УДК 548.0:515.511

Б.Г. Мицик, Я.П. Кость, Н.М. Дем'янишин
Фізико-механічний інститут НАН України

ФОТОПРУЖНІСТЬ КРИСТАЛІВ ФОСФІДУ ГАЛІЮ

© Мицик Б.Г., Кость Я.П., Дем'янишин Н.М., 2012

B.G. Mytsyk, Ya. P. Kost', N.M. Demyanyshyn

PHOTOELASTICITY OF GALLIUM PHOSPHIDE CRYSTALS

© Mytsyk B.G., Kost'Ya. P., Demyanyshyn N.M., 2012

Для кристалів фосфіду галію (GaP) на основі п'єзооптичних коефіцієнтів π_{im} розраховані пружнооптичні коефіцієнти p_{in} і коефіцієнт акустооптичної якості M_2. Значення M_2 кристалів фосфіду галію більш ніж на порядок перевищує M_2 модельного акустооптичного матеріалу ніобату літію. Отримано співвідношення для вказівних поверхонь пружнооптичного ефекту, на основі яких побудовано відповідні поверхні і знайдено кутові координати їх екстремумів. Максимальна величина M_2, визначена на основі максимуму пружнооптичної поверхні, переважає коефіцієнт M_2 для найбільшого значення пружноптичного коефіцієнта (0,23) на 70%.

Ключові слова: пружнооптичні коефіцієнти, коефіцієнт акустооптичної якості, вказівна поверхня, температурна стабільність, фосфід галію.

For gallium phosphide (GaP) crystals the elasto-optic coefficients p_{in} and the acousto-optic figure of merit M_2 were calculated based on the piezo-optic coefficients π_{im}. Value of M_2 for gallium phosphide crystals is more than an order of magnitude higher than M_2 for the model acousto-optic material of lithium niobate. The relation for the indicative surfaces of elasto-optic effect were obtained based on which corresponding surface were built and angular coordinates of extrema were found as well. The maximum value of M_2 that defined based on the maximum elasto-optic surface were dominated coefficient M_2 for the largest value of the elasto-optic coefficient (0.23) by 70%.

Key words: elasto-optic coefficients, acousto-optic figure of merit, indicative surface, temperature stability, gallium phosphide.

Вступ

Фосфід галію входить до складу важливого класу напівпровідників (клас симетрії $\bar{4}3m$), що знайшли широке застосування як матеріали для електроніки [1]. Вирощують кристал методом Бріджмена в камері з тиском до 100 бар [1]. Дисперсійна залежність показника заломлення вивчена в [2]. Показник заломлення n визначено у спектральному інтервалі 0,5–25 мкм інтерференційним методом, а в інтервалі 0,54–1,7 мкм – методом призми. Для довжини світлової хвилі λ = 632,8 нм показник заломлення становить n = 3,313 (при температурі T = 290 К).

У [3, 4] вивчені фотопружні властивості кристалів GaP. Визначені пружнооптичні коефіцієнти p_{in} (p_{11} = –0,151, p_{12} = –0,082, p_{44} = –0,074) і коефіцієнти акустооптичної якості M_2 для двох швидкостей звукових хвиль ($V_{L[110]} = 6{,}32\times10^3$ м/с, $V_{S[100]} = 4{,}13\times10^3$ м/с). Відповідні значення M_2 становлять $44{,}6\times10^{-15}$ с^3/кг і $24{,}1\times10^{-15}$ с^3/кг. Оскільки за нашими оцінками значення фотопружних параметрів GaP істотно перевищують подані вище значення, то в цій роботі досліджено фотопруж-

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

ність кристалів GaP з врахуванням: 1) непаралельності граней реального зразка; 2) внеску пружності; 3) додаткових геометрій експерименту, що підтверджують достовірність результатів; 4) аналізу анізотропії вказівних поверхонь п'єзо- і пружнооптичного ефектів (ПОЕ) і (ПрОЕ). Методи вивчення фотопружності кристалів відповідно до сформульованих пунктів детально описані в [5–8].

Незважаючи на те, що точне визначення п'єзооптичних коефіцієнтів (ПОК) має самостійне значення під час розрахунку параметрів п'єзооптичних пристроїв [9], для застосувань в акустооптиці важливою є інформація про пружнооптичні коефіцієнти (ПрОК). Тому метою роботи є розрахунок пружно- і акустооптичних характеристик в кристалах фосфіду галію як перспективних матеріалів для акустооптичної модуляції світла.

Пружнооптичні коефіцієнти і акустооптична якість

Для визначення пружнооптичних коефіцієнтів p_{in} використаємо значення абсолютних ПОК π_{im} із [6] і формули взаємозв'язку між коефіцієнтами p_{in} і π_{im}. Із загального виразу $p_{in} = \pi_{im} C_{mn}$ [10] (C_{mn} – коефіцієнти пружної жорсткості) для кристалів, що належать до класу симетрії $\bar{4}3m$ (GaP), отримаємо:

$$\begin{aligned} p_{11} &= \pi_{11} C_{11} + 2\pi_{12} C_{12}, \\ p_{12} &= \pi_{11} C_{12} + \pi_{12}(C_{11} + C_{12}), \\ p_{44} &= \pi_{44} C_{44}. \end{aligned} \qquad (1)$$

Підставляючи в (1) значення $\pi_{11} = -1.44 \pm 0.11$ (7,0 %); $\pi_{12} = -0.19 \pm 0.03$ (15,8 %); $\pi_{44} = -1.36 \pm 0.12$ (8,8%), усе в од. 10^{-12} м^2/Н, із [6] і значення $C_{11} = 14{,}12$; $C_{12} = 6{,}253$; $C_{44} = 7{,}047$, усе в од. 10^{10} Н/м^2, із [11], знайдемо:

$$\begin{aligned} p_{11} &= -0{,}23 \pm 0{,}02 \ (8{,}7\ \%), \\ p_{12} &= -0{,}13 \pm 0{,}01 \ (7{,}7\ \%), \\ p_{44} &= -0{,}10 \pm 0{,}01 \ (10\ \%). \end{aligned} \qquad (2)$$

Розрахунок похибок коефіцієнтів p_{in} виконаний на основі співвідношення для середньоквадратичної похибки: $\Delta(\pi_{im} C_{mn}) = [(\Delta\pi_{im})^2 (C_{mn})^2 + (\pi_{im})^2 (\Delta C_{mn})^2]^{1/2}$. Похибки ΔC_{mn} взяті як 5% від величини C_{mn}. Відзначимо, що у [11] коефіцієнти C_{mn} визначені з меншими похибками. Однак такий недолік статичного експерименту, на основі якого визначено ПОК π_{im} [6], як нерівномірність механічного напруження на зразку (5%) виправдовує використання коефіцієнтів C_{mn} з похибками 5%.

Акустооптичну (АО) якість кристалів GaP встановлено на основі коефіцієнта АО-якості M_2 [12]: $M_2 = n^6 p^2/(\rho V^3)$, де n – показник заломлення, p – пружнооптичний коефіцієнт, ρ – густина кристала, V – швидкість акустичної хвилі.

Розрахуємо M_2 для поздовжньої ультразвукової хвилі, швидкість якої $V_{L[110]} = 6{,}32 \times 10^3$ м/с [13]. Для цього визначимо величину ефективного пружнооптичного коефіцієнта у разі поширення і поляризації звукової хвилі в напрямку [110] і поляризації світла в тому ж напрямку. Цей напрям відповідає осі X' системи координат, повернутої навколо осі Z на кут 45° (рис. 1). Відповідно до закону перетворення компонент тензора четвертого рангу при переході до нової (штрихованої) системи координат [14, 15]

$$p'_{ijkl} = \alpha_{im}\alpha_{jn}\alpha_{kp}\alpha_{lo} p_{mnpo}$$

(тут α_{im}, …, α_{lo} – напрямні косинуси кутів між осями старої і нової систем координат) для поздовжньої компоненти p'_{1111} тензора пружнооптичних коефіцієнтів у штрихованій системі координат отримаємо (з переходом до матричної форми [14] запису компонент тензора ПрОК):

$$p'_{1111} = p'_{11} = 1/2\,(p_{11} + p_{12}) + p_{44}, \qquad (3)$$

де p_{11}, p_{12}, p_{44} – компоненти тензора ПрОК в старій (кристалофізичній) системі координат.

Скориставшись значеннями p_{in} із (2) і співвідношенням (3), знаходимо ефективний коефіцієнт p'_{11}: $p'_{11} = -0{,}280 \pm 0{,}015$ (5,4%). Підставимо це значення p'_{11}, густину кристалів GaP ($\rho = 4{,}3 \times 10^3$

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

кг/м^3 [13]), а також значення швидкості $V_{L[110]}$ та показника заломлення у вираз для визначення M_2. У результаті отримаємо $M_2 = 95{,}5\times10^{-15}$ с^3/кг, що більше ніж у два рази перевищує значення M_2, визначене в [3, 4]. Така різниця обумовлена, переважно, більшими коефіцієнтами p_{11} і p_{12} (2) порівняно із p_{11}, p_{12}, визначеними в [3, 4] (див. вступ).

Звернемо увагу на те, що отримана величина M_2 майже в 14 разів перевищує M_2 модельного АО-матеріалу ніобату літію [4].

Розрахуємо також M_2 для зсувної хвилі, що поширюється в напрямку [100] зі швидкістю $V_{S[100]} = 4{,}13\times10^3$ м/с [13]. У цьому разі ефективність взаємодії акустичної та світлової (із довільною поляризацією) хвиль обумовлена пружнооптичним коефіцієнтом p_{44} (2). Підставивши значення $V_{S[100]}$ і p_{44} у вираз для M_2, отримаємо: $M_2 = 43{,}6\times10^{-15}$ с^3/кг. Це значення теж істотно (майже в два рази) перевищує відповідну величину M_2, наведену в [3, 4, 13].

Отже, АО-якість досліджених кристалів GaP приблизно в два рази перевищують АО-якість кристалів GaP, вивчених в [3, 4]. Ці відмінності, а також відмінності коефіцієнтів π_{im} і p_{in} можна пояснити двома причинами: 1) великою похибкою визначення ПОК і ПрОК у роботах [3, 4] (на жаль, в цих роботах не вказані похибки вивчення ПОЕ і ПрОЕ); 2) залежністю фізичних властивостей кристалів GaP від особливостей технології їх вирощування. Друга причина видається вагомішою, тому що багато фізичних властивостей фосфіду галію істотно залежать від умов їх вирощування [13].

У таблиці наведено ПрОК відомих акустооптичних матеріалів. Бачимо, що як за величиною конкретних ПрОК, так і за сумою головних коефіцієнтів p_{in} (i, n = 1, 2, 3) перевагу має фосфід галію, а коефіцієнт p_{11} для GaP має найбільше абсолютне значення. Неголовний коефіцієнт p_{44} фосфіду галію є співмірний з відповідним p_{in} інших кристалів, внесених в таблицю.

ПрОК різних акустооптичних матеріалів

p_{in}	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{31}	p_{33}	$\Sigma\,\lvert p_{in}\rvert$	p_{14}	p_{41}	p_{44}
GaP	-0,23	-0,13	-0,13	-0,13	-0,23	0,85	–	–	-0,10
$LiNbO_3$	-0,021	0,060	0,172	0,141	0,118	0,512	-0,052	-0,109	0,121
$LiNbO_3$:MgO	-0,015	0,058	0,174	0,155	0,154	0,556	-0,044	-0,149	0,136
$La_3Ga_5SiO_{14}$	0,012	0,026	0,072	0,084	-0,191	0,385	0,013	0,033	0,028

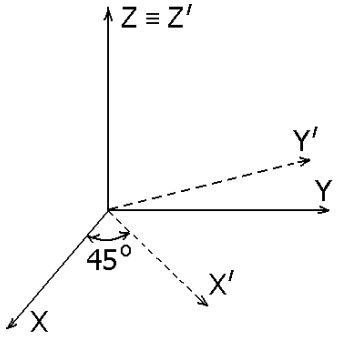


Рис. 1. Кристалофізична X, Y, Z і повернута навколо осі Z на кут 45° штрихована системи координат

Анізотропія пружнооптичного ефекту

Найбільш повно анізотропію фізичної властивості в просторі відображає його вказівна поверхня (ВП), яка математично тотожна закону перетворення цієї фізичної властивості при переході від старої системи координат до нової [7, 8, 14, 15]. В [7, 8] запропонована функція $\delta n\,(\theta, \varphi)$, що описує зміну показника заломлення δn у будь-якому просторовому напрямку (θ, φ) залежно від напрямку (β, α) дії одновісного тиску. Аналогічно записується функція $\delta n\,(\theta, \varphi)$ залежно від напрямку (β, α) деформації ε. Ця функція для кубічних кристалів матиме вигляд:

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

$$-\frac{2}{\varepsilon(\beta,\alpha)n^3}\delta n(\theta,\varphi) = p'_{in} = [p_{11}(\sin^2\beta\sin^2\theta(\cos^2\varphi\cos^2\alpha+\sin^2\varphi\sin^2\alpha)+$$
$$+\cos^2\beta\cos^2\theta)+p_{12}(\sin^2\beta\sin^2\theta(\cos^2\varphi\sin^2\alpha+\sin^2\varphi\cos^2\alpha)+\cos^2\beta\sin^2\theta+ \quad (4)$$
$$+\sin^2\beta\cos^2\theta)+p_{44}(\sin 2\beta\sin 2\theta\cos(\alpha-\varphi)+\sin^2\beta\sin^2\theta\sin 2\alpha\sin 2\varphi)],$$

Отримане співвідношення для ВП ПрОЕ є подібне до співвідношення для ВП ПОЕ з врахуванням таких умов: $\pi_{im} = 2\pi_{ijkl}$ (при m = 4, 5, 6), а $p_{in} = p_{ijfh}$ при будь-яких значеннях індексів.

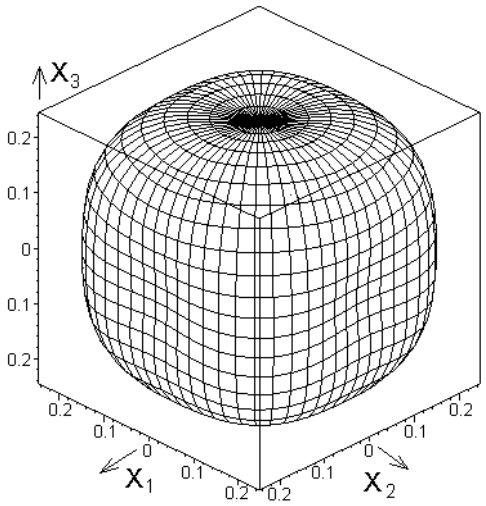
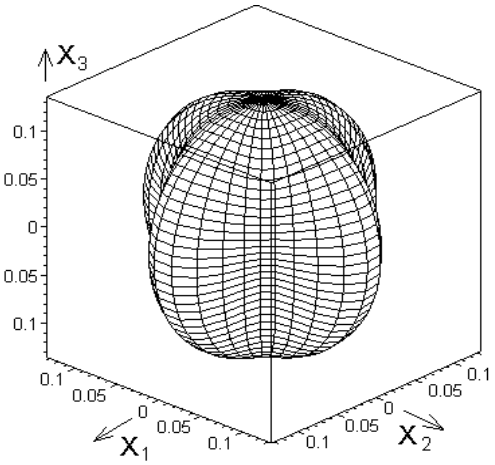
Умови для сферичних координат	Вказівна поверхня
а) **i** ∥ **n:** $\theta = \beta$, $\varphi = \alpha$	
б) **i** ⊥ **n:** $\beta = 90°$, $\alpha = \varphi + 90$	

Рис. 2. Приклади вказівних поверхонь ПрОЕ кристалів GaP

Для того, щоб записати співвідношення, які дозволяють побудувати ВП пружнооптичного ефекту, необхідно підставити в (4) умови, які пов'язують напрям поляризації світла (θ, φ) з напрямком деформації (β, α). Запишемо рівняння вказівної поверхні для поздовжнього ПрОЕ, коли **i** ∥ **n** (n – напрямок деформації, на який вказує другий індекс при коефіцієнті p_{in}). Тоді кути θ, φ пов'язані із кутами β, α рівностями θ = β, φ = α. Підставляючи ці рівності в (4), одержуємо:

$$p'_{11}(\theta,\varphi) = p_{11}(\sin^4\theta(\cos^4\varphi+\sin^4\varphi)+\cos^4\theta)+$$
$$+2p_{12}(\sin^4\theta\sin^2\varphi\cos^2\varphi+\sin^2\theta\cos^2\theta)+p_{44}(\sin^2 2\theta+\sin^4\theta\sin^2 2\varphi). \quad (5)$$

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Для побудови поверхні (5), див. рис. 2 (а) використані значення ПрОК p_{in} із (2). Максимальне значення поздовжнього ПрОЕ $p'_{11}(\theta,\varphi) = -0{,}30$ відповідає кутам $\theta = 54{,}6°$, $\varphi = 45° \pm k\cdot 90°$, де $k = 0$, 1, 2, 3.

Запишемо рівняння ВП для поперечного ПрОЕ, коли напрямки поляризації світла і деформації взаємно перпендикулярні (**i** ⊥ **n**). Цій умові відповідають сферичні координати $\beta = 90°$, $\alpha = \varphi + 90°$. Підставивши вказані значення β і α у (4), одержуємо рівняння поверхні поперечного ПрОЕ:

$$p'_{12} = 2p_{11}\sin^2\theta\sin^2\varphi\cos^2\varphi + p_{12}(\sin^2\theta(\cos^4\varphi + \sin^4\varphi) + \cos^2\theta) - p_{44}\sin^2\theta\sin^2 2\theta. \quad (6)$$

Максимальний поперечний пружнооптичний ефект ($p'_{12} = -0{,}13$) цієї поверхні (рис. 2 (б)) існує для довільних кутів θ при $\varphi = 0° \pm k\cdot 90°$, $k = 0$, 1, 2, 3. Тобто в площинах, перпендикулярних напрямкам, які задаються вказаними кутами φ, поверхня (6) має кругові перерізи.

Якщо максимальне значення $p'_{11}(\theta,\varphi)$ підставити у вираз для визначення коефіцієнта АО-якості M_2, то отримаємо: $M_2 = 109{,}5\times10^{-15}$ с^3/кг. Ця величина M_2, визначена на основі максимуму ВП, переважає коефіцієнт M_2 для найбільшого значення ПрОК (0,23) на 70%. Тобто вивчення анізотропії ПрОЕ шляхом побудови поверхонь просторового розподілу ПрОЕ та аналіз цих поверхонь на екстремальні значення дозволяють знайти кутові умови (α, β, θ, φ), яким відповідає максимальний ПрОЕ і, відповідно, максимальна акустооптична ефективність кристалів.

Температурна стабільність ПОЕ в кристалах GaP

Для оцінки температурної стабільності пружно- та акустооптичного ефектів у кристалах фосфіду галію високоточним методом, запропонованим в [16], встановлено температурні залежності ПОК різниці ходу π^{o}_{km}.

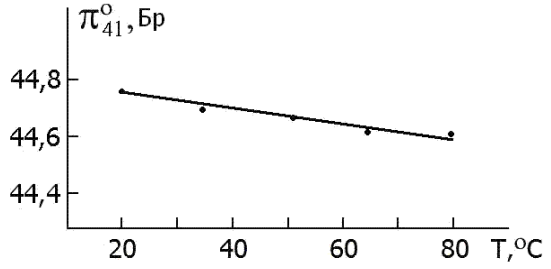


Рис. 3. Приклад температурної залежності ПОК різниці ходу для кристалів GaP

Температурна зміна ПОК π^{o}_{km} кристалів фосфіду галію незначна (рис. 3). Наприклад, найбільший ПОК різниці ходу π^{o}_{41} зменшується на 0,065% при зростанні температури на 10 град. Звернемо увагу на те, що відхилення експериментальних точок від прямої, що апроксимує залежність π^{o}_{41} (T), не перевищує 0,45% для ПОК π^{o}_{41}. Вказане відхилення свідчить, що похибки використаної методики вивчення залежностей π^{o}_{km} (T) не перевищують 0,5%. Це пов'язано з тим, що зразок в установці не перемонтовують, тому не змінюються точка падіння променя на зразок та неоднорідність механічного напруження в об'ємі зразка.

Підкреслимо, що за температурною стабільністю ПОЕ фосфід галію переважає кристали $La_3Ga_5SiO_{14}$ у ~2 рази, а $LiNbO_3$ [16] аж у ~4 рази. Температурна залежність коефіцієнтів пружної жорсткості є також незначна [17]: в інтервалі температур 5–300 K пружний коефіцієнт C_{11} зменшується на 1,7%, C_{12} – на 1,9% і C_{44} – на 1,6% відповідно. Зважаючи на високу температурну стабільність п'єзооптичних і пружних характеристик фосфіду галію, слід очікувати таку ж високу стабільність ПрОК та коефіцієнта акустооптичної якості M_2.

Висновки

Розглянуто ПрОЕ кристалів фосфіду галію, що належать до класу симетрії $\bar{4}3m$. На основі абсолютних ПОК π_{im} розраховані пружнооптичні коефіцієнти p_{in} і коефіцієнт акустооптичної якості

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

M_2 для двох геометрій взаємодії акустичної та оптичної хвиль. Проведено порівняння пружнооптичних коефіцієнтів з відомими акустооптичними матеріалами. Максимальний коефіцієнт акустооптичної якості M_2 кристалів GaP більш ніж на порядок перевищує відповідне значення M_2 для модельного АО-матеріалу ніобату літію.

Одержано аналітичні вирази для вказівних поверхонь ПрОЕ, які описують просторову анізотропію пружнооптичного ефекту. На основі заповненої матриці ПрОК кристалів GaP побудовано відповідні поверхні і знайдено кутові параметри просторової орієнтації максимумів ПрОЕ відносно кристалофізичних осей. Показано, що найбільше значення ПрОЕ для кристалів GaP досягає величини –0,30 при азимутальному та радіальному кутах 54,6° та 45° ± k·90° відповідно (k = 0, 1, 2, 3). Описана методика аналізу просторової анізотропії ПрОЕ дозволяє підвищити ефективність акустооптичних комірок. Висока температурна стабільність ПОК і коефіцієнтів пружної жорсткості кристалів фосфіду галію свідчить про таку ж стабільність його пружнооптичних і акустооптичних характеристик.

1. Govida Rajan K., Chandra Shekar N. V., Rao G. V. N., et al. // Bull. Mater. Sci. – 1988. – 11. – P.269-275. 2. Yas'kov D. A., Pikhtin A. N. // Mat. Res. Bull. – 1969. – 4. – P.781–788. 3. Canal F., Grimsditch M., Cardona M. // Solid State Commun. – 1979. – 29. – P.523–526. 4. Dixon R. W. // J. Appl. Phys. – 1967. – 38. – P.5149–5153. 5. Mytsyk B.G., Andrushchak A.S., Demyanyshyn N.M., Kost' Ya.P. et al. // Appl. Opt. – 2009. – 48. – P.1904–1911. 6. Mytsyk B.G., Andrushchak A.S. and Kost' Ya.P. // Crystallography Reports. – 2012. – 57. – P.124–130. 7. Дем'янишин Н. М., Мицик Б. Г., Калиняк Б. М. // УФЖ. – 2005. – 50. – С.521–526. 8. Мыцык Б. Г., Демьянишин Н. М. // Кристаллография. – 2006. – 51. – С.696–703. 9. А. с. 1204979 СССР. / М. И. Ермохин, В. А. Ширяев (СССР); опубл. 1986, Бюл. № 2. 10. Нарасимхамурти Т.С. Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов. – М., 1984. 11. Polian A., Grimsditch M. // Phys. Rev. B. – 1999. – 60. – P.1468–1470. 12. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. – М., 1985. 13. Акустические кристаллы. Справочник / Под ред. М.П.Шаскольской. – М., 1982. 14. Най Дж. Физические свойства кристаллов. – М., 1967. 15. Сиротин Ю. И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. – М., 1979. 16. Мицик Б. Г., Андрущак А. С., Кость Я. П., Сольський І. М. // Журн. фіз. досл. – 2008. – 12. – С.3702-5. 17. Boyle W. F. , Sladek R. J. // Phys. Rev. B. – 1975. – 11. – P.2933–2940.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua