

# Особенности процесса твердофазной рекристаллизации аморфизованных ионами кислорода структур кремний-на-сапфире

© П.А. Александров<sup>¶</sup>, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов<sup>¶¶</sup>

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

(Получена 18 июня 2008 г. Принята к печати 8 июля 2008 г.)

Малодефектные кремниевые пленки на сапфировой подложке были получены с использованием процесса твердофазной рекристаллизации. Для оценки кристаллического качества структур кремний-на-сапфире применялась рентгеновская кривая качания. Значения ширины на половине высоты максимума интенсивности (FWHM) показывают, что после имплантации ионов кислорода (энергия 130 кэВ, доза  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) и последующего отжига ( $550^\circ\text{C}/0.5 \text{ ч} + 1000^\circ\text{C}/1 \text{ ч}$ ) образуется кремниевый слой толщиной  $d = 1000\text{--}2500 \text{ \AA}$  высокого кристаллического качества.

PACS: 61.72.Dd, 61.72.Ff, 61.72.Tt, 61.80.Jh, 68.55.Jk

## 1. Введение

Структуры кремний-на-сапфире (КНС) чрезвычайно привлекательны для создания высокочастотных и силовых приборов из-за малых паразитных емкостей и высокой теплопроводности сапфира. Использование их в качестве подложек в современной микроэлектронике повышает быстродействие и радиационную стойкость микросхем. Однако уменьшение толщины эпитаксиально осажденного кремния, высокая концентрация дислокаций, микродвойников и других кристаллических несовершенств вблизи границы раздела кремний-сапфир приводят к резкому ухудшению качества приборов, созданных на КНС-структурах [1,2]. Использование процесса твердофазной рекристаллизации значительно уменьшает количество дефектов в кремниевом слое [3–8]. В предыдущих наших работах показана возможность получения малодефектных тонких ( $\sim 1200 \text{ \AA}$ ) слоев кремния на сапфире при проведении процесса твердофазной рекристаллизации в окислительной атмосфере. Аморфный слой создавался имплантацией ионов кислорода. Остающийся на поверхности неаморфизованный монокристаллический кремний использовался как затравка [9–11]. В настоящей работе анализируется кристаллическое качество кремниевого слоя вблизи поверхности и на границе кремний-сапфир, обсуждаются возможности получения высококачественного слоя кремния толщиной  $1000\text{--}2500 \text{ \AA}$  на сапфировой подложке.

## 2. Методика эксперимента

Исходная КНС-структура (толщина кремниевого слоя  $\sim 3200 \text{ \AA}$ ), полученная эпитаксиальным осаждением кремния на сапфировую подложку, аморфизовалась ионами кислорода при температуре  $\sim 130 \text{ К}$ . Облучение проводилось на установке ИЛУ-100 [11]. Энергия ионов при имплантации (130 кэВ) выбиралась из

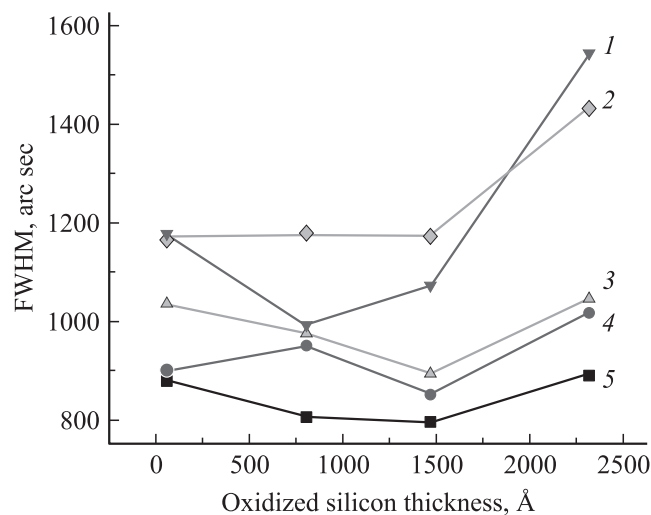
условия, чтобы максимум упруго выделенной энергии находился вблизи границы раздела кремний-сапфир. Облучение осуществлялось дозами ионов  $\text{O}^+$   $D = (8\text{--}12) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . После этого образцы отжигались в атмосфере азота ( $550^\circ\text{C}/0.5 \text{ ч} + 1000^\circ\text{C}/1 \text{ ч}$ ). Утончение поверхностного кремния происходило при отжиге при температуре  $1000^\circ\text{C}$  во влажном кислороде. Оценка кристаллического качества структур КНС проводилась методом высокоразрешающей двухкристалльной рентгеновской дифрактометрии на спектрометре ДРОН-3М. Поскольку толщина кремниевого слоя много меньше длины экстинкции для выбранной характеристической линии  $\text{CuK}_\alpha$ , величина ширины на половине высоты кривой качания рентгеновской дифракции (FWHM) пропорциональна среднему по толщине слоя количеству дефектов. Для исходных образцов FWHM  $\approx 1400$  угл. с. Измерение толщины окисного слоя (следовательно, количества окисленного кремния), образующегося во время отжига в окислительной атмосфере, проводилось на эллипсометре ЛЭФ-3М.

## 3. Обсуждение результатов

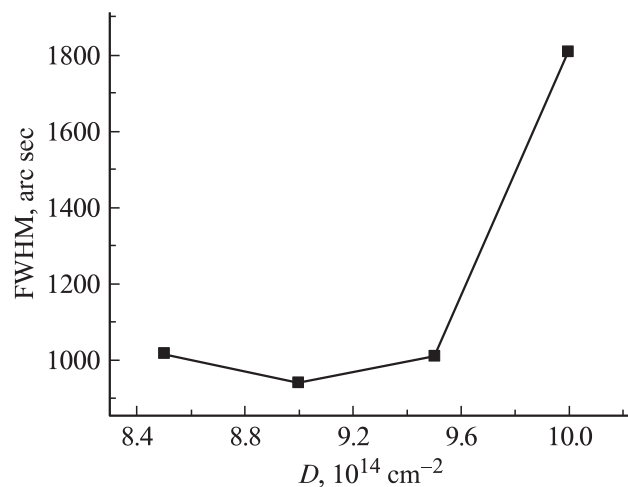
На рис. 1 представлены результаты твердофазной рекристаллизации кремниевого слоя ( $\sim 3200 \text{ \AA}$ ), предварительно аморфизованного имплантацией ионами кислорода дозами  $D = (8\text{--}12) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Толщина окисленного слоя кремния  $d_{\text{Si}}$  рассчитывалась из измеренной толщины окисного слоя  $d_{\text{SiO}_2}$  как  $d_{\text{Si}} = 0.44d_{\text{SiO}_2}$ . Наименьшее значение FWHM по всей толщине кремниевого слоя (следовательно, и наилучшее кристаллическое качество) получено для дозы аморфизации  $10^{15} \text{ см}^{-2}$ . После окисления  $\sim 800 \text{ \AA}$  кремния показания FWHM стабилизируются на уровне  $800\text{--}820$  угл. с, а затем при приближении к границе раздела кремний-сапфир несколько возрастают — до  $\sim 900$  угл. с. Эти результаты свидетельствуют о получении после проведения твердофазной рекристаллизации протяженного высококачественного кремниевого слоя, за исключением затравочного слоя [5,12,13]. Рент-

<sup>¶</sup> E-mail: aleksandrov.peter@kiac.ru

<sup>¶¶</sup> E-mail: leming25@yandex.ru



**Рис. 1.** Значения ширины кривой качания рентгеновской дифракции (FWHM) в зависимости от толщины окисленного кремния после проведения процесса твердофазной рекристаллизации. Доза аморфизации  $D$ ,  $10^{14}$  см $^{-2}$ : 1 — 8, 2 — 12.5, 3 — 11, 4 — 9, 5 — 10. Энергия ионов 130 кэВ.



**Рис. 2.** Зависимость ширины кривой качания рентгеновской дифракции (FWHM) после проведения процесса твердофазной рекристаллизации ( $550^{\circ}\text{C}/0.5\text{ ч} + 1000^{\circ}\text{C}/1\text{ ч}$ ) от дозы аморфизации при имплантации ионов кислорода с энергией 130 кэВ в структуру  $\text{SiO}_2(400\text{ \AA})/\text{Si}(2800\text{ \AA})/\text{Al}_2\text{O}_3$ .

геновская дифракция, как и дифракция высокоэнергетичных электронов [14], не позволяет определить размеры затравочного слоя непосредственно после аморфизации. Пространственное распределение имплантируемых ионов приводит к тому, что приповерхностный слой содержит большое количество дефектов и дифракция не наблюдается. Оценить размеры затравочного слоя позволяют результаты, приведенные на рис. 2. В этом случае имплантация ионов кислорода проводилась в структуру, состоящую из  $400\text{ \AA}$  поверхностного окисла,  $2800\text{ \AA}$  кремния и сапфировую подложку. Разницей пробегов

ионов кислорода в такую структуру и в кремниевый слой в первом приближении можно пренебречь. Таким образом, при имплантации одной и той же дозы ионов в обоих случаях будет одно и то же распределение смещенных атомов кремния по глубине, за исключением поверхностных  $400\text{ \AA}$  (т.е. толщины окисла). Затем проводилась рекристаллизация в атмосфере азота в тех же температурных условиях, что и в эксперименте, показанном на рис. 1. Как видно из рис. 2, для дозы ионов  $\text{O}^+ 1 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$  качество рекристаллизованной структуры катастрофически ухудшается (FWHM = 1800 угл. с), что в этом случае можно связать только с ухудшением кристаллического качества затравочного слоя. Таким образом, сравнивая результаты, приведенные на рис. 1 и 2 для дозы аморфизации  $1 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$ , величину затравочного слоя с большой точностью можно оценить как  $d = 500\text{--}600\text{ \AA}$ . Для дополнительного повышения качества всего эпитаксиального слоя обычно используется двойная рекристаллизация [12,13]. В технологическую цепочку добавляется второй этап, заключающийся в аморфизации затравочного слоя и проведении повторного отжига. В нашем случае, поскольку величина затравочного слоя невелика ( $d = 500\text{--}600\text{ \AA}$ ), при удалении (окислении) этого слоя возможно получение высококачественного рекристаллизованного кремниевоего слоя на сапфировой подложке в относительно широком диапазоне толщин ( $d = 1000\text{--}2500\text{ \AA}$ ) после проведения одношаговой рекристаллизации.

Возвращаясь к результатам, представленным на рис. 1, для разных доз аморфизации следует выделить две области: приповерхностную и вблизи границы раздела кремний-сапфир. Значения FWHM в этих областях „зеркальны“ относительно оптимальной дозы аморфизации ( $1 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$ ) — как при увеличении, так и при уменьшении дозы происходит увеличение ширины кривой качания, хотя процессы, ответственные за это явление, сильно различаются. Ухудшение кристаллической структуры вблизи границы раздела при уменьшении дозы возможно из-за недостаточной степени аморфизации этой области, содержащей наибольшее количество кристаллических дефектов, а также алюмосиликаты [1,2]. Поскольку FWHM — характеристика интегральная, состояние кристалла вблизи границы раздела непосредственно сказывается на значениях FWHM для разных толщин рекристаллизованного кремниевоего слоя. Кроме того, увеличение толщины затравочного слоя, которое наблюдается при уменьшении дозы аморфизации, должно также приводить к увеличению FWHM после отжига в инертной атмосфере. При превышении оптимальной дозы аморфизации возможно как уменьшение затравочного слоя, так и ухудшение его кристаллической структуры, что должно непосредственно сказаться на процессе протекания твердофазной рекристаллизации и, естественно, на величине FWHM. Ухудшение кристаллической структуры области, прилегающей к границе раздела кремний-сапфир, возможно из-за процессов, связанных с радиационными нарушениями в  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и развалом

алюмосиликатов. Возможное появление несвязанного кислорода в концентрациях, превышающих  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ , ухудшает качество рекристаллизованной структуры [8].

#### 4. Заключение

Таким образом, в работе показана возможность получения высококачественного кремниевого слоя на сапфировой подложке толщиной 1000–2500 Å после проведения одношагового процесса твердофазной рекристаллизации.

#### Список литературы

- [1] Ю.Ф. Козлов, В.В. Зотов. *Структуры кремния на сапфире: технология, свойства, методы контроля, применение* (М., МИЭТ, 2004).
- [2] А.Ю. Игнатов, В.С. Постолов, А.С. Филимонов. *VI Межд. конф. „Химия твердого тела и современные микро и нанотехнологии“* (Кисловодск–Ставрополь, 2006) с. 510.
- [3] T. Inoue, T. Yoshii. *Nucl. Instrum. Meth.* **182/183**, 683 (1981).
- [4] I. Golecki. *United States Patent*, No. 4 588 447 (1986).
- [5] R.E. Reedy, T.W. Sigmon, L.A. Christel. *Appl. Phys. Lett.*, **42** (8), 707 (1983).
- [6] M.L. Burgener, R.E. Reedy. *United States Patent*, No. 5 416 043 (1995).
- [7] T. Nakamura, Y. Nagatomo. *Oki Technical Review*, **74** (4), 66 (2004).
- [8] Y. Yamamoto, H. Kobayashi, T. Takahashi, T. Inada. *Nucl. Instrum. Meth. B*, **7/8**, 273 (1985).
- [9] П.А. Александров, К.Д. Демаков, Ю.Ю. Кузнецов, С.Г. Шемардов. *Сб. аннотаций докл. конф. по физике конденсир. сост., сверхпровод. и материаловед.* (М., 2007) с. 54.
- [10] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов. *Научн. сессия МИФИ-2008. Сб. науч. трудов* (М., Россия, 2008) т. 7, с. 146.
- [11] П.А. Александров, К.Д. Демаков, С.Г. Шемардов, Ю.Ю. Кузнецов. *Нано- и микросистемная техника*, **3**, 54 (2008).
- [12] M.A. Parker, R. Sinclair, T.W. Sigmon. *Appl. Phys. Lett.*, **47** (6), 626 (1985).
- [13] R.L. Maddox, I. Golecki. *Electron. Lett.*, **21** (4), 154 (1985).
- [14] E.D. Richmond, A.R. Knudson. *Thin Sol. Films*, **93**, 347 (1982).

Редактор Л.В. Шаронова

#### Solid phase epitaxial regrowth features of silicon-on-sapphire structures amorphized with oxygen ions

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

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

**Abstract** Low-defect-density silicon films on sapphire substrates have been produced using solid phase epitaxial regrowth. X-ray rocking curves were used to evaluate the crystalline quality of silicon-on-sapphire (SOS) structures. The full-width-at-half-maximum (FWHM) intensity values indicated that the high crystalline quality silicon layer ( $d = 1000\text{--}2500 \text{ \AA}$ ) was formed after oxygen ion implantation (energy 130 keV, dose  $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ) and subsequent annealing ( $550^\circ\text{C}/0.5 \text{ h} + 1000^\circ\text{C}/1 \text{ h}$ ).