

Взаимодействие водорода с радиационными дефектами в кремнии *p*-типа проводимости

© О.В. Феклисова[¶], Н.А. Ярыкин, Е.Б. Якимов, Й. Вебер*

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, 142432 Черноголовка, Россия

* Институт низких температур, Технический университет Дрездена, D-01062 Дрезден, Германия

(Получена 12 марта 2001 г. Принята к печати 3 апреля 2001 г.)

Методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней исследовалось взаимодействие водорода с радиационными дефектами в кремнии *p*-типа проводимости. Водород вводился в кристаллы, облученные электронами с высокой энергией, при жидкостном химическом травлении в растворе азотной и плавиковой кислот при комнатной температуре и последующем отжиге с обратным смещением при 380 К. Обнаружено, что процесс пассивации радиационных дефектов сопровождается образованием новых электрически активных центров с водородозависимым профилем распределения. Впервые показано, что водород пассивирует электрическую активность комплексов C_sC_i . На основе данных о пространственном распределении дефектов и кинетики процесса пассивации проведен анализ возможной природы вновь образующихся центров. Определены радиусы захвата водорода дивакансиями, *K*-центрами, комплексами C_sC_i и новыми дефектами.

Введение

На различных этапах технологических обработок водород, источником которого являются большинство используемых реактивов и даже пары воды, может легко проникать в кристаллы кремния вследствие своей высокой диффузионной способности даже при комнатных температурах [1]. Обладая высокой химической активностью, водород легко вступает в реакции с примесями и дефектами кристаллической решетки, пассивируя электрическую активность целого ряда дефектов с мелкими и глубокими уровнями [2]. В случае мелких акцепторов механизм их взаимодействия с водородом исследован достаточно хорошо [2], для других дефектов вопрос о механизме такого взаимодействия еще не решен. В последние годы обнаружено [3–6], что, помимо пассивации электрической активности, взаимодействие водорода с дефектами и примесями может приводить к формированию новых электрически активных центров, которые являются промежуточными звеньями последовательности превращений, приводящей к полной пассивации электрической активности этих дефектов и примесей.

Собственные точечные дефекты и их комплексы с атомами примесей образуются в кристаллах кремния на различных этапах технологических обработок, поэтому изучение взаимодействия этих дефектов с водородом не только представляет научный интерес, но и имеет практическое значение. При введении водорода в кристаллы с радиационными дефектами, а также после имплантации образцов кремния протонами был найден целый ряд новых, не обнаруживаемых в образцах без водорода, дефектов [7–10]. Так, например, основной дефект, возникающий в кремнии *n*-типа проводимости, с уровнем $E(0.32)$ в большинстве работ связывают с гидрогенизацией комплексов вакансия–кислород (*A*-цент-

ров) [9–11].¹ В кремнии *p*-типа проводимости ситуация более сложная, и практически ни для одного из обнаруженных дефектов, возникающих в результате взаимодействия водорода с радиационными дефектами [7,12], вопрос о природе не решен.

В настоящей работе методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней исследовано взаимодействие водорода с радиационными дефектами в кремнии *p*-типа проводимости. Показано, что концентрация всех радиационных дефектов уменьшается при гидрогенизации, причем этот процесс сопровождается образованием новых электрически активных дефектов. На основе данных о пространственном распределении новых дефектов и о кинетике процесса пассивации радиационных дефектов проведен анализ возможной природы образующихся дефектов. Оценены радиусы захвата водорода для различных радиационных дефектов.

Методика

В работе использовался набор кристаллов кремния *p*-типа проводимости, выращенных методом Чохральского (*Cz*) и бестигельной зонной плавки (*FZ*), со средними степенями легирования бором (от $6 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) и различным содержанием кислорода и углерода. Образцы облучались электронами с энергиями от 2 до 6 МэВ при комнатной температуре в диапазоне доз от 10^{14} до 10^{16} см^{-3} . Водород вводился в облученные кристаллы в результате жидкостного химического травления (ЖХТ) в растворе фтористоводородной и азотной кислот ($\text{HF} : \text{HNO}_3 = 1 : 7$) при комнатной температуре, скорость травления составляла 2–4 мкм/мин.

¹ Здесь и далее обозначения типа $E(0.32)$, $H(0.30)$ показывают положение энергетического уровня. Буква *E* обозначает, что энергия отсчитывается от дна зоны проводимости, а буква *H* — от потолка валентной зоны. Числовые значения приведены в эВ.

[¶] E-mail: feklisov@ipmt-hpm.ac.ru

Барьеры Шоттки формировались путем термического напыления Al в вакууме. Омические контакты наносились на обратную сторону образцов Al + Ga-пастой. Профили распределения носителей заряда определялись из вольт-фарадных характеристик ($C-V$ -характеристик). Спектры глубоких уровней измерялись методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) в диапазоне температур от 40 до 300 К на стандартной установке с использованием в качестве коррелятора усилителя с фазовым детектированием. В процессе измерений спектров глубоких уровней подавались заполняющие импульсы длительностью 1 мс. Пространственное распределение центров с глубокими уровнями измерялось при постоянном обратном смещении и переменной амплитуде заполняющего импульса на компьютеризированной DLTS-установке; при вычислении профиля принималось во внимание неоднородное распределение легирующей примеси.

Результаты эксперимента

Известно, что в процессе облучения кремния высокоэнергетичными электронами генерируются собственные точечные дефекты — вакансии (V) и междоузлия (I). При этом междоузлия вступают в реакции замещения с некоторыми примесями [13], вытесняя их в междоузельное положение (C_i и B_i). Мигрируя в кремнии, эти вторичные дефекты в свою очередь вступают в различные реакции, образуя устойчивые при комнатной температуре дефекты [14], к которым относятся комплексы углерод-кислород C_iO_i (K -центры) с $H(0.36)$, пары бор-кислород B_iO_i с $E(0.25)$, пары бор-бор B_iB_j с $H(0.30)$ и метастабильные комплексы углерод-углерод C_sC_i с $E(0.1/0.17)$ и $H(0.05/0.09)$. Вакансии трансформируются в комплексы вакансия-кислород $V-O$ (A -центры) с $E(0.17)$ и дивакансии V_2 с $E(0.23)$, $E(0.4)$ и $H(0.21)$. При этом соотношение стабильных радиационных дефектов в кремнии сильно зависит от примесного состава исходного кристалла.

Метод DLTS позволяет наблюдать только центры захвата основных носителей заряда, т. е. в кристаллах p -типа можно тестировать лишь центры с глубокими уровнями, расположенными в нижней половине запрещенной зоны. Стандартный спектр DLTS в облученных кристаллах p -типа состоит из пиков, обусловленных донорным уровнем дивакансий V_2 с $H(0.21)$, комплексами углерод-кислород C_iO_i (K -центры) и в кристаллах FZ -Si метастабильными комплексами углерод-углерод C_sC_i .

Влияние гидрогенизации на энергетический спектр глубоких уровней кремния, выращенного методом Чохральского и облученного электронами с высокой энергией, представлено на рис. 1. Непосредственно после ЖХТ в спектре DLTS в этих образцах практически никаких изменений не наблюдается и детектируются лишь уровни, соответствующие "обычным" радиационным дефектам — дивакансиям и K -центрам (рис. 1, штриховая

кривая). Это объясняется тем, что в кристаллах кремния p -типа проводимости водород, проникающий в приповерхностные слои, весьма эффективно захватывается бором. При этом происходит формирование электрически

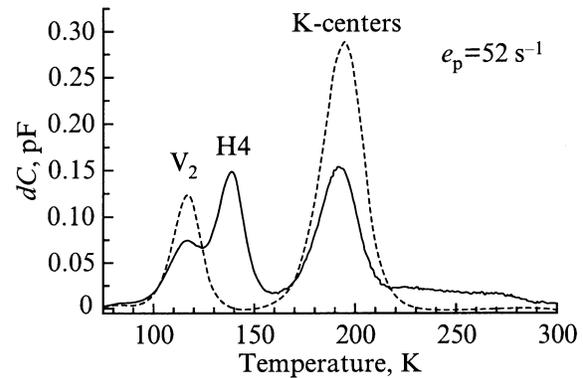


Рис. 1. Спектры DLTS облученного p -кремния, выращенного методом Чохральского, после жидкостного химического травления (штриховая линия) и последующего отжига с обратным смещением при $T = 380$ К (сплошная линия).

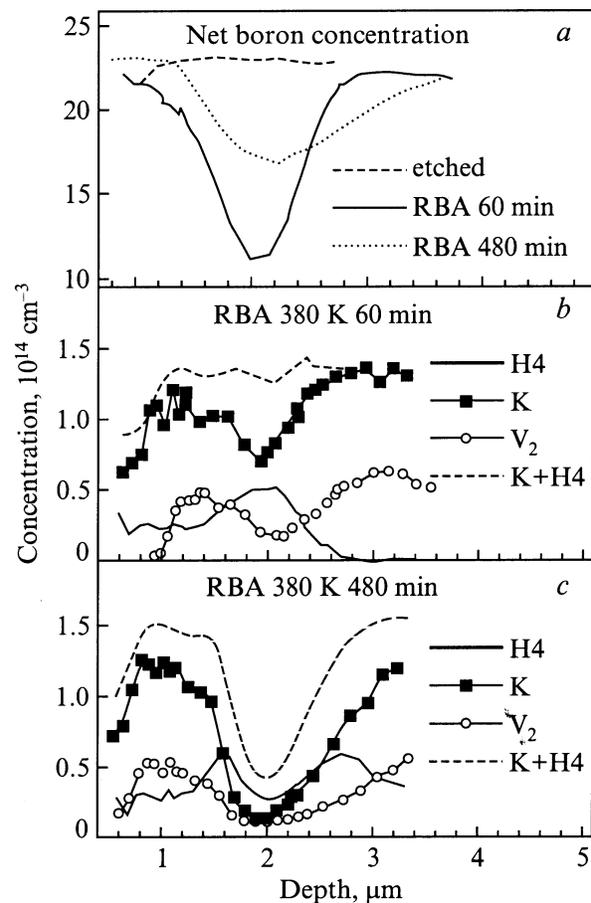


Рис. 2. Профили концентраций электрически активного бора (a) и центров с глубокими уровнями (b, c) в облученном Sz -кремнии после жидкостного химического травления и отжига с обратным смещением (4В) в течение 60 и 480 мин.

неактивных пар В–Н [15]. При температурах 340–380 К связь В–Н становится нестабильной. Поэтому отжиг при таких температурах с приложенным обратным смещением (RBA) стимулирует проникновение освободившегося водорода на большую глубину, где он может вступать в реакцию как с бором, так и с другими дефектами. При этом контролировать проникновение водорода можно с помощью *C–V*-измерений по формированию характерного провала в профиле электрически активного бора в процессе изотермического RBA [15].

После RBA в спектре DLTS облученных *Cz*-образцов наблюдаются следующие изменения: уменьшение амплитуды пиков радиационных дефектов и появление нового пика *H4* с *H*(0.28) (рис. 1, сплошная кривая). Образование центров *H4* наблюдалось во всех *Cz*- и *FZ*-кристаллах в результате RBA при $T = 340\text{--}380$ К. Отметим, что в необлученных кристаллах образования каких-либо новых центров с глубокими уровнями при гидрогенизации зарегистрировано не было. На рис. 2 представлены профили концентраций электрически активного бора, радиационных дефектов и центров *H4* после ЖХТ и последующего отжига с приложенным обратным смещением при $T = 380$ К. Видно, что с увеличением длительности RBA концентрация *K*-центров и дивакансий в гидрогенизированной области уменьшается. Концентрация новых центров *H4* растет, проходит через насыщение и затем начинает уменьшаться. При этом все изменения в профиле распределения центров *H4* происходят в области, насыщенной водородом. Кроме того, было обнаружено, что во многих *Cz*-кристаллах на начальных стадиях RBA суммарная концентрация *K*- и *H4*-центров имеет равномерный профиль распределения (рис. 2, *b*), т.е. уменьшение концентрации *K*-центров примерно равно увеличению концентрации центров *H4*.

При облучении кремния, выращенного методом бестигельной зонной плавки, помимо дивакансий и *K*-центров образуются комплексы углерод–углерод C_sC_i , которые надежно могут быть идентифицированы по их метастабильному поведению [16]. На рис. 3 представлены спектры DLTS, измеренные в облученном *FZ*-кремнии, где после ЖХТ регистрируются лишь пики, обусловленные радиационными дефектами (штриховая кривая). Используя ту же процедуру отжига с обратным смещением, мы обнаружили, что сигнал от всех радиационных центров уменьшается и одновременно наблюдается появление центров *H4* и *H3* (рис. 3, сплошная кривая). Характер образования центров *H4* в процессе RBA в этих образцах подобен тому, что мы наблюдали в *Cz*-кристаллах, т.е. при увеличении длительности RBA концентрация центров *H4* возрастала с последующим образованием минимума в области с высоким содержанием водорода, и профиль распределения центров *H4* хорошо коррелировал с профилем распределения водорода. Однако баланс между уменьшением *K*-центров и образованием центров *H4* отсутствовал в *FZ*-кристаллах, и в некоторых случаях концентрация образующихся центров *H4* вдвое превосходила исходную концентрацию *K*-центров.

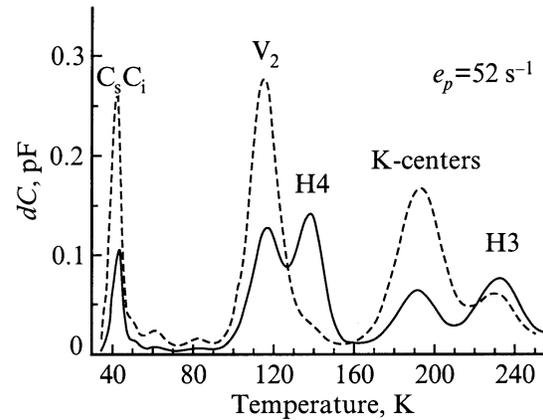


Рис. 3. Спектры DLTS облученного *p*-кремния, выращенного методом бестигельной зонной плавки, после жидкостного химического травления (штриховая линия) и последующего отжига с обратным смещением при $T = 380$ К (сплошная линия).

Концентрация центров *H3* росла с увеличением длительности RBA и в ряде случаев существенно превосходила исходную концентрацию дивакансий и *K*-центров. Из рис. 3 (сплошная кривая) видно, что уменьшается также и концентрация центров C_sC_i . Насколько нам известно, это первое экспериментальное наблюдение влияния водорода на электрическую активность этого комплекса. В настоящее время мы не можем связать исчезновение C_sC_i с появлением какого-либо другого уровня. Поэтому остается неясным, происходит ли в данном случае формирование комплекса $C_sC_i\text{--}H$ или водород стимулирует распад пары C_sC_i . Отметим, однако, что теоретические расчеты [17] свидетельствуют о возможности формирования водородсодержащего комплекса на основе центра C_sC_i .

Еще раз подчеркнем, что все наблюдаемые изменения в спектре радиационных дефектов и новых центров *H4* и *H3* по своему пространственному положению совпадали с областью распределения водорода.

Обсуждение результатов

Проанализируем реакции последовательного присоединения водорода к дефекту с концентрацией N_0 . Предполагая, что продукты этого взаимодействия при используемых в экспериментах температурах стабильны, взаимодействие дефекта с водородом и образование новых комплексов в произвольной точке кристалла можно представить в виде [18]

$$\frac{\partial N_0}{\partial t} = -4\pi D r_0 N_0 [H], \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = 4\pi D (r_{i-1} N_{i-1} - r_i N_i) [H], \quad (1.2)$$

где N_i — концентрация комплексов, содержащих i атомов водорода, $r_{0,i}$ — радиус захвата атома водорода

соответствующим комплексом ($i = 1, 2, 3 \dots$), $[H]$ и D — концентрация и коэффициент диффузии водорода. Для решения этих уравнений нам не хватает значений D , r , $[H]$. Однако эту проблему можно обойти, преобразовав систему уравнений (1.1), (1.2) к следующему виду:

$$\frac{\partial N_0}{\partial \Phi} = -r_0 N_0, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial \Phi} = r_{i-1} N_{i-1} - r_i N_i, \quad (2.2)$$

где

$$\Phi = \int_0^{t_0} 4\pi D[H] dt. \quad (3)$$

В условиях динамического равновесия между $[H]$ и $[B-H]$ концентрация подвижного (не связанного с бором) водорода может быть найдена как

$$[H] = \frac{\nu_{BH}}{4\pi D r_{BH}} \frac{[B]_0 - [B]}{[B]}, \quad (4)$$

где ν_{BH} — скорость диссоциации пар В-Н при заданной температуре, r_{BH} — радиус захвата водорода на бор, $[B]_0$ — полная концентрация бора и $[B]$ — концентрация электрически активного, не пассивированного водородом, бора. Величины r_{BH} , ν_{BH} были экспериментально определены в [15] и составляют $r_{BH} = 4$ нм, $\nu_{BH} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ при 380 К. Подставляя (4) в (3), можно вычислить значения Φ из экспериментальных данных в конкретных точках как функцию длительности RBA t_0 . Профилирование методом DLTS позволяет нам определить концентрацию радиационных дефектов и новых центров после каждого шага RBA. Из $C-V$ -измерений можно восстановить распределение электрически активного бора и с помощью (3), (4) рассчитать значения Φ после каждого шага RBA. Далее, ставя в соответствие экспериментально измеренные в произвольной точке кристалла значения концентрации дефектов значению Φ в этой же точке, получаем зависимость $N_{0,i}$ от Φ : $N^{\text{exp}}(\Phi)$. Сопоставляя полученные зависимости $N^{\text{exp}}(\Phi)$ с теоретическими зависимостями $N^{\text{th}}(\Phi)$, являющимися решениями (2.1) для N_0 и (2.2) для N_i и варьируя в качестве свободных параметров $r_{0,i}$, можно оценить радиус захвата атома водорода дефектом. На рис. 4 представлены зависимости от величины Φ концентраций K -центров, дивакансий и центров H_4 , измеренных на нескольких глубинах поблизости от провала в профиле электрически активного бора в Cz -кремнии. Для K -центров и дивакансий сплошные линии на рис. 4 рассчитаны в соответствии с (2.1) с использованием r_0 в качестве подгоночного параметра для достижения наибольшего соответствия экспериментальным данным.

Использование вышеописанной схемы для определения радиусов захвата водорода на дефекты дает возможность сравнить параметры реакции для различных дефек-

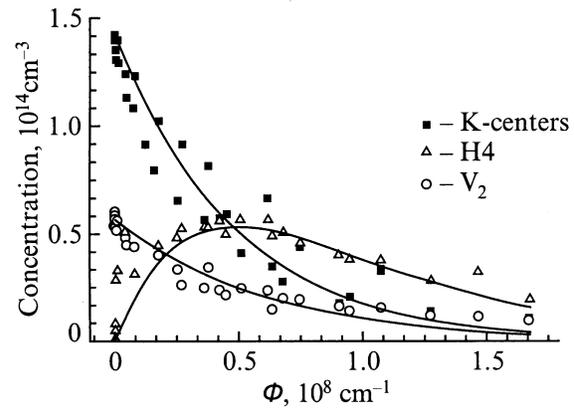


Рис. 4. Кинетика трансформации дефектов в облученном Cz -кремнии в процессе отжига с обратным смещением при $T = 380$ К. Значения Φ рассчитывались по формуле (3) с использованием профилей концентрации электрически активного бора.

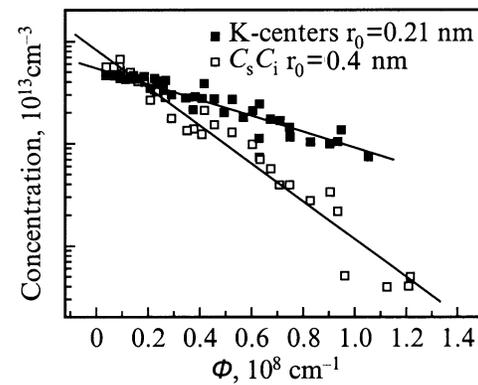


Рис. 5. Кинетика трансформации K -центров и комплексов $C_s C_i$ в облученном FZ -кремнии в процессе отжига с обратным смещением при $T = 380$ К.

тов. Значения радиуса захвата водорода дивакансиями как в Cz -, так и в FZ -кристаллах по нашим оценкам находились в пределах 0.14–0.17 нм. Для K -центров были получены значения от 0.14 до 0.21 нм. Большой разброс, возможно, обусловлен тем, что в пик в спектре DLTS, соответствующий K -центрам, может давать вклад другой дефект с близкой энергией активации [19], и кинетика гидрогенизации в этом случае носит более сложный характер. Тем не менее следует отметить, что значения радиусов захвата водорода на K -центры и дивакансии достаточно близки. Кинетика пассивации комплексов $C_s C_i$ в FZ -Si представлена на рис. 5, где для сравнения приведена также кинетика пассивации K -центров. Наилучшее согласие кривой, рассчитанной в соответствии с (2.1), с экспериментальными данными достигалось при значении радиуса захвата водорода комплексами $C_s C_i$ $r_0 \approx 0.4$ нм, что примерно в 2–3 раза больше, чем для K -центров и дивакансий.

Теперь проанализируем процессы образования новых водородсодержащих дефектов *H3* и *H4*. Центры *H3* были обнаружены в концентрации, сравнимой с концентрацией основных радиационных дефектов, во всех исследованных *FZ*-кристаллах, однако во многих *Cz*-образцах они практически отсутствовали (ср. рис. 1 и рис. 3). Появление в кремнии *p*-типа проводимости центров с энергией активации $H(0.51)$, похожих на центры *H3*, наблюдалось после имплантации либо ионов бора, либо ионов водорода в работе [12], где был сделан вывод, что это комплексы межузельного бора и водорода. В наших экспериментах образование центров *H3* наблюдалось в легированных бором облученных образцах в процессе отжига при 380 К в области с высоким содержанием водорода. Это не противоречит выводам [12], однако вопрос об источнике межузельного бора, особенно в облученных кислородом *FZ*-кристаллах, остается пока открытым.

Центры *H4* формировались во всех исследуемых облученных образцах. Образование центров, аналогичных *H4*, уже наблюдалось в [7], где также была показана их связь с водородом, но микроскопическая природа этих центров установлена не была. Полагая, что комплексы *H4* являются продуктом взаимодействия водорода с радиационными дефектами, рассмотрим наиболее вероятные дефекты в качестве источника образования *H4*. Практически во всех исследованных кристаллах концентрация центров *H4* в максимуме превосходила концентрацию дивакансий в объеме кристалла, к тому же центры *H4* возникали при гидрогенизации в кристаллах, где V_2 предварительно были отожжены. Поэтому мы исключаем дивакансии из нашего дальнейшего рассмотрения. С другой стороны, в *Cz*-кристаллах на начальных стадиях RBA уменьшение концентрации *K*-центров полностью компенсировалось ростом концентрации *H4* (рис. 2, *b*), откуда логично предположить, что *H4* — это комплексы *K*-центров с водородом [20]. Характер изменений концентрации центров *H4* в процессе RBA можно описать следующим образом: на первых этапах RBA водород, освобождающийся вследствие диссоциации пар В–Н, захватывается *K*-центрами, образуя комплексы $C_iC_i\text{--}H$ (*H4*), при дальнейшем увеличении концентрации этих комплексов они сами вступают в реакцию с водородом, трансформируясь в другие, вероятно, электрически неактивные дефекты, путем присоединения еще одного атома водорода. Поскольку этот процесс происходит быстрее в области с максимальной концентрацией водорода, то поэтому в профиле распределения центров *H4* появляется провал (рис. 2, *c*).

Зависимость концентрации центров *H4* в *Cz*-Si от величины Φ хорошо описывается с помощью (2.2) в предположении, что они возникают из *K*-центров, с использованием для радиусов захвата *K*-центрами первого и второго атомов водорода значений $r_0 = 0.21$ нм и $r_1 = 0.2$ нм соответственно (рис. 4). Это также может служить дополнительным аргументом в пользу сделанного предположения о связи *H4* с *K*-центрами.

В *FZ*-Si, как отмечалось выше, баланс между уменьшением *K*-центров и образованием центров *H4* отсутствует и концентрация образующихся центров *H4* превосходит даже исходную концентрацию *K*-центров. Этот результат уже трудно описать в рамках предложенной структуры центров *H4* как комплекса *K*-центра с атомом водорода. Для объяснения этого факта можно сделать несколько предположений.

Во-первых, вклад в пик, обозначенный как *H4* в спектре DLTS, может давать какой-то другой уровень, близкий по энергии *H4*. Однако его формирование также должно определяться присутствием водорода. Из [21] известно, что водород может стимулировать перестройку дефектов в кремнии. Можно предположить, что в качестве продуктов такой реакции в облученных образцах *p*-типа проводимости могут выступать, например, комплексы V_iC_s или V_iB_s , обладающие близкими к *H4* энергиями активации — соответственно $H(0.29)$ и $H(0.30)$ [22]. Образование комплексов V_iC_s в концентрации, превосходящей концентрацию *K*-центров, и равномерно распределенных по объему кристалла, наблюдалось после отжига при $\sim 200^\circ\text{C}$. Температурное положение пика, соответствующего V_iC_s , отличается на несколько градусов от положения пика, определяемого центрами *H4*. Однако разрешающая способность стандартной DLTS-методики не позволяет надежно их разделять, если оба типа центров присутствуют в образце. Пик комплексов V_iB_s еще ближе в спектре DLTS к сигналу от центров *H4*.

Во-вторых, результатом стимулированной водородом перестройки каких-то дефектов в *FZ*-Si может быть образование дополнительных *K*-центров либо уже сразу гидрогенизированных *K*-центров, т.е. центров *H4*. В этом случае необходимо предположить, что под воздействием водорода возникают подвижные изолированные атомы межузельного углерода C_i или комплексы $C_i\text{--}H$ (тоже подвижные согласно [17]), которые могут захватываться на кислород. В качестве источника C_i или $C_i\text{--}H$ могут служить комплексы C_iC_s , которые, как было показано выше, исчезают при RBA. Однако и в такой схеме остаются некоторые противоречия, такие, например, как образование центров *H4* в концентрации, превосходящей даже суммарную концентрацию *K*-центров и комплексов C_sC_i .

Наконец, в-третьих, можно предположить, что *K*-центры вовсе не являются источником центров *H4*, а эти центры образуются из каких-то других дефектов, например *A*-центров, образующихся при облучении в достаточно большой концентрации. Однако в этом случае остается непонятной четкая корреляция между *K*-центрами и центрами *H4* в *Cz*-Si. Кроме того, при ЖХТ облученного кремния *n*-типа проводимости появляются центры *E4* с $E(0.32)$, которые, согласно [9,11], и являются комплексами *A*-центров с водородом. Трансформация *A*-центров в центры *E4* под действием света в имплантированных протонами кристаллах *n*-кремния наблюдалась и в [10]. Для окончательного решения вопроса о природе центров *H4* необходимы дополнительные исследования.

Заключение

Методом DLTS исследовалось влияние гидрогенизации на энергетический спектр дефектов в облученных кристаллах кремния p -типа проводимости при жидкостном химическом травлении и последующем отжиге. Обнаружено, что гидрогенизация радиационных дефектов сопровождается образованием новых электрически активных центров $H4$ и $H3$. На основе анализа профилей распределения дефектов после ЖХТ и РВА сделано предположение, что центры $H4$ являются комплексами K -центров с водородом, но отмечено различие в формировании $H4$ в Cz - и FZ -кристаллах. Исследование кинетики гидрогенизации радиационных и вновь образующихся дефектов позволяет оценить радиус захвата водорода дефектами, что было сделано для дивакансий, K -центров, комплексов C_sC_i и центров $H4$.

Настоящая работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант РФФИ-ННИО 00-02-04002) и Deutsche Forschungsgemeinschaft (грант 436 RUS 113/166/0).

Список литературы

- [1] C.H. Seager, R.A. Anderson, J.K.G. Panitz. *J. Mater. Res.*, **2** (1), 96 (1987).
- [2] S.J. Pearton, J.W. Cordett, M. Stavola. *Hydrogen in Crystalline Semiconductors* (Berlin, Springer, 1992).
- [3] J.-U. Sachse, E.Ö. Sveinbjörnsson, W. Jost, J. Weber, H. Lemke. *Phys. Rev. B*, **55**, 16 176 (1997).
- [4] J.-U. Sachse, J. Weber, H. Lemke. *Mater. Sci. Forum*, **258–263**, 307 (1997).
- [5] E.Ö. Sveinbjörnsson, Ö. Engström. *Phys. Rev. B*, **52**, 4884 (1995).
- [6] N. Yarykin, J.-U. Sachse, J. Weber, H. Lemke. *Mater. Sci. Forum*, **258–263**, 301 (1997).
- [7] K. Irmscher, H. Klose, K.J. Maas. *J. Phys. C*, **17**, 6317 (1984).
- [8] A. Hallen, B.U.R. Sundquist, Z. Paska, B.G. Svensson, M. Rosling, J. Tiren. *J. Appl. Phys.*, **67**, 1266 (1990).
- [9] O. Feklisova, N. Yarykin. *Semicond. Sci. Technol.*, **12**, 742 (1997).
- [10] Y. Tokuda. *Japan. J. Appl. Phys.*, **37**, 1815 (1998).
- [11] A.R. Peaker, J.H. Evans-Freeman, P.Y.Y. Kan, L. Rubaldo, I.D. Hawkins, K.D. Vernon-Parry, L. Dobaczewski. *Physica B*, **273–274**, 243 (1999).
- [12] S. Fatima, C. Jagadich, J. Lalita, B.G. Svensson, A. Hallen. *J. Appl. Phys.*, **85** (5), 2562 (1999).
- [13] G.D. Watkins. *Radiation Damage in Semiconductors* (Dunod, Paris, 1965).
- [14] G.D. Watkins. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **469**, 139 (1997).
- [15] T. Zundel, J. Weber. *Phys. Rev. B*, **39**, 13 549 (1989).
- [16] W. Song, X.D. Zhan, B.W. Benson, G.D. Watkins. *Phys. Rev. B*, **42**, 5765 (1990).
- [17] P. Leary, R. Jones, S. Öberg. *Phys. Rev. B*, **57** (7), 3887 (1998).
- [18] N. Yarykin, J.-U. Sachse, H. Lemke, J. Weber. *Phys. Rev. B*, **59** (8), 5551 (1999).
- [19] P.M. Mooney, L.J. Cheng, M. Süli, J.D. Gerson, J.W. Corbett. *Phys. Rev. B*, **15** (8), 3836 (1977).

- [20] O. Feklisova, N. Yarykin, Eu. Yakimov, J. Weber. *Phys. B*, **273–274**, 235 (1999).
- [21] С.В. Ковешников, С.В. Носенко, Е.Б. Якимов. *ФТП*, **22**, (5), 922 (1988).
- [22] P.J. Drevinsky, C.E. Cafer, S.P. Tobin, J.C. Mikkelsen, L.C. Kimerling. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **104**, 167 (1988).

Редактор Л.В. Шаронова

Hydrogen interaction with radiation defects in p -type silicon

O.V. Feklisova, N. A.Yarykin, Eu.B. Yakimov, J. Weber*

Institute of Microelectronics Technology RAS,
142432 Chernogolovka, Russia

* Institut für Tieftemperaturphysik TU Dresden,
D-01062 Dresden, Germany

Abstract Hydrogen interaction with radiation defects in p -type silicon has been investigated by deep-level non-stationary spectroscopy. Hydrogen was introduced into the high-energy electron-irradiated crystals under chemical etching in acid solutions at room temperature followed by the reverse-bias annealing at 380 K. It is observed that passivation of the irradiation-induced defects was accompanied by formation of novel electrically active defects with hydrogen-related profiles. Effect of hydrogen on the electrical activity of the C_sC_i complexes is shown for the first time. Based on the spatial distribution and passivation kinetics, possible nature of the novel complexes is analyzed. The radii for hydrogen capture by divacancies, K -centers, C_sC_i centers and the novel complexes are determined.