

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛЕНОК ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ,
ЛЕГИРОВАННЫХ В ПРОЦЕССЕ РОСТА ФОСФОРОМ,
ДЛЯ СОЗДАНИЯ СУБМИКРОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

О.Ю. Наливайко, канд. техн. наук

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
Минск, Беларусь

Рассмотрена кинетика процесса осаждения пленок поликристаллического кремния, легированного фосфором в процессе роста (ПКЛФ). Описаны основные направления улучшения электрофизических свойств пленок поликристаллического кремния, легированного фосфором в процессе роста для использования в производстве интегральных микросхем с субмикронными проектными нормами.

В КМОП-технологии легированные плёнки поликристаллического кремния (ПК) используются в качестве материала затворных электродов, обкладок конденсаторов, межкомпонентных соединений благодаря их высокой температурной стабильности, превосходной границе раздела с оксидом кремния и химической чистоте, несмотря на более высокое удельное сопротивление по сравнению с другими металлами [1, 2]. Кроме того, плёнки поликристаллического кремния применяются для формирования эмиттеров в биполярных приборах, структурах для микроэлектромеханических систем, для заполнения канавок с высоким аспектным соотношением, для пассивирования контактов и в качестве нагрузочных резисторов в схемах памяти [1, 2].

С возрастанием степени интеграции ИМС уменьшаются топологические размеры элементов и зазоры между ними. Это обуславливает необходимость снижения температуры термических обработок и шероховатости поверхности слоёв, а также повышения конформности воспроизведения топологического рельефа. В связи с вышеизложенным требуется усовершенствование способов формирования плёнок кремния. Одним из наиболее перспективных путей является использование плёнок кремния, осаждённых в аморфном состоянии, что позволяет снизить шероховатость поверхности плёнок, а также улучшить их легирование [1].

Структура свежесозданной плёнки зависит от температуры осаждения, давления и определяется соотношением скоростей роста и кристаллизации. При более высокой температуре и быстрой диффузии преобладает зародышеобразование и кристаллизация с формированием поликристаллических плёнок (скорость кристаллизации существенно выше скорости осаждения), в то время как при более низких температурах скорость поверхностной диффузии также низкая, при этом скорость кристаллизации существенно ниже скорости осаждения, что приводит к формированию аморфных плёнок [1, 3].

Легирование плёнок ПК может быть осуществлено при помощи диффузии, ионной имплантации или введения легирующих добавок в газовую смесь в процессе осаждения плёнки [1]. Использование плёнок поликристаллического кремния, легированных

в процессе роста фосфором (ПКЛФ) позволяет уменьшить количество высокотемпературных операций и обеспечить легирование в труднодоступных местах [1, 2, 4]. Для получения легированных в процессе роста плёнок ПК используются газообразные источники легирующей примеси, такие как PH_3 , AsH_3 или B_2H_6 [1, 4]. Удельное сопротивление легированных плёнок поликристаллического кремния зависит как от концентрации легирующей примеси, так и от структуры плёнок [1, 5].

С точки зрения практического применения процесса осаждения плёнок ПКЛФ к нему применяются следующие основные требования: скорость осаждения ($\geq 2,0$ нм/мин), однородность толщины плёнки по пластине и по загрузке ($< \pm 1,5$ %), достижение требуемого удельного сопротивления и его однородности, низкая шероховатость поверхности плёнок и конформное заполнение топологического рельефа.

В настоящей работе осаждение плёнок ПКЛФ на пластинах диаметром 200 мм проводилось в вертикальном реакторе пониженного давления ASM A400. Пластины располагаются горизонтально в кварцевой кассете, имеющей 167 позиций. Использовались 100%-й моносилан марки 5.0 (99,999%) и смесь газовая фосфина с азотом (1% фосфина). В качестве подложек использовали пластины кремния диаметром 200 мм с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 12 Ом · см, легированные бором. Термический отжиг пленок ПКЛФ проводился в вертикальной диффузионной печи Arogee при температуре 950 °С в течение 30 минут в азоте.

Контроль толщины плёнок кремния проводился при помощи спектрофотометрии на установке Optiprobe 2690 UV. Контроль поверхностного сопротивления проводился после выполнения активирующего отжига при помощи четырехзондового метода на установке OmniMap Rs-75. Контроль шероховатости и морфологии осаждаемых плёнок проводился при помощи сканирующего зондового микроскопа Certus Light.

На рисунке 1 представлены зависимости скорости осаждения плёнок ПК от соотношения потоков PH_3/SiH_4 (γ) при температурах осаждения в диапазоне от 560 до 650 °С и $P_{\text{сумм}} = 49,9$ Па. Видно, что при температурах осаждения 620 и 650 °С наблюдается резкое уменьшение скорости осаждения с увеличением γ . При температурах от 560 до 590 °С с увеличением γ скорость осаждения уменьшается значительно меньше и при больших значениях γ лишь незначительно отличается от скорости осаждения при температурах 620 и 650 °С. Указанные зависимости свидетельствуют о конкурентном характере адсорбции моносилана и фосфина на одних и тех же центрах адсорбции [6].

Величина эффективной энергии активации процесса осаждения нелегированного кремния составляет 1,5 эВ, что на 0,24 эВ ниже, чем для процесса осаждения нелегированных пленок кремния на пластинах диаметром 100 мм (1,74 эВ) [1, 7]. При введении в реактор фосфина эффективная энергия активации процесса осаждения ПКЛФ снижается до 1,32 эВ при γ , равном 0,001 [8] (Рис.2).

Для описания кинетики роста плёнок нелегированного ПК, полученных пиролизом концентрированного моносилана, наиболее полно подходит адсорбционно-кинетическая модель [7], согласно которой химическая реакция осаждения ПК является

гетерогенной реакцией 1-го порядка. При этом скорость роста плёнки определяется следующим соотношением:

$$V = K \times \theta \times n_0,$$

где K – константа скорости гетерогенной реакции;

n_0 – концентрация адсорбционных центров на поверхности (принималась равной поверхностной плотности атомов кремния ($8 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$));

V – скорость роста плёнки, выраженная в количестве атомов кремния, осажденных на площадь 1 см^2 за 1 с ;

θ – степень заполнения адсорбционных центров.

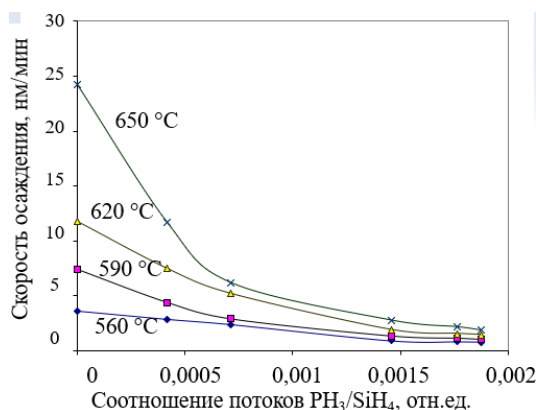


Рисунок 1. – Зависимость скорости осаждения ПКЛФ от соотношения потоков PH_3/SiH_4

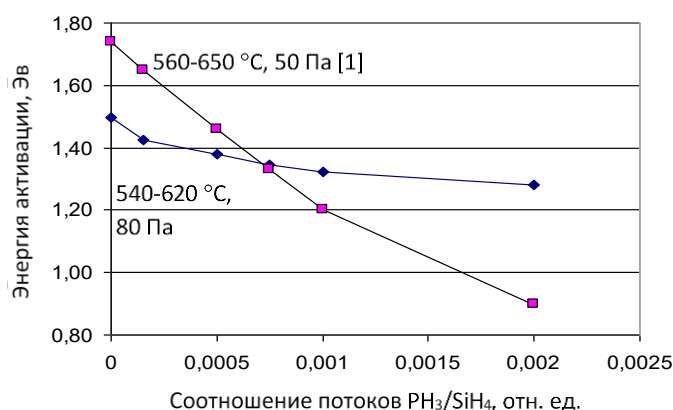


Рисунок 2. – Зависимость энергии активации процесса осаждения ПКЛФ от соотношения потоков PH_3/SiH_4

На рисунке 3 представлены зависимости степени заполнения адсорбционных центров молекулами моносилана (θ_{SiH_4}) от парциального давления моносилана.

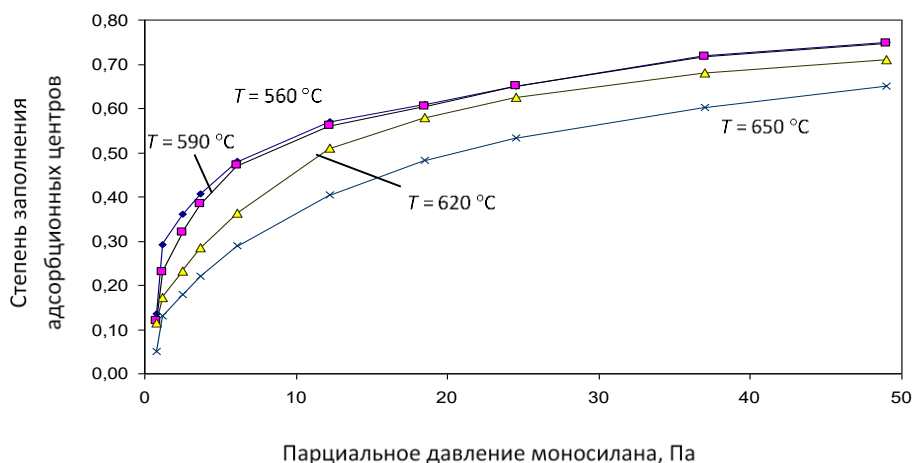
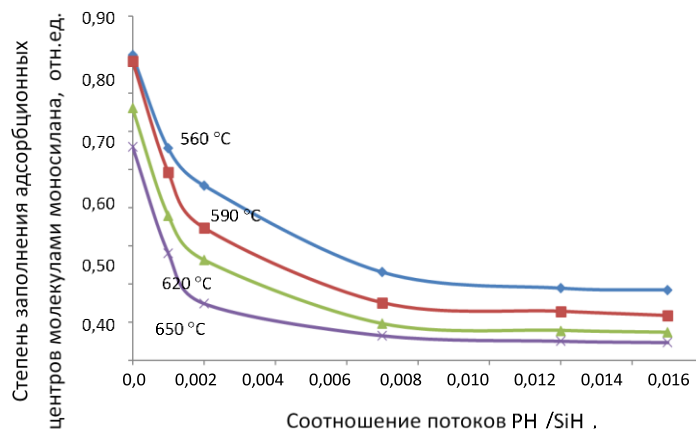


Рисунок 3. – Зависимости степени заполнения адсорбционных центров молекулами моносилана от парциального давления моносилана

При введении фосфина в реактор значение суммарной степени заполнения адсорбционных центров определяется в основном адсорбцией фосфина, при этом θ_{SiH_4} резко уменьшается (рисунок 4). Очевидно, что увеличение θ_{SiH_4} может быть достигнуто

при уменьшении соотношения объёмных потоков PH_3/SiH_4 (γ). В то же время при снижении температуры осаждения степень заполнения адсорбционных центров молекулами SiH_4 повышается (рисунок 4).

Рисунок 4. – Зависимость степени заполнения поверхности молекулами моносилана от соотношения потоков PH_3/SiH_4



Таким образом, повышение скорости осаждения плёнок ПКЛФ может быть достигнуто за счёт повышения степени заполнения адсорбционных центров молекулами моносилана при снижении соотношения объёмных потоков PH_3/SiH_4 . При этом, можно достигнуть требуемых скоростей осаждения и однородности осаждения плёнок ПКЛФ, так как при более низких значениях γ ещё не происходит полное блокирование адсорбции моносилана молекулами фосфина. При температуре 560 °C и ниже происходит осаждение аморфных плёнок кремния, не имеющих зёрен, что способствует снижению шероховатости поверхности осаждаемых плёнок и равномерному распределению легирующей примеси. При этом улучшается конформность воспроизведения топологического рельефа и достигается приемлемая скорость осаждения.

Для снижения воздействия легированных плёнок кремния на приповерхностный слой и снижения шероховатости поверхности использовался нелегированный подслой кремния перед осаждением легированной плёнки кремния. Отсутствие фосфина в газовой фазе на начальных стадиях роста плёнки уменьшает вероятность протекания гомогенных реакций, что способствует улучшению однородности подслоя кремния и, следовательно, плёнки в целом. Плёнки, осажденные при вышеуказанных условиях, после осаждения имеют среднеквадратичную шероховатость поверхности не более 0,47 нм, что в 14,8 раза ниже, чем у плёнок ПК (6,98 нм). После проведения отжига при 950 °C среднеквадратичная шероховатость поверхности плёнок ПКЛФ не более 2,12 нм, что в 5 раз ниже, чем у плёнок ПК (10,6 нм).

Зависимости удельного сопротивления плёнок ПКЛФ от γ и температуры осаждения представлены на рисунках 5 и 6 [8]. С увеличением γ от 0,0003 до 0,00075 при температуре 550 °C происходит монотонное уменьшение удельного сопротивления легированных плёнок кремния от 980 мкОм · см до 640 мкОм · см ($(6,5 \div 7) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$) (Рис.5), а при дальнейшем увеличении γ удельное сопротивление выходит на насыщение и практически не изменяется при значениях γ более 0,001. Так же очевидно, с уменьшением температуры осаждения достигается более высокий уровень легирования при одинаковых значениях γ .

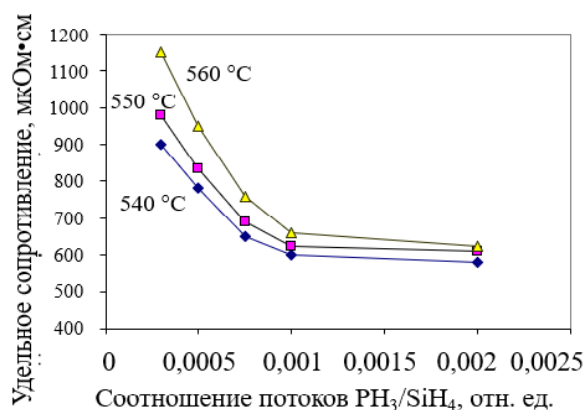


Рисунок 5. – Зависимость удельного сопротивления плёнок ПКЛФ от соотношения потоков PH_3/SiH_4 при различных температурах осаждения

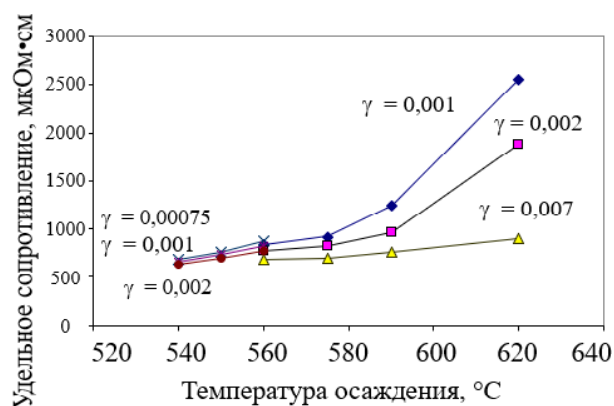


Рисунок 6. – Зависимость удельного сопротивления плёнок ПКЛФ от температуры осаждения при различных от соотношения потоков PH_3/SiH_4

Плёнки ПКЛФ, осаждённые при температурах 590 °C и ниже, после отжига имеют больший размер зёрен, следовательно, возможно достижение более низких удельных сопротивлений. При температурах 560 °C и ниже происходит осаждение аморфной плёнки кремния, в которой отсутствуют зёрна, что способствует равномерному распределению примеси в плёнке. При этом приемлемый уровень легирования достигается при более низком γ .

Таким образом, в результате проведенных исследований был разработан процесс осаждения плёнок ПКЛФ, который используется для производства изделий с субмикронными проектными нормами на пластинах диаметром 200 мм (для формирования затвора, а также обкладок конденсаторов) и имеет следующие характеристики:

- скорость осаждения – 2,2 – 2,5 нм/мин;
- однородность толщины плёнки по пластине – $\leq 1,0 \%$;
- диапазон удельного сопротивления – 600 – 1000 мкОм·см;
- однородность поверхностного сопротивления по пластине – $\leq 1,5 \%$.

Использование плёнок ПКЛФ позволило исключить трудоемкую операцию ионного легирования плёнок ПК, снизить высоту топологического рельефа, улучшить контактные сопротивления, повысить выход годных кристаллов, снизить затраты.

Кроме того, было установлено что, использование двухслойной структуры, состоящей из высоколегированного слоя ПК и слоя нелегированного ПК, позволяет получить резисторы полицида титана шириной 0,35 мкм с удельным сопротивлением не более 23 мкОм·см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Турцевич А.С., Ануфриев Л.П. Плёнки поликристаллического кремния в технологии производства интегральных схем и полупроводниковых приборов, Мн.: Белорусская наука, 2006. С. 55–65.
2. Calvoa, J. LPCVD in-situ doped silicon for thermoelectric applications / J. Calvoa et al // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5. – P. 10249–10256.

3. Наливайко О. Ю. Влияние легирующих добавок на процесс зародышеобразования плёнок кремния / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич, Н. Г. Цыркунова // Материалы V Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств», Новополоцк, 29–30 мая 2008 г.: в 3 т. / Полоц. гос. ун-т. – Новополоцк, 2008. – Т. 2. – С. 155–158.
4. Mulder, J. G. M. An industrial LPCVD Progress in situ Phosphorus-Doped Polysilicon / J. G. M. Mulder, P. Eppenda, M. Hendrics et al. // J. Electrochem. Soc. – 1990. – Vol. 137, N 1. – P. 273–279.
5. Lesnikova, V. P. The structure, morphology and resistivity of in situ phosphorus polysilicon films / V. P. Lesnikova et al. // Thin Solid Films. – 1994. – Vol. 247. – P. 156–161.
6. Turtsevich, A. S. The effect of production conditions for in situ phosphorus doped LPCVD polysilicon in monosilane/phosphine system on the deposition process kinetics / A. S. Turtsevich et al.
7. Наливайко, О. Ю. Адсорбционно-кинетическая модель осаждения плёнок поликристаллического кремния, легированного фосфором в процессе роста / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2009. – Т. 20, № 6. – С. 50–55.
8. Осаждение плёнок поликристаллического кремния, легированного в процессе роста фосфором, в вертикальном реакторе пониженного давления / О. Ю. Наливайко, А. С. Турцевич, С. М. Завадский, Д. В. Жигулин // Материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. «Квантовая электроника», Минск, 18–22 ноября 2019 г. / Минск: РИВШ, 2019. – С. 157–158.