БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

кафедра ЭТТ

РЕФЕРАТ на тему:

"ПОЛУЧЕНИЕ ПЛЕНОК ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ"

МИНСК, 2008

Эпитаксия - это процесс наращивания слоев полупроводникового материала с упорядоченной кристаллической структурой на ориентированной пластине.

Выращиваемые слои могут повторять структуру пластины, например при выращивании кремния на кремнии, германия на германии. Они могут отличаться по структуре, например при выращивании кремния на сапфире, кремния на шпинели, кремния на оксиде бериллия.

Термин " эпитаксия " образован из двух греческих слов "эпи" - на, "таксис" - располагать в порядке. Впервые выращивание кристаллов из паровой фазы было предложено в 1957 г. Практическое использование этого метода началось с 1960 г.

Эпитаксию можно подразделить на три вида: авто-, гетеро - и хемоэпитаксию.

Автоэпитаксия - процесс ориентированного наращивания вещества, не отличающегося или незначительно отличающегося по химическому составу от вещества пластины. Она обеспечивает возможность формирования гомогенных (однородных) p-n-переходов и иногда называется гомоэгштаксией.

Гетероэпитаксия - процесс ориентированного наращивания вещества, отличающегося по химическому составу от вещества пластины. На границе "эпитаксиальный слой - пластина" образуется гетерогенный (неоднородный) p-n-переход. Гетероэпитаксия осуществима для элементов, не склонных к химическому взаимодействию.

Хемоэпитаксия - процесс ориентированного наращивания, при котором образование слоя происходит за счет химического взаимодействия вещества пластины с наносимым веществом. Полученный слой по химическому составу отличается как от вещества пластины, так и от наносимой фазы, но закономерно продолжает кристаллическую структуру пластины. При образовании таких слоев может быть сформирован гетеропереход или невыпрямляющий контакт.

Маркируют кремниевые эпитаксиальные структуры буквами: К - кремний; Д - дырочный; Э - электронный тип электропроводности; Б, Ф, С, М - легирующие элементы, соответственно бор, фосфор, сурьма, мышьяк.

Однослойные эпитаксиальные структуры, изготовленные на кремниевых пластинах n-типа с эпитаксиальным слоем р - типа, маркируют дробью с цифровым коэффициентом. Например:

 (1)

где 76 - диаметр пластины, мм; 8 - толщина эпитаксиального слоя, мкм; 380 - толщина пластины, мкм; 0,5 и 0,01 - удельное сопротивление эпитаксиального слоя и пластины соответственно, Ом • см.

Маркировка многослойных эпитаксиальных структур, изготовленных в процессе автоэпитаксиального наращивания слоев разных типов электропроводности аналогична маркировке однослойных структур, но содержит несколько уровней.

Эпитаксиальные структуры со скрытым слоем (ЭСС) (Рисунок 1),

Рисунок 1. Схема эпитаксиальной структуры со скрытым слоем:

1 - эпитаксиальная структура; 2 - скрытый слой; 3 – пластина

изготовленные, как правило, на кремниевых пластинах р-типа с локальными участками п - типа, которые формируют на них диффузией или ионным легированием мышьяком или сурьмой, маркируют так:

 (2)

где 76, 380 - диаметр и толщина пластины соответственно в мм и мкм; КЭФ, КЭМ, КДБ - тип электропроводности эпитаксиального, скрытого слоя и пластины соответственно; 4, 5 - толщины эпитаксиального и скрытого слоя, мкм.

### Хлоридные и силановый методы получения эпитаксиальных слоев

Гидридную эпитаксию проводят чаще всего при температуре 1000° С реакцией пиролиза силана, которая идет почти с такой же скоростью, как и реакция восстановления SiCl4 при температуре 1200° С:

SiH4 => Si + 2Н2

cкорость растущей пленки зависит от давления в реакторе. В интервале температур 1100 - 1225° С скорость роста пленки практически не зависит от температуры.

При температурах выше 1225° С начинается газофазное разложение силана, что приводит к уменьшению скорости осаждения Si. Скорость осаждения пленки зависит также от концентрации силана в газовом потоке. При концентрациях силана больших, чем 0,2 маc.%, и температурах выше 1100° С скорость осаждения уменьшается из-за газофазного разложения SiH4. Газофазное разложение силана помимо уменьшения количества Si, осаждающегося на пластину, приводит к попаданию твердых частиц продуктов газофазного пиролиза SiH4 в растущий слой.

Силановый процесс, который проводится при относительно низкой температуре, позволяет легко регулировать концентрацию SiH4 в газовом потоке, выбирать диапазон скоростей, слабо зависящий от температуры, что облегчает поддержание рабочей температуры с точностью ± 10° С.

К недостаткам гидридной эпитаксии следует отнести пирофорность силана (возможность самовозгорания на воздухе и взрыва). Это приводит к необходимости разбавлять силан аргоном или водородом до безопасных концентраций в баллоне (2,5 - 4%). Кроме того, если произошло газофазное разложение SiH4, то реактор, не имеющий водяного охлаждения, "зарастает" и выращенные пленки имеют большую плотность дефектов. При гидридном процессе требуется тщательно герметизировать все элементы газовых магистралей и узлы реакционной камеры, так как при взаимодействии SiH4 с воздухом образуется соединение, которое может забить магистрали. По сравнению с хлоридом силан - дорогостоящий продукт.

Пиролиз дихлорсилана. Гидридную эпитаксию можно осуществить реакцией пиролиза дихлорсилана SiH2Cl2. Реакция начинается при температуре 600° С. Оптимальные температуры для получения пленок 1080 - 1100° С. Ухудшение качества слоев происходит при температуре ниже 1050° С.

Химические реакции с участием SiH2Cl2 занимают промежуточное положение между реакциями с участием SiCl4 и SiH4. Осаждение Si из SiH2Cl2 может происходить в среде аргона или азота по реакции

SiH2Cl2 => Si +2HCl

причем водород не оказывает восстанавливающего действия. Кроме основной реакции возможны побочные:

SiHCl3 + Ar => Si + ЗНСl

SiCl2 + Ar => Si + 2HCl

SiCl4 + Ar => Si + 4HCl

Разложение SiH2Cl2 при избытках Н2 уменьшает вероятность протекания побочных реакций.

Как и при предыдущем процессе, на скорость роста эпитаксиальной пленки сильно влияет концентрация SiH2Cl2 в Н2 и температура процесса. В диапазоне 1100 - 1200° С, однако, это влияние незначительно. Энергия активации процесса при пиролизе дихлорсилана невелика, что свидетельствует о том, что скорость осаждения определяется только массопереносом реагентов в газовой фазе.

При пиролизе SiH2Cl2, протекающем при относительно низких рабочих температурах (1080 - 1100° С), практически отсутствует газофазное разложение, возможен подбор условий осаждения, не зависящих от температуры. К недостаткам относятся повышенное требование к герметичности газовых магистралей и реакционной камере и в несколько раз большая стоимость SiH2 Cl2 по сравнению с SiCl4.

Выбор того или иного кремнийсодержащего соединения для эпитаксии Si зависит от возможностей оборудования и температурные ограничений конкретного технологического маршрута.

Хлоридный метод заключается в восстановлении водородом кремния из S1CI4 • Реакция восстановления является гетерогенной

SiCl4 + 2Н2 => Si + 4HCl

При относительно низких температурах скорость осаждения пленок описывается уравнением

Vp=Aexp [-E/(RT)]

Где E – энергия активации процесса; A и R - постоянные, Т – температура процесса.

Пластины после предварительной аммиачно-перекисной отмывки устанавливают на подложкодержатель. Проверяют герметичность установки по скорости уменьшения избыточного давления газа азота. Герметичность установки и реактора считаются достаточными, если избыточное давление 0,2 • 105 Па за 30 мин не уменьшается. После этого реакционную камеру продувают азотом в течение 5 мин (с расходом газа 1,5 м3 /ч). Далее реактор продувают рабочим газом-носителем водородом в течение 5 мин и нагревают подложкодержатель с пластинами до рабочей температуры (1200 - 1250° С).

Рабочую температуру контролируют оптическим пирометром через специальное смотровое окно в реакторе. После отжига пластин при рабочей температуре в течение 5-7 мин производится их газовое травление. Для этого к основному газу-носителю добавляют газообразный хлористый водород (расход хлористого водорода определяют по ротаметру или более точно с использованием регулятора расхода газа). Газовое травление проводится 1-2 мин со скоростью травления 0,1 - 0,2 мкм/мин. После травления газовую магистраль с хлористым водородом закрывают. Во время газового травления испаритель с SiCl4 продувают водородом на байпасную линию для установления требуемого рабочего расхода. Водород, проходя через испаритель, насыщается его парами. Смесь SiCl4 + H2 после окончания газового травления добавляется к основному потоку водорода путем открывания соответствующих газовых кранов. После окончания выращивания эпитаксиальной структуры линию подачи водорода в испаритель закрывают.

Увеличение концентрации SiCl4 выше некоторого критического значения приводит к образованию газообразного НС1, который травит поверхность пластины и осаждаемого слоя.

Увеличение скорости роста с увеличением температуры связано с более интенсивным протеканием реакции восстановления. Повышение скорости газового потока при фиксированной температуре также приводит к увеличению скорости роста, что связано с интенсификацией доставки и отвода продуктов реакции.

Удельное сопротивление эпитаксиальной структуры зависит от типа и количества примесей, введенных в газовую смесь в процессе осаждения. В качестве источников легирующей примеси п - и р-типов используют фосфин (РН3) и диборан (В2Н6) соответственно. Зависимость концентрации примеси в растущей пленке от концентрации примеси в газовой фазе очень сложная.

Хлоридным методом получают эпитаксиальные структуры с низкой дефектностью, т.е. малой плотностью дефектов упаковки и дислокации [порядка (2…5) 102 см-2], что вязано с гетерогенным характером протекания реакции. Условия реакции можно подобрать таким образом, чтобы не происходило взаимодействия между реагентами и стенками реактора, что обеспечивает чистоту процесса. Кроме того, SiCl4 легко поддается очистке, нетоксичен и недорог, что позволяет предъявлять пониженные требования к герметичности газовых магистралей.

Недостатки хлоридного процесса - сравнительно высокий диапазон ра6очих тёмператур (1200 - 1250° С) и, как следствие" невозможность получения резких p-n-переходов из-за "диффузионного размытия" границы пленка - пластина во время процесса эпитаксиального осаждения.

Если необходимо получать пленки с резким изменением концентрации примесей на границе пластина - эпитаксиальный слой, используют реакцию пиролиза силана.

Эпитаксию из парогазовых смесей обычно проводят при атмосферном давлении (10s Па). Понижение давления до (6,5 …13) х 103 Па позволяет уменьшить эффекты бокового и вертикального автолегирования.

### Легирование при эпитаксии

Кремний при автоэпитаксиальном росте легируют элементами III и V групп периодической таблицы. Наиболее часто для легирования используют соединения, содержащие фосфор, мышьяк и бор. В зависимости от концентрации примеси, ее типа и способа легирования получают кремниевые слои, обладающие разным сопротивлением.

Обычно требуется небольшая концентрация примеси, поэтому при использовании жидких источников их многократно разбавляют, в результате чего получают растворы с относительным содержанием примеси от 10~9 до 10~2. Это обеспечивает уровень легирования ЭС от 1014 до 1019 ат/см3.

Для получения воспроизводимых результатов при легировании бором необходимо применять борсодержащие соединения с высокой температурой кипения. При легировании легирующее соединение помещают в отдельный испаритель, а количество бора, поступающего в реактор, регулируют потоком транспортирующего газа Н2, проходящего через испаритель.

В зависимости от температуры осаждения при легировании в системе SiCl4 - РСl5 и SiCl4 - SbCl5 сопротивление получаемых слоев оказывается различным. При легировании сурьмой эта зависимость более ярко выражена.

Концентрация фосфора и сурьмы в выращиваемых слоях обычно пропорциональна их концентрации в смеси и не зависит от скорости роста пленки.

Жидкостные методы легирования применяют при выращивании однослойных структур. При выращивании многослойных структур с разным типом электропроводности или с переменной концентрацией примеси по толщине они непригодны. Это связано с тем, что галогениды хорошо адсорбируются стенками газопроводов и реакторов, загрязняя установку и вызывая необходимость промывки газовой системы и реакторов перед выращиванием последующего слоя.

Газовое легирование. При легировании с использованием газообразных примесных соединений гидридов фосфина (РН3), арсина (AsH3), диборана (В2Н6) их взаимодействие с поверхностью газопроводов и реактора существенно уменьшается.

Уровень легирования зависит от температуры, уменьшаясь с ее ростом, от концентрации легирующих примесей в газе и от его парциального давления., Так, при 1200° С уровень легирования кремниевой пленки фосфором из РН3 вплоть до концентраций 1018 см"3 линейно возрастает с повышением концентрации РН3. При одном и том же значении парциального давления легирующего газа более высокую концентрацию примеси в растущем слое получают при легировании его бором (из диборана) в сравнении с As (из арсина). Это связано с тем, что арсин частично конденсируется на внутренних стенках реакционной камеры из-за высокого парциального давления а бор, существующий в виде газообразного соединения низшей валентности ВН3, при высоких температурах на них не конденсируется.

Основным фактором, влияющим на уровень легирования слоев кремния гидридами, является концентрация парогазовой смеси и температура процесса. Поэтому для дозировки легирующих гидридов применяют расходомеры с точностью отсчета не менее 1% и воспроизводимостью отсчета, равно 0,2 % максимального расхода.

Для регулирования в широком диапазоне концентрации легирующего гидрида используют системы двойного разбавления водородом и контролируют сброс основной доли разбавляемого газового потока расходомером.

Газоразрядное легирование. Газоразрядный способ легирования наиболее безопасен для обслуживающего персонала, поэтому при проведении процесса рабочий может находиться рядом с реакционной камерой. Легирующую газовую смесь приготовляют в специальной газоразрядной камере, через которую пропускают водород. В камере располагают электроды, материал которых содержит элементы III и V групп периодической системы. Материалы электродов должны быть проводящими, высокооднородными, иметь высокую теплоту испарения.

Для получения эпитаксиальных слоев дырочного типа электропроводности чаще всего используют электроды из борида лантана LaB6. электронного типа - из сурьмы, сплава кремния с 0,1 мае. % фосфора или сплава сурьмы с 1 мае. % мышьяка. При подаче на электроды высокого постоянного или импульсного напряжения между ними возникает газовый разряд, в результате которого образуются летучие соединения элементов материала электрода. Этот способ позволяет легировать кремниевую пластину в диапазоне контролируемых концентраций: мышьяком 5 • 1015 - 1 • 1018 см"3 и бором 3 • 1015 - 5 • 1017 см'3.

Для получения контролируемого легирования необходимо управлять скоростью протекания газа через разрядную камеру, расстоянием между электродами, мощностью, подводимой к электродам, иметь нужный материал электродов.

Самым гибким способом управления степенью легирования в режиме тлеющего разряда является изменение разрядного тока. На рисунке 1 показана зависимость уровня легирования бором от тока газового разряда для электродов из LaB6, откуда следует, что при изменении разрядного тока до 500 мкА уровень легирования достигает предельной концентрации.

Рисунок 1. Зависимость уровня NB легирования бором от тока газового разряда Ip пленки толщиной L = 2 мм.

Процессы, происходящие при этом в разрядной камере, следующие. При подаче высокого напряжения в камере возникают нестабильные легирующие соединения. Время их существования увеличивают за счет повышения скорости потока водорода через камеру. Присутствие в камере водорода приводит также к росту количества легирующих атомов в объеме камеры. При очень больших потоках водорода рост концентрации легирующих атомов замедляется, так как скорость образования легирующих соединений в зоне разряда ограничена. Повысить ее можно лишь путем увеличения мощности разрядного генератора, прикладываемой к электродам.

С ростом частоты импульсов уровень легирования также повышается за счет увеличения энергии, выделяемой в зоне разряда в единицу времени.

При легировании бором образующиеся в результате разряда атомы являются его гидридами. При легировании мышьяком просто распыляются электроды.

Газоразрядное легирование предпочтительно использовать для получения малых концентраций легирующей примеси и при создании многослойных структур.

Следует отметить, что процесс роста пленки и ее легирования тесно взаимосвязаны. Так, при повышении скорости роста пленки от 0,1 до 1,0 мкм/мин концентрация легирующей примеси, например As, в эпитаксиальном слое уменьшается на порядок.

Автолегирование. Кроме контролируемых примесей в эпитаксиальный слой попадают и неконтролируемые примеси из пластины. Этот процесс называется автолегированием. Механизм автолегирования представлен на рисунке 2. Неконтролируемые примеси внедряются в растущий эпитаксиальный слой 1 за счет твердотельной диффузии 6 через границу 2 ЭС - пластина 3, а также за счет испарения примеси с нерабочих поверхностей пластины и переноса через газовую фазу 7, 8. С лицевой стороны пластины автолегирование проявляется как увеличение ширины переходной области d - d1 между слоем и пластиной (Рисунок 3).

При эпитаксии кремния скорость роста пленки существенно превосходит скорость диффузии атомов примеси, поэтому

Рисунок 2. Схема автолегирования:

1 - эпитаксиальный слой; 2 - металлургическая граница ЭС - пластина; 3 - пластина; 4 - подложкодержатель; 5 - скрытый слой; 6 - твердотельная диффузия; 7, 8 - перенос примеси через газовую фазу с нерабочей и боковой (торцевой) стороны пластины.

Рисунок 3. Распределение концентрации примеси N на границе перехода пластина - эпитаксиальная структура по глубине х пластины:

0 - d - начало равномерного участка примесного профиля в ЭС; d1 - - начало равномерного участка примесного профиля в пластине; d - dl - переходный спой; 0 – d1 - полная толщина ЭС.

Профиль легирования пленки в основном определяется переносом примеси через газовую фазу. Примесь переходит в газовую фазу на этапе предварительного прогрева. На поверхности пластины образуется адсорбированный слой примесных атомов, которые и захватываются растущей пленкой. Примесные атомы адсорбируются и подложкодержателем.

При автолегировании диффузия по поверхности пластины не играет существенной роли. Установлено, что разница между максимальными концентрациями примеси при автолегировании мышьяком составляет 2-3 порядка.

Для уменьшения автолегирования нерабочую поверхность пластины маскируют SiO2 или Si3N4. В последнее время для уменьшения автолегирования используют пониженное давление. Разницу в скорости испарения при использовании для эпитаксии кремния проточной системы и вакуума можно объяснить наличием пограничного слоя у поверхности пластины, влияющего на условия испарения. Поток примеси в газовую фазу с нерабочих поверхностей пропорционален концентрации в поверхностном слое этих поверхностей. Часть потока осаждается на растущей пленке. В вакууме эта часть потока сводится к минимуму.

Автолегирование уменьшается и при снижении скорости роста пленки (как над скрытым слоем, так и вне его). Оно зависит от площади скрытого слоя и с ее уменьшением уменьшается пропорционально (где Scc - площадь скрытого слоя). Уменьшение автолегирования наблюдается при повышении температуры эпитаксии вплоть до 1050 - 1100° С. В хлоридном процессе (по сравнению с силановым) оно меньше, что объясняется наличием дополнительного подтравливания поверхности хлористым водородом, в результате чего уменьшается количеством атомов примеси, захватываемых растущей пленкой.


# ЛИТЕРАТУРА

1. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. Учебник для ВУЗов - М; Радио и связь, 2007 - 464 с: ил.
2. Технология СБИС. В 2 кн. Пер. с англ. / Под ред. С. Зи, - М.: Мир, 2006. -786 с.
3. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. Справочник. - М.: Радио и связь, 2001. -528 с.
4. Достанко А.П., Баранов В.В., Шаталов В.В. Пленочные токопроводящие системы СБИС. -Мн.: Выш. шк., 2000. -238 с.
5. Таруи Я. Основы технологии СБИС Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 2000-480 с.