

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДОВГОТРИВАЛОЇ РЕЛАКСАЦІЇ ФОТОПРОВІДНОСТІ У НАПІВПРОВІДНИКУ ПІСЛЯ РАДІАЦІЙНОГО ОПРОМІНЕННЯ

У рамках механізму розділення носіїв просторовими неоднорідностями обговорюється довготривала релаксація кінетики фотоструму у компенсованих зразках  $\text{Si}\langle\text{B},\text{S}\rangle$  і  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Rh}\rangle$ . Досліджено математичну модель утворення та розпаду комплексів (дивакансій), яка задовільно пояснює процеси, що протікають у напівпровіднику під впливом радіації. Вивчено стійкі режими поведінки даної моделі та отримано частковий точний розв'язок задачі для зміни концентрації дивакансій з часом. Обчислено залежності постійної часу процесу довготривалої релаксації від дози опромінення. Відзначено можливість прогнозування кінетики релаксації фотоструму у радіаційно опромінених матеріалах на основі отриманих результатів.

In the ranges of carriers separation mechanism by spatial inhomogeneities long-range relaxation phenomenon of photocurrent kinetics in compensated samples  $\text{Si}\langle\text{B},\text{S}\rangle$  and  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Rh}\rangle$  is discussed. Mathematical model of complexes (divacancies) formation and dissociation is examined. It explains the processes in semiconductor under irradiation. Stable regimes of the given model are studied and partial exact solution of the problem for time change of divacancy concentration is obtained. Dependencies of long-range relaxation process time constant on irradiation dose are calculated. Possibility of photocurrent relaxation kinetics prediction for irradiated materials is proven on the basis of results obtained.

Різні механізми довготривалої релаксації (ДР) носіїв струму розглядалися у багатьох працях (див., наприклад, [1-4]). У праці [4], зокрема, на основі вивчення кінетики релаксації фотопровідності у компенсованому матеріалі  $\text{Si}\langle\text{B},\text{S}\rangle$  і  $\text{Si}\langle\text{B},\text{Rh}\rangle$  до і після опромінення гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$  зроблено висновок, що основний відповідальний за ДР механізм – розділення носіїв бар'єрами, зумовленими просторовими неоднорідностями у розподілі неекранованих домішок. При цьому вважалось, що компенсація носіїв струму зумовлена наявністю вторинних дефектів (дивакансій). Проте у праці [4] залежність постійної часу ДР від дози опромінення пояснено лише якісно і тільки при певній ієрархії швидкостей процесів дефектоутворення. Враховуючи важливість розуміння природи фізичних процесів, що протікають у компенсованому кремнію, як дозиметричному матеріалі, задача визначення постійної часу ДР при довільному співвідношенні між параметрами матеріалу та зовнішнього впливу є актуальною.

Мета роботи – розрахунок часової сталої процесу ДР на основі отриманих залежностей концентрації комплексів (дивакансій) від часу опро-

мінення зразків, а також пояснення сукупності наявних експериментальних даних. При цьому використовується модель, дещо відмінна від описаної в [4], яка враховує утворення пар Френкеля під час опромінення кристалу та їхню рекомбінацію, утворення і розпад комплексів (дивакансій), а також часову релаксацію первинних дефектів на ненасичуваних стоках. Початок відліку часу співпадає з моментом початку дії опромінення.

Кінетика квазіхімічних реакцій, що відповідає описаній вище моделі, у безрозмірних змінних така:

$$\begin{cases} v_t = l - giv - av^2 + piw - bv, \\ i_t = l - giv - piw - hi, \\ w_t = 0,5v^2 - piw, \end{cases} \quad (1)$$

$$v = V/c, \quad i = I/c, \quad w = W/c, \quad t = \tau/\tau_{IRR},$$

$$\text{де } g = Gc\tau_{IRR}, \quad a = Ac\tau_{IRR}, \quad p = Pc\tau_{IRR}, \quad (2)$$

$$l = L\tau_{IRR}/c, \quad b = \tau_{IRR}/\tau_V, \quad h = \tau_{IRR}/\tau_I.$$

Тут  $V, I, W, c$  – концентрації вакансій, міжвузлових атомів, дивакансій і неосновних носіїв струму,  $\tau_V, \tau_I$  – ефективні часи життя первинних дефек-

тів,  $G \geq 0$ ,  $A/2 > 0$  і  $P > 0$  – константи квазіхімічних реакцій рекомбінації пар Френкеля, утворення і розпаду дивакансій відповідно,  $L > 0$  – швидкість введення первинних дефектів,  $\tau_{IRR}$  – час опромінення,  $\tau$  – час; нижній індекс "t" позначає похідну по часу.

Знаючи з (1) концентрацію дивакансій, можна обчислити залежність часу життя носіїв струму  $\tau(t)$  від дози опромінення за формулою [4]:

$$\tau(t) = \tau_0(1 + W(t)/c), \quad (3)$$

де  $\tau_0$  – постійна часу процесу ДР до опромінення,  $c$  – концентрація електронів для p-Si або концентрація дірок для n-Si.

Система (1) допускає єдиний стаціонарний розв'язок:

$$v_0 = \left\{ \left[ (bh)^2 + 2hl(2bg + ah) \right]^{1/2} - bh \right\} / (2bg + ah),$$

$$i_0 = bv_0/h, \quad w_0 = ahv_0/(2bp). \quad (4)$$

Проаналізуємо стійкість цього розв'язку, використовуючи метод лінеаризації кінетичних рівнянь [5]. Характеристичне рівняння у даному випадку має вигляд [5]:

$$\omega^3 - T\omega^2 + \delta\omega - \Delta = 0. \quad (5)$$

Тут  $T$ ,  $\delta$  і  $\Delta$  – відповідно слід, сума головних мінорів другого рангу і визначник матриці коефіцієнтів лінеаризованих рівнянь:

$$T = -v_0[2a + g + ah/(2b) + b(g + p)/h] - b - h < 0,$$

$$\delta = v_0^2 \left[ 3ag + a^2h/b + (g + a + gb/h)bp/h \right] +$$

$$+ v_0 \left[ 2bg + 2,5ah + bp + b^2p/h \right] + bh > 0, \quad (6)$$

$$\Delta = bp(bv_0 - 2l) < 0.$$

Аналіз коефіцієнтів кубічного рівняння (5) при довільних додатних значеннях  $a, b, g, h, l, p$  показує, що дійсні частини його коренів завжди від'ємні. При цьому або всі корені дійсні, що відповідає асимптотично стійкому вузлу, або один з коренів дійсний, а два інші комплексноспряжені (асимптотично стійкий фокус) [5]. Отже, стаціонарний розв'язок (4) асимптотично стійкий при довільних значеннях коефіцієнтів квазіхімічних реакцій.

Оскільки система (1) – суттєво нелінійна ( $g > 0$ ,  $p > 0$ ), то знаходження для неї загального аналітичного розв'язку – досить складна задача. Можна показати, що частковим розв'язком (1) для

$$a > 0, p > 0, h > 0, 0 < b < h, g = p(h-b)/h,$$

$$l = 4b^2h^2p(h-b)^2 \left[ ah^2 - 2p(h-b)(h-2b) \right]^{-2} \quad (7)$$

буде:

$$\begin{cases} v(t) = v_0 + C(h-b)\exp(-Rt), \\ i(t) = bv_0h^{-1} - ahC(2p)^{-1}\exp(-Rt), \\ w(t) = ahv_0(2bp)^{-1} - (h-b)^2Ch^{-1}\exp(-Rt), \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{де } R = \frac{ah^3 + 2bph(h-b)}{ah^2 - 2p(h-b)(h-2b)} > 0, \quad (9)$$

$C$  – постійна, що визначається з початкових умов,  $v_0$  – стаціонарна концентрація з (4).

Приймемо, що зразок до опромінення не містить комплексів. Тоді, використовуючи для (8), як початкову умову рівність  $w(t=0)=0$ , отримаємо:

$$w(t) = ahv_0(2bp)^{-1} [1 - \exp(-Rt)]. \quad (10)$$

Часова залежність (10) якісно демонструє процес накопичення комплексів у зразку і, відповідно, збільшення часу життя носіїв струму із дозою опромінення (внаслідок лінійності залежності  $\tau(t)$  від  $W(t)$  – вираз (3)).

Інтегрування системи (1) при довільних додатних значеннях параметрів  $a, b, g, h, l, p$  проводилося методом Рунге-Кутта 4-го порядку [6]. Виходячи з експериментальних залежностей  $\tau(\Phi)$  і формули (3), за допомогою методу найменших квадратів визначено величини коефіцієнтів квазіхімічних реакцій для  $T=77\text{K}$  і  $300\text{K}$ . У безрозмірних одиницях ці коефіцієнти набувають таких значень:

$$T = 77\text{K}: a = 1,228, b = 0,4602, g = 0,9559,$$

$$h = 0,1435, l = 26,92, p = 0,4236,$$

$$T = 300\text{K}: a = 0,1802, b = 0,2368, g = 0,1402,$$

$$h = 0,0739, l = 4,419, p = 0,0622. \quad (11)$$

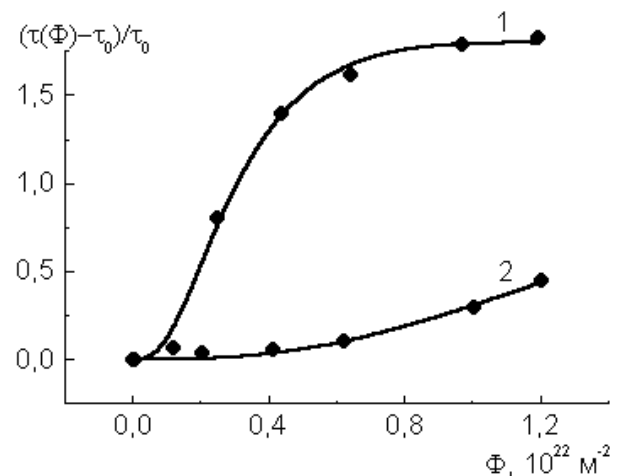


Рис. 1. Залежність часової сталої процесу ДР  $\tau$  від дози опромінення  $\Phi$ :  $T=77\text{K}$  (1),  $T=300\text{K}$  (2).

Результати теоретичних розрахунків залежності  $\tau(\Phi)$  з визначеними значеннями параметрів (суцільні криві) і відповідні дослідні дані (окремі точки) наведені на рис. 1.

З метою встановлення достовірності теоретичних розрахунків знайдемо ефективний поперечний переріз атомного зміщення під дією гамма-квантів  $\sigma_d$ . Згідно з визначенням [7]:

$$\sigma_d = lc / (\Phi n), \quad (12)$$

де  $l$  – безрозмірна швидкість введення дефектів,  $c$  – концентрація неосновних носіїв струму,  $\Phi$  – сумарний потік гамма-квантів за час опромінення  $\tau_{IRR}$ ,  $n$  – концентрація атомів у кремнії. Використовуючи для цих величин значення  $c=5 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$  [4],  $\Phi=10^{22} \text{ м}^{-2}$  [4],  $n=5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$  [8], а також дані (11) для  $T=300 \text{ К}$ , визначимо  $\sigma_d = 4,4 \cdot 10^{-29} \text{ м}^2$ . Отримане значення для  $\sigma_d$  досить добре в межах точності експерименту корелює з даними роботи [9] ( $\sigma_d=5,1 \cdot 10^{-29} \text{ м}^2$ ).

Визначені параметри квазіхімічних реакцій дають змогу прогнозувати поведінку системи для різних умов проведення експерименту. Наприклад, на основі (11) можна стверджувати, що при  $T=300\text{К}$  максимальне значення  $\tau_{MAX}=2,2\tau_0$  досягається після набору дози  $\Phi_{MAX}=2,7 \cdot 10^{-22} \text{ м}^{-2}$ . Це впливає з того, що при отриманих значеннях параметрів задачі має місце монотонне зростання із дозою опромінення часу життя носіїв струму до величини  $\tau_{MAX}$ , яка відповідає стаціонарній концентрації  $w_0$ . Такий хід експериментальної залежності  $\tau(\Phi)$  повністю узгоджується з аналізом стійкості моделюючої системи (1) і якісно демонструється поведінкою розв'язку (10). Перевірка цих тверджень для квазіхімічних коефіцієнтів (11) при  $T=77\text{К}$  призводить до  $\tau_{MAX}=2,8\tau_0$  ( $w_0=1,8$ ), що цілком узгоджується з рис. 1.

Отже, розглянута модель ДР носіїв у компенсованому кремнії не тільки якісно, але і з достатньою точністю кількісно пояснює наявні експериментальні результати.

Отримані аналітичні вирази для стаціонарних і нестаціонарних концентрацій дефектів і величини квазіхімічних коефіцієнтів дозволяють з достатньою точністю прогнозувати кінетику релаксації фотоструму у радіаційно опромінених матеріалах.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рывкин С.М. К вопросу о модели "аномальной фотопроводности" // Физика и техника полупроводников. - 1977. - **11**, №12. - С.2378-2381.
2. Шейнкман М.К., Шик А.Я. Долговременные релаксации и остаточная проводимость в полупроводниках // Физика и техника полупроводников. - 1976. - **10**, № 2. - С. 209-233.
3. Лебедев А.А., Мамадалимов А.Т., Махкамов Ш. Исследование ФП и ИК гашения в Si<S> // Физика и техника полупроводников. - 1981. - **15**, №5. - С. 1018-1021.
4. Юнусов М.С., Каримов М., Оксенгендлер Б.Л. О механизмах долговременной релаксации проводимости в компенсированном Si<B,S> и Si<B,Rh> при радиационном воздействии // Физика и техника полупроводников. - 1998. - **32**, № 3. - С.264-267.
5. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в равновесных системах. - М.: Мир, 1979.
6. Гринчишин Я.Т., Ефимов В.И., Ломакович А.Н. Алгоритмы и программы на Бейсике: Учеб. пособие для студентов пед. ин-тов по физ.-мат. спец. - М.: Просвещение, 1988.
7. Конобеевский С.Т. Действие облучения на материалы. Введение в радиационное материаловедение. - М.: Атомиздат, 1967.
8. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. К.П. Мищенко и А.А. Равделя. - Ленинград: Химия, 1972.
9. Cahn J. Irradiation damage in Germanium and Silicon due to electrons and gamma rays // J. Appl. Phys. - 1959. - **30**, No. 3. - P.1310-1316.