

Природа центров $E_c - 0.37$ эВ и образование высокоомных слоев в Si n -типа проводимости

© О.В. Наумова, Л.С. Смирнов, В.Ф. Стась

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 20 декабря 1996 г. Принята к печати 4 февраля 1997 г.)

Методами DLTS и Ван-дер-Пау проведено исследование формирования центров $E_c - 0.37$ эВ, ответственных за образование высокоомных слоев в облученном электронами и отожженном в температурном интервале $80 \div 320^\circ\text{C}$ n -Si. Анализ экспериментальных данных позволил сделать вывод о составе центров $E_c - 0.37$ эВ ($[V-O-C]$) и заключить, что их формирование стимулировано потоком межузельных атомов кремния (I) и углерода (C_i) от границы раздела в объеме полупроводника в процессе отжига с прохождением следующих реакций:

- 1) $I + C_s \rightarrow C_i$, $C_i + [V-O] \rightarrow [V-O-C]$ (доминирующая реакция),
- 2) $I + V_2 \rightarrow V$, $V + [C-O] \rightarrow [V-O-C]$.

Вблизи поверхности кремния дефектно-примесные реакции имеют особенности, определяемые характеристиками исходного материала, механическими и химическими операциями, термическими и радиационными условиями обработок. Исследованию этих реакций посвящено довольно много работ (см., например, [1–3]). Так, ранее был обнаружен эффект формирования высокоомного приповерхностного слоя (ВПС) при отжигах облученного электронами кремния в диапазоне температур $180 \div 300^\circ\text{C}$ [2]. Установлено, что эффект наблюдается только в кислородсодержащем (выращенном по методу Чохральского) кремнии и ответственным за образование ВПС являются центры с энергетическим уровнем $E_c - 0.37$ эВ. Обнаружено [4], что в γ -облученном кремнии имеет место корреляция между формированием центров $E_c - 0.37$ эВ и отжигом комплексов вакансия–кислород (A -центров). Удивительным в эффекте формирования ВПС были не только низкие температуры прохождения реакций, но и то, что он появлялся снова при послыном стравливании, если только температура и длительность отжигов не превышали необходимых для полного исчезновения A -центров [2]. И несмотря на то что эффект исследовался довольно подробно и известен давно, природа и механизм формирования высокоомных приповерхностных слоев при низкотемпературных ($\lesssim 900^\circ\text{C}$) обработках облученного кремния до сих пор не установлены.

По данным электронного парамагнитного резонанса и инфракрасной спектроскопии в объемном материале кремния отжиг комплексов вакансия–кислород связан с формированием центров $[C-O-V_2]$ [5], $[V-O_2]$ [6,7], $[V-O-C]$ [7], V_3O [8]. Последнее послужило поводом для авторов ряда работ предположить, что дефектами, ответственными за образование высокоомных слоев вблизи границ раздела, являются комплексы $[C-O-V_2]$ [9], $[V-O_2]$ [10], V_2O , V_3O [11]. Механизм формирования этих комплексов связывался со следующим. Вблизи границ раздела при воздействии полей механических напряжений вакансионные комплексы отжигаются при более низких температурах, чем в объеме полупроводника. В результате: 1) освобождающиеся вакансии

захватываются уже имеющимися в объеме комплексами $[C-O]$ [9], 2) подвижные вблизи поверхности комплексы вакансия–кислород взаимодействуют с кислородом [10], 3) во время отжига вблизи поверхности образуются дивакансии, диффундирующие затем в объем и взаимодействующие с кислородом либо с не отожженными еще A -центрами [11].

Участие кислорода в процессе комплексообразования подтверждалось тем фактом, что центр $E_c - 0.37$ эВ наблюдается в кремнии, выращенном по методу Чохральского, но не проявляется в "бескислородном" (с концентрацией кислорода $N_O \leq 10^{16} \text{ см}^{-3}$) кремнии (отметим, что участие кислорода является необходимым, но не достаточным условием: в некоторых образцах с концентрацией кислорода до 10^{18} см^{-3} образование ВПС не наблюдается). Чтобы установить, являются ли комплексы $E_c - 0.37$ эВ моно- либо мультивакансионными, входит ли в их состав углерод, необходимы экспериментальные данные 1) о поведении при отжиге радиационных дефектов (РД), содержащих вакансии, 2) о зависимости эффекта от концентрации углерода (примеси, охотно вступающей в реакции с вакансиями и кислородом [7] и обычно присутствующей в кремнии в больших концентрациях — $N_C \simeq 5 \cdot 10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Поэтому цель настоящей работы заключалась в более детальном исследовании поведения центров $E_c - 0.37$ эВ в сравнении с другими вакансионно-содержащими комплексами в кремнии с контролируемым содержанием углерода.

Исследования проводились на материале марок КЭФ-1, КЭФ-4.5 и БКЭФ-4.5 ("бескислородном" кремнии с $N_O \lesssim 10^{16} \text{ см}^{-3}$). В исходных образцах КЭФ-1 и КЭФ-4.5 концентрация кислорода составляла $N_O \simeq 10^{18} \text{ см}^{-3}$, концентрация углерода $N_C < 3 \cdot 10^{15}$ и $\sim 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ соответственно. Часть "безуглеродных" образцов из КЭФ-1 подвергалась ионной имплантации углерода или азота (энергия ионов $E = 200$ кэВ, дозы $\Phi_1 = 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $\Phi_2 = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$) и отжигу при температуре $T_a = 900^\circ\text{C}$ в течение $t_a = 30$ мин. Все образцы облучались электронами с энергией $E = 3.5$ МэВ на

импульсным ускорителе "Микротрон" в режиме: частота следования импульсов $\omega = 100$ Гц, длительность одного импульса $t_i = 3$ мкс, температура облучения $T_{irr} = 300$ К. После облучения и отжига (изотермических или изохронных в интервале $80 \div 320^\circ\text{C}$ с шагом $\Delta T_a = 20^\circ$) проводились измерения удельного сопротивления ρ методом Ван-дер-Пау и пространственного распределения концентрации РД по глубине структур методом DLTS [12] (для DLTS-измерений напылением золота формировались барьеры Шоттки или предварительно создавались $p^+ - n$ -структуры методом диффузии бора на глубину $2 \div 3$ мкм).

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены результаты изохронного отжига кремния с различным содержанием углерода.

Как и следовало ожидать, для пластин КЭФ-4.5 с $N_C \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в диапазоне $180 \div 220^\circ\text{C}$ наблюдался рост удельного сопротивления ρ с увеличением температуры отжига (на материале марки БКЭФ-4.5 эффект образования ВПС не проявлялся). DLTS-измерения показали (рис. 1, вставка), что в исследуемом материале увеличение ρ действительно коррелирует с отжигом А-центров и увеличением концентрации центров $E_c - 0.37$ эВ. Причем в пределах погрешности измерения изменение концентрации центров $E_c - 0.37$ эВ соответствует изменению концентрации А-центров (см. также работы [2,4]).

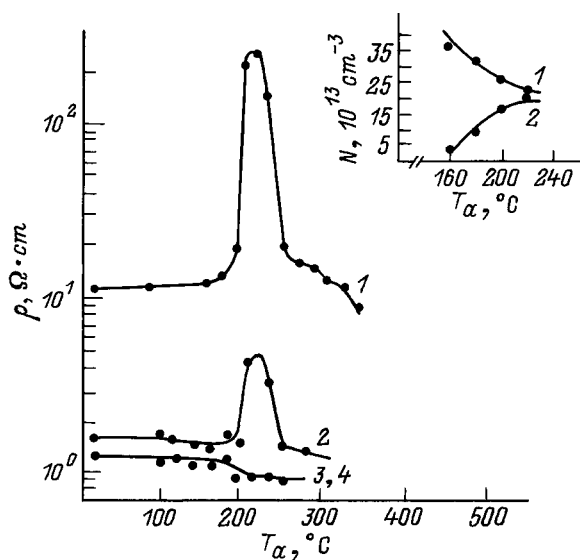


Рис. 1. Удельное сопротивление при изохронном отжиге кремния: 1 — КЭФ-4.5, $N_C \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, доза электронов $\Phi_e = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; (2–4) — КЭФ-1, $N_C < 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, доза электронов $\Phi_e = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; облучение углеродом дозой, см^{-2} : 1, 4 — 0, 2 — $5 \cdot 10^{13}$, 3 — $1 \cdot 10^{13}$. На вставке — зависимость концентрации N А-центров (1) и центров $E_c - 0.37$ эВ (2) от температуры отжига на расстоянии $x = 1.5$ мкм от границы раздела p^+ - и n -областей.

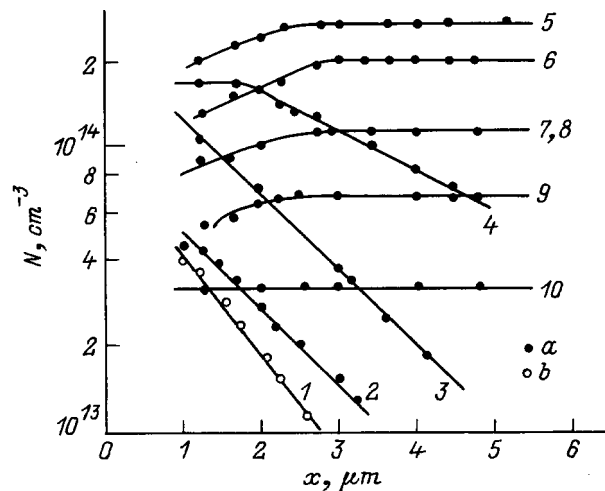


Рис. 2. Пространственное распределение концентрации N центров $E_c - 0.37$ эВ по глубине x $p^+ - n$ -структур в процессе изохронного отжига. Шаг изменения температуры $\Delta T_a = 20^\circ$, время отжига $t_a = 20$ мин. $T_a, ^\circ\text{C}$: 1 — 120, 2 — 160, 3 — 180, 4 — 200, 5 — 220, 6 — 240, 7 — 260, 8 — 280, 9 — 300, 10 — 320. $a - U = 0$ В, $b - U = 20$ В. Доза электронов $\Phi_e = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

На образцах с $N_C < 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (рис. 1, кривая 4) эффект вообще не наблюдался. Формирование высокоомного слоя на безуглеродных образцах наблюдалось лишь после ионной имплантации углерода (кривые 2, 3). Отметим, что при используемых режимах облучения и активационного отжига концентрация имплантированного углерода составляла $\sim 4 \cdot 10^{16}$ и $\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ для доз Φ_1 и Φ_2 соответственно ($N_C = \Phi_i/d$, где d по данным SIMS [13] для используемых режимов ~ 2.5 мкм). Таким образом, высокоомный слой образовывался при условии, что концентрация углерода имела значение, характерное для материала, выращенного по методу Чохральского ($\sim 5 \cdot 10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$).

Для контроля безуглеродные образцы облучались азотом в том же диапазоне доз. Эффект увеличения ρ не проявлялся. Кроме того, на образцах КЭФ-1, облученных углеродом дозой $\Phi_2 = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, проводились следующие операции: 1) отжиг при 400°C в течение 30 мин — для удаления радиационных дефектов, 2) травление в СР-4 со снятием слоя ~ 10 мкм — для удаления области, содержащей углерод, 3) повторное облучение электронами дозой $\Phi_e = 10^{16} \text{ см}^{-2}$, 4) изохронный отжиг. Увеличения ρ с ростом температуры отжига не наблюдалось, но те же операции, сделанные на материале КЭФ-4.5, приводят к повторному образованию высокоомного слоя. Это, по нашему мнению, свидетельствует об участии углерода в формировании центров $E_c - 0.37$ эВ.

Возникает вопрос — каково при этом распределение концентрации вакансионных комплексов и центров $E_c - 0.37$ эВ по глубине структур. На рис. 2 приведены данные DLTS относительно распределения концентрации центров $E_c - 0.37$ эВ по глубине $p^+ - n$ -структур. Из характера распределения центров на начальной стадии

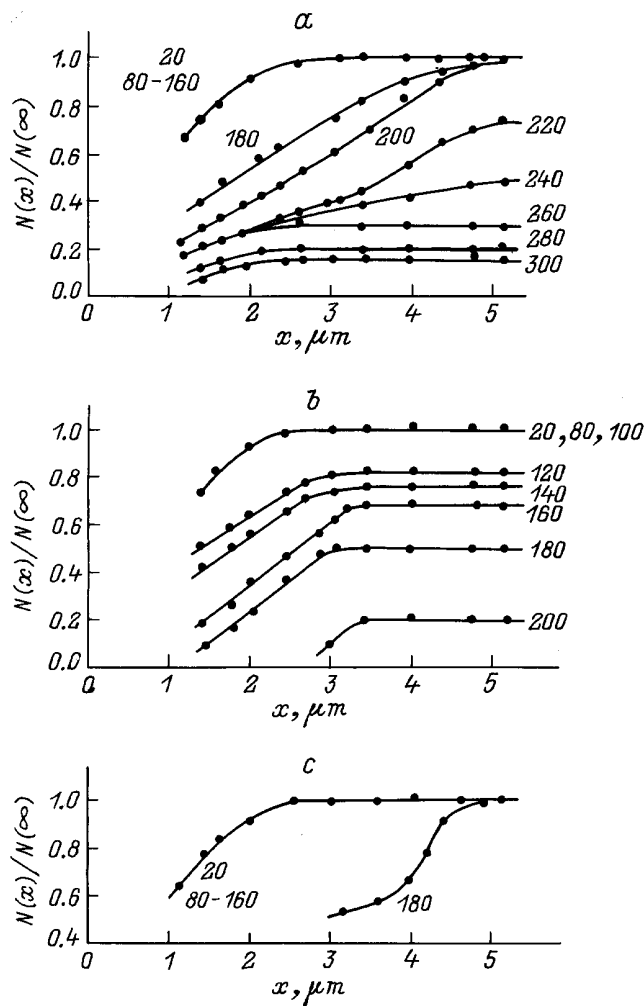


Рис. 3. Относительные изменения концентрации N различных дефектов в базе $p^+ - n$ -структур в процессе изохронного отжига. *a*: А-центры, $N(\infty) = 1.7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. *b*: Е-центры, $N(\infty) = 1.1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. *c*: дивакансии V_2 , $N(\infty) = 0.3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Шаг изменения температуры отжига $\Delta T_a = 20^\circ$, время отжига $t_a = 20$ мин. Указаны значения $T_a, ^\circ\text{C}$. Доза электронов $\Phi_e = 10^{15} \text{ см}^{-2}$. $N(\infty)$ — концентрация радиационных дефектов в объеме до отжига.

отжига (при температурах $T_a < 220^\circ\text{C}$) можно заключить, что их образование носит диффузионный характер.

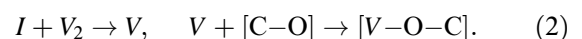
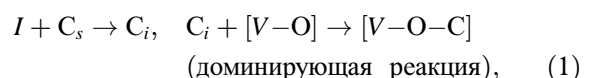
Анализ профилей распределения концентрации центров $E_c - 0.37$ эВ по глубине структур после изотермических отжигов при $T_a < 220^\circ\text{C}$ показал, что они соответствуют закону Гаусса. Поэтому логично предположить, что формирование центров $E_c - 0.37$ эВ связано с диффузией от границы раздела в объем полупроводника некоего компонента, либо непосредственно входящего в состав центров, либо стимулирующего их образование при взаимодействии с другими дефектами.

На рис. 3 приведены зависимости относительного изменения концентрации А-центров, Е-центров (комплексов вакансия-фосфор) и дивакансий V_2 по глубине диодных структур после изохронного отжига. Видно, что

формирование центров $E_c - 0.37$ эВ не влияет на отжиг комплексов вакансия-фосфор: отжиг их начинается с 120°C и форма профилей распределения концентрации с T_a практически не изменяется. Кроме А-центров более эффективно (начиная с $T_a = 180^\circ\text{C}$) в слоях, прилегающих к границе $p^+ - n$ -перехода, отжигаются дивакансии V_2 . Обращает на себя внимание следующее: 1) градиент концентрации V_2 направлен не от поверхности в объем, как предполагалось в работе [11], а наоборот, и, следовательно, формирование центров $E_c - 0.37$ эВ на глубинах в десятки микрон нельзя связывать с диффузией дивакансий в объем полупроводника, 2) отжиг комплексов $V - O$, V_2 наблюдается начиная с $T \approx 180^\circ\text{C}$ не только в слоях, прилегающих к границе раздела p - и n -областей, но и на глубинах $x \gg 1$ мкм, где нет полей механических и электрических напряжений границы раздела. Однако в таких условиях (для объемного материала) А-центры, в кремнии стабильны до 300°C , дивакансии — до 250°C [14]. Это заставляет думать, что и А-центры и V_2 отжигаются при данных температурах, взаимодействуя с диффундирующими от поверхности (учитывая характер распределения центров $E_c - 0.37$ эВ — рис. 2) дефектами или атомами примеси, но не мигрируют как целое до взаимодействия с кислородом [10,11]. Учитывая также, что имеет место корреляция между изменениями концентраций А-центров и центров $E_c - 0.37$ эВ и что концентрация других вакансионных комплексов много меньше концентрации комплексов вакансия-кислород, мы пришли к выводу, что: 1) ответственные за образование ВПС комплексы являются моновакансионными, 2) А-центр не служит поставщиком вакансий в новый комплекс, а входит в него как целое.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты позволяют, с нашей точки зрения, сделать выбор из ряда возможных комплексов, ответственных за формирование высокоомных слоев вблизи границ раздела, в пользу комплексов $[V - O - C]$. Для образования этих комплексов нужны А-центры и поток атомов углерода.

Источником подвижного углерода (при $T \geq 300 \text{ K}$) в кремнии считаются реакции $I + C_s \rightarrow C_i$ во время облучения, когда в объеме генерируются собственные межузельные атомы I , или во время отжига комплексов, содержащих межузельные атомы [7]. Поэтому логично предположить, что при отжиге имеет место диффузия от границы раздела в объем полупроводника межузельных атомов кремния или (и) межузельных атомов углерода с прохождением следующих реакций:



Допустим, что во время отжига вблизи границ раздела диссоциируют введенные при облучении комплексы межузельных атомов и имеет место диффузия I (либо C_i за счет реакции $I + C_s \rightarrow C_i$) в объем полупроводника. Легко оценить, достаточно ли генерированных облучением

межузельных атомов кремния для образования центров $E_c - 0.37$ эВ по реакции (1).

При дозе электронов $\Phi_e = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, скорости введения межузельных атомов $\sim 4 \text{ см}^{-1}$ и "выживаемости" (после аннигиляции с вакансиями) $\sim 10\%$ общее число генерированных I составляет $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Отсюда, если даже в слое толщиной 1 мкм продиссоциируют все межузельные комплексы, то в объеме продиффундируют $\sim 10^{11}$ межузельных атомов. Из приведенных на рис. 2 экспериментальных данных получим, что при $T_a = 220^\circ\text{C}$ для образования центров $E_c - 0.37$ эВ в слое толщиной ~ 10 мкм потребуется $\sim 2.4 \cdot 10^{11}$ межузельных атомов I . Учитывая, что далеко не каждый "радиационный" межузельный атом вступит в реакцию (1), приходим к заключению, что кроме введенных облучением межузельных атомов должен быть другой источник I для формирования центров $E_c - 0.37$ эВ по реакции (1). Нельзя исключить возможность обогащения приповерхностных слоев кремния межузельными атомами в процессе отжига при образовании пленок SiO_2 . Хорошо известна инжекция I и образование дефектов упаковки при высокотемпературном ($T \geq 900^\circ\text{C}$) окислении кремния (см., например, [3]). Однако имеет ли место подобный эффект в рассматриваемом диапазоне температур — $180 \div 300^\circ\text{C}$? Необходимы экспериментальные доказательства и целенаправленная постановка экспериментов.

Рассмотрим вариант с активным поведением углерода вблизи границы раздела. Допустим, что поток атомов углерода есть следствие его освобождения из комплексов или облака декорирования границы раздела. Приведем аргументы в пользу миграции межузельного углерода в объем образца.

1. По концентрации образца. При $N_C = 5 \cdot 10^{16} \div 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (когда наблюдается формирование центров $E_c - 0.37$ эВ в образцах) содержание углерода в слое $x < 1$ мкм составляет $< 10^{13}$ атомов. Это примерно на порядок больше, чем требуется для формирования наблюдаемой концентрации центров $E_c - 0.37$ эВ, хотя следует учесть, что в образовании последних могут принимать участие только подвижные межузельные атомы C_i .

2. По коэффициенту диффузии. Анализ профилей концентрации центров $E_c - 0.37$ эВ после проведения изотермических отжига показал, что распределение концентрации центров по глубине структур при $T_a < 220^\circ\text{C}$ соответствует закону Гаусса с коэффициентом диффузии $D \approx 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$. Если использовать известную аппроксимацию для коэффициента диффузии межузельного углерода $D_{C_i} [\text{см}^2/\text{с}] = 0.44 \exp(-0.87/kT [\text{эВ}])$ [15] в диапазоне $T = 160 \div 200^\circ\text{C}$, то получим близкое к экспериментальному значение $D_{C_i} \approx 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$.

3. Косвенным подтверждением правомерности привлечения C_i к объяснению процесса формирования высококомных слоев является зависимость эффекта от типа маскирующего покрытия: наличие пленки SiO_2 (покрытие наносилось до облучения электронами) практически

никак не сказывается на характере изменения сопротивления образцов, тогда как нанесение пленки Si_3N_4 сдвигает максимум в область больших температур, а увеличение ρ сравнительно невелико [2]. По данным работы [16] межузельный углерод эффективно взаимодействует с азотом, образуя комплексы $C_i\text{-N}_3$, т.е. пленки Si_3N_4 (в отличие от SiO_2) способны пассировать часть межузельного углерода.

Возникает вопрос — какие комплексы являются источником подвижного межузельного углерода? Экспериментальный факт, заключающийся в том, что высококомный слой неоднократно образуется после операций травливание-отжиг [2], свидетельствует, что это должны быть центры, сформированные при температуре ниже 180°C , и в объеме образца их температура отжига не ниже температуры отжига комплексов $V\text{-O}$, т.е. $> 300^\circ\text{C}$. Достаточен ли уровень механических и электрических напряжений границ раздела для ослабления связей между компонентами комплексов и высвобождения межузельных атомов? Оценки показывают, что электрические и механические напряжения дают выигрыш по энергии $\sim 10^{-3} \div 10^{-2}$ эВ. Поэтому, если диссоциация углеродсодержащих комплексов определяется полями механических и электрических напряжений границ раздела, то это должны быть комплексы с малой энергией связи.

В работе [17] показано, что одноосное сжатие Si в процессе нагрева уменьшает температуру отжига A- и E-центров. Нами проводились эксперименты, когда в процессе изохронного отжига ($80 \div 140^\circ\text{C}$) к структурам прикладывалось внешнее напряжение таким образом, что $p^+ - n$ -переход оказывался в обратно смещенном состоянии. Эксперимент показал (рис. 2), что воздействие электрического поля снижает температуру отжига A-центров и, соответственно, температуру формирования комплексов $E_c - 0.37$ эВ до 120°C .

Если допустить, что концентрация подвижных C_i вблизи границы раздела подчиняется закону $N_C \sim \exp[-(E_d + \Delta U)/kT]$, где E_d — энергия диссоциации углеродсодержащих комплексов, ΔU — изменение энергии при воздействии электрического поля напряженностью E , то, сравнивая зависимости $N(x, t)$ при $T_a = 160$ и 120°C (рис. 2), при максимальном размере диссоциирующего комплекса $x \approx 10 \text{ \AA}$ и значениях E в максимуме $1.6 \cdot 10^4$ и $7.7 \cdot 10^4 \text{ В/см}$ соответственно для несмещенных и обратно смещенных в процессе отжига структур, получим $E_d < 0.072$ эВ. Это объясняет, почему такие незначительные добавки полей напряжений ($\sim 10^{-2}$ эВ) оказывают влияние на поведение центров $E_c - 0.37$ эВ. Однако механизм воздействия электрического поля может быть и другим, а именно возникает изменение зарядового состояния дефектов, подобно тому, как проявляется эффект воздействия электрических полей при отжиге E-центров [18]. В этом случае изменение энергии активации отжига комплексов в поле может составлять десятки доли эВ. Однако в любом случае полученное по

данном проведенного изотермического отжига значение энергии активации формирования центров $E_c - 0.37$ эВ $E_a \simeq 1.3$ эВ есть величина, включающая: 1) энергию диссоциации углеродосодержащих комплексов E_d , 2) собственно энергию миграции C_i , $E_m = 0.87$ эВ [15] и 3) энергию образования комплекса $C_i + [V-O]$, E_k .

В настоящее время недостаточно экспериментальных данных, чтобы отдать предпочтение одному из рассмотренных процессов. Первый требует экспериментальных доказательств, что граница раздела обогащается межузельными атомами нерадиационной природы при отжиге в диапазоне температур $T_a = 180 \div 300^\circ\text{C}$. Второй требует ответа на вопрос — что за комплексы (или процессы) являются источником подвижного углерода вблизи границ раздела? Вероятнее всего, работают оба процесса. Отметим только, что механизм с потоком межузельных атомов кремния объясняет как формирование центров $E_c - 0.37$ эВ, так и более эффективный отжиг дивакансий вблизи границ раздела (рис. 3).

1. Заключение

Полученные в данной работе экспериментальные данные позволяют 1) заключить, что одним из условий образования в облученном электронами кремнии центров $E_c - 0.37$ эВ является содержание углерода в концентрациях $N_C \geq 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, 2) сделать выбор из ряда возможных комплексов, ответственных за формирование центров $E_c - 0.37$ эВ, соответственно обуславливающих формирование высокоомных слоев вблизи границ раздела кремниевых структур, в пользу комплексов $[V-O-C]$. Механизм формирования комплексов $[V-O-C]$, по нашему мнению, является многостадийным процессом, связанным с диффузией от границы раздела межузельных атомов и реакциями

1) $I + C_s \rightarrow C_i$, $C_i + [V-O] \rightarrow [V-O-C]$ (доминирующая реакция),

2) $I + V_2 \rightarrow V$, $V + [C-O] \rightarrow [V-O-C]$. Поверхность, по-видимому, в результате термообработок в диапазоне температур $180 \div 300^\circ\text{C}$ является источником межузельных атомов кремния нерадиационного происхождения. Облучение электронами и формирование системы вакансионно-содержащих комплексов создает ситуацию, когда активизируются реакции с межузельными атомами.

В заключение авторы выражают благодарность С.А. Сухих и Г.Н. Камаеву за облучение образцов ионами и электронами.

Список литературы

- [1] Л.С. Смирнов, С.И. Романов. ФТП, **10**, 876 (1976).
- [2] Н.Н. Герасименко, Н.П. Кибалина, В.Ф. Стась. В кн.: *Радиационные эффекты в полупроводниках*, под ред. Л.С. Смирнова (Новосибирск, 1979) с. 78.

- [3] А.Л. Асеев, Л.И. Федина, Д. Хёэль, Х. Барч. *Скопления межузельных атомов в кремнии и германии* (Новосибирск, 1991).
- [4] Л.С. Берман, В.Б. Шуман. ФТП, **10**, 1755 (1976).
- [5] Y.H. Lee, J.W. Corbett, K.L. Brower. Phys. St. Sol. (a), **41**, 637 (1977).
- [6] B.G. Svenson, J.L. Lindstrom, J.W. Corbett. Appl. Phys. Lett., **47**, 841 (1985).
- [7] J.L. Lindstrom, B.G. Svenson. In: *Mater. Sci. Forum. Defects in Semiconductors* (1989) v. 38–41, p. 45.
- [8] Y.H. Lee, J.W. Corbett. Phys. Rev. B, **13**, 2653 (1976).
- [9] И.Ф. Лугаков, Т.А. Лукашевич, В.В. Шуша. ФТП, **13**, 401 (1979).
- [10] R.V. Tayke, B.J. Faraday. In: *Symposium in Lattice Defects in Semiconductors* (Univ. Tokyo Press., 1966) p. 170.
- [11] Э.Г. Батыев, Н.Н. Герасименко, А.В. Ефанов. ФТП, **15**, 1448 (1981).
- [12] D.V. Lang. J. Appl. Phys., **45**, 3023 (1974).
- [13] U. Gosel. In: *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **59**, 149 (1989).
- [14] *Вопросы радиационной технологии полупроводников*, под ред. Л.С. Смирнова (Новосибирск, 1980).
- [15] Gr. Davies, E.C. Lightowles, R.C. Newman, A.S. Oates. Semicond. Sci. Technol., **2**, 524 (1987).
- [16] A. Dornen, R. Sauer, G. Pensl. In: *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **59**, 545 (1989).
- [17] Л.С. Милевский, Т.М. Ткачева, А.А. Золотухин. В кн.: *Межд. конф. по радиационной физике полупроводников и родственных материалов* (Тбилиси, 1980) с. 350.
- [18] L.C. Kimerling. Sol. St. Commun., **16**, 171 (1975).

Редактор Л.В. Шаронова

The nature of $E_c - 0.37$ eV centres and the formation of high-resistance layers in n -type conductivity silicon

O.V. Naumova, L.S. Smirnov, V.F. Stas'

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

Abstract The DLTS and Van der Pauw techniques were employed to study the formation of $E_c - 0.37$ eV centres, which are responsible for the formation of high-resistance layers in n -Si, irradiated with electrons and annealed in the temperature range $80 \div 320^\circ\text{C}$. The analysis of the experimental data allowed for a conclusion about the composition of the $E_c - 0.37$ eV centres ($[V-O-C]$), and for an inference that their formation is stimulated by a flux of interstitial atoms of silicon (I) and carbon (C_i) from the interface boundary into the bulk of semiconductor under annealing, with the following reactions taking place:

1) $I + C_s \rightarrow C_i$, $C_i + [V-O] \rightarrow [V-O-C]$ (the dominant one),

2) $I + V_2 \rightarrow V$, $V + [C-O] \rightarrow [V-O-C]$.