

Применение имплантации ионов кремния для формирования структурно-совершенных слоев кремния на сапфире

© В.М. Воротынец[¶], Е.Л. Шолобов^{*¶}, В.А. Герасимов^{*}

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
603600 Нижний Новгород, Россия

^{*} Научно-производственный центр Научно-исследовательского института измерительных систем им. Ю.Е. Седакова,
603137 Нижний Новгород, Россия

(Получена 28 апреля 2011 г. Принята к печати 16 мая 2011 г.)

Приведены результаты исследований метода улучшения кристаллической структуры эпитаксиального слоя кремния на сапфировой подложке путем его предварительной аморфизации высокоэнергетическими ионами кремния и последующего восстановления (твердофазной рекристаллизации) до структурно-совершенного монокристаллического состояния. Проведен сравнительный анализ структурных и электрофизических параметров композиций „кремний на сапфире“ до и после твердофазной рекристаллизации.

1. Введение

Композиция кремний на сапфире (КНС) представляет собой достаточно сложную гетерофазную структуру, состоящую не только из монокристаллического слоя кремния и сапфировой подложки, но и переходного слоя кремния толщиной до 0.3 мкм на границе раздела, отличающегося по свойствам от монокристаллического, возникновение которого обусловлено различием физико-химических свойств кремния и сапфировой подложки. Переходной слой характеризуется наличием различных типов дефектов высокой концентрации (дислокации, механические напряжения, микродвойники, дефекты упаковки и др.), что значительно усложняет технологию получения качественных структур КНС, особенно с ультратонким (0.1–0.3 мкм) слоем Si, используемых для изготовления интегральных схем (ИС) с субмикронными (0.25 мкм и менее) нормами [1,2]. Наличие переходного слоя обуславливает ряд принципиальных проблем ИС на основе структур КНС — повышенные токи утечки, нестабильность характеристик под влиянием внешних воздействующих факторов. Несмотря на указанные недостатки, гетероструктуры КНС до сих пор не вытеснены с рынка специальной микроэлектроники структурами кремний-на-изоляторе (КНИ), являющимися их основным конкурентом, по следующим основным причинам:

– ИС на основе структур КНС с ультратонким приборным слоем обладают повышенной стойкостью к воздействию внешних дестабилизирующих факторов (термо-, баро-, ионизирующих);

– на основе структур КНС с ультратонким приборным слоем возможно изготовление цифровых СБИС, аналоговых СБИС СВЧ диапазона, оптоэлектронных схем, а также так называемых „систем-на-кристалле“, включающих в свой состав первичный аналоговый преобразователь (детектор) и цифровую схему обработки сигнала, изготовленные в едином технологическом цикле на одном кристалле [3].

Таким образом, значительный практический интерес представляет исследование возможности уменьшения дефектности приборного слоя кремния на сапфире для получения структур КНС с высококачественным структурно-совершенным ультратонким приборным слоем.

Основой технологии изготовления структур КНС с улучшенным качеством приборного слоя кремния служит процесс возвратной трансформации (твердофазной рекристаллизации) относительно толстого (как правило, не менее 0.3 мкм) эпитаксиального слоя кремния в ультратонкий (0.1 мкм) бездефектный слой, включающий следующие основные операции [4,5]:

– наращивание на сапфировой подложке максимально качественного исходного приборного слоя кремния толщиной 0.3 мкм;

– аморфизация высокоэнергетическими ионами кремния пограничного с сапфиром слоя кремния толщиной ~ 0.2 мкм. Выбор режимов ионной имплантации при этом обеспечивает сохранение верхней (~ 0.1 мкм) части эпитаксиальной пленки кремния максимально неповрежденной (монокристаллической), которая далее будет служить затравкой в процессе рекристаллизации аморфизированного слоя. Охлаждение сапфировой подложки во время имплантации ионов кремния до температуры менее 0°С препятствует диффузии Al в Si:

– твердофазная рекристаллизация сформированной аморфной прослойки в монокристаллический слой путем термообработки структуры в инертной среде при температурах 600–900°С с использованием верхнего неповрежденного слоя Si в качестве затравки:

– утонение рекристаллизованного приборного слоя до номинальной толщины 0.1 мкм путем его частичного окисления и последующего травливания образовавшегося оксида. Слой оксида при этом играет роль эффективного гетера остаточных дефектов.

Сформированная таким образом структура — ультратонкий кремний на сапфире (УТКНС) характеризуется минимальным содержанием кристаллических дефектов, максимальной однородностью, гладкостью и воспроиз-

[¶] E-mail: vlad@vorotyn.nnov.ru

^{¶¶} E-mail: achepele@niis.nnov.ru

Параметры структурного совершенства слоя кремния

	Суммарная ширина КДО, град	Ширина КДО от кристаллической части, град	Ширина КДО от аморфной части, град
До рекристаллизации (слой Si 0.3 мкм)	0.42	0.26	1.15
После рекристаллизации (слой Si 0.3 мкм)	0.26	0.17	0.4
После рекристаллизации и утонения (слой Si 0.1 мкм)	0.25	0.15	0.5

Примечание: КДО — кривые дифракционного отражения

водимостью толщины, минимальным уровнем автолегирования алюминием и другими примесями.

2. Методика эксперимента

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования возможности улучшения качества кристаллической структуры кремния в гетероструктурах КНС и создания структур КНС с ультратонким структурно-совершенным приборным слоем с использованием описанной технологии.

Имплантация высокоэнергетических ионов кремния проводилась на установке ионной имплантации „ИЛУ-100“ (Россия) с использованием приемника, охлаждаемого жидким азотом. Температура образцов в процессе облучения контролировалась термопарой и для предотвращения автолегирования кремния алюминием из сапфировой подложки в процессе имплантации поддерживалась ~ 130 К. Оптимальная энергия аморфизации (150 кэВ) была подобрана экспериментально и выбиралась из условия, чтобы максимум упруго выделенной энергии (и соответственно наибольшее количество смещенных атомов кремния) находился вблизи границы раздела „кремний–сапфир“ и, с другой стороны, чтобы радиационные повреждения на границе раздела не вызвали вторичных упругих волн в кремниевой пленке, приводящих к диффузии алюминия в эпитаксиальный слой. Доза варьировалась в широком диапазоне и был выбран оптимальный режим для толщины слоя кремния 0.3 мкм ($8 \cdot 10^{14}$ ат/см²). Для предотвращения радиационного повреждения поверхности кремния на ней перед имплантацией предварительно выращивался слой термического защитного оксида толщиной ~ 10 –15 мкм, который затем стравливался. После создания аморфной области вблизи границы раздела кремний/сапфир структуры КНС подвергались двухстадийному отжигу в атмосфере сухого азота: при температуре $T_1 \approx 550^\circ\text{C}$ в течение времени $t_1 = 30$ мин для активации процесса твердофазной рекристаллизации от поверхности монокристаллического кремния через аморфную область до границы с сапфировой подложкой, и, для завершения этого процесса, температуру отжига увеличивали до $T_2 \approx 1000^\circ\text{C}$ в течение времени $t_2 = 1$ ч для отжига остаточных дефектов. Отжиг образцов проводил-

ся в трехреакторной термической печи „СДОМУГ-9“ (Россия).

3. Экспериментальные результаты

Исследования кристаллической структуры слоя кремния проводились до и после твердофазной рекристаллизации методами рентгеновской спектроскопии, растровой электронной микроскопии и спектральной эллипсометрии.

Кривые дифракционного отражения (КДО), характеризующие структурное совершенство и степень кристалличности, снимались с использованием дифрактометра ДРОН-4 ($\text{CuK}\alpha_1$ -излучение, $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$, напряжение на трубке 30 кВ, ток 20 мА) по методике, описанной в работе [6]. В качестве монохроматора использовался Si(111). Энергетический пучок от рентгеновской трубки ограничивался блоком щелей, в которую входило 3 щели. Первая горизонтальная щель имела размер 100 мкм, ширина второй вертикальной щели, ограничивающей рентгеновский пучок по высоте, была 4 мм и третья горизонтальная щель, расположенная в непосредственной близости от исследуемого образца, имела размер 80 мкм. Размеры вертикальной (4 мм) и горизонтальной (80 мкм) щелей определяли размеры рабочей области (области дифракции) кристалла, которая составляла при записи отражения Si(400) примерно 1×4 мм. Режим съемки — шаговый, шаг сканирования 0.01 град., время экспозиции в точке 5". Погрешность измерения угловой величины 2θ составляла 0.01° .

На рис. 1 приведены типичные КДО исходной (со слоем Si 0.3 мкм), рекристаллизованной (со слоем Si 0.3 мкм) и рекристаллизованной и утоненной (со слоем Si 0.1 мкм) гетероструктуры КНС. Чтобы определить степень кристалличности кремниевого слоя КДО разделялась на две кривые, одна из которых соответствовала кристаллической, другая — аморфной фазе. Обработка КДО велась с помощью программы „Origin“. Результаты разделения типичной КДО от структуры КНС после рекристаллизации приведены на рис. 2. В таблице приведены данные по ширине (полуширина на полувысоте) КДО до и после процесса твердофазной рекристаллизации.

Из таблицы следует, что в результате твердофазной рекристаллизации ширина КДО снижается до значений,

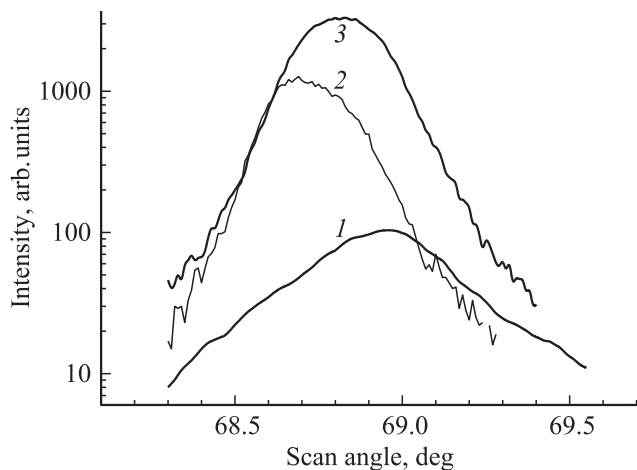


Рис. 1. Типичные кривые дифракционного отражения от слоя кремния на сапфире: 1 — исходная структура КНС — 0.3 мкм; 2 — рекристаллизованная и утоненная структура КНС — 0.1 мкм; 3 — рекристаллизованная структура КНС — 0.3 мкм.

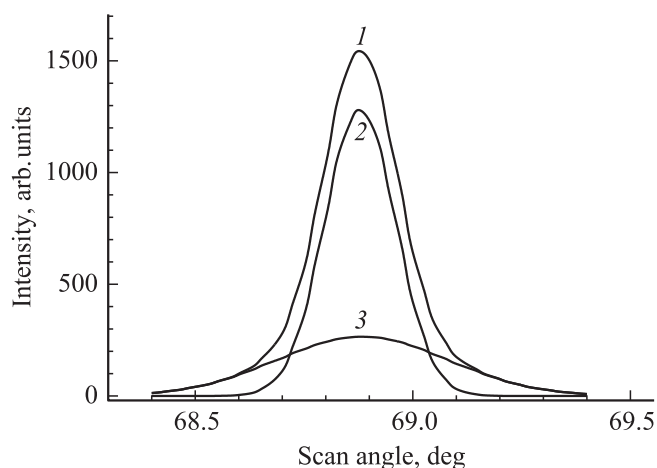


Рис. 2. Типичная кривая дифракционного отражения (КДО) рекристаллизованной гетероструктуры КНС: 1 — измеренная (суммарная) КДО; 2 — расчетная КДО от кристаллической части; 3 — расчетная КДО от аморфной части.

меньших ширины КДО у исходной структуры почти в 2 раза, на основании чего можно сделать вывод о существенном улучшении качества кристаллической структуры приборного слоя после проведенных обработок. Утонение кремния до 0.1 мкм не привело к изменению значения ширины КДО, что свидетельствует о высоком качестве и однородности рекристаллизованного слоя Si по всей толщине.

Исследование оптических параметров слоя кремния на сапфире проводилось с помощью автоматического спектрального эллипсометра-фотометра с целью оценки толщины Si, степени его кристалличности, распределения дефектных комплексов по глубине (после аморфизации, рекристаллизации и утонения) [7].

Использованный в работе эллипсометр-фотометр позволяет проводить измерения толщин (от 0 до 30 мкм) и оптических характеристик (коэффициентов отражения, преломления и поглощения) многослойных тонкопленочных структур: до 7 комбинационных слоев Si, Si^α (аморфный Si), легированный Si^α, Si* (поликристаллический Si), SiO₂, PyroOx (пиролитический оксид), Si₃N₄, Ti, TiN, OxyNitrid, Resist, BPSG (боро-, фосфоро-силикатное стекло), TEOS (тетра-этил-орто-силикат) и других. Входящий в состав системы спектральный эллипсометр предназначен для прецизионного измерения параметров тонких пленок (от 0 до 4000 Å), спектральный фотометр — для измерения параметров более толстых пленок (от 50 Å до 30 мкм).

Анализ эллипсометрических спектров показал, что на границе раздела кремний/сапфир у структур КНС с рекристаллизованным слоем кремния присутствует поликристаллическая фаза кремния толщиной ~ 0–50 нм, тогда как у исходных структур КНС переходный слой кремния характеризуется значительно более высоким кристаллографическим качеством, в том числе из-за отсутствия примесно-дефектных комплексов, изменяющих оптические свойства пленки кремния.

Исследование структур КНС с утоненным до 0.1 мкм приборным слоем (утонение кремния проходило в окислительной атмосфере в две стадии — при температуре 550°C в течение 30 мин и при температуре 1000°C в течение 1 ч) показало, что в данном случае приборный слой представляет собой в основном монокристаллический кремний, толщина которого составляет $d \approx 100–120$ нм с прослойкой поликристаллического кремния толщиной 0–50 нм.

Исследование границы раздела гетероструктуры КНС также проводилось с использованием растрового электронного микроскопа, позволяющего получать изображение в отраженных и вторичных электронах с ускоряющим напряжением до 30 кэВ, увеличением до $8 \cdot 10^5$ крат и разрешением до ~ 1.5 нм. На рис. 3 приведена типичная РЭМ-микрофотография поперечного сечения структуры КНС с приборным слоем 0.3 мкм.

Как видно из рисунка, вблизи границы раздела кремний/сапфир наблюдается наличие большого количества структурных нарушений в виде дислокаций, хорошо выявляемых на РЭМ-изображении за счет эффектов зарядки электронным пучком. Данные дислокации локализованы в основном на расстоянии до 200 нм от границы,

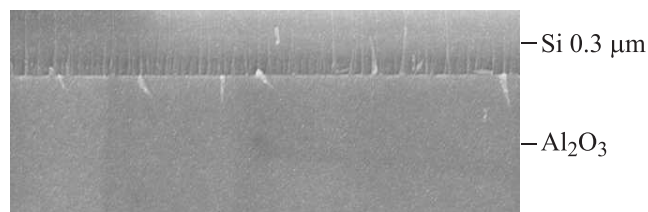


Рис. 3. РЭМ-микрофотография поперечного сечения гетероструктуры КНС.

однако некоторые из них выходят на поверхность кремния. После проведения твердофазной рекристаллизации по описанной выше технологии толщина дефектной области уменьшалась до ~ 50 нм, что хорошо согласуется с данными эллипсометрических и рентгеновских исследований и свидетельствует о существенном уменьшении кристаллографических дефектов вблизи границы раздела кремний/сапфир.

Для изучения влияния рекристаллизации приборного слоя кремния на электрофизические параметры структур КНС проводились комплексные исследования специальных тестовых структур (ТС) [8], сформированных на структурах КНС до и после процесса рекристаллизации. В состав ТС входил набор структур для контроля электрофизических параметров и параметров дефектности низколегированных слоев „*p*-карман“ и „*n*-карман“, а также высоколегированных слоев „*n*⁺-стоки–истоки“ и „*p*⁺-стоки–истоки“ (тест Холла, тест фотоэдс, *C–V*-тест, тест Ван-дер-Пау, тестовые транзисторы, области *n*- и *p*-карманов и др.).

Для вычисления профилей распределения дырок в области *p*-кармана структур КНС измерялись неравновесные вольт-фарадные характеристики тестовых конденсаторов. Расчетные значения слоевой концентрации и слоевой подвижности основных носителей тока в слое „*p*-карман“, полученные из результатов измерений тестовых фоторезисторов, для отдельных образцов проверялись с помощью холловских измерений.

Для оценки концентрации глубоких состояний в структуре использовалось сравнение результатов измерения слоевой концентрации основных носителей тока, проведенных в темноте и при возбуждении образца излучением мощного белого светодиода.

Величина удельного слоевого сопротивления структуры определялась путем измерения сопротивления тестового фоторезистора или из холловских измерений. Величина удельной слоевой концентрации носителей тока определялась из результатов измерений вольт-фарадных характеристик тестового МОП-конденсатора.

В результате исследований были установлены характер и степень влияния рекристаллизации приборного слоя КНС структур на электрофизические параметры и параметры дефектности. Так, структуры КНС после рекристаллизации имели существенно более высокую подвижность основных носителей заряда ($300–700$ см²/(В·с) для электронов и $150–200$ см²/(В·с) для дырок) в слоях „*p*-карман“ и „*n*-карман“ транзисторных структур по сравнению с исходными структурами ($20–100$ см²/(В·с) для электронов и дырок). Эта закономерность сохранялась даже при сильном (почти в 4 раза) изменении концентрации дырок.

Исследования тестовых транзисторов показали, что в результате рекристаллизации на порядок уменьшался ток потребления (от ~ 1.0 до ~ 0.1 мкА), на 2 порядка уменьшался ток утечки (от ~ 0.1 до ~ 0.001 мкА) и в 2 раза возрастала крутизна (dU/dI) транзистора.

Дополнительно исследовалось влияние рекристаллизации приборного слоя кремния на процент выхода годных кристаллов ИС, который оценивался на основе данных контроля функционирования и измерений статических параметров типовых тестовых ИС. Было обнаружено, что на структурах КНС с рекристаллизированным приборным слоем процент выхода годных составлял $\sim 60\%$ против $\sim 20\%$ на стандартных структурах без рекристаллизации.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии структурного качества эпитаксиального слоя кремния в структурах КНС на параметры изготавливаемых ИС. Улучшение кристалличности приборного слоя для структур КНС в результате рекристаллизации и уменьшение его дефектности приводит к существенному улучшению электрофизических параметров и повышению процента выхода годных кристаллов ИС.

4. Заключение

Экспериментально установлена возможность существенного улучшения и оптимизации кристаллографических и электрофизических параметров структур КНС за счет снижения плотности дефектов кристаллической решетки кремния вблизи границы раздела с сапфиром путем предварительной аморфизации эпитаксиальной пленки кремния методом ионной имплантации кремния с последующей твердофазной рекристаллизацией при высокой температуре с использованием верхнего, максимально качественного, слоя кремния в качестве затравки. Электрофизические параметры микросхем, сформированных на структурах КНС, в значительной степени определяются особенностями дефектных областей вблизи границы раздела кремний/сапфир. Существенное снижение плотности дефектов в результате рекристаллизации позволяет значительно улучшить электрофизические параметры и повысить процент выхода годных микросхем, изготавливаемых на основе таких структур КНС.

Список литературы

- [1] T. Nakamura, H. Matsushashi, Y. Nagatomo. *Oki Technical Rev.*, **71** (4), 66 (2004).
- [2] M.E. Twigg, E.D. Richmond. *J. Appl. Phys.*, **64**(6), 3037 (1988).
- [3] А.С. Адонин. *Электронные компоненты*, **3**, 40 (2000).
- [4] M.L. Burgener, R.E. Reedy. *U.S. Pat.*, 5.416.043 (1995).
- [5] T. Nakamura, H. Kobayashi, T. Takahashi, T. Inada. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, **7** (8), 275 (1985).
- [6] С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. *Рентгенографический и электронно-оптический анализ* (М., МИСИС, 1994) гл. 3, с. 147.
- [7] В.К. Громов. *Введение в эллипсометрию* (Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1986) гл. 6, с. 235.
- [8] E.S. Meieran, P.A. Flinn, J.R. Carruthers. *Proc. IEEE*, **75** (7), 68 (1987).

Редактор Т.А. Полянская

Silicon ion implantation application for generating structural perfect silicon layers on sapphire

V.M. Vorotyntsev, E.L. Shobolov, V.A. Gerasimov**

Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University,
603600 Nizhny Novgorod, Russia

* Science-and-Production Center,
Sedakov Measuring Systems Research Institute,
603137 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract There are given research results of crystal structure improvement of silicon on sapphire (SOS) epitaxial layer by force of high-energy silicon ions preliminary amorphization and further recovery (solid-phase recrystallization) up to structurally perfect monocrystalline state. There was carried out the comparative analysis of SOS composition structural and electrophysical parameters prior and after solid-phase recrystallization.