

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ БОРА НА ДРЕЙФ ВАКАНСИЙ В ОБЛАСТЯХ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ДИОДОВ ШОТТКИ Al—p-Si

Болотов В. В., Стучинский В. А.

Методом DLTS изучено распределение по глубине K -центров $N_K(x)$ в областях пространственного заряда (ОПЗ) облученных электронами ($E_e=3.5$ МэВ) диодов Шоттки Al—p-Si с разным содержанием примеси бора в базе. Измеренные профили $N_K(x)$ хорошо согласуются с результатом расчета по дрейфовой модели формирования профилей. Найденные из сопоставления результатов расчета и данных эксперимента величины длин диффузии дрейфующих вакансий (V^{2+}) оказываются зависящими от концентрации бора N_B . Показано, что эта зависимость соответствует ожидаемой $l_{V^{2+}} \sim N_B^{-1/2}$, возникающей при учете сопровождающегося перезарядкой вакансий взаимодействия V^{2+} и B_s^- . Получены также оценки размера области повышенной генерации вакансий в кремнии у границы раздела Al—Si и величины генерации.

В работах [1-4] было показано, что действие электрического поля при облучении приводит к формированию неоднородного распределения вакансионных комплексов в ОПЗ кремниевых диодов Шоттки и $p-n$ -переходов. В [1, 2]¹

Материал	N_{O_I} , 10^{18} см ⁻³	N_{B_s} , 10^{15} см ⁻³	$\frac{dN_K}{d\Phi}$, 10^{-2} см ⁻¹	$l_{V^{2+}}$, 10^{-6} см
КДБ-1	1.2	15.0	3.5	1.5 ± 0.2
КДБ-4.5	1.1	2.8	3.8	3.5 ± 0.3
КДБ-7.5 (I)	1.2	1.6	3.0	4.5 ± 0.4
КДБ-7.5 (II)	0.55	1.6	2.8	5.0 ± 0.5
КДБ-10 (I)	1.2	1.2	3.4	5.5 ± 0.5
КДБ-10 (II)	1.0	1.3	3.2	5.0 ± 0.5
КДБ-30	1.0	0.46	2.8	—
КДБ-45	0.9	0.29	3.2	—

отмечалось, что измеренные профили концентрации дефектов $N_{\text{деф}}(x)$ хорошо описываются диффузионно-дрейфовой моделью формирования профилей $N_{\text{деф}}(x)$. Были определены также величины длин диффузии V^{2+} при комнатной температуре, которые оказались равными ~ 0.3 и ~ 0.05 мкм для n - и p -Si соответственно. Для объяснения различия полученных величин $l_{V^{2+}}$ в n - и p -Si было высказано предположение, что величина $l_{V^{2+}}$ в p -Si определяется кулоновским взаимодействием V^{2+} с ионизованным бором B_s^- .

Цель настоящей работы — проверить это предположение, изучив формирование профилей $N_{\text{деф}}(x)$ в базе обратно смещенных при облучении диодов.

¹ Здесь по сравнению с работой [1] мы делаем более конкретное утверждение о заряде дрейфующих вакансий на основании работы [2], где было показано, что положительный заряд вакансий сохраняется в течение ~ 35 мкс. Последнее согласуется с экстраполяцией температурной зависимости скорости эмиссии дырки в область комнатных температур лучше для состояния V^{2+} , чем для состояния V^+ [5].

Шоттки Al—p-Si с разным уровнем легирования подложки, сопоставив их с результатом расчета согласно дрейфовой модели и получив таким образом зависимость $l_{V^{2+}}$ от концентрации бора N_B .

В эксперименте использовались образцы, вырезанные из слитков кремния марок КДБ-45, КДБ-30, КДБ-10 (два слитка), КДБ-7.5 (два слитка), КДБ-4.5 и КДБ-1. В таблице приведены измеренные методами ИК спектроскопии и эффекта Холла концентрации примесей кислорода N_{O_1} и бора N_B , в образцах. Диоды Шоттки, полученные напылением в вакууме на образцы алюминия, облучались электронами на импульсном ускорителе (длительность импульса

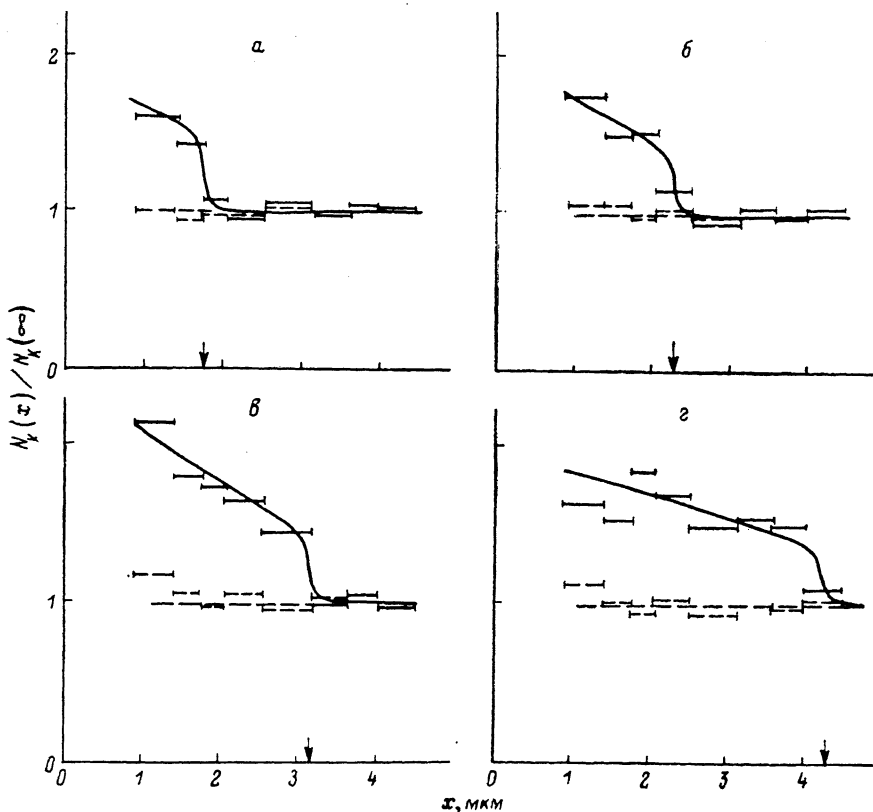


Рис. 1. Распределение К-центров в базе диодов Шоттки Al—p-Si.

Сплошные линии — диоды с обратным смещением при облучении, штриховые — без смещения. $U_{см}$, В: а — 2, б — 4, в — 8, г — 16. Кремний КДБ-10 (1).

~3 мкс, частота повторения ~100 Гц, средняя плотность тока ~0.2 мкА/см²). Во время облучения на диодах поддерживалось постоянное обратное смещение $U_{см}$, равное 0, 2, 4, 8 и 16 В. После облучения методом DLTS измерялось распределение в базе диодов концентрации К-центров ($E_v + 0.37$ эВ).² Погрешность измерения концентрации дефектов составляла 5—7 %.

На рис. 1 приведены распределения $N_K(x)$ в базе диодов на кремнии КДБ-10 для $U_{см} = 2, 4, 8$ и 16 В. Для сравнения штриховыми линиями показаны профили $N_K(x)$, измеренные на соседних диодах с $U_{см} = 0$. Увеличение $N_K(x)$ в ОПЗ (граница ОПЗ и квазинейтрального объема $x = h$ отмечена стрелочкой на горизонтальной оси) обусловлено дрейфом V^{2+} в объем кремния из тонкого приповерхностного слоя $0 < x < a$, характеризующегося повышенной генерацией V^{2+} [1]. На рис. 2 показана зависимость формы профилей для диодов с $U_{см} = 0$ и 8 В от уровня легирования базы диода. В диодах с подложкой КДБ-30 (и КДБ-45) распределения $N_K(x)$ для $U_{см} = 0$ и 8 В в пределах погрешности

² Согласно [6-8], в кремнии, выращенном методом Чохральского, уровни $E_v + 0.37$ эВ обусловлены преимущественно дефектами, идентифицированными как комплексы VOS.

измерений однородны и не различаются, что обусловлено соотношением $t_{др} > \tau_{V^{2+}}$, где $\tau_{V^{2+}}$ — время жизни V^{2+} , $t_{др}$ — время, необходимое для формирования в результате дрейфа заметно неоднородного распределения вакансий [1]. В ряду КДБ-10, КДБ-7.5, КДБ-4.5, КДБ-1 эффект увеличения скорости введения K -центров $dN_K/d\Phi$ в ОПЗ становится все более ярко выраженным.

Измеренные распределения $N_K(x)$ сопоставлялись с профилями $N_K(x)$, рассчитанными согласно дрейфовой модели, основные положения которой следующие.

а) Неоднородное распределение вакансионных комплексов формируется в результате дрейфа V^{2+} в поле ОПЗ [1]. Относительно K -центров, образование которых может происходить либо присоединением вакансий к CO -комплексам радиационного происхождения, либо путем захвата на A -центр (комплекс VO)

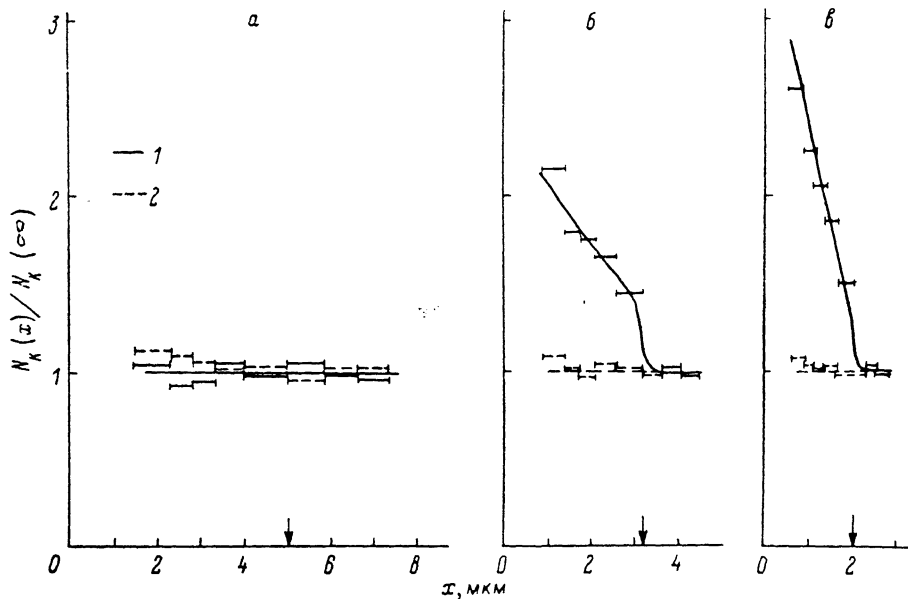


Рис. 2. Распределение K -центров в базе диодов Шоттки Al— p -Si.

$U_{0.4}$, В: 1 — 8, 2 — 0, Кремний: а — КДБ-30, б — КДБ-10, в — КДБ-4.5.

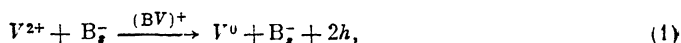
междоузельного углерода [6], мы предполагаем, что неоднородность $N_K(x)$ формируется исключительно на стадии, когда неоднородно распределенные в результате дрейфа вакансии захватываются на однородно распределенные ловушки, а другие стадии существенного вклада в неоднородность $N_K(x)$ не дают.

б) В условиях эксперимента потоки носителей в ОПЗ таковы, что за время дрейфа изменения зарядовых состояний вакансий из-за захвата носителей не происходит. Начальное распределение генерированных облучением вакансий по зарядовым состояниям: V^{2+} — 50, V^0 — 50 %. В первом приближении времена жизни вакансий по отношению к захвату на нейтральные примеси и их комплексы (O_I , CO) не зависят от зарядового состояния вакансий [1].

в) Предполагается повышенная (в сравнении с объемной) генерация V^{2+} в тонком приповерхностном слое кремния толщиной $a \ll h$ [1].

г) В ОПЗ имеет место дальнедействующее (неэкранированное) кулоновское взаимодействие V^{2+} с B_s^- , приводящее помимо дрейфа V^{2+} во внешнем электрическом поле к дрейфу V^{2+} в локальных полях. Относительно комплекса (BV) известно, что он отжигается выше 260 К [9, 10], т. е. при комнатной температуре бор является центром прилипания, а не захвата для V^{2+} . Последнее хорошо согласуется с тем фактом, что величины $dN_K/d\Phi$ в объеме использовавшихся образцов Si $\langle B \rangle$ с $N_B = 2.9 \cdot 10^{14} \div 1.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ различаются в пределах $\sim 20\%$ (см. таблицу). Ясно, что если после развала комплекса (BV) вакансия будет освобождаться в состоянии V^{2+} , то это не приведет к изменению длины электро-

переноса l_E . Следует поэтому считать, что результатом захвата V^{2+} бором является ее перезарядка:



приводящая к уменьшению времени жизни вакансии в состоянии V^{2+} $\tau_{V^{2+}}$ и соответственно длины дрейфа $l_E = \mu E \tau_{V^{2+}}$ во внешнем поле E .

Учитывая выражение для диффузионно-лимитирующей части константы скорости реакции (1) $k = 1/\tau_{V^{2+}} N_B = 4\pi D_{V^{2+}} R$ ($D_{V^{2+}}$ — коэффициент диффузии, R — радиус реакции) [11], можно ожидать следующей зависимости $l_{V^{2+}}(N_B)$:

$$l_{V^{2+}} = \sqrt{\epsilon \epsilon_0 k T / 2e^2 N_B}$$

(учтено, что $R = 2e^2 / 4\pi \epsilon \epsilon_0 k T$).

В соответствии со сказанным система кинетических уравнений для концентраций вакансий N_{V^0} , $N_{V^{2+}}$, комплексов BV N_{BV} и K -центров N_K запишется следующим образом: ³

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_{V^{2+}}}{\partial t} &= D_{V^{2+}} \frac{\partial^2 N_{V^{2+}}}{\partial x^2} - \mu_{V^{2+}} \frac{\partial}{\partial x} (E(x) N_{V^{2+}}) - N_{V^{2+}} (\tau_{CO}^{-1} + \tau_B^{-1}) + g'_{V^{2+}}, \\ \frac{\partial N_{V^0}}{\partial t} &= D_{V^0} \frac{\partial^2 N_{V^0}}{\partial x^2} - N_{V^0} (\tau_{CO}^{0-1} + \tau_B^{0-1}) + \frac{N_{BV}}{\tau^*} + g'_{V^0}, \\ \frac{\partial N_{BV}}{\partial t} &= \frac{N_{V^{2+}}}{\tau_B^+} + \frac{N_{V^0}}{\tau_B^0} - \frac{N_{BV}}{\tau^*}, \\ \frac{\partial N_K}{\partial t} &= \frac{N_{V^{2+}}}{\tau_{CO}^+} + \frac{N_{V^0}}{\tau_{CO}^0}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $E(x) = \frac{2U}{h} \left(1 - \frac{x}{h}\right)$; τ_B^0 , τ_{CO}^0 — времена жизни нейтральных вакансий по отношению к захвату на В- и СО-комплексы; τ_B^+ , τ_{CO}^+ — времена жизни положительно заряженных вакансий по отношению к захвату на В- и СО-комплексы; τ^* — время распада комплекса BV , $g'_{V^{2+}} = g_{V^{2+}} - N_{V^{2+}} \tau_{V^{2+}}^{-1} \approx g'_{V^0} = g_{V^0} - N_{V^0} \tau_{V^0}^{-1}$, $g_{V^{2+}}$, g_{V^0} — темп генерации V^{2+} и V^0 ; $\tau_{V^{2+}}$, τ_{V^0} — их времена жизни по отношению к захвату на другие ловушки (например, кислород).

Интегрируя уравнения системы (2) по времени от начала облучения ($t=0$) до конца облучения и дефектных перестроек ($t=T$), с учетом соотношения $\mu_{V^{2+}} = 2eD_{V^{2+}}/kT$ и условий $N_i(0) = 0$ ($i = V^0, V^{2+}, BV, K$), $N_i(T) = 0$ ($i = V^0, V^{2+}, BV$) получим следующую систему уравнений для величин $\bar{N}_i(x) = \int_0^T N_i(x, t) dt$:

$$0 = D_{V^{2+}} \frac{\partial^2 \bar{N}_{V^{2+}}}{\partial x^2} - \frac{2eD_{V^{2+}}}{kT} \frac{\partial}{\partial x} (E(x) \bar{N}_{V^{2+}}) - \bar{N}_{V^{2+}} (\tau_{CO}^{-1} + \tau_B^{-1}) + \bar{g}'_{V^{2+}}, \quad (3)$$

$$0 = D_{V^0} \frac{\partial^2 \bar{N}_{V^0}}{\partial x^2} - \bar{N}_{V^0} (\tau_{CO}^{0-1} + \tau_B^{0-1}) + \frac{\bar{N}_{BV}}{\tau^*} + \bar{g}'_{V^0}, \quad (4)$$

$$0 = \frac{\bar{N}_{V^{2+}}}{\tau_B^+} + \frac{\bar{N}_{V^0}}{\tau_B^0} - \frac{\bar{N}_{BV}}{\tau^*}, \quad (5)$$

$$N_K(T) = \frac{\bar{N}_{V^{2+}}}{\tau_B^+} + \frac{\bar{N}_{V^0}}{\tau_B^0} \quad (6)$$

$$c \bar{g}_i = \int_0^T g_i(x, t) dt.$$

На зондируемых методом DLTS глубинах $x \gg l_V$ первый член в (4) мал, и с учетом (5) имеем

$$\bar{g}'_{V^0} + \bar{N}_{V^{2+}} \tau_B^{+ -1} = \bar{N}_{V^0} \tau_{CO}^{0-1},$$

³ Для определенности система кинетических уравнений записана для случая образования K -центров путем захвата вакансий на СО-комплексы.

после чего (6) приобретает вид

$$N_K(T) = \bar{N}_{V^{2+}} (\tau_{CO}^{+1} + \tau_B^{+1}) + \bar{g}'_v.$$

Таким образом, для нахождения профиля $N_K(x)$ следует найти решение краевой задачи для уравнения (3). Пользуясь его линейностью, решаем вначале (численно на ЭВМ) часть задачи, связанную с однородной генерацией V^{2+} , с граничными условиями $N_{V^{2+}}(0) = 0$, $\partial N_{V^{2+}}/\partial x(\infty) = 0$. Добавляя затем к полученному решению решение задачи для поверхностной генерации (последнее ищем в области $a < \xi < x < h$, в связи с чем полагаем в уравнении (3) $g'_{V^{2+}} = 0$, а граничные условия задаем в виде $j_s = \mu E_s N_{V^{2+}}(\xi) - D \frac{\partial N_{V^{2+}}}{\partial x}(\xi) = \text{const}$, $N_{V^{2+}}(\infty) = 0$), получаем окончательный результат, приближаемый к экспериментальному профилю $N_K(x)$ путем подбора подгоночных параметров $l_{V^{2+}} = \sqrt{D(\tau_{CO}^{+1} + \tau_B^{+1})^{-1}}$ и j_s .

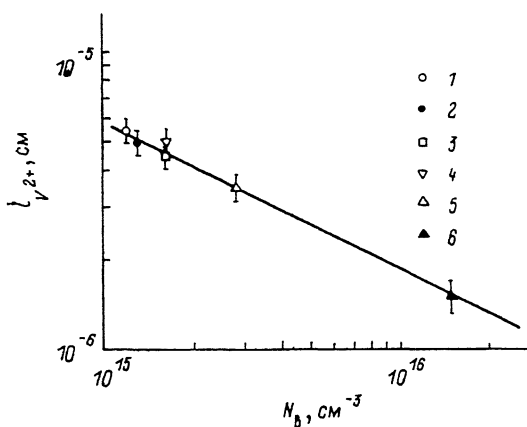


Рис. 3. Зависимость длины диффузии вакансий V^{2+} в кремнии от концентрации бора N_B .

Кремний: 1 — КДБ-10 (I), 2 — КДБ-10 (II), 3 — КДБ-7.5 (I), 4 — КДБ-7.5 (II), 5 — КДБ-4.5, 6 — КДБ-1.

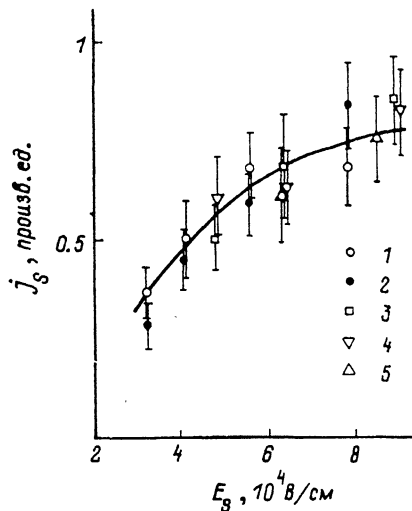


Рис. 4. Зависимость тока вакансий V^{2+} от границы раздела Al—Si в объеме кремния от напряженности электрического поля E_s .

Кремний: 1 — КДБ-10 (I), 2 — КДБ-10 (II), 3 — КДБ-7.5 (I), 4 — КДБ-7.5 (II), 5 — КДБ-4.5.

С целью иллюстрации хорошего совпадения результатов расчета и эксперимента на рис. 1 и 2 сплошными линиями проведены расчетные профили $N_K(x)$. Величины $l_{V^{2+}}$ для кремния с различной концентрацией бора приведены в таблице. На рис. 3 показано хорошее соответствие полученных величин $l_{V^{2+}}$ зависимости $l_{V^{2+}} \sim N_B^{-1/2}$. Следует отметить, что для образцов кремния КДБ-7.5 (I) и КДБ-7.5 (II) с различающейся в ~ 2 раза концентрацией межзубельного кислорода N_{O_I} величины $l_{V^{2+}}$ различаются на $\leq 10\%$ на уровне ~ 0.05 мкм. Последнее хорошо согласуется с определенным ранее [1] значением $l_{V^{2+}} = 0.3$ мкм для кремния марки КЭФ с $N_{O_I} \approx 10^{18}$ см $^{-3}$. Действительно, учитывая равенство $\tau^{-1} = \tau_B^{-1} + \tau_{O_I}^{-1}$ (τ_B и τ_{O_I} — времена жизни V^{2+} по отношению к захвату на B и O_I), имеем $l_V^{-2} = l_B^{-2} + l_{O_I}^{-2}$, откуда, полагая $l_{V_0} \geq 0.3$ мкм, $l_B \approx 0.05$ мкм, получаем, что в кремнии КДБ-7.5 захват на O_I дает вклад в $l_{V^{2+}}$ на уровне $\sim 2\%$.

На рис. 4 показана зависимость потока V^{2+} из области избыточной генерации в объеме j_s от величины электрического поля E_s . В сильных полях ($> 10^5$ В/см) эта зависимость насыщается, что соответствует полному вытягиванию всех генерируемых в области $0 < x < a$ вакансий в объеме. Уменьшение j_s с умень-

пением поля E_s соответствует ситуации, когда диффузионный ток вакансий на поверхность $j_{\text{дрф}} = D(N_V/a)$ становится сравнимым с дрейфовым током вакансий в объем $j_{\text{др}} = \mu E_s N_V$. Отсюда следует оценка размера области повышенной генерации вакансий: $a \approx kT/2eE_s = 30 \div 40 \text{ \AA}$, где $E_s = (3 \div 4) \cdot 10^4 \text{ В/см}$ — величина полей, в которых имеет место зависимость $j_s(E_s)$. Эта оценка подтверждает сделанное в [1] предположение, что дополнительная генерация вакансий в тонком приповерхностном слое может быть обусловлена участием границы раздела Al—Si в разделении пар Френкеля путем захвата межузельного атома, поскольку полученное значение a близко к размеру зоны неустойчивости пар Френкеля в Si [12, 13]. Из сравнения $\int_0^{\infty} g_{\text{нов}} dx = Ga$ с концентрацией избыточных

K -центров в ОПЗ $\int_0^{\infty} [N_K(x) - N_K(\infty)] dx$ (рис. 1) видно, что G примерно на 2 порядка превышает объемную генерацию $g = g_{V^+} + g_{V^{2+}}$.

Суммируя вышесказанное, отметим, что измеренные распределения концентрации K -центров, формирующиеся в базе обратно смещенных диодов Шоттки Al— p -Si, соответствуют результатам расчета по дрейфовой модели. Полученные значения длин диффузии $V^{2+} l_{V^{2+}}$ оказываются зависящими от концентрации примеси бора N_{B_s} , и эта зависимость хорошо согласуется с ожидаемой $l_{V^{2+}} \sim \sim N_{B_s}^{-1/2}$. Получены также оценки размера области повышенной генерации вакансий у границы раздела $a \sim 30 \div 40 \text{ \AA}$ и величины генерации $G \approx 10^2 g$.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Болотов В. В., Карпов А. В., Стучинский В. А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 49—55.
- [2] Болотов В. В., Стучинский В. А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 8. С. 1405—1407.
- [3] Кучинский П. В., Ломачко В. М., Петрунин А. П. // Письма ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 5. С. 309—311.
- [4] Бобрикова О. В., Стась В. Ф. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 1. С. 143—145.
- [5] Бургуэн Ж., Ланно М. Точечные дефекты в полупроводниках. М., 1985. 304 с.
- [6] Lee Y. M., Corbett J. W., Brower K. L. // Phys. St. Sol. (a). 1977. V. 41. N 2. P. 637—647.
- [7] Lodos C. A. // Phys. St. Sol. (a). 1985. V. 92. N 2. P. 609—614.
- [8] Ferenczi G., Lodos C. A., Pavelka T., Somogyi M., Mertens A. // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. N 1. P. 183—189.
- [9] Watkins G. D. // Phys. Rev. B. 1976. V. 13. N 6. P. 2511—2518.
- [10] Bains S. K., Banbury P. C. // J. Phys. C: Sol. St. Phys. 1985. V. 18. N 5. P. L109—L116.
- [11] Баранов А. И., Васильев А. В., Кулешов В. Ф., Вяткин А. Ф., Смирнов Л. С. // Препринт Института проблем технологии электроники и обособистых материалов и Института физики полупроводников СО АН СССР. Черноголовка, 1985.
- [12] Крайчинский А. М., Мизрухин Л. В., Шаховцов В. И. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 3. С. 437—440.
- [13] Емцев В. В., Машовец Т. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М., 1981. 248 с.

Институт физики полупроводников СО АН СССР
Новосибирск

Получена 2.12.1988
Принята к печати 10.01.1989