

Рекристаллизация с границы раздела кремний–сапфир как новый метод получения структурно совершенных пленок кремния на сапфировой подложке

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

Российский научный центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия

(Получена 1 марта 2010 г. Принята к печати 15 марта 2010 г.)

Использование процесса твердофазной рекристаллизации в значительной степени уменьшает количество дефектов в кремниевом слое. Аморфный слой создавался имплантацией ионов кремния. Кристаллическое качество КНС-структур оценивалось методом высокоразрешающей двухкристальной рентгеновской дифракции. Высококачественные кремниевые слои с толщиной $d = 1000\text{--}2500 \text{ \AA}$ получались после имплантации ионов кремния (с энергией 150 кэВ) и последующего высокотемпературного отжига.

1. Введение

Структуры кремний на сапфире (КНС), получаемые эпитаксиальным осаждением из газовой фазы, уже длительное время выпускаются промышленным способом. Однако качество кремниевого слоя, содержащего большое количество дефектов, резко уменьшает использование КНС-структур, несмотря на их очевидные достоинства при создании высокочастотных, радиационно- и термостойких электронных приборов. Применяемые усовершенствования метода эпитаксиального осаждения не могут кардинально улучшить качество кремниевого слоя из-за физических свойств используемых материалов (разница в размерах кристаллических решеток и коэффициентах термического расширения кремния и сапфира, „островковый“ рост на начальной стадии эпитаксиального осаждения, образование алюмосиликатов и автолегирование приборного слоя алюминием и т.д.). Поэтому остается вопрос улучшения эпитаксиальных КНС-структур. Для этих целей используются различные методы [1–3], среди которых наибольшее распространение и практическое применение нашел метод твердофазной рекристаллизации [4–10]. Поскольку наиболее дефектная область эпитаксиального кремниевого слоя расположена вблизи границы раздела кремний–сапфир, то практически во всех работах на первом этапе проводят ее аморфизацию имплантацией, как правило, ионами кремния. При этом менее дефектная поверхностная область эпитаксиального слоя остается слабо поврежденной и служит „затравкой“ при последующей низкотемпературной рекристаллизации (обычно 550–600°C). Последний этап — высокотемпературный отжиг (как правило, 900–1000°C). Проведение последнего этапа в окислительной среде позволяет получить высококачественные сверхтонкие пленки кремния на сапфире [11].

В данной работе представлены результаты по улучшению структуры эпитаксиального Si-слоя при проведе-

нии твердофазной рекристаллизации с границы раздела кремний–сапфир.

2. Методика эксперимента

Образцы КНС-структуры с толщиной эпитаксиального слоя $\sim 3000 \text{ \AA}$ аморфизировались ионами кремния на установке ИЛУ-100 [9]. Энергия имплантации 150 кэВ. Температура поверхности держателя образцов поддерживалась около 0°C в процессе облучения. Плотность тока $\sim 0.25 \text{ мкА/см}^2$. Отжиг аморфизированных образцов производился в атмосфере азота. Низкотемпературный отжиг: 550°C, 0.5 ч. Высокотемпературный отжиг: 1000°C, 1 ч. Скорость нагрева 10 град./мин. Оценка кристаллического совершенства эпитаксиального слоя КНС-структур проводилась методом высокоразрешающей двухкристальной рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-3М. Ширина рентгеновской кривой качания (FWHM) характеризовала среднее по глубине качество структуры кремниевого слоя. FWHM исходных эпитаксиальных структур $\sim 1400''$.

3. Экспериментальные результаты

На рисунке представлены результаты исследования структуры кремниевого слоя рекристаллизованных образцов в зависимости от дозы первоначальной аморфизации. Как видно из рисунка, имеется значительный дозовый интервал $D = (5\text{--}9) \cdot 10^{14} \text{ Si}^+/\text{см}^2$, в котором качество структуры рекристаллизованных образцов довольно близко друг к другу, и значения FWHM достигают минимума (550–650''). Увеличение дозы аморфизации свыше $10^{15} \text{ Si}^+/\text{см}^2$ ухудшает структуру рекристаллизованного кремниевого слоя вследствие расширения зоны аморфизации и отсутствия качественного затравочного материала. Увеличение значений FWHM при дозах аморфизации, меньших $5 \cdot 10^{14} \text{ Si}^+/\text{см}^2$, происходит из-за „утонения“ аморфного слоя и образования поверхностной неаморфизированной области. После

[¶] E-mail: aleksandrov.peter@kiaec.ru

^{¶¶} E-mail: kuznetsov.yuri@kiaec.ru

Таблица 1. Сравнение рекристаллизованных КНС-структур для случаев поли- и моноэнергетической имплантации

Первичная имплантация		Вторичная имплантация		Отжиг	FWHM
Доза, Si^+/cm^2	Энергия, кэВ	Доза, Si^+/cm^2	Энергия, кэВ		
$5 \cdot 10^{14}$	150	10^{15}	75	550°C, 0.5 ч + 1000°C, 1 ч – " –	550''
$5 \cdot 10^{14}$	150	–	–		650''

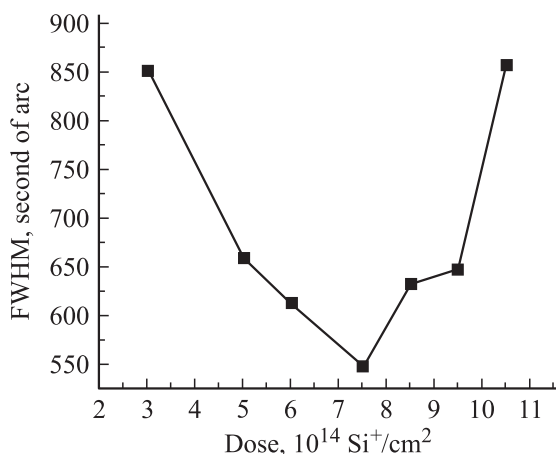
Таблица 2. Результат и параметры процесса твердофазной рекристаллизации для КНС-структуры с эпитаксиальным кремниевым слоем толщиной 2000 Å

Подложка	Энергия имплантации, кэВ	Доза, Si^+/cm^2	Отжиг	FWHM
Si(2000 Å)/Al ₂ O ₃	150	$7.5 \cdot 10^{14}$	550°C, 0.5 ч + 1000°C, 1 ч	7800''

Таблица 3. Результаты и параметры процесса твердофазной рекристаллизации при отжиге в окислительной среде

Условия аморфизации		Отжиг в окислительной среде	Толщина оставшегося Si-слоя, Å	FWHM
Энергия, кэВ	Доза, Si^+/cm^2			
150	$6 \cdot 10^{14}$	550°C, 0.5 ч + 1000°C, 1 ч – " –	950	635''
150	$9 \cdot 10^{14}$			615''

проведения процесса твердофазной рекристаллизации это приводит к ухудшению качества конечной структуры. Данный вывод подтверждают результаты, приведенные в табл. 1. После проведения двойной имплантации [$5 \cdot 10^{14} \text{Si}^+/\text{cm}^2$ (150 кэВ) + $10^{15} \text{Si}^+/\text{cm}^2$ (75 кэВ)] FWHM рекристаллизованного образца (550'') соответствует лучшим результатам, что объясняется уничтожением приповерхностной кристаллической области в



Зависимость ширины кривой качания рентгеновской дифракции (FWHM) эпитаксиального кремниевого слоя КНС-структуры после проведения процесса твердофазной рекристаллизации (550°C, 0.5 ч + 1000°C, 1 ч) от дозы аморфизации при имплантации ионов кремния с энергией 150 кэВ. Толщина эпитаксиального слоя составляет 3000 Å.

процессе дополнительной низкоэнергетической (75 кэВ) имплантации. Таким образом, в случае имплантации дозы $5 \cdot 10^{14} \text{Si}^+/\text{cm}^2$ существует приповерхностная область более дефектная, чем рекристаллизованный материал, и сам процесс рекристаллизации должен идти и с поверхности кремниевой пленки, и с границы раздела кремний–сапфир, что приводит к дефектности рекристаллизованного слоя в месте встречи фронтов рекристаллизации. В то же время для дозы $7.5 \cdot 10^{14} \text{Si}^+/\text{cm}^2$ (см. рисунок) при имплантации в структуру с толщиной эпитаксиального слоя 3000 Å достигается минимальное значение FWHM (550''), согласно табл. 2 после имплантации в кремниевый слой толщиной 2000 Å рекристаллизация не наблюдается (так как $\text{FWHM} = 7800''$), что свидетельствует об отсутствии затравочного материала в последнем случае. Таким образом, при наших условиях аморфизации, после проведения температурной обработки рекристаллизация протекает только с границы раздела для доз имплантации, больших $7.5 \cdot 10^{14} \text{Si}^+/\text{cm}^2$.

Рекристаллизация с границы раздела позволяет получать также высококачественные пленки ультратонкого кремния на сапфире (в английской аббревиатуре UTSi). В этом случае отжиг производился во влажном кислороде (табл. 3). Соотношения концентрации водяного пара и кислорода подбирались таким образом, чтобы в течение стандартной процедуры (1 ч при температуре 1000°C) произошло окисление $\sim 2000 \text{Å Si}$. Как видно из табл. 3, качество структуры оставшегося кремниевого слоя ($\sim 1000 \text{Å}$) практически такое же, как и при толщине Si-слоя 3000 Å.

4. Обсуждение результатов

Небольшая мощность ионного пучка (меньше 0.02 Вт/см²) и поддержание температуры внешней стенки держателя образцов в процессе имплантации около 0°С приводят к тому, что процесс аморфизации происходит при относительно низких температурах и образуется широкая аморфная область, позволяющая при относительно невысоких энергиях имплантации (обычно в случае кремниевого слоя толщиной 3000 Å используется энергия $E = 190\text{--}200$ кэВ) и при стандартных дозах производить практически полную аморфизацию эпитаксиального слоя. При имплантации (150 кэВ, $D \geq 7.5 \cdot 10^4$ Si⁺/см²) „загрывочный“ монокристаллический Si-слой остается вблизи границы раздела кремний–сапфир и рекристаллизация протекает „снизу“.

Высококачественные рекристаллизованные пленки кремния можно получить и при использовании поли-энергетической аморфизации (табл. 1). При этом можно значительно уменьшить дозу высокоэнергетической имплантации. Незначительность величины загрывочного слоя (100–200 Å) и его улучшение под влиянием растущего эпитаксиального слоя позволяет получать структурно совершенные пленки толщиной 3000 и 1000 Å. Дополнительным преимуществом предложенного метода является отсутствие повреждений в сапфировой подложке и отсутствие дополнительной диффузии алюминия в приборный слой при высокотемпературном отжиге, что происходит при обычно используемых режимах аморфизации [5].

5. Заключение

Использование рекристаллизации с границы раздела кремний–сапфир позволяет получить структурно совершенные кремниевые пленки толщиной $d = 1000\text{--}3000$ Å на сапфировой подложке.

Список литературы

- [1] K. Tanno, M. Kanamori. *J. Cryst. Growth*, **58**, 73 (1982).
- [2] H.Y. Cho, C.J. Park. *Physica E*, **16**, 489 (2003).
- [3] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов. *Нано- и микросистемная техника*, **9**, 30 (2009).
- [4] S.S. Lau, J.W. Mayer, T.W. Sigmon. USA Patent, No 4 177 084 (1979).
- [5] I. Golecki. USA Patent No 4 588 447 (1986).
- [6] R.E. Reedy, T.W. Sigmon, L.A. Christel. *Appl. Phys. Lett.*, **42**(8), 707 (1983).
- [7] T. Inoue, T. Yoshii. *Nucl. Instrum. Meth.*, **182/183**, 683 (1981).
- [8] T. Nakamura, Y. Nagatomo. *Oki Techn. Rev.*, **74**(4), 66 (2004).
- [9] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов. *Нано- и микросистемная техника*, **3**, 54 (2008).
- [10] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов. *ФТП*, **43**(5), 627 (2009).

- [11] M.L. Burgener, R.E. Reedy. USA Patent, No 5 416 043 (1995).

Редактор Т.А. Полянская

Cristalline quality improvement of silicon films on sapphire using recrystallization from the silicon-sapphire interface

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

Russian Research Center „Kurchatov Institute“,
123182 Moscow, Russia

Abstract The use of the process of solid-phase recrystallization reduces to a great extent the number of defects in the silicon layer. An amorphous layer was formed implantation of silicon ions. The crystalline quality of the SOS structures was assessed by the method of high resolution double-crystal X-ray diffraction. The silicon layer with thickness $d = 1000\text{--}3000$ Å and with high crystalline quality is formed after silicon ions implantation (with the energy of 150 keV) and subsequent annealing.