

## КІНЕТИКА ВІДПАЛУ РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ В ОПРОМІНЕНОМУ ЕЛЕКТРОНАМИ ГЕРМАНІЇ

С.В. Луньов, М.В. Хвищун

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна, [luniovser@ukr.net](mailto:luniovser@ukr.net)

Дослідження процесів відпалу радіаційних дефектів та визначення їх параметрів, зокрема енергії активації і частоти міграційних стрибків дефектів до стоків, є важливим етапом встановлення оптимальних умов експлуатації напівпровідникових приладів, які зазнали радіаційного впливу. Побудова адекватних теоретичних моделей відпалу дає можливість сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо створення електронних компонентів із прогнозованими функціональними характеристиками.

У роботі проведено дослідження ізотермічного відпалу монокристалів германію n-типу, опроміненіх електронами з енергією 10 МеВ при флюенсі  $\Phi=5 \cdot 10^{14}$  ел./см<sup>2</sup>. Запропоновано теоретичну модель відпалу радіаційно індукованих дефектів. На основі результатів вимірювань ефекту Холла та спектрів інфрачервоного поглинання встановлено, що домінуючими дефектами є комплекси  $VO_iI_{2Ge}$  та зародки областей розупорядкування.

Отримані експериментальні залежності концентрації дефектів від часу мають нелінійний характер, що свідчить про неможливість опису процесу відпалу рівняннями першого порядку.

$$N=N_0 \exp(-t/\tau)$$

де  $N$  — концентрація дефектів після відпалу,  $N_0$  — початкова концентрація дефектів,  $t$  — час відпалу,  $\tau$  — середній час життя дефекту.

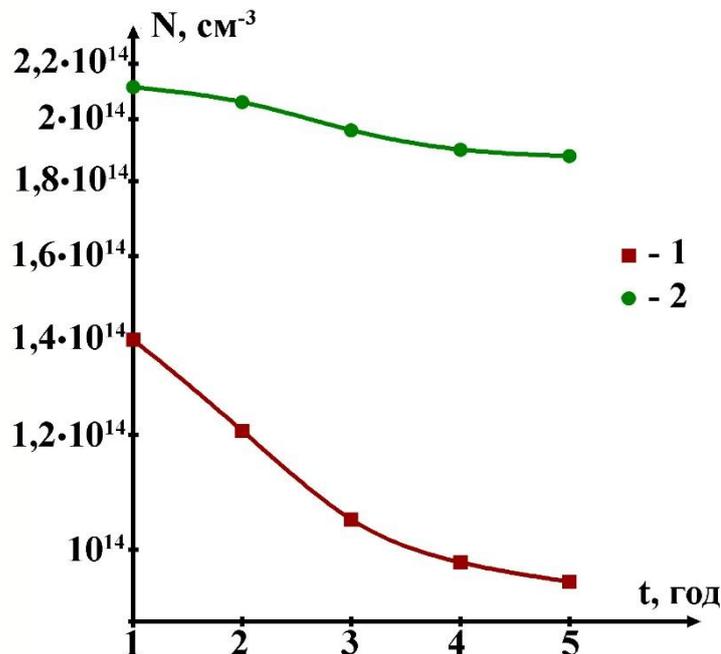


Рис. 1. Залежність концентрації комплексів  $VO_iI_{2Ge}$  від часу ізотермічного відпалу при різних температурах.

Для випадку одночасних процесів відпалу комплексів  $VO_iI_{2Ge}$  та ядер областей розупорядкування в досліджуваних монокристалах n-Ge, можна записати наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = \frac{N_V}{\tau_1} - \frac{N_A}{\tau_2}, \\ \frac{dN_V}{dt} = \frac{N_V}{\tau_1} + \frac{N_1}{\tau_2}. \end{cases} \quad (2)$$

де  $N_1$ ,  $N_V$  – концентрації комплексів  $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$  та вакансій в довільний момент часу,  $\tau_1$  та  $\tau_2$  – середній час життя вакансії та А-центру відповідно.

З розв'язку системи (2) отримаємо, що

$$N_1(t) = -\frac{N_0(k_2\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_1 t} + \frac{N_0(k_1\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_2 t}, \quad (3)$$

$$\text{де } k_1 = \frac{-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} - 1\right) + \sqrt{\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} - 1\right)^2 + \frac{8\tau_1}{\tau_2}}}{2\tau_1}, \quad k_2 = \frac{-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} - 1\right) - \sqrt{\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} - 1\right)^2 + \frac{8\tau_1}{\tau_2}}}{2\tau_1}.$$

Враховуючи результати ізотермічного відпалу для різних часів ізотермічного відпалу  $t_1$  та  $t_2$ , можна записати отримаємо наступну система рівнянь:

$$\begin{cases} N_A(t_1) = -\frac{N_0(k_2\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_1 t_1} + \frac{N_0(k_1\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_2 t_1}, \\ N_A(t_2) = -\frac{N_0(k_2\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_1 t_2} + \frac{N_0(k_1\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_2 t_2}. \end{cases} \quad (4)$$

Для знаходження енергії активації відпалу комплексів  $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$  та ядер областей розпорядкування запишемо вирази для середнього часу життя цих дефектів для двох різних температур відпал  $T_1$  та  $T_2$ :

$$\tau_1(T_1) = \frac{1}{\nu_1} e^{\frac{E_{a1}}{kT_1}}, \quad \tau_1(T_2) = \frac{1}{\nu_1} e^{\frac{E_{a1}}{kT_2}}, \quad (5)$$

$$\tau_2(T_1) = \frac{1}{\nu_2} e^{\frac{E_{a2}}{kT_1}}, \quad \tau_2(T_2) = \frac{1}{\nu_2} e^{\frac{E_{a2}}{kT_2}}. \quad (6)$$

З розв'язків рівнянь (5) та (6) отримаємо, що  $E_{a1} = 0,92$  eВ – енергія активації відпалу ядра області розпорядкування та  $E_{a2} = 1,04$  eВ – енергія активації відпалу комплексу  $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ ,  $\nu_1 = 2,52 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$  та  $\nu_2 = 1,07 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$  – частотні фактори для вакансії та комплексів  $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$  відповідно.

Одержане значення енергії активації відпалу для комплексу  $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$  виявилось більшим, ніж для комплексу  $\text{VO}_i$  ( $E_a = 0,94$  eВ), що свідчить про більшу його термічну стійкість і більш стабільну в часі роботу електронних приладів, виготовлених на основі досліджуваних монокристалів германію.