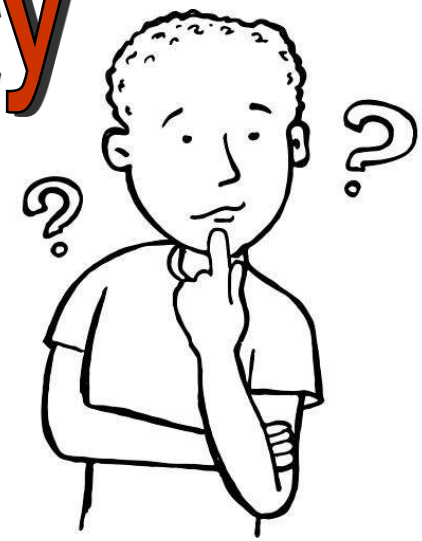
# СТУДЕНТАМ 2-го КУРСУ



Обираючи кафедру, варто в першу чергу ознайомитись з **науковими напрямками** і дослідженнями, що проводяться в рамках її структурних підрозділів, а також зі спецкурсами, що викладаються співробітниками підрозділів

Нижче Ви зможете дізнатися більше про те, з чим Ви будете мати справу у найближчі 4 роки навчання

## СПЕЦКУРСИ

### Бакалавратура

- Механічні властивості твердих тіл (Оліх О.Я.)
- Дефекти в напівпровідникових та діелектричних кристалах (Оліх О.Я.)
- Фізика напівпровідників (Коротченков О.О.)
- Методи експерментальних досліджень напівпровідникових матеріалів (Оліх О.Я.)
- Основи фізики низькорозмірних напівпровідникових систем (Коротченков О.О.)

### Магістратура

- Фізика електронних та фононних процесів в наноструктурах (Коротченков О.О.)
- Фізика оптичних та фотоелектронних явищ в наноструктурах (Подолян А.О.)
- Фізика радіаційних дефектів у напівпровід-никових структурах (Подолян А.О.)

# Методичний огляд

## Поняття про нано- та оптоелектроніку

**Оптоелектроніка** - це розділ електроніки, пов'язаний з перетворенням оптичного випромінювання в електричний струм і навпаки.

Одне з центральних місць в цій галузі науки обіймають **фотовольтаїчні пристрої**, що забезпечують вироблення електричної енергії фоточутливими елементами шляхом перетворення сонячної енергії в електрику.

**Наноелектроніка** – область електроніки, що займається розробкою фізичних і технологічних основ створення інтегральних електронних схем з характерними топологічними розмірами елементів, меншими за 100 нанометрів (1 нм = $10^{-9}$ м) .

Сучасна **електроніка твердого тіла** – це електроніка мікроскопічних обсягів речовини, що містять невелику кількість атомів; штучних і природних систем зі зниженою розмірністю (наноструктурами ); точкових і протяжних дефектів і включень, атомів і молекул, захоплених поверхнею або розчинених в об'ємі. Вона природньо охоплює фізику двовимірних меж розділу двох речовин, тонких шарів і поверхонь. Принципово нова особливість саме *нано*електроніки пов'язана з тим , що для елементів таких малих розмірів починають проявлятись квантово-розмірні ефекти. З'являється нова номенклатура властивостей, відкриваються нові привабливі перспективи їх використання. Тому електроніка, що використовує квантові ефекти, – це вже основа принципово нової , нано- чи наногетероструктурної електроніки.

# Чим займається підрозділ

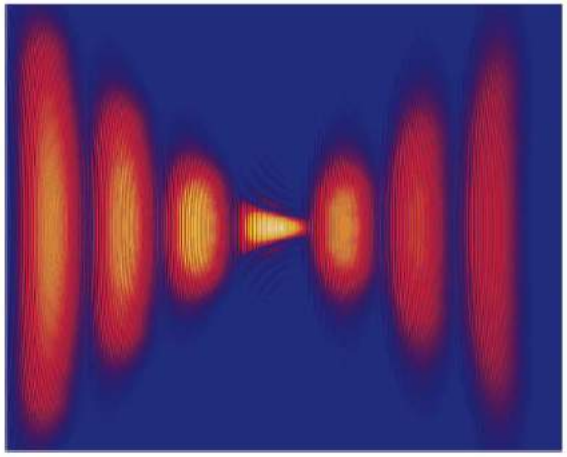
Ми передусім приділяємо увагу **електрофізичним методам дослідження** напівпровідникових гетероструктур, що пов'язані з рухом носіїв заряду і зазвичай дають статистично усереднені відомості як про параметри носіїв, так і про природу розсіювачів носіїв заряду – електрично активних або нейтральних центрів (точкових чи протяжних дефектів в об'ємі структури або на межах поділу). За останні 2 роки розгорнуто методи дослідження теплофізичних властивостей напівпровідникових гетероструктур, що поєднують визначення теплопровідності методом 3*w* та коефіцієнту Зеебека.

# У чому особливість наших підходів

- Однією з особливостей є намагання співробітників підрозділу **поєднати експериментальні та розрахункові методики** дослідження, що сприяє формуванню у студентів бакалавратури і магістратури теоретичних та експериментальних знань і умінь.
- Іншою особливостю є залучення до комплексу традиційних методів електрофізичних досліджень **п'єзоелектричних та пружніх полів акустичних хвиль**.
- Загалом, комплекс наявних експериментальних та розрахункових методів більш детально висвітлений нижче, при розгляді основних наукових напрямків роботи підрозділу.
- Усе це створює можливість вирішення максимально широкого кола фундаментальних і прикладних завдань сучасної фізики твердого тіла і наноструктур. Зрозуміло, що методична різноманітність висуває підвищені професійні вимоги до співробітників підрозділу, аспірантів та студентів.

# Основні наукові напрямки

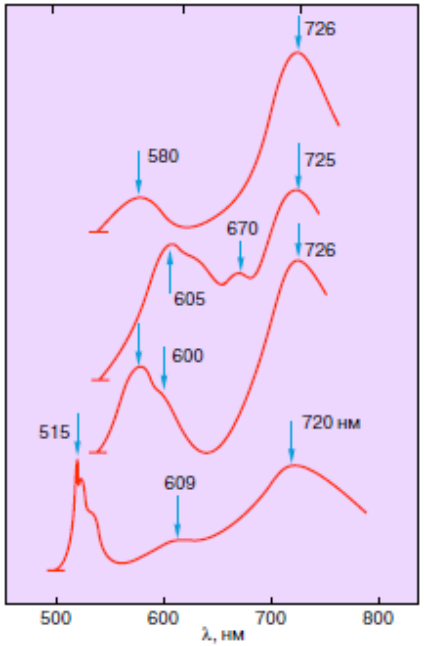
- Наукові дослідження в рамках даного напрямку було започатковано на кафедрі у 70-х роках минулого століття. Значна увага була присвячена вивченню акустоелектричних явищ у напівпровідниках, зокрема, акустоелектричних струмів, та ефектам нелінійної взаємодії ультразвукових хвиль.
- Дослідження проводились на межі таких цікавих наукових дисциплін, як акустика твердого тіла, фізика напівпровідників і радіоелектроніка. Вони мали важливе прикладне значення для вдосконалення методів перетворення та обробки радіосигналів завдяки тому факту, що перетворення високочастотних радіосигналів у звукові із меншою на два порядки довжиною хвилі значно спрощує їх обробку.



Просторове перетворення ультразвукових сигналів

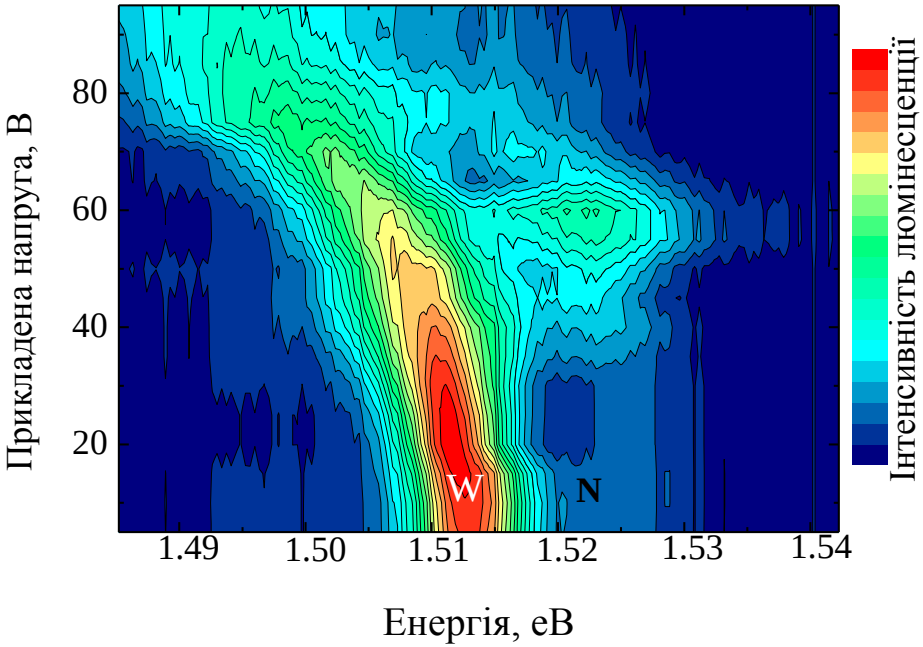
Саме для здійснення операцій над сигналами використовується взаємодія ультразвуку з електронами провідності в напівпровідниках (**акустоелектричний ефект**), з оптичним випромінюванням (**акустооптика**), а також **нелінійна взаємодії ультразвукових хвиль**. Акустоелектронні пристрої дозволяють виконувати операції над сигналами, зокрема, перетворення у часі (затримку сигналів, зміну їх тривалості), спектральні перетворення (зсув фази, перетворення частоти), зміни амплітуди (підсилення, модуляція). Стають можливими також більш складні функціональні перетворення (інтегрування, кодування і декодування, отримання функцій згортки, кореляції сигналів тощо).

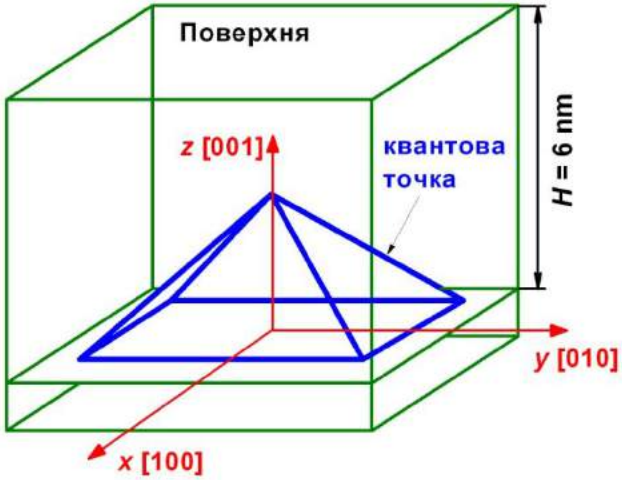
Суттєвий внесок у розвиток цього напрямку був зроблений д.ф.м.н. Островським І. В., к.ф.м.н. Булахом Г. І. та к.ф.м.н. Половиною О. І.

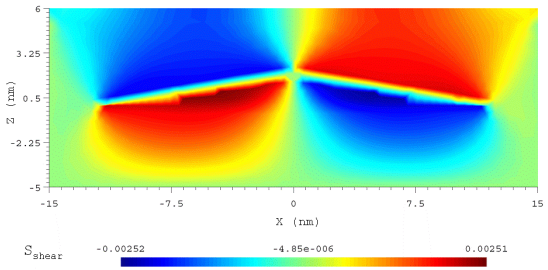



♦ На початку 80-х років на кафедрі було вперше спостережено явище **акусто-(чи соно-) люмінесценції** кристалів, тобто їх світіння завдяки поширенню ультразвуку (д.ф.м.н. Островський І. В. та к.ф.м.н. Лисенко В. М.). Серед декількох можливих механізмів виникнення акустолюмінесценції найбільш цікавим виявився власно-дефектний, обумовлений генерацією ультразвуком заряджених структурних дефектів. Спектри на рисунку ліворуч виявляють ряд смуг випромінювання, пов'язаних із точковими дефектами та їх комплексами. Важливу роль у цьому процесі можуть відігравати дислокації, що здатні рухатись при прикладанні знакозмінних механічних напруг звукових хвиль. У свою чергу, цей факт дозволяє напрямлено впливати за допомогою ультразвуку на оптичні, електричні та механічні параметри кристалів. Дослідження у цьому цікавому напрямку і досі тривають в рамках підрозділу.

♦ Іншим проявом такого роду акусто-оптичних явищ є можливість керування інтенсивністю та спектром фотолюмінесценції квантово-розмірних напівпровідникових структур за допомогою п'єзоелектричних полів, що супроводжують ультразвук у п'єзоелектричних середовищах . Рисунок праворуч демонструє резонансне підсилення випромінювання із більш вузької квантової ями поблизу 1,52 еВ внаслідок резонансного тунелювання електронів у системі двох зв'язаних квантових ям GaAs/AlGaAs товщинами 5,5 та 6,1 нм.





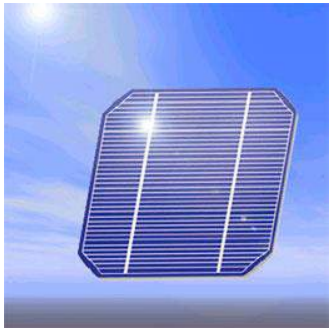

♦ Низькорозмірні напівпровідникові структури, зокрема, **квантові точки та квантові ями** мають широке застосування в багатьох галузях науки і техніки й поступово стають основними елементними складовими сучасної наноелектроніки. Включення однієї речовини (наприклад, Ge квантова точка) деформує матрицю (наприклад, Si), в якій воно вирощене, генеруючи пружні поля навколо включення. Якщо матриця та/або включення є ще й п’єзоелектричним середовищем (наприклад, GaAs/AlGaAs), то в розглядуваній системі виникають також п’єзоелектричні поля.

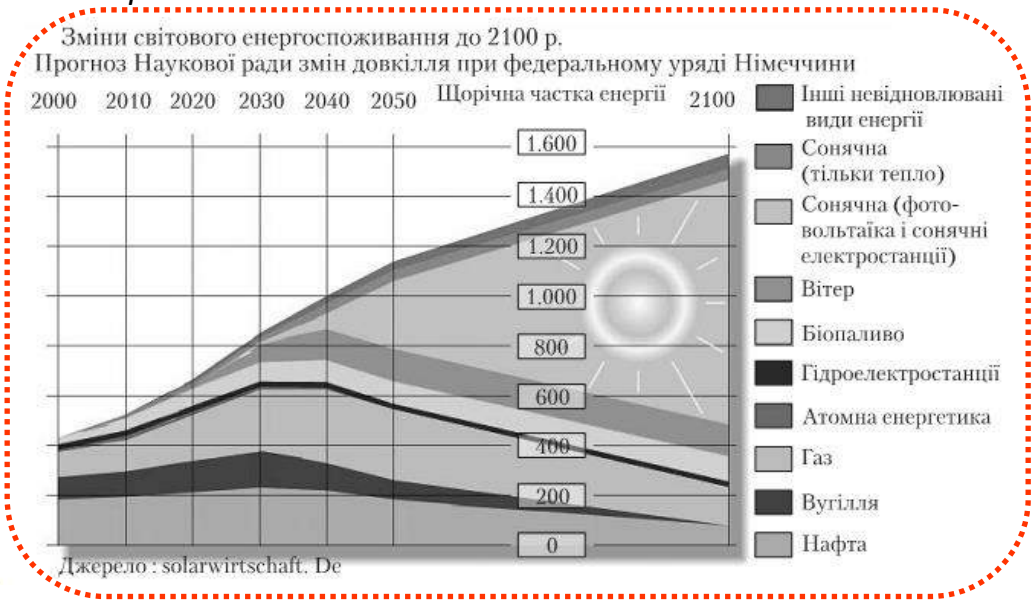
Створювані поля є фактично основним чинником, що визначає функціонування пристроїв розглядуваного типу, суттєво впливаючи, зокрема, на їх оптичні властивості та процеси струмопереносу. Тому розробці методів розрахунку та просторового розподілу пружних та п’єзоелектричних полів приділяється підвищена увага дослідників. Відповідні дослідження ведуться останніми роками І в рамках підрозділу.

Приклад структури та розрахованого розподілу пружних полів навколо квантово-розмірного включення Ge в матриці Si, розраховані методом FEM, подані на рисунку ліворуч.

Процеси переносу заряду у структурах такого роду експериментально вивчаються за допомогою ряду методів, зокрема, нестаціонарної поверхневої фотопровідності та її розподілу по поверхні структури.

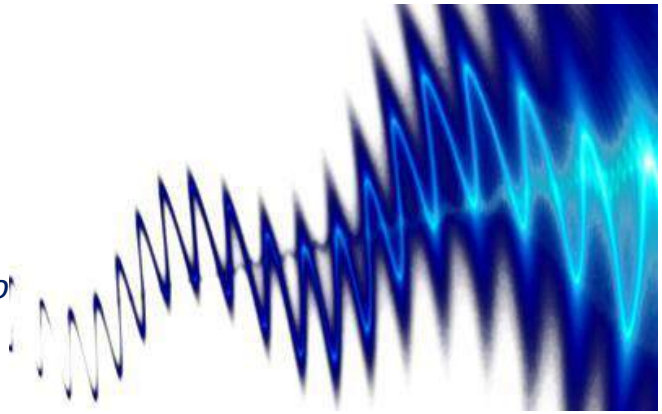
♦ Також досліджуються **напівпровідникові бар'єрні структури**, що є основою сучасної електроніки та обчислювальної техніки. Так, *структури з контактом Шотки широко використовуються при виготовленні польових транзисторів, високочастотних детекторів та відіграють важливу роль при виробництві швидкісних логічних, інтегральних та оптоелектронних елементів. Структури з бар'єрами різноманітної природи також є основою сонячних елементів, а саме такий шлях отримання електричної енергії вважається чи не найперспективнішим.*





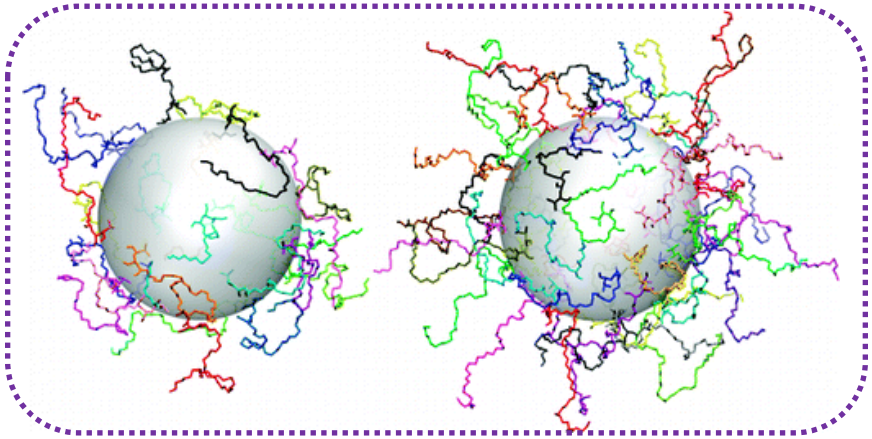

З іншого боку, у багатьох галузях промисловості для неруйнівного оперативного контролю перебігу процесів, властивостей речовин та для впливу на параметри готових виробів використовуються ультразвукові хвилі. *Чи не найширше ультразвук застосовується у металургії, матеріалознавстві, медицині, підводній акустиці, харчовій промисловості.* Проте багато аспектів впливу ультразвуку на тверде тіло у цій галузі практично не розглядаються.

В рамках підрозділу проводяться дослідження **впливу ультразвукових хвиль на напівпровідникові бар'єрні структури**, виготовлені на основі різноманітних матеріалів, зокрема кремнію. *Показано, що акустичні коливання здатні змінювати електричні властивості напівпровідникових пристроїв завдяки взаємодії з їх дефектами структури. Зокрема, при використанні ультразвуку з інтенсивністю до 0.5 Вт/см$^2$ в напівпровідниках спостерігаються оборотні зміни, що відкриває перспективи використання акустичної хвилі як елемента керування динамічними неоднорідностями середовища в елементах функціональної електроніки.*



♦ Одним з важливих напрямків сучасного фізичного матеріалознавства є дослідження полімерних нанокомпозитних матеріалів. Полімери та композиційні матеріали широко використовуються у багатьох технічних галузях як конструкційні або функціональні матеріали.

В рамках підрозділу проводяться дослідження **полімерних нанокомпозитних матеріалів** на основі поліефірних смол.



*В якості наповнювачів використовуються оксиди металів ($TiO_2$, $Al_2O_3$) та неметалів ($SiO_2$, $Si_xTi_{1-x}O_2$). Перераховані наповнювачі мають велику питому площу поверхні (до 400 м$^2$/г) і різний рівень хімічної активності поверхні. Ступінь активності поверхні можна змінювати, осаджуючи на неї або металеві частинки, або молекули органічних сполук з заданими властивостями.*

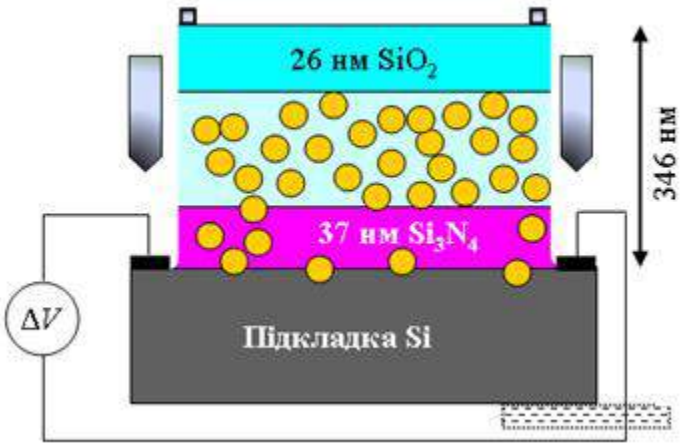
***За рахунок зміни типу наповнювача, хімічної модифікації його поверхні та концентрації у полімерній матриці можна керувати фізичними властивостями таких нанокомпозитних матеріалів.***

***А саме: підвищувати межу міцності, термостійкість, змінювати діелектричну проникність, електро- та теплопровідність тощо.***

Для експериментальних досліджень використовуються методи статичного механічного навантаження, ультразвукової спектроскопії, термодесорбційної мас-спектроскопії, діелектричної спектроскопії. За допомогою цих методів визначаються механічні, акустичні, структурні та електричні властивості цих матеріалів.

# Вагомі наукові результати

*Розміщення сферичних Ge квантових точок на межі поділу $Si/SiO_2/Si_3N_4$ є дуже ефективним засобом поліпшення фотоелектричного і термоелектричного перетворення енергії такою структурою. Показано, що термо-е.р.с. збільшується в кілька разів за рахунок захоплення носіїв в квантових точках.*




**Квантові точки $Ge/SiO_2$, вирощені на поверхні (100) Si p-типу**

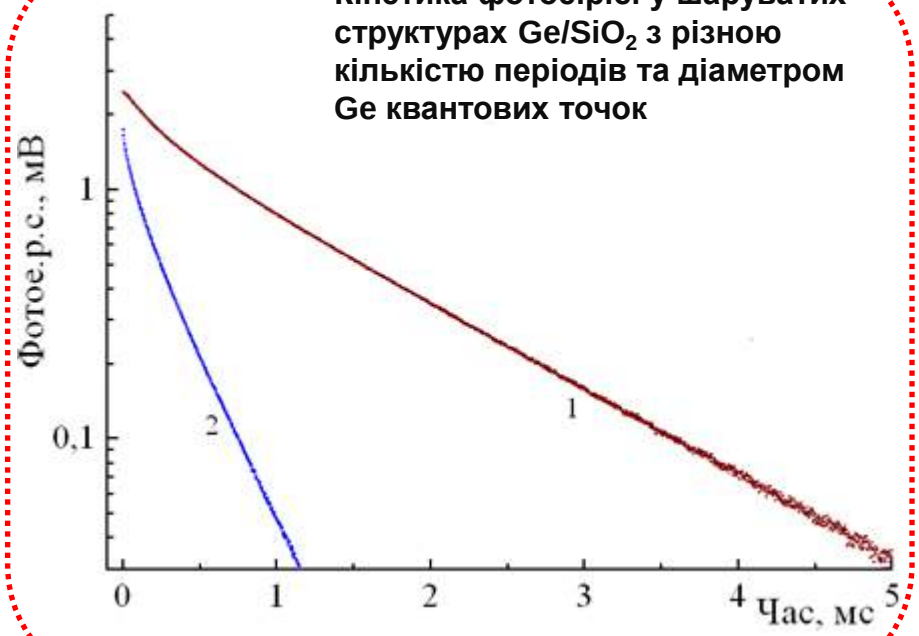
*Зростання довжини рознесення фотозбуджених електронів і дірок в полях механічних напружень біля межі поділу Ge/Si здатне збільшити величину фото-е.р.с. , одночасно збільшуючи і час її загасання.*

## Практичне застосування

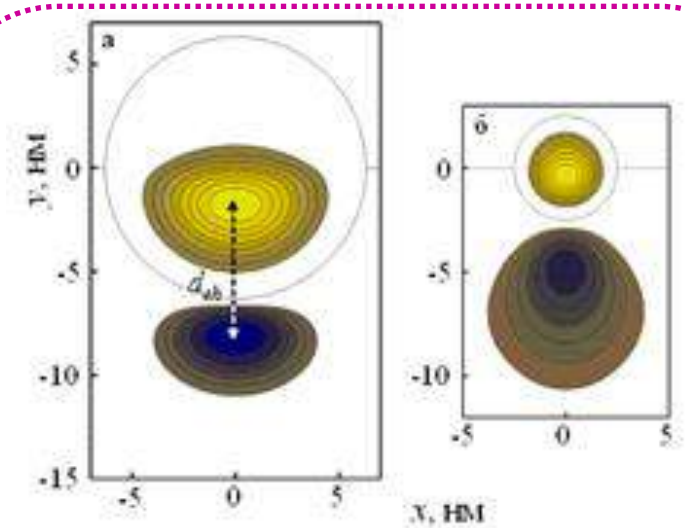
*Нові можливості для вдосконалення термо- і фото-електричних пристроїв на Ge/Si із малими концентраціями центрів рекомбінації на межах поділу.*

*Виявлено вплив ультразвуку на процеси фотоелектричного перетворення та світловипромінюючі властивості кремнієвих структур різного типу, включаючи кремнієві сонячні елементи та структури із нано-кремнієм, радіаційно-опромінений кремній. Показано, що обробка ультразвуком здатна покращити функціональні властивості цих структур. Побудовано фізичні моделі ультразвукового впливу, що пов'язує виявлені ефекти із процесами перегрупування дефектів в полі ультразвуку.*

♦ ***Ефективність фото- і термоелектричних кремнієвих структур можна покращити функціалізацією поверхні частково зануреними в Si квантовими точками Ge. Ефект збільшення фото- і термое.р.с. пояснюється захопленням носіїв заряду у квантових точках і подальшим їх звільненням у високоякісних структурах із слабким рівнем рекомбінації захоплених носіїв заряду.***




**Кінетика фотое.р.с. у шаруватих структурах Ge/$SiO_2$ з різною кількістю періодів та діаметром Ge квантових точок**

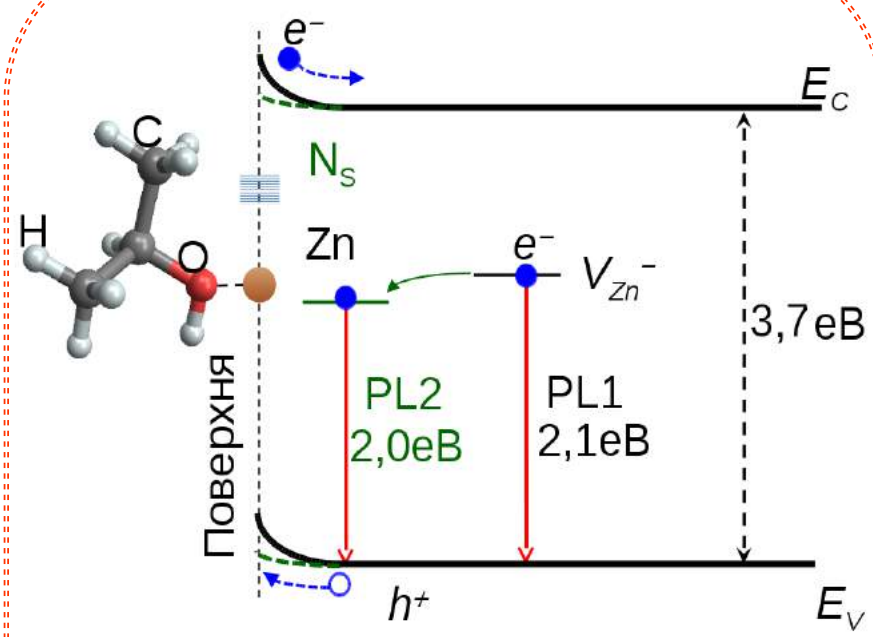



**Залежності просторового розподілу густини електронних (під сферичними точками) та діркових (всередині точок) станів, що демонструють збільшену відстань рознесення електронів і дірок**

## Практичне застосування

Виявлені закономірності слід враховувати при розробці ефективних термоелектричних і фотовольтаїчних пристроїв на основі Ge/Si

♦ ***Виявлено, що при сонофрагментації сульфіду цинку (як сфалериту, так і вюрциту) у полярному розчиннику утворюється нанорозмірні частинки, поверхня яких пасивується в середовищі розчинника. Одночасно відбувається зміна дефектного складу в об'ємі частинок. змінюється вихід люмінесценції, її спектр та кінетика загасання.***



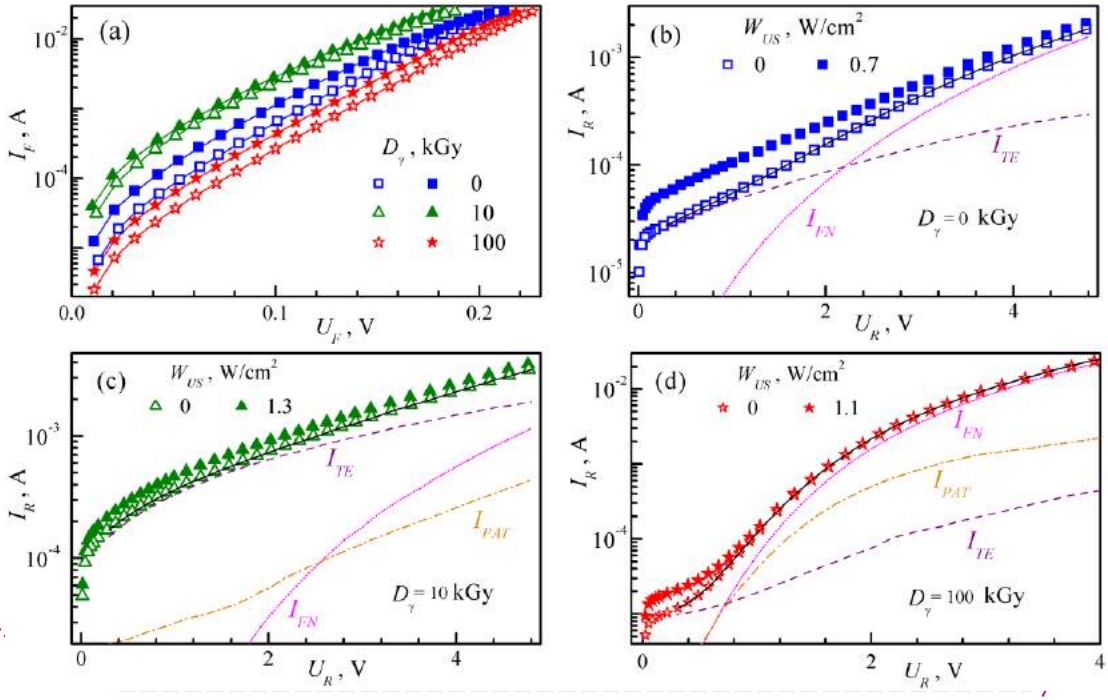

PL1 та PL2 – електронні переходи, що формують спектри фотолюмінесценції до та після сонофрагментації, відповідно;
$e^-$ та $h^+$ – електрон та дірка, відповідно;
$N_S$ – стани на поверхні нанокристаліту, обумовлені пасивацією атомів Zn групами OH

**Зонна схема кристалітів ZnS, що пояснює зміни фотолюмінесценції при сонофрагментації**

## Практичне застосування

Підбір і оптимізація режимів ультразвукової сонофрагментації і типу розчинника відкриває можливість ефективної модифікації в широких межах розмірів наночастинок, виходу їх люмінесценції, її спектру та кінетики загасання, що має важливе значення для практичного використання напівпровідникових структур типу ZnS/ZnO.

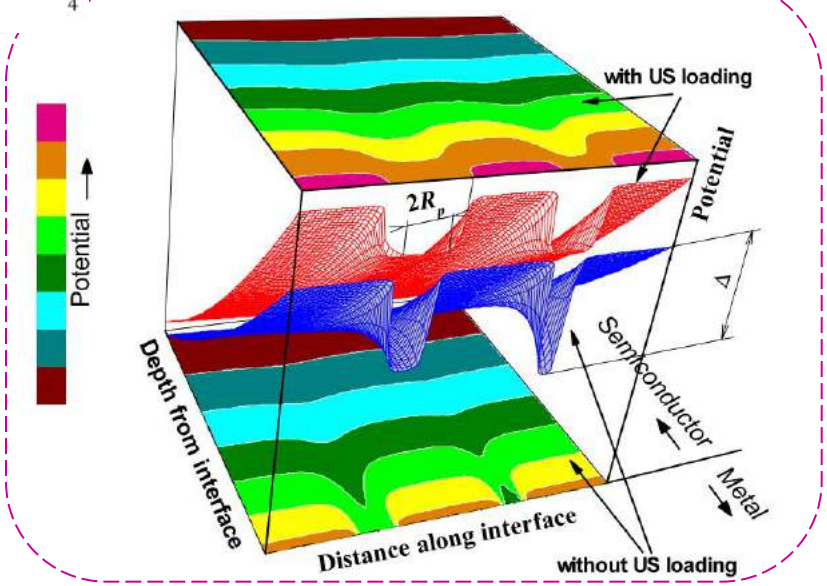
**Вплив ультразвукового навантаження на вольт-амперні характеристики неопромінених та гамма-опромінених структур напівпровідних-метал**



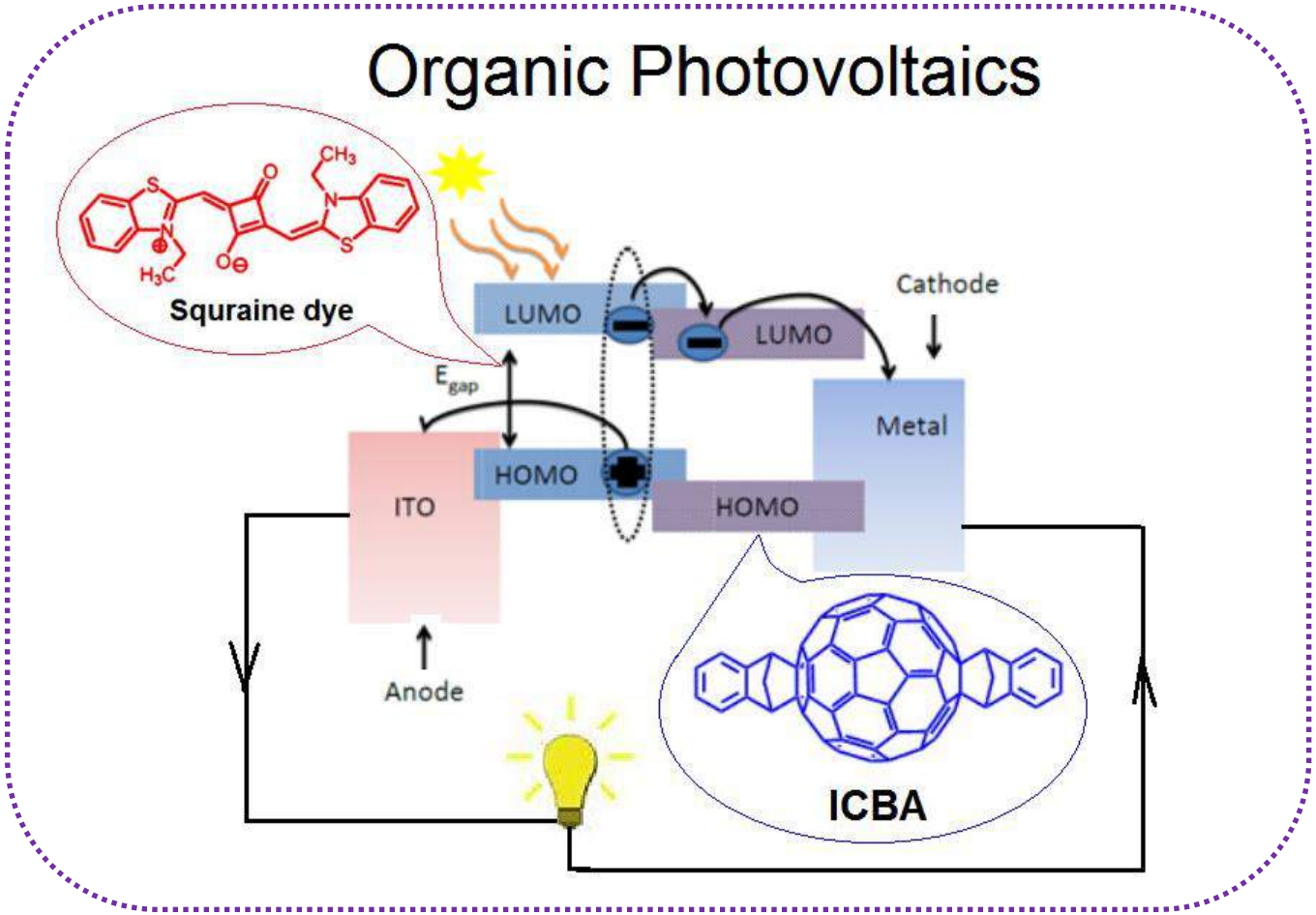

## Практичне застосування

Отримані дані можуть бути використані для потреб мікро- та наноелектроніки, сонячної енергетики.

**Схема зміни дна зони провідності в умовах ультразвукового навантаження (верхня площина) поблизу неоднорідної границі контакту метал-напівпровідник**

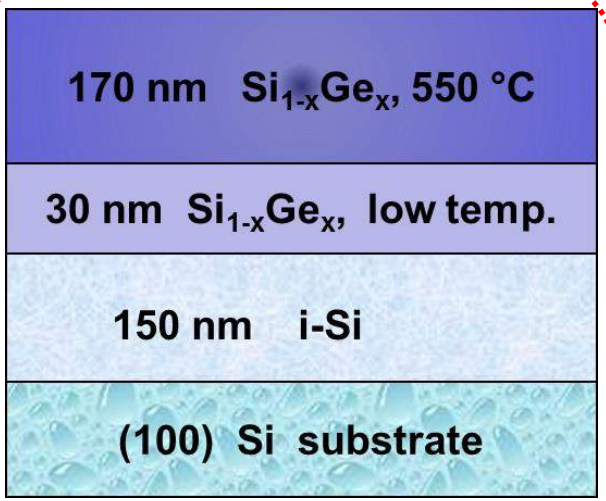



- ***Виявлено акустостимульоване перетворення робочих характеристик кремнієвих діодів Шоттки – зростання фактору неідеальності вольт-амперних характеристик, коефіцієнту випрямлення, зменшення висоти бар'єру Шоттки та величини зворотнього струму.***




♦ ***Вперше експериментально виявлена поляризаційна фото-е.р.с. у плівкових гетероструктурах на основі полі-N-епоксипропілкарбазола та скварилієвого барвника***

♦ *Показано, що у гібридній системі п'єзоелектрик–напівпровідникова гетероструктура GaAs/AlGaAs можливе ефективне керування просторовим розподілом носіїв заряду за допомогою п'єзополів, генерованих у п'єзоелектричній підкладці. Зміна резонансної частоти коливань системи змінює співвідношення між нормальною та тангенціальною до площини гетероструктури компоненти п'єзоелектричного поля.*

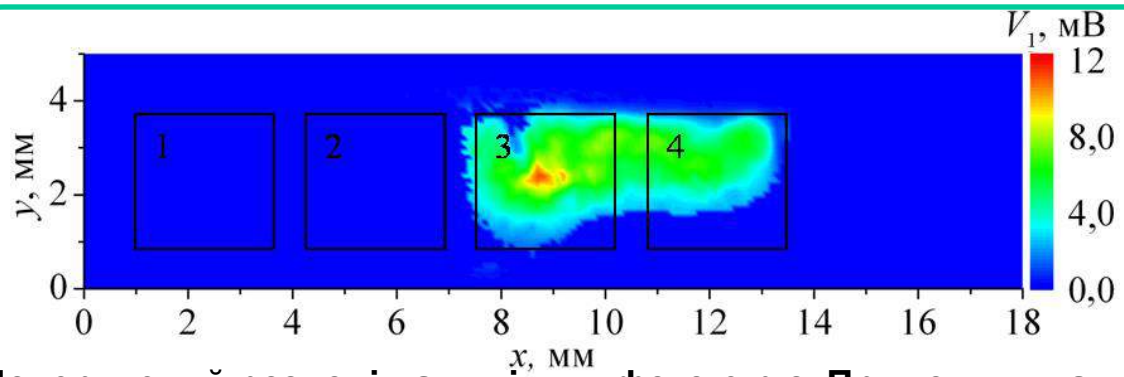



**Гетероструктура $Si_{1-x}Ge_x$ на кремнієвій підкладці**

♦ *Запропоновано модель процесів переносу та розділення фотозбуджених носіїв заряду у оксідованих структурах із наноострівцями $Ge_xSi_{1-x}$, що враховує різну густину поверхневих станів на межах поділу $GeSi/SiO_2$ та $Si/SiO_2$.*

## Практичне застосування

*Керування процесами переносу заряду у гетероструктурі та її світло-випромінюючими і вольтамперними характеристиками*




**Поверхневий розподіл амплітуди фото-е.р.с. Прямокутниками показані області дії лазерного випромінювання з інтесивностями $I_1<I_2<I_3<I_4$**