

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР С УМЕНЬШЕННОЙ ВЕЛИЧИНОЙ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ

А.П. ОКСАНИЧ, Е.А. СЕДИН

Разработан метод и установка получения кремниевых эпитаксиальных слоёв на сильно легированных подложках с резким концентрационным переходом вблизи границы слой-подложка. Показано, что при проведении пиролиза в аргоне при пониженном давлении разброс по толщине и концентрации легирующей примеси в слоях уменьшается приблизительно в два раза и составляет менее 10%.

Ключевые слова: пиролиз, концентрация примеси, диффузия, силан, пониженное давление.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема концентрационной переходной области (КПО) между подложкой и основным объёмом осаждённой монокристаллической плёнки является частью более общей задачи получения кремниевых однослойных эпитаксиальных структур (КОЭС), однородных по толщине и повышенным структурным совершенством. Широкое использование эпитаксиальной технологии в микроэлектронике, уменьшение толщины слоёв в КОЭС требовали устранения либо максимального уменьшения протяжённости КПО, образующихся на начальной стадии роста слоёв. Исследования КПО продолжены в работах о свойствах границ раздела слой-подложка и связаны с совершенствованием методов изучения объёмных свойств тонких эпитаксиальных слоёв. Систематизация результатов исследований протяжённости структурных и других свойств КПО, их влияния на свойства эпитаксиальных слоёв отражены в работах [1-6].

Поэтому разработка технологии получения КОЭС с толщиной эпитаксиального слоя 0,1-5 мкм и уменьшенными величинами КПО и плотности дислокаций является весьма актуальной задачей.

1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В последние годы одним из важнейших направлений развития микроэлектроники является создание полупроводниковых приборов на базе тонкослойных эпитаксиальных структур (толщина слоя 0,3-5,0 мкм). Слои необходимо осаждать на сильно легированных подложках при их удельном сопротивлении 0,01-0,001 Ом·см. Основным требованием к таким КОЭС является наличие резких КПО вблизи границы слой-подложки (порядка 10-20% от толщины слоя).

При использовании традиционного способа осаждения КОЭС методом водородного восстановления тетрахлорида кремния не удаётся получить малые величины КПО, вследствие высокой

температуры проведения процесса (порядка 1200°С) [7].

Величина КПО определяется прежде всего твердотельной диффузией примеси из сильно легированной полужошки в слой и автолегированием слоёв [7]. Так как коэффициент диффузии — легирующих элементов снижается приблизительно на порядок на каждые 100°С, необходимо снижение температуры эпитаксиального процесса и понижения давления.

КПО образуются при росте слоя, поэтому наиболее важным является исследование группы ростовых факторов таких как термодинамические характеристики процесса роста — температура и плотность (давление) исходной фазы так и кинетические характеристики — скорость реакции, диффузия, образование и перемещение дефектов упаковки и дислокаций. Образование дислокаций в процессе получения слоя способствует диффузия примесей, которая ведёт к размножению дислокаций и к расширению КПО.

Целью настоящей работы являлось исследование условий получения КОЭС методом пиролиза силана при пониженном давлении в токе аргона или в смеси аргона с водородом для обеспечения получения КОЭС с уменьшенными величинами КПО (10-20%) и улучшенными структурными характеристиками.

2. РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ «ВЕРТИКАЛЬ-2 МА» И МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЁВ КРЕМНИЯ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ В РЕАКТОРЕ

На рис. 1 приведена структурная схема установки для выращивания эпитаксиальных слоёв кремния «Вертикаль-2 МА». Графитовая пирамида 1 с кремниевыми подложками 2 размещена в водоохлаждаемом реакторе 3 на вращающемся пьедестале 4. Нагрев пирамиды 1 осуществляется с помощью многовиткового индуктора 5 питаемого через машинный преобразователь 6. Смесь

силана с аргоном поступает из баллона 7, а аргон и водород из установок их очистки 8 и 17.

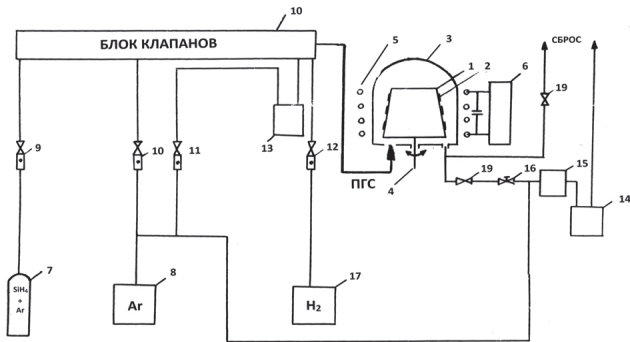


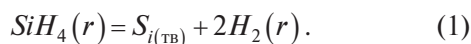
Рис. 1. Структурная схема установки «Вертикаль 2 МА»: 1 – пирамида, 2 – подложки, 3 – кварцевый реактор, 4 – вращающийся пьедестал, 5 – индуктор, 6 – машинный преобразователь ВПЧ – 100/8000, 7 – баллон с силано-аргонной смесью, 8 – установка очистки аргона, 17 – установка очистки водорода, 9-12 – ротаметры, 13 – испаритель с лигатурой, 14 – пластинчато-роторный насос, 15 – ловушка с активированным углём, 16 – кран Гофера, 19 – вентиль

На линиях подачи аргонно-водородной смеси и лигатуры в блоке клапанов 10 установлены показывающие приборы с регуляторами. Кроме того, на всех линиях дополнительно установлены ротаметры.

На выходе из реактора установлен пластинчато-роторный насос 14 и ловушка 15, заполненная активированным углём для захвата паров масла.

Термодинамический анализ проводился на основе расчёта равновесного состава газовой фазы в ядре потока и у поверхности осаждения, с учётом всех соединений кремния с водородом, физико-химические свойства которых известны. Следовательно на макроуровне процесс осаждения кремния при атмосферном давлении до температуры 1500 К можно представить следующим образом.

Подаваемая в реакторе силановодородная смесь разогревается в ядре потока практически без изменения состава газовой фазы до температуры около 900°C. Молекулы силана диффундируют через пограничный слой к поверхности осаждения и эпитаксиальный рост идёт по брутто – реакции



При более высоких температурах наблюдается также образование SiH_2 , который абсорбируется и разлагается до кремния на поверхности подложки.

Макроскопическую картину эпитаксии кремния при пониженном давлении $1,32 \cdot 10^2$ Па (или смеси $SiH_4 + 0,13\% H_2 + 99,87\% Ar$) в диапазоне температур 800-1100 °С можно представить следующим образом. Силеновый радикал (SiH_2) диффузирует через граничный газовый слой

вблизи подложки и диссоциирует на её поверхности с образованием кремния. При температурах свыше 1100 °С наблюдается диффузия и диссоциация SiH , причём с повышением температуры всё большая доля SiH диссоциирует до кремния уже в газовой фазе. В этом случае к поверхности осаждения подходят пары кремния.

Суммарный выход кремния, который в отсутствие гомогенного зародышеобразования равен скорости роста ($V \frac{ммоль}{см^2 \text{ час}}$)

$$V = \frac{D^0}{P_* R^* T^* Z} (P_1^* - P_2^*) \left(\frac{T}{273}\right)^{1,7}, \quad (2)$$

где P_1^* и P_2^* – гипотетические парциальные давления в ядре потока и у поверхности осаждения [8], R – газовая постоянная (кал/град. моль), Z – толщина граничного слоя газа (см), D^0 – коэффициент диффузии кремнийсодержащего компонента через граничный слой при комнатной температуре ($см^2/с$).

На рис. 2 приведены зависимости суммарного выхода кремния от концентрации силана в смеси. Здесь же для сравнения приведены расчётные кривые для хлорсиланов. Из рис. 2 видно, что выход кремния из силана максимален.

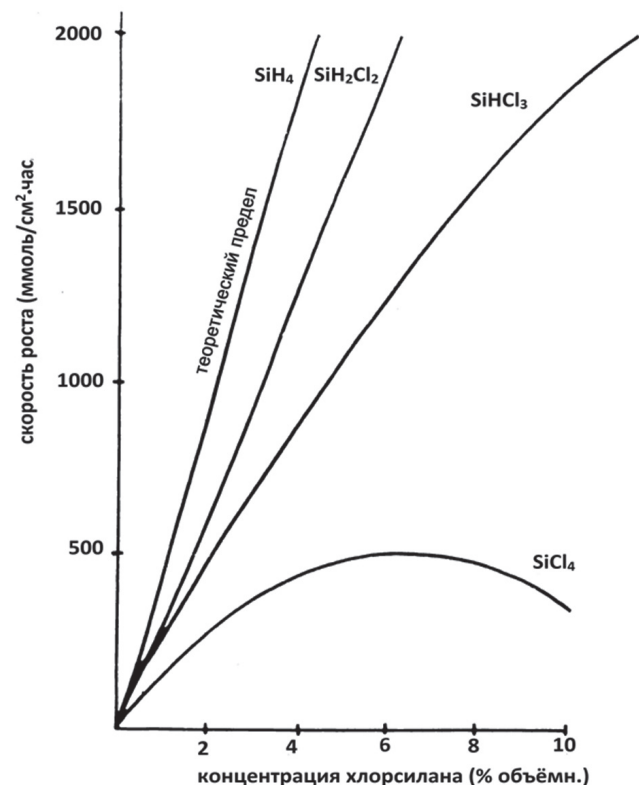


Рис. 2. Зависимость суммарного выхода кремния от концентрации кремнийсодержащего соединения

С учётом полученных выше термодинамических данных нами предложена схема кинетики процесса пиролиза силана представленная на рис. 3.

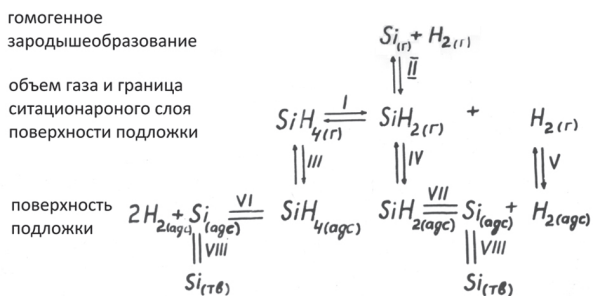


Рис. 3. Схема кинетики пиролиза силана

В зависимости от условий проведения процесса могут проходить 6 стадий пиролиза силана в объёме газовой фазы: гомогенное зародышеобразование, массоперенос силана, силенового радикала и водорода, адсорбция соединений на поверхности подложки, гетерогенное разложение силана и силена и рост эпитаксиального слоя, происходящий при поверхностной диффузии атомов кремния и встраивании их в твёрдую фазу.

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании теоретических и экспериментальных исследований приведённых выше, были определены оптимальные технологические режимы осуществления эпитаксиального наращивания слоёв методом пиролиза силана при пониженном давлении в реакторе в газе разбавителе аргоне или в смеси аргона (25%) с водородом. Исследовалось влияние условий проведения осаждения на величину КПО. Концентрационный профиль измерялся С-V методом в интервале концентраций 10^{13} - 10^{17} см⁻³ и нейтронно-активационным анализом при последовательном снятии тонких слоёв материала. Погрешность отдельного измерения находилась в пределах $\pm 20\%$ в зависимости от концентрации примеси.

На рис. 4 приведены концентрационные профили в самых тонких слоях (0,3 мкм), выращенных при различных температурах в смеси аргона с водородом (кривая 1) и в аргоне (кривая 2) на подложках легированных сурьмой до удельного сопротивления 0,01 Ом.см. Слои легировались сурьмой. Если в первом случае величина КПО составляет около 30%, то снижение температуры привело к уменьшению её до 10%.

Аналогичная картина имеет место и при осаждении слоев на ещё более сильно легированных мышьяком подлжках ($\rho=0,003$ Ом.см). При толщине легированных сурьмой слоёв 5 мкм величины КПО составляет, как показано на рис. 5, 10 и 22%. Таким образом, ожидаемое существенное снижение величины КПО вблизи границы слой-подложка при проведении низкотемпературной эпитаксии в аргоне достигается.

На рис. 6 и 7 показаны экспериментальные данные измерения распределения внутренних напряжений по плоскости КОЭС при хлорсилановой рис. 7 и силановой технологии рис. 6.

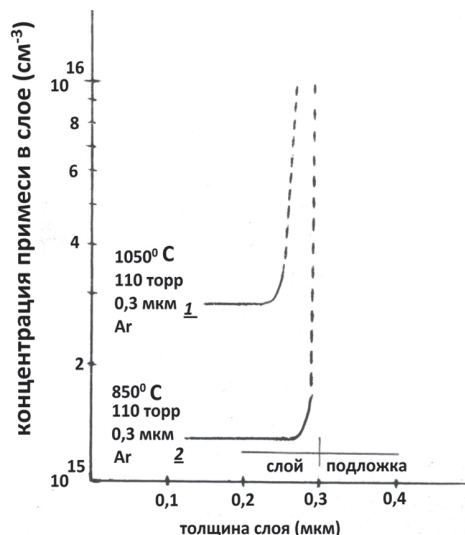


Рис. 4. Концентрационные профили в КОЭС, подложки КЭС 0,01, кривая 1 – 1050 °С, P = 1,45.10⁴ Па, аргона (25%) + водород, кривая 2 – 850 °С, P = 1,45.10⁴ Па, аргон

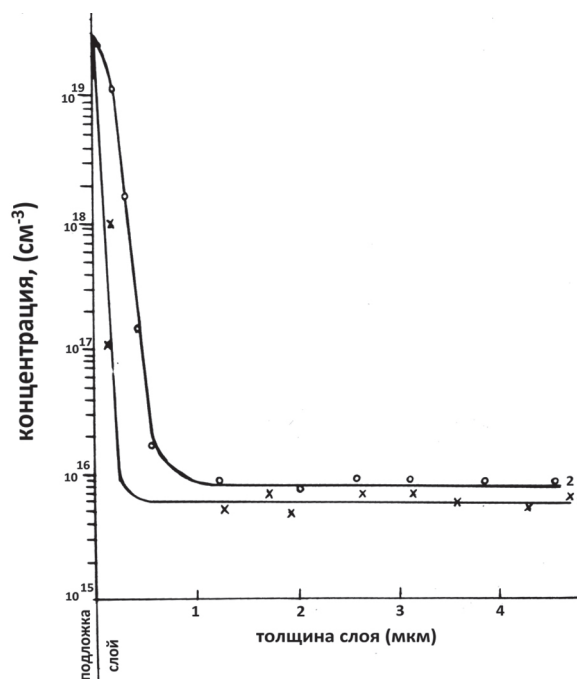


Рис. 5. Концентрационные профили в КОЭС, подложки КЭМ 0,003, кривая 1 – 850 °С, P = 10⁴ Па, аргон, кривая 2 – 1050 °С, P = 10⁴ Па, аргон (25%) + водород

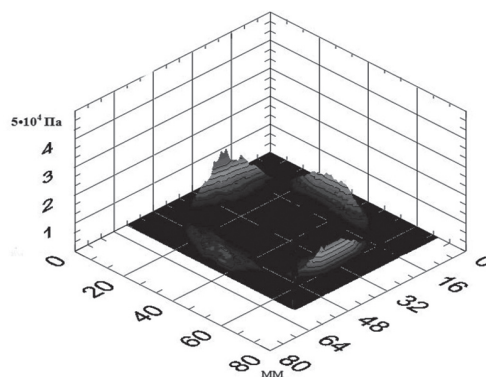


Рис. 6. Распределение внутренних напряжений в плоскости КОЭС по силановой технологии

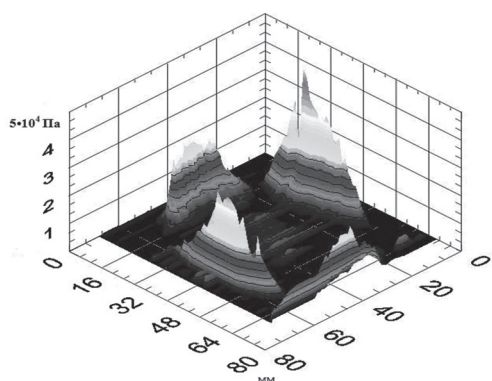


Рис. 7. Распределение внутренних напряжений в плоскости КОЭС по хлорсилановой технологии

Как видно из рисунков внутренние напряжения гораздо ниже при силановой технологии, что говорит о повышении структурного совершенства КОЭС.

ВЫВОДЫ

1. Разработан технологический режим и установка получения КОЭС на сильно легированных подложках с резким концентрационным переходом вблизи границы слой-подложка.

Осаждение методом пиролиза силана проводилось в газе разбавителе аргоне при 850 °С, давлении 10⁴ Па, мольной доле силана 0,1%.

2. Показано, что при проведении пиролиза в аргоне при пониженном давлении разброс по толщине и концентрации легирующей примеси в слоях уменьшается приблизительно в два раза и составляет менее 10%.

3. Впервые показано, что величина КПО снижается приблизительно до 10% от общей толщины слоя по сравнению с 30% в случае проведения пиролиза в водороде при атмосферном давлении.

4. Приведены результаты измерения внутренних напряжений, показывающие, что по предложенной технологии заметно улучшается структурное совершенство выращенных КОЭС.

Литература.

- [1] Александров Л.Н. О структуре переходного слоя эпитаксиальных полупроводниковых плёнок.// Матер. Всесоюз. Совещ. Пр дефектам структуры в полупроводниках. Новосибирск, ИФПН СО АН СССР, 1969, С. 5 – 21.7
- [2] Aleksandrov L.N. Physical and Technological Questions, concerning the Transition Layer Structure Formation of Epitaxial Semiconductor Films. «Mikroelektronik», 4, München – Vien, Oldenbourg Verlag, 1970, p. 13-35.
- [3] Mayer H. Transition layer and intermediate layer in epitaxy of vapor deposited films. – In: Advances in Epitaxy of vapor deposited films. – In: Advances in Epitaxy and Endotaxy. Leipzig, Veb. Deutscher Verlag, 1917, p. 63, 82.
- [4] Aleksandrov L.N. Structure and Properties of Transition Layer Formed in the Epitaxy Process. - «Phys. Stat. Solidi» (a), 1972, v. 11, p. 9-38.
- [5] Александров Л.Н. Структура и свойства переходных слоёв, образующихся в процессе эпитаксии. М., «Электроника», 1972. С. 46.

[6] Александров Л.Н. Структура и свойства переходных слоёв, образующихся в процессе эпитаксии полупроводников. - «Сборник научных трудов по проблемам микроэлектроники. Эпитаксии, II», 1975, вып. 20, С. 14-42.

[7] Гуревич В.М. Кинетика осаждения эпитаксиальных слоёв кремния методом пролиза силана. Известия АН СССР. Неорганические материалы, 1983, т.19, №11, С. 1781-1785.

[8] Шеффер Г., Химические транспортные реакции. М., «Мир», 1964, пер. немец.

Поступила в редколлегию 11.01.2012



Оксанич Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-управляющих систем Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского. Область научных интересов: оборудование и производство материалов электронной техники.



Седин Евгений Александрович, старший преподаватель кафедры технической кибернетики Криворожского института Кременчугского университета экономики, информационных технологий и управления. Научные интересы: методы и аппаратура контроля структурно совершенных полупроводниковых монокристаллов.

УДК 546.28

Розробка технології одержання кремнієвих епітаксиальних структур зменшеного розміру концентраційної перехідної області / А.П. Оксанич, Є.О. Седин // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2012. Том 11. № 1. – С. 100-103.

Розроблено метод и установка отримання кремнієвих епітаксійних шарів на сильно легованих підложках с різким концентраційним переходом поблизу межі шар-підкладка. Показано, що при проведенні піролізу в аргоні при зниженому тиску розкид у товщині і концентрації легуючої домішки в шарах зменшується приблизно в два рази і становить менше ніж 10%.

Ключові слова: піроліз, концентрація домішки, дифузія, силан, знижений тиск.

Лл. 7. Бібліогр.:8 найм.

UDC 546.28

Development of technology of obtaining silicon epitaxial structures with reduced value of concentration transition region / A.P. Oksanich, E.A. Sedin // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2012. Vol. 11. № 1. – P. 100-103.

A method and a unit for obtaining silicon epitaxial layers on heavily doped substrates with a sharp concentration transition near the boundary layer-substrate interface are developed. It is shown that at the realization of pyrolysis in argon at reduced pressure a variety in thickness and dopant concentration in the layers is reduced by approximately half and is less than 10%.

Keywords: pyrolysis, impurity concentration, diffusion, silane, reduced pressure.

Fig. 7. Ref.: 8.