

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

---

На правах рукопису

ДЕМЧИШИН Омелян Іванович

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНІ І ТЕРМОМАГНІТНІ ЯВИЩА В АНІЗОТРОПНИХ  
СЕРЕДОВИЩАХ ПРИ ВЕЛИКИХ ГРАДІЄНТАХ ТЕМПЕРАТУРИ

Спеціальність 01.04.10 - фізика напівпровідників  
і діелектриків

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Чернівці - 1994

17 23. 291

Робота виконана на кафедрі термоелектрики Чернівецького державного університету.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,  
професор БУЛАТ Лев Петрович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
професор БУДА Іван Степанович  
доктор фізико-математичних наук,  
професор МЕЛЬНИЧУК Степан Васильович

Провідна установа: Інститут прикладних проблем механіки і математики АН України

Захист відбудеться "18" листопада 1994 р. в 14 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Чернівецького державного університету ім. Федьковича.

Адреса: 274012, м. Чернівці, вул. Коцюбинського, 2.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Чернівецького державного університету.

Автореферат розісланий "18" січня 1994 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради

Курганецький М.В.

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00801515 (К)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Використання термоелектричних і термомагнітних приладів в якості нагрівників і холодильних пристроїв, генераторів електричного струму і стабілізаторів температури зростає у зв'язку з розробкою і впровадженням енергозберігаючих технологій. В той же час мініатюризація термоелектричних перетворювачів енергії, їх робота в широкому діапазоні температур від наднизьких до високих і інші екстремальні умови, ставлять питання про вивчення властивостей напівпровідників при дії великих градієнтів температури.

Сучасна експериментальна база дає можливість досягнути значних градієнтів температури ( $\sim 10^9$  К/см в металах і  $\sim 10^{10}$  К/см в напівпровідниках). Великі градієнти температури (ВГТ) в металах досягаються при лазерній дії, електронно-променевої обробці і т.д. В напівпровідниках ВГТ можуть бути також досягнені при відповідному розігріві газу носіїв струму надвисокочастотним полем і іншими методами. Експериментальні роботи, які виконані нашими співвідчизниками, а також за кордоном, дають можливість зробити висновки, що вивчення термоелектричних, теплопровідних, термомагнітних і теплопровідних в магнітному полі властивостей напівпровідників при ВГТ актуальне.

Метою роботи є мікроскопічне і феноменологічне, на основі симетрії анізотропного напівпровідника, дослідження структури кінетичних тензорів вищих рангів для отримання інформації, яка дозволяє при дії на середовище ВГТ у відсутності чи наявності в середовищі магнітного поля:

- виявити нові нелінійні локальні і нелокальні термоелект-

ричні (теплопровідні) і термомагнітні ефекти (в дальнішому термо-ефекти) в анізотропних середовищах без конкретизації симетрії середовища;

- класифікувати нелінійні термоелектричні ефекти за єдиною класифікаційною системою;

- виявити і класифікувати нові нелінійні локальні і нелокальні термоелектричні ефекти в анізотропних середовищах з конкретною симетрією, наприклад, середовища з симетрією кубічної системи;

- дослідити термоелектричні властивості середовищ з штучною анізотропією.

На захист виноситься:

1. В анізотропних середовищах мають місце нелінійні локальні і нелокальні, як поздовні так і поперечні, термоелектричні і теплопровідні ефекти.

2. В анізотропних середовищах при дії великого градієнту температури і наявності слабкого магнітного поля мають місце нелінійні локальні і нелокальні термомагнітні електричні і теплопровідні ефекти.

3. Класифікаційна система термоелектричних, гальванотермомагнітних і термомагнітних ефектів узагальнена при дії великих градієнтів температури.

4. Великий градієнт температури є причиною появи нелінійних явищ в кристалічних кубічних системах, які в лінійній теорії проявляють ізотропні термоелектричні властивості. При цьому наявність магнітного поля (його відсутність) спричиняє появу відповідних термомагнітних (термоелектричних) ефектів.

5. Вплив ВГТ на термоелектричні властивості твердого тіла

можливий в середовищах із штучною анізотропією (плосдинно-шаруваті гетерогенні середовища) при виконанні умови що градієнт температури, який прикладений до системи блоків метал-напівпровідник, значно менший ніж характерний градієнт температури напівпровідника.

Наукова новизна. В дисертації отримані наступні нові результати:

1. В рамках мікроскопічного підходу записані вирази для густини струму і густини теплового потоку, які внаслідок дії ВГТ, містять нелінійні і нелокальні складові по градієнту температури і електричному полю, породженому цим градієнтом температури.

2. Проведено аналіз структури кінетичних тензорів вищих рангів в узагальнених на випадок дії в анізотропному середовищі ВГТ законах електро- і теплопровідності.

3. Зроблено аналіз нелінійних локальних і нелокальних термоелектричних і теплопровідних ефектів, поява яких спричинюється дією на анізотропне середовище ВГТ.

4. Виходячи із розкладу по магнітному полю узагальнених рівнянь електро- і теплопровідності, проведено аналіз структури кінетичних тензорів для анізотропних середовищ при дії на них ВГТ і магнітного поля.

5. Зроблено аналіз нелінійних локальних і нелокальних термомігнітних ефектів, які виникають при сумісній дії на анізотропне середовище ВГТ і магнітного поля.

6. Запропонована узагальнена модель класифікації нелінійних локальних і нелокальних термоелектричних (теплопровідних) і термомігнітних ефектів.

7. Феноменологічно, на основі симетрії кристалів кубічної системи, в цих середовищах проведено аналіз структури кінетичних тензорів на випадок дії ВГТ при відсутності і наявності магнітного поля.

8. Теоретично досліджені нові термоелектричні і термомагнітні нелінійні локальні і нелокальні ефекти в кристалах кубічної системи з симетрією п'яти підгруп.

9. На основі узагальненої моделі класифікації термоелектричних і термомагнітних нелінійних ефектів зроблена класифікація ефектів в кристалах кубічної системи.

10. Проведено теоретичні дослідження термоелектричних властивостей середовищ із штучною анізотропією (площинно-шаруватих), в яких не розігрітий зовні градієнт температури спричиняє розігрів електронів і появу нелінійних властивостей в напівпровідникових частинах блоків метал-напівпровідник гетерогенного середовища.

Практична цінність даної роботи визначається тим, що рекомендації, які випливають з результатів даної роботи, можуть бути використані для створення нових напівпровідникових приладів які працюють при ВГТ.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались на республіканській школі-семінарі по теорії напівпровідників (с. Валя Кузьмін Чернівецької області, 1982), III Школі по термоелектриці (Яремча, 1982), VI Республіканській конференції по статистичній фізиці (Львів, 1982), XI, XII нарадах по теорії напівпровідників (Ужгород, 1983, Ташкент, 1984), VI Всесоюзному симпозиумі "Плазма и неустойчивости в полупроводниках" (Вільнюс, 1986), I Всесоюзному (Ленінград, 1987) і III міждержавному (Санкт-Петербур-

бург, 1992) семінарах, II, III і IV міжнародні конференції "Електронні властивості металічних/неметалічних мікросистем" (Чехословаччина, 1989, ФРН, 1991, Великобританія, 1993).

Публікації. По темі дисертації є 16 публікацій, список яких приведений в кінці автореферату.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох глав, висновку і списку основної використаної літератури. Загальний об'єм роботи - 139 сторінок, включаючи 5 рисунків, 4 таблиці, і схему і 10 сторінок бібліографії з 107 найменувань.

#### ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність вибраної теми, визначена мета роботи, сформульовані основні положення які захищаються, викладена структура дисертації.

Перша глава має оглядовий характер.

В першому розділі глави проведено короткий історичний огляд відкритих термоелектричних і термомагнітних явищ.

В другому розділі розглядається теорія термоелектричних і термомагнітних явищ в термоелектрично-анізотропних середовищах. В основу викладення покладені узагальнені закони електро- і теплопровідності і співвідношення Онзагера. Розглянуті термоелектричні і термомагнітні явища в анізотропних середовищах і проведена їх класифікація.

В третьому розділі визначається функція розподілу електронів в однорідному ізотропному монополярному (електронному), невирод-

женому напівпровіднику з елементарною зонною структурою, якщо в ньому створений ВГТ. При умові, що концентрація електронів невелика і перерозподіл їх енергії відбувається лише завдяки взаємодії з фоновими, методом теорії збурень отримано розв'язок кінетичного рівняння Больцмана, коли розсіювання імпульсу електронів відбувається на акустичних фононах, або на іонізованих домішках. Отримані з функції розподілу вирази для густини струму і густини потоку електронної енергії є нелінійними і нелокальними по градієнту температури і електричному полю.

Друга глава присвячена вивченню термоелектричних (теплопровідних) і термомагнітних явищ в анізотропних середовищах при ВГТ без конкретизації симетрії середовища.

В першому розділі глави розглядаються рівняння електро- і теплопровідності, які в узагальненні відповідних рівнянь третього розділу на випадок дії на анізотропне середовище ВГТ і, отже, становлять розклад в ряд по степенях  $\nabla T$  і вищих похідних від температури  $T$  по координатах. Обмежившись третіми степенями  $\nabla T$  градієнту температури і третіми похідними від температури по координатах, а також враховуючи тензорний характер коефіцієнтів в розкладі (кінетичних коефіцієнтів), для узагальнених рівнянь термодинамічних потоків можемо записати співвідношення:

$$\vec{S} = \hat{\Phi}^{(0)} \cdot \nabla T + \hat{\Phi}^{(11)} \cdot (\nabla T)^2 + \hat{\Phi}^{(12)} \cdot (\nabla T)^3 + \hat{\Phi}^{(21)} \cdot \nabla \times \nabla T + \hat{\Phi}^{(22)} \cdot \nabla T \cdot \nabla \times \nabla T + \hat{\Phi}^{(23)} \cdot \nabla \times \nabla \times \nabla T,$$

де  $\vec{S} = ( \vec{E}, \vec{q} )$  - термодинамічні потоки (термоелектричне поле  $\vec{E}$ , або густина теплового потоку  $\vec{q}$ );  $\hat{\Phi}^{(0)} = ( \hat{\alpha}, -\hat{\kappa} )$  - тензори звичайних коефіцієнтів термо-е.р.с. і теплопровідності;  $\hat{\Phi}^{(ar)}$  - кінетичні тензори вищих рангів;  $\nabla \times \nabla T$  - тензорний добуток  $\nabla$  на  $\nabla T$ .

Феноменологічно без врахування симетрії середовища на основі симетрії кінетичних тензорів, які входять в узагальнені рівняння і описують нелінійні і нелокальні властивості середовища при ВГТ, теоретико-груповим методом проведено дослідження по виявленню можливих нелінійних локальних і нелокальних термоелектричних і теплопровідних ефектів. Дослідження проводилось при напрямленні градієнту температури вздовж координатної осі вибраної системи координат. Отримані нелінійні локальні і нелокальні термоелектричні і теплопровідні ефекти класифіковані на основі узагальнення існуючих класифікаційних систем лінійної теорії.

В другому розділі розглядається випадок, коли на анізотропне середовище діє магнітне поле  $\vec{B}$ . В цьому випадку розклад попереднього співвідношення по магнітному полю приводить при обмеженні квадратичними членами до векторного рівняння, яке зв'язує градієнт температури і магнітне поле з досліджуваними термодинамічними величинами:

$$\vec{S} = \left( \hat{\Phi}^{m(11)} \cdot (\nabla T)^2 + \hat{\Phi}^{m(12)} \cdot (\nabla T)^3 + \hat{\Phi}^{m(21)} \cdot \nabla \times \nabla T + \hat{\Phi}^{m(22)} \cdot \nabla T \cdot \nabla \times \nabla T + \right. \\ \left. + \hat{\Phi}^{m(23)} \cdot \nabla \times \nabla \times \nabla T \right) \cdot \vec{B} + \left( \hat{\Phi}^{m(13)} \cdot (\nabla T)^2 + \hat{\Phi}^{m(14)} \cdot (\nabla T)^3 + \hat{\Phi}^{m(24)} \cdot \nabla \times \nabla T + \right. \\ \left. + \hat{\Phi}^{m(25)} \cdot \nabla T \cdot \nabla \times \nabla T + \hat{\Phi}^{m(26)} \cdot \nabla \times \nabla \times \nabla T \right) \cdot \vec{B} \cdot \vec{B}.$$

Врахування симетрії тензорів дає можливість розглянути цілий ряд нелінійних локальних і нелокальних термомагнітних ефектів. Розгляд нелінійних ефектів проводився при напрямленні  $\nabla T$  і  $\vec{B}$  вздовж координатних осей системи координат. При цьому, якщо розглядалися ефекти в поздовжньому магнітному полі, то  $\nabla T \parallel \vec{B} \parallel \vec{e}_1$ , а якщо в поперечному магнітному полі - то  $\nabla T \parallel \vec{e}_1$  і  $\vec{B} \parallel \vec{e}_3$ .

В третьому розділі всі термоелектричні ефекти зводяться в узагальнену

на нелінійний випадок класифікаційну систему, яка розділяє їх по восьми класифікаційним ознакам. При цьому за першою класифікаційною ознакою розділяються ефекти на лінійні і нелінійні. За другою класифікаційною ознакою розділяються ефекти на локальні і нелокальні. Третя ознака виділяє два класи ефектів термоелектричні і теплопровідні. За четвертою ознакою ефекти поділяються на термомагнітні електричні або теплопровідні і на термоелектричні або теплопровідні. За шостою ознакою визначається взаємна орієнтація градієнту температури і магнітного поля. Сьома класифікаційна ознака розділяє ефекти на парні і непарні по градієнту температури. Восьма класифікаційна ознака визначає поперечні і поздовжні ефекти в залежності від напрямків  $\vec{S}$  і  $\nabla T$ .

Для компактного запису кінетичних ефектів в анізотропному середовищі використовується символічна формула ефекту (СФЕ):

$$X = ( S^m K_p^n R O ),$$

де  $X$  - розглядуваний ефект.

В цій формулі перша буква  $S = (E, q)$  вказує на розглядувану фізичну величину. Верхній індекс  $m = (+, -, 0)$  при цій букві вказує на парність "+" або непарність "-" ефекту по магнітному полю. Якщо магнітне поле відсутнє, то приймаємо  $m = 0$ . Друга буква СФЕ  $K = (U, A)$  вказує на першу класифікаційну ознаку ( $U$  - ефект лінійний і  $A$  - ефект нелінійний). Верхній індекс при цій букві  $n = (+, -, 0, 1)$  вказує на парність "+" або непарність "-" ефекту по  $\nabla T$ . Крім цього для нелокальних ефектів використані індекси: 0, якщо  $S$  не залежить від  $\nabla T$ ; 1, якщо  $\nabla T$  входить в першому степені. Нижній індекс  $F = (L, N)$  вказує на другу класифікаційну ознаку ( $L$  - ефект локальний і  $N$  - нелокальний). Третя буква СФЕ  $R = (P, C, O)$  виз-

начає шосту ознаку класифікації ( $P - \nabla T \vec{B}$ ,  $C - \nabla T \vec{B} \cdot \vec{O} - \vec{B} = 0$ ). Четвертий знак в СФЕ  $\Omega = \{ |, \perp \}$  вказує на паралельність " | " або перпендикулярність "  $\perp$  " ефекту до градієнту температури. Для більш детального висвітлення взаємного розміщення векторів, які описують ефекти Р-типу, використані додаткові позначення H і G. Вони знаходяться в кінці СФЕ і мають олідуючий смисл: буква H вказує що вектори  $\vec{S}$ ,  $\vec{B}$  і  $\nabla T$  напрямлені як в ефекті Холла; буква G вказує на паралельність векторів  $\vec{S}$  і  $\vec{B}$  (як в ефекті Грабнера).

Символічні формули всіх можливих термоелектричних ефектів для анізотропного середовища виписані в таблиці 1.

$X_i$	СФЕ	$X_i$	СФЕ	$X_i$	СФЕ	$X_i$	СФЕ	$X_i$	СФЕ
1	$S^{\circ}U_L^{\circ}O $	11	$S^{\circ}A_L^{\circ}O $	21	$S^{\circ}A_L^{\circ}P H$	31	$S^{\circ}A_N^{\circ}C $	41	$S^{\circ}A_N^{\circ}P G$
2	$S^{\circ}U_L^{\circ}O\perp$	12	$S^{\circ}A_L^{\circ}C $	22	$S^{\circ}A_N^{\circ}O $	32	$S^{\circ}A_N^{\circ}C\perp$	42	$S^{\circ}A_N^{\circ}P H$
3	$S^{\circ}U_L^{\circ}C $	13	$S^{\circ}A_L^{\circ}G $	23	$S^{\circ}A_N^{\circ}O\perp$	33	$S^{\circ}A_N^{\circ}C $		
4	$S^{\circ}U_L^{\circ}C\perp$	14	$S^{\circ}A_L^{\circ}C\perp$	24	$S^{\circ}A_N^{\circ}O $	34	$S^{\circ}A_N^{\circ}P $		
5	$S^{\circ}U_L^{\circ}P $	15	$S^{\circ}A_L^{\circ}C\perp$	25	$S^{\circ}A_N^{\circ}O\perp$	35	$S^{\circ}A_N^{\circ}P\perp$		
6	$S^{\circ}U_L^{\circ}P G$	16	$S^{\circ}A_L^{\circ}P $	26	$S^{\circ}A_N^{\circ}O\perp$	36	$S^{\circ}A_N^{\circ}P\perp$		
7	$S^{\circ}U_L^{\circ}P H$	17	$S^{\circ}A_L^{\circ}P\perp$	27	$S^{\circ}A_N^{\circ}O\perp$	37	$S^{\circ}A_N^{\circ}P G$		
8	$S^{\circ}A_L^{\circ}O $	18	$S^{\circ}A_L^{\circ}P G$	28	$S^{\circ}A_N^{\circ}G $	38	$S^{\circ}A_N^{\circ}P H$		
9	$S^{\circ}A_L^{\circ}O\perp$	19	$S^{\circ}A_L^{\circ}P H$	29	$S^{\circ}A_N^{\circ}C\perp$	39	$S^{\circ}A_N^{\circ}P G$		
10	$S^{\circ}A_L^{\circ}O\perp$	20	$S^{\circ}A_L^{\circ}P G$	30	$S^{\circ}A_N^{\circ}C $	40	$S^{\circ}A_N^{\circ}P H$		

Третя глава присвячена вивченню термоелектричних (теплопровідних) і термомагнітних явищ в анізотропних середовищах з кубічною симетрією при дії ВТГ. Такі середовища в звичайних умовах мають ізотропні термоелектричні властивості.

В першому розділі глави дається характеристика п'яти точко-

вим групам  $T$ ,  $T_d$ ,  $T_h$ ,  $O$  і  $O_h$  кубічного середовища і визначено метод, за яким буде досліджуватись структура кінетичних тензорів.

В другому розділі на основі теоретико-групового методу, з врахуванням того, що тензори повинні бути інваріантними відносно всіх перетворень симетрії, які містяться в точковій групі, виявлено структуру кожного кінетичного тензора для всіх груп кубічної системи.

В третьому розділі проведено дослідження нелінійних термоелектричних (теплопровідних) ефектів в таких середовищах при спрямуванні  $\nabla T$  в координатну площину вибраної системи координат.

Серед нелінійних ефектів слід відмітити нецентросиметричні парні по градієнту температури поперечні локальні і нелокальні ефекти. Локальний ефект зникає при колінеарності вектора градієнту температури з яким-небудь базисним вектором фізичної системи координат (кут нахилу  $\nabla T$  до  $\vec{e}_1$ ,  $\phi = 0$ ;  $\pi/2$ ). При  $\phi = \pi/4$  ефект набуває свого максимального значення. Ці ефекти існують лише в кристалах з симетрією точкових груп  $T$  і  $T_d$ . Якщо ж симетрія кубічного кристала вища, то нецентросиметричні ефекти зникають.

Непарний по градієнту температури поперечний локальний термоелектричний (теплопровідний) ефект в кристалах з симетрією групи  $T$  визначається рівнянням

$$S_1 = \frac{1}{4} \cdot G^3 \cdot \Phi_{1111}^{(12)} \cdot R_1^{(12)} \left[ \sin 4\phi + 2 \cdot \left[ 1 - R_2^{(12)} \right] \cdot \sin^2 \phi \right],$$

де  $G = |\nabla T|$ ;  $R_1^{(12)}$  і  $R_2^{(12)}$  визначаються через компоненти тензора четвертого рангу  $\hat{\Phi}^{(12)}$ .

Для кристалів з симетрією, яка вища за симетрію групи  $T$ ,  $R_2 = 1$ . В цьому випадку ефект зникає при  $\phi = 0$ ;  $\pi/4$ ;  $\pi/2$ . Якщо ж  $\phi = \pi/8$ , то ефект набуває максимального значення.

Відмічений ефект аналогічний до відповідного електричного, який носить назву ефекту Сасаки. Тому його можна було б назвати термоелектричним аналогом ефекту Сасаки, якщо розглядається термоелектричне поле ( $\vec{S} = \vec{E}$ ).

В четвертому розділі розглядаються нелінійні термомагнітні явища в відмічених середовищах. При дослідженні цих ефектів градієнт температури спрямовувався в координатну площину, а магнітне поле - або в ту ж координатну площину, або вздовж третьої осі.

Аналіз нелінійних термомагнітних ефектів показує, що крім парного і непарного ефектів Нернста-Еттингсгаузена і парного ефекту магніто-е.р.с. (вони спостерігаються при малих  $\nabla T$ ) в середовищі повинні спостерігатися нелінійні добавки до них і ефекти, які є добавками до характерних для анізотропного середовища ефектів. Так при спрямуванні магнітного поля вздовж  $\vec{e}_3$ , в цьому ж напрямку ми повинні спостерігати поперечний нелінійний термомагнітний ефект  $S_3^m$  з розміщенням векторів як у ефекту Грабнера. Даний ефект складається з непарної і парної по магнітному полю складових. Кожна з них містить локальну і нелокальну частини. Нелокальні складові ефектів, на відміну від локальних, не залежать від кута нахилу  $\nabla T$  до першої координатної осі. При співпаданні  $T$  з координатною віссю ( $\nabla T \parallel \vec{e}_1$ ) парний ефект зникає, і в напрямку  $\vec{e}_3$  повинен спостерігатися непарний по магнітному полю ефект.

Ефект  $S_3^m$  є нецентросиметричним і тому повинен існувати лише в середовищах з симетрією груп  $T$  і  $T_d$ .

В п'ятому розділі проводиться класифікація розглянутих в кубічних середовищах лінійних і нелінійних, локальних і нелокальних, термоелектричних і теплопровідних, термомагнітних (електричних і

теплопровідних) ефектів. Всі розглянуті ефекти зібрані в таблиці 2.

	Групи	T			T <sub>d</sub>			T <sub>h</sub>			O			G <sub>h</sub>		
		+	-	o	+	-	o	+	-	o	+	-	o	+	-	o
1	S <sup>o</sup> U <sub>L</sub> <sup>+</sup> O <sub>I</sub>	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x
2	S <sup>o</sup> U <sub>L</sub> <sup>+</sup> O <sub>I</sub>	...	...	o	...	...	o	...	...	o	...	...	o	...	...	o
3	S <sup>m</sup> U <sub>L</sub> <sup>+</sup> C <sub>I</sub>	x	o	...	x	o	...	x	o	...	x	o	...	x	o	...
4	S <sup>m</sup> U <sub>L</sub> <sup>+</sup> C <sub>I</sub>	o	o	...	o	o	...	o	o	...	o	o	...	o	o	...
5	S <sup>m</sup> U <sub>L</sub> <sup>+</sup> P <sub>I</sub>	x	o	...	x	o	...	x	o	...	x	o	...	x	o	...
6	S <sup>m</sup> U <sub>L</sub> <sup>+</sup> P <sub>I</sub> G	o	o	...	o	o	...	o	o	...	o	o	...	o	o	...
7	S <sup>m</sup> U <sub>L</sub> <sup>+</sup> P <sub>I</sub> H	o	x	...	o	x	...	o	x	...	o	x	...	o	x	...
8	S <sup>o</sup> A <sub>L</sub> <sup>+</sup> O <sub>I</sub>	...	...	~	...	...	~	...	...	o	...	...	o	...	...	o
9	S <sup>o</sup> A <sub>L</sub> <sup>-</sup> O <sub>I</sub>	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x
10	S <sup>o</sup> A <sub>L</sub> <sup>+</sup> O <sub>I</sub>	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x
11	S <sup>o</sup> A <sub>L</sub> <sup>-</sup> O <sub>I</sub>	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x
12	S <sup>m</sup> A <sub>L</sub> <sup>+</sup> C <sub>I</sub>	~	x	...	~	x	...	o	o	...	o	o	...	o	o	...
13	S <sup>m</sup> A <sub>L</sub> <sup>-</sup> C <sub>I</sub>	x	~	...	x	~	...	x	~	...	x	~	...	x	~	...
14	S <sup>m</sup> A <sub>L</sub> <sup>+</sup> C <sub>I</sub>	x	x	...	x	x	...	o	o	...	o	o	...	o	o	...
15	S <sup>m</sup> A <sub>L</sub> <sup>-</sup> C <sub>I</sub>	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...
16	S <sup>m</sup> A <sub>L</sub> <sup>+</sup> P <sub>I</sub>	~	~	...	~	~	...	o	o	...	o	o	...	o	o	...
17	S <sup>m</sup> A <sub>L</sub> <sup>-</sup> P <sub>I</sub>	~	x	...	~	x	...	~	x	...	~	x	...	~	x	...
18	S <sup>m</sup> A <sub>L</sub> <sup>+</sup> P <sub>I</sub> G	x	x	...	x	x	...	o	o	...	o	o	...	o	o	...
19	S <sup>m</sup> A <sub>L</sub> <sup>+</sup> P <sub>I</sub> H	~	~	...	~	~	...	o	o	...	o	o	...	o	o	...
20	S <sup>m</sup> A <sub>L</sub> <sup>-</sup> P <sub>I</sub> G	~	~	...	~	~	...	~	~	...	~	~	...	~	~	...
21	S <sup>m</sup> A <sub>L</sub> <sup>-</sup> P <sub>I</sub> H	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...
22	S <sup>o</sup> A <sub>N</sub> <sup>+</sup> O <sub>I</sub>	...	...	~	...	...	~	...	...	~	...	...	~	...	...	~
23	S <sup>o</sup> A <sub>N</sub> <sup>-</sup> O <sub>I</sub>	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x
24	S <sup>o</sup> A <sub>N</sub> <sup>o</sup> O <sub>I</sub>	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x

	Групи	T			T <sub>d</sub>			T <sub>h</sub>			O			O <sub>h</sub>		
		+	-	o	+	-	o	+	-	o	+	-	o	+	-	o
25	$S^o A_N^+ O_1$	...	...	~	...	...	~	...	...	~	...	...	~	...	...	~
26	$S^o A_N^- O_1$	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x
27	$S^o A_N^o O_1$	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x	...	...	x
27*	$\check{S}^o A_N^o O_1$	...	...	x	...	...	x	...	...	o	...	...	o	...	...	o
28	$S^m A_N^+ C_1$	~	~	...	~	~	...	~	~	...	~	~	...	~	~	...
29	$S^m A_N^- C_1$	x	~	...	x	~	...	x	~	...	x	~	...	x	~	...
30	$S^m A_N^o C_1$	x	~	...	x	~	...	x	~	...	x	~	...	x	~	...
30*	$\check{S}^m A_N^o C_1$	~	x	...	~	x	...	o	o	...	o	o	...	o	o	...
31	$S^m A_N^+ C_1$	~	~	...	~	~	...	~	~	...	~	~	...	~	~	...
32	$S^m A_N^o C_1$	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...
33	$S^m A_N^o C_1$	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...
33*	$\check{S}^m A_N^o C_1$	x	x	...	x	x	...	o	o	...	o	o	...	o	o	...
34	$S^m A_N^+ P_1$	~	~	...	~	~	...	~	~	...	~	~	...	~	~	...
35	$S^m A_N^- P_1$	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...
36	$S^m A_N^o P_1$	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...
37	$S^m A_N^+ P_1 G$	~	~	...	~	~	...	~	~	...	~	~	...	~	~	...
38	$S^m A_N^+ P_1 H$	~	~	...	~	~	...	~	~	...	~	~	...	~	~	...
39	$S^m A_N^- P_1 G$	~	~	...	~	~	...	~	~	...	~	~	...	~	~	...
40	$S^m A_N^- P_1 H$	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...
41	$S^m A_N^o P_1 G$	x	x	...	x	x	...	o	o	...	o	o	...	o	o	...
42	$S^m A_N^o P_1 H$	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...	x	x	...

В таблиці " X " показує, що ефект існує; " ... " - що такий ефект не існує; " O " - ефект дорівнює нулю; " ~ " - ефект в принципі може існувати; зірочкою відмічені нецентросиметричні ефекти, символічні формули яких співпадають.

Четверта глава присвячена дослідженню середовища з штучною анізотропією. Розглядається одне з найпростіших гетерогенних середовищ - площинно-шарувате, яке являє собою періодично повторювані вздовж осі  $x$  однакові блоки. Блоки представляють собою дві однорідні ізотропні пластинки, які виготовлені з різних матеріалів, причому перше середовище є металом, а друге - напівпровідником. В цьому випадку при деякому, характерному для напівпровідника, градієнті температури відбувається розігрів електронів напівпровідника, тоді як в металах розігрів повинен проявлятися при значно більшому градієнті температури. Для такого середовища отримано аналітичне рівняння усереднених густин струму і потоку тепла, знайдено вирази для ефективних кінетичних коефіцієнтів гетерогенного середовища при умові, що градієнт температури, який прикладений до системи блоків значно менший ніж характерний градієнт напівпровідника. В кінці глави зроблені оцінки для зразка, що складається з періодично розміщених пластин металу (мідь) і напівпровідника (n-Ge).

В висновках сформульовані основні результати роботи.

1. Великий градієнт температури є причиною відхилення кінетичних властивостей напівпровідників від звичайних.

2. Якщо характерна довжина зміни температури співмірна з довжиною застигання носіїв струму в напівпровіднику, виникає відхилення симетричної функції розподілу носіїв струму від рівноважної функції.

3. Несиметричність функції розподілу носіїв струму спричиняє появу нелінійних і нелокальних складових в рівняннях для термодинамічних потоків.

4. Узагальнення рівнянь для термодинамічних потоків на випадок анізотропного середовища дає можливість розглянути нові нелінійні локальні і нелокальні термоелектричні (теплопровідні) ефекти при дії ВГТ.

5. Розклад узагальнених рівнянь електро- і теплопровідності, які враховують дію на анізотропне середовище ВГТ, по магнітному полю дає можливість розглянути нові нелінійні локальні і нелокальні термомагнітні ефекти.

6. Аналіз існуючих в лінійній теорії класифікаційних систем і нових нелінійних (локальних і нелокальних) термоелектричних (теплопровідних) і термомагнітних електричних (теплопровідних) ефектів дає змогу об'єднати всі лінійні і нелінійні (локальні і нелокальні) термоелектричні ефекти в єдину класифікаційну систему.

7. Застосування методики феноменологічного дослідження нелінійних термоелектричних ефектів до середовища з конкретною кубічною симетрією дає можливість виявити нові нелінійні термоелектричні ефекти, які виникають внаслідок дії на кристалічні кубічні системи великого градієнту температури і наявності або відсутності магнітного поля.

8. В площинно-шаруватому середовищі навіть малий в середньому градієнт температури може спричинити до появи нелінійних термоелектричних властивостей якщо різні ділянки середовища будуть мати дуже відмінні кінетичні властивості.

По темі дисертації опубліковані наступні роботи:

1. Булат Л.П., Демчишин Е.И., Ладька Р.Б., Сартинская Л.Л., Яцук В.Г. Явления переноса в твердых телах при больших градиентах температуры. - VII Респ. конф. по статист. физике: Тез. док., К. - 1982. - С. 21.

2. Булат Л.П., Демчишин Е.И. Нелинейные анизотропные термоэлектрические и термомагнитные эффекты. // Материалы III школы по термоэлектричеству, 1982., ч. I, Черновцы: ЧГУ, 1983. С. 71 - 77. (Рук. деп. в УкрНИИТИ 2 авг. 1983 г. № 862 Ук - Д83.).

3. Демчишин Е.И. Вихревые термоэлектрические токи при разогреве электронного газа большим градиентом температуры. // Материалы III школы по термоэлектричеству, 1982., ч. I. - Черновцы: ЧГУ, 1983. - С. 148 - 152. (Рук. деп. в УкрНИИТИ 2 авг. 1983 г., № 862 Ук-Д83.).

4. Булат Л.П., Демчишин Е.И., Комолов Е.Н., Ладика Р.Б., Марчук М.Е., Сартинская Л.Л. Разогревные эффекты и неустойчивости в полупроводниках при больших градиентах температуры. II сов. по теор. полупр. Тезисы докладов. Ужгород. - 1983. - С. 89 - 90.

5. Булат Л.П., Демчишин Е.И., Снарский А.А., Томчук П.М. Нелинейные эффективные кинетические коэффициенты гетерогенных сред. К. ИФ АН УССР, препринт. № 32. - 1984. - 16 с.

6. Булат Л.П., Демчишин Е.И., Ладика Р.Б. Яцук В.Г. Электронные процессы в полупроводниках при резких перепадах температуры. XII совещание по теории полупроводников. Тезисы докладов Ч. I. - К. 1985. - С. 126 - 127.

7. Булат Л.П., Демчишин Е.И. Свойства теллурида висмута и твердых растворов на его основе при больших тепловых потоках. Материаловедение халькогенидных и кислородосодержащих полупров. Тезисы докладов. II Всесоюзной конференции. Т. I. - Черновцы, 1986. - С. 135.

8. Булат Л.П., Демчишин Е.И. Электронный ветер в полупроводниках при резких перепадах температур. // ФТП. - 1986. 20, вып. 10.

- С. 1929 - 1931.

9. Булат Л.П., Демчишин Е.И. Новые эффекты при разогреве электронов в полупроводниках потоком тепла. - VI Всесоюзный симпозиум "Плазма и неустойчивости в полупроводниках". Вильнюс. - 1986. - С. 175.

10. Булат Л.П., Демчишин Е.И. О свойствах термоэлектрических материалов при резких перепадах температур. - Материалы для термоэлектрических преобразователей. Тезисы докладов Всесоюзного семинара. Ленинград. - 1987. - С. 135 -136.

11. Анатичук Л.И., Булат Л.П., Демчишин Е.И. Классификация термоэлектрических и теплопроводных явлений в условиях больших тепловых потоков. Доклады АН УССР, сер. А, физ.-мат. науки, 1989, № 5. С. 42 - 44.

12. Булат Л.П., Демчишин Е.И. Способ генерирования поперечной термоэдс в монокристаллах высокой симметрии. АС № 1484215, 1.02.1989.

13. Bulat L.P., Demchishin E.I., Jatsjuk W.G. On the thermoelectric properties of plane-laminated media. Second International Seminar on Electronic Properties of Metal/non Metal Microsystems. Book of abstracts. Štirin-Czechoslovakia, 1989. P. 22.

14. Bulat L.P., Demchishin E.I. Sasaki Phenomenon Thermoelectric Analogue and its Application to thin Film Sensors. Electronic Properties of Metal/non Metal Microsystems.- Kleineubach/Main. Germany. 1991. - P. 303.

15. Bulat L.P., Demchishin E.I. Sasaki phenomenon thermoelectric analogue and its application to thin film sensors. Int. J. Electronics, 1992, vol. 73, № 5. P. 881 - 882.

16 Азатичук Л.И., Булат Л.П., Демчишин Е.И. Новые анизотропные термомагнитные эффекты при больших градиентах температуры, теоретико-групповой анализ. Материалы для термоэлектрических преобразователей. / Тезисы докладов. III Межгосударственного семинара. Санкт-Петербург. - 1993. - С.62-63.

*С.Д.И.*

Підписано до друку 3.01.94р. Формат паперу 60 x 84 1/16  
Друк офсетний ротопринтний.Папір білий. Друкарських лис-  
тів 1. Замовлення 14. Тираж 100.

---

Тернопіль, вул. Над Ставом, 10. Обласне управління статистики,  
Відділ оперативної поліграфії.





AB 29.091  
**AB 29.091**