

УДК 621.315.592; 548.4+548.734

В.М. Бабич, Ю.П. Доценко, Л.А. Міщенко<sup>1</sup>, М.Я. Скороход  
**Роль легуючих та фонових домішок у формуванні дефектної  
структури і електрофізичних властивостей кисневмісних  
кристалів кремнію**

*Інститут фізики напівпровідників НАН України, 03028, Київ-28, пр. Науки, 45,  
<sup>1</sup>Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій,  
03110, Київ-110, вул. Солом'янська, 7*

На основі розгляду результатів експериментальних досліджень, виконаних нами з використанням комплексу взаємодоповнюючих методів (електрофізичних, електронного парамагнітного резонансу, низькотемпературної фотолюмінесценції та ін.), та досліджень інших авторів, проаналізовано вплив легуючих та фонових домішок на процеси дефектоутворення в кисневмісних кристалах кремнію. Звернуто увагу на те, що на ранніх стадіях преципітації кисню (відпали при 450°C) легуюча домішка бору може втрачати свої акцепторні властивості та вступати у взаємодію з міжвузловим киснем з утворенням електрично активних донорних комплексів.

Розглянуто також особливості впливу при відпалах кисневмісних кристалів Si ізовалентних домішок вуглецю та германію (або олова) на формування електрично активних термодонорних центрів кисневої природи і, відповідно, на формування нових властивостей матеріалу Si. Зокрема, знайдено як схожі, так і відмінні риси, у поведінці вуглецю та германію при взаємодії з міжвузловим киснем. Обговорюються модельні уявлення про міждомішкову взаємодію в кисневмісних кристалах Si.

**Ключові слова:** кремній, домішки легуючі та фонові, термодефекти, термодонори, термоакцептори, ізовалентні домішки.

*Стаття постуила до редакції 27.09.2002; прийнята до друку 23.10.2002*

Відомо, що розпад пересиченого твердого розчину кисню в монокристалах кремнію в інтервалі температур відпалів 400 - 1200°C супроводжується утворенням цілого ряду термодефектів. І, в першу чергу, преципітатів кисню. Розміри і концентрація останніх визначаються як вмістом кисню в кристалах, температурою та тривалістю відпалів, так і наявністю в кристалах Si поряд з основними легуючими домішками (P, B та ін.) ізовалентних легуючих (Ge, Sn) або фонових (C) домішок, які опосередковано через локальні механічні напруги, що виникають навколо атомів цих домішок, суттєво змінюють картину дефектоутворення в кисневмісних кристалах.

Враховуючи те, що значна частина термодефектів, які утворюються при відпалах кисневмісних кристалів Si в області 400-800°C є електрично активними (термодонори (ТД) та термоакцептори (ТА)) і їх концентрації досягають значень  $\approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , легко спостерігати формування нових електрофізичних властивостей слабологованих ( $N_D, N_A \leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) кристалів Si в результаті таких відпалів.

Властивості електрично активних ТД- та ТА-

центрів та поведінка міжвузлового кисню в кристалах Si при їх утворенні вивчались протягом тривалого часу (більше 4-х десятиліть) в багатьох наукових центрах і результати цих досліджень узагальнені в ряді оглядів та монографій і, зокрема, в [1].

В даній оглядовій роботі представлені найбільш цікаві результати досліджень впливу легуючих та фонових домішок на дефектоутворення в кисневмісних кристалах Si, отримані авторами на протязі тривалого часу, і які лише частково знайшли відображення в [1].

Однозначної думки про вплив легуючих домішок (B, Al, Ga, P та ін.) в матеріалі Si на формування ТД-центрів кисневої природи тривалий час не було. Одні автори стверджували на основі власних експериментальних даних, що такий вплив легуючих домішок на утворення ТД-центрів існує як в матеріалі p-Si [2,3], так і в матеріалі n-Si [4]. Також існували експериментальні дані, які такого впливу легуючих домішок на утворення ТД-центрів не виявляли [5]. Тому, навіть в [1], нами відмічено, що спростувати цю неоднозначність очевидно зможуть лише подальші дослідження якісного складу ТД-

центрів в матеріалах n- і p-Si, легованих елементами III і V груп до значних концентрацій. При цьому передбачалось розширення кола інформативних методик досліджень цих центрів.

Покажемо на прикладі наших експериментальних даних, отриманих на різних етапах досліджень цієї проблеми, причому, з використанням комплексу незалежних методик (ефекту Холла, ЕПР, низькотемпературної фотолюмінесценції та ін.), як нам вдалося однозначно встановити роль легуючої домішки бору у формуванні ТД-центрів і відповідних їм парамагнітних центрів.

При дослідженні процесів утворення ТД- та парамагнітних центрів в кисневмісних компенсованих кристалах p-Si(B) [6] (в експерименті використані два кристали, леговані бором, з різним ступенем компенсації домішкою фосфору: 1 –  $N_B = 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_P = 2 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ; 2 –  $N_B = 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_P = 2,5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) при 450°C було виявлено, що в процесі відпалів 1 - 250 год в зразках утворюються ТД-центри та парамагнітні центри типу NL8, NL9. Вперше такі парамагнітні центри спостерігали в [7] при відпалах кисневмісного p-Si(B). Те, що центри NL8 спостерігалися тільки в матеріалі Si p-типу, наводило на думку про певну роль легуючої домішки бору у їх утворенні під час відпалів або у прояві їх в спектрах ЕПР. Подальші наші роботи, а також роботи інших авторів, по дослідженню цих центрів, дозволили ідентифікувати центри NL8 як дво зарядні ТД-центри в однократно іонізованому стані (ТД)<sup>+</sup>. Спостереження одного і того ж спектра NL8 у вихідних кристалах p-Si(B) (в умовах перекомпенсації в n-тип за рахунок термодонорів)[6,7], а також у відпалених кристалах n-Si(P) (при опроміненні електронами або  $\gamma$ -квантами, що приводило до утворення А-центрів – акцепторних центрів кисневої природи), які містять акцептори різного роду, на нашу думку, є прямим доказом того, що акцептор, як і вважали в [6,9], до складу ТД-центрів не входить. А їх роль зводиться лише до участі в процесах зміни зарядового стану дво зарядних ТД-центрів [(ТД)<sup>0</sup> → (ТД)<sup>+</sup>] і, навпаки, (ТД)<sup>+</sup> → (ТД)<sup>0</sup>].

Не вдаючись до детального опису кінетик накопичення ТД-центрів та парамагнітних центрів в p-Si(B) під час відпалів (вони ґрунтовно представлені в [1,6]), звернемо лише увагу на два цікаві факти, отримані в цих експериментах, які вдалося пояснити через прояв впливу легуючої домішки бору (В):

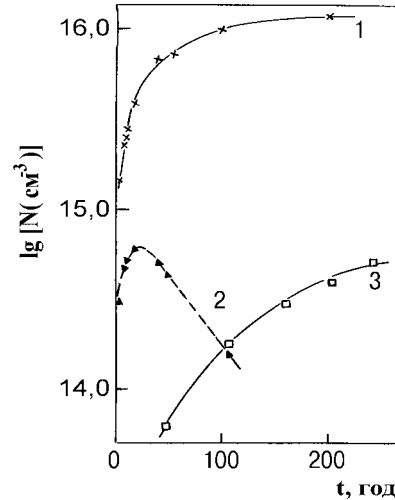
1) кінетика накопичення центрів NL8 при відпалах при 450°C представляє залежність  $N_{\text{ЕПР}} = f(t)$  (t – час відпалу) з максимумом і наступним спадом;

2) відновлення ЕПР-активності атомів фосфору в зразках при відпалах тривалістю 40 - 250 годин.

Кінетики накопичення ТД- і парамагнітних центрів NL8 та кінетика відновлення ЕПР-активності фосфору при відпалах зразків із кристала 2 представлені на рис.1.

Слід зазначити, що у вихідних зразках p-Si(B) ніяких ліній ЕПР, зв'язаних з домішками та

дефектами не виявлено (бор в звичайних умовах не проявляє себе в спектрах ЕПР, а домішка фосфору знаходиться в іонізованому стані за умови  $N_P < N_B$ ). Наявність атомів фосфору у вихідних зразках визначається лише при освітленні міжзонним світлом при T = 30 - 40К. З відпалом різної тривалості при



**Рис. 1.** Утворення електрично активних центрів в процесі відпалу кисневмісних кристалів p-Si(B) при 450 °С (кристал 2): 1 – сумарна кінетика накопичення центрів ТД-I усіх типів; 2 – кінетика накопичення центрів NL8 – (ТД-I)<sup>+</sup>; 3 – кінетика відновлення ЕПР-активності фосфору.

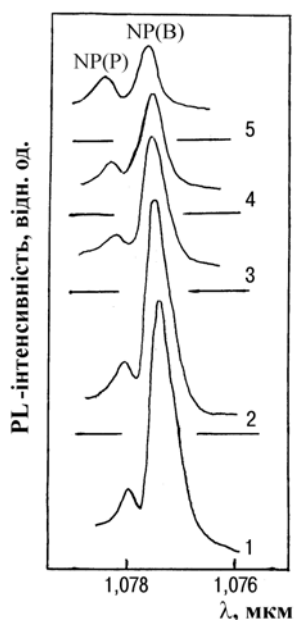
450°C спектри ЕПР зразків змінюються. Починаючи з t > 20 год спектр ЕПР від атомів фосфору зростає і при t ≈ 200 год досягає максимального значення, що відповідає вмісту його в кристалі (крива 3, рис.1). При цьому, як показують дослідження спектрів ЕПР в зразках без освітлення та з освітленням, кількість атомів фосфору в процесі відпалу не змінюється, а лише змінюється зарядовий стан їх (відбувається процес деіонізації атомів фосфору).

Таку поведінку ЕПР-спектрів фосфору при відпалах зразків можна було пояснити або появою в зразках "мільких" ТД (МТД) з енергією термічної іонізації  $E_{\text{МТД}} < E_P$ , або переходом атомів бору в якийсь інший стан з втратою акцепторних властивостей. Дослідження спектрів ЕПР з використанням освітлення зразка міжзонним світлом при низьких температурах (T < 30К) та вимірювання температурних залежностей  $n_c(T)$  з використанням ефекта Холла та фото-Холла на відпалених зразках показали, що МТД –центри в них не утворюються. Отже залишалось єдине припущення для пояснення зміни зарядового стану фосфору – домішка бору переходить в інший стан з втратою акцепторних властивостей. Але з використанням лише двох методик – ефекту Холла та ЕПР однозначно визначити в який саме стан переходять атоми бору і яка їх кількість знаходиться в тому чи іншому стані після відпалу певної тривалості, було неможливо.

Остаточне підтвердження цього припущення ми отримали в більш пізніх експериментах при

залученні для дослідження відпалених зразків додаткового незалежного методу (поряд з попередніми методами) – низькотемпературної фотолюмінесценції. Цей метод базується на існуванні в кристалі екситонно-домішкових комплексів, що представляють зв'язані стани екситона з мілкою нейтральною чи іонізованою донорною або акцепторною домішкою. При рекомбінації електронів і дірок в таких комплексах в спектрах виникають вузькі лінії люмінесценції. Використовуючи методику, розроблену в [10,11], для визначення як якісного, так і кількісного стану основних легуючих домішок у відпалених зразках р-Si(B), нам вдалося по зміні спектрів люмінесценції відслідкувати зміни стану домішок бору та фосфору в залежності від тривалості відпалу зразків при 450°C.

На рис.2 показані спектри фотолюмінесценції зв'язаних екситонів в безфононній області для зразків із кристалу 1 для різних тривалостей відпалів



**Рис. 2.** Спектри люмінесценції зразка із кристалу 1, що пройшов відпалі різної тривалості: 1 – без відпалу; 2-5 – після відпалу протягом 8 ; 22 ; 48 ; 83 годин, відповідно.

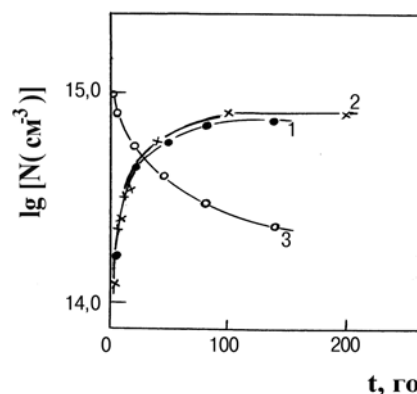
при 450°C [12,13]. Зазначимо, що визначаючи концентрацію бору і фосфору за методикою [11], використовуючи експериментальні дані (рис.2, наприклад), ми фактично визначаємо лише ту частку атомів домішок, які знаходяться у вузельному положенні ґратки Si. Решта атомів (наприклад, бору), які увійшли до складу будь-яких комплексів, не дають вклад в спектр фотолюмінесценції і не можуть контролюватись цим методом. Тому зміни спектрів NP(P) та NP(B) з відпалом відображають лише зміни положення атомів в ґратці, а не є підтвердженням зміни вмісту їх у кристалі.

Отримані зміни вмісту вузлового бору (в електрично активному і неактивному станах) при відпалах в зразках із кристалу 1 виходячи з аналізу

змін інтенсивностей люмінесцентних смуг рис.2, представлені кривими 1 і 3 рис.3. Крива 1 відображає кінетику переходу атомів бору в електрично неактивний стан (з втратою ними акцепторних властивостей), в той час як крива 3 представляє зміну вмісту акцепторної домішки бору в електрично активному стані з відпалом.

Виходячи з цього результату, легко якісно пояснити поведінку кінетики накопичення парамагнітних центрів NL8 (крива 2 рис.1), зокрема, перехід її через максимум при  $T \approx 20$  год і подальший спад цієї залежності. Якщо, дійсно, при переході атомів бору в інший стан втрачаються їх акцепторні властивості, то цей процес буде супроводжуватись перезарядкою (деіонізацією) двохзарядних ТД-центрів  $[(ТД)^+ \rightarrow (ТД)^0]$ , що і проявляється у вигляді спаду в залежності  $N_{EPR} = f(T)$  (рис.1, крив.2).

Щоб остаточно підтвердити справедливості цього пояснення необхідно було показати, що двохзарядні



**Рис. 3.** Кінетика накопичення ГТД (крива 2). Кількість атомів  $N_B$ , що перейшли в електрично неактивний стан (крива 1) та зміна вмісту акцепторної домішки бору в електрично активному (акцепторному) стані (крива 3). (Кристал 1).

ТД-центри при цих відпалах не руйнуються або не перебудовуються в інші. З цією метою були піддані опроміненню  $\gamma$ -квантами відпалені зразки (тривалість відпалів 150 ÷ 250 год), на яких практично не спостерігались спектри NL8, тобто ТД-центри в стані  $(ТД)^+$ . Після їх опромінення (деталі експерименту не приводимо), що приводило до утворення в зразках А-центрів – глибоких акцепторних центрів кисневої природи, в ЕПР знову з'явилися спектри NL8, що свідчить про те, що двохзарядні ТД-центри не руйнуються. В цьому випадку їх перезарядка до стану  $(ТД)^+$  відбувається за рахунок акцепторів іншого роду – А-центрів.

Порівняння кінетики випадіння атомів бору в електрично неактивний стан (крив.1 рис.3) з кінетикою накопичення ГТД-центрів з енергією термічної іонізації  $E_{ГТД} \approx 0,2$  eВ (крива 2, рис.3) приводить нас до висновку, що кожен атом бору, який втрачає акцепторні властивості, виступає в ролі складової частини нового кисневого ТД-комплексу, що являється однозарядним ТД-центром. При цьому

цілком можливо, що реалізується одна із ранніх моделей однозарядного ТД-центра, запропонована в [14].

Таким чином, застосування комплексу незалежних взаємодоповнюючих методик (ефекту Холла, ЕПР та низькотемпературної фотолюмінесценції) дозволило однозначно встановити, що при відпалах кисневмісних кристалів р-Si(B) при 450°C домішка бору (на відміну від домішки фосфору) може втрачати свої електричні (акцепторні) властивості, входячи при цьому до складу кисневого донорного комплексу з енергією термічної іонізації  $E_{ГД} \approx 0,2$  еВ.

Особливої уваги заслуговують результати досліджень процесів дифузії кисню та міждефектної (міждомішкової) взаємодії і їх впливу на формування властивостей кисневмісних кристалів Si під час відпалів при наявності в кристалах ізовалентних фонових (C) та легуючих (Ge, Sn) домішок.

В ґратці Si атоми ізовалентних домішок (ІВД) C, Ge, Sn займають вузлове положення, відаючи по 4 електрони на створення ковалентних зв'язків з 4-ма сусідніми атомами Si. В такому стані атоми ІВД є електрично неактивними і не створюють в забороненій зоні Si додаткових енергетичних рівнів. І, крім того, легування ними кристалів Si аж до концентрацій  $\approx 2 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup> не приводить до помітних змін в рухливості носіїв в них, порівняно з кристалами Si, які не містять ІВД. Але, виявляється, що наявність ІВД в кристалах Si в концентраціях  $5 \times 10^{16} \leq [C] \leq 8 \times 10^{17}$  см<sup>-3</sup> та  $1 \times 10^{18} \leq [Ge; Sn] \leq 2 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup> приводить до кардинальних змін у процесах дефектоутворення при відпалах кисневмісних кристалів Si в області температур 400 ÷ 800°C. Зокрема, в експериментальних дослідженнях процесів утворення ТД-I (відпали при 350 ≤ T ≤ 600°C) та ТД-II (відпали при 600 ≤ T ≤ 800°C) прослідковано основні закономірності такого впливу ІВД на утворення термодефектів і, відповідно, на властивості Si [15-20] і показано, що:

ІВД вуглецю гальмує процеси утворення ТД-I і сприяє утворенню ТД-II;

ІВД германію та олова гальмують як процеси утворення ТД-I, так і ТД-II, незважаючи на наявність прискореної низькотемпературної (в області 300 ÷ 500°C) дифузії атомів кисню в ближньому до атомів Ge та Sn оточенні ;

Атоми C приймають участь у міждомішкочій взаємодії, зокрема, утворюючи C-O комплекси, в той час як утворення комплексів кисню з домішками Ge та Sn не виявлено;

Наявність в кристалі кремнію ІВД не впливає на енергії термічної іонізації двохзарядних ТД-I, але впливає на спектр (набір) рівнів ТД-II [21].

Необхідно було знайти пояснення видимому протиріччю між існуванням низькотемпературної прискореної дифузії кисню в кристалах Si при наявності ІВД Ge (або Sn) та сповільненням процесів утворення ТД-I та ТД-II центрів.

Незважаючи на те, що домішки C та Ge (або Sn)

ніби викликають однаковий ефект при відпалах кисневмісного Si, а саме, гальмують процеси утворення ТД-I, природа впливу цих ІВД на дефектоутворення різна. Домішки C та Ge (або Sn), знаходячись у вузлах ґратки Si, є електрично нейтральними. Але, маючи ковалентні радіуси атомів відмінними від ковалентного радіуса атома Si

( $R_C=0,77 \text{ \AA}$ ;  $R_{Si}=1,17 \text{ \AA}$ ,  $R_{Ge}=1,22 \text{ \AA}$ ;  $R_{Sn}=1,40 \text{ \AA}$ ), вони створюють в ґратці мікронапруження поблизу їх розташування. Причому, навколо атома C виникає напруження розтягу, а навколо атома Ge (або Sn) – напруження стиску. З цієї причини місця розташування атомів C виступають в ролі стоків для міжвузлових атомів кисню ( $O_I$ ) та кремнію ( $Si_I$ ), що приводить до утворення C-O комплексів, а також випадіння міжвузлових атомів  $Si_I$  у вузловий стан  $Si_S$ , заміщуючи при цьому атоми  $C_S$ . З утворенням C-O комплексів деяка частка міжвузлового кисню випадає з процесів преципітації при відпалах. Крім того, процес гальмування утворення ТД-I можливо пояснити лише за умови, якщо прийняти за основну модель ТД-I таку модель, в якій основним будівельним матеріалом комплексу ТД-I є міжвузлові атоми  $Si_I$ , що з'являються в ґратці Si при преципітації кисню як результат об'єднання в комплекс двох атомів  $O_I$  [22]. Такий процес переходу  $Si_I$  у вузловий стан  $Si_S$  також приводить до сповільнення процесів утворення ТД-I.

Домішки Ge (або Sn), створюючи локальні напруги в матриці Si того ж знаку, що і преципітати кисню, заважають розпаду пересиченого твердого розчину кисню, приводячи до гальмування процесів преципітації і, відповідно, до сповільнення процесів утворення зародків ТД-I та формування ТД-II, пов'язаних з преципітатами. На нашу думку, основна причина гальмування процесів утворення ТД-I (а також ТД-II) при наявності цих домішок в кристалі визначається впливом локальних пружних полів на генерацію і анігіляцію первинних мікродофектів – вакансій та міжвузлових атомів  $Si_I$ . Наявність локальних напруг стиску навколо атомів Ge (та Sn) не сприяє утворенню включень (преципітатів) з більшим, ніж у матриці питомим об'ємом [16], що є основним джерелом генерування міжвузлових атомів  $Si_I$  [23]. Тобто, процес генерації міжвузлових атомів  $Si_I$  в присутності ІВД Ge (або Sn) сповільнюється. З другого боку, згідно [15], поля локальних напруг на відстані від атомів ІВД Ge (або Sn) приводять до генерації "вільних" вакансій, котрі сприяють анігіляції тих міжвузлових атомів  $Si_I$ , які виникли в кристалі при утворенні  $SiO_2$  – фази.

Незважаючи на різні фізичні механізми, якими визначається гальмування процесів утворення ТД-I при наявності в кристалі Si ІВД вуглецю чи германію, спостерігається і деяка схожість їх впливу на ці процеси, яка проявляється в тому, що вони виступають як анігілятори власних міжвузлових атомів  $Si_I$ .

Приведені в огляді результати досліджень ролі легуючих та фонових домішок в кисневмісних кристалах Si вказують на широкі можливості, які

з'являються при формуванні нових властивостей кисневмісних слабологованих кристалів з використанням термовідпалів, що частково проаналізовано в [24]. Відпали,  $\gamma$ - та електронне опромінення, пластична деформація, легування

певними домішками (включаючи і ізовалентні) кристалів Si дозволяють модифікувати їх електрофізичні і структурні властивості в широких межах.

**В.М. Бабич** – доктор фіз.-мат. наук, професор, завідувач відділом ІФН НАН України;

**Ю.П. Доценко** – кандидат фізико-математичних наук, начальник департаменту інновацій і трансферних технологій Міністерства освіти і науки України;

**Л.А. Міщенко** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій;

**М.Я. Скороход** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник ІФН НАН України.

- [1] В.М. Бабич, Н.И. Блецкан, Е.Ф. Венгер. *Кислород в монокристаллах кремния*. Интерпрес ЛТД, К. – 240 с. (1997).
- [2] C.S. Fuller, F.H. Doleiden. Interaction between oxygen and acceptor elements in silicon // *J. Appl. Phys.* **29**(8), pp. 1264-1265 (1958).
- [3] В.В. Батавин, З.А. Сальник. Влияние акцепторов на генерацию термодоноров в кремнии, содержащем кислород // *Электр. техн., Сер. Материалы.* **5**(172), сс. 42-45 (1980).
- [4] A.R. Bean, R.C. Newman. The effect of carbon on thermal donor formation in heat treated pulled silicon crystals // *J. Phys. Chem. Solids.*, **33**(2), pp. 255-268 (1972).
- [5] J.W. Cleland. Heat-Treatment Studies of Oxygen – Defect-Impurity Interactions in Silicon // *J. Electrochem. Soc.*, **129**(9), pp. 2127-2132 (1982).
- [6] P.I. Baranskii, V.M. Babich, N.P. Baran et. all. The Effect of Heat Treatment on Compensated Cz-Silicon // *Phys. Stat. sol. (a)*, **82**(2), pp. 533-536 (1984).
- [7] S.H. Muller, M. Sprenger, E.C. Sieverts, C.A.J. Ammerlaan. EPR Spectra of Heat-Treatment Centers in Oxygen-Rich Silicon // *Solid State Commun.*, **25**(12), pp. 987-990 (1978).
- [8] В.М. Бабич, Н.П. Баран, А.А. Бугай и др. Исследование свойств термодоноров-I в кремнии n-типа при электронном облучении // *ФТП*, **20**(11), сс. 2117-2119 (1986).
- [9] B. Pajot, J. von Bardeleben. Oxygen Associated Point Defects and Thermal Donors in Silicon in *Proceedings of 13-th Intern. Conf. on Defects in Semiconductors*, Eds. L.C.Kimerling and J.M.Parsey, pp. 685-691, The Metallurgical Society of AIME, Warendale, PA (1985).
- [10] А.С. Каминский, Я.Е. Покровский. Рекомбинационное излучение конденсированной фазы неравновесных носителей заряда в кремнии // *Письма в ЖЭТФ*, **11**(8), сс. 381-384 (1970).
- [11] M. Tagima. Determination of boron and phosphorus concentration in silicon by photoluminescence analysis // *Appl. Phys. Lett.*, **32**(11), pp.719-721 (1978).
- [12] V.M. Babich, N.P. Baran, V.L. Kiritsa et all. On the nature of deep donors created at 450 °C in boron doped p-Si // *Phys. stat. sol.(a)*. **157**(2), pp. 405-410 (1996).
- [13] В.М. Бабич, М.Я. Валах, В.Л. Кирица, Г.Ю. Рудько. Влияние легирующей примеси бора на процессы образования термодоноров при 450 °C в кислородсодержащих кристаллах кремния // *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*, **31**, сс. 69-73 (1996).
- [14] J.P. Suchet. Sur le role de l'oxygen dans les cristaux de silicium // *J.Chim.Phys.*, **58**(3), pp. 455-463 (1961).
- [15] М.Г. Мильвидский, Н.С. Рытова, Е.В. Соловьева. Влияние упругой деформации, создаваемой примесями, на концентрацию и поведение собственных точечных дефектов в полупроводниках // *Проблемы кристаллографии: К 100-летию со дня рождения акад. А.В. Шубникова.*, сс. 215-232 (1987).
- [16] Ю.М. Бабицкий, Н.И. Горбачева, П.М. Гринштейн и др. Генерация термодоноров в кремнии, легированном германием // *ФТП*, **18**(7), сс. 1309-1311 (1984).
- [17] М.Я. Дашевский, С.Г. Лымарь, А.А. Докучаева и др. Влияние германия на поведение кислорода в кремнии // *Изв. АН СССР, Неорг. материалы.*, **21**(11), сс. 1827-1830 (1985).
- [18] М.Я. Дашевский, А.А. Докучаева, Д.Н. Корляков. Электрические параметры кремния, легированного германием, после термической обработки при 720К // *Изв.АН СССР, Неорг.материалы.*, **24**(9), сс. 1413-1418 (1988).
- [19] В.М. Бабич, Н.П. Баран, Н.И. Блецкан. Особенности образования термодоноров-II в кристаллах кремния, легированных германием // *Укр. физ. журн.*, **34**(5), сс. 730-735 (1989).
- [20] В.М. Бабич, Н.П. Баран, К.И. Зотов и др. Низкотемпературная диффузия кислорода и образование термодоноров в кремнии, легированном изовалентной примесью германия // *ФТП*, **29**(1), сс. 58-64 (1995).

- [21] В.М. Бабич, Н.П. Баран, В.Л. Кирица. Влияние изовалентных примесей углерода и германия на свойства кислородсодержащих кристаллов кремния // *Оптоэлектроника и полупр. техника*, **29**, сс. 94-100 (1995).
- [22] J. Lerouelle. Influence of carbon on oxygen behaviour in silicon // *Phys.stat.sol.(a)*, **67**(1), pp. 177-181 (1981).
- [23] В.Л. Кирица. Роль процесів дифузії та міждефектної взаємодії у формуванні властивостей кристалів кремнію // Дисерт. канд. фіз.-мат. наук. - К. 141 с. (1997).
- [24] В.М. Бабич, П.І. Баранський, Ю.П. Доценко. Роль термодонорів в кристалах Si з підвищеним вмістом домішки кисню у формуванні їх електрофізичних властивостей // *Укр. фіз. журнал*, **45**(3), сс. 313-317 (2000).

V.M. Babich, Yu.P. Dotsenko, L.A. Mischenko<sup>1</sup>, M.Ya. Skorokhod

## **A role of Doping and Residual Impurities in The Formation of Defect Structure and Electrophysical Properties of Oxygen-Containing Silicon Crystals**

*Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, 45 Nauka Ave., Kyiv, 03028, Ukraine*

<sup>1</sup>*State University of information and communication technology,  
Solomyanska str.7, Kyiv 03110, Ukraine*

On the basis of examination of experimental results received by us with the help of different methods (electrophysical, electron paramagnetic resonance, low temperature photoluminescence and so on) and also those obtained by other authors, an analysis was made of the effect of doping and residual impurities on the processes of defect formation in oxygen-containing silicon crystals. Attention is drawn to the fact that at the early stages of oxygen precipitation (annealings at 450°C) the B doping impurity loses its acceptor properties and interacts with substitutional oxygen thus forming electrically active donor complexes.

It is also are considered peculiarities of the effect of isovalent impurities carbon and germanium (or tin) in annealed oxygen-containing crystals on the formation of electrically active thermal donors of oxygen nature and also on the formation of new properties of silicon material. In particular, there were found the same and different features in the behaviour of carbon in germanium when they interact with substitutional oxygen. Model ideas about interimpurity interaction in oxygen-containing silicon crystals are discussed.