

# Эпитаксиальное наращивание структур кремния с тонкими легированными бором слоями для СВЧ диодов

А.С. Дубкова, Е.Н. Куликов, В.Н. Рябов, И.В. Тарасов, Н.Б. Хахин

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

**Аннотация:** В работе получены эпитаксиальные структуры кремния с тонкими пиками бора. Проведено сравнение полученных профилей легирования для структур с различными режимами роста. Определены отдельные условия получения тонкого пика для структур, легированных бором.

**Ключевые слова:** кремний, бор, газофазная эпитаксия, поверхностная сегрегация, ЛПД

## 1. Введение

Кремниевые СВЧ диоды, работающие в мм диапазоне длин волн, изготавливаются на основе многослойных эпитаксиальных структур с тонкими бездефектными слоями. Тонкие слои толщиной 0,2 мкм и менее, различаются не только уровнем легирования, но и типом проводимости (n и p). Так для ЛПД с увеличением рабочей частоты диода уменьшаются его размеры, площадь и мощность генерации. В таком случае уже не обойтись без двухпролетного исполнения диода как с n-, так и p-слоями. Для диодов, имеющих структуру Рида с повышенным КПД необходимо получать тонкие пики с более высокой концентрацией примеси, из-за чего возрастают требования к толщине p-слоев. Как правило, получение слоев дырочного типа проводимости производят путем легирования бором. Легирование слоев бором имеет свои особенности и трудности по сравнению с получением слоев n-типа проводимости (фосфор, мышьяк или сурьма) и требует дополнительного изучения.

Низкотемпературный процесс газофазной эпитаксии проводится при пониженном давлении в реакторе в диапазоне 10 - 20 кПа с использованием пиролиза моносилана. Применяя этот метод можно снизить температуру совершенного роста эпитаксиальных слоев кремния до 850 - 950 °С, что необходимо для выращивания тонких структур. Термодиффузия легирующих примесей при этом незначительная, однако преобладающее влияние на формирование профиля легирования слоев теперь оказывает эффект сегрегации примеси [1, 2].

Этот эффект обусловлен особыми свойствами поверхности растущего слоя, решетка которого идеальна в глубине выращенного слоя и сильно деформирована у поверхности из-за наличия оборванных ковалентных связей. Степень искажения решетки убывает с удалением от поверхности, но может достигать десятков межатомных расстояний. Это искажение влияет на встраивание атомов легирующих примесей, имеющих отличные от атомов кремния атомные и ионные радиусы, соотношения ковалентных и ионных связей, присущих элементу. Большая часть примесей при низкотемпературном росте преимущественно накапливается в этой искаженной области кристалла. Концентрация примеси может превышать равновесную концентрацию в глубине выращенного слоя на два порядка. Кристаллическая решетка поверхностного слоя в этом случае значительно отличается от идеальной решетки в глубине кристалла.

Подобное наблюдается при легировании кремния атомами бора. Так ковалентный тетраэдрический радиус атомов бора составляет 0,88 Å при том, что для кремния – 1,17

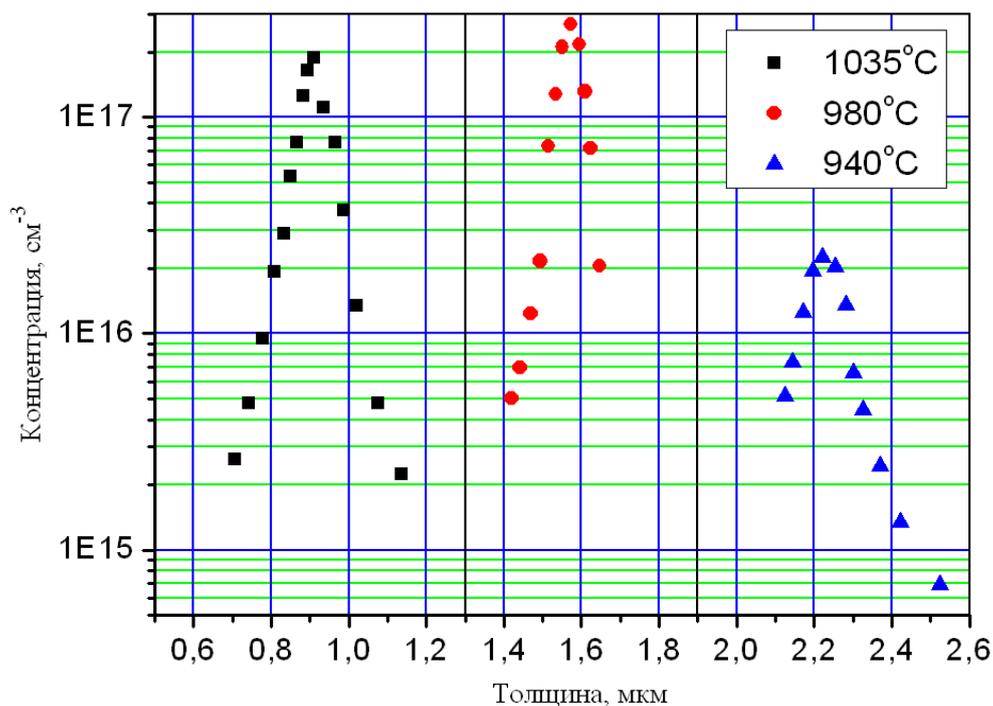
Å. При больших концентрациях бора изменяется параметр решетки. При эпитаксии с использованием пониженных температур толщина обогащенного примесью слоя составляет, по нашим оценкам, около 0,01 мкм. В работе [3] по результатам ВИМС измерений структуры, выращенной методом МЛЭ при температуре 600°C, составляет 150-200 Å. Кроме того при больших концентрациях в слое, как в приповерхностном сегрегационном слое, атомы примеси могут образовывать сложные комплексы, в которых до 30% примеси электрически не активна [4], но при дальнейшем эпитаксиальном росте будет участвовать в автолегировании и, вероятно, активируется.

## 2. Получение структур и профили легирования

Эпитаксиальные структуры кремния типа  $n^{++}pp^{+}pp^{++}$  для нахождения оптимальных режимов легирования бором тонкого  $p^{+}$ -слоя наращивались при пониженных давлении и температуре в реакторе методом пиролиза моносилана. Толщина слоя и уровень его легирования зависят от многих параметров процесса. С учетом наличия сегрегации примеси варьировались режимы предварительного запуска легирующей добавки – диборана в реактор (с целью насыщения приповерхностного слоя), роста и отжига после роста (для уменьшения влияния на наращивание последующих слоев).

Было обнаружено, что уровень легирования  $p$ -слоев, граничащих с  $p^{+}$ -слоем, почти не зависит от уровня легирования подложки  $p^{++}$  ( $4 \cdot 10^{19}$ ,  $1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ), но зависит от температуры наращивания, и чем выше температура, тем выше уровень. Это совпадает с написанным ранее в работе [5], что автолегирование бором уменьшается при понижении температуры осаждения слоя, а автолегирование мышьяком – увеличивается.

Также было замечено, что профиль легирования переходных областей  $p^{+}$ -слоя зависит не только от режима наращивания слоя, но и от режимов предварительного запуска лигатуры в реактор и отжига слоя. И есть отличия при легировании слоев бором и мышьяком или фосфором. Для примера на рисунке 1 приведены профили легирования  $p^{+}$ -слоя структур  $n^{++}pp^{+}pp^{++}$  после измерения вольт-фарадных характеристик и их расчета. Структуры получены при температуре роста 940°C, варьировались лишь температура предварительного запуска и расход лигатуры (в небольших пределах), последнее, впрочем, не должно сказываться на толщине  $p^{+}$ -слоя.



**Рисунок 1.** Профили легирования  $p^+$ -слоя структур  $n^{++} p p^+ p p^{++}$  типа, температура предварительного запуска  $940^\circ\text{C}$ ,  $980^\circ\text{C}$ ,  $1035^\circ\text{C}$ .

Из рисунка 1 видно, что нет однозначной зависимости толщины  $p^+$ -слоя от температуры запуска. Существует оптимальная температура, при неизменных других параметрах режима эпитаксии, позволяющая получать наименьшую толщину  $p^+$ -слоя, в нашем случае –  $980^\circ\text{C}$ . Можно предложить объяснение обнаруженной зависимости. С одной стороны, с уменьшением температуры уменьшается диффузионное размытие сторон слоя. С другой стороны, увеличивается сегрегационное накопление атомов бора в приповерхностном слое структуры за счет уменьшения десорбции (энергия связи пары Si-B равна  $68,7$  ккал/моль, при том, что для Si-Si –  $56$  ккал/моль, Si-P –  $48$  ккал/моль). И при последующем наращивании, не смотря на понижение уровня легирования, накопившаяся примесь расходуется на встраивание в кристаллическую решетку, увеличивая толщину  $p^+$ -слоя.

### 3. Заключение

Для изготовления кремниевых СВЧ диодов (в том числе ЛПД) с улучшенными характеристиками, большой мощностью и расширенным в сторону больших частот рабочим диапазоном необходимы эпитаксиальные структуры с тонкими ( $0,1$  мкм и менее)  $n$ - и  $p$ - слоями. Получение таких структур возможно газофазной эпитаксией при пониженном давлении  $10$ - $20$  кПа и температуре  $850$  -  $950^\circ\text{C}$  в реакторе путем пиролиза моносилана. При этом необходимо учитывать влияние эффекта сегрегации примесей в приповерхностных слоях во время наращивания. Закономерности легирования  $n$ - и  $p$ - слоев различаются. В зависимости от приборных задач получение тонких слоев (пиков), легированных бором, требует технологической оптимизации всех этапов наращивания слоя. Таких этапов, как предварительный запуск лигатуры в реактор, наращивание слоя, отжиг слоя. В качестве примера показано влияние температуры во время предварительного запуска диборана в реактор на толщину выращенного  $p^+$ -слоя. Исследования поверхностной сегрегации примеси бора при оптимизации режимов наращивания тонких слоев кремния будут продолжены.

Список литературы

1. Никулов, В.В. Сегрегационная модель автолегирования кремния в эпитаксиальном слое / В.В. Никулов, В.Н. Власов // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-электроника. – 1988. – Вып. 10 (414). – С. 53-54.
2. Эрвье, Ю.Ю. О накоплении примеси в адсорбционном слое в процессе легирования при молекулярно-лучевой эпитаксии / Ю.Ю. Эрвье // Материалы электронной техники – 2013. – № 2. – С. 4-10.
3. Keith, H. Chung. Silicon-based epitaxy by chemical vapor deposition using novel precursor neopentasilane: dissertation candidacy for the degree of doctor of philosophy / Keith, H. Chung. – Princeton, 2010. – 149 p.
4. Voyles, P.M. Atomic-scale imaging of individual dopant atoms and clusters in highly n-type bulk Si / P.M. Voyles, D.A. Muller, J.L. Grazul et al. // Nature. – 2002. – Vol. 416. – P. 826-829
5. Зи, С. Технология СБИС в 2 кн. / Под ред. С. Зи. – М: Мир, 1986. – 453 с.