

ЕНЕРГІЯ АКТИВАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТЕРМОДОНОРІВ У НЕЙТРОННО-ЛЕГОВАНОМУ КРЕМНІЇ

Л. І. Панасюк¹, В. В. Коломоєць¹, В. М. Єрмаков¹, С. А. Федосов², Л. В. Ящинський³

¹ *Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
просп. Науки, 41, Київ, 03028, Україна, e-mail: ekol@isp.kiev.ua*

² *Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки,
просп. Волі, 13, Луцьк, 43000, Україна,*

³ *Луцький національний технічний університет,
вул. Львівська, 75, Луцьк, 43018, Україна*

(Отримано 15 грудня 2014 р.; в остаточному вигляді — 13 травня 2015 р.)

З метою визначення енергій активації високотемпературних термодонорів-II (ТД-II) технологічного походження досліджено ефект Голла на високоомних кристалах нейтронно-легованого Si (НЛ Si) з концентрацією фосфору $N_P = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Оскільки в таких кристалах домішка фосфору повністю йонізована при $T = 78 \text{ К}$, зміна концентрації вільних електронів, яка спостерігається з підвищенням температури в області (78–300) К, відбувається за рахунок термічної іонізації ТД-II. Аналіз даних вимірювань ефекту Голла дав змогу встановити енергії активації термодонорів-II. На температурній залежності сталої Голла спостерігаємо наявність двох рівнів, енергія активації яких $\varepsilon_1 = 72.5 \pm 1.0 \text{ меВ}$ і $\varepsilon_2 \approx 257 \text{ меВ}$ і які слід віднести до термодонорів, що виникають унаслідок високотемпературного технологічного відпалу НЛ-Si.

Ключові слова: термодонори, тензорезистивний ефект, енергія активації, нейтронно-легований кремній, одновісний тиск.

PACS number(s): 72.20.Fr

I. ВСТУП

Оскільки опромінення кремнію тепловими нейтронами супроводжується також опроміненням швидкими нейтронами і γ -квантами, то, як наслідок, отримують монокристали Si, насичені всіма відомими на сьогодні радіаційними дефектами. Крім того, після опромінення кремнію нейтронами ядерного реактора атоми ^{31}Si (які спонтанно переходять у ^{31}P) виявляються здебільшого в міжвузловому стані, який, як відомо, відповідає електрично-неактивному стану. Таким чином, для відпалу радіаційних дефектів та активації атомів ^{31}P , які в об'ємі кремнію виявляють донорні властивості лише у вузлах ґратки, нейтронно-легований кремній необхідно піддавати термічній обробці.

Вважають, що ті дефекти, які виникають під час НЛ кристалів Si при їх опроміненні тепловими нейтронами, можна повністю усунути внаслідок відпалу за температури $T = (800 - 850)^\circ\text{C}$ протягом 1–2 год.

Однак при відпалі не тільки зменшується кількість дефектів, зумовлених безпосередньо опроміненням нейтронами, але утворюються нові дефекти. Оскільки кристали кремнію, які вирощують як методом безтигельної зонної плавки, так і методом Чохральського, мають значний вміст кисню, відповідно від $\approx 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ до $1.8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [1], то згаданий технологічний відпал приводить до формування високотемпературних термодонорів-II [1–3], пов'язаних з наявністю кисню в кристалах кремнію.

Результати дослідження особливостей тензорезистивних ефектів у нейтронно-легованих кристалах кремнію з різною концентрацією домішки фосфору (10^{14} – 10^{15}) см^{-3} [4,5] дали змогу визначити наявність

у забороненій зоні енергетичних станів, зумовлених наявністю в об'ємі кристалів ТД-II, що виникають під час високотемпературного технологічного відпалу зливків після опромінення повільними нейтронами. Дані аналізу температурних залежностей опору й коефіцієнта Голла [4] підтвердили те, що в кристалах кремнію зі значним умістом кисню високотемпературний відпал протягом двох годин за $T \approx 900^\circ\text{C}$, приводить до появи технологічних термодонорів-II з енергією активації $\varepsilon_a \approx 60 - 200 \text{ меВ}$.

Незначні зміни концентрації вільних електронів із підвищенням температури не дозволяли визначити з потрібною точністю енергію активації термодонорів технологічного походження в досліджуваних кристалах.

Оскільки вплив термодонорів на властивості нейтронно-легованого кремнію повинен збільшуватися зі зменшенням концентрації легуючої домішки фосфору, то проведено дослідження електрофізичних властивостей високоомних кристалів НЛ n -Si(P) $N_P < 10^{13} \text{ см}^{-3}$. При цьому визначені енергії активації ТД-II.

II. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 1 зображено залежності $\rho_0/\rho_x = f(X)$ поздовжнього тензорезистивного (ТР) ефекту для кристалів НЛ-Si з різною концентрацією домішки фосфору в умовах $X \parallel [001] \parallel E$. Характерною ознакою ТР-ефекту, який вимірювали за $T = 78 \text{ К}$, є наявність максимуму при $X \approx 0.6 \text{ ГПа}$ і поступове експоненціальне зменшення питомого опору ($\approx 5\%$) зі збільшен-

ням тиску до 1.2 ГПа після завершення переселення електронів із долин, які піднімаються по енергії, у долини, енергія яких зменшується з тиском $X \parallel [001]$. Результати проведених розрахунків свідчать, що при таких значеннях одновісного тиску (ОТ) відбувається повне переселення електронів із “верхніх” долин у “нижні”, оскільки енергетичне розщеплення Δ_1 -долин значно перевищує енергію kT ($\delta E > kT$).

Установлено [6], що при зазначених вище умовах технологічного відпалу зливків кремнію, вирощених методом Чохральського, концентрація високотемпературних термодонорів-II сягає значення $\approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Таким чином, у чистих кристалах НЛ кремнію з концентрацією домішки фосфору такого ж порядку і нижче фізичні властивості кристалів кремнію визначатимуться характеристиками термодонорів. Тому, щоб з прийнятною точністю визначити значення енергії активації ТД-II, було досліджено ефект Голла на високоомних (чистих) кристалах нейтронно-легованого кремнію з концентрацією фосфору $N_P = 2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Оскільки в таких кристалах домішка фосфору повністю йонізована за $T = 78 \text{ К}$, то зміна концентрації вільних електронів, яка спостерігається з підвищенням температури в області (78–300) К, відбувається виключно за рахунок термічної йонізації високотемпературних технологічних термодонорів.

Аналіз даних вимірювань ефекту Голла дав змогу встановити енергію активації ТД-II. На температурній залежності сталої Голла (рис.2,а) спостерігаємо наявність двох рівнів $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, які слід віднести до термодонорів, що виникають унаслідок високотемпературного технологічного відпалу нейтронно-легованого кремнію. Використовуючи цю залежність та побудувавши графік $\lg RT^{3/4} = f\left(\frac{10^3}{T}\right)$ (рис. 2,б), обчислили енергію активації цих рівнів $\varepsilon_1 = 72.5 \pm 1.0 \text{ меВ}$ і $\varepsilon_2 \approx 257 \text{ меВ}$, які слід віднести до термодонорів, що виникають унаслідок високотемпературного технологічного відпалу нейтронно-легованого кремнію.

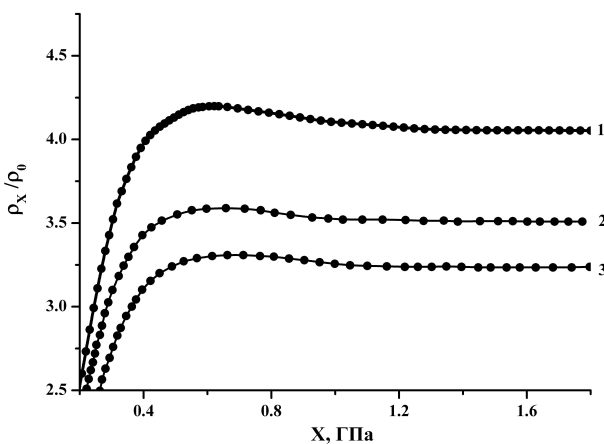


Рис. 1. Залежності поздовжнього тензорезистивного ефекту $\rho_x/\rho_x = f(X)$ для нейтронно-легованого $n\text{-Si}$ в умовах $X \parallel [001] \parallel E$ при $T = 78 \text{ К}$. Концентрація домішки фосфору $N_P [\text{см}^{-3}]$: крива 1 – 1.2×10^{14} , крива 2 – 2.7×10^{14} , крива 3 – 3.2×10^{14} .

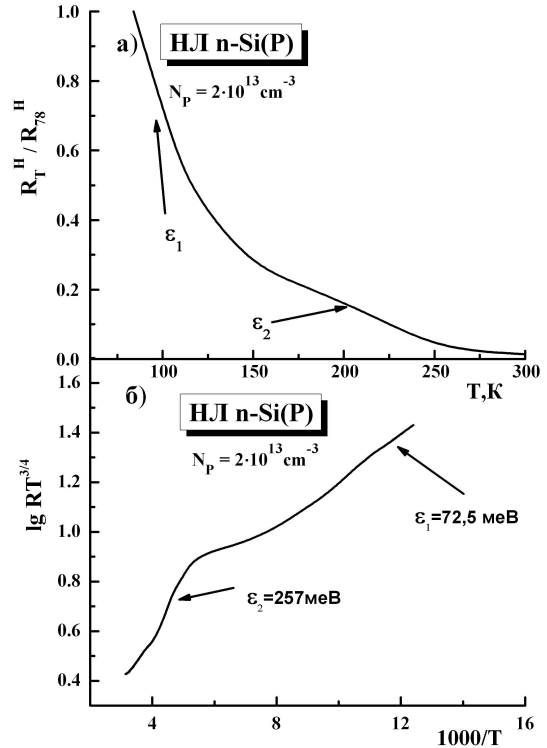


Рис. 2. Температурна залежність відносної зміни коефіцієнта Голла (а) та залежність $\lg RT^{3/4} = f\left(\frac{10^3}{T}\right)$ (б) для нейтронно-легованого $n\text{-Si(P)}$ з $N_P = 2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Зазначимо, що формування контактів із золотої-кремнієвої евтектики відбувалося за високої температури на поверхні кремнію, а якість їх перевіряли за допомогою зняття вольт-амперних характеристик (ВАХ) у широкому діапазоні напружень, які приклали до зразків. Вимірювали тільки в лінійній частині ВАХ. Стабільність контактів визначали у всьому діапазоні прикладання ОТ після зняття прикладених напружень до кристалів, які не сягали величини 0.1 – максимальної величини теоретичної міцності досліджуваних кристалів.

III. ВИСНОВКИ

На основі аналізу результатів досліджень тензорезистивного ефекту визначено механізми тензоефектів у сильно деформованих нейтронно-легованих кристалах $n\text{-Si(P)}$. Установлено, що поряд із класичними механізмами перерозподілу електронів домінуючими механізмами тензоефектів є додаткова деформаційно-індукована йонізація енергетичних станів радіаційних дефектів (фосфор) і термодонорів-II технологічного походження, які виникають унаслідок відпалу кристалів після опромінення повільними нейтронами. Суттєва деформаційно-індукована йонізація енергетичних станів зазначених дефектів відбувається в різних областях одновісного тиску $X \parallel [001]$: фосфору – (0÷0.4) ГПа, термодонорів II – (0.5÷1.2) ГПа. Визначено енергії активації ТД-II у високоомному кремнії: $\varepsilon_1 = 72.5 \pm 1.0 \text{ меВ}$ і $\varepsilon_2 \approx 257 \text{ меВ}$.

- [1] В. М. Бабич, Н. И. Блецкан, Е. Ф. Венгер, *Кислород в монокристаллах кремния* (Интерпрес ЛТД, Київ, 1997).
- [2] M. Pesola *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 5343 (2000).
- [3] V. V. Emtsev, A. J. Ammerlaan, G. A. Oganessian, A. Misiuk, Cryst. Res. Technol. **38**, 394 (2003).
- [4] С. І. Будзуляк *та ін.*, Доп. Нац. акад. наук України **9**, 79 (2000).
- [5] S. I. Budzulyak *et al.*, Physica B **302–303**, 12 (2001).
- [6] A. Kanamozhi, N. Kanamozhi, J. Appl. Phys. **50**, 8095 (1979).

ACTIVATION ENERGIES OF TECHNOLOGICAL TERMODONORS IN NEUTRON DOPED SILICON

L. I. Panasjuk¹, V. V. Kolomoets¹, V. N. Ermakov¹, S. A. Fedosov², L. V. Yashchynskiy³

¹*Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, 45, Nauky Ave., Kyiv, UA-03028, Ukraine, e-mail:ekol@isp.kiev.ua*

²*Lesya Ukrainka Eastern European National University, Solid-State Physics Department, 13, Voli Ave., Lutsk, UA-43000, Ukraine*

³*Lutsk National Technical University, Physics and electrical Department, 75, Lvivska St., Lutsk, UA-43018, Ukraine*

The typical pressure dependence of resistivity in uncompensated *n*-Si crystals doped by phosphorus from the melt is characterized by the saturation of resistivity at uniaxial pressure $X \simeq 0.7$ GPa. This peculiarity is determined by the Smith–Herring’s dominant mechanism of TR which is defined by the redistribution of *c*-band electrons between the Δ_1 -minima when $X \parallel [001]$ increases. On the contrary, the pressure dependencies of resistivity in NTD *n*-Si(P) crystals are characterized by both maximum availability on the resistivity dependencies at $X \simeq 0.6$ GPa and the following exponential-shape decreasing of resistivity in the pressure range 0.6–1.2 GPa. We attribute the above mentioned exponential resistivity decreasing in NTD *n*-Si(P) to the strain-induced ionization of technological TDs energy states.

To achieve the acceptable precision of the determination of the activation energy of high-temperature technological thermal donors the Hall effect was studied in the high-purity ($N_P < 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) transmutation doped silicon crystals. Considering that the phosphorus impurity is completely ionized already at $T = 78$ K, the variation of free electrons concentration with the increasing temperature in the range (78–300 K) is shown to be caused by a thermal ionization of technological donors.

Based on the analysis of Hall’s results the activation energy of thermal donors was found. The temperature dependence of the Hall coefficient shows the presence of two levels $\varepsilon_1 = 72.5 \pm 1.0$ meV and $\varepsilon_2 = 257$ meV. These are the activation energies of thermal donors formed under the annealing of the transmutation doped Czochralski-grown silicon.