



ЄВГЕН ФЕДОРОВИЧ ВЕНГЕР

Відділ напівпровідникових гетероструктур (№ 18)

Завідуючий відділом – чл.-к. НАН України, доктор фіз.-мат. наук,
професор Є.Ф. Венгер

Відділ створений в 1982 р. на базі існуючої з 1974 р. лабораторії напівпровідникових гетеропереходів. Очолив його доктор фіз.-мат. наук, професор Ю.О. Тхорик (1928-1996 рр.). З 1991 р. відділ очолює чл.-к. НАН України, доктор фіз.-мат. наук, професор Венгер Є.Ф. В ньому працюють 11 докторів наук і 19 кандидатів наук. До його складу входять 4 лабораторії: лабораторія НВЧ-електроніки (д. т. н., проф. Р.В. Конакова), анізотропних напівпровідників (д. ф.-м. н. С.І. Козловський), модуляційно-поляризаційної спектроскопії (д. ф.-м. н. Б.К. Сердега), лабораторія фізико-хімічних проблем матеріалознавства аморфно-кристалічних матеріалів (д. т. н. В.П. Маслов). Відділ входить до складу відділення технології і матеріалів сенсорної техніки, яке очолює чл.-к. НАН України, професор Є.Ф. Венгер.

Основний науковий напрямок відділу — дослідження фізичних величин гетероепітаксійних плівок та внутрішніх меж поділу в напівпровідникових гетеросистемах в зв'язку з їх реальною структурою, в тому числі деформаційних ефектів під впливом внутрішніх механічних напружень і радіаційно-стимульованих ефектів на межі поділу плівка-підкладка, а також розробка активних елементів і датчиків параметрів



Засновник від. № 18
доктор ф.-м. н., професор
Юрій Олександрович Тхорик

фізичних властивостей на основі напівпровідникових систем.

Основні наукові та науково-технічні результати, найбільш значні розробки:

Розроблено технологію отримання гетеросистем Ge-GaAs та Ge-Si методом термічного випаровування у вакуумі. За результатами досліджень електрофізичних характеристик гетероепітаксійних плівок германію обгрунтовано їх використання в якості активних елементів датчиків деформації, температури і магнітного поля, створені мініатюрні плівкові термо- і тензорезистори для широкої області температур (від гелієвих до 500 K) і магнітних полів (до 10 T).

Створено устаткування для визначення електронних і оптичних параметрів напівпровідників методом модуляційної спектроскопії електровідбивання, енергетичного спектра носіїв заряду в плівках і підкладках на межі поділу, а також внутрішніх механічних напружень. Вперше виявлено деформаційне розщеплення валентної зони в плівках германію під дією внутрішньої деформації та хвосту густини стану в них.

Досліджено механізми релаксації внутрішніх механічних напружень в гетеросистемах, з'ясовано роль концентраторів напружень при зародженні та розповсюдженні дислокацій, встановлено зв'язок між розподілом дислокацій, механічними напруженнями та кривизною зігнутої ними гетеросистеми. Вперше виявлено вплив електронного, лазерного та γ -опромінення, ультразвукової дії на дислокаційну морфологію гетероепітаксійних систем, явище радіаційно-стимульованої релаксації внутрішніх механічних напружень в гетеросистемах та радіаційно стимульованого впорядкування дислокаційної структури на межі поділу плівка-підкладка. Показано, що ефективність радіаційно-стимульованої релаксації механічних напружень під дією електронного і γ -опромінення, структурне упорядкування межі поділу шаруватої структури визначається складом і досконалістю гетеросистеми та видом іо-



Д. ф.-м. н., проф. Р.В. Конакова (зліва), д. ф.-м. н., проф. Л.О. Матвеева разом із співробітниками фізичного факультету Білоруського державного університету к. ф.-м. н. М.Й. Тарасик та д. ф.-м. н., проф. М.О. Поклонським під час проведення в Мінську V міжнародної наукової конференції «Взаємодія випромінювання з твердим тілом».

нізуючої радіації.

Створена і підтверджена експериментально феноменологічна теорія структурної релаксації в напівпровідникових приладних структурах, що дозволило розробити нові методи радіаційної технології і впровадити їх у виробництво НВЧ-приладів (діодів та транзисторів). Виявлена стимульована НВЧ-випромінюванням сантиметрового діапазону довжин хвиль релаксація механічних напруг в на-

півпровідникових гетеросистемах, яка супроводжується при оптимальній дозі впливу структурно-домішковим впорядкуванням в області межі поділу фаз, що є важливим для розробки високонадійних приладів мікро-, опто-, НВЧ- та сенсорної електроніки.

Показано, що процеси масопереносу і структурно-фазові перетворення на межах поділу метал-GaAs визначають термічну і радіаційну стійкість бар'єрних контактів. Розраховані і експериментально підтверджені ефективні коефіцієнти радіаційно-стимульованої дифузії Cr, Mo з шарів контактної металізації в GaAs. Запропоновано модель стимульованої релаксації внутрішніх механічних напруг в структурах на основі нітридів і боридів титану. Визначено природу, моделі і параметри ростових локальних центрів та дефектів, створюваних термічним відпалом, деформацією та опроміненням високоенергетичними частинками в напівпровідникових сенсорних матеріалах Ge, GaAs та SiC. Експериментально знайдено суттєві зміни дефектної структури і рекомбінаційних характеристик квантово-розмірних структур на підкладках GaAs під дією рентгенівського опромінення. Вперше зафіксовано підвищену радіаційну стійкість (до дози $\sim 2 \cdot 10^9$ R при γ -опроміненні Co^{60}) GaAs/Al_xGa_{1-x}As гетероструктур з квантовими ямами.

Розроблені поліруючі травники для отримання якісних поверхонь під-

кладок та плівок напівпровідникових сполук A^3B^5 і A^2B^6 , спосіб підготовки підкладок з напівпровідникових сполук A^3B^5 , що не потребує шліфування та механічної поліровки, спосіб виготовлення напівпровідникових епітаксійних структур без деформації згину. Методом спектроскопії низькопольового електровідбиття показана можливість використання попередньої обробки різкою при виготовленні досконалих плоских та анізотропно травлених мікрорельєфних пластин кремнію для підкладок в гетероструктурах зі зменшенням їх кошторису. Запропоновано нову технологію низькотемпературної гетероепітаксії, індукованої розвиненою морфологією анізотропно травленої напівпровідникової підкладки. Встановлено, що при малих пересиченнях і низьких швидкостях росту в умовах стимульованої гетероепітаксії зберігається морфологічна стабільність поверхні напівпровідникових плівок, отриманих імпульсним термічним осадженням.

Встановлено вплив нейтронного опромінення та термообробки на електронні властивості, внутрішні механічні напруження та структурну досконалість кристалів кремнію при утворенні преципітатів SiO_2 . Показано, що опромінення напівпровідників частинками великої енергії може використовуватись з метою потрібної зміни їх властивостей, а прилади, які виготовляються на основі нейтронно легovanого $n-Si(P)$, є більш радіаційно стійкими по відношенню до γ -опромінення в порівнянні з приладами на основі кремнію, легovanого фосфором під час вирощування.

Виявлено вплив плазмової обробки на електронні параметри і механічні напруження в класичних і наноструктурних гетеросистемах $Si-SiO_2$. Визначені особливості електронних процесів в світловипромінюючих кремнієвих наносистемах в залежності від технології їх виготовлення, встановлено зв'язок між електровідбиванням, фотолюмінесценцією і спектром електронних станів в кремнієвих наносистемах, отриманих різними технологіями, що є важливим для практичного впровадження нових наноструктур в наноелектроніку. Отримані електронні параметри поверхні монокремнію на межі з пористим кремнієм: граничний потенціал, щільність граничних електронних станів, концентрація пасток для нерівноважних носіїв заряду. Визначено вплив легування паладієм на електронні властивості кремнієвих наносистем для використання їх в каталізі і електронній техніці.

При дослідженні методом модуляційної спектроскопії електровідбивання поруваного та нанокристалічного кремнію, отриманих різними методами, виявлені прямі переходи в області існування фотолюмінесценції при кімнатній температурі, що важливо для створення елементів сенсорної техніки.

Встановлено, що енергетичний спектр наносистем із квантовими точками містить оптичні переходи, які характерні й для поруватих кремнієвих структур. Показано, що енергії оптичних переходів, параметр розсіяння, рухливість і час енергетичної релаксації збуджених світлом носіїв заряду у них залежать від технології виготовлення структур, що є важливим для впровадження нових наносистем в мікроелектроніку.

Побудована енергетична зонна структура світловипромінюючого поруватого кремнію, отриманого електрохімічним, анізотропним і «барвлячим» травленням та вплив на неї водневої плазми. Показана наявність мінізон, які відповідають за існування фотолюмінесцентних смуг (червона, зелена і голуба). Встановлена природа електронних станів в забороненій зоні кремнієвих нанокристалітів поруватого кремнію (Si-O та Si-H зв'язки) та механізм впливу обробки водневою плазмою на спектр електровідбивання і спектр електронних станів, що важливо для розробки елементів оптоелектронних сенсорних систем на їх основі.

В результаті дослідження температурних та електропольових залежностей поверхневої фото-ЕПС на поверхнях германію, кремнію та GaAs вперше показано, що при електропольових дослідженнях визначаються параметри ефективних поверхневих електронних станів, які розміщені як на межі поділу напівпровідник-поверхнева плівка, так і в самій плівці. Сульфідкування GaAs(100) стабілізує поверхню, виключаючи перебудову системи ПЕС зі зміною температури. Методом модуляційної спектроскопії електровідбивання виявлено вплив квантово-розмірного ефекту і внутрішніх механічних напружень на межі поділу підкладинка GaAs - пасивуюча плівка Ga₂S₃ на ефективність сульфідної електронної пасивації поверхні арсеніду галію, що важливо для її використання в електронній, оптоелектронній і сенсорній техніці. Встановлено, що зменшення внутрішніх напружень і енергії квантованого рівня, розширення поверхневої квантової ями покращують електронні параметри пасивованої поверхні GaAs.

На основі результатів проведеного методом температурних і електропольових залежностей конденсаторної фото-ЕПС дослідження реальних поверхонь GaAs і Si, а також поверхонь при нанесенні на них сульфідних і хлоридних шарів, термічно і хімічно отриманих оксидних шарів SiO₂, а також шарів пористого кремнію (ПК/p-Si структури) показана перспективність розробленої методики для визначення електронних параметрів поверхні та нанесених на неї шарів. Запропонований методичний підхід для оцінки максимальної товщини перехідного шару в гетероструктурах і контактах Шот-

ткі, який базується на вимірюванні спектральних характеристик поперечної фото-ЕРС.

За результатами дослідження впливу умов термічного осадження фулеренів C_{60} на структуру, склад, оптичні та механічні властивості плівок з фулеренами встановлено, що вони визначаються швидкістю осадження фулеренів, яка залежить від взаємодії термічно збуджених молекул з підкладкою. Виявлено, що поглинання і комбінаційне розсіяння світла, фотолюмінесценцію, внутрішні механічні напруження і наноморфологію плівок можна модифікувати шляхом зміни температури джерела сублімації молекул C_{60} або розміщенням підкладки по відношенню до нього. Вперше спостерігалась фотолюмінесценція в безводневих вуглецевих плівках $a-C:C_{60}$, отриманих на підкладках кремнію термічним випаруванням у вакуумі фулеренів C_{60} . Встановлено розпад молекул фулеренів C_{60} під дією гелієвої плазми. Запропоновано механізм виникнення механічних стискуючих напружень в плівках $a-C:H$ на кремнієвих підкладках (перехід від тетрагональної гібридизації вуглецю до тригональної) і вплив на них умов осадження і термічної обробки. Показано, що оптичні властивості даних плівок визначаються розміром і ступенем досконалості ближнього порядку графітоподібних нанокристалітів.

Розроблені нові принципи створення дискретних і багатофункціональних вимірювальних перетворювачів. На основі дослідження явищ переносу в гетероепітаксійних системах (тонких плівках германію на ізольованих підкладках GaAs) встановлено механізми провідності і особливості зонного спектра плівок Ge, які забезпечують оптимальне співвідношення високої термочутливості у широкому діапазоні температур і низької чутливості до магнітного поля, високу радіаційну стійкість чутливих елементів сенсорів температури. Розроблено методики комплексного дослідження і аналізу метрологічних характеристик та алгоритми калібрування широкодіапазонних кріогенних сенсорів температури, магнітного поля та багатофункціональних сенсорів. Створено та впроваджено у виробництво мініатюрні термометри опору у діапазоні робочих температур 0,02-500 К.

Розроблено діодний сенсор температури (4-500 К) для контролю і моніторингу потужних теплових полів в електро- та атомній енергетиці, а також для контролю температури в побутовій техніці, медицині та різних технологічних процесах. Визначені особливості впливу дифузійного і рекомбінаційного струмів у сильнолегованих діодних структурах, які визначають граничні характеристики діодних сенсорів температури в області помірковано

низьких та середніх температур. Визначені особливості температурних залежностей ВАХ в умовах дії зовнішніх чинників, які впливають на метрологічні характеристики діодних сенсорів температури. Визначені межі, в яких можна керувати їх метрологічними характеристиками.

На базі гетероструктур Ge/GaAs і InSb/GaAs розроблені нові багатофункціональні сенсори для одночасного вимірювання температури і магнітного поля. На підставі комплексних досліджень метрологічних характеристик нових типів термометрів опору та багатофункціональних сенсорів встановлено конкурентноспроможність розроблених сенсорів на світовому ринку. Виявлено ефект гігантського негативного магнітоопору в плівках германію при наднизьких температурах (0,03 – 0,3 К), який обумовлений квантовими поправками до ефекту локалізації в області стрибкової провідності.

Розроблені і виготовлені установки для контролю параметрів і калібрування кріогенних термометрів опору в діапазоні 1,5 - 350 К у відповідності з міжнародною метрологічною шкалою ITS-90. Встановлено, що кріогенні мікротермометри опору на базі плівок германію на арсеніді галію мають високу радіаційну стійкість і малі похибки при вимірюванні температури у присутності сильних магнітних полів.

Виявлені процеси деградації лавино-прольотних діодів та вплив різних технологічних прийомів і обробок на надійність і вихідні параметри таких приладів. Виявлена орієнтаційна залежність напруги лавинного пробою в арсенід-галієвих діодах Шоттки і запропонована її фізична модель. Розроблена і підтверджена експериментально теорія шнурування струму в лавино-прольотних НВЧ діодах різного типу, розрахована омічна балістична провідність в тунельно-зв'язаних двоямних системах, перспективних для створення електронних перемикачів нового покоління. Створена оригінальна апаратура для прогнозування надійності напівпровідникових діодів за тонкою структурою ВАХ.

Створено методики відбраковування потенційно ненадійних НВЧ напівпровідникових приладів, що працюють в екстремальних умовах (при високій густині розсіюваної потужності і температурах, близьких до критичних) шляхом аналізу особливостей їх електрофізичних характеристик. На основі цих методик створено автоматизований діагностичний характеріограф. Встановлено та апробовано в експерименті інформативні параметри для прогнозування відмов невикривляючих контактів для активних мікрохвильових і сенсорних елементів на основі GaAs. Виявлено високу термостабільність поверхнево-бар'єрних структур, які формуються плівками ZrB_x на

n - n^+ GaAs, що забезпечує їх стійку працездатність при екстремальних терморадіаційних впливах ($T=600$ °C, $\Phi=10^8$ P).

Встановлено, що автоепітаксійні структури InP та GaAs, які вирощені на пористих сильнолегованих підкладках n^+ InP (100) і n^+ -GaAs (100), є більш структурно досконалішими та менш напруженими, ніж аналогічні структури, вирощені на стандартних підкладках. Показано, що діоди Ганна, виготовлені на епішарах, які вирощені на пористих підкладках, мають «м'який» запуск у режимі генерації і більш високі вихідні параметри, ніж стандартні діоди Ганна. Встановлено наявність перехідного шару на межі поділу контактів Шоттки NbN-GaAs, провідність якого залежить від температури відпалу зразків та концентрації азоту в плівці NbN, що важливо для створення високонадійних діодів Шоттки.

Показано, що в субмікронних напівпровідникових бар'єрних структурах на основі InP, GaAs і SiC при наявності структурних неоднорідностей на межі поділу метал-напівпровідник і (або) ростових дислокацій, що пересікають область просторового заряду, на прямій гілці вольтамперної характеристики в діапазоні температур 100-500 K домінує тунельний струм. Встановлено, що основним фактором, який обмежує деградацію TiN_x -GaAs, TiB_x -SiC, Ta_2O_5 -Si, Ge-GaAs при впливі на них потужного електромагнітного випромінювання, є наявність аморфної (TiN_x , TiB_x , Ta_2O_5) або монокристалічної (Ge) бар'єростворюючої плівки, яка уповільнює зернограничну дифузію (основний механізм руйнування бар'єрних контактів), що важливо для створення узагальненої моделі термо- і радіаційно-стійкого контакту: метал-напівпровідник. Розроблені високонадійні термо- і радіаційно-стійкі омичні та бар'єрні контакти на основі фаз проникнення для дискретних напівпровідникових приладів і інтегральних схем нового покоління (тунельно-резонансні, тунельно-прольотні діоди, транзистори з високою рухливістю в каналі).

Теоретично обґрунтовані, експериментально виявлені та встановлені основні закономірності розповсюдження поверхневих та хвилеводних поляритонів у шаруватих напівпровідникових структурах на основі арсеніду галію, карбіду кремнію та антимоніду індію. Виявлено і досліджено явище фотопам'яті поверхневого потенціалу на ряді напівпровідникових матеріалів (германію, кремнію, арсеніді галію, карбіді кремнію), яке залежить від температури навколишнього середовища і стану поверхні напівпровідника.

Розроблено фізико-технологічні основи створення інтегральних чутливих елементів перетворювачів механічних параметрів (сили, тиску, прискорення, витрат рідин та газів) на основі кремнію з аналоговим та частотно-

модульованим вихідними сигналами. Сенсорні елементи відзначаються легкістю з'єднання з мікропроцесорними системами та підвищеним захистом від електромагнітних завад та радіоперешкод. Розроблені оригінальні конструкції інтегральних чутливих елементів перетворювачів механічних параметрів на основі ефекту тензо-ЕРС, одноперехідних тензотранзисторів, багатоклекторних біполярних тезотранзисторів, багатостокових уніполярних тензотранзисторів. Оригінальні конструкції відзначаються підвищеною чутливістю, лінійністю робочої характеристики та спроможністю до серійного виготовлення.

Розроблено автоматизований комплекс для вимірювання параметрів субмікронних напівпровідникових приладів та структур в діапазоні 77-1000 К та оригінальну конструкцію чутливого елементу кремнієвого інтегрального перетворювача тиску на основі диференційних тензоерс елементів. Конструкція відзначається принциповою нечутливістю до планарних «паразитних» механічних напружень, які виникають при виготовленні та складанні перетворювача.

Сукупність досліджень методом електронного парамагнітного резонансу і подвійного електронного ядерного резонансу та їх температурних залежностей з використанням вимірювання на кількох мікрохвильових частотах (9, 37, 140 ГГц) надала можливість встановити моделі парамагнітних центрів бору у нееквівалентних позиціях ґратки карбіду кремнію та з'ясувати електронну структуру домішки азоту у політипах карбіду кремнію. На основі вивчення фото-ЕПР спектрів було встановлено, що глибокий донорний дефект з більш глибоким рівнем залягання, ніж азот, є головним дефектом, що контролює процес рекомбінації нерівноважних носіїв у напівізолюючому 4H політипі карбіду кремнію. В результаті проведених досліджень методами ЕПР та фото-ЕПР напівізолюючих зразків 4H SiC, виготовлених при різних технологічних умовах, виявлена смуга з максимумом при 2.4 еВ, яка пов'язана з присутністю домішки титану, а також смуга з краєм поглинання 2.75 еВ, яка викликана донорно-акцепторною рекомбінацією між домішками азоту та алюмінію.

Розроблено метод вимірювання мікрохвильової фотопровідності безконтактним методом з використанням НВЧ 37 ГГц (Q-діапазон) у зразках карбіду кремнію різних політипів, у тому числі з напівізолюючими властивостями. Проведений сумісний аналіз часових залежностей фотопровідності, які виміряні контактними і безконтактними методами та фото-ЕПР. Розроблено конструкцію резонатора, що надає можливість опромінення

досліджуваного зразка випромінюванням під час спостереження спектра ЕПР. Конструкція має достатньо високу чутливість, проста у виготовленні, ремонтпридатна та надає змогу реалізувати методики фото-ЕПР у 8-мм діапазоні довжин хвиль при вивченні спектрів ЕПР в широкому діапазоні температур.

Розроблено фізико-технічні основи новітнього наукового напрямку - модуляційно-поляризаційної спектроскопії матеріалів та структур. На основі використання модуляції поляризації електромагнітного випромінювання створено нові методи дослідження явищ лінійного та циркулярного двопроремезаломлення, а також явищ лінійного та циркулярного дихроїзму. Виявлено, що з точки зору фізико-технічних застосувань циркулярна компонента за своїм динамічним діапазоном та чутливістю до величини анізотропії є найбільш інформативна. Встановлено, що лінійна компонента вектора Стокса, яка є різницею ортогональних компонент електричного поля хвилі, у цьому методі найбільш чутлива до ефектів лінійного та циркулярного дихроїзму. Розроблено новий, більш чутливий метод реєстрації поверхневого плазмонного резонансу, який є базовим для створення сучасних біосенсорів та рефрактометрів. Розроблено пристрій для вимірювання внутрішніх напружень в мікрокристалах, мікрочіпах, композиційних матеріалах (прозорих і непрозорих), а також прилади для моніторингу довкілля та аналізу біосередовищ.

Виявлено механізми деградації параметрів напівпровідникових матеріалів A^3B^5 та A^2B^6 і структур на їхній основі, пов'язані з перебудовою домішково-дефектної атмосфери. Із аналізу фотоелектричних і фотолюмінесцентних властивостей отримана структура локальних центрів і визначена радіаційна стійкість шарів CdTe в залежності від умов виготовлення. Теоретично розраховано і експериментально підтверджено пригнічення міжзонної безвипромінювальної Оже-рекомбінації в монокристалах КРТ одновісною пружною деформацією і суттєве зростання при цьому більш ніж на порядок квантового виходу міжзонного ІЧ-випромінювання. Вперше отримано інтенсивне стимульоване випромінювання в діапазоні 80-100 мкм в кристалах КРТ ($x < 0.16$) в умовах докорінної зміни енергетичної структури одновісним пружним стиском.

Розроблені неруйнівні методи діагностики параметрів поверхні і межі поділу напівпровідників на основі модуляційної та поляризаційної спектроскопії, фотолюмінесценції і поверхневої фото-ЕРС, способи покращення параметрів напівпровідникових приладів з межею поділу (фотоприймачів, тен-

зорезисторів, діодів Шотткі та НВЧ-діодів) та експрес-методи контролю напівпровідникових сенсорів в умовах малосерійного промислового виробництва.

Розроблено і впроваджено комплекс апаратури для діагностики та прогнозування надійності НВЧ-діодів і транзисторів, а також наносекундні характеристики і серійноспроможну технологію виготовлення перетворювачів тиску широкого застосування на основі кремнієвої інтегральної біполярної технології.

Розроблено та виготовлено експериментальний радіоспектрометр ЕСР високої роздільної здатності D-діапазону на базі твердотільних мікрохвильових компонентів. Висока чутливість та інформативність обладнання продемонстрована на прикладі дослідження спектрів ЕСР акцепторних та донорних домішок в SiC.