

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ ІНСТИТУТ ФІЗИКИ

03028, м. Київ, пр.-т. Науки, 46
тел.: (044) 525-12-20, (044) 525-05-91
e.mail: fizyka@iop.kiev.ua
www.iop.kiev.ua
ЄДРПОУ 05417302

ВІДГУК

провідного наукового співробітника відділу фізики магнітних явищ
Інституту фізики НАН України, доктора фізико-математичних наук,
професора, Морозовської Ганни Миколаївни
на дисертаційну роботу Гамалія Володимира Олександровича
«Низькотемпературне дослідження наноструктурованих поверхонь
модельного перовскіту титанату стронцію»,
представлену на здобуття наукового ступеня
доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія»
з галузі знань 10 – «Природничі науки»

Дисертаційну роботу присвячено низькотемпературним дослідженням поверхонь титанату стронцію оригінальним методом дифракції високоенергетичних електронів на відбиття (RHEED) у інтервалі температур 5,5 – 300 К. Завдяки цьому методу знайдено декілька нових ефектів на поверхні здавалось давно відомого перовскіту титанату стронцію (хімічна формула SrTiO_3), що робить цю роботу вельми **актуальною з фундаментально-наукової точки зору**. Дослідження у широкому температурному інтервалі також відкривають **перспективи застосування отриманих результатів на практиці**, наприклад, для приготування плівок високотемпературних надпровідників, де титанат стронцію часто використовується як підкладка для росту плівок. Нанорозмірність з іншого боку створює підґрунтя для пошуку унікальних сегнетоелектричних властивостей. Дійсно титанат стронцію, який (за відсутності домішок) залишається параелектриком у об'ємі навіть при найнижчих температурах, має стрімке зростання відносної діелектричної проникності (від 300 при кімнатній температурі до 3000 при низьких температурах), активно досліджується з приводу появи сегнетоелектрики у наночастинках та тонких плівках під дією різноманітних деформацій.

По матеріалах, що увійшли у дисертацію, опубліковано три статті в журналі Applied Surface Science (квартиль Q1) та у українському виданні Low Temperature Physics (квартиль Q3), яке перекладається Американським Інститутом Фізики. Статті зроблено у співавторстві, але внесок В.О. Гамалія (як першого та другого автора) є цілком достатнім для захисту дисертації, враховуючи розробку і застосування новітніх методик як у експерименті, так і у аналізі великої кількості дифракційних даних. Слід відзначити також особисте представлення здобувачем матеріалів дисертації на міжнародних конференціях у вигляді 3-х усних доповідей.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів та висновків.

У **вступі** сформульовано **мету дисертаційної роботи** як отримання нового рівня розуміння структури та морфології поверхні модельного перовськіту титанату стронцію. Цю мету безсумнівно досягнуто, оскільки у дисертації знайдено і представлено **принципово нові ефекти на його поверхні**. Серед таких ефектів найбільш вагомими є незвичні структурні трансформації, що відбуваються на поверхні, знайдено специфічні наноструктури на майже ідеальній поверхні монокристалу, а також новий ефект площинного стиснення та його немонотонне розповсюдження у глибину кристалу.

У **розділі 1** представлено літературний огляд, у якому досить детально розглянуто спершу об'ємні, а потім поверхневі властивості оксидних перовскітів, зокрема SrTiO_3 . Значну увагу приділено структурі оксидних перовскітів, зокрема центрованим металом кисневим октаедрам та ролі їх обертання у структурних фазових переходах. Розглянуто також поверхневі властивості SrTiO_3 , зокрема можливість виникнення сегнетоелектрики завдяки порушенню поверхневої симетрії. У розділі приділено значну увагу великій кількості існуючих і потенційних застосувань оксидних перовскітів та зокрема SrTiO_3 .

У **другому розділі** розглянуто методологію експерименту та приготування зразків. Основним методом дослідження була дифракція високоенергетичних електронів на відбиття від гладких поверхонь (001) монокристалів SrTiO_3 . Детально описано різні режими зйомки, деякі з яких є оригінальними. Пояснено природу залежності глибини проникнення електронів в кристал від кута електронного пучка відносно поверхні, яка дозволила встановити залежності параметрів поверхневої ґратки від глибини у кристалі. Розглянуто запропоновану у цій роботі методику прецизійних

вимірювань поверхневих параметрів, а також методи аналізу поверхневих наноструктур.

Третій розділ присвячено поверхневим структурним переходам. Три з них корелюють з відомими структурними переходами у об'ємі, тоді як два інших притаманні лише поверхні. Детально розглянуто і класифіковано взаємозв'язок між характером залежностей параметрів ґратки на поверхні від кута падіння електронів на поверхню кристалу, які пов'язуються з різною глибиною у кристалі, та станом поверхні. Це дозволяє використовувати такі залежності саме для ідентифікації цих станів.

У **розділі 4** розглянуто найбільш важливий та цікавий ефект площинного стиснення вздовж поверхні SrTiO_3 , який раніше не був помічений через загальну думку, що параметри кристалу вздовж поверхні кристалу є ідентичними об'ємним. Вперше встановлено окремі параметри ґратки у перших трьох поверхневих шарах залежно від температури та показано, що у перших двох шарах має місце сильне «площинне» скорочення параметрів ґратки при низьких температурах, а у третьому поверхнева ґратка розширена, що було підтверджено теорією функціоналу густини для поверхні (001) SrTiO_3 .

Розділ 5 цілком присвячено аналізу трьох типів наноструктур, які виникають на поверхні за різних умов. Але у всіх трьох випадках наноструктурна архітектура є принципово керованою, що відкриває перспективу її цілеспрямованого відтворення. Розглянуто наноструктури, які виникають у вигляді пагорбів на витравлених поверхнях, але зі збереженням початкової кристалічної орієнтації. Знайдено періодичні наноструктури у вигляді сходинок на поверхні, якщо кут зрізу поверхні не збігається з кристалографічними площинами. Ще один третій тип наноструктур пов'язується зі спостереженою неспіврозмірністю між першими поверхневими шарами та об'ємом, що виникає завдяки ефекту площинного стиснення, який розглянуто у попередньому розділі.

До **найбільш важливих нових наукових результатів**, отриманих у дисертації, можна віднести, на мою думку, перш за все відмінність структурних трансформацій на поверхні, пов'язану з **втратою температурної локалізації переходів на поверхні**, вони розтягуються на поверхні вздовж інтервалу температур. У дисертації також представлено оригінальний **метод виявлення поверхневих станів** завдяки вивченню залежностей параметрів поверхневої ґратки від кута падіння електронів на поверхню. **Також знайдено наноструктури** на поверхні, які мають різне походження і детально описані у

розділі 5. Але усі ці наноструктури пов'язує одна важлива особливість – вони структурно і орієнтаційно впорядковані, що відкриває нові можливості для їх потенційного практичного застосування насамперед у мікроелектроніці і комп'ютерній техніці завдяки, наприклад, можливості виникнення поверхневої сегнетоелектрики. Цікавою знахідкою є **ефект площинного стиснення на поверхні** з характерним немонотонним розповсюдженням у глибину кристалу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає як у розробці та застосуванні **новітніх методик** експерименту та аналізу даних, так і у спостереженні **нових ефектів**, перелічених вище. Як розроблені методики, так і знайдені ефекти на поверхні модельного перовськіту титанату стронцію мають потужний потенціал для **подальшого використання як у фундаментальній науці, так і у багатьох практичних застосуваннях.**

Обґрунтованість та достовірність отриманих у дисертації результатів та висновків забезпечується з одного боку багатобічним та оригінальним аналізом взаємно пов'язаних спостережень, а з іншого чіткою кореляцією між отриманими експериментальними результатами та теоретичними розрахунками, виконаними партнерами – теоретиками.

Потрібно зробити деякі **зауваження до дисертаційної роботи:**

1. Робота дуже вдало та детально проілюстрована, але на багатьох рисунках відсутні похибки вимірюваних величин та/або відхилення від середніх значень. Якщо вони є меншими за розмір символів, то це потрібно щоразу вказувати, або вказувати саму похибку. Також бажано пояснювати випадкову немонотонність (так званий «зоряний розкид») деяких з таких залежностей або похибкою, або іншими механізмами.
2. Аналіз поверхневих фазових переходів у титанаті стронцію так чи інакше вимагає аналізу наявності кореляцій між структурними властивостями, які детально проаналізовані в роботі, та електрофізичними (зокрема полярними та діелектричними) властивостями тонких приповерхневих шарів. У роботі можна було більше уваги приділити саме аналізу змін електрофізичних властивостей поблизу поверхні та їх кореляції із зміною параметрів ґратки та спектральних характеристик досліджених зразків.
3. Обговорення механізмів поверхневої сегнетоелектрики у титанаті стронцію так чи інакше вимагає уявлення та оцінок внесків поверхневого п'єзоелектричного ефекту (через втрату центра інверсії та поверхні) та

флексоелектричного ефекту (через наявність градієнту властивостей поблизу поверхні). Дивись, наприклад роботу [Interfacial Polarization and Pyroelectricity in Antiferrodistortive Structures Induced by a Flexoelectric Effect and Rotostriction. Phys.Rev.B. 85, 094107 (2012), <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.85.094107>] та розділ 5 монографії [“Strontium Titanate: Synthesis, Properties”. Editors: Alexander Tkach and Paula Vilarinho (Nova Science Publishers, New York 2019), ISBN: 978-1-53615-438-2 (eBook) <https://novapublishers.com/shop/strontium-titanate-synthesis-properties-and-uses/>]. Ці механізми повинні впливати на виявлений в роботі «ефект площинного стиснення на поверхні з характерним немонотонним розповсюдженням у глибину кристалу».

Але ці зауваження ніяк не знижують загальну високу оцінку представленої дисертаційної праці. Всі вони є побажаннями на майбутнє.

Підсумовуючи відгук, вважаю, що за актуальністю, обсягом досліджень, світовою науковою новизною та практичним значенням результатів, дисертаційна робота Гамалія В.О. «Низькотемпературне дослідження наноструктурованих поверхонь модельного перовскіту титанату стронцію», відповідає всім вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 № 44, а здобувач Гамалій Володимир Олександрович заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» з галузі знань 10 «Природничі науки».

Опонент: провідний науковий співробітник
Інституту фізики НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
професор



Морозовська Г.М.

