

Дніпропетровський державний університет.

На правах рукопису.

Юдін Олександр Сергійович.

**Стимульована провідність в кристалах
з низькою рухливістю.**

01.04.07. – фізика твердого тіла.

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Дніпропетровськ – 1996



00751961 (Т)

Дисертація є рукопис.

робота виконана на кафедрі електрофізики
Дніпропетровського державного університету.

Наукові керівники: доктор фізико-математичних наук,
професор Кудзін А.Ю.,
кандидат фізико-математичних наук,
доцент Соколянський Г.Х.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор Черненко І.М.,
доктор фізико-математичних наук,
професор Шаповалов В.П.

Провідна організація: Інститут фізики НАН України (м. Київ)

Захист дисертації відбудеться "28" серпня 1996 р.
о 15 год. 00 хвил.


на засіданні Спеціалізованої Вченої ради для захисту дисертацій
на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних
наук при Дніпропетровському державному університеті за
адресою: 320625 м. Дніпропетровськ, пер. Науковий 13, корпус
11, ауд.300.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетров-
ського державного університету.

Автореферат разісланий "24" травня 1996 р.

Вчений секретар

Спеціалізованої вченої ради


Спіридонова І.М.

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Серед великої кількості напівпровідникових матеріалів можна виділити клас кристалів з широкою забороненою зоною та малою рухливістю. Теорія цих речовин розроблена значно слабкіше, ніж слабо легованих кристалічних напівпровідників, що добре описуються в межах зонної моделі. До того ж багато фізичних властивостей матеріалів з малою рухливістю не достатньо вивчені експериментально. Високий питомий опір, низька рухливість носіїв, значний вплив домішок та власних дефектів в цих кристалах призводить до значних труднощів у використанні традиційних методів вимірювання основних параметрів цих матеріалів та інтерпретації результатів. Окрім того, ряд параметрів переносу суттєво залежать від попередньої історії зразків.

В той же час матеріали з низькою рухливістю, до яких належать кристали активних діелектриків, знаходять широке практичне застосування, а це, в свою чергу, стимулює пошукову роботу по синтезуванню та вирощуванню нових матеріалів.

Серед цієї групи кристалів відзначемо лише ті, для яких принципово важливе значення має перенос зарядів: електрооптичні, електрогираційні та фоторефрактивні. Використання цих матеріалів в якості електрооптичних модуляторів лазерного випромінювання та елементів оптичного запису і збереження інформації безпосередньо зв'язана з процесами переносу та накопичування зарядів під впливом електричного поля та опромінювання. Так наприклад, сам процес виникнення фоторефракції, а також час збереження наведеного світлом двопронемозломлення визначаються механізмами збудження носіїв заряду, їх переміщення в кристалі, захоплення на локалізовані стани та рекомбінації.

Все це робить актуальною проблему експериментального дослідження процесів провідності та фотопровідності кристалів з низькою рухливістю як з точки зору уявлень про перенос зарядів в твердих тілах, так і з точки зору можливостей їх застосування в різних пристроях.

Важливим аспектом дослідження являється вибір матеріалу. На протязі довгого часу головна увага приділялась дослідженню полярних кристалів, запис інформації в яких може бути здійснено за рахунок фоторефракції без прикладання зовнішнього електричного поля. Менше уваги приділялось неполярним матеріалам. Проте згідно з дослідженнями останніх років перевага віддається саме неполярним кристалам. Це пов'язане з тим, що зовнішнє електричне поле може бути використане як додатковий фактор, що дозволяє керувати процесами запису інформації. Серед неполярних кристалів, що використовуються як матеріали для оптичного запису інформації, найбільш перспективні силленіти кременію та германію $[\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO) та $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO)]. Тому в даній роботі в якості об'єктів дослідження були вибрані саме ці кристали. Окрім того, були частково досліджені порівняно нові кристали зі структурою перовскиту $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ (NBT), а також широко відомий ніобат літію LiNbO_3 (NL).

Виконана робота є складовою частиною дослідження фізичних властивостей кристалів активних діелектриків, що виконуються на кафедрі електрофізики Дніпропетровського державного університету за держбюджетною темою N 30 - 91 "Дослідження явищ переносу та природи структурних фазових переходів в кристалах активних діелектриків".

Мета та задачі роботи. Метою роботи являється: (1) вивчення закономірностей провідності та фотопровідності кристалів BSO, BGO і NBT під впливом сильного електричного поля та ос-

вітлення; (2) з'ясування природи стимульованої полем провідності та фотоіндукованої провідності; (3) виявлення змін механізму переносу зарядів при стимулюванні та фотозбудженні; (4) вивчення ролі домішкових станів у указаних процесах.

Для досягнення поставленої мети проведено комплекс досліджень:

- вивчена поведінка електропровідності BGO, BSO, NBT і NL в широкому інтервалі температур та полів;
- вивчено вплив довготермінової дії сильного електричного поля на характер електропровідності;
- вивчено вплив освітлення короткохвильовим світлом на фотопровідність кристалів в довгохвильовій частині спектру;
- вивчено зміну спектру оптичного поглинання в результаті дії сильного електричного поля;
- розроблена якісна модель, що здатна пояснити отримані експериментальні результати.

В роботі отримані такі нові результати:

- Вперше проведено порівняльні дослідження рухливості носіїв заряду методами стаціонарних струмів обмежених об'ємним зарядом (COOЗ), перехідних COOЗ та часо-прольотною методикою в кристалах BSO і BGO, величина провідності яких контролювано змінювалась в межах 4-х порядків під дією сильного електричного поля.
- Виявлено істотне збільшення фотопровідності в кристалах BGO і BSO внаслідок стимуляції сильним полем.
- Виявлено збільшення темної провідності внаслідок впливу сильного електричного поля (стимуляція) в кристалах NL та NBT.
- Вперше виявлено зменшення поглинання світла кристалами BSO і BGO в області "плеча поглинання", викликане стимуляцією.

- Виходячи з аналізу механізму руху носіїв заряду зроблено висновки про гаусовський розподіл за енергією локалізованих станів в забороненій зоні BGO і BSO.
- Показано, що спектр поглинання в області "плеча" складається з окремих гаусовських смуг різної амплітуди і дисперсії, визначуваних домішковим складом, технологією виготовлення та передісторією кристалів.
- Запропонована якісна модель, яка пояснює стимульований стан.

Практичне значення роботи. Кристали BGO, BSO, NL широко використовуються в різних пристроях. В низці приладів елементи, виготовлені з цих кристалів, працюють в сильних електричних полях та в умовах освітлення на протязі довгого часу, що призводить до їх деградації. Одержані в роботі результати становлять практичну цінність для вибору оптимальних режимів експлуатації елементів.

Експериментальні дані та запропоновані механізми переносу, фотопереносу, стимуляції та ін. є важливі для розроблення просторових модуляторів світла і оптичних елементів, що базуються на явищі фоторефракції.

Виявлені закономірності переносу, фотопереносу, стимуляції та ін. є загальними для широкого класу матеріалів з низькою рухливістю і являють інтерес для включення в учбові програми для студентів ВУЗів, що спеціалізуються в області фізики твердого тіла, фізики напівпровідників і діелектриків, напівпровідникової електроніки та оптоелектроніки.

Для досліджень використовувались зразки високої оптичної якості. При проведенні експериментів велика увага приділялась питанню відтворюваності результатів. Використовувались апробовані методики досліджень і достатньо сучасне обладнання. Обробка результатів експериментів проведена на основі сучасних уявлень

фізики твердого тіла з залученням ЕОМ. Все це дозволяє вважати результати дисертаційної роботи достовірними.

На захист виносяться наступні положення:

1. Кристали складних окислів (NL, NBT, BGO, BSO) переходять в метастабільний (стимульований) стан з високою провідністю під впливом сильного електричного поля.
2. Стимулювання полем пов'язане з заповненням локальних станів в забороненій зоні інжектованими з електродів носіями заряду, які здійснюють перенос струму стрибками між цими локальними рівнями.
3. В процесі стимулювання відбувається зменшення коефіцієнту поглинання світла в області "плеча поглинання", що пов'язане з заповненням локальних станів інжектованими носіями.
4. Локальні стани в забороненій зоні мають гаусовський розподіл. Контур "плеча поглинання" складається з багатьох смуг поглинання, число яких визначається домішковим складом кристалів.
5. В метастабільному стимульованому полем або індукваному короткохвильовим світлом стані має місце збільшення рухливості носіїв, яка може досягати значення перевищуюче початкове в 10^4 раз.

Особистий вклад автора. Основні результати та висновки дисертації отримані особисто автором. Постановка задачі, визначення напрямків дослідження та обговорення результатів виконані разом з науковими керівниками доктором фіз.-мат. наук професором Кудзіним А.Ю. та кандидатом фіз.-мат. наук доцентом Соколянським Г.Х. Співавтори публікацій приймали участь в обговоренні результатів роботи та отриманні об'єктів дослідження.

Обсяг та структура дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти глав, основних результатів та висновків і списку

літератури. Обсяг дисертації складає 187 сторінок, у тому числі 63 малюнки, 9 таблиць. Список цитованої літератури містить 110 найменувань, на 13 сторінках.

Апробація роботи. Результати роботи доповідались на Шостій Всесоюзній конференції фізики діелектриків (СРСР, Томськ, листопад 1988), Всесоюзній науковій конференції "Фотоелектричні явища в напівпровідниках" (СРСР, Ташкент, жовтень 1989), IX Всесоюзному симпозиумі з спектроскопії кристалів, активованих йонами рідкоземельних і перехідних металів (СРСР, Ленінград, травень 1991), Всесоюзній нараді-семінарі "Спектроскопія лазерних матеріалів" (СРСР, Краснодар, травень 1990), XV Всесоюзній конференції "Акустоелектроніка і фізична акустика твердого тіла" (СРСР, Ленінград, червень 1991), V Всесозній школі-семінарі з фізики сегнетоелектриків (СРСР, Ужгород, вересень 1991), XIII конференції з фізики сегнетоелектриків (СРСР, Тверь, червень 1992), та підсумкових конференціях ДДУ.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 робіт, з них 5 статей у центральних журналах.

Основний зміст роботи

У вступі обгрунтована актуальність теми, розглянута мета дисертації, її наукове та практичне значення. Сформульовані положення, що виносяться на захист. Подані відомості про апробацію.

В першій главі дисертації розглянуто особливості електропровідності матеріалів, що мають низькі значення рухливості носіїв заряду. До цієї групи матеріалів слід віднести ті, рухливість носіїв у яких менше $10^{-2} \text{см}^2 / \text{В.с}$. Однією з головних особливостей цих матеріалів являється неможливість використання зонного механізму переносу заряду.

Низькою рухливістю характеризуються: неорганічні кристалічні складні сполуки (складні окисли), органічні кристали,

аморфні речовини та стекла. На відміну від класичних напівпровідникових кристалів із суворою упорядкованістю ґратки, речовини з малою рухливістю мають частково розупорядковану структуру, що призводить до появи досить значної концентрації локалізованих електронних станів в забороненій зоні. Концентрація останніх зростає по мірі віддалення від середини зони з поступовим переходом в делокалізовані стани. Таким структурам властивий характерний механізм переносу носіїв по локалізованих станах поблизу рівня Фермі шляхом стрибків. Цей механізм провідності одержав назву стрибкового.

Ряд експериментальних результатів по вивченню темної провідності та фотопровідності вказують на стрибковий механізм переносу в кристалах складних окислів, таких як BSO та BGO. За допомогою методики струмів обмежених об'ємним зарядом встановлено, що величина рухливості в цих кристалах має значення $\sim 10^4 - 10^6$ см² / В.с. Інтерпретація результатів досліджень, проведених різними авторами, дуже суперечлива. Немає єдиного погляду навіть з такого принципового питання як характер провідності (зонний, стрибковий). Виявлено сильний вплив власних дефектів та домішок на провідність, фотопровідність і оптичні параметри BGO і BSO. Однак дефекти не ідентифіковані. Мало вивчене питання про поглинання світла в цих кристалах особливо в спектральній області, близькій до краю поглинання, де спостерігається "плече поглинання", природа якого до кінця не встановлена. Вимагає додаткових досліджень і вплив сильного електричного поля на електропровідність, що проявляється в значному збільшенні питомої провідності під дією поля – стимуляція провідності.

Кристали BSO і BGO широко використовуються як оптичні середовища запису інформації на основі явища фоторефракції – зміни коефіцієнту заломлення під дією світлового променя [1]. Це явище пов'язане з фотозбудженням носіїв заряду в місці ос-

вітлювання кристала, дифузією електронів в неосвітлювану область та захоплення їх на рівні прилипання. Виникаюче поле захопленого об'ємного заряду через електрооптичний ефект призводить до локальної зміни коефіцієнту заломлення. З'ясування деталей механізму цього важливого для застосування ефекту вимагає всебічного дослідження процесів переносу, фотопереносу, захоплення та рекомбінації носіїв заряду.

Все це вказує на актуальність досліджень, започаткованих в дисертації та визначає мету досліджень, сформульовану у вступі.

З метою виявлення деякої спільності фізичних механізмів для широкого класу кристалів з низькою рухливістю, окрім BGO та BSO вивчались також кристали LiNbO_3 і $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$.

Друга глава дисертації містить в собі опис експериментальних методик дослідження та зразків. Наведена блок-схема установки для вимірювання електропровідності матеріалів на постійному струмові. Установка дозволяє проводити вимірювання при температурах до 400°C в полях до 30 кВ / см . Реєстрація струму здійснюється за допомогою самописця КСП-4, що дозволяє досліджувати довгочасну кінетику процесів встановлення струму. Використання в установці програмованого регулятора температури, що дозволяє здійснювати лінійну за часом зміну температури зразка, дає можливість вимірювання термостимульованих струмів (ТСС) і струмів термостимульованої деполаризації (ТСД). Вимірювання ТСС і ТСД дає можливість визначення глибоких локалізованих електронних станів в твердому тілі.

Як було вже сказано, високі значення питомого опору та мала рухливість носіїв заряду у вивчених кристалах не дозволяє використовувати традиційні для провідників (напівпровідників) методи визначення рухливості носіїв заряду (гальваноманітні і термоелектричні ефекти). В роботі вимірювання рухливості здійснювалось шляхом аналізу вольт-амперних характеристик (ВАХ) в об-

ласті струмів обмежених об'ємним зарядом. Окрім стаціонарних СООЗ досліджувались перехідні СООЗ, що також дає можливість отримати інформацію про рухливість носіїв.

В роботі використовується і прямий метод визначення рухливості: часово-прольотна методика. Цей метод полягає в вимірюванні часу прольоту носіїв заряду між електродами після генерації їх імпульсом світла поблизу одного із электродів. Однак в кристалах ВГО, BSO і NL має місце дисперсійний перенос, що утруднює отримання точних значень рухливості. Тому для одержання достовірної інформації про рухливість носіїв заряду проводився порівняльний аналіз даних, отриманих за допомогою різних методик.

Для вимірювання стаціонарної фотопровідності в роботі використана установка, електровимірювальна частина якої не відрізняється від приведеної, а як джерело фотозбудження використовувалось випромінювання лампи розжарювання, пропущене через монохроматор СПМ-2. При вимірюваннях стаціонарної фотопровідності інтенсивність світла в усьому діапазоні хвиль витримується постійною шляхом регулювання струму розжарювання лампи. Для калібрування використовувався вимірювач інтенсивності лазерного випромінювання "Кварц 01".

Спектри поглинання кристалів вимірювались за допомогою спектрофотометра SPECORD - M40 в діапазоні енергій 1.0 - 5.0 еВ.

При аналізуванні результатів досліджень фотоелектричних властивостей враховувалось відбивання світла та неоднорідність його поглинання вздовж зразка.

В роботі досліджені: (1) монокристали ВГО і BSO без спеціально введених домішок та з домішками Al і Ga, (2) монокристали ніобату літія без спеціально введених домішок, (3) кристали натрій-вісмутного титанату. Всі кристали були вирощені за методом Чохральського з оксидів відповідних металів марки "ОСЧ"

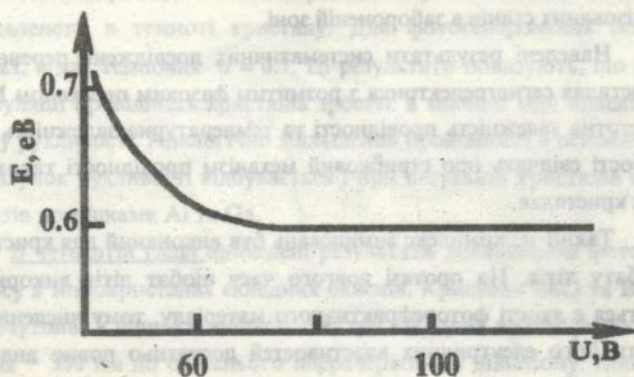
Розміри кристалів дозволяли вирізувати зразки необхідної форми та розмірів. Всі вивчені кристали були високої оптичної якості.

При дослідженні електричних та фотоелектричних властивостей приділялась увага вибору матеріалу електродів. Важливою процедурою, що забезпечує відтворюваність результатів вимірювань, являється відпал зразків при температурі $\sim 400^{\circ}\text{C}$ перед кожним вимірюванням.

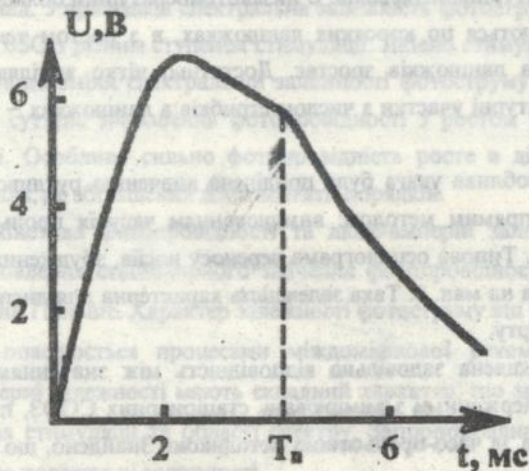
Третя глава вміщує результати досліджень електричного заряду в складних окислах. До початку цих досліджень існувала численна інформація про перенос зарядів в силленітах. Але в питанні про механізм переносу ясності не було. Тому були проведені детальні дослідження переносу в BGO і BSO методом СООЗ. Залежність струму від напруги в цих кристалах не може бути пояснено в рамках уявлень про дискретні пастки в забороненій зоні. В такому складному кристалі як BSO(BGO) найбільш вірогідна наявність великої кількості "розмитих" дискретних рівнів, що в кінцевому підсумкові призводить до квазібезперервного спектру локалізованих станів в забороненій зоні.

Аналіз експериментальних результатів СООЗ проведено на основі існуючих теоретичних уявлень Бонхема [2], що враховують розподіл пасток в забороненій зоні. Інформація про характер такого розподілу отримана з досліджень залежності термічної енергії активації носіїв від прикладеного зовнішнього поля (мал. 1.), що характерно для гаусовського розподілу пасток, та добре описуються в рамках теорії Бонхема.

Відомо, що довготермінове перебування зразків BGO та BSO під напругою в режимі СООЗ призводить до збільшення провідності на 3 - 5 порядків. Для уточнення механізму цього явища були вивчені ТСС стимульованих зразків. Одержані результати



Мал. 1. Залежність енергії активації провідності BSO від напруги



Мал. 2. Осцилограма фотопереносу в $Bi_{12}SiO_{20}$.

дозволяють однозначно зв'язати стимуляцію з заповненням локалізованих станів в забороненій зоні.

Наведені результати систематичних досліджень переносу в кристалах сегнетоелектрика з розмитим фазовим переходом NBT. Частотна залежність провідності та температурна залежність рухливості свідчать про стрибковий механізм провідності також і в цих кристалах.

Такий же комплекс вимірювань був виконаний для кристалів ніобату літія. На протязі довгого часу ніобат літія використується в якості фоторефрактивного матеріалу, тому численні аспекти його електричних властивостей достатньо повно вивчені. Проте в більшості праць обговорення результатів провадиться на засадах моделі вільних носіїв. На основі одержаних нами даних можливо стверджувати, що провідність NL здійснюється за стрибковим механізмом. При цьому характер стрибків різний для різних температурних інтервалів. В низькотемпературній області стрибки здійснюються по коротких ланцюжках, а з ростом температури довжина ланцюжків зростає. Достатньо чітко виділяються три температурні участки з числом стрибків в ланцюжках $\sim 3, 10, \text{і } 60-90$.

Особлива увага була приділена вивченню рухливості носіїв заряду прямим методом: вимірюванням часу їх прольоту через кристал. Типова осцилограма переносу носіїв, збуджених світлом, наведена на мал. 2. Така залежність характерна для дисперсійного транспорту.

Виявлена задовільна відповідність між значеннями рухливості, одержаними з вимірювань стаціонарних СООЗ, перехідних СООЗ та за часо-прольотною методикою. Знайдено, що величина рухливості носіїв залежить від величини провідності кристалів в стані стимуляції. В загальному вигляді ця залежність описується степенною функцією $\mu \sim p^n$, де n ступінь стимуляції, дорівнює

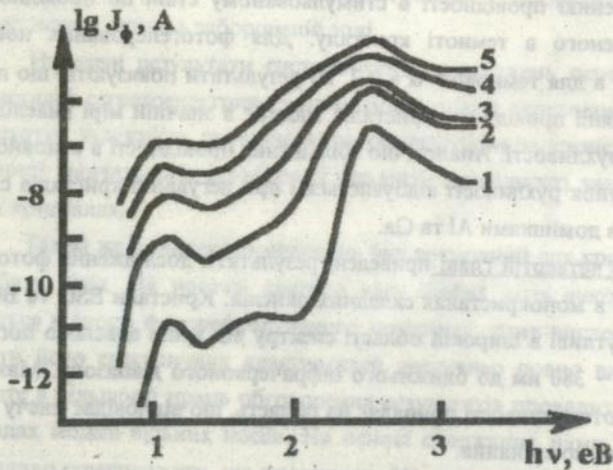
відношенню провідності в стимульованому стані до провідності прокаленого в темноті кристалу. Для фотогенерованих носіїв $\alpha \approx 0.21$, а для темнових $\alpha \approx 0.7$. Ці результати показують, що при стимуляції провідність кристалів зростає в значній мірі внаслідок росту рухливості. Аналогічно збільшення провідності в основному за рахунок рухливості відбувається і при легуванні кристалів силенитів домішками Al та Ga.

В четвертій главі приведені результати дослідження фотопереносу в монокристалах складних окислів. Кристали BSO та BGO fotocутливі в широкій області спектру від краю власного поглинання ~ 380 нм до ближнього інфрачервоного діапазону. Максимум fotocутливості припадає на область, що відповідає плечу оптичного поглинання.

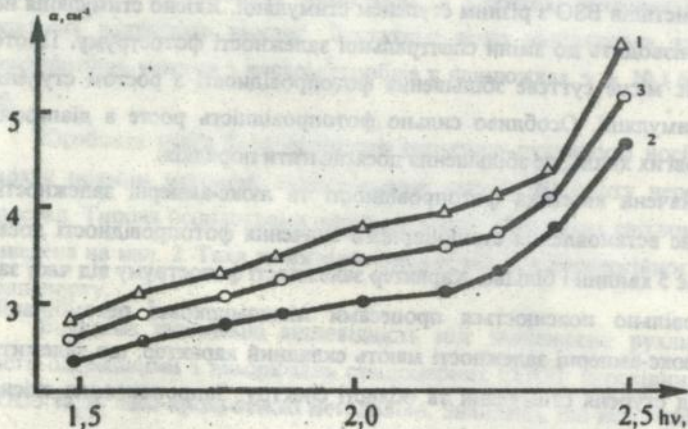
Фотоперенос в BSO та BGO раніше достатньо повно вивчено [3]. Але фотопровідність стимульованих кристалів ще не вивчалась. На мал. 3 приведена спектральна залежність фотоструму для кристалів BSO з різним ступенем стимуляції. Якісно стимуляція не призводить до зміни спектральної залежності фотоструму. Проте має місце суттєве збільшення фотопровідності з ростом ступеня стимуляції. Особливо сильно фотопровідність росте в діапазоні довгих хвиль, де збільшення досягає п'яти порядків.

Вивчена кінетика фотопровідності та люкс-амперні залежності. Час встановлення стаціонарного значення фотопровідності досягає 5 хвилин і більше. Характер залежності фотоструму від часу задовільно пояснюється процесами міждомішкової рекомбінації. Люкс-амперні залежності мають складний характер, що залежить від ступеня стимуляції та області спектру. Запропонована якісна модель, яка пояснює ці залежності.

Освітлення нестимульованого зразка короткохвильовим світлом також призводить до підвищення фотопровідності в довгохвильовій області. Це явище відоме як індукована домішкова



Мал.3. Спектральні залежності фотосуму для:
1 - $n = 1$; 2 - $n = 10^2$; 3 - $n = 10^3$; 4 - $n = 10^4$; 5 - $n = 10^5$.



Мал. 4. Спектральні залежності коефіцієнту поглинання ВГО.
1 - нестимульований, 2 - $n = 10^4$, 3 - $n = 10^3$, n - відношення
струмів в стимульованому та нестимульованому зразках.

фотопровідність (ІДФ). Дослідження польових залежностей дало можливість виявити значне підвищення рухливості при фотозбудженні також і в стані ІДФ.

В п'ятій главі приведені результати дослідження оптичного поглинання в легованих та стимульованих кристалах. Відомо, що легування кристалів призводить до появи нових (домішкових) смуг поглинання. Більш незвичним являється просвітлення кристалів при введенні домішок. В літературі [4] відомі дані про просвітлення кристалів BSO(BGO), легованих Al, або Ga. Ці ж домішки призводять до значного збільшення провідності та рухливості. Як було показано, провідність та рухливість сильно збільшуються при стимуляції електричним полем. Тому були започатковані дослідження впливу стимуляції на поглинання світла. Зміна коефіцієнту поглинання світла зразків при стимулюванні приведені на мал. 4. Внаслідок стимулювання кристалів BSO(BGO) має місце зменшення коефіцієнту поглинання в широкому інтервалі довжин хвиль.

Спектр поглинання BSO в області "плеча поглинання" має складну структуру. Параметри розкладення спектру поглинання BSO подані в таблиці.

Таблиця. Параметри розкладення спектру поглинання BSO.

вихідний зразок			стимульований зразок			A ₁ /A ₂
hν ₀ eV	A ₁ см ⁻¹	Δhν _{1/2} eV	hν ₀ eV	A ₂ см ⁻¹	Δhν _{1/2}	
1.33	0.35	0.40	--	--	--	--
1.48	0.30	0.50	--	--	--	--
1.69	0.45	0.51	1.69	0.01	0.29	45
1.78	0.35	0.50	1.83	0.16	0.33	2.20
2.10	0.50	0.47	2.10	0.13	0.37	3.85
2.27	0.60	0.40	2.27	0.30	0.33	2.00
2.42	0.85	0.47	2.42	0.06	0.40	1.42
2.66	2.00	0.50	2.65	1.20	0.50	1.67
3.20	60.00	0.58	3.20	60.0	0.58	1.00

Ці результати, а також дослідження спектральної залежності фотопровідності свідчать про наявність в забороненій зоні BSO квазібезперервного розподілення домішкових рівнів.

Весь комплекс експериментальних результатів несуперечливо укладається в таку схему. Стрибок носія - тунелювання електрона з одного локалізованого стану на інший за участю фонона. Переходи між різними пастковими рівнями проходять з поглинанням або випромінюванням фонона. Перенос носіїв заряду обумовлюється розподіленням носіїв по локалізованих станах. "Стрибова зона" являє собою локалізовані рівні, розподілені в інтервалі kT поблизу рівня Фермі. Освітлення або інжекція носіїв може визвати зміщення рівня Фермі шляхом перерозподілу, або зоповнення нестабільних пасткових рівнів, змінюючи тим самим умови стрибків електронів. Проведено аналіз цієї схеми на прикладі найбільш простої моделі, енергетична схема якої приведена на мал. 5.

Зростання питомої електропровідності, що спостерігається у випадку стимульованої провідності, обумовленої інжекцією носіїв з електродів, може бути пояснене як збільшенням заселеності рівнів провідності, так і збільшенням рухливості носіїв заряду.



Мал. 5. Модель, що дозволяє пояснити високе значення енергії активації рухливості.

Запропонована модель задовільно пояснює високе значення енергії активації провідності, що має місце в складних окислах. Згідно моделі термічне збудження носіїв проходить за два етапи. Первісно носій, що знаходиться на нижньому рівні, після поглинання енергії W_0 збуджується в область стрибків і далі переміщується по цих рівнях активаційно, але уже з меншою енергією активації. Значення енергії активації, що фіксується в експерименті, дорівнює сумі цих двох енергій ($\Delta E = W_0 + W$).

Трудніше пояснити довготермінове збереження збудженого, стимульованого стану, або записаної голограми. Наявні експериментальні результати та теоретичні моделі не дозволяють задовільно пояснити збереження стимульованого стану. Частково довготермінове збереження стимульованого стану можна пов'язати з подвійною інжекцією носіїв.

Основні результати та висновки

Кристали складних окислів знаходять широке застосування в низці пристроїв керування лазерним випромінюванням, запису та збереження оптичної інформації. Серед цих матеріалів особливе місце займають кристали силленитів германію та кремнію, а також кристали ніобату літія та складних перовскитів.

1. В роботі проведені комплексні дослідження темної електропровідності в широкому інтервалі постійного електричного поля, а також на змінному струмові в широкому інтервалі температур кристалів германо- і силікосилленитів номінально чистих та з домішками деяких атомів, а також кристалів ніобату літія та титанату натрія-вісмуту. На кристалах силленитів підтверджено раніше спостережуване збільшення провідності внаслідок дії сильного електричного поля. В кристалах ніобату літія та NBT стимульований стан виявлено вперше. Це вказує на загальність стимульованого стану в кристалах складних окислів.

2. В кристалах силленитів вивчено явище індукованої фотопровідності. Показано, що індукована фотопровідність пов'язана з перерозподілом електронів між локалізованими станами в забороненій зоні.
3. Проведено експериментальне дослідження впливу стимулювання провідності в кристалах силленитів електричним полем на спектрі оптичного поглинання поблизу краю власного поглинання. Вперше виявлено зменшення поглинання світла внаслідок стимуляції.
4. Проведено детальний порівняльний аналіз рухливості носіїв в кристалах, поміряної за допомогою вольтамперних характеристик COO_3 , а також за допомогою часо-прольотної методики зі збудженням носіїв поблизу електроду. Результати дослідження рухливості різними методами знаходяться в добрій відповідності. Стимулювання кристалів полем збільшує рухливість носіїв. В стимульованому стані та в стані індукованої провідності механізм переносу, як і в вихідному стані, має стрибковий характер.
5. На основі дослідження рухливості носіїв показано, що провідність в складних окислах здійснюється стрибками по локалізованих станах. Проведено аналіз частотних залежностей рухливості носіїв. Показано, що стрибки здійснюються по мультиплетних станах. Локалізовані стани розподілені в забороненій зоні за гаусовським законом, що визначається функціональним розподілом густини дефектів ґратки та домішок.
6. Методом розкладання контуру спектру поглинання світла в області "плеча поглинання" показано, що він складається з великої кількості гаусовських піків. Кількість піків залежить від легуючих домішок. Виявлено заглушування деяких піків в процесі стимулювання сильним полем. Виявлена кореляція між ефектом

просвітлення силіценітів введенням домішок Al і Ga та стимуляцією зразків.

7. Весь набір експериментальних фактів – стимульована провідність, фотоіндукована фотопровідність та вплив легування на електропровідність – задовільно описуються в рамках стрибків між локалізованими станами, заповнення яких змінюється при легуванні, стимулюванні та фотозбудженні.

Основні результати дисертації надруковані

у роботах:

1. Бунина Л.К., Кудзин А.Ю., Соколянський Г.Х., Юдин А.С. Аппроксимация экспериментальных ВАХ кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ с помощью аналитических приближений теории ТОПЗ // ФТТ. - 1992. - т.34, N 2. - с.461-466.
2. Авраменко В.П., Крузина Т.В., Кудзин А.Ю., Соколянський Г.Х., Юдин А.С. Электрические свойства монокристаллов натрий-висмутитового титаната. // ФТТ. - 1989. - т.31 в.3, с. 325-327.
3. Бунина Л.К., Гуенок Е.П., Кудзин А.Ю., Соколянський Г.Х., Юдин А.С. Стимулированная проводимость и оптическое поглощение в кристаллах ниобата лития // ФТТ. - 1991. т.33, N 8. - с. 2465-2467.
4. Бунина Л.К., Кудзин А.Ю., Соколянський Г.Х., Юдин А.С. Влияние сильного электрического поля на свойства ниобата лития // Тез. докл. XV Всесоюз. конф. "Акустоэлектроника и физическая акустика твердого тела" Ленинград 1991. - ч.1. с. 46-47.
5. Бунина Л.К., Кудзин А.Ю., Соколянський Г.Х., Юдин А.С. Влияние сильного поля на электрические свойства кристаллов сложных окислов // Тез. докл. V Всесоюз. школы-семинара по физике сегнетоэластиков. Ужгород. - 1991. с. 79.

6. Бунина Л.К., Кудзин А.Ю., Соколянский Г.Х., Юдин А.С. Электропроводность и локальные состояния в кристаллах LiNbO_3 // Тез. докл. XIII конф. по физике сегнетоэлектриков. Тверь. - 1992. - т. 2. - с. 41.
7. Юдин А.С. Роль примесных состояний в процессе стимуляции германата висмута // В сб. Физические свойства кристаллов активных диэлектриков. - Днепропетровск, ДГУ. - 1989. - с. 102-107.
8. Соколянский Г.Х., Юдин А.С. Фотопроводимость стимулированных кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ // В сб. Физические свойства кристаллов активных диэлектриков. - Днепропетровск, ДГУ. - 1989. - с. 107-112.
9. Кудзин А.Ю., Соколянский Г.Х., Юдин А.С. Уменьшение оптического поглощения кристаллов $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ при стимуляции электрическим полем. // ФТТ. - 1988. - т.30, в.6. с. 1864-1865.
10. Кудзин А.Ю., Соколянский Г.Х., Юдин А.С. Влияние стимуляции электрическим полем на оптические и фотоэлектрические свойства $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ // ФТТ. 1991. - т.33, N 3. - с. 981-984.
11. Кудзин А.Ю., Соколянский Г.Х., Юдин А.С. Фотопроводимость стимулированных монокристаллов германосилленита // Тез. 6 Всесоюз. конф. по физике диэлектриков. Секц. 2. "Процессы электропереноса и накопления зарядов в диэлектриках". Изд-во ЦНИИ "Электроника". М. 1988. - с. 37.
12. Агафонов О.В., Кудзин А.Ю., Соколянский Г.Х., Юдин А.С. Фотопроводимость кристаллов германосилленита в состоянии стимулированной проводимости. // Тез. докл. Всесоюз. научн. конф. "Фотоэлектрические явления в полупроводниках". Ташкент. Изд-во "ФАН". - 1989. - с.345.
13. Бунина Л.К., Кудзин А.Ю., Соколянский Г.Х., Юдин А.С. Спектры фотопроводимости кристаллов силикосилленита, легированных хромом // Тез. докл. IX Всесоюз. симпозиума

по спектроскопии кристаллов, активированных ионами редкоземельных и переходных металлов. Ленинград. - 1990. с. 157.

14. Бунина Л.К., Кудзин А.Ю., Соколянский Г.Х., Юдин А.С. Структура спектров поглощения ниобата лития // Тез. докл. Всесоюзн. совещания-семинара "Спектроскопия лазерных материалов". Краснодар. 1991. - с.94.

Цитована література.

1. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации / Л. Наука, - 1983. - 270 с.
2. Силиньш Э.А. Электронные состояния в органических молекулярных кристаллах / Рига Зинатна, 1978, - 344 с.
3. Костюк В.Х., Кудзин А.Ю., Соколянский Г.Х. Фотоперенос в монокристаллах $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ // ФТТ. - 1980. - т. 22, в.8. - с. 2454 - 2459.
4. Hou S.L., Lauer R.B., Aldrich R.E. Transport processes of photoinduced carries in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ // J.Appl. Phys. - 1973. - v.44, №6. - p. 2652 - 2658.



436870

Юдин А.С. Стимулированная проводимость в кристаллах с низкой подвижностью.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела. Днепропетровский государственный университет. Днепропетровск, 1996.

Проведено сравнительное исследование подвижности заряда методами стационарных токов ограниченных объемным зарядом (ТООЗ), переходных (ТООЗ) и время-пролетной методикой в кристаллах BSO и BGO, величина проводимости которых контролировано изменялась в пределах 4-х порядков под действием сильного электрического поля. Обнаружено уменьшение поглощения света кристаллами в области "плеча поглощения", вызванное стимуляцией. Показано, что спектр поглощения состоит из отдельных гауссовских пиков разной амплитуды и дисперсии, определяемых составом примесей, технологией приготовления и предисторией кристаллов.

YUDIN A.S. Stimulated conductivity in crystals with low charge mobility.

Thesis on search of the scientific degree of candidate of physical and mathematical sciences, speciality 01.04.07 - solid state physics. Dnepropetrovsky State University. Dnepropetrovsk, 1996.

Comparative research of mobility of charge carriers by methods of stationary currents limited by the space charge (SCLC), transitive SCLC and by time-overfly technique in crystals BSO and BGO is conducted. The value of conductivity of crystals changed within the limits of four orders under the effect of a strong electric field. Reduction of light absorption in the crystals in the area of "absorption shoulder" due to stimulation has been revealed for the first time. It is shown, that the spectrum of absorption consists of separate Gausse curves of different amplitude and dispersion, determined by impurities composition, technology of manufacturing and crystals background.

Ключові слова: монокристали, складні окисли, стимульована провідність, індукована фотопровідність, локалізовані стани, оптичне поглинання, рухливість носіїв, стрибова провідність.