

**Федотов С.Д.<sup>1</sup>, Тимошенко С.П.<sup>1</sup>,  
Соколов Е.М.<sup>2</sup>, Стаценко В.Н.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

<sup>2</sup>АО «ЭПИЭЛ»

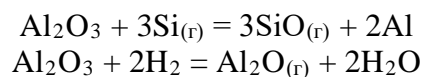
## **Исследование температурных режимов осаждения начального слоя кремния на сапфире**

*Исследованы аспекты влияния температуры осаждения начального слоя кремния на основные характеристики эпитаксиального слоя (структурное совершенство, шероховатость поверхности кремния и автолегирование переходного слоя кремний-сапфир) структур «кремний на сапфире», полученных с помощью газофазной эпитаксии. Установлено, что пониженная температура осаждения начального слоя (910-930 °С) позволяет снизить автолегирование, а наращивание основного объема эпитаксиального слоя при стандартной температуре (950-960 °С) позволяет получить высокое структурное совершенство.*

**Ключевые слова:** эпитаксиальные структуры, кремний на сапфире, кремний на изоляторе, КНС, КНИ, начальный слой, граница раздела, гетероэпитаксия, газофазная эпитаксия, ГФЭ.

Эпитаксиальные структуры кремния на сапфире (КНС) используются в качестве основы для производства электронной компонентной базы интегральных схем различного назначения [1,2]. Электронные компоненты на КНС имеют ряд преимуществ, таких как высокое быстродействие, повышенная степень интеграции и память, термическая и радиационная стойкость, по сравнению с аналогами на объемном кремнии [3]. Указанные преимущества дают приоритет использования электроники на КНС в атомной, космической, военной и др. промышленности, благодаря уменьшению паразитных емкостей между элементами и уменьшению токов утечки, за счет высоких изоляционных свойств сапфировой подложки. Однако широкое использование структур КНС сдерживает высокая плотность структурных дефектов в эпитаксиальном слое, вследствие рассогласования кристаллических решеток и разницы температурных коэффициентов линейного расширения материала слоя и подложки [4]. Важную роль в формировании эпитаксиального слоя КНС играет начальный слой (НС) кремния, образующийся на первых секундах эпитаксии и расположенный в приграничной области интерфейса кремний-сапфир. Механические напряжения и повышенное автолегирование приграничных областей, возникающие в данном слое, являются основными причинами образования высокой плотности дефектов (дислокаций, двойниковых ламелей и др.) и, как следствие, снижения характеристик и надежности электронных изделий на КНС.

На данный момент в области исследования влияния параметров технологического процесса эпитаксии КНС известно, что механизм автолегирования эпитаксиального слоя кремния идет по следующей схеме:



Известны основные факторы, увеличивающие степень автолегирования при наращивании начального слоя КНС: повышенная температура эпитаксиального осаждения,

низкая скорость наращивания, высокая температура проведения и чрезмерная продолжительность послеростового отжига [5]. Структурное совершенство основного объема эпитаксиального слоя КНС в значительной мере обеспечивается температурой осаждения атомарного кремния, при которой подвижность выстраивающихся слоев адатомов достаточна для нормального роста зародышевых островков. Таким образом, можно заключить, что структурное совершенство и автолегирование приграничных областей начального слоя КНС, в целом характеризующие качество получаемых структур, имеют различный характер изменения в зависимости от температуры эпитаксиального осаждения кремния (рис. 1).

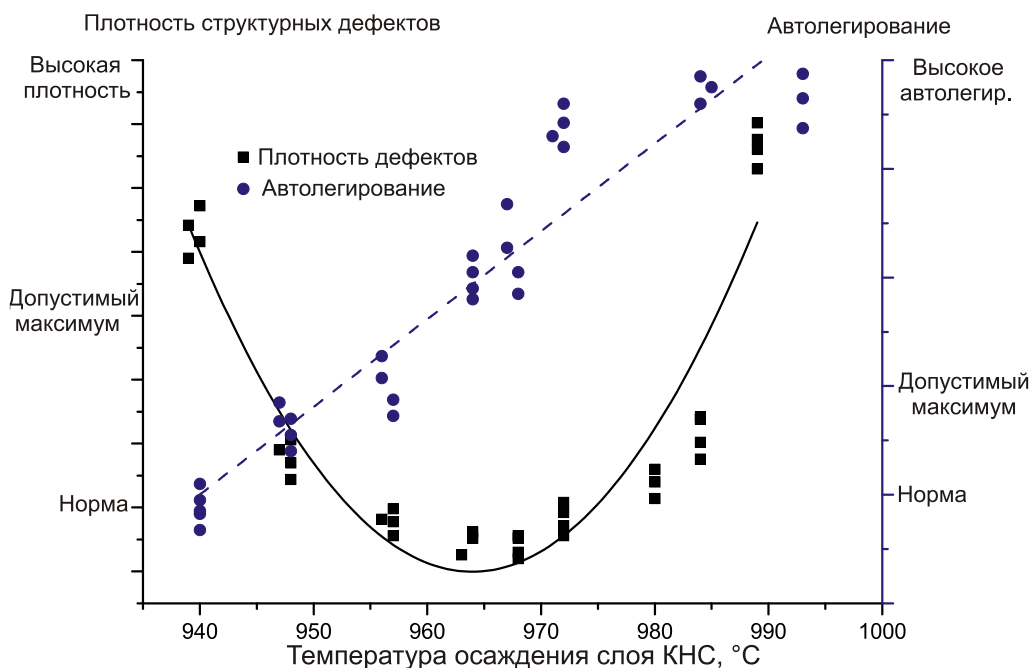


Рис. 1. Экспериментальные зависимости плотности дефектов эпитаксиального слоя и степени автолегирования начального слоя от температуры эпитаксиального осаждения.

Существуют технологические приемы, позволяющие снизить автолегирование путем максимально быстрой скорости наращивания начального слоя КНС [6], а также уменьшающие плотность структурных дефектов в КНС за счет отжига механических напряжений [7]. Тем не менее, до сих пор нет достоверного сравнения известных приемов на одном эпитаксиальном оборудовании в рамках одного технологического процесса и не выявлено оптимальной методики формирования начального слоя, которая позволила бы минимизировать влияние автолегирования от подложки и плотность структурных дефектов в КНС.

В настоящей работе рассмотрены аспекты влияния температуры осаждения начального слоя КНС на основные параметры эпитаксиального слоя (структурное совершенство, шероховатость поверхности кремния и автолегирование переходного слоя кремний-сапфир) структур КНС, полученных с помощью газофазной эпитаксии.

Исследуемые структуры КНС были получены с помощью «комбинированного» метода, разработанного инженерами АО «ЭПИЭЛ» (г. Зеленоград), который заключается в наращивании начального слоя КНС путем газофазного пиролитического разложения моносилана ( $\text{SiH}_4$ ) и дорастивании основного объема эпитаксиального слоя, используя смесь  $\text{SiH}_4$  и галогенсодержащего реагента. Проведены серии опытных процессов по следующим температурным режимам эпитаксиального осаждения начального слоя: 1) осаждение начального слоя при 910-930 °C; 2) при 960-980 °C; 3) осаждение при 950 °C и отжиг начального слоя при 920 °C, 4) осаждение при 950 °C и отжиг при 980 °C (рис.2,

подписи кривых соответствуют указанным режимам). Температура эпитаксии основного объема слоя КНС была в диапазоне 945-955 °С.

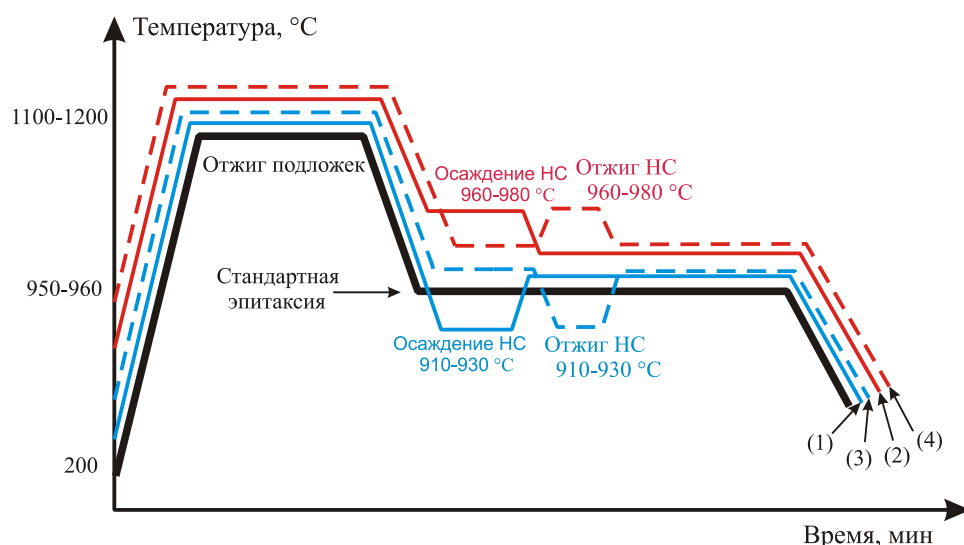


Рис. 2. Циклограмма процесса эпитаксии слоя КНС по различным температурным режимам осаждения начального слоя.

Псевдоморфный характер роста слоя КНС [8] позволяет оценивать относительную плотность структурных дефектов НС по плотности аналогичных структурных нарушений основного объема эпитаксиального слоя, не используя разрушающие и дорогостоящие методы контроля (такие как ПЭМ). Поэтому для оценки плотности структурных дефектов был применен экспрессный метод УФ рассеяния, позволяющий оценить плотность структурных дефектов по геометрическим параметрам поверхности кремниевого слоя [9]. Для подтверждения данных УФ рассеяния использовался выборочный контроль с помощью рентгеноструктурного дифракционного анализа (XRD). Степень автолегирования в приграничной области кремний-сапфир была оценена с помощью метода поверхностной фото-ЭДС (ПФЭ) [10]. Данный метод позволяет с достаточной достоверностью оценить степень автолегирования алюминием кремния, за счет интерпретации данных об электрофизическом состоянии границы раздела кремний-сапфир. Для каждого типа и концентрации легирующего элемента в эпитаксиальном слое кремния на сапфире опытным путем подбирается диапазон допустимых значений ПФЭ, при котором степень автолегирования в приграничной области кремний-сапфир допустима для корректной работы определенного электронного компонента на КНС. Так, для исследуемых изделий КНС с концентрацией легирующего элемента  $4-8 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup> n-типа, максимальная допустимая величина ПФЭ составляет 450 мВ.

По результатам исследования структур было определено, что наиболее оптимальным температурным режимом является режим по варианту (1), в котором производится наращивание начального слоя КНС при 910-930 °С. Параметры эпитаксиальных слоев находились в пределах: FWHM – 0,25-0,3°, УФ – 0,26-0,3 ppm, ПФЭ – 150-250 мВ. Также, структуры, изготовленные по температурному режиму (3) отличались высоким качеством: FWHM – 0,31-0,33°, УФ – 0,29-0,32 ppm, ПФЭ – 330-380 мВ. Качество структур КНС полученных по режимам (2) и (4) было непригодным для использования данных структур в изготовлении электронных компонентов ИС. Полученные в ходе исследования результаты позволили установить зависимости изменения основных параметров слоев КНС при изменении температуры осаждения НС (рис. 3).

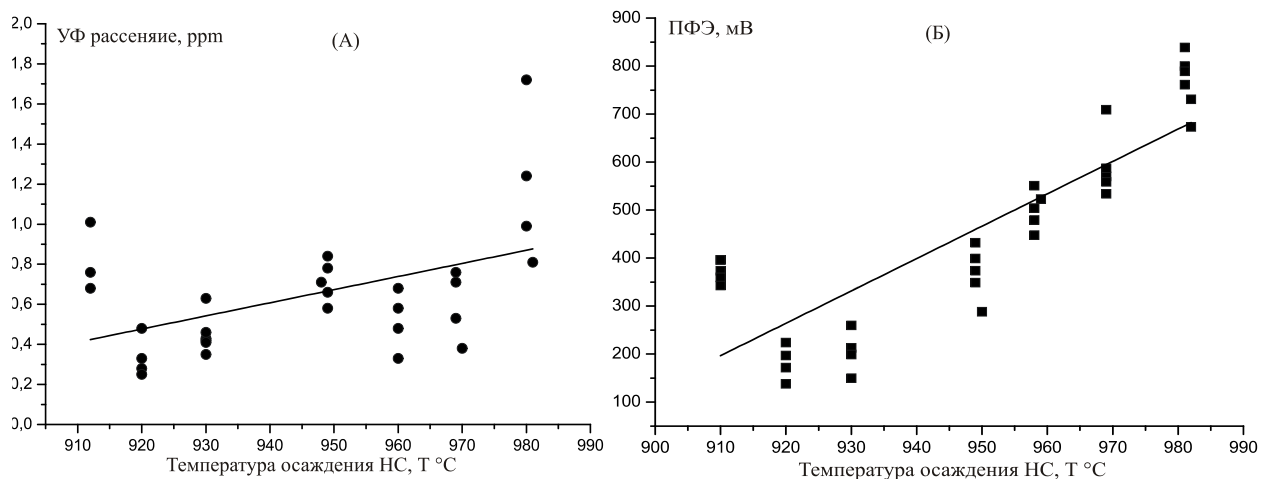


Рис. 3. Изменение основных характеристик слоя КНС от температуры осаждения начального слоя, где А – изменение УФ рассеяния, Б – изменение ПФЭ.

Полученные зависимости показывают, что снижение температуры осаждения начального слоя КНС до 920-930 °С позволяет улучшить структурное совершенство всего слоя КНС и уменьшить автолегирование приграничных областей кремний-сапфир. Ухудшение контролируемых параметров при температуре осаждения 910 °С связано с преобладанием роста поликристаллической фазы на начальном этапе формирования слоя, связанного с малой скоростью роста слоя. Осаждение кремния на сапфир при температуре 980 °С и более также ведет к образования поликристаллического слоя, вследствие слишком высокой скорости роста и активного реакционного взаимодействия кремния и сапфира. Также обнаружено, что отжиг НС при повышенной температуре усиливает автолегирование из подложки, что ухудшает характеристики слоя в целом.

Таким образом можно заключить, что наиболее оптимальным температурным режимом наращивания эпитаксиального слоя КНС может служить процесс с пониженной температурой (920-930 °С) наращивания начального слоя, его последующим отжигом при данной температуре и дальнейшим наращиванием основного объема эпитаксиального слоя КНС при стандартной температуре эпитаксии (945-955 °С) до требуемого значения толщины.

#### Библиографический список

1. J.P. Colinge Thin film SOI technology: the solution for many submicron CMOS problems // IEEE International Electron Devices Meeting, 1989, p. 817-820.
2. R.A. Johnson, P.R. Houssey et al. Advanced thin-film silicon-on-sapphire technology: microwave circuit applications // IEEE Trans Electron Dev. 1998, Vol. 45, p. 1047.
3. R.A Johnson et al. Comparison of microwave inductors fabricated on silicon on sapphire and bulk silicon // IEEE Microwave and Guided Wave Letters. 1986. Vol. 6, No. 9. p. 323-325.
4. S. Cristoloveanu, S.S. Li Electrical characterization of SOI materials and devices // Norwell: Kluwer; 1995.
5. А.Ю. Игнатов, В.С. Постолов Влияние технологических факторов процесса эпитаксии на физические свойства границы раздела кремний-сапфир // Химия твердого тела и современные микро и нанотехнологии. VI Международная конференция. Кисловодск – Ставрополь: СевКавГТУ, 2006. 510 с.
6. Патент США № 3885061 от 20.05.1975 г.
7. Патент США № 4279688 от 21.07.1981 г.
8. M. Mouzykh, S. Samoilenkov Large thickness-dependent improvement of crystallographic texture of CVD silicon films on r-sapphire // Journal of Crystal Growth, 2013, vol. 383, p. 145-150.
9. D.E. Passoja et all Some aspects of the structure-properties relationships associated with haze in SOS // Journal of Crystal Growth 1982, Vol. 58, p. 44-52.
10. А.Ф. Яремчук и др. Применение методики поверхностной фото ЭДС для контроля качества кремниевых эпитаксиальных слоев на сапфире // Известия вузов. Электроника № 5(103) 2013, стр. 14-18.