

НЕНАПРУЖЕНІ КОНФІГУРАЦІЇ ДОМЕННИХ СТРУКТУР СЕГНЕТОЕЛАСТИЧНИХ ФАЗ ТВЕРДОТІЛЬНОГО ІОННОГО ЕЛЕКТРОЛІТУ $\text{La}_{0,95}\text{Sr}_{0,05}\text{Ga}_{0,9}\text{Mg}_{0,1}\text{O}_{2,925}$

© Савицький Д.І., Татарин Т.Р., 2006

Можливі ненапружені конфігурації доменних структур, що складаються з чотирьох орієнтаційних станів, знайдені з умови рівності одиничній матриці добутку відповідних матриць зв'язку, що характеризують просторовий взаємозв'язок між орієнтаційними станами тригональної, орторомбічної та моноклінної сегнетоеластичних фаз сполуки $\text{La}_{0,95}\text{Sr}_{0,05}\text{Ga}_{0,9}\text{Mg}_{0,1}\text{O}_{2,925}$. Показано, що в цих кристалах в усіх досліджуваних сегнетоеластичних фазах неможлива реалізація ненапруженого співіснування трьох чи п'яти орієнтаційних станів.

Possible unstrained domain configurations in solid state ionic electrolyte $\text{La}_{0,95}\text{Sr}_{0,05}\text{Ga}_{0,9}\text{Mg}_{0,1}\text{O}_{2,925}$ were investigated using condition of equality of unit matrix to product of connection matrixes, which defined space relationship between orientational states. Using connection matrixes for all domain pairs in trigonal, orthorhombic and monoclinic phases of $\text{La}_{0,95}\text{Sr}_{0,05}\text{Ga}_{0,9}\text{Mg}_{0,1}\text{O}_{2,925}$ it was found all unstrained configuration of domain structure which consist of four orientation states. It was shown that domain configurations which consist of three and five orientation states are strained.

1. Вступ

У наш час особливо актуальною є потреба у високоефективних та екологічно безпечних джерелах енергії. Одним з видів таких джерел є паливні елементи. Паливні елементи (або fuel cells в іноземній літературі, надалі FC) – альтернативні джерела живлення, що перетворюють хімічну енергію згоряння палива безпосередньо в електричну з високим ККД і низьким забрудненням довкілля. На сьогодні одним з найперспективніших типів FC є твердотілі оксидні паливні елементи (або solid oxide fuel cells в іноземній літературі, надалі SOFCs) [1–3].

Незважаючи на численні переваги твердотілих паливних елементів, перед SOFCs- технологією постають серйозні проблеми, а саме, пошук дешевих альтернативних матеріалів та технологій виготовлення. В останні роки одним з найперспективніших електролітичних матеріалів для твердотілих оксидних паливних елементів вважається галат лантану з домішками стронцію і магнію [4–11], який володіє високою іонною провідністю.

Дослідження кристалічної структури $\text{La}_{0,95}\text{Sr}_{0,05}\text{Ga}_{0,9}\text{Mg}_{0,1}\text{O}_{2,925}$ (LSGM) показали, що при кімнатній температурі симетрія кристала LSGM орторомбічна (просторова група *Imma*). Під час нагрівання кристала LSGM при температурі 520 К – 570 К спостерігається неперервний фазовий перехід другого роду з пониженням точкової симетрії кристала до моноклінної (просторова група *I2/a*), а при 720 К – стрибкоподібний перехід першого роду до нецентросиметричної тригональної просторової групи *R3c*, яка орієнтовно в околі 870 К стає центросиметричною (просторова група *R3c*) [12]. Внаслідок таких фазових переходів, в кристалі появляється ще один рівень його внутрішньої будови – сегнетоеластична доменна структура. Оскільки локальна атомна структура доменної границі відрізняється від кристалічної структури в області доменів, то і локально хімічні та фізичні властивості доменних стінок також відрізняються від відповідних властивостей доменних областей. Так в роботах [13,14] на основі модифікованих методик електронної мікроскопії атомарого розділення в доменних стінках керамічного зразка $\text{SrCoO}_{3-\delta}$ та перовскитної плівки BaTiO_3 виявлена вища концентрація кисневих вакансій, ніж в доменній області.

Використовуючи методи поліхроматичної рентгенівської дифракції, показано, що в кристалах LSGM при температурних переходах між сегнетоеластичними фазами відбувається реверсивна

перебудова характерних для кожної із фаз “шевронподібних” доменних структур [15]. Виявлена реверсивність доменних конфігурацій, зумовлена відтворюваністю розподілу мікронапружень, які, очевидно, визначаються сегрегацією кисневих вакансій в області доменних стінок. У роботі [16] висунута гіпотеза, що виявлена висока іонна провідність сполук LSGM пов’язана із додатковою міграцією кисню по вакансіях, що локалізовані в об’ємі двійникових границь.

У зв’язку з цим актуальними є дослідження конфігурацій доменної структури в усіх сегнетоеластичних фазах, що притаманні цьому твердотільному електроліту, оскільки іонна складова провідності галату лантану, зумовлена сегрегацією кисневих вакансій в доменні (двійникові) стінки володіє анізотропною поведінкою, яка залежить від конфігурації доменних границь в зразку.

2. Теоретичні основи пошуку ненапружених конфігурацій доменної структури

Між двома орієнтаційними станами існує ненапружена доменна стінка, якщо виконується умова амбівалентності [17]. Можна показати, що ця умова еквівалентна такій умові:

$$T_{ij} \times T_{ji} \equiv I, \quad (1)$$

де T_{ij} – тензор зв’язку між базовими векторами елементарних комірок в довільній доменній парі, I – одинична матриця. Інакше кажучи, коли ми трансформуємо базисні вектори домена TS_i в вектори домена TS_j , діючи тензором T_{ij} , то виконавши ту саму дію щодо вже базисних векторів TS_j , отримуємо базис TS_i , що і відображає рівняння (1).

Для пошуку варіантів співіснування більшої кількості доменних станів, яке не призводить до виникнення додаткових напружень, нами запропоновано тестування умови, подібної до (1), але для більшої кількості доменних станів. Так, наприклад, для того, щоб у відповідній сегнетоеластичній фазі кристала спостерігалось співіснування трьох орієнтаційних станів, повинна виконуватися умова їх ненапруженого співіснування, яку через тензори зв’язку записуємо так:

$$T_{31} \times T_{23} \times T_{12} \equiv I. \quad (2)$$

Для співіснування чотирьох орієнтаційних станів:

$$T_{41} \times T_{34} \times T_{23} \times T_{12} \equiv I, \quad (3)$$

а для співіснування п’яти орієнтаційних станів:

$$T_{51} \times T_{45} \times T_{34} \times T_{23} \times T_{12} \equiv I, \quad (4)$$

де T_{ij} – тензори зв’язку між доменною парою $TS_i - TS_j$.

Наприклад, рівність (2) відповідає трансформації базисних векторів домена TS_1 в вектори TS_2 при дії тензором T_{12} з подальшою послідовною трансформацією в базис TS_3 та знову TS_1 (див. рис. 1, б) і отримується, якщо врахувати, що векторні бази відповідних сусідніх орієнтаційних станів зв’язані між собою рівностями типу (1).

Якщо ж внаслідок перемноження відповідних тензорів зв’язку, ми отримуємо не одиничну матрицю, то це свідчить, що ця конфігурація двійникової структури, якщо і виникає, то є напруженою, оскільки векторні бази орієнтаційних станів не можуть стикуватись без додаткової деформації. Очевидно, що рівності (2)–(4) повинні виконуватись при циклічній перестановці добутоків, що еквівалентно тому, що ми стартуємо з іншого доменного стану і, зробивши оберт, вертаємось до нього.

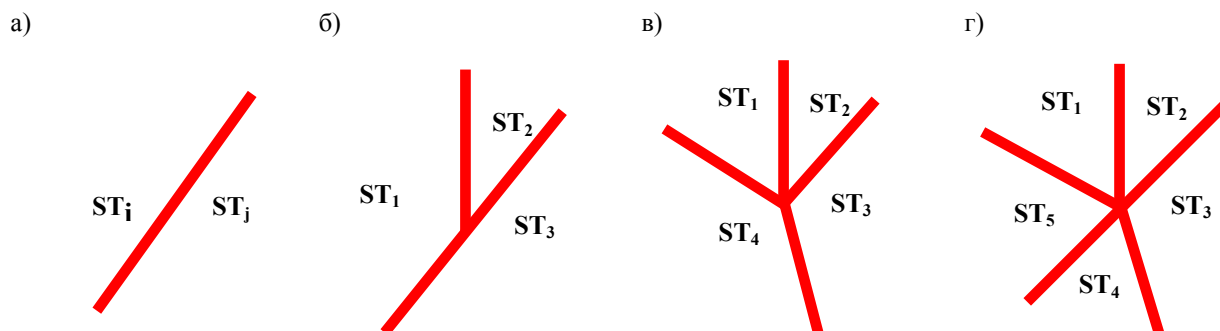


Рис. 1. Схематичні конфігурації доменних структур сегнетоеластичної фази з кількістю орієнтаційних станів від двох до п’яти

3. Пошук ненапружених конфігурацій сегнетоеластичних фаз твердотілого іонного електроліту LSGM

Умови (2)–(4) були протестовані на предмет виконання для всіх можливих варіантів конфігурацій доменної структури для трьох сегнетоеластичних фаз з різною точковою симетрією, а саме: тригональної, орторомбічної та моноклінної. Аналіз здійснювали перебором всіх комбінацій добутоків тензорів зв'язку, що відповідали можливим у даних сегнетоеластичних фазах доменним стінкам. Для розрахунків використовувались тензори зв'язку T_{ij} , обраховані для кристала LSGM, що наведені в [18], а самі розрахунки здійснені за допомогою комп'ютерного пакета Maple 7.

Для випадку доменної конфігурації, що складається з трьох чи п'яти орієнтаційних станів для усіх трьох досліджуваних фаз не знайдено жодного варіанта, коли б добуток із трьох чи п'яти тензорів зв'язку давав одиничну матрицю, тобто виконувалась рівність (2) або відповідно (4). Це свідчить про те, що існуватимуть додаткові напруження в області дотику трьох чи п'яти орієнтаційних станів.

Для випадку конфігурацій із чотирьох орієнтаційних станів (рис.1в) при тестуванні рівності (3) в усіх трьох досліджуваних сегнетоеластичних фазах знайдено варіанти, коли добуток із чотирьох тензорів дорівнював одиничній матриці. Результати наведені в таблиці.

Так, для сегнетоеластичної тригональної фази отримано три різних випадки виконання умови (3), де з метою наочності позначення тензорів зв'язку замінено на позначення відповідних доменних стінок, по яких межують орієнтаційні стани. Всі ці три випадки кристалографічно еквівалентні, оскільки отримуються один з одного циклічною перестановкою індексів Міллера. На рис. 2 схематично показана область стику чотирьох орієнтаційних станів TR_i ($i=1-4$), де для ілюстрації структури використано представлення в базисі перовскитної комірки.

Для випадку чотирьох орієнтаційних станів орторомбічної фази під час тестування умови співіснування доменів отримано значно більше варіантів виконання умови (3). З погляду кристалографічної еквівалентності їх поділяють на три групи. У першу з них входять конфігурації доменної структури, що сформовані тільки стінками W -типу (перші два). Один з них зображений на рис. 3, де побудова стику станів також виконана в базисі перовскитної комірки.

Згідно з тестуваннями рівності (3) можлива також реалізація ненапружених чотиридоменних конфігурацій орторомбічної фази із стінками W - та S -типу, які з кристалографічного погляду поділяють на дві групи. До однієї з них потрібно зарахувати конфігурації, що утворені доменними стінками W -типу сімейства $\{101\}$, а до другої групи – доменними стінками W -типу сімейства $\{121\}$.

Ненапружені чотиридоменні конфігурації кристала LSGM

Тригональна фаза	Орторомбічна фаза	Моноклінна фаза
$W110 \times W121 \times W011 \times W121 = I$ $W011 \times W112 \times W101 \times W112 = I$ $W101 \times W211 \times W110 \times W211 = I$	$W121 \times W101 \times W1\bar{2}1 \times W101 = I$ $W12\bar{1} \times W10\bar{1} \times W\bar{1}21 \times W10\bar{1} = I$ $W101 \times S11\bar{1} \times W101 \times S11\bar{1} = I$ $W101 \times S\bar{1}11 \times W101 \times S\bar{1}11 = I$ $W10\bar{1} \times S111 \times W10\bar{1} \times S111 = I$ $W10\bar{1} \times S\bar{1}\bar{1}1 \times W10\bar{1} \times S\bar{1}\bar{1}1 = I$ $W\bar{1}21 \times S11\bar{1} \times W\bar{1}21 \times S11\bar{1} = I$ $W12\bar{1} \times S\bar{1}11 \times W12\bar{1} \times S\bar{1}11 = I$ $W1\bar{2}1 \times S111 \times W1\bar{2}1 \times S111 = I$ $W121 \times S\bar{1}\bar{1}1 \times W121 \times S\bar{1}\bar{1}1 = I$	$W100 \times S011 \times W100 \times S011 = I$ $W100 \times S01\bar{1} \times W100 \times S01\bar{1} = I$ $W011 \times S01\bar{1} \times W011 \times S01\bar{1} = I$ $W01\bar{1} \times S011 \times W01\bar{1} \times S011 = I$ $W011 \times S\bar{1}\bar{1}1 \times W011 \times S\bar{1}\bar{1}1 = I$ $W01\bar{1} \times S\bar{1}11 \times W01\bar{1} \times S\bar{1}11 = I$ $W211 \times S0\bar{1}1 \times W211 \times S0\bar{1}1 = I$ $W\bar{2}11 \times S0\bar{1}1 \times W\bar{2}11 \times S0\bar{1}1 = I$ $W2\bar{1}1 \times S011 \times W2\bar{1}1 \times S011 = I$ $W21\bar{1} \times S011 \times W21\bar{1} \times S011 = I$ $W211 \times S\bar{1}11 \times W211 \times S\bar{1}11 = I$ $W\bar{2}11 \times S111 \times W\bar{2}11 \times S111 = I$ $W2\bar{1}1 \times S11\bar{1} \times W2\bar{1}1 \times S11\bar{1} = I$ $W21\bar{1} \times S\bar{1}\bar{1}1 \times W21\bar{1} \times S\bar{1}\bar{1}1 = I$

Значно більша кількість чотиридоменних ненапружених конфігурацій може виникати в низькосиметричній моноклінній фазі, що пов'язано з можливістю виникнення більшої кількості орієнтаційних станів та відповідно доменних стінок між ними. У моноклінній фазі можливі тільки взаємні перетини стінок W - та S -типу, причому з огляду на кристалографічну еквівалентність можливі чотиридоменні конфігурації можна поділити на декілька груп.

До першої зараховано конфігурації з доменною стінкою W -типу (100) та стінками S -типу, які розділяють орієнтаційні стани моноклінної фази, що пов'язані операцією повороту навколо осей другого порядку $[011]$ та $[01\bar{1}]$. Варто відмітити, що зазначені осі лежать в кристалографічній площині (100), яка також відповідає орієнтації доменної стінки W -типу, по якій межують орієнтаційні стани цих же чотиридоменних конфігурацій.

Інші виявлені ненапружені конфігурації складаються з стінок W -типу сімейств $\{011\}$ та $\{211\}$. Ненапруженим може бути стик чотирьох орієнтаційних станів моноклінної фази з доменними стінками W -типу $\{101\}$ та S -типу з віссю повороту на 180° щодо кристалографічного напрямку $\langle 01\bar{1} \rangle$, а також S -типу з віссю повороту на 180° щодо двох кристалографічних напрямків сімейства $\langle 111 \rangle$. Можливе утворення чотиридоменних конфігурацій з участю доменних стінок W -типу $\{211\}$ та S -типу, які розділяють орієнтаційні стани моноклінної фази, що пов'язані операцією повороту навколо осей другого порядку $\langle 011 \rangle$, а також осей сімейства $\langle 111 \rangle$.

Проведений нами кристалографічний аналіз вищенаведених результатів для моноклінної фази показав, що конфігурацію із чотирьох орієнтаційних станів без додаткових напружень можуть утворювати стінки W - та S -типу тоді і тільки тоді, коли осі повороту другого порядку, що лежать в площині S -стінки, також знаходяться в площині стінки W -типу. Зазначена кристалографічна особливість справедлива і для чотиридоменних конфігурацій орторомбічної та тригональної фаз.

Тензори зв'язку T_i , які використовували для тестування умови (3) та наведені в [18], розраховані, враховуючи параметри комірки (відповідних для кожної з фаз), знайдених при певних температурах існування кожної фази. Числові значення елементів тензорів зв'язку T_i залежать від параметрів комірки, які змінюються з температурою, тому протестовано виконання рівності (3) при різних температурах існування кожної фази. Отримані результати свідчать про інваріантність усіх зазначених умов від температури. Тобто, у разі зміни температури кристала в межах температурного діапазону існування відповідної сегнетоеластичної фази, в таких чотиридоменних структурах не виникають напруження в області перетину доменних стінок.

Дослідження двійникової структури перовскитів LaAlO_3 , які при кімнатній температурі володіють аналогічною тригональною кристалічною структурою, підтверджують результати, отримані нами під час тестування умови (3) для випадку тригональної сегнетоеластичної фази. На рис.4 та 5 показана двійникова структура кристалічних пластин LaAlO_3 , що спостерігалась в поляризованому світлі. Доменні стінки типу $W(101)$ та $W(110)$ не перетинаються між собою. Більше того, в областях дотику існують напруження, які зумовлюють розсіювання поляризованого світла, що реєструється за допомогою оптичного мікроскопа. У той час стінки типу (101) та (211) перетинаються між собою без додаткових напружень (рис. 5), формуючи “шевронподібну” структуру з чотирьох доменів, що відповідає конфігурації, зображеній на рис. 2.

При кімнатній температурі орторомбічною структурою володіє сполука LaGaO_3 . На рис.6 та 7 показана двійникова структура кристалічних пластин LaGaO_3 , що спостерігалась в поляризованому світлі. Як бачимо, доменні стінки типу $(011)_p$ та $(01\bar{1})_p$ (в орторомбічній установці $W(12\bar{1})$ та $W(\bar{1}21)$) не перетинаються між собою, тоді як стінки типу $(011)_p$ та $(010)_p$ (в орторомбічній установці $W(12\bar{1})$ та $W(10\bar{1})$) – таблиця) перетинаються між собою без додаткових напружень (рис.7), формуючи “шевронподібну” двійникову структуру, що відповідає конфігурації, яка зображена на рис. 3.

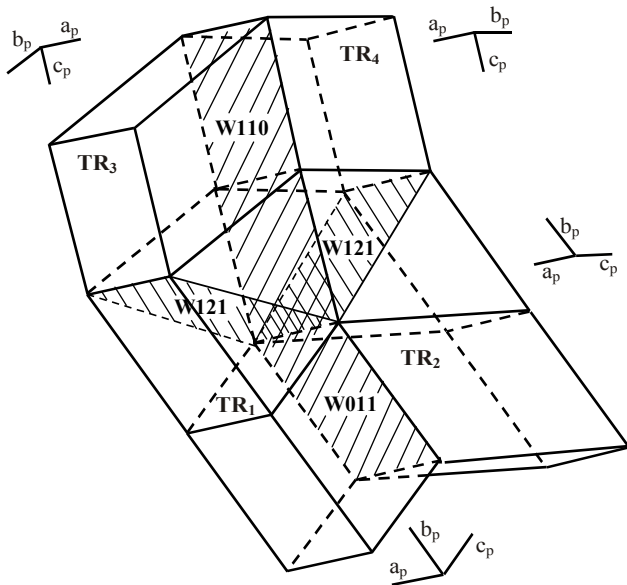


Рис. 2. Схематична модель стику чотирьох орієнтаційних станів тригональної фази по доменних стінках *W*-типу (011), (110) та (121)

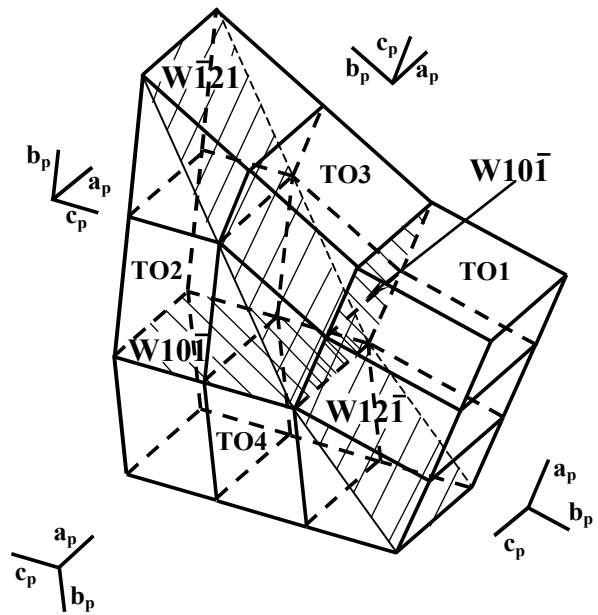


Рис. 3. Схематична модель стику чотирьох орієнтаційних станів орторомбічної фази по доменних стінках *W*-типу ($\bar{1}21$), ($12\bar{1}$) та ($10\bar{1}$)

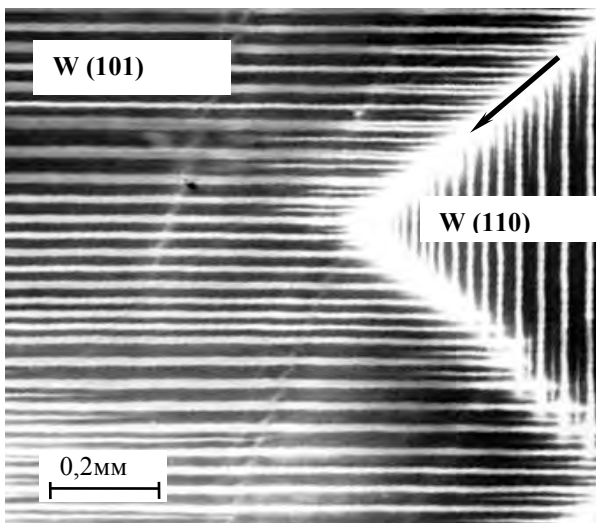


Рис. 4. Двійникова структура $LaAlO_3$ в поляризованому світлі. Стрілкою помічені напружені області дотику двійникових ламелей з *W*-стінками (101) та (110) в тригональній фазі

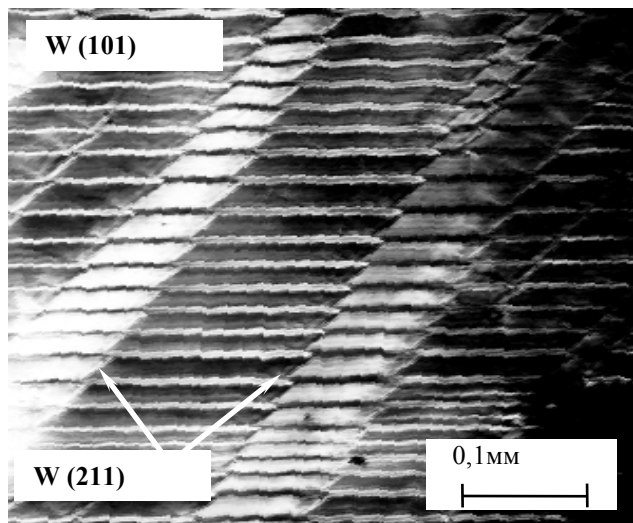


Рис. 5. Двійникова структура тригональної фази $LaAlO_3$ в поляризованому світлі. Стрілками помічені ненапружені області перетину ламелей з *W*-стінками (101) та (211) в тригональній фазі

Як було показано в [15], цікавою особливістю перовскитних кристалів LSGM в орторомбічній та тригональній фазах є здатність формувати “шевронподібну” доменну структуру, в якій доменні стінки одного типу можуть перетинати велику кількість доменних границь іншого типу. Враховуючи вищепроведений теоретичний аналіз доменних структур, ці конфігурації є ненапруженими, оскільки відповідають конфігураціям, які зображені на рис. 2 та 3.

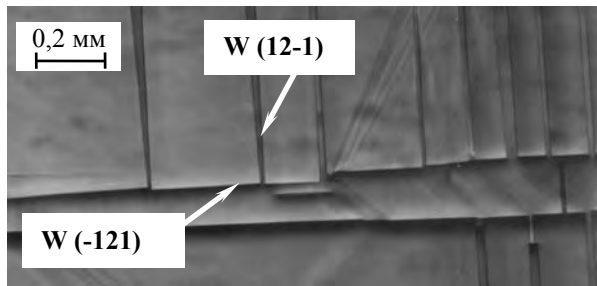


Рис. 6. Двійникова структура $LaGaO_3$ в поляризованому світлі. Стрілками помічені двійникові ламелі з W -стінками ($12\bar{1}$) та ($\bar{1}21$) в орторомбічній фазі

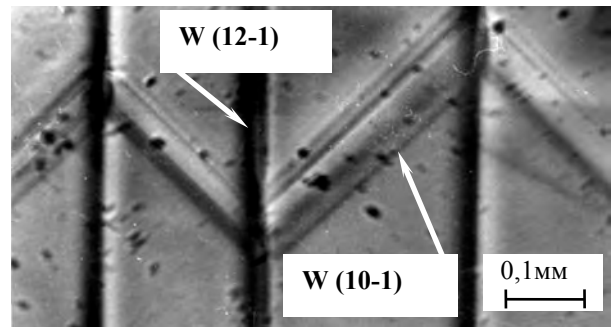


Рис. 7. Двійникова структура $LaGaO_3$ в поляризованому світлі. Стрілками помічені W -стінки ($12\bar{1}$) та ($10\bar{1}$) в орторомбічній фазі

На основі експериментальних даних в роботі [19] було зроблено висновок, що двійникова ламель перетинає іншу двійникову границю без напружень, якщо напрямок зсуву μ_1 паралельний до площини перетинаючої границі. Якщо проаналізувати конфігурації ненапружених чотиридоменних структур, то ця умова справджується для усіх випадків, що знайдені нами для трьох досліджуваних фаз. Конфігурацію із чотирьох орієнтаційних станів без додаткових напружень можуть утворювати стінки W - та S -типу, коли осі повороту другого порядку, що лежать в площині S -стінки, також знаходяться в площині стінки W -типу. Тепер, якщо врахувати, що осі повороту другого порядку, які лежать в площині відповідної S -стінки, є одночасно напрямком двійникового зсуву [20], то знайдені ненапружені конфігурації автоматично задовольняють умову, сформульовану в роботі [19].

Особливістю перовскитних кристалів в орторомбічній та тригональній фазах є здатність формувати “шевронподібну” доменну структуру, в якій доменні стінки одного типу можуть перетинати велику кількість доменних границь іншого типу (див., наприклад, рис. 5 та 7). Враховуючи вищенаведений теоретичний аналіз конфігурацій доменних структур, можна запропонувати таке пояснення спостережуваного явища. Якщо в одній із ламелей кристала, що вже розбитий на два орієнтаційні стани із доменними границями, умовно названими першого типу, виникає ламель другого типу, то вона, досягаючи доменної границі першого типу, зумовлює в точці дотику напруження. Про це свідчать наші тестування умови (2) для випадку тридоменної конфігурації, яка не виконується в жодній із протестованих сегнетоеластичних фаз. Очевидно, ці напруження можуть зрелаксувати тільки для доменних стінок, для яких виконується умова (3), причому шляхом дальшого проникнення цієї ламелі другого типу в наступний орієнтаційний стан, який зв'язаний з першим площиною дзеркального відображення щодо стінки першого типу. При цьому виникає чотиридоменна конфігурація без напружень в області стику новоутворених орієнтаційних станів. Згадана операція дзеркального відображення трансформує і просторове поширення доменної стінки другого типу, оскільки її злом приблизно на 90° на границі відповідає дзеркальному відображенню щодо стінки першого типу. Описана ситуація повторюється за кожного наступного перетину доменною стінкою другого типу стінки першого типу, тим самим, формуючи “шевронподібну” конфігурацію доменної структури, показану на рис. 5 та 7.

4. Висновки

Для пошуку варіантів ненапруженого співіснування (стику) n -кількості доменних станів, використана умова рівності одиничній матриці добутку відповідно n -кількості матриць зв'язку, що характеризують просторовий взаємозв'язок між можливими орієнтаційними станами досліджуваної сегнетоелас-

тичої фази. Використовуючи знайдені матриці зв'язку для усіх можливих доменних пар сполуки $\text{La}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}\text{Ga}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{O}_{2.925}$ в тригональній, орторомбічній та моноклінній сегнетоеластичних фазах [18], знайдено усі можливі ненапружені конфігурації доменної структури, що складаються з трьох, чотирьох та п'яти орієнтаційних станів. Показано, що в цих кристалах в усіх досліджуваних сегнетоеластичних фазах неможлива реалізація ненапруженого співіснування трьох чи п'яти орієнтаційних станів.

Проведений аналіз знайдених ненапружених конфігурацій із чотирьох орієнтаційних станів показав, що вони можуть виникати при перетині стінки W -типу стінкою S -типу тоді, коли вісь повороту другого порядку, що лежить в площині S -стінки, також належить стінці W -типу, що перетинається. Зазначена кристалографічна особливість справедлива і для чотиридоменних конфігурацій, що формуються тільки стінками W -типу. Вона також відповідає експериментально встановленому факту, що двійникова ламель перетинає іншу доменну стінку без напружень та розтріскувань, якщо напрямок двійникового зсуву, необхідний для її утворення, – паралельний до площини стінки, що перетинається.

1. Steele B. C.H., Heinzl A. *Materials for fuel-cell technologies*// *Nature*. – 2001. – V. 414. – P. 345–352.
2. Stambouli A. B., Traversa E. *Solid oxide fuel cells (SOFCs) : a review of an environmentally clean and efficient source of energy*// *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.– 2002.– V.6. –P. 433–455.
3. Feng M. and Goodenough J.B. *A superior oxide-ion electrolyte* // *Eur. J. Solid State Inorg. Chem.*–1994. –V.31. – P. 663–672.
4. Ishihara T., Matsuda H., Takita Y. *Doped-LaGaO₃ perovskite type oxide as a new oxide ionic conductor* // *J. Am. Chem. Soc.*– 1994. –V.116. –P. 3801–3803.
5. Skinner S.J., Kilner J.A. *Oxygen ion conductors* // *Materials Today*.– 2003. –V. 6(3). –P. 30–37.
6. Haile S. *Materials for fuel cells* // *Materials Today*. –2003. –V. 6(3). –P. 24–29.
7. Huang K., Wang J., Goodenough J. B. *Oxide-ion conducting ceramics for solid oxide fuel cells* // *J. Mat. Sci.*– 2001. –V.36. – P. 1093–1098.
8. Maffel N, Kuriakose A.K. *Performance of planar single cell lanthanum gallate based solid oxide fuel cell*// *Journal of Power Sources*.– 1998.–V. 75.– P. 162–166.
9. Kuroda K., Hashimoto I., Adachi K. *Characterization of solid oxide fuel cell using doped lanthanum gallate*// *Solid State Ionics*.– 2000.– V.132.– P. 199–208.
10. Kostogloudis G, Ftikos C., Ahmad-Khanlou A., Naoumidis A. *Chemical compatibility of alternative perovskite oxide SOFC cathodes with doped lanthanum gallate solid electrolyte*// *Solid State Ionics*.– 2000.– V. 134.– P. 127–138.
11. Maffei N., Silveira G. De. *Interfacial layers in tape cast anode-supported doped lanthanum gallate SOFC elements*// *Solid State Ionics*.– 2003.– V.159.– P. 209–216.
12. Vasylechko L., Vashook V., Savytskii D., Senyshyn A., Niewa R., Knapp M., Ullmann H., Berkowski M., Matkovskii A., Bismayer U. *Crystal structure, thermal expansion and conductivity isotropic $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Ga}_{1-2x}\text{Mg}_{2x}\text{O}_{3-y}$ ($x = 0.05; 0.1$) single crystals*// *J. Solid State Chem.* – 2003. –V.172 (2). – P. 396–411.
13. Stemmer S., Sane A., Browning N.D., Mazanec T. J. *Characterization of oxygen-deficient $\text{SrCoO}_{3-\delta}$ by electron energy-loss spectroscopy and Z-contrast imaging*// *Solid State Ionics*.–2000.– V.130.–P. 71–80.
14. Jia C.L., Urban K. *Atomic-resolution measurement of oxygen concentration in oxide materials*// *Science*. – 2004. – V.303. – P. 2001–2004.
15. Savytskii D., Vasylechko L., Bismayer U., et al. *Configuration of twin walls in LSGMO*// *NATO Science Series*.– 2005.– V. 202. – P. 135–148.
16. Kurumada M., Iguchi E. and Savytskii D. *Correlation between high ionic conductivity and twin structure in $\text{La}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}\text{Ga}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{O}_{3-x}$* // *J. Appl. Phys.* –2006. – V. 100. – P. 014107 (1–9).

17. Janovec V. *Group analysis of domains and domain pairs* // *Czech. J. Phys.*–1972. – V.B22. – P. 974–994.
18. Савицький Д.І., Матковський А.О. Двійникова структура кристалів $La_{0.95}Sr_{0.05}Ga_{0.9}Mg_{0.1}O_{2.925}$ // *Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, “Електроніка”*.– 2004. – № 514. – С. 72–109.
19. Классен-Неклюдова М.В., *Механическое двойникование кристаллов*. – М., 1960. – 344 с.
20. Келли А., Гровс Г. *Кристаллография и дефекты в кристаллах* / Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 401 с.