

С.В. Луньов¹, П.П. Шигорін², Б.Я. Венгрин³

Електричні властивості тонких плівок Ge/Ge_(x)Si_(1-x) на межі переходу напівпровідник-діелектрик

¹Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна, luniovser@ukr.net;

²Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк, Україна, shygorin.pavlo@vnu.edu.ua;

³Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, bohdan.y.venhryn@lpnu.ua

На основі теорії електропровідності двовимірних напівпровідникових наноструктур проведено розрахунки залежностей концентрації носіїв струму та питомої електропровідності при кімнатній температурі для нелегованої та легованої наноплівки германію, вирощеної на підкладці Ge_(x)Si_(1-x) з кристалографічною орієнтацією (001), від її товщини та складу підкладки. Було встановлено, що перехід діелектрик-напівпровідник для тонких плівок германію товщиною $d < 7$ нм можна реалізувати за рахунок збільшення її товщини, що пов'язано зі зменшення ефективності квантово-розмірних ефектів, або вмісту кремнію в підкладці Ge_(x)Si_(1-x), внаслідок чого відбувається зростання величини внутрішніх механічних напружень в плівці та, відповідно, концентрації власних носіїв струму. Легування такої плівки германію донорною домішкою з енергією іонізації $E_d < 150$ меВ також призводить до реалізації переходу діелектрик-напівпровідник. Представлені розрахунки електричних властивостей тонких плівок германію можуть бути використані при розробці наукових основ їхнього синтезу та при конструюванні на основі таких плівок каналів n-MOSFET та n-MODFET транзисторів, лазерів на гетеропереходах та електрооптичних модулаторів.

Ключові слова: ефекти розмірного квантування, перехід діелектрик-напівпровідник, внутрішні механічні напруження, тонкі плівки германію, концентрація власних носіїв струму, питома електропровідність.

Подано до редакції 09.02.2025; прийнято до друку 16.05.2025.

Вступ

Технології виготовлення кремнієвих інтегральних мікросхем досягли сьогодні такого стану, коли зростання їхньої продуктивності вже не можна досягнути виключно за рахунок геометричного масштабування [1]. Тому вчені прийшли до висновку, що в багатьох новітніх структурах електронних пристроїв кремній можна замінити на германій, який має більшу рухливість носіїв струму та дозволяє отримувати гетероструктури різного складу та практично довільної товщини шарів на підкладках з кремнію або твердих розчинів кремній-германій [2-5]. В гетероструктурах, одержаних на основі кремнію та германію, існують значні внутрішні механічні напруження, пов'язані зі значною різницею сталих

граєток цих матеріалів. Це дозволяє вирощувати на поверхні підкладок з Si або твердого розчину Ge_(x)Si_(1-x) дуже тонкі плівки германію, на основі яких можуть бути створені лазери, електрооптичні модулатори та MOSFET-транзистори [6-11]. При цьому цілісність, якість і однорідність електричних та оптичних властивостей одержаних плівок германію будуть визначатись ступенем їхньої кристалічності та густиною дислокацій [12-15]. Ступінь кристалічності, густина та потік дислокацій і величина внутрішніх напружень в плівці залежать від технологічних умов її росту (температури та атмосфери росту, подальшої термічної обробки, наявності неконтрольованих домішок та легування) [16-21]. Зокрема, в роботах [20, 21] показано, що додаткове легування плівки германію донорною або акцепторною домішкою

призводить до зменшення густини дислокацій, яка залежить також від природи легуючої домішки. Тому вибір найбільш оптимальної технології одержання плівок германію може забезпечити досить високі їхні електричні властивості. Ще одним фактором, який значно впливає на електричні властивості дуже тонких плівок германію, є наявність в них квантово-розмірних ефектів. Раніше нами в роботах [22-24] було встановлено, що електропровідність наноплівки германію товщиною $d < 7$ нм, вирощеної на підкладці $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$ з кристалографічною орієнтацією (001), значно залежить від ефектів розмірного квантування, ефективність яких, в свою чергу, є функцією ступеня легування наноплівки донорними домішками. Електропровідність такої плівки визначається складом підкладки. Зі збільшенням вмісту кремнію в підкладці зростає величина внутрішніх механічних напружень в наноплівці, під дією яких відбувається деформаційна перебудова зонної структури наноплівки. Зокрема, при значних внутрішніх деформаціях була одержана (L_1 - Δ_1) - інверсія типу абсолютного мінімуму зони провідності наноплівки германію. Механізм виникнення такої інверсії та її впливу на електричні властивості об'ємних монокристалів германію був детально вивчений в

роботах [25-27]. В роботі [23] вперше було одержано перехід напівпровідник-діелектрик для наноплівок германію товщиною $d < 7$ нм при температурах нижчих за кімнатну. Проте, не проводилось комплексне дослідження впливу величин внутрішніх механічних напружень та ступеня легування донорними домішками з різною енергією іонізації на механізми та можливість реалізації такого переходу при кімнатній температурі.

Саме тому метою даної роботи є проведення таких досліджень, оскільки вони є більш практично актуальним щодо моделювання та розробки на основі наноплівок германію різних елементів наноелектроніки, що функціонують в більшості випадків при температурах близьких до кімнатної.

I. Теоретичні розрахунки

Розрахунки зонної структури нелегованої та легованої донорною домішкою наноплівки германію, вирощеної на підкладці $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$ (001), проводились в роботах [22, 28]. Згідно з [28], вирази для концентрацій носіїв струму в напруженій наноплівці германію

$$n_{L_1} = \left(\frac{2}{d} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_{\parallel}^{L_1} k T d^2}} \right) \frac{2\pi m_{\parallel}^{L_1} k T}{h^2} \cdot e^{\frac{E_F - E_{L_1}}{k T}}, \quad n_{\Delta_1} = \left(\frac{2}{d} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_{\parallel}^{\Delta_1} k T d^2}} \right) \frac{2\pi m_{\parallel}^{\Delta_1} k T}{h^2} \cdot e^{\frac{E_F - E_{\Delta_1}}{k T}}, \quad (1)$$

$$p_1 = \left(\frac{2}{d} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_1 k T d^2}} \right) \frac{2\pi m_1 k T}{h^2} \cdot e^{\frac{E_F - E_{V_1}}{k T}}, \quad p_2 = \left(\frac{2}{d} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_2 k T d^2}} \right) \frac{2\pi m_2 k T}{h^2} \cdot e^{\frac{E_F - E_{V_2}}{k T}}. \quad (2)$$

Тут n_{L_1} , n_{Δ_1} – концентрації електронів в L_1 - та Δ_1 - мінімумах зони провідності наноплівки германію; p_1 та p_2 – концентрації «легких» та «важких» дірок для віток валентної зони; d – товщина наноплівки; $m_{\perp}^{L_1} = 0.082m_0$, $m_{\parallel}^{L_1} = 1.58m_0$, $m_{\perp}^{\Delta_1} = 0.32m_0$, $m_{\parallel}^{\Delta_1} = 1.65m_0$, $m_1 = 0.044m_0$, $m_2 = 0.28m_0$ – ефективні маси провідності в L_1 -, Δ_1 -мінімумах та для зон «легких» і «важких» дірок відповідно [29-31]; m_0 – маса вільного електрона; E_F – енергія Фермі; E_{L_1} , E_{Δ_1} , E_{V_1} , E_{V_2} – енергетичні положення відповідних мінімумів зони провідності та віток валентної зони напруженої наноплівки германію.

Концентрації електронів та дірок в зоні провідності та валентній зоні, а також власних носіїв струму рівні:

$$n = n_{L_1} + n_{\Delta_1}, \quad p = p_1 + p_2, \quad n_i(\varepsilon) = \sqrt{np}. \quad (3)$$

Концентрація власних носіїв струму в ненапруженій наноплівці германію

$$n_i(0) = \frac{4\pi k T}{h^2 d} (m_{\perp}^{L_1} m_p)^{1/2} \left[\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_{\parallel}^{L_1} k T d^2}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_p k T d^2}} \right]^{1/2} \cdot e^{-\frac{E_g(0)}{2kT}}. \quad (4)$$

де $m_p = 0.193m_0$ – ефективна маса провідності для дірок, $E_g(0) = 0.66$ eV [29].

Питома електропровідність ненапруженої $\sigma(0)$ та напруженої $\sigma(\varepsilon)$ наноплівки рівна:

$$\sigma(0) = q n_i(0) (\mu_{L_1} + \mu_p), \quad \sigma(\varepsilon) = q n_i(\varepsilon) (\mu_n(\varepsilon) + \mu_p(\varepsilon)), \quad (5)$$

де μ_{L_1} , μ_p – рухливості електронів та дірок в

ненапруженій наноплівці; $\mu_n(\varepsilon)$ та $\mu_p(\varepsilon)$ – ефективні рухливості електронів та дірок в напруженій наноплівці.

Тоді відносну зміну питомої електропровідності напруженої наноплівки германію можна представити у вигляді [23]:

$$\frac{\sigma(\varepsilon)}{\sigma(0)} = \frac{n_i(\varepsilon)}{n_i(0)} \frac{b_4(1+B) + b_5 B + b_6}{(1+B)(1+b_7)}. \quad (6)$$

Позначення для величин B, b_4, b_5, b_6, b_7 у виразі (6) та детальні розрахунки представлено в роботі [23].

Концентрація електронів в легованій наноплівці германію донорною домішкою визначається виразом [26]:

$$n(\varepsilon) = ax. \quad (7)$$

де $x = e^{\frac{E_F}{kT}}$ та обчислювалось з розв'язків кубічного рівняння:

$$2x^3 + cx^2 - \frac{N_d c + 2b}{a}x - \frac{bc}{a} = 0, \quad (8)$$

де

$$a = \frac{4\pi kT}{h^2 d} \left(m_{\perp}^{L_1} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_{\perp}^{L_1} kT d^2}} \cdot e^{-\frac{E_{L_1}}{kT}} + m_{\perp}^{\Delta_1} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_{\perp}^{\Delta_1} kT d^2}} \cdot e^{-\frac{E_{\Delta_1}}{kT}} \right), \quad (9)$$

$$b = \frac{4\pi kT}{h^2 d} \left(m_1 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_1 kT d^2}} \cdot e^{-\frac{E_{V_1}}{kT}} + m_2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_2 kT d^2}} \cdot e^{-\frac{E_{V_2}}{kT}} \right), \quad c = e^{\frac{E_d}{kT}},$$

N_d – концентрація донорної домішки, E_d – енергія її іонізації.

Вираз (6) для випадку легованої наноплівки германію можна представити наступним чином:

$$\frac{\sigma(\varepsilon)}{\sigma(0)} = \frac{n(\varepsilon)\mu_n(\varepsilon) + p(\varepsilon)\mu_p(\varepsilon)}{n(0)\mu_{L_1} + p(0)\mu_p(0)}. \quad (10)$$

Згідно з [23],

$$\mu_n(\varepsilon) = \frac{\mu_{L_1} A + \mu_{\Delta_1}}{1 + A}, \quad \mu_p(\varepsilon) = \frac{\mu_1 B + \mu_2}{1 + B}, \quad (11)$$

де

$$A = \frac{n_{L_1}}{n_{\Delta_1}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_{\perp}^{L_1} kT d^2}}}{\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{h^2 n^2}{8m_{\perp}^{\Delta_1} kT d^2}}} \left(\frac{m_{\perp}^{L_1}}{m_{\perp}^{\Delta_1}} \right) e^{\frac{E_{\Delta_1} - E_{L_1}}{kT}}.$$

Тоді, враховуючи вирази (3) та (11), відносна зміна питомої електропровідності напруженої наноплівки германію, легованої донорною домішкою,

$$\frac{\sigma(\varepsilon)}{\sigma(0)} = \frac{n(\varepsilon) \frac{\mu_{L_1} A + \mu_{\Delta_1}}{1 + A} + \frac{n_{\Delta_1}^2(\varepsilon)}{n(0)} \frac{\mu_1 B + \mu_2}{1 + B}}{\frac{n_{\Delta_1}^2(0)}{n(0)} \mu_p(0)}, \quad (12)$$

де, μ_{L_1} та μ_{Δ_1} – рухливості електронів в L_1 - та Δ_1 - мінімумах зони провідності, μ_1 та μ_2 – рухливості «легких» та «важких» дірок, $\mu_p(0)$ – рухливість дірок в ненапруженій наноплівці. Вирази для розрахунку даних рухливостей в умовах розсіяння електронів та дірок на акустичних фонах представлено в роботі [23]. Енергетичне положення E_d донорної домішки в напруженій наноплівці германію обчислювалось з розв'язків рівняння електронейтральності, одержаного в роботі [28].

II. Результати та обговорення

На рис. 1 представлено залежності концентрації власних носіїв струму та електронів для нелегованої та легованої мілкою донорною домішкою наноплівки германію від її товщини. Розрахунки проводились при

$T=300$ К та для випадку росту наноплівки на підкладці $Ge_{(x)}Si_{(1-x)}$ з кристалографічною орієнтацією (001). Як було встановлено раніше нами в роботах [22-24], для такої наноплівки товщиною $d < 7$ нм суттєво проявляються ефекти розмірного квантування, які впливають сильно на концентрацію носіїв струму та її електропровідність.

Як слідує з рис. 1 а, ненапружена наноплівка германію ($x = 1$) товщиною $d = 2$ нм є діелектриком. Зростання її товщини до 7 нм призводить до переходу діелектрик-напівпровідник. Також даний перехід досягається за рахунок збільшення вмісту кремнію в підкладці і, відповідно, величини внутрішніх механічних напружень в наноплівці. Такі напруження призводять до зменшення ширини забороненої зони наноплівки та, як наслідок, до зростання концентрації власних носіїв струму [22, 23]. Іншим способом реалізації переходу діелектрик-напівпровідник в наноплівці германію є її легування донорною домішкою. Як слідує з рис. 1 б, с, д, збільшення концентрації легуючої домішки призводить до зростання концентрації електронів в зоні провідності наноплівки за рахунок повної іонізації мілких донорів при кімнатній температурі. Причому, при вмісті кремнію 100% та 75% в підкладці $Ge_{(x)}Si_{(1-x)}$ ступінь легування (від 10^{11} см^{-3} до 10^{13} см^{-3}) практично не впливає на перехід діелектрик-напівпровідник. В даних випадках основною причиною такого переходу є наявність значних внутрішніх механічних напружень в наноплівці германію, які призводять до суттєвого зростання концентрації власних носіїв, яка в рази більша за концентрацію легуючої домішки. Тому для набуття наноплівкою германію, вирощеною на підкладці з германію (ненапружена наноплівка) або з меншим вмістом кремнію (меншим значенням внутрішніх механічних напружень в наноплівці), напівпровідникових властивостей для ширшого діапазону складу підкладки $Ge_{(x)}Si_{(1-x)}$ (001) необхідним є легування такої наноплівки донорною домішкою з концентрацією $N_d > 10^{13}$ см^{-3} . Як відомо [23], збільшення вмісту кремнію в підкладці призводить до незначного зменшення рухливості носіїв струму по відношенню до відповідних змін їхньої концентрації. Тому одержані якісні та кількісні залежності питомої електропровідності наноплівки

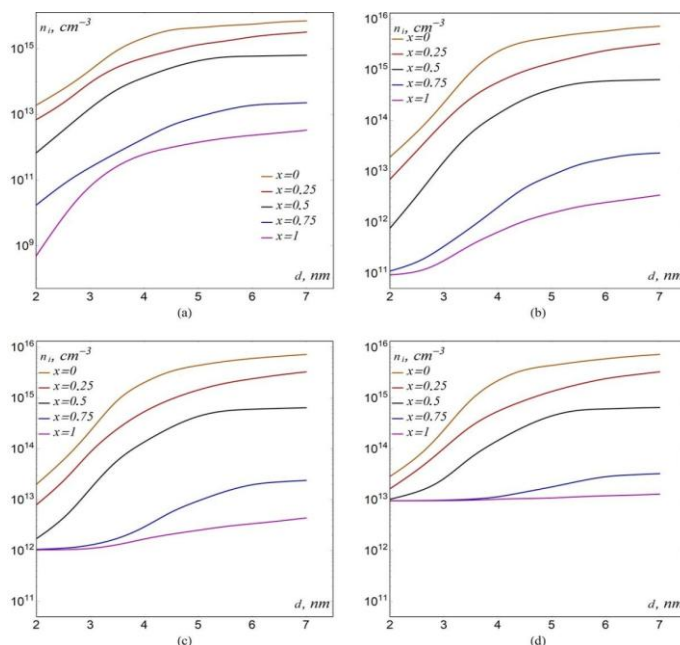


Рис. 1. Залежності концентрації власних носіїв струму та електронів для нелегованої та легованої мілкою донорною домішкою наноплівки германію, вирощеної на підкладці $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$ (001), від її товщини:
(a) – нелегована наноплівка; (b), (c), (d) – легована наноплівка донорами, з концентраціями $N_d=10^{11} \text{ см}^{-3}$, $N_d=10^{12} \text{ см}^{-3}$ та $N_d=10^{13} \text{ см}^{-3}$, відповідно.

германію від її товщини будуть, в основному, визначатись змінами концентрації носіїв струму та ефективністю квантово-розмірних ефектів. Згідно з рис. 2, відносне значення питомої електропровідності нелегованої наноплівки германію зменшується зі збільшенням її товщини, а легованої наноплівки навпаки зростає. Це можна пояснити тим, що в нелегованій та ненапруженій наноплівці, згідно з даними рис. 1 а, найбільш ефективно проявляються квантово-розмірні ефекти, які призводять до значної зміни в ній концентрації власних носіїв (майже на чотири порядки) при варіації товщини наноплівки від 2 до 7 нм. В напруженій наноплівці, з більшим значенням концентрації власних носіїв струму, ефективність квантово-розмірних ефектів менша. Відповідно питома електропровідність напруженої наноплівки $\sigma(\epsilon)$ буде менш інтенсивно зменшуватись зі збільшенням її товщини, ніж ненапруженої $\sigma(0)$. Це пояснює відносне зменшення питомої електропровідності $\sigma(\epsilon)/\sigma(0)$ нелегованої наноплівки германію (рис. 2 а). Легування наноплівки германію донорною домішкою при $\sigma(\epsilon)/\sigma(0)$ изводить до зменшення ролі квантово-розмірних ефектів, які впливають на її електричні властивості [24]. При цьому характер залежностей питомої електропровідності, як для ненапруженої, так і напруженої наноплівки, від її товщини буде іншим і, як наслідок, відносне значення питомої електропровідності $\sigma(\epsilon)/\sigma(0)$ зі збільшенням товщини наноплівки зростатиме (рис. 2 б, 2 с, 2 д). Як показують розрахунки, представлені результати будуть справедливими для випадку донорної домішки з енергією іонізації $E_d < 150$ меВ, яка буде повністю іонізованою при кімнатній температурі в ненапруженій та напруженій наноплівці германію. При більших значеннях енергії іонізації домішки її енергетичні рівні не будуть повністю іонізованими,

що є причиною зменшення концентрації електронів в зоні провідності наноплівки [24]. При цьому зростання вмісту кремнію в підкладці та, відповідно, величини внутрішніх механічних напружень в наноплівці призводитиме до зростання енергії іонізації донорної домішки.

На рис. 3 подано залежності концентрації електронів для легованої глибокою донорною домішкою з концентрацією $N_d=10^{13} \text{ см}^{-3}$ наноплівки германію від її товщини при $T=300$ К. Розрахунки проводились для енергії іонізації донорної домішки $E_d=150$ меВ, $E_d=250$ меВ та $E_d=300$ меВ.

Як слідує з даних рисунків, зростання енергії іонізації донорної домішки від 150 до 300 меВ призводить до зменшення концентрації електронів в зоні провідності ненапруженої наноплівки германію, що пояснюється зростанням ступеня деіонізації донорного рівня. Також, на відміну від випадку мілкої донорної домішки, для наноплівки германію товщиною $d < 3$ нм при збільшенні вмісту кремнію в підкладці $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$ до 50% та, відповідно, величини внутрішніх механічних напружень зменшується концентрація електронів в зоні провідності напруженої наноплівки порівняно з ненапруженою. В даному випадку зміна концентрації електронів в наноплівці визначається двома механізмами: 1) зростанням концентрації вільних носіїв струму, 2) зменшенням концентрації електронів в зоні провідності за рахунок зростання енергії іонізації донорної домішки при деформації, що призводить до збільшення ступеня заповнення електронами донорного рівня. Для напруженої наноплівки германію товщиною $d < 3$ нм з вмістом кремнію в підкладці $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$ до 50% домінуючим є другий механізм, а при вмісті кремнію більше 50% – перший. Якісно подібні залежності відносних змін питомої електропровідності $\sigma(\epsilon)/\sigma(0)$ від товщини

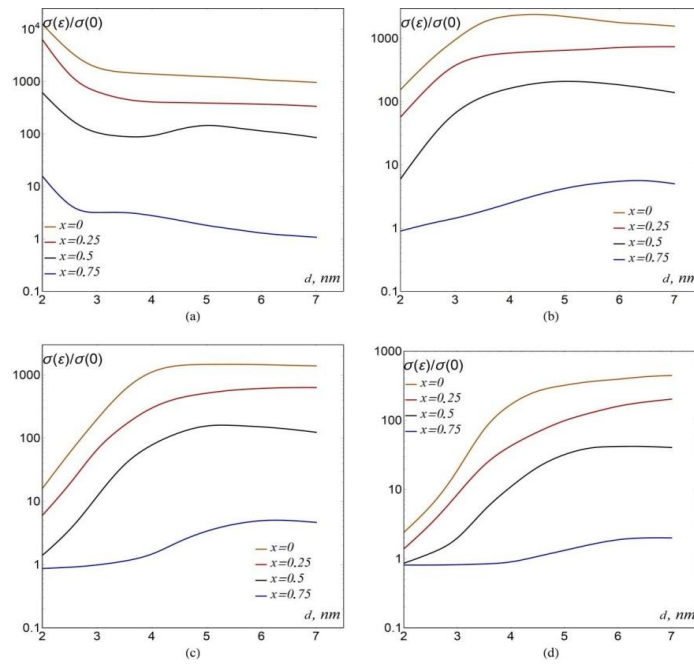


Рис. 2. Залежності відносної зміни питомої електропровідності для нелегованої та легованої мілкою донорною домішкою наноплівки германію, вирощеної на підкладці $\text{Ge}_{(x)}\text{Si}_{(1-x)}$ (001), від її товщини: (a) – нелегована наноплівка; (b), (c), (d) – легована наноплівка донорами з концентраціями $N_d=10^{11} \text{ см}^{-3}$, $N_d=10^{12} \text{ см}^{-3}$ та $N_d=10^{13} \text{ см}^{-3}$, відповідно.

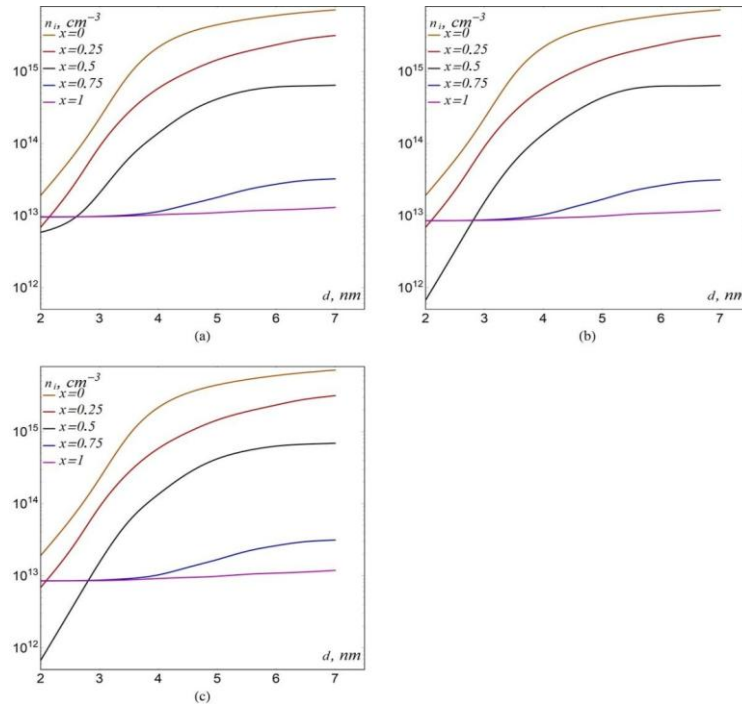


Рис. 3. Залежності концентрації електронів для легованої глибокою донорною домішкою наноплівки германію від її товщини при різних значеннях енергії іонізації легуючої домішки E_d , меВ: (a) –150, (b) –250, (c) –300.

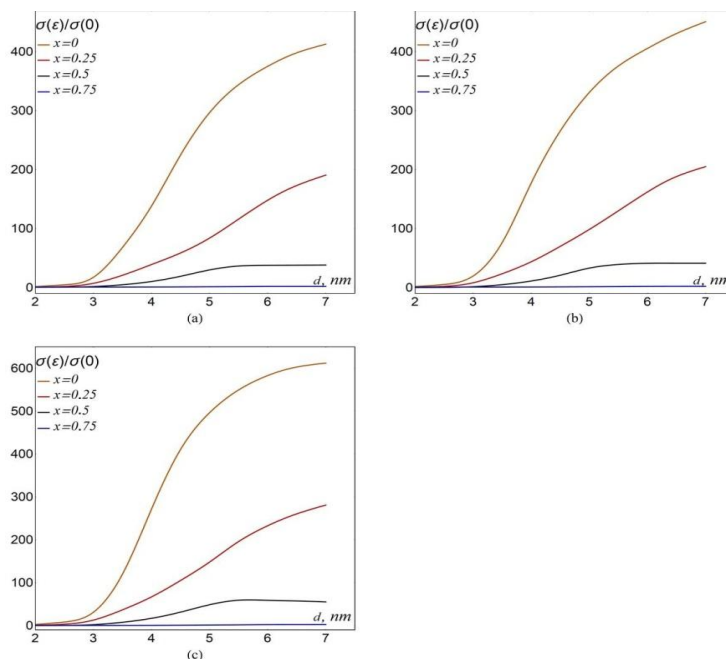


Рис. 4. Залежності відносної зміни питомої електропровідності для легованої глибокою донорною домішкою наноплівки германію, вирощеної на підкладці $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ (001), від її товщини при різних значеннях енергії іонізації легуючої домішки E_d , меВ: (a) –150, (b) –250, (c) –300.

наноплівки германію були одержані і для випадку її легування глибокою донорною домішкою (рис. 4).

Зростання величини відносної питомої електропровідності при збільшенні вмісту кремнію в підкладці $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ пояснюється збільшенням концентрації власних носіїв струму. Енергетичні рівні домішок з енергією іонізації $E_d > 350$ меВ будуть повністю заповненими електронами і, відповідно, легування не буде впливати на залежності концентрації електронів та відносної питомої електропровідності від товщини наноплівки. В даному випадку механізми квантово-розмірних ефектів будуть протікати так само як і в нелегованій наноплівці германію.

Висновки

Перехід діелектрик-напівпровідник для нелегованої наноплівки германію можна реалізувати двома способами: 1) збільшенням її товщини від 2 нм до 7 нм, що пояснюється значним послабленням ролі квантово-розмірних ефектів; 2) збільшенням вмісту кремнію в підкладці $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, що призводить до зростання величини внутрішніх механічних напружень в наноплівці та, відповідно, концентрації власних носіїв струму в ній. Для легованої наноплівки германію даний перехід можна досягнути за рахунок її легування як мілкими, так і глибокими донорними домішками. При енергіях іонізації донорної домішки $E_d > 150$ меВ буде проявлятися її деіонізація, що призводить до зменшення концентрації електронів в зоні провідності наноплівки та, відповідно, впливу ролі легування на перехід діелектрик-напівпровідник.

Тому реалізація такого переходу буде ефективнішою при легуванні наноплівки германію глибокою донорною домішкою з концентрацією $N_d > 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Механізми переходу діелектрик-напівпровідник для легованої наноплівки германію донорною домішкою з енергією іонізації $E_d > 350$ меВ будуть такими ж як і для нелегованої наноплівки, а легування такими домішками в даному відношенні втрачає будь-який зміст.

Представленні розрахунки електричних властивостей тонких ненапружених та напружених наноплівок германію необхідно враховувати при їхньому синтезі, а також при розробці на їхній основі різних елементів наноелектроніки, зокрема каналів n-MOSFET та n-MODFET транзисторів, лазерів на гетеропереходах, електрооптичних модуляторів. При цьому, в першу чергу, важливим при конструюванні таких елементів є питомий опір (питома електропровідність) сировинного матеріалу, що обґрунтовує практичне значення одержаних результатів.

Луньов С.В. – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри фізики та вищої математики, Луцький національний технічний університет;

Шигорін П.П. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки;

Венгрин Б.Я. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства, Національний університет «Львівська політехніка».

- [1] N. Rinaldi, M. Schröter, *Silicon-Germanium Heterojunction Bipolar Transistors for Mm-wave Systems Technology: Modeling and Circuit Applications* (River Publishers), (2022); <https://doi.org/10.13052/rp-9788793519602>.
- [2] M. Rudan, R. Brunetti, S. Reggiani, *Handbook of semiconductor devices* (Springer, 2023); <https://doi.org/10.1007/978-3-030-79827-7>.
- [3] Y. Shimura, C. Godfrin, A. Hikavy, J. Aguilera, G. Katsaros, R. Loo, *Compressively strained epitaxial Ge layers for quantum computing applications*, Materials Science in Semiconductor Processing, 174, 108231 (2024); <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.108231>.
- [4] E. Wangila, P. Lytvyn, H. Stanchu, C. Gunder, F. De Oliveira, S. Saha, G. Salamo, *Growth of Germanium Thin Films on Sapphire Using Molecular Beam Epitaxy*, Crystals, 13(11), 1557(2023); <https://doi.org/10.3390/cryst13111557>.
- [5] H. Stanchu, S. Kryvyi, S. Margiotta, M. Cook, J. Grant, H. Tran, S. Yu, *Comprehensive material study of Ge grown by aspect ratio trapping on Si substrate*, Journal of Physics D: Applied Physics, 57(25), 255107 (2024); <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad365b>.
- [6] C. Zhao, B. Xu, Z. Wang, *Boron-doped III–V semiconductors for Si-based optoelectronic devices*, Journal of Semiconductors, 41(1), 011301(2020); <https://doi.org/10.1088/1674-4926/41/1/011301>.
- [7] N. B. Singh, S. K. Shukla, *Two-dimensional nanostructures for biomedical technology: Properties of two-dimensional nanomaterials* (Elsevier, 2020); <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817650-4.00003-6>.
- [8] P. Chaisakul, N. Koompai, P. Limsuwan, , *Theoretical investigation of a low-voltage Ge/SiGe multiple quantum wells optical modulator operating at 1310 nm integrated with Si_3N_4 waveguides*, AIP Advances, 8(11), 115318(2018); <https://doi.org/10.1063/1.5064701>.
- [9] Y. Zhang, J. Gao, S. Qin, M. Cheng, K. Wang, L. Kai, J. Sun, , *Asymmetric Ge/SiGe coupled quantum well modulators*, Nanophotonics, 10(6), 1765(2021); <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0007>.
- [10] T. Dutta, N. Yadav, Y. Wu, G. Cheng, X. Liang, S. Ramakrishna, A. Yadav, *Electronic properties of 2D materials and their junctions*, Nano Materials Science, 6(1), 1(2024); <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2023.05.003>.
- [11] K.C. Saraswat, Germanium. In 75th Anniversary of the Transistor, (Wiley, 2023); <https://doi.org/10.1002/9781394202478.ch36>.
- [12] J. Ding, H. Tong, J. Long, R. Zhang, B. Zhang, C. Wang, F. Qiu, *ACS Applied Electronic, Microcrystal-induced crystallization effect for high-quality germanium/silicon heteroepitaxial nanofilms*, Materials, 3(8), 3391(2021); <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsaelm.1c00373>.
- [13] K. Sawano, Y. Hoshi, S. Kubo, K. Arimoto, J. Yamanaka, K. Nakagawa, Y. Shiraki, *Structural and electrical properties of Ge (111) films grown on Si (111) substrates and application to Ge (111)-on-Insulator*, Thin Solid Films, 613, 24(2016); <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.11.020>.
- [14] M. Myronov, *Molecular Beam Epitaxy of High Mobility Silicon, Silicon Germanium and Germanium Quantum Well Heterostructures*. In Molecular Beam Epitaxy (Elsevier, 2018); <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812136-8.00003-7>.
- [15] A. Ghosh, M. Clavel, P. Nguyen, M. Meeker, G. Khodaparast, R. Bodnar, M. Hudait, *Growth, structural, and electrical properties of germanium-on-silicon heterostructure by molecular beam epitaxy*, Aip Advances, 7(9), 095214(2017); <https://doi.org/10.1063/1.4993446>.
- [16] S. Bedell, S. Hart, S. Bangsaruntip, C. Durfee, J. Ott, M. Hopstaken, P. Gumann, , *Low-temperature growth of strained germanium quantum wells for high mobility applications*, ECS Transactions 98(5), 215(2020); <https://doi.org/10.1149/09805.0215ecst>.
- [17] T. Nagano, R. Hara, K. Moto, K. Yamamoto, T. Sadoh, *Improved carrier mobility of Sn-doped Ge thin films (≤ 20 nm) on insulator by interface-modulated solid-phase crystallization combined with surface passivation*, Materials Science in Semiconductor Processing, 165, 107692(2023); <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107692>.
- [18] A. Nigro, E. Jutzi, N. Forrer, A. Hofmann, G. Gadea, I. Zardo, *High quality Ge layers for Ge/SiGe quantum well heterostructures using chemical vapor deposition*, Physical Review Materials, 8(6), 066201(2024); <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.8.066201>.
- [19] L. Wei, Y. Miao, Y. Ding, C. Li, H. Lu, Y. Chen, *Ultra high hole mobility in Ge films grown directly on Si (100) through interface modulation*, Journal of Crystal Growth 548, 125838 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2020.125838>.
- [20] G. Zhou, K. Lee, D. Anjum, Q. Zhang, X. Zhang, C. Tan, G. Xia, *Impacts of doping on epitaxial germanium thin film quality and Si-Ge interdiffusion*, Optical Materials Express, 8(5), 1117 (2018); <https://doi.org/10.1364/OME.8.001117>.
- [21] X. Yu, H. Jia, J. Yang, M. Masteghin, H. Beere, M. Mtunzi, H. Liu, *Effects of phosphorous and antimony doping on thin Ge layers grown on Si*, Scientific Reports, 14(1), 7969(2024); <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57937-8>.
- [22] S.V. Luniov, *Calculation of Electron Mobility for the Strained Germanium Nanofilm*, Journal of Nano-and Electronic Physics, 11(2), 02023 (2019); https://jnep.sumdu.edu.ua/en/full_article/2732.
- [23] S.V. Luniov, P.F. Nazarchuk, O.V. Burban, *Electrical properties of strained germanium nanofilm*, Physics and Chemistry of Solid State, 22(2), 313 (2021); <https://doi.org/10.15330/pcss.22.2.313-320>.
- [24] S. Luniov, O. Burban, Y. Koval, *IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties 02TM03-1* (IEEE, Sumy, 2020); <https://ieeexplore.ieee.org/document/9309623>.

- [25] S.V. Luniov, P.F. Nazarchuk, O.V. Burban, *Calculation of the Electron Mobility for the Δ_1 -Model of the Conduction Band of Germanium Single Crystals*, Semiconductors, 48(4), 438 (2014); <https://doi.org/10.1134/S1063782614040198>.
- [26] S.V. Luniov, O.V. Burban, P.F. Nazarchuk, *Electron scattering in the Δ_1 -model of the conduction band of germanium crystals*, Semiconductors, 49(5), 574 (2015); <https://doi.org/10.1134/S1063782615050140>.
- [27] S.V. Luniov, *The impact of intrinsic conductivity on the mechanisms of tensor resistance of uniaxially deformed n-Ge single crystals*, Journal of Physical Studies, 23(3), 3701 (2019); <https://doi.org/10.30970/jps.23.3701>.
- [28] S.V. Luniov, *Calculation of band structure of the strained germanium nanofilm, doped with a donor impurity*, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 118, 113954 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.physe.2020.113954>.
- [29] U. Mishra, J. Singh, *Semiconductor Device Physics and Design* (Springer, Netherlands, 2008); <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6481-4>.
- [30] G. Bir, G. Pikus, D. Louvish, *Symmetry and strain-induced effects in semiconductors* (Wiley, New York, 1974).
- [31] S.V. Luniov, P.F. Nazarchuk, O.V. Burban, *Parameters of the high-energy Δ_1 -minimum of the conduction band in n-Ge*, Journal of Physical Studies, 17(3), 3702 (2013); <https://doi.org/10.30970/jps.17.3702>.

S.V. Luniov¹, P.P. Shygorin², B.Ya. Venhryn³

Electrical Properties of Ge/Ge_(x)Si_(1-x) thin films on the boundary of semiconductor-dielectric transition

¹Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine, luniovser@ukr.net

²Lesya Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine, shygorin.pavlo@vnu.edu.ua

³Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine, bohdan.y.venhryn@lpnu.ua

Calculations of the dependencies of carrier concentration and specific electrical conductivity at room temperature for the undoped and doped germanium nanofilms, grown on the Ge_(x)Si_(1-x) substrate with crystallographic orientation (001), on a film thickness and substrate composition, have been provided based on the theory of electrical conductivity for the two-dimensional semiconductor nanostructures. It was established that the dielectric-semiconductor transition for thin germanium films with a thickness of $d < 7$ nm can be achieved either by increasing the film thickness, which reduces the effectiveness of quantum size effects or by increasing the silicon content in the Ge_(x)Si_(1-x) substrate. The latter increases the internal mechanical stress in the film and, consequently, the concentration of intrinsic current carriers. Doping such germanium film by the donor impurities with the ionization energy $E_d < 150$ meV also leads to the implementation of the dielectric-semiconductor transition. The presented calculations of the electrical properties of germanium thin films can be utilized in developing the scientific foundations for their synthesis and in designing channels of the n-MOSFET and n-MODFET transistors, lasers based on heterojunctions, and electro-optical modulators based on such films.

Keywords: quantum size effects, dielectric-semiconductor transition, internal mechanical strains, germanium thin films, intrinsic carrier concentration, specific electrical conductivity.