

Формирование эпитаксиальных структур кремния с тонкими слоями и резкими переходными границами для СВЧ диодов

В.Н. Рябов¹, А.В. Дерябкин¹, А.С. Ткачева¹, И.В. Тарасов¹, Н.Б. Хахин¹, М.Н. Дроздов²

¹АО «НПП «Исток» им. Шокина»

²Институт физики микроструктур РАН

Аннотация: эпитаксиальные структуры кремния для ЛПД мм диапазона длин волн получены методом газофазной эпитаксии при пониженных температуре и давлении с учетом эффекта поверхностной сегрегации примесей.

Ключевые слова: кремний, газофазная эпитаксия, поверхностная сегрегация, ВИМС.

Для создания кремниевых СВЧ диодов, работающих в мм диапазоне длин волн, необходимы многослойные эпитаксиальные структуры, в которых тонкие слои (0,2 мкм и менее) различаются не только уровнем легирования, но и типом проводимости (n- и p-). Поскольку СВЧ диоды работают в жестких режимах, слои также должны быть бездефектными.

Решение поставленной задачи осуществляется путем применения низкотемпературного процесса газофазной эпитаксии при пониженном давлении в реакторе в диапазоне 10 – 20 кПа с использованием пиролиза моносилана. Осаждение при пониженном давлении улучшает качество растущих кристаллических слоев и позволяет снизить температуру эпитаксии благодаря подавлению газофазных реакций, снижению сорбции водорода, кислорода, галогенов и других посторонних атомов на поверхности роста, активации поверхностных реакций локальным газовым разрядом при использовании ВЧ нагрева.

Применяя этот метод наращивания можно снизить температуру совершенного роста эпитаксиальных слоев кремния до 850 – 950 °С. Термодиффузия легирующих примесей при этом незначительная, и преобладающее влияние на формирование профиля легирования слоев оказывает эффект сегрегации примеси [1,2].

Этот эффект обусловлен особыми свойствами поверхности растущего слоя – границы двух фаз. Первая фаза – газовая (приповерхностный слой) в ней проходят химические реакции по образованию ростовых и легирующих компонент и транспорт этих компонент. Вторая фаза – твердая, представляющая собой растущий кристалл, решетку которого можно представить идеальной в глубине выращенного слоя и сильно деформированной у поверхности из-за наличия оборванных ковалентных связей. Непосредственно на поверхности так же, как и в газовой фазе, имеют место отдельные химические реакции. Происходит миграция легирующих и ростовых атомов или агрегатов до момента встраивания в решетку кристалла, идут важные для наращивания процессы сорбции, как атомов кремния и легирующих примесей, так и атомов, занимающих места зародышеобразования (водорода – газа-носителя, следов углерода, кислорода, галогенов – после предэпитаксиального травления).

Степень искажения решетки убывает с удалением от поверхности, но может достигать десятков межатомных расстояний. Это искажение влияет на встраивание атомов легирующих примесей, имеющих, например, несколько отличные от атомов кремния атомные и ионные радиусы, соотношения ковалентных и ионных связей, присущих элементу. Большая часть примесей преимущественно накапливается в этой

искаженной области кристалла. Поэтому на начальной стадии эпитаксиального роста легирующая примесь расходуется на обогащение тонкого, около 0,01 мкм, слоя.

При сравнительно малой толщине слоя количество сегрегированных атомов примеси существенно, так как концентрация их превышает равновесную концентрацию в глубине выращенного слоя на два порядка, в зависимости от температуры роста и типа примеси. На профиле распределения можно наблюдать провал, область с недостаточным легированием. При наращивании слаболегированного слоя на сильнолегированный слой эффект проявляется в медленном спаде концентрации, легирующая примесь из сегрегационного расходуется в растущий слой. Такие аномалии в легировании затрудняют получение структур с резкими переходами между слоями разного типа проводимости или с различным уровнем концентрации носителей заряда. Поэтому для уменьшения влияния эффекта приповерхностной сегрегации примеси проводится предварительный запуск лигатуры перед наращиванием слоя для создания на поверхности необходимого избытка атомов примеси, и высокотемпературный отжиг после его наращивания для освобождения поверхности от сегрегированной примеси.

На рисунке 1 представлен профиль распределения легирующей примеси полученной из вольт-фарадных измерений в эпитаксиальной структуре кремниевого лавинно-пролетного диода $p^{++}n^{+}np^{++}$ -типа, выращенной с учетом сказанного выше на установке «Эпикрем» [3].

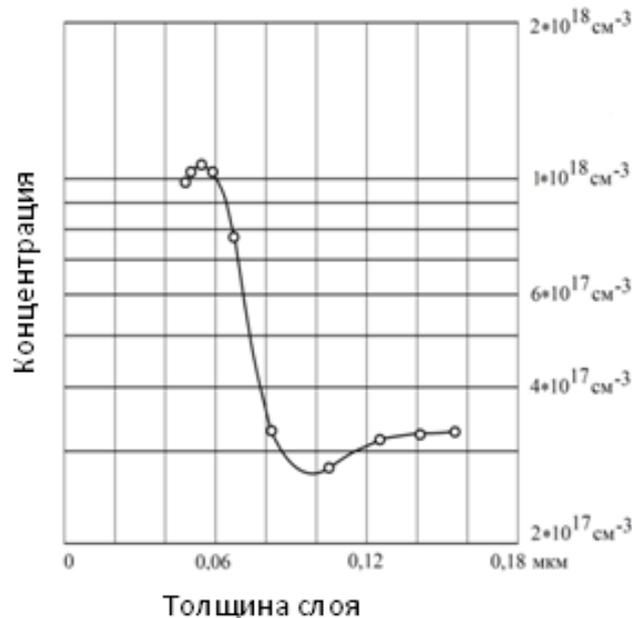


Рисунок 1. Структура $p^{++}n^{+}np^{++}$ -типа.

В структуре n -слой ($N \sim 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) легирован фосфором, температура роста 950°C , n^+ -слой ($N \sim 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) – мышьяком. На рисунке 2 представлен профиль распределения атомов бора и мышьяка в структуре $p^{++}p^+n^+np^{++}$ -типа, полученный методом вторичной-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на установке TOF.SIMS-5.

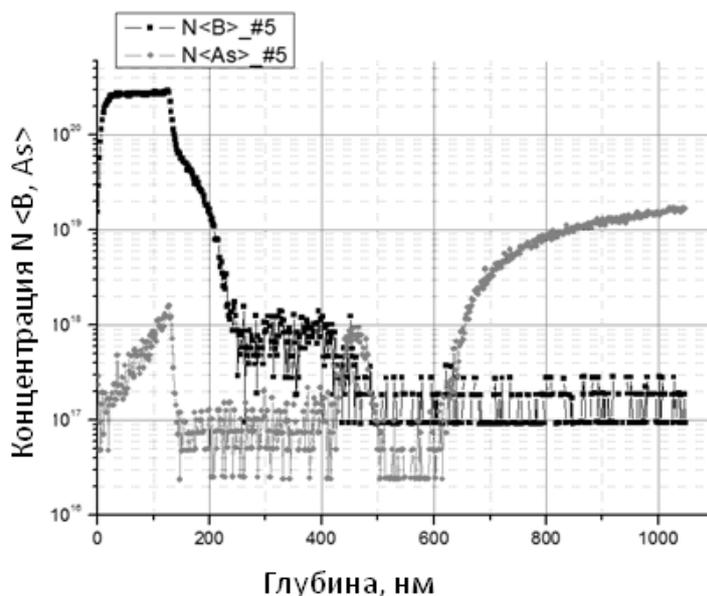


Рисунок 2. Структура $p^{++}p^{+}n^{+}n^{++}$ -типа.

Измерения показывают возможность получения p-слоев кремния с высоким уровнем легирования (пиков) толщиной 0,05 – 0,1 мкм.

Интересно распределение атомов мышьяка на рисунке 2. Видно, что после наращивания n^{+} -слоя и отжига в растущий слой p-типа мышьяк входит в концентрации сравнимой с порогом обнаружения ВИМС, хотя в области сегрегации он остается в большом количестве и во время роста перемещается вместе с поверхностью роста. Однако, когда наращивается контактный слой, легированный бором с концентрацией больше 10^{20} см^{-3} , перемещение области сегрегации As прекращается, и ее уровень легирования уменьшается за счет вхождения атомов As в растущий p^{+} -слой в значительном количестве. Это можно объяснить образованием пар агрегатов B-As, с одной стороны – элементов акцептор-донор в кремнии, с другой – имеющие разные ионные и атомные радиусы. Такое взаимодействие B-As наблюдалось также при неудачной попытке вырастить полную структуру Рида с двумя соседними областями p^{+} и n^{+} , легированными до уровня более $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Вольт-фарадные измерения показывали на порядок меньше концентрации, и даже чередование n- и p-типа проводимости в переходе.

Эпитаксиальным наращиванием кремния из газовой фазы при пониженном давлении 10-20 кПа и температуре 850 - 950°C в реакторе методом пиролиза моносилана можно получать тонкие структуры с толщиной отдельных слоев до 0,2 мкм и до 0,05 мкм толщиной слоев пиков легирования для различных СВЧ приборов мм диапазона длин волн. При этом необходимо учитывать явления сегрегации легирующих примесей в приповерхностной области роста и использовать способы, уменьшающие ее влияние на формирование профиля легирования структур. Необходимо также продолжить исследования поверхностной сегрегации примеси.

Список литературы

1. В.В. Никулов, В.Н. Рябов Сегрегационная модель автолегирования кремния в эпитаксиальном слое. Электронная техника. Серия 1.СВЧ-электроника. Вып. 10 (414). – 1988. – С. 53-54.
2. Ю.Ю. Эрвье О накоплении примеси в адсорбционном слое в процессе легирования при молекулярно-лучевой эпитаксии. Материалы электронной техники. – 2013. №2. – С. 4-10.
3. Э.А. Ангилов, А.А. Исаев, Л.И. Козеева, В.В. Никулов, В.Н. Рябов Установка осаждения пленок из газовой фазы при пониженном давлении. Электронная промышленность. Вып. 2 (160). – 1987. – С. 61-62.