

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ ЗАРЯДОВЫХ СОСТОЯНИЙ ВАКАНСИЙ НА НАКОПЛЕНИЕ ДИВАКАНСИЙ В КРЕМНИИ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Колесников Н. В., Ломасов В. Н., Мальханов С. Е.

Выполнено сравнительное исследование процессов накопления дивакансий в n - и p -кремнии с различными уровнями легирования в широком диапазоне интенсивностей облучения электронами с энергией 900 кэВ. Установлено, что в n - и p -кремнии с концентрациями носителей заряда $5 \cdot 10^{18}$ и $1 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ соответственно скорость введения дивакансий квадратично растет с интенсивностью облучения, а в n -кремнии с концентрацией $6 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$ растет линейно. Полученные результаты объяснены с учетом изменений зарядовых состояний вакансий при облучении.

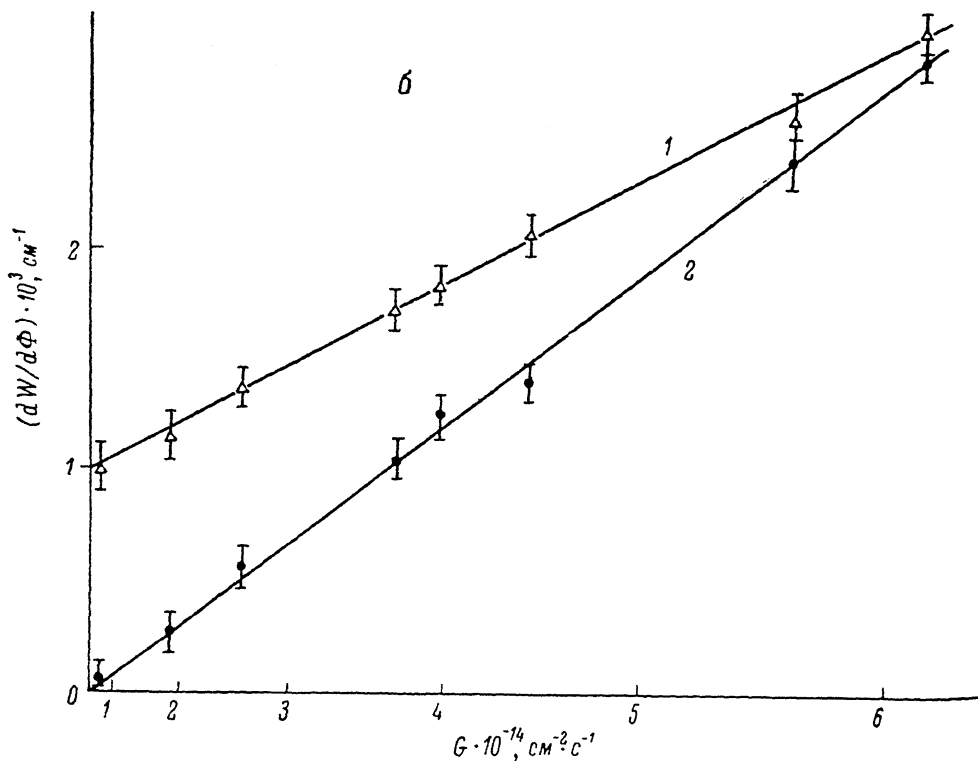
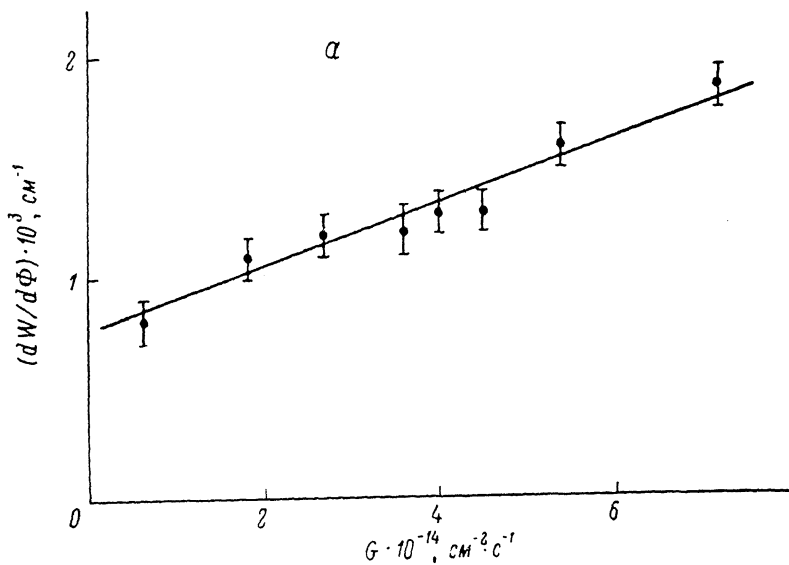
Накопление дивакансий (W) в кремнии при электронном облучении, как известно, возможно двумя путями: прямой генерацией W и в результате квазихимических реакций вакансий (V) между собой. Эффективность квазихимических реакций зависит от зарядового состояния компонентов и, следовательно, от уровня легирования материала и интенсивности облучения. Таким образом, от этих параметров должна зависеть и скорость введения W .

Нами экспериментально и путем расчета проведено сравнительное исследование процессов накопления W в кремнии марок КЭФ-1, КЭФ-7.5 и КДБ-10. Концентрации носителей заряда в этих материалах равны $5 \cdot 10^{15}$, $6 \cdot 10^{14}$ и $1 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$ соответственно. Образцы со структурами $p^+ - n - p^+$ или $n^+ - p - p^+$ имели размеры $0.3 \times 2.5 \times 5$ мм. Слои p^+ и n^+ наносились на плоские грани $\langle 111 \rangle$ с противоположных сторон методом ионного легирования фосфором и бором. На слой p^+ и n^+ наносились алюминиевые контактные площадки. Все однотипные образцы изготавливались из одного слитка.

Облучение проводилось на ускорителе типа РТЭ-1В. Энергия электронов составляла 0.9 МэВ, длительность импульса облучения 370 мкс, частота следования импульсов ~ 450 Гц. Поскольку длительность импульса намного превышает времена жизни первичных радиационных дефектов (так, время жизни вакансий по отношению к захвату на примесь оценивается величиной ~ 3 мкс [1]), облучение можно считать квазистационарным. Диапазон доз облучения варьировался в зависимости от типа исследуемого материала. Начальные дозы для построения приведенных в работе зависимостей составляли: для КЭФ-1 — $5.4 \cdot 10^{16}$, для КЭФ-7.5 — $7.2 \cdot 10^{15}$, для КДБ-10 — $4 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$. Данные значения доз находились на линейном участке зависимости концентрации дефектов от дозы облучения.

Температура образцов, размещавшихся на охлаждаемых водой фланцах, контролировалась в ходе облучения и не превышала 30 °С. Измерения дозы и интенсивности облучения проводились с помощью цилиндра Фарадея. Погрешности измерений этих величин составляли ~ 5 %. Для получения убедительных сопоставимых результатов при каждом интенсивности и дозе выполнялись одновременные облучения образцов всех трех исследуемых типов кремния. Для уменьшения вероятности случайных ошибок, связанных, например, с возможной неоднородностью исходного материала, проводились измерения не менее чем 4 образцов, облученных в одинаковых условиях.

В ходе облучения наряду с дивакансиями и в значительно больших концентрациях образовывались *A*- и *K*-центры, что характерно для использованного в работе материала — кремния, выращенного по методу Чохральского.



Зависимость скорости введения дивакансий от интенсивности облучения.

а) КЭФ-7.5, б) 1 — КЭФ-1, 2 — КДБ-10.

Эти центры отчетливо наблюдались нами, причем полученное значение скорости введения *A*-центров ($\sim 0.1 \text{ cm}^{-1}$), совпадающее с известными литературными данными [1-4], позволило сделать вывод о типичности использованного материала.

Энергетическое положение уровней W в запрещенной зоне кремния измерялось методами фотоемкости и изотермических релаксаций емкости [5]. Концентрация W в n -кремнии определялась по уровню $E_c - 0.42$ эВ, концентрация W в p -кремнии — по уровню $E_v + 0.21$ эВ. Вопрос об энергетических положениях уровней W является в настоящее время дискуссионным [6, 7], однако выбранные нами значения энергий активации согласуются с данными большинства экспериментальных работ и соответствуют, по нашему мнению, уровням дивакансий.

Величина сигнала, пропорционального концентрации вводимых облучением дефектов, получалась в эксперименте в виде изменения емкости ΔC при полной перезарядке дефектов монохроматическим светом (призма NaCl, спектрометр ИКС-21) при температуре жидкого азота в криостате КГ-0302. Измерения емкости проводились прецизионным мостом ВМ 400Г на частоте 10 кГц. Погрешность измерения емкости составляла ± 0.1 пФ, что давало возможность определять концентрацию дефектов с чувствительностью $\sim 3 \cdot 10^{11}$ см⁻³. Общая погрешность определения величин скорости введения W составляла в основном диапазоне измерений $\sim 10\%$.

На рисунке представлены полученные в данной работе зависимости скорости введения W от интенсивности потока электронов в импульсе G . Здесь α — постоянная, которую можно интерпретировать как скорость введения W при прямой генерации. Из рисунка следует, что накопление W в кремнии КДБ-10 и КЭФ-1 пропорционально G^2 , а в кремнии КЭФ-7.5 — G , что представляется нетривиальным экспериментальным результатом, который может быть объяснен на основе рассмотрения квазихимических реакций между вакансиями в различных зарядовых состояниях.

Значения α , полученные путем спрямления экспериментальных зависимостей скорости введения W в координатах $f(G)$ или $f(G^2)$, оказались равными: для КЭФ-1 — $(1 \pm 0.1) \cdot 10^{-3}$, для КЭФ-7.5 — $(8 \pm 0.8) \cdot 10^{-4}$, для КДБ-10 — $(0 + 2) \cdot 10^{-5}$ см⁻¹. Сопоставление этих значений показывает, что величина α уменьшается по мере уменьшения концентрации фосфора в кремнии. Такой вывод, возможно, может быть обоснован в рамках модели, подобной «примесному ионизационному механизму образования дефектов» [8], однако он требует дополнительных экспериментальных исследований, выполненных на кремнии с различным уровнем легирования фосфором. Вообще говоря, вопрос о влиянии состояния атомов в кристаллической решетке на эффективность первичного дефектообразования не решен, несмотря на наличие довольно большого количества интересных экспериментальных данных. Так, в работе [9] установлено наличие зависимости скорости введения W от ориентации электронного пучка относительно кристаллографических осей решетки кремния, а в [10] — от концентрации междоузельного кислорода. Не останавливаясь далее на обсуждении этого вопроса, отметим только, что полученные нами значения скоростей введения W весьма близки к известным литературным значениям [9].

При облучении n -кремния возможны следующие реакции между V , приводящие к образованию W :



Здесь V^0 , V^- и V^+ — концентрации нейтральных, однократно и дважды отрицательно заряженных вакансий соответственно. Аналогично обозначены зарядовые состояния дивакансий.

Прямые реакции между одноименно заряженными вакансиями маловероятны из-за наличия кулоновского отталкивания. Реакция (3) не идет, поскольку, даже если не учитывать эффективного ухода на стоки [2], их максимальная равновесная концентрация, определяемая соотношением

$$N_{V^+} = \frac{s_n}{s_p} \frac{n}{p} N_{V^-},$$

где s_n — сечение захвата электрона отталкивающим центром V^- , а s_p — сечение захвата дырки притягивающим центром V^- , оказывается весьма малой. Так, при $s_p \approx 10^3 s_n$, $N_{V^-} \approx 10^{-2} N_{V^0}$.

Кинетику накопления W в результате прямой генерации и казихимических реакций можно описать уравнением

$$\frac{dN_W}{dt} = \alpha G + \beta_0 N_{V^0}^2 + \beta_1 N_{V^0} N_{V^-} - \beta_2 N_W I - \beta_3 N_W (N_{V^0} + N_{V^-}) - \beta_4 N_W C, \quad (4)$$

где $\beta_{0,1}$ — константы реакций (1) и (2), $\beta_2, \beta_3, \beta_4$ — частоты взаимодействия с междоузельными атомами, вакансиями и примесями с концентрацией C соответственно, N_{V^-} и N_W — концентрации вакансий и дивакансий. На начальной стадии облучения, когда N_W невелика, тремя последними членами уравнения (4) можно пренебречь. Расчет скорости введения W сводится к расчету N_{V^-} и N_{V^0} .

Пологая время жизни вакансий τ_V , определяемое стоками на примеси, дислокации, поверхность и т. д., малым по сравнению с продолжительностью облучения [1], полную стационарную концентрацию получим в виде

$$N_{V^-} = \gamma \tau_V G, \quad (5)$$

где γ — вероятность генерации свободной вакансии электроном. В принципе, эта величина может зависеть от интенсивности облучения, однако в использованных в данной работе условиях такой зависимости нет, или она слабая. Это подтверждают результаты работ [3, 4], в которых исследовалась зависимость скорости введения А-центров, определяемая равновесной концентрацией вакансий, от интенсивности облучения. Независимость скорости введения А-центров от интенсивности потока электронов при близких к использованным нами режимах облучения свидетельствует о постоянстве величины γ в данных условиях.

При расчете концентраций V^0 и V^- с учетом их функций распределения необходимо учитывать также возможность изменения знака заряда при захвате ими генерируемых при облучении носителей. Темп генерации носителей заряда при облучении может быть вычислен по формулам из [8]. Оценки показывают, что для случая низкоомного материала (у нас КЭФ-1)

$$p \approx \Delta p \gg p_0, \quad n \approx n_0 \gg \Delta n, \quad (6)$$

где p_0 и n_0 — концентрации равновесных, а Δp и Δn — генерированных облучением носителей; p и n — полные концентрации носителей при облучении.

Действительно, при изменении величины G в диапазоне от 10^{14} до 10^{15} $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ темп генерации неравновесных носителей изменяется от $3 \cdot 10^{20}$ до $3 \cdot 10^{21}$ $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, что дает возможность оценить $\Delta n (3 \cdot 10^{14} < \Delta n < 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3})$, поскольку измеренные методом Лэкса времена жизни неравновесных носителей заряда в наших образцах находились в диапазоне 0.7–1.1 мкс. Падение времени жизни неосновных и концентрация основных носителей заряда в результате облучения в использованном нами диапазоне доз не меняют соотношений (6).

С учетом сказанного концентрацию V^- можно выразить как

$$N_{V^-} = \frac{\gamma_n}{\gamma_p} \frac{n_0}{\alpha G} N_{V^0}, \quad (7)$$

где γ_n и γ_p — частоты захвата n и p на V^0 и V^- соответственно, α — постоянная, которая в соответствии с [11] определяется из соотношения

$$\alpha = \frac{E_s}{\lambda E_p} \tau_H,$$

где E_s и λ — энергия и длина пробега в кремнии быстрых электронов, E_p — энергия, необходимая для генерации одной электронно-дырочной пары.

Подставив (5) и (7) в (4), получим для скорости введения

$$\frac{dN_W}{d\Phi} = \alpha + BG^2, \quad (8)$$

где $\Phi = Gt$ — доза облучения, а B — коэффициент, не зависящий от G . Следует подчеркнуть, что данное рассмотрение справедливо для сравнительно низкоомного материала, в котором выполняются условия

$$N_{V^-} \gg N_{V^0} \gg N_{V^+}.$$

В высокоомном материале (у нас КЭФ-7.5), когда условие (6) не выполняется и достигается ситуация $\Delta p > p_0$ и $\Delta n > n_0$, вместо равенства (7) будет справедливо $N_{V^-} \approx N_{V^0}$, зависимость зарядового состояния вакансий от интенсивности облучения исчезнет, а скорость накопления W станет линейно зависеть от G .

При рассмотрении высокоомного p -кремния (КДБ-10) необходимо учитывать энергетическую близость однократно заряженного донорного уровня V^+ к верху валентной зоны [12]. Равновесное заполнение этого уровня определяется из равенства

$$N_{V^+} \nu \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) = s \nu_p N_{V^0},$$

где ν — частотный фактор, E — глубина залегания уровня V^+ относительно верха валентной зоны, s — сечение захвата дырки уровнем V^0 , ν — тепловая скорость дырки.

Поскольку $E \sim 0$ эВ, $\nu = N_p s \nu$ [13] (N_p — эффективная плотность состояний), а $p \sim 10^{15}$ см $^{-3}$, справедливо соотношение $N_{V^+} \ll N_{V^0}$. Концентрация V^{++} соответственно еще меньше. Следовательно, как и в случае n -кремния, можно ограничиться анализом реакций (1) и (2), но вместо (6) нужно положить

$$n \approx \Delta n = \Delta p, \quad p \approx p_0 \gg \Delta p.$$

При этом

$$N_{V^-} = \frac{\gamma_n \times G}{\gamma_p p_0} N_{V^0} \ll N_{V^0} \approx N_{V^+}. \quad (9)$$

Подставив (5) и (9) в (4), для скорости введения W получим по аналогии с (8)

$$\frac{dN_W}{d\Phi} = \alpha + B_1 G + B_2 G^2,$$

где B_1 и B_2 — постоянные, причем B_1 определяется реакцией (1), а B_2 — реакцией (2). Здесь $B_1 < B_2 G$ вследствие меньшей подвижности V^0 по сравнению с V^- [2].

Таким образом, наблюдаемые особенности накопления дивакансий, заключающиеся в квадратичной зависимости выходов для КЭФ-1 и КДБ-10 в линейной — для КЭФ-7.5, могут быть объяснены изменением при облучении электронами зарядовых состояний вакансий.

В заключение авторы выражают благодарность В. В. Емцеву и Т. В. Машовец за полезное обсуждение работы и сделанные замечания.

Список литературы

- [1] Физические процессы в облученных полупроводниках / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1977. 256 с.
- [2] Емцев В. В., Машовец Т. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. Л., 1981. 248 с.
- [3] Абдусаттаров А. Г., Емцев В. В., Ломасов В. Н., Машовец Т. В. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 1. С. 164—167.
- [4] Колесников Н. В., Ломасов В. Н., Мальханов С. Е. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 6. С. 1136—1138.
- [5] Берман Л. С., Лебедев А. А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л., 1981. 176 с.
- [6] Васильев А. В., Смирнов Л. С., Шаймеев С. С. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 4. С. 737—739.
- [7] Берман Л. С., Воронков В. Б., Ременько А. Д., Толстобров М. Г. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 1. С. 140—144.

- [8] Емцев В. В., Клингер М. И., Машовец Т. В., Назарян Е. Х., Рывкин С. М. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 5. С. 933—937.
- [9] Oehrlein G. S., Lindström J. L., Klafcsik J., Jaworowski A. E., Corbett J. W. // Proc. 12 Int. Conf. Def. Semicond. Amsterdam, 1982. P. 230—235.
- [10] Corbett J. W., Watkins G. D. // Phys. Rev. 1965. V. 138. N 2A. P. A555—A560.
- [11] Павков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. М., 1973. 456 с.
- [12] Емцев В. В., Маргарян М. А., Машовец Т. В. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 8. С. 1505—1508.
- [13] Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел. М., 1962. 558 с.

Ленинградский политехнический институт
им. М. И. Калинина

Получена 1.12.1987
Принята к печати 29.05.1989