

Образование и отжиг метастабильных комплексов межузельный кислород—межузельный углерод в кремнии n - и p -типа

© Л.Ф. Макаренко*, Ф.П. Коршунов⁺, С.Б. Ластовский⁺, Л.И. Муринов⁺, М. Молл[°], И. Пинтилие[◇]

* Белорусский государственный университет,

220050 Минск, Республика Беларусь

⁺ Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,

220072 Минск, Республика Беларусь

[°] CH-1211 RH-DT, ЦЕРН,

Женева, Швейцария

[◇] Национальный институт физики материалов,

RO 077125 Магурел, Бухарест, Румыния

(Получена 1 апреля 2014 г. Принята к печати 8 апреля 2014 г.)

Экспериментально показано, что в отличие от стабильной конфигурации комплекса (межузельный углерод—межузельный кислород) (C_iO_i) его метастабильная конфигурация ($C_iO_i^*$) не может быть обнаружена в кремниевых p^+-n -структурах методом емкостной спектроскопии. Скорости перестройки $C_iO_i^* \rightarrow C_iO_i$ практически одинаковы в кремнии n - и p -типа с концентрацией носителей заряда менее 10^{13} см^{-3} . Установлено, что вероятности одновременного формирования стабильной и метастабильной конфигураций исследуемого комплекса при присоединении атома межузельного углерода к атому межузельного кислорода близки к 50%. Это объясняется ориентационной зависимостью потенциала взаимодействия атома межузельного кислорода с диффундирующим к нему атомом межузельного углерода.

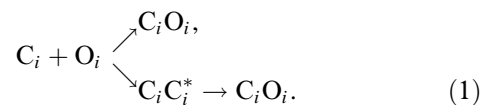
1. Введение

Примесные атомы углерода активно взаимодействуют с другими примесями и дефектами в кремнии. Процессы такого взаимодействия протекают как при изготовлении кремниевых приборов, так и при их функционировании в радиационных полях [1].

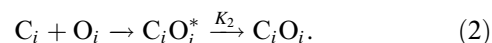
Весьма высокая реакционная активность характерна для межузельных атомов углерода (C_i), которые образуются по механизму Уоткинса при облучении кремния высокоэнергетическими частицами. Будучи подвижными при комнатной температуре, атомы C_i захватываются другими примесями с образованием ряда стабильных электрически активных комплексов [1]. Одним из таких дефектных комплексов является пара межузельный кислород—межузельный углерод (C_iO_i). Эта пара является одним из наиболее исследованных дефектных комплексов [1–3]. Тем не менее имеет место существенный пробел в понимании атомного механизма непосредственного образования этого комплекса и влияния состояния электронной подсистемы на процесс взаимодействия между C_i и O_i . Этот пробел в значительной степени обусловлен противоречивостью имеющихся экспериментальных данных о кинетике образования и электронных свойствах метастабильной конфигурации рассматриваемого комплекса, которую будем далее обозначать как $C_iO_i^*$.

На основании данных измерений емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) в работе [4] было обнаружено, что процесс образования стабильной конфигурации C_iO_i в p -Si может быть описан посредством

двух параллельных реакций:



В то же время в работах [5–6] утверждалось, что в n -Si имеет место только последовательный процесс



Вообще говоря, возможность реализации этих двух различных механизмов формирования комплекса C_iO_i может быть связана с особенностями влияния электронных процессов на диффузию C_i [7] и возникновением особенностей в формировании стабильной конфигурации C_iO_i в кристаллах Si с различным типом легирования. Однако такая интерпретация не согласуется с данными ИК-спектроскопии [3], согласно которым даже при очень больших дозах электронного облучения имеет место одновременное формирование комплексов $C_iO_i^*$ и C_iO_i . Возникшее противоречие требует более детальных исследований как электронных характеристик метастабильных комплексов, так и процессов их формирования и трансформации в стабильную конфигурацию в кремнии как n -, так и p -типа. Цель настоящей работы заключалась в проведении таких исследований.

2. Детали эксперимента

В работе использовались два типа диодных структур. Структуры первого типа (n^+-p -структуры) создавались диффузией фосфора в пластины кремния p -типа

проводимости, выращенные по методу Чохральского. Концентрация дырок в базе этих структур, определенная из вольт-фарадных характеристик, составляла $\sim 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Второй тип диодов (p^+-n -структуры) с концентрацией электронов в базе $\sim 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ был создан на основе зонного кремния n -типа проводимости, легированного кислородом путем высокотемпературной диффузии из окисла. Содержание кислорода в диодах первого и второго типа составляло $\sim 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $\sim 2.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Концентрация углерода в обоих типах структур, по нашим оценкам, была меньше 10^{16} см^{-3} (ниже порога чувствительности метода SIMS).

Структуры облучались быстрыми электронами ($E_e = 6 \text{ МэВ}$) при температуре 273 К. Флюенсы электронов для образцов первого и второго типов были $4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Плотность потока электронов была $10^{11} \text{ см}^{-2}/\text{с}$. После облучения образцы устанавливались в измерительный криостат DLTS-спектрометра без нагрева выше температуры 273 К. Спектры DLTS измерялись в интервале температур 80–310 К при значении обратного смещения -5 В с использованием заполняющих импульсов двух видов. В первом случае во время действия импульса заполнения напряжение на диоде либо было нулевым, либо оставалось отрицательным, и мы получали заполняющие импульсы, не изменяющие концентрацию неосновных носителей в базе диода. Этот режим соответствует стандартному варианту метода релаксационной спектроскопии глубоких уровней (DLTS). Во втором случае использовали заполняющие импульсы положительной полярности, когда происходила инжекция неосновных носителей заряда через p - n -переход. Этот режим измерения мы будем в дальнейшем обозначать как MC-DLTS. В режиме MC-DLTS длительность импульса заполнения $t_p = 0.1 \text{ с}$, напряжение во время импульса заполнения $U_f = +2 \text{ В}$ и окно скорости эмиссии $e = 19.1 \text{ с}^{-1}$. В режиме DLTS устанавливались следующие параметры: $t_p = 0.01 \text{ с}$, $U_f = 0 \text{ В}$ и $e = 19.1 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ для p^+-n -диодов и $t_c = 0.1 \text{ с}$, $U_f = -2 \text{ В}$ и $e = 19.1 \text{ с}^{-1}$ для n^+-p -диодов.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлены спектры DLTS и MC-DLTS, полученные для одного из исследуемых диодов на основе p -Si до начала процедуры отжига. Пики $H019$, $H029$ и $H035$ хорошо известны и идентифицированы как принадлежащие дивакансии и тривакансии (V_2 и V_3), межузельному углероду (C_i) и комплексу C_iO_i [2,8,9]. Перед первым измерением через облученные диоды пропускался прямой ток плотностью 0.5 А/см^2 при 78 К для обеспечения завершения реакции $\text{Si}_i + \text{C}_s \rightarrow \text{C}_i$ [4,10]. После проведения такой процедуры амплитуды пиков $H019$ и $H029$ несколько возрастали, достигая при этом своих максимальных значений. Незначительно изменялась также высота пика $H035$.

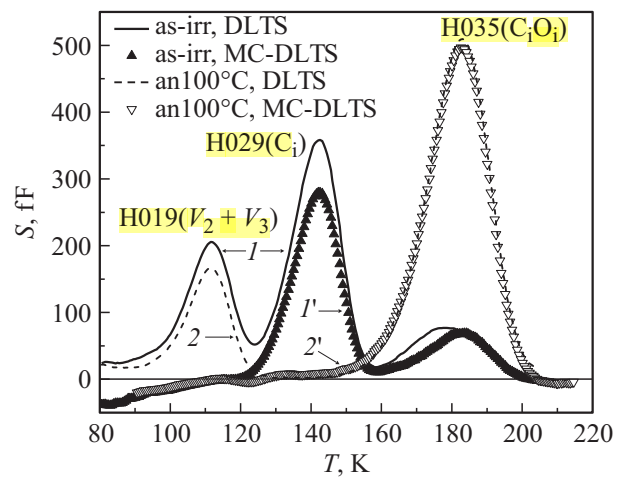


Рис. 1. Спектры DLTS (линии) и MC-DLTS (точки), облученных электронами кремниевых n^+-p -диодов до начала (кривые 1 и 1') и после завершения (кривые 2 и 2') отжига C_i .

Здесь следует отметить, что время облучения ($t \leq 1 \text{ мин}$) при температуре $T_{\text{irr}} = 273 \text{ К}$ относительно мало для образования C_iO_i в условиях термического равновесия. Тем не менее можно ожидать его образования как результат рекомбинационно-индуцированной диффузии C_i [7]. Нельзя также исключить возможность принадлежности невысокого пика $H035$, наблюдающегося сразу после облучения, какому-то неидентифицированному еще дефекту [11]. Однако его амплитуда мала по сравнению с амплитудой пика $H035$ после отжига при 100°C и его влияние на определение окончательной концентрации комплекса C_iO_i будет незначительным. Тем не менее его присутствие следует учитывать при оценке погрешностей определения вклада близко расположенных пиков DLTS на промежуточных стадиях отжига.

Наличие комплекса $C_iO_i^*$ проявляется в спектрах DLTS как небольшой сдвиг пика $H035$ в область низких температур и его некоторое уширение. Суперпозицию двух пиков, связанных с C_iO_i и $C_iO_i^*$, будем обозначать как $H035b$ (рис. 2, кривая 1). Это связано с тем, что скорости эмиссии дырок C_iO_i и $C_iO_i^*$ очень близки [4,10].

Основная проблема при изучении кинетики образования C_iO_i в кремнии p -типа заключается в корректном определении концентраций самого комплекса C_iO_i и его метастабильной конфигурации $C_iO_i^*$ из данных DLTS. Ясно, что в этом случае простой метод обработки данных не работает и требуется специальная процедура. Именно сложность анализа пика $H035b$ объясняет относительно большой разброс в параметрах $C_iO_i^*$, определенных разными авторами [4,5,7]. Наличие такого разброса заставляет сомневаться в корректности процедуры одновременного определения концентрации исследуемых центров в указанных работах. Для решения этой задачи нами ранее использовалась подгонка экспериментальных кривых DLTS с использованием метода

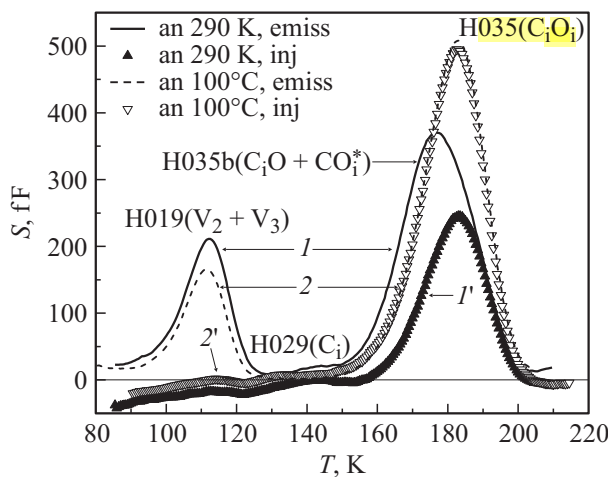


Рис. 2. Спектры DLTS (линии) и MC-DLTS (точки), облученных электронами кремниевых p^+-n -диодов после отжига при 290 K в течение 219 мин (кривые 1 и 1') и после (кривые 2 и 2') полного завершения отжига C_i .

наименьших квадратов [12,13]. Однако применение этого метода к обработке пика $H035b$ сталкивается с рядом трудностей, связанных с возможным наличием других дефектов с относительно малой концентрацией, дающих вклад в амплитуду сигнала DLTS в интересующей нас области температур измерения. Поэтому мы попытались найти путь получения более однозначной информации о концентрациях C_iO_i и $C_iO_i^*$.

Такую информацию можно получить, используя заполняющие импульсы прямого смещения, при которых происходит инжекция неосновных носителей заряда, метод DLTS для наблюдения ловушек неосновных носителей заряда (MC-DLTS). При этом углеродные пики $H029$ и $H035$ наблюдаются также хорошо, как и при измерениях без инжекции неосновных носителей заряда. Такое поведение указанных ловушек связано с тем, что как для C_i так и для C_iO_i имеет место значительная асимметрия сечений захвата электронов и дырок, когда сечение захвата дырок (C_p) значительно выше сечения захвата электронов (C_n). Например, отношение $\eta = C_p/C_n$ достигает значения 500 для C_iO_i [14,15]. Температуры максимума пика $H035$, полученные при использовании инжекции неосновных носителей заряда, совпадают друг с другом на всех стадиях отжига (кривые 1' и 2' на рис. 1 и 2). Кроме того, также отметим, что после исчезновения $C_iO_i^*$ амплитуды пика $H035$, полученные в результате измерений DLTS с использованием и без использования инжекции неосновных носителей заряда, совпадают (рис. 1, кривые 2 и 2'). Из этого следует, что в результате измерений с инжекцией мы всегда определяем полную концентрацию ловушки $H035$. Кроме этого, мы видим, что пик, связанный с комплексом $C_iO_i^*$, не дает вклада в сигнал DLTS при измерениях с использованием заполняющих импульсов, сопровождающихся инжекцией электронов (рис. 2, кривые 1

и 1'). Этот факт является свидетельством малости отношения сечение захвата дырок к сечению захвата электронов (C_n) для ловушки $H035^*$, т.е. $\eta(C_iO_i^*) \ll 1$. Таким образом, мы имеем простой способ независимого определения концентрации C_iO_i в стабильной конфигурации на промежуточных стадиях отжига, что позволяет нам определять высоту пика $H035$ без использования численной подгонки.

Обнаруженное нами свойство ловушки $C_iO_i^*$ позволяет объяснить эволюцию спектров DLTS, связанных с углеродными центрами в кремнии n -типа проводимости в процессе отжига C_i .

Как известно, в диодах на основе кремния n -типа можно наблюдать как акцепторное (ловушка основных носителей заряда $E012$), так и донорное (ловушка неосновных носителей заряда $H029$) состояние C_i (рис. 3). Как ловушка неосновных носителей заряда проявляется и

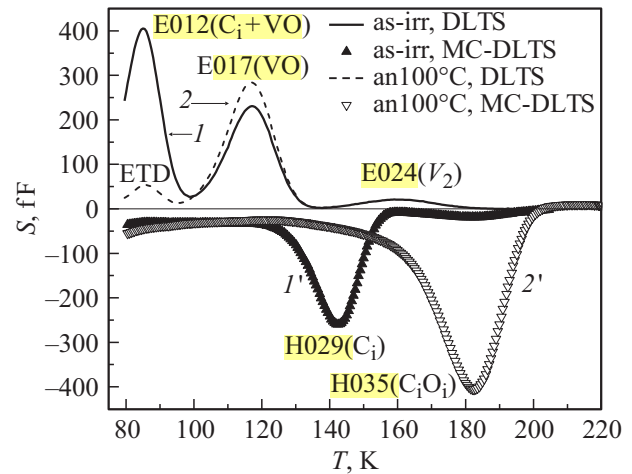


Рис. 3. Спектры DLTS (линии) и MC-DLTS (точки), облученных электронами кремниевых p^+-n -диодов до (кривые 1 и 1') и после (кривые 2 и 2') завершения отжига C_i .

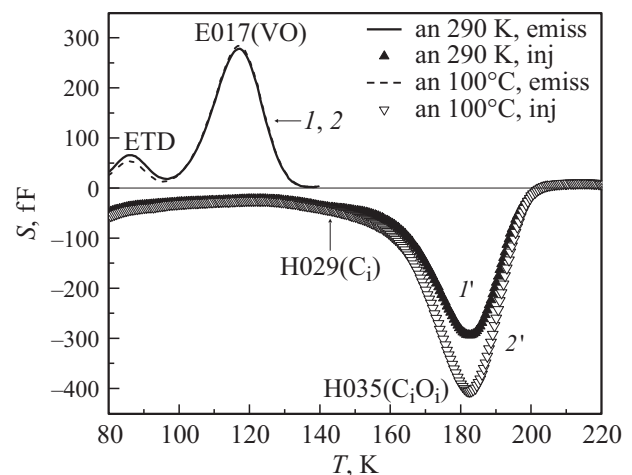


Рис. 4. Спектры DLTS (линии) и MC-DLTS (точки), облученных электронами кремниевых p^+-n -диодов после отжига при 300 K в течение 101 мин (кривые 1 и 1') и после (кривые 2 и 2') полного завершения отжига C_i .

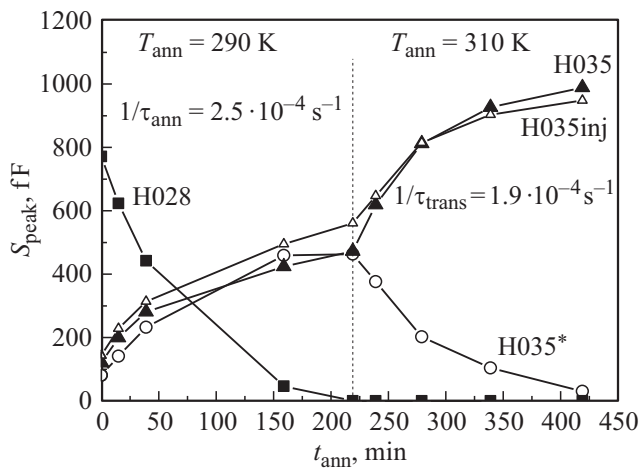


Рис. 5. Изменения концентрации углеродсодержащих дефектов в процессе изотермического отжига диодов, изготовленных на *p*-Si. Температуры отжига были 290 К ($t_{\text{ann}} = 0\text{--}219$ мин) и 310 К ($t_{\text{ann}} = 219\text{--}419$ мин).

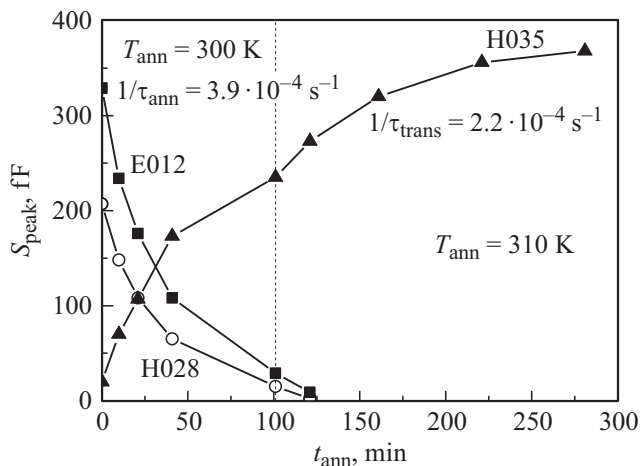


Рис. 6. Изменения концентрации углеродсодержащих дефектов в процессе изотермического отжига диодов, изготовленных на *n*-Si. Температуры отжига были 300 К ($t_{\text{ann}} = 0\text{--}101$ мин) и 310 К ($t_{\text{ann}} = 101\text{--}281$ мин).

донорное состояние C_iO_i (пик H035, рис. 3). Кроме того, мы можем также следить и за изменением концентрации комплекса межузельный углерод–углерод в узле (C_iC_s), который дает вклад в амплитуду пика E017. Выделить этот вклад можно из измерений при различных длительностях заполняющего импульса [15].

Таким образом, в кремнии *n*-типа мы можем следить за изменением концентрации C_i по высоте пиков E012 и H029. В то же время, как следует из приведенных выше данных, мы не можем наблюдать пик, связанный с комплексом $C_iO_i^*$. О присутствии метастабильного состояния комплекса C_iO_i мы можем судить только по увеличению амплитуды пика H035 после полного исчезновения пиков E012 и H029 (эффект запаздывающего роста, по-видимому, наблюдавшийся также в [16]). Этот

эффект хорошо виден, например, из сравнения кривых 1' и 2' на рис. 4 и зависимости высоты пиков H028 и H035 от времени отжига n^+ -*p*- и p^+ -*n*-диодов (см. рис. 5 и 6).

4. Обсуждение

Рассмотрим кинетику образования C_iO_i более подробно. При этом реакцию (2) можно рассматривать как частный случай реакции (1), если ввести параметр f_s , который определяет долю атомов C_i , участвующих в реакции с непосредственным образованием стабильной конфигурации C_iO_i , минуя промежуточную стадию. Тогда, если имеет место только процесс (2), величина f_s будет равна нулю. Если же происходит одновременное образование как стабильной, так и метастабильной конфигураций комплекса, то $0 < f_s \leq 1$.

Каждая стадия процессов образования стабильной конфигурации комплекса C_iO_i (см. реакцию (1)) характеризуется различными постоянными времени. Первая постоянная времени (τ_{ann}) описывает кинетику отжига C_i и образования либо $C_iO_i^*$, либо C_iO_i . Ее можно записать в виде

$$\tau_{\text{ann}}^{-1} = (k_1 + k'_1)[O_i], \quad (3)$$

где k_1 и k'_1 — константы реакций взаимодействия C_i с O_i , в результате которых образуются либо C_iO_i , либо $C_iO_i^*$ соответственно. Как обычно, $[O_i]$ обозначает концентрацию межузельного кислорода. Вторая постоянная времени, которую обозначим как τ_{trans} , будет описывать скорость трансформации $C_iO_i^* \rightarrow C_iO_i$. Можно ожидать, что она определяется только структурными особенностями рассматриваемых комплексов и, возможно, уровнем Ферми. Отметим, что, увеличивая концентрацию кислорода, мы достигаем выполнения условия $\tau_{\text{ann}} \ll \tau_{\text{trans}}$ при температуре отжига C_i . Это неравенство еще более усиливается с понижением температуры, так как энергия активации диффузии C_i меньше барьера для трансформации $C_iO_i^* \rightarrow C_iO_i$ (см. [4,10] и данные, приведенные далее). Такое соотношение между постоянными времени позволяет рассматривать начальную и конечную стадию всего процесса отдельно.

На начальной стадии процесса, когда скоростью трансформации $C_iO_i^* \rightarrow C_iO_i$ можно пренебречь, мы получим следующие временные зависимости концентраций исследуемых дефектов:

$$[C_i] = [C_i]_a \exp(-t/\tau_{\text{ann}}), \quad (4)$$

$$[C_iO_i^*] = (1 - f_s)[C_i]_a \{1 - \exp(-t/\tau_{\text{ann}})\}, \quad (5)$$

$$[C_iO_i] = f_s [C_i]_a \{1 - \exp(-t/\tau_{\text{ann}})\}. \quad (6)$$

На заключительной стадии процесса, когда уже все атомы межузельного углерода связаны в комплексы, происходит только дообразование C_iO_i из уже имеющихся

комплексов $C_iO_i^*$. Кинетика изменения концентраций обоих состояний C_iO_i может быть описана как

$$[C_iO_i^*] = [C_iO_i^*]_{ini} \exp(-(t - t_{ini})/\tau_{ann}), \quad (7)$$

$$[C_iO_i] = [C_iO_i]_{ini} + [C_iO_i^*]_{ini} \{1 - \exp(-(t - t_{ini})/\tau_{trans})\}, \quad (8)$$

где t_{ini} обозначает некоторый момент времени после начала отжига межзерельного углерода, а $[C_iO_i^*]_{ini}$ дает концентрацию метастабильного состояния комплекса в этот момент времени. Для расчета концентраций дефектов на промежуточной стадии реакции следует пользоваться более общим выражением, описывающим одновременное изменение концентраций всех трех центров $[C_i]$, $[C_iO_i]$ и $[C_iO_i^*]$ вследствие протекания всех трех реакций (см. [13]).

В качестве t_{ini} можно использовать тот момент времени отжига, после которого осталось не более 5% от начальной концентрации C_i . Как показывают расчеты, проведенные по более общей формуле, списывающей кинетику реакций (1) (см. ссылку [10]), доля образовавшихся к одному моменту времени C_iO_i будет составлять $\gamma \approx 0.55$ от полной концентрации этого комплекса, если значения других параметров были $\tau_{trans} = 10\tau_{ann}$ и $f_s = 0.5$. Таким образом, определяя долю уже образовавшихся к данному моменту комплексов, мы можем оценить значение γ . Если же $\tau_{trans} < 10\tau_{ann}$, то мы получим еще большую долю C_iO_i в стабильной конфигурации и эффект запаздывания будет выражен не столь явно.

Для обеспечения как можно больших различий между τ_{ann} и τ_{trans} на начальных участках мы проводили отжиг при более низкой температуре. Эта температура зависела от содержания кислорода в структуре. Для заключительной стадии отжига была выбрана одна и та же температура $T_{ann} = 310$ К, обеспечивающая отсутствие других метастабильных конфигураций C_iO_i [3]. Используя значения высоты пика $H035$, измеренные с применением заполняющих импульсов прямого смещения (см. рис. 5), можно оценить f_s как близкое к 0.5, что соответствует результатам, полученным из численной подгонки.

В то же время из рис. 5 видно, что имеет место некоторое различие между результатами измерений высоты пика $H035$ и его вычислением с использованием программы подгонки. Одной из причин появления таких различий является наличие в облученных диодах фоновых радиационных дефектов, имеющих пики DLTS, совпадающие или близкие к $H029$ и $H035$. Наличие этих радиационных дефектов с малой концентрацией приводит к дополнительной неопределенности в определении как энергий ионизации C_iO_i и $C_iO_i^*$, так и их концентраций.

Качественное поведение кинетики отжига C_i и образования C_iO_i для p^+-n -диодов (рис. 6) такое же, как и для n^+-p -диодов (рис. 5). Отличие в скорости

отжига C_i обусловлено меньшим содержанием кислорода, что вынудило нас проводить начальную стадию отжига при более высокой температуре. В свою очередь это привело к тому, что разница между τ_{ann} и τ_{trans} для структур этого типа оказалась не столь велика и к моменту практически полного исчезновения пика $H029$ уже довольно значительная доля $C_iO_i^*$ перешла в C_iO_i . Аналогичные особенности кинетики отжига C_i и образования пика $H035$ наблюдались и в работе [6]. Оценка f_s из данных, приведенных на рис. 2 работы [6], также позволяет сделать вывод, что f_s существенно больше нуля. В то же время на основании данных по отжигу электронной ловушки $E_c - 0.06$ эВ авторы этой работы делают вывод, что имеет место только процесс (2) и соответственно f_s должно быть равно нулю. Таким образом, противоречие содержится уже внутри самой работы [6]. Авторы [6] предположили, что это противоречие можно объяснить наличием еще одной ловушки с уровнем вблизи $E_c - 0.35$ эВ, но не связанной с C_iO_i . Однако наши данные, изложенные выше, не подтверждают такую интерпретацию.

По нашему мнению, причина этого противоречия может заключаться в неприменимости стандартной процедуры определения концентрации ловушек из данных DLTS в случае относительно мелких ловушек. К сожалению, авторы [6] не привели экспериментальных спектров DLTS, что не позволяет нам провести повторную оценку концентрации ловушки $E_c - 0.06$ эВ. Однако ясно, что эта температура должна быть достаточно низкой. Так, в работе [15] соответствующий пик наблюдался при $T_{peak} = 35$ К, что соответствует довольно близкому расположению этого уровня к зоне проводимости. Поскольку в работе [6] использовались образцы с концентрацией носителей в базе $\sim 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, на основании имеющихся экспериментальных данных об энергетическом спектре донора фосфора можно сделать вывод, что при $T = 35-40$ К концентрация электронов будет значительно меньше концентрации доноров (концентрацию электронов для определенной температуры измерения можно рассчитать, используя, например, результаты работы [17]).

Такая оценка показывает, что концентрация электронов (n_0) будет значительно меньше концентрации легирующей примеси. Отсюда следует, что стандартная процедура определения концентрации центра из высоты пика DLTS в этом случае будет неприменима. В этом случае задача корректного определения концентрации ловушки $E_c - 0.06$ эВ не будет простой, и возможны большие погрешности, если не известна величина n_0 при температуре измерения соответствующего пика DLTS. Если принять во внимание этот факт, то следует признать, что наши выводы согласуются с экспериментальными данными работы [6].

Тем не менее мы согласны с выводом авторов [6] о принадлежности уровня $E_c - 0.06$ эВ акцепторному уровню метастабильного состояния комплекса C_iO_i .

Дополнительным аргументом в пользу этой интерпретации являются экспериментальные данные о постоянной времени трансформации $C_iO_i^* \rightarrow C_iO_i$. Если принять во внимание, что энергия активации этого процесса близка к значению (1.05 ± 0.05) эВ [4,10], то экстраполяция наших данных к температуре отжига 297 К дает значение $1/\tau_{\text{trans}} = 3.5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, что не очень значительно отличается от $1/\tau_{\text{trans}} = 3.0 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, полученного в [6]. В n^+ – p -диодах уровень Ферми при температуре трансформации был расположен вблизи $E_v + 0.39$ эВ. Поэтому следует ожидать, что основные зарядовые состояния $C_iO_i^*$ и C_iO_i в p^+ – n - и n^+ – p -диодах были одинаковыми (дефекты находились в основном нейтральном зарядовом состоянии), что и проявилось в совпадении полученных нами значений τ_{trans} для обоих типов использованных структур (см. рис. 5, 6).

По-видимому, для примесей и дефектов, создающих анизотропные напряжения в решетке кремния, следует ожидать и анизотропии в потенциале их взаимодействия между собой. Это может проявляться, в частности, в наличии метастабильных конфигураций ряда углеродных комплексов (см., например, [18]). Для более полного понимания влияния локальных искажений решетки на диффузию углерода и его взаимодействия с другими примесями желательны дальнейшие теоретические исследования.

Следует отметить, что в полученных нами данных содержится один важный факт, который может помочь в определении направления таких исследований. Это касается сосуществования параллельных реакций, описываемых уравнением (1). По нашему мнению, этот факт является следствием анизотропии потенциала взаимодействия C_i и O_i при их сближении в результате миграции межузельного углерода, т.е. когда сближение происходит в каком-то одном кристаллографическом направлении, то промежуточный комплекс не образуется. Если же направление сближения изменяется, то в потенциале взаимодействия C_i и O_i появляется локальный минимум. Поскольку статистически разные направления сближения равновероятны, только часть атомов углерода захватывается с образованием метастабильного комплекса. Следовательно, появление наблюдаемого нами метастабильного состояния комплекса C_iO_i отражает именно динамику миграции межузельного углерода вблизи центра захвата, а соотношение между коэффициентами образования стабильного и метастабильного состояний есть результат пространственного расположения локальных минимумов потенциала взаимодействия сближающихся атомов.

Таким образом, методом DLTS спектроскопии изучена кинетика отжига межузельного углерода C_i в облученных электронами с $E = 6$ МэВ при $T_{\text{II}} = 273$ К диодах, изготовленных на кремнии n - и p -типа. В результате отжига C_i образуется комплекс межузельный углерод–межузельный кислород в стабильной C_iO_i и метастабильной $C_iO_i^*$ конфигурациях. Установлено, что,

несмотря на близкое расположение глубоких уровней в запрещенной зоне Si, ловушка $C_iO_i^*$ обладает малым (< 1) отношением сечения захвата дырок к сечению захвата электронов в отличие от C_iO_i . Вследствие этого измерения спектров DLTS в p -Si с инжекцией неосновных носителей заряда позволяют исключить из пика H035 составляющую, обусловленную метастабильной конфигурацией $C_iO_i^*$, и наблюдать только сигнал, обусловленный ловушкой C_iO_i . Получено дополнительное подтверждение одновременного и равновероятного формирования комплексов $C_iO_i^*$ и C_iO_i при отжиге C_i . Определены постоянные времени трансформации $C_iO_i^* \rightarrow C_iO_i$, которые для диодов на основе высокоомных n - и p -Si имеют близкие значения.

Работа выполнена в рамках коллаборации RD50 (ЦЕРН) при частичной финансовой поддержке БРФФИ (проект Ф12РА-005) и Румынским фондом фундаментальных исследований, грант PCE 72/5.10.2011.

Список литературы

- [1] G. Davies, R.C. Newman. In: Handbook on Semiconductors, ed. by T.S. Moss (Amsterdam, Elsevier Science, 1994), v. 3b, 1557 (1994).
- [2] L.C. Kimerling, V.N. Asom, J.L. Benton, P.J. Drevinsky, C.E. Cafer. Mater. Sci. Forum, **38–41**, 141 (1989).
- [3] L.I. Khirunenko, M.G. Sosnin, Yu.V. Pomozev, L.I. Murin, V.P. Markevich, A.R. Peaker, L.M. Almeida, J. Coutinho, V.J.B. Torres. Phys. Rev. B, **78**, 155 203 (2008).
- [4] Kh.A. Abdullin, B.N. Mukashev, M.F. Tamendarov, T.B. Tashenov. Phys. Lett. A, **144**, 198 (1990).
- [5] П.В. Кучинский, В.М. Ломако, А.П. Петрунин. ФТП, **23**, 1625 (1989).
- [6] K. Shinoda, E. Ohta. Appl. Phys. Lett., **61**, 2691 (1992).
- [7] A.R. Fredericksen, A.S. Karakashian, P.J. Drevinsky, C.E. Cafer. J. Appl. Phys., **65**, 3272 (1989).
- [8] P.M. Mooney, L.J. Cheng, M. Süli, J.D. Gerson, J.W. Corbett. Phys. Rev. B, **15**, 3836 (1977).
- [9] J. Coutinho, V.P. Markevich, A.R. Peaker, B. Hamilton, S.B. Lastovskii, L.I. Murin, B.J. Svensson, M.J. Rayson, P.R. Briddon. Phys. Rev. B, **86**, 174 101 (2012).
- [10] L.F. Makarenko, F.P. Korshunov, S.B. Lastovskii, L.I. Murin, M. Moll. Sol. St. Phenomena, **156–158**, 155 (2010).
- [11] A. Nylandsted Larsen, H.J. Pedersen, M.C. Petersen, V. Privitera, Y. Gurimskaya, A. Mesli. J. Appl. Phys., **114**, 223 706 (2013).
- [12] A.A. Istratov, H. Hieslmair, C. Flink, E.R. Weber. Rev. Sci. Instrum., **69**, 244 (1998).
- [13] Л.Ф. Макаренко, Ф.П. Коршунов, С.Б. Ластовский, Л.И. Мурин. Докл. НАН Беларуси, **51** (5), 52 (2007).
- [14] A. Hallen, N. Keskitalo, F. Masszi, V. Nágl. J. Appl. Phys., **79**, 3906 (1996).
- [15] M. Moll. PhD thesis (Hamburg, University of Hamburg, 1999) ISSN 1435–8085.
- [16] B. Schmidt, V. Eremin, A. Ivanov, N. Strokan, E. Verbitskaya, Z. Li. J. Appl. Phys., **76**, 4072 (1994).
- [17] P. Norton, T. Braggins, H. Levinstein. Phys. Rev. B, **8**, 5632 (1973).
- [18] G. Davies. Mater. Sci. Forum, **38–41**, 151 (1989).

Редактор Т.А. Полянская

Formation and annealing of metastable configuration for interstitial carbon-interstitial oxygen complex in *n*- and *p*-silicon

L.F. Makarenko^{*}, *F.P. Korshunov*⁺, *S.B. Lastovskii*⁺,
L.I. Murin⁺, *M. Moll*[°], *I. Pintilie*[◇]

^{*} Belarusian State University,
220050 Minsk, Belarus

⁺ Scientific-Practical Materials Research Centre
of National Academy of Sciences of Belarus,
220072 Minsk, Belarus

[°] CH-1211 CERN,
Geneva, Switzerland

[◇] RO 077125 National Institute of Materials Physics,
Magurele, Romania

Abstract It has been shown experimentally that contrary to the stable configuration of interstitial carbon-interstitial oxygen complex (C_iO_i) its metastable configuration ($C_iO_i^*$) can not be observed in silicon p^+-n structures by the DLTS method. The rates of $C_iO_i^* \rightarrow C_iO_i$ transformation are practically similar in *n*- and *p*-Si with carrier concentration less than 10^{13} cm^{-3} . The probabilities of the simultaneous formation of stable and metastable configurations by the attaching of mobile carbon to interstitial oxygen atom are close 50%. This fact is explained by an orientation dependence of the interaction potential between interstitial oxygen and carbon atoms.