

КИЇВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

На правах рукопису

Сайко Сергій Васильович

Нестационарна акустоелектрична та акустооптична
спектроскопія глибоких рівнів в GaAs

01.04.07 - фізика твердого тіла

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 1996



Дисертація в рукописом

Робота виконана на кафедрі загальної фізики 00739481 (W) КОГО

Університету ім. Тараса Шевченка.

Науковий керівник : доктор фізико-математичних наук,
професор, зав. кафедрою загальної
фізики Київського Університету ім.
Тараса Шевченка ОСТРОВСЬКИЙ І.В.

Офіційні опоненти : доктор фізико-математичних наук,
професор, зав. відділом нелінійних
властивостей твердого тіла Інсти-
туту теоретичної фізики НАН України
ЛОКТЕВ В.М.

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник Ін-
ституту напівпровідників НАН України
ОЛИХ Я.М.

Провідна організація: Інститут фізики НАН України.

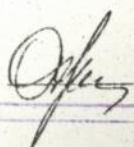
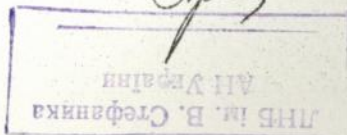
Захист дисертації відбудеться 27 травня 1996 року
о 14.30 на засіданні Спеціалізованої Ради (шифр Д-01.01.22)
в Київському Університеті ім. Тараса Шевченка за адресою
252127, м. Київ, пресл. Глушкова, 6, аудиторія 200.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Київського
Університету ім. Тараса Шевченка (вул. Володимирська 62).

Автореферат розіслано " 2 " квітня 1996 року.

Вчений секретар

Спеціалізованої Ради

доктор фізико-математичних наук  Охріменко Б.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В процесі розвитку сучасної твердотільної мікроелектроніки спостерігається неухильна тенденція до зменшення геометричних розмірів напівпровідникових елементів та пов'язане з цим підвищення робочої частоти і збільшення швидкості обробки інформації. Потреба в поліпшенні параметрів електронних пристроїв викликала бурхливий розвиток технології виготовлення напівпровідникових матеріалів. Основою твердотільної мікроелектроніки стали епітаксціальні структури, в яких головні процеси протікають в тонких епітаксціальних шарах. В зв'язку з дуже малими товщинами епітаксціальних шарів практично весь робочий об'єм можна розглядати як приповерхневі ділянки, і чисто об'ємні властивості відступають на задній план. Природньо, що з широким застосуванням таких структур значно зросла необхідність у розробці експериментальних та теоретичних методів їх дослідження.

Як і для випадку об'ємних напівпровідників, на електрофізичні властивості епітаксціальних матеріалів надзвичайно сильний вплив має наявність дефектів структури. На даний час існує велика кількість експериментальних методів дослідження границь розділу і дефектів, які локалізовані поблизу них. Це, наприклад, скануюча тунельна мікроскопія [1], C-V та DLTS вимірювання [2,3] та багато інших. Основним їх недоліком є неможливість неруйнівного контролю внутрішніх (інтерфейсних) границь розділу в епітаксціальних напівпровідникових структурах. Цього недоліку позбавлені акустоелектричні мето-

ди дослідження. Всі вони ґрунтуються на електромеханічній взаємодії між п'єзоелектричними хвилями та вільними носіями заряду. Їх використання для дослідження приповерхневих шарів визначається можливістю локалізації акустичних хвиль поблизу поверхні (поверхневі акустичні хвилі у випадку п'єзоелектричних напівпровідників) та невеликою глибиною проникнення в об'єм напівпровідника електричних полів, що супроводжують п'єзоактивні акустичні хвилі в шаруватих структурах п'єзоелектрик - напівпровідник.

Одним із проявів нелінійної акустоелектричної взаємодії є виникнення поперечної до напрямку поширення акустичних хвиль постійної складової електричної напруги - поперечний акустоелектричний ефект. Важливим з точки зору характеристики дефектів структури, які локалізовані поблизу границь розділу, є вивчення перехідних процесів, характерних для нелінійної акустоелектричної взаємодії, оскільки вони безпосередньо визначаються кінетикою обмінних процесів між поверхневими електронними станами і зонами. Саме тому дослідження релаксації сигналу поперечної акустоелектричної напруги (ПАН) (нестационарна акустоелектрична спектроскопія) та її залежності від спектру освітлення (нестационарна акустооптична спектроскопія) можуть дати важливу інформацію про параметри глибоких центрів захоплення.

Вибір епітаксіальних структур на основі арсеніду галію в якості базового матеріалу для досліджень був зумовлений їх широким використанням у сучасній твердотільній мікроелектроніці. Окрім того, незважаючи на велику кількість експериментальних і теоретичних робіт, питання про природу багатьох

локальних центрів в GaAs до цього часу залишається відкритим. Тому є доцільним визначення за допомогою нестаціонарної акустоелектричної та акустооптичної спектроскопії основних типів дефектів в епітаксialьному GaAs та уточнення їх параметрів.

Мета даної роботи полягала в розробці неруйнівної експериментальної методики - нестаціонарної акустоелектричної та акустооптичної спектроскопії глибоких рівнів у напівпровідниках, та у визначенні за допомогою неї параметрів основних типів дефектів, локалізованих на границях розділу в епітаксialьних структурах GaAs.

У процесі виконання роботи розв'язувалися такі основні завдання:

- теоретичне вивчення особливостей кінетики обміну нерівноважного заряду між підзоною поверхневих центрів захоплення та вільними носіями заряду;
- створення експериментальної установки для отримання нестаціонарної поперечної акустоелектричної напруги в шаруватих структурах напівпровідник - п'єзоелектрик;
- розробка методики визначення характерних часів релаксації нерівноважного заряду на глибоких поверхневих центрах за допомогою методу нестаціонарної акустоелектричної спектроскопії, та створення відповідних комп'ютерних програм для математичної обробки експериментальних даних.
- експериментальне вивчення оптичних спектрів релаксуючого сигналу поперечної акустоелектричної напруги (нестационарна

акустооптична спектроскопія) та визначення параметрів основних типів центрів захоплення в епітаксіальних структурах GaAs.

Наукова новизна. До дисертації увійшли такі нові результати, отримані автором:

- експериментально визначено характерні часи релаксації нерівноважного заряду, захопленого на глибокі центри в епітаксіальному GaAs.

- вперше досліджено оптичні спектри релаксації поперечної акустоелектричної напруги в епітаксіальних структурах GaAs. На основі отриманих даних знайдено оптичні енергії активації та розраховані ефективні перерізи захоплення електронів для глибоких рівнів EL3, EL4, EL10.

- розраховано час релаксації нерівноважного заряду, захопленого на локальні центри, в загальному випадку, коли існує підзона глибоких електронних рівнів.

- вперше експериментально виявлено рівень з енергією залягання 105 meV, який пов'язаний з одним із зарядових станів вакансії арсена.

Практична цінність. Створено нову неруйнівну методику дослідження дефектів на границях розділу в епітаксіальних напівпровідникових структурах. Вона може бути застосована для розробки експрес методів контролю якості виготовлення поверхонь в напівпровідникових матеріалах на виробництві.

На захист виносяться наступні основні положення:

1. Розроблена нова неруйнівна методика -- нестационарна акустоелектрична та акустооптична спектроскопія глибоких рівнів у напівпровідниках. Вона базується на вимірюванні спектрів релаксації поперечної акустоелектричної напруги у структурах напівпровідник - п'єзоелектрик. Методика дозволяє визначати такі параметри -- час релаксації заряду на центрах захоплення, енергетичні рівні цих центрів та перерізи захоплення носіїв на них. На відміну од відомих методів можна визначати параметри дефектів на внутрішніх границях розділу в епітаксіальних напівпровідниках.

2. Вперше в GaAs експериментально виявлено енергетичний рівень 105 meV, який пов'язаний з одним із зарядових станів вакансії арсена. Запропонованою методикою знайдені параметри центрів захоплення EL3, EL4, EL10, які присутні на границі розділу в епітаксіальних структурах GaAs.

3. Теоретично розраховано час релаксації нерівноважного заряду, захопленого на підзоні поверхневих електронних станів. Показано, що з точки зору обмінних процесів підзона поверхневих електронних станів може бути замінена одним рівнем з ефективними параметрами -- глибиною залягання в забороненій зоні та перерізом захоплення носіїв заряду.

Апробація роботи. За матеріалами дисертації опубліковано 5 наукових робіт. Її основні результати доповідались та обговорювались на Всеукраїнській конференції молодих вчених (м. Київ, 1993 р.), на Міжнародній науковій конференції "International symposium on surface waves in solid and layered

structures and national conference on acoustoelectronics" (м. Москва - Ст.Петербург, 1994 р.), на НАТОвському інституті підвищення кваліфікації (м. Київ, 1995 р.).

Структура роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та бібліографії. Вона викладена на 186 сторінках, в тому числі містить 139 сторінок машинописного тексту, 45 малюнків, 3 таблиці, 116 бібліографічних посилань.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи, основні завдання, коротко викладено зміст роботи по розділах.

Перший розділ складається із короткого огляду сучасних методів дослідження поверхонь та границь розділу напівпровідникових структур і більш детального розгляду методу DLTS, аналіз якого має багато спільного з методом нестационарної акустоелектричної спектроскопії. Приведено основні теоретичні співвідношення між параметрами сигналу DLTS та характеристиками глибоких центрів захвалення. В цьому ж розділі наведено основні електрофізичні властивості та параметри основних дефектів структури кристалів GaAs. Ця інформація необхідна для подальшої інтерпретації результатів експериментів та теоретичних розрахунків. Тут також розглянуто два відомих з літератури основних механізми виникнення акустоелектричного ефекту у напівпровідниках - "концентраційна" та

"зарядова" складові поперечної акустоелектричної напруги.

У другому розділі описано принципи нестационарної акустоелектричної та акустооптичної спектроскопії глибоких рівнів. Приведено блок-схему експериментальної установки для отримання поперечного акустоелектричного ефекту. Описано методику вимірювання параметрів сигналу ПАН та визначення із експериментальних даних характерних часів релаксації нерівноважного заряду на поверхневих центрах захоплення. В якості порівняння, описано методику вимірювання C-V характеристик та отримання нестационарної ємності в інтегральних напівпровідникових структурах. Складовою частиною другого розділу є аналіз точності вимірювання характерних часів релаксації сигналу ПАН та визначення основних джерел виникнення похибок.

В третьому розділі викладено результати теоретичного і експериментального дослідження нестационарної акустоелектричної напруги. Тут знайдено зв'язок між характеристиками глибоких центрів та параметрами релаксуючого сигналу ПАН у випадку окремого енергетичного рівня в забороненій зоні, а потім проведено узагальнення для випадку неперервного енергетичного спектру поверхневих центрів захоплення. Показано, що з точки зору обмінних процесів підзона поверхневих електронних станів може бути замінена одним рівнем з ефективними параметрами - глибиною залягання в забороненій зоні та періодом захоплення носіїв заряду. Оцінено мінімально необхідну для застосування методу нестационарної акустоелектричної спектроскопії концентрацію поверхневих дефектів структури $10^9 \div 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Порівняно дві експериментальні методики

вимірювання нестационарної ПАН - імпульсний та неперервний синусоїдально модульований режим збудження. Проведено аналіз амплітудних залежностей часу релаксації поперечної акустоелектричної напруги в епітаксialьних структурах GaAs. За допомогою запропонованої методики аналізу спадаючої ділянки ПАН виділено внесок окремих типів центрів захоплення в поперечний акустоелектричний ефект та знайдені характерні часи релаксації нерівноважного заряду на них. Показано, що при збільшенні інтенсивності ультразвуку відносний внесок більш глибоких центрів в загальний сигнал ПАН зростає порівняно з внеском від більш мілких центрів. Проведено дослідження температурних залежностей часу релаксації нестационарної ПАН. На основі даних цих експериментів знайдені термічні енергії активації глибоких центрів в епітаксialьному GaAs - 0.42 eV та в кремнію р-типу -0.33 eV. Для порівняння описані експерименти по дослідженню C-V характеристик та нестационарної ємності в епітаксialьних структурах GaAs. Розрахована ємність інтегральної напівпровідникової структури GaAs з контактом Шоткі при різних напругах зміщення. Експериментально досліджена релаксація нестационарної ємності в цих структурах та проведено її порівняння з параметрами релаксації сигналу ПАН.

Четвертий розділ присвячений методу нестационарної акустооптичної спектроскопії глибоких рівнів, який полягає у дослідженні впливу монохроматичної підсвітки поверхні напівпровідникової структури на параметри релаксації поперечної акустоелектричної напруги. В ньому пояснюється наявність особливостей в оптичних спектрах ПАН, які виникають в ре-

зультаті оптичних електронних переходів у напівпровіднику. За допомогою запропонованої методики експериментально визначені оптичні енергії активації глибоких рівнів в епітаксіальному GaAs. На основі цих даних та отриманих раніше характерних часів релаксації нерівноважного заряду розраховані ефективні періоди захоплення електронів глибокими рівнями EL3, EL4, EL10. Описані експерименти по вивченню впливу ультразвукової обробки на спектри ПАН. Показано, що ультразвукові потоки потужністю понад 1 Вт/см^2 приводять до утворення трьох енергетичних рівнів в забороненій зоні GaAs 0.145, 0.105 і 0.050 eV, які пов'язуються з різними зарядовими станами вакансії арсена.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Розроблена нова неруйнівна методика дослідження дефектів поверхонь та границь розділу в епітаксіальних напівпровідникових структурах - нестационарна акустоелектрична та акустооптична спектроскопія глибоких рівнів. Запропонований метод дозволяє вивчати дефекти структури між підкладкою та епітаксіальним шаром, тоді коли такими відомими методами, як електронна мікроскопія, оптична спектроскопія, DLTS- виміри неможливий неруйнівний контроль цих границь розділу.

2. Теоретично досліджені процеси обміну електронами між локальними електронними станами та зоною провідності у загальному випадку, коли існує підзона рівнів у забороненій зоні. Розрахунки показали, що з точки зору релаксації акустоелектричної напруги підзона поверхневих рівнів може

бути замінена одним рівнем з ефективними параметрами - глибиною залягання в забороненій зоні $E_{t,eff}$ та перерізом захоплення носіїв заряду $S_{n,eff}$.

3. Проведено аналіз похибок визначення параметрів релаксуючої поперечної акустoeлектричної напруги, які виникають при інтерполяції експериментальних даних теоретичними залежностями по методу найменших квадратів. Показано, що похибка вимірювання характерних часів релаксації заряду на глибоких рівнях методом нестационарної акустoeлектричної спектроскопії становить 8-10 відсотків.

4. Проведено експериментальне порівняння двох методик визначення часів релаксації нерівноважного заряду на глибоких рівнях - неперервний синусоїдально модульований та імпульсний режими вимірювання акустoeлектричної напруги. Обидві методики в межах похибки вимірювань дають однакові результати і доповнюють одна одну. Неперервний синусоїдально модульований режим більш зручніший для виділення малих часів релаксації в межах від 0 до 0.5 мілісекунди. Імпульсний режим має меншу похибку для аналізу більш повільних процесів обміну електронами, з часами релаксації більше 0.5 мілісекунди.

5. Досліджено C-V характеристики та параметри сигналів нестационарної ємності в інтегральних епітаксціальних структурах GaAs. Знайдено часи релаксації нестационарної ємності. Ці результати підтверджують та доповнюють дані, які були отримані методом нестационарної акустoeлектричної та акустooптичної спектроскопії.

6. Проведено вимірювання часів релаксації нерівноважного

заряду на глибоких поверхневих рівнях для зразків об'ємного р-Si при різних температурах. Визначена термічна енергія активації глибоких рівнів 0.33 eV, що відповідає енергетичному положенню рівнів поверхневих центрів захоплення в зразках кремнію.

7. Методом нестационарної акустооптичної спектроскопії, який полягає у дослідженні впливу монохроматичної підсвітки поверхні напівпровідникової структури на характер акустoeлектричної взаємодії, виділені спектральні залежності параметрів релаксації поперечної акустoeлектричної напруги в епітаксіальному GaAs. За результатами цих експериментів знайдені ефективні енергії залягання та розраховані перерізи захоплення електронів для відповідних глибоких рівнів, а також визначені характерні часи релаксації нерівноважного заряду на них. Ці дані наведені нижче в таблиці.

N	τ , мс	E_t , eV	S_n , см ²	Ідентифікація
1	2	0.54	$2.5 \cdot 10^{-13}$	EL3
2	22	0.48	$2 \cdot 10^{-15}$	EL4
3	4.5	0.20	$1 \cdot 10^{-19}$	EL10

8. Проведено експерименти по вивченню впливу ультразвукової обробки на спектри поперечної акустoeлектричної напруги. Показано, що ультразвукові потоки потужністю понад 1 Вт/см² приводять до утворення трьох енергетичних рівнів в забороненій зоні GaAs 0.145, 0.105 і 0.050 eV нижче дна зони провідності, які пов'язуються з різними зарядовими станами вакансії арсена. Рівень 0.105 eV спостерігався вперше.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ОПУБЛІКОВАНІ В НАСТУПНИХ РОБОТАХ:

1. Островський І.В., Сайко С.В. Акустоелектрична спектроскопія поверхні GaAs// УФЖ.-1993.-Т.38.-№10.-С.1544-1546.
2. Островский И.В., Сайко С.В., Савкина Р.К. Релаксация поперечного акустoeлектрического напряжения в эпитаксиальных структурах GaAs//ФТП.-1994.-Т.26.-№5.-С.796-801.
3. Островский И.В., Сайко С.В. Акустoeлектрический анализ глубоких уровней на поверхности раздела в эпитаксиальных структурах GaAs// ПОВЕРХНОСТЬ. Химия. Физика. Механика.-1994.-№10-11.-С.62-67.
4. Островский И.В., Сайко С.В. Спектроскопия поверхностных состояний в GaAs посредством акустoeлектрического эффекта// ФТП.-1993.-Т.35.-№4.-С.1043-1050.
5. Ostrovskii I.V., Saiko S.V. Transient TAV and capacitance measurements for surface characterization in GaAs and Si// International symposium on surface waves in solid and layered structures and national conference on acoustoelectronics. St.Petersburg, 1995.-P.468-472.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Bass J.M., Matthal C.C., Saynor K.A. A theoretical study of the scanning tunneling microscopy images of the GaAs (001) $\beta(2 \times 4)$ and $\alpha(2 \times 4)$ surfaces// 22-nd international conference on the physics of semiconductors. Vancouver, 1994.-V.1.-P.419-422.
2. Ricksand A., Engström O. Deep level transient spectroscopy

py: Increased accuracy of interpretation of silicon/silicon dioxide interface states data by the assistance of computer simulations// J. Appl. Phys. -1991. -V.70. -N11. -P.6915-6926.

3. Goguenheim D., Viillaume D., Vincent G., Noble M. Johnson. Accurate measurements of capture cross sections of semiconductor-insulator interface states by a trapp-fillin experiment: the charge potential feedback effect// J. Appl. Phys. -1990. -V.68. -N3. -P.1104-1113.

Saiko S.V. Transient acoustoelectric and acoustooptic spectroscopy of deep levels in GaAs (manuscript).

The dissertation advanced for a degree of Philosophy Doctor in the speciality 01.04.07 - Solid State Physic. Taras Shevchenko Kiev University, Kiev, 1996.

A new nondestructive technique - transient acoustoelectric and acoustooptic spectroscopy of deep levels for investigation of structure defects at interfaces in epitaxial semiconductors is developed. It permits to find the following parameters - relaxation time of charged carriers on trapping centers, energetic levels of these centers and crosssections of carriers on them. By this technique the parameters of main trapping centers EL3, EL4, EL10 in epitaxial GaAs are found. Features of a charge transfer between a subzone of surface electronic states and free charge carriers in the conduction band are theoretically investigated.

ЛНБ ім. В. Стефанюка
АН України

Сайко С.В. Нестационарная акустоэлектрическая и акустооптическая спектроскопия глубоких уровней в GaAs.

Диссертация на соискание ученой степени кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела. Киевский Университет им. Тараса Шевченко, Киев, 1996.

Разработана новая неразрушающая методика исследования дефектов структуры на границах раздела в эпитаксиальных полупроводниках - нестационарная акустоэлектрическая и акустооптическая спектроскопия глубоких уровней. Она позволяет определять следующие параметры - время релаксации носителей заряда на центрах захвата, энергетические уровни этих центров и сечения захвата носителей на них. С помощью предложенной методики найдены параметры основных центров захвата EL3, EL4, EL10 в эпитаксиальном GaAs. Теоретически изучены особенности кинетики обмена между зарядом, захваченным на подзону поверхностных электронных состояний, и свободными носителями заряда в зоне проводимости.

Ключові слова: дефекти, епітаксіальні структури, акустоелектричні.

Сайко

Таблиця 1.1. Динаміка витрат на науково-технічні дослідження та розробки в Україні за період 1990-2000 років. Дані за 1990-1999 роки за оцінками Держстатистики, дані за 2000 рік за оцінками МОН. Джерело: МОН України, Київ, 2001 рік.

Витрати на науково-технічні дослідження та розробки в Україні за період 1990-2000 років становили 1,1 млрд грн (1990 рік), 1,2 млрд грн (1991 рік), 1,3 млрд грн (1992 рік), 1,4 млрд грн (1993 рік), 1,5 млрд грн (1994 рік), 1,6 млрд грн (1995 рік), 1,7 млрд грн (1996 рік), 1,8 млрд грн (1997 рік), 1,9 млрд грн (1998 рік), 2,0 млрд грн (1999 рік), 2,1 млрд грн (2000 рік).

Підп. до друку 14.02.96. Формат 60×84^{1/16}. Папір
друк. № 2. Друк офсетний. Умовн. друк. арк. 47.
Умовн. фарбо-відб. 1,04 Облік-вид. арк. 10
Тираж 100 . Зам. № 6-1011.

Фірма «ВІПОЛ»
252151, Київ, вул. Волинська, 60.

446495

AB.34.608

AB 34.608