

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ И ОТЖИГА НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ

*М.Д. Варенцов, Г.П. Гайдар, А.П. Долголенко, П.Г. Литовченко
Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина
E-mail: gaidar@kinr.kiev.ua, факс +38(044)265-44-63*

Описан отжиг А-центров, дивакансий, А-центров, модифицированных водородом, в n-Si ($P \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$), в отсутствие и при наличии примеси платины, после облучения протонами с энергией 1,8 МэВ. Показано, что энергия активации отжига радиационных дефектов при взаимодействии с водородно-вакансионными дефектами уменьшается с 1,1 до 0,8 эВ при увеличении концентрации платины в кремнии, так как деформационные поля, создаваемые атомами платины, уменьшают энергию переориентации дефектов. Уточнено энергетическое положение в запрещенной зоне кремния донорного уровня А-центра ($E_V + 0,415 \text{ эВ}$) на основании известных данных о положении А-центра, модифицированного атомом углерода ($E_V + 0,38 \text{ эВ}$) или водорода ($E_V + 0,28 \text{ эВ}$).

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании термической стабильности радиационных дефектов в полупроводниках надо учитывать вид облучения, энергию ядерных частиц и температуру облучения. Кремний можно выращивать различными методами, легируя примесями типа Pt, Sn, Ge, которые создают повышенную деформацию решетки. Обычно ядерные частицы (H, He и другие) в решетке кремния подвижны, что может усложнить описание отжига радиационных дефектов. Водород в кремнии, обладая высокой диффузионной способностью, вступает во взаимодействие с различными дефектами кристаллической решетки. Поэтому изучение взаимодействия радиационных дефектов с водородом не только представляет научный интерес, но и имеет практическое значение. Так, водород, пассивируя оборванные связи на границе наноструктур, уменьшает концентрацию центров безызлучательной рекомбинации и таким образом повышает их фотолюминесценцию.

К числу наиболее изученных собственных дефектов в кремнии можно отнести дивакансии (V_2) и А-центры (VO). В кремнии с решеткой типа алмаза дивакансии создают шесть оборванных связей и являются амфотерными центрами. Они могут находиться в четырех зарядовых состояниях, которым соответствуют пять полос инфракрасного поглощения.

А-центр представляет собой атом кислорода, частично расположенный в вакантном узле решетки, и оборванных связей не имеет. Вместе с тем эксперименты свидетельствуют о том, что А-центр может быть амфотерным дефектом [1, 2].

Как известно [3], водород (H) модифицирует электрические свойства точечных дефектов и, в конце концов, может наблюдаться полная пассивация. Пассивация донорных и акцепторных уровней дефектов связана с амфотерным поведением атомарного водорода, который может находиться как в положительном зарядовом состоянии, в центре Si-Si-связи, так и в отрицательном (тетраэдрическом) междоузлии.

Пассивация дефектов обусловлена способностью водорода насыщать оборванные связи атомов кремния [4].

Одним из главных свойств водорода в кремнии является понижение энергетического положения акцепторных и донорных уровней дефектов, которые исчезают в валентной зоне после одного или двух атомов водорода, добавленных к дефекту. Это является следствием кулоновского поля, возникающего от протонов. Поэтому VOH_2 и VO_2 являются электрически неактивными. Присоединение водорода к А-центру (VOH) понижает энергию акцепторного уровня А-центра ($E_c - 0,175 \text{ эВ}$) на 0,135 эВ, т. е. энергетическое положение А-центра, модифицированного водородом, становится равным $E_c - 0,31 \text{ эВ}$ [5, 6].

Очень большой разброс существует в литературе относительно энергии активации диффузии водорода в кремнии (от 0,48 эВ при высокой температуре до 1,2 эВ при 225...350 °С), вероятно, отражая сильную зависимость подвижности водорода от его зарядового состояния [7, 8]. Используемые численные значения для коэффициентов диффузии водорода в кремнии даются формулой: $D_H = 5 \cdot 10^{-3} \exp(-0,8 / kT) \text{ см}^2/\text{с}$. Энергия активации $\sim 0,8 \text{ эВ}$ получена и для диффузии молекулы водорода (H_2), но предэкспоненциальный фактор составляет $\sim 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ [9, 10].

Энергия активации для аннигиляции дефектов, содержащих вакансии, определяется захватом межузельного атома кремния (I_{Si}). Она включает как энергию активации движения I_{Si} , так и энергию его связи на уровне захвата [11]. Энергия связи определяется химической природой двух атомов. Энергия связи вакансии с фосфором большая и изменяется от 0,92 до 1,28 эВ в первой координационной сфере [12]. Энергия связывания вакансий в дивакансии равна 1,6 эВ [13], а миграции – 1,3 эВ. Энергия диссоциации H_2 в двух тетраэдрических пустотах (H_{BC}), как было определено в [14], равна $\sim 1,6 \text{ эВ}$. Энергия связывания водорода с межузельным атомом кремния $E_{\text{cs}} = 1,34 \text{ эВ}$ [15]. Деформация в образце кремния в определенном кристаллографическом

направлении позволила определить энергию реориентации (переориентации) радиационных дефектов. Процесс электронной реориентации, измеренный G. D. Watkins и J. W. Corbett [13], при термической активации прыжков дивакансии показал, что энергия переориентации дивакансии равна 0,056 эВ, а А-центра – $E_n = 0,38$ эВ [16].

Введение водорода в кислородно-обогащенный кремний также ведет к повышенной диффузии кислорода в температурной области около 350 °С с энергией активации 1,7...2,0 эВ [8]. Предполагается, что водород катализирует движение кислорода. Барьер при обычной диффузии кислорода (2,5 эВ) эффективно устраняется в присутствии Si-H. Это происходит из-за формирования метастабильных конфигураций с участием атомов кислорода и водорода (ОН), благодаря которым существенно (в 200 раз при температуре 300 °С) повышается коэффициент диффузии кислорода [17]. Водород, вводимый в кристаллы имплантацией, обработкой в водородной плазме или отжигом в атмосфере водорода с последующей закалкой, приводит к повышению коэффициента диффузии алюминия и других примесей [18]. Обработка образцов кремния в водородной плазме приводит к уменьшению скорости введения углеродных дефектов (C₁O₂, C₁C₂ и др.), так как вводятся протяженные дефекты типа вакансионных конгломератов, в которых оборванные связи пассивированы водородом [19].

Атомы платины (Pt) широко применяются в полупроводниковой технологии для уменьшения времени жизни носителей заряда, потому что акцепторный уровень платины является идеальным рекомбинационным центром. Переходные металлы (Pt, Pd, Au, Ag) имеют большой атомный радиус, поэтому, с одной стороны, гасят эффект растяжения вокруг пустот в кристалле, а с другой стороны, используются для улучшения гетерирования. Упругое сжатие уменьшает энергию активации отжига. Так энергия активации отжига А-центра (1,3 эВ) при одноосном сжатии уменьшается до 1,03 эВ, а Е-центра (VP) – с 0,94 до 0,73 эВ [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для восстановления электрофизических свойств полупроводниковых материалов и приборов на их основе обычно используют отжиг. Когда концентрация радиационных дефектов, созданных ядерным излучением в твердом теле, превышает равновесный уровень при данной температуре, то при подходящих условиях эти дефекты будут взаимодействовать не только с фоновыми примесями, но и с атомами, введенными ядерными частицами, и таким образом уменьшать свободную энергию кристалла. Описать отжиг проще всего с помощью уравнений, подобных тем, которые применяются в химической кинетике.

Накопление или исчезновение P концентрации дефектов вследствие процесса отжига первого порядка можно определить через константы скорости K :

$$\frac{dP^i}{dt} + K_i (P^i - P_m^i) = 0, \quad \frac{dP^j}{dt} = -K_j P^j. \quad (1)$$

Обычно константа скорости равна $K_{i,j} = A^{i,j} \exp(-E_a^{i,j} / kT)$, где $A^{i,j}$ – частотные факторы; $E_a^{i,j}$ – энергия активации процесса; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; j, i – количество каналов отжига и накопления дефектов соответственно.

Проинтегрировав уравнения (1) и просуммировав разные каналы отжига или накопления дефектов, получим

$$P(T) = \sum_{j=1}^k P_0^j \exp\left[-A^j t \exp\left(-E_a^j / kT\right)\right] + \sum_{i=1}^m P_m^i \left[1 - \exp\left(-A^i t \exp\left(-E_a^i / kT\right)\right)\right] - \sum_{l=1}^n P_{00}^l. \quad (2)$$

Последний член P_{00}^l связан с тем, что процесс отжига идет не до конца. Тут P_0^j – доля отжига концентрации дефектов в j -способе; P_m^i – доля накопления концентрации дефектов в i -способе; t – время отжига. Образование более стабильного дефекта возможно, например, за счет отжига другого дефекта. Межузельные атомы кремния, подвижные при комнатной температуре, способны отжигать не только А-центры, но и дивакансии.

Скорости изменения концентрации вакансий и А-центров равны:

$$\frac{d[V]}{dt} = \frac{[I]}{\tau_a} - \frac{[V]}{\tau_b}, \quad \frac{d[VO_i]}{dt} = \frac{[V]}{\tau_b}, \quad (3)$$

$$\text{где } \tau_a = \frac{1}{\nu_a} = \frac{1}{\nu_a^0} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right), \quad \tau_b = \frac{1}{\nu_b} = \frac{1}{\nu_b^0} \exp\left(\frac{E_b}{kT}\right)$$

– времена жизни межузельного атома и вакансии соответственно до захвата дивакансией и межузельным кислородом; $[V]$, $[I]$, $[VO_i]$ – концентрации вакансий, межузельных атомов, А-центров соответственно; ν_a^0 , ν_b^0 – частотные предэкспоненциальные множители; E_a , E_b – энергии активации отжига дивакансий и активации образования А-центров соответственно.

Решения уравнений (3) являются функциями от температуры отжига T . Изменение концентрации А-центров в зависимости от температуры отжига облученного кремния равно

$$[VO_i] = [I_0] \frac{(\nu_a [1 - \exp(\nu_b t)] - \nu_b [1 - \exp(-\nu_a t)])}{(\nu_a - \nu_b)}. \quad (4)$$

Изменение концентрации вакансий в зависимости от температуры отжига облученного кремния

$$[V] = [I_0] \nu_a [\exp(-\nu_a t) - \exp(\nu_b t)] / (\nu_b - \nu_a), \quad (5)$$

где $[I_0]$ – первоначальная концентрация межузельных атомов кремния.

Полученные уравнения (1)-(5) были применены

нами при описании изохронного отжига А-центров, дивакансий и А-центров, модифицированных водородом (рис. 1). Образцы, облученные на глубину 39,6 мкм протонами с энергией 1,8 МэВ, были легированы фосфором с концентрацией $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Отжиг проводился на структурах $p^+n p^+$ в области 100...400 °С в течение 30 мин. Радиационные дефекты были изучены с помощью спектрометра DLTS [21].

На рис. 1, а показан изохронный отжиг А-центров в n-Si, содержащем различную концентрацию платины, описанный с помощью уравнения (2) и трех каналов исчезновения DLTS-сигнала от А-центра и одного канала накопления. Параметры расчета, реакции накопления и отжига А-центров приведены в табл. 1. Здесь E_a и ν – энергия активации накопления и исчезновения А-центров и их частотный фактор; E_b – потенциальный барьер взаимодействия между подвижным дефектом и стоком; h – концентрация стадий в единицах DLTS-сигнала; $N_s \text{ см}^{-3}$ – концентрация стоков; T – температура центра стадий отжига; $D_0, \text{ см}^2/\text{с}$ – предэкспоненциальный множитель коэффициента диффузии подвижного дефекта; R – радиус захвата А-центром или стоком подвижного дефекта при температуре центра стадии отжига. Стадия

накопления А-центров в области температур 350...400 К была описана с помощью уравнения (4). Как видно из табл. 1, отжиг А-центров происходит путем захвата вакансионно-водородных комплексов. При увеличении концентрации Pt в n-Si энергия активации отжига А-центра уменьшается с 1,1 до 0,7 эВ и также уменьшается средняя температура стадий отжига А-центров. Такое изменение энергии активации отжига А-центра аналогично его отжигу при одноосном упругом сжатии [20], так как атомы Pt вносят в образец дополнительное упругое сжатие решетки кремния. А энергия миграции А-центра на кислородный сток (O_i), равная 1,86 эВ, не зависит от содержания платины, хотя средняя температура стадии отжига А-центра уменьшается с увеличением концентрации платины. Отжиг А-центров в n-Si, выращенном методом Чохральского, после облучения быстрыми электронами происходит путем захвата димежузельных и межузельных атомов кремния. Эти стадии отжига А-центров при облучении 1,8 МэВ протонами отсутствуют, так как при этом вводятся протяженные дефекты типа вакансионных конгломератов, в которых оборванные связи пассивированы водородом и которые обладают высокой вероятностью захвата межузельных атомов кремния [19].

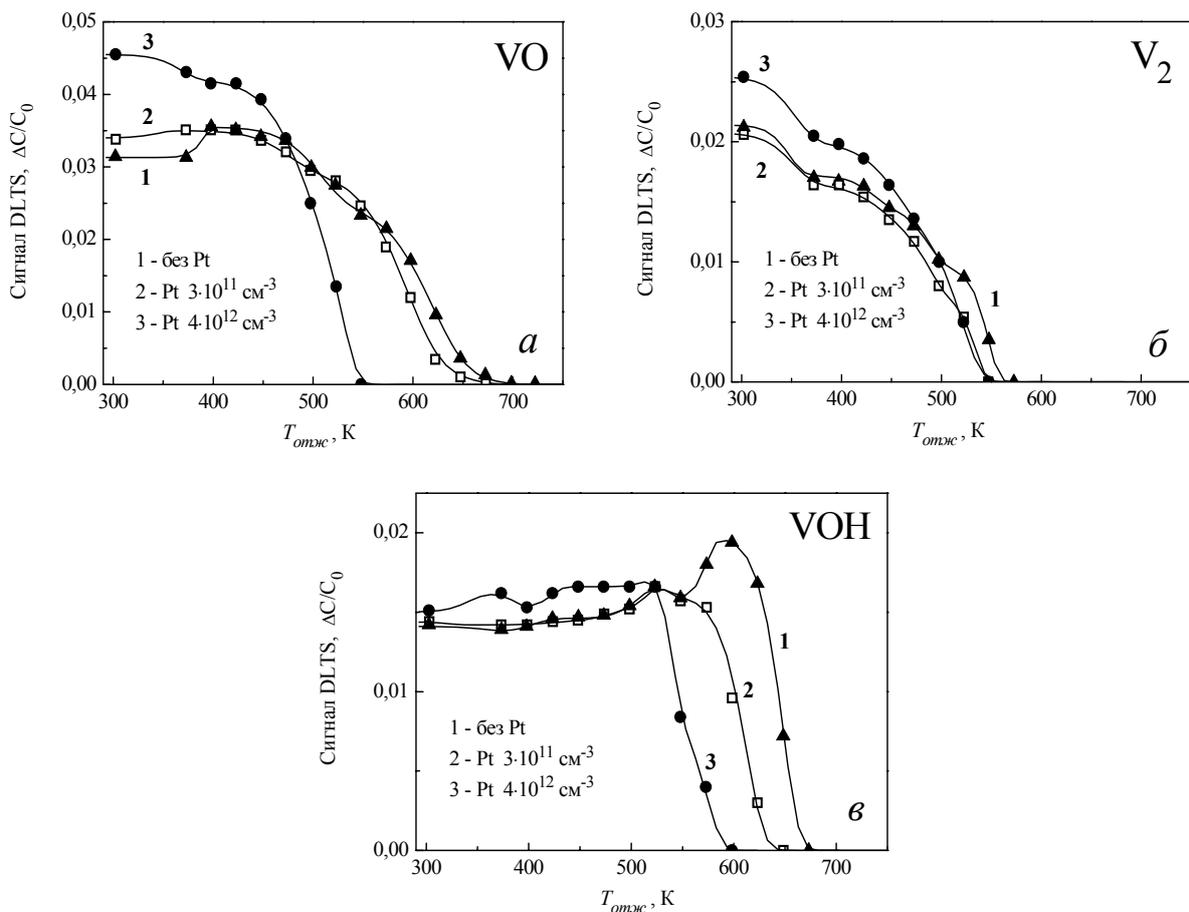


Рис. 1. Изохронный отжиг дефектов в n-Si с примесью платины (крив. 2, 3) и без нее (крив. 1), облученном протонами с энергией 1,8 МэВ: а – А-центров (VO); б – дивакансий (V₂); в – А-центров, модифицированных водородом (VOH). ▲, □, ● – экспериментальные данные получены в [21]; — — — теоретическое описание сделано авторами данной работы

Таблица 1

Параметры изохронного отжига А-центров (VO) в n-Si с примесью платины и без нее, облученном протонами с энергией 1,8 МэВ (экспериментальные данные [21])

А-центры	Процесс	Реакция	E_a , эВ	E_b , эВ	$\nu e^{-\frac{E_a}{kT}}$, c^{-1}	h	N , cm^{-3}	D_0 , cm^2/c	\bar{T} , $^{\circ}C$	R , Å
VO-Pt-0 $N_{Pt}=0$	Отжиг	$VO+VH_2 \rightarrow V_2OH_2$	0,9		$4,5 \cdot 10^5$	0,0105	$2,61 \cdot 10^{12}$	$2,53 \cdot 10^{-3}$	227,22	1041
		$VO+VH \rightarrow V_2OH$	1,1		$4,5 \cdot 10^5$	0,0236	$1,15 \cdot 10^{12}$	$2,28 \cdot 10^{-3}$	338,38	1370
		$VO+O_i \rightarrow VO_{2i}$	1,86		$3,5 \cdot 10^{10}$	0,0014	$9,27 \cdot 10^{17}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$	398,56	14,7
	Образование	$I_{2Si}+V_3 \rightarrow V$	0,74		$5 \cdot 10^6$	0,0042	-	-	-	-
		$V+O_i \rightarrow VO_i$	0,8		$2 \cdot 10^7$	0,0042	-	-	-	-
VO-Pt-11 $N_{Pt}=3 \cdot 10^{11} cm^{-3}$	Отжиг	$VO+VH_2 \rightarrow V_2OH_2$	0,8		$1,5 \cdot 10^5$	0,0055	$2,76 \cdot 10^{12}$	$4,24 \cdot 10^{-4}$	196,33	1023
		$VO+VH \rightarrow V_2OH$	1,0		$1,5 \cdot 10^5$	0,028	$1,32 \cdot 10^{12}$	$6,94 \cdot 10^{-4}$	313,66	1300
		$VO+O_i \rightarrow VO_{2i}$	1,86		$8 \cdot 10^{10}$	0,0015	$9,27 \cdot 10^{17}$	$4,67 \cdot 10^{-2}$	381,72	14,7
	Образование	$V+O_i \rightarrow VO_i$	0,8		$3 \cdot 10^8$	0,001	$9,27 \cdot 10^{17}$	$3,27 \cdot 10^{-4}$	58,5	14,7
VO-Pt-12 $N_{Pt}=4 \cdot 10^{12} cm^{-3}$	Отжиг	$VO+VH_2 \rightarrow V_2OH_2$	0,7		$2 \cdot 10^6$	0,0035	$3,76 \cdot 10^{12}$	$4,59 \cdot 10^{-3}$	90,12	922
		$VO+VH \rightarrow V_2OH$	0,8		$8,5 \cdot 10^4$	0,022	$2,67 \cdot 10^{12}$	$2,46 \cdot 10^{-4}$	210,2	1034
		$VO+O_i \rightarrow VO_{2i}$	1,86	0,36	$8,3 \cdot 10^{10}$	0,020	$9,27 \cdot 10^{17}$	134,4	254,33	14,7

Примечание. Отсутствие значений в столбце E_b (табл. 1) свидетельствует о том, что значения частотных факторов приводятся в предположении $E_b = 0$.

На рис. 1, б показан изохронный отжиг дивакансий в n-Si, содержащем различную концентрацию платины, описанный с помощью уравнения (2) и трех каналов исчезновения DLTS-сигнала от дивакансии и одного канала ее диссоциации. Параметры расчета и реакции отжига дивакансий представлены в табл. 2. Как видно, отжиг V_2 происходит путем захвата атомов и молекул водорода. При увеличении концентрации Pt в n-Si энергия активации отжига дивакансии не

зависит от содержания платины, хотя средняя температура стадий отжига V_2 слегка растет с увеличением концентрации платины. Энергия миграции V_2 на свободный кислород (O_i), равная 1,3 эВ, не зависит от содержания платины, но средняя температура отжига этой стадии увеличивается с ростом концентрации Pt, а температура диссоциации дивакансии уменьшается. Стадии взаимодействия V_2 с Isi и димеждоузлиями кремния, как и в случае А-центров, отсутствуют.

Таблица 2

Параметры изохронного отжига дивакансий (V_2) в n-Si с примесью платины и без нее, облученном протонами с энергией 1,8 МэВ (экспериментальные данные [21])

Дивакансии	Процесс	Реакция	E_a , эВ	E_{cb} , эВ	$\nu e^{-\frac{E_a}{kT}}$, c^{-1}	h	N , cm^{-3}	D_0 , cm^2/c	\bar{T} , $^{\circ}C$	R , Å
V_2 -Pt-0 $N_{Pt}=0$	Отжиг	$V_2+H_2 \rightarrow V_2H_2$	0,8	-	$2 \cdot 10^8$	0,0042	$1,64 \cdot 10^{12}$	0,798	71,14	1215
		$V_2+H \rightarrow V_2H$	1,0	-	$2,5 \cdot 10^8$	0,0025	$1,35 \cdot 10^{12}$	1,14	153,65	1297
		$V_2+O_i \rightarrow V_2O_i$	1,3	-	$1,5 \cdot 10^{10}$	0,0052	$9,27 \cdot 10^{17}$	$8,76 \cdot 10^{-3}$	209,08	14,7
		$V_2 \leftrightarrow V+V$	2,5	1,6	$8,6 \cdot 10^4$	0,0095	$8,16 \cdot 10^{11}$	$3,81 \cdot 10^{11}$	270,25	1534
V_2 -Pt-11 $N_{Pt}=3 \cdot 10^{11} cm^{-3}$	Отжиг	$V_2+H_2 \rightarrow V_2H_2$	0,6	-	$2 \cdot 10^5$	0,0042	$1,59 \cdot 10^{12}$	$8,15 \cdot 10^{-4}$	73,95	1228
		$V_2+H \rightarrow V_2H$	0,7	-	$5 \cdot 10^4$	0,0035	$1,41 \cdot 10^{12}$	$2,21 \cdot 10^{-4}$	161,82	1278
		$V_2+O_i \rightarrow V_2O_i$	1,3	-	$1,3 \cdot 10^{10}$	0,006	$9,27 \cdot 10^{17}$	$7,59 \cdot 10^{-3}$	211,29	14,7
		$V_2 \leftrightarrow V+V$	2,5	1,6	$1,33 \cdot 10^5$	0,007	$1,62 \cdot 10^{12}$	$8,06 \cdot 10^{11}$	258,27	1221
V_2 -Pt-12 $N_{Pt}=4 \cdot 10^{12} cm^{-3}$	Отжиг	$V_2+H_2 \rightarrow V_2H_2$	0,6	-	$1,8 \cdot 10^5$	0,0054	$1,95 \cdot 10^{12}$	$7,11 \cdot 10^{-4}$	73,95	1147
		$V_2+H \rightarrow V_2H$	0,7	-	$2,7 \cdot 10^4$	0,0072	$1,41 \cdot 10^{12}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$	174,04	1278
		$V_2+O_i \rightarrow V_2O_i$	1,3	-	$2 \cdot 10^9$	0,0128	$9,27 \cdot 10^{17}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$	242,25	14,7

На рис. 1, в приведен изохронный отжиг А-центра, модифицированного водородным атомом, в n-Si, содержащем различную концентрацию платины. Отжиг описан с помощью уравнения (2) и трех каналов исчезновения DLTS-сигнала от VОН-дефекта, а также трех каналов его накопления в процессе термического воздействия. Параметры расчета и реакции отжига VОН-дефекта приведены в табл. 3, где также показаны энергии связи $E_{св}$: V-ОН (0,8 эВ); V-VОН₂ (1,6 эВ); VОН-Н (0,7 эВ); V-VОН₃ (1,6 эВ). Энергия связывания водорода и

кислорода ~ 0,28 эВ [10]. Основными стадиями отжига VОН-дефекта являются диссоциация с энергией активации 2,5 эВ и объединение со свободным кислородом (2,0 эВ). С увеличением концентрации платины средняя температура этих двух стадий уменьшается. Так как энергия диффузии кислорода в кремнии в присутствии водорода уменьшается до 2,0...1,7 эВ, то можно предположить, что не VОН-дефект мигрирует на кислородный сток, а свободный кислород мигрирует к VОН-дефекту.

Таблица 3

Параметры изохронного отжига А-центров, модифицированных водородом (VОН), в n-Si с примесью платины и без нее, облученном протонами с энергией 1,8 МэВ (экспериментальные данные [21])

А – центры	Процесс	Реакция	E_a , эВ	$E_{св}$, эВ	$\nu e^{-\frac{E_{св}}{kT}}$, с ⁻¹	h	N , см ⁻³	D_0 , см ² /с	\bar{T} , °С	R , Å
VОН-Pt-0 $N_{Pt}=0$	Отжиг	VОН+VН ₂ →V ₂ ОН ₃	0,7	-	$3 \cdot 10^6$	0,0004	$1,20 \cdot 10^{12}$	$1,47 \cdot 10^{-2}$	83,65	1347
		VОН+O _i →VO _{2i} H	2,0	-	$2 \cdot 10^{15}$	0,0012	$9,27 \cdot 10^{17}$	$1,17 \cdot 10^3$	265,57	14,7
		VОН↔O _i +VН	2,5	0,8	$7,89 \cdot 10^9$	0,0198	$9,27 \cdot 10^{17}$	$8,47 \cdot 10^3$	370,62	14,7
	Образование	VO+H→VОН	0,9	-	$8 \cdot 10^7$	0,0009	$3,04 \cdot 10^{12}$	$2,12 \cdot 10^{-1}$	127,78	989
		VОН ₂ ↔VОН+H	1,6	0,7	$3,83 \cdot 10^5$	0,0022	$1,36 \cdot 10^{12}$	$2,04 \cdot 10^4$	228,85	1294
		V ₂ ОН ₂ ↔VОН+VН	3,2	1,6	$5,29 \cdot 10^{10}$	0,0042	$1,53 \cdot 10^{12}$	$2,82 \cdot 10^{16}$	298,00	1244
VОН-Pt-11 $N_{Pt}=3 \cdot 10^{11}$ см ⁻³	Отжиг	VОН+VН ₂ →V ₂ ОН ₃	0,7	-	$5 \cdot 10^7$	0,0002	$1,23 \cdot 10^{12}$	0,242	44,43	1338
		VОН+O _i →VO _{2i} H	2,0	-	$1,5 \cdot 10^{13}$	0,0161	$9,27 \cdot 10^{17}$	8,76	334,55	14,7
		VОН↔O _i +VН	2,5	0,8	$6 \cdot 10^{12}$	0,001	$9,27 \cdot 10^{17}$	$1,46 \cdot 10^8$	256,11	14,7
	Образование	VO+H→VОН	0,9	-	$3 \cdot 10^7$	0,0002	$2,98 \cdot 10^{12}$	$8,04 \cdot 10^{-2}$	143,45	996
		VO+H→VОН	1,3	-	$2,8 \cdot 10^{10}$	0,0007	$2,73 \cdot 10^{12}$	79,5	199,65	1025
		V ₂ ОН ₃ ↔VОН+VН ₂ VН ₂ +Pt→PtVН ₂	2,5	1,6	$2,6 \cdot 10^5$	0,002	$1,38 \cdot 10^{12}$	$5,81 \cdot 10^{12}$	240,67	1286
VОН-Pt-12 $N_{Pt}=4 \cdot 10^{12}$ см ⁻³	Отжиг	VОН+O _{2i} →VO _{3i} H	1,5	-	$2 \cdot 10^{16}$	0,0009	$9,27 \cdot 10^{17}$	$1,17 \cdot 10^4$	110,44	14,7
		VОН+O _i →VO _{2i} H	2,0	-	$2 \cdot 10^{14}$	0,009	$9,27 \cdot 10^{17}$	116,8	295,97	14,7
		VОН↔O _i +VН	2,5	0,8	$3,43 \cdot 10^{12}$	0,0096	$9,27 \cdot 10^{17}$	$6,43 \cdot 10^7$	264,16	14,7
	Образование	ОН+V→VОН	0,7	-	$1 \cdot 10^7$	0,0012	$5 \cdot 10^{13}$	$4,09 \cdot 10^{-3}$	65,75	389
		VОН ₂ ↔VОН+H	1,6	0,7	$2,41 \cdot 10^7$	0,0013	$1,38 \cdot 10^{12}$	$2,69 \cdot 10^7$	147,14	1379
		V ₂ ОН ₃ ↔VОН+VН ₂ VН ₂ +Pt→PtVН ₂	2,5	1,6	$2,53 \cdot 10^5$	0,002	$1,46 \cdot 10^{12}$	$5,2 \cdot 10^{12}$	241,4	1265

Известно [22], что А-центр не имеет оборванных связей, и электрическая активность VO возникает из реконструкции Si-Si-связи. VОН-дефект образуется, когда А-центр захватывает атом водорода. Чтобы VO мог взаимодействовать с атомом Н, реконструируемая связь Si-Si прерывается и надо затратить энергию для уменьшения взаимодействия VO с Н. Также VОН-дефект (см. табл. 3), образуется как продукт диссоциации VОН₂, V₂ОН₂, V₂ОН₃ с большей вероятностью, чем при взаимодействии А-центра с атомарным водородом. При этом энергия активации возрастает с 0,9 до 1,3 эВ, когда А-центр переориентируется в процессе взаимодействия с атомом водорода. Средняя температура диссоциации V₂ОН₃ (~ 240 °С) не зависит от концентрации платины в образце Si, и VОН₂ с увеличением содержания Pt также не меняет энергию диссоциации, тем не менее, средняя температура диссоциации уменьшилась почти на

~ 80 °С. V₂ОН₂ обладает самой высокой температурой диссоциации (~ 300 °С) и наблюдается лишь в n-Si, не содержащем платины. Диссоциация V₂ОН₃ в кремнии без платины не происходит, так как платина выступает в качестве катализатора при его диссоциации, взаимодействуя с водородно-вакансионным дефектом VН₂.

Концентрация дефекта, обозначенного в работе [21] как P3 (258 К), достигает своего максимума в температурном интервале отжига 225...275 °С. Авторы [21] предположили, что P3 связан с комплексом, содержащим вакансии, атомы платины и кислорода. Из нашей табл. 3 видно, что при температуре отжига ~ 240 °С концентрация VОН и VН₂ растет за счет диссоциации V₂ОН₃. Поэтому можно предположить, что P3 – это дефект PtVН₂. Полученная авторами [21] кинетика накопления E6 (V₂Н) позволила нам показать, что молекула водорода (H₂) и ее комплекс с вакансией обладают

меньшей энергией миграции, чем атом водорода и его комплекс с вакансией (VH).

В табл. 1-3 приведен расчет радиуса захвата стоком подвижного дефекта и предэкспоненциального множителя его коэффициента диффузии, а также средняя температура стадий предложенных реакций по отжигу и накоплению радиационных дефектов VO, V₂, VOH в образцах n-Si с различным содержанием платины.

Параметры, определяющие атомные взаимодействия, – это энергия связи и радиус захвата, которые можно определить недостаточно надежно. Радиус захвата – это не стопроцентная вероятность захвата подвижного дефекта на сток. В работе [23] даны выражения для расчета радиуса захвата подвижного дефекта неподвижным стоком. Если существует барьер для захвата дефекта на сток, то эффективный радиус захвата и его вероятность будут пропорциональны $\exp(-E_{\bar{\sigma}}/kT)$, где $E_{\bar{\sigma}}$ – величина барьера. Радиус эффективного взаимодействия можно оценить из условия, когда энергия связи порядка kT . В случае, когда подвижный дефект и сток обладают зарядом q_1 и q_2 , то $R_{\text{эф}} = q_1 q_2 / kT$.

Исследование миграции межузельного углерода (C_i) и дивакансии (V₂) в кремнии, выращенном зонной плавкой (FZ) и методом Чохральского (Cz), на стоки типа межузельного кислорода показали, что энергии активации движения не зависят от метода выращивания, а частотные факторы больше в кремнии, полученном методом Cz [24, 25]. Так как при таком движении, описываемом марковским процессом, средний путь дефекта на сток зависит от частотного фактора, то обычно говорят, что чем меньше частота скачков, тем больший путь должен пройти дефект на сток при отжиге. Температурная зависимость частоты скачков дефектов (ν), называемая аррениусовской, определяется выражением $\nu = \nu_0 \exp(-E_{\bar{\sigma}}/kT)$, где $\nu_0 = 15$ ГГц – типичная фонная частота атомов в кремнии.

В работе [26] предложен механизм образования V₂O в предположении, что при $T \sim 220$ °C межузельный кислород O_i неподвижен и служит ловушкой для диффундирующей нейтральной дивакансии. При миграции V₂ по решетке кремния с энергией 1,3 эВ дивакансия преодолевает в среднем барьер +0,31 эВ, но при взаимодействии с O_i вынуждена преодолевать барьер +0,42 эВ. Энергия связи V₂O равна 1,34 эВ. Частотные факторы миграции V₂ на стоки равны $\sim 5 \cdot 10^8$ с⁻¹ и $1 \cdot 10^9$ с⁻¹ в Si (FZ) и Si (Cz) [25] соответственно. Следовательно, при миграции V₂ на стоки дивакансия преодолевала кинетический барьер $\sim 0,44$ и $0,4$ эВ соответственно. При 300 °C V₂O диссоциирует по реакции V₂O → V₂ + O_i. При этом энергия диссоциации равна 1,34 + 1,3 = 2,64 эВ. Итак, энергия движения V₂ в решетке кремния равна кинетическому барьеру ($\sim 0,4$ эВ) и энергии миграции (1,3 – 0,4 = 0,9 эВ). Увеличение барьера при миграции V₂ с 0,31 до 0,42 эВ авторы [26]

связывают с переориентацией O_i в вакантном узле V₂.

При исследовании термической стабильности А-центров (экспериментальные данные Whan R.E. [27]) нами получена энергия активации отжига 1,3 эВ [28], связанная с аннигиляцией межузельного атома кремния с А-центром (реакция $\overset{\wedge}{\text{VO}} + \text{I}_{\text{Si}} \rightarrow \text{O}_i$), в процессе которого O_i внутри вакансии переориентировался с энергией 0,38 эВ [28]. Если при взаимодействии V₂ с O_i дивакансии не надо преодолевать барьеры, то при взаимодействии C_i с O_i [28] такие барьеры, которые не превышают энергию связывания C_iO_i (1,7 эВ), межузельному атому углерода пришлось преодолевать. Эти барьеры обусловлены деформацией, создаваемой межузельным атомом кислорода в решетке кремния.

Таким образом, энергия активации взаимодействия подвижного дефекта со стоком определяется кинетическим барьером, энергией миграции дефекта, энергией реориентации стока и барьером захвата на сток. При диссоциации радиационного комплекса надо знать энергию связи и энергию движения подвижного дефекта в решетке кремния.

Энергия связи вакансии и межузельного атома кислорода в А-центре равна $E_{ca} = (0,7 \div 0,8)$ эВ [29]. Механизм миграции А-центра на сток (O_i) состоит, по нашему мнению, из последовательных процессов – диссоциации А-центра на V и O_i (при этом O_i возвращается в межузельное положение), миграции вакансии и скачка O_i в новое положение, занимаемое вакансией. Тогда величина барьера захвата А-центра на сток O_i будет следующей: $E_{\bar{\sigma}} = E_a - (E_{ca} + E_m^V)$. Энергия миграции вакансии определена в [30]: $E_m^V = 0,8$ эВ. Учитывая энергию активации движения А-центра на сток ($E_a = 1,86$ эВ), получим барьер захвата $E_{\bar{\sigma}} = 1,86 - (0,7 + 0,8) = 0,36$ эВ (см. табл. 1). Тогда частотный фактор с учетом полученного барьера

равен $\nu e^{-\frac{E_{\bar{\sigma}}}{kT}} = 8,3 \cdot 10^{10}$ с⁻¹. Ранее полученное значение частотного фактора ($2,3 \cdot 10^{14}$ с⁻¹) превышало допустимое значение для кремния, так как максимальная частота колебаний атомов кремния не может быть выше $1,5 \cdot 10^{13}$ с⁻¹. Поэтому и возник вопрос о наличии барьера захвата А-центра на сток O_i. В других случаях, когда температура отжига выше (~ 400 °C), энергия миграции вакансии возрастает до $E_m^V = 1,1$ эВ [28]. Поэтому $E_{\bar{\sigma}} = 0$, как мы и предположили (см. *Примечание* к табл. 1).

В работе [31] сообщается об одновременном появлении двух дефектов с уровнями в запрещенной зоне кремния $E_V + 0,35$ эВ и $E_V + 0,38$ эВ при отжиге C_i-центров. Первый уровень не стабилен при комнатной температуре, и его исчезновение сопровождается дальнейшим ростом концентрации дефектов с уровнем $E_V + 0,38$ эВ. Межузельный углеродный дефект возникает как продукт взаимодействия между атомом кремния и узельным

углеродом (C_s) путем "kick out" - механизмом захвата [32]. В первой конфигурации C и Si атомы размещаются вдоль $\langle 001 \rangle$ направления, деля вакантный узел решетки кремния. Эта "split"-конфигурация является наиболее стабильной конфигурацией для C_i в кремнии. Реакция $C_s + I_{Si} \rightarrow C_i$ считается экзотермической с освобождением энергии 1,2 эВ. Поэтому углерод из узла перемещается в межузельное положение и движется по решетке кремния с энергией $E_m = 0,87$ эВ. "Split"-конфигурация C_i взаимодействует с O_i , который тут же занимает вакантный узел, образуя дефект $C_iVO_iI_{Si}$ ($E_V + 0,35$ эВ). Этот дефект при $T_{комн}$ не стабилен, так как I_{Si} уходит на стоки [31], образуя дефект C_iVO_i ($E_V + 0,38$ эВ). Увеличение энергии донорного дефекта C_iVO_i на 0,03 эВ свидетельствует, что именно I_{Si} уходит на стоки при комнатной температуре [33]. C_i в межузельном положении взаимодействует с O_i с энергией активации процесса 0,87 эВ, образуя $(CO)_i$ дефект с энергетическим положением $E_V + 0,34$ эВ [34]. Но при взаимодействии с А-центрами энергия активации уменьшается до 0,77 эВ, так как барьер взаимодействия C_i с VO_i меньше, чем с O_i . Как видно из рис. 2, рост колебательной полосы $865,9 \text{ см}^{-1}$ (крив. 2) после отжига C_i (крив. 1, 3) происходит с энергиями активации 0,77 эВ и 2,5 эВ в температурных интервалах 260...310 К и 310...325 К соответственно. Последний процесс можно объяснить как движение O_i в вакансию, которую покидает атом углерода: $C_sO_i \rightarrow C_iVO_i$. Именно O_i имеет энергию активации диффузии в кремнии, равную 2,5 эВ.

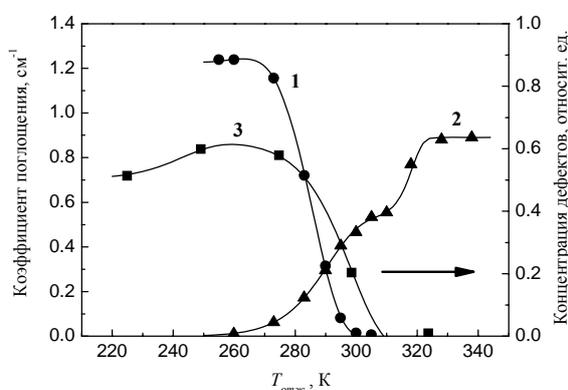


Рис. 2. Образование колебательной полосы $865,9 \text{ см}^{-1}$ (2) при изохронном отжиге межузельного углерода (C_i) в электронно-облученном Cz-Si (1, 3).

- , ▲ – экспериментальные данные [35];
- – экспериментальные данные [27];
- — теоретическое описание кривых 1–3
сделано авторами данной работы

Авторы [36] с помощью DLTS-измерений связали донорный уровень $E_V + 0,38$ эВ с C-VO-комплексом. В дальнейшем в работе [2] на основе данных магнитного спектрометра было установлено, что А-центр является амфотерным дефектом с акцепторным $E_c - 0,17$ эВ и донорным уровнем $E_c - 0,76$ эВ. Согласно модели

модификации донорных и акцепторных уровней радиационных дефектов фоновыми примесями типа C_i и O_i в работе [37] показано, что межузельный углерод повышает энергию акцепторных уровней в запрещенной зоне кремния и понижает энергию донорных уровней на 0,035 эВ. Поэтому можно предположить, что А-центр в кремнии имеет донорный уровень $(0/+)$ $E_V + 0,415$ эВ.

С другой стороны, известно, что водород, пассивируя А-центр, понижает энергетическое положение не только донорных, но и акцепторных уровней. VОН-комплекс с акцепторным $E_c - 0,31$ эВ и донорным уровнем $E_V + 0,28$ эВ был детально изучен, включая экспериментальное микроскопическое определение с помощью ЭПР-методики [5].

Таким образом, при модификации А-центра атомом водорода энергия его акцепторного и донорного уровней понижается на величину $0,31 - 0,175 = 0,135$ эВ. Тогда донорный уровень А-центра равен $E_V + 0,415$ эВ ($0,28 + 0,135 = 0,415$). Так как А-центр и VОН-комплекс являются амфотерными дефектами, которые при захвате электрона увеличивают энергетическое положение в запрещенной зоне кремния на величину $\Delta = 0,265$ эВ, тогда можно предположить, что А-центр будет иметь в запрещенной зоне кремния и второй донорный уровень $(+/++)$ $E_V + 0,15$ эВ, а VОН-комплекс – второй акцепторный уровень $(=/-)$ $E_c - 0,045$ эВ. Таким образом, показываем, что А-центр и VОН-комплекс являются многозарядными центрами.

В работе [38] изучено формирование метастабильного водородосодержащего радиационного дефекта (MHR). Комплексные исследования электрических, оптических и магнитных свойств MHR-центров показали, что они являются многозарядными дефектами с отрицательной корреляционной энергией ($U < 0$), т. е. дефектами с инверсным расположением уровней в запрещенной зоне кремния с уровнем $E_c - 0,075$ эВ. Ранее было сделано заключение, что MHR-центр является комплексом VОН [39]. Поэтому естественно предположить, что VОН имеет еще метастабильный акцепторный уровень $E_c - 0,075$ эВ ($\equiv/=$), который лежит ниже акцепторного уровня VОН ($E_c - 0,045$ эВ) ($\neq/-$) в запрещенной зоне кремния.

ВЫВОДЫ

В данной работе на основе экспериментальных данных [21] рассчитаны кривые отжига А-центров, дивакансий и VОН-комплексов в образцах n-Si с различной концентрацией платины после облучения протонами с энергией 1,8 МэВ.

Определены радиусы взаимодействия радиационных дефектов с водородными комплексами.

Показано, что уменьшение энергии активации движения водородно-вакансионных комплексов с 1,1 до 0,8 эВ обусловлено деформационными полями, создаваемыми атомами платины.

Приведены доказательства, что P3-дефект – это PtVH₂-комплекс.

Уточнено энергетическое положение в запрещенной зоне Si донорных уровней А-центров (0/+) E_V + 0,415 эВ и (+/++) E_V + 0,15 эВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.Ф. Макаренко. Проверка применимости модели моновалентного дефекта для описания свойств комплекса вакансия-кислород в кремнии // *ФТП*. 2000, т. 34, № 10, с. 1162–1165.
2. A.M. Frens, M.T. Bennebroek, A. Zakrzewski, J. Schmidt, W.M. Chen, E. Janzen, J.L. Lindstrom, B. Monemar. Observation of Rapid Direct Charge Transfer between Deep Defects in Silicon // *Phys. Rev. Lett.* 1994, v. 72, N 18, p. 2939–2942.
3. Yu.V. Gorelkinskii, N.N. Nevinyi. Electron paramagnetic resonance of hydrogen in silicon // *Physica B: Condensed Matter*. 1991, v. 170, N 1–4, p. 155–167.
4. N.M. Johnson, C. Herring, Van de C.G. Walle. Inverted order of acceptor and donor levels of monatomic hydrogen in silicon // *Phys. Rev. Lett.* 1994, v. 73, N 1, p. 130–133.
5. O. Feklisova, N. Yarykin, E.B. Yakimov, J. Weber. On the nature of hydrogen-related centers in p-type irradiated silicon // *Physica B: Condensed Matter*. 2001, v. 308–310, p. 210–212.
6. Y. Tokuda, H. Shimada, A. Ito. Light-illumination-induced transformation of electron traps in hydrogen-implanted n-type silicon // *J. Appl. Phys.* 1999, v. 86, N 10, p. 5630–5635.
7. Van A. Wieringen and N. Warmoltz. On the permeation of hydrogen and helium in single crystal silicon and germanium at elevated temperatures // *Physica*. 1956, v. 22, N 6–12, p. 849–865.
8. R.C. Newman, J.H. Tucker, A.R. Brown, and S.A. McQuaid. Hydrogen diffusion and the catalysis of enhanced oxygen diffusion in silicon at temperatures below 500 °C // *J. Appl. Phys.* 1991, v. 70, N 6, p. 3061–3070.
9. N.M. Johnson and C. Herring. Migration of the H₂^{*} complex and its relation to H⁻ in n-type silicon // *Phys. Rev. B*. 1991, v. 43, N 17, p. 14297–14300.
10. V.P. Markevich and M. Suezawa. Hydrogen–oxygen interaction in silicon at around 50 °C // *J. Appl. Phys.* 1998, v. 83, N 6, p. 2988–2993.
11. В.Л. Винецкий, Г.А. Холодарь. *Радиационная физика полупроводников*. Киев: "Наукова думка", 1979, 335 с.
12. M.G. Ganchenkova, V.A. Borodin, R.M. Nieminen. Annealing of vacancy complexes in P-doped silicon // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2005, v. 228, N 1–4, p. 218–225.
13. G.D. Watkins and J.W. Corbett. Defects in Irradiated Silicon: Electron Paramagnetic Resonance of Divacancy // *Phys. Rev.* 1965, v. 138, N 2A, p. A543–A555.
14. C.G. Van de Walle. Energies of various configurations of hydrogen in silicon // *Phys. Rev. B*. 1994, v. 49, N 7, p. 4579–4585.
15. C.G. Van de Walle and J. Neugebauer. Hydrogen interactions with self-interstitials in silicon // *Phys. Rev. B*. 1995, v. 52, N 20, p. R14320–R14323.
16. J.W. Corbett, G. D. Watkins, R.M. Chrenko, and R.S. McDonald. Defects in Irradiated Silicon. II. Infrared Absorption of the Si-A Center // *Phys. Rev.* 1961, v. 121, N 4, p. 1015–1022.
17. S.K. Estreicher. Interstitial O in Si and its interactions with H // *Phys. Rev. B*. 1990, v. 41, N 14, p. 9886–9891.
18. Ю.В. Горелкинский, Б.Н. Мукашев, Х.А. Абдуллин. Обнаружение низкотемпературной диффузии примесных атомов алюминия в имплантированном водородном кремнии // *ФТП*. 1998, т. 32, № 4, с. 421–428.
19. J.N. Heyman, J.W. Ager III, E.E. Haller, N.M. Johnson, J. Walker, C.M. Donald. Hydrogen-induced platelets in silicon: Infrared absorption and Raman scattering // *Phys. Rev. B*. 1992, v. 45, N 23, p. 13363–13366.
20. Л.С. Милевский, Т.М. Ткачева, А.А. Золотухин. Влияние внешнего упругого поля на введение и кинетику отжига радиационных дефектов в кремнии // *Труды Международной конференции по радиационной физике полупроводников и родственных материалов (Тбилиси, 1979)*. Тбилиси: Изд-во Тбилисского университета, 1980, с. 350–354.
21. P. Hazdra and V. Komarnitsky. Radiation Defects in Silicon: Effects of Contamination by Platinum Atoms // *Solid State Phenomena*. 2010, v. 156–158, p. 167–172.
22. G.D. Watkins and J.W. Corbett. Defects in Irradiated Silicon. I. Electron Spin Resonance of the Si-A Center // *Phys. Rev.* 1961, v. 121, N 4, p. 1001–1014.
23. А.П. Долголенко, М.Д. Варенцов, Г.П. Гайдар, П.Г. Литовченко. Термический отжиг кластеров и точечных дефектов в n-Si (Cz), облученном быстрыми нейтронами реактора // *Ядерная физика и атомная энергетика*. 2008, № 2 (24), с. 73–80.
24. В.П. Маркевич, Л.И. Мурин. Селективный захват межузельных атомов углерода в облученном кремнии // *ФТП*. 1988, т. 22, № 5, с. 911–914.
25. P. Pellegrino, P. Leveque, J. Lalita, A. Hallen, C. Jagadish, B.G. Svensson. Annealing kinetics of vacancy-related defects in low-dose MeV self-ion-implanted n-type silicon // *Phys. Rev. B*. 2001, v. 64, N 19, p. 195211–10.
26. J. Coutinho, R. Jones, S. Oberg, P.R. Briddon. The formation, dissociation and electrical activity of divacancy-oxygen complexes in Si // *Physica B*. 2003, v. 340–342, p. 523–527.

27. R.E. Whan. Oxygen-Defect Complexes in Neutron-Irradiated Silicon // *J. Appl. Phys.* 1966, v. 37, N 9, p. 3378–3382.
28. Г.П. Гайдар, О.П. Долголенко, П.Г. Литовченко, О.П. Литовченко. Кінетика трансформації точкових дефектів у процесі відпалу е-опроміненого кремнію // *Тези доповідей IV Української наукової конференції з фізики напівпровідників. (Запоріжжя, 15-19 вересня 2009 р.)*, т 1, с. 185–186.
29. В.Е. Бахрушин. *Получение и физические свойства слаболегированных слоев многослойных композиций*. Запорожье: Гуманитарный университет “ЗИ ГМУ”, 2001, 248 с. (С. 41).
30. А.П. Долголенко, М.Д. Варенцов, Г.П. Гайдар, П.Г. Литовченко. Радиационная стойкость кремния, легированного германием, с высокой концентрацией свободного кислорода // *Ядерная физика та енергетика*, 2006, № 1(17), с. 60-66.
31. Kh.A. Abdullin, B.N. Mukashev, M.F. Tamen-darov, and T.B. Tashenov. New defect states in irradiated p-type silicon // *Phys. Lett. A.* 1990, v. 144, N 3, p. 198–200.
32. A. Mattoni, F. Bernardini, and L. Colombo. Self-interstitial trapping by carbon complexes in crystalline silicon // *Phys. Rev. B.* 2002, v. 66, N 19, p. 195214–6.
33. А.П. Долголенко, Г.П. Гайдар, М.Д. Варенцов, П.Г. Литовченко. Влияние примеси германия на радиационную стойкость кремния с высокой концентрацией кислорода // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных поврежденных и радиационное материаловедение»*. 2008, № 2, с. 28–36.
34. C.P. Ewels, R. Jones, S. Oberg, J. Miro, and P. Deak. Shallow Thermal Donor Defects in Silicon // *Phys. Rev. Lett.* 1996, v. 77, N 5, p. 865–868.
35. L.I. Khirunenko, M.G. Sosnin, Yu.V. Pomozov, L.I. Murin, V.P. Markevich, A.R. Peaker, L.M. Almeida, J. Coutinho, and Torres V. J. B. Formation of interstitial carbon–interstitial oxygen complexes in silicon: Local vibrational mode spectroscopy and density functional theory // *Phys. Rev. B.* 2008, v. 78, N 15, p. 155203–8.
36. P.M. Mooney, L.J. Cheng, M. Suli, J.D. Gerson, and J.W. Corbett. Defect energy levels in boron-doped silicon irradiated with 1-MeV electrons // *Phys. Rev. B.* 1977, v. 15, N 8, p. 3836–3843.
37. А.П. Долголенко, П.Г. Литовченко, М.Д. Варенцов, Г.П. Гайдар, А.П. Литовченко. Particularities of the formation of radiation defects in silicon with low and high concentrations of oxygen // *Phys. stat. sol. (b)*. 2006, v. 243, N 8, p. 1842–1852.
38. И.Ф. Медведева, Л.И. Мурин, В.П. Маркевич, Б.А. Комаров. Образование и отжиг метастабильного водородосодержащего центра в облученных кристаллах Cz-Si: влияние различных факторов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных поврежденных и радиационное материаловедение»*. 2001, № 2, с. 48–52.
39. H. Hatakeyama, M. Suezawa. Hydrogen-oxygen-vacancy complexes in Czochralski-grown silicon crystal // *J. Appl. Phys.* 1997, v. 82, N 10, p. 4945–4951.

Статья поступила в редакцию 16.02.2010 г.

ВПЛИВ ОПРОМІНЕННЯ ТА ВІДПАЛУ НА ТЕРМІЧНУ СТАБІЛЬНІСТЬ РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ У КРЕМНІІ

М.Д. Варенцов, Г.П. Гайдар, О.П. Долголенко, П.Г. Литовченко

Описано відпал А-центрів, дивакансій, А-центрів, модифікованих воднем, у n-Si ($P \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$), за відсутності та при наявності домішки платини, після опромінення протонами з енергією 1,8 МеВ. Показано, що енергія активації відпалу радіаційних дефектів при взаємодії з воднево-вакансійними дефектами зменшується від 1,1 до 0,8 еВ зі збільшенням концентрації платини в кремнії, оскільки деформаційні поля, які створюються атомами платини, зменшують енергію переорієнтації дефектів. Уточнено енергетичне положення у забороненій зоні кремнію донорного рівня А-центра ($E_V + 0,415 \text{ eV}$), виходячи із відомих даних щодо положення А-центра, модифікованого атомом вуглецю ($E_V + 0,38 \text{ eV}$) або водню ($E_V + 0,28 \text{ eV}$).

INFLUENCE OF IRRADIATION AND ANNEALING ON THE THERMAL STABILITY OF RADIATION DEFECTS IN SILICON

M.D. Varentsov, G.P. Gaidar, A.P. Dolgolenko, P.G. Litovchenko

The annealing of A-centers, divacancies, A-centers modified by hydrogen was described for n-Si ($P \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$), with and without platinum dopants, after the irradiation by protons with energy 1.8 MeV. It was shown that the activation energy of annealing for radiation defects under their interaction with hydrogen-vacancy defects is decreased from 1.1 to 0.8 eV with the increasing of platinum concentration in silicon, because the deformation fields, creating by platinum atoms, decrease the energy of the defect re-orientation. In the forbidden zone of silicon the energy state for the donor level of A-center ($E_V + 0.415 \text{ eV}$) was specified based on the data about the position of A-center modified by the carbon atom ($E_V + 0.38 \text{ eV}$) or the hydrogen atom ($E_V + 0.28 \text{ eV}$).