

ВПЛИВ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ТЕРМООБРОБКИ НА ГОЛЛІВСЬКІ ПАРАМЕТРИ ТА ЧАС ЖИТТЯ НОСІЇВ ЗАРЯДУ ТРАНСМУТАЦІЙНО ЛЕГОВАНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ

Г. П. Гайдар

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна,
просп. Науки, 47, Київ, 03680, Україна,
e-mail: gaydar@kinr.kiev.ua*

(Отримано 29 січня 2018 р.; в остаточному вигляді — 05 жовтня 2018 р.)

Подано результати експериментального дослідження голлівських параметрів і часів життя неосновних носіїв заряду в трансмутаційно легованих кристалах n -Si(P), що піддавалися високотемпературним відпалам різної тривалості й охолоджувалися з різними швидкостями. Установлено, що процеси міждефектної (чи домішково-дефектної) взаємодії в кристалі під час монотонного охолодження його від температури відпалу до кімнатної (за різних швидкостей охолодження) не відповідають монотонній зміні цих швидкостей. Виявлено, що за високотемпературної (1200°C) обробки трансмутаційно легованих кристалів кремнію n -типу протягом 2 год і швидкості охолодження $15^{\circ}\text{C}/\text{хв}$, а також протягом 72 год і всіх досліджених швидкостей охолодження ($1, 15$ і $1000^{\circ}\text{C}/\text{хв}$) в їхньому об'ємі відбувається генерація глибоких донорних центрів. Установлено, що найвищі часи життя неосновних носіїв заряду після високотемпературних відпалів отримують у зразках, які охолоджувалися зі швидкістю $15^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ (серед серій високотемпературних відпалів протягом 2 і 72 год).

Ключові слова: кремній, трансмутаційне легування, термообробка, швидкість охолодження, голлівські параметри, час життя.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.22.4601>

PACS number(s): 61.82.Fk

I. ВСТУП

Основним напівпровідниковим матеріалом сучасної мікро- та наноелектроніки є кремній [1, 2]. Проблема керування фізичними властивостями напівпровідників за допомогою різних обробок особливо актуальна щодо кремнію у зв'язку з появою нових технологічних матеріалів і приладів, виготовлених на їхній основі [3–6]. Активне вивчення пористого кремнію (пор-Si) зумовлене необхідністю створення газочутливих сенсорів на основі кремнієвих технологій. Завдяки розвиненій системі пор у структурах пор-Si/Si спостерігали зміну оптичних [7, 8], електричних [9] та люмінесцентних властивостей [10] під час адсорбції молекул поверхнею, що може бути використано під час створення сенсорів. Застосування в мікро- і наноелектроніці шарів полікристалічного кремнію на поверхні окисленої кремнієвої пластини (КНІ-структури) відкриває широкі можливості для створення високочутливих приладів мікроелектроніки, а в поєднанні з прийомом і методами нанотехнологій дає змогу створити новий клас пристроїв з розширеними функційними можливостями, які за своїми характеристиками набагато кращі від наявних аналогів [11–14]. Застосування наноструктур із самоіндукованими Ge(Si) наноострівцями відкриває нові можливості для розвитку опто- і наноелектроніки [15]. Одержання багаточастотних масивів квантових точок Ge в Si матриці є перспективним з погляду їхнього використання в сонячних елементах [16, 17].

Бурхливий розвиток мікро- і наноелектроніки вимагає не тільки створення нових перспективних матеріалів, але й удосконалення тих, які вже є. Зазначені обставини спонукають постійно розширювати знання про властивості кремнію, досліджувати методи його обробки й легування, щоб одержувати в підсумку кристали необхідного ступеня чистоти й однорідності [18]. Звичайні методи легування не можуть забезпечити необхідного рівня однорідності розподілу легуючої домішки в об'ємі кристалів, однак використання методу ядерного (нейтронно-трансмутаційного) легування ліквідує цю прогалину і надає можливість отримувати високоякісний монокристалічний кремній, що відповідає сучасним вимогам щодо однорідності, стабільності та відтворюваності параметрів [19].

Одним із найважливіших критеріїв якості напівпровідникового матеріалу і ступеня його придатності для виготовлення приладів є час життя неосновних носіїв заряду: що вища чистота і структурна досконалість матеріалу, то зазвичай буде вищим і час життя. Цей фізичний параметр залежить не тільки від властивостей матеріалу, але й від стану поверхні, уведених домішок, розмірів зразка, технології його виготовлення [20].

У технології виготовлення напівпровідникових приладів (особливо в планарній [21]) на різних стадіях їхньої готовності використовують систему ряду термовідпалів, причому умови, за яких відповідні напівпровідникові об'єкти охолоджуються від температури відпалу, можуть суттєво відрізнятися. Тому як у

науковому плані, так і для практичних застосувань в електроніці становило інтерес дослідження впливу не лише температури відпалу, але також і швидкості охолодження зразків на кінетичні коефіцієнти і час життя неосновних носіїв заряду в монокристалах кремнію, що є метою цієї статті.

II. ЕКСПЕРИМЕНТ

Для постановки експерименту використовували трансмутаційно леговані зразки n -Si(P), виходячи з таких міркувань: розподіл домішкових атомів фосфору в таких кристалах більш однорідний і, крім того, саме цей матеріал є профільним у планарній промисловій технології, де подібні термовідпали широко вживані. Експеримент проводили на слабо легованих кристалах кремнію, у дослідях з якими вимірювані параметри більші за абсолютною величиною і, отже, можуть бути виміряні з меншою ймовірністю на похибки.

У вихідних кристалах кремнію концентрація рівноважних електронів становила $n_e \approx 6.42 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ і визначалася концентрацією домішки фосфору, введеної в ці кристали у процесі трансмутаційного легування. Концентрацію носіїв заряду знаходили за допомогою ефекту Голла. Час життя носіїв визначали з кінетики загасання надлишкової провідності, яка збуджувалася коротким світловим імпульсом, що рівномірно поглинався. Цей імпульс, створений лазером (тривалість імпульсу 20 нс), проходив спочатку крізь кремнієві послаблюючі фільтри. Спад надлишкової провідності складався з експоненційної компоненти.

Зразки вирізали у формі паралелепіпеда з розмірами $10 \times 4 \times 1 \text{ мм}$, а їхні поверхні мали низьку швидкість поверхневої рекомбінації.

Високотемпературний (за 1200°C) відпал трансмутаційно легованих кристалів n -Si(P) проводили у кварцових ампулах під відкачкою (в умовах форвакууму) протягом 2 і 72 год. Швидкості охолодження (v_{cl}) після високотемпературного відпалу становили: 1°C/хв (повільне охолодження) — зразок в ампулі охолоджувався разом із пічкою; 15°C/хв — після витягування ампули з пічки охолодження одержували за допомогою зовнішнього обдуву; 1000°C/хв (швидке охолодження) — відпалені зразки скидали у трансформаторне масло.

III. ВПЛИВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВІДПАЛУ ТА РІЗНИХ ШВИДКОСТЕЙ ОХОЛОДЖЕННЯ НА ГОЛЛІВСЬКІ ПАРАМЕТРИ ТРАНСМУТАЦІЙНО ЛЕГОВАНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ

Типові результати дослідів, проведених на трьох серіях зразків трансмутаційно легованого кремнію (по 4-и зразки в кожній серії) з наступним усередненням, наведено в таблиці. Як видно з таблиці, навіть зразки, вирізані з одного й того ж зливка, а отже, вирощені, леговані й відпалені в тотожних умовах, залежно від умов охолодження зазнають досить відчутних змін, які, безперечно, необхідно брати до уваги під час інженерних розробок і тих змін, що час до часу вносяться в планарну технологію з метою її вдосконалення.

Умови термовідпалу й охолодження		ρ ,	$n_e \cdot 10^{-13}$,	$\mu_{77\text{К}}$,
$T_{\text{анн}}$ і його тривалість	$\nu_{cl}, ^\circ\text{C/хв}$	Ом·см	см ⁻³	см ² /В·с
1200°C; 2 год	1000	4.62	6.61	20500
1200°C; 2 год	15	9.18	3.60	18800
1200°C; 2 год	1	5.55	5.66	20100
Вихідні кристали		4.56	6.42	21400

Таблиця. Голлівські параметри для зразків трансмутаційно легованого n -Si(P), що охолоджувався в різних режимах після типового термовідпалу.

Характерними особливостями одержаних результатів є те, що: 1) на параметри ρ , n_e і μ відпалених монокристалів n -Si(P) у конкретних умовах (близьких до практично використовуваних у планарній технології виготовлення напівпровідникових приладів, зокрема й інтегральних та великих інтегральних схем) суттєво впливає швидкість охолодження напівпровідникових об'єктів від температури відпалу (1200°C) до кімнатної; 2) найбільш помітні зміни питомого опору, концентрації та рухливості носіїв заряду $\rho \approx 101.3\%$; $n_e \approx 43.9\%$; $\mu \approx 12.2\%$ відпалених кристалів (1200°C ; 2 год) виникають не за екстремально-високих (1000°C/хв) чи низьких (1°C/хв) швидкостей охолодження, а за деякого проміжного значення цієї швидкості (у нашому випадку проміжною швидкістю охолодження кристалів була $\nu_{cl} = 15^\circ\text{C/хв}$). А це означає, що при моно-

тонному охолодженні відпаленого кристала в домішково-дефектній системі відбувається процес, який у широкому діапазоні швидкостей охолодження (від 1°C/хв до 1000°C/хв) змінюється залежно від швидкості охолодження немонотонно. Тобто цей процес характеризується наявністю екстремуму в зміні голлівських параметрів, про що свідчать найбільш істотні відхилення значень вимірюваних параметрів не тільки від аналогічних значень у вихідних зразках, але також і у відпалених кристалах, які охолоджувалися з максимально високою й максимально низькою швидкостями. Максимум цієї функції, звичайно, не можна прив'язувати безпосередньо до $\nu_{cl} = 15^\circ\text{C/хв}$, адже його положення між крайніми значеннями швидкостей охолодження, використаними в цій роботі, наразі не відоме.

IV. ТЕМПЕРАТУРНІ ЗАЛЕЖНОСТІ КОНЦЕНТРАЦІЇ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В ТРАНСМУТАЦІЙНО ЛЕГОВАНОМУ n -Si(P)

На рис. 1 показано температурні залежності концентрації рівноважних носіїв заряду n_e до (крива 1) і після (криві 2–7) високотемпературного відпалу. Як випливає з даних, наведених на цьому рисунку, відпали за температури 1200°C протягом 72 год за будь-яких досліджених швидкостей охолодження ($\nu_{cl} = 1000, 15, 1^\circ\text{C}/\text{хв}$), а також відпал протягом 2 год з наступним охолодженням зі швидкістю $\nu_{cl} = 15^\circ\text{C}/\text{хв}$ призводять до зменшення в $1.8 \div 3.6$ раза концентрації рівноважних електронів n_e при $T = 77\text{ K}$ (яка визначається центрами мілкого залягання) і до утворення в об'ємі кристала глибоких донорних центрів із концентрацією $(1 \div 3) \cdot 10^{13}\text{ cm}^{-3}$ (див. рис. 1, криві 3, 5–7).

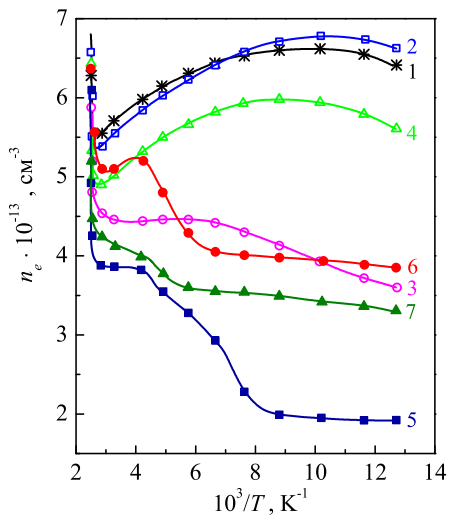


Рис. 1. Температурні залежності концентрації рівноважних електронів у трансмутаційно легovanому n -Si(P): 1 — вихідний кристал; 2, 3, 4 — $T_{\text{ann}} = 1200^\circ\text{C}$, $t = 2$ год, $\nu_{cl} = 1000, 15, 1^\circ\text{C}/\text{хв}$ відповідно; 5, 6, 7 — $T_{\text{ann}} = 1200^\circ\text{C}$, $t = 72$ год, $\nu_{cl} = 1000, 15, 1^\circ\text{C}/\text{хв}$ відповідно.

Відпали за 1200°C протягом 2 год з наступним швидким ($1000^\circ\text{C}/\text{хв}$) або повільним ($1^\circ\text{C}/\text{хв}$) охолодженням суттєво не змінюють концентрації рівноважних електронів n_e , яка визначається центрами мілкого залягання, і не призводять до утворення глибоких рівнів (рис. 1, криві 2, 4). Помітне зменшення концентрації n_e зі зниженням температури (рис. 1, криві 1, 2, 4) пов'язане зі зміною голлфактора.

Поряд з електричними вимірами досліджено мікроструктуру кристалів кремнію до і після термообробки за допомогою аналізу мікроснімків поверхні після вибіркового травлення зразків [22–24]. Для цього зразки вирізали паралельно площині (111) з одного і того ж зливка. Механічну й хімічну обробку зразків проводили в однакових умовах. Мікроструктурний аналіз трансмутаційно легovanого n -Si(P) до термообробки показав, що в таких зразках є велике скупчення дефектів, імовірно, дрібних

комплексів точкових дефектів (рис. 2, а), однак після високотемпературного відпалу 1200°C протягом 2 год за умови швидкого охолодження точкові дефекти та комплекси розчинилися, при цьому з'явилися дислокації (рис. 2, б).

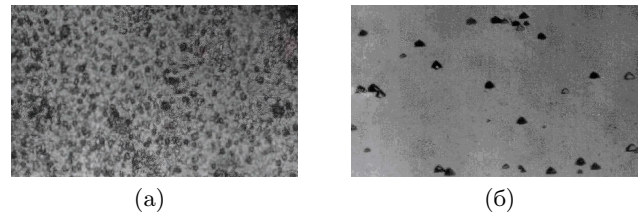


Рис. 2. Мікрофотографії поверхні ($\times 200$) після вибіркового хімічного травлення зразків трансмутаційно легovanого n -Si(P) до (а) і після (б) відпалу (1200°C ; 2 год) та охолодження зі швидкістю $1000^\circ\text{C}/\text{хв}$.

V. ЧАС ЖИТТЯ НЕОСНОВНИХ НОСІЇВ ЗАРЯДУ В ТРАНСМУТАЦІЙНО ЛЕГОВАНОМУ n -Si(P)

Час життя неосновних носіїв заряду τ у трансмутаційно легovanому кремнії — одна з найважливіших характеристик матеріалу, що визначає межі його практичного застосування. Після технологічного відпалу за 800°C можна отримати досить стабільні й відтворювані значення питомого опору, концентрації та рухливості носіїв, причому це справедливо для кремнію, опроміненого різними інтегральними потоками нейтронів аж до 10^{21} cm^{-2} [25]. Під час спроби отримати стабільні й досить високі за величиною значення τ дослідники зіткнулися з низкою труднощів. Зокрема, виявилось, що в окремих зливках стабільні значення виходять за вищих температур відпалу, ніж це необхідно для отримання стабільних значень питомого опору ρ , концентрації n_e та рухливості μ носіїв заряду, і що відновлення τ залежить від низки чинників, які включають чистоту й опір кристала, тривалість витримки за температури відпалу, атмосферу печі, швидкість охолодження та ін. [25]. Абсолютно несподіваним і практично досі непоясненим залишається нерідко спостережуваний факт отримання трансмутаційно легovanого кремнію з високими значеннями τ за опромінення потоком нейтронів з великим умістом швидких нейтронів і, отже, в умовах утворення великої концентрації радіаційних дефектів, тоді як за цих умов слід було б очікувати зворотного ефекту [25, 26].

Вихідний кремній, отриманий методом безтигельної зонної плавки, зазвичай характеризується значеннями $\tau \approx 1 \div 3$ мкс [27, 28]. Безпосередньо після опромінення значення τ настільки малі, що їх практично неможливо виміряти. У процесі термічної обробки в міру відпалу дефективні значення τ відновлюються [27]. При цьому кінцеві значення τ істотно залежать від досконалості кристалів і слабо — від потоку нейтронів. Однак повного відновлення вихідних значень τ не відбувається.

Відомо [29], що відпал кристалів кремнію за температур $1000 \div 1200^\circ\text{C}$ призводить до значного зменшення часу життя носіїв заряду τ . Це пов'язано як із проникненням в об'єм кристала з його поверхні різних

рекомбінаційно-активних домішок (типу Fe, Au, Cu), що швидко дифундують, так і з утворенням в об'ємі Si нових рекомбінаційно-активних центрів. Високотемпературний відпал може призводити також до появи ефективних центрів прилипання електронів і дірок. Утворення рекомбінаційних центрів прилипання, а також "внутрішнє" гетерування можуть призводити до немонотонностей у залежностях часу життя носіїв заряду від швидкості охолодження [30].

Під час дослідження впливу високотемпературного відпалу та різних швидкостей охолодження на голлівські параметри у трансмутаційно легованих кристалах кремнію, показано, що швидкість охолодження $\nu_{cl} = 15^\circ\text{C}/\text{хв}$ (від температури відпалу 1200°C до кімнатної) є в певному сенсі виділеною.

Розгляньмо експериментальні дані щодо залежності часу життя носіїв заряду від режимів термообробки і охолодження трансмутаційно легованих кристалів кремнію. Час життя носіїв заряду визначили за ефектом загасання фотопровідності.

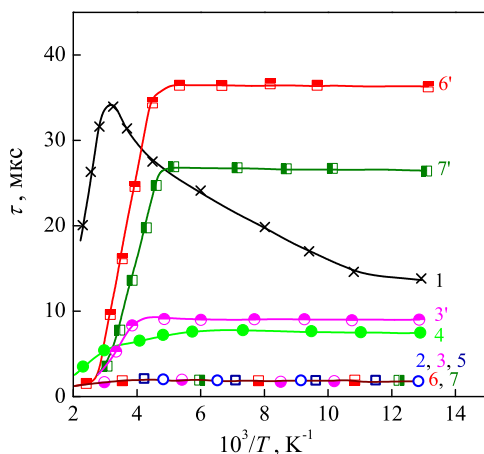


Рис. 3. Температурні залежності часів життя неосновних носіїв заряду в трансмутаційно легованому $n\text{-Si(P)}$: 1 — вихідний кристал; 2, 3, 3', 4 — $T_{\text{ann}} = 1200^\circ\text{C}$, $t = 2$ год, $\nu_{cl} = 1000, 15, 1^\circ\text{C}/\text{хв}$; 5, 6, 6', 7, 7' — $T_{\text{ann}} = 1200^\circ\text{C}$, $t = 72$ год, $\nu_{cl} = 1000, 15, 1^\circ\text{C}/\text{хв}$ відповідно. Криві 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 — τ_1 ; криві 3', 6', 7' — τ_2 .

Вивчення кінетики фотопровідності трансмутаційно легованих зразків вихідних і тих, що пройшли відповідну термообробку, показало, що у всіх випадках, коли в результаті відповідного відпалу в об'ємі досліджуваних зразків з'являються глибокі центри (рис. 1, криві 3, 5–7), імпульс фотовідповіді містить дві експоненційні ділянки. Перша з них характеризується амплітудою dU і порівняно коротким часом життя τ_1 , величина якого в інтервалі температур $77 \leq T \leq 400$ К залишається практично незмінною. Друга ділянка характеризується амплітудою $dU' < dU$ і довшим часом життя τ_2 , (приблизно до 37 мкс), який залишається сталим в зоні температур $77 \leq T \leq 200$ К, а з подальшим підвищенням температури зменшується.

Відношення dU'/dU залежить від режимів термообробки. Для зразків, відпалених протягом 2 год з наступним охолодженням зі швидкістю $\nu_{cl} = 15^\circ\text{C}/\text{хв}$, $dU'/dU = 0.07$ за кімнатної температури. Для зразків, відпалених протягом 72 год з наступним охолодженням зі швидкостями $\nu_{cl} = 1000, 15, 1^\circ\text{C}/\text{хв}$, відношення dU'/dU становило 0.014, 0.14, 0.043 відповідно. Імпульс фотовідповіді для зразків, у яких не виявлено глибоких центрів (рис. 1, криві 1, 2, 4), складався з однієї експоненти.

На рис. 3 зображено температурні залежності часів життя носіїв заряду до (крива 1) і після (криві 2–7, 3', 6', 7') високотемпературного відпалу. До термообробки (як випливає з цього рисунка) спостерігається за $T < 330$ К природне зменшення τ зі зниженням температури. У кристалах, які пройшли високотемпературну обробку, в ході залежностей $\tau_2 = f(1/T)$ (рис. 3, криві 3', 6', 7') виявляються якісні відмінності від кривої 1. У зразках, які пройшли високотемпературну обробку, часи життя не спадають, а зростають зі зниженням температури. Не виключено, що таке збільшення τ_2 зі зниженням температури пов'язане з проявом створених у процесі термообробки центрів прилипання носіїв і що τ_2 визначає час життя неосновних носіїв заряду [29]. Дані, наведені на рис. 3, цікаві з двох сенсів. Передусім це те, що найвищі часи τ_2 після високотемпературних відпалів різної тривалості отримують у зразках, які охолоджувалися зі швидкістю $15^\circ\text{C}/\text{хв}$, тобто проявляється характерна немонотонність у залежності часу життя τ_2 від швидкості охолодження. І в цьому сенсі швидкість $\nu_{cl} = 15^\circ\text{C}/\text{хв}$ також є виділеною. Друге — це те, що вищі часи τ_2 виявляються характерними для зразків, які піддавалися високотемпературному відпалу більшої тривалості, що стандартними уявленнями про проникнення рекомбінаційно-активних центрів із поверхні кристала в його об'єм (у процесі відпалу протягом 72 год) не пояснюється. Отримані результати можна пояснити із залученням процесів "внутрішнього" гетерування [30]. Справді, в радіаційно легованих кристалах кремнію (навіть після технологічного відпалу за $T = 800^\circ\text{C}$ протягом $1.5 \div 2$ год є порушення кристалічної ґратки [31,32]. Ці порушення, як і інші структурні дефекти та домішкові включення, можуть бути ефективними центрами випадіння рекомбінаційно-активних центрів. Остання обставина, імовірно, й призводить (за рахунок "внутрішнього" гетерування) до значного зниження концентрації рекомбінаційно-активних центрів, що, своєю чергою, спричиняє зростання часів життя носіїв заряду. Ефективність прояву цього механізму з підвищенням тривалості термовідпалу повинна, природно, зростати, що й дає експеримент.

VI. ВИСНОВКИ

У результаті проведених експериментів можна зробити такі висновки.

1. З'ясовано, що найбільш помітні зміни питомого опору, концентрації та рухливості носіїв заряду трансмутаційно легованих кристалів $n\text{-Si(P)}$ виникають не за низького чи високого, а за деякого проміжного ($15^\circ\text{C}/\text{хв}$) значення швидкості охолодження після високотемпературного відпалу.

2. Установлено, що процеси міждефектної взаємодії в кристали під час монотонного його охолодження протікають немонотонно й характеризуються наявністю екстре-

муму в зміні голлівських параметрів, хоча цей екстремум не прив'язаний безпосередньо до швидкості охолодження $15^{\circ}\text{C}/\text{хв}$.

3. Виявлено, що за високотемпературної (1200°C) обробки трансмутаційно легованих кристалів кремнію n -типу протягом 2 год і швидкості охолодження $15^{\circ}\text{C}/\text{хв}$, а також протягом 72 год і всіх досліджених швидкостей охолодження (1, 15 і $1000^{\circ}\text{C}/\text{хв}$) в їхньому об'ємі відбува-

ється генерація глибоких донорних центрів.

4. Експериментально доведено, що вищі значення часу життя неосновних носіїв заряду τ після високотемпературних відпалів (за 1200°C) різної тривалості мають зразки, які охолоджувалися зі швидкістю $15^{\circ}\text{C}/\text{хв}$.

5. Установлено, що за швидкості охолодження $15^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ максимальне значення τ серед усіх досліджуваних зразків отримано за віддалу протягом 72 год.

-
- [1] Н. Герасименко, Ю. Пархоменко, *Кремній — матеріал наноелектроніки* (Техносфера, Москва, 2007).
- [2] С. М. Павлов, *Основи мікроелектроніки* (ВНТУ, Вінниця, 2010).
- [3] S. Oda, *Materials Sci. Eng. B* **101**, 19 (2003).
- [4] J. Vanhellefont, E. Simoen, *J. Electrochem. Soc.* **154**, H572 (2007).
- [5] S. I. Budzulyak, *Phys. Chem. Solid State* **13**, 34 (2012).
- [6] П. І. Баранський, О. Є. Беляєв, Г. П. Гайдар, В. П. Кладько, А. В. Кучук, *Проблеми діагностики реальних напівпровідникових кристалів* (Наукова думка, Київ, 2014).
- [7] V. A. Vikulov, V. V. Korobtsov, *Russ. Microelectronics* **36**, 97 (2007).
- [8] L. A. Golovan, V. Yu. Timoshenko, P. K. Kashkarov, *Phys. Usp.* **50**, 595 (2007).
- [9] R. C. Anderson, R. S. Muller, C. W. Tobias, *J. Electrochem. Soc.* **138**, 3406 (1991).
- [10] V. A. Skryshevsky, *Appl. Surf. Sci.* **157**, 145 (2000).
- [11] R. He, P. Yang, *Nature Nanotechnol.* **1**, 42 (2006).
- [12] O. V. Naumova *et al.*, *Microelectronic Eng.* **69**, 168 (2003).
- [13] V. I. Turchanikov *et al.*, *Microelectronics Reliability* **45**, 903 (2005).
- [14] O. V. Naumova *et al.*, in *EuroSOI International Conference* (Göteborg, Sweden, 2009), p. 69.
- [15] D. N. Lobanov *et al.*, *Semiconductors* **43**, 313 (2009).
- [16] J. Konle, H. Presting, H. Kibbel, F. Banhart, *Mat. Sci. Eng. B* **89**, 160 (2002).
- [17] Е. Я. Швець, *Технологии и материалы солнечной энергетики* (ЗГИА, Запорожье, 2007).
- [18] І. Ф. Червоний *та ін.*, *Напівпровідниковий кремній: теорія і технологія виробництва*, під заг. ред. І. Ф. Червоного (ЗДІА, Запоріжжя, 2009).
- [19] I. S. Shlimak, *Fiz. Tverd. Tela* **41**, 794 (1999).
- [20] R. N. Volyar, *Tekhnologicheskiiy audit i rezervy proizvodstva* №1/4(21), 50 (2015).
- [21] Е. З. Мазель, Ф. П. Пресс, *Планарная технология кремниевых приборов* (Энергия, Москва, 1974).
- [22] А. Е. Usenko, А. V. Yukhnevich, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Mat. Elektron. Tekhn.* №2, 38 (2009).
- [23] A. J. Nijdam, J. G. E. Gardeniers, C. Gui, M. Elwenspoek, *Sens. Actuators A* **86**, 238 (2000).
- [24] А. Е. Usenko, А. V. Yukhnevich, *Zhurn. Obshch. Khim.* **77**, 400 (2007).
- [25] J. Cleland *et al.*, in *Neutron transmutation doping in semiconductors. Proc. 2nd Intern. Conf. Colombia, Missouri, April 23–26, 1978*, edited by J. M. Meese. (Plenum Press, N. Y.–London, 1979), p. 261.
- [26] O. Malmros, in *Neutron transmutation doping in semiconductors. Proc. 2nd Intern. Conf. Colombia, Missouri, April 23–26, 1978*, edited by J. M. Meese. (Plenum Press, N. Y.–London, 1979), p. 249.
- [27] A. Senes, G. Sifre, M. Breant, in *Semiconductor Silicon*, edited by H. Huff, E. Sirtl (The Electrochem. Soc., Princeton, 1977), p. 135.
- [28] V. A. Kharchenko, S. P. Solov'yev, *Fiz. Tekhn. Polupr.* **5**, 1641 (1971)
- [29] K. D. Glinchuk, N. M. Litovchenko, R. Merker, *Polupr. Tekhn. Mikroelektron.* №25, 17 (1977).
- [30] K. Nagasawa, Y. Matsushita, S. Kishino, *Appl. Phys. Lett.* **37**, 622 (1980).
- [31] P. I. Baranskii, G. P. Gaidar, *J. Thermoelectricity* №1, 5 (2012).
- [32] П. І. Баранський, А. В. Федосов, Г. П. Гайдар, *Фізичні властивості кристалів кремнію та германію в полях ефективного зовнішнього впливу* (Надстир'я, Луцьк, 2000).

Г. П. ГАЙДАР

**INFLUENCE OF DIFFERENT THERMAL TREATMENT REGIMES ON THE HALL
PARAMETERS AND THE LIFETIME OF CHARGE CARRIERS OF TRANSMUTATION
DOPED SILICON CRYSTALS**

G. P. Gaidar

*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine,
47, Nauky Ave., Kyiv, UA-03680, Ukraine,
e-mail: gaydar@kinr.kiev.ua*

The results of an experimental study of the Hall parameters and lifetimes of the minority charge carriers in transmutation doped n -Si(P) crystals, subjected to high-temperature annealings of different duration and cooled at different rates, are presented. It has been established that the processes of interdefect (or impurity-defect) interaction in a crystal when monotonically cooled from the annealing temperature to room temperature (at different cooling rates) do not correspond to a monotonous change in these rates. It is proved that in transmutation doped silicon crystals subjected to high-temperature annealing, the most noticeable influence on the change in Hall parameters was observed with the cooling at an intermediate rate ($15^{\circ}\text{C}/\text{min}$). It was found that after the high-temperature processing (1200°C) of transmutation doped n -type silicon crystals for 2 h with the cooling rate of $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$, and also for 72 h and with all the cooling rates studied (1, 15 and $1000^{\circ}\text{C}/\text{min}$), the generation of deep donor centers occurs in their volume. It was established that the highest lifetimes of minority charge carriers after high-temperature annealings will be in the samples that were cooled at the rate of $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (among the series of high-temperature annealings of 2 and 72 h duration). It is shown that among all the investigated thermal treatments, the silicon crystals, annealed at 1200°C during 72 h and cooled at the rate of $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$, have the maximum value of lifetime.