

ДВА КАНАЛА ОТЖИГА ДИВАКАНСИЙ В ОБЛУЧЕННЫХ КРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ n -ТИПА

Т.А. ПАГАВА, Н.Т. БЖАЛАВА, Н.И. МАЙСУРАДЗЕ, Д.З. ХОЧОЛАВА,
Л.С. ЧХАРТИШВИЛИ

УДК 621.315.592
© 2010

Департамент Физики, Грузинский Технический Университет
(Ул. Костава, 77, Тбилиси 0175, Грузия; e-mail: tpagava@gtu.ge)

Исследованы образцы кремния n -типа проводимости, полученные методом зонной плавки, с концентрацией основных носителей тока $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, облученные электронами с энергией 2 МэВ. Показано, что в облученных образцах кремния n -Si дивакансии отжигаются по двум каналам: путем их конверсии в другие комплексы (V_2O или PV_2) и диссоциацией на отдельные моновакансии.

соответственно. В любом случае энергия связи дивакансии составляет ~ 2 эВ.

V_2 существует в разных зарядовых состояниях [5]: V_2^+ , V_2^0 , V_2^- и V_2^{--} . В частности, в работе [6] было установлено, что в легированном фосфором n -Si наряду с E -центром (т.е. $V + P$ парой) основным радиационным дефектом является дважды отрицательно заряженная дивакансия. Дивакансия в кремнии может находиться в нескольких состояниях, которые различаются вызываемой дисторсией решетки. Было продемонстрировано [7], что экспериментально измеренные при обычных температурах электронные уровни дивакансии возникают не от этих состояний, а соответствуют некоторому усредненному по движениям атомов состоянию (уровни при определенных дисторсиях могут быть измерены лишь при очень низких температурах, когда дивакансия “вымораживается” в одном из них). В работе [8] была предложена форма дисторсии решетки кремния, вызываемой двукратно отрицательно заряженной дивакансией. Согласно теоретическим исследованиям [9] дисторсия, вызываемая в решетке кремния наличием нейтральной дивакансии, при комнатной температуре такая, что система должна осциллировать между двумя состояниями, которые слабо (на ~ 10 мэВ) различаются по энергии.

1. Введение

Из мультивакансионных комплексов в кремнии экспериментально наиболее подробно изучена дивакансия (V_2). V_2 может образовываться двумя путями: 1) если налетающей частицей кристаллу передается энергия, достаточная для смещения двух соседних атомов кремния, то V_2 может образовываться как первичный дефект; 2) при энергии электронов 1,5 эВ скорость введения V_2 составляет 5% скорости образования вакансий. Отметим, что измерения проводились при температуре облучения кристаллов – 20 К. При последующем нагреве кристаллов спектр изолированных вакансий исчезал и в кристаллах с пониженной концентрацией кислорода наблюдался рост числа V_2 . В данном случае, т.е. при низких энергиях облучения диффузионный механизм превалирует над каскадным механизмом образования V_2 [1, 2]. Как известно, при облучении кристаллов кремния частицами высоких энергий в них образуются аморфизированные включения. Молекулярно-динамическое моделирование показывает [3], что подобные включения также могут служить эффективными источниками точечных структурных дефектов и в частности – дивакансий, так как они более стабильны, чем сами включения.

Возможные зарядовые состояния дивакансии в кремнии теоретически изучались в работе [10]: были найдены энергии их образования и связи, а также энергии ионизации. Изучение их атомной и электронной структур приводит к заключению [11], что заряженные состояния дивакансии проявляют большую дисторсию. Для этих зарядовых состояний рассчитаны такие характеристики, как атомная конфигурация, энергии образования, энергии электронных переходов и энергия связи [12] (см. также [13]). Было найдено, что конфигурация основного состояния зависит от зарядового состояния дивакансии.

В настоящее время по проведенным расчетам [4] известны структуры и энергетические характеристики простой и расщепленной дивакансий в кремнии. Энергии их образования оценены как 4,63 и 5,90 эВ

Как известно [4, 5], V_2 в кремнии отжигаются вследствие их диффузии по решетке, пока они не бу-

дуг захвачены ловушкой; при этом они могут диффундировать на большие расстояния по решетке кремния без диссоциации, так как энергия активации диффузии $V_2 \sim 1,25$ эВ, а энергия ее диссоциации составляет ~ 2 эВ. V_2 эффективно взаимодействуют с примесными атомами I с образованием комплексов V_2+I . Например, эффективно образуются комплексы V_2O , V_2O_2 , HV_2 , SnV_2 , Sn_2V_2 , GeV_2 и т.д. [5, 14, 15].

Проведенные нами исследования показали, что в кристаллах *p*-Si, легированных бором (B) и облученных электронами с энергией 8 МэВ, отжиг V_2 происходит путем их конверсии в комплексы BV_2 [16–18]. Еще раньше такой комплекс был рассчитан теоретически [19]. По этим расчетам энергия связи дивакансии с узловым атомом бора оказалась около 0,2 эВ. Что же касается электронных уровней комплекса BV_2 , то они должны лежать близко к соответствующим уровням свободной дивакансии. Было отмечено, что подобный комплекс и механизм отжига дивакансии с образованием BV_2 будут играть важную роль лишь в сильнолегированном бором кремнии.

В работе [20] показано, что в кристаллах *n*-Si с содержанием кислорода $N_O \approx 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³, V_2 отжигаются путем их конверсии в комплексы V_2O (о возможности идентификации продукта отжига дивакансий с V_2O в специально окисдованном до $N_O \sim 10^{17}$ см⁻³ кремнии говорилось в работе [21]). В образцах с содержанием кислорода $N_O \approx 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³ V_2 отжигаются путем их диссоциации на отдельные моновакансии, что приводит к отрицательному отжигу А-центров. Наблюдаемый эффект (диссоциация определенной части V_2) авторами работы [20] объясняется низкой концентрацией атомов кислорода ($N_O \approx 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³), и, соответственно, небольшим количеством образовавшихся при облучении А-центров по сравнению с V_2 . Отрицательный отжиг А-центров в области 230–300 °С в процессе изохронного отжига (ИО) объясняется диссоциацией V_2 также в работе [22]. Следует отметить, что отрицательный отжиг А-центров может наблюдаться и в тех случаях, когда доминирующим механизмом отжига самих дивакансий является образование комплексов V_2O . Дело в том, что указанные комплексы, со своей стороны, отжигаются путем диссоциации на А-центры (т.е. V+O-комплексы) и моновакансии: $V_2O \rightarrow A + V$ [23, 24]. Энергия миграции дивакансии до встречи с ловушкой, в виде междуузельного кислорода, оценивается в 1,3 эВ [23], тогда как сам процесс взаимодействия дивакансии с кислородом характеризуется энергией активации в $2,02 \pm 0,12$ эВ [24] и при отжиге протекает в интервале температур 275 – 355 °С. В даль-

нейшем образованные А-центры могут мигрировать к междуузельным атомам кислорода, образуя комплексы VO_2 , или же (при продолжительном отжиге) – комплексы VOH и VOH_2 с атомами водорода, которые, со своей стороны, являются подвижными в решетке кремния.

Цель данной работы – выяснить, по какому каналу – конверсией или диссоциацией – отжигаются V_2 , в облученных при разных температурах кристаллах *n*-Si.

2. Методика эксперимента

В настоящей работе исследовались образцы кремния *n*-типа проводимости, выращенные методом зонной плавки, с концентрацией основных носителей тока $6 \cdot 10^{13}$ см⁻³; концентрация кислорода, определенная по инфракрасному поглощению, составляла $\sim 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³; плотность ростовых дислокаций, измеренная по ямкам травления не превышала $4 \cdot 10^4$ см⁻². Образцы вырезались в форме брусков $1 \times 3 \times 10$ мм с наибольшей гранью (111). Одна часть исследуемых образцов облучалась импульсами электронов с энергией 2 МэВ. Плотность потока электронов $\varphi = 5 \cdot 10^{12}$ см⁻²·с⁻¹. Образцы облучались электронами при температурах 300 К и 473 К.

Вторая часть образцов облучалась протонами с энергией 25 МэВ. Облучение производилось в импульсном режиме. Длительность импульса 25 мксек, частота повторения 0,25 Гц. Плотность потока протонов $1,5 \cdot 10^{11}$ част/см² в одном импульсе. Образцы облучались протонами при 300 К.

Все образцы облучались по направлению, перпендикулярному к наибольшей грани. Доза облучения подбиралась таким образом, что концентрация основных носителей тока, захваченных радиационными дефектами (РД) при 77 К, не превышала концентрацию легирующей примеси – фосфора (N_P). Для идентификации образующихся при облучении дефектов определяли энергию ионизации и термическую стабильность этих центров.

Изохронный обжиг исследуемых образцов проводился в интервале температур 80–600 °С с шагом 10 °С. Время выдержки при фиксированной температуре равнялось 10 мин. После каждого цикла ИО методом Холла измерялась концентрация основных носителей тока от 77 до 300 К.

Омические контакты для измерения создавались путем втирания алюминия в поверхность исследуемого образца.

Изменение концентрации основных носителей тока при 300 К определялось по кривым $N = f(10^3/T)$, где N – концентрация электронов; T – абсолютная температура. Энергии ионизации уровней дефектов E_i определялись в предположении $\varepsilon_F = E_i$, где ε_F – энергия уровня Ферми. Для кристаллов n -Si применяли формулу

$$N = N_C F_{1/2} \left(\frac{\varepsilon_F}{kT} \right),$$

где N_C – эффективная плотность состояния в валентной зоне, $F_{1/2}$ – интеграл Ферми-Дирака, k – постоянная Больцмана. Соответствующие участки на зависимостях $N = f(10^3/T)$ выбирались с учетом степени истощения определенного уровня. В сильно компенсированных образцах энергия E_i различных РД определялась по наклону зависимостей концентрации основных носителей тока от обратной температуры. Концентрации различных РД после каждого цикла ИО вычислялись с помощью ступенчатых зависимостей $N = f(10^3/T)$ и $N = f(T_{отж})$ в интервалах 77–300 К и 80–600 °С соответственно. В качестве примера на рис. 1 показаны изменения концентрации электронов N от обратной температуры до облучения (кривая 1), после облучения электронами дозой $\Phi = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при 300 К (кривая 2) и изохронного отжига: при 100 °С (кривая 3), 150 °С (кривая 4), и 300 °С (кривая 5). Концентрацию А-центров N_A определяли с помощью зависимостей 2–5 на рис. 1, $N_A = N_{300} - N_{77}$. Концентрацию Е-центров N_E измеряли по изменению N при 300 К после ИО в интервале 80–150 °С. Как известно [1], образование Е-центров в кристаллах n -Si с малым содержанием кислорода приводит к удалению двух электронов из зоны проводимости, поэтому $N_E = \Delta N/2$ (см. кривые 2 и 4). Как известно [2], двукратно отрицательно заряженным дивакансиям в запрещенной зоне соответствует энергетический уровень $E_c-(0,21-0,23)$ эВ. Соответственно, при 300 К дивакансия является носителем одного электрона, поэтому концентрация дивакансий N_{V_2} определяется по изменению N при 300 К после ИО в интервале $T_{отж}=150-300$ °С, $N_{V_2} = \Delta N$ (см. кривые 4 и 5). С дальнейшим увеличением $T_{отж}$ можно судить о кинетике отжига А-центров и более термостабильных РД (на рисунке не приведены); N_{300} – концентрация электронов при $T=300$ К, N_{77} – при 77 К. Ошибка измерения этих величин не превышала 10%.

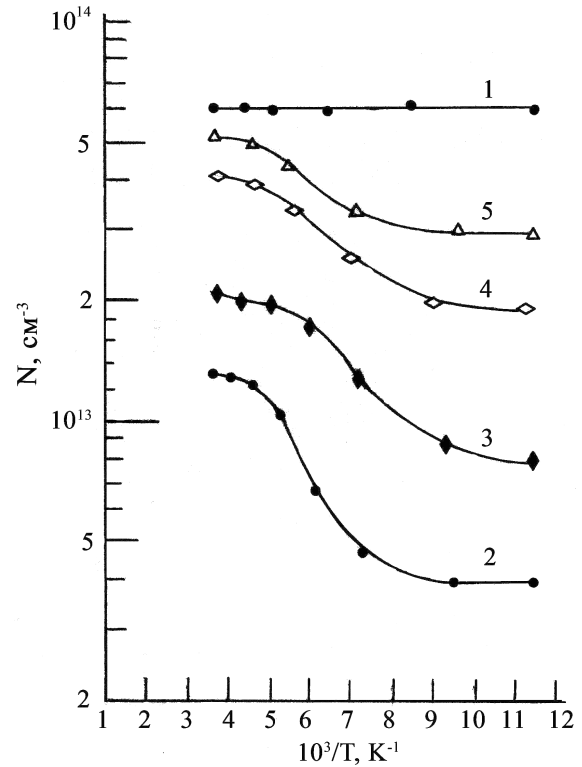


Рис. 1. Температурная зависимость концентрации электронов в кристаллах n -Si: 1 – до облучения, 2 – после облучения электронами при 300 К ($\Phi = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$), 3–5 – после отжигов при $T_{отж} = 100$ °С, 150 °С и 300 °С соответственно

3. Результаты исследований и их обсуждение

Как видно из рис. 2 (кривая 1), в облученных при 300 К кристаллах n -Si в процессе ИО концентрация А-центров в интервале $T_{отж} = 80-150$ °С растет, что объясняется взаимодействием освободившихся при распаде Е-центров вакансий с примесными атомами кислорода. Сразу после облучения соотношение $N_A/N_{V_2} \approx 1$, где N_A и N_{V_2} – концентрации А-центров и V_2 соответственно. После отжига при $T_{отж} = 150$ °С $N_A/N_{V_2} \approx 2$. Это связано с увеличением N_A при диссоциации Е-центров. В этих условиях, в процессе распада V_2 , в интервале 250–300 °С, увеличение концентрации А-центров не наблюдается.

Для того, чтобы избавиться от влияния Е-центров, исследуемые образцы облучались при температуре 200 °С. В процессе ИО концентрации А-центров и V_2 в этих кристаллах не меняются до $T_{отж} = 250$ °С, что связано с отсутствием Е-центров в объеме кристалла, которые полностью отжигаются при $T_{отж} = 150$ °С и соответственно не образуются при $T_{обл}=200$ °С (рис. 3). При увеличении температуры облучаемого

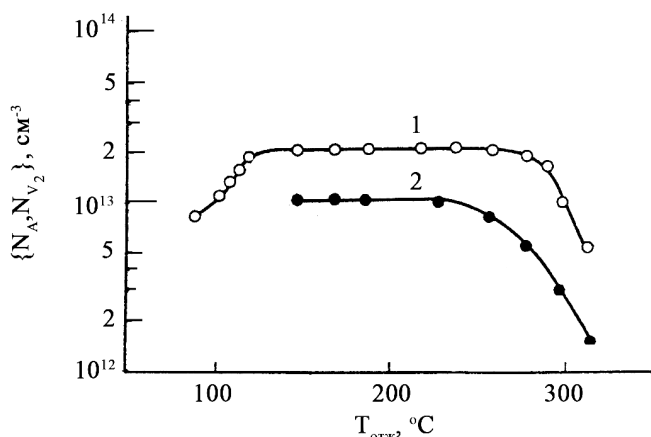


Рис. 2. Зависимости концентрации А-центров (1) и дивакансий (2) от температуры изохронного отжига в образцах *n*-Si, облученных электронами с энергией 2 МэВ; температура облучения 300 К; доза $\Phi_e = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

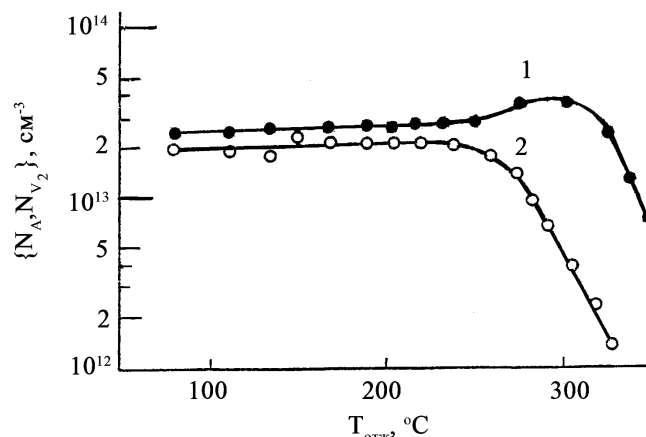


Рис. 3. Зависимость концентрации А-центров (1) и дивакансий (2) от температуры изохронного отжига в образцах *n*-Si облученных электронами с энергией 2 МэВ; температура облучения 200 °С; доза $\Phi_e = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

кристалла от комнатной до 200 °С изменение эффективности введения η различных РД в идентичных образцах в основном определяется тремя факторами: температурой облучения, концентрацией неравновесных вакансий и их зарядовым состоянием. Увеличение $T_{\text{обл}}$ приводит к уменьшению η ; вакансии, высвободившиеся при $T_{\text{обл}} = 200$ °С от формирования *E*-центров, приводят к увеличению η ; перезарядка вакансий при увеличении $T_{\text{обл}}$. При 200 °С в исследуемых образцах, с концентрацией электронов $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, начинается собственная проводимость [25]. Как известно [26], в области собственной проводимости вакансии находятся в нейтральном состоянии и соответственно дивакансии образуются не только как первичные РД, а также путем диффузионного механизма, что увеличивает η_{V_2} .

В образцах *n*-Si, облученных при 200 °С, совместное влияние этих трех факторов на процесс дефектообразования приводит к уменьшению соотношения N_A/N_{V_2} в два раза: $N_A/N_{V_2} \approx 1$ (рис. 3, кривые 1, 2).

В образцах, облученных при 300 К, $N_A = 0,9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. В процессе ИО N_A возрастает до $N_A \approx 2,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (рис. 2, кривая 1), что, как уже отмечалось, связано с диссоциацией *E*-центров. При облучении исследуемых кристаллов при 200°С *E*-центры не образуются и нейтральные вакансии, высвободившиеся при $T_{\text{отж}} = 200$ °С от формирования *E*-центров, приводят к увеличению как N_A , так и N_{V_2} (рис. 3, кривые 1, 2). Поэтому соотношение N_A/N_{V_2} почти не изменяется и остается таким же, каким она была после облучения при $T_{\text{обл}}=300$ К. Дальнейшее увеличение

температуры отжига приводит к уменьшению концентрации V_2 и к росту количества А-центров. Анализ экспериментальных кривых показал, что в процессе ИО при распаде двух V_2 образуется один А-центр, т.е. $\Delta N_{V_2}/\Delta N_A = 2$, где ΔN_{V_2} – концентрация распавшихся V_2 , а ΔN_A – концентрация образовавшихся при распаде V_2 А-центров. После распада V_2 с концентрацией $N_{V_2} \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ образуются А-центры с концентрацией $N_A \approx 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (рис. 3, кривые 1, 2).

При распаде V_2 образуются две вакансии, а для образования одного А-центра необходима одна вакансия. Получается, что на образование А-центров расходуется 25% отожженных V_2 . Остальные V_2 , по видимому, отжигаются путем их конверсии в другие дефекты, например, V_2O . Комплекс V_2O образуется поэтапно. Сначала одна из двух вакансий в комплексе V_2 , которая находится вблизи Si–O–Si связи, образует А-центр по реакции: $O+V \rightarrow \text{А-центр}$. После этого добавляется вторая вакансия: $A(V+O)+V \rightarrow V_2O$. Комплексам V_2O соответствует энергетический уровень $E_C-(0,5 \pm 0,05)$ эВ и подобно А-центрам они отжигаются при $T_{\text{отж}} = 620$ К. Эффективность введения этих центров зависит от концентрации кислорода [2]. Не исключено, что отжиг V_2 происходит путем их конверсии в комплексы фосфор+ V_2 (PV_2). Как известно комплексы PV_2 в кристаллах *n*-Si образуются в процессах длительного облучения или ИО облученных образцов. Комплексы PV_2 в нижнюю половину запрещенной зоны вносят акцепторный уровень $E_V+0,34$ эВ и отжигаются в интервале $T_{\text{отж}} = 400\text{--}500$ °С [27, 28].

В образцах, облученных при комнатной температуре, отсутствие отрицательного отжига на кривой зависимости $N_A(T_{отж})$ в интервале $T_{отж} = 250-300$ °С, в области распада V_2 , по-видимому, связано с большим значением соотношения $N_A/N_{V_2} \approx 2$.

При таком соотношении А-центров и V_2 диссоциация 1/4 части V_2 не может существенно повлиять на концентрацию А-центров.

Как уже отмечалось выше, в кристаллах p -Si, легированных бором, V_2 полностью отжигаются путем их конверсии в комплексы BV_2 .

Специфика отжига V_2 в облученных кристаллах n -Si (отжиг по двум каналам) позволяет предположить, что энергия связи между компонентами V_2^+ в кристаллах p -Si больше, чем в кристаллах n -Si, где преобладают отрицательно заряженные V_2 . Не исключено, что концентрация стоков и эффективность захвата этими стоками V_2 , без развала диффундирующих по кристаллу, в образцах p -Si больше, чем в кристаллах кремния n -типа проводимости.

Как видно из рис. 4, кривая 2, в облученных протонами с энергией 25 МэВ ($\Phi = 2,7 \cdot 10^{12}$ см⁻²) образцах n -Si концентрация А-центров меняется иначе, чем в образцах, облученных электронами с энергией 2,2 МэВ. Вследствие распада E -центров концентрация А-центров не изменяется. Особенности ИО А-центров можно объяснить существованием в облученных высокоэнергетическими протонами кристаллах кремния разупорядоченных областей (РО). РО являются эффективными стоками для вакансий, мигрирующих в кристалле после диссоциации E -центров и уменьшают их участие в дополнительном образовании А-центров [29].

При высокоэнергетическом облучении в кристаллах n -Si V_2 образуются как по каскадному, так и по диффузионному механизмам [30]. Поэтому общее количество V_2 при высокоэнергетическом облучении больше, чем при низкоэнергетическом. Несмотря на это, концентрация изолированных, электрически активных V_2 в облученных высокоэнергетическими частицами кристаллах чуть меньше, чем в образцах, облученных электронами с низкой энергией (см. рис. 4 и 2, кривые 3 и 2 соответственно). Это связано с тем, что большинство V_2 при высокоэнергетическом облучении расходуется на формирование ядра РО и других вакансионных ассоциатов [31].

В ядре РО V_2 не проявляют электрическую активность. Как видно из рис. 4, соотношение концентрации А-центров и изолированных дивакансий (кривые 2 и 3 соответственно) $N_A/N_{V_2} \approx 2,5$, поэтому не наблюдается отрицательный отжиг А-центров в обла-

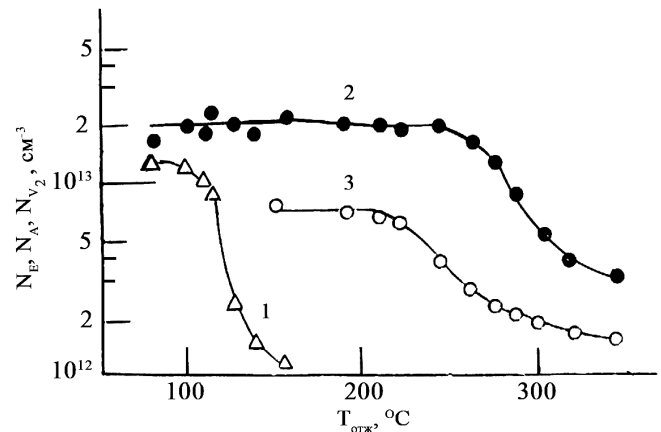


Рис. 4. Зависимость концентраций E -центров (1), А-центров (2) и дивакансий (3) от температуры изохронного отжига в образцах n -Si облученных протонами с энергией 25 МэВ при $T_{обл} = 300$ К; доза облучения $\Phi_p = 2,7 \cdot 10^{12}$ см⁻²

сти распада V_2 . Что касается РО, при больших дозах облучения, когда РО перекрываются, они полностью отжигаются при 570 °С и фрагменты их распада не могут принять участие в процессе дообразования А-центров [32]. Наоборот, будучи эффективным стоком для моно- и дивакансии, уменьшают участие V_2 и продуктов их распада – моновакансий – в образовании комплексов V_2O и А-центров соответственно.

4. Заключение

Проведенные исследования позволяют предположить, что в облученных кристаллах n -Si большинство дивакансий отжигаются путем их конверсии в другие комплексы. Например, в n -Si они могут превратиться в РД типа V_2O или PV_2 .

Небольшая часть (25%) V_2 отжигаются по другому каналу – путем диссоциации на отдельные моновакансии, что в нашем случае приводит к отрицательному отжигу А-центров.

1. В.В. Емцев, Т.В. Машовец, *Примеси и точечные дефекты в полупроводниках* (Радио и связь, Москва, 1981).
2. В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев, *Дефекты в кремнии и на его поверхности* (Наука, Москва, 1990).
3. L.A. Marqués, L. Pelaz, P. López, I. Santos, and M. Aboy, *Phys. Rev. B* **76**, 153201 (2007).
4. H. Seong and L.J. Lewis, *Phys. Rev. B* **53**, 9791 (1996).
5. Ю.В. Помозов, М.Г. Соснин, Л.И. Хируненко, Н.В. Абросимов, В. Шредер, *ФТП* **35**, 927 (2001).

6. M. Mamor, M. Elzain, K. Bouziane, and S.H. al Harthi, *Phys. Rev. B* **77**, 035213 (2008).
7. B.G. Svensson, B. Mohadjeri, A. Hallgen, J.H. Svensson, and J.W. Corbett, *Phys. Rev. B* **43**, 2292 (1991).
8. M. Saito and A. Oshiyama, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 866 (1994).
9. D.V. Makhov and L.J. Lewis, *Phys. Rev. B* **72**, 073306 (2005).
10. M. Pesola, J. von Boehm, S. Puska, and R.M. Neiminen, *Phys. Rev. B* **58**, 1106 (1998).
11. S. Öpüt and J.R. Chelikowsky, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 3852 (1999).
12. R.R. Wixom and A.F. Wright, *Phys. Rev. B* **74**, 205208 (2006).
13. R.R. Wixom and A.F. Wright, *Phys. Rev. B* **75**, 199901(E) (2007).
14. P. Stallinga, P. Johannesen, S. Herstrom, K. Bonde Nielsen, B. Bech Nielsen, and J.R. Byberg, *Phys. Rev. B* **58**, 3842 (1998).
15. M. Fanciull and J.R. Byberg, *Phys. Rev. B* **61**, 2657 (2000).
16. T. Pagava, L. Chkhartishvili, and N. Maisuradze, *Radiation Effects and Defects in Solids*, **161**, 709 (2006).
17. Т.А. Пагава, Л.С. Чхартішвілі, Н.И. Майсурадзе, Э.Р. Кутелия, *УФЖ* **52**, 1162 (2007).
18. Т. Пагава, *ФТП* **41**, 651 (2007).
19. J. Adey, R. Jones, D.W. Palmer, P.R. Briddon, and S. Öberg, *Phys. Rev. B* **71**, 165211 (2005).
20. T. Pagava and L. Chkhartishvili, *Rad. Eff. Def. Sol.* **164**, 639 (2009).
21. E.V. Monakhov, B.S. Avset, A. Hallen, and B.G. Svensson, *Phys. Rev. B* **65**, 233207 (2002).
22. Yu.V. Pomozov, M.G. Sosnin, L.I. Khirunenko, V.I. Yashnik, N.V. Abrasimov, N.V. Shreder, and M. Khene, *Fiz. Tekhn. Polupr.* **34**, 1030 (2000).
23. P. Pellegrino, P. L ev eque, J. Lalita, A. Hall en, C. Jagadish, and B.G. Svensson, *Phys. Rev. B* **64**, 195211 (2001).
24. M. Mikelsen, J.H. Bleka, J.S. Christensen, E.V. Monakhov, B.G. Svensson, J. Härkönen, and B.S. Avset, *Phys. Rev. B* **75**, 155202 (2007).
25. К.В. Шалимова, *Физика полупроводников* (Энергоатомиздат, Москва, 1985).
26. Y.H. Lee, J.W. Corbett, and K.L. Brower, *Phys. Stat. Sol. A* **41**, 637(1977).
27. М.Ф. Лугаков, В.В. Лукьяница, *ФТП* **20**, 742 (1986).
28. М.Ф. Лугаков, Т.А. Лукашевич, *ФТП* **22**, 2071 (1988).
29. Н.Д. Конозенко, А.К. Семенюк, В.И. Хиврич, *Радиационные эффекты в кремнии* (Наукова думка, Киев, 1981).
30. Р.Ф. Коноплева, В.Л. Литвинов, Н.А. Ухин, *Особенности радиационного повреждения полупроводников частицами высоких энергий* (Атомиздат, Москва, 1971).
31. В.И. Кузнецов, М.Ф. Лугаков, *ФТП* **13**, 625 (1979).
32. *Физические процессы в облученных полупроводниках* Ответственный редактор проф. Л.С. Смирнов (Наука, Сибирское отделение, Новосибирск, 1977).

Получено 16.03.10

ДВА КАНАЛИ ВІДПАЛУ ДИВАКАНСІЙ В
ОПРОМІНЕНИХ КРИСТАЛАХ КРЕМНІЮ *n*-ТИПУ

Т.А. Пагава, Н.Т. Бжалава, Н.И. Майсурадзе, Д.З. Хочолава,
Л.С. Чхартішвілі

Резюме

Досліджено зразки кремнію *n*-типу провідності, що одержані методом зонної плавки, з концентрацією основних носіїв струму $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, опромінені електронами з енергією 2 МеВ. Показано, що в опроміненіх зразках кремнію *n*-Si дивакансії відпалоються по двох каналах: шляхом їх конверсії в інші комплекси (V_2O чи PV_2) та дисоціацією на окремі моновакансії.

TWO MECHANISMS OF ANNEALING OF DIVACANCIES
IN IRRADIATED *n*-Si CRYSTALS

Т.А. Pagava, N.T. Bzhalava, N.I. Maisuradze, D.Z. Khocholava,
L.S. Chkhartishvili

Georgian Technical University, Department of Physics
(77, Kostava Str., Tbilisi 0175, Georgia;
e-mail: tpagava@gtu.ge)

Summary

We studied *n*-silicon samples obtained by the floating-zone method and irradiated by 2-MeV electrons with a majority-carrier concentration of $6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. It is shown that, in irradiated *n*-Si samples, divacancies are annealed by means of two mechanisms: their conversion to other complexes (V_2O or PV_2) or dissociation into separate monovacancies.