некоторых типов МЭМС стало возможным лишь благодаря зависимости скоростей травления полупроводникового материала от ориентации в кристалле.

Присущая кристаллам анизотропия требует при измерении физических свойств принимать во внимание направления, в которых определены значения величин.

Если заданы три базисных вектора, то положение узла решетки характеризуется началом координат и радиусом-вектором

$$\mathbf{r}_{n_1 n_2 n_3} = n_1 \mathbf{a}_1 + n_2 \mathbf{a}_2 + n_3 \mathbf{a}_3,$$

определяющим положение данного узла по отношению к началу координат. Группы атомов, в свою очередь, определяют плоскости. Кристаллической плоскостью является любая плоскость, проходящая через какие-либо три узла кристалла.

Определить положение кристаллической плоскости или семейства плоскостей можно следующим образом. Если за оси координат выбрать положения базисных векторов, образующих базисную ячейку, то каждую плоскость можно характеризовать отрезками, отсекаемыми этой плоскостью на осях. Если нас интересует не одна конкретная плоскость, а совокупность параллельных плоскостей, то необходимо брать не абсолютные значения, а отношения этих отрезков, т.к. они остаются постоянными для всех параллельных плоскостей. При этом принято брать отношение трех наименьших целых чисел.

Для обозначения же кристаллических плоскостей используются числа, обратные указанным и называемые индексами Миллера. Объясняется это двумя причинами:

1. Для плоскости, параллельной одной из осей и отсекающей, например, равные отрезки на двух других, отношение отрезков было бы $1 : 1 : \infty$, миллеровские же индексы будут $1 : 1 : 0$ (рис. 1.2), что намного удобнее.

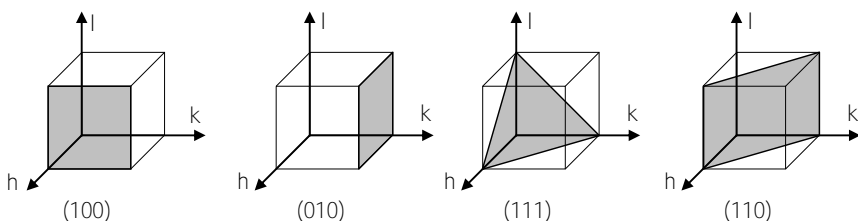


Рис. 1.2. Плоскости кубического кристалла и соответствующие им индексы Миллера

2. Величина, обратная отрезкам, отсекаемым на осях в прямом пространстве, определяет точку в обратном пространстве. Таким образом, система плоскостей в прямом пространстве характеризуется точкой (или соответствующим вектором) в обратном. Это основная и наиболее важная причина.

Обычно индексы Миллера для граней (плоскостей) заключаются в круглые скобки (hkl). Направление, соответствующее определенной

грани, в кубических кристаллах перпендикулярно ее плоскости, и его индексы записываются обычно в квадратных скобках $[hkl]$. На рис. 1.3 отражен принцип определения индексов Миллера.

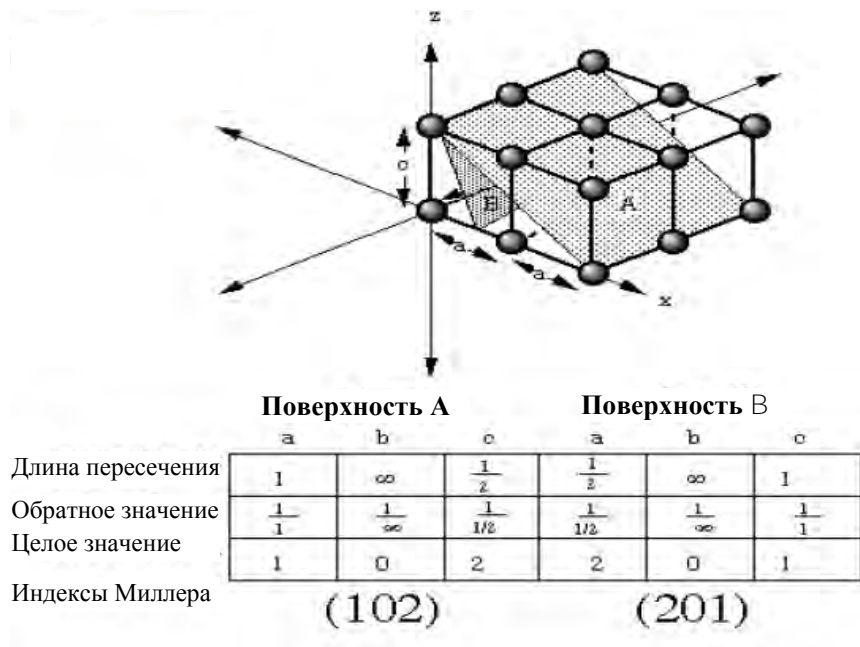


Рис. 1.3. Правило определения индексов Миллера

Для определения индексов Миллера необходимо выполнить следующие операции:

1. Определить пересечения поверхности (плоскости) вдоль каждого из трех кристаллографических направлений.
2. Для каждой точки пересечения определить число, обратное ее численному значению.
3. Если результат дробный, умножить каждое число на знаменатель меньшей дроби.

Определение ориентации и типа проводимости полупроводниковых пластин

Монокристаллический кремний, используемый при изготовлении как интегральных микросхем, так и МЭМС, выпускается промышленностью в виде пластин определенного диаметра, толщины, типа проводимости, а также ориентации. Для нахождения указанных параметров на пластинах выполняются базовый и второстепенные срезы. На рис. 1.4 приведены изображения основных видов срезов.



P – базовый срез (primary); S – второстепенный срез (secondary)

Рис. 1.4. Основные виды срезов:

P – базовый (Primary) срез, ориентированный (secondary) и ориентации кремниевых пластин

Второстепенных срезов может быть несколько. Их выполняют для возможности определения типономинала пластин.

Базовый срез в пластинах с ориентацией поверхности (100) и (110) всегда расположен параллельно направлению [110].

Методы микропрофилирования монокристаллического кремния

При производстве устройств МЭМС из монокристаллического кремния используются различные методы формирования трехмерных структур [3, 4]: жидкостное анизотропное, жидкостное изотропное, реактивное ионное, химическое газовое, электрохимическое травление, ионно-лучевой и лазерный методы, а также ультразвуковая размерная обработка и обработка электроэрозионная.

Наиболее часто из указанных методов применяются три: жидкостное анизотропное, жидкостное изотропное и реактивное ионное травление.

Жидкостное травление монокристаллического кремния

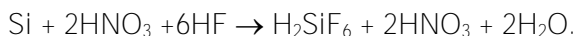
Жидкостное (химическое) травление, т. е. саморастворение кремния, протекает по электрохимическим законам, складываясь из сопряженных катодных и анодных реакций.

Основными катодными реакциями на кремнии являются выделение водорода и восстановление молекул окислителей.

Анодные и катодные реакции при химическом травлении кремния протекают одновременно. Они идут на микроанодах и микрокатадах, разделенных пространственно на поверхности кремния.

Изотропное химическое травление

Процесс изотропного травления проходит в две стадии: окисление кремния и последующее травление окисла. В смеси плавиковой и азотной кислот в общем виде происходит следующая реакция:



Азотная кислота окисляет Si до SiO_2 , а плавиковая кислота растворяет образовавшийся окисел. Процесс травления происходит с одинаковой скоростью во всех кристаллографических направлениях.

К факторам, влияющим на скорость травления и профиль фигур травления относятся состав травителя, температура процесса, наличие/отсутствие перемешивания, наличие дефектов в материале полупроводника и др. На рис. 1.5 представлены профили фигур активированного и неактивированного перемешиванием изотропного травления кремния.

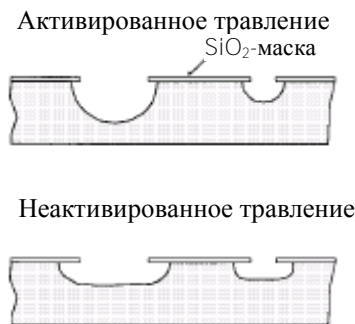


Рис. 1.5. Профили изотропного травления кремния

Анизотропное химическое травление

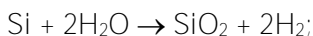
Существует несколько составов анизотропных травителей монокристаллического кремния, обладающих общим свойством – травление кремниевого кристалла в направлениях [100] и [110] происходит с более высокой скоростью, чем в направлении [111]. В большинстве случаев анизотропные травители представляют собой многокомпонентные растворы, состоящие из окислителя, который окисляет кремний до гидратированной двуокиси и комплексообразователя, предназначенного для того, чтобы в реакции с гидратированной двуокисью кремния образовывать растворимый комплексный ион и воду.

В качестве анизотропных травителей используются следующие системы:

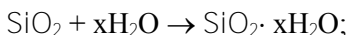
- гидразин – вода (гидразингидрат) : $N_2 - H_2O$;
- гидразин – изопропиловый спирт – вода: $N_2 - C_3H_7OH - H_2O$;
- этилендиамин – пирокатехин – вода (EDP): $NH_4(CH_2)_2NH_2 - 3C_6H_4(OH)_2 - H_2O$;
- гидроксид калия – вода : $KOH - H_2O$;
- гидроксид калия – изопропиловый спирт – вода: $KOH - C_3H_7OH - H_2O$.

В этих травителях этилендиамин, гидразин и гидроксид калия выполняют роль окислителя, а пирокатехин и изопропиловый спирты – комплексных агентов. Вода выполняет функцию катализатора в снабжении избытком ионов OH^- для этапа окисления. Процесс травления в щелочных травителях происходит в три стадии (на примере травления в KOH):

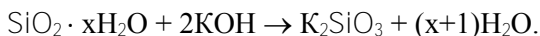
1. окислительно-восстановительная



2. гидратация оксида



3. растворение гидратированного оксида



Процесс травления монокристалла может быть представлен как поэтапное удаление атомных слоев с его поверхности. Пример профилей анизотропного травления приведен на рис. 1.6.

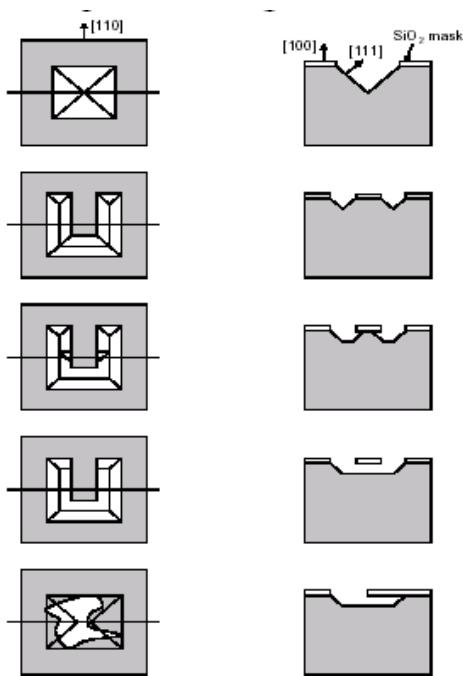
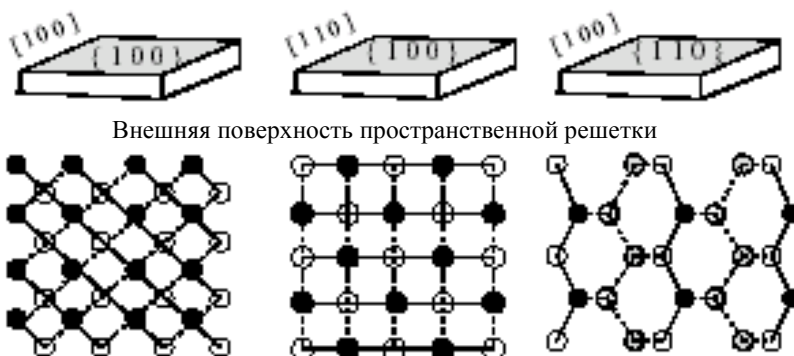


Рис. 1.6. Форма профилей анизотропного травления монокристаллического кремния

Особенностью анизотропного травления монокристаллического кремния является то, что в разных кристаллографических направлениях скорость удаления атомных слоев с поверхности травления неодинакова. Это объясняется различной плотностью упаковки атомов в разных кристаллографических плоскостях а также различным характером их связи между собой и внутренними атомами объема кристалла (рис. 1.7). Наибольшая плотность упаковки атомов в плоскости (111), наименьшая – в (100). В соответствии с этим наименьшую скорость травления во всех травителях имеет плоскость (111).



Внешняя поверхность пространственной решетки

Рис. 1.7. Зависимость упаковки атомов кремния от кристаллографических направлений для пластин с ориентацией поверхности (100) и (110)

В отличие от изотропного травления при анизотропном помимо состава травителя, температуры и времени травления на форму получаемых фигур травления влияют ориентация поверхности исходной пластины монокристаллического кремния, форма маски (для формирования лунок или мезаструктур), ориентация маски на поверхности пластины.

Анизотропное травление Si (100)

Плоскость (100) является единственной из главных плоскостей, при пересечении которой плоскостями (110), (111), (100) и (211) образуются фигуры с прямоугольной симметрией. Плоскость (100) пересекается четырьмя плоскостями (111) под углом $54,74^\circ$. При ориентации сторон окна травления вдоль направления [110] или перпендикулярно к нему получают фигуры травления пирамидальной формы с боковыми стенками, ограниченными плоскостями (111), и дном, ограниченным плоскостью (100). При длительном травлении плоскости (111) сходятся, образуя V-образную канавку (рис. 1.8). При этом процесс травления самоостанавливается. Окончательная глубина V-образной канавки определяется размером окна травления на поверхности пластины d и пропорциональна его наименьшей стороне a :

$$d = a\sqrt{2}.$$

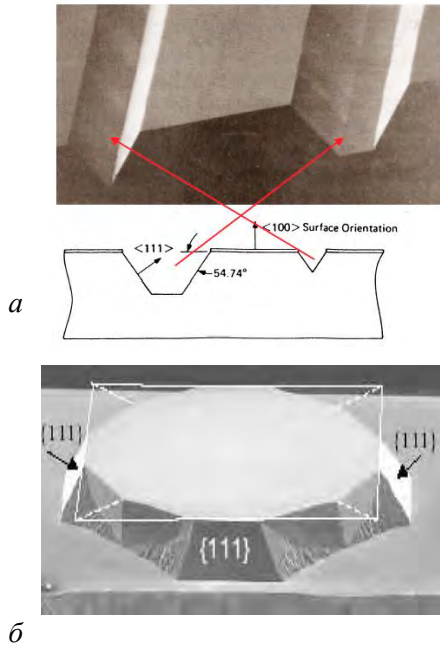


Рис. 1.8. Канавки (а) и мезаструктуры (б), получаемые при анизотропном травлении пластин ориентации (100)

Профиль фигуры травления зависит от ориентации рисунка маски на плоскости (100). Для получения фигур травления с вертикальными стенками прямолинейные стороны маски необходимо ориентировать под углом в 45° относительно направления $[110]$ (рис. 1.9).

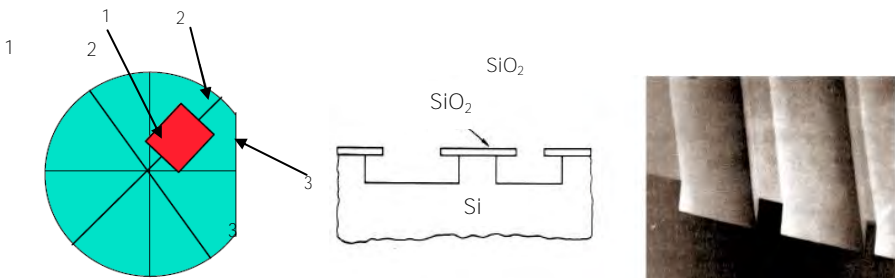


Рис. 1.9. Ориентация маски травления на пластине с ориентацией (100) для получения вертикального профиля травления:
1 – маска; 2 – пластина (100); 3 – базовый срез (вдоль направления $[110]$)

Анизотропное травление Si (110)

Пластина кремния с ориентацией (110) пересекается шестью (111) плоскостями. Из них четыре перпендикулярны к поверхности (110): плоскости (1 $\bar{1}\bar{1}$) и ($\bar{1}\bar{1}1$) перпендикулярны к поверхности (110) и пересекаются между собой под углом 109,48°. Плоскости ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$) и (11 $\bar{1}$) пересекают поверхность (110) под углом 35,26° и внутри лунки травления под углом 109,48°. Форма вытравливаемой лунки зависит от величины окна в защитной маске и времени травления. Получаемый поперечный рельеф называют U-канавкой. Для ее формирования окно в маске ориентируют вдоль следа плоскости (111) или под углом 70,53°.

Процесс травления самоостанавливается, как в случае образования V-канавки, когда U-канавка ограничивается шестью (111) плоскостями: четырьмя вертикальными и двумя наклонными.

Глубина самоограничивающейся U-канавки определяется выражением

$$d = \frac{a + b\sqrt{2}}{2\sqrt{6}},$$

где a и b – ширина и длина окна травления соответственно.

Для прогнозирования форм фигур получаемых при травлении областей различной конфигурации, используют круговые диаграммы скоростей травления (рис. 1.10). На них в полярных координатах отложены скорости травления кремния в зависимости от ориентации вектора травления на поверхности пластины.

Разориентация маски на поверхности пластины относительно кристаллографических направлений приводит к искажению фигур травления и снижению степени интеграции. Точно определить направления расположения плоскостей в пластине можно несколькими методами: рентгенографически, по фигурам травления расплавленным металлом, по фигурам травления анизотропным травителем (KOH, NaOH). Достигаемая точность ориентации данными методами составляет 1–2 мин угловой дуги.

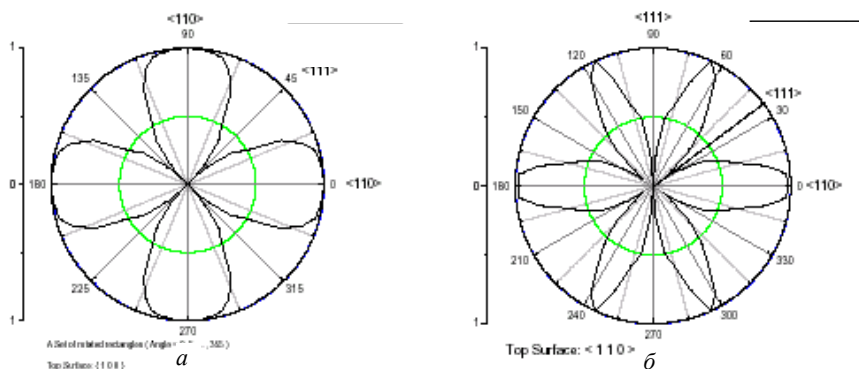


Рис. 1.10. ^(a)Соотношение скоростей травления монокристаллического кремния в зависимости от ориентации на пластине:
^(b)
 а) – пластина(100); б) – пластина (110)

Реактивное ионное травление (RIE - Reactive ion etching)

Ионное травление отличается универсальностью и может быть применено для обработки практически любых материалов [6], например, для травления многослойных структур с «несовместимыми» с точки зрения химической обработки свойствами слоев. Важной характеристикой ионного травления является отсутствие бокового подтравливания (рис. 1.11).

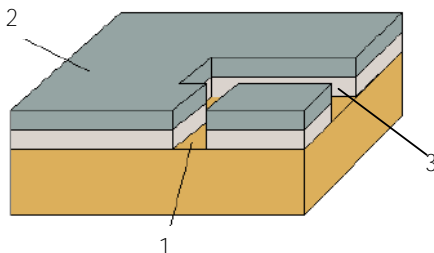
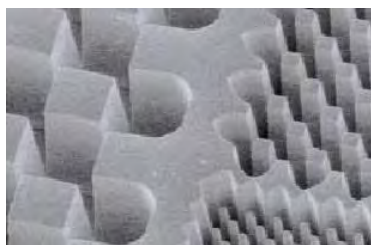


Рис. 1.11. Профили, получаемые ионным травлением:
 1 – лунка травления; 2 – маска; 3 – протравленный слой

Удаление атомных слоев с поверхности при ионном травлении происходит за счет бомбардировки положительными ионами, энергия которых должна превышать энергию связи атомов обрабатываемого

вещества. Для двуокиси кремния, например, последняя составляет 20 эВ. В результате скорости ионного травления самых различных веществ мало отличаются и находятся в диапазоне сотен ангстрем в минуту.

Для бомбардировки используются ионы инертных газов, поступающие из области тлеющего разряда перпендикулярно поверхности пластины. На скорость ионного травления влияют следующие факторы: подводимая мощность, частота прикладываемого напряжения, давление инертного газа, наличие примесей в подводимых газах, температура подложки.

В качестве маскирующего покрытия при ионном травлении чаще всего используется фоторезист.

Материалы маскирующих покрытий

В качестве маскирующих покрытий при различных видах микропрофилирования используются слои диоксида кремния (SiO_2) и нитрида кремния (Si_3N_4), фоторезист. Могут использоваться также пленки некоторых металлов (Al, Ag, Au, Cr и др.). Стоп-слоем при жидкостном анизотропном травлении монокристаллического кремния могут служить слои и области с высокой концентрацией бора. При концентрации бора $7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ кремний характеризуется p -типом проводимости и имеет скорость травления в KOH практически равную нулю.

Оксид кремния является наиболее часто используемым материалом для создания защитных маскирующих и функциональных покрытий при изготовлении МЭМС. Наиболее часто слои SiO_2 формируются термическим окислением кремниевой подложки (рис. 1.12). Процесс окисления осуществляется в атмосфере сухого кислорода или водяного пара в кварцевых печах при температуре 900–1200 °С.

Поскольку скорость травления двуокиси кремния в самом распространенном анизотропном травителе, которым является система гидроокись калия – вода, имеет хоть и малую, но конечную величину, важно рассчитать минимальную толщину защитного слоя окисла, достаточного для предохранения поверхности кремния от травления. Скорость травления пленки SiO_2 , так же как и кремния, зависит как от концентрации KOH, так и от температуры раствора (рис. 1.13). Исходя из соотношения скоростей травления Si и SiO_2 , можно рас-

считать оптимальную «безопасную» толщину маскирующей пленки для травления монокристаллического кремния на заданную глубину.

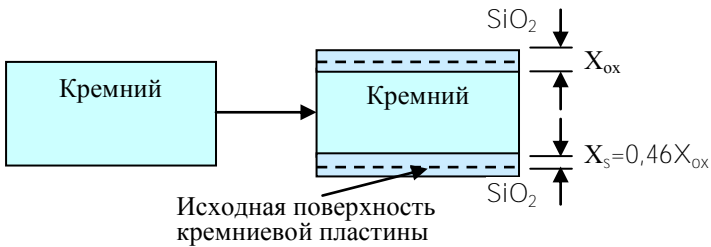
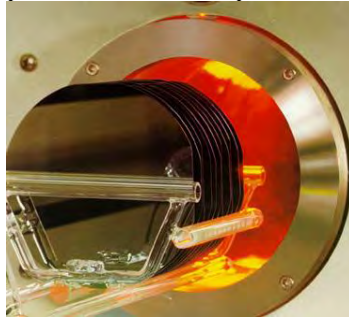


Рис. 1.12. Термическое окисление кремниевой пластины:

X_{ox} – толщина сформированного оксида;

X_s – толщина слоя кремниевой пластины, перешедшего в оксид

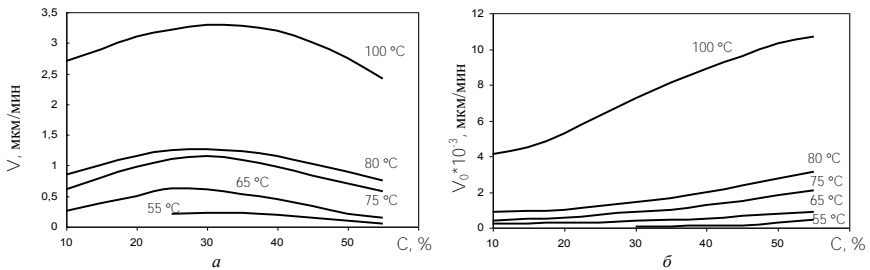


Рисунок 13 - Зависимости скорости травления кремния (100) (а) и диоксида кремния (б) от концентрации травителя и температуры для водных растворов КОН

Ионное легирование

В технологии кремниевых МЭМС ионное легирование играет очень важную роль. В отличие от технологии интегральных микросхем, где данный процесс предназначен лишь для создания $p-n$ -переходов, при изготовлении МЭМС он приобретает значительно большее значение. Сформированные в кремниевой пластине локальные области с различной концентрацией примесей обладают различными физико-химическими свойствами, что позволяет создавать сложные трехмерные структуры. На рис. 14 приведены результаты моделирования распространения легирующей примеси в кремниевой пластине.

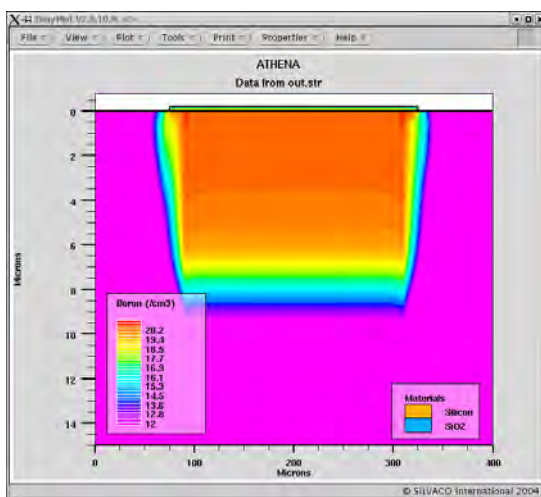


Рис. 1.14. Профиль распределения примеси бора при легировании из окисной пленки

«Побочные» эффекты, появляющиеся в $p-n$ -переходах при протекании через них электрического тока в случае МЭМС приобретают практическое применение. Например, эффект разогрева $p-n$ -перехода используется для контролируемого нагрева чувствительных элементов некоторых сенсоров.

Для легирования полупроводниковых структур вначале формируются источники примесей в самой пластине либо вблизи ее границы. Затем подложка нагревается до температуры порядка 1100 °С и выдерживается в течение необходимого времени. В результате примесь диффундирует на определенную глубину в подложку. Глубина

диффузии зависит от таких параметров, как исходная концентрация в источнике, тип примеси, температура и длительность процесса диффузии, и может составлять от долей до единиц микрометра.

Фотолитография

Фотолитография является основой всех процессов изготовления МЭМС. Процесс фотолитографии состоит из нескольких операций:

- нанесение пленки фоторезиста;
- сушка и задубливание пленки фоторезиста;
- экспонирование через фотошаблон (локальное воздействие ультрафиолетовым светом на пленку фоторезиста);
- травление пленки фоторезиста;
- операции со слоями, лежащими под пленкой фоторезиста;
- снятие пленки фоторезиста.

Фоторезисты – вязкие полимеры, бывают двух типов: позитивные и негативные. В позитивных фоторезистах под воздействием ультрафиолета их полимерные цепочки разрушаются, что приводит к удалению засвеченных областей на операции травления. В негативных фоторезистах наоборот – воздействие ультрафиолетовых лучей приводит к сшиванию полимерных цепочек (рис. 1.15).

Нанесение фоторезиста на подложку обычно осуществляется на центрифуге. Возможно также нанесение путем окунания. Однако последний метод используется гораздо реже.

Для формирования рисунка вначале в пленке фоторезиста, а затем и в ниже лежащих слоях используются фотошаблоны. Они представляют собой стекла с высокой плоскопараллельностью поверхностей, на одной стороне которых из хрома или оксида железа сформирован тонкопленочный рисунок.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Моделирование процессов микропрофилирования монокристаллического кремния с помощью программы ACES

Программный пакет ACES (Anisotropic Crystalline Etching Simulation) предназначен для моделирования трехмерных объектов, образуемых микропрофилированием монокристаллических полупроводниковых материалов. Позволяет моделировать процессы:

- анизотропного жидкостного травления;
- изотропного жидкостного травления;

- реактивного ионного травления;
- ионного легирования бором;
- пассивации (создания пленки SiO_2).

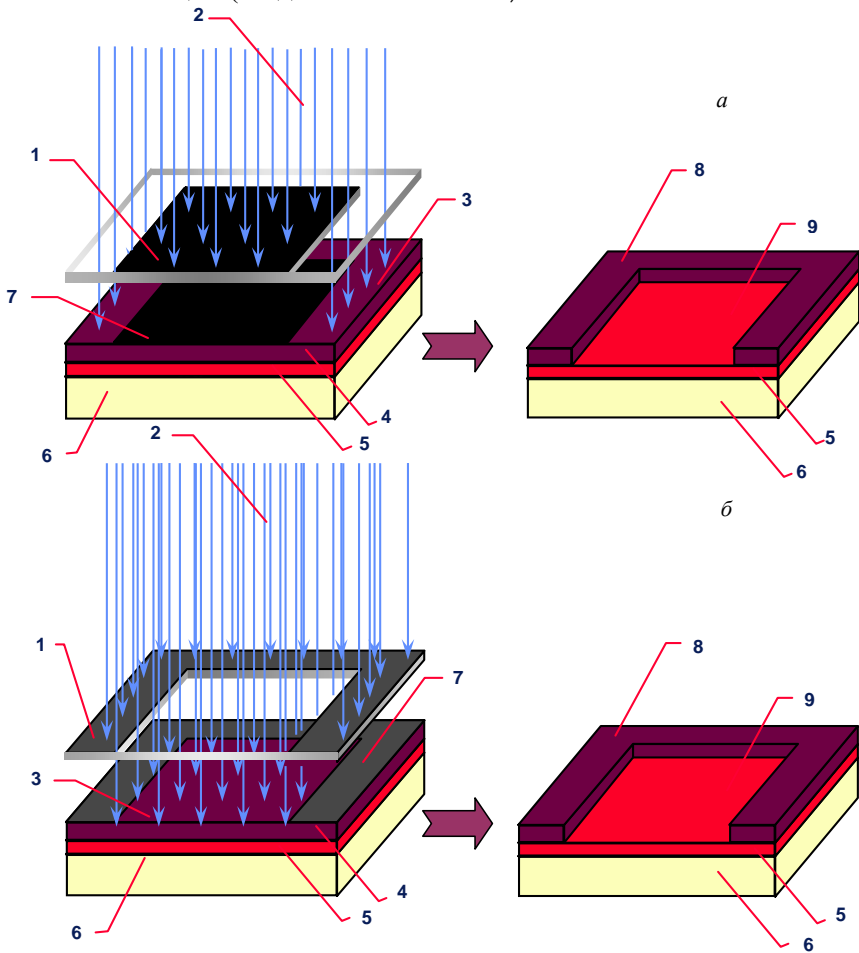


Рис. 1.15. Схема процесса фотолитографии:

a – негативный фоторезист; *б* – позитивный фоторезист;

1 – островок хрома на стекле; 2 – ультрафиолетовый свет;

3 – освещенная область фоторезиста; 4 – фоторезист; 5 – оксид;

6 – кремниевая пластина; 7 – неосвещенный фоторезист; 8 – островок; 9 – окно

Моделирование базируется на статической клеточной автоматической модели (Cellular Automata Model) связи атомов. В этой модели учитываются расположение атомов в кристаллической решетке относительно друг друга и характер связей между ними. При проведении процессов травления атомы выборочно удаляются согласно статусу их соседей.

Последовательность действий при моделировании в программе ACES

Шаг 1. В меню «Пуск» запускается приложение «ACES beta 2».

Шаг 2. В появившемся окне выбирается опция «Simulation Wizard» → ОК.

Шаг 3. Выбор формы маски

Select an Existing Mask File → папка «Masks» → папка «100×100» → выбирается файл изображения маски → Открыть → Далее.

Замечание! Выбирается путь к папке «Masks», скопированной в рабочую папку.

Шаг 4. Выбор ориентации поверхности полупроводниковой пластины и базового направления на ее поверхности

В окне «Orientation» выбирается Surface: (100), Edge: [110] → Далее.

Шаг 5. Выбор типа травителя

Select your etchant from database: KOH (1,4 um/min) → Далее

Замечание! Помимо анизотропных (**KOH**, EDP) может быть выбран изотропный травитель (Iso Etch).

Шаг 6. Выбор типа полупроводникового материала и продолжительности времени травления

Process → Silicon Wet Etching;

Process Time → 5 min → Готово.

Замечание! Помимо жидкостного травления кремния могут быть выбраны операции пассивации (Passivation), реактивного ионного травления (RIE), ионного легирования (Boron Doping).

Шаг 7. Запуск симулятора и моделирование процесса анизотропного травления

Start Process.

Шаг 8. Продолжение процесса травления с достигнутого момента

Chain Proc.

Шаг 9. Получение изображения фигуры травления относительно маски травления

Disp → Show Mask (Mask Color – выбор цвета изображения маски).

Шаг 10. Просмотр результатов моделирования

View → Rotate (вращение фигуры травления), Scaling (изменение размера изображения).

Шаг 11. Измерение рельефа фигуры травления

В рабочем окне необходимо перейти на закладку «Disp». В разделе «Display Mode» выбираем пункт «Measure Mode». В разделе «Cross Section» выбираем одно из направлений (X, Y, Z) и, перемещая движок, определяем геометрические размеры фигуры травления (цифра – результат измерения фигуры травления вдоль рассматриваемого направления).

Шаг 12. Сохранение изображения фигуры травления

Главное меню → Output → Copy View.

Шаг 13. Наблюдение процесса травления в режиме анимации

Главное меню → Output → Save Simulation to Video → Step Range → устанавливается численное значение времени травления.

Замечание! Параметры и условия травления, а также вид маски травления можно изменять непосредственно из окна «Simu» или при помощи мастера установок (**Главное меню** → Simulation → Simu Wizard).

Создание собственной маски травления

Меню → Simulation → Simu.Wizard → Draw a New Mask & Save to File – по умолчанию открывается графический редактор «Paint». В данном редакторе в меню Рисунок выбираем подменю «Атрибуты». В появившемся окне устанавливаем размеры маски травления (рекомендуемые размеры не более 300×300 пикселей). Один пиксель будет соответствовать одному микрону при моделировании травления. Палитра выбирается черно-белая. После нажатия «ОК» переходим к непосредственному созданию собственной маски травления. Графическими инструментами Paint создается маска. Рисунок маски сохраняется в своей рабочей папке. В дальнейшем при выборе маски указывается путь, по которому рисунок был сохранен.

Задание на лабораторную работу

1. Изучить теорию микропрофилирования монокристаллического кремния.
2. Изучить работу пакета ACES.
3. Провести моделирование процессов микропрофилирования в пакете ACES.
4. В соответствии с требованиями к содержанию отчета о лабораторной работе получить изображения фигур травления.
5. Рассчитать геометрию фигур травления (размеры масок травления) в соответствии с вариантом задания. Численные значения для расчета приведены в табл. 1.1. Основные формулы для расчета приведены в табл. 1.2.
6. Рассчитать толщину маскирующей пленки SiO_2 , необходимую для получения фигуры травления, в соответствии с вариантом задания (по окончании травления толщина окисла должна составлять не менее 0,08 мкм; скорость травления SiO_2 принять равной $1 \cdot 10^{-3}$ мкм/мин).
7. Смоделировать процесс формирования мембранного сенсора с высоколегированным островком с обратной стороны мембраны.
8. Составить отчет о лабораторной работе.

Теоретический расчет геометрии элемента МЭМС, выполненного анизотропным травлением монокристаллического кремния

Общие условия

Анизотропное травление осуществляется в 30%-м растворе КОН при температуре 75 °С.

При изотропном травлении скорость подтравливания под маску равна скорости травления вглубь. Скорость изотропного травления кремния принять равной 5 мкм/мин.

При реактивном ионном травлении величина подтравливания под маску равна нулю. Скорость травления кремния и оксида кремния при этом принять равной 0,05 мкм/мин.

Варианты заданий

Вариант 1. Рассчитать радиус маски травления круглой формы для сквозного травления кремниевой пластины. Отверстие квадратной формы в пластине с обратной стороны должно иметь сторону

квадрата $b = 50$ мкм. Толщина исходной пластины 380 мкм. Пластина с ориентацией поверхности (100). Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 2. Рассчитать размеры маски травления прямоугольной формы для получения диэлектрической мембраны прямоугольной формы размерами 360×500 мкм на обратной стороне пластины. Толщина исходной пластины 380 мкм. Пластина с ориентацией поверхности (100). Маска ориентирована короткой стороной вдоль направления [110]. Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 3. Определить толщину кремниевой мембраны. Маска травления квадратной формы со стороной 2000 мкм. Время травления 1,5 ч. Пластина с ориентацией поверхности (100). Маска ориентирована вдоль направления [110]. Толщина исходной пластины 380 мкм. Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 4. Рассчитать размеры фигуры травления и толщину образующейся мембраны. Маска травления – ромб с диагональю 500 мкм. Диагональ ромба ориентирована вдоль направления [110]. Время травления 50 мин. Толщина исходной пластины 380 мкм. Пластина с ориентацией поверхности (100). Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 5. Определить форму и глубину лунки травления. Исходная пластина с ориентацией поверхности (100). Маска круглой формы радиусом 150 мкм. Время травления 70 мин. Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 6. Определить размер угловой компенсации « α », необходимой для получения мезаструктуры с прямыми углами, если время травления составляет 20 мин. Пластина с ориентацией поверхности (100). Маска ориентирована вдоль направления [110]. Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 7. Определить время травления, необходимое для получения мезаструктуры с прямыми углами, если размер угловой компенсации $x = 100$ мкм. Пластина с ориентацией поверхности (100). Маска ориентирована вдоль направления [110]. Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 8. Рассчитать окончательную глубину U-образной канавки травления. Маска травления прямоугольной формы со сторонами $a = 250$ мкм и $b = 680$ мкм. Пластина с ориентацией поверхнос-

ти (110). Маска ориентирована длинной стороной вдоль следа плоскости [111]. Рассчитать время травления. Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 9. Рассчитать окончательную глубину и размер сторон канавки травления на поверхности пластины. Маска травления – эллипс с размерами вдоль осей $x = 560$ мкм и $y = 320$ мкм. Ось x ориентирована вдоль направления [110]. Пластина с ориентацией поверхности (100). Рассчитать время травления. Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 10. Рассчитать толщину кремниевой пластины, остающейся после двустороннего анизотропного травления. Пластина с ориентацией поверхности (110). Толщина исходной пластины 400 мкм. Маски травления прямоугольной формы со сторонами $a = 100$ мкм и $b = 200$ мкм ориентированы короткой стороной вдоль следа плоскости [111]. Процесс травления прекращается в момент образования U-образных канавок. Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 11. Определить глубину и геометрические размеры фигуры травления на поверхности пластины. Маска травления прямоугольной формы размером 30×200 мкм ориентирована длинной стороной под углом 45° по отношению к направлению [110]. Исходная пластина с ориентацией поверхности (100). Время травления 10 мин. Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 12. Определить шаг между центрами масок травления круглой формы, если расстояние между фигурами травления на поверхности пластины должно составлять 100 мкм. Радиус маски равен 50 мкм. Время травления составляет 180 мин. Исходная пластина с ориентацией поверхности (100). Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 13. Определить размер стороны маски травления прямоугольной формы для получения отверстия по центру толщины пластины размером 180×180 мкм при двустороннем травлении. Исходная пластина с ориентацией поверхности (100) и толщиной 512 мкм. Маска одной из сторон ориентирована вдоль направления [110]. Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 14. Определить размер угловой компенсации χ для получения мезаструктуры с прямыми углами, если мембрана, образуемая в процессе травления и на которой расположена мезаструктура,

имеет толщину 20 мкм. Исходная пластина с ориентацией поверхности (100) и толщиной 200 мкм. Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 15. Рассчитать шаг расположения элементов на фотошаблоне при условии, что лунки травления глубиной 120 мкм формируются путем *изотропного* травления. Расстояние между краями лунок травления должно составлять 300 мкм. Размеры элементов составляют 500×1200 мкм. Исходная пластина с ориентацией поверхности (100).

Вариант 16. Кремниевая пластина покрыта пленкой оксида кремния. В пленке сформированы два окна прямоугольной формы размером 30×500 мкм, расположенные параллельно друг другу на расстоянии 50 мкм. Через окна осуществляется *изотропное* травление кремния. Определить время момента отрыва кремния от обратной стороны оксидной пленки.

Вариант 17. Рассчитать полное время формирования элементов сенсорной структуры в кремниевой пластине ориентации (100). Вначале осуществляется *реактивное ионное* травление пленки оксида кремния толщиной 0,5 мкм. Затем – *изотропное* травление кремния на глубину 5 мкм. Результирующее глубокое травление кремния осуществляется в щелочном травителе на глубину 210 мкм.

Вариант 18. Рассчитать окончательную глубину и размер сторон канавки травления на поверхности пластины. Маска травления – шестиугольник с размером внешнего радиуса 220 мкм. Пластина с ориентацией поверхности (100). Рассчитать время травления. Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 19. Определить форму и рассчитать размеры маски травления, необходимой для сквозного травления кремниевой пластины толщиной 200 мкм с условием, что на обратной стороне пластины в итоге формируется прямоугольное отверстие со стороной 50 мкм. Пластина с ориентацией поверхности (100). Рассчитать время травления. Микропрофилирование осуществляется химическим *анизотропным* травлением в КОН.

Вариант 20. Рассчитать полное время формирования элементов сенсорной структуры в кремниевой пластине ориентации (100) и габаритные размеры микропрофиля. Вначале осуществляется *реактивное ионное* травление пленки оксида кремния толщиной 0,5 мкм. Затем –

реактивное ионное травление кремния на глубину 10 мкм. В заключение проводится *изотропное* травление кремния в течение 1 мин.

Таблица 1.1

Численные значения величин для расчета параметров анизотропного травления

Обозначение	R_{100}	R_{110}	R_{111}	R_{100}^T	R_{110}^T	R_n	R_α	R_β
Значение, мкм/мин	3,1	4,5	0,007	2,5	3,5	5,2	4,7	4

Обозначения к табл.1.1:

R_{100} – скорость травления плоскости (100);

R_{110} – скорость травления плоскости (110);

R_{111} – скорость травления плоскости (111);

R_{100}^T – скорость травления боковой грани, образованной плоскостью (100), пересекающей пластины (100) и (110) по направлениям [100];

R_{110}^T – скорость травления боковой грани, образованной плоскостью (110), пересекающей пластину (110) по направлениям [100];

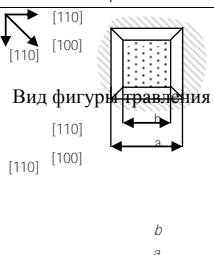

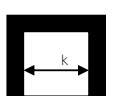
R_n – скорость травления плоскости, ориентированной на пластине (100) вдоль направления [110];

R_α – скорость стравливания вершины прямого угла на плоскости (100), стороны которого ориентированы по направлениям [100];

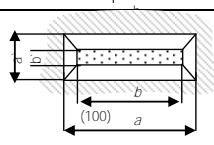
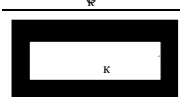
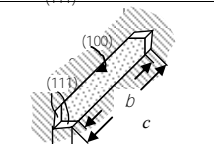
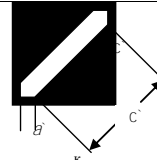
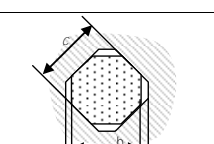
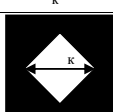
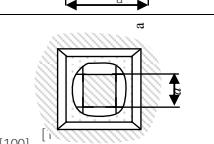
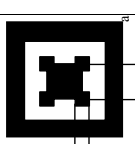
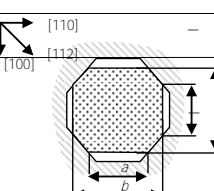
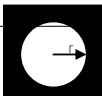
R_β – скорость травления плоскости, ориентированной на пластине (110) вдоль направления [112].

Таблица 1.2

Зависимости и выражения для расчета процесса анизотропного травления монокристаллического кремния

Вид фигуры травления	Поверхность	Форма маски на поверхности пластины	Формулы для расчета
1 	2 (100) Поверхность (100)	3 1.1 	4 $b = a - 1.41h$ $r = 0.5b - (1.22 \frac{R_{111}}{R_{100}} - 0.71) \cdot h$ Формулы для расчета
		1.2 	$b = a - 1.41h$ $k = b - (2.45 \frac{R_{111}}{R_{100}} - 1.41) \cdot h$ $r = 0.5b - (1.22 \frac{R_{111}}{R_{100}} - 0.71)h$ b (см. 1.1)

(100) 2. $k = b - (2.45 \frac{R_{111}}{R_{100}} - 1.41)h$
к (см. 1.1)
к, к' (см. 1.2)
Б (см. 1.1)

1 	2 (100) (100)	3 2 	4 к, к' (см. 1.2) $b = c - 2.0 \cdot h$ $a = a - \sqrt{2} \cdot h \cdot \frac{R_{100}^T}{R_{100}}$
1 	(100) (100)	3 	$b = c - 2.0h$ $c = c - 3.46 \cdot h \cdot \frac{R_{111}}{R_{100}}$ $a = a - \sqrt{2}h \cdot \frac{R_{100}^T}{R_{100}}$ $c \in [c - 3.46h \cdot \frac{R_{111}}{R_{100}}]$ к (см. 1.2);
1 	(100) (100)	4 	$c = b$; b (см. 1.1) к (см. 1.2);
1 	(100) (110)	5 	$x = \sqrt{2} \cdot R_{\alpha} \frac{h}{R_{100}}$ $x_r = \sqrt{0.97} R_{\alpha} \frac{h}{R_{100}}$ $m = 1.93b - (3.47 \frac{R_{111}}{R_{100}} + 6.7)h$
1 	(110)	6 	$r_{\bar{a}} = 2[0.97b - (1.42 \frac{R_{100}^T}{R_{100}} + 0.94)h]$ $m = 1.93b - (3.47 \frac{R_{111}}{R_{100}} + 6.7)h$ $l = 0.31b + (1.73 \frac{R_{110}}{R_{100}} - 2.0 \frac{R_{100}^T}{R_{100}} + 2.02)h$ $a = 2[0.97b - (1.42 \frac{R_{100}^T}{R_{100}} + 0.94)h]$ $l = 0.31b + (1.73 \frac{R_{111}}{R_{100}} - 2.0 \frac{R_{100}^T}{R_{100}} + 2.02)h$

Обозначение к табл. 1.2:

h – глубина, на которую проводится травление

Последовательность действий при моделировании мембранного сенсора с высоколегированным островком с обратной стороны мембраны

Общая последовательность технологических операций:

1. Ионное легирование.
2. Пассивация.
3. Анизотропное жидкостное травление.

Шаг 1. Выбор маски для процесса ионного легирования

Mask File → **Рабочая папка** → Masks → 100x100 → hole_square_100x100.bmp → **Открыть**.

Шаг 2. Выбор типа ориентации пластины

Orientation → FACE: (100), EDGE: [110].

Шаг 3. Выбор технологического процесса легирования

Process → Boron Doping.

Шаг 4. Выбор времени легирования

Proc. Time → 15 Minute.

Замечание! Поля «Etchant» и «Mask Size» остаются по умолчанию.

Шаг 5. Процесс легирования

Кнопку «Start Process» необходимо нажать один раз!

Замечание! При повороте модели на обратной стороне будет видна область распространения примеси бора.

Шаг 6. Выбор маски для процесса пассивации

Mask File → **Рабочая папка** → Masks → 100x100 → Passivation → **Открыть**.

Шаг 7. Выбор технологического процесса пассивации

Process → Passivation

Шаг 8. Процесс пассивации

Нажимается кнопка Chain Proc!

Шаг 9. Выбор технологического процесса жидкостного анизотропного травления

Process → Silicon Wet Etching.

Шаг 10. Выбор типа травителя

Etchant → KOH (30%).

Шаг 11. Выбор маски для процесса жидкостного анизотропного травления

Над изображением маски для процесса пассивации устанавливается «птичка» в пункте «Negative Mask»!

Шаг 12. Процесс травления

Кнопку «Chain Proc» необходимо нажимать до момента формирования пирамидальной лунки травления!

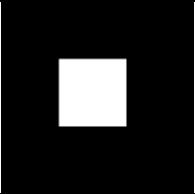
Замечание! Наблюдать процесс формирования мембранного сенсора можно «в профиль». Для этого необходимо перейти к закладке «Disp». В разделе «Display Mode» выбираем пункт «2) Cut View Mode». **Автоматически** появится изображение сечения структуры вдоль оси Y .

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ


1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Изображения фигур травления монокристаллического кремния с ориентацией поверхностей (100) и (110), отражающие зависимость скоростей травления от ориентации на пластине (использовать маску spoke_146x148; процесс травления в течение 15 мин).
4. Изображения фигур микропрофилирования кремния с ориентацией поверхности (100), полученных различными методами микропрофилирования для трех различных масок (табл. 1.3). Время травления для каждого процесса составляет 15 мин. Напротив каждой фигуры указать максимальные размеры микропрофиля.
5. Изображения фигур микропрофилирования в соответствии с пунктом 4, полученные для негативных, по отношению к исходным, масок.
6. Изображения фигур микропрофилирования, полученных при использовании собственной маски.
7. Результаты, оформлены в виде таблицы (см. форму табл. 1.3).
8. Изображения полученной модели мембранного сенсора с высоколегированным островком с обратной стороны мембраны.
9. Условие задания на расчет и результаты расчета.

Таблица 1.3

Результаты моделирования

Изображение маски					
Метод микро-профилирования	Анизотропное травление в КОН: (100), [100]	Анизотропное травление в КОН: (100), [110]	Анизотропное травление в КОН: (110), [100]	Изотропное травление	Реактивное ионное травление
Фигура травления					

Продолжение табл. 1.3

Измерение размеров	$X =$ $Y =$ $Z =$	$X =$ $Y =$ $Z =$	$X =$ $Y =$ $Z =$	$X =$ $Y =$ $Z =$	$X =$ $Y =$ $Z =$
Фигура травления – негативная маска					
Изображение маски					
Метод микро-профилирования	Анизотропное травление в КОН: (100), [100]	Анизотропное травление в КОН: (100), [110]	Анизотропное травление в КОН: (110), [100]	Изотропное травление	Реактивное ионное травление
Фигура травления					
Измерение размеров	$X =$ $Y =$ $Z =$	$X =$ $Y =$ $Z =$	$X =$ $Y =$ $Z =$	$X =$ $Y =$ $Z =$	$X =$ $Y =$ $Z =$
Фигура травления – негативная					

маска					
Изображение маски	 - угол поворота 45°				
Метод микро-профиле-рования	Анизо-тропное травление в КОН: (100), [100]	Анизо-тропное травление в КОН: (100), [110]	Анизо-тропное травление в КОН: (110), [100]	Изотроп-ное трав-ление	Реактивное ионное травление

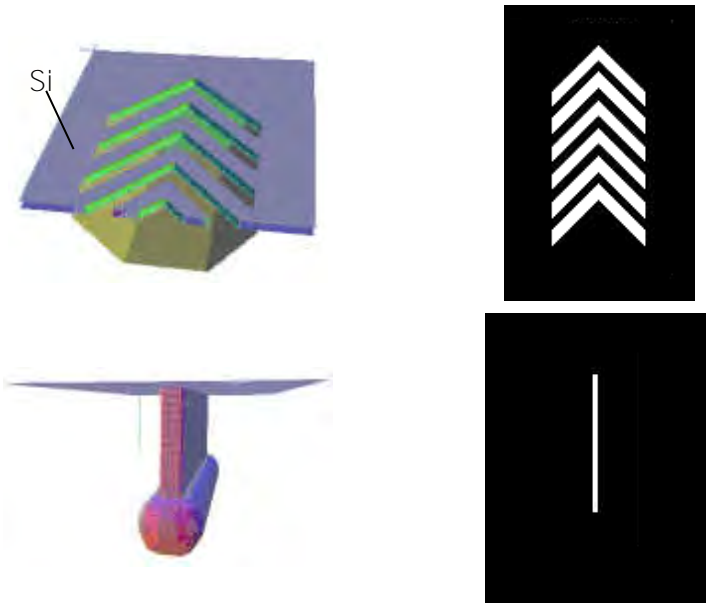
Окончание табл. 1.2

Фигура травления					
Измерение размеров	X = Y = Z =	X = Y = Z =	X = Y = Z =	X = Y = Z =	X = Y = Z =
Фигура травления – негативная маска					
Изображение маски	Собственная маска				
Метод микро-профиле-рования	Анизо-тропное травление в КОН: (100), [100]	Анизо-тропное травление в КОН: (100), [110]	Анизо-тропное травление в КОН: (110), [100]	Изотроп-ное трав-ление	Реактивное ионное травление
Фигура травления					
Измерение размеров	X = Y = Z =	X = Y = Z =	X = Y = Z =	X = Y = Z =	X = Y = Z =
Фигура травления – негативная					

маска					
-------	--	--	--	--	--

Дополнительное (творческое) задание

Постарайтесь получить микропрофили, аналогичные приведенным ниже примерам. Изображения масок, необходимых для их формирования, приведены напротив.



ЛИТЕРАТУРА

1. Пичугин, И.Г. Технология полупроводниковых приборов / И.Г. Пичугин, Ю.М. Таиров. – М.: Высшая школа 1984. – 288 с.
2. Колешко, В.М. Микропрофилирование кремния при создании сенсорных микросистем / В.М. Колешко, А.В. Сергейченко // Машиностроение. – Вып. 19. – Минск, 2003. – С. 679–689.
3. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники: в 10 кн. – М.: высшая школа, 1989. – Кн. 1. Общая технология: учебное пособие / И.Я. Козырь [и др.]. – 223 с.
4. Ваганов, В.И. Оптимальные режимы анизотропного травления кремния в водных растворах щелочей / В.И. Ваганов, Н.И. Гончарова // Электронная техника. Сер. 3, Микроэлектроника. – 1980. – Вып. 1. – С. 73–78.
5. Ваганов, В.И. Структурный и технологический способы управления формой микропрофиля фигур локального анизотропного травления кремния / В.И. Ваганов, Н.И. Гончарова // Электронная техника. Сер. 2, Полупроводниковые приборы. – 1980. – Вып. 4. – С. 33–37.
6. Бачурин, В.В. Применение анизотропного травления кремния в технологии изготовления полупроводниковых приборов / В.В. Бачурин, В.В. Полехов, А.И. Пыхтунова // Обзоры по электронной технике. Сер. 2 Полупроводниковые приборы. – Вып. 3. – 1982. – 51 с.

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ
СЕНСОРОВ И МЭМС**

Цель работы: изучить существующие Интернет-ресурсы, содержащие сведения о свойствах материалов, применяемых при изготовлении сенсоров и МЭМС; осуществить поиск физико-химических свойств указанных материалов в соответствии с заданием.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В настоящее время Интернет предоставляет обширные информационные ресурсы, позволяющие инженеру сидя за компьютером, подключенным к сети, выполнять расчеты и различного рода моделирование с использованием всевозможных прикладных программ и не отвлекаться на поиск числовых значений свойств материалов и их характеристик в различных справочниках. Существует большое количество баз данных, содержащих сведения о свойствах материалов. Большинство таких баз имеет открытый характер. В итоге для того, чтобы работа стала максимально эффективной и не была обременена нудными поисками, необходимо всегда иметь в своей записной книжке список адресов порталов, предоставляющих информацию о различных свойствах материалов.

Кроме того, сегодня Интернет представляет собой не только свалку статической информации, которую инженер может использовать в своих расчетах. Зачастую появляются задачи, для решения которых необходимо использовать формулы, содержащие в себе единицы и величины, не входящие в систему СИ. Также уже имеющиеся величины могут быть не той размерности, которая в настоящий момент требуется. Для перевода существуют различного рода on-line калькуляторы, позволяющие безо всяких затрат осуществлять такие операции, находясь на той же страничке Интернет, где приведены численные значения необходимых величин или свойств материалов.

ЗАДАНИЕ

1. Ознакомьтесь с содержанием сайта <http://users.omskreg.ru/~kolosov/atlas/3D-crystals/indexr.htm>.
2. Ознакомьтесь с возможностями on-line калькулятора <http://www.calc.ru>.
3. Ознакомьтесь с ресурсами портала <http://matdata.net/>.
4. У преподавателя получите задание на поиск.
5. Используя существующие Интернет-ресурсы, найдите изображение атомной структуры и физико-химические свойства (молекулярный вес, теплопроводность, плотность, точка плавления, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и т. п.) заданных материалов. Также найдите, изучите и приведите в отчете примеры сенсорных свойств рассматриваемых материалов, либо характеристики сенсоров, изготовленных с использованием данных материалов.
6. Подготовьте отчет о лабораторной работе.

Для поиска информации можно воспользоваться следующими ресурсами:

- <http://www.memsnet.org/material/>;
- www.matweb.com;
- <http://www.webelements.com/webelements/index.html>
- <http://www.nationmaster.com/encyclopedia>
- <http://ansys.net/ansys/?mycat=matl>;
- <http://www.martindalecenter.com/Calculators.html>;
- <http://www.martindalecenter.com/GradMaterial.html>;
- <http://www.solgel.com/refdesk/database.htm>;
- **поисковые системы:** www.google.com, www.altavista.com, www.rambler.ru и др.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ
ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЭМС
С ПРИМЕНЕНИЕМ МКЭ-ПАКЕТА ANSYS 5.7 ED**

Цель работы: изучить теорию силовой зондовой микроскопии и технологию изготовления микроантилеверов для зондовой микроскопии; рассчитать упругие характеристики монокристаллического кремния; создать конечноэлементную модель микроантилевера, исследовать его амплитудно-частотную характеристику.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В современной науке сформировалась новая область – нанотехнология, представляющая собой междисциплинарное направление, охватывающее область от молекулярной биологии и геномной инженерии до физики поверхности твердого тела, электрохимии и микроэлектроники. Получены уникальные результаты по изучению структуры поверхностей, строения кластеров, природы каталитических центров, строения вирусов, полимеров, отдельных молекул.

Нанотехнология открывает качественно новый уровень изучения различных свойств поверхности материалов. Существует возможность не только исследовать поверхность, но и производить прецизионное воздействие: перемещать слабо связанные с поверхностью наноструктуры, производить нанолитографию, кроме того, возможно и физическое воздействие на поверхность.

Возникновение и развитие нанотехнологий связано с открытием физиками из швейцарского отделения компании IBM сканирующих туннельных и атомно-силовых микроскопов (1981–1986 гг.).

С того времени сменилось уже два поколения сканирующих зондовых микроскопов.

К первому относятся сканирующие туннельные микроскопы (СТМ). Они были изобретены в 1981 г. как сверхвысоковакуумные приборы, на которых впервые было получено атомарное разрешение при исследовании поверхности кристаллических образцов. Также были созданы и получили распространение жидкостные, воздушные, вакуумные и сверхвысоковакуумные варианты приборов.

Принцип работы СТМ – это регистрация туннельного тока между проводящим образцом и микроиглой. Микроигла формирует туннельный ток, локализованный на малой площади. Например, если микрозонд удален на фиксированное расстояние от поверхности, то высота физического рельефа в исследуемой точке определит величину туннельного тока. Контролируя при сканировании фиксированную величину туннельного тока за счет вертикального перемещения микрозонда, определяют микрорельеф поверхности. Применение СТМ ограничивается проводящими поверхностями, а исследования в основном имеют только научное значение. Кроме того, интерпретация СТМ-данных неоднозначна: ток зависит не только от расстояния, но и от плотности электронных состояний, энергии связи электронов, присутствия адсорбционных слоев.

В 1986 г. были изобретены атомно-силовые микроскопы (АСМ). С их помощью регистрировались силы межатомного взаимодействия, так называемой силы ближнего поля. Они были построены подобно патефону. Вдоль поверхности скользила острая игла на пружинке, отклонение которой при этом измерялось. Первоначально пружинки изготавливались из тонкой платиновой фольги, и к ним приклеивалась острая маленькая иголочка – кантилевер, выбранная, например, из разбитого монокристалла сапфира. Одно из основных требований: острие кантилевера должно быть предельно острым, т.е. заканчиваться единичными атомами (рис. 3.1). Промышленная технология производства таких кантилеверов была создана в 1990 г., после чего и начало развиваться второе поколение зондовых микроскопов.

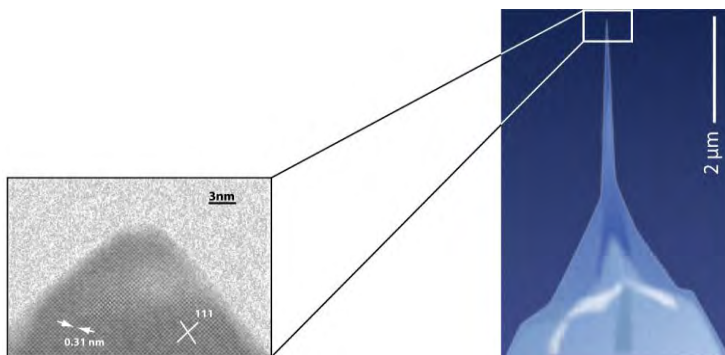


Рис. 3.1. Электронно-микроскопический снимок окончания иглы кремниевого кантилевера. Радиус кривизны кантилевера около 1 нм

Сканирующий зондовый микроскоп – это настольный прибор с компьютерным управлением (рис. 3.2).

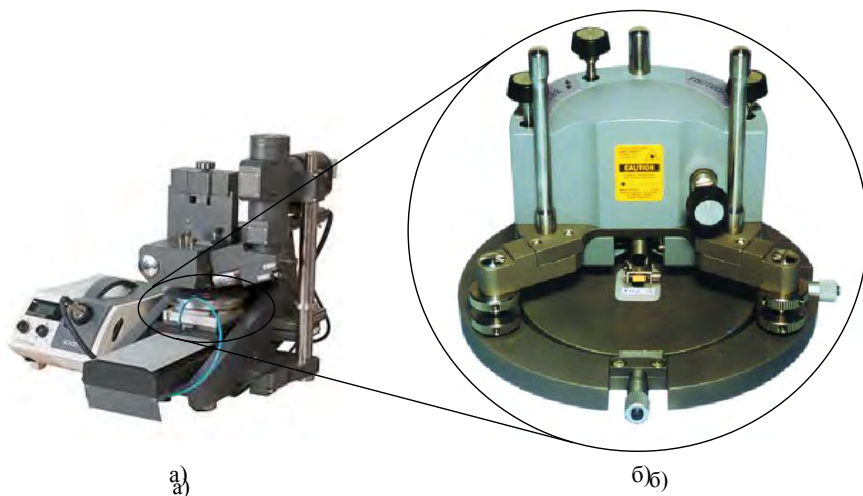


Рис. 3.2 Внешний вид одного из вариантов сканирующего зондового микроскопа (а) и сканирующей головки (б)

Прибор производит «ощупывание» объекта микрозондом. Этот процесс можно производить как в вакууме, так и на воздухе и даже под водой. В качестве твердого зонда используется микробалка с иглой на свободном конце. Измерение угла наклона балки регистрируется с помощью чувствительного датчика (лазер-фотодиод).

Изменение положения кантилевера в процессе сканирования можно измерять разными способами: иглой сканирующего туннельного микроскопа, интерферометрически, оптико-позиционной схемой, датчиком давления (тензодатчиком). Наиболее широко распространена оптико-позиционная схема регистрации (рис. 3.3).

При приближении иглы к образцу между ними возникает обменное взаимодействие, приводящее к взаимному притяжению. Притяжение начинает чувствоваться кантилевером на расстояниях порядка десятков ангстрем. Сканируя по поверхности с поддержанием постоянной силы притяжения, можно получить информацию о рельефе поверхности. Устойчивость достигается за счет обратной связи. Такой режим называется бесконтактная мода. Наряду с ним существуют также контактный и полуконтактный режимы (рис. 3.4).

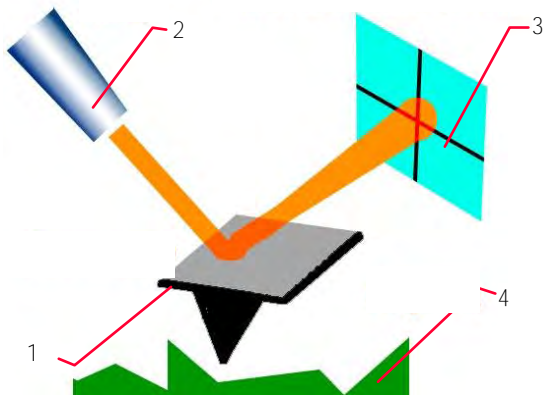


Рис. 3.3. Схема оптической регистрации отклонения кантилевера: 1 – кантилевер; 2 – лазер; 3 – 4-секционный фотодиод; 4 – образец

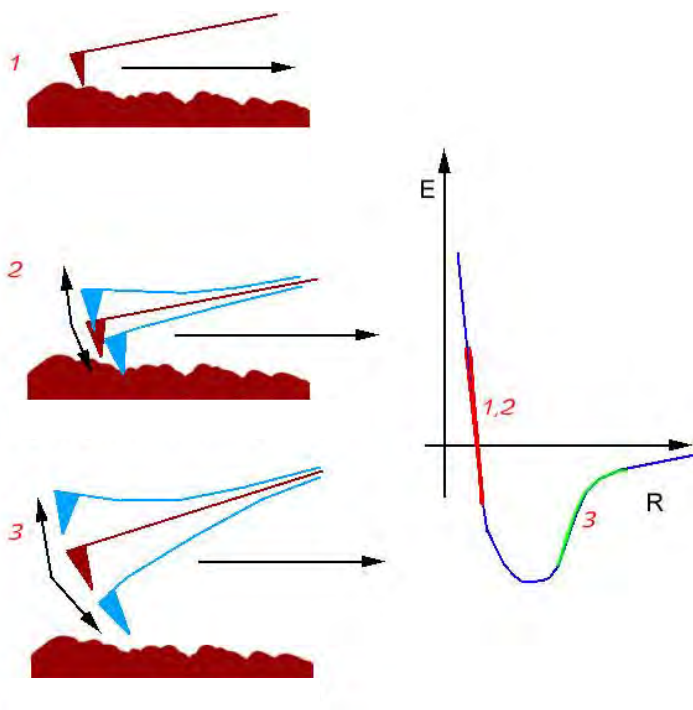


Рис. 3.4. Режимы сканирования: 1 – контактный; 2 – полуконтактный; 3 – бесконтактный

В настоящее время зондовая микроскопия становится одним из основных методов для решения проблем молекулярной диагностики. Уже сейчас с помощью атомно-силовых микроскопов задачи прямой визуализации ДНК, отдельных вирусов, белков, структуры и свойств клеточных мембран из категории высшего экспериментального искусства превращаются в рутинные. Буквально за десятилетия зондовые микроскопы перестали быть уникальными инструментами. Такие приборы используются практически всеми современными лабораториями.

С 1993 г. стало развиваться новое поколение приборов, использующих в своей работе так называемый многомодовый режим. Суть его заключается в том, что он позволяет «сделать видимым» не только микрорельеф поверхности, но и другие ее характеристики, например, магнитные или электрохимические свойства, вязкость, осуществить регистрацию фото-, электро-, химолуминесценции, в том числе низкотемпературной, регистрацию поверхностных плазмонов и т. д. Для реализации многомодовых режимов используются кантилеверы со специальными покрытиями, вибрирующие кантилеверы и т.п. (рис. 3.5). Развитие многомоды превратило зондовый микроскоп в мощный аналитико-препаративный инструмент для моделирования процессов и исследования свойств поверхностей.

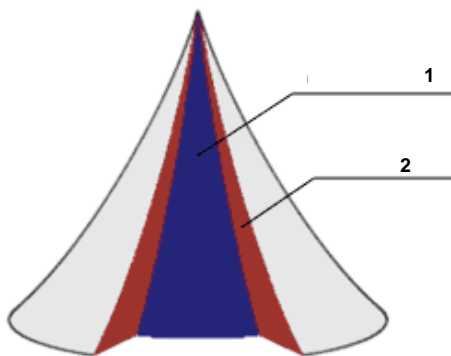


Рис. 3.5. Кантилевер с проводящим покрытием:
1 – кремниевая основа; 2 – проводящее покрытие

С помощью зондовых микроскопов можно не только изучать ранее приготовленные, но и создавать новые структуры с нанометровым разрешением. Используя проводящие кантилеверы, возможно

электрически модифицировать поверхностные слои. В режиме СТМ через проводящий микрозонд (обычно платиновый или платиноиридиевый, или платинородиевый) формируют короткий (порядка 5 нс) импульс тока, и внедренный таким образом в поверхность объемный заряд производит на поверхности различные изменения в зависимости от ее природы поверхности: химические, кулоновский взрыв (например, пробивает в проводящей поверхности отверстие малого, порядка 30 \AA , диаметра) и т. д.

Промышленное применение сканирующих зондовых микроскопов:

- субмикронная микроэлектроника – межоперационный контроль пластин, тестирование и коррекция СБИС;
- промышленное производство цифровых видеодисков DVD и CD – контроль качества матриц и выборочный контроль самих дисков;
- промышленное производство магнитных дисков – выборочный контроль качества магнитных покрытий;
- оптическая промышленность – контроль качества обработки стекла, лазерных зеркал;
- промышленность полимеров – контроль качества и идентификация полимерных материалов;
- медицинская промышленность – контроль качества глазных линз и др.

Являясь не только измерительными приборами, но и инструментами, с помощью которых можно формировать и исследовать наноструктуры, зондовые микроскопы призваны стать базовым физическим и метрологическим оборудованием XXI столетия.

Геометрия и физические свойства кантилеверов

Основным определяющим элементом силовых микроскопов являются его чувствительные элементы – кантилеверы. Для реализации как контактных, так и резонансных мод требуются кантилеверы со специальными и заданными характеристиками.

Несмотря на то, что атомно-силовая микроскопия была изобретена еще в 1986 г. [1], она начала интенсивно развиваться и получила широкое распространение только с 1990 г. после изобретения групповой технологии изготовления кантилеверов. Для их создания используется технология кремниевой микромеханики, основанная на классической микроэлектронной технологии с использованием

процессов легирования, формирования окисных слоев, фотолитографических процессов, процессов травления. Для изготовления одинаковых игл кантилеверов особую и исключительно важную роль играют эффекты селективного травления, позволяющие производить тождественные иглы с точностью до единиц нанометров. Балки заданной и повторяемой толщины получают либо применением стоп-слоев и путем легирования кремния бором или фосфором на заданную глубину, либо напылением пленочных структур заданной толщины.

Одновременно были разработаны кантилеверы из Si_3N_4 и монокристаллического кремния, которые в основном и применяются на практике.

Иглы и методы изготовления кантилеверов

Для недеформируемых поверхностей и жесткого кантилевера изображение в сканирующем зондовом микроскопе (СЗМ) – это свертка реального профиля поверхности и формы зонда (рис. 3.6).

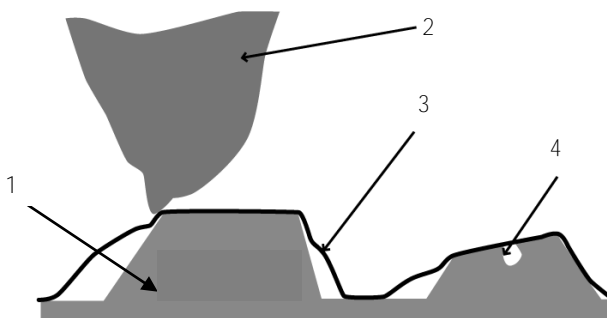


Рис. 3.6. Имитация процесса получения СЗМ – изображения с помощью реального зонда:

1 – образец; 2 – кончик иглы; 3 – СЗМ-изображение; 4 – полость

Если решение прямой задачи – вычисление СЗМ-изображения известной поверхности при использовании зонда известной формы (задача конволюции) – большого труда не представляет, то обратная задача – восстановление геометрического профиля поверхности по измеренному СЗМ-изображению – даже при известной форме

иглы (задача деконволюции) точного решения не имеет. Например, показанная на рис. 3.6 полость никакого вклада в СЗМ-изображение практически не вносит.

Очевидно, что точность решения задачи деконволюции тем выше, чем меньше радиус кривизны иглы и чем меньше угол сходимости ее конуса. Задача деконволюции упрощается для игл «правильной» формы. Решением данной задачи является использование для изготовления кантилеверов групповой технологии изготовления чипов с использованием эффектов селективного анизотропного травления монокристаллического кремния.

Пленочные кантилеверы

В пластине Si(100) вытравливается пирамидальная лунка строго заданной геометрии (рис. 3.7, а), ограниченная плоскостями (111).

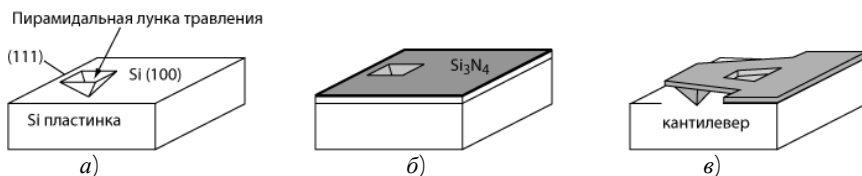


Рис. 3.7. Основные стадии процесса получения кантилеверов из Si_3N_4

После травления лунок поверхность кремния покрывается аморфной пленкой заданной толщины Si_3N_4 , которая полностью повторяет рельеф поверхности (рис. 3.7, б). Затем делается форма балки кантилевера (фотолитография и травление Si_3N_4) (рис. 3.7, в), на верхнюю сторону пленки приклеивают полоски стекла Пирекс (толщиной 0,5 мм), пластина запылится отражающим слоем (для Si_3N_4 кантилеверов обычно из золота), пирексовые полоски надрезаются по бокам на чипы, и после этого стравливается кремний.

Угол сходимости граней (111) пирамиды $\varphi = 70,5^\circ$, что и определяет геометрию иглы. Геометрические параметры такого кантилевера – реплики – определяются геометрией фотошаблона, конструктивно-технологическими ограничениями процесса травления пленки Si_3N_4 (длина и ширина), режимом нанесения Si_3N_4 (толщина) и условиями травления лунок (параметрами игл).

Для точно пирамидальных ($70,5^\circ$) игл характерные радиусы кривизны лежат в диапазоне 30–50 нм. Применение дополнительного режима травления позволяет изготовить двухступенчатую пирамидку с углом при вершине $\varphi = 36^\circ$ (приблизительно соответствует пересечению граней (211)). В этом случае удается получить иглы с радиусом кривизны порядка 20 нм (рис. 3.8). Технологическими тонкостями производства является изготовление ненапряженных или компенсированных балочных структур. Это позволяет сохранить плоскость реплики (балок кантилеверов) после стравливания кремния и точность приклейки Пирекса, что обеспечивает повторяемость длины балок.

Недостатком Si_3N_4 зондов является большой радиус кривизны кончика иглы, исключающий возможность получения высокого разрешения, и большой угол при вершине, не позволяющий корректно измерять поверхности с особенностями в виде столбиков, канавок и вообще шероховатостей.

Кремниевые кантилеверы

Цикл изготовления пассивных кремниевых кантилеверов включает:

- формирование кремниевых столбиков, из которых последующим заострением будут выполнены иглы;
- формирование консоли;
- нанесение отражающего покрытия;
- разделение пластины на отдельные чипы.

В настоящее время известны три варианта технологии изготовления кремниевых кантилеверов, различающиеся способом формирования кремниевых столбиков и способами изготовления консоли.

В первом варианте используется технологическая возможность выращивания на поверхности кремния столбиков длиной до долей миллиметра. Впоследствии из выращенных столбиков формируют иглы путем химической заточки. Данная технология не получила развития, т. к. создаваемые кантилеверы получаются чрезвычайно хрупкими и имеют значительный разброс в характеристиках.

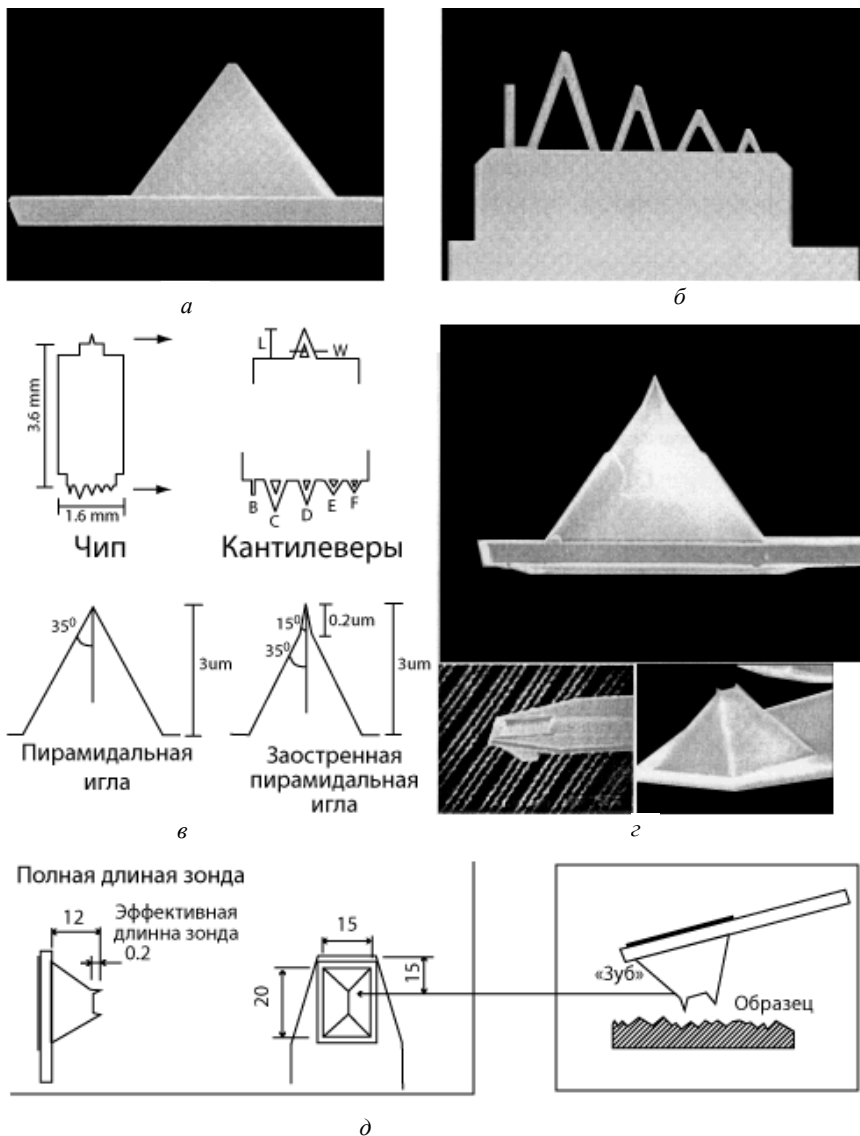


Рис. 3.8. Электронно-микроскопическая фотография отдельной иглы (а), чипа с кантилеверами (б), эскизных чертежей кантилеверов и игл (в) производства компании «TermoMicroscope», (CA, USA) и два типа пирамидальных Si_3N_4 одно- и двухыгольчатых кантилеверов фирмы «Olympus Optic» (Япония) (г, д)

В двух других технологиях, которыми пользуются производители кантилеверов, столбики под иглы формируют изотропным травлением пластины. Различие технологий состоит в том, что в одной (В-технология) стоп-слой, определяющий толщину консоли, изготавливается диффузией бора в кремнии, а в другой (Р-технология) травление консоли осуществляется электрохимически. В этом случае глубинное травление прекращается, когда фронт травления достигает предварительно организованного в кремнии р-п-перехода. Кроме того, в Р-технологии стоп-слой формируют до травления столбиков.

Преимуществом В-технологии является автоматический контроль толщины балки кантилевера по пластине, поэтому разброс характеристик кантилеверов, обусловленный разнотолщинностью, практически отсутствует. Кроме того, балки и иглы кантилеверов автоматически имеют высокую проводимость, так как уровень легирования, необходимый для формирования стоп-слоя, в этой технологии составляет порядка $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Это же, в свою очередь, является недостатком в случае, если имеется необходимость формирования функциональных структур (даже пары резисторов для тензорезисторного считывания угла изгиба кантилевера) на балке и теле кантилевера. Кроме того, из-за особой последовательности формирования структуры игла является маской при образовании стоп-слоя на кремниевой балке. Из-за этого после формирования балки на отражающей поверхности кантилевера над иглой образуется лунка, которая, с одной стороны, приводит к потерям при отражении, а с другой – указывает местоположение иглы.

В Р-технологии остановка процесса глубинного травления осуществляется автоматически, т. к. используется электрохимическое травление, при достижении р-п-перехода возникает скачок напряжения, и травление останавливается. Достаточная степень легирования в Р-технологии составляет $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что допускает формирование активных структур. При использовании Р-технологии процесс формирования структуры следующий: первоначально диффузией фосфора формируется глубоко залегающий р-п-переход. Глубина залегания р-п-перехода задается равной сумме длины иглы и толщины консоли. После этого формируются столбики под иглы травлением п-слоя. Контроль травления проводят по времени. После этого глубинным электрохимическим травлением с обратной

стороны формируют балку. Маскирующего эффекта здесь не возникает в принципе, и лунка над иглой не образуется, однако отсутствует автоматический контроль толщины балки и возможен разброс характеристик кантилеверов по пластине. Поэтому требования к Р-технологии более жесткие, чем к В-технологии.

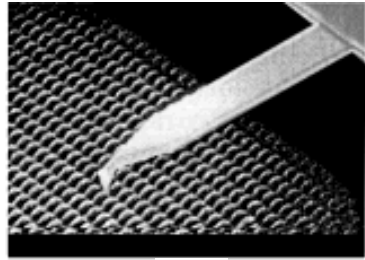
В настоящее время ведущие производители используют как Р-, так и В-технологии в зависимости от требований к конкретному виду кантилеверов.

На рис. 3.9–3.12 приведены конструкции и геометрические характеристики простых кремниевых кантилеверов, которые производятся в настоящее время. Если не применять специальных процедур заточки игл, то углы при вершине кремниевых кантилеверов получаются близкими углам схождения граней (111), (211), (311) (411). Углы этих граней относительно нормалей к поверхности равны соответственно 35,26 (см. рис. 3.11, *д*), 19,47; 13,26; 10,02 градусов.

В зависимости от исходной ориентации пластины, геометрии столбика и условий травления можно добиться строгой повторяемости параметров игл. Радиус кривизны кремниевых игл обычно находится в диапазоне 5–15 нм и строго не контролируется. При отработанной технологии с вероятностью порядка 80 % удастся гарантировать радиус кривизны кремниевых игл не хуже 10 нм. Разработана технология дополнительной заточки кремниевых игл (см. рис. 3.10, *в, з*), которая гарантированно обеспечивает с вероятностью 80 % радиус кривизны острия менее 2 нм при угле сходимости 8–10° на длине до 2 мкм.



a



б

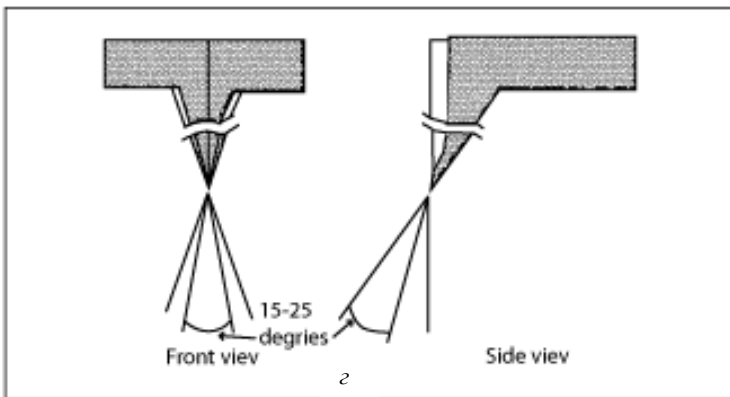
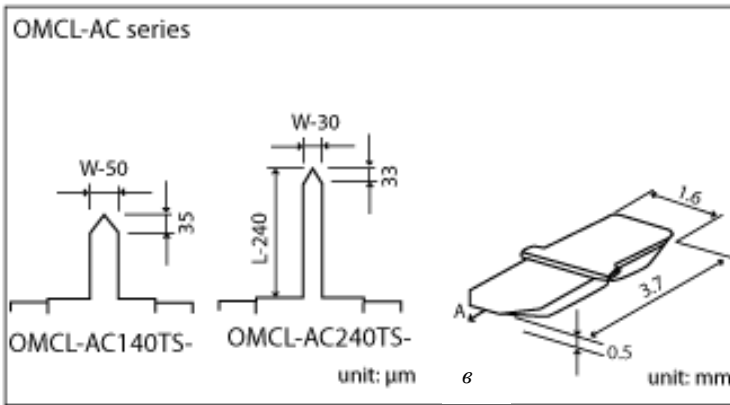
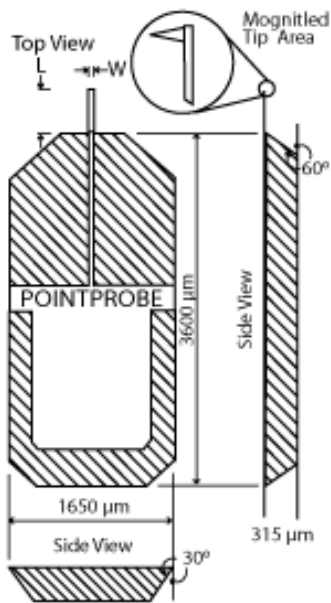
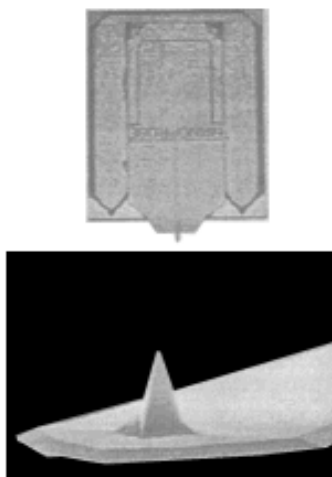


Рис. 3.9. Промышленные кантилеверы фирмы «Olympus» (Япония);
a, б – электронно-микроскопическая фотография кремниевых кантилеверов;
в, z – конструкция



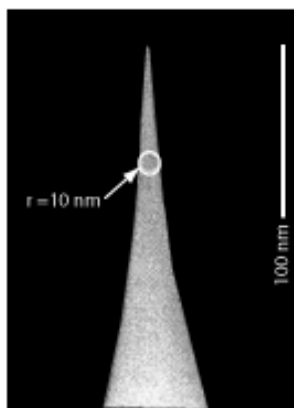
a



б



в



г

Рис. 3.10. Промышленные кантилеверы фирмы «NanoSensor» (Германия): *a* – конструкция; *б* – электронно-микроскопическая фотография кремниевого кантилевера в оправке; *в* – заостренная кремниевая игла на конце кремниевого кантилевера; *г* – кончик заостренной кремниевой иглы

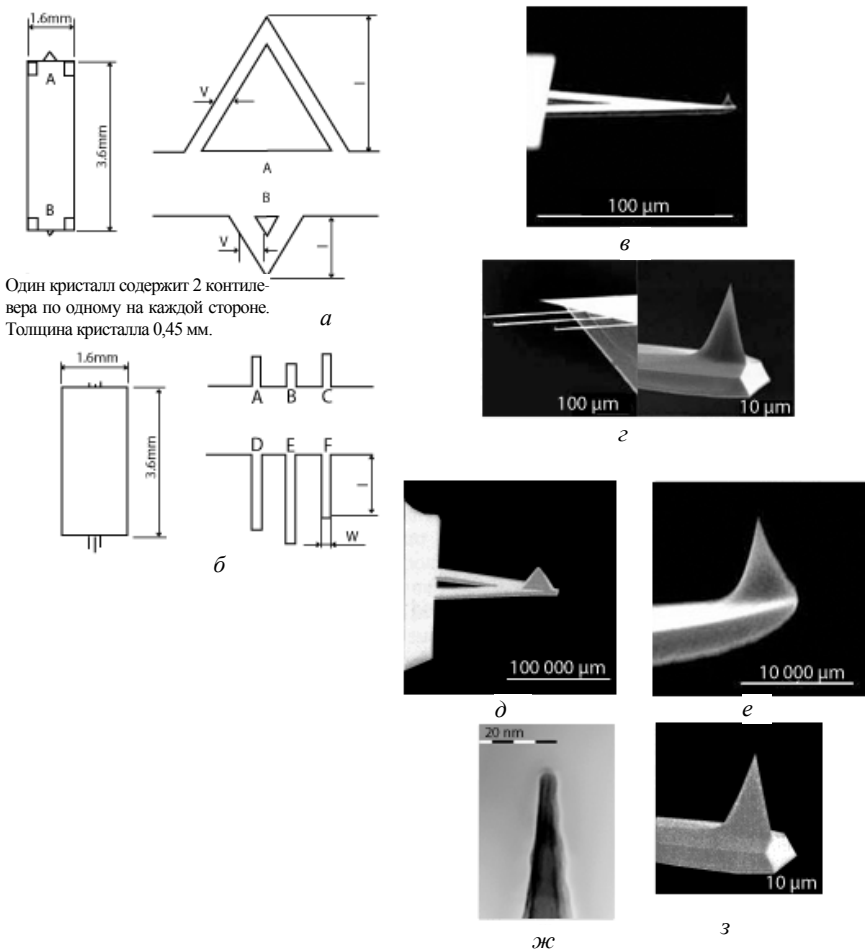


Рис. 3.11. Промышленные кантилеверы фирмы «НТ-МДТ» и «Силикон-МДТ» (Зеленоград, Россия):
а, б – конструкции; *в-з* – электронно-микроскопические фотографии кремниевых кантилеверов

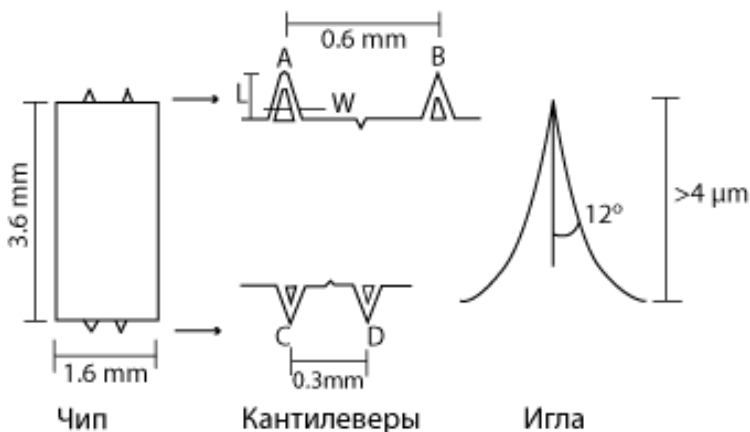


Рис. 3.12. Кремниевые кантилеверы производства фирмы «ThermoMicroscope» (CA, USA)

Модификация поверхности игл

Как ранее уже говорилось, методом сканирующей зондовой микроскопии в дополнение к топографии существует возможность измерить различные характеристики материалов.

С помощью зондов с проводящей поверхностью можно:

- измерять относительное распределение поверхностного сопротивления;
- работать в режимах туннельной микроскопии и спектроскопии;
- работать в режиме измерения относительного распределения работы выхода (Кельвин-мода);
- измерять относительное распределение поверхностной емкости;
- проводить токовую модификацию поверхности;
- измерять электрические характеристики поверхностных структур.

С помощью магниточувствительных зондов можно измерять распределение приповерхностных магнитных полей.

Проводящие зонды с диэлектрической поверхностью позволяют:

- измерять распределение приповерхностных электростатических полей;
- работать в режиме измерения относительного распределения работы выхода (Кельвин-мода);

- измерять относительное распределение поверхностной емкости;
- проводить электростатическую модификацию поверхности с возможностью манипуляции кластерами, частицами на поверхности.

С помощью зондов с покрытиями из материалов высокой прочности (нитрид бора, алмазоподобные покрытия и т. д.) возможны:

- наноиндентация, измерение твердости приповерхностных структур;
- тензоиндуцированная модификация поверхности;
- маркировка поверхностей.

Зонды с покрытиями из электропластичных материалов позволяют осуществлять:

- модификацию поверхности;
- осаждение проводящих кластеров;
- формирование коммутации между элементами;
- коррекцию структур.

С помощью химически модифицированных структур можно:

- измерять и интерпретировать распределение адгезионных сил;
- проводить качественные исследования поверхности;
- измерять механические свойства кластеров и молекул.

С помощью зондов со сформированными активными элементами на концах выполняют:

- измерение распределения приповерхностных тепловых полей;
- измерение распределения теплопроводности;
- термоиндуцированную модификацию поверхности;
- измерение распределения инфракрасного излучения от поверхности.

Приведенным перечнем не ограничиваются возможности зондовой микроскопии, но очевидно, что:

- не может существовать одного универсального зонда, способного интегрировать требования, предъявляемые в методиках исследований;
- для раскрытия аналитических и препаративных возможностей зондовой микроскопии, являющихся, по сути, сенсорными методами, исключительную роль играют свойства зондов, требующие разнообразия покрытий.

Специальные кантилеверы

Кантилеверы последних разработок характеризуются следующими параметрами. Достигается жесткость 10^{-5} Н/м, что позволяет регистрировать силы до 10^{-18} Н (рис. 3.13). Использование таких кантилеверов позволяет регистрировать магнитно-силовой рельеф с разрешением до 5 нм. Время механического отклика достигает 90 нс. Кантилеверы интегрируются с микросканером, который позволяет получать атомарное разрешение изображения (рис. 3.14).

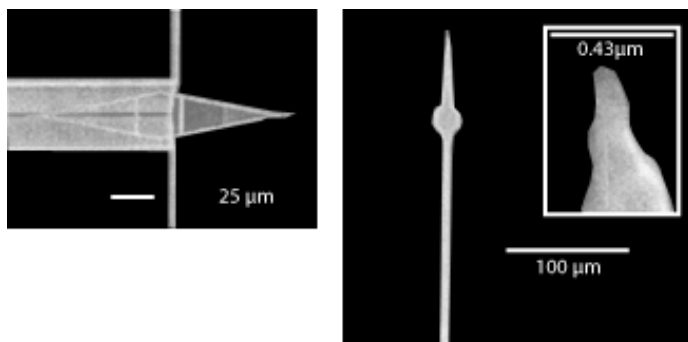


Рис. 3.13. РЭМ-изображение сверхвысокочувствительного кантилевера (Стенфордский университет, Калифорния)

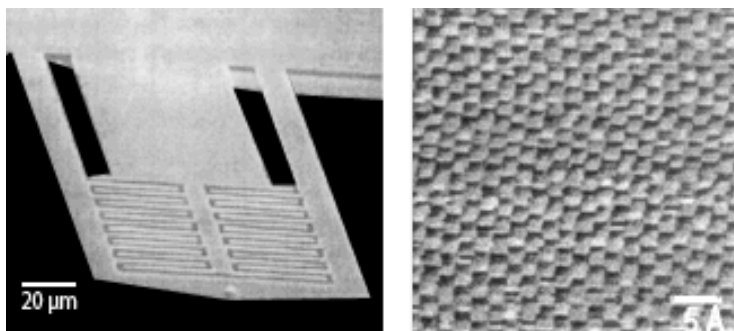


Рис. 3.14. Комбинированный со сканером кантилевер Квайта и полученное с его помощью СЗМ-изображение решетки графита

Ограничения в использовании силовой микроскопии

При исследованиях в СЗМ возникает ограничение, связанное с геометрией иглы и геометрическими особенностями установки кантилеверов. В зависимости от этих особенностей в различных приборах угол наклона чипа по отношению к образцу колеблется в пределах 10–20°. При этом могут существовать области, в которых изображение в основном определяется формой иглы и геометрией ее крепления.

Для конических и пирамидальных кантилеверов в приближении нулевого радиуса кривизны или области недоверности определяется простыми выражениями (рис. 3.15) при $\Psi \leq \alpha$, что выполняется для кремниевых кантилеверов фирм «NanoSensor», «НТ-МДТ», «Силикон-МДТ», «Thermoscope». Для конструкций, у которых угол крепления кантилевера $\alpha \geq 15$ (в микроскопах фирмы «НТ-МДТ» $\alpha = 20^\circ$), область недоверности L_Ψ для ступеньки определяется только радиусом кривизны иглы. Область недоверности для конических кантилеверов с углом сходимости 22° ($\varphi = 11^\circ$) и $\alpha = 20^\circ$ получается значительной и составляет $L_\varphi = 0,6h_2$. Это обстоятельство ставит под сомнение целесообразность использования СЗМ для решения метрологических задач в субмикронной электронике, где требуется проводить измерения канавок, в том числе качества «дна» с шириной до 0,2 мкм при глубине до 1 мкм.

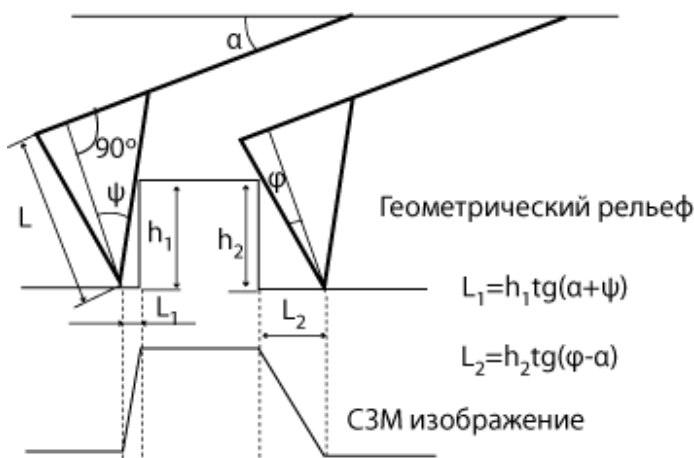


Рис. 3.15. Геометрический рельеф ступеньки и ее СЗМ-изображение

Силовые и резонансные свойства балок кантилеверов

Рассмотрим механические свойства простейшего безыгольчатого микрокантилевера в виде прямоугольной балки с длиной L , толщиной h и шириной w .

Если взять упругую балку с эффективной массой M , геометрическими размерами L, w, h (рис. 3.16), жесткостью k в среде с затуханием H , колеблющуюся под действием периодической раскачки держателя вдоль оси Z ($Z_{\text{balk}} = A \cos(\omega t)$), то в отсутствие внешних сил малую деформацию $u(x, t)$ можно описать уравнением

$$M \frac{d^2 u}{dt^2} + H \frac{du}{dt} + k[u - \cos(\omega t)] = 0.$$

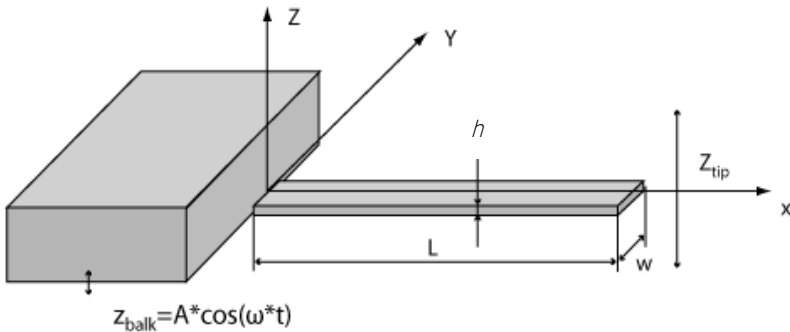


Рис. 3.16. Микрокантилевер в виде прямоугольной балки

Тогда если амплитуда колебаний балки при $x = 0$ равна A , то в соответствии с проведенной формулой амплитуда колебаний свободного конца балки будет определяться выражением

$$U(\omega) = \frac{A}{\left| 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \frac{i}{Q} \frac{\omega}{\omega_0} \right|} = \frac{A}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \frac{1}{Q^2} \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}},$$

где $\omega_0 = \sqrt{k/M}$ – первая резонансная частота балки;

$Q = k/(H\omega_0)$ – добротность колебаний балки.

Жесткость кантилеверов k_Z и резонансная частота f_R для балки в форме параллелепипеда связаны с их геометрическими параметрами и упругими константами материала балки следующими соотношениями:

$$k_Z = \frac{Et^3 W}{4L^3}, \quad f_R = 0,162 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

а его торсионная жесткость

$$k_\Psi = \frac{Et^3 W}{6(1+n)Lh},$$

где E – модуль упругости;

t – толщина;

W – ширина;

L – длина микрокантилевера;

ρ – плотность материала балки;

h – длина иглы;

n – коэффициент Пуассона.

Для кантилеверов с V -образными балками

$$f_R = a \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где $a = 0,194–0,284$ в зависимости от конкретной геометрии балки,

а силовая константа k_Z^Δ при этом определяется выражением

$$k_Z^\Delta = \frac{Et^3 W}{2L^3}.$$

При расчете упругих элементов из кристаллических материалов необходимо учитывать анизотропные свойства последних. Некоторые свойства материалов, например, плотность, влажность и т.д., определяются одним числом и являются скалярными величинами.

Ряд других свойств, таких, как электропроводность, магнитная проницаемость, упругость зависят от направления воздействия и структуры используемого материала. Для анизотропных материалов, как-ким является кремний, эти свойства определяются таблицей чисел и тензором соответствующего ранга.

Тензор напряжений связывает два полярных вектора: вектор действующей на кристалл силы и единичный вектор нормали к поверхности, абсолютная величина которого равна единице площади.

Необходимо иметь в виду, что напряженное состояние возникает в кристалле под действием внешних сил в том случае, если кристалл лишен возможности деформироваться.

При воздействии внешних сил на находящийся в свободном состоянии кристалл возникает деформация, описываемая тензором деформаций.

Связь между напряжениями и деформациями в анизотропном теле устанавливается обобщенным законом Гука, который можно записать в тензорном виде в одной из двух форм:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \text{или} \quad \varepsilon_{km} = \lambda_{kmij} \sigma_{ij},$$

где σ_{ij} , ε_{km} – тензоры второго ранга напряжения и деформации.

Коэффициенты C_{ijkl} называются модулями упругости, а коэффициенты λ_{kmij} – коэффициентами податливости и являются тензорами четвертого ранга.

Число независимых коэффициентов C_{ijkl} и λ_{kmij} для кристаллов с определенной симметрией уменьшается. Так, упругие свойства кристаллов с кубической симметрией (к которым относится и кремний) в системе координат, определяемой кристаллографическими осями, описываются тремя независимыми модулями упругости или тремя коэффициентами податливости.

Модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν можно определить следующим образом:

$$E_i \equiv \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}; \quad \nu_{ij} \equiv -\frac{\varepsilon_{jj}}{\varepsilon_i},$$

где $i, j = 1, 2, 3; i \neq j$.

Таким образом, они могут быть выражены через соответствующие компоненты тензоров модулей упругости или коэффициентов податливости:

$$E_i = \frac{1}{\lambda'_{ij}}; \quad \nu_{jr} = -\frac{\lambda'_{ij}}{\lambda'_{jj}}$$

На практике наиболее часто распространенными ориентациями кремниевых пластин являются: (111), (100) и (110).

При расчете напряженного состояния упругих элементов, плоскость которых ориентирована в одной из указанных кристаллографических плоскостей, напряжениями и деформациями по направлению, перпендикулярному плоскости, как правило, пренебрегают, а учитывают напряжения и деформации только в плоскости упругого элемента.

На рис. 3.17 приведен график распределения коэффициента Пуассона и модуля Юнга по направлениям в плоскости (100).

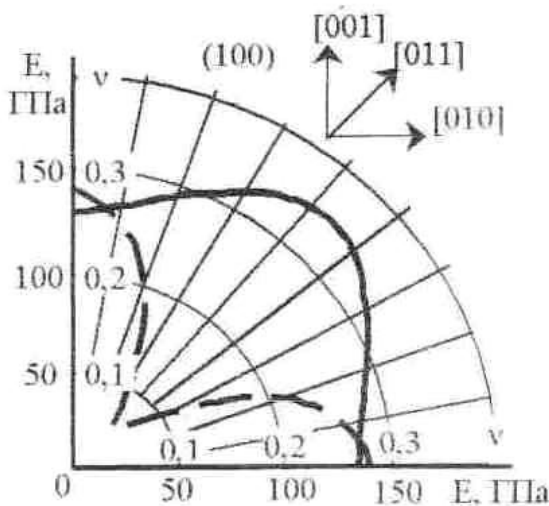


Рис. 3.17. Значение модуля Юнга и коэффициента Пуассона для кремния по направлениям в плоскости (100)

Общие выражения для технических параметров упругости пластины, ориентированной в плоскости (100) равны:

- модуль Юнга

$$E = \frac{1}{\lambda_{11} - 0,25\lambda_A(1 - \cos 4\varphi)};$$

- коэффициент Пуассона

$$\nu = -\frac{\lambda_{12} + 0,25\lambda_A(1 - \cos 4\varphi)}{\lambda_{11} + 0,25\lambda_A(1 - \cos 4\varphi)},$$

где λ_A – коэффициент податливости ($\lambda_A = \lambda_{11} - \lambda_{12} - \lambda_{44}/2$);

φ – угол поворота рассматриваемого направления относительно выбранного базового (направление [010]) в плоскости пластины.

Значения коэффициентов, необходимых для расчета E и ν приведены в табл. 3.1.

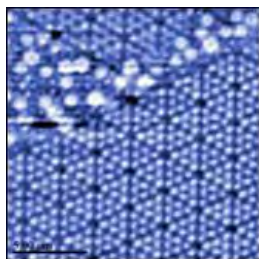
Таблица 3.1

Характеристики упругости кремния

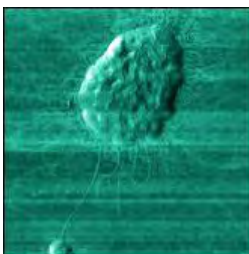
Моно-кристалл	Коэффициенты податливости ($\text{м}^2/10^{11}\text{Н}$)				Коэффициенты жесткости (10^{11}Н)		
	λ_{11}	λ_{12}	λ_{44}	λ_A	c_{11}	c_{12}	c_{44}
Si	0,768	-0,214	1,256	0,354	1,657	0,639	0,796

Примеры результатов зондовой микроскопии

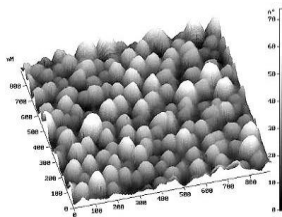
На рис. 3.18 представлены изображения различных поверхностей, полученные посредством зондовой микроскопии.



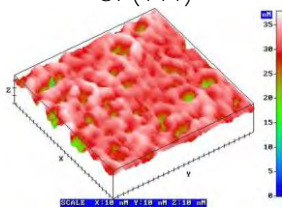
Si (111)



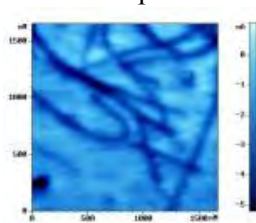
бактерия



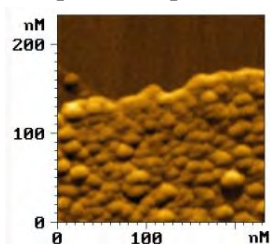
пористый кремний



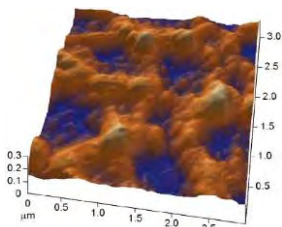
алмазоподобная пленка



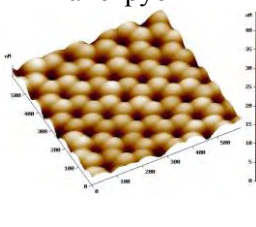
углеродные нанотрубки



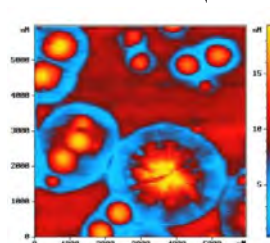
серебряные наночастицы



SnO_2



Al_2O_3



PZT пленка

Рис. 3.18 Примеры изображений, полученных с использованием СЗМ

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

Рассчитать значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для последующего моделирования микроантислевера, изготовленного из монокристаллического кремния. Значения угла ориентации микроантислевера относительно базового направления в пластине (100) приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Варианты заданий на моделирование микрокантилевера

№ варианта		Контрольные точки		Угол поворота φ , °
1	2	3	4	5
1	X	0	2,0E-4	0
	Y	0	2,0E-5	
	Z	0	1,0E-6	
2	X	0	2,5E-4	15
	Y	0	2,0E-5	
	Z	0	1,0E-6	
3	X	0	3,0E-4	30
	Y	0	2,0E-5	
	Z	0	1,0E-6	
4	X	0	3,5E-4	45
	Y	0	2,0E-5	
	Z	0	1,0E-6	
5	X	0	4,0E-4	60
	Y	0	2,0E-5	
	Z	0	1,0E-6	
6	X	0	2,0E-4	75
	Y	0	1,5E-5	
	Z	0	1,0E-6	
7	X	0	2,0E-4	90
	Y	0	2,5E-5	
	Z	0	1,0E-6	
8	X	0	2,0E-4	105
	Y	0	3,0E-5	
	Z	0	1,0E-6	
9	X	0	2,0E-4	120
	Y	0	2,0E-5	
	Z	0	2,0E-6	
10	X	0	2,5E-4	135
	Y	0	2,5E-5	
	Z	0	2,0E-6	
11	X	0	2,5E-4	150
	Y	0	2,0E-5	
	Z	0	1,5E-6	
12	X	0	4,0E-4	165
	Y	0	3,0E-5	
	Z	0	2,0E-6	
13	X	0	2,2E-4	180
	Y	0	2,0E-5	
	Z	0	1,0E-6	

Окончание табл. 3.2

1	2	3	4	5
14	X	0	2,5E-4	195
	Y	0	2,0E-5	
	Z	0	1,0E-6	
15	X	0	3,2E-4	210
	Y	0	2,0E-5	
	Z	0	1,0E-6	
16	X	0	3,5E-4	225
	Y	0	2,0E-5	
	Z	0	1,0E-6	
17	X	0	2,8E-4	240
	Y	0	2,0E-5	
	Z	0	1,0E-6	
18	X	0	3,0E-4	255
	Y	0	1,5E-5	
	Z	0	1,0E-6	
19	X	0	4,0E-4	270
	Y	0	4,0E-5	
	Z	0	1,0E-6	
20	X	0	3,0E-4	285
	Y	0	3,0E-5	
	Z	0	1,0E-6	
21	X	0	3,0E-4	300
	Y	0	3,0E-5	
	Z	0	1,0E-6	
22	X	0	3,5E-4	315
	Y	0	2,5E-5	
	Z	0	2,5E-6	
23	X	0	2,5E-4	330
	Y	0	2,5E-5	
	Z	0	1,5E-6	
24	X	0	4,0E-4	345
	Y	0	4,0E-5	
	Z	0	2,0E-6	
25	X	0	2,0E-4	360
	Y	0	2,0E-5	
	Z	0	1,5E-6	

Плотность монокристаллического кремния $\rho = 2329 \text{ кг/м}^3$

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Постановка задачи

Балка микрокантилевера абсолютно жестко прикреплена к основанию. На основание осуществляется циклическое воздействие со стороны генератора вдоль оси Z с величиной силы $50 \cdot 10^{-9}$ Н (рис. 3.19).

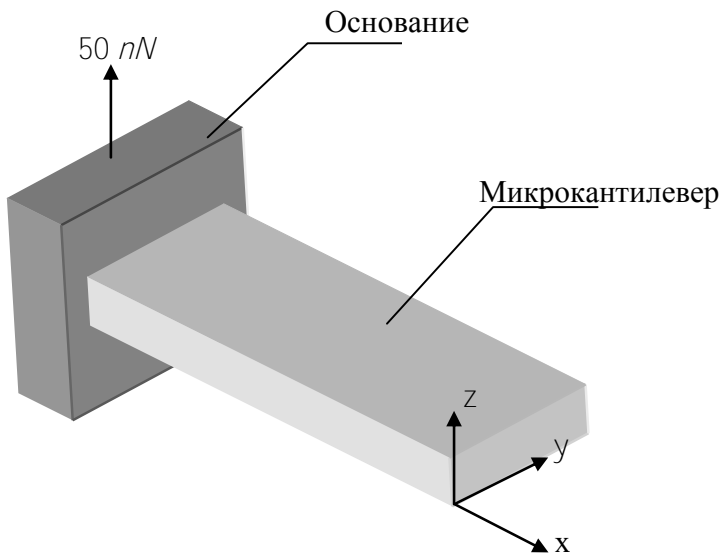


Рис. 3.19. Модель балки микрокантилевера, прикрепленной к основанию

Шаг 1. Вход в МКЭ-пакет ansys

Пуск → **Программы** → ANSYS 5.7 → Interactive

Задается имя файла и его расположение (C:/Temp). По умолчанию файлу присваивается имя «file».

ANSYS «работает» в режиме разворачивающихся меню. Каждый пункт меню представляет собой команду выполнения определенных операций. Надпись каждой команды в меню заканчивается определенным значком. Стрелочка (>) означает, что данная команда раскрывает подменю, многоточие (...) – открытие диалогового окна, знак, аналогичный арифметическому знаку сложения (+) – работа с объектами непосредственно на «рабочем столе» (рис. 3.20).

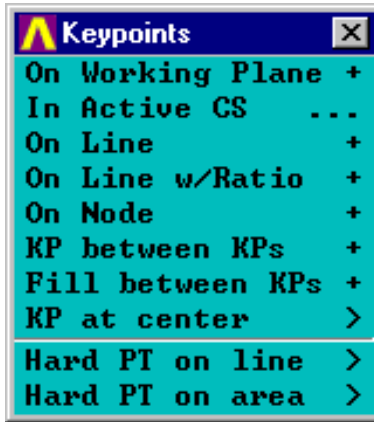


Рис. 3.20. Пример меню команд

Управление осуществляется одинарным щелчком мыши.

Задается оригинальное имя вашему файлу:

ANSYS Utility Menu → File → **Change Jobname...**

В появившемся окне записывается рабочее имя будущих файлов (ANSYS генерирует сразу несколько файлов, см. Help). В поле «New log and error files?» устанавливается значение Yes → ОК (рис. 3.21).

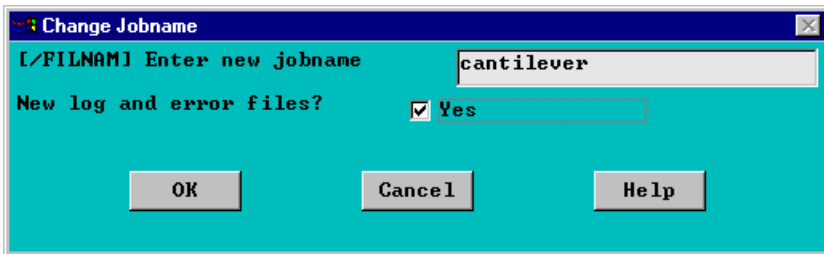


Рис. 3.21. Определение рабочего имени файла

Шаг 2. Создание объемной модели кантилевера

Вначале графическими средствами ANSYS создается объемная модель микрокантилевера.

В ANSYS имеется набор графических примитивов, позволяющих создавать модели твердотельных объектов различной сложности.

Для создания модели микрокантилевера воспользуемся примитивом параллелепипед, построенным по двум точкам.

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Modeling → Create → → Volumes → Block → **By Dimensions...**

В появившемся окне (рис. 3.22) вводятся координаты ключевых точек в соответствии с вариантом задания (см. табл. 3.2), после чего необходимо нажать «ОК».

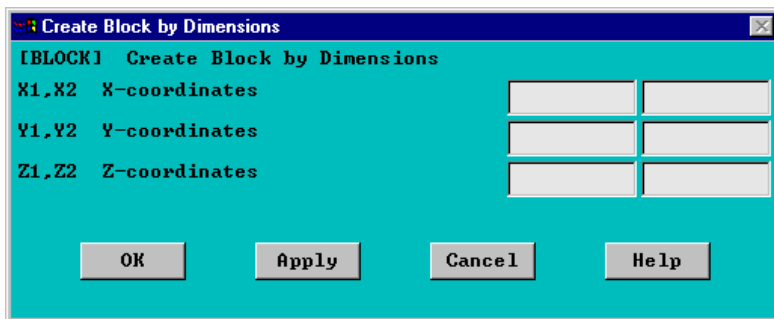


Рис. 3.22. Окно ввода координат ключевых точек

Замечание! В ANSYS отсутствует функция отката назад. В связи с этим рекомендуется каждый раз, когда заканчивается тот либо иной этап моделирования, осуществлять сохранение.

Сохранение модели

В меню «ANSYS Toolbar» необходимо нажать кнопку «SAVE_DB» (рис. 3.23)

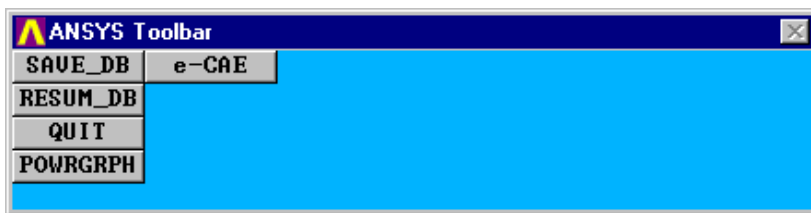


Рис. 3.23. Сохранение результатов моделирования

Для просмотра трехмерного изображения модели воспользуйтесь функциями управления изображением (рис. 3.24):

ANSYS Utility Menu → PlotCtrls → **Pan, Zoom, Rotate...**

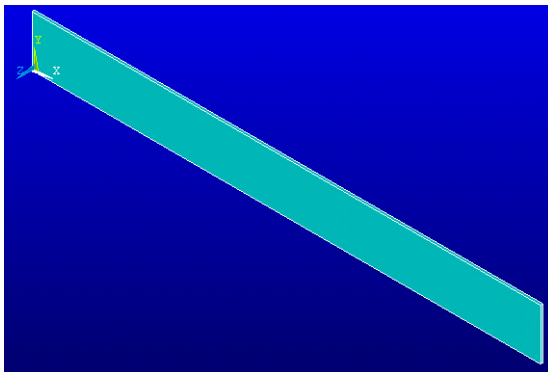


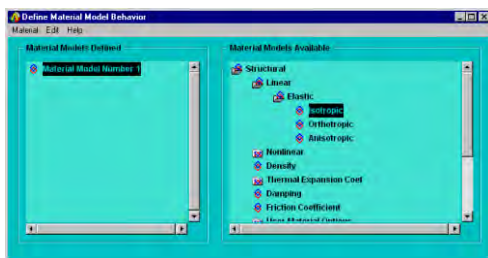
Рис. 3.24. Объемный вид модели микрокантилевера

Шаг 3. Определение упругопластических свойств изотропных материалов

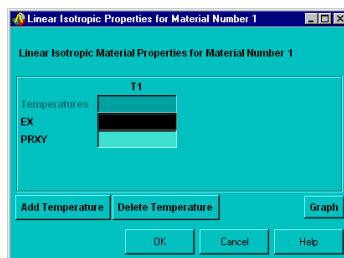
ANSYS Main Menu → Preprocessor → Material Props → Material Models → Structural → Linear → Elastic → Isotropic

В появившемся окне (рис. 3.25) задаются модуль Юнга (**EX**) (*Yang module*) и коэффициент Пуассона (**PRXY**) (*Poisson's ratio*) → OK. Не выходя из открытого окна «Material Models» определяют плотность материала (**Density**). Окно «Material Models» закрывается.

Примечание. Значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона берутся из расчетной части.



a) ^a



б) ^b

Рисунок 11.1 - Создание модели материала
Рис. 3.25. Создание модели материала

Шаг 4. Разбиение на конечные элементы и получение объемной модели кантилевера

Для того чтобы произвести моделирование и расчет параметров микрокантилевера, вначале необходимо представить его как набор контактирующих между собой определенным образом конечных элементов. Существует большое количество типов конечных элементов. Каждый из них характеризуется заданными параметрами расчета и применяется для определенного типа моделирования (моделирования процессов упругой деформации, тепловых потоков и напряжений, электрических полей и т.п.).

Для моделирования микрокантилевера выбирается конечный элемент, обозначаемый как SOLID5. Данный элемент имеет шесть степеней свободы, характеризуется возможностью достаточно больших отклонений и деформаций и предназначен для моделирования балок и кантилеверов.

Задание типа конечного элемента

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Element Type → Add/Edit/Delete → Add

В появившемся окне (рис. 3.26.) выбирается конечный элемент Coupled Field → Scalar Brick 5 → OK. Окно «Element Type» закрывается (Close).

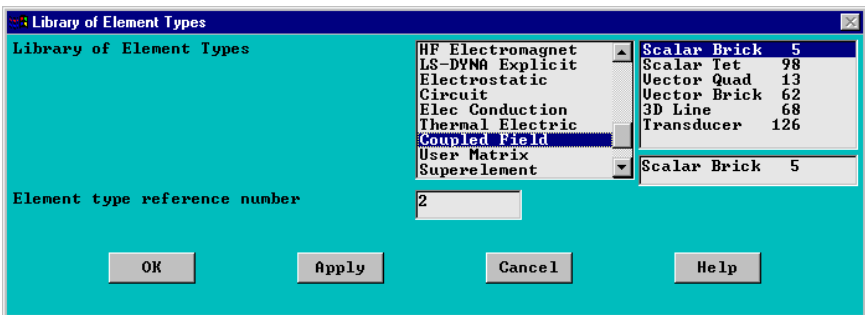


Рис. 3.26. Выбор типа конечного элемента

Создание конечно-элементного разбиения

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Meshing → SizeCtrls → Manual Size → Global → Size

Появляется рабочее окно определения количества конечных элементов на элементе разбиения (рис. 3.27). В окне в пункте «No. of element divisions –» устанавливается число конечных элементов, равное 4 → ОК.

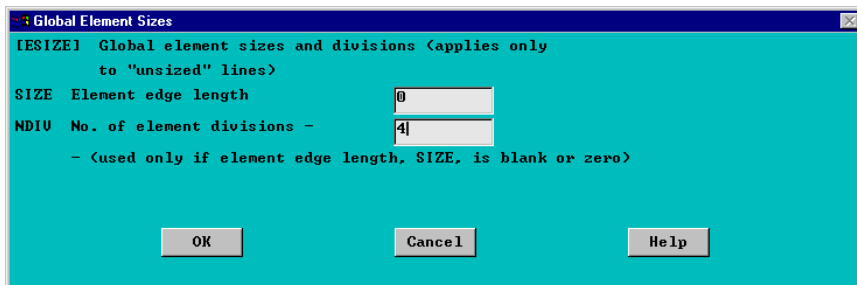


Рис. 3.27. Определение количества конечных элементов

Далее осуществляется разбиение модели с количеством элементов на каждой линии, равное 4 (рис. 3.28).

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Meshing → Volumes → Mapped → 4 to 6 sided

Стрелкой-курсором выбирается объем, определяющий микрокантилевер → ОК.

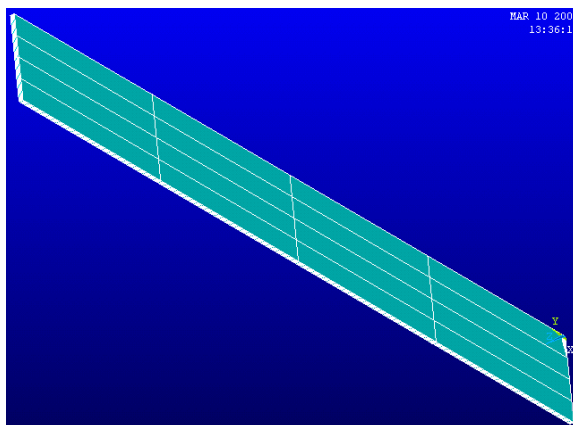


Рис. 3.28. Конечно-элементное разбиение кантилевера

Просмотр объемной модели микросенсора

Utility Menu → PlotCtrls → Pan, Zoom, Rotate...

В появившемся окне нажмите кнопку «Iso», программа отобразит изопланарный вид конструкции.

Закрепление модели

ANSYS Main Menu → Preprocessor → Loads → Loads → Apply → Displacement → On Areas

Выбирается поверхность, определяющая одну из торцевых поверхностей микрокантилевера → **OK** (рис. 3.29).

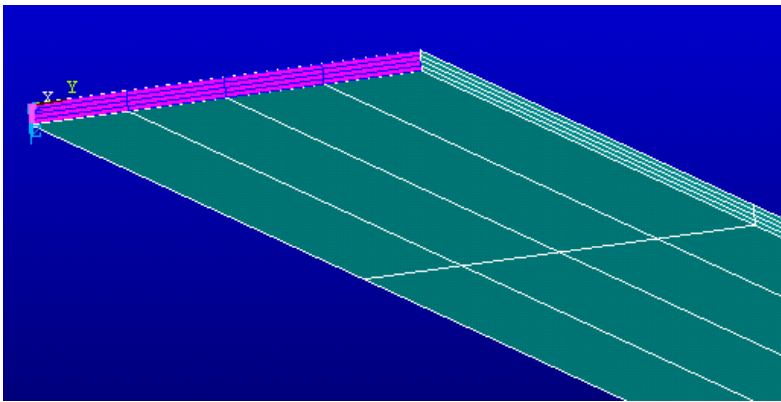


Рис. 3.29. Выбор поверхности закрепления кантилевера

В появившемся окне (рис. 3.30) в разделе «DOFs to be constrained» (определение степеней свободы) выбирается параметр UX, в пункте «Displacement value» устанавливается величина смещения, равная нулю → Apply. Аналогичным образом ограничивается смещение в направлении оси UY. Установление данных параметров означает, что моделируемый микрокантилевер при любых внешних воздействиях будет перемещаться в данном месте лишь в направлении оси OZ.

Пример результата закрепления показан на рис. 3.31.

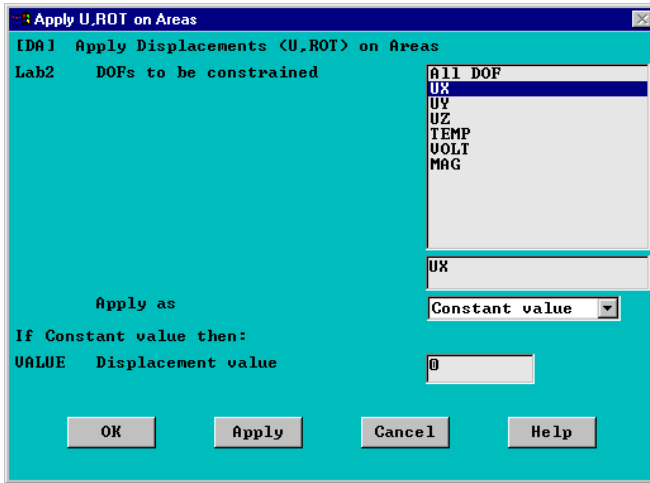


Рис. 3.30. Определение степени свободы выбранных элементов модели

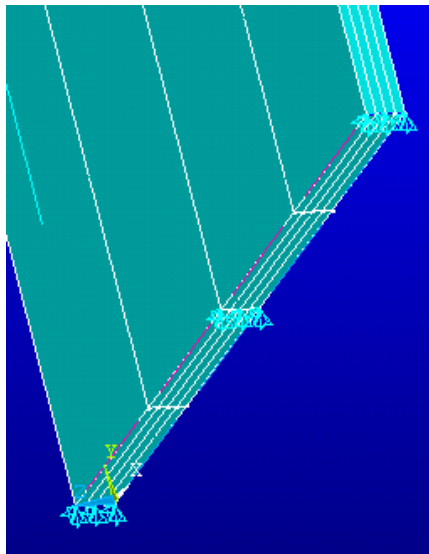


Рис. 3.31. Результат закрепления микрокантилевера

Шаг 5. Определение типа анализа и диапазона воздействующих нагрузок

Определение типа проводимого анализа (гармонический)

В соответствии с постановкой задачи моделируемый микрокантилевер одним концом крепится к пьезогенератору, генерирующему циклические колебания определенной амплитуды и частоты (гармоническое воздействие). В соответствии с этим данные циклические воздействия будут прикладываться к месту предполагаемого крепления микрокантилевера.

Выбор типа проводимого анализа:

ANSYS Main Menu → Solution → Analysis Type → New Analsis → → Harmonic

Выбор опций проводимого анализа:

ANSYS Main Menu → Solution → **Analysis Options...**

В появившемся окне Harmonic Analysis (рисунок 3.32) выбирается метод решения Full и способ представления результатов Real + + imaginary → **ОК**. Появляющееся окно «Full Harmonic Analysis» остается без изменений → **ОК**.

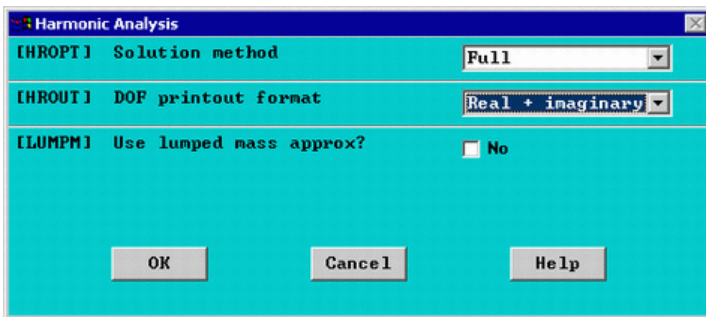


Рис. 3.32. Выбор метода решения и способа представления результатов

Ограничение области приложения нагрузки

Для того чтобы приложить воздействующие нагрузки ко всем точкам закрепленной поверхности, необходимо вначале ограничить область применения.

Utility Menu → Select → Entities...

В появившемся окне выбираются установки как показано на рис. 3.33.



Рис. 3.33. Ограничение области применения нагрузок

Приложение гармонических нагрузок

ANSYS Main Menu → Solution → Define Loads → Apply →
→ Structural → Force/Moment → On Nodes

Примечание. Ноды – это точки пересечения линий конечно-элементной сетки.

В появившемся окне «Apply F/M on Nodes» нажимается кнопка «Pick All». Затем устанавливается направление действия силы (FZ) и ее величина $50 \cdot 10^9$ (рис. 3.34).

Для продолжения расчета модели необходимо вновь «активизировать» все входящие в нее ноды. Для этого в окне «Select Entities» нажимается кнопка Sele All → OK.

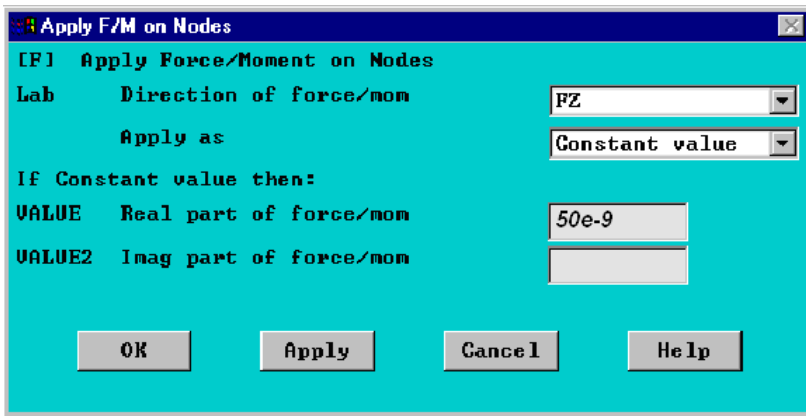


Рис. 3.34. Определение направления действия силы и ее величины

Определение диапазона исследуемых частот

ANSYS Main Menu → Solution → Load Step Opts → Time/Frequency → Freq and Substps...

В появившемся окне «Harmonic Frequency and Substep Options» устанавливается диапазон исследуемых частот 20 000–100 000 Гц и количество ступеней на каждом шаге решения Number of substep – 100. Характер изменения нагрузки на каждом шаге – Stepped → **OK** (рис. 3.35).

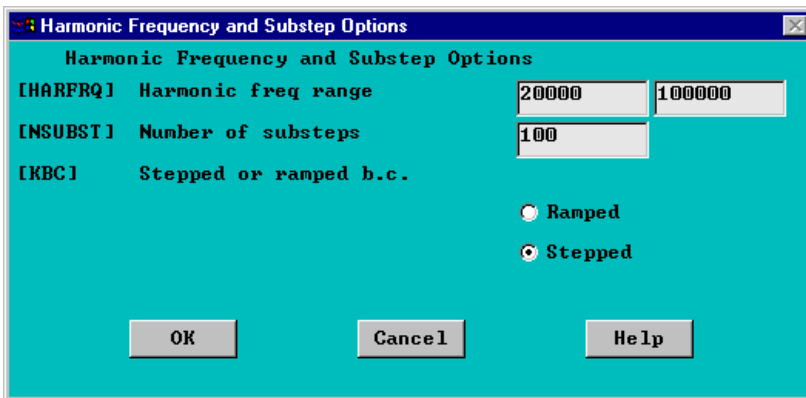


Рис. 3.35. Определение диапазона исследуемых частот

Результат приложения воздействия показан на рис. 3.36.

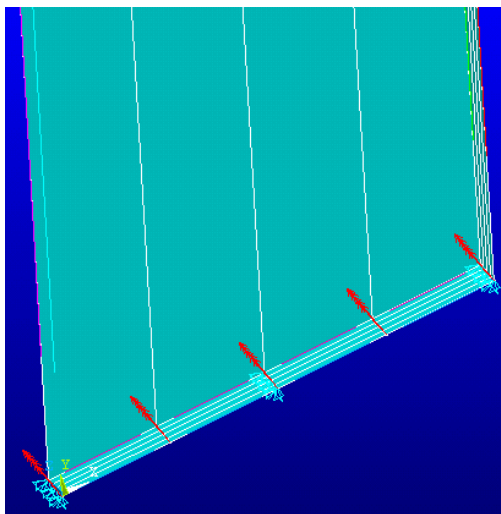


Рис. 3.36. Результат приложения воздействия

Шаг 6. Решение и просмотр результатов

ANSYS Main Menu → Solution → Solve → Current LS (load step)

В результате выполнения команды появляются два окна:

- окно «STATUS Command» содержит полную служебную информацию о решаемой задаче. После просмотра оно должно быть закрыто;
- в окне запуска решения задачи «Solve Current Load Step» нажимается **ОК**.

В случае корректно заданных исходных данных появляется окно с надписью Solution is done. Окно закрывается → Close.

Определение типа данных для отображения на графике

ANSYS Main Menu → TimeHist Postpro → Define Variables...

В появившемся окне Defined Time-History Variables нажимается клавиша **Add...** Появляется окно выбора типа отображаемых результатов Add Time-History Variable → Nodal DOF result → **ОК**.

Курсором-стрелкой выбирается точка (нода), для которой будет определяться частотная характеристика. Выбирается точка середины

микромантелефера, расположенная на его незакрепленном крае (она условно соответствует месту расположения иглы микромантелефера, рис. 3.37) → ОК.

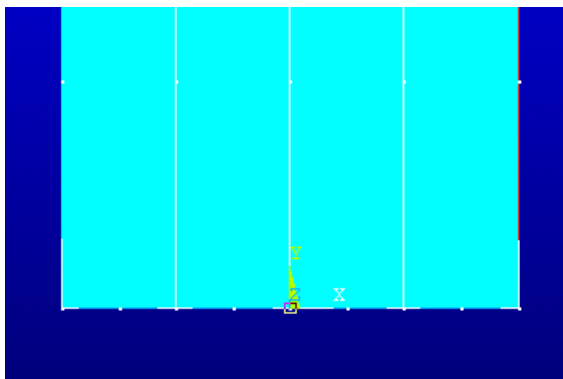


Рис. 3.37. Выбор точки, для которой определяется частотная характеристика

В появившемся окне «Define Nodal Data» выбирается направление UZ, результаты смещения вдоль которого будут отображены на графике (рис. 3.38) → ОК. Здесь же автоматически присваивается номер переменной (Ref number of variable).

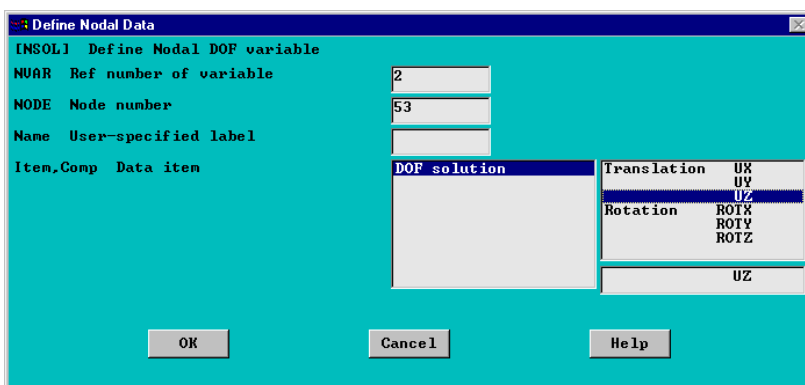


Рис. 3.38. Выбор области построения результатов

Окно «Defined Time-History Variables» закрывается → Close.

Вывод результатов моделирования на график

ANSYS Main Menu → TimeHist Postpro → Graph Variables...

В появившемся окне «Graph Time-History Variables» (рис. 3.39) в пункте «1st variable to graph» указывается номер переменной 2 → OK.

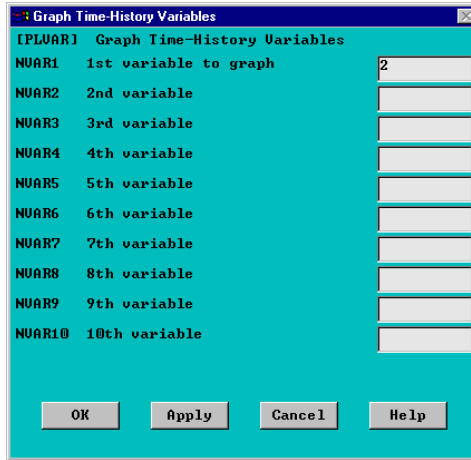


Рис. 3.39. Определение номера переменной

На графике строится амплитудно-частотная характеристика моделируемого микрокантилевера (рис. 3.40).

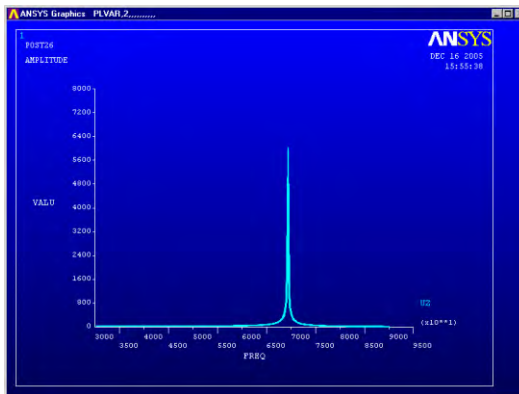


Рис. 3.40. Амплитудно-частотная характеристика моделируемого микрокантилевера в выбранной точке

Просмотр результата в логарифмических координатах

Для более детального рассмотрения результатов моделирования удобно представить значения амплитуды в логарифмическом виде.

Utility Menu → PlotCtrls → Style → Graphs → Modify Axis

В появившемся окне «Axes Modifications for Graph Plots» (рис. 3.41) в пункте «Y-axis scale» устанавливается тип шкалы – Logarithmic → OK.

Для просмотра измененного графика необходимо обновить окно результатов: Utility Menu → Plot → Replot

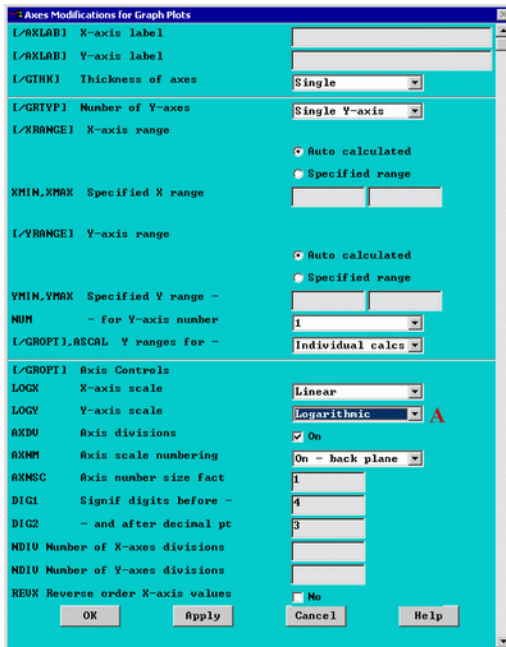


Рис. 3.41. Определение типа шкалы графика

Просмотр результата в табличном виде

Также результаты моделирования могут быть представлены в табличном виде, что позволяет детально их изучить.

ANSYS Main Menu → TimeHist Postpro → **List Variables...**

В появившемся окне «List Time-History Variables» в пункте «^{1st} variable to list» устанавливается значение переменной 2 → OK.

Сохраните полученные результаты в соответствии с описанной ранее схемой.

Получение копии изображения модели

Utility Menu → PlotCtrls → Capture Image

Появляется отдельное окно с копией рабочего окна. Изображение сохраняется в рабочую папку под оригинальным именем: File → → Save As.

Шаг 8. Выход из программы

File → **Exit...** → Quite - No Save! → OK

СОСТАВ ОТЧЕТА И ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отчет о работе должен содержать следующие элементы:

- цель работы;
- задание на лабораторную работу;
- результаты расчета модуля Юнга и коэффициента Пуассона;
- изображения полученной конструкции микроантилевера;
- изображения графических зависимостей амплитудно-частотных характеристик в линейных и логарифмических системах координат;
- значения резонансных частот микроантилевера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миронов, В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений / В.Л. Миронов. – Н. Новгород: Институт физики микро-структур, 2004. – 110 с.
2. Интернет-сайт компании «НТ-МДТ» / компания НТ-МДТ. – Режим доступа: <http://www.ntmdt.ru/>. – Дата доступа: 06.06.2009.
3. Быков, В.А. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии / В.А. Быков // Нано- и микросистемная техника. –2000. – №1. – С. 21–33.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Лабораторная работа №1</i> Технология и моделирование элементов МЭМС, получаемых микропрофилированием монокристаллического кремния.....	3
<i>Лабораторная работа №2</i> Физико-химические свойства материалов, применяемых при изготовлении сенсоров и МЭМС	34
<i>Лабораторная работа №3</i> Моделирование и изучение физических свойств материалов МЭМС с применением МКЭ-пакета ANSYS 5.7 ED	36

Учебное издание

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
И ТЕХНОЛОГИЯ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ
СЕНСОРНЫХ СТРУКТУР

Лабораторные работы для студентов специальности
1-55 01 02 «Интегральные сенсорные системы»

С о с т а в и т е л и :

СЕРГЕЙЧЕНКО Алексей Владимирович
ШЕВЧЕНОК Александр Аркадьевич

Редактор Е.О. Коржуева
Компьютерная верстка Д.К. Измайлович

Подписано в печать 27.10.2009.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 4,71. Уч.-изд. л. 3,68. Тираж 100. Заказ 771.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.