

С.І. Будзуляк

Тензорезистивні ефекти в сильно деформованих кристалах n-Si та n-Ge

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова, пр. Науки, 41, 03028, м. Київ

Встановлено, що поряд із класичними механізмами перерозподілу електронів між долинами існують додаткові механізми, які пов'язані з радикальною перебудовою зони провідності за рахунок деформаційно-індукованого збільшення ефективної маси електрона. Для сильно легованих кристалів кремнію за умови досягнення переходу метал-ізолятор отримана залежність ефективної маси електрона від одновісного тиску, що знаходиться в повній відповідності з теоретичними розрахунками, а також з експериментальними даними. З'ясовані особливості ударної іонізації станів мілких домішок на ізоляторній стороні деформаційно-індукованого переходу метал-ізолятор для сильно легованих кристалів кремнію й германію n-типу провідності. Виявлено особливості електрофізичних властивостей нейтронно-легованих кристалів кремнію, зумовлених наявністю високотемпературних технологічних термодонорів.

Ключові слова: тензорезистивний ефект, кремній, германій, перехід метал-ізолятор, критична концентрація, нейтронне легування властивості, ефективна маса, термодонори, одновісний тиск.

Стаття постуила до редакції 03.10.2011; прийнята до друку 15.12.2011.

Вступ

Встановлення реальних механізмів ефектів у сильно деформованих кристалах дає можливість не тільки пояснити відповідні закономірності фізичних явищ, які вивчаються, але й передбачити можливість реалізації нових ефектів, що не пов'язані з класичними механізмами тензорезистивних явищ, характерних для області слабких напрямлених тисків [1-3]. Так незначна лінійна зміна величини ефективної маси електрона ($\leq 1\%$) в чистих кристалах кремнію, деформованих у напрямку [111] (в області тисків $0 < X < 0.25$ ГПа), виміряна методом циклотронного резонансу, виключала можливість реалізації в умовах експериментально визначеної реальної міцності монокристалічного кремнію, деформаційно-індукованого переходу метал-діелектрик. При більш високих тисках (3 – 6 ГПа) був реалізований перехід метал-ізолятор (MI) у вироджених кристалах кремнію з концентраціями мілких домішок (P, Sb, As), які суттєво перевищували відповідні значення їх критичних концентрацій переходу MI. У цьому випадку необхідно було визначити закономірності зростання ефективної маси електрона в області сильних напрямлених тисків, і підтвердити або спростувати запропонований механізм пояснення експериментально реалізованого деформаційно-індукованого переходу метал-діелектрик у вироджених кристалах кремнію, зумовленого, як вважалося, збільшенням величини

поперечної компоненти ефективної маси електрона.

Встановлення механізму тензорезистивних ефектів у невироджених кристалах n-Ge, легованих мілкими донорами, який зумовлений L_1 - Δ_1 -інверсією типу абсолютного мінімуму зони провідності в області сильних одновісних тисків $X \parallel [001]$ ($X > 2.1$ ГПа), дозволило експериментально реалізувати у вироджених кристалах n-Ge(Sb) деформаційно-індукований перехід метал-діелектрик. Даний механізм переходу метал-ізолятор пов'язаний зі збільшенням ефективної маси електрона внаслідок зміни симетрії і параметрів абсолютного мінімуму C -зони [4].

З практичної точки зору актуальність запланованих і проведених у процесі виконання дисертаційної роботи досліджень визначається тим, що вивчення закономірностей і механізмів тензорезистивних ефектів у сильно деформованих кристалах дозволяє встановити природу дефектів, зокрема в нейтронно легованому (НЛ) кремнії, вплив наявності різних дефектів на електрофізичні властивості кристалів, запропонувати рекомендації щодо вдосконалення технології нейтронного легування з точки зору зменшення дефектності кристалічної структури НЛ n-Si(P), який широко застосовується у виробництві потужних високовольтних приладів.

В свою чергу практичне значення досліджень деформаційно-індукованого переходу метал-діелектрик полягає в розробці нових сенсорів тиску

та температури, а також є важливими з точки зору застосування напружених напівпровідників в сучасній мікроелектроніці, зокрема для виготовлення швидкодіючих транзисторів.

Нами розглянуто закономірності деформаційно-індукованих переходів метал-ізолятор (МІ) в n-Si(P) і n-Ge(Sb) та методи ідентифікації механізмів тензорезистивних ефектів (ТРЕ). Зокрема проведено аналіз експериментальних даних, одержаних при вимірах ТРЕ в області сильних напрямлених тисків, і визначено вирішальні переваги порівняно з методом слабких тисків з точки зору можливості ідентифікації механізмів досліджуваних ефектів. Обґрунтовано можливість використання методу визначення константи деформаційного потенціалу в багатодолінних напівпровідниках у якості чутливого методу визначення механізмів ТР ефектів в області сильних напрямлених тисків.

I. Отримані результати, їх теоретичне та експериментальне обґрунтування

Тензорезистивний ефект, спостережуваний для кристалів n-Ge та n-Si для напрямку найбільшої тензочутливості ($\mathbf{X} \parallel [111] \parallel \mathbf{E}$ в n-Ge і $\mathbf{X} \parallel [100] \parallel \mathbf{E}$ в n-Si), пояснюється для області малих тисків класичним механізмом перерозподілу електронів між еквівалентними мінімумами зони провідності (механізм Сміта-Херрінга) [5]. Представлені на рис. 1 дані вимірів поздовжнього ТРЕ в кристалах n-Si і n-Ge зі змішаним типом розсіювання (акустичне розсіювання, міждолинне розсіювання f -типу, розсіювання на іонізованих домішках), одержані в області напрямлених тисків ($0 \div 1.6$ ГПа), демонструють відсутність якісної різниці у вимірних залежностях $r_X = f(X)$ для n-Ge і n-Si в області малих тисків ($X < 0.05$ ГПа) при різних температурах.

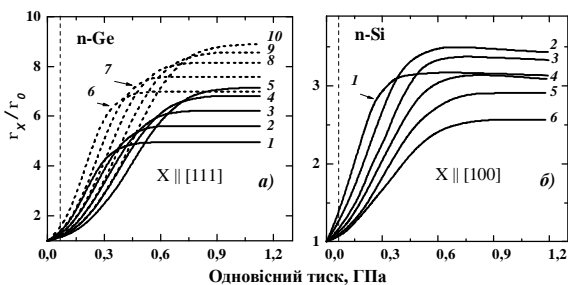


Рис. 1. Залежності ТРЕ для кристалів германію і кремнію при фіксованих температурах та різних концентраціях легуючої домішки:

а) n-Ge: T (К): 1, 6 – 78 К, 2, 7 – 98 К, 3, 8 – 118 К, 4, 9 – 138 К, 5, 10 – 158 К. N_{Sb} (см⁻³): 2.7×10^{15} – пунктир, 1.0×10^{16} – суцільна;

б) n-Si: T (К): 1 – 78 К, 2 – 118 К, 3 – 158 К, 4 – 198 К, 5 – 238 К, 6 – 300 К. N_P (см⁻³): 3.2×10^{15} .

Тому на основі аналізу даних вимірів тензорезистивних ефектів, одержаних в області малих тисків, неможливо коректно визначити як

домінуючі, так і додаткові до домінуючих механізми ТРЕ в напівпровідниках, які вивчаються. Навпаки, дані з досліджень поздовжнього ТРЕ, отримані в області сильних напрямлених тисків ($X > 0.5$ ГПа) для кристалів кремнію та германію з помітним внеском розсіювання як на акустичних фонах, так і на іонізованих домішках, показують якісно різні закономірності зміни в залежностях ТРЕ, вимірних при різних температурах (рис. 1). Враховуючи, що за умов домінуючого внеску в ТР ефекти механізму міждолинного перерозподілу параметр анізотропії рухливості K повинен визначатися з даних вимірів поздовжнього ТРЕ, одержаних у широкій області одновісних тисків, зорієнтованих для n-Ge в напрямку [111], а для n-Si – в напрямку [100]:

$$K = \frac{3 r_{\infty}}{2 r_0} - \frac{1}{2} \quad (1)$$

(де r_0 , r_{∞} – питомий опір кристалу у відсутності тиску та при виході на насичення під дією одновісного тиску, відповідно) співставлення відповідних залежностей $r_X/r_0 = f(X)$, які одержані, наприклад, для кристалів зі змішаним типом розсіювання на акустичних фонах та іонах домішок (рис. 1, а, б, область тисків $X > 0.5$ ГПа) дає можливість виявити механізми ТРЕ, які зумовлюють зростання величини r_X/r_0 зі збільшенням температури, що пов'язано як в n-Ge (криві 1 – 5 та 6 – 10, рис. 1, а), так і в n-Si (криві 1 – 3, рис. 1, б) зі зростанням внеску акустичного розсіювання. Однак, у кристалах n-Si зі змішаним типом розсіювання (акустичні фонони, міждолинне розсіювання, іони домішки), при зростанні температури в області $T > 150$ К навпаки спостерігається зменшення величини ТР ефекту в області сильних тисків (область насичення r_X/r_0), що пов'язано зі зменшенням внеску f -переходів у міждолинне розсіювання із збільшенням тиску (зростає рухливість електронів, що зумовлює зменшення величини r_X/r_0 із зростанням X (рис. 1, б, криві 4 – 6). Отже, аналіз закономірностей $r_X/r_0 = f(X)$, вимірних у широкій області одновісних тисків, дозволяє встановити механізми тензорезистивних ефектів для широкого діапазону зміни концентрацій домішок, температури, електричних полів, доз γ -опромінення тощо. Зокрема, на основі співставлення температурних залежностей питомого опору у чистому n-кремнії при $\mathbf{X} \parallel [100]$ було встановлено домінуючий внесок у міждолинне розсіювання f -переходами електронів, оскільки внаслідок наявності значного енергетичного розщеплення між Δ_1 -долинами, розташованими на взаємно перпендикулярних осях {100} ($d\epsilon(X) \gg kT$), при високих одновісних тисках f -переходами електронів можна знехтувати.

У невідроджених зразках кремнію та германію (для домінуючого внеску в ТР ефекти класичного механізму міждолинного перерозподілу) при $T = 78$ К були отримані лінійні залежності $\ln(n_2/n_1) = f(X)$ (рис. 2), визначені на основі даних вимірів поздовжнього ТРЕ, одержаних для широкого діапазону тисків, нахил яких і визначав величину

константи деформаційного потенціалу X_{ii} . Як показують виміри поздовжнього ТРЕ в n-Ge, механізм міждолинного перерозподілу електронів між еквівалентними L_1 -долинами є домінуючим механізмом в широкому діапазоні тисків, концентрацій домішок і температури. Виявилось, однак, що для n-кремнію даний механізм ТР ефектів, зумовлений винятково перерозподілом між еквівалентними Δ_1 -долинами, визначає закономірності явищ транспорту в сильно деформованих кристалах тільки для вузького температурного діапазону (78 ÷ 120) К і концентрацій мілких донорів ($N_d < 10^{14}$) см⁻³. Так, підвищення температури, внаслідок наявності в n-Si залежності ймовірності f -переходів у міждолинному розсіюванні від тиску, призводить до відхилення від лінійності в залежностях $\ln(n_2/n_1) = f(X)$. При підвищенні рівня легування ($> 10^{14}$ см⁻³) додаткова (навіть незначна) іонізація рівнів мілких донорів також призводить до відхилення від лінійності в залежностях $\ln(n_2/n_1) = f(X)$, які аналізуються для $T = 78$ К, що свідчить про наявність додаткового механізму тензорезистивних ефектів, пов'язаного зі збільшенням концентрації вільних електронів і, як наслідок, зменшення опору в області сильних тисків.

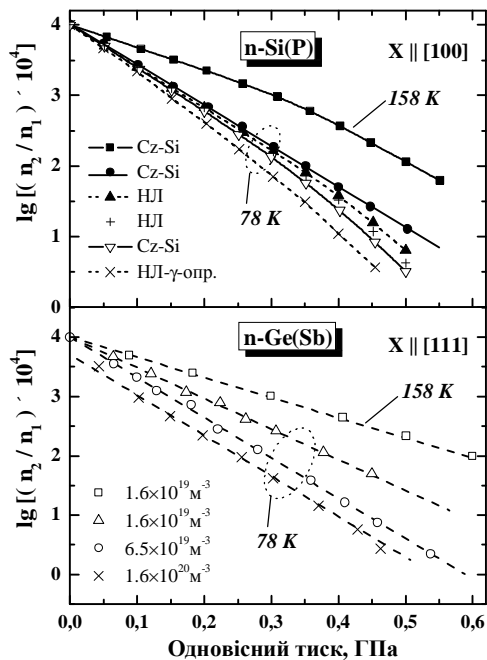


Рис. 2. Залежності $\ln(n_2/n_1) = f(X)$ для кристалів кремнію (легованих з розплаву (Cz-Si) і нейтронно легуваних (НЛ)) та германію.

Відхилення від лінійності залежностей $\ln(n_2/n_1) = f(X)$ спостерігається і для нейтронно легуваного кремнію, де наявність технологічних термодонорів і рівнів А-центрів в γ -опромінених кристалах (що було встановлено на основі аналізу температурних залежностей коефіцієнту Холла для нейтронно легуваних γ -опромінених кристалів кремнію) також призводить до появи додаткових механізмів, які визначають особливості закономірностей ТР ефектів у сильно деформованих кристалах. Одержані дані свідчать, що найбільш характерними

додатковими до міждолинного перерозподілу механізмами ТР ефектів є: 1) зростання концентрації вільних електронів у зоні провідності від тиску, яка визначається додатковою деформаційно-індукованою іонізацією при низьких температурах мілких донорів і термодонорів у кристалах n-Si(P), легуваних різними методами, а також суттєвою залежністю від тиску положення рівня А-центру в γ -опромінених кристалах; 2) залежність концентрації вільних електронів від тиску для компенсованих кристалів n-Si, легуваних мілкими донорами ($K > 0.3$); 3) залежність імовірності f -переходів від тиску, які повністю визначають міждолинне розсіювання в n-Si при $T > 120$ К і зумовлюють додатковий до класичного механізму ТР ефектів механізм зростання рухливості електронів зі збільшенням тиску.

Отже, визначення наявності додаткових до класичних механізмів ТР ефектів пояснює той факт, що лінійна залежність $\ln(n_2/n_1) = f(X)$ у широкому діапазоні тисків присутня тільки для чистих і слабо компенсованих ($K < 0.3$) кристалів кремнію, легуваних мілкими донорами під час вирощування ($N_d < 2 \times 10^{14}$), і лише для області температур 78 ÷ 120 К.

Незначні (< 1%) лінійні зміни ефективної маси електрона в кристалах кремнію, деформованих у напрямку [111], були виміряні методом циклотронного резонансу [1] при тисках, які не перевищували 0.25 ГПа. В роботі [2] повідомлялось про експериментальне підтвердження можливості реалізації переходу метал → ізолятор у n-Si(P) при напрямлених тисках до 5 ГПа ($X \parallel [111]$) за рахунок збільшення величини ефективної маси електрона, зумовленого зняттям виродження енергетичного спектру зони провідності кремнію на краю зони Бріллюена. Невідомо було, однак, як змінюється величина ефективної маси залежно від тиску та рівня легування кристалів, оскільки, як відомо, метод циклотронного резонансу непридатний для визначення величини ефективної маси носіїв заряду в сильно легуваних кристалах. Незважаючи на те, що деформаційно-індукований перехід метал → ізолятор зі збільшенням концентрації легуючої домішки помітно зміщується в область більш високих тисків, вдосконалення установки високих напрямлених тисків і методики експерименту дозволило реалізувати при $T = 4.2$ К і тисках до 6 ГПа перехід метал → ізолятор у кристалах n-Si, при концентраціях мілких домішок, які майже втричі перевищували величину відповідного значення критичної концентрації переходу МІ. Одержані дані з урахуванням збільшення в області переходу МІ опору вироджених кристалів n-Si зі зростанням напрямленого тиску на 5–10 порядків могли свідчити про наявність у залежностях ефективної маси від тиску членів більш високого порядку, ніж лінійна залежність $m_X/m_0 = f(X)$. З метою визначення закономірностей зміни ефективної маси електрона при збільшенні напрямленого тиску і при зміні концентрації домішки було використане співвідношення між провідністю кристалів і концентрацією електронів, знайдене теоретично для аналізу

переходу МІ в напівпровідниках: $S \cong S_M (n/n_c - 1)^g$ [3]. Враховуючи критерій Мотта ($n_c^{1/3} a_B \approx 0.25$) і те, що $a_B = h^2 c / m^* e^2$, було отримано вираз для зміни провідності кремнію, яка визначається зростанням ефективної маси електрона від тиску, припускаючи наявність не тільки лінійної складової такого зростання, але й квадратичної компоненти:

$$\frac{S_X}{S_0} = \left[\frac{A}{(\sqrt[3]{A/2 + BX + CX^2})^3} - 1 \right]^n \quad (2)$$

де $A = \frac{N_d}{N_c}$; X – тиск, B, C – підгоночні параметри, n – критична експонента.

Співставлення розрахунків зміни провідності за співвідношенням (2) і відповідних експериментальних даних дослідження переходу МІ в сильно деформованих у напрямку [111] кристалах n-Si(P) (рис. 3) дозволило зробити такі висновки. Збільшення концентрації легуючої домішки фосфору і відповідно – концентрації електронів у вироджених при $X=0$ кристалах суттєво зменшує внесок лінійної складової залежності ефективної маси електрона від тиску, що свідчить про наближення деформаційно-індукованої непараболічності Δ_1 -долин до непараболічності кейнівського типу зі зростанням хвильового вектора \mathbf{k} від мінімуму енергії в напрямку краю зони Брілюена. Непараболічність енергетичного спектру Δ_1 -зони також зростає зі збільшенням тиску $X \parallel [111]$, чим, зокрема, і пояснюється лінійність залежності $m^* = f(X)$, одержана в експериментах по циклотронному резонансу в області малих тисків. Максимальне узгодження розрахунків і експериментальних даних має місце для показника $\nu = 0.5$ в співвідношенні (2), який практично збігається з величиною $\nu = 0.48$, одержаною на основі

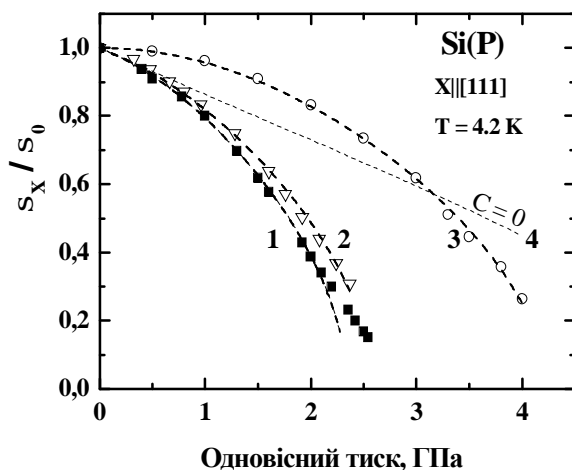


Рис. 3. Зміна провідності внаслідок дії одновісного тиску для кристалів n-Si(P) $\mathbf{n}, \nabla, \circ$ – експериментальні дані, пунктир – розрахункові дані. Крива 4 – розрахунок, без урахування квадратичного члена у співвідношенні (2). N_p (см³): $\mathbf{n} - 5.0 \times 10^{18}$; $\nabla - 5.3 \times 10^{18}$; $\circ - 9.0 \times 10^{18}$.

аналізу експериментальних даних із досліджень переходу ізолятор → метал в області температур $3 \div 35$ мК [4], тоді як значення $\nu = 0.5$ суттєво відрізняється від теоретично передбаченої величини $\nu = 1$ [4].

Співставлення експериментальних даних з розрахунками, виконаними за співвідношенням (2), дозволяє встановити закономірність зростання величини ефективної маси електрона від прикладеного тиску, яке зумовлює домінуючий механізм деформаційно-індукованого переходу МІ в n-Si(P) для випадку відсутності міждолинного перерозподілу електронів. На основі співставлення співвідношення (2) було встановлено що, найбільш точним є квадратичний закон зміни ефективної маси електрона від тиску, а не лінійний, як раніше було встановлено методом циклотронного резонансу для області малих напрямлених тисків ($X < 0.25$ ГПа).

При дослідженні електрофізичних властивостей сильно деформованих нейтронно легованих кристалів кремнію і кристалів n-Si, легованих фосфором під час вирощування і відпалених при високих температурах, встановлено, що дефектна структура кристалів, яка формується внаслідок опромінення кристалів повільними нейтронами і трансформації дефектів в процесі термообробок, визначає як положення енергетичних станів відповідних дефектів у забороненій зоні, так і анізотропію його залежності від напрямленого тиску відносно головних кристалографічних напрямків.

Отримані дані досліджень ТР ефектів демонструють наявність у нейтронно легованому γ -опромінену кремнії енергетичних рівнів, зумовлених радіаційними дефектами і дефектами технологічного походження, зміну їх енергетичного положення з тиском, що і визначає наявність додаткового до міждолинного перерозподілу електронів механізму тензорезистивного ефекту в нейтронно-легованому n-Si(P). Даний механізм зумовлений деформаційно-індукованою іонізацією енергетичних рівнів дефектів внаслідок їх наближення до зони провідності при збільшенні величини одновісного тиску.

Значний інтерес представляє вивчення механізмів ТРЕ у випадках, коли закономірності тензоефектів не зумовлені міждолинним перерозподілом носіїв заряду і спостерігаються в сильно легованих кристалах кремнію в області високих одновісних тисків. Як показали дослідження переходу метал-ізолятор в багатодолинних напівпровідниках, перехід від металевого до активаційного типу провідності відбувається за рахунок суттєвої зміни параметрів зони провідності, а саме – виникнення деформаційно-індукованої непараболічності Δ_1 -долин і збільшення внаслідок цього ефективної маси електрона в n-Si при орієнтації $X \parallel [111]$; збільшення величини ефективної маси електрона має місце також і в n-Ge в області сильних тисків $X \parallel [100]$ внаслідок L_1 - Δ_1 -інверсії типу абсолютного мінімуму зони провідності (рис. 4).

На відміну від класичного способу отримання переходу МІ за рахунок збільшення концентрації

легуючої домішки, зростання ступеня перекриття хвильових функцій домішок і делокалізації електронів (перехід ізолятор → метал), досліджено закономірності деформаційно-індукованого переходу від металевого типу провідності до активаційної провідності внаслідок зростання ефективної маси електрона в кремнії при $X \parallel [111]$. Деформаційно-індукована трансформація енергетичного спектру приводить до помітного збільшення ефективної маси електронів, зменшення внаслідок цього борівського радіуса та локалізації електрона на домішковому центрі (перехід метал → ізолятор).

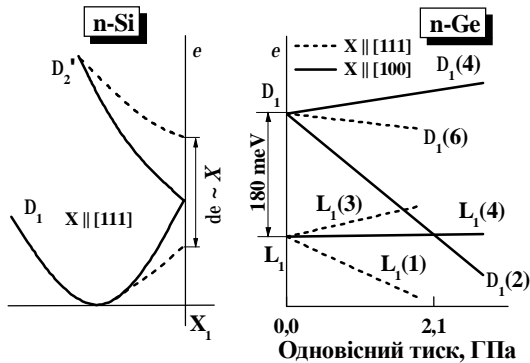


Рис. 4. Механізми деформаційно-індукованого переходу метал-діелектрик для n-Si та n-Ge.

Встановлено, що оскільки зазначені орієнтації одновісного тиску ($X \parallel [111]$ для n-Si і $X \parallel [100]$ для n-Ge) зумовлюють якісно різні закономірності перебудови зонної структури кремнію (деформаційно-індукована непараболічність Δ_1 -мінімумів, – рис. 4) і германію (L_1 - Δ_1 -інверсія типу абсолютного мінімуму С-зони) закономірності досліджених переходів метал → ізолятор у сильно деформованих кристалах n-Si і n-Ge суттєво відрізняються. Однак, оскільки в обох випадках відбувається збільшення ефективної маси електрона і локалізація його на домішковому центрі, спостерігаються і загальні особливості, а саме: поява і зростання з тиском енергії активації (e_2 -провідність), трансформація

лінійних ВАХ у S-подібні, зсув переходу МІ в область більш високих тисків з ростом рівня легування кристалів, перехід від слабкої локалізації електрона до сильної зі зростанням тиску.

Досліджували раніше закономірності ударної іонізації слабологованих ($\leq 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) напівпровідників, які при $T=4.2$ мали діелектричні властивості, визначили, що основними механізмами розсіювання електронів в умовах порівняно слабкого розігріву є розсіювання на іонах домішок і акустичних фонах. Закономірності залежності полів ударної іонізації від енергії активації узгоджувались з теоретичними розрахунками. Одним із завдань даної роботи було дослідження закономірностей ударної іонізації в умовах, коли при великих тисках стає можливим розігрів електронів і ударна іонізація на ізоляторному боці переходу МІ при низьких температурах в початково вироджених кристалах n-Ge і n-Si. У даному випадку можливо визначити домінуючий внесок механізму розсіювання на домішкових центрах і встановити відповідність одержаних даних висновкам теорії ефективної маси. Для цього були отримані залежності полів пробую від тиску (рис. 5), що визначаються процесом набору енергії вільними електронами, які беруть участь в процесі ударної іонізації мілко донора [6]. Залежності поля пробую від тиску були знайдені при аналізі ВАХ, виміряних при різних значеннях тиску.

Процес ударної іонізації локалізованого на воднеподібних домішках електрона на ізоляторній стороні переходу МІ визначається як нелінійним характером залежності $E_{np} = f(X)$ в сильно легованих кристалах n-Si(P), так і лінійним характером залежності поля пробую від тиску в сильно легованих кристалах n-Ge(Sb). Враховуючи, що лінійні залежності $E_{np} = f(e_a)$ мають місце для випадку набору іонізуючим електроном енергії $E_i \approx e_a$ без розсіювання (чисті кристали, низькі температури, енергії іонізації, не перевищуючі енергії оптичного фона), в сильно легованих кристалах лінійний характер функції $E_{np} = f(X)$ при ударній іонізації локалізованого електрона може визначитися такими причинами: а) малою відстанню між домішковими атомами, характерною для великого рівня легування; б) малим значенням енергії активації; (отримані значення енергій активації e_2 -провідності становлять $\approx (1 \div 3)$ меВ); в) порівняно високими значеннями рухливості вільних електронів у області e_2 -провідності; г) в ударній іонізації локалізованих станів можуть брати участь також вільні електрони зони провідності (незначна кількість яких знаходиться в С-зоні при $T=4.2$ К), оскільки, у загальному випадку, провідність на ізоляторній стороні переходу МІ визначається при низьких температурах співвідношенням:

$$S = S_1 \exp(-e_1/kT) + S_2 \exp(-e_2/kT) + S_3 \exp(-e_3/kT) \quad (3).$$

Нелінійний характер залежностей $E_{np} = f(X)$ має місце при врахуванні будь-якого виду розсіювання іонізуючого електрона в процесі набору необхідної для іонізації домішкового атома енергії. Встановлено, що експериментальні дані для

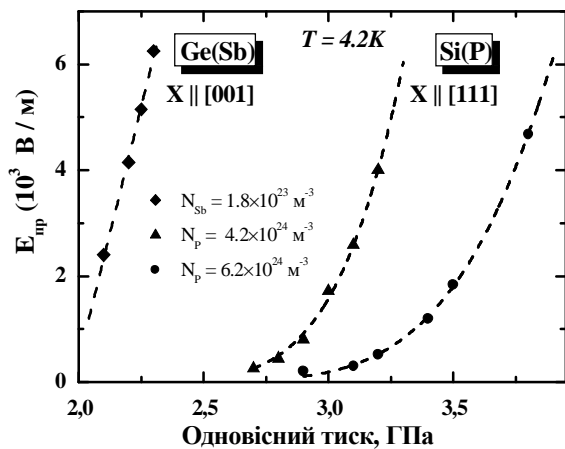


Рис. 5. Залежності поля пробую від одновісного тиску для кристалів кремнію та германію. \diamond - $N_{Sb} = 1.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; \blacktriangle - $N_p = 4.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; \bullet - $N_p = 6.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

величини критичних полів ударної іонізації, вимірюваних при різних значеннях одновісного тиску X , в області деформаційно-індукованого переходу метал-ізолятор добре описуються для різних значень концентрації легуючої домішки фосфору в кремнії, які перевищують величину критичної концентрації (криві 2, 3, рис. 5.) функцією:

$$E_{np} = E + a \cdot \exp\left(-\frac{b}{X^2}\right) \quad (4),$$

де a , b - підгоночні параметри, X - тиск.

Висновки

1. Встановлено, що трансформація енергетичного спектру зони провідності в сильно деформованих вироджених кристалах кремнію визначається зміною з тиском величини ефективної маси електрона.
2. Вперше експериментально досліджені механізми переходу метал-діелектрик у сильно деформованих вироджених кристалах n-Si(P), зумовлені зміною з тиском ефективної маси електронів, яка носить квадратичний характер.
3. Встановлено, що відсутність насичення опору для поздовжнього TPE в діапазоні високих

одновісних тисків ($\delta E \gg kT$) пов'язана з додатковою генерацією вільних електронів внаслідок зменшення енергії активації таких структурних дефектів кристалічної ґратки під дією одновісного тиску: а) донорної домішки фосфору, що утворилася внаслідок трансмутаційного легування; б) термодонорів II, які формуються в кристалах кремнію з високим вмістом кисню при високотемпературному відпалі; в) А-центрів, які з'являються в γ -опромінену кремнії і створюють у забороненій зоні глибокий акцепторний рівень.

4. Трансформація лінійних вольт-амперних характеристик у S-подібні при збільшенні величини одновісного тиску для сильно легуваних кристалів кремнію і германію пов'язується з переходом від металевого до активаційного типу провідності (ϵ_2 -провідність), що підтверджується залежностями енергії активації від одновісного тиску, отриманих з температурних залежностей питомого опору при фіксованих значеннях одновісного тиску.

Будзуляк С.І. – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник.

- [1] M.A. Paalanen, T.F. Rosenbaum, G.A. Thomas, and R.N. Bhatt. Stress tuning of the metal-insulator transition at millikelvin temperatures // *Phys. Rev. Lett.*, **48**(18), pp. 1284-1287 (1982).
- [2] S.I. Budzulyak, J.P. Dotsenko, V.M. Ermakov, V.V. Kolomoets, V.F. Machulin, I.V. Prokopenko, E.F. Venger, E. Liarokapis, D.P. Tunstall. Impact ionization of shallow donor states related to different minima-type of the germanium c-band. // *Abst. of the 8th Int. Conf. on Shallow-Level Centers in Semiconductors. Montpellier, France.* – 1998 – p.1-7.
- [3] S.I. Budzulyak, J.P. Dotsenko, V.M. Ermakov, V.V. Kolomoets, V.F. Machulin, E.F. Venger, E. Liarokapis, D.P. Tunstall. Breakdown of donor localized states on the insulating side of strain-induced MI transition in Si and Ge. // *Phys. Stat. Sol. (b)*, **211**, pp. 137-142 (1999).
- [4] S.I. Budzulyak, A.E. Gorin, V.M. Ermakov, V.V. Kolomoets, E.F. Venger, P. Verma, M. Yamada, E. Liarokapis, D.P. Tunstall. Strain-induced MI transition in n-Si and n-Ge: Physical Mechanisms and transport phenomena // *Phys. Stat. Sol. (b)*, **223**, pp.519-523 (2001).
- [5] Baidakov V.V., Ermakov V.N., Gorin A.E., Kolomoets V.V., Stuchinska N.V., Shenderovskii V.A, and Tunstall D.P. Metal-Insulator Transition in Degenerately Doped Si and Ge under High Uniaxial Pressure // *Phys. Stat. Sol. (b)*. **198**(1), pp. 149-152 (1996).
- [6] С.И. Будзуляк, Е.Ф. Венгер, Ю.П. Доценко, В.Н. Ермаков, В.В. Коломоец, Л.И. Панасюк. Пробой мелких доноров в Si и Ge на изоляторной стороне деформационно-индуцируемого перехода металл-диэлектрик. // *ФТП*, **34**(9), сс. 1063-1065 (2000).

S.I. Budzulyak

Tensoresistive Effects in Strongly Deformed Crystals n-Si and n-Ge

V.E.Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS of Ukraine, Avenue Nauku, 41, 03028, Kyiv

The results of complex investigation of main dependencies and peculiarities of tensoeffects in highly uniaxially strained n-type silicon and germanium crystals are presented. The methods of identification of tensor resistivity physical mechanism and determination of main electrophysical parameters of silicon and germanium are described. For heavily doped silicon at the condition of realization of the metal-insulator transition the dependence of electron effective mass vs. uniaxial pressure was obtained. As a result of careful fitting procedure, it was determined that the quadratic dependence of electron effective mass on the uniaxial pressure $X \parallel [111]$ describes the experimental data of measured pressure-tuned conductivity change in the range of strain-induced MI transition. Single linear dependence of increase of the electron effective mass on pressure can not describe the measured conductivity decrease at all.

Key words: high-temperature superconductivity, Bi-containing ceramic, oxygen stoichiometry.