

УДК 621.315.5.592.3

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ГЕРМАНИЕМ КАК ИЗОВАЛЕНТНОЙ ПРИМЕСЬЮ

В.М. БОРИСЕВИЧ, А.А. КОВАЛЕВСКИЙ, В.В. НЕЛАЕВ,
В.С. МАЛЫШЕВ, В.Р. СТЕМПИЦКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Унитарное предприятие "Белмикросистемы"

Поступила в редакцию 19 ноября 2003

Проведено экспериментальное исследование кинетики роста пленок поликристаллического кремния, легированных изовалентной примесью — германием. Установлены закономерности влияния основных технологических параметров процесса на скорость роста и удельное электрическое сопротивление пленок. Тонкие пленки поликристаллического кремния, легированные германием и выращенные при температуре 620⁰ С, при пониженном давлении обладают лучшими структурно-морфологическими свойствами по сравнению с нелегированными пленками. На основании экспериментальных результатов получена аппроксимационная зависимость скорости осаждения, удельного электрического сопротивления от условий разложения моногидридов и состава газовой смеси. Приведены результаты решения задачи оптимизации значимых параметров исследованного процесса.

Ключевые слова: кинетика, изовалентная примесь, скорость осаждения, удельное электрическое сопротивление, аппроксимация, оптимизация.

Введение

Осаждение пленок поликристаллического кремния в настоящее время — составная часть технологического цикла при изготовлении практически всех типов биполярных ИС, значительной части МОП и КМОП ИС, дискретных приборов, ПЗС и ППЗУ. Одной из ключевых проблем современной технологии осаждения пленок поликристаллического кремния является получение пленок с однородными свойствами. Особое значение эта проблема приобретает с ростом производительности оборудования и диаметра подложек.

Промышленные методы получения пленок поликристаллического кремния основаны на реакционной конденсации кремния из газовой фазы. В качестве исходных соединений используются SiCl₄, SiHCl₃, SiH₂Cl₂, SiH₄, Si₂H₆, а также транспортирующие газы — водород, гелий, аргон, азот. Процессы осаждения проводятся в реакционных камерах проточного типа преимущественно при пониженном давлении. Наиболее распространенным способом осаждения пленок поликремния является гидридный процесс, основанный на эндотермической реакции пиролиза моносилана:



В гидридном процессе пленки поликристаллического кремния с параметрами, соответствующими требованиям современной микроэлектроники, формируются, как правило, в кинетической области протекания гетерогенной реакции при температуре не выше 640 °С и пониженном давлении [1-8]. При таких условиях увеличивается значение энергии активации процесса. Макроскопическая скорость процесса определяется условиями химической реакции реагирующих веществ и продуктов реакции. Однородность параметров и качество пленок поликристаллического кремния определяются прежде всего геометрией реакционной зоны, составом газовой смеси, температурных и газодинамических условий [1-5].

Анализ кинетических характеристик основных систем парогазовых смесей [1, 3-5] свидетельствует о том, что существующие химические системы и режимы реализации процессов осаждения пленок поликристаллического кремния требуют серьезных усовершенствований составов вследствие низкой скорости осаждения и недостаточного качества осаждаемых пленок [1-8]. Решение этой задачи возможно только путем фундаментальных исследований и оптимизации процесса осаждения. Другим, не менее важным обстоятельством, стимулирующим интенсивные исследования в этой области, является широкое внедрение физического моделирования как на стадии обработки, так и на стадии использования технологического процесса.

Создание высококачественных пленок поликристаллического кремния невозможно без использования новых исходных материалов. К таким материалам относится газовая смесь моносилан-моногерман. В процессе осаждения из такой газовой фазы германий вводится в пленку поликристаллического кремния как изовалентная примесь. Примесные атомы германия принадлежат к той же группе периодической системы, что и замещаемые ими атомы кремния. Такое изовалентное легирование (замещение) представляет собой простейший вариант изовалентной ситуации в кристалле, поскольку оно является одноатомным и не изменяет координационного числа замещаемой кристаллографической позиции.

Связывание носителя на германии изовалентной примесью можно рассматривать как следствие различия электроотрицательностей замещаемых атомов кремния и германия. Известно [9], что электроотрицательность атома кремния равна 1,64, а атома германия — 1,59. Если электроотрицательность атома изовалентной примеси меньше электроотрицательности замещаемого атома, как это имеет место в случае германия с кремнием, то связываться будет дырка и германий как изовалентная примесь должен проявлять донорные свойства, что важно с точки зрения свойств легированных пленок поликремния.

В результате легирования пленки поликристаллического кремния германием как изовалентной примесью германий, концентрируясь по границам зерен, связывает оборванные связи в кремнии, не изменяя координационного числа замещаемой позиции. При этом образуется ковалентная связь между кремнием и германием, что сдерживает эффект рекристаллизации в результате образования малоподвижных границ между зернами. Немаловажное влияние дополнительное введение германия (моногермана) в газовую смесь оказывает и на кинетику процесса формирования пленки поликристаллического кремния.

Кинетика процесса осаждения пленок поликристаллического кремния

Успех реализации того или иного технологического процесса зависит главным образом от того, насколько правильно определены зависимости кинетики процесса от контролирующих параметров, таких, как концентрации (парциальные давления) и соотношения реагентов, температуры подложки, потоков газов. Все кинетические закономерности, которые обсуждаются ниже, получены при таких условиях эксперимента, когда явления массопереноса являются некритичными.

Задача исследования кинетики любой реакции, в том числе и гетерогенного взаимодействия газа с поверхностью подложки, начинается с установления аналитической зависимости скорости реакции от концентрации активного газа (газов) и температуры подложки. Снижение температуры процесса осаждения пленок поликристаллического кремния может быть достигнуто за счет создания таких условий, при которых скорость осаждения пленки не изменяется, или, напротив, увеличивается. Так, добавление примеси-катализатора к моносилану приводит к увеличению скорости осаждения, что представляет важный практический интерес к осаждению

пленок поликристаллического кремния при более низкой температуре. Однако влияние компонентов, способных играть роль инициаторов, на закономерности роста пленок поликристаллического кремния в изотермической реакционной зоне реакторов пониженного давления, как и на свойства выращенных пленок, еще не исследовано. Исследованию и оптимизации параметров процесса осаждения пленок поликристаллического кремния при разложении моносилана в присутствии моногермана и посвящена настоящая работа.

Методика эксперимента

Осаждение пленок поликристаллического кремния проводилось в изотермической зоне горизонтального реактора пониженного давления с горячими стенками "Изотрон 4-150" при температуре 560-630 °С. В качестве основной температуры была выбрана температура 620 ± 5 °С. Температурный профиль поддерживался с точностью ± 1 °С. В экспериментах использовались 100%-ный моносилан и смесь, состоящая из 3% моногермана и 97% аргона классификации ОС.Ч. Кремниевые пластины диаметром 100 мм, покрытые термическим оксидом кремния (толщиной 20-40, 100 и 800 нм), помещались в камере перпендикулярно газовому потоку. Протяженность изотермической зоны реактора ($L_{изт}$) составляла 750 мм. Пластины равномерно размещались по изотермической зоне реактора на расстоянии 5 мм друг от друга. Использовались кремниевые пластины с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 12 и 20 Ом·см, легированные соответственно бором и фосфором. Предварительно на пластинах выращивался термический оксид толщиной 20-40, 100 и 800 нм.

Для заполнения реактора применялся азот, очищенный с помощью установки финишной очистки газов КФОГ-3. Регуляторы расхода газа позволяли контролировать и автоматически поддерживать расход используемых газов. Регулирующий кран в вакуумной линии в совокупности с электронным блоком регулировки давления давали возможность устанавливать и поддерживать требуемое рабочее давление в реакторе в процессе осаждения пленок поликристаллического кремния. Для сведения к минимуму погрешностей в определении скорости роста пленок поликристаллического кремния из-за нелинейности в начальной стадии роста время осаждения, как правило, было более 10 мин. Небольшие добавки аргона с моногерманом вводились в газовую смесь одновременно как для легирования поликристаллических пленок, так и для инициирования разложения моносилана моногерманом. Рабочее давление изменялось в пределах 10-140 Па. Откачка реактора проводилась вакуумным агрегатом с быстротой откачки 150-300 дм³/ч. Величина потока моносилана составляла $7,0 \pm 0,5$ дм³/ч, а объемное соотношение между потоком моногермана и моносилана — 0,001-0,003. Соотношение между объемом моногермана и моносилана было принято равным $0,002 \pm 0,0005$ в качестве базового.

Толщина осаждаемых пленок поликристаллического кремния (толщиной более 150 нм) измерялась по сколам в растровом электронном микроскопе "Hitachi-860", а также с помощью интерференционного микроскопа МИИ-11. Толщина пленок менее 150 нм определялась по цветовой таблице толщины поликристаллического кремния на кремниевой подложке, покрытой диоксидом кремния толщиной 100 нм.

Удельное электрическое сопротивление пленок поликристаллического кремния оценивалось четырехзондовым методом на измерителе ИУС-3 с блоком входного сопротивления $2 \cdot 10^3$ МОм и электрометром В7-30 с погрешностью $\pm 5\%$ при доверительной вероятности 0,97.

Экспериментальные результаты и их интерпретация

Проведено исследование закономерностей изменения скорости осаждения пленок поликристаллического кремния от величины общего давления в камере при скорости потока моносилана $7,0 \pm 0,5$ дм³/ч и температуре подложки 620 °С. При изменении общего (полного) давления в камере (реакторе) от 40 до 140 Па скорость осаждения снижается по линейному закону с 110 до 20 Å/мин. Разброс толщины осажденных пленок на пластинах по всей изотермической зоне реактора и площади пластин при зазоре между ними $h=5$ мм не превышал $\pm 5\%$. Распределение толщины пленок поликристаллического кремния, осажденных при парциальном давлении моносилана 35 и 45 Па для скорости потока 7 и 10,5 дм³/ч вдоль диаметра пластин показы-

вает, что реальная неоднородность по толщине пленки снижается при уменьшении давления. Если разброс по толщине пленки, осажденной при давлении 45 Па, составляет $\pm 2,5-3\%$, то аналогичная величина для пленки, осажденной при давлении 35 Па, снижается до $\pm 1,5-2\%$.

Отмечено, что снижение давления в реакторе благоприятно сказывается на уменьшении шероховатости микрорельефа поверхности пленок. К аналогичным результатам приводит дополнительное введение в газовую смесь моногермана в количестве 0,002 об. ч. по отношению к объему чистого моносилана. При этом скорость осаждения увеличивается в 1,5-2 раза по отношению к процессу разложения только чистого моносилана (рис. 1). Изменение парциального давления моносилана в реакторе от 10 до 40 Па приводит к увеличению скорости осаждения от 50 до 110 Å/мин при прочих равных условиях (рис. 1, 1). Скорость реакции разложения моногидридов в реакторах пониженного давления в указанных условиях зависит от парциального давления и скорости потока моносилана и пропорциональна им.

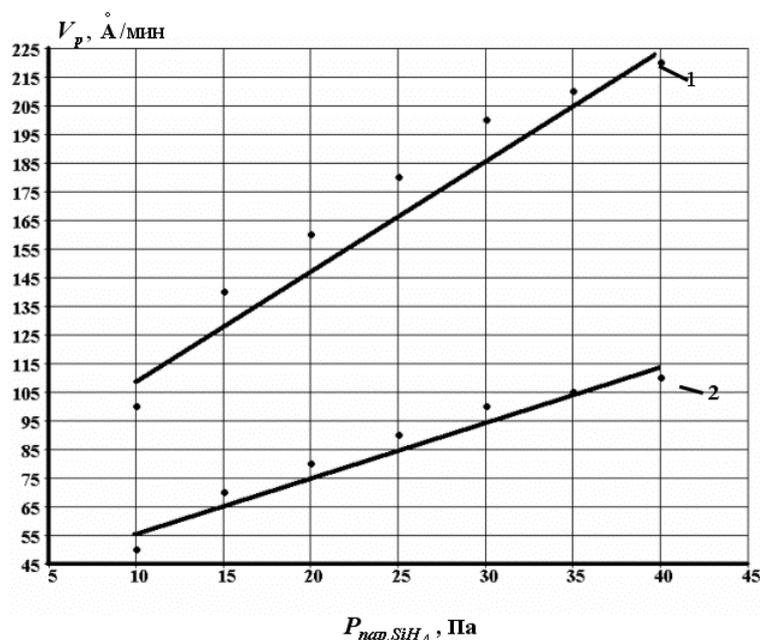
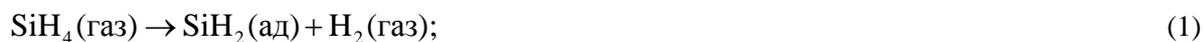


Рис. 1. Зависимость скорости (V_p) осаждения пленок поликристаллического кремния в LPCVD процессе от величины парциального давления моносилана. Полное давление в реакторе 40 Па, температура в центре изотермической зоны 620°C: 1 – осаждение без GeH_4 ; 2 – с GeH_4

При скорости потока моногидридов 7,0 и 10,5 дм³/ч процесс адсорбции моногидрида диссоциативен, т.е. при адсорбции моносилана на поверхности подложки происходит диссоциация молекулы моносилана на SiH_2 (ад) и H_2 , моногермана на GeH_2 (ад) и H_2 , каждая из которых занимает свой адсорбционный центр:



Если на растущей поверхности пленки имеются радикалы SiH_2 и GeH_2 или их аналоги типа SiH_3 , GeH_3 , SiH , GeH , то они вступают во взаимодействие между собой, например, согласно реакции:



В итоге адсорбированными частицами являются кремний и германий
 $\text{Si, Ge} \rightarrow \text{Si, Ge ад, Si, Ge ад} \rightarrow \text{Si, Ge(ТВ)}$. (6)

Таким образом, характер адсорбции не меняется при изменении скорости потока. Перевод процесса осаждения пленок поликристаллического кремния в область более низких давлений моногидрида представляет значительный практический интерес, поскольку способствует повышению стабильности процесса осаждения за счет перевода его в область, где скорость осаждения практически нечувствительна или малочувствительна к величине давления в объеме изотермической зоны.

Повышение однородности пленок поликристаллического кремния по толщине и, следовательно, по электрофизическим параметрам, с уменьшением общего давления в изотермической зоне реактора при одной и той же скорости потока газов обусловлено в первую очередь тем, что вероятность протекания реакции в гомогенном маршруте в газовой фазе становится достаточно малой и, кроме того, практически исключается полимеризация моногидридов и их производных с образованием кластеров кремния в газовой фазе, поскольку концентрация таких производных, как SiH_2 и GeH_2 , пропорциональна квадрату парциального давления SiH_4 и GeH_4 соответственно. Добавка моногермана к моносилану приводит к заметному повышению скорости осаждения (рис. 1, 2).

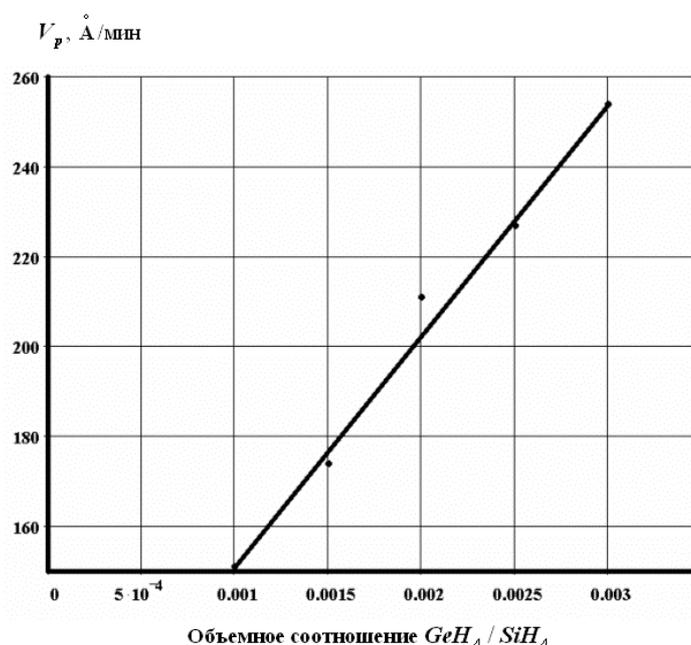


Рис. 2. Зависимость скорости осаждения пленок поликристаллического кремния от объемного соотношения моногермана к моносилану. Температура в центре изотермической зоны реактора 620°C , общее давление газовой смеси 35 Па, скорость потока газов $7 \text{ дм}^3/\text{ч}$

На рис. 1, 2 показано влияние добавки моногермана на скорость осаждения пленок поликристаллического кремния. Из рисунков видно, что добавление моногермана к моносилану в количестве 0,002 об. ч. по отношению к объему моносилана при прочих равных условиях приводит к увеличению скорости осаждения практически в 2 раза в центре изотермической зоны. Эта зависимость позволила определить эффективный порядок реакции по моногерману ($n = \Delta \lg V_p / \Delta \lg C_{\text{GeH}_4}$), величина которого равна $n = 1,25 \pm 0,02$ для температуры 620°C и не изменяется по всей зоне роста пленок поликристаллического кремния. Дробный порядок характерен для сложных химических реакций, а его положительное значение указывает на увеличение скорости реакции. В исследуемом процессе — это усиление гетерогенного маршрута процесса разложения моносилана. Таким образом, при температуре 620°C преобладает гетерогенный маршрут реакций. При этом гетерогенный маршрут является более эффективным поставщиком радикалов SiH_2 , для которых моногерман служит инициатором их образования.

Диапазон температур процесса осаждения пленок поликристаллического кремния "сверху" ограничивается процессом преобразования структуры пленок в результате их рекристаллизации, а "снизу" — очень малой скоростью их осаждения.

Фундаментальные исследования процесса разложения моносилана показали, что реакции его термического разложения являются многомаршрутными и многостадийными, зависящими от условий разложения. Как уже отмечалось выше, процесс разложения гидридов может протекать по двум маршрутам – гетерогенному и гомогенному, имеющим разные кинетические временные характеристики. Эти различия позволяют разделить составляющие процесса. Величины энергии активации гетерогенного ($E_{a, get}^*$) и гомогенного ($E_{a, gom}^*$) процессов различны и зависят от условий разложения гидридов, в первую очередь, от температуры подложки. Для определения энергии активации используется зависимость скорости осаждения от температуры:

$$E_{ae}^* = -8,3 \cdot 10^{-3} \frac{2,3lg \frac{V_2}{V_1}}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)}, \text{ кДж/моль}, \quad (7)$$

где $E_{ак}^*$ - энергия активации процесса, кДж/моль; V_2, V_1 – скорость реакции осаждения при температуре подложки T_2 и T_1 соответственно.

В физическом смысле энергия активации – это то избыточное количество энергии (по сравнению со средней величиной), которой должна обладать молекула в момент столкновения для осуществления химического взаимодействия. В большинстве случаев увеличение температуры способствует усилению такого взаимодействия. При повышении температуры скорость химических реакций увеличивается весьма значительно (рис. 3).

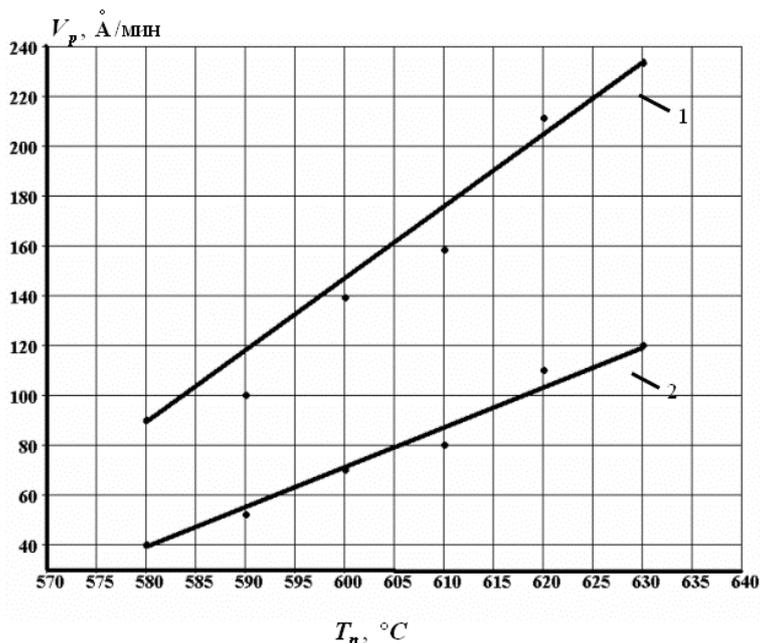


Рис. 3. Зависимость скорости (V_p) осаждения слоев поликристаллического кремния в LPCVD-процессе от температуры подложки. Полное давление в реакторе 40 Па, парциальное давление моносилана 35 Па, скорость потока газов 7 дм³/ч: 1 – осаждение с GeH_4 ; 2 – осаждение без GeH_4 .

Скорость реакции в большей степени изменяется с температурой в тех реакциях (процессах), в которых энергия активации больше. И наоборот, если в данной реакции энергия активации незначительна, то скорость этой реакции (процесса) слабо изменяется с температурой.

Эффективная энергия активации, рассчитанная согласно уравнению (7), составляет 175 кДж/моль при отсутствии моногермана в зоне реакции и 135 кДж/моль при его наличии в кинетической области, и соответственно 33,5 и 28,0 кДж/моль в диффузионной области. Параметры процесса: полное давление в реакторе 40 Па, парциальное давление моносилана 35 Па и скорость потока газов 7 дм³/ч. Снижение скорости потока газов в реакторе до 3,5 дм³/ч при прочих равных условиях приводит к увеличению энергии активации до 207 кДж/моль, а повышение ее до 10,5 дм³/ч – к снижению энергии активации до 188 кДж/моль. Таким образом, малые скорости потока газов способствуют усилению температурной зависимости скорости осаждения пленок поликристаллического кремния, и напротив, повышение скорости потока газов снижает степень этой зависимости.

Увеличение парциального давления моносилана до 40 Па при общем давлении в реакторе 50 Па и прочих равных условиях в отсутствие моногермана приводит к уменьшению энергии активации до 104 кДж/моль, а при наличии моногермана - до 133 кДж/моль в кинетической области и до 11,6 и 56 кДж/моль соответственно в диффузионной области (табл. 1). Анализируя эти результаты, можно констатировать, что при давлениях моносилана больших чем 35 Па и общем давлении в реакторе больше чем 40 Па, усиливается влияние наличия моногермана на процесс осаждения с повышением температуры в изотермической зоне реактора.

Таблица 1. Значение энергии активации процесса осаждения пленок поликристаллического кремния в LPCVD–процессе в кинетической и диффузионной областях

Параметры процесса			Энергия активации $E_{ак}^*$, кДж/моль			
$P_{об.}$, Па	$P_{пар.}$, Па	$W_{п.}$, 7,0 дм ³ /ч	в кинетической области		в диффузионной области	
			без Ge	с Ge	без Ge	с Ge
40	35	7,0	175	137	33,5	28
40	35	3,5	104	133	11,6	56
50	40	10,5	207	188	16,0	72

Оценка эффективной энергии активации процесса разложения моносилана для условий проведенных экспериментов показала, что в отсутствие моногермана в зоне реакции ее величина составляет 104-207 кДж/моль. В этом случае существенный вклад в ее величину вносят парциальное давление моносилана и скорость потока газов в изотермической зоне реактора. В связи с этим они являются важнейшими технологическими параметрами процесса осаждения пленок кремния, которые позволяют управлять как скоростью осаждения, так и структурно-морфологическими и электрофизическими свойствами пленок поликристаллического кремния. При наличии моногермана в зоне реакции и относительной величине объема моногермана к объему моносилана $GeH_4/SiH_4=0,002$ энергия активации снижается с 175 до 137 кДж/моль при условиях процесса: скорость газового потока 7 дм³/ч, парциальное давление моносилана 35 Па и общее давление газовой смеси в реакторе 40 Па. Таким образом, скорость осаждения пленок поликристаллического кремния в меньшей степени зависит от температуры в изотермической зоне реактора при указанных режимах процесса. Однако увеличение парциального давления моносилана до 40 Па и выше, а общего давления до 50 Па и выше в реакторе, напротив, в присутствии моногермана способствует увеличению эффективной энергии активации от 104 до 135 кДж/моль, т.е. приводит к увеличению зависимости процесса осаждения пленок поликристаллического кремния от температуры.

К аналогичным результатам, но только в диффузионной области, приводит увеличение скорости потока газов до 10,5 дм³/ч. Увеличение давления в реакторе выше 40 Па при температуре подложек ≥ 640 °С приводит к тому, что появляется матовость поверхности слоев поликристаллического кремния, что является критическим фактором в отношении качества пленки. Это указывает на увеличение вклада гомогенного маршрута разложения гидридов. Во всех остальных случаях имел место гетерогенный маршрут разложения моногидридов.

Таким образом, величины скорости потока газов, общего давления в реакторе, парциального давления моносилана в реакторе и величина объемного соотношения моногерман–моносилан, как и температура в изотермической зоне реактора (камеры), являются важнейшими технологическими параметрами процесса осаждения пленок поликристаллического крем-

ния, которые позволяют регулировать как скорость осаждения, так и структурно-морфологические и, следовательно, электрофизические свойства осаждаемых пленок. Эти параметры технологического процесса осаждения поликристаллического кремния, легированного германием, выбраны в качестве значимых факторов в математической процедуре исследования воспроизводимости и стабильности скорости осаждения и удельного сопротивления пленки поликремния.

Оценка технологичности процесса осаждения пленки поликремния на воспроизводимость и стабильность скорости осаждения и удельного сопротивления

Эффективным средством решения задачи оптимизации любого технологического процесса и, в частности, процесса осаждения поликремния является метод поверхности откликов, в котором взаимосвязь между входными и выходными параметрами исследуемого процесса рассматриваются как "черный ящик", а поверхность выходных характеристик аппроксимируется в виде полиномиальной зависимости от значимых факторов, т.е. тех технологических параметров процесса, которые оказывают наибольшее влияние на выходные характеристики. Методика и иллюстрации результатов ее использования изложены в работах [10, 11].

Использование аппроксимационных зависимостей позволяет заменить дорогостоящие и трудоемкие натурные эксперименты компьютерными экспериментами, посредством которых можно провести, например, анализ чувствительностей выходных характеристик от изменений всех значимых входных факторов при любых их разумных разбросах.

Проведен статистический анализ экспериментальных данных, полученных в опытном производстве УП "Белмикросистемы", по результатам измерений толщины (скорости осаждения) и удельного электрического сопротивления слоев поликристаллического кремния, легированных изовалентной примесью – германием. Для каждого выходного параметра проведено по 32 измерения (полный факторный эксперимент), в которых варьировались согласно выбранному плану эксперимента, 5 значимых факторов (табл. 2), оказывающих наибольшее влияние на скорость осаждения и удельное сопротивление поликристаллических пленок кремния:

полное давление газов в камере P_{Global} (среднее значение 35 Па, разброс ± 15 Па);

парциальное давление моносилана $P_{Monosil}$ (среднее значение 35 Па, разброс ± 5 Па);

объемное соотношение потока моногермана к потоку моносилана $V_{O_{Corr}}$ (среднее значение 0,02, разброс $\pm 0,0005$);

скорость потока газов в реакторе $Flow_{Speed}$ (среднее значение 6,96 дм³/ч, разброс $\pm 0,5$ дм³/ч);

температура подложки T_{Sub} (среднее значение 620 °С, разброс ± 5 °С).

Измеренные выходные характеристики: скорость осаждения, Å/мин, и удельное электрическое сопротивление слоев поликристаллического кремния, Ом·см, в том числе

скорость осаждения нелегированных слоев поликристаллического кремния Sp_{nleg} ;

скорость осаждения легированных германием слоев поликристаллического кремния Sp_{leg} ;

удельное электрическое сопротивление нелегированных слоев поликристаллического кремния R_{nleg} ;

удельное электрическое сопротивление легированных германием слоев поликристаллического кремния R_{leg} .

Таблица 2. Результаты "натурного" эксперимента по исследованию влияния значимых факторов процесса осаждения поликремния на скорость осаждения и удельное сопротивление пленки поликремния

Номер эксперимента	P_t	P_{SiH_4}	GeH_4/SiH_4	F	T_s	V_{Gd}	V_G	ρ_d	ρ
1	35	35	0,0020	6,96	620	103,759	199,069	9,803E+05	9,803E+03
2	30	25	0,0015	6,46	625	99,7770	191,324	1,004E+06	1,004E+04

Номер эксперимента	P_t	P_{SiH_4}	GeH_4/SiH_4	F	T_s	V_{Gd}	V_G	ρ_d	ρ
3	30	25	0,0015	7,46	615	98,3340	189,954	1,026E+06	1,026E+04
4	30	25	0,0015	7,46	625	99,7510	192,472	1,040E+06	1,040E+04
5	30	25	0,0025	6,46	615	101,782	198,125	9,560E+05	9,560E+03
6	30	25	0,0025	6,46	625	103,200	200,643	9,698E+05	9,698E+03
7	30	25	0,0025	7,46	615	101,757	199,273	9,920E+05	9,920E+03
8	30	25	0,0025	7,46	625	103,175	201,791	1,006E+06	1,006E+04
9	30	28	0,0015	6,46	615	99,3670	189,670	9,845E+06	9,845E+03
10	30	28	0,0015	6,46	625	100,785	192,188	9,984E+05	9,984E+03
11	30	28	0,0015	7,46	615	99,3420	190,818	1,021E+06	1,021E+04
12	30	28	0,0015	7,46	625	100,760	193,336	1,034E+06	1,034E+04
13	30	28	0,0025	6,46	615	102,790	198,989	9,506E+05	9,506E+03
14	30	28	0,0025	6,46	625	104,208	201,507	9,644E+05	9,644E+03
15	30	28	0,0025	7,46	615	102,765	200,137	9,866E+05	9,866E+03
16	30	28	0,0025	7,46	625	104,183	202,654	1,000E+06	1,000E+04
17	50	25	0,0015	6,46	615	96,8830	192,369	9,911E+05	9,911E+03
18	50	25	0,0015	6,46	625	98,3010	194,886	1,005E+06	1,005E+04
19	50	25	0,0015	7,46	615	96,8580	193,516	1,027E+06	1,027E+04
20	50	25	0,0015	7,46	625	98,2750	196,034	1,041E+06	1,041E+04
21	50	25	0,0025	6,46	615	100,306	201,687	9,571E+05	9,571E+03
22	50	25	0,0025	6,46	625	101,724	204,205	9,710E+05	9,710E+03
23	50	25	0,0025	7,46	615	100,281	202,835	9,931E+05	9,931E+03
24	50	25	0,0025	7,46	625	101,699	205,353	1,007E+06	1,007E+04
25	50	40	0,0015	6,46	615	101,924	196,688	9,643E+05	9,643E+03
26	50	40	0,0015	6,46	625	103,342	199,205	9,781E+05	9,781E+03
27	50	40	0,0015	7,46	615	101,899	197,836	1,000E+06	1,000E+04
28	50	40	0,0015	7,46	625	103,317	200,353	1,014E+06	1,014E+04
29	50	40	0,0025	6,46	615	105,348	206,007	9,304E+05	9,304E+03
30	50	40	0,0025	6,46	625	106,765	208,524	9,442E+05	9,442E+03
31	50	40	0,0025	7,46	615	105,322	207,154	9,664E+05	9,664E+03
32	50	40	0,0025	7,46	625	106,740	209,672	9,802E+05	9,802E+03

Аппроксимация зависимости выходных характеристик от входных параметров осуществлялась в виде полинома первой степени:

$$Y = b_0 + X_1 b_1 + X_2 b_2 + X_3 b_3 + X_4 b_4 + X_5 b_5, \quad (8)$$

где X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 — значимые факторы эксперимента $P_{Global}, P_{Monosil}, Vol_{Corr}, Flow_{Speed}$ и T_{Sub} ; b_i — коэффициенты полинома; Y — измеренные в серии натуральных экспериментов выходные характеристики $Sp_{nleg}, Sp_{leg}, R_{nleg}$ и R_{leg} .

Справедливость линейной формы аппроксимационного полинома подтверждается корреляционными зависимостями (рис. 4, а-з) между результатами натурального эксперимента и расчетами согласно выражению (8), а также рассчитанными статистическими критериями (табл. 3).

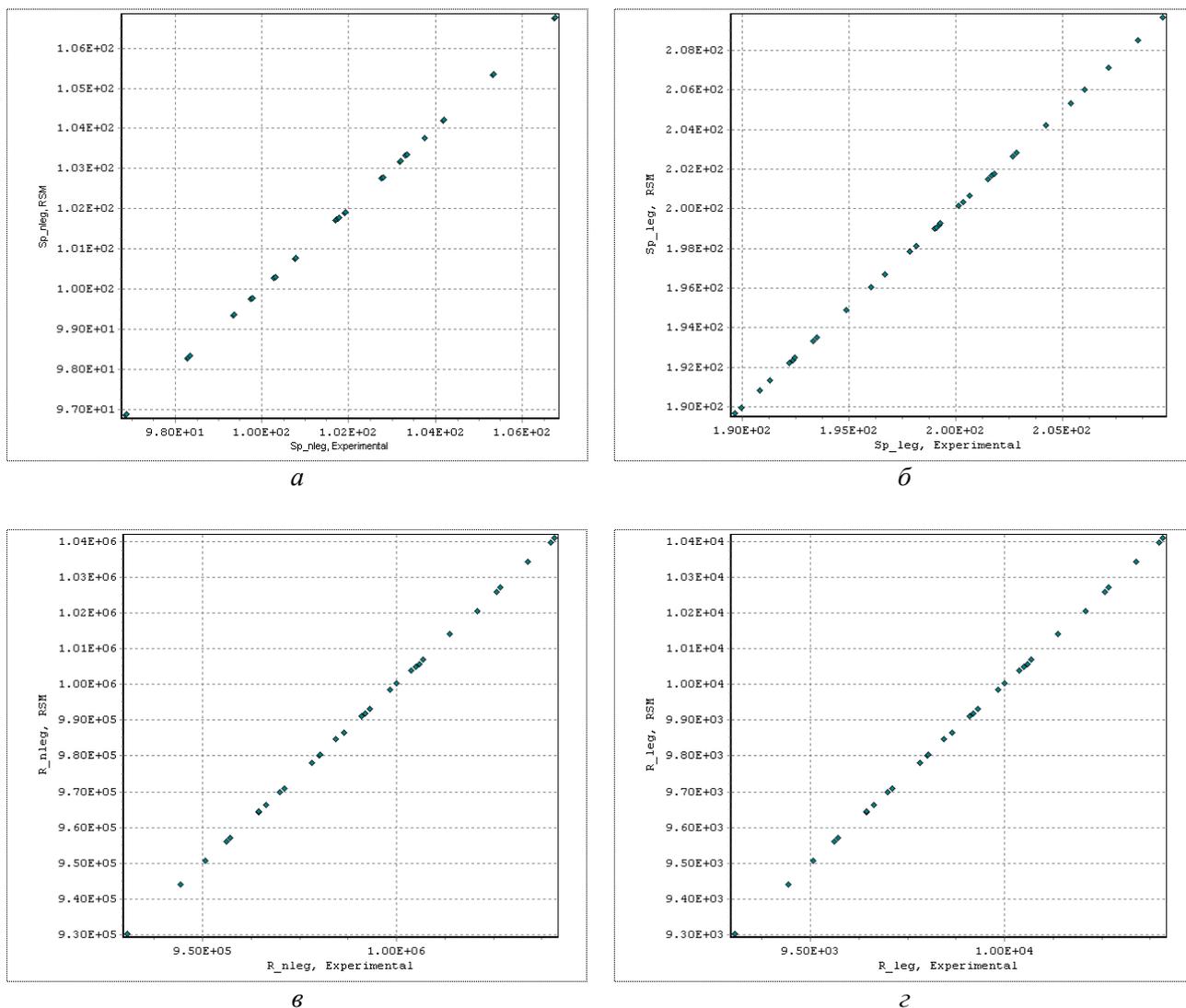


Рис. 4. Корреляционная зависимость для Sp_{nleg} (а), Sp_{leg} (б), R_{nleg} (в), R_{leg} (г)

Таблица 3. Основные статистические характеристики полученных аппроксимационных зависимостей

Характеристика	Sp_{nleg}	Sp_{leg}	R_{nleg}	R_{leg}
Среднеквадратическая ошибка	0,00027357	0,00029820	176,17101396	1,76171014
Коэффициент детерминации	0,99999999	1,0	0,99996765	0,99996765
Приведенный коэффициент детерминации	0,99999999	1,0	0,99996143	0,99996143
Средняя ошибка, %	0,00018831	0,00011373	0,01075124	0,01075124
Максимальная ошибка, %	0,00060494	0,00026173	0,04210727	0,04210727

Решена задача аппроксимации зависимости скорости осаждения, удельного электрического сопротивления от условий разложения моногидридов и состава газовой смеси на основании результатов эксперимента и определения диапазона изменения каждого из выходных параметров технологического процесса осаждения слоев поликристаллического кремния, обеспечивающих получение скорости осаждения, удельного электрического сопротивления, температурного коэффициента сопротивления в заданном интервале от разбросов.

Типичные поверхности откликов для полученных аппроксимационных зависимостей параметров Sp_{nleg} , Sp_{leg} , R_{nleg} и R_{leg} приведены на рис. 5, а-г.

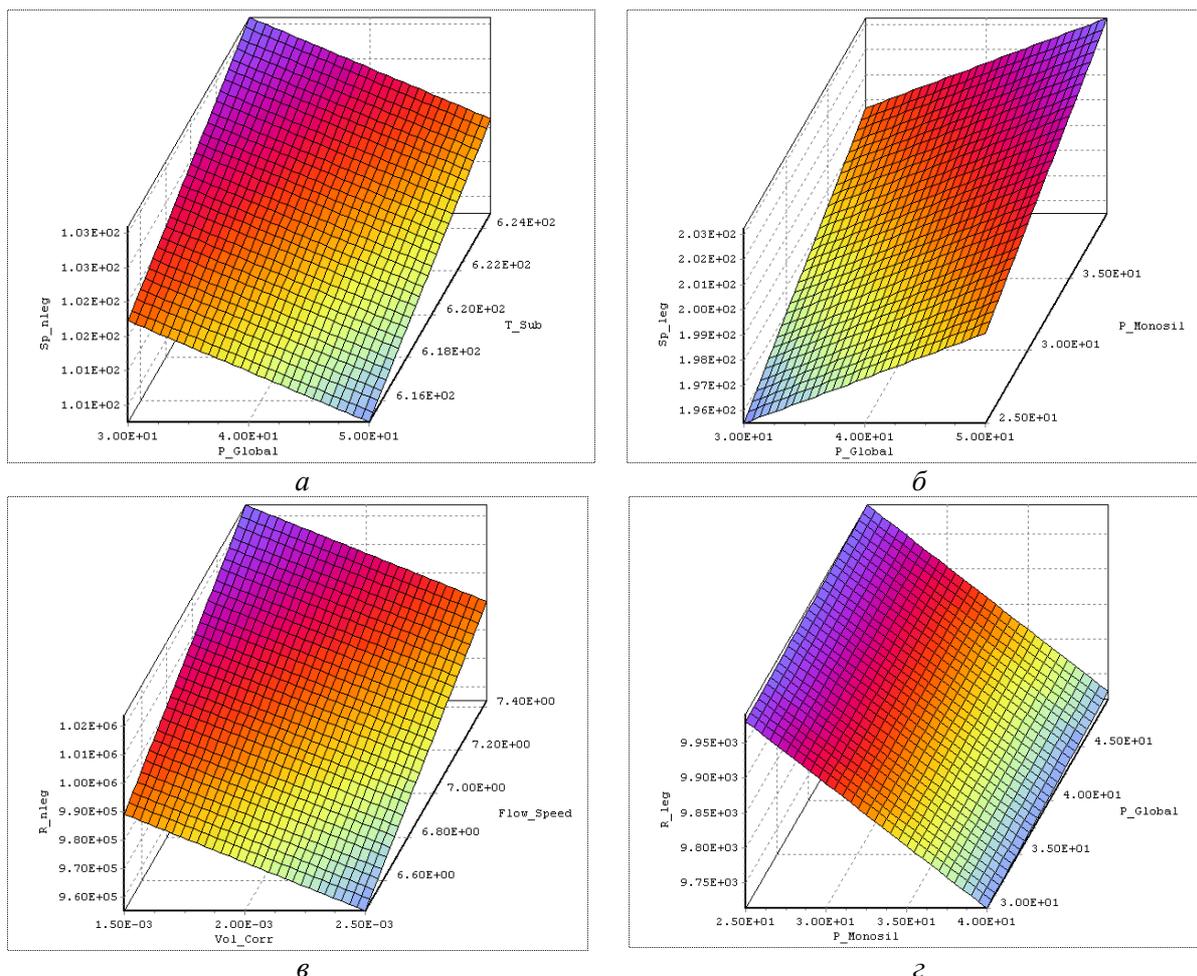


Рис. 5. Зависимость Sp_{nleg} от T_{Sub} и P_{Global} (а), Sp_{leg} от $P_{Monoisil}$ и P_{Global} (б), R_{nleg} от Vol_{Corr} и $Flow_{Speed}$ (в), R_{leg} от $P_{Monoisil}$ и P_{Global} (г)

Анализ результатов построения аппроксимационной зависимости показал ее линейность. Следует отметить строгое соответствие экспериментальных данным значениям, полученным с использованием аппроксимирующего полинома (ошибка не превышает величины 0,1 %). Это также подтверждают рассчитанные значения коэффициентов детерминации. Таким образом, можно сделать вывод о правильности выбора полного факторного эксперимента (ПФЭ) $2^n = 32$, который обычно используется для линейных моделей и нецелесообразности проведения ПФЭ $3^5 = 243$, наиболее адекватного в случае исследования квадратичной зависимости.

Полученные выражения для аппроксимирующих полиномов могут эффективно использоваться в процессе оптимизации параметров процесса осаждения пленок поликристаллического кремния, легированного германием как изовалентной примесью для определения диапазонов входных параметров, обеспечивающих изменение выходных характеристик в заданном исследователем интервале. Методика и результаты аналогичных расчетов подробно описаны в [10,11]. В качестве условий для проведения процедуры оптимизации были выбраны следующие допустимые диапазоны выходных характеристик (табл. 4).

Таблица 4. Допустимые диапазоны выходных характеристик

Выходная характеристика	Минимальное допустимое значение	Максимальное допустимое значение
Скорость осаждения нелегированных пленок, А/мин	99,0	101,0

Скорость осаждения легированных пленок, А/мин	199,0	201,0
Удельное сопротивление нелегированных пленок, Ом·см	$0,99 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$
Удельное сопротивление легированных пленок, Ом·см	$0,99 \cdot 10^4$	$0,99 \cdot 10^4$

В табл. 5-7 приведены результаты оптимизации параметров для выбранных диапазонов изменения входных параметров.

Таблица 5. Результаты оптимизации для скорости осаждения нелегированных пленок

Входной параметр	Минимальное допустимое значение	Максимальное допустимое значение
P_{Global}	39,4	33,4
$P_{Monosil}$	28,6	28,9
Vo_{Corr}	0,00154	0,0015
$Flow_{Speed}$	7,04	7,24
T_{Sub}	615,2	621,7

Таблица 6. Результаты оптимизации для скорости осаждения легированных пленок

Входной параметр	Минимальное допустимое значение	Максимальное допустимое значение
P_{Global}	40,4	33,3
$P_{Monosil}$	33,06	28,1
Vo_{Corr}	0,00197	0,0024
$Flow_{Speed}$	6,94	6,71
T_{Sub}	620,1	625,0

Таблица 7. Результаты оптимизации для удельного сопротивления нелегированных пленок

Входной параметр	Минимальное допустимое значение	Максимальное допустимое значение
P_{Global}	37,5	47,9
$P_{Monosil}$	28,1	25,5
Vo_{Corr}	0,0025	0,0016
$Flow_{Speed}$	7,21	6,77
T_{Sub}	623,3	624,1

Таблица 7. Результаты оптимизации для удельного сопротивления легированных изовалентной примесью пленок

Входной параметр	Минимальное допустимое значение	Максимальное допустимое значение
P_{Global}	37,5	47,9
$P_{Monosil}$	28,1	25,5
Vo_{Corr}	0,0025	0,0016
$Flow_{Speed}$	7,21	6,77
T_{Sub}	623,3	624,1

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF THE DEPOSITION PROCESS OF POLYCRYSTALLINE SILICON FILMS DOPED BY GERMANIUM AS AN ISOVALENT IMPURITY

V.M. BORISEVICH, A.A. KOVALEVSKY, V.V. NELAYEV, V.S. MALYSHEV,
V.R. STEMPITSKY

Abstract

Experimental study of the growth kinetics of polycrystalline silicon films doped by germanium as an isovalent impurity is performed. The regularities of the influence of main technological parameters of process on the growth rate and resistivity of films are stated. Thin films of polycrystalline silicon films doped by germanium and grew at the temperature 620⁰C under low pressure process are characterized by flying structural and morphological properties in comparison with undoped films. Approximation dependency of deposition rate and resistivity on conditions of the monohydrids decomposition and composition gas mixture is obtained on the base of experimental results. Results of the problem solution of the significant parameters optimization of investigated process are presented.

Литература

1. *Колешко В.М., Ковалевский А.А.* Поликристаллические пленки полупроводников в микроэлектронике. Мн.: Наука и техника, 1978. 344с.
2. *Ковалевский А.А., Колешко В.М.* Исследование процесса получения поликристаллических пленок кремния, легированных кислородом // Изв. АН СССР. Сер. Неорганические материалы. 1981. Т.17, №1. С.5-9.
3. *Ковалевский А.А., Колешко В.М., Ланицкий Е.И.* Влияние добавок редкоземельных элементов на свойства поликристаллических пленок кремния, легированных кислородом в процессе разложения моносилана // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. 1984. Вып. 5. С.78-83.
4. *Ковалевский А.А.* Интенсификация реакции разложения моногермана германием // Техника средств связи. Сер. Микроэлектронная аппаратура. 1987. Вып 1(8). С. 96-100.
5. *Ковалевский А.А.* Кинетика совместного разложения моносилана и метана при пониженном давлении // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1988. Вып. 7. С. 33-37.
6. *Ковалевский А.А.* Подавление рекристаллизационных процессов в поликристаллических пленках кремния тонкими слоями аморфного кремния//Микроэлектроника. 1998. Т.27, №4. С.16-21.
7. *Kovalevsky A.A.* Structure and Morphology of Si Films Grown on porous Silicon by Reduction of Dichlorosilane // Inorganic Materials. 1999. Vol.15, №2. P.102-105.
8. *Ковалевский А.А.* Легирование поликристаллического кремния при газотранспортном осаждении изовалентной примесью // Сб. тр. Междунар. научн.-техн. конф. "Новые технологии изготовления многокристалльных модулей". 30 сентября – 4 октября 2002г. Минск, Нарочь. С. 48-52.
9. *Chelikowsky J.R., Philips J.C.* // Phys. Rev. B. 1978. Vol. 17, №8. P. 2453 – 2447.
10. *Kuzmicz W.B., Malyshev V.S., Nelayev V.V., Stempitsky V.R.* Optimization of the integrated circuit technology // Proc. of SPIE. 2001. Vol. 4348. P. 431-434.
11. *Кулешов А.А., Малышев В.С., Нелаяев В.В., Стемпницкий В.Р.* Статистическое проектирование и оптимизация технологии производства интегральных микросхем // Микроэлектроника. 2003. Т. 32, № 1. С. 47-61.