

Исследование рекристаллизации КНС-структур при разных энергиях аморфизирующего пучка ионов

© П.А. Александров[¶], К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия

(Получена 6 августа 2012 г. Принята к печати 13 августа 2012 г.)

Кремниевые пленки на сапфировой подложке были получены с помощью рекристаллизации с границы раздела кремний–сапфир. Аморфный слой формировался при помощи ионной имплантации с энергией ионов кремния 90–150 кэВ. Рентгеновская кривая качания использовалась для оценки кристаллического совершенства кремниевых пленок. После рекристаллизации кремниевый слой состоял из двух частей с разным структурным качеством. Рекристаллизованные структуры кремний на сапфире имеют высокосовершенный верхний слой (для производства приборов микроэлектроники) и нижний слой с большим количеством дефектов, прилегающий к сапфировой подложке.

1. Введение

Современное развитие микро- и нанoeлектроники приводит к широкому использованию в качестве подложек для создания электронных схем структур кремний на изоляторе (КНИ), к числу которых относятся и гетероэпитаксиальные пленки кремний на сапфире (КНС). Однако высокая концентрация дислокаций, микродвойников и других кристаллических несовершенств в эпитаксиальном кремниевом слое, особенно вблизи границы раздела кремний–сапфир, при проведении эпитаксии из газовой фазы требуют привлечения дополнительных методов для улучшения структуры кремниевого слоя.

Применение процесса твердофазной рекристаллизации (ТФР) является одним из таких методов. На первом этапе проводится аморфизация (как правило, имплантацией ионов кремния) эпитаксиального слоя, за исключением небольшой приповерхностной его части, которая в дальнейшем используется в качестве затравки процесса ТФР при последующем температурном отжиге [1–3]. Последние наши исследования, представленные к публикации, свидетельствуют о том, что высококачественные пленки Si можно получить при проведении ТФР с границы раздела кремний–сапфир [4]. При аморфизации эпитаксиальной КНС-структуры ионами кремния (энергия имплантации 150 кэВ, доза — $7.5 \cdot 10^{14} \text{ Si}^+ / \text{cm}^2$, температура имплантации около 0°C) и при последующих рекристаллизации (550°C — 0.5 ч) и отжиге (1000°C — 1 ч) наблюдается минимальная дефектность кремниевого слоя (ширина рентгеновской кривой качания FWHM уменьшается от значений $\sim 1400\text{--}1500''$ в исходных эпитаксиальных структурах до $\sim 550\text{--}600''$ в рекристаллизованных образцах).

Пластины КНС диаметром 100 мм были аморфизированы нами при приведенных выше параметрах (а не так, как указано в работе [5]) и переданы в НИИИС (г. Н. Новгород) для проведения рекристаллизации и создания тестовых структур. Хотя авторы не смогли получить структуры такого же качества, как у нас, но все

равно они наблюдают значительное улучшение электрофизических параметров тестовых микросхем (подвижность электронов возросла до $300\text{--}700 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{c})$ с исходных $20\text{--}100 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{c})$, на порядок уменьшается ток потребления, на 2 порядка уменьшился ток утечки, в 3 раза вырос процент выхода годных микросхем и т.д.).

Однако последние наши исследования, а также исследования, проведенные за рубежом, показывают, что улучшение структурного качества эпитаксиальной пленки ведет к значительному снижению радиационной стойкости микросхем — одному из важнейших свойств КНС-структур [6,7]. С другой стороны, использование ТФР с границы раздела позволяет получать кремниевые пленки с резко различающейся дефектностью по толщине. Вырвирование толщины затравочного слоя в широких пределах приводит к тому, что аморфизация и соответственно рекристаллизация происходят только в верхней части эпитаксиальной пленки. При этом остается слой, прилегающий к границе раздела кремний–сапфир, практически не подвергнутый ионному воздействию, слой, низкое структурное качество которого и соответственно возникающие токи утечки в значительной мере уменьшают радиационное воздействие. В то же время улучшение структурного качества в верхней части эпитаксиального кремниевого слоя позволяет улучшить электрические характеристики микросхем. Таким образом, подобные структуры КНС, с совершенным приборным слоем и относительно дефектным слоем, прилегающим к сапфировой подложке, несомненно, представляют интерес.

В данной работе предложен оригинальный метод и исследована по глубине дефектность кремниевого слоя, получившего при ТФР с границы раздела кремний–сапфир при разных толщинах „затравочного“ слоя.

2. Методика эксперимента

Аморфизация пластин КНС диаметром 100 мм проводилась на установке ИЛУ-100. Энергия имплантации ионов кремния менялась от 90 до 150 кэВ при сохранении дозы имплантации $\sim 7.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. Прочие

[¶] E-mail: alexsandrov.peter@kiae.ru

параметры имплантации и рекристаллизации указаны во Введении. Дефектность рекристаллизованного кремниевого слоя измерялась методом двухкristальной брэгговской дифракции. Длина волны рентгеновского излучения 1.54 Å. Поскольку при данной длине волны величина экстинкции значительно превышает толщину кремниевого слоя, ширина рентгеновской кривой качания является интегральной характеристикой всего слоя.

Для исследования структуры Si-пленки по глубине авторами предложен метод последовательной аморфизации с поверхности с одновременными рентгеновскими измерениями. Поскольку аморфный материал не влияет на рентгеноструктурные измерения, то при последовательной аморфизации с поверхности исследуемого образца ширина рентгеновской кривой качания FWHM характеризует качество остающейся кремниевой пленки, а интегральная интенсивность (площадь под кривой качания) определяет толщину кристаллического слоя рекристаллизованных КНС-структур. Аморфизация рекристаллизованных КНС-структур также проводилась имплантацией ионов кремния. Первоначальная энергия имплантации 50 кэВ. Доза имплантации — $7.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. На поверхности рекристаллизованной пленки образовывался аморфный слой толщиной $\sim 1000 \text{ Å}$. Для увеличения резкости границы раздела кристалл–(аморфный материал) и для уменьшения влияния переходного слоя на структурные параметры образец подвергался кратковременному низкотемпературному отжигу ($450^\circ \text{ — 1 мин}$). Рентгеновские измерения определяли качество и количество оставшегося монокристаллического кремниевого слоя. На следующем этапе энергия имплантации увеличивалась, и все операции повторялись.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены интегральные характеристики качества кремниевого слоя КНС-структур после проведения процесса ТФР. Первый этап процесса (аморфизация Si-слоя) проведен различными энергиями (90–150 кэВ) соответствует минимальной дефектности кремниевого слоя рекристаллизованной КНС-структуры и соответственно практически полной аморфизации эпитаксиального слоя на первом этапе ТФР. Уменьшение энергии аморфизации приводит к одновременно уменьшению толщины аморфизированного слоя и смещению его к поверхности. При этом все большая часть кремниевой пленки, прилегающая к сапфировой подложке, не подвергается воздействию ионного пучка. На приведенном рисунке уменьшение энергии аморфизации сопровождается одновременным увеличением значений FWHM. Однако даже для энергии аморфизации 90 кэВ наблюдается значительное улучшение интегральных величин FWHM (до 800"), что свидетельствует о возможных улучшениях структуры и в первоначально неаморфизированных областях кремниевой пленки при проведении ТФР.

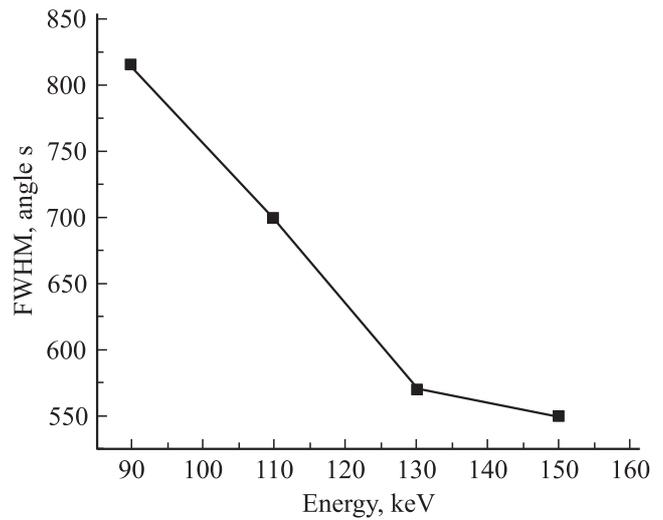


Рис. 1. Зависимость ширины кривой качания рентгеновской дифракции (FWHM) кремниевого слоя КНС-структуры рекристаллизованных образцов от первоначальной энергии аморфизации.

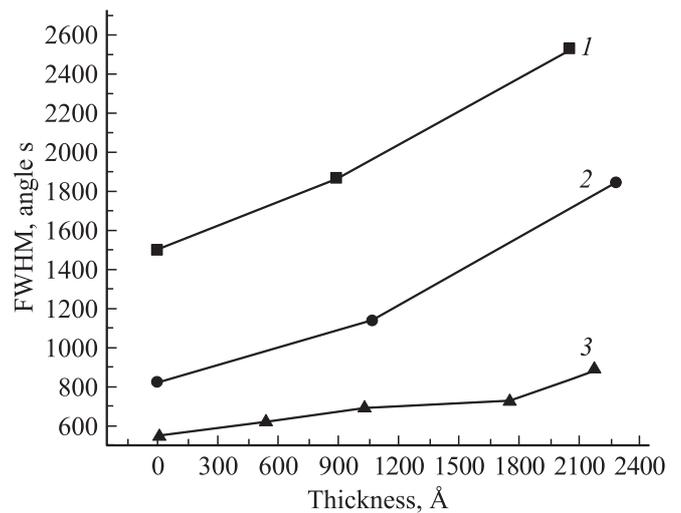


Рис. 2. Дефектность рекристаллизованной кремниевой пленки КНС-структуры по толщине при различных первоначальных энергиях аморфизации, кэВ: 1 — 0 (исходный эпитаксиальный слой), 2 — 90, 3 — 150. Толщина кремниевого слоя $\sim 3000 \text{ Å}$. Нулевая толщина соответствует поверхности Si-пленки.

На рис. 2 приведено исследование структуры кремниевой пленки по глубине по описанной выше методике. Исследования проведены для 3 образцов: эпитаксиального Si-слоя и двух рекристаллизованных образцов с энергиями аморфизации 90 и 150 кэВ на первом этапе ТФР. В последнем случае аморфизировался практически весь эпитаксиальный слой, а при энергии 90 кэВ $\sim 2000 \text{ Å}$.

Как и следовало ожидать, исследования показали чрезвычайно плохое качество эпитаксиальной пленки по сравнению с рекристаллизованными образцами. FWHM 1000 Å Si-слоя, прилегающего к сапфировой подложке,

составляет 2500". Это подтверждает невозможность использования эпитаксиальных пленок с толщиной менее 3000 Å в микроэлектронике. Огромные изменения в структуре рекристаллизованного образца 1 (энергия аморфизации 150 кэВ) на этом фоне демонстрируют все преимущества процесса ТФР. Образуется малодефектный (600–800"), практически по всей глубине, кремниевый слой. Как уже упоминалось выше, огромные преимущества использования подобной структуры (с последующим утонением, уменьшением размера микросхем, увеличением плотности упаковки и быстродействия и т.д.) наталкиваются на серьезное препятствие в виде малой радиационной стойкости.

В рекристаллизованном образце 2 структурные изменения происходят не только первоначально в аморфизованном слое (~ 200 Å от поверхности образца), но и в слое, прилегающем к сапфировой подложке (~ 1000 Å), не подвергавшемся воздействию ионов. Перераспределение напряжений в пленке, диффузионные и аннигиляционные процессы, протекающие при рекристаллизации должны приводить к некоторому улучшению структуры слоя, хотя первоначально он и не подвергался аморфизации. Образец 2 имеет очень неоднородный по качеству структуры кремниевый слой: высококачественный поверхностный и сильно дефектный, прилегающий к сапфировой подложке. Если с первым слоем связаны значительные улучшения электрических характеристик микросхем, то токи утечки, связанные со вторым слоем, несколько ухудшают их, однако увеличивают радиационную стойкость. Такая компромиссная структура позволяет сохранить радиационную стойкость при значительном улучшении многих параметров электрических микросхем.

4. Заключение

Представленные результаты говорят о том, что оптимизация параметров процесса ТФР позволяет получать КНС-структуры со значительно лучшими электрофизическими характеристиками при сохранении их радиационной стойкости.

Авторы выражают благодарность П.Р. Машевичу и А.А. Романову (ОАО „Ангстрем“) за полезные обсуждения, изготовление тестовых структур и проведение их измерений.

Список литературы

- [1] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов. Нано- и микросистемная техника, **3**, 54 (2008).
- [2] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов. ФТП, **43** (5), 627 (2009).
- [3] M.L. Burgener, R.E. Reedy. United States Patent, No 5 416 043 (1995).
- [4] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов. ФТП, **44** (10), 1433 (2010).

- [5] В.М. Воротынцева, Е.Л. Шоболов, В.А. Герасимов. ФТП, **45** (12), 1662 (2011).
- [6] T. Liu et al. *Proc. 9th Eur. Conf. Radiation and its Effects on Components and Systems* (Deauville, France, 2007) p. 11.
- [7] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов. Патент РФ, № 2427941 (2011).

Редактор Т.А. Полянская

The different energy amorphized bunch of ions for research recrystallization SOS structure

P.A. Alexandrov, K.D. Demakov, S.G. Shemardov, Yu.Yu. Kuznetsov

National Research Centre „Kurchatov Institute“,
123182 Moscow, Russia

Abstract Silicon films of sapphire substrates have been produced using recrystallization from the silicon-sapphire interface. An amorphous layer was formed by implantation of low energy silicon ions (90–150 keV). X-ray rocking curve was used to evaluate the crystalline quality of the silicon film. After recrystallization silicon layer consist of the two parts with different crystalline quality. Recrystallized SOS structures have a high quality upper silicon layer (where microelectronic devices may be produced) and lower silicon layer with many defects.