

Кристаллизация пленок кремний-на-изоляторе, имплантированных большими дозами ионов водорода, под действием термических миллисекундных импульсов

© И.Е. Тыщенко[¶], В.А. Володин*, М. Фельсков⁺, А.Г. Черков, В.П. Попов

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

* Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

⁺ Институт ионно-лучевой физики и материаловедения,
01328 Дрезден, Германия

(Получена 25 июня 2012 г. Принята к печати 2 июля 2012 г.)

Исследована кристаллизация пленок кремний-на-изоляторе, имплантированных большими дозами ионов водорода, под действием импульсного миллисекундного отжига. Сразу после имплантации ионов водорода обнаружено формирование трехфазной структуры, состоящей из нанокристаллов кремния, аморфного кремния и водородных пузырей. Показано, что при импульсном отжиге нанокристаллическая структура пленок сохраняется вплоть до температуры $\sim 1000^\circ\text{C}$. С ростом температуры миллисекундного отжига размеры нанокристаллов увеличиваются от 2 до 5 нм, а доля нанокристаллической фазы возрастает до $\sim 70\%$. Из анализа энергии активации роста кристаллической фазы сделано предположение о том, что процесс кристаллизации пленок кремния с большим ($\sim 50\text{ ат}\%$) содержанием водорода лимитирован диффузией атомарного водорода.

1. Введение

Создание высокоэффективных тонкопленочных солнечных элементов является весьма перспективной задачей, требующей разработки новых материалов, обеспечивающих как более широкие возможности преобразования солнечного света, так и обладающих большей стабильностью к длительному воздействию излучения. В этом отношении большое внимание исследователей привлекает гетерофазный нанокристаллический кремний, состоящий из нанокристаллов кремния, разделенных аморфной прослойкой [1,2]. По сравнению с аморфным кремнием, который широко используется для создания дешевых тонкопленочных фотовольтаических приборов [3], слои гетерофазного нанокристаллического кремния обладают целым рядом преимуществ. Во-первых, наличие двухфазной структуры обеспечивает эффективное поглощение света в более широком спектральном диапазоне. При этом поглощение коротковолнового излучения (в сине-зеленой области спектра) происходит в аморфном кремнии, а поглощение длинноволнового красно-оранжевого света — в нанокристаллах кремния. Иными словами, нанокристаллический кремний поглощает свет практически во всем видимом и ближнем инфракрасном (вплоть до 1.1 эВ) диапазоне энергетического спектра. Другим преимуществом такого материала является его высокая стабильность к воздействию солнечного света по сравнению с аморфным кремнием [4,5].

Свойства гетерофазного нанокристаллического кремния во многом определяются размерами зерен, содержанием кристаллической фазы, состоянием границы раздела между зерном и окружающей аморфной матрицей [6].

Большую роль при этом играет структура аморфного кремния, разделяющего нанокристаллические островки. В частности, важным фактором является концентрация и положение атомов водорода в аморфной кремниевой прослойке. Атомы водорода способны формировать устойчивые связи Si-H в кремнии при температурах менее 300°C за счет взаимодействия с оборванными связями, а также путем встраивания в напряженную связь Si-Si, стимулируя кристаллизацию аморфного кремния [7]. Однако при температурах выше 300°C , когда происходит разрыв связей Si-H и высвобождение атомарного водорода, происходит формирование молекул H_2 , которые в дальнейшем способны накапливаться в микропустотах в виде водородных пузырей. Обычно структурные перестройки в кремнии с участием водородных пузырей рассматриваются в свете изучения процессов водородного скалывания в слоях монокристаллических полупроводников [8]. Влияние состояния водорода в пленках кремния на процесс кристаллизации аморфного кремния в литературе практически не изучено. В данной работе был исследован процесс кристаллизации тонких аморфных пленок кремния с большим содержанием водорода под действием импульсного миллисекундного отжига. Тонкие водородосодержащие пленки Si были сформированы имплантацией слоев кремний-на-изоляторе (КНИ) большими дозами ионов водорода, обеспечивающими концентрацию атомов водорода на уровне 50 ат%.

2. Методика экспериментов

В качестве исходного материала использовались пластины КНИ с толщиной отсеченного слоя кремния

[¶] E-mail: tys@isp.nsc.ru

280 нм и толщиной захороненного слоя оксида кремния 400 нм. Подложки кремния *p*-типа проводимости имели ориентацию (100). Имплантация ионов водорода с энергией 24 кэВ дозой $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ проводилась из импульсного плазменного источника ионов на установке, разработанной в Институте ядерной физики им. Будкера СО РАН. Согласно расчетам по программе TRIM, использованные параметры ионов должны были обеспечивать концентрацию атомов водорода в пленке $\sim 50 \text{ ат}\%$. Последующие отжиги проводились с помощью импульсной ксеноновой лампы при температурах 600–1000 °С длительностью 20 мс в Институте ионно-лучевой физики и материаловедения Гельмгольц-Центра Росендорф-Дрезден (Германия). Стационарный подогрев структур до температуры 550 °С во время импульсного отжига осуществляется с помощью галогеновой лампы. Отжиг проводился в атмосфере аргона. Для сравнения исследовались соответствующие структуры, отожженные в термической печи при температурах 200–1000 °С в течение 20 мин в атмосфере азота. Исследования структурных свойств сформированных объектов осуществлялись методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Анализ проводился на микроскопе JEM-4000 с разрешением 0,2 нм при ускоряющем напряжении 250 кВ. В качестве другого метода изучения структурных свойств исходных и отожженных образцов использовались спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС). Спектры КРС возбуждались линией Аг-лазера с длиной волны 514,5 нм, сходящейся до образца мощностью 2–3 мВт и регистрировались при комнатной температуре. Размер зондирующего пятна составлял 6–8 мкм. Использовался спектрометр с тройным монохроматором T64000 производства компании Horiba Jobin Yvon со спектральным разрешением не более 2 см^{-1} . Детектором служила кремниевая матрица фотоприемников, охлаждаемая жидким азотом. Измерения проводились в геометрии обратного рассеяния с вектором поляризации падающего излучения, направленным вдоль кристаллографического направления $\langle 011 \rangle$ кремния. Рассеянный свет регистрировался в поляризации $\langle 01\bar{1} \rangle$. Выбранная геометрия позволяла максимально подавить сигнал КРС от кремниевой подложки.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлено полученное методом ПЭМ изображение поверхности КНИ структуры сразу после имплантации ионов водорода. Из рисунка видно, что уже сразу после имплантации на поверхности слоя КНИ формируются водородные пузыри, диаметр которых варьируется в интервале 100–1000 нм. Пузыри имели куполообразную форму, при этом максимальная высота купола достигала 600 нм (см. вставку к рис. 1). С ростом температуры отжига размеры пузырей изменялись немонотонно.

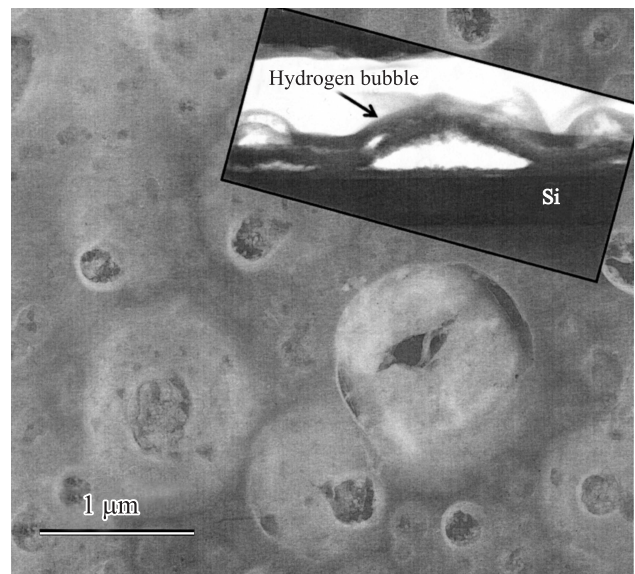


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение поверхности пленки КНИ, имплантированной ионами водорода с энергией 24 кэВ дозой $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. На вставке к рисунку показано изображение единичного водородного пузыря на поверхности КНИ-слоя, полученное с помощью ПЭМ на поперечном срезе.

На рис. 2 представлены спектры КРС, измеренные от имплантированных ионами водорода пленок КНИ и после импульсного отжига при температурах $T_a = 600\text{--}1000 \text{ °С}$. В спектрах КНИ-структур, не подвергнутых отжигу, доминирует пик с максимумом около 472 см^{-1} . Это соответствует частоте поперечного оптического фонона в гидрированном аморфном кремнии [9]. В области спектра около 514 см^{-1} наблюдается асимметрия в виде слабовыраженного плеча. Полная ширина на полувысоте аморфного пика составляет 70 см^{-1} . После отжига при температуре 600 °С его интенсивность падает в ~ 2 раза, а наблюдаемое в высокочастотной области плечо трансформируется в четко выраженный пик с максимумом вблизи 516 см^{-1} . Наблюдаемый пик обусловлен рассеянием на оптических фононах, локализованных в нанокристаллах кремния. Увеличение температуры отжига до 800 °С сопровождается дальнейшим высокочастотным сдвигом этого пика к 518 см^{-1} и монотонным ростом его интенсивности. После отжига при температурах выше 800 °С частота локализованной оптической моды остается неизменной, а происходит лишь рост ее интенсивности и уменьшение полуширины на полувысоте. На вставке к рис. 2 показаны спектры КРС для объемного монокристаллического кремния и имплантированных КНИ-структур, отожженных при температуре 1000 °С в течение 20 мс. Видно, что даже после высокотемпературного отжига интенсивность пика КРС остается в 3 раза меньше, чем в монокристаллическом кремнии, а положение максимума смещено в область низких частот. Кроме того, ширина

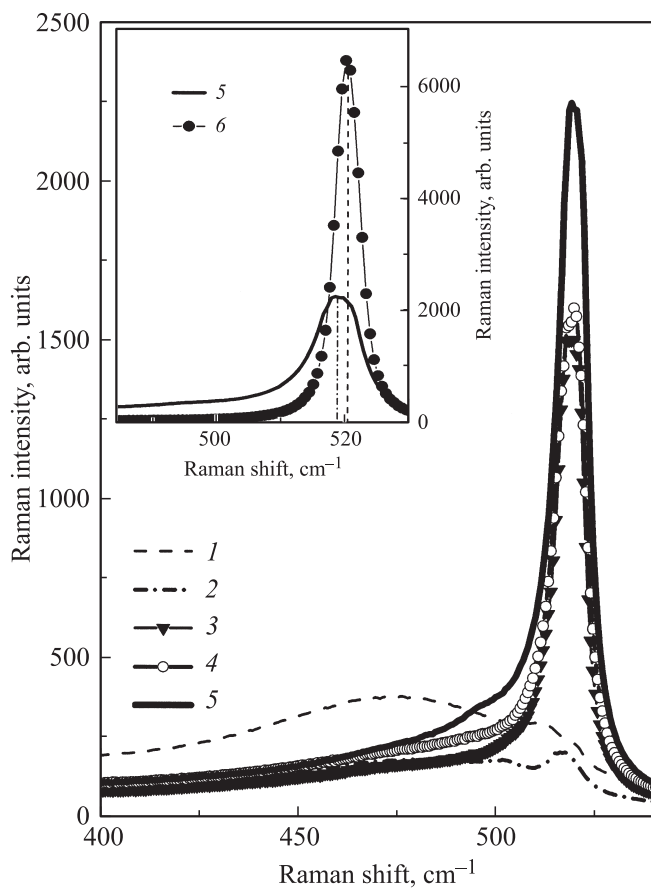


Рис. 2. Спектры КРС, измеренные от имплантированных ионами водорода пленок КНИ до (1) и после импульсного отжига в течение 20 мс при температурах T_a , °С: 600 (2), 800 (3), 900 (4), 1000 (5). Кривая 6 — спектр КРС монокристаллического кремния.

пика 518 см^{-1} в 2 раза шире пика оптических фононов в монокристаллическом кремнии. Эти данные свидетельствуют в пользу того, что в импульсно-отожженных пленках сохраняется высокая степень локализации оптических фононов, которая может быть обусловлена как присутствием нанокристаллов кремния, так и достаточно высокой степенью разупорядочения пленки. Следует отметить, что аморфная составляющая также остается достаточно заметной даже после миллисекундного отжига при 1000°C (см. вставку к рис. 2).

Более полная информация о структурных перестройках в гидрированном аморфном кремнии может быть получена из анализа низкочастотных спектров КРС на акустических фононах [10,11]. На рис. 3 представлены низкочастотные спектры КРС пленок КНИ, имплантированных большой дозой ионов водорода, до и после отжига при температурах 600°C и 1000°C в течение 20 мс, а также спектр монокристаллического объемного кремния. Из рисунка видно, что сразу после имплантации в спектрах наблюдается широкий интенсивный пик с максимумом около 150 см^{-1} . Серия узких пиков в ука-

занном частотном диапазоне соответствует КРС на вращательно-колебательных модах присутствующих в атмосфере молекул азота и кислорода. Частотное положение этого пика соответствует частоте поперечного акустического фонона на границе зоны Бриллюэна решетки кремния. В монокристаллическом кремнии этот пик не наблюдается, поскольку трансляционная симметрия в объемной кристалле приводит к правилам отбора, которые накладывают запрет на рассеяние света фононами в этой области спектра. Генерация дефектов часто приводит к нарушению трансляционной симметрии и снятию запретов, обусловленных правилами отбора, что сопровождается ростом комбинационного рассеяния света на акустических фононах с большим волновым числом и соответственно с большой частотой. Как видно из рис. 3, миллисекундный отжиг при температуре 600°C приводит к уменьшению интенсивности полосы КРС более чем в 2 раза. Это свидетельствует об отжиге структурных нарушений в области имплантированного кремния. Однако дальнейшее увеличение температуры отжига вплоть до 1000°C не сопровождается соответствующими изменениями в интенсивности пика КРС, а лишь приводит к небольшому уменьшению его ширины.

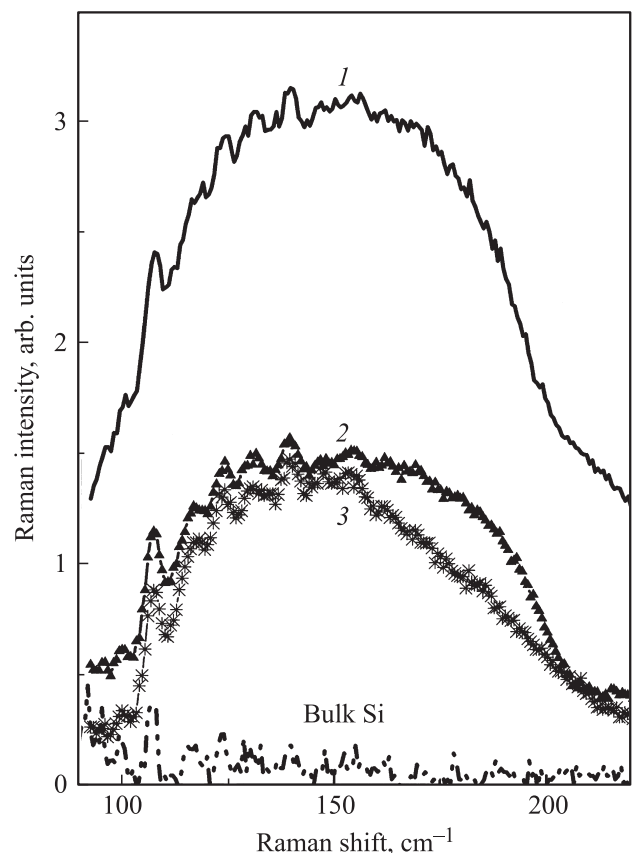


Рис. 3. Спектры КРС в спектральном диапазоне $90\text{--}220\text{ см}^{-1}$ пленок КНИ, имплантированных ионами водорода с энергией 24 кэВ дозой $5 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-2}$, до (1) и после импульсного отжига в течение 20 мс при температурах 600°C (2) и 1000°C (3).

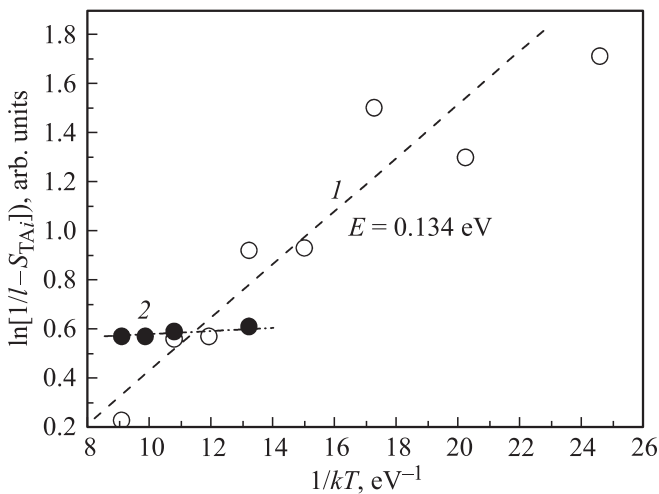


Рис. 4. Логарифм изменения относительной площади пика КРС с максимумом 150 см^{-1} в зависимости от обратной температуры отжига в течение 20 мин (1) и 20 мс (2).

Аналогичные спектры были также измерены для образцов, отожженных в течение 20 мин при температурах $200\text{--}1000^\circ\text{C}$. На рис. 4 представлена зависимость логарифма изменения относительной площади пика КРС с максимумом $\sim 150\text{ см}^{-1}$ от обратной температуры импульсного (точки, аппроксимированные линией 2) и обычного печного отжига (точки, аппроксимированные линией 1). Видно, что в случае обычного отжига характер изменения площади низкочастотного пика КРС аппроксимируется во всем диапазоне температур прямой линией с наклоном, соответствующим энергии активации 0.134 эВ , которая в точности соответствует энергии активации структурных перестроек оборванных связей, насыщенных атомами водорода [12,13]. В случае миллисекундного отжига при температурах порядка и более 600°C структурные перестройки в кремнии, приводящие к изменениям в спектре оптических фононов, не оказывают влияния на спектры акустических фононов. Это означает, что импульсный миллисекундный отжиг пленок кремния с большим содержанием водорода даже при температурах $\sim 1000^\circ\text{C}$ не приводит к появлению в них трансляционной симметрии.

Итак, данные ПЭМ и КРС показывают, что в пленках кремния, имплантированных большими дозами ионов H^+ , формируются водородные пузыри и нанокристаллы Si. Наличие нанокристаллов создает условия для ограничения волновой функции фононов внутри нанокристаллического объема. При этом порядок локализованной моды определяется числом полувольт, кратных размеру кристалла. В силу закона дисперсии фононов их частота уменьшается с уменьшением длины волны. Поэтому уменьшение размеров нанокристаллов сопровождается низкочастотным смещением пика поперечного оптического фонона в спектре КРС. Феноменологическое соотношение, позволяющее установить

связь между сдвигом частоты локализованной моды 1-го порядка ω_{nc} относительно частоты длинноволновых оптических колебаний в объемном кремнии ω_{Si} и размером нанокристалла кремния D_{nc} , имеет вид [14]

$$\Delta\omega = \omega_{\text{Si}} - \omega_{\text{nc}} = B \left(\frac{a}{D_{\text{nc}}} \right)^\gamma, \quad (1)$$

где $a = 0.543\text{ нм}$ — постоянная решетка кремния. Параметры B и γ зависят от формы нанокристалла. В расчетах частоты оптических мод, локализованных в нанокристаллах шарообразной формы, проведенных методом поляризационной связи [15], значения этих параметров составили: $B = 47.41\text{ см}^{-1}$ и $\gamma = 1.44$. На рис. 5 представлен диаметр нанокристаллов кремния, рассчитанный с помощью выражения (1), в зависимости от температуры постимплантационного отжига имплантированных пленок КНИ как миллисекундной длительности, так и в случае термического отжига в течение 20 мин. Видно, что если после стационарного отжига пленки КНИ практически полностью кристаллизуются уже при температурах около 900°C , то после импульсного отжига пленки остаются нанокристаллическими вплоть до температуры 1000°C . Размер нанокристаллов при этом не превышает 5 нм .

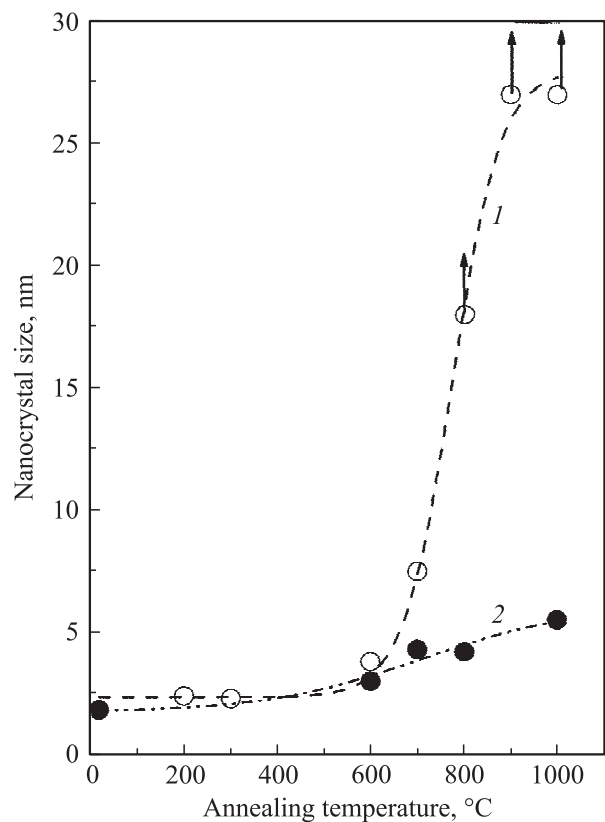


Рис. 5. Диаметр нанокристаллов кремния, рассчитанный с помощью выражения (1), в зависимости от температуры постимплантационного отжига в течение 20 мин (1) и 20 мс (2) пленок КНИ, имплантированных ионами водорода с энергией 24 кэВ дозой $5 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-2}$.

Количественный анализ спектров КРС в диапазоне частот оптических фононов позволяет определить объемную долю аморфной и кристаллической фракций в синтезированных пленках. Например, кристаллическая доля ρ_c может быть выражена следующим образом [16]:

$$\rho_c = \frac{I_c}{I_c + yI_a}, \quad (2)$$

где I_c и I_a — соответствующие интегральные интенсивности комбинационного рассеяния света в кристаллической и аморфной фазе; $y = \Sigma_c/\Sigma_a$, где Σ_c и Σ_a — интегральные сечения обратного рассеяния в измеряемом спектральном диапазоне для кристаллического и аморфного кремния соответственно. Интегральное сечение КРС поперечного оптического фонона является функцией размера нанокристалла D_{nc} (в нанометрах) [16]:

$$y = 0.1 + \exp\left(\frac{-D_{nc}}{25}\right). \quad (3)$$

Используя данные рис. 5 и выражения (2) и (3), мы определили объемную долю кристаллической фазы в зависимости от температуры импульсного и стационарного отжига. Интегральные интенсивности определялись путем разложения экспериментальных спектров КРС на составные функции Гаусса или Лоренца и последующим интегрированием. Эти результаты представлены на рис. 6. Из рисунка видно, что кристаллизация пленок КНИ в присутствии больших концентраций водорода в условиях импульсного микросекундного отжига оказывается замедленной по сравнению с обычным термическим отжигом. Согласно полученным результатам, нанокристаллическая фракция в пленках КНИ, имплантированных большими дозами ионов водорода и отожженных в импульсном режиме, может достигать 70%.

Обсудим процесс кристаллизации пленок кремния, имплантированных большими дозами ионов водорода, в зависимости от длительности отжига. Из рис. 6 видно, что рост кристаллической фазы в кремнии с большим содержанием водорода происходит лишь при температурах выше 600°C. Процесс кристаллизации в этом случае может быть описан формулой Аврамы [17,18].

$$\ln\left[\frac{1-\rho_{c0}}{1-\rho_c}\right] = -A \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right), \quad (4)$$

где ρ_{c0} — объемная доля кристаллической фазы в неотожженных пленках, E_a — энергия активации кристаллизации, k — постоянная Больцмана, $A = (vt)^m$ — предэкспоненциальный член, связанный со временем отжига t и частотным фактором v , величина m варьируется между 3 и 4 [17]. На вставках к рис. 6 представлена зависимость кристаллической фазы от обратной температуры в координатах $\ln[(1-\rho_{c0})/(1-\rho_c)]$ и $1/kT$ для соответствующих пленок, отожженных в условиях микросекундного отжига, а также для пленок,

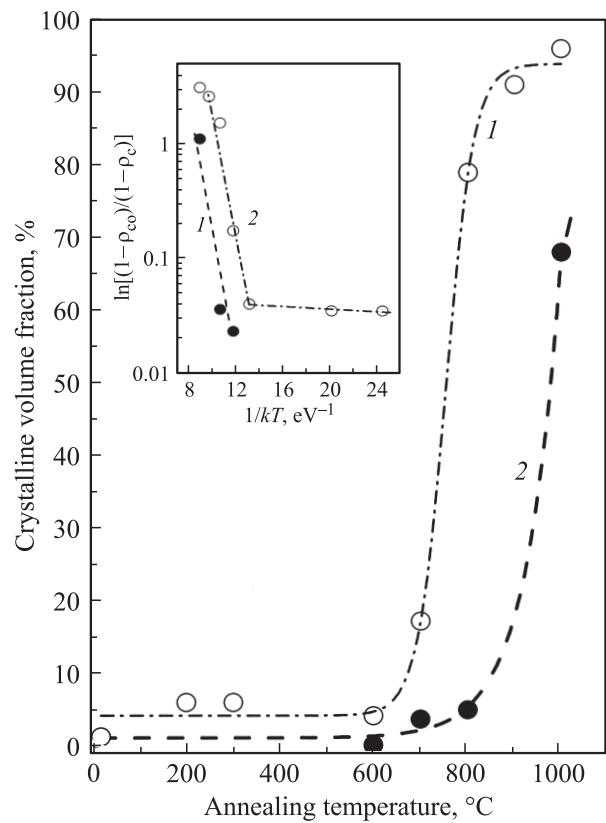


Рис. 6. Доля кристаллической фазы в пленках КНИ, имплантированных ионами водорода с энергией 24 кэВ дозой $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, в зависимости от температуры последующего отжига в течение 20 мин (1) и 20 мс (2). На вставке к рисунку показаны соответствующие зависимости доли кристаллической фазы, полученные в соответствии с уравнением Аврамы, от обратной температуры.

отожженных в течение 20 мин. Видно, что в том и другом случаях зависимость имеет одинаковый наклон. Это означает, что энергия активации кристаллизации как при импульсном, так и при стационарном отжиге определяется одними и теми же процессами и отличается лишь величиной предэкспоненциального члена A , в который входит время отжига. Процесс характеризуется двумя стадиями. Первая стадия, низкотемпературная, протекает при температурах ниже 600°C с энергией активации ~ 0.01 эВ. Обычно в гидрированном аморфном кремнии, когда содержание водорода не превышает 10 ат%, указанная низкотемпературная стадия происходит с энергией активации, большей на порядок полученного значения, и обусловлена структурными перестройками оборванных связей, в том числе и насыщенных атомами водорода [13]. Этому соответствуют и данные рис. 3, на котором показано, что энергия активации 20-минутного изохронного отжига дефектов, обеспечивающих генерацию акустической моды в спектре КРС кремния, составила также величину, близкую к 0.1 эВ. Наблюдаемое в нашем случае отличие энер-

гий активации кристаллизации указывает на то, что в пленках с большим содержанием водорода структурные перестройки оборванных связей, насыщенных атомами водорода, не являются фактором, лимитирующим процесс кристаллизации.

Энергия активации, характеризующая в нашем случае высокотемпературную стадию кристаллизации (см. рис. 6), также существенно отличается от известного значения энергии гетерогенной твердофазной кристаллизации (от 2.8 до 4.7 эВ [19]). Оцененное нами значение 1.5 эВ совпадает по величине с энергией активации диффузии атомарного водорода в аморфном кремнии. Это может означать, что рост кристаллической фазы в пленках кремния, имплантированных большими дозами водорода, происходит не за счет фазового перехода из аморфного состояния в кристаллическое, а путем упорядочения напряженных Si-Si-связей в результате диффузии атомарного водорода из областей гидрированного аморфного кремния, разделяющего кристаллические области нанометрового размера. При этом уменьшение длительности отжига способствует замедлению выхода водорода из имплантированного объема пленки. В соответствии с выражением (4) это приводит к сдвигу активационной зависимости в область более высоких температур. Это означает, что полная кристаллизация пленки Si при импульсном отжиге происходит при более высоких температурах, чем при обычном стационарном отжиге. В этом случае нанокристаллы кремния сохраняются как островки монокристаллического кремния, разделенные прослойкой гидрированного аморфного кремния, вплоть до температуры 1000°C. После высокотемпературного импульсного отжига пленки представляют собой текстуру, состоящую из ориентированных нанокристаллов, разделенных тонкой аморфной прослойкой. В этом случае положение пика комбинационного рассеяния света на оптических фонах определяется не размером наноструктурированных областей, а размером отдельных нанокристаллических зерен, составляющих структуру.

Итак, при исследовании пленок КНИ, имплантированных большими дозами ионов водорода, обеспечивающих содержание атомов H в концентрации 50 ат%, обнаружено формирование трехфазной системы, состоящей из водородных пузырей, гидрированного аморфного кремния и нанокристаллов кремния. С ростом температуры последующего импульсного миллисекундного отжига происходит кристаллизация гидрированного аморфного кремния, сопровождающаяся ростом нанокристаллической фазы. Нанокристаллическая структура слоев сохраняется вплоть до температуры ~ 1000°C. С ростом температуры размеры нанокристаллов увеличиваются от 2 до 5 нм, а доля нанокристаллической фазы возрастает до ~ 70%. Энергия активации роста кристаллической фазы составила 1.5 эВ, что соответствует энергии активации диффузии атомарного водорода в гидрированном аморфном кремнии.

Авторы благодарны И.И. Морозову за проведение имплантации ионов водорода. Исследования проводились на аналитическом оборудовании Центра коллективного пользования научно-образовательного комплекса „Наносистемы и современные материалы“ Новосибирского государственного университета.

Список литературы

- [1] B. Yan, G. Yue, J.M. Owens, J. Yang, S. Guha. Appl. Phys. Lett., **85**, 1925 (2004).
- [2] R. Biswas, C. Xu. Opt. Express, **19**, A664 (2011).
- [3] B. Rech, H. Wagner. Appl. Phys. A, **69**, 155 (1999).
- [4] A. Chowdhury, S. Mukhopadhyay, S. Ray. Solar. Energy Mater. Solor. Cells., **93**, 597 (2009).
- [5] S. Mukhopadhyay, R. Goswami, S. Ray. Sol. Energy Mater. Solar. Cells., **93**, 674 (2009).
- [6] S. Klein, F. Finger, R. Carius, T. Dylla, B. Rech, M. Grimm, L. Houben, M. Stutzmann. Thin. Sol. Films, **430**, 202 (2003).
- [7] M.S. Valipa, S. Sriraman, E.S. Aydil, D. Maroudas. J. Appl. Phys., **100**, 053 515 (2006).
- [8] Q.-Y. Tong, K. Gutjahr, S. Hopfe, U. Gösele, T.-H. Lee. Appl. Phys. Lett., **70**, 1390 (1997).
- [9] F.A. Sarrot, Z. Iqbal, S. Veprek. Sol. St. Commun., **42**, 465 (1982).
- [10] A.P. Sokolov, A.P. Shebanin, O.A. Golikova, M.M. Mezdrogina. J. Phys.: Condens. Matter, **3**, 9887 (1991).
- [11] N.N. Ovsyuk, V.N. Novikov. Phys. Rev., **57**, 14 615 (1998).
- [12] N.H. Nickel, E.A. Schiff. Phys. Rev. B., **58**, 1114 (1998).
- [13] D.T. Britton, A. Hempel, M. Harting, G. Kogel, P. Sperr, W. Triftshauer, C. Arendse, D. Knoesen. Phys. Rev. B., **64**, 075 403 (2001).
- [14] G. Faraci, S. Gibilisco, P. Russo, A. Pennisi. Phys. Rev. B, **73**, 033 307 (2006).
- [15] J. Zi, H. Büscher, C. Falter, W. Ludwig, K. Zhang, X. Xie. Appl. Phys. Lett., **69**, 200 (1996).
- [16] E. Bustarret, M.A. Hachicha, M. Brunel. Appl. Phys. Lett., **52**, 1675 (1988).
- [17] J. Gonzalez-Hernandez, R. Tsu. Appl. Phys. Lett., **42**, 90 (1983).
- [18] T. Okada, T. Iwaki, H. Kasahara, K. Yamamoto. Sol. St. Commun., **52**, 363 (1984).
- [19] U. Köstner. Phys. Status Solidi A, **48**, 313 (1978).

Редактор Т.А. Полянская

Crystallization of the high-dose hydrogen ion implanted silicon-on-insulator layers under millisecond pulse annealing

I.E. Tyschenko, V.A. Volodin, M Voelskow⁺,
A.G. Cherkov, V.P. Popov*

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian
Branch of the Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

* Novosibirsk State University,
630090 Novosibirsk, Russia

⁺ Institute of Ion Beam Physics and Materials
Research, 01328 Dresden, Germany

Abstract Crystallization of the silicon-on-insulator films implanted with high dose of hydrogen ions was investigated under pulse millisecond annealing. Three-phase structure, consisted of the silicon nanocrystals, amorphous silicon, and hydrogen bubbles, was observed from the as-implanted samples. It was shown that the nanocrystal structure of the films is remained under pulse annealing up to 1000°C. As pulse annealing temperature grown, the nanocrystal diameter increased from 2 to 5 nm, and the nanocrystal fraction rose to 70%. From the analysis of the crystalline-phase growth activation energy, it was speculated about the atomic hydrogen diffusion as limiting factor of the crystallization of the highly-hydrogenated (~ 50 at%) silicon films.