

УДК 621.315.592

Е.Л. Жавжаров⁽¹⁾, доцент, к.т.н.

Т.В. Критская⁽²⁾, профессор, д.т.н.

В.М. Матюшин⁽¹⁾, профессор, д.т.н.

Ю.М. Чащинов⁽³⁾, ст. научн. сотрудник, к.т.н.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ВОДОРОДА В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ

⁽¹⁾ Запорожский национальный технический университет,

⁽²⁾ Запорожская государственная инженерная академия,

⁽³⁾ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова-Ленина, Россия

Досліджено вміст водню у кристалічному кремнії, одержаному різними методами. Спостерігається тенденція до зростання концентрації водню із підвищенням температури процесу. У монокристалах, кристалізація яких відбувається за температури ~ 1412 °С, вміст водню помітно вище, ніж у полікристалічних стержнях кремнію, що одержують осадженням із газової фази на підкладку за температури 850...1150 °С. Нестабільність і швидкий спад за часом високих значень τ_{HHz} у монокристалах CZ-Si, вирощених в атмосфері Ar+SiH₄, можуть бути пов'язані із делокалізацією атомів водню з дислокацій та їх наступною дифузією з об'єму монокристала кремнію. Уповільнена деградація τ_{HHz} у монокристалах, вирощених із шихти змішаного складу, дозволяє вважати міграцію атомів водню як одну з причин зниження цього параметра, разом з розпадом пересиченого твердого розчину кисню в монокристалах CZ-Si.

Ключові слова: кристалічний кремній, метод Чохральського, дифузія водню, час життя нерівноважних носіїв заряду, окислювальні дефекти упаковки

Исследовано содержание водорода в кристаллическом кремнии, полученном различными методами. Наблюдается тенденция к возрастанию концентрации водорода с повышением температуры процесса. В монокристаллах, кристаллизация которых происходит при температуре ~1412 °С, содержание водорода заметно выше, чем в поликристаллических стержнях кремния, получаемых осаждением из газовой фазы на подложку при температурах 850...1150 °С. Нестабильность и быстрый спад во времени высоких значений τ_{HHz} в монокристаллах CZ-Si, выращенных в атмосфере Ar+SiH₄, могут быть связаны с делокализацией атомов водорода с дислокаций и их последующей диффузией из объема монокристалла кремния. Замедленная деградация τ_{HHz} в монокристаллах, выращенных из шихты смешанного состава, позволяет считать миграцию атомов водорода как одну из причин снижения этого параметра, наряду с распадом пересыщенного твердого раствора кислорода в монокристаллах CZ-Si.

Ключевые слова: кристаллический кремний, метод Чохральского, диффузия водорода, время жизни неравновесных носителей заряда, окислительные дефекты упаковки

Content of hydrogen in crystalline silicon, got different methods is investigated. There is a tendency towards increasing of concentration of hydrogen with the height of temperature of process. In single-crystals crystallization of which takes place at the temperature ~ 1412 °С, content of hydrogen is noticeable higher, than in the polycrystalline bars of silicon, got besieging from a gas phase on backing material at the temperatures 850...1150 °С. Instability and rapid slump at time of high values of $\tau_{\text{n-e.ch.ca}}$ in the single-

crystals of CZ-Si, grown in the atmosphere of Ar+SiH₄, can be related with the delocalization of hydrogen atoms with distribution and their subsequent diffusion from the volume of single-crystal of silicon. Slow degradation of $\tau_{n-e.ch.ca}$ in single-crystals, grown from the charge of the mixed composition, allows to suppose migration of hydrogen atoms as one of reasons for decline of this parameter, along with disintegration of oversaturated hard colution of oxygen in the single-crystals of CZ-Si.

Key words: crystalline silicon, method of Chokhralsky, diffusion of hydrogen, time of life of non-equilibrium charge carriers, oxidizing defects of packing

Введение. Изучение поведения водорода представляет интерес как для понимания процессов дефектно-примесного взаимодействия в объеме кристаллического кремния, так и для создания комплекса технологических операций при получении полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Возможность трансформации дефектной структуры поверхности, с целью устранения поверхностных загрязнений либо формирования заданных структурных композиций, имеет большое значение для развития нанотехнологий, разработки конструкций интегральных микросхем с особыми функциональными свойствами и др. Использование гидрогенизации поверхности кремния также перспективно для технологий высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей [1].

В то же время исследования поведения водорода в объеме кристаллического кремния малочисленны и касаются, в основном, установления его роли в образовании раковин и пустот в объеме кристаллов (вследствие оттеснения водорода из насыщенной им жидкой фазы), а также влияния водорода на ростовые термодоноры, микродефекты и рекомбинационно активные центры [2-5].

В настоящее время для объяснения физико-химических процессов, лежащих в основе технологических операций легирования, измерений электрофизических и структурных параметров монокристаллов, влияние содержащегося в кремнии водорода практически не рассматривается. Нашими исследованиями [6], было установлено, что в различных видах кристаллического кремния водород присутствует в весьма высоких концентрациях, превышающих содержание легирующих элементов, кислорода и углерода. Содержание водорода определяли методом высокотемпературной экстракции в токе инертного газа-носителя с использованием анализатора РН-1 фирмы «Леко». Предел обнаружения метода $[(0,6...1,8) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} (0,01...0,03 \text{ см}^3) / 100 \text{ г кремния}]$, относительная погрешность – не более 10 %.

Постановка задачи. Задачей настоящей работы являлось установление возможности получения монокристаллов с повышенными значениями времени жизни неравновесных носителей заряда $\tau_{ннз}$ за счет пассивации имеющихся центров рекомбинации растворенным в кремнии водородом.

Учитывая, что уровень насыщения водородом выше в монокристаллах, по сравнению с поликристаллическим кремнием, в идентичных условиях были проведены процессы выращивания по методу Чохральского из загрузок поликристаллического кремния-сырца, оборотов монокристаллов, а также смесей оборотов и сырца. Использовали поликристаллический кремний-сырец, полученный в процессе водородного восстановления трихлорсилана с содержанием $N_B \sim 1,1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $N_P \sim 8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $N_C \leq 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Результаты измерений параметров выращенных монокристаллов представлены в табл. 1. Масса загрузки в тигель составляла 22 кг. Контроль удельного электрического сопротивления монокристаллов производили на прилегающих к марочной части шайбах толщиной 10...12 мм после термообработки (650 °С, 30 мин), контроль $\tau_{ннз}$ –

на нижних торцах монокристаллов без термообработки. Из приведенных в таблице данных следует, что наиболее высокие значения $\tau_{\text{ннз}}$ были получены на монокристаллах из смешанных загрузок.

Также в процессе выращивания была исследована возможность получения монокристаллов кремния с плотностью дислокаций $N_D \geq 10^3 \text{ см}^{-2}$ и значениями времени жизни неравновесных носителей заряда $\tau_{\text{ннз}} \geq 205 \text{ мкс}$ [6]. Исходя из предпосылки о возможной закалке центров рекомбинации в условиях интенсификации скорости охлаждения монокристалла [7], в процессе выращивания использовали среды инертных газов с различной теплопроводностью. Процессы выращивания выполняли в идентичных условиях. Теплопроводность водорода ($\lambda = 0,1655 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) существенно превышает теплопроводность гелия ($\lambda = 0,1411 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) и аргона ($\lambda = 0,0161 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$). В то же время использование среды чистого водорода является опасным, и молекулярный водород приводит к образованию газовых включений в объеме кристаллической фазы кремния. Поэтому эксперименты выполняли в менее теплопроводных средах гелия, аргона и смеси «аргон+моносилан».

Как известно [8], моносилан при температурах более 673 К разлагается с образованием атомарного водорода, который обладает высокой растворимостью в решетке кремния и не приводит к образованию пор. Суммарная концентрация примесей в используемом моносилане не превышала $2 \cdot 10^{-8} \%$ об. Мольное содержание моносилана в смеси с аргоном поддерживали на уровне 1:3000. Выращиваемые монокристаллы легировали фосфором до концентрации $\sim 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (марка 1ф1брт кэф 7,5/0,5-45, ТУ 48-4-295-82).

Таблица 1 – *Время жизни неравновесных носителей заряда в монокристаллах кремния для микроэлектроники*

Марка монокристалла кремния	УЭС, Ом·см	$\tau_{\text{ннз}}$, мкс	Состав шихты*
1А2яО ₂ КДБ 10/2,5-102,5 (ТУ 48-4-295-82)	12...8	15...25	1
		18...35	2
		16...22	3
1А2ямед ₁ О ₁ КДБ 12/24-102,5 (ТУ 48-4-295-82)	14,4...9,6	26...35	1
		48...72	2
		24...33	3
1А2мяО ₁ КЭФ-4,5/9-102,5 (ТУ 48-4-295-82)	5,4...3,6	18...36	1
		45...130	2
		27...33	3
ЭКДБ-40-6Вм1 (ГОСТ 19658-81)	48...32	24...60	2

Примечание: 1 – 100 % поликристаллический кремний-сырец, полученный методом водородного восстановления SiHCl_3 ;
 2 – 50 % сырец + 50 % собственные обороты;
 3 – 100 % собственные обороты

Представленные результаты показывают возможность увеличения $\tau_{\text{ннз}}$ в монокристаллах, выращенных в смеси $\text{Ar}+\text{SiH}_4$, по сравнению с процессами, выполняемыми в аргоне или гелии. Наиболее существенное увеличение $\tau_{\text{ннз}}$ (до 750...800 мкс) наблюдали в монокристаллах, выращенных в этой смеси при давлении в камере 133 кПа (без протока газа), однако получение монокристаллов требуемой длины было затруднено. Контроль концентрации кислорода в выращенных монокристаллах показал, что ее величина была на 30...35 % ниже, чем в выращенных в атмосфере аргона или ге-

лия, что может быть вызвано более интенсивным испарением кислорода (в виде SiO) из расплава, а также дополнительной очисткой аргона от влаги в присутствии моносилана.

Следует отметить, что эффект повышения $\tau_{низ}$ в монокристаллах, выращенных в смеси $Ar+SiH_4$, оказался нестабильным во времени и при хранении в течение 3...6 месяцев при комнатной температуре величина $\tau_{низ}$ постепенно снижалась (рис. 1).

Исследования, проведенные методом ИК-спектроскопии, не обнаружили образований гидридов. Можно предположить, что водород, содержащийся в монокристаллах ($CZ-Si \sim 3,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $FZ-Si \sim 3,84 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), а также в кремнии-сырце, находится в растворенном виде (межузельное положение в решетке кремния) и свободном состоянии (в микропорах). В кремнии-сырце, полученном термическим разложением моносилана, по данным ИК-спектроскопии обнаружено, что водород образует моногидридные связи (полоса поглощения в области 2000 см^{-1}), появление которых может быть связано с образованием в процессе термической диссоциации моносилана некоторого количества аморфной фазы кремния.

Повышенное содержание водорода в монокристаллах, легированных германием ($CZ-Si<Ge,P>$), по-видимому, подтверждает установленную для кремния-сырца тенденцию возрастания содержания данного газа с увеличением плотности кристаллической фазы. Плотность монокристаллов $CZ-Si<P>$ составляет $2,3280... 2,3290$, а $CZ-Si<Ge,P>$ – $2,3366... 2,3464 \text{ г/см}^3$ (соответственно концентрации фосфора $\sim 1 \cdot 10^{15}$ и $\sim 7,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, германия – $N_{Ge} \sim 8,5 \cdot 10^{19}$ и $N_{Ge} \sim 2,2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$).

Таким образом, наиболее насыщены водородом монокристаллы, полученные из расплава, наименее – стержни поликристаллического кремния, выращенные по методу термического разложения моносилана при температуре $\sim 850 \text{ }^\circ\text{C}$. Большее содержание водорода обычно наблюдается в менее плотных, более пористых образцах, а также при возрастании поверхности межзеренных границ (с уменьшением площади сечения зерен). Также можно говорить о тенденции к возрастанию концентрации водорода с ростом температуры процесса: в монокристаллах, кристаллизация которых происходит при температуре $\sim 1412 \text{ }^\circ\text{C}$, содержание водорода заметно выше, чем в поликристаллических стержнях кремния, получаемых осаждением из газовой фазы на подложку при температурах $850...1150 \text{ }^\circ\text{C}$.

В случае выращивания из расплава повышенное содержание водорода может быть обусловлено поступлением его в кристалл за счет диссоциации остаточных паров воды, присутствующей в атмосфере печи, или захвата гидроксильных групп, содержание которых в кварцевом тигле может достигать 60 ppmw .

Повышенные величины $\tau_{низ}$ в монокристаллах $CZ-Si$, выращенных из смешанных загрузок (сырец и обороты), могут свидетельствовать в пользу возможной пассивации центров рекомбинации водородом, присутствующим в монокристаллах. Однако данная закономерность требует дальнейшего изучения, поскольку $\tau_{низ}$ зависит от содержания фоновых кислорода, углерода, вида легирующего элемента, длительности плавления шихтовой загрузки (гомогенизации расплава), скорости охлаждения выращенного монокристалла и др. Следует также отметить, что в монокристаллах, выращенных только из собственных оборотов, то есть из наиболее насыщенной водородом шихты, величина времени жизни ниже, чем при использовании смешанных загрузок.

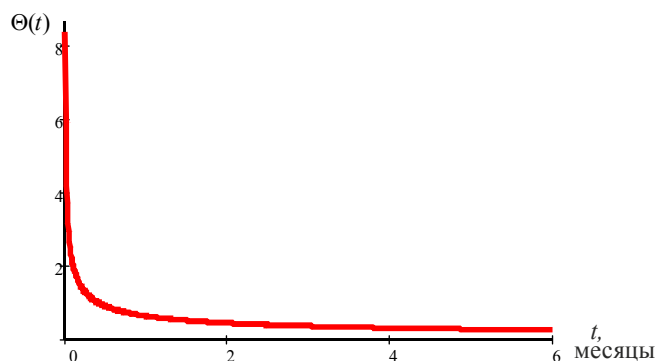
Как известно [9], кристаллы бездислокационного кремния имеют периодический потенциальный рельеф $U(x,y,z)$ для электронов, находящихся в зоне проводимости, который сглаживается после применения термина эффективной массы. Однако наличие дислокаций (одномерного дефекта) вносит существенные искажения в пери-

одическое потенциальное поле твердого тела. Данные искажения можно представить как наличие дополнительной потенциальной ямы ΔU_A , (область растяжения решетки) и потенциального барьера ΔU_B (области сжатия). Это приводит к возникновению эффективных центров рассеяния для подвижных носителей заряда, уменьшая длину их свободного пробега L . Поскольку

$$L = \sqrt{D \cdot \tau} = \tau \cdot \sqrt{\frac{k_b \cdot T}{2m}}, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии носителей заряда, τ – время жизни неравновесного носителя заряда, то с уменьшением величины L уменьшается и значение $\tau_{\text{ннз}}$ (температура T предполагается неизменной). Кроме того, потенциальные ямы имеют дополнительный дискретный спектр энергетических уровней в запрещенной зоне кремния, что также снижает $\tau_{\text{ннз}}$.

Водород в кремнии находится преимущественно в атомарном состоянии в междоузлиях, однако при наличии потенциальных ям, создаваемых дислокациями, может локализоваться в них. При этом происходит сглаживание потенциального рельефа, а также увеличение L и $\tau_{\text{ннз}}$. Энергия связи атома водорода с дислокацией невелика, и с течением времени (при отсутствии дополнительной подпитки водородом) атомы водорода уходят из монокристалла кремния в атмосферу. При этом L и $\tau_{\text{ннз}}$ постепенно возвращаются к своему первоначальному значению (рис. 1).



Выдержка при комнатной температуре (марка 1ф1брт КЭФ 7,5/0,5- 45, ТУ 48-4-295-82)

Рисунок 1 – Изменение $\tau_{\text{ннз}}$ в монокристаллах кремния во времени

Следовательно, уменьшение $\tau_{\text{ннз}}$ монокристаллов кремния можно с достаточной высокой степенью обоснованности связать с делокализацией атомов водорода с дислокаций и их последующей диффузией в объем кремния.

Распространение водорода можно описать математически, используя уравнение одномерной диффузии из ограниченного источника с концентрацией C_0^H в тонком приповерхностном слое. При этом

$$C_0^H = \frac{Q}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}}, \quad (2)$$

где Q – общее количество атомов водорода, введенное в кристалл кремния через 1 см^2 поверхности за время диффузии; D – коэффициент диффузии водорода в кремнии; t – время диффузии.

Предполагая, что Q и D в условиях эксперимента постоянны, тогда соотношение

$$\theta(t) = \frac{C_H^0(t)}{Q} = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} \quad (3)$$

хорошо совпадает с экспериментально полученной зависимостью $\tau(t)$ (рис. 2).

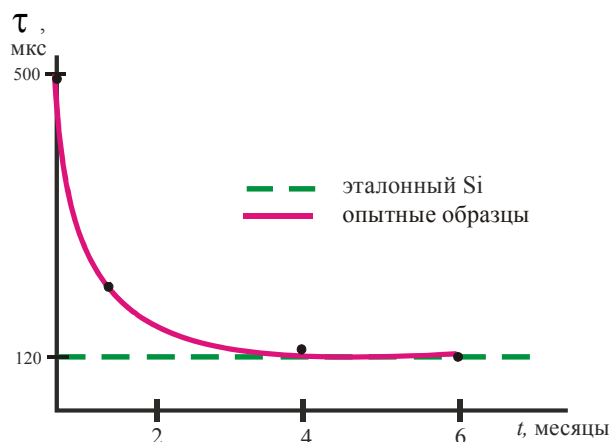


Рисунок 2 – Изменение концентрации водорода в монокристалле кремния во времени

Учитывая достаточно быстрое снижение величины $\tau_{\text{низ}}$ во времени, установленное в данном эксперименте, для нахождения коэффициента диффузии была использована зависимость:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k_b \cdot T}\right), \quad (4)$$

где D_0 – предэкспоненциальный множитель, $D_0 = 2 \text{ см}^2/\text{с}$ [10]; E_a – энергия активации процесса диффузии, $E_a = 0,18 \text{ эВ}$ [10]; T – температура диффузии, $T = 300 \text{ К}$.

Уменьшение концентрации водорода в объеме монокристалла кремния происходит достаточно активно, вследствие диффузии в атмосферу (в условиях эксперимента $D = 2,94 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$) через пленку естественного оксида SiO_2 на поверхности выращенного монокристалла в результате его выдержки при нормальных условиях (атмосферное давление, комнатная температура).

Ранее была установлена деградация электрофизических параметров монокристаллов вследствие их длительного хранения при комнатной температуре [11]. Было показано, что в монокристаллах «электронного качества» с плотностью дислокаций менее 10 см^{-2} (марки КДБ-12, КДБ-10, КЭФ-4,5) $\tau_{\text{низ}}$ снижается. Изменяется также и величина УЭС, но при проведении термообработки, устраняющей термодонорный эффект, УЭС практически всегда восстанавливается, в отличие от $\tau_{\text{низ}}$. В то же время скорость процесса деградации $\tau_{\text{низ}}$ существенно меньше, чем для монокристаллов, выращенных в атмосфере $\text{Ar} + \text{SiH}_4$.

Известно [12], что высокие концентрации кислорода и углерода могут приводить к увеличению скорости поглощения мигрирующих атомов или комплексов водорода, что имеет следствием уменьшение времени жизни (диффузионной длины) в CZ-Si. Поэтому, наряду с возможной «депассивацией» центров рекомбинации из-за рассредоточения атомов водорода, можно говорить о существенном влиянии на деградацию электрофизических параметров монокристаллов процессов распада пересыщенного твердого раствора кислорода в кремнии.

Необходимо также принимать во внимание, что описанные особенности поведения водорода в поликристаллическом кремнии наблюдали в материале, получаемом при атмосферном давлении. В то время современные процессы водородного восстановления трихлорсилана происходят при давлении $6 \cdot 10^5$ Па и более, что может изменить поведение водорода в кремнии, в частности, это относится к трудноразрушаемому, способным к полимеризации связям *Si-H*.

Представляется также целесообразным отметить следующее. При изготовлении интегральных схем необходимо контролировать появление на пластинах окислительных дефектов упаковки (ОДУ) в результате проведения специального окислительного теста (SEMI MF 1809-0704). Эта операция позволяет оценить трансформацию ростовых микродефектов в монокристаллах кремния при термических операциях технологического маршрута, фактически – оценить пригодность монокристалла данного качества для конкретной технологии интегральных систем.

При диффузии, окислении и других термических операциях баланс дефектов в выращенных монокристаллах нарушается, и процессы дефектообразования заново проходят все стадии, начиная с кластеризации вакансий и межузельных атомов и завершаясь образованием различного вида окислительных дефектов упаковки (ОДУ) [13-15]. Размер и плотность образующихся при окислении ОДУ обусловлены температурой, длительностью и средой окисления (сухой, влажный кислород, присутствие соляной кислоты) [16,17]. Характер распределения ОДУ, формируемых на образующихся в процессе роста кислородных преципитатах, зависит от условий выращивания монокристалла [18,19]. В то же время наблюдается существенное различие плотности ОДУ для монокристаллов, легированных бором или фосфором до одинаковых концентраций и выращенных при идентичных величинах V/G (критерий В.В. Воронкова).

По нашему мнению, образование и выявляемость ОДУ в результате термического окисления и химического травления могут быть связаны с различным поведением водорода в монокристаллах *n*- и *p*-типа. Как известно [20,21], введение водорода в легированный кремний (при обработке в плазме атомарного водорода или в процессе жидкостного травления) приводит к пассивации электрически активной примеси, при этом поведение водорода различается в кремнии *n*- и *p*-типа электропроводности. Расчеты, проведенные методом псевдопотенциала [22], позволили получить значения энергии диссоциации для комплексов «водород-бор» «водород-фосфор», равные 0,6 и 0,1 эВ соответственно. Энергия активации диффузии фосфора как минимум в два раза меньше энергии активации пассивированного бора [23]. В процессе химического травления легированного кремния (в течение одинакового времени при комнатной температуре) установлено, что глубина проникновения водорода в *n-Si* больше, чем в *p-Si* вследствие менее эффективного взаимодействия водорода с атомами электрически активной примеси в кремнии *n*-типа [24]. Сравнение спектров ИК-поглощения в легированном кремнии показывает, что комплексы атомов водорода с атомами донорной примеси менее устойчивы, чем с атомами акцепторной примеси [25]. Контроль ОДУ методом просвечивающей электронной микроскопии [26] показал, что в *p-Si*, вследствие большей на порядок концентрации водорода в окрестности дефекта, чем в *n-Si*, дефекты имеют меньший контраст. Это затрудняет их выявляемость методом просвечивающей электронной микроскопии и приводит к результату, когда концентрация дефектов в *p-Si*, меньше на два порядка, чем в *n-Si* [26].

Заключение.

1. Приведенные данные свидетельствуют о достаточно большом количестве накопленных фактов особенностей поведения водорода в кремнии, что необходимо

учитывать при исследовании процессов дефектно-примесного взаимодействия в объеме и на поверхности кристаллического кремния.

2. Нестабильность и быстрый спад во времени высоких значений $\tau_{\text{ннз}}$ в монокристаллах *CZ-Si*, выращенных в атмосфере $Ar+SiH_4$, могут быть связаны с делокализацией атомов водорода с дислокаций и их последующей диффузией из объема монокристалла кремния.

3. Повышенные величины $\tau_{\text{ннз}}$ в монокристаллах *CZ-Si* массой более 20 кг, выращенных из смешанных загрузок (сырец и обороты), могут свидетельствовать о возможной пассивации центров рекомбинации присутствующим в монокристаллах водородом. Однако замедленная деградация $\tau_{\text{ннз}}$ в данном случае позволяет считать миграцию атомов водорода как одну из причин снижения этого параметра, наряду с распадом пересыщенного твердого раствора кислорода в монокристаллах *CZ-Si*.

4. Образование и выявляемость ОДУ в результате термического окисления и химического травления могут быть связаны с различным поведением водорода в монокристаллах *CZ-Si* *n*- и *p*-типа электропроводности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Saga, T.* Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production [Text] / T. Saga // NPG Asia Mater. – 2010. – Vol. 2, No 3. – P. 96-102.
2. Пат. 5641353. США МКИ6 С30В 15/14. Low hydrogen-content silicon crystal with few microdefect (Яп.) [Текст] / Hara A., Koizuka M. Fujitsu Ltd. (Яп.) – № 565592; заявл. 30.11.95; опубл. 24.04.97.
3. *Hara, A.* Effects of grown-in hydrogen on lifetime of CZ-Si crystals [Text] / A. Hara // Jap. J. Appl. Phys. Pt.1. – 1995. – Vol. 34, No 10. – P. 5483-5488.
4. Hydrogen in polycrystalline silicon solar cell material: its role and characteristics [Text] / H. E. Elgamel, J. Nijs, R. Mertens [et al.] // Sol. Energy Mater. and Sol. Cells. – 1998. – Vol. 53, No 3-4. – P. 277-284.
5. Применение водородно-плазменной технологии для модификации свойств кремния и создания структур на его основе [Текст] / А. Г. Ульяшин, А. К. Федотов, Р. Джоб [и др.] // Физико-химия обработки материалов. – 2000. – № 5. – С. 22-27.
6. *Богомаз, А. В.* Особенности свойств кристаллического кремния, содержащего водород [Текст] / А. В. Богомаз, Т. В. Критская, А. Н. Рябец // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2009. – № 3. – С. 17-20
7. Пат. 2927008. США МКИ. В01j 17/00, МКИ 23-273. Оборудование для выращивания монокристаллов кремния [Текст] / *Shockly W.*, опубл. 01.03.1960.
8. *Шварцман, Л. Я.* Применение летучих неорганических гидридов при получении эпитаксиальных структур [Текст] / Л. Я. Шварцман, А. Г. Петрик // Научные труды Гиредмета. – М. : Гиредмет, 1974. – Т. 51. – С. 13-22.
9. *Киреев, А. С.* Физика полупроводников [Текст] / А. С. Киреев. – М. : Высшая школа, 1969. – 590 с. – Библиография в конце каждого раздела.
10. Boron neutralization and hydrogen diffusion in silicon subjected to low-energy hydrogen implantation [Text] / T. Zundel, A. Mesli, J. C. Muller, P. Siffert // Applied Physics A Solids and Surfaces. – 2003. – Vol. 48, Issue 1. – P. 31-40.
11. *Быткин, С. В.* Сравнительный анализ электрофизических параметров монокристаллов кремния, подвергнутых длительному хранению при 300 К / С. В. Быткин, Т. В. Критская [Текст] // Известия вузов. Материалы электронной техники. – 2010. – № 3. – С. 19-23.
12. *Talanin, V. I.* Adout formation of grown-in microdefects in dislocation-free silicon single crystals [Text] / V. I. Talanin, I. E. Talanin, A. A. Voronin // Can. J. Phys. – 2007. – Vol. 85, No 12. – P. 1459-1471.
13. Recent progress in understanding oxygen precipitation in silicon [Text] / J. Vanhellerman, H. Esfandyari, G. Obermeier [et al.] // Electrochem. Soc. Proc. – 1998. – Vol. 13. – P. 101-124.

14. Formation behavior of grown defects in silicon during CZ-crystal growth [Text] / *T. Saihoji, K. Nakamura, H. Nakamura* [et al.] // *Electrochem. Soc. Proc.* – 1998. – Vol. 13. – P. 28-40.
15. Characterization of as-grown defects in silicon [Text] / *G. Kissinger, D. Gräf, U. Lambert* [etc.] [Text] // *Electrochem. Soc. Proc.* – 1998. – Vol. 13. – P. 285-288.
16. Производственная диагностика микродефектов в кремнии на ранней стадии их образования [Текст] / *Т. Ф. Русак, К. Л. Енишерлова, Т. М. Ткачева, Г. Н. Петров* // *Известия вузов. Материалы электронной техники.* – 2001. – № 1. – С. 11-15.
17. Булатов, О. С. Термическое окисление кремния в парах соляной кислоты [Текст] / *О. С. Булатов, С. А. Воронов* // *Электронная техника. Сер. Материалы.* – 1979. – Вып. 8. – С. 74-75.
18. Formation behavior of grown defects in silicon during CZ-crystal growth [Text] / *T. Saihoji, K. Nakamura, H. Nakamura* [etc.] // *Electrochem. Soc. Proc.* – 1998. – Vol. 13. – P. 28-40.
19. Гучетль, Р. И. Образование окислительных дефектов упаковки в кремнии, выращенном методом Чохральского [Текст] / *Р. И. Гучетль, А. А. Кравцов* // *Известия вузов. Материалы электронной техники.* – 2002. – № 3. – С. 11-17.
20. *Jonson, N. M.* Interstitial hydrogen and neutralization of shallow-donor impurities in single-crystal silicon [Text] / *N. M. Jonson, C. Herring* // *Phys. Rev. Lett.* – 1986. – Vol. 56, No 7. – P. 769-772.
21. *Jonson, N. M.* Hydrogen neutralization of shallow-donor impurities in single-crystal silicon [Text] / *N. M. Jonson, C. Herring* // *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* – 1988. – Vol. 104. – P. 277-280.
22. *Chang, K. J.* Theory of hydrogen passivation of shallow-level dopants in crystalline silicon [Text] / *K. J. Chang, D. J. Chandi* // *Phys. Rev. Lett.* – 1988. – Vol. 60, No 14. – P. 1422-1425.
23. *Deak, P.* State and Motion of hydrogen in crystalline silicon [Text] / *P. Deak, L. C. Snyder* // *Phys. Rev. B.* – 1988. – Vol. 37, No 12. – P. 6889-6892.
24. *Feklisova, O. V.* Hydrogen Penetration into Si under Wet Chemical Etching: Experiment and Simulation [Текст] / *O. V. Feklisova, E. B. Yakimov, N. A. Yarykin* // *Sol. State Phenomena.* – 2001. – Vol. 80-81. – P. 121-126.
25. *Bergman, K.* Donor-hydrogen complexes in passivated silicon [Text] / *K. Bergman* // *Phys. Rev. B.* – 1988. – Vol. 37, No 5. – P. 2770-2773.
26. *Jonson, N. M.* Defects in single-crystal silicon induced by hydrogenation [Text] / *N. M. Jonson,* // *Phys. Rev. B.* – 1987. – Vol. 35, No 8. – P. 4166-4169.

Стаття надійшла до редакції 24.05.2013 р.
Рецензент, проф. Ю.В. Трубіцин