

**Федотов С.Д.^{1,2}, Тимошенко С.П.¹, Соколов Е.М.²,
Чумак В.Д.², Стаценко В.Н.²**

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

²АО «ЭПИЭЛ»

Мониторинг структурного качества интерфейса кремний-сапфир методом поверхностной фотоЭДС

Гетероэпитаксиальные структуры «кремний на сапфире» (КНС) с толщиной слоя 200 и 600 нм были изготовлены методом газофазной эпитаксии с использованием моносилана. Оценка структурного качества интерфейса кремний-сапфир производилась с помощью метода поверхностной фотоЭДС (ПФЭ) путем регистрации изменения поверхностного потенциала в процессе зондирования структуры световым потоком с заданной длиной волны, а также методом рентгеновской рефлектометрии. В процессе мониторинга качества структур КНС определены технологические параметры процесса изготовления, влияющие на величину сигнала ПФЭ, выявлены наиболее значимые: температура осаждения и скорость роста слоя. Отмечена корреляция между результатами измерений ПФЭ и данными рентгеновской рефлектометрии. На исследованных структурах КНС изготовлены и протестированы р-канальные МОП-транзисторы. Определено, что на структурах КНС с величиной сигнала ПФЭ более 450 мВ ток утечки р-канального МОП-транзистора в закрытом состоянии составлял 2-16 нА, в то время как на структурах с величиной сигнала ПФЭ менее 450 мВ ток утечки не превышал 4 нА.

Ключевые слова: гетероэпитаксиальные структуры, газофазная эпитаксия, кремний на сапфире, кремний на изоляторе, КНС, КНИ, интерфейс, граница раздела, поверхностная фотоЭДС, фотопроводимость, поверхностный потенциал, потенциальный барьер, МОП-транзистор.

Технология изготовления гетероэпитаксиальных структур «кремний на сапфире» (КНС) известна уже более 50 лет. Однако в настоящее время продолжают работы по усовершенствованию и модификации данной технологии с помощью различных методов наращивания гетероэпитаксиальных слоев. Сегодня метод газофазной эпитаксии позволяет получать качественные структуры КНС с толщиной слоя кремния до нескольких сотен нанометров для производства интегральных схем различного назначения [1-2], а также для МЭМС устройств [3]. Формирование дискретных приборов на таких структурах в значительной степени зависит от распределения плотности дефектов и удельного сопротивления по сечению эпитаксиального слоя. Как известно, слои КНС неоднородны по своей структуре: область слоя вблизи поверхности приближается по своим свойствам к объемному кремнию, в то время как приграничная область кремний-сапфир, вблизи интерфейса слой-подложка, содержит высокую плотность структурных дефектов, образованных вследствие рассогласования решеток кремния и сапфира. Неоднородность структурных свойств КНС ведет к увеличению рекомбинационной активности для избыточной концентрации носителей заряда одновременно с неоднородным изменением удельного сопротивления по толщине слоя. Таким образом, изготовление дискретных приборов на структурах КНС с требуемыми эксплуатационными характеристиками возможно только при проведении постоянного мониторинга (контроля) процесса формирования дефектных областей вблизи интерфейса кремний-сапфир. Данный контроль, по возможности,

должен быть неразрушающим, бесконтактным и не продолжительным по времени, что обеспечит возможность его применения при мониторинге изготавливаемой продукции в режиме реального времени.

Требуемым условиям удовлетворяет метод зондирования локальной приграничной области полупроводникового материала световым потоком с заданной длиной волны и определенной интенсивностью. Изменения электронной структуры слоя, возникающие вследствие фотогенерации большого числа неосновных носителей заряда, возможно регистрировать либо с помощью СВЧ методики [4], либо используя емкостную связь поверхности полупроводника и измерительной аппаратуры [5]. Оба метода активно применяются при тестировании полупроводниковых материалов после различных технологических операций, однако именно метод поверхностной фотоЭДС (ПФЭ) наиболее пригоден для оценки качества структур КНС. Принципиальная схема измерения по данному методу представлена на Рис. 1, А. Стоит отметить, что метод ПФЭ применим только в том случае, если поверхность исследуемой области обладает встроенным поверхностным потенциалом. Неоднородность распределения удельного сопротивления в слое КНС приводит к формированию встроенного потенциала на поверхности сапфировой подложки (обратная сторона структуры), величина которого отражает как плотность распределения структурных дефектов, так и концентрацию легирующей примеси вблизи переходного слоя кремний-сапфир, причем оба критерия зависят от условий проведения процесса наращивания слоя, как сказано в результатах работы [6]. Это позволяет осуществлять измерение величины сигнала ПФЭ на структурах КНС без какой либо предварительной химической обработки поверхности, а также значительно увеличивает достоверность проводимых измерений.

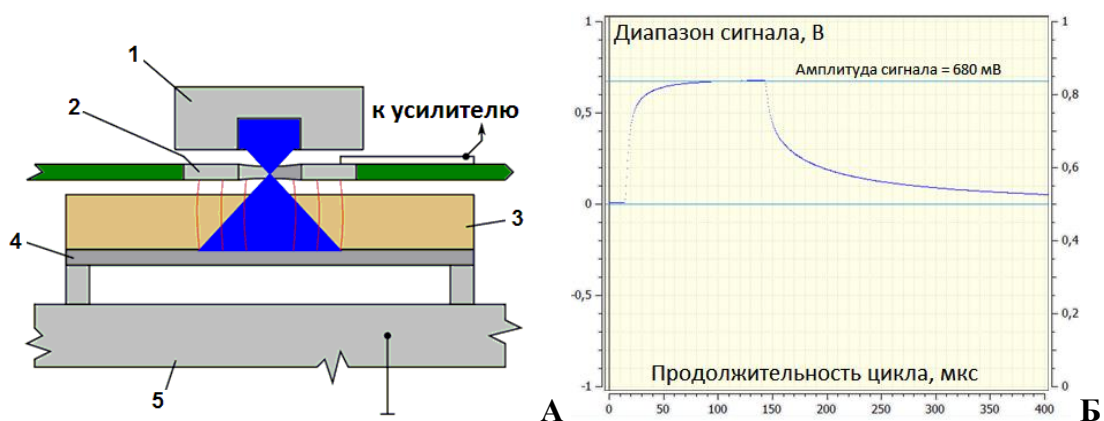


Рис. 1. Принципиальная схема измерения ПФЭ (А), где 1 – излучатель, 2 – емкостный электрод, 3 – сапфир, 4 – кремний, 5 – металлическая оснастка, и экран цифрового осциллографа при измерении амплитуды ПФЭ (Б).

Принцип метода поверхностной фотоЭДС заключается в процессе зондирования обратной стороны структуры световым потоком, генерации избыточных неосновных носителями заряда, образованных в результате засветки области кремния, граничащей с интерфейсом кремний-сапфир, вследствие чего величина поверхностного потенциала (заряда поверхности) изменяется. Эти изменения регистрируются внешним емкостным электродом, расположенным на расстоянии не более 100 мкм от поверхности обратной стороны структуры, а так как они, в свою очередь, связаны с рекомбинационными процессами в объеме приграничной области кремний-сапфир, то это дает возможность судить о качестве исследуемого материала. В работе [6] указано, что изменения поверхностного потенциала, связанные с рекомбинационными параметрами тестируемой области слоя кремния, отражаются на величине амплитуды выходного сигнала ПФЭ (Рис. 1, Б). Амплитуда

выходного сигнала может служить оценочным параметром степени дефектности слоя КНС и в настоящее время проходит процедуры внедрения в современные ТУ на КНС.

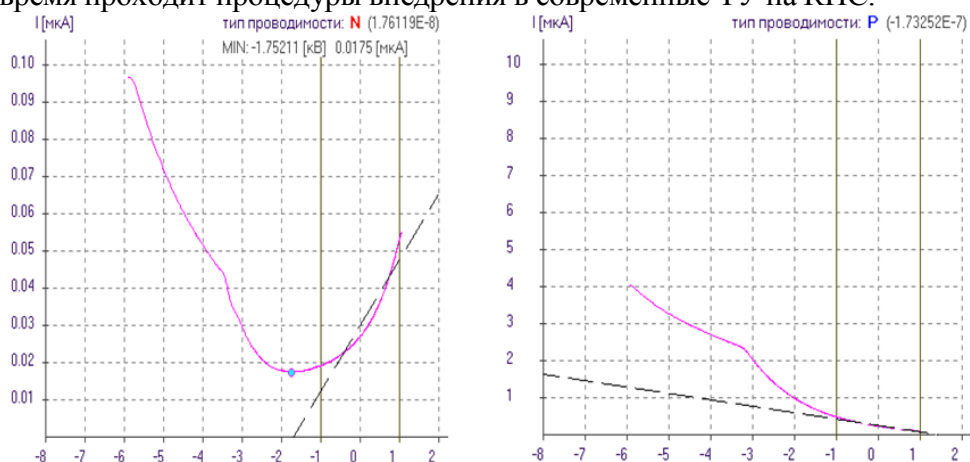


Рис. 2. Кривые, полученные методом эффекта поля для N-типа проводимости на интерфейсе (слева) и для P-типа проводимости (справа).

Однако до сих пор, как нам известно, исследование влияния технологических факторов процесса эпитаксии на величину амплитуды сигнала ПФЭ не проводилось. В работе [7] изучено влияние данных факторов на физические свойства границы раздела кремний-сапфир с помощью метода измерения эффекта поля [8]. В результатах данной работы выделены основные факторы, увеличивающие автолегирование границы раздела: повышение температуры процесса эпитаксии, снижение скорости роста слоя, увеличение температуры и длительности отжига структуры после роста слоя. Полученные в указанной работе результаты также подтверждаются методами XRD и АСМ. Тем не менее, метод эффекта поля позволяет проводить лишь качественную оценку степени автолегирования приграничной области кремний-сапфир – по наклону получаемой кривой отношения силы тока к получаемому напряжению определяют тип проводимости на границе раздела (см. Рис. 2), что затрудняет оптимизацию процесса изготовления и снижает точность вносимых корректировок. Количественная оценка влияния технологических факторов процесса эпитаксии на качество интерфейса кремний-сапфир, полученная с помощью метода ПФЭ, позволит оптимизировать процесс изготовления структур КНС и с достаточной точностью определить способы управления данным качеством.

Структуры КНС были изготовлены с помощью вертикального эпитаксиального реактора с индуктивным нагревом PE2061 (LPE, Италия) методом химической газофазной эпитаксии (CVD) при атмосферном давлении. Температура процесса эпитаксии контролировалась оптическим пирометром. Сухой водород (содержание воды < 5 ppb) был использован в качестве рабочей атмосферы. В качестве кремнийсодержащего реагента использовался моносилан (SiH_4), разбавленный водородом (5% SiH_4 – 95% H_2). Фосфин (PH_3) был использован в качестве легирующей примеси (n-тип). При проведении опытных процессов варьировались следующие параметры: температура осаждения (роста), скорость роста и удельное сопротивление слоя.

Каждая изготовленная структура КНС прошла контроль всех требуемых параметров. Толщина слоя кремния была проконтролирована с помощью ИК Фурье спектроскопии (ФСМ 1201, ООО Инфраспек, РФ). Шероховатость слоя кремния была оценена с помощью метода УФ рассеяния (Reflex 375, ООО Рефлекс-лайт, РФ). Удельное сопротивление слоя контролировалось четырехзондовым методом (ResMap 178, CDE Inc., США). Рентгеновский рефлектометрический анализ (X-Ray Minilab, ООО ИРО, РФ) был проведен на отдельной серии опытных структур.

В результате проведения серий опытных процессов получены структуры КНС с параметрами слоя: толщина – 600 нм, ориентация рабочей поверхности перпендикулярна плоскости (100), n-тип с удельным сопротивлением $2 \div 15$ Ом·см. Разброс параметров толщины и удельного сопротивления по площади структур не превышал $\pm 10\%$ от заданного значения.

Определено, что температура осаждения слоя кремния оказывает наиболее сильное влияние на величину амплитуды сигнала ПФЭ среди остальных исследуемых технологических параметров. Найдена строгая линейная зависимость амплитуды ПФЭ от температуры осаждения (Рис. 3, А). Температурный диапазон 910 – 920 °С является пограничным между образованием поликристаллической и монокристаллической фаз КНС. При температуре процесса ниже 910 °С происходило образование поликремния на сапфире, о чем можно судить по высокой шероховатости рабочей поверхности структуры. Возможно это происходит вследствие недостаточной подвижности адатомов кремния на поверхности роста. Выше 920 °С происходило образование монокристаллических слоев кремния с гладкой рабочей поверхностью. Величина сигнала амплитуды фотоЭДС увеличивалась вплоть до 980 °С. При температуре процесса около 990 °С и выше наблюдался явный рост поликристаллической фазы, вероятно вследствие протекания активной реакции между осаждаемым атомарным кремнием и поверхностью сапфировой подложки. Возможно, именно повышенная концентрация структурных дефектов вблизи интерфейса кремний-сапфир, образованная в результате загрязнения слоя продуктами реакции, является причиной повышения величины амплитуды сигнала ПФЭ. Помимо этого, повышенная концентрация атомарного алюминия в приграничной области кремния также может являться причиной роста величины амплитуды сигнала ПФЭ, вследствие увеличения концентрации акцепторных ловушек и модификации поверхностного потенциала.

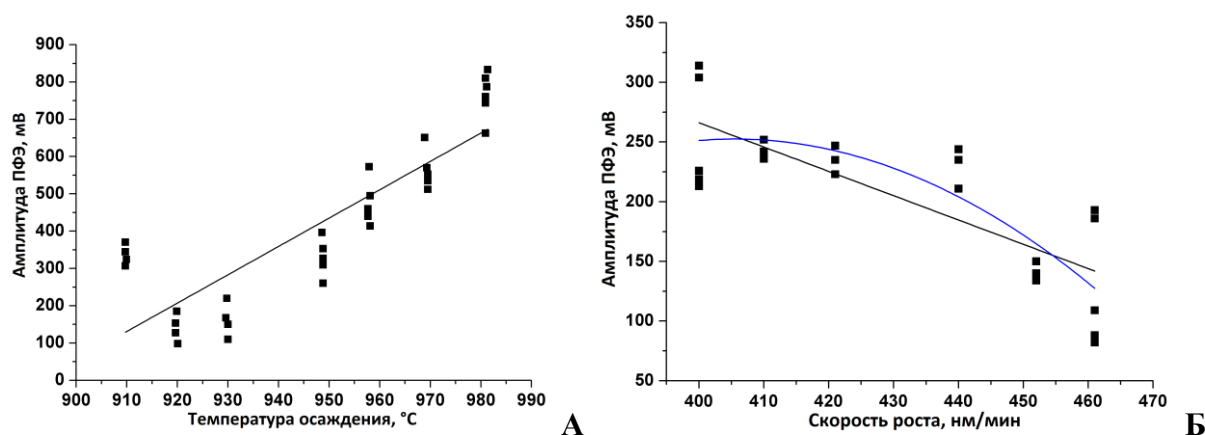


Рис. 3. Зависимость величины амплитуды ПФЭ от температуры роста (А) и от скорости роста слоя (Б).

Найденная зависимости амплитуды ПФЭ от скорости роста слоя может быть описана линейной функцией или полиномом второго порядка (Рис. 3, Б). В данных опытных процессах скорость роста варьировалась с помощью изменения расхода кремнийсодержащей ПГС. Исследуемый диапазон составил 400 – 460 нм/мин. Стоит отметить, что данный диапазон является оптимальным для данного процесса, так как за его пределами структурное качество получаемых структур резко ухудшается. Температура роста в каждом процессе данной серии была равна 950 °С. Величина амплитуды ПФЭ понижалась с повышением скорости роста слоя. Возможно, повышение скорости роста ускоряет зарастивание рабочей поверхности сапфировой подложки, что

способствует снижению загрязнения эпитаксиального слоя продуктами реакций восстановления сапфира водородом и взаимодействия кремния и сапфира.

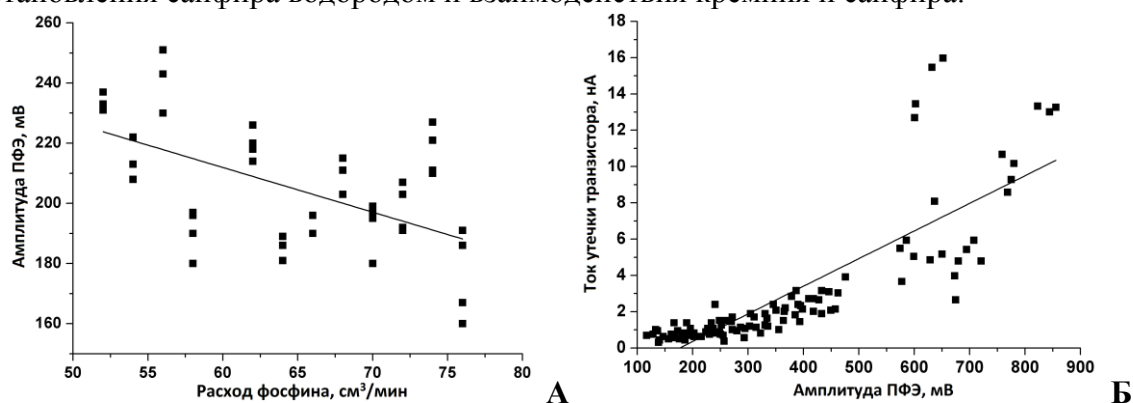
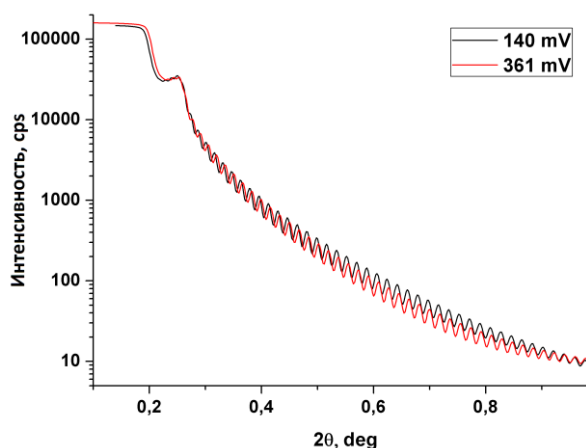


Рис. 4. Зависимость величины амплитуды ПФЭ от расхода фосфина (А) и зависимость тока утечки транзистора от амплитуды ПФЭ (Б).

Изменение величины амплитуды ПФЭ от расхода фосфина показано на Рис. 4, А. Несмотря на довольно сильный разброс получаемых данных, в основном связанный с особенностью измерений четырехзондовым методом, прослеживается тенденция к уменьшению амплитуды с увеличением расхода фосфина. Исследуемый диапазон расхода фосфина составил 52 – 76 см³/мин, удельное сопротивление слоя было в диапазоне 15÷2 Ом·см. Можно предположить, что повышение легирующей примеси n-типа изменяет уровень Ферми в слое и модифицирует потенциальный барьер на границе раздела кремний-сапфир. С другой стороны, атомарный фосфор способен встраиваться в решетку рабочей поверхности сапфировой подложки на кислородные вакансии, тем самым уменьшая дефицит кислорода на поверхности роста и улучшая условия зарождения начального слоя, например как это описано в работе [9].

Таблица 1. Результаты рентгеновской рефлектометрии.



ПФЭ, мВ	Параметр переходного слоя		
	Толщина, Å	Шероховатость, Å	Плотность, g/cm ³
140	28±6	13±4	2,70±0,14
259	27±8	20±4	2,75±0,14
361	34±8	24±6	2,75±0,15
643	44±6	27±6	2,75±0,15

Рис. 5. Рефлектограммы слоев КНС с различной амплитудой ПФЭ.

Рефлектометрические измерения были проведены для симметричного дифракционного отражения Si (400) в режиме сканирования θ - 2θ с угловым шагом $\Delta\theta = 0,001^\circ$. Данные измерения проводились на структурах КНС с толщиной слоя 200 нм, полученных в отдельной серии опытных процессов с помощью температурной вариации. Рефлектограммы структур КНС с различными значениями амплитуды ПФЭ показаны на

Рис. 5. На графике видно, что величина амплитуды способна изменять форму кривой рефлектограммы. Параметры переходного слоя вблизи интерфейса кремний-сапфир (Таблица 1), полученные в результате проведенного рефлектометрического анализа, также подтверждают корреляцию величины амплитуды сигнала ПФЭ и структурного качества переходного слоя кремний-сапфир. Обнаружено, что толщина и шероховатость переходного слоя повышается с ростом величины амплитуды ПФЭ.

Опытные структуры КНС с толщиной слоя 600 нм были использованы для производства тестовых р-канальных МОП транзисторов. В результате тестирования полученных приборов была обнаружена зависимость тока утечки транзистора в закрытом состоянии от величины амплитуды ПФЭ (Рис. 4, Б). Ток утечки имел тенденцию к росту с повышением амплитуды ПФЭ, однако после превышения значения амплитуды ~ 450 мВ ток утечки значительно усиливался. На структурах с величиной амплитуды ПФЭ менее 450 мВ ток утечки р-канального МОП-транзистора не превышал 4 нА, в то время как на структурах КНС с амплитудой ПФЭ более 450 мВ ток утечки составлял 2-16 нА. Полученные данные позволяют применять метод поверхностной фотоЭДС при контроле рабочей продукции и определить критерий годности для исследованного типа структур.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (уникальный идентификатор прикладных научных исследований 16-19-00177) и за счет внутренних средств АО «Эпиэл».

Благодарим наших коллег: Герасименко Н.Н. и Смирнова Д.И. из НИЛ РМТА НИУ «МИЭТ» за проведение рентгеноструктурного анализа тонких слоев и помощь в интерпретации результатов.

Также благодарим коллектив ООО «Телеком-СТВ» и лично Алексева А.В. за разработку измерительного оборудования и адаптацию метода ПФЭ для структур КНС.

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. T. Galchev, W. C. Welch, K. Najafi “Low-temperature MEMS process using plasma activated Silicon-On-Silicon (SOS) bonding” // IEEE 20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Hyogo, Japan, 21-25 January 2007.
4. Контроль качества структур КНС СВЧ методом / П.А. Бордовский, А. Ф. Булдыгин, Н. И. Петухов и др. // Микроэлектроника. - 2008. - Т. 37, № 2. - С. 101-110.
5. Implant metrology for SOI wafers using a surface photovoltage technique / Bertuch A. et al. // 211th ECS Conference (Chicago, 2006). - 2006. - P. 1-6.
6. Яремчук А.Ф., Старков А.В., Заикин А.В., Алексеев А.В., Соколов Е.М. Применение методики поверхностной фотоЭДС для контроля качества кремниевых эпитаксиальных слоев на сапфире // Известия вузов. Электроника. - 2013. - Вып. 103, № 5. - С. 14-19.
7. Игнатов А.Ю., Постолов В.С., Филимонов А.С. 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.
8. Сидоров А.И., Сальников Л.А., Чумак В.Д. // Электронная техника сер. Материалы. - 1985. - вып. 5 (204). - С. 20-22.
9. M. Tsuda et al. “Mechanism of H2 pre-annealing on the growth of GaN on sapphire by MOVPE” // Applied Surface Science, 2003, Vol. 216, pp. 585–58.