

Й.М. СТАХІРА, Р.Й. СТАХІРА

Львівський національний університет ім. Івана Франка
(Вул. Драгоманова 50, Львів 79005; e-mail: stakhira@electronics.lnu.edu.ua)

СТРУКТУРНІ ЗМІНИ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОННИХ СТАНІВ ШАРУВАТОГО КРИСТАЛА, ДЕФОРМОВАНОГО ЗСУВОМ ШАРІВ

УДК 621.315.592

Проаналізовано зміни структури електронних станів шаруватих кристалів, які зумовлені деформацією кристала, що приводить до відносного зсуву шарів. Показано, що така деформація силою, яка має гармонічну складову низької частоти, приводить до дискретної зміни періоду ґратки і часткового зняття виродження енергій електронних станів. Просторово-часове деформаційне збурення приводить до зняття виродження енергій, хвильові вектори яких мають компоненту, нормальну до площини шарів і рівну компоненті періоду оберненої ґратки деформованого кристала у цьому напрямку, і розриву функціональної залежності енергії від такої компоненти. У межах окремого періоду зняття виродження енергії відбувається в різні ексклюзивні моменти часу, в які період ґратки у напрямку зсуву є кратним величинам зсуву. Енергії цього інтервалу можуть бути ідентифіковані радіотехнічними методами за моментами часу різкої зміни густини електронних станів.

Ключові слова: п'єзофотопровідність, шаруваті кристали, деформація зсуву, зміна періодичності, зміщення шарів.

1. Вступ

Наявність у кристалічній структурі шаруватих кристалів шарів як структурних елементів зумовлює певні особливості електронних властивостей цих матеріалів [1, 2]. Вони наглядно проявляються у явищах електронного переносу значною анізотропією і польовою залежністю, в оптичних властивостях структурою спектрів міжзонного і фонного поглинання. Роль шарів у формуванні особливостей електронних властивостей, як структурних елементів, що породжують адекватну просторову залежність потенціалу, залежить від структури шарів та взаємодії між ними. Окремий шар у цих кристалах може мати складну багатопланову структуру, яка формується інтенсивною міжатомною взаємодією, що приводить до певної

замкненості шару. Ця властивість проявляється у залишковій взаємодії між сусідніми шарами і збереженню їх структури у широкому діапазоні зовнішніх впливів. Вона проявляється у результатах дії на шаруваті кристали зовнішніх деформаційних сил [3].

Характерні зміни у системі електронних станів шаруватих кристалів, які виникають унаслідок деформації цих матеріалів, зумовлені змінами взаємодії між шарами у результаті наближення і відносного зсуву між шарами [4, 5]. Ця робота присвячена аналізу змін у структурі електронних станів та їх динаміки, які зумовлені деформацією, що реалізується у вигляді відносного зсуву між сусідніми шарами. Вона є продовженням робіт [6–8], у яких запропоновано механізм формування спектрів складової фотопровідності, яка пропорційна добутку інтенсивності світла на механічне напруже-

© Й.М. СТАХІРА, Р.Й. СТАХІРА, 2017

ння. Знайдена у цих роботах суттєва немоно-тонна залежність різниці фаз струму п'єзофото-провідності і деформуючої сили від енергій між-зонних переходів вимагає з'ясування причини її реалізації.

2. Період потенціального збурення деформованого зсувом шаруватого кристала

Деформація кристалів, змінюючи рівноважні координати частинок, приводить до певних змін кристалічної структури і відповідних змін потенціального поля в кристалі. У випадку шаруватих кристалів їх деформація може реалізуватись відносним зсувом між сусідніми шарами без зміни їх структури, що приводить до порушення періодичності ґратки і зміни взаємодії між сусідніми шарами. Така деформація здійснює переміщення у заданому напрямку на однакову відстань цілої системи значних кристалічних фрагментів, що проявляється у координатній залежності потенціалу. Як правило, зсув шарів досягається незначними зусиллями, що є підставою оцінювати такі зміни потенціалу як збурення. Основною контрольованою величиною такого збурення є його періодичність.

Розглянемо структурні зміни шаруватого кристала, який піддається дії сили, що є сумою сталої F_c та гармонічної $F_s \sin \Omega t$ (низької частоти) складових. Якщо деформуюча сила має складову у площині шару, то наслідком її дії може бути наближення і відносний зсув між сусідніми шарами. Обмежимося випадком, коли деформуюча сила не суттєво змінює структуру шару і відстань між шарами. Деформація кристала такою силою не змінює періодичність ґратки у площині шарів (x, y) , але приводить до зміни періоду у напрямку, нормальному до їх площин. Унаслідок збереження ідентичності структури в процесі деформації зсуву періодичність у цьому напрямку може змінюватись тільки дискретно на мінімальну величину, рівну товщині шару d_z^0 . Ця обставина приводить до складної залежності періоду ґратки d_z деформованого кристала від величини відносного зсуву L , який змінюється неперервно.

Якщо зсув шарів відбувається у напрямку, в якому період ґратки у площині шару рівний d_{xy} ,

то ідентичне просторове положення у кристалічній структурі двох найближчих шарів досягається у випадку рівності сумарного зсуву між ними цілому найменшому числу періодів d_{xy} . Необхідною умовою виконання цієї рівності є кратність величини Nd_{xy} відносному зсуву L , яка рівна числу n зміщених шарів:

$$Nd_{xy} = nL. \quad (1)$$

Величина N у цій рівності є найменше ціле число, за якого n є цілим числом для заданих величин d_{xy} і L . Таким чином, період ґратки деформованого кристала у напрямку, нормальному до площини шарів, визначається числом зміщених шарів $d_z = nd_z^0$. У випадку кратності періоду d_{xy} величині зсуву, що досягається для зсувів $L \leq \frac{d_{xy}}{2}$, реалізуються невеликі значення n і відповідно найменші величини періодів d_z .

Величина періоду d_z деформованого кристала, і відповідного йому деформаційного збурення потенціалу може змінюватись на товщину шару додатковим зсувом. Якщо період d_z зумовлений зсувом L_c , то його збільшення на товщину одного шару досягається зменшенням зсуву на величину $\Delta L_+ = -L_c \frac{1}{n+1}$. Зменшення цього періоду здійснюється збільшенням зсуву L_c на величину $\Delta L_- = L_c \frac{1}{n-1}$. Зменшення періоду d_z на ціле число p одиниць шарів досягається збільшенням зсуву L_c додатковим зсувом $\Delta L_- = L_c \frac{p}{n-p}$, а збільшення періоду на p число шарів досягається зменшенням зсуву L_c на величину $\Delta L_+ = -L_c \frac{p}{n+p}$, за умови $p \leq n - 1$.

Отже, величина періоду деформаційного збурення потенціалу визначається не тільки величиною зсуву, а і співвідношенням його величини періоду d_{xy} . Кратність величини Nd_{xy} зсуву L є необхідною умовою збереження структури шарів у процесах зміни періодичності потенціального збурення. Залежність періоду збурення від зсуву задається кратністю n , яка визначається величинами зсуву і періоду ґратки Nd_{xy} , у якому здійснюється зсув. Кратність періоду d_{xy} величині зсуву рівна числу зміщених шарів, сумарна товщина яких рівна періоду d_z кристала у нормальному до площини шару напрямку. Зміна кратності на одиницю відповідає зміні величини цього періоду на товщину одного шару. Нижче обмежимося зсувами $L \leq \frac{d_{xy}}{2}$, які забезпечують малі значення кратності.

3. Часова залежність

деформаційного збурення потенціалу

Особливості процесів формування періодів потенціального збурення відносним зсувом шарів суттєво проявляються у часовій залежності їх величин. У випадку шаруватих кристалів, в яких час релаксації механічного напруження є достатньо малим, а частота Ω гармонічної складової є така, що $\frac{2\pi}{\Omega} \gg \tau$, основною причиною часових змін деформаційного збурення є залежність зсуву між шарами від часу. Гармонічна складова сили приводить до залежності зсуву L від часу, $L = L_c + L_s \sin \Omega t$ і його зміни у межах різниці зсувів $L_c \pm L_s$, зумовлених сталою складовою сили L_c і амплітудою гармонічної складової L_s . У межах цього інтервалу величина зсуву L змінюється неперервно зростанням або зменшенням зсуву залежно від фази деформуєчої сили, синфазно з фазою гармоніки. За певних умов протягом часу, рівному періоду гармонічної складової, у певні моменти часу t_p можуть реалізуватись зсуви, по відношенню до яких період d_{xy} є кратним їх величині, що приводить до часової залежності мінімальної кратності n і періоду збурення d_z .

Моменти часу, в які наступає зміна кратності періоду d_{xy} величині зсуву, можуть реалізуватись виключно внаслідок додаткових зсувів ΔL , роль яких у даному випадку відіграє гармонічна частина зсуву. Гармонічна складова зсуву, як додатковий зсув до L_c заданої, фіксованої у часі величини, може приводити до його зменшення або збільшення на ціле число p -одиниць, в залежності від фази гармоніки. У випадках гармонічних приростів $\Delta L = L_s \sin \Omega t$, які приводять до зменшення L_c на мінімальну величину $\Delta L_+ = -L_c \frac{p}{n+p}$, реалізується зростання кратності n до $n+p$. Якщо гармонічна складова приводить до збільшення зсуву L_c на $\Delta L_- = L_c \frac{p}{n-p}$, то здійснюється зменшення кратності n до $n-p$, де $p = 1, 2, \dots$.

Безпосередньою причиною часових змін періоду d_z деформованого кристала є гармонічна складова сумарного зсуву, яка відіграє роль додаткових зсувів по відношенню до заданого сталого зсуву L_c . Гармонічна складова змінюючи сумарний зсув від $L_c - L_s$ до $L_c + L_s$, створює сумарні зсуви, які відповідають кратності періоду d_{xy} . Кожному такому зсуву $L_p = L_c + L_s \sin \Omega t_p$ відповідає ексклюзивна кратність n_p і момент часу її створення протягом періоду гармоніки.

Кратність $n = \frac{d_{xy}}{L_c}$, якій відповідає заданий сталий зсув L_c , може бути зменшена гармонічною складовою зсуву на p -одиниць, якщо її величини у момент часу t_p^- будуть рівні зсуву ΔL_- :

$$L_s \sin \Omega t_p^- = L_c \frac{p}{n-p}, \quad (2)$$

або збільшена на p -одиниць у випадку рівності

$$L_s \sin \Omega t_p^+ = L_c \frac{p}{n+p}, \quad (3)$$

що реалізується у відповідних інтервалах гармоніки.

Внаслідок неперервного зростання сумарного зсуву L , яке відбувається у межах інтервалу фази гармоніки $0 \leq \varphi_1 \leq \pi/2$, реалізується дискретне зменшення кратності, яке здійснюється раптово у моменти часу:

$$t_p^- = \frac{1}{\Omega} \arcsin \left(R \frac{p}{n-p} \right), \quad (4)$$

відрахованих від початку відліку часу $\Omega t_0 = 0$, $R = \frac{L_s}{L_c}$. Максимальне число p_1 , на яке може змінитись кратність p_1 -разів, відповідає сумарному зсуву $L = L_c + L_s$, рівне найбільшому цілому числу дробу $p_1 = \frac{n}{R+1}$. Число p_1 -моментів часу t_p^- , у які реалізується зміна кратності, залежить від її величини у момент часу $t_p^- = 0$. Не підлягає зміна кратності $n = 2$ у сторону зменшення довільним зсувом.

Протягом інтервалів часу, які відповідають фазі гармоніки у межах $\pi/2 \leq \varphi_2 \leq \pi$, відбувається дискретне зменшення на цілі числа зменшеної до $n-p$ дискретності внаслідок зменшення гармонічним зсувом сумарного зсуву від $L_c \frac{n}{n-p_1}$ до L_c . Моменти часу t_p^+ , у які відбувається зміна розглядуваної кратності на одиницю, реалізуються у моменти досягнення гармонічної складової величин, рівних відповідним приростам ΔL_+ , які збільшують кратність

$$t_p^+ = \frac{\pi}{2\Omega} + \frac{1}{\Omega} \arcsin \left(R \frac{p}{n-p_1+p} \right). \quad (5)$$

Аналогічні зміни кратності n відбуваються у другій половині фази гармоніки. Внаслідок зменшення з часом сумарного зсуву у межах інтервалу фази гармоніки від π до $\frac{3}{2}\pi$ різко зростає кратність до $n+p_1$. Максимальне число p_1 , на яке

зростає кратність, рівне найбільшому цілому числу дробу $p_1 = \frac{Rn}{1-R}$. Моменти часу t_p^+ , у які здійснюється кратність, наступають у випадку рівності гармонічної складової зсуву одному з природств ΔL_+ , який приводить до збільшення кратності на одиницю.

Протягом часу, якому відповідає інтервал фази φ_4 від $\frac{3}{2}\pi$ до 2π унаслідок зростання зсуву від $L_c \frac{n}{n+p_1}$ до L_c , реалізується зменшення кратності від $n + p_1$ до n у моменти часу t_p^- , які підлягають до аналогічної до (5) залежності від додаткових зсувів ΔL_- .

Таким чином, гармонічна складова зсувів між шарами приводить до залежності від часу компоненти періоду кристалічної ґратки, нормальної до площини шарів. Залежність від часу періоду d_z у цьому напрямку здійснюється дискретними зсувами строго заданих величин шляхом раптових змін його величини на товщину шару у моменти часу, які відповідають величинам фази гармонічних складових цих зсувів.

Протягом інтервалів часу, за які здійснюються зміни періоду на товщину одного шару, період ґратки деформованого кристала залишається сталим. Тривалість цих інтервалів, які формують часову залежність періоду d_z , суттєво змінюється у межах фази гармоніки φ : $0 - \pi$ і $\pi - 2\pi$.

Залежність компоненти d_z періоду кристалічної ґратки від часу є складною, дискретною не гармонічною періодичною функцією, у якій умовно зберігається протифазна тенденція по відношенню до фази гармоніки. На рисунку наведена схема часових змін для конкретного випадку, в якому $L_c = 0,25$, $L_s = \frac{1}{2}0,25$, $d_{xy} = 1$.

4. Деформаційні зміни структури електронних станів

Деформація шаруватого кристала приводить до певних змін кристалічної структури, наслідком яких є відповідні зміни координатної залежності потенціалу кристалічного поля. У випадку деформації, яка приводить до відносного зсуву сусідніх шарів, відбувається переміщення на відносно значні відстані мікроскопічних фрагментів кристалічної структури, що може привести до суттєвих змін структури електронних станів. Така деформація шаруватого кристала, як правило, досягається незначними зовнішніми зусиллями та може

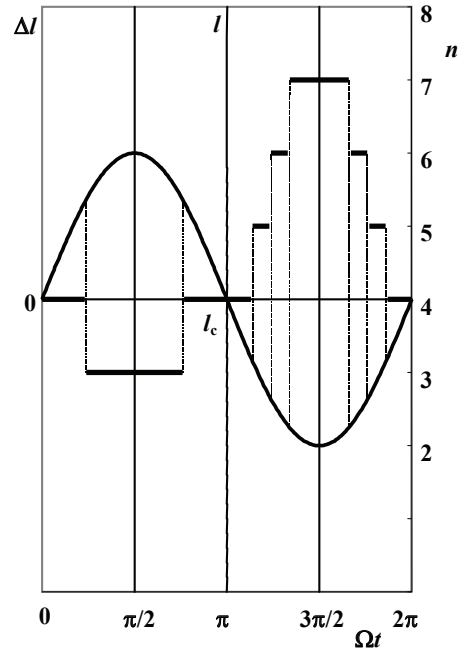


Схема часових змін для випадку $L_c = 0,25$, $L_s = \frac{1}{2}0,25$, $d_{xy} = 1$

розглядатись як причина виникнення деформаційного збурення потенціалу.

Деформаційне збурення потенціалу формується відносним зсувом між шарами і суттєвими змінами взаємодії між ними. Зсув між шарами приводить до зміни відстані між ідентичними структурними елементами сусідніх шарів і, відповідно, до зміни взаємодії між ними та її залежності від структури шару. Зміни відносним зсувом слабкої взаємодії між шарами при збереженні їх структури, які залишають деформований кристал шаруватим, приводять до змін потенціалу, які розглядаються як збурення. Якщо деформуюча сила має гармонічну складову низької частоти, яка забезпечує квазістаціонарний режим процесу, то період такого збурення може залежати від зсуву між сусідніми шарами і бути складною дискретною функцією часу.

Відносний зсув між сусідніми шарами відбувається синхронно з фазою гармоніки, а зміни періоду збурення реалізуються тільки при фіксованих дискретних величинах зсуву, які виникають у відповідних заданих моментах часу протягом періоду гармоніки. Така часова залежність збурення дозволяє розглядати його вплив на еле-

ктронні стани в адиабатичному наближенні теорії збурень. У межах цього наближення гармонічна складова збурення розглядається як повільне, на фоні якої короткочасові, у порівнянні з періодом гармоніки, інтервали часу зміни періодичності збурення як швидка складова часової залежності збурення.

Деформація кристала сумарною гармонічною силою приводить до зсуву шарів, який реалізується синфазно з фазою гармонічної складової сили. Синфазність цієї гармоніки та часової залежності періоду деформаційного збурення, втрачається внаслідок складної, негармонічної залежності періоду збурення від часу.

Зміни періоду збурення, яке здійснюється шляхом раптових приростів його величини, реалізуються тільки у моменти часу, в які зсуви набувають величини, по відношенню до яких період зсуву d_{xy} є кратним їх величині. Зокрема, період збурення, який створений сталою складовою сили $d_{zc} = \frac{d_{xy}}{L_c} d_z^0 = n_c d_z^0$, зменшується гармонічною складовою внаслідок збільшення сумарного зсуву в інтервалі часу від $\Omega t_0 = 0$ до $\Omega t_1 = \pi$ і збільшується у межах інтервалу часу, який відповідає різниці фаз гармоніки від π до 2π . По відношенню до моменту відліку часу $t_0 = 0$, при якому зсув рівний L_c , зміна періоду деформаційного збурення відбувається у протифазі до фази гармоніки. Таким чином, деформація зсуву шарів приводить до утворення системи короткочасових Брегівських площин, які збігаються з площинами шарів, а їх енергетичне положення і час виникнення задаються компонентою періоду оберненої ґратки $q = \frac{2\pi}{d_z}$. Внаслідок дифракції Блохівських хвиль на цих площинах у відповідні моменти часу здійснюються розриви енергетичної залежності електронних станів $\varepsilon(\mathbf{k})$ для всіх хвильових векторів \mathbf{k} , які мають k_z компоненту, рівну компоненті вектора $q = \frac{2\pi}{d_z}$. Співмірність величини q і k_z -компонент хвильових векторів зони Брілюєна допускає реалізацію таких розривів енергій $\varepsilon(\mathbf{k})$ в усьому інтервалі зони провідності. Для заданого, фіксованого у часі, періоду збурення d_z , розриви енергетичних залежностей відбуваються одночасно в усіх енергіях, у яких хвильові вектори мають k_z -компоненту рівну $k_z = \frac{2\pi}{d_z} m$, де $m = 1, 2, 3, \dots$. У результаті розривів залежностей енергій від хвильового вектора $\varepsilon(\mathbf{k})$ в околі цих енергій різко змінюється густина станів, що приводить до від-

повідних змін електронних властивостей кристала. Енергетичні смуги, які виникають у результаті Брегівської дифракції Блохівських хвиль формуються у моменти часу, які однозначно відповідають величинам компоненти q і можуть бути ідентифіковані за його величиною.

До адекватних змін структури електронних станів недеформованого кристала приводять процеси зняття виродження енергій $\varepsilon(\mathbf{k})$ деформаційним збуренням. Унаслідок змін координатної залежності потенціалу і його симетрії зсувом шарів знімається виродження енергій, котрі залежать від хвильових векторів, які мають k_z -компоненту, рівну компоненті вектора збурення q . Зняття виродження станів для заданого вектора q відбувається одночасно для всіх енергій, що мають $k_z = q$ у відповідний момент часу. Зняття виродження енергетичних станів приводить до розриву залежності енергій від хвильових векторів, які мають k_z -компоненту, рівну q , і відповідних змін електронних властивостей. Динаміка зняття виродження і його вплив на структуру електронних станів повністю збігаються з результатами Брегівської дифракції Блохівських хвиль.

Деформація зсуву шарів зберігає структуру і основні фізичні параметри кристала за виключенням зміни компоненти періоду кристалічної ґратки у напрямку, нормальному до площини шарів, яке відбувається дискретно на товщину одного шару. Така модель дозволяє порівнювати зміни у структурі електронних станів, які виникають у кристалах, d_z -компоненти періодів ґратки яких відрізняється у ціле число разів. За умови незмінності об'єму деформованого кристала така деформація приводить до кратних змін об'ємів елементарних комірок оберненої ґратки і відповідних змін числа допустимих значень хвильових векторів. Кожному фіксованому періоду деформованого кристала відповідає ексклюзивний просторовий розподіл структурних одиниць і відповідна залежність від структури шарів та взаємодія між ними. Серед різного роду змін у структурі електронних станів, спровокованих зсувом шарів, розрив функціональної залежності енергій від хвильового вектора і час його реалізації залишаються незмінними для розглядуваної моделі деформованого кристала.

Експериментально структурні зміни енергій електронних станів, які зумовлені зсувом шарів, кон-

трольованими деформуючими силами, можуть бути встановлені за часовою залежністю протягом періоду гармоніки коефіцієнта поглинання монохроматичного світла, яке відіграє роль монітора. В роботах [7, 8] такі зміни оцінено за спектральною залежністю зсуву фази складової електропровідності, пропорційної добутку інтенсивності світла на механічне напруження, відносно фази модулюючої сили.

5. Висновки

Деформація шаруватого кристала, яка реалізується у вигляді відносного зсуву між сусідніми шарами, приводить до зміни складової періоду кристалічної ґратки у напрямку, перпендикулярному до площини шарів. Зміна його періоду відбувається на ціле число товщин шару ексклюзивними величинами зсувів, по відношенню до яких період ґратки у напрямку зсуву є кратним їх величині. Зсуви, які здійснені силою, що має гармонічну складову низької частоти, приводять до негармонічної дискретної залежності періоду від часу протягом періоду гармоніки. Моменти часу зміни періодів однозначно відповідають величинам зсуву і кратності періоду в напрямку зсуву.

Просторово-часове деформаційне збурення потенціалу, яке зумовлене зсувом шарів, розглядуване в адіабатичному наближенні, приводить до часткового зняття виродження енергетичних станів і розривів залежності енергій від компоненти хвильового вектора, нормальної до площини шарів. Часткове зняття виродження енергій електронних станів реалізується у моменти часу t_p , у які компоненти хвильового вектора k_z рівні

$$k_z = \frac{2\pi}{d_z^0} \frac{L_c + L_s \sin \Omega t_p}{d_{xy}}. \quad (6)$$

Отже, енергія, яка підлягає зняттю виродження, може бути ідентифікована за моментами часу його реалізації. Такі моменти збігаються з моментами різкої зміни електронних властивостей кристала, котрі зумовлені суттєвими змінами густини електронних станів в околі енергій виродження.

Таким чином, енергії електронних станів, виродження яких частково знімається контрольованим деформаційним збуренням, можуть бути

ідентифіковані за моментами часу його реалізації. Зняття виродження конкретного енергетичного стану, яке здійснюється в ексклюзивний момент часу, супроводжується різкою зміною густини електронних станів в околі цієї енергії. Відповідно, момент реалізації зняття виродження може бути ідентифікований по зміні електронних властивостей.

В роботах [8, 9] енергетична залежність моментів часу зняття виродження енергії в електронних станах шаруватих кристалів In_4Se_3 оцінена за спектральною залежністю зсуву фаз гармоніки і негармонічної складової струму п'єзофотопровідності. Структурні зміни у системі електронних станів шаруватих кристалів, котрі зумовлені деформацією зсуву шарів, можуть знайти ефективне застосування. Зокрема, цей ефект може бути використаний як спосіб аналізу спектра світла радіотехнічними методами, без використання диспергуючих елементів [10].

1. Г.Л. Беленький, Э.Ю. Салаев, Р.А. Сулейманов. Деформационные явления в слоистых кристаллах. *Успехи физических наук* **155**, 89 (1988).
2. D.M. Bercha, K. Rushchanskii, I.V. Slipukhina, I.V. Bercha. Manifestation of deformation effect in band spectra in crystals with inhomogeneous bonding. *Cond. Matt. Phys.* **6**, 229 (2003).
3. М.С. Бродин, И.В. Блонский. *Экситонные процессы в слоистых кристаллах* (Наукова думка, 1986).
4. Р.Й. Стахіра, Г.Д. Данилюк, Я.М. Бужук. Спектри п'єзофотопровідності та рентгеноструктурні дослідження шаруватих структур. *Нові технології* **27** (1), 62 (2010).
5. I.V. Slipukhina, L.Yu. Harhalic, I.V. Bercha. Вплив зсувових деформацій та домішок впровадження на закони дисперсії носіїв струму в шаруватих кристалах In_4Se_3 . *Науковий Вісник Ужгородського університету* **19**, 14 (2006).
6. Й.М. Стахіра, Р.Й. Стахіра. Спектри п'єзофотопровідності в монополярних напівпровідниках. *Жур. Фіз. Досл.* **2** (3), 376 (1998).
7. J.M. Stakhira, R.J. Stakhira, V.P. Savchyn. Concentration mechanism of piezophotoconductivity. *Ukr. J. Phys.* **50** (6), 588 (2005).
8. Y. Stakhira, R. Stakhira. Structure of spectra of time-dependent piezophotoconductivity. *J. Phys. Studies* **11** (2), 215 (2007).
9. Y. Stakhira, R. Stakhira. Mechanism of non-stationary piezophotoconductivity spectrum formation in layered crystals. *Ukr. J. Phys.* **58** (12), 1159 (2013).
10. Й.М. Стахіра, Р.Й. Стахіра, В.М. Белюх. Патент України № 108674 (2016).

Одержано 28.07.17

Y.M. Stakhira, R.Y. Stakhira

STRUCTURAL CHANGES IN THE SYSTEM
OF ELECTRON STATES IN A SHEAR-DEFORMED
LAYERED CRYSTAL

S u m m a r y

Changes in the structure of electron states in a layered crystal induced by a deformation giving rise to a relative shift of the layers have been analyzed. It is shown that if the deformation force has a low-frequency harmonic component, the period of the deformed lattice changes discretely, and the energy degeneration of the electron states becomes partially eliminated. A

space-time deformation removes the energy degeneration for states, whose wave vectors have a component normal to the layer plane and equal to the component of the reciprocal lattice period in the deformed crystal along this direction. It also generates a discontinuity in the functional dependence of the energy on this component. Within a separate time period of perturbation, the energy degeneration becomes eliminated at different time moments, at which the lattice period along the shear direction is a multiple of the shift. The energies within this time interval can be identified with the use of a radio equipment, by detecting the time moments, when the density of electronic states drastically changes.