

Д.М. Фреїк¹, П.М. Литвин³, І.М. Ліщинський², В.В. Бачук¹, І.В. Горічок¹

Наноструктури телуриду свинцю, вирощені у вакуумі з парової фази на монокристалах кремнію із оксидною плівкою

¹Фізико-хімічний інститут, ²фізико-технічний факультет
Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76000, Україна, E-mail: fcss@pu.if.ua

³Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лискарьова НАН України, пр. Науки, 41, Київ-28, 03028, Україна,
E-mail: plyt@isp.kiev.ua

Методами атомно-силової мікроскопії досліджено особливості формування наноструктур телуриду свинцю, вирощених у відкритому вакуумі із парової фази на монокристалах кремнію із оксидною плівкою SiO₂-Si. Показано, що самоорганізація квантово-розмірних структур пов'язана із мінімізацією пружних деформацій у сендвіч-системі “плівка-підкладка”.

Ключові слова: телурид свинцю, наноструктури, процеси росту, парова фаза.

Стаття поступила до редакції 05.04.2008; прийнята до друку 15.12.2008.

Вступ

Використання характерних особливостей речовини, що проявляються на відстанях декілька нанометрів, створює цілком нові можливості для їх застосування в різних областях техніки і напрямках науки [1]. Це, перш за все, стосується наноелектроніки. Якраз на неї покладаються обґрунтовані надії у розробці надмініатюрних і надшвидкодійних систем реєстрації та обробки інформаційних даних, які гігантськими об'ємами накопичує людство. Вже сьогодні ми щільно наблизились до теоретичної межі: можливості запам'ятовувати і передавати інформацію за допомогою одного електрона [2]. Широке використання цих пристроїв поки стримується необхідністю створення нанотехнологій, які б забезпечували конструювання наперед заданої архітектури із окремих атомів.

Крім вже відомих методів – молекулярно-променева епітаксія, газофазна епітаксія із металоорганічних сполук, йонне розпилення, йонне бомбардування – які є надто дорогими і конструктивно складними [3] йде пошук нових, більш доступних методик, а також поглиблене вивчення вже відомих, недорогих технологій, які добре себе зарекомендували. Серед останніх слід відзначити методи осадження з парової фази у відкритому вакуумі та квазізамкненому об'ємі (гарячої стінки, газодинамічний потік), які вже

протягом багатьох років використовуються і удосконалюються, в тому числі і авторами [4].

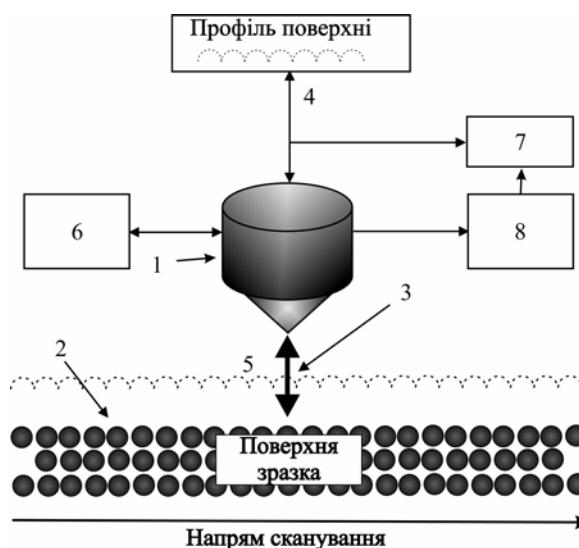


Рис.1. Принцип роботи скануючого зондового мікроскопа: 1-зонд; 2-окремий атом; 3-фізична характеристика (тунельний струм, міжатомні сили і т.п.); 4-вихідний сигнал; 5-траєкторія руху зонда; 6- коло керування процесом сканування; 7- коло зворотнього зв'язку; 8- коло детектування досліджуваної фізичної характеристики [1].

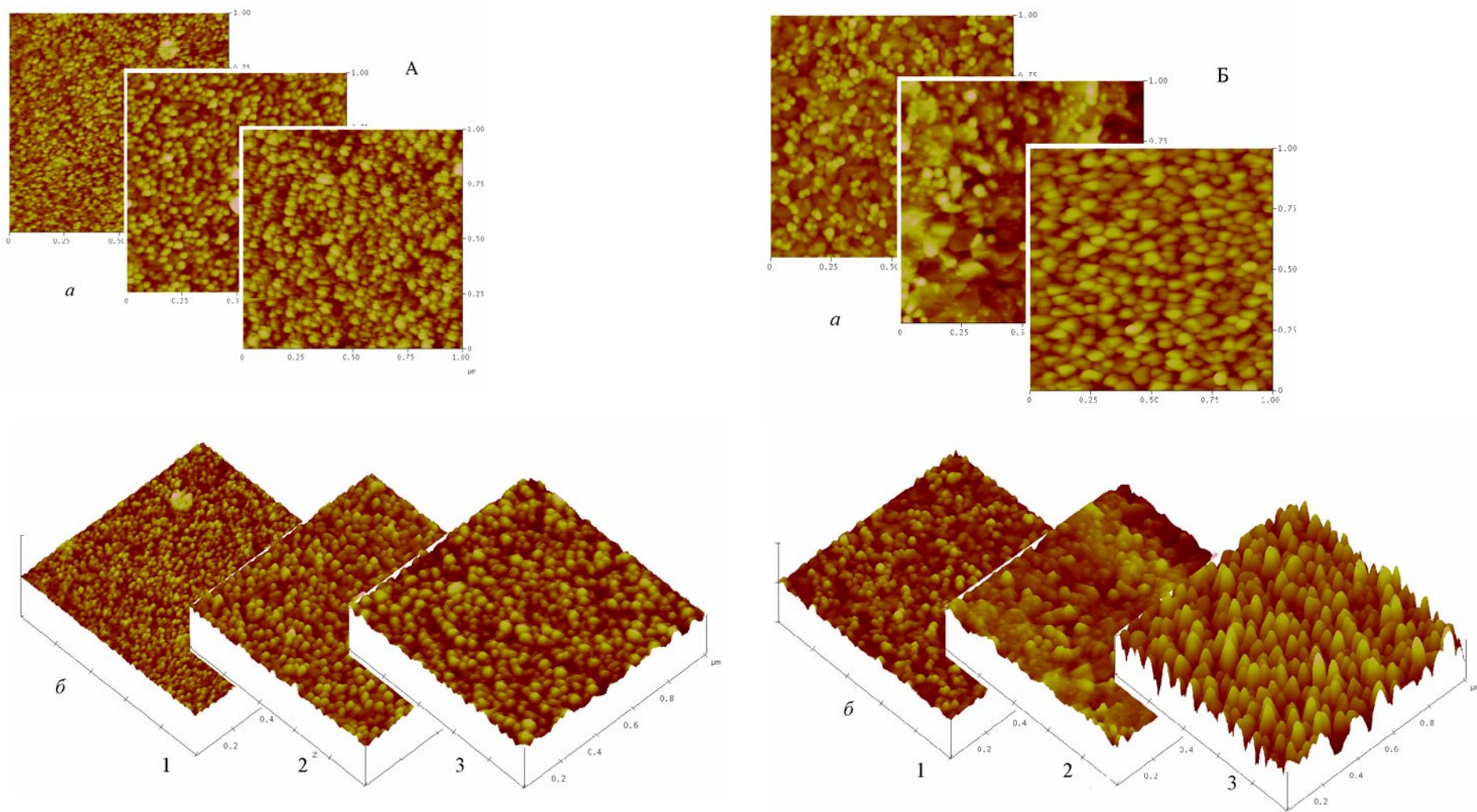


Рис. 2. Двовимірні (а) та трьохвимірні (б) АСМ зображення наноструктур PbTe/SiO₂-Si, осаджені при температурі T_{пл}, °C: 1-100; 2-200; 3-300. Час осадження t, хв.: А-15, В-30.

Метою цієї роботи є вивчення можливостей формування наноструктур напівпровідникових сполук $A^{VI}B^{VI}$ у відкритому вакуумі із використанням новітніх методик дослідження — атомно- силової мікроскопії(АСМ).

I. Методика експерименту

Нанокристалічні структури телуриду свинцю отримували осадженням пари у відкритому вакуумі на попередньо окислені монокристалічні пластинки кремнію. Температуру осадження (підкладок) варіювали у межах $T_{\text{п}} = (50-300)^{\circ}\text{C}$. Температура випаровування наважки із наперед синтезованої сполуки PbTe витримувалась сталою і складала $T_{\text{в}} = (700 \pm 10)^{\circ}\text{C}$. Товщину конденсату (10-40) нм задавали часом осадження при швидкості $(1-2) \cdot 10^{-2} \text{ нмс}^{-1}$.

Структуру конденсату досліджували на атомно-силовому мікроскопі (АСМ), робота якого ґрунтується на вимірюванні сил взаємодії між вістрям зонда і атомами поверхні (рис.1) [1]. Величина міжатомних сил, що виникають між вістрям зонда і атомами певної ділянки “шорсткої” поверхні, відповідає величині вигину платформи кронштейна, яку можна визначити із високою точністю, реєструючи відбитий лазерний промінь за допомогою оптичного детектора (фотодіода) (рис.1).

У нашому випадку в якості АСМ був використаний Nanoscope IIIa Dimension 3000 (Digital Instruments, США) у режимі періодичного контакту.

Вимірювання проведені у центральній зоні зразка із використанням серійних кремнієвих зондів NSG-11 з номінальним радіусом закруглення вістря до 10 нм (компанія "НТ-МДТ", Росія).

II. Результати експериментів

Зауважимо, що раніше [5] методами АСМ досліджено особливості формування nanoострівцевих плівок PbTe на свіжих сколах BaF_2 (111) при осадженні методом гарячої стінки. Показано, що варіюючи температурні режими в ростовій камері можна реалізувати різні механізми росту, а також контролювати форму та розміри nanoострівців. У роботі [6] наведено результати таких же досліджень структур PbTe на сколах (0001) слюди – мусковіт. Встановлено, що поцеси росту нанокристалів здійснюється за механізмом «пара-кристал» без коалесценції із переважаючою квазіпаралельною орієнтацією $(111)[110] \text{ PbTe} \parallel (0001)[1120]$ слюди із утворенням ростових дефектів упаковки і мікродвійників.

Деякі із результатів проведених нами досліджень одержаних наноструктур методами АСМ та їх розрахунків представлено на рис 2-6. На основі аналізу дво- (рис. 2,а) та трьохвимірних (рис 2,б) зображень їх топологічних особливостей видно, що за заданих умов осадження наноструктури

формується у вигляді окремих стовпчатих утворень, які статистично рівномірно покривають поверхню підкладок (рис. 2). Розміри цих наноструктур, у певній мірі, залежать від технологічних факторів їх отримання (температура, час осадження) і змінюються від декілька десятих до десятків нанометрів (рис. 3). При цьому із збільшенням діаметра наноструктур їх висота лінійно зростає (рис.3). Зауважимо, що діаметр наночастинок завжди переважає їх висоту (рис.3). Така ж закономірність характерна і при зміні температури осадження. Так, зокрема, як для області «малих» товщин (10-20 нм, час осадження 15 хв.) (рис. 4 – крива 1), так і для більш «товстих» (25-35 нм, час осадження 30хв) (рис. 4 – крива 2) має місце збільшення висоти наноструктур при підвищенні температури осадження (рис. 4). Відзначений характер геометричних змін у наноструктурах PbTe/SiO₂-Si зумовлює і відповідні залежності середньоквадратичної шорсткості (рис. 5 – крива 1) та товщини (рис. 5 – крива 2) конденсату.

Вище відзначені закономірності підтверджуються гістограмами розподілу висоти (рис. 6,а) і діаметра (рис. 6, б) наноструктур при різних температурах осадження (рис. 6 – криві 1,2,3). Видно, що якщо при $100^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{п}} \leq 200^{\circ}\text{C}$ (час осадження 30 хв) домінують ($\approx 90\%$) наночастинок висотою до 5 нм (рис. 6, а), то вже при $T_{\text{п}} = 300^{\circ}\text{C}$ – 20нм із достатньо значною дисперсією (2-45) нм. Що стосується гістограм розподілу діаметра наночастинок, то слід відзначити зміщення його максимального значення із підвищенням температури осадження в бік більш крупніших структур від 40 нм до 80 нм (рис. 6,б).

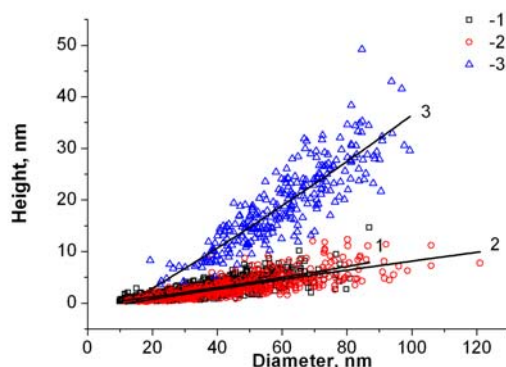


Рис.3. Залежність висоти наноструктур PbTe/SiO₂-Si, від їх діаметра для різних температур ($T_{\text{п}}$, $^{\circ}\text{C}$: 1-100; 2-200; 3-300) і часу осадження 30 хв.

III. Дискусії

Представлені результати АСМ досліджень технології вирощених PbTe/SiO₂-Si, структур, а саме формування на поверхні оксидної плівки майже однакового розміру квантових точок (рис.2), вказують на реалізацію так званого процесу самоорганізації. Рушійною силою утворення

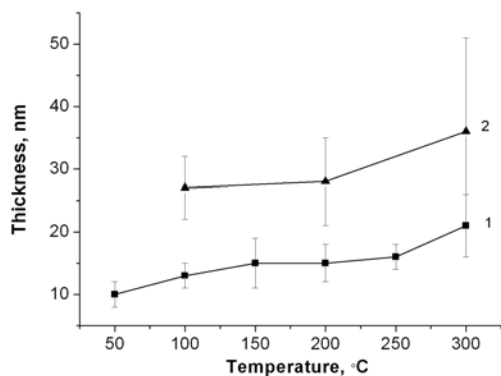


Рис.4. Залежність товщини конденсату PbTe/SiO₂-Si від температури підкладки для різного часу осадження (t, хв.: 1-15, 2-30).

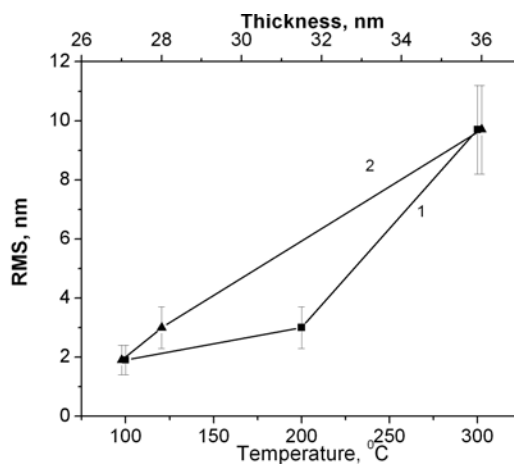
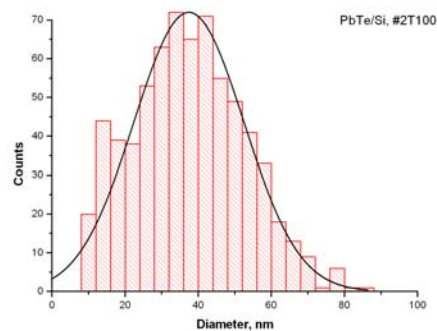
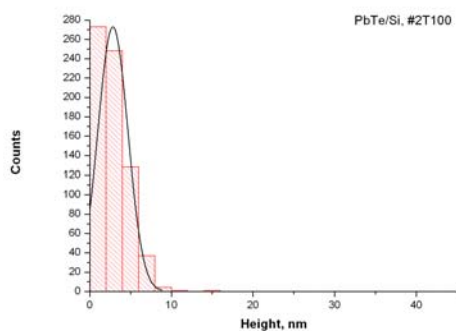
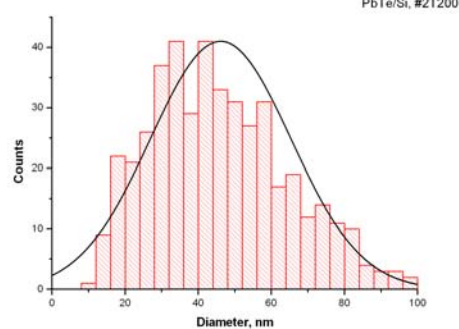
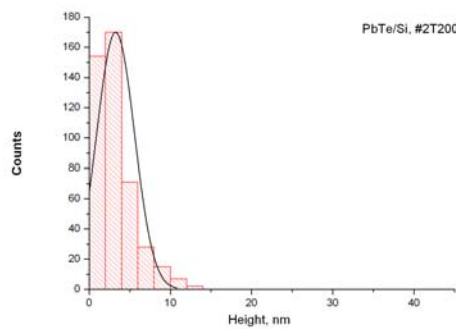


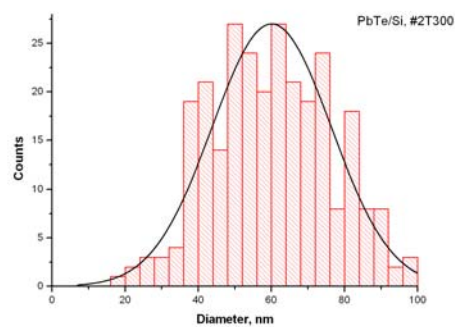
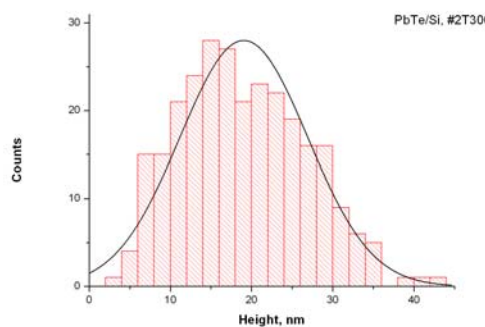
Рис.5. Залежність середньоквадратичної шорсткості наноструктур PbTe/SiO₂-Si від температури (1) та товщини (2) конденсату, час осадження 30 хв.



1



2



3

a

б

Рис. 6. Гістограми розподілу висоти (*a*) та діаметра (*б*) у наноструктурах PbTe/SiO₂-Si при різних температурах осадження (T_п, °C: 1-100; 2-200; 3-300, час осадження 30 хв).

окремих острівців, а не суцільного шару, є прагнення системи до мінімізації енергії. Внаслідок неспівпадання параметрів ґраток і лінійних термічних коефіцієнтів розширення виникають пружні деформації в сендвіч-системі "плівка-підкладка". Якщо у процесі росту конденсований шар залишається суцільним, тоді енергія пружної деформації зростає, а поверхнева енергія не змінюється. При певній товщині (декілька нанометрів) такий стан стає енергетично не вигідним. Мінімуму енергії системи буде відповідати утворення трьохвимірних статистично розміщених окремих острівців (рис.2), у яких основа буде сильно деформована, але деформація зменшується в міру віддалення від підкладки до вершин стовпчастих структур. Ріст таких наноструктур відбувається до таких пір поки на рівні їх вершин напруження повністю не будуть подолані. При подальшому осадженні пари вершини стовпчастих наноструктур будуть центрами зародків нових квантових точок, що і підтверджується результатами АСМ досліджень (рис.2)

Таким чином, можна стверджувати про те, що метод відкритого випаровування у вакуумі, при відповідних технологічних умовах, дає можливість реалізувати самоорганізацію системи квантоворозмірних структур.

Висновки

- [1] Н. Кобаяси. Введение в нанотехнологию. Пер. с японоск.- 2-е изд.-М.:БИНОМ. Лаборатория знаний. 134с. (2008).
- [2] В.Е.Борисенко. Нанoeлектроника – основа информационных систем XXI века// Соросовский образовательный журнал. Физика.5. сс.100-104 (1997)
- [3] В.Н.Белявский. Физические основы полупроводниковой нанoeлектроники// Соросовский образовательный журнал. Физика. 10. сс. 92-98 (1998)
- [4] Д.М.Фреик, М.А.Галушак, Л.Н.Межиловская. Физика и технология полупроводниковых пленок. Вища школа. Львів. 152 с. (1988)
- [5] T.I.Sheremeta, I.V. Prokopenko, P.M.Lytvyn, O.S. Lytvyn, V.M. Vodop'yanov, A.P.Bakhtinov, E.I.Slyn'ko. Peculiarities of the PbTe nanoislet formation on BaF2 substrate at "hot wall" epitaxy method investigated by atomic force microscopy, *Funktional Materials*, 14 № 1, PP.1-6(2007)
- [6] Д.М.Фреїк, І.М.Ліщинський, П.М.Литвин, В.В.Бачук, М.Я.Гриджук, Р.І.Никируй. Топологія поверхні і процеси росту нанокристалічних структур PbTe на сколах слюди-мусковіт// *Фізика і хімія твердого тіла*. 9, 4, сс. 529-535 (2008)

D.M. Freik¹, P.M. Lytvyn², I.M. Lishchynskyu¹, V.V. Bachuk, I.V. Gorichok¹

Nanostructures of Plumbum Telluride Vapour Fase Method Grown on Silicon Monocrystals with Oxide Layer

¹Physical-chemical institute of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine, E-mail: freik@pu.if.ua

²Instytutum Institute for Semiconductor Physics of National Academy of Sciences of Ukraine

The peculiarity of formation nanostructures of lead telluride grown in the open vacuum from a vapour phase on monocrystals of silicon with oxide layer SiO₂-Si by atomic-force microscopy methods have been investigated. It is shown, that self-organizing of quantum-dimensional structures is connected with minimization of elastic deformations in "film-substrate" system.

1. Показано, що при відкритому випаровуванні у вакуумі з парової фази на діелектричних поверхнях оксиду кремнію формуються нанорозмірні структури телуриду свинцю.
2. Розміри окремих квантових точок складають ~40 нм за висотою та ~100 нм у діаметрі і залежать від технологічних факторів вирощування – температури підкладки і часу осадження пари.
3. Нанокристалічні структури статистично рівномірно розміщені на поверхні підкладок внаслідок самоорганізації за рахунок зменшення напружень у приповерхневому шарі.

Робота частково фінансується МОН України (Державний реєстраційний номер 0109U001414)

Фреїк Д.М. – заслужений діяч науки і техніки України, завідувач кафедри фізики і хімії твердого тіла, доктор хімічних наук, професор;
Литвин П.М. – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник;
Ліщинський І.М. – кандидат фізико-математичних наук, доцент;
Бачук В.В. – аспірант;
Горічок І.В. – завідувач лабораторіями кафедри фізики і хімії твердого тіла.