



УДК 621.315.592.(075.8)

С. Д. Федотов, С. П. Тимошенко

Национальный исследовательский университет "МИЭТ"

Е. М. Соколов, В. Н. Стаценко

АО "ЭПИЭЛ" (Москва, Зеленоград)

Мониторинг структурного качества границы раздела "кремний-сапфир" методом поверхностной фотоЭДС¹

Приведены результаты оценки структурного качества границы раздела "кремний-сапфир" гетероэпитаксиальных структур "кремний на сапфире" (КНС) с толщиной слоя кремния 200...600 нм, изготовленных методом газофазной эпитаксии с помощью пиролиза моносилана. Качество границы раздела оценивалось методом поверхностной фотоЭДС (ПФЭ) путем регистрации изменения поверхностного потенциала в процессе зондирования структуры световым потоком с заданной длиной волны, а также методом рентгеновской рефлектометрии. Мониторинг качества структур КНС в процессе их изготовления позволил определить технологические параметры, влияющие на значение сигнала ПФЭ. Наиболее значимыми параметрами являются температура и скорость роста слоя кремния. Отмечена корреляция между результатами измерений амплитуды сигнала ПФЭ и данными рентгеновской рефлектометрии. Тестирование р-канальных МОП-транзисторов на структурах КНС показало, что при амплитуде более 0.45 В ток утечки транзистора в закрытом состоянии составлял 2...16 нА, в то время как на структурах с меньшими значениями амплитуды этот ток не превышал 4 нА.

Гетероэпитаксиальные структуры, газофазная эпитаксия, кремний на сапфире, кремний на изоляторе, граница раздела, поверхностная фотоЭДС, поверхностный потенциал

Технология изготовления гетероэпитаксиальных структур "кремний на сапфире" (КНС) известна уже более 50 лет [1]. Однако в настоящее время продолжают работы по усовершенствованию и модификации данной технологии с помощью различных методов наращивания гетероэпитаксиальных слоев [2], [3]. Сегодня метод газофазной эпитаксии позволяет получать качественные структуры КНС с толщиной слоя кремния до нескольких сотен нанометров для производства интегральных схем различного назначения [4], [5], а также для микроэлектромеханических систем (МЭМС) [6].

Формирование дискретных приборов на КНС-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 при-

ближается по своим свойствам к объемному кремнию, в то время как область кремния вблизи границы раздела "кремний-сапфир" ("слой-подложка") имеет высокую плотность структурных дефектов из-за рассогласования кристаллических решеток кремния и сапфира [7]. Неоднородность структурных свойств КНС ведет к увеличению рекомбинационной активности избыточных носителей заряда, а также к неоднородным изменениям удельного сопротивления по толщине слоя. Поэтому изготовление дискретных приборов на КНС-структурах с требуемыми эксплуатационными характеристиками возможно только при проведении постоянного мониторинга (контроля) процесса формирования дефектных областей вблизи границы раздела "кремний-сапфир". Такой контроль, по возможности, должен быть неразрушающим, бесконтактным и непродолжительным, что обеспечит возможность его приме-

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (уникальный идентификатор прикладных научных исследований 16-19-00177).

нения при мониторинге изготавливаемой продукции в режиме реального времени.

Указанным условиям может удовлетворять 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 [8], либо используя емкостную связь поверхности полупроводника и измерительной аппаратуры [9], [10]. 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 [11].

Метод поверхностной фотоЭДС. Необходимо 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), отражающего как плотность распределения структурных дефектов, так и концентрацию легирующей примеси вблизи переходного слоя "кремний-сапфир", причем оба фактора зависят от условий проведения процесса наращивания слоя [11]. Благодаря этому для измерения структур КНС не требуется дополнительной химической обработки, что позволяет увеличить достоверность проводимых измерений.

Метод ПФЭ позволяет определить диффузионную длину неосновных носителей заряда в объеме кремния. Генерация электронно-дырочных пар в объеме кремния происходит под действием световых потоков различной длины волны со строго определенной интенсивностью. В методе используется емкостная связь поверхности кремния с измерительной аппаратурой, поэтому световые потоки, падающие на поверхность кремния, по интенсивности модулируются по синусоидальному закону. На выходе измерительного устройства регистрируется амплитуда синусоидального сигнала, которая преобразуется в цифровую форму.

Рекомбинация неосновных носителей заряда осуществляется как в объеме кремния, так и на его поверхности. В случае гетероэпитаксиальных структур КНС диффузионный оптический поток подходит к границе области пространственного

заряда, которая всегда присутствует вблизи границы раздела "кремний-сапфир". Избыточные электроны, фотогенерированные в объеме гетероэпитаксиального слоя, подхватываются электрическим полем и переносятся через эту границу. Часть электронов нейтрализуют акцепторные состояния на границе раздела, обычно вызванные присутствием атомов алюминия и структурными нарушениями переходного слоя. Нейтрализация акцепторных центров изменяет общее зарядовое состояние на границе раздела "кремний-сапфир". Именно это изменение общего заряда на границе двух фаз можно зарегистрировать внешним емкостным электродом, поскольку оно влияет на заряд противоположной границы раздела поверхности кремния. Другая часть электронов захватывается рекомбинационными центрами на границе раздела. Такими центрами являются вакансии и дырки, образованные акцепторной примесью (алюминием) и различными структурными дефектами, концентрация которых вблизи границы раздела достигает $10^8 \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ [12].

Принцип измерения структур КНС методом ПФЭ заключается в следующем. Структура КНС, расположенная на металлической оснастке (рис. 1, 5), зондируется со стороны сапфировой подложки (рис. 1, 3) модулированным по интенсивности световым потоком от излучателя (рис. 1, 1). Зондирование приграничной с сапфиром зоны кремния (рис. 1, 4) вызывает в ней генерацию избыточных неосновных носителей заряда, вследствие чего поверхностный потенциал (заряд поверхности) изменяется.

Эти изменения регистрируются внешним емкостным электродом (рис. 1, 2), расположенным на расстоянии не более 100 мкм от поверхности обратной стороны структуры. Поскольку они, в свою очередь, связаны с рекомбинационными процессами в объеме приграничной области "кремний-сапфир", это дает возможность судить о качестве исследуемого материала. В [11] указа-

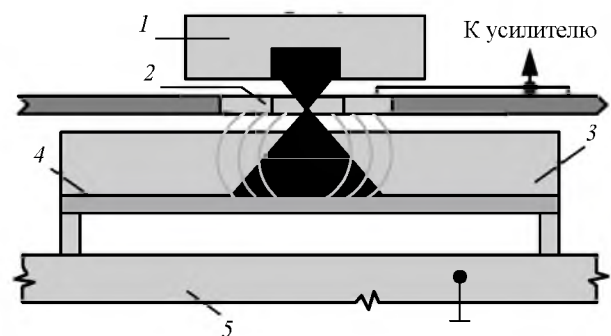
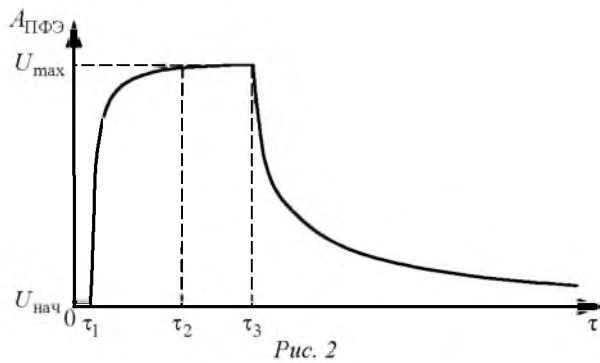


Рис. 1



но, что изменения поверхностного потенциала, связанные с рекомбинационными параметрами тестируемой области слоя кремния, отражаются на значении амплитуды сигнала ПФЭ (АС ПФЭ).

На рис. 2 представлена типичная форма сигнала ПФЭ при импульсной засветке образца сапфира *n*-типа с осажденным слоем кремния. Импульс подавался в интервале от τ_1 до τ_3 . После подачи импульса в интервале $\tau_1 \dots \tau_2$ АС ПФЭ возрастает от начального $U_{нач}$ до установившегося максимального значения U_{max} . После окончания засветки ($\tau > \tau_3$) АС спадает $U_{нач}$. Интенсивность засветки и длина волны излучения определяются химическим составом образца. Значение U_{max} характеризует концентрацию акцепторных состояний в инспектируемой области границы раздела "кремний-сапфир", поскольку увеличение концентрации акцепторных состояний в слое *n*-типа проводимости приводит к увеличению рекомбинации фотогенерированных носителей заряда. Таким образом, структурное качество границы раздела можно оценить по значению АС ПФЭ. В экспериментах, результаты которых представлены далее в настоящей статье, облучение проводилось на длине волны 430 нм, длительность светового импульса составляла 150 мкс.

Методика оценки структурного качества границы раздела "кремний-сапфир" по значениям АС ПФЭ в настоящее время проходит процедуру внедрения в современные технические условия (ТУ) на КНС.

Насколько известно авторам статьи, до сих пор исследование влияния технологических факторов процесса гетероэпитаксии на амплитуду сигнала ПФЭ не проводилось. В [13] описано исследование влияния технологических факторов на физические свойства границы раздела "кремний-сапфир" путем регистрации изменения высоковольтного эффекта поля [14]. В указанной работе выделены следующие факторы, увеличивающие автолегирование границы раздела: по-

вышение температуры процесса эпитаксии, снижение скорости роста слоя, увеличение температуры и длительности отжига структуры после роста слоя. Полученные результаты подтверждены [13] методами рентгеноструктурного анализа и атомно-силовой микроскопии. Тем не менее метод эффекта поля позволяет проводить лишь качественную оценку степени автолегирования приграничной области КНС. По наклону кривой отношения силы тока к напряжению определяют тип проводимости на границе раздела "кремний-сапфир". Такая оценка затрудняет оптимизацию процесса изготовления и снижает точность внесимых корректировок. Количественная оценка влияния технологических факторов процесса эпитаксии на структурное совершенство границы раздела "кремний-сапфир", полученная методом ПФЭ, позволит оптимизировать процесс изготовления структур КНС

Эксперимент. Для экспериментальной проверки описанного метода были изготовлены структуры КНС с помощью вертикального эпитаксиального реактора с индуктивным нагревом PE2061 (производство LPE, Италия) методом химического газофазного осаждения (chemical vapor deposition – CVD) при атмосферном давлении в рабочей атмосфере сухого водорода (содержание воды меньше 5 ppb). Температура процесса эпитаксии контролировалась оптическим пирометром. В качестве кремнийсодержащего реагента использовался моносилан (SiH_4), разбавленный водородом (5 % SiH_4 – 95 % H_2). Фосфин (PH_3) использован в качестве легирующей примеси *n*-типа. 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 контролировалась инфракрасным фурье-спектрометром ФСМ 1201 (ООО "Инфраспек", РФ). Шероховатость слоя кремния определялась методом ультрафиолетового рассеяния прибором "Reflex 375" (ООО "Рефлекс-лайт", РФ). Удельное сопротивление слоя контролировалось четырехзондовым методом с использованием установки ResMap 178 (фирма "CDE Inc.", США). Рентгеновский рефлектометрический анализ (прибор "X-Ray Minilab", ООО "ИРО", РФ) проводился на отдельной серии опытных структур. Измерение АС методом ПФЭ осуществлялось на специально разработанной для структур КНС установке ТЕЛЕК-01 (ООО "Телеком-СТВ", РФ).

Результаты и их обсуждение. В результате проведения серий опытных процессов получены структуры КНС со следующими параметрами слоя кремния: толщина 200...600 нм, ориентация рабочей поверхности перпендикулярна плоскости (100), проводимость *n*-типа с удельным сопротивлением 2...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 значительное влияние на значение АС ПФЭ в сравнении с остальными исследуемыми технологическими параметрами. Выявлена строгая линейная зависимость этой амплитуды от температуры осаждения (рис. 3)¹. 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 и наличию равномерной матовости. Возможно, это происходит вследствие недостаточной подвижности адатомов кремния на поверхности роста. При температуре выше 920 °С образовывались монокристаллические слои кремния с гладкой рабочей поверхностью. 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.

АС ПФЭ увеличивалась вплоть до 980 °С. Возможно, причиной повышения амплитуды является отмеченная при повышении температуры повышенная концентрация структурных дефектов вблизи границы раздела, образованная в результате загрязнения слоя продуктами реакции взаимодействия кремния и сапфира. Также причиной роста амплитуды сигнала ПФЭ может являться повышен-

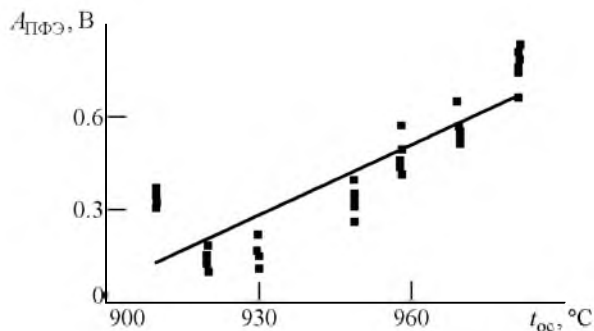


Рис. 3

¹ На рис. 3–5, 7 маркерами показаны результаты экспериментов.

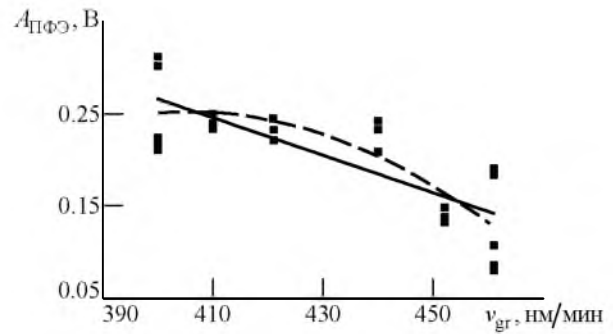


Рис. 4

ная концентрация атомарного алюминия в приграничной области кремния вследствие увеличения концентрации акцепторных состояний и модификации поверхностного потенциала.

Зависимость амплитуды сигнала ПФЭ от скорости роста слоя $v_{гр}$ (рис. 4) может быть описана линейной функцией (сплошная линия) или полиномом второго порядка (штриховая линия). В проведенных опытных процессах скорость роста варьировалась с помощью изменения расхода кремнийсодержащей парогазовой среды в диапазоне 400...460 нм/мин. Указанный диапазон можно считать оптимальным для проведенного процесса, так как за его пределами структурное качество границы раздела "кремний–сапфир" резко ухудшается.

Температура роста во всех процессах проведенной серии составляла 950 °С.

АС 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.

Зависимость АС ПФЭ от расхода фосфина Q_{PH_3} на этапе роста начального слоя показана на рис. 5. Несмотря на существенный разброс значений амплитуды, в основном связанный с неоднородностью уровня легирования слоя от процесса к процессу, прослеживается тенденция к уменьшению амплитуды с увеличением расхода фосфина. Исследованный диапазон расхода составил 52...76 см³/мин, удельное сопротивление слоя находилось в диапазоне 2...15 Ом·см. Можно предположить, что повышение концентрации легирующей примеси *n*-типа изменяет уровень Ферми в слое кремния и модифицирует потенциальный барьер границы раздела "кремний–сапфир". С другой стороны, атомарный фосфор способен встраиваться в решетку рабочей поверхности

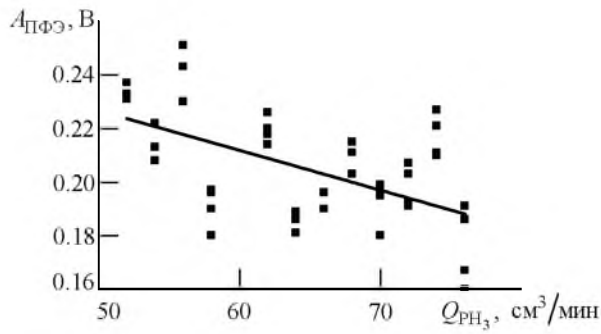


Рис. 5

сапфировой подложки на кислородные вакансии, тем самым уменьшая дефицит кислорода на поверхности роста и улучшая условия зарождения начального слоя (см., например, [15]).

Рефлектометрические измерения были проведены для симметричного дифракционного отражения Si (400) в режиме сканирования $\theta - 2\theta$ с угловым шагом $\Delta\theta = 0.001^\circ$. Измерения проводились на структурах КНС с толщиной слоя кремния 200 нм, полученных в отдельной серии опытных процессов при различных температурах.

Получены рефлектограммы (зависимость интенсивности рассеянного рентгеновского излучения от угла рассеяния $I(\theta)$) структур КНС со значениями АС ПФЭ 0.14 и 0.361 В (рис. 6). Изменение АС ПФЭ коррелирует с изменением формы кривой рефлектограммы, свидетельствующим о неодинаковом интерференционном рассеянии рентгеновского излучения в тонких слоях структур КНС при различных значениях АС ПФЭ.

Расчет размерных параметров переходной области кремниевого слоя вблизи границы раздела "слой-подложка" (таблица) также подтверждает корреляцию значений АС ПФЭ и структурных характеристик границы. Обнаружено, что рост АС ПФЭ отражает возрастание толщины и шероховатости переходного слоя.

На основании опытных структур КНС с толщиной слоя 600 нм были изготовлены тестовые *p*-канальные МОП-транзисторы. В результате тести-

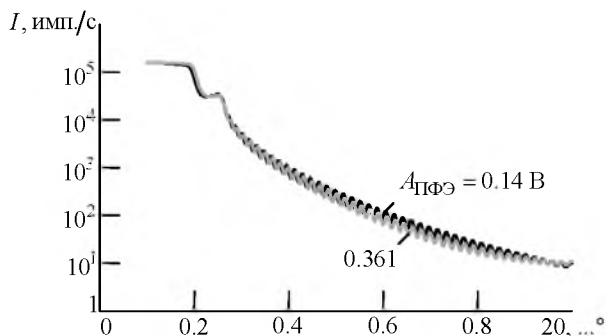


Рис. 6

Амплитуда ПФЭ, В	Параметр переходного слоя "кремний-сапфир"		
	Толщина, Å	Шероховатость, Å	Плотность, г/см ³
0.140	28±6	13±4	2.70±0.14
0.259	27±8	20±4	2.75±0.14
0.361	34±8	24±6	2.75±0.15
0.643	44±6	27±6	2.75±0.15

рования полученных приборов обнаружена зависимость тока утечки транзистора в закрытом состоянии ($I_{ут}$) от АС ПФЭ (рис. 7). При малых значениях амплитуды (примерно до 0.45 В) с ее ростом ток утечки не превышал 4 нА и возрастал незначительно, однако при больших значениях АС ПФЭ ток значительно увеличивался и принимал значения 2...16 нА. Полученные данные позволяют применять метод ПФЭ при контроле рабочей продукции и сформулировать критерий годности для исследованного типа структур.

По результатам проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы.

Обнаружено, что температура осаждения и скорость роста кремния на сапфире влияют на значение АС ПФЭ наиболее существенно. Установлено, что изменение расхода фосфина на стадии наращивания начального слоя КНС также изменяет электрофизическое состояние границы раздела "кремний-сапфир". Полученные экспериментальные зависимости технологических параметров от амплитуды ПФЭ позволили определить новые пути управления качеством получаемых структур КНС.

Обнаруженная зависимость параметров дискретных приборов на КНС (на примере тестовых *p*-канальных МОП-транзисторов) от АС ПФЭ позволяет сформулировать пороговый критерий годности качества границы раздела "кремний-сапфир", составляющий около 0.45 В. При больших значениях амплитуды ток утечки *p*-канального МОП-транзистора в закрытом состоянии составлял 2...16 нА, в то время как на структурах с АС ПФЭ менее порогового значения этот ток не превышал 4 нА.

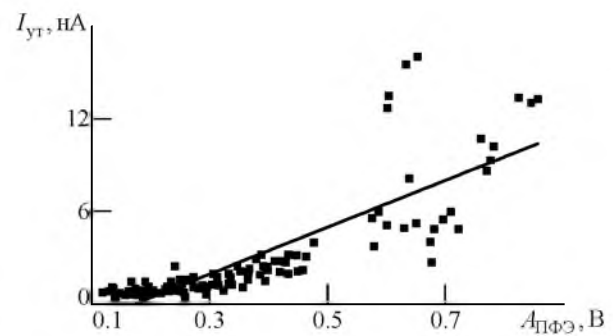


Рис. 7

Количественная оценка электрофизического состояния границы раздела "кремний–сапфир", полученная по методу ПФЭ, позволяет с большой точностью оптимизировать процесс эпитаксии КНС, тем самым получая структуры с улучшенным структурным качеством границы раздела. В соответствии с этим критерием оптимальный диапазон температуры роста для рассматриваемого процесса эпитаксии составляет 920...950 °С, при этом целесообразно использовать диапазон скорости роста 440...460 нм/мин.

Результаты рентгеноструктурного анализа показали корреляцию величины АС ПФЭ и толщи-

ны переходного слоя "кремний–сапфир". Это позволяет подтвердить реальную взаимосвязь между электрофизической характеристикой границы раздела, полученной по методу ПФЭ, и структурной характеристикой, полученной методом рентгеновской рефлектометрии.

Авторы статьи выражают благодарность коллективу ООО "Телеком-СТВ" и лично А. В. Алексееву за разработку измерительного оборудования и адаптацию метода ПФЭ для структур КНС.

Также благодарим А. А. Романова (АО "Ангстрем") за предоставленные данные измерений тестовых МОП-транзисторов на КНС-структурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Celler G. K., Cristoloveanu S. *Frontiers of Silicon-on-Insulator* // *J. of Appl. Phys.* 2003. Vol. 93. P. 4955–4978.
2. Heteroepitaxial Silicon Film Growth at 600 °C from an Al–Si Eutectic Melt / P. Chaudhari, H. Shim, B. A. Wacaser, M. C. Reuter, C. Murray, K. B. Reuter, J. Jordan-Sweet, F. M. Ross, S. Guha // *Thin Solid Films.* 2010. Vol. 518, iss. 19. P. 5368–5371.
3. Large Thickness-Dependent Improvement of Crystallographic Texture of CVD Silicon Films on r-Sapphire / M. Moyzykh, S. Samoilenkov, V. Amelichev, A. Vasiliev, A. Kaul // *J. of Crystal Growth.* 2013. Vol. 383. P. 145–150.
4. Colinge J. P. Thin film SOI technology: the solution for many submicron CMOS problems // *IEEE Int. Electron Devices Meeting. Washington: Technical Digest proceedings, 1989.* P. 817–820.
5. Advanced Thin-Film Silicon-on-Sapphire Technology: Microwave Circuit Applications / R. A. Johnson, P. R. de la Housaye, C. E. Chang, Pin-Fan Chen, M. E. Wood, G. A. Garcia, I. Lagnado, P. M. Asbeck // *IEEE Trans Electron Dev.* 1998. Vol. 45, iss. 5. P. 1047–1054.
6. Galchev T., Welch W. C., Najafi K. A New Low-Temperature High-Aspect-Ratio MEMS Process Using Plasma Activated Wafer Bonding // *J. Micromech. Microeng.* 2011. Vol. 21. P. 1–11.
7. Cristoloveanu S., Li Sh. *Electrical Characterization of Silicon-on-Insulator Materials and Devices* // *The Springer Int. Ser. in Engineering and Computer Science.* Vol. 305. New York: Springer, 1995. 381 p.
8. Бордовский П. А., Булдыгин А. Ф., Петухов Н. И. Контроль качества структур КНС СВЧ-методом // *Микроэлектроника.* 2008. Т. 37, № 2. С. 101–110.
9. *Implant Metrology for SOI Wafers Using a Surface Photovoltage Technique* / A. F. Bertuch, W. Smith, K. Steeples, R. Standley, A. Stefanescu, R. Johnson // *ECS Trans.* 2007. Vol. 6, iss. 4. P. 179–184.
10. Подшивалов В. Н. Определение диффузионной длины неосновных носителей заряда с использованием цифрового осциллографирования сигнала поверхностной фотоЭДС // *Микроэлектроника.* 2010. Т. 39, № 1. С. 38–45.
11. Применение методики поверхностной фотоЭДС для контроля качества кремниевых эпитаксиальных слоев на сапфире / А. Ф. Яремчук, А. В. Старков, А. В. Заикин, А. В. Алексеев, Е. М. Соколов // *Изв. вузов. Электроника.* 2013. Вып. 103, № 5. С. 14–19.
12. Козлов Ю. Ф., Зотов В. В. Структуры КНС: технология, свойства, методы контроля, применение. М.: Изд-во МГИЭТ, 2004, 137 с.
13. 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 Междунар. конф., Кисловодск–Ставрополь, 17–22 сент. 2006 г. / СевКавГТУ. Ставрополь, 2006.* С. 210–213.
14. Сидоров А. И., Сальников Л. А., Чумак В. Д. Исследование границы раздела кремний–сапфир структур КНС по измерению проводимости четырехзондовым методом с поперечным высоковольтным полем // *Электронная техника. Материалы.* 1985. Вып. 5 (204). С. 20–22.
15. Mechanism of H₂ Pre-annealing on the Growth of GaN on Sapphire by MOVPE / M. Tsuda, K. Watanabe, S. Kamiyama, H. Amano, I. Akasaki, R. Liu, A. Bell, F. A. Ponce // *App. Surface Science,* 2003, Vol. 216. P. 585–589.

Статья поступила в редакцию 28 июля 2017 г.

Для цитирования: Федотов С. Д., Тимошенко С. П., Соколов Е. М., Стаценко В. Н. Мониторинг структурного качества границы раздела "кремний–сапфир" методом поверхностной фотоЭДС // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника.* 2017. № 5. С. 54–63.

Федотов Сергей Дмитриевич – инженер (2014, Российский химико-технологический университет (РХТУ) им. Д. И. Менделеева) по специальности "Химическая технология монокристаллов, материалов и изделий электронной техники", аспирант Национального исследовательского университета "МИЭТ" (Москва, Зеленоград). Инженер-исследователь АО "ЭПИЭЛ" (Москва, Зеленоград). Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов – эпитаксия кремния на диэлектрических подложках; разработка процессов

формирования структур кремний на изоляторе, в частности, гетероэпитаксиальных структур кремний на сапфире, предназначенных для изготовления радиационно стойких схем, СВЧ-приборов и тензометрических датчиков; процессы формирования гетероструктур для силовой электроники.

E-mail: fedotov.s.d@yandex.ru

Тимошенко Сергей Петрович – доктор технических наук (2004), профессор (2007), заведующий кафедрой микроэлектроники факультета интеллектуальных технических систем Национального исследовательского университета МИЭТ (Москва, Зеленоград), лауреат премии Правительства РФ (2007). Автор 180 научных работ. Сфера научных интересов – изучение физико-химических процессов сращивания и формирования многослойных, сложнопрофильных структур для микроэлектроники и микросистемной техники, формирование структур кремний на изоляторе (КНИ), разработка технологии изготовления и сборки чувствительных элементов МЭМС.

E-mail: spt@micee.ru

Соколов Евгений Макарович – ведущий научный сотрудник АО "ЭПИЭЛ" (Москва, Зеленоград). Окончил Московский государственный университет (1975) по специальности "Химия". Автор более 90 научных работ. Сфера научных интересов – полупроводниковое материаловедение, в частности, технологии создания структур различного типа на основе кремния и его соединений, предназначенных для изготовления приборов и интегральных схем.

E-mail: se41@rambler.ru

Стаценко Владимир Николаевич – генеральный директор АО "ЭПИЭЛ" (Москва, Зеленоград). Окончил Московский институт электронной техники (МИЭТ) (1981) по специальности "Полупроводники и диэлектрики". Автор более 40 научных работ. Сфера научных интересов – проведение эпитаксиальных процессов, авто- и гетероэпитаксия полупроводниковых соединений, в т. ч. соединений "полупроводник на изоляторе", быстрые термические процессы.

E-mail: vstatsenko@epiel.ru

S. D. Fedotov, S. P. Timoshenkov
National Research University of Electronic Technology
E. M. Sokolov, V. N. Statsenko
Epiel JSC (Moscow, Zelenograd)

The Monitoring of Structural Quality of Silicon-Sapphire Interface by the Surface Photovoltage Method

Abstract. *Heteroepitaxial silicon-on-sapphire (SOS) wafers with a layer thickness of 200 and 600 nm were fabricated by the vapor phase epitaxy with monosilane as a precursor. The assessment of structural quality of silicon-sapphire interface was carried out by the surface photovoltage method (SPV) and X-ray reflectometry. Technological parameters of the manufacturing process that affecting to the amount of SPV signal were determined via SOS quality monitoring. We conclude that deposition temperature and the growth rate are most important process parameters in this cause. It was found that SPV method can be used as monitoring method of SOS fabrication process, because SPV signals are correlated with X-ray reflectometry results. Probably, SPV method allowed to evaluate the structural and electrophysical parameters of silicon-sapphire interface. SOS device performances as function of SPV signal were determined. The leakage current of test p-channel MOS transistor in the closed state was on 2-16 nA when SPV signal higher than 450 mV and the leakage current was approximately 4 nA when SPV signal lower than 450 mV.*

Keywords: Hetero epitaxial Structures, Gas Phase Epitaxis, Silicon on Sapphire, Silicon on Insulator, Interface, Surface Photo Voltage, Surface Potential

REFERENCES

1. Celler G. K., Cristoloveanu S. Frontiers of Silicon-on-Insulator. Journal of Appl. Phys. 2003, vol. 93, pp. 4955–4978.
2. Chaudhari P., Shim H., Wacaser B. A., Reuter M. C., Murray C., Reuter K. B., Jordan-Sweet J., Ross F. M., Guha S. Heteroepitaxial Silicon Film Growth at 600 °C from an Al-Si Eutectic Melt. Thin Solid Films. 2010, vol. 518, no. 19, pp. 5368–5371.
3. Moyzykh M., Samoilenkov S., Amelichev V., Vasiliiev A., Kaul Large A. Thickness-Dependent Improvement of Crystallographic Texture of CVD Silicon Films on r-Sapphire. Journal of Crystal Growth. 2013, vol. 383, pp. 145–150.
4. Colinge J. P. Thin film SOI technology: the solution for many submicron CMOS problems. IEEE Int. Electron Devices Meeting, Washington, Technical Digest proceedings, 1989, pp. 817–820.
5. Johnson R. A., de la Hous-saye P. R., Chang C. E., Pin-Fan Chen, Wood M. E., Garcia G. A., Lagnado I., Asbeck P. M. Advanced Thin-Film Silicon-on-Sapphire Technology: Microwave Circuit Applications. IEEE Trans Electron Dev. 1998, vol. 45, no. 5, pp. 1047–1054.
6. Galchev T., Welch W. C., Najafi K. A New Low-Temperature High-Aspect-Ratio MEMS Process Using Plasma Activated Wafer Bonding. Journal Micromech. Microeng, 2011, vol. 21, pp. 1–11.

7. Cristoloveanu S., Li Sh. Electrical Characterization of Silicon-on-Insulator Materials and Devices. The Springer Int. Ser. in Engineering and Computer Science. Vol. 305, New York, Springer, 1995, 381 p.

8. Bordovsky P. A., Bulygin A. F., Petukhov N. I. Quality Control of SOS Wafers by SHF Method. *Mikroelektronika* [Microelectronics]. 2008, vol. 37, no. 2, pp. 101–110. (In Russian)

9. Bertuch A. F., Smith W., Steeples K., Standley R., Stefanescu A., Johnson R. Implant Metrology for SOI Wafers Using a Surface Photovoltage Technique. *ECS Trans.* 2007, vol. 6, no. 4, pp. 179–184.

10. Podshivalov V. N. Determination of Diffusion Length of Minority Carriers by Digital Oscilloscope Surface Photovoltage Signal. *Mikroelektronika* [Microelectronics]. 2010, vol. 39, no. 1, pp. 38–45. (In Russian)

11. Yaremchuk A. F., Starkov A. V., Zaikin A. V., Alekseev A. V., Sokolov E. M. Application of the SPV Method for Quality Control of SOS Wafers. *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Electronics]. 2013, vol. 103, no. 5, pp. 14–19. (In Russian)

12. Kozlov Yu. F., Zotov V. V. *Struktury KNS – tekhnologiya, svoistva, metody konrolya, priminenie* [Silicon on Sapphire Wafers: Technology, Characteristics, Measurements, Application]. Moscow, MGIEI, 2004, 137 p.

13. Ignatov A. Yu., Postolov V. S., Filimonov A. S. The Influence of Technological Factors of the Process of Epitaxy on the Physical Properties of the Interface of the Silicon-Sapphire. Proc. of VI Int. conf. *Khimiya tverdogo tela i sovremennye mikro i nanotekhnologii* [Solid state chemistry and modern micro and nanotechnologies]. Kislovodsk – Stavropol, September 17–22, 2006, SevKavGTU, pp. 210–213.

14. Sidorov A. I., Salnikov L. A., Chumak V. D. Investigation of Silicon-Sapphire Interface of SOS Wafers by Four-Probe Method with Cross High Voltage. *Elektronnaya tekhnika. Materialy* [Electronic engineering. Materials]. 1985, vol. 5 (204), pp. 20–22.

15. Tsuda M., Watanabe K., Kamiyama S., Amano H., Akasaki I., Liu R., Bell A., Ponce F. A. Mechanism of H₂ Pre-annealing on the Growth of GaN on Sapphire by MOVPE. *App. Surface Science.* 2003, vol. 216, pp. 585–589.

Received July, 28, 2017

For citation: Fedotov S. D., Timoshenkov S. P., Sokolov E. M., Statsenko V. N. The monitoring of structural quality of silicon-sapphire interface by the surface photovoltage method. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2017, no. 5, pp. 54–63. (In Russian)

Sergey D. Fedotov – Dipl.-engineer on "Chemical technology of single crystals, materials and electronic devices" (2014, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia), postgraduate student of National Research University of Electronic Technology. Research engineer in Laboratory of analysis and development of technologies of EPIEL JSC (Moscow, Zelenograd). The author of 20 scientific publications. Area of expertise: epitaxy of silicon on dielectric substrates; development of the formation processes of SOI, heteroepitaxial structures of silicon on sapphire (SOS), intended for the manufacture of radiation hardened circuits, microwave devices and strain gauges; the processes of forming wafers for power electronics.

E-mail: fedotov.s.d@yandex.ru

Sergey P. Timoshenkov – D.Sc. in Engineering (2004), Professor (2007), the chief of the Department of Microelectronics of National Research University of Electronic Technology. Laureate of the Russian Federation Government award (2007). The author of 180 scientific publications. Area of expertise: study of physic-chemical processes of splicing and the formation of multi-layered, complex structures for microelectronics and Microsystem technology, the formation of silicon on insulator (SOI), development of technology of manufacture and Assembly of a MEMS sensor.

E-mail: spt@miec.ru

Evgeniy M. Sokolov – Dipl.-engineer on chemistry (1975, Moscow State University), leading researcher of the EPIEL JSC (Moscow, Zelenograd). The author of more than 90 scientific publications. Area of expertise: semiconductor materials science, in particular, the technology of creation of structures of various types based on silicon and its compounds, intended for the manufacture of devices and integrated circuits.

E-mail: se41@rambler.ru

Vladimir N. Statsenko – Dipl.-engineer (1981, Moscow Institute of Electronic Technology (MIET)), CEO of EPIEL JSC (Moscow, Zelenograd). The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: conducting epitaxial processes; homo- and heteroepitaxy semiconductor compounds, including compounds "semiconductor on insulator"; rapid thermal processes.

E-mail: vstatsenko@epiel.ru