

ВОЛИНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені Лесі Українки

Касянчук Михайло Миколайович

УДК 621.315.592

ЕЛЕКТРОННІ ТА ФОНОННІ ТЕПЛОВІ ХВИЛІ
У НАПІВПРОВІДНИКАХ

01.04.10 — Фізика напівпровідників та діелектриків

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Луцьк – 2001

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі фізики та методики її викладання Тернопільського державного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка.

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор

ЛОГВИНОВ Георгій Миколайович,
Центр досліджень та передових методів
навчання при Національному
політехнічному інституті Мексики

Офіційні опоненти – заслужений діяч науки і техніки України,

лауреат Державних премій СРСР та України,
доктор фізико-математичних наук, професор

РАРЕНКО Іларій Михайлович,
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича, завідувач кафедри
напівпровідникової мікроелектроніки.

доктор фізико-математичних наук, професор

ФЕДОСОВ Анатолій Васильович,
Луцький державний технічний університет,
завідувач кафедри фізики.

Провідна установа – Харківський національний університет

імені В. Н. Каразіна, кафедра теоретичної фізики,
Міністерство освіти і науки України, м.Харків.

Захист відбудеться 19 жовтня 2001 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К32.051.01 при Волинському державному університеті імені Лесі Українки за адресою: 43009, м. Луцьк, вул. Потапова, 9.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Волинського державного університету імені Лесі Українки за адресою: 43009, м. Луцьк, проспект Волі, 13.

Автореферат розісланий 10 вересня 2001 року.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

В.В. Божко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В останні роки фізика теплових хвиль викликала до себе підвищену увагу завдяки успішному розвитку її прикладних напрямів і, в першу чергу, фототермічних методів дослідження різних матеріалів – твердих тіл, рідин, полімерів, біологічних об'єктів тощо [1]. Постійно зростаючий інтерес до цих методів зумовлений їх відносною простотою і універсальністю, які дозволяють досліджувати різноманітні характеристики речовини, а саме теплові, оптичні та релаксаційні [2].

В основі всіх фототермічних методів лежить детектування на поверхнях зразка нестаціонарної температури, що виникає в результаті періодичного збурення в його об'ємі змінних в просторі та часі теплових потоків, які часто називають тепловими хвилями. Зазвичай ці потоки виникають внаслідок поглинання енергії періодично модульованого лазерного випромінювання, яке на поверхні та в об'ємі зразка конвертується в тепло. Вимірюваний в експерименті відгук середовища, наприклад, акустичний, п'єзоелектричний, істотно залежить від його оптичних і теплових властивостей, ефективності перетворення енергії випромінювання в тепло, генераційно-рекомбінаційних процесів і т.п. і дозволяє отримати інформацію про такі параметри, як теплопровідність, температуропровідність, коефіцієнт поглинання світла і багато інших. Характерною особливістю цих методик є їх неструктуривність та висока прецизійність.

При теоретичному описі фототермічних процесів у напівпровідниках використовується, як правило, однотемпературна модель, яка зводиться до апріорі рівних нерівноважних температур всіх підсистем квазічастинок, що беруть участь в процесі теплопереносу [3]. Однак добре відомо, що в умовах квазіпружного розсіяння енергії електронів на акустичних фонах існує характерна дифузійна довжина релаксації енергії l_e (довжина остигання), в межах якої термічно нерівноважні електрони та фонони мають власні нерівноважні температури T_e і T_p [4]. В типових напівпровідників ця довжина є величиною порядку $10^{-2} - 10^{-4}$ см [4] і для різних матеріалів її значення наведені в [5]. В статичних теплових нерівноважних процесах ефект розузгодження температур у масивному напівпровіднику відчутний в межах областей порядку l_e , прилеглих до границь зразка. В субмікронних плівках товщиною $a < l_e$ воно має місце в усьому об'ємі [6]. Цілком очевидно, що і фототермічні процеси в напівпровідниках більш коректно розглядати з точки зору двох самоузгоджених нестаціонарних теплових процесів – електронного та фононного, тобто з точки зору поширення електронних і фононних теплових хвиль. В загальному вигляді даний підхід детально в фототермії напівпровідників практично не розглядався і визначає один з напрямів дисертаційної роботи.

Інший напрям зводиться до вивчення теплових хвиль у двошарових структурах. Актуальність цієї задачі визначається необхідністю вивчення впливу теплових характеристик інтерфейсу між шарами на поширення теплових хвиль, а також відсутністю універсальної процедури для теоретичного визначення ефективних значень теплових параметрів, зокрема ефективних значень теплопровідностей та температуропровідностей в умовах фототермічних експериментів. Існуюча процедура пошуку цих параметрів базується на аналогії між послідовно з'єднаними електричними та тепловими опорами і не може бути використана в фототермічних експериментах, де вимірюється не різниця температур на поверхнях, а лише їх абсолютні значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Напрямок дослідження пов'язаний з планом наукової роботи кафедри фізики та методики її викладання Тернопільського державного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка.

Мета дослідження полягає у створенні теорії фототермічних процесів в однорідних та ізотропних напівпровідниках в рамках двотемпературної моделі і в частинно однорідних

та ізотропних двошарових структурах в однотемпературному наближенні.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі **задачі**:

1. Дослідження формування і поширення електронних та фононних теплових хвиль у сильно поглинаючих напівпровідниках, коли вся енергія зовнішнього модульованого лазерного випромінювання трансформується в тепло на поверхні зразка.
2. Дослідження електронних та фононних теплових хвиль у напівпровідниках, коли має місце поглинання електромагнітного випромінювання в усьому об'ємі зразка.
3. Теоретичне дослідження фази та амплітуди термоелектричних відгуків на нерівноважну електронну температуру в фототермічних процесах у напівпровідниках.
4. Вивчення особливостей поведінки теплових хвиль у двошарових структурах, які містять теплопровідний інтерфейс з довільним значенням поверхневої теплопровідності.
5. Розробка методу визначення ефективних значень теплопровідності та температуропровідності в двошарових теплопровідних системах та їх обчислення.

Об'єктом дослідження є масивні та тонкоплівкові однорідні та ізотропні напівпровідники, а також частинно-однорідні двошарові теплопровідні структури.

Предметом дослідження є фототермічні процеси в однорідних напівпровідниках при врахуванні власних теплових граничних умов для електронної та фононної підсистем квазічастинок і енергообміну між ними, а також фототермічні процеси в двошарових структурах в однотемпературному наближенні.

Методи дослідження ґрунтуються на аналітичному розв'язку систем рівнянь балансу енергії для електронів та фононів, чисельному розв'язку трансцендентних рівнянь і комп'ютерній обробці ряду проміжних та кінцевих результатів.

Наукова новизна одержаних результатів. Узагальнена теорія самоузгодженої електронної та фононної термодифузії в геометрично обмежених напівпровідниках, зумовленої поверхневим поглинанням модульованого лазерного випромінювання і вперше запропоновано подібне дослідження при об'ємних модульованих джерелах тепла. Показано, що врахування скінченої за величиною енергетичної електрон-фононної взаємодії приводить до необхідності розгляду двох видів теплових хвиль – електронних та фононних. Проаналізовано самоузгоджений характер їх розповсюдження, а також умови, при яких ці хвилі поширюються незалежно і вироджуються в єдиний температурний розподіл. Показано, що варіація частоти модуляції падаючого випромінювання в широких межах дозволяє отримати інформацію про теплові параметри електронної та фононної підсистем окремо, а також про величину частоти релаксації енергії при електрон-фононній взаємодії в межах одного фототермічного експерименту. Запропоновано вивчення фази термоелектричного сигналу при детектуванні нестационарної електронної температури в напівпровідниках для знаходження теплових параметрів електронів та фононів. Вперше послідовно вивчено вплив теплових характеристик інтерфейсу на процес поширення теплових хвиль у двошарових системах при поверхневому поглинанні зовнішнього модульованого випромінювання. Розроблено універсальний підхід для визначення ефективних значень теплопровідності та температуропровідності в двошарових системах у моделі фототермічного експерименту. Показано, що ефективні значення тепло- та температуропровідностей двошарових середовищ в загальному випадку залежать від температуропровідностей, теплопровідностей та геометричних розмірів кожного шару, їх поверхневих параметрів, частоти модуляції зовнішнього випромінювання, а також від точки та способу вимірювання.

Достовірність основних результатів підтверджується строгою постановкою задачі, вибором адекватних експерименту граничних умов і методів розв'язку, зрозумілим фізичним трактуванням основних положень і висновків, співпаданням деяких результатів з

результатами робіт інших авторів в серії граничних випадків, позитивними рецензіями опублікованих статей і представлених на різних конференціях доповідей.

Практична цінність одержаних результатів. Основні результати роботи дозволяють передбачити результати вимірювань електронної та фононої тепло- та температуропровідностей, енергетичні частоти електрон-фононої релаксації в напівпровідниках, коефіцієнта поглинання світла, ефективних значень тепло- і температуропровідностей двошарових систем, а також величину поверхневої теплопровідності інтерфейса в двошарових структурах. Аналіз і співставлення основних характерних величин задачі дозволяють прогнозувати постановку цілеспрямованих експериментів для визначення відмічених параметрів. В роботі, в доповнення до відомих, пропонується новий експериментальний метод детектування електронних теплових хвиль у напівпровідниках – термоелектричний, що розширює прикладний напрям термоелектрики.

Особистий вклад дисертанта полягає в безпосередній участі у постановці задач, визначенні шляхів їх вирішення та аналізі результатів. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У всіх працях, виконаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в аналітичному дослідженні поставлених завдань та частковій фізичній інтерпретації отриманих результатів. Крім того, в роботах [3], [9] дисертантом створено комплекс комп'ютерних програм для чисельного та графічного дослідження параметрів теплових хвиль. В [14], [15] здобувачем обґрунтована можливість термоелектричного детектування електронних температурних відгуків. В роботі [11] дисертант описав нестационарні термодифузійні процеси в двошарових структурах, а в [7], [19] розробив універсальний метод для визначення ефективних тепло- і температуропровідностей таких систем в умовах фототермічного експерименту і показав співпадання отриманих результатів в серії граничних випадків з результатами інших робіт.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи представлялися, доповідалися та обговорювалися на окремих стадіях її готовності на таких конференціях, нарадах та семінарах: наукових конференціях професорсько-викладацького складу Тернопільського державного педагогічного університету ім.В.Гнатюка, 1996-1999 рр.; V Межгосударственном семинаре “Термоэлектрики и их применения”, Санкт-Петербург, Россия, 1997; XVI International Conference on Thermoelectrics, Dresden, Germany, 1997; Second International School-Conference “Physical Problems in Material Science of Semiconductors”, Chernivtsi, Ukraine, 1997; XVII International Conference on Thermoelectrics, Nagoya, Japan, 1998; 28th Winter School on Molecular and Quantum Acoustics and 4th Workshop on Photoacoustics and Photothermics, Gliwice, Poland, 1999; Міжнародній школі-конференції з актуальних питань фізики напівпровідників, Дрогобич, Україна, 1999; 15th European Conference on Thermophysical Properties, Würzburg, Germany, 1999; Third International School-Conference “Physical Problems in Material Science of Semiconductors”, Chernivtsi, Ukraine, 1999; 29th Winter School on Molecular and Quantum Acoustics and 5th Workshop on Photoacoustics and Photothermics, Gliwice, Poland, 2000; 11th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, Kyoto, Japan, 2000; II Міжнародному смакуловому симпозіумі “Фундаментальні та прикладні проблеми сучасної фізики, Тернопіль, Україна, 2000.

Публікації. Результати роботи були опубліковані в 7 статтях у міжнародних та вітчизняних фахових виданнях, 4 матеріалах конференцій та 10 тезах доповідей. Перелік робіт наводиться в кінці автореферату.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку цитованої літератури з 122 найменувань. Загальний обсяг

дисертації становить 134 сторінки, включаючи 8 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дослідження, сформульовані мета та завдання роботи, описані об'єкт, предмет та методи дослідження, визначені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

В першому розділі аналізуються відомі літературні джерела, присвячені проблемі фізики теплових хвиль у твердих тілах в однотемпературному наближенні та розглянуто специфіку переносу тепла в напівпровідниках при статичних теплових полях. Детально описані найбільш поширені методи реєстрації температурного сигналу, вказані їх переваги та недоліки. Здійснено огляд робіт, в яких обговорюється проблема визначення ефективних тепло- і температуропровідностей двошарових зразків. З'ясовано, що запропоновані в цих роботах методи є не завжди коректними і тому виникає необхідність розробки універсального підходу для визначення згаданих ефективних теплових параметрів.

Другий розділ присвячений дослідженню електронних та фононних теплових хвиль у напівпровідниках при поверхневому поглинанні енергії лазерного випромінювання з наступним перетворенням в тепло. Враховуються різні теплові граничні умови для електронів та фононів і скінченні значення енергетичної електрон-фононної взаємодії. В останньому випадку підсистеми квазічастинок виступають одна для одної внутрішнім періодичним джерелом тепла.

З врахуванням нестаціонарності теплового поля записана та аналітично розв'язана одновимірною системою рівнянь балансу енергії для самоузгодженого визначення електронної та фононної температур, яка враховує залежну від часу термодифузію підсистем квазічастинок і електрон-фононний теплообмін. З метою спрощення припускається, що в електронній підсистемі поглинання відбувається на власних носіях або поверхнева рекомбінація нескінченно велика, тому генераційно-рекомбінаційними процесами можна знехтувати.

Самостійно обумовлені граничні умови для цієї системи рівнянь і запропоновані феноменологічні поверхневі джерела тепла, які описують конвертацію модульованого електромагнітного випромінювання в тепло.

У відповідності з характером зовнішнього збурення шукані температури (електронна $T_e(x,t)$ та фононна $T_p(x,t)$) представлені у вигляді сум відповідних статичних $T_{e,p}^s(x)$ та динамічних $T_{e,p}^d(x) \cdot e^{i\omega t}$ частин, де ω – частота модуляції лазерного випромінювання, індекси “e”, “p” відповідають електронам та фононам. Строгий розв'язок задачі показав, що як статичні, так і динамічні частини температурних розподілів в загальному випадку різні для електронів та фононів. Це пов'язано з різними поверхневими та об'ємними тепловими параметрами підсистем квазічастинок і наявністю ефективної довжини електрон-фононної енергетичної взаємодії (довжини остигання). Ця довжина істотно залежить від величини енергетичної взаємодії між електронною та фононною підсистемами і суттєво впливає на характер розподілу теплових хвиль в підсистемах квазічастинок. Показано, що у випадку гранично слабкої взаємодії ($P \rightarrow 0$, де P – коефіцієнт, що визначає інтенсивність електрон-фононного енергообміну), в зразку є два незалежних температурних поля. В іншому граничному випадку – необмежено сильної електрон-фононної взаємодії ($P \rightarrow \infty$) – обидва температурні розподіли вироджуються в один. Врахування скінченної за величиною енергії електрон-фононної взаємодії приводить до подвоєння числа теплових хвиль в кожній підсистемі квазічастинок. Це пояснюється тим, що у напівпровіднику, крім поверхневих джерел тепла,

виникають також внутрішні, пов'язані з електрон-фононним енергообміном, які викликають взаємоузгоджені періодичні притоки і відтоки тепла з однієї підсистеми квазічастинок в іншу і навпаки.

Температурні розподіли $T_e(x,t)$ та $T_p(x,t)$ знайдені в загальному випадку та для невідроджених напівпровідників (в них справедливі співвідношення $\chi_e/\chi_p \sim 10^{-3} - 10^{-4}$, $\alpha_e/\alpha_p \sim 10^2 - 10^6$, де $\chi_{e,p}$, $\alpha_{e,p}$ – відповідно електронні та фононні тепло- та температуропровідності). В останніх ефект розузгодження температур виражений найбільш яскраво, тому в дисертації основна увага концентрується на них. У невідроджених напівпровідниках по електронній підсистемі поширюється чотири теплові хвилі, а по фононній – дві. Це спричинено тим, що при $\chi_p \gg \chi_e$ енергія у “фононному тепловому хвилеводі” практично не змінюється за рахунок притоку тепла з електронної підсистеми. І навпаки, електронний газ зазнає з боку фононного інтенсивних періодичних теплових збурень. Іншими словами, електронний газ розігрівається і поверхневими, і об'ємними джерелами тепла, а фононний – тільки поверхневими. Внаслідок цього динамічна частина електронної температури залежить від параметрів як електронної, так і фононної підсистем; динамічна частина фононної температури визначається тільки характеристиками фононного газу.

В роботі введені довжини хвиль та довжини їх затухання, а також зсуви фаз електронного і фононного температурних розподілів відносно періодичного зовнішнього збурення. Відмічено, що довжини теплових хвиль більші за довжини їх затухання. В реальних хвильових процесах (наприклад, при поширенні електромагнітних хвиль) має місце зворотна нерівність.

Визначено характерні довжини задачі. Ними є довжини електронної та фононної термодифузії і електронна довжина остигання. Показано, що в невідроджених напівпровідниках характер релаксації енергії у фононній підсистемі визначається фононною термодифузією при довільних довжинах зразка a . В електронному газі характер цієї релаксації принципово інший в залежності від a . В масивних зразках ($a \gg l_e$) релаксація енергії відбувається за допомогою енергетичної електрон-фононної взаємодії з наступним її виводом назовні через фононний газ. В тонких зразках ($a \ll l_e$) процес релаксації енергії в зовнішній термостат відбувається безпосередньо завдяки електронній термодифузії. В кожному випадку отримано температурні розподіли та зроблено їх фізичний аналіз.

Наявність характерних довжин, а також характерних часів релаксації (часи релаксації енергії електронів та фононів шляхом термодифузії $\tau_{e,p}$ та час релаксації енергії електронів при електрон-фононній взаємодії τ_e) дає можливість розглянути ряд часткових випадків. Найбільш цікаві з точки зору експериментального детектування теплових хвиль наступні:

1. $\omega\tau_p \sim 1$, $a \gg l_e$, $K \ll a/l_e$, де ω – частота модуляції, K – коефіцієнт, який визначає відношення величин електронного та фононного градієнтів температур в приповерхневому шарі.

Динамічні частини електронної та фононної температур однакові і визначаються винятково параметрами фононної підсистеми.

2. $\omega\tau_e \geq 1$, $a \gg l_e$, $K \gg a^2(2l_e^2\omega\tau_p)^{-1}$.

В цьому випадку теплові хвилі поширюються переважно по електронному газу і визначаються винятково його параметрами.

$$3. \quad \omega\tau_e \ll 1, \omega\tau_p \ll 1, a \ll l_e.$$

При таких умовах в зразку існує два незалежні квазістаціонарні температурні поля – електронне та фононне.

В дисертації наведені частотні залежності амплітуд та відповідних зсувів фаз електронних і фононних теплових хвиль на поверхні $x=0$. Відмічено, що ці залежності різні для різних довжин зразка (для прикладу розглядалися зразки GaAs довжинами 10^{-2} см та 10^{-4} см). Детально проаналізовані ділянки монотонності графіків, вказані інтервали частот, на яких домінують амплітуди або електронних, або фононних теплових хвиль. Показано, що із збільшенням довжини зразка лінійно збільшуються величини амплітуд хвиль, а екстремуми фаз стають гострішими.

На основі знайдених виразів для $T(x,t)$ та $T_e(x,t)$ аналітично отримано та графічно побудовано частотні залежності амплітуди та фази термоелектричного відгуку температурного сигналу в одно- та двотемпературному наближенні, здійснена їх порівняльна характеристика. Оскільки $T_e(x,t)$ в загальному випадку визначається електронною і фононною тепло- та температуропровідностями, довжиною остигання, довжиною зразка і частотою модуляції, то фаза та амплітуда термоЕРС будуть містити всі ці параметри. Експериментальні вимірювання екстремальних значень амплітуд і фаз термоЕРС дозволяють отримати інформацію про теплові параметри обох підсистем напівпровідника. Показано, що, змінюючи частоту модуляції ω , можна визначати окремо електронні або фононні характеристики матеріалу зразка.

В третьому розділі досліджуються електронні та фононні теплові хвилі у напівпровідниках з врахуванням об'ємного поглинання енергії. Припускається, що зовнішнє модульоване світлове випромінювання поглинається в усьому об'ємі зразка вільними носіями або поверхневою та об'ємною рекомбінації є нескінченними. Таким чином, як і в попередньому розділі, енергетично нерівноважні електрони вважаються концентраційно рівноважними.

На відміну від попереднього розділу, система рівнянь балансу енергії враховує джерело тепла в електронній підсистемі, яке визначає конвертацію світлової енергії в теплову в кожній точці зразка за законом Бугера–Ламберта. Граничні умови на фронтальній поверхні задають електронний та фононний теплообмін з оточуючим середовищем у відповідності зі своїми поверхневими температурами і поверхневими теплопровідностями. Задня поверхня зразка підтримується при постійній температурі навколишнього середовища, бічні грані адіабатично ізолювані.

Точний аналітичний розв'язок задачі представлений для довільних напівпровідників. Детальний аналіз, як і раніше, здійснюється для невинродженого випадку.

Розрахунки показують, що в загальному випадку амплітуда фононної температури пропорційна малому параметру $\gamma = \chi_e / \chi_p \ll 1$. Фізично це пов'язується з тим, що енергію зовнішнього випромінювання спершу отримують електрони, а потім, протягом деякого часу, частково передають її фононам шляхом електрон-фононної взаємодії, збуджуючи тим самим фононні температурні хвилі. Велика теплопровідність фононів, природно, зменшує амплітуду останніх. Електронна температура не містить відміченого параметра і тому задача допускає нульове наближення по параметру γ . Таким чином, фононна теплопровідність вважається необмежено великою в порівнянні з електронною, і тоді амплітуда нерівноважної фононної температури дорівнює нулю.

Статична частина нерівноважної електронної температури визначається довжиною остигання, коефіцієнтом поглинання світла β , довжиною зразка a , поверхневою (η_e) та

об'ємною електронними теплопровідностями. Її динамічна складова, крім перерахованих параметрів, залежить також від електронної температуропровідності та частоти модуляції.

Наявність характерних довжин та характерних частот в електронному температурному розподілі дозволяє розглянути ряд часткових випадків, серед яких виділимо найбільш фізично важливі.

I. Довжина зразка перевищує довжину остигання ($a \gg l_e$).

1. Низькочастотне обмеження ($\omega \tau_e \ll 1$).

В цьому випадку температурні осциляції квазістатичні. Як для статичної, так і для динамічної частин температурного розподілу характерними виступають довжина остигання та довжина поглинання світла $l = \beta^{-1}$. Температура носіїв залежить також від об'ємної та поверхневої електронних теплопровідностей.

1.1. Оптично тонкі зразки ($\beta a \ll 1$).

В таких зразках характерною стає довжина остигання. Відхилення від лінійності електронного температурного розподілу проявляється на відстані l_e від поверхонь $x=0$ та $x=a$.

1.2. Оптично масивні зразки ($\beta a \gg 1$).

При $l_e \ll 1$ характерною буде довжина поглинання світла. Якщо $l_e \gg 1$, то характерною виступає довжина остигання. Як для статичної, так і для динамічної частин електронної температури випадок поверхневого поглинання реалізується, коли $\beta \gg \eta_e / \chi_e, l_e^{-1}$.

2. Високочастотне обмеження ($\omega \tau_e \gg 1$).

В динамічній частині температурного розподілу характерними будуть довжина термодифузії електронів $L = q_e^{-1} = \sqrt{2\alpha_e / \omega}$ та довжина поглинання. Електронна температура визначається також об'ємною та поверхневою електронними теплопровідностями. Експериментальні вимірювання в цьому частковому випадку при відомих двох параметрах дають можливість визначити два інші.

2.1. Оптично тонкі зразки ($\beta a \ll 1$).

Характерною є довжина термодифузії. Відхилення від лінійності електронної температури спостерігається у тонких областях на відстані L від поверхонь $x=0$ та $x=a$.

2.2. Оптично масивні зразки ($\beta a \gg 1$).

При $L \ll 1$ динамічна температура квазістатична, але температурні осциляції зсунуті за фазою на $\pi/2$ по відношенню до падаючого випромінювання. Характерною виступає довжина поглинання l .

Якщо $L \gg 1$, то температура $T_e^d(x)$ описується виразом, подібним до хвильового, тобто температурні коливання зсунуті за фазою в різних перерізах. Характерною виступає термодифузійна довжина L . На відміну від низькочастотного обмеження, поверхнєве поглинання реалізується при умовах $\beta \gg \eta_e / \chi_e, q_e$.

II. Довжина зразка менша за довжину остигання ($a \ll l_e$).

В тонких зразках електрон-фононна взаємодія в електронному енергетичному балансі неістотна і домінуючим стає термодифузійний канал. Характерна частота в цьому граничному випадку $\nu_e = \tau_e^{-1} = 2\alpha_e / a^2$.

1. Низькочастотне обмеження ($\omega \tau_e \ll 1$).

Електронний температурний розподіл квазістатичний. Характерною виступає довжина поглинання. Температура носіїв залежить також від об'ємної та поверхневої електронних

теплопровідностей і довжини остигання.

1.1. Оптично тонкі зразки ($\beta a \ll 1$).

В цьому випадку електронна температура дорівнює температурі зовнішнього середовища T_0 , тобто енергія електромагнітного випромінювання, не затримуючись в об'ємі зразка, виходить в термостати.

1.2. Оптично масивні зразки ($\beta a \gg 1$).

Електронна температура, на відміну від зразків, більших від довжини остигання, є приблизно лінійною функцією по координаті вздовж усього зразка. Поверхневе поглинання реалізується, якщо виконується умова $\beta \gg \eta_e / \chi_e$.

2. Високочастотне обмеження ($\omega \tau_e \gg 1$).

Результати цього випадку збігаються з результатами, отриманими при $a \gg l_e$, $\omega \tau_e \gg 1$.

Для кожного з розглянутих часткових випадків встановлено критерії адіабатичності та ізотермічності теплового контакту на поверхні $x=0$.

В дисертації побудовані та проаналізовані частотні залежності амплітуд і відповідних зсувів фаз електронних та фононних теплових хвиль на поверхні $x=0$ при значенні коефіцієнта поглинання 10^3 см^{-1} , 10^4 см^{-1} для зразків GaAs довжинами 10^{-2} см , 10^{-4} см . Характерно, що амплітуда електронних хвиль на декілька порядків перевищує амплітуду фононних. Аналітично отримано вирази для амплітуди та фази термоЕРС в одно- та двотемпературному наближенні в невідроджених напівпровідниках.

Четвертий розділ дисертації присвячений вивченню теплових хвиль у двошарових структурах і визначенню ефективних значень теплопровідності та температуропровідності таких структур в умовах фототермічних експериментів. Основний підхід до цієї проблеми зводиться до наступного.

Будь-який прилад, детектуючий нерівноважну температуру в фототермічному експерименті, вимірює її або на освітленій лазером поверхні (метод “закритої комірки”), або на протилежній – метод “відкритої комірки” [2]. Об'єм двошарового зразка для цього приладу являє собою “чорний ящик”, а покази приладу будуть інтегральними, включаючими в себе всі деталі термодифузійного процесу, які визначаються теплопровідностями та температуропровідностями кожного шару, їх геометричними розмірами, тепловими параметрами інтерфейса між шарами і т.д. В зв'язку з цим можна представити однорідний одношаровий зразок з ідентичними зовнішніми геометричними розмірами і деякими тепловими параметрами, які приводять до тієї ж температури на досліджуваній поверхні. Рівність температур на відповідних поверхнях реального двошарового та ефективного одношарового зразків і є тією умовою, яка дає можливість отримати ефективні значення як теплопровідності, так і температуропровідності. Теплові параметри ефективного одношарового середовища і будемо вважати ефективними параметрами двошарової структури.

Можливість вимірювання температури на різних поверхнях, як показують розрахунки дисертації, в загальному випадку приводить до різних значень теплових ефективних параметрів. Це означає, що ефективні параметри, крім усього іншого залежать від точки та способу вимірювання.

Для вирішення поставленої задачі були записані одномірні рівняння балансу енергії в кожному шарі двошарової системи та задані граничні умови другого роду, в яких враховується теплообмін шарів через інтерфейс та між зразком і зовнішнім середовищем. Після розв'язку рівнянь теплового балансу отримано аналітичні вирази температурних розподілів в кожному шарі у вигляді сум статичних та динамічних частин температури.

Замінивши реальну двошарову структуру уявним однорідним зразком тієї ж довжини і розв'язавши для нього рівняння енергетичного балансу, було отримано температурний розподіл в об'ємі цього зразка. Теплопровідність χ_F та температуропровідність α_F одношарового середовища названі ефективними параметрами, вимірними методом закритої комірки, якщо вони отримані з такого рівняння: $T(x=0, t)=T_1(x=0, t)$, де $T(x, t)$ та $T_1(x, t)$ – температури одношарової та першого шару двошарової систем. Аналогічно величини χ_R та α_R , визначені з рівняння $T(x=a, t) = T_2(x=a, t)$ ($T_2(x, t)$ – температура в другому шарі), виступають в якості ефективних параметрів, отриманих методом відкритої комірки.

Як найпростішу ілюстрацію запропонованого методу розглянуто процедуру визначення ефективної теплопровідності двошарової системи при статичних теплових полях. Вимірювання в закритій комірці приводять до значення χ_F , яке при ізотермічному контакті на інтерфейсі співпадає з результатами робіт [7], де використовувалася аналогія між електричними та тепловими опорами. Застосовуючи метод відкритої комірки, отримуємо, що теплопровідність χ_R дорівнює теплопровідності другого шару.

При нестационарних теплових полях температури є комплексними величинами і тому необхідною умовою для визначення ефективних параметрів є рівність відповідних дійсних та уявних частин температур окремо. Вимірювання методами закритої та відкритої комірок приводять до двох різних систем з двома невідомими (відповідно χ_F , α_F та χ_R , α_R) і відповідно до різних значень ефективних параметрів.

Знайдені системи рівнянь трансцендентні і можуть бути точно розв'язані тільки числовими методами. Аналітичні розв'язки можна отримати лише в деяких часткових випадках, які класифікуються в залежності від співвідношень між частотою модуляції ω та характерною частотою термодифузії i -го шару $2\alpha_i/a_i^2$, де α_i – температуропровідність i -го шару, a_i – його довжина, $i=1,2$.

1. Низькочастотне обмеження ($\omega \ll 2\alpha_i/a_i^2$).

В цьому випадку ефективні теплопровідності визначаються тими самими виразами, що і при статичних теплових полях. Ефективні температуропровідності залежать від об'ємних і поверхневих теплопровідностей та температуропровідностей, а також геометричних розмірів кожного шару. На значення ефективних параметрів не впливає частота модуляції. Показано, що методи відкритої та закритої комірок приводять до різних результатів.

Окремо розглянутий частковий випадок двошарової системи, яка складається з однакових матеріалів. Відмічено, що ефективні параметри, взагалі кажучи, не співпадають з відповідними тепловими параметрами складових. Обумовлена можливість визначення в таких системах інтерфейсної теплопровідності. Більше того, і в цьому найпростішому випадку відповідні ефективні параметри, обчислені шляхом співставлення температур на різних поверхнях, будуть різними. Відмінність в цих параметрах дозволяє запропонувати простий спосіб визначення поверхневої теплопровідності інтерфейсу, який описаний в дисертації.

Якщо для одного із шарів відношення його довжини до довжини термодифузії набагато більше, ніж для іншого, то значення χ_F , α_F , α_R залежать від геометричних розмірів цього шару, його теплопровідності, а також від поверхневих теплопровідностей інтерфейсу між шарами та між зразком і зовнішнім середовищем. Теплопровідність же χ_R дорівнює теплопровідності другого шару. При ізотермічних контактах на інтерфейсі та на поверхні $x=a$ (в цьому випадку ефективні параметри визначаються в точці $x=a_2-\varepsilon$, де $\varepsilon/a_2 \ll 1$) ефективні температуропровідності α_F і α_R однакові.

2. Високочастотне обмеження ($\omega \gg 2\alpha_i/a_i^2$).

При вимірюваннях методом закритої комірки вплив інтерфейсу та другого шару практично не відчувається внаслідок малої довжини термодифузії в першому шарі. Вимірюваний сигнал залежить тільки від параметрів першого матеріалу, де теплова хвиля затухатиме. Це означає, що ефективні теплові параметри χ_F і α_F співпадатимуть з відповідними характеристиками першого матеріалу.

Вимірювання методом відкритої комірки приводять до громіздкої системи з двох рівнянь з невідомими χ_R і α_R , які є функціями від всіх поверхневих та об'ємних теплових параметрів обох шарів, їх геометричних розмірів і частоти модуляції падаючого випромінювання.

При ізотермічних контактах на інтерфейсі та поверхні $x=a$ ця система значно спрощується. Значення для α_F переходить у відомий вираз, отриманий у [8] при таких самих умовах. Ефективна теплопровідність в цьому випадку визначається не тільки теплопровідностями шарів, але і їх температуропровідностями.

ВИСНОВКИ

1. В результаті розв'язків систем рівнянь теплового балансу самоузгоджено отримано нерівноважні, залежні від координат та періодичні в часі температурні розподіли в електронній та фононній підсистемах геометрично обмежених напівпровідників (теплові хвилі) з врахуванням енергетичної електрон-фононної взаємодії при поверхневому та об'ємному поглинанні модульованого лазерного випромінювання.

2. Характер розповсюдження електронних та фононних теплових хвиль істотно залежить від співвідношень між частотою модуляції падаючого випромінювання і характерними частотами задачі – частотами термодифузії електронів та фононів, а також частотою релаксації енергії при електрон-фононній взаємодії.

3. Механізм релаксації енергії фононів у невироджених напівпровідниках не залежить від геометричних розмірів зразка і носить термодифузійний характер. В електронній підсистемі цей механізм в тонких зразках визначається електронною термодифузією, а в масивних – електрон-фононною взаємодією.

4. При вивченні електронних теплових хвиль детектування нестационарної електронної температури може бути здійснено термоелектричними вимірюваннями, що розширює прикладний напрям термоелектрики. Цей метод, на відміну від інших, дозволяє вимірювати електронну та фононну тепло- та температуропровідності, величину електрон-фононної взаємодії в напівпровідниках, коефіцієнт поглинання світла в межах одного фототермічного експерименту.

5. Вивчено вплив теплових параметрів поверхонь та інтерфейсу між шарами на розповсюдження теплових хвиль в двошаровій структурі. Отримано критерії, коли теплові контакти між шарами можна вважати ізотермічними.

6. У відповідності до загальної процедури вимірювань у фототермічних експериментах запропоновано загальний підхід для теоретичного розрахунку ефективних значень теплопровідності та температуропровідності двошарових структур, адекватних експерименту. Показано, що отримані до цього часу результати є частковими випадками наведених загальних міркувань.

7. Ефективні параметри не є однозначними, а залежать від точки та способу фототермічних вимірювань. Це означає, що при виборі експериментальних значень ефективних параметрів обов'язково треба обумовлювати метод їх вимірювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. A. Mandelis. Photoacoustic and thermal waves phenomena in semiconductors. – North-Holland, Amsterdam, 1987.
2. H. Vargas and L.C.M. Miranda. Photoacoustic and related photothermal techniques // Phys. Rep. – 1988. – Vol.161, №2. – P.43–101.
3. A. Rosencwaig, A. Gersho. Theory of the photoacoustic effect with solids // J. Appl. Phys. – 1976. – Vol.47, №1. – P.64 – 69.
4. Ф.Г.Басс, В.С. Бочков, Ю.Г. Гуревич. Электроны и фононы в ограниченных полупроводниках. – М.: Наука, 1984, – 287 с.
5. В.С. Закордонец, Г.Н.Логвинов. Термоэлектрическая добротность полупроводников ограниченных размеров // ФТП, – 1997. – Т.31, №3. – С.323-325.
6. Г.Н. Логвинов. Электронная температура в неоднородно нагретом полупроводниковом субмикронном слое // ФТП, – 1991. – Т.25, №10. – С.1815-1818.
7. A.M.Mansanares, A.C.Bento, H.Vargas, N.F.Leite and L.C.M.Miranda. Photoacoustic measurement of the thermal properties of two-layer systems // Phys.Rev. (B), – 1990. – Vol.42, №7. – P.4477-4486.
8. T.Tominaga, K.Ito. Theory of Photoacoustic Measurements of the Thermal Diffusivity of Two-Layer Samples // Jap. J. Appl. Phys., – 1988. – Vol.27, №12. – P.2392–2397.

Результати дисертації опубліковані в таких роботах:

1. Yu.G. Gurevich, G. Gonzalez de la Cruz, G.N. Logvinov, M.N. Kasyanchuk. Thermal Waves in Semiconductors // Journal of Thermoelectricity. – 1997. – № 2. – P.45-54.
2. G.N. Logvinov, M.N. Kasyanchuk, Yu.G. Gurevich, G. Gonzalez de la Cruz, Narciso Munoz Aguirre. Nonequilibrium Electron and Phonon Temperature Fields in Two-Layer Structure Semiconductor-Dielectric Caused by Static Photothermal Excitation. Thermo-EMF in Electron Subsystem // Journal of Thermoelectricity. –1997. – № 4. – P. 65-75.
3. Ю.Г. Гуревич, Г. Гонзалес де ла Круз, Г.Н. Логвинов, М.Н. Касянчук. Влияние электрон-фононного энергообмена на распространение тепловых волн в полупроводниках // ФТП. – 1998. – Т.32, №11. – С.1325–1330.
4. М.М. Касянчук, І.М. Лашкевич, Г.М. Логвінов. Двотемпературні теплові хвилі в обмежених напівпровідниках // Збірник “Наукові записки ТДПУ”. Серія “Математика і фізика”. – 1998. – №1(11). – С. 58-63.
5. М.М.Касянчук, І.М.Лашкевич. Нестационарна електронна і фононна температури у невідроджених напівпровідниках субмікронних товщин // Фізика і хімія твердих тіл (Івано-Франківськ, Україна). – 2000. – Т.1, №1. – С.49–54.
6. Ю.Г.Гуревич, Г.М.Логвінов, Г.Гонзалес де ла Круз, А.Ф.Карбалло Санчез, Ю.В.Дрогобицький, М.М.Касянчук. Динамічний тепловий транспорт в напівпровідникових субмікронних плівках // Фізика і хімія твердих тіл (Івано-Франківськ, Україна). – 2000. – Т.1, №1. – С. 27–40.
7. N.Munoz Aguirre, G.Gonzalez de la Kruz, Yu.G.Gurevich, G.N.Logvinov, M.N.Kasyanchuk. Heat Diffusion in Two-Layer Structures:Photoacoustic Experiments // Phys. Stat. Sol.(b). – 2000. – Vol.220. – P. 781-787.
8. Ю.Г.Гуревич, Г.Гонзалес де ла Круз, Г.Н.Логвинов, М.Н.Касянчук. Электронные и фононные тепловые волны в полупроводниках // Доклады V Межгосударственного семинара “Термоэлектрики и их применения”. – Санкт-Петербург: ФТИ им. А.Ф.Иоффе. – 1997. – С.155-158.
9. Yu.G. Gurevich, G. Gonzalez de la Cruz, G.N. Logvinov, M.N. Kasyanchuk. Thermoelectric

- Detection of Photothermal Signals in Semiconductors // Proceeding of XVI International Conference on Thermoelectrics. – Dresden (Germany). – 1997. – P. 738–740.
10. Yu.G. Gurevich, G. Gonzalez de la Cruz, M.N. Kasyanchuk, G.N. Logvinov. Some Physical Aspects of Forming and Propagation Thermal Waves // Proceedings of the 28th Winter School on Molecular and Quantum Acoustics and 4th Workshop on Photoacoustics and Photothermics. – Gliwice (Poland). – 1999. – P. 121-124.
 11. М.М.Касянчук, І.М.Лашкевич. Нестационарні термодифузійні процеси в двошарових структурах // Матеріали II Міжнародного смакулового симпозіуму “Фундаментальні та прикладні проблеми сучасної фізики”. – Тернопіль (Україна). – 2000. – С. 46-47.
 12. Yu.G. Gurevich, G. Gonzalez de la Cruz, G.N. Logvinov, M.N. Kasyanchuk. Elektron and Phonon Thermal Waves in Semiconductors // Доклади V Межгосударственного семинара “Термоэлектрики и их применения”. – Санкт-Петербург: ФТИ им. А.Ф.Иоффе. – 1997. – С.226.
 13. Yu.G. Gurevich, G. Gonzalez de la Cruz, G.N. Logvinov, M.N. Kasyanchuk. Thermoelectric Detection of Photothermal Signals in Semiconductors // Program and Abstracts of XVI International Conference on Thermoelectrics. – Dresden (Germany). – 1997. – P. 106.
 14. Yu.G. Gurevich, G. Gonzalez de la Cruz, G.N. Logvinov, M.N. Kasyanchuk, T.N. Kondratova. About Possibility of Determination of Electron and Phonon Heat Parameters by Thermoelectric Detection of Electron Thermal Waves // Abstract Booklet of Second International School-Conference “Physical Problems in Material Science of Semiconductors”. – Chernivtsi (Ukraine). – 1997. – P. 103.
 15. G.N. Logvinov, M.N. Kasyanchuk, I.M. Lashkevych, Yu.G. Gurevich, G. Gonzalez de la Cruz. Thermal Waves in Semiconductors and Semiconductor Films. Thermoelectric Detection of Waves // Program and Abstracts of XVII International Conference on Thermoelectrics. – Nagoya (Japan). – 1998. – P. 34.
 16. М.М.Касянчук, І.М.Лашкевич, Ю.Г.Гуревич, Г.М.Логвінов. Нестационарна самоузгоджена електронна та фононна термодифузія в напівпровідниках // Міжнародна школа-конференція з актуальних питань фізики напівпровідників. Тези доповідей. – Дрогобич, Україна. – 1999. – С. 80.
 17. Gonzalez de la Cruz, Yu. G. Gurevich, G.N. Logvinov, N. Munoz Aguirre, M.N. Kasyanchuk. The Heat Effective Parameters in Two-Layer Mediums // 15th European Conference on Thermophysical Properties. Book of Abstracts. – Würzburg (Germany). – 1999. – P. 229.
 18. Yu.G. Gurevich, G. Gonzalez de la Cruz, M.N. Kasyanchuk, I.M. Lashkevich, G.N. Logvinov. The Theory of the Photothermal Processes in Semiconductors: Two-Temperature Model // 15th European Conference on Thermophysical Properties. Book of Abstracts. – Würzburg (Germany). – 1999. – P. 230.
 19. G. Gonzalez de la Cruz, Yu.G. Gurevich, M.N. Kasyanchuk, T.N. Kondratova, G.N. Logvinov. The Effective Thermal Parameters in Two-Layer Systems. Application to Photothermal Experiments // Abstract Booklet of Third International School-Conference “Physical Problems in Material Science of Semiconductors”. – Chernivtsi (Ukraine). – 1999. – P. 227.
 20. G. Gonzalez de la Cruz, Yu.G. Gurevich, G.N. Logvinov, M.N. Kasyanchuk, I.M. Lashkevich. Selfconsistent Electron and Phonon Thermal Waves in Semiconductors // Book of Abstracts of 29th Winter School on Molecular and Quantum Acoustics. 5th Workshop on Photoacoustics and Photothermics. – Gliwice (Poland). – 2000. – P. 59.
 21. Yu.G. Gurevich, G.N. Logvinov, G. Gonzalez de la Kruz, M.N. Kasyanchuk, I.M. Lashkevich. The Interacted Electron and Phonon Thermal Waves in Semiconductors // Abstract of 11th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena. – Kyoto (Japan). –

2000. – Р.02-10.

Касянчук М.М. Електронні та фононні теплові хвилі у напівпровідниках. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.10 – Фізика напівпровідників та діелектриків. – Волинський державний університет імені Лесі Українки, Луцьк, 2001.

Дисертація присвячена дослідженню електронних та фононних теплових хвиль у напівпровідниках при поверхневому і об'ємному поглинанні модульованого електромагнітного випромінювання. Інший її напрям зводиться до вивчення теплових хвиль у двошарових структурах.

Самоузгоджено отримано і проаналізовано температурні розподіли в електронній та фононній підсистемах. Досліджено термоелектричний метод детектування електронної температури.

Вивчено вплив теплових параметрів поверхонь та інтерфейсу на поширення теплових хвиль в двошаровій системі. Запропоновано загальний підхід для визначення ефективних тепло- і температуропровідностей в рамках фототермічного експерименту.

Ключові слова: фототермічні експерименти, теплопровідність, температуропровідність, теплові хвилі, термодифузія, термоЕРС, двошарова система, ефективні теплові параметри.

Касянчук М.Н. Электронные и фононные тепловые волны в полупроводниках. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников и диэлектриков. – Волинский государственный университет имени Леси Украинки, Луцк, 2001.

Диссертация посвящена исследованию электронных и фононных тепловых волн в полупроводниках при поверхностном и объемном поглощении внешнего модулированного электромагнитного излучения. Другое ее направление сводится к изучению тепловых волн в двухслойных структурах с учетом интерфейса между слоями и теплообмена между образцом и внешней средой.

Самосогласованно получены и проанализированы аналитические выражения температурных распределений в электронной и фононной подсистемах полупроводникового образца с учетом энергетического электрон-фононного взаимодействия. Введены характерные частоты задачи: частоты термодиффузии электронов и фононов, а также частота релаксации энергии при электрон-фононном взаимодействии. Характер распространения тепловых волн существенно зависит от соотношений между этими частотами и частотой модуляции падающего излучения.

Для невырожденных полупроводников определен механизм релаксации энергии, который в фононной подсистеме не зависит от геометрических размеров образца и носит термодиффузионный характер. В электронной подсистеме этот механизм в тонких образцах определяется электронной термодиффузией, а в массивных – электрон-фононным взаимодействием. Построены графические зависимости амплитуд и фаз температурных волн от частоты модуляции.

Исследована возможность использования термоэлектрического детектирования электронной температуры, которое позволяет получить информацию об электронных и

фононных тепло- и температуропроводностях, величине электрон-фононного взаимодействия в полупроводниках и коэффициенте поглощения света

Изучено влияние тепловых параметров поверхностей и интерфейса между слоями на распространение тепловых волн в двухслойной системе при поверхностном поглощении внешнего излучения в однотемпературной модели. Получены критерии изотермичности теплового контакта между слоями.

Предложен общий подход для теоретического определения адекватных эксперименту эффективных значений тепло- и температуропроводностей двухслойной структуры. Наглядно продемонстрированы более широкие возможности этого метода для определения эффективной теплопроводности на примере статических тепловых полей. При нестационарных тепловых полях записаны общие системы уравнений для получения эффективных тепло- и температуропроводностей, которые могут быть использованы для ряда аналитических расчётов и универсальных компьютерных вычислений. Рассмотрены частные случаи, в которых значения эффективных параметров определяются аналитически точно.

Делается вывод, что измерения и адекватные вычисления эффективных параметров различными методами в общем случае приводят к различным результатам, то есть эффективные параметры определяются не однозначно, а зависят от точки и способа измерений. При выборе же экспериментальных значений эффективных тепловых параметров необходимо оговаривать метод их измерения.

Ключевые слова: фототермические эксперименты, теплопроводность, температуропроводность, тепловые волны, термодиффузия, термоЭДС, двухслойная система, эффективные тепловые параметры.

Kasyanchuk M.N. Electron and phonon thermal waves in semiconductors. – Manuscript.

The thesis for the scientific degree of candidate of physics and mathematics science, speciality 01.04.10 – Semiconductor and Insulator Physics. – L. Ukrainy Volyn' State University, Lutsk, 2001.

The thesis is devoted to an investigation of electron and phonon thermal waves in semiconductors with taken into account surface and bulk absorption of modulated electromagnetic irradiation. Another direction of the dissertation is to study thermal waves in two-layer structures.

Temperature distributions in electron and phonon subsystems are self-consistently obtained and analyzed. Thermoelectricity detection of electron temperature is investigated.

Thermal parameters surface and interface's influence on propagation thermal waves in two-layer system has been investigated. General approach to determinate effective thermal conductivity and thermal diffusivity has been suggested within the frame of photothermal experiments.

Key words: photothermal experiments, thermal conductivity, thermal diffusivity, thermal waves, thermal diffusion, thermoEMF, two-layer system, effective thermal parameters.