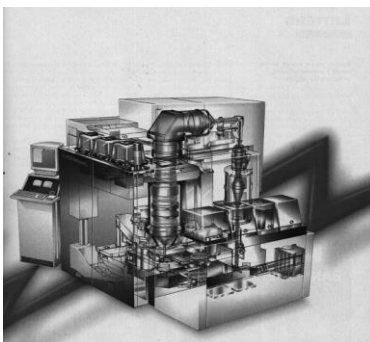


ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет»

Кафедра полупроводниковой электроники и нанoeлектроники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Основы лучевых и плазменных технологий»
для студентов направления подготовки бакалавров
210100 «Электроника и нанoeлектроника», профиля
«Микроэлектроника и твердотельная электроника»
очной формы обучения



Воронеж 2015

Составитель канд. техн. наук Т.В. Свистова

УДК 621.382.2

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Основы лучевых и плазменных технологий» для студентов направления подготовки бакалавров 210100 «Электроника и наноэлектроника», профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника» очной формы обучения / ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Т.В. Свистова. Воронеж, 2015. 65 с.

Методические указания содержат лабораторные работы, позволяющие ознакомиться с процессами взаимодействия потоков частиц и плазмы с конденсированными средами, которые используются в лучевых и плазменных технологиях при производстве изделий электронной техники, и получить первичные навыки работы на лучевых и плазменных технологических установках. Методические указания предназначены для студентов четвертого курса.

Издание подготовлено в электронном виде в текстовом редакторе MS WORD и содержится в файле «Му_лаб_раб_ОЛиПТ.docx».

Табл. 6. Ил. 28. Библиогр.: 10 назв.

Рецензент канд. техн. наук, доц. Н.Н. Кошелева

Ответственный за выпуск зав. кафедрой
д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет», 2015

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум по дисциплине «Основы лучевых и плазменных технологий» предназначен для изучения студентами процессов взаимодействия потоков частиц и плазмы с конденсированными средами, используемых в лучевых и плазменных технологиях при производстве изделий электронной техники, и получения первичных навыков работы на лучевых и плазменных технологических установках.

Микроэлектроника - наиболее бурно развивающаяся область электронной техники, катализатор научно - технического прогресса всех отраслей народного хозяйства. Современная техника предъявляет очень высокие требования к интегральным микросхемам (ИС) по надежности, быстродействию, информационной емкости и другим параметрам. Поэтому основной тенденцией развития микроэлектроники является непрерывное повышение степени интеграции и информационной емкости интегральных микросхем с одновременным уменьшением стоимости бита информации. Это достигается за счет перехода от больших интегральных схем к сверхбольшим и ультрабольшим, уменьшения размеров элементов микросхем. Уже разработаны технологии производства микросхем с размерами элементов 0,13 мкм и 0,09 мкм.

Жидкостные процессы технологической обработки материалов в процессе создания микроструктур не могут обеспечить изготовления ИС с субмикронными размерами, поэтому во всем мире ведутся поиски альтернативных технологических вариантов на базе так называемых «сухих» процессов.

Технологии с использованием низкотемпературной неравновесной газоразрядной плазмы в этом плане оказались наиболее перспективными. Первым плазменным процессом, используемым в промышленном производстве с 1968 г., было удаление фоторезиста в кислородной плазме. Примерно в эти же годы начал проявляться интерес к плазменным методам

получения пленок, в первую очередь диоксида кремния, и травлению неорганических металлов - кремния, нитрида кремния, диоксида кремния, алюминия и других. К настоящему времени разработаны и внедрены в производство изделий электронной техники целый ряд технологических процессов с использованием низкотемпературной плазмы - это обработка и удаление органических резистов, плазменное травление, плазменное получение различных пленок и слоев.

Общеизвестно, что современные интенсивные технологии являются основой технического процесса. К ним относятся и лучевые технологии, основанные на использовании концентрированных потоков энергии - лазерные, электронные и электронно-лучевые, ионные и ионно-лучевые. Их применение позволяет получать совершенно новые эффекты и результаты, принципиально недостижимые при традиционных технологиях, или значительно повысить скорость и качество обработки. Принципиально важными особенностями этих технологий являются локальность и селективность вложения энергии при огромных плотностях мощности, достигающих $10^8 - 10^{12}$ Вт/см², отсутствие механических контактов инструмента и изделия в процессе обработки, простота и широкие возможности управления энергией и размерами энергонесущего пучка, возможность полной автоматизации технологического процесса. Применение этих технологий позволяет изменять форму и размеры обрабатываемых изделий, их механические, физические, химические, электрические, оптические, магнитные и другие свойства, как в массе материала, так и на поверхности, в нанометровых слоях.

Лазерные, плазменные, электронные и ионные процессы и технологии, зародившись, в основном в недрах электронной промышленности, в настоящее время широко применяются в электронике, приборостроении, машиностроении, металлургии, химии, медицине, текстильной и легкой промышленности и ряде других отраслей.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД СКВОЗНОГО ТРАВЛЕНИЯ ПЛАСТИН КРЕМНИЯ

Цель работы: изучить способы вакуумно-плазменного травления микроструктур, освоить технологический процесс сквозного травления пластин кремния.

Используемое оборудование и материалы: установка глубокого реактивного ионного травления, кремниевые пластины с нанесенным фоторезистом.

Теоретическая часть

Плазменные анизотропные и изотропные процессы травления кремния являются одними из основных в технологии TSVs («through-silicon vias») «сквозные соединения через кремний». Такие процессы осуществляются в реакторе высокочастотным (ВЧ) индуцированным источником плазмы низкого давления с использованием газовых смесей $SF_6 + C_4F_8$ или $SF_6 + O_2$. Анизотропные процессы травления осуществляются в циклическом режиме, состоящем из двух стадий – травления кремния и защиты боковых стенок травления путем пассивации (осаждения тонкого полимерного слоя).

Вакуумно-плазменное травление (ВПТ) материалов осуществляется в неизотермической низкотемпературной газоразрядной плазме низкого давления. Низкотемпературная газоразрядная плазма может генерироваться разрядами, возбуждаемыми постоянным электрическим полем, а также разрядами на низких ($10^2 - 10^3$ Гц), высоких частотах ($10^5 - 10^8$ Гц), СВЧ ($10^9 - 10^{11}$ Гц) и в электромагнитных полях оптического диапазона частот ($10^{13} - 10^{15}$ Гц).

При возбуждении плазмы постоянным током электроды помещаются непосредственно в камере, в других случаях - вне ее. Такая плазма представляет собой слабоконцентрированную

ный газ при давлении $13,3 \cdot 10^{-2} - 13,3 \cdot 10^2$ Па с концентрацией электронов $10^{10} - 10^{12}$ см⁻³ и их энергией 1 - 10 эВ (температура порядка $10^4 - 10^5$ К). Средняя энергия тяжелых частиц газа - ионов, атомов, молекул - примерно на два порядка величины ниже (температура $(3 - 5) \cdot 10^2$ К). Для увеличения плотности плазмы и снижения рабочего давления используется магнитное поле.

Любая из частиц (возбужденная молекула, ион, свободный атом или радикал) может выполнять роль активной частицы, которая при взаимодействии с обрабатываемыми материалами образует летучее или легко распыляемое соединение, т.е. осуществлять «плазменное» травление.

Электронные соударения в плазме газового разряда являются главным механизмом создания ионов, атомов и радикалов при разрядах в инертных и молекулярных газах. В молекулярных газах ионизация осуществляется параллельно с расщеплением молекул. При этом происходит диссоциация и ионизация. Механизм процессов, протекающих в плазме, очень сложен и включает большое количество элементарных реакций и взаимодействий. Рассмотрим наиболее характерные из них.

Простая ионизация:



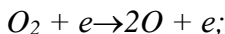
Диссоциативная ионизация:

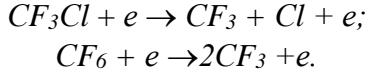


Диссоциативная ионизация с прилипанием:



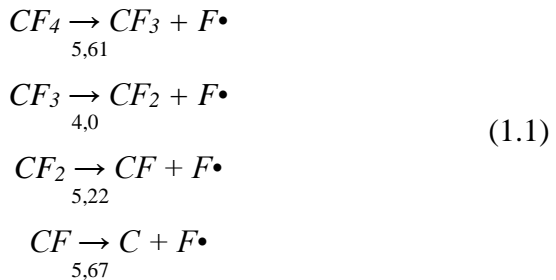
Молекулярная диссоциация без ионизации:





Большинство атомов и радикалов возникает по этому механизму, притом возникновение атомов и радикалов в молекулярных газах необходимо для осуществления травления, так как молекулярные рабочие газы почти всегда обладают низкой реакционной способностью. Например, CF_4 не взаимодействует с Si вплоть до температуры плавления ($1412\text{ }^\circ\text{C}$). Однако в плазме разряда CF_4 образует атомарный фтор, вступающий в реакцию с Si при комнатной температуре.

Если основой плазмы является инертный газ, то она содержит ионы, электроны и атомы, в том числе и возбужденные. Если же используются молекулярные газы, то присутствуют также свободные атомы и радикалы, имеющие на внешней электронной оболочке неспаренный электрон и вследствие этого обладающие высокой химической активностью. В зоне ВЧ разряда молекулы галогеносодержащих соединений, которые в обычном состоянии при температурах до $1000\text{ }^\circ\text{C}$ не способны травить материалы, под воздействием неупругих ударов электронов диссоциируют и превращаются в реакционноспособные радикалы. В технологии ИМС чаще всего в качестве источника радикалов используется четырехфтористый углерод. Диссоциация этих молекул идет согласно следующим уравнениям:



(точкой обозначены неспаренные электроны, под стрелками указаны энергии разрыва связей в электрон-вольтах).

Различают три основных вида взаимодействия частиц плазмы с поверхностью материала:

1. **Ионное травление** (ИТ), при котором слой материала удаляется только в результате физического распыления высокоэнергетическими (более 500 эВ) ионами газа без химического взаимодействия между ними. Обычно такими ионами являются ионы инертного газа аргона (Ar^+).

2. **Плазмохимическое травление** (ПХТ), напротив, происходит только в результате химического взаимодействия между активными частицами реакционного газа и поверхностными атомами материала. Причем, если обрабатываемый материал находится в области плазмы разряда, то химические реакции активируются бомбардировкой низкоэнергетическими электронами, ионами, фотонами. Если же плазма отделена от обрабатываемого материала, идет лишь химическое взаимодействие с атомами и радикалами.

3. **Ионно-химическое травление** (ИХТ) или **реактивное ионное травление** является как бы суммарным взаимодействием первых двух. Поверхностные слои материала удаляются как под действием распыления, так и при химическом взаимодействии с химически активными частицами (ХАЧ). В этом случае трудно выделить вклад физического или химического механизмов травления. Можно принять условно, что при энергии ионов $E < 100$ эВ будут преобладать плазмохимические процессы, тогда как с ростом $E > 100$ эВ возможно преобладание ионно-химических явлений.

Если обрабатываемые подложки помещаются на электродах и соприкасаются с плазмой разряда, то травление называется ионно-плазменным. **Ионно-плазменное травление** (ИПТ) обычно осуществляется в высокочастотных диодных системах (рис. 1.1).

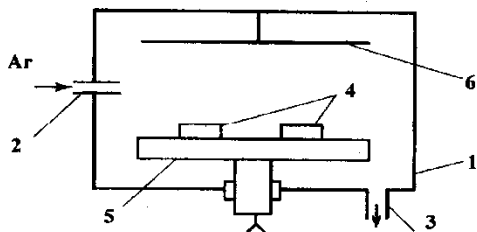


Рис. 1.1. Схема установки ионного травления с планарным реактором: 1 - вакуумная камера; 2 - напуск рабочего газа; 3 – откачное отверстие; 4 - обрабатываемая пластина; 5 - катод; 6 – анод

Установка содержит камеру низкого давления с двумя плоскими электродами, откачную систему, устройство регулирования параметров газовой среды, источник напряжения. Пластина расположена на электроде (катоде), к которому прикладывается ВЧ напряжение. Электрическое поле ускоряет ионы в направлении, перпендикулярном плоскости пластины, и при типичных рабочих давлениях (1,33 - 13,3 Па) степень анизотропии травления очень высока (порядка 10 - 100).

При *ионно-лучевом травлении* (ИЛТ) материал помещен в вакуумную зону, отделенную от области плазмы. В методе ионно-лучевого травления источником ионов обычно является разряд постоянного тока, но область разряда физически отделена от подложек системой сеток, на которые подаются потенциалы смещения, обеспечивающие экстрагирование ионного пучка (Ar^+) из разряда (рис. 1.2).

Для нейтрализации ионного пучка на его пути размещается термокатод. При ионно-лучевом травлении тепловое и радиационное воздействие меньше, чем при ионном травлении.

Процессы ионного травления благодаря удалению материала в результате физического распыления являются универсальными, обеспечивают высокую анизотропию процесса

травления. Применение инертных газов делает наиболее безопасными условия труда, устраняет проблему загрязнения окружающей среды выхлопными газами. Ограничениями метода являются низкая селективность, достаточно высокий уровень радиационного и теплового воздействия на подложку.

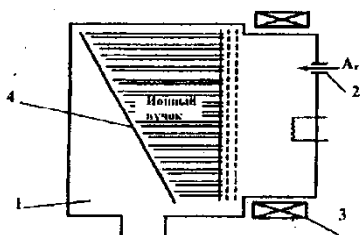


Рис. 1.2. Схема установки ионно-лучевого травления:
1 - вакуумная камера; 2 - напуск рабочего газа;
3 - магнитная система; 4 – подложкодержатель

Поверхностные слои материала удаляются только в результате химических реакций между обрабатываемым материалом и химически активными частицами, к которым относятся свободные атомы и радикалы. Если обрабатываемый материал находится в области плазмы разряда, то травление называют *плазменным*. В этом случае химические реакции травления будут активироваться низкоэнергетическими электронной и ионной бомбардировками. Для травления с высоким разрешением используются реакторы с электродами в виде параллельных пластин (рис. 1.3).

Уровень удержания плазмы относительно высок, так как электроды расположены близко друг к другу и имеют размеры, соизмеримые с размером реактора. Подложки помещаются на заземленном электроде. Давление рабочего газа от 13,3 до 1330 Па. Если подложки находятся в вакуумной зоне и отделены от области плазмы, то травление производится ХАЧ без активации электронной и ионной бомбардировками и называется *радикальным*.

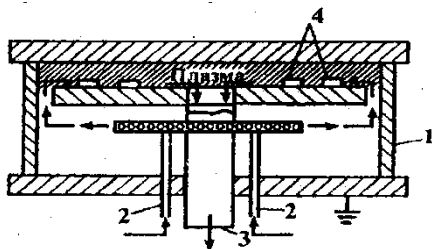


Рис. 1.3. Схема установки плазменного травления:
 1 - вакуумная камера; 2 - напуск рабочего газа;
 3 - откачное отверстие; 4 - обрабатываемые пластины

Разделение плазмы и подложки производится с помощью перфорированных металлических экранов, магнитного поля. Таким образом, при радикальном травлении химические реакции не осложняются воздействием заряженных частиц. Схема установки радикального травления показана на рис. 1.4.

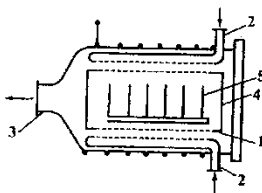


Рис. 1.4. Схема установки радикального травления:
 1 - вакуумная камера; 2 - подача газа; 3 - откачное отверстие;
 4 - перфорированный цилиндр; 5 - подложки; 6 - индуктор

Плазмохимическое травление обладает наибольшей селективностью и оказывает наименьшее тепловое и радиационное воздействие на обрабатываемые структуры, но имеет низкий показатель анизотропии (2 - 5), что не позволяет получать субмикронные размеры элементов. Основная область применения плазменного травления ввиду наименьшего теплового воздействия - травление органических резистов, изго-

товление неорганических масок для процессов ионно-плазменного травления.

Поверхностные слои материала удаляются в результате как физического распыления энергетическими ионами, так и химических реакций между ХАЧ и поверхностными атомами материала. Если обрабатываемый материал находится в области плазмы, то травление называется **реактивным ионно-плазменным** (РИПТ). На поверхность материала в этом случае также воздействуют электронная и фотонная бомбардировки.

РИПТ осуществляется в планарных или с коаксиальными цилиндрическими электродами реакторах, в основном, двухэлектродных ВЧ системах с катодной связью, но в качестве рабочего газа используются не инертные газы, как при ИТ, а молекулярные газы, как при ПТ (рис. 1.5). Таким образом, травление при РИПТ производится в плазме молекулярного активного газа. Давление рабочего газа относительно низкое 0,33 - 13,3 Па.

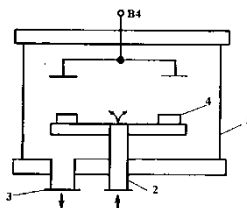


Рис. 1.5. Схема установки РИПТ: 1 - вакуумная камера; 2 - напуск рабочего газа; откатное отверстие; 4 - обрабатываемые пластины

Если обрабатываемые подложки находятся в вакуумной зоне и отделены от области плазмы, то процесс травления называется **реактивным ионно-лучевым** (РИЛТ). В этом случае поверхность материала подвергается воздействию только молекулярных или атомарных ионов. Установка РИЛТ аналогична установке ИЛТ. Однако вместо инертных газов источ-

никами ионов служат молекулярные газы, так же как в методах ПТ и РИПТ.

В процессах ионно-химического травления трудно выделить вклад физического и химического механизмов, так как физическое распыление активирует поверхность материала, повышая скорость химических реакций, которые, в свою очередь, ослабляют химические связи поверхностных атомов, увеличивая скорость их физического распыления. Однако заметных скоростей физического распыления достигает при энергиях больше 100 эВ. Поэтому энергия ионов $E_{и} = 100$ эВ является условной границей между процессами ИХТ и ПХТ. При $E_{и} < 100$ эВ - травление ПХТ, при $E_{и} > 100 - 500$ эВ - ИХТ, а при $E = (500 - 2000)$ эВ - ИТ.

ПХТ представляет собой гетерогенную химическую реакцию, происходящую на границе двух фаз: твердой и газообразной (или плазмообразной). Это позволяет при анализе ПХТ использовать общие физико-химические положения, разработанные в теории гетерогенных реакций с учетом специфики процесса.

В ПХТ можно выделить следующие стадии:

- доставка молекул активного газа в зону разряда;
- превращение молекул газа в реакционноспособные радикалы под воздействием электронов разряда;
- доставка радикалов к поверхности материала, подвергаемого травлению;
- адсорбция радикалов на поверхности материала;
- химическая реакция радикалов с поверхностными атомами;
- десорбция продуктов реакции с поверхности материала;
- отвод продуктов реакции из реактора.

Для переноса изображения, травления отверстий необходимо, чтобы материал подложки стравливался быстрее маскирующего слоя. Часто бывает важно не допустить травления

материалов, примыкающих сбоку или снизу к обрабатываемой области. Следовательно, необходимо обеспечить условия, при которых в данном составе плазмы с разной скоростью будут травиться как разные материалы, так и один и тот же материал в разных направлениях. Свойство материала травиться различно по разным направлениям называется *анизотропией*. В технологии плазменного травления показатель анизотропии определяется отношением скоростей травления в вертикальном и горизонтальном направлениях относительно поверхности материала:

$$A = 1 - V_x / V_d \quad (1.2)$$

где A - показатель анизотропии; V_x - скорость травления параллельно плоскости поверхности; V_d - скорость травления перпендикулярно плоскости поверхности.

Выражая уравнение (1.2) через параметры элемента, формируемого к концу процесса травления можно записать (рис. 1.6)

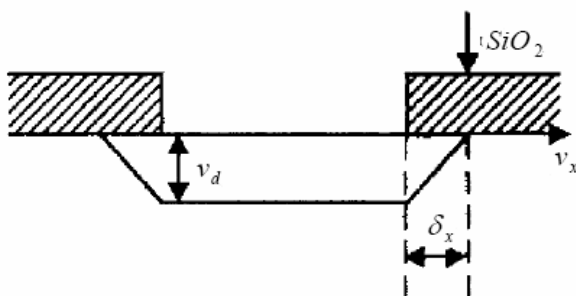


Рис. 1.6. Боковое подтравливание под маску при ПХТ

$$A = 1 - \delta_x / d, \quad (1.3)$$

где δ_x - смещение, d - толщина слоя. Таким образом, для изотропного травления $A = 0$, а при $1 \geq A > 0$ реализуется ани-

зотропное травление. На практике термин «анизотропное травление» часто используют для обозначения экстремально-го случая $A = 1$ (рис. 1.7).

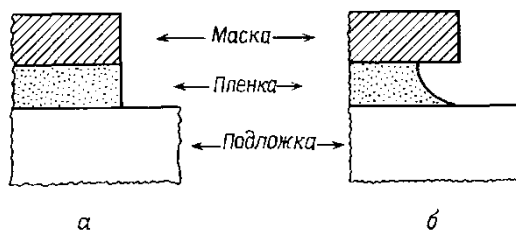


Рис. 1.7. Идеальные профили травления для *a* - полностью анизотропного ($A = 1$) и *б* - изотропного ($A = 0$) травления при отсутствии подтравки маски

Анизотропия травления увеличивается при использовании ионно-плазменного или ионно-лучевого травления под действием бомбардировки поверхности ионами. Правильный подбор состава газовой смеси также существенно влияет на анизотропию травления, в частности, можно вводить определенные добавки в рабочий газ, которые связывают активные вещества на боковых стенках.

Селективность S или **избирательность** травления определяется как отношение скоростей травления различных материалов, например: маски и подложки, в одном составе плазмы.

Селективность по отношению к материалу резиста необходимо учитывать при контроле размеров формируемых элементов. Селективность по отношению к материалу подложки определяет качество и процент выхода годных приборов.

Селективность по отношению к материалу подложки зависит от однородности скорости травления как подложки, так и маски, однородности толщины подложки, степени перетравливания, профиля края элемента маски, анизотропии скоро-

сти травления маски и максимального допустимого ухода размеров вытравливаемого элемента.

Рассмотрим процесс травления слоя, средняя толщина которого составляет h_c , а однородность толщины определяется безразмерным параметром Δh_c , так что при $0 \leq \Delta h_c \leq 1$ максимальная толщина пленки равна $h_c(1 + \Delta h_c)$, а минимальная толщина составляет $h_c(1 - \Delta h_c)$. Предположим, что средняя скорость травления V_c , а однородность скорости травления определяется интервалом скоростей $V_c(1 \pm \Delta V_c)$, где ΔV_c - безразмерный параметр ($0 \leq \Delta V_c \leq 1$).

Для оценки необходимой селективности, обеспечивающей заданные размеры с учетом вытравливания маски, зададим наихудшие условия - максимальная скорость травления маски и минимальная скорость травления наиболее толстых участков слоя. В этом случае время травления слоя на всю толщину

$$t_c = \frac{h_c(1 + \Delta h_c)}{V_c(1 - \Delta V_c)}. \quad (1.4)$$

Если продолжительность перетравливания обозначить Δt , то продолжительность травления слоя возрастет до $t_c(1 + \Delta t)$ и выражение для полной продолжительности травления t_t можно записать в виде

$$t_t = \frac{h_c(1 + \Delta h_c) \cdot (1 + \Delta t)}{V_c(1 - \Delta V_c)} \quad (1.5)$$

В течение этого времени происходит растравливание маски (рис. 1.8).

Если максимальные скорости вертикального и бокового травления маски обозначить V_y^M и V_x^M , то края элемента маски смещается на максимальное расстояние $W = 2\Delta x$, равное

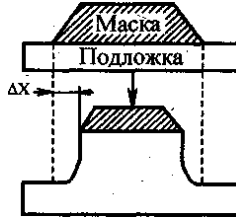


Рис. 1.8. Формирование контура элемента

$$\frac{W}{2} = (V_y^M \cdot ctg(\theta) + V_x^M) \cdot t_t \quad (1.6)$$

или, подставляя выражение для t_t из уравнения (1.5), получим

$$W = 2 \frac{V_y^M}{V_c} \frac{h_c(1 + \Delta h_c) \cdot (1 + \Delta t)}{(1 - \Delta V_c)} \left(ctg(\theta) + \frac{V_x^M}{V_y^M} \right) \quad (1.7)$$

Скорость травления маски определяется вертикальной скоростью травления. В рассматриваемом случае взята максимальная величина V_y^M , что соответствует наиболее жестким требованиям к селективности, необходимой для достижения заданного значения W .

Скорость травления маски можно определить с помощью параметра однородности ΔV_M : $V_y^M = V_M (1 + \Delta V_M)$, где V_M – средняя скорость травления маски. Далее, учитывая, что $S_{CM} = V_c / V_y^M$ – заданная селективность травления пленки по отношению к маске и что $V_x^M / V_y^M = 1 - A_M$, где A_M – степень анизотропии травления маски; – максимальная скорость травления маски, уравнение (1.7) можно переписать в виде

$$S_{CM} = \frac{2h_c(ctg\theta + (1 - A_M))}{W} U_{CM} \quad (1.8)$$

где U_{CM} – фактор, учитывающий наихудшее совпадение всех неоднородностей

$$U_{CM} = \frac{(1 + \Delta h_c) \cdot (1 + \Delta t) \cdot (1 + \Delta V_M)}{(1 - \Delta V_c)}. \quad (1.9)$$

Для фоторезистивных масок угол θ определяется применяемым методом литографии и может быть изменен после экспозиционной обработкой. Угол 60° является типичным для проекционной литографии, а угол 90° - для контактной. Маски с вертикальными стенками краев элементов ($\theta = 90^\circ$) характерны также для систем с использованием многослойных резистов.

Аналогично можно оценить необходимую селективность травления материала подложки для наилучших условий (наиболее тонкая и быстро стравливаемая область пленки лежит на наиболее быстро стравливаемой подложке):

$$S_{СП} = 2 \cdot \frac{h_c}{h_n} U_{СП}, \quad (1.10)$$

где h_n - максимально допустимая глубина травления подложки;

$$U_{СП} = \frac{\Delta V_c (2 + \Delta t + \Delta h_c) + \Delta h_c (2 + \Delta t) + \Delta t}{(1 - \Delta V_c^2)}. \quad (1.11)$$

Оценка селективности травления путем выбора соответствующей газовой смеси для ПХТ позволяет получить нужный профиль края маски для формирования определенной структуры элемента ИМС. В каждом случае необходимо специально подбирать условия для того, чтобы обеспечить нужную селективность травления подложки и маски. На рис. 1.9 показано влияние селективности травления маски относительно подложки $S_{ПМ}$ на профиль травления. При $S_{ПМ} < 1$ (рис. 1.9, а) угол ϕ , вытравливаемый в подложке, составляет 60° при перетравливании на 20 % по времени, что обеспечивает доста-

точно крутой профиль. При $S_{\text{пм}} > 1$ (рис. 1.9, б) угол ϕ оказывается значительно меньшим и обеспечивает плавный переход от вытравленной поверхности к основной плоскости структуры.

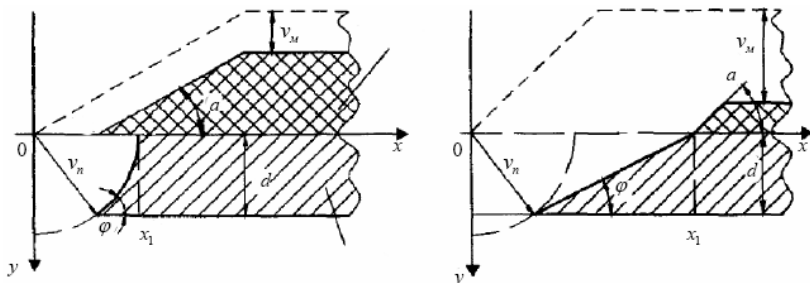


Рис. 1.9. Профили травления при ПХТ для $S_{\text{пм}} < 1$ (а) и $S_{\text{пм}} > 1$ (б)

Селективность травления существенно зависит не только от состава газа, но также от мощности разряда, энергии и угла падения ионов. Важную роль играет материал электродов и конструкция реакции.

Таким образом, высокий показатель анизотропии и высокая селективность при травлении являются необходимым условием формирования элементов субмикронного размера. Кроме того, при травлении должны быть обеспечены низкий уровень загрязнения поверхности материала и искажения получаемого рельефа, воспроизводимость скорости травления, высокая равномерность. При травлении должно отсутствовать деградирующее влияние на электрофизические параметры обрабатываемых структур. Этим требованиям в значительной мере удовлетворяют процессы вакуумно-плазменного травления материалов, в которых используются энергетические и химические активные частицы, образующиеся в плазме газового разряда низкого давления.

На скорость травления в разряде галогеносодержащих газов существенное влияние оказывают факторы, зависящие от технологических параметров процесса и конструктивных особенностей оборудования:

- состав реакционных газов;
- давление в реакционной камере;
- величина подводимой мощности;
- температура обрабатываемой поверхности;
- площадь обрабатываемых пластин и другие.

Реакционными газами являются: четырехфтористый углерод CF_4 , монофтортрихлорметан $CFCl_3$ (фреон-11), дифтордихлорметан CF_2Cl_2 (фреон-12), монофтордихлорметан $CHFCl_2$ (фреон-21) и другие соединения галогенов с углеродом, а иногда с серой (SF_6). Кроме того, в процессе травления могут участвовать газы (особенно кислород и водород), остающиеся в разрядной камере после ее откачки.

При исследовании зависимости скорости травления от давления было замечено, что с началом разряда происходит быстрое повышение давления в реакционной камере, причем изменение прироста давления ΔP и скорости давления в зависимости от первоначального давления P_0 имеет аналогичный характер (рис. 1.11).

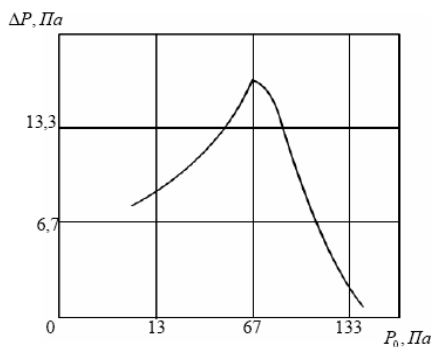


Рис. 1.10. Прирост давления ΔP в реакторе после включения разряда

Установлено, что для каждого газа имеется такое давление, при котором скорость травления материала максимальна и не зависит от его природы.

Величина подводимой мощности, по-видимому, будет определять скорость (а значит, и энергию) электронов в плазме, от чего в свою очередь зависит скорость образования активных радикалов. С увеличением подводимой ВЧ мощности возрастает число неупругих соударений электронов с атомами или молекулами активного газа, приводящих к резкому росту числа возбужденных и ионизированных фрагментов в плазме, что приводит к увеличению скорости ПХТ.

С ростом температуры материала увеличивается скорость гетерогенных реакций, протекающих на его поверхности, из-за возрастающей энергии поверхностных атомов материала, вступающих в химическую реакцию с радикалами активного газа, и скорость травления увеличивается.

В плазме, полученной при постоянных технологических режимах, скорость травления снижается по мере увеличения числа пластин, что объясняется увеличением площади, на которой осуществляется гетерогенная реакция, при сохранении числа активных радикалов, генерируемых в единицу времени.

Энергия и угол падения ионов влияют на коэффициент распыления, определяемый как среднее число атомов поверхности, выбиваемых одним ионом. Интенсивность распыления монотонно возрастает с увеличением энергии ионов в интервале энергий, соответствующих «сухому» травлению (0,1 - 2 кэВ). Ионы, падающие на поверхность под наклонным углом, характеризуются большим коэффициентом распыления по сравнению с нормально падающими ионами, так как такие ионы передают большую долю энергии приповерхностным атомам.

При ИХТ, ПТ ионы, соударяющиеся с поверхностью, увеличивают скорость распыления. Как показывает анализ этих процессов, это увеличение объясняется, в основном, не

физическим распылением, а стимуляцией или возбуждением химических реакций на поверхности обрабатываемого материала. Влияние ионного облучения на скорость травления обусловлено физическими процессами, основными из которых являются:

- образование дефектов решетки, ускоряющих хемсорбцию или реакцию;
- непосредственная диссоциация травления газов под действием ионного облучения (Cl_2 , XeF_2);
- удаление нелетучих остатков под действием ионной бомбардировки.

Состав рабочего газа - основной фактор, определяющий скорость, селективность, анизотропию ВПТ. В табл. 1.1 приведены обычно используемые для травления газы для основных материалов, применяемых в технологии СБИС.

Таблица 1.1

Газы, применяемые для «сухого» травления

Материал	Газы
<i>Si</i>	$CF_4; CF_4 + O_2; SF_6; SF_6 + O_2;$ $NF_3; Cl_2; CCl_4; CCl_2F$
<i>SiO_2, Si_3N_4</i>	$CF_4; CF_4 + H_2; C_2F_6; C_3F_8; CHF_3 CCl_4;$
<i>Al, Al - Si,</i> <i>Al-Cu</i>	$CCl_4 + Cl_2;$ $SiCl_4; BCl_4$
Углерод (органические материалы)	O_2, H_2 и их смеси с азотом и инертными газами
Материалы группы A^3B^3	$CCl_4; CF_2Cl_2$ и их смеси с кислородом и инертными газам
<i>Cr, Au, Pt</i>	$CCl_4; CF_3Cl, CF_2Cl_2$ и их смеси с кислородом и инертными газами
Сталь, <i>Fe, Ni, Cu,</i> <i>Ag,</i> гранаты	<i>Ar, Xe</i>

Для процесса травления в технологии ИЭТ применяются в основном галогеносодержащие газы, за исключением травления фоторезистов, где используется плазма кислорода. Вы-

бор этих газов обусловлен образованием обрабатываемыми материалами летучих соединений с галогенами при температурах, близких к комнатной. Для реактивного травления часто применяются многокомпонентные смеси, состоящие из основной компоненты с добавками для обеспечения требуемой скорости травления, заданной селективности, анизотропии, профиля края. Влияние контролируемых добавок на параметры процесса травления зависит от материала, который подвергается травлению.

Добавка кислорода к фторуглеродным соединениям сначала повышает скорость травления, так как увеличивается концентрация атомов F за счет уменьшения скорости рекомбинации F (вследствие образования COF_2 , CO , CO_2), а также удаляется полимерная пленка на поверхности обрабатываемого материала с образованием CO , CO_2 . Однако при увеличении концентрации O_2 относительная концентрация F снижается и увеличивается адсорбция атомов кислорода на поверхности материала, в результате доступ атомов F к поверхности может частично блокироваться. Такая блокировка объясняет уменьшение скорости травления поверхности Si при концентрации $O_2 > 12\%$, в то время как скорость травления SiO_2 уменьшается только при концентрации $O_2 > 20\%$ (рис. 1.11).

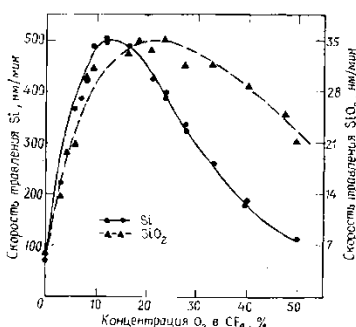


Рис. 1.11. Влияние добавок в плазму O_2 в плазму CF_4 на скорость травления Si и SiO_2

Таким образом, помимо изменения скорости травления добавка O_2 может существенно изменить селективность травления одного материала по отношению к другому. При травлении ионами Ar^+ незначительная добавка O_2 резко снижает скорость травления.

Добавка водорода в плазму фторуглеродных газов уменьшает концентрацию атомов F и, следовательно, увеличивает концентрацию склонных к полимеризации ненасыщенных фторуглеродных частиц, так что при значительной добавке H_2 можно превратить травление в процесс осаждения полимерных пленок. Таким образом, при добавке H_2 (до 30 %) происходит резкое снижение скорости травления Si и почти не изменяется скорость травления SiO_2 , что позволяет добиться высокой селективности (рис. 1.12).

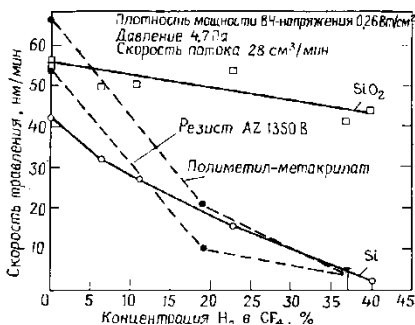


Рис. 1.12. Влияние добавок в плазму H_2 в плазму CF_4 на скорость травления Si и SiO_2

Добавка небольших количеств хлорсодержащих газов CF_2Cl_2 , $C_2F_3Cl_2$, $CFCl_3$ резко снижает величину подтравки под маску фоторезиста (менее 0,3 мкм).

На скорость и селективность ВПТ большое влияние оказывают неконтролируемые добавки, т.е. давление остаточных газов и паров. Так, наличие в реакторе небольшого количества паров воды и, кислородсодержащих газов вносит неопреде-

ленность в процесс травления. Загрязнение насосов парами рабочих жидкостей может вызывать появление полимерных пленок.

Давление газа, частота электрического поля, температура подложки - независимые параметры, которые влияют на процесс ВПТ различным образом, однако можно указать несколько общих тенденций. Понижение давления или частоты приводит к увеличению средней энергии электронов и ионов. Рабочие частоты лежат в интервале 10 кГц - 30 МГц. Температурная зависимость скорости ВПТ определяется, главным образом, влиянием температуры на скорость протекания химических реакций. Температура влияет и на селективность, так как величина энергии активации зависит от вида материала. Для обеспечения однородных и воспроизводимых результатов необходимо контролировать температуру подложки.

При реактивном травлении иногда наблюдается загрузочный эффект - уменьшение скорости травления при увеличении суммарной площади поверхности, подвергаемой травлению. Загрузочный эффект имеет место в тех случаях, когда активные компоненты быстро вступают в реакцию с обрабатываемым материалом, но обладают сравнительно большим временем жизни в отсутствие этого материала. В этом случае доминирующим механизмом потерь активных компонентов является само травление, поэтому, чем больше площадь, подвергаемая травлению, тем выше скорость потерь, и скорость травления уменьшается с увеличением площади поверхности травления.

Практическая часть

Вакуумная установка плазменного травления «ПЛАЗМА ТМ-200» предназначена для плазмохимического и реактивно-ионного травления проводящих и диэлектрических материалов, в том числе для формирования наноструктур и микроэлектронных механических систем (рис. 1.13, 1.14).



Рис. 1.13. Вакуумная установка плазменного травления
«ПЛАЗМА ТМ-200»

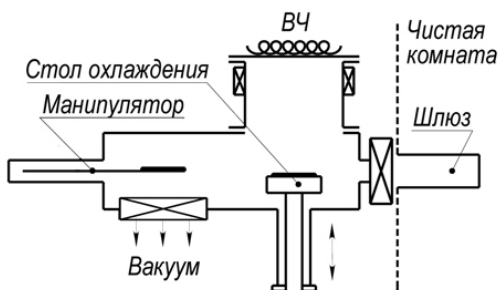


Рис. 1.14. Схема установки плазменного травления
«ПЛАЗМА ТМ-200»

Особенности установки:

высокочастотный источник индуктивно связанной плазмы (ICP);

шлюзовая камера поштучной загрузки – выгрузки подложек или подложкодержателя диаметром до 200 мм (200 x 200 мм);

безмасляная химически стойкая система откачки на базе турбомолекулярного и форвакуумного насосов;

гелиевое охлаждение подложек на рабочем столе;

микропроцессорная система управления;
возможность встраивания в «чистую» комнату;
возможность объединения в кластерный комплекс - стыковка отдельных установок через шлюзовую камеру или с платформой транспортно-загрузочного модуля.

Характеристики установки.

Неравномерность травления - + 2 %.

Скорость анизотропного травления:

– кремния. – (1 – 3) мкм/мин

– двуокиси кремния, кварца, стекла «пирекс» - (0,5 – 1) мкм/мин.

Аспектное соотношение 1/10 – 1/30.

Порядок выполнения

1. Изучить особенности и параметры установки глубокого реактивного ионного травления.

2. Проанализировать какие факторы и как влияют на скорость и селективность плазмохимического травления материалов.

3. Провести процесс плазмохимического травления отверстий.

4. Определить продолжительность вытравливания отверстия требуемой глубины по формуле (1.4), используя данные для расчета, приведенные в табл. 1.2.

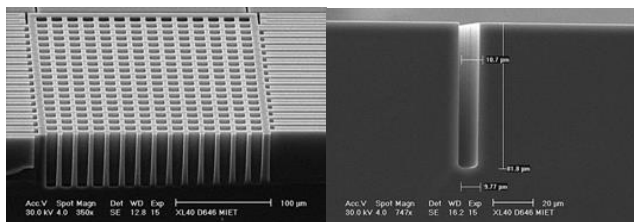


Рис. 1.15. Примеры профилей травления кремниевых структур через фоторезистивную маску

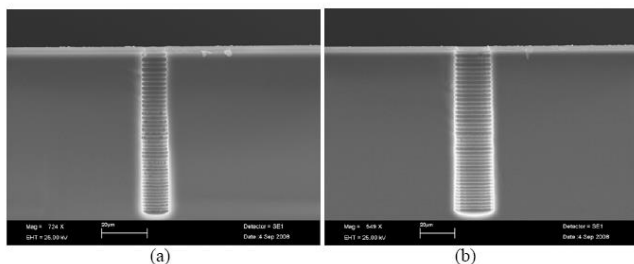


Рис. 1.16. Отверстие диаметром 10 мкм, протравленное на глубину 72 мкм при скорости травления 14,3 мкм/мин (а). Отверстие диаметром 20 мкм, протравленное на глубину 96 мкм при скорости травления 19.0 мкм/мин (б)

5. Рассчитать и построить зависимости требуемой селективности травления по отношению к маске фоторезиста S_{CM} от отношения толщины слоя h_c к величине растравливания маски W для различных профилей краев элементов маски и различных значений анизотропии травления маски по формулам (1.8) и (1.9).

6. Рассчитать и построить зависимости требуемой селективности травления подложки $S_{СП}$ от отношения толщины слоя h_c к допустимой глубине травления подложки h_n , используя формулы (1.10) и (1.11).

Таблица 1.2

Данные для расчета

Вариант	Данные для расчета
1	$h_c = 60$ мкм; $V_c = 21$ мкм/мин; $\Delta h_c = 5\%$; $\Delta V_c, \Delta V_M = 10\%$; $\Delta t = 10\%$; $\theta = 60^\circ; 90^\circ$; $A_M = 0; 1$; $h/W = 0 - 10$; $h_c/h_n = 0 - 10$ при $\Delta t = 0; 10\%$
2	$h_c = 72$ мкм; $V_c = 14,3$ мкм/мин; $\Delta h_c = 7\%$; $\Delta V_c, \Delta V_M = 9\%$; $\Delta t = 11\%$; $\theta = 60^\circ; 90^\circ$; $A_M = 0,2; 1$; $h/W = 0 - 10$; $h_c/h_n = 0 - 10$ при $\Delta t = 10; 15\%$

Продолжение табл. 1.2

Вариант	Данные для расчета
3	$h_c = 96$ мкм; $V_c = 20$ мкм/мин; $\Delta h_c = 6$ %; $\Delta V_c, \Delta V_M = 8$ %; $\Delta t = 12$ %; $\theta = 60^\circ; 90^\circ$; $A_M = 0,3; 1$; $h/W = 0 - 10$; $h_c/h_n = 0 - 10$ при $\Delta t = 0$; 12 %
4	$h_c = 60$ мкм; $V_c = 21$ мкм/мин; $\Delta h_c = 8$ %; $\Delta V_c, \Delta V_M = 7$ %; $\Delta t = 13$ %; $\theta = 60^\circ; 90^\circ$; $A_M = 0,4; 1$; $h/W = 0 - 10$; $h_c/h_n = 0 - 10$ при $\Delta t = 0$; 13 %
5	$h_c = 72$ мкм; $V_c = 14,3$ мкм/мин; $\Delta h_c = 9$ %; $\Delta V_c, \Delta V_M = 6$ %; $\Delta t = 14$ %; $\theta = 60^\circ; 90^\circ$; $A_M = 0,5; 1$; $h/W = 0 - 10$; $h_c/h_n = 0 - 10$ при $\Delta t = 0$; 14 %
6	$h_c = 96$ мкм; $V_c = 20$ мкм/мин; $\Delta h_c = 10$ %; $\Delta V_c, \Delta V_M = 5$ %; $\Delta t = 15$ %; $\theta = 60^\circ; 90^\circ$; $A_M = 0,6; 1$; $h/W = 0 - 10$; $h_c/h_n = 0 - 10$ при $\Delta t = 0$; 15 %
7	$h_c = 60$ мкм; $V_c = 21$ мкм/мин; $\Delta h_c = 5$ %; $\Delta V_c, \Delta V_M = 6$ %; $\Delta t = 16$ %; $\theta = 60^\circ; 90^\circ$; $A_M = 0,7; 1$; $h/W = 0 - 10$; $h_c/h_n = 0 - 10$ при $\Delta t = 0$; 16 %
8	$h_c = 72$ мкм; $V_c = 14,3$ мкм/мин; $\Delta h_c = 6$ %; $\Delta V_c, \Delta V_M = 7$ %; $\Delta t = 17$ %; $\theta = 60^\circ; 90^\circ$; $A_M = 0,8; 1$; $h/W = 0 - 10$; $h_c/h_n = 0 - 10$ при $\Delta t = 0$; 17 %
9	$h_c = 96$ мкм; $V_c = 20$ мкм/мин; $\Delta h_c = 7$ %; $\Delta V_c, \Delta V_M = 8$ %; $\Delta t = 18$ %; $\theta = 60^\circ; 90^\circ$; $A_M = 0; 1$; $h/W = 0 - 10$; $h_c/h_n = 0 - 10$ при $\Delta t = 0$; 18 %
10	$h_c = 60$ мкм; $V_c = 21$ мкм/мин; $\Delta h_c = 8$ %; $\Delta V_c, \Delta V_M = 9$ %; $\Delta t = 19$ %; $\theta = 60^\circ; 90^\circ$; $A_M = 0,3; 1$; $h/W = 0 - 10$; $h_c/h_n = 0 - 10$ при $\Delta t = 0$; 19 %
11	$h_c = 72$ мкм; $V_c = 14,3$ мкм/мин; $\Delta h_c = 9$ %; $\Delta V_c, \Delta V_M = 10$ %; $\Delta t = 20$ %; $\theta = 60^\circ; 90^\circ$; $A_M = 0,5; 1$; $h/W = 0 - 10$; $h_c/h_n = 0 - 10$ при $\Delta t = 0$; 20 %
12	$h_c = 96$ мкм; $V_c = 20$ мкм/мин; $\Delta h_c = 10$ %; $\Delta V_c, \Delta V_M = 5$ %; $\Delta t = 10$ %; $\theta = 60^\circ; 90^\circ$; $A_M = 0,2; 1$; $h/W = 0 - 10$; $h_c/h_n = 0 - 10$ при $\Delta t = 0$; 10 %
13	$h_c = 60$ мкм; $V_c = 21$ мкм/мин; $\Delta h_c = 5$ %; $\Delta V_c, \Delta V_M = 6$ %; $\Delta t = 15$ %; $\theta = 60^\circ; 90^\circ$; $A_M = 0; 1$; $h/W = 0 - 10$; $h_c/h_n = 0 - 10$ при $\Delta t = 0$; 15 %

Контрольные вопросы

1. Плазменные процессы травления кремния, используемые в технологии 3D сборки.
2. Физические и химические явления в газовых разрядах.
3. Классификация процессов плазмохимического травления.
4. Ионное травление.
5. Плазмохимическое травление.
6. Ионно-химическое травление.
7. Ионно-плазменное травление.
8. Ионно-лучевое травление.
9. Реактивное ионно-плазменное травление.
10. Реактивное ионно-лучевое травление.
11. Плазменное травление.
12. Радикальное травление.
13. Стадии плазмохимического травления.
14. Образование радикалов в газоразрядной плазме.
15. Взаимодействие радикалов с атомами материалов.
16. Анизотропия и селективность травления.
17. Факторы влияющие на скорость и селективность травления.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

СКРАЙБИРОВАНИЕ И ПРОШИВКА ОТВЕРСТИЙ В ПЛАСТИНАХ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРА

Цель работы: изучить принципы работы лазерной установки и ее технологические параметры; освоить технологический процесс скрайбирования и сквозной прошивки отверстий.

Используемое оборудование и материалы: установка лазерной обработки LDS200M, пластины кремниевые.

Теоретическая часть

Лазерная технология – это процессы обработки и сварки материалов излучением лазеров. В лазерной технологии применяют твердотельные и газовые лазеры импульсного и непрерывного действия. В большинстве процессов лазерной технологии используется термическое действие света, вызываемое его поглощением в обрабатываемом материале. Для увеличения плотности потока излучения и локализации зоны обработки применяют оптические системы. Особенности лазерных технологий: высокая плотность потока излучения в зоне обработки, дающая необходимый термический эффект за короткое время (длительность импульса 1 мсек и менее); локальность воздействия излучения, обусловленная возможностью его фокусировки в световые пучки предельно малого диаметра (порядка длины волны излучения); малая зона термического влияния, обеспечиваемая кратковременным воздействием излучения; бесконтактный ввод энергии в зону обработки и возможность ведения технологических процессов в любой прозрачной среде (вакуум, газ, жидкость, твёрдое тело), через прозрачные окна технологических камер, оболочки электровacuумных приборов и т.д.

Лазерная обработка материалов, наряду с другими, используется для следующих приложений.

1. Сварка:

- корпуса полупроводниковых приборов и ИС;
- выводы диодов, выводы реле;
- миниатюрные модули на печатных схемах;
- выводы для солнечных элементов;
- герметичная линейная сварка газонаполненных и сосудов под вакуумом;
- соединение малогабаритных деталей (лист - лист, проволока - проволока, проволока - лист) и др.

2. Резка:

- заготовки из алмаза;
- формы из керамических подложек;
- резка листовых материалов малой толщины;
- фасонная резка термопластов и др.

3. Лазерное удаление материала, сверление:

- подложки из кварца, кремния;
- точное сверление в камнях часов (рубин), проволочные волокна (алмаз),
- керамика (диаметр отверстия не менее 0,003 мм);
- скрайбирование керамики, полупроводников (150 мм/с);
- подгонка элементов ГИС (резисторов, конденсаторов) и др.

Технологические установки, на которых осуществляется обработка заготовок или изделий лазерным лучом, называется лазерными технологическими установками (ЛТУ), или лазерными технологическим комплексами (ЛТК).

В состав ЛТУ помимо лазера входят:

- 1) устройство для относительного перемещения луча и обрабатываемой детали (рабочий стол);
- 2) оптическая система транспортировки луча от лазера в зону обработки, включающая фокусирующее устройство;

- 3) система управления ЛТУ;
- 4) различная оснастка: крепления обрабатываемой детали, система подачи технологического газа, приборы для контроля параметров излучения, положения пятна фокусировки на детали, скорости его перемещения и др.

Структурная схема ЛТУ имеет вид, представленный на рис. 2.1.

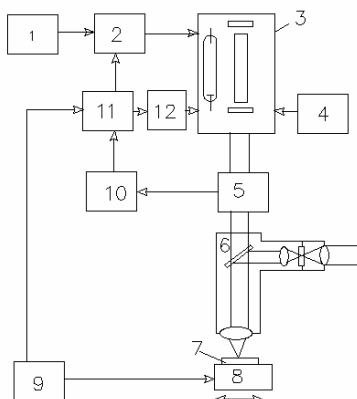


Рис. 2.1. Типовая структурная схема лазерной технологической установки: 1 – зарядное устройство; 2 – емкостный накопитель; 3 – лазерная головка; 4 – система охлаждения; 5 – датчик энергии излучения; 6 – оптическая система; 7 – изделие; 8 – предметный столик; 9 – система программного устройства; 10 – система стабилизации энергии излучения; 11 – система управления; 12 – блок поджига

В зависимости от конструктивных особенностей и конкретных условий в реальных установках могут отсутствовать или быть совмещенными те или иные устройства и узлы.

Для каждой из известных технологических операций разработаны специальные установки, возможности которых не ограничиваются основным назначением в силу универ-

сальных свойств лазерного излучения как технологического инструмента. Специализация установок особенно характерна для электронной промышленности, где необходимо учитывать высокие точности позиционирования (до долей микрометра) и особенности самого технологического оборудования.

Наряду со специальным лазерным технологическим оборудованием в последнее время начали выпускаться лазерные обрабатывающие центры, которые в едином технологическом цикле позволяют проводить разнообразные операции, сильно отличающиеся по требованиям к выходным параметрам лазера как технологического инструмента: сверление, резка металлов и неметаллов, сварка, термическая обработка, а также скрайбирование, гравировка, маркировка, пайка и обработка материалов полупроводниковой электроники.

В обрабатывающем центре осуществляется программное управление для автоматического регулирования выходных параметров лазерного излучения (энергия, длительность и частота повторения импульсов). Кроме того, используются волоконно-оптические кабели для транспортировки излучения на рабочее место.

По способу транспортировки луча ЛТУ делятся на две группы - с постоянной и переменной длиной оптического тракта. К первой группе относятся ЛТУ с неподвижным лучом и перемещаемой под лучом деталью, а также ЛТУ с неподвижно закрепленной деталью, относительно которой перемещается весь оптический блок, т.е. излучатель с системой транспортировки и фокусировки луча. Последнее возможно только для излучателей с малой массой, например твердотельных лазеров. Для установки первой группы характерна высокая стабильность плотности мощности излучения в зоне обработки они обычно используются для точной обработки изделий небольших габаритов и малой массы.

В ЛТУ второй группы излучатель неподвижен, а лазерное излучение передается в зону обработки с помощью систе-

мы подвижных оптических элементов. Типовым примером такой ЛТУ является так называемая порталная (или трехзеркальная) установка для лазерного раскроя листа неподвижно закрепленного на рабочем столе (рис. 2.2).

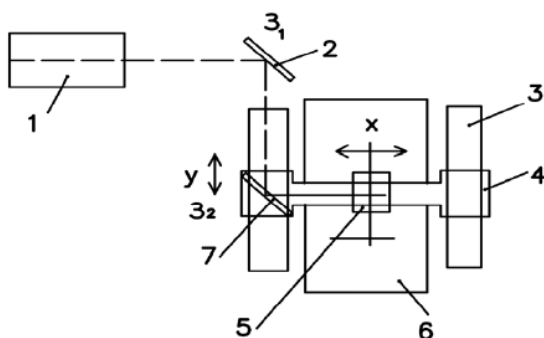


Рис. 2.2. Схема порталной установки для лазерного раскроя листа: 1 - СО лазер; 2 - неподвижное зеркало Z_1 ; 3 - направляющие портала; 4 - портал, перемещающийся по направляющим (ось Y); 5 - каретка с зеркалом Z_2 и оптическим резаком, перемещающаяся по portalу (ось X); 6 - неподвижный стол для размерной обработки детали; 7 - подвижное зеркало Z_2 , укрепленное на портале

Установки второй группы более универсальны, но на них труднее обеспечить высокую точность обработки, т.к. взаимные перемещения оптических элементов и изменение длины тракта, по которому двигается расходящийся лазерный луч, приводят к нестабильности оси диаграммы направленности излучения и изменению диаметра сфокусированного луча. Это, в свою очередь, приводит к нестабильности потока мощности в зоне обработки и отклонению параметров технологического процесса от номинальных. При повышенных тре-

бованиях к точности и качеству обработки в ЛТУ этого типа необходимо применять специальные меры:

- снижать расходимость лазерного излучения;
- использовать в оптическом тракте сложные асферические зеркала;
- изменять параметры движения фокусирующего устройства.

Структура любого ЛТУ представлена на рис. 2.3.

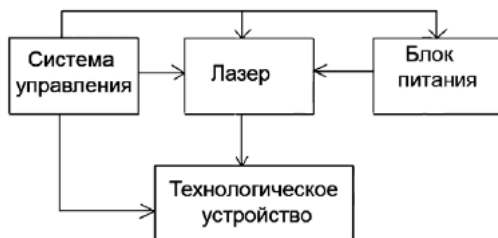


Рис. 2.3. Упрощенная структурная схема лазерной технологической установки

В зависимости от назначения, мощности, типа используемого лазера различают различные компоновочные решения ЛТУ. Прежде всего, это могут быть либо малогабаритные переносные установки настольного типа, либо стационарные, на базе мощных газовых лазеров или твердотельных со сложными технологическими устройствами.

В микроэлектронике на сегодняшний день наблюдается тенденция к всё большей интеграции и миниатюризации изделий. Появляется спрос на повышение функциональности микросистем (например, интеграция механической, оптической и биологической систем), улучшение их характеристик, повышение производительности и снижение стоимости. Возможным решением всех этих вопросов может стать 3D-интеграция

Методы 3D-интеграции: чип-на-чипе; пластина-на-пластине, или вертикальная системная интеграция (VSI); корпус-на-корпусе (рис. 2.4).

Этажерочная сборка кристаллов (чипов) с разваркой кристаллов (для создания межсоединений) уже много лет используется такими компаниями как Intel, Hitachi, Sharp, Amkor, Philips и др. Сборка же кристаллов друг на друга на уровне пластины больше способствует повышению производительности и снижению стоимости производства.

Вертикальная система интеграции (VSI) характеризуется созданием выводов очень высокой плотности между кристаллами, выводы свободно распространяются через *Si* отверстия. Основана технология на утонении, монтаже и вертикальной металлизации полностью обработанной подложки изделия, требования к VSI - очень точное утонение, надежное образование стержней-выводов между кристаллами и подходящий процесс монтажа. Большой вклад в разработку технологии VSI на уровне пластины внес институт Fraunhofer IZM в Мюнхене.

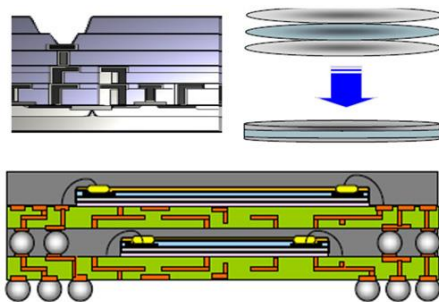


Рис. 2.4. Методы 3D-интеграции (сборка чип-на-чипе, пластина-на-пластине, корпус-на-корпусе)

Технологию VSI можно выполнить двумя способами – это:

- монтаж кристаллов на пластину и монтаж пластины на пластину (рис. 2.5).

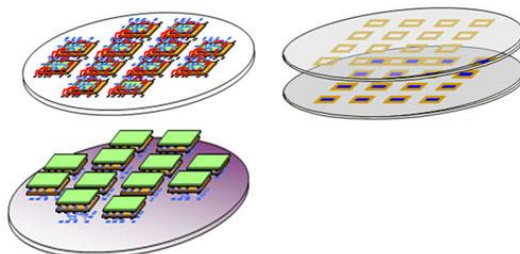


Рис. 2.5. Монтаж кристаллов на пластину и монтаж пластины на пластину

В первом случае соединения формируются методом разварки или по технологии Flip Chip, во втором – по технологии TSV (сквозные отверстия в кремнии) (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Сквозные отверстия в кремнии

Вертикальная система интеграции на основе метода создания сквозных отверстий имеет ряд преимуществ: более высокая плотность при тех же размерах, большая функциональность, лучшие характеристики (параллельность, минимальные длины соединений, нет ограничения скорости межсоедине-

ния), пониженное энергопотребление и уменьшенная стоимость конечного изделия.

Технология VSI включает в себя следующие этапы:

1. Создание отверстий (лазерная прошивка, реактивное ионное травление, фотолитография).

2. Заполнение отверстий (металлизация, химическое осаждение, фотолитография).

3. Монтаж пластин друг на друга (совмещение и монтаж).

4. Утонение пластин до отдельных кристалльных сборок (шлифовка, травление).

Для реализации технологии TSV требуется целый комплекс технологического оборудования. Один из наиболее удачных вариантов такого комплекса включает в себя следующие установки: установка лазерной обработки; установка глубокого реактивного ионного травления; установка нанесения фоторезиста; установки вакуумного, магнетронного напыления, осаждения, установки монтажа кристаллов, установка механического утонения пластин. Для создания отверстий лазерной прошивкой рекомендуется установка лазерной обработки LDS200M (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Установка лазерной обработки LDS200M

Параметры установки лазерной обработки LDS200M:

- точность позиционирования ± 3 мкм;
- ширина реза 20 мкм;
- максимальная рабочая область – 240 x 240 мм;
- максимальная скорость – 1000 мм/сек;
- тип лазера – твердотельный Nd:YAG;
- длина волны 532 или 1024 нм;
- мощность 120 Вт;
- ручная / кассетная загрузка;
- автоматическая система совмещения.

Для лазерного прожигания отверстий с последующим заполнением проводящими материалами в качестве исходной используется структура «кремний на сапфире» (КНС). При лазерном прожигании отверстий и формировании в них сквозных проводящих каналов поверхность слоя кремния для предотвращения вредного воздействия лазерного излучения на параметры активных элементов, изготовленных в монокристаллическом слое, покрывалась защитным слоем. В качестве материалов защитного слоя может служить нитрид кремния, фоторезист или легкоплавкое стекло.

Прожигание отверстий лазерным лучом может проводиться как со стороны слоя кремния, так и со стороны сапфировой подложки. В качестве источника излучения использовался лазер на основе алюминий иттриевого граната с примесью неодима (Nd – YAG), работающий в режиме с модулированной добротностью. Мощность лазера должна быть такой, чтобы для прожигания отверстий использовалась последовательность импульсов от 10 до 100.

Полученные отверстия необходимо заполнить каким-либо проводящим материалом. Тонкий слой смачивающей жидкости, обогащенный проводящим материалом приводится в соприкосновение с одной из поверхностей КНС - структуры.

Объемное удельное сопротивление такой жидкости должно составлять не более 10^{-4} Ом·см. Наиболее предпочти-

тельнее заполнять отверстия жидкостью со стороны сапфировой подложки.

Жидкость хорошо смачивает сапфир, поэтому под воздействием капиллярного эффекта она достаточно легко втягивается в отверстия. В качестве взвешенных частиц проводящего материала обычно используют гранулы серебра или золота, в качестве смачивающих жидкостей – чистые эпоксидные и полиамидные смолы.

При использовании структур КНС – технология получения проводящих каналов является сравнительно простой. Использование кремниевых подложек существенно усложняет технологию, так как на стенках отверстий перед их заполнением проводящими материалами необходимо создавать изоляцию. Рассмотрим способ создания проводящих микроканалов в кремниевых подложках с последующим созданием в отверстиях изолирующих диффузионных $p-n$ – переходов.

Сначала в подложке с помощью лазеров выжигают матрицу отверстий, а затем проводят диффузию примесных атомов, в результате которой достигается изменение типа проводимости материала на стенках отверстий. Если уровень легирования материала стенок отверстий будет большим, то его можно использовать в качестве проводника. Формирование такого проводящего элемента путем диффузии примесных атомов не налагает каких-либо принципиальных ограничений на диаметр отверстий и на отношение толщины подложки к их диаметру. Выход годных при использовании этого процесса составляет 100 %. На боковых стенках отверстий сохраняется исходная кристаллографическая ориентация. При лазерной обработке на поверхности подложки могут оседать пары и капли расплава кремния. Такое загрязнение подложки в конечном итоге вызывает понижение выхода процента годных. Поэтому для предотвращения загрязнения поверхность подложки предварительно покрывают пленкой полимерного материала, которую снимают после лазерной обработки с оса-

жденными на ней загрязнениями. Нарушенные слой обычно удаляют путем шлифовки поверхности.

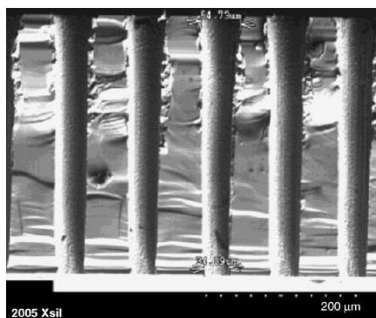


Рис. 2.8. Изображение отверстий прожженных лазером, полученное сканирующей электронной микроскопией

Кроме того, проводящие каналы в кремниевой подложке можно создать еще и следующим образом: создаем матрицу отверстий, затем осуществляем термическое окисление. Затем методом магнетронного напыления осаждаем алюминий на лицевую и обратную сторону подложки.

Для лазерной прошивки отверстий можно использовать следующие виды лазеров.

Молекулярный CO_2 -лазер. Лазеры на углекислом газе являются наиболее важными газовыми лазерами. CO_2 -лазеры обладают очень высоким КПД, способны генерировать исключительно большие мощности, как в непрерывном, так и в импульсном режиме, спектр их излучения совпадает с окном прозрачности атмосферы.

Молекулярный CO_2 -лазер - это лазер на смеси углекислого газа, азота и гелия. CO_2 является рабочим газом, азот способствует эффективному заселению верхнего лазерного уровня, а гелий - обеднению нижнего. Конструкции CO_2 -лазеров могут быть весьма разнообразны. В зависимости от метода возбуждения различают газоразрядные и газодинами-

ческие лазеры. На рис. 2.9 показано устройство CO_2 -лазера с продольной прокачкой газа.

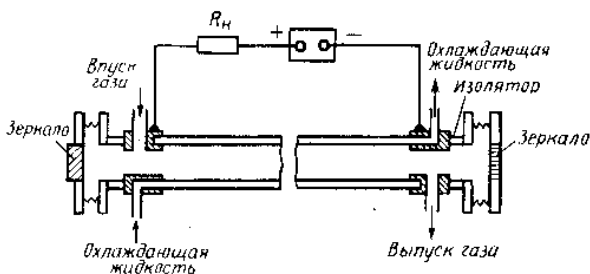


Рис. 2.9. Устройство CO_2 -лазера с продольной прокачкой газа

Лазерная прошивка отверстий молекулярными CO_2 -лазерами осуществляется за счет термических процессов, последовательного сверления (одного отверстия за другим). Молекулярный CO_2 -лазер обладает высокой пропускной способностью и недорогой стоимостью процесса.

Лазеры на иттрий-алюминиевом гранате с примесью неодима $Y_3Al_5O_{12} : Nd^{3+}$ - твердотельные лазеры. Неодим замещает в решетке примерно 1 % атомов иттрия и может излучать на длине волны 1,06 мкм (инфракрасный цвет). Для возбуждения могут использоваться как газоразрядные источники, так и светодиоды типа $GaAlAs$. YAG-лазеры работают как в непрерывном, так и в импульсном режиме с большой частотой повторения со средней мощностью до нескольких сотен ватт.

Лазерная прошивка отверстий YAG-лазерами осуществляется за счет термических / химических процессов; последовательного сверления (одного отверстия за другим); YAG-лазер обладает средней пропускной способностью и высокой стоимостью процесса.

Экцимерные лазеры представляют особый класс молекулярных лазеров на электронно-колебательных переходах между устойчивым возбужденным и химически неустойчи-

вым основным состояниями некоторых молекул. Молекула A_2^* , которая может существовать только в возбужденном состоянии, называется эксимером. Свойствами эксимеров обладают некоторые соединения благородных газов Xe_2^* , Kr_2^* , XeF^* , ArF^* и др. Накачка лазера осуществляется пучком электронов ускоренных до энергий 0,1 – 1 МэВ. Эти лазеры работают в импульсном режиме, с большой мощностью излучения в ультрафиолетовой области при высоком КПД с длиной волны излучения 120 - 350 нм.

Лазерная прошивка отверстий, созданных проекционной литографией осуществляется в основном за счет химической обработки. Эксимерный лазер обладает очень высокой пропускной способностью и высокой стоимостью процесса.

Для выбора конкретных режимов лазерной обработки необходимо проводить оценку температурных полей. Наибольший интерес для технологии представляет решение «обратной» задачи - по заданному результату импульсного воздействия (максимально достижимой температуры обрабатываемой поверхности, толщине расплава или прогретого слоя и т.д.) необходимо найти пороговую плотность энергии светового импульса и его длительность. При расчете пороговой плотности энергии светового импульса, достаточной для начала плавления материала в зависимости от длительности энергетического воздействия, теплофизических и оптических характеристик полупроводниковых материалов (теплоемкости, теплопроводности, коэффициента поглощения света) выбирается несколько областей:

1. Нагрев полубесконечного образца объемным источником тепла. Источник считается объемным, если выполняется соотношение

$$\tau_u \ll (D \cdot \alpha^2)^{-1}, \quad (2.1)$$

где τ_u - длительность импульса; D - коэффициент температуропроводности (температуропроводность – величина,

характеризующая скорость выравнивания температуры). $D = k/(\rho \cdot c)$, где k - коэффициент теплопроводности; ρ - плотность; c - удельная теплоемкость; α - коэффициент поглощения.

В этой области роль теплопроводности незначительна и температура определяется непосредственно проникновением света в материал. Глубина проникновения $\delta = 1/\alpha$. С течением времени глубина прогретой области растет за счет теплопроводности пропорционально $(D \cdot \tau)^{1/2}$.

В этой области максимальная температура нагрева зависит от коэффициента поглощения света и при малых коэффициентах поглощения света и малой длительности импульса нагрев можно считать адиабатическим (то есть процессом, в котором нет теплообмена между системой, в которой совершается процесс и окружающей средой) и не зависящим от длительности импульса:

$$W_{II} = \frac{\Delta T_{II} \cdot \rho \cdot c}{(1 - R)\alpha}, \quad (2.2)$$

W_{II} - плотность энергии импульса, необходимая для нагрева поверхности до температуры плавления;

R - коэффициент отражения света;

$\Delta T_{II} = T_{II} - T_n$, T_{II} - температура плавления, T_n - начальная температура образца.

2. Нагрев полубесконечного образца поверхностным источником тепла:

$$(D \cdot \alpha^2)^{-1} \ll \tau_u \ll h^2/D, \quad (2.3)$$

h - толщина образца.

В этой области нагрев можно считать поверхностным и не зависящим от коэффициента поглощения света. Длина тепловой диффузии меньше толщины образца, что позволяет считать образец полубесконечным. Плотность энергии приближенно рассчитывают по формуле:

$$W_{II} = \frac{1,4\Delta T \sqrt{\pi \cdot k \cdot \rho \cdot c \cdot \tau_u}}{2(1-R)}. \quad (2.4)$$

3. Нагрев образца конечной толщины поверхностным источником:

$$\tau_u \gg h^2/D. \quad (2.5)$$

Максимальная температура нагрева зависит от толщины образца, и при достаточно тонком образце или большой длительности импульса нагрев можно считать адиабатическим и не зависящим от длительности импульса:

$$E = \frac{\Delta T_{II} \cdot \rho \cdot c \cdot h}{1-R}. \quad (2.6)$$

4. Нагрев образца конечной толщины с теплоизлучением

$$h^2/D \ll \tau_u \approx \frac{E(1-R)}{2\varepsilon T^4 \sigma}. \quad (2.7)$$

Нагрев зависит от толщины образца, длительности и формы импульса. При достаточно высокой температуре и малой толщине образца уже при длительности более одна секунда устанавливается режим теплового баланса

$$E = \frac{A\varepsilon\sigma T_{II}^4 \tau_u}{1-R}, \quad (2.8)$$

A – коэффициент, равный отношению площади поверхности образца, с которой тепло отдается излучением и площади, куда падает световой поток;

ε – относительная излучательная способность;

σ – постоянная Стефана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Практическая часть

Рассчитать расчет пороговую плотность энергии светового импульса, достаточную для начала плавления кремния, используя формулы (2.1) – (2.6) и построить ее зависимость от длительности импульса.

Данные для расчета:

1. Исходная температура образца, $T_n = 20$ °С.
2. Коэффициент отражения света твердой фазой $R = 0,38$.
3. Температура плавления $T_{пл} = 1410$ °С.
4. Удельная теплота плавления $H = 1640$ Дж/г.
5. Плотность $\rho = 2,33$ г/см³.
6. Удельная теплоемкость $c = 0,9$ Дж/(г град).
7. Коэффициент теплопроводности $k = 2$ Вт/(см град).
8. Коэффициент поглощения $\alpha = 3 \cdot 10^3$ см⁻¹
9. Толщина исходной пластины кремния h , приведена в таблице.

Толщина исходной пластины кремния h

Вариант	Толщина исходной пластины кремния, h , мкм	Вариант	Толщина исходной пластины кремния, h , мкм
1	360	8	470
2	380	9	480
3	400	10	610
4	420	11	620
5	440	12	640
6	450	13	650
7	460	14	660

Контрольные вопросы

1. Основные технологические преимущества лазерной обработки материалов.

2. Для каких приложений следует использовать лазерную обработку материалов?
3. Состав лазерной технологической установки.
4. Структура лазерной технологической установки.
5. Лазерный обрабатывающий центр.
6. Классификация лазерных технологических установок по способу транспортировки луча.
7. Упрощенная структурная схема лазерной технологической установки.
8. Технология вертикальной системы интеграции.
9. Лазерное прожигание отверстий с последующим заполнением проводящими материалами.
10. Молекулярный CO₂-лазер.
11. Эксимерные лазеры.
12. Лазеры на иттрий-алюминиевом гранате с примесью неодима.
13. Сравнение различных лазеров для лазерной прошивки отверстий.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ОТВЕРСТИЙ И КРОМОК В ПЛАСТИНАХ КРЕМНИЯ МЕТОДАМИ ВАКУУМНОГО РАСПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Цель работы: оценить технологические возможности термического и магнетронного распыления металлов; рассчитать режимы распыления; измерить электрофизические параметры напыления пленок; осуществить визуальный контроль качества металлизации.

Используемое оборудование и материалы: установка CS-1000 Sputter & PVD Deposition System, пластины кремниевые.

Теоретическая часть

В последние годы, благодаря интенсивным экспериментальным и теоретическим исследованиям, в технологии тонких пленок достигнут значительный прогресс. В зависимости от решаемой задачи в распоряжении исследователей имеются различные методики получения образцов, гарантирующие воспроизводимые и стабильные характеристики конечного продукта.

Методы получения пленок подразделяются на *физические* (PVD – Physical Vapour Deposition), *химические* и промежуточные *газофазные химические методы* (CVD). Все методы нанесения пленок характеризуются такими параметрами, как скорость получения покрытий и диапазон достигаемых толщин. Для PVD и CVD это обычно от 1 до 1000 мкм/час и 10^{-2} – 10 (100) мкм. Для химических методов – 100 - 1000 мкм/час и 10^{-1} - 1000 мкм; взрывных (детонационных) и плазменных методов – до 10 - 100 мм/час и 0,1 - 10 мм соответственно. Методы нанесения тонкопленочных покрытий приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Методы нанесения тонкопленочных покрытий

Наименование метода	Условия реализации метода	Основные виды покрытий	Преимущества метода	Недостатки метода
Термовакuumное (резистивное) испарение	Рабочая среда: вакуум $10^{-2} - 10^{-3}$ Па Испарение металлов резистивным нагреванием	Металлические покрытия: Al, Ag, Cu, Zn, Cd, Cr, Ni, Co, Si	Высокая скорость осаждения. Возможность получения толстых покрытий	Недостаточно плотная структура покрытий. Невысокие механические свойства.
Электронно-лучевое испарение	Рабочая среда: вакуум $10^{-4} - 10^{-3}$ Па реактив. газы N_2, O_2, CH_4 . Испарение металлов сфокусированным электронным пучком с дополнительной ионизацией	Металлические покрытия: Al, Ag, Cu, Ti, Cr, Ni, Co, Si Керамические покрытия: TiN, ZrN, TiC, ZrC, TiCN, ZrCN, $Al_2O_3, TiO_2, SiO_2, ZrO_2, ZrO_2/Y_2O_3$	Высокая скорость осаждения. Возможность получения толстых покрытий (до 200 мкм). Высокая чистота покрытий (минимум примесей)	Трудно обеспечить равномерность толщины и стехиометрии на изделиях сложной конфигурации. Низкая степень загрузки изделиями объема рабочей камеры
Лазерное испарение (абляция)	Рабочая среда: вакуум $10^{-5} - 10^{-3}$ Па. Испарение материалов различного состава лазерным импульсом длительностью от мкс до фс.	Покрытия для микроэлектроники: $Sb_2S_3, As_2S_3, SrTiO_3, BaTiO_3, GaAs$ Алмазоподобные покрытия (DLC) с высокими характеристиками	Получение покрытий сложных соединений Высокая чистота покрытий (минимум примесей)	Сложность реализации

Продолжение табл. 3.1

Наименование метода	Условия реализации метода	Основные виды покрытий	Преимущества метода	Недостатки метода
Вакуумно-дуговое испарение	Рабочая среда: вакуум 10^{-3} - 10^{-2} Па, реактив. газы N_2 , O_2 , CH_4 $P = 0,01 - 1$ Па $T = 300 - 600$ °C. Испарение металлов в катодном пятне дугового разряда. Осаждение покрытий с высокой степенью ионного воздействия	Металлические покрытия: Ti, Zr, Hf, Cr, Ta, Ni, Co, Si, MCrAlY (M = Ni, Co) Керамические покрытия: TiN, ZrN, CrN, TiC, TiCN, ZrCN, TiAlN, AlCrN, TiO ₂ , ZrO ₂ Наноккомпозиты: TiAlN/Si ₃ N ₄ , AlCrN/Si ₃ N ₄ Покрытия DLC	Высокая скорость осаждения. Относительная простота технической реализации. Эффективная ионная очистка изделий перед нанесением покрытий. Высокие свойства керамических покрытий	Наличие в структуре покрытий микрокапельной металлической фазы. Относительно высокие температуры осаждения покрытий
Магнетронное распыление	Рабочая среда: Чистые газы Ar, N_2 , O_2 , CH_4 $P = 0,05 - 1$ Па $T = 60 - 6000$ °C Ионное распыление металлов в магнетронном разряде	Полный спектр металлических покрытий: Al, Ag, Au, Cu, Zn, Sn, Cd, Ti, Zr, Hf, Cr, Ta, Ni, Co, Si, MCrAlY (M=Ni, Co) и др. Керамические покрытия: TiN, ZrN, CrN, TiC, TiCN, ZrON, TiAlN, AlCrN, TiBN, CrAlTiYN, TiO ₂ , ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , SiO ₂ . Наноккомпозиты: 3D: TiAlN/Si ₃ N ₄ , TiN/BN, AlCrN/Si ₃ N ₄ , ZrN/Cu, ZrO ₂ /Al ₂ O ₃ . 2D: TiN/NbN, TiN/CrN, TiN/AlN, CrN/AlN, TiN/CN. Покрытия DLC	Плотная микро(нано) кристаллическая структура металлических и керамических покрытий при полном отсутствии капельной фазы. Возможность нанесения покрытий на термочувствительные материалы при низких температурах. Наиболее широкий спектр покрытий различного назначения. Высокая скорость осаждения. Высокие свойства металлических и керамических покрытий	Относительная сложность технической реализации метода при получении реактивных (керамических) покрытий. Относительно высокая стоимость оборудования

Процесс получения пленочных покрытий сопровождается рядом специфических явлений. Рост пленки происходит в два этапа: образование зародыша на поверхности подложки и рост зародыша. При столкновении двух атомов друг с другом между ними может возникнуть химическая связь. Атомы дольше остаются на поверхности и успевают присоединить следующий атом и т.д. Так образуются скопления адсорбированных атомов, более длительное время связанных с подложкой и имеющих тенденцию к дальнейшему росту. Это происходит за счет присоединения мигрирующих по поверхности атомов, падающих атомов и более мелких кластеров. Таким образом, на поверхности формируется сеть объединенных кластеров, затем происходит объединение этих кластеров и образуется сплошная пленка. При этом в зависимости от скорости осаждения, природы подложки и типа осаждаемого материала возможны три типа роста пленки: островковый рост; послойный рост; послойно-островковый или смешанный рост.

Тип роста определяется взаимодействием атомов пленки с атомами подложки и между собой. Островковый рост имеет место, если осаждаемые атомы напыляемой пленки сильнее взаимодействуют между собой, чем с атомами подложки. Послойный рост происходит при образовании больших по площади «двухмерных» зародышей на поверхности подложки вследствие того, что атомы напыляемого материала сильнее связываются с атомами подложки. Послойно-островковый рост имеет место, когда островки начинают расти после того, как сформируется пленка толщиной в несколько атомных слоев.

Рассмотрим особенности методов магнетронного распыления и термовакuumного испарения на примере установки CS-1000 Sputter & PVD Deposition System фирмы Asia Pacific Systems Inc. (рис. 3.1).

Установка CS-1000 обеспечивает реализацию двух методов нанесения – термовакuumный и магнетронный.



Рис. 3.1. Внешний вид установки CS-1000 Sputter & PVD Deposition System

Магнетронное распыление – газонаполненный процесс со значительно удаленными друг от друга источниками материала – магнетронами. Частицы осаждаемого материала, соударяясь с частицами газа, меняют свою траекторию и осаждаются, в том числе, на боковых стенках профиля фоторезиста. Исправить эту ситуацию очень сложно, т.к. изменять обратный наклон профиля фоторезиста невозможно до бесконечности. Значительная удаленность друг от друга магнетронов с различными материалами затрудняет повторяемое осаждение покрытий на большое количество обрабатываемых образцов, число которых можно увеличить за счет повышения габаритов магнетрона, но возникает вопрос о стоимости мишени драгоценного металла. При одновременной обработке 10 - 15 образцов диаметром 100 мм (типично для электронно-лучевого испарения) речь идет об использовании достаточно крупных слитков золота или платины. Для электронно-лучевого испарителя размеры навески в несколько раз меньше, причем для купольного держателя образцов эффектив-

ность использования металла намного выше. Вследствие неравномерного расходования мишени при магнетронном распылении количество неиспользованного материала перед заменой мишени может составить 40 – 50 %.

Магнетронное распыление относится к методам распыления материалов ионной бомбардировкой. Нанесение покрытий в вакууме с помощью магнетронных систем заключается в распылении твердой мишени напыляемого материала ионами инертного газа, образующимися в плазме аномального тлеющего разряда при наложении на него магнитного поля, силовые линии которого ортогонально пересекают силовые линии магнитного поля.

Итак, *ионное распыление* – метод вакуумного напыления, в котором осаждаемый атомарный поток получают в результате бомбардировки ускоренными ионами поверхности исходного напыляемого материала и последующей инжекции распыленных атомов в паровую фазу.

Характеристикой процесса ионного распыления служит коэффициент распыления, определяемый средним количеством атомов мишени, выбитых с бомбардируемой поверхности падающим ионом.

$$K_s = \frac{N_p}{N} \quad (3.1)$$

где K_s - коэффициент распыления,
 N_p - количество выбитых (распыленных) атомов мишени,
 N - количество бомбардирующих ионов.

Коэффициент распыления определяется энергией и направлением падения ионов, природой взаимодействующих материалов, кристаллографической структурой и атомным строением бомбардируемой поверхности.

При возрастании энергии бомбардирующих ионов свыше 100 эВ коэффициент распыления резко увеличивается и в области 5 - 10 кэВ выходит на насыщение. Дальнейшее повы-

шение кинетической энергии свыше 100 кэВ приводит к снижению распыления, вызванному радиационными эффектами и внедрениями ионов в кристаллическую решетку. Диапазон энергий бомбардирующих ионов, представляющих интерес при получении покрытий, находится в пределах от 300 до 5000 эВ. Распыление вызывается, в основном, передачей импульса энергии от бомбардирующей частицы атомам кристаллической решетки в результате серии последовательных столкновений. Передача импульса от падающих ионов происходит в первых атомных слоях решетки, например, при бомбардировке поверхности поликристаллической меди ионами аргона с энергией 1000 эВ глубина проникновения равнялась трем атомным слоям. Энергия распыления атомов значительно превышает кинетическую энергию испаренных атомов и составляет 0,1 - 100 эВ. Распыление сопровождается эмиссией вторичных электронов, которые ускоряются в электрическом поле, вызывая дополнительную ионизацию.

Наибольшее распространение в качестве источника бомбардирующих ионов получил инертный газ аргон, имеющий массу, достаточную для распыления, и характеризующийся относительно малой стоимостью. Влияние температурных условий незначительно. Распыление металлов в твердом и расплавленном состояниях практически не различается. Исключение составляет область температур, при которых переход атомов в паровую фазу путем испарения становится существенным и превышает распыление. Необходимо заметить, что с увеличением угла падения ионов (относительно нормали к поверхности) эффективность распыления возрастает. В зависимости от схемы распылительного устройства напыление происходит при давлении остаточных газов от 10 до 10^{-2} Па.

Схема магнетронной распылительной системы приведена на рис. 3.2.

Основными элементами являются плоский катод, изготовленный из напыляемого материала, анод, устанавливаемый

по периметру катода, магнитная система, обычно на основе постоянных магнитов, и система водоохлаждения. Силовые линии магнитного поля, замыкаясь между полюсами, пересекаются с линиями электрического поля. Принцип действия установки основан на торможении электронов в скрещенных электрических и магнитных полях.

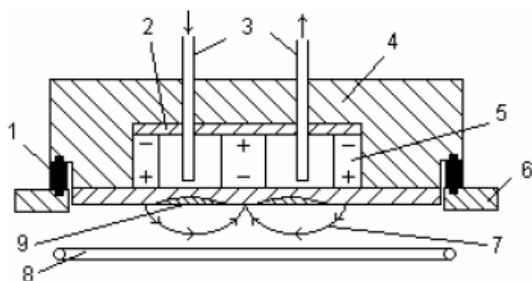


Рис. 3.2. Установка магнетронного распыления:

- 1 – изолятор; 2 – магнитопровод; 3 – система водоохлаждения; 4 – корпус катодного узла;
- 5 – постоянный магнит; 6 – стенка вакуумной камеры;
- 7 – силовые линии магнитного поля; 8 – кольцевой водоохлаждаемый анод; 9 – зона эрозии распыляемого катода

Известно, что на заряд, движущийся в электромагнитном поле, действует сила Лоренца, направление которой, по правилу сложения сил, зависит от направления ее составляющих. При этом, часть силы Лоренца, обусловленная действием магнитного поля, не совершает работы, а лишь искривляет траекторию движения частицы, заставляя ее двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной V и B .

При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля к распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать

плазму разряда непосредственно у мишени. Электрон циркулирует в электромагнитной ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых он потеряет полученную от электрического поля энергию. Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадает на анод, используется на ионизацию и возбуждение, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени. Это, в свою очередь, приводит к увеличению интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительный рост скорости осаждения покрытия.

Таким образом, в магнетронных устройствах при одновременном действии электрических и магнитных полей изменяется траектория движения электрона. Электроны, эмитированные катодом, и образующиеся в результате ионизации, под действием замкнутого магнитного поля локализуются непосредственно над поверхностью распыляемого материала. Они попадают в ловушку, образуемую, с одной стороны, действием магнитного поля, заставляющего двигаться электроны по циклоидальной траектории вблизи поверхности, с другой – отталкиванием их электрическим полем катода в направлении к аноду. Вероятность и количество столкновения электронов с молекулами аргона и их ионизация резко возрастают. Из-за неоднородности действия электрических и магнитных полей в прикатодной зоне интенсивность ионизации в различных участках различна. Максимальное значение наблюдается в области, где линии индукции магнитного поля перпендикулярны вектору напряженности электрического поля, минимальное – где их направление совпадает. Поверхность мишени, расположенная между системами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы. Локализация плазмы в прика-

тодном пространстве позволила получить значительно большую плотность ионного тока при меньших рабочих давлениях, и, соответственно, обеспечить высокие скорости распыления.

Магнетронные устройства относятся к низковольтным системам ионного распыления. Напряжение источника питания постоянного тока не превышает 1000 - 1500 В. При подаче отрицательного потенциала на катод, между электродами возбуждается аномальный тлеющий разряд в среде аргона. Наличие магнитной ловушки обеспечивает при одних и тех же давлениях газа возникновение разряда при более низких напряжениях по сравнению с диодными системами. Напряжение разряда составляет 300 - 700 В.

Магнетрон может работать в диапазонах давления рабочего газа от 10^{-2} до 1 Па и выше. Давление газа и индукция магнитного поля оказывают значительные влияния на характеристики разряда. Понижение давления обуславливает повышение рабочих напряжений. В то же время для каждой магнетронной системы существует некоторый интервал значений, обычно 10^{-1} – 1 Па, в котором колебание давления не оказывает существенного влияния на изменение параметров разряда. Воздействие магнитного поля аналогично действию газовой среды. Поэтому низкие рабочие давления в магнетронах обеспечивают увеличение индукции магнитного поля, величина которой у поверхности катода составляет 0,03 - 0,1 Тл. Повышение удельной мощности способствует стабилизации разряда в области низких давлений.

Магнетронное распыление с постоянным током не позволяет напылять оксиды с большой скоростью. Повышение производительности приводит к сильному окислению самой мишени, что сразу же делает невозможным ее использование. В этих случаях используется модифицированная технология с использованием высокочастотного тока, который препятству-

ет изменению стехиометрического состава напыляемого материала.

Термическое испарение производят в глубоком вакууме, поэтому технологический процесс в первую очередь определяется конструкцией вакуумного оборудования. Сущность процесса термовакuumного испарения состоит в переводе осаждаемого материала с помощью нагрева в парогазовую фазу. Образующийся при этом парогазовый поток в высоком вакууме распространяется прямолинейно, так как отсутствует соударение с молекулами остаточного газа - длина свободного пробега молекул в остаточном газе на порядок превышает расстояние от источника до подложки; газ попадает на подложку, поверхность которой холоднее источника пара, при этом происходит конденсация и образование плёнки.

На рис. 3.3 показана схема вакуумной системы напылительной установки. Она включает рабочую камеру 1 колпакового типа с объемом до $0,5 \text{ м}^3$, в которой размещаются полупроводниковые структуры 2 на планетарном, карусельном или барабанном держателе, испаритель 4 и заслонка 3. Измерение давления до 10^{-1} Па производят термопарным манометром, а ниже 10^{-1} Па - ионизационным, которые объединены в одном приборе 5. Предварительный вакуум достигается с помощью форвакуумного насоса 9 при закрытом клапане 12 диффузионного насоса 11 и закрытом кране 10. Краны 8 и 7 открыты. По достижении давления ~ 10 Па кран 7 закрывают и открывают кран 10 и клапан 12, в результате чего осуществляется откачка диффузионным насосом. В случае аварийного отключения форвакуумного насоса срабатывает электромагнитный клапан 12, предохраняя систему от натекания в нее атмосферного воздуха через неработающий форвакуумный насос. Для конденсации паров масла и остаточных газов служит ловушка 6, наполняемая жидким азотом. В настоящее время все шире используют безмасляную откачку с примене-

нием турбомолекулярных и гетероионных насосов, позволяющих достигать разрежения до 10^{-9} Па.

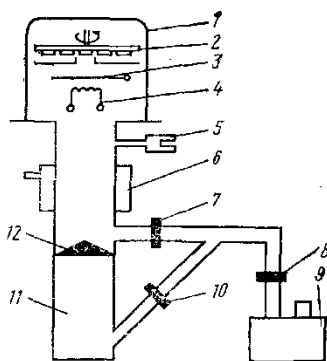


Рис. 3.3. Схема установки термовакuumного испарения

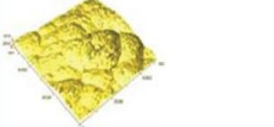
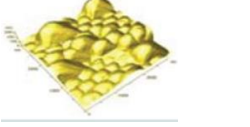
Термическое испарение материалов производят из испарителей косвенного подогрева — проволочных (W , Ta), ленточных (Mo , Ta) или тигельных (кварц, графит, стеклографит, керамика). Эти материалы слабо взаимодействуют со многими испаряемыми веществами и не загрязняют молекулярный поток. Форма испарителей зависит от агрегатного состояния испаряемого материала. Порошкообразные вещества испаряют из тиглей и лодочек, что особенно удобно для несмачивающих материалов. Для испарения крупнозернистых порошков используют проволочные спиральные конические испарители. Если испаряемый металл относится к числу смачивающих, то применяют ленточные или спиральные проволочные испарители. Металл навешивают на них в виде гусачиков или навивают тонкой проволочной спиралью. Подложки обычно располагают над испарителем, что предотвращает случайное попадание на них капель расплавленного вещества. Заслонка 3 играет важную технологическую роль, так как позволяет точно контролировать длительность процесса оса-

ждения покрытия и препятствует попаданию на подложки летучих загрязнений, содержащихся в испаряемом веществе, в начальный момент испарения. Для образования равномерного по толщине покрытия карусель и подложки на ней вращаются над испарителем.

Адгезия металлических слоев с подложкой у пленок, полученных магнетронным способом, существенно выше, чем у таких же пленок, полученных термовакuumным напылением, при сравнимых скоростях напыления. Это связано с более высокой энергией конденсирующихся частиц при магнетронном распылении и дополнительной активацией поверхности действием плазмы. В отличие от других способов нанесения тонкопленочных покрытий способ магнетронного распыления позволяет достаточно тонко регулировать толщину металлического слоя, а значит и его сопротивление, что очень важно при создании структур с определенной проводимостью. Метод магнетронного распыления позволяет получать тонкие пленки высокого качества с рекордными физическими характеристиками (толщина, пористость, адгезия и пр.), а также проводить послойный синтез новых структур (структурный дизайн), «собирая» пленку буквально на уровне атомных плоскостей.

Таблица 3.2

Параметры установки CS-1000

Параметры магнетронного распыления установки CS-1000	Параметры термовакuumного испарения установки CS-1000
Скорость осаждения Cu для 300 Вт – 125 А/мин Скорость осаждения Ni и Cr для 200 Вт – 45 А/мин	Скорость осаждения Cu, V и др. для 70 % мощности – 0,33 А/с Скорость осаждения Ni для 25 % мощности – 0,25 А/с
	

Практическая часть.

Коэффициент распыления определяется характером атомных столкновений и структурой мишени. Выражение для коэффициента распыления изотропных мишеней имеет вид

$$K = \frac{K_0 N_2 \sigma_a 2(E/E_M)^{1/2}}{F E_S 1 + E/E_M}. \quad (3.2)$$

N_2 – собственная концентрация атомов в кристалле, см⁻³;

σ_a – сечение экранирования, см²;

F – нормирующий коэффициент энергии, эВ⁻¹;

E_S – энергия сублимации, эВ;

E – энергия ионов, эВ;

E_m – энергия, соответствующая максимальному коэффициенту распыления, эВ;

K_0 – коэффициент, зависящий от заряда ядра бомбардирующего иона Z_1 и заряда ядра атома распыляемой мишени Z_2 и периодически изменяющийся с изменением Z_2 .

При $3 \leq Z_2 \leq 16$

$$K_0 = 1,3 \cdot 10^{-10} Z_2^{\frac{1}{2}} \left[1 + 0,25 \sin \left\langle 2\pi \left(\frac{Z_2}{8} \right) + \frac{\pi}{2} \right\rangle \right] - 4,65 \cdot 10^{-12} (Z_1 - 18) \text{ см.} \quad (3.3)$$

При $Z_2 \geq 19$

$$K_0 = 1,3 \cdot 10^{-10} Z_2^{\frac{1}{3}} \left[1 + 0,25 \sin \left\langle 2\pi \left(\frac{Z_2 + 2}{18} \right) + \frac{\pi}{2} \right\rangle \right] - 4,65 \cdot 10^{-12} (Z_1 - 18) \text{ см.} \quad (3.4)$$

При расчетах K_0 в случаях $Z_2 \geq 72$ или $Z_1 \geq 72$ следует использовать эффективные заряды ядер $Z_{1,2 \text{ эф}} = Z_{1,2} - 14$.

Сечение экранирования рассчитывается по следующей формуле

$$\sigma_a = \pi a^2 \quad (3.5)$$

где a - радиус экранирования, который рассчитывают как

$$a = \frac{4,7 \cdot 10^{-9}}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})}. \quad (3.6)$$

Нормирующий коэффициент энергии F определяют как

$$F = \frac{6,9 \cdot 10^6 a M_2}{Z_1 Z_2 (M_1 + M_2)}, \quad (3.7)$$

где M_1 – масса иона газа;

M_2 – масса атома.

С увеличением энергии ионов коэффициент распыления возрастает, достигает максимума, а затем уменьшается. Энергия (эВ), соответствующая максимуму K

$$E_M = 0,3/F \quad (3.8)$$

Максимальное значение коэффициента распыления

$$K_{max} = \frac{K_0 N_2 \sigma_a}{F E_s}. \quad (3.9)$$

Распыление изотропных веществ подчиняется закону косинуса:

$$K(\alpha) = K(0)/\cos \alpha, \quad (3.10)$$

где $K(0)$ - коэффициент распыления при нормальном падении иона на поверхность мишени, при $\alpha = 0$; α — угол падения ионов относительно нормали к поверхности.

При нормальном падении коэффициент распыления пропорционален энергии, рассеиваемой ионом в поверхностном слое веще-

ства, в пределах которого упругие столкновения с атомами приводят к распылению. С увеличением угла падения число смещенных атомов, достигающих поверхности и могущих покинуть кристалл, увеличивается, так как области смещений располагаются под малым углом к поверхности. Из геометрических рассуждений следует, что число распыленных атомов возрастает в $1/\cos \alpha$ раз.

Увеличение α от 60 до 90° приводит к падению K до нуля вследствие преобладания отражения ионов от поверхности. Значение угла, при котором наблюдается максимум коэффициента распыления, зависит от типа иона, материала мишени и энергии

$$\alpha_{max} = \frac{\pi}{2} - \sqrt{\frac{5\sigma_a N_2^{2/3} Z_1 Z_2 E_R}{E(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})}}. \quad (3.11)$$

где $E_R = 13,6$ эВ - энергия Ридберга.

Угловые зависимости коэффициента распыления одинаковы для поликристаллов и монокристаллов, так как при бомбардировке образуется большое число радиационных нарушений. Если при распылении монокристаллов происходит отжиг образующихся нарушений, то наблюдается сложная зависимость $K(\alpha)$, обусловленная анизотропией распыления по различным кристаллографическим направлениям.

Рассчитать коэффициент распыления металла ионами аргона с энергией E , кэВ, используя данные приведенные в табл. 3.3.

Порядок расчета

1. Пользуясь данными для расчета, выберем: $Z_1, M_1, Z_2, M_2, N_2, E_s$.

2. Рассчитаем вспомогательные величины a, σ_a, F , при необходимости $Z_{1,2 \text{эф}} = Z_{1,2} - 14$ по формулам (3.5) – (3.7).

3. Определим значение K_0 , по формулам (3.3), (3.4)

4. Найдем максимальный коэффициент распыления, формула (3.9).

5. Определим энергию, соответствующую K_{max} по (3.8).

6. Находим значение K при заданном значении энергии E по (3.2).

7. Находим значение угла при котором наблюдается максимум коэффициента распыления (3.11).

Таблица 3.3

Данные для расчета коэффициент распыления металла ионами аргона

Вариант	Газ	Z ₁	M ₁	E, кэВ	Металл мишени	Z ₂	M ₂	E _s , эВ	N ₂ , см ⁻³
1	Ar	18	40	0,1	Al	13	27	3,26	1,89·10 ²³
2				0,2	Ti	22	48	4,34	2,4·10 ²³
3				0,5	Cr	24	52	3,68	1,72·10 ²²
4				1	Ti	22	48	4,34	2,4·10 ²³
5				1,5	Cu	29	64	3,56	1,18·10 ²³
6				2	Ta	73	181	8,7	1,56·10 ²³
7				3	Au	79	197	3,92	5,91·10 ²²
8				5	W	74	184	8,76	5,68·10 ²²
9				0,5	Al	13	27	3,26	1,89·10 ²³
10				1,5	Cu	29	64	3,56	1,18·10 ²³
11				2	W	74	184	8,76	5,68·10 ²²
12				3	Ti	22	48	4,34	2,4·10 ²³
13				4	Cu	29	64	3,56	1,18·10 ²³

Контрольные вопросы

1. Этапы роста пленки. Тип роста.
2. Методы нанесения тонкопленочных покрытий.
3. Термовакuumное (резистивное) испарение.
4. Электронно-лучевое испарение.
5. Лазерное испарение (абляция).
6. Вакуумно-дуговое испарение.
7. Магнетронное распыление.
8. Коэффициент распыления.

9. Схема магнетронной распылительной системы.
10. Схема установки термовакуумного испарения.
11. Типы испарителей.
12. Достоинства и недостатки методы нанесения тонко-пленочных покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вейко, В.П. Лазерная микрообработка [Текст]: опорный конспект лекций / В.П. Вейко. - СПб.: СПбУ ИТМО, 2005. - 110 с.
2. Голишников, А.А. Плазменные технологии в нанoeлектронике [Текст]: учеб. пособие / А.А. Голишников, М.Г. Путря. - М.: МИЭТ, 2011. - 172 с.
3. Готра, З.Ю. Технология микроэлектронных устройств [Текст]: справочник / З.Ю. Готра. - М.: Радио и связь, 1991. - 528 с.
4. Ефремов, А.М. Вакуумно-плазменные процессы и технологии [Текст]: учеб. пособие / А.М. Ефремов, В.И. Светцов, В.В. Рыбкин. - Иваново, 2006. - 260 с.
5. Курносов, А.И. Технология производства полупроводниковых приборов [Текст]: учеб. пособие / А.И. Курносов, В.В. Юдин. - М.: Высш. шк., 1986. - 368 с.
6. Малышева, И.А. Технология производства интегральных микросхем [Текст]: учебник / И.А. Малышева. - М.: Радио и связь, 1991. - 344 с.
7. Рилей, Д. А. Мир микро- и нанoeлектроники: учебное пособие по современным технологиям в производстве микросистем [Текст]: в 2-х кн. / А. Д. Рилей. - Курск: Экспромт, 2009.
8. Светцов, В.И. Корпускулярно-фотонные процессы и технологии [Текст]: учеб. пособие / В.И. Светцов, С.А. Смирнов. - Иваново, 2002. - 192 с.

9. Сушков, А.Д. Вакуумная электроника: Физико-технические основы [Текст]: учеб. пособие / А.Д. Сушков. - СПб: Лань, 2004. - 464 с.

10. Технология СБИС [Текст]: в 2-х кн.; пер. с англ. / под ред. С. Зи.- М.: Мир, 1986.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	1
Лабораторная работа № 1	3
Лабораторная работа № 2	29
Лабораторная работа № 3	47
Библиографический список	64

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Основы лучевых и плазменных технологий»
для студентов направления подготовки бакалавров
210100 «Электроника и наноэлектроника»,
профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника»
очной формы обучения

Составитель
Свистова Тамара Витальевна

В авторской редакции

Подписано к изданию 26.05.2015
Уч.-изд. л. 4,1.

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14