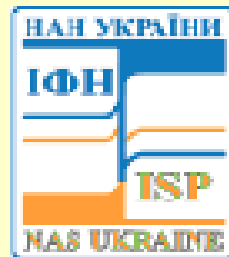


На здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки за 2016 рік

Цикл наукових праць

**«Фотоніка напівпровідникових
та діелектричних наноструктур»**



представлено Інститутом електронної фізики НАН України

Автори:



Інститут електронної фізики НАН України (Ужгород):

Ажнюк Юрій Миколайович, д. ф.-м. н.

Гомоннай Олександр Васильович, д. ф.-м. н.



Інститут фізики напівпровідників

ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (Київ):

Джаган Володимир Миколайович, к. ф.-м. н.

Тарасов Георгій Григорович, професор, д. ф.-м. н.

Юхимчук Володимир Олександрович, д. ф.-м. н.



Інститут фізичної хімії

ім. Л.В. Писаржевського НАН України (Київ):

Кучмій Степан Ярославович, чл.-кор. НАН України, д. х. н.

Стрюк Олександр Леонідович, д. х. н.



Інститут радіофізики і електроніки

ім. О.Я. Усикова НАН України (Харків):

Носич Олександр Йосипович, професор, д. ф.-м. н. Fellow IEEE



Загальна характеристика циклу робіт

Результати представленої роботи викладено у публікаціях:

2 монографії (“Nova Science”, “Академперіодика”), **7** розділів у **7** монографіях (“Springer” (4), “Nova Science” (2), “Наукова думка”).

219 реферованих статей з сумарним імпаکت-фактором **530,89** у **76** реферованих журналах, з яких **75** закордонні журнали (сумарний імпаکت-фактор яких **175,44**) і **1** журнал України (імпаکت-фактор **0,815**), зокрема:

ACS Nano, Nanoscale, Phys. Chem. Chem. Phys., J. Phys. Chem. C (5), IEEE Transact. THz Sci. Technol., IEEE J. Sel. Top. Quant. Electr. (6), RSC Advances, Nanotechnology (11), Appl. Phys. Letters (11), Phys. Rev. B (12), Optics Letters (6), Nanoscale Res. Letters (4), Applied Surface Science (6), J. Photochem. Photobiol. A: Chem. (9), Transactions on Antennas and Propagation (7), J. Phys.: Cond. Matter (5), J. Appl. Phys. (23), Photonics Technology Letters (2) та ін.

Отримано **31** авторських свідоцтв та патенти, в тому числі три міжнародні.

Колективний індекс Гірша (h-індекс) циклу праць згідно з Google Scholar становить **39**, згідно зі SCOPUS **34**.

Загальний індекс цитування публікацій авторів становить за базами даних: Google Scholar Citations – **4318**, SCOPUS – **3465**.

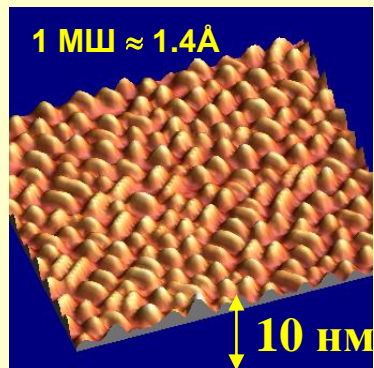
За цією тематикою захищено **5** докторських та **18** кандидатських дисертацій.

Цикл робіт містить такі розділи:

- Механізми формування самоіндукованих наноострівців та їх оптичні і структурні властивості.
- Комплексний аналіз та розробка оптичних методів характеристики псевдоморфних модульовано-легованих гетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs з докритичними ширинами квантових ям для застосування в HEMT-структурах.
- Розвиток фундаментальних засад створення новітніх ефективних фотокаталітичних систем і процесів.
- Синтез та спектральні властивості метал-халькогенідних нанокристалів і шаруватих наноматеріалів та наногетероструктур на їх основі.
- Напівпровідникові квантові точки в діелектричних матрицях.
- Математичне та чисельне дослідження розсіювання та випромінювання електромагнітних хвиль одиничними та оптично-зв'язаними напівпровідниковими та діелектричними мікро- і нанорезонаторами та ґратами з них.

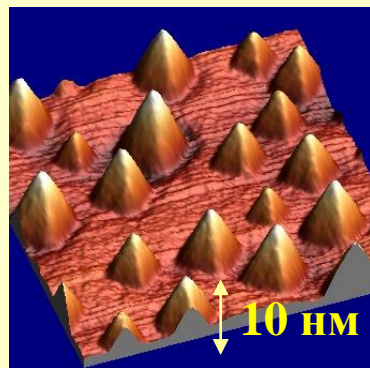
Формування самоіндукованих nanoострівців

$T_p < 550^\circ\text{C}$, $d_{\text{Ge}} < 8 \text{ нм}$



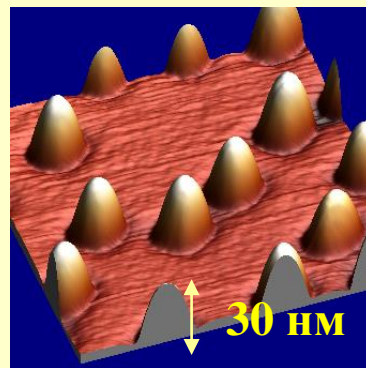
hut-кластери

$T_p > 550^\circ\text{C}$, $d_{\text{Ge}} < 8 \text{ нм}$

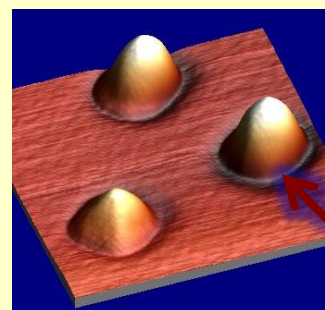


піраміди

$8 \text{ нм} < d_{\text{Ge}} < 13 \text{ нм}$

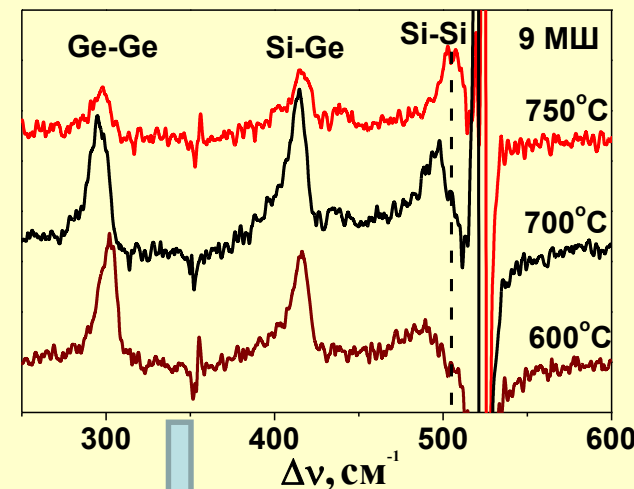


куполи



Канавки навколо острівців свідчать про інтенсивну інтердифузію.

ІНТЕНСИВНІСТЬ, ВІДН. ОД.



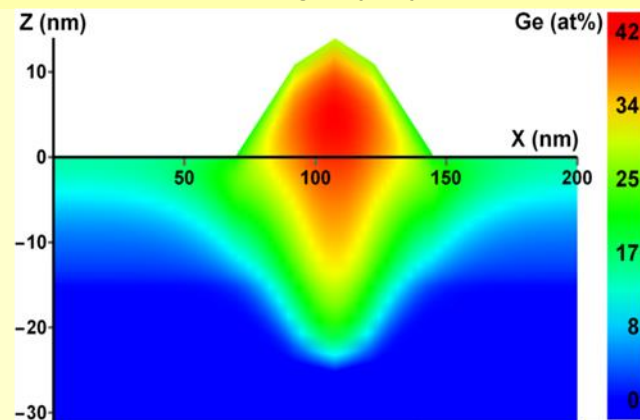
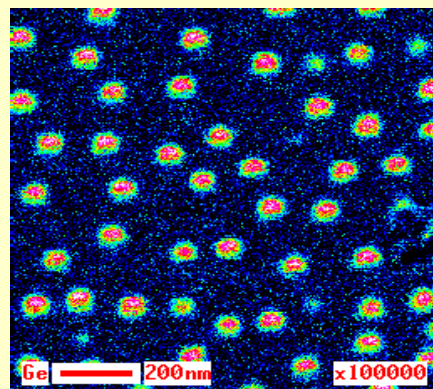
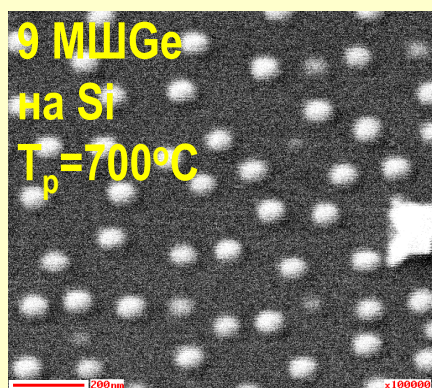
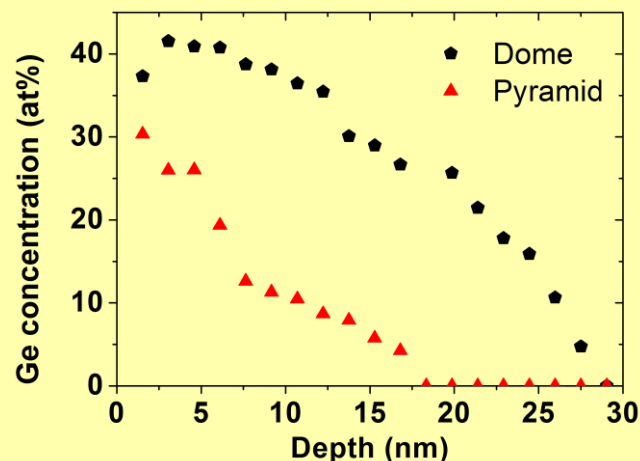
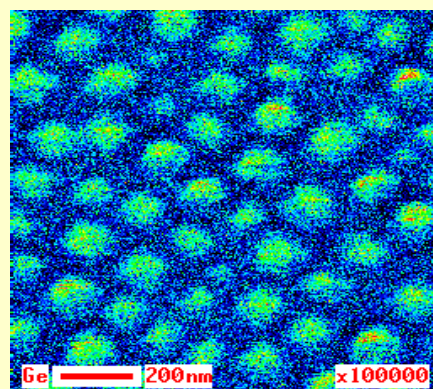
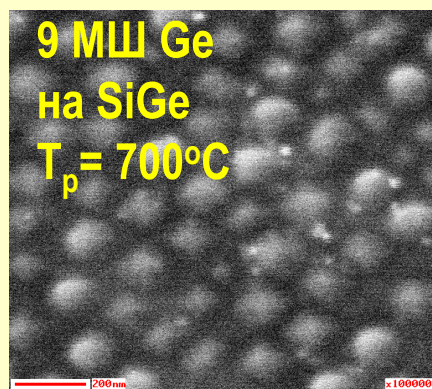
$$\omega_{\text{SiSi}}(x, \varepsilon) = 520,5 - 62x - 815\varepsilon$$

$$\omega_{\text{GeSi}}(x, \varepsilon) = 387 + 81 \cdot (1-x) - 78 \cdot (1-x)^2 - 575\varepsilon$$

$$\omega_{\text{GeGe}}(x, \varepsilon) = 282,5 + 16x - 385\varepsilon$$

Встановлено, що процес самоіндукованого формування nanoострівців на основі Ge та Si тільки у першому наближенні описується механізмом Странського-Крастанова. Реально він ускладнюється аномально інтенсивною поверхневою інтердифузією компонентів, підсиленою дією неоднорідних напружень.

Елементний склад nanoострівців GeSi, сформованих на різних буферних шарах

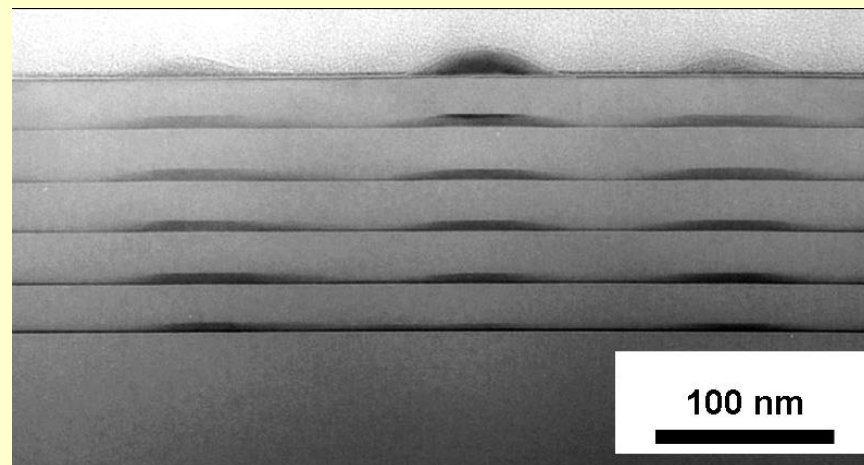
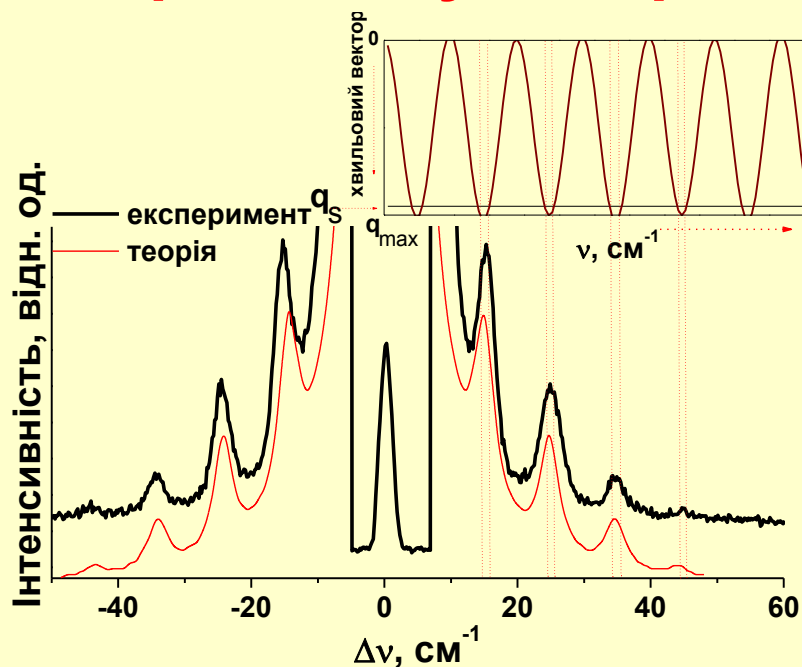


Вторинні електрони

Оже електрони

Методом локальної Оже-спектроскопії встановлено просторовий розподіл елементного складу з високою латеральною локальністю (5–8 нм) для пірамідальних та куполоподібних nanoострівців GeSi. Показано, що в пірамідах частка атомів Si значно більша, ніж у частково відрелаксованих куполоподібних острівцях.

КРС на згортках дисперсійних гілок акустичних фононів у надгратках з нанострівцями SiGe

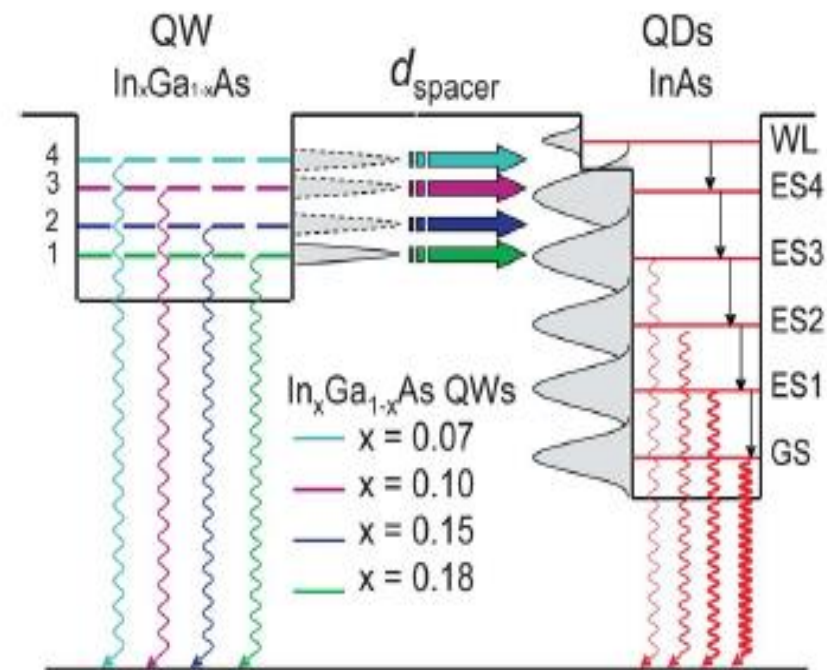
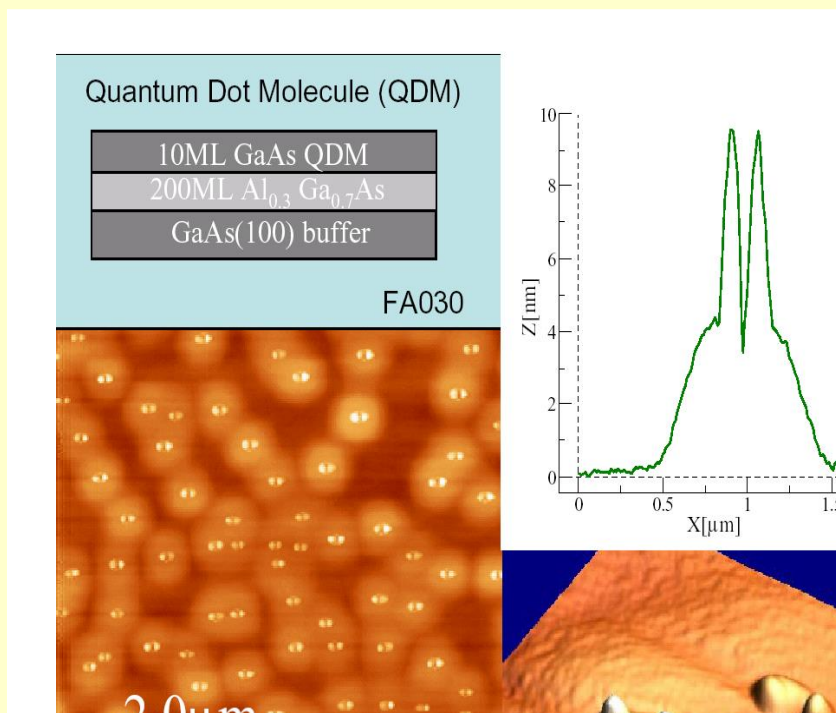


$$I_m \sim \sin^2 \left\{ \frac{d_1}{d} \left[\frac{\omega d_2}{2} \left[\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right] \mp \pi m \right] \right\}^2 \cdot \left| \frac{\frac{P_1}{V_1}}{\frac{\omega d_2}{2} \left[\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right] \mp \frac{2\pi m}{d}} - \frac{\frac{P_2}{V_2}}{\frac{\omega d_1}{2} \left[\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right] \mp \frac{2\pi m}{d}} \right|^2$$

P_1 і P_2 – коеф. фотопружності;
 V_1, V_2 – еф. швидкості звуку;
 d_1, d_2 – товщини I і II шарів,
 $d = d_1 + d_2$ – період НГ;
 ω – частота фонона;
 $\pm m$ – порядок дублету.

Встановлено, що при інтерпретації спектрів КРС на згортках дисперсійних гілок акустичних фононів у надгратках з нанострівцями необхідно враховувати реальну структуру острівців, а не осаджену кількість матеріалу. Показано, що використання КРС дозволяє аналізувати наявність вертикального впорядкування острівців у надгратці та оцінювати її період.

Гібридні нанорозмірні гетероструктури

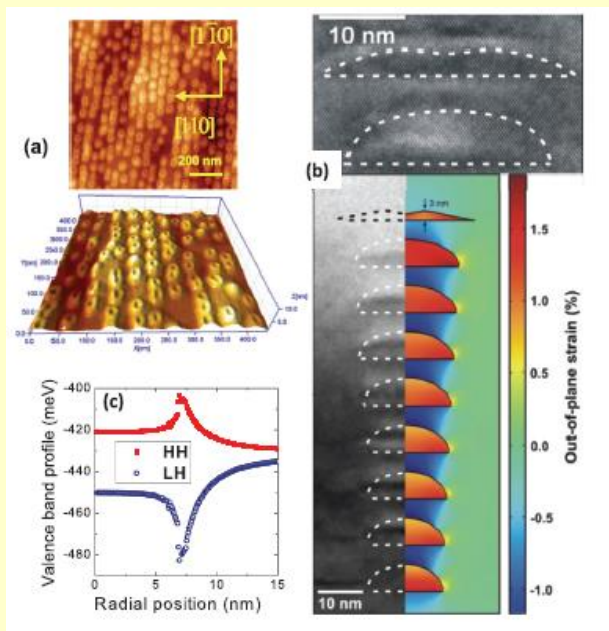


Квантові молекули, утворені крапельним методом

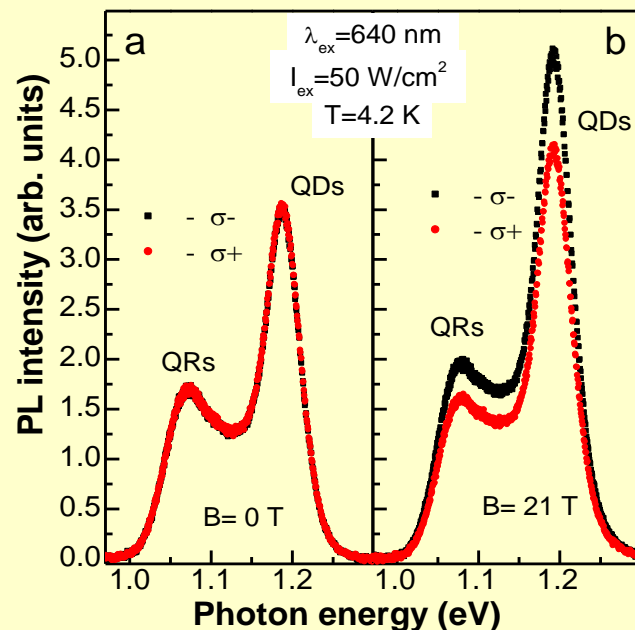
Енергетична схема та процеси релаксації у гібридній структурі InAs/GaAs КТ–In_xGa_{1-x}As/GaAs

Вивчені властивості гібридних гетеронаноструктур, у яких комбінуються квантові точки (КТ) з квантовими ямами та квантовими дротами, тобто КТ взаємодіють з наноструктурами різних розмірностей, що істотно розширює функціональні властивості системи.

Гетеронаноструктури з квантовими кільцями (КК) та квантовими точками (КТ)



(a) АСМ-зображення ланцюгів квантових кілець на надгратці $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$ вертикально корельованих КТ. (b) ПЕМ-зображення КТ та їх модельне представлення. (c) Розраховані профілі деформаційного потенціалу валентної зони



ФЛ спектри зразка з КК-КТ, збуджені випромінюванням з $\lambda_{\text{ex}} = 640 \text{ nm}$ та зареєстровані в двох циркулярних поляризаціях σ^+ та σ^- для геометрії Фарадея: а) $B = 0 \text{ T}$; б) $B = 21 \text{ T}$.

Вперше досліджено оптичні властивості гібридних структур КК-КТ та КТ-КЯ в магнітному полі. Показано, що гібридна структура з квантовими кільцями InAs/GaAs на надгратці латерально-упорядкованих квантових точок $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ є сильно зв'язаною через міжшарове тунелювання, сила якого контролюється товщиною GaAs бар'єру.

Фотохімічно активні напівпровідникові (НП) наноматеріали (колоїдні розчини, мезопористі порошки та плівки, 2D шаруваті та моношарові матеріали)

Люмінесцентні напівпровідникові наноматеріали (колоїдні розчини, полімерні плівки)

НП наночастинки

Наногетеро-
структури НП-
метал

Бінарні НП
наногетеро-
структури

Регулярні
нано-
частинки

Ультрамалі
(~2 нм)
наночастин
ки

ZnO, TiO₂, Fe₂O₃
CdS, ZnS,
Cd_xZn_{1-x}S, PbS,
Cu_xS,
CdSe, PbSe

ZnO/M, TiO₂/M,
M = Au, Ag, Cu,
Ni, Pb, In, Zn
CdS/M, ZnS/M,
M = Ni, Co, Fe,
Zn

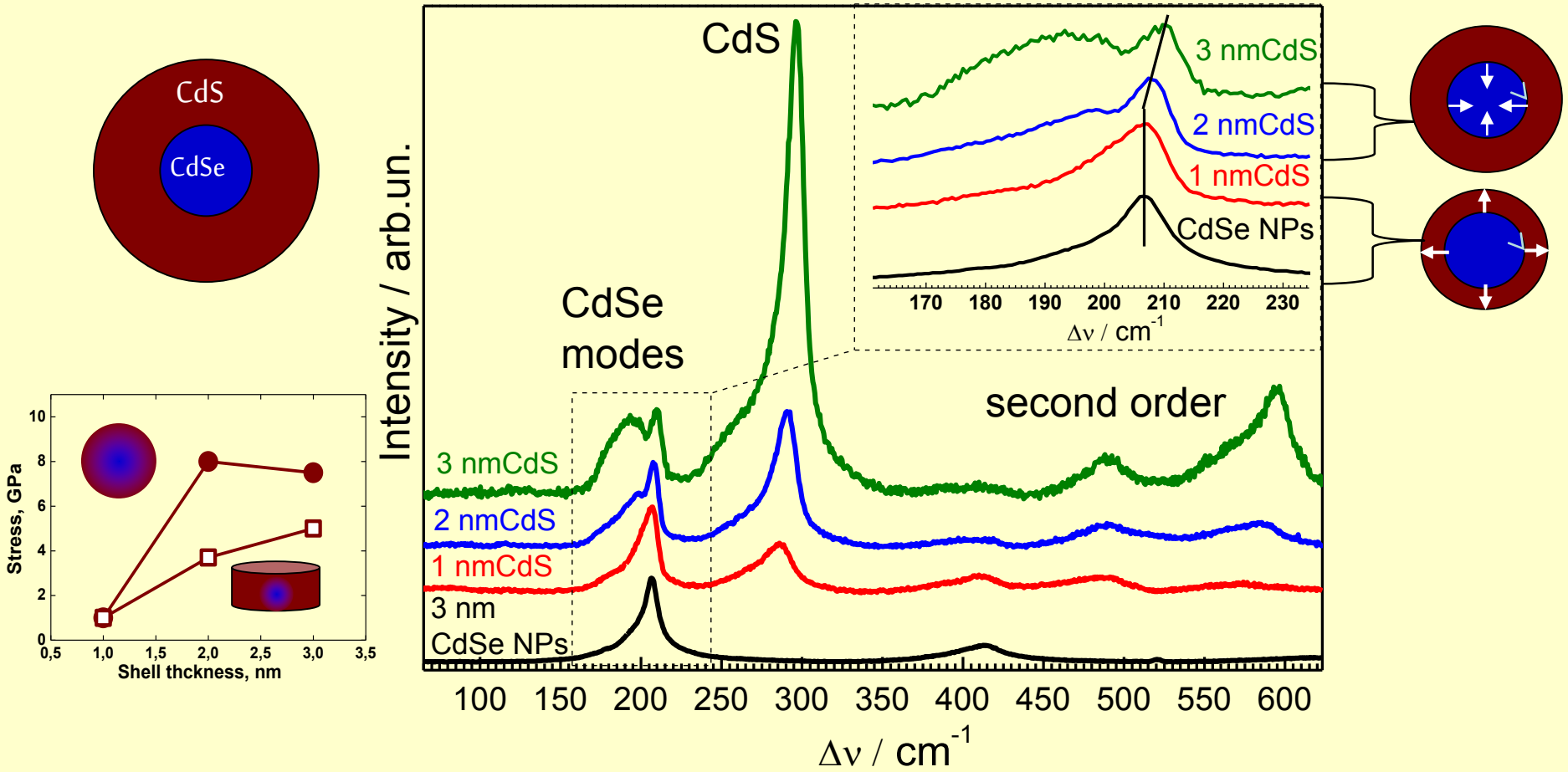
CdSe/ZnS,
CdSe/CdS,
CdS/CdSe,
ZnO/MS, TiO₂/MS,
MS = CdS, Cu_xS,
PbS, Sb₂S₃

CdSe,
ZnO,
ZnO@SiO₂
AgInS₂,
CuInS₂

CdS,
CdSe,
CdTe

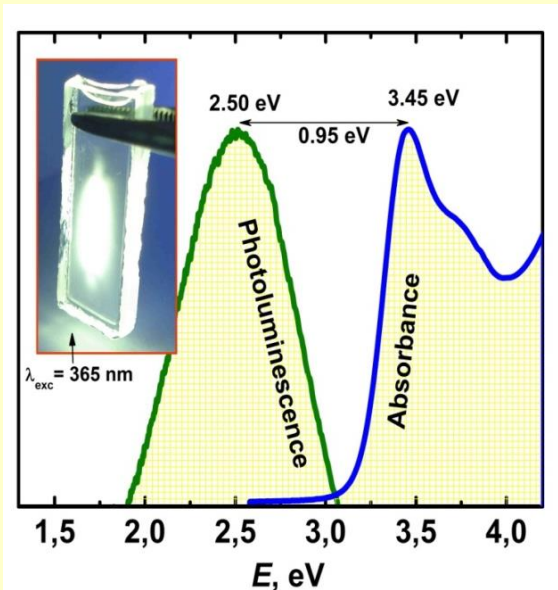
Сформульовано основні положення нового напрямку – напівпровідникового нанофотокаталізу. Запропоновано низку нових практично важливих фотокаталітичних систем: фотополімеризаційноздатні композиції, системи для одержання молекулярного водню, нові фотоелектрохімічні НП сонячні комірки.

Інтердифузія та еволюція механічних напружень у колоїдних гетеронаструктурах типу ядро/оболонка: ефекти товщини та форми оболонки

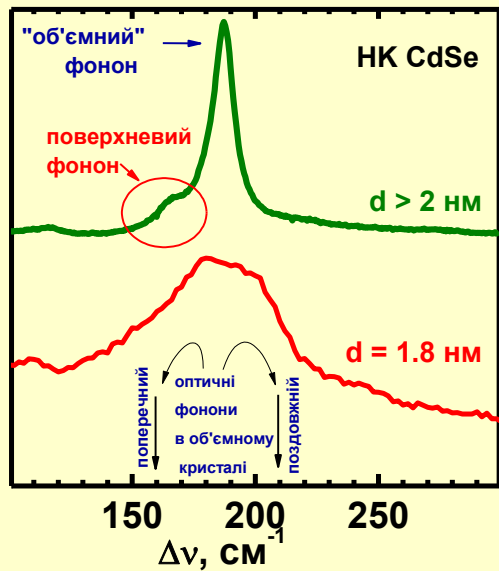


Неузгодженість сталої ґратки ядра та оболонки індукує напруження в ядрі та оболонці, які можна аналізувати завдяки частотному зсуву LO фононів.

Дослідження електронних та коливних спектрів наночастинок A^2B^6 надмалих розмірів



Спектри ФЛ та оптичного поглинання НК CdS з $d \approx 1,8$ нм. Квантовий вихід ФЛ >50%

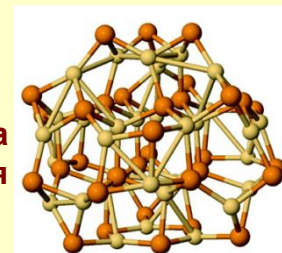


Раманівське розсіювання світла на фонах НК CdS



Фрагмент ідеального кристала

структурна релаксація

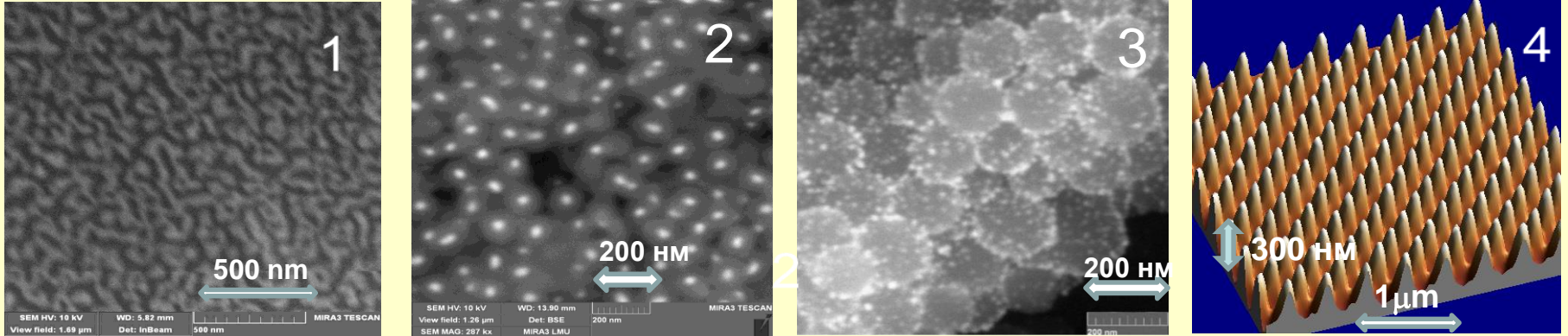


Наночастинка

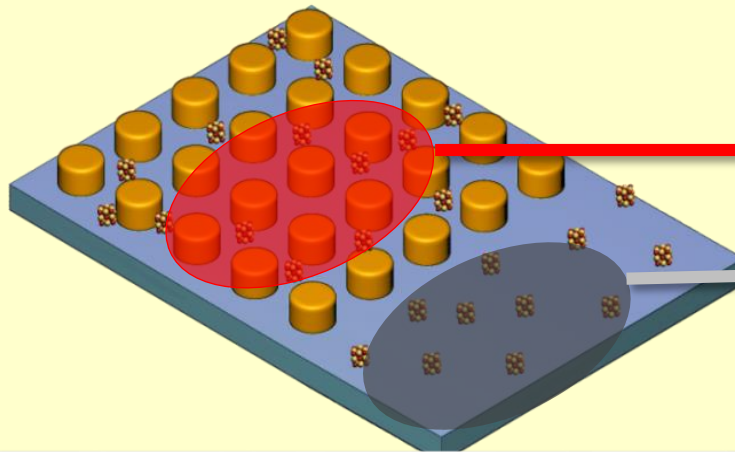
Стрімка зміна форми фононного спектру при переході до розмірів нанокристалів менше 2 нм пояснюється, окрім класичного ефекту фононного просторового обмеження, суттєвою структурною релаксацією, що зумовлена домінуванням кількості поверхневих атомів над кількістю об'ємних.

Розроблено метод надчутливої плазмово підсиленої спектроскопії молекулярних, біологічних і колоїдних напівпровідникових наносистем

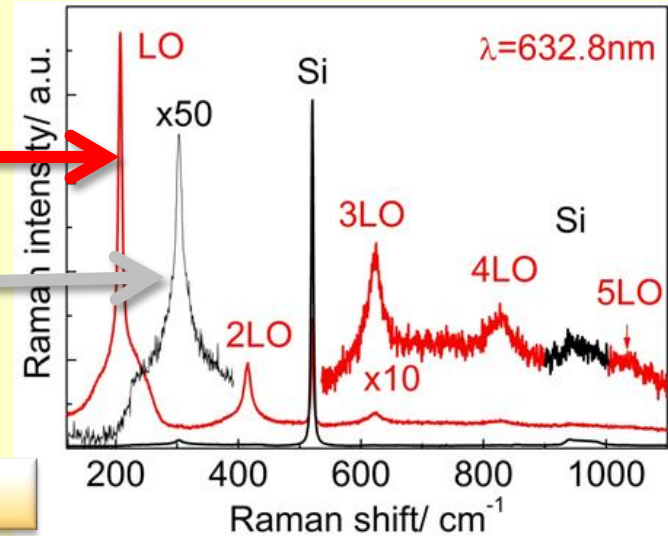
13



Розроблено SERS- підкладки на основі : 1 – неупорядкованих Au наноструктур (НС) ; 2 – НС «ядро Au – оболонка SiO₂»; 3 – НС ядро SiO₂– оболонка - Au»; 4 – латерально впорядковані Au НС.

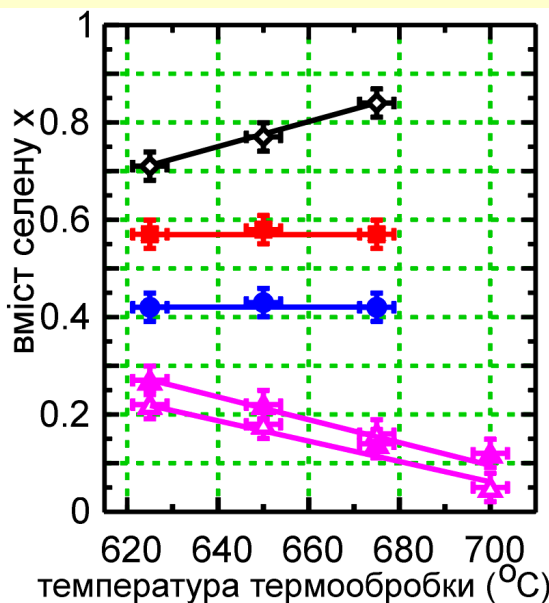
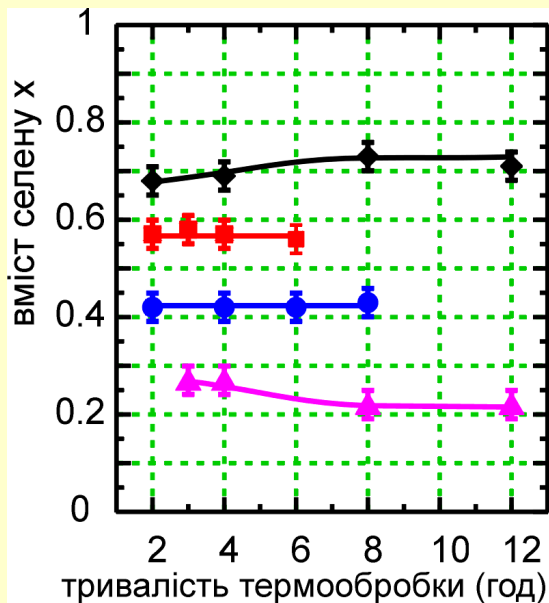


1 моношар наночастинок CdSe (~ 5.5 нм)



Реалізована можливість підсилення сигналу раманівського розсіювання на 5–6 порядків залежно від досліджуваної речовини.

Залежність хімічного складу потрійних нанокристалів $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ від параметрів термообробки



За даними раманівської спектроскопії, характер залежності хімічного складу нанокристалів $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$, що формуються у боросилікатному склі, визначається насамперед початковим вмістом компонентів, що формують напівпровідникову фазу

Нанокристали $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ з переважним вмістом Se

Нанокристали $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ з переважним вмістом S

Нанокристали $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ з майже однаковим вмістом

Тривалість і / або температура термообробки зростає

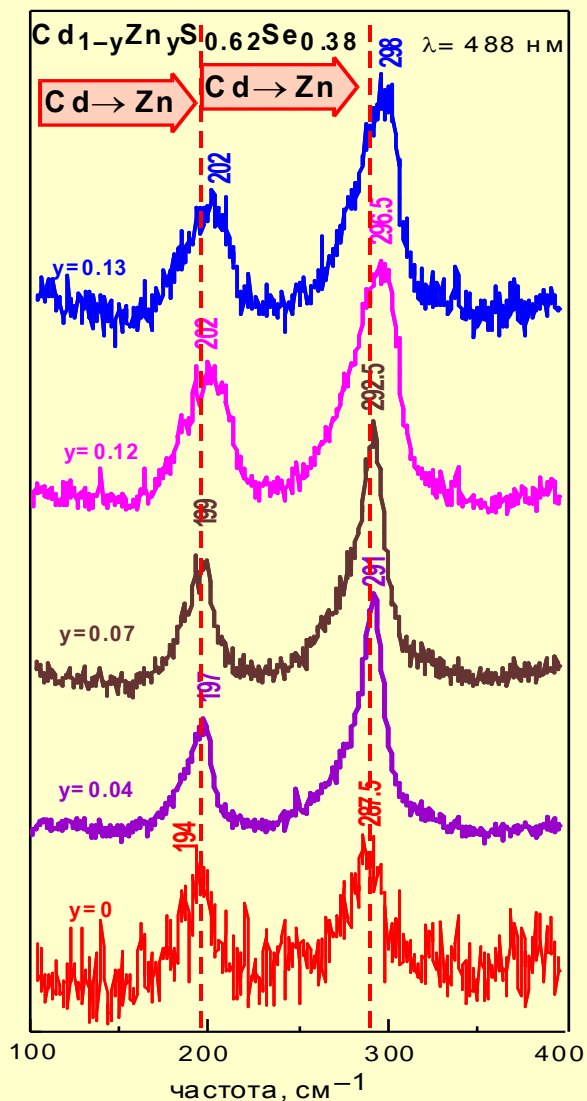
Se витісняє S з нанокристалів

S витісняє Se з нанокристалів

Співвідношення S та Se в нанокристалі не змінюється

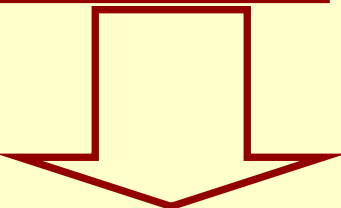
Встановлено, що у нанокристалах $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ міноритарний халькоген, виштовхується до межі розділу, подібно до домішок при зонній очистці напівпровідників.

Ідентифікація чотирьохкомпонентних нанокристалів типу A^2B^6 у скляній матриці на основі раманівської спектроскопії



$CdS_{1-x}Se_x$,
 $ZnS_{1-x}Se_x$
 ДВОМОДОВІ
 СИСТЕМИ

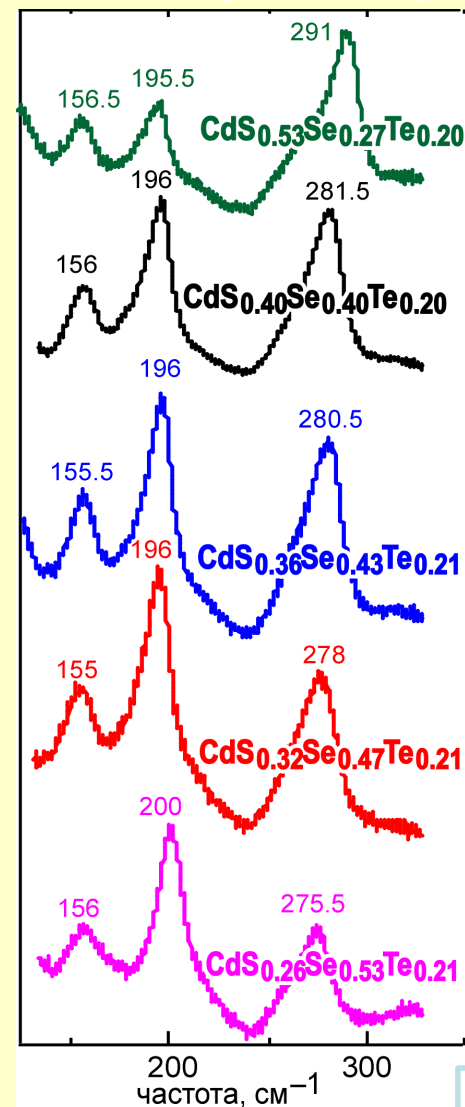
$Cd_{1-y}Zn_yS$,
 $Cd_{1-y}Zn_ySe$
 ОДНОМОДОВІ
 СИСТЕМИ



$Cd_{1-y}Zn_yS_{1-x}Se_x$
 ДВОМОДОВА
 СИСТЕМА



ТРИМОДОВА СИСТЕМА



Вивчено вплив опромінення на властивості нанокристалів $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ у боросилікатному склі

Опромінення (електрони 7–10 MeV або рентгенівське випромінювання)

Утворення радіаційних центрів забарвлення (діркових пасток) у боросилікатному склі

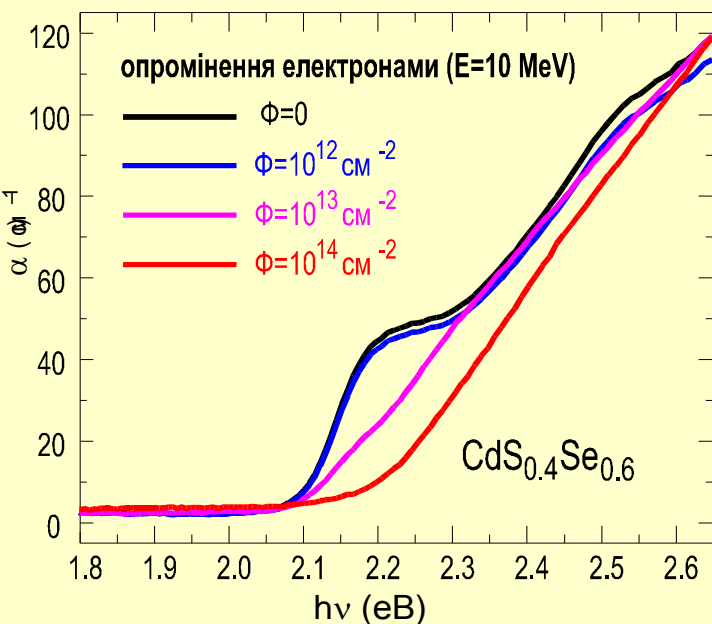
Збудження електронно-діркових пар у нанокристалах $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$

Захоплення дірок пастками, утвореними у боросилікатному склі

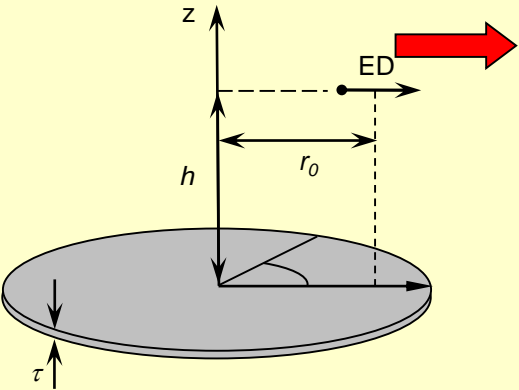
Іонізація нанокристалів $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ внаслідок захоплення ними електронів

Заповнення квантово-розмірних рівнів у нанокристалах $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ і блокування низькоенергетичних оптичних переходів

Синє зміщення і трансформація краю поглинання (подібно до ефекту Бурштейна-Мосса)

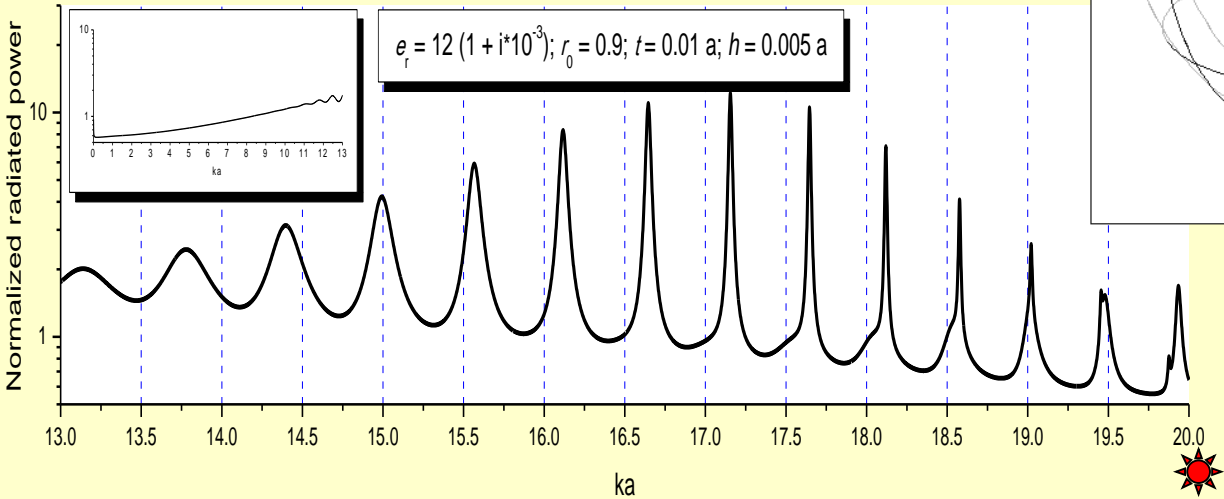
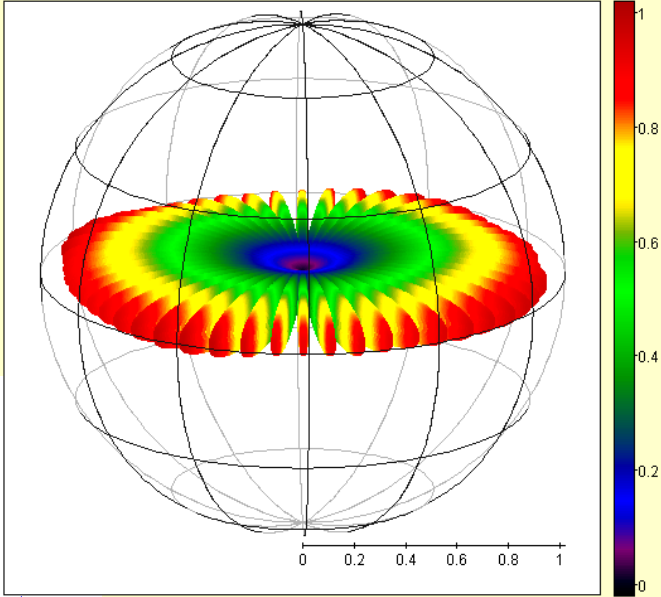


Ефект Парсела (ефект прискорення спонтанного випромінювання на резонансних частотах резонатора) для диполя поблизу діелектричного мікродиску



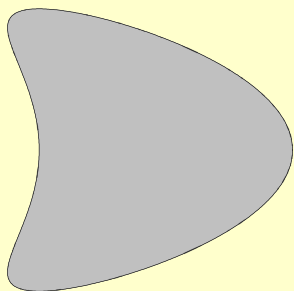
$a = 30 \text{ мкм}$
 $\tau/a = d/a = 0.01$
 $\lambda = 4 \text{ to } 6 \text{ мкм}$

$$J_m(\alpha_{eff}^H ka) \approx 0$$



Резонанси на модах Галереї Шепотіння
 $m = 13-26, n = 1$

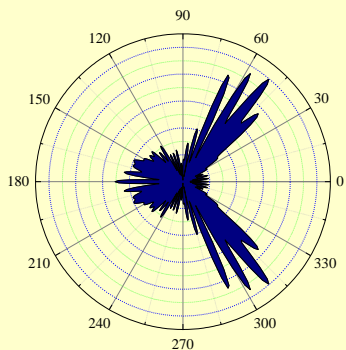
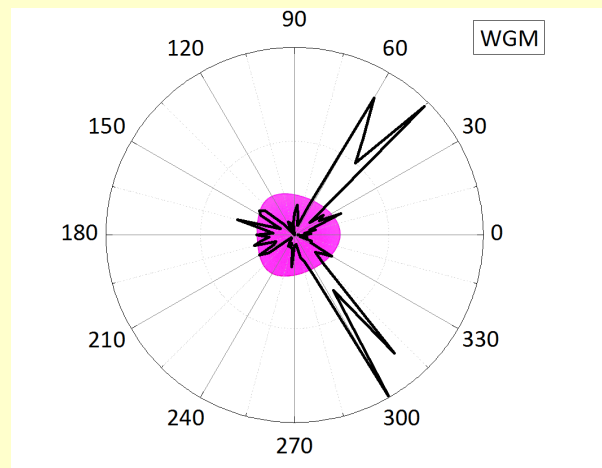
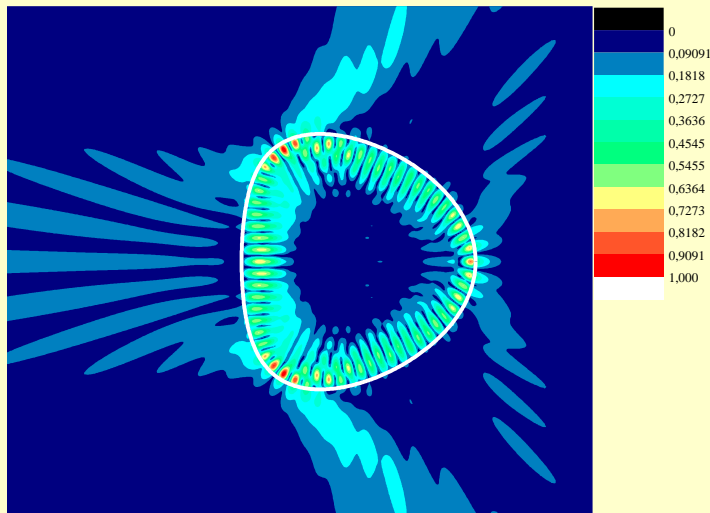
Моди мікролазера у формі кайта



$$x(t) = a(\cos t + \delta \cos 2t - \delta), y(t) = a \sin t$$

Поля лазерних мод у кайті, $\alpha = 2.63$ ($\epsilon = 8$), $N = 50$

Моделювання методом інтегральних рівнянь по контуру



Квазігалерея шепотіння
 $k_a = 23.6$
 $\gamma = 0.001$ - поріг
 $D = 6.78$ - спрямованість

Експеримент, зроблений в ENSC (м. Кашан, Франція) в рамках співробітництва (програма "Дніпро").

Спрямованість випромінювання мод кайта значно вища, ніж мод диску.

- Розроблено методи хімічного синтезу фотохімічно активних напівпровідникових наноматеріалів, зокрема колоїдних розчинів, мезопористих порошків та плівок, 2D шаруватих та моношарових матеріалів, наногетероструктур напівпровідник-метал, бінарних напівпровідникових наногетероструктур, ультрамалих (≤ 2 нм) наночастинок.
- Запропоновано низку нових практично важливих фотокаталітичних систем: фотополімеризаційноздатні композиції, системи для одержання молекулярного водню, нові фотоелектрохімічні напівпровідникові сонячні комірки.
- Люмінесцентні квантові точки на основі сульфїду кадмію перебувають на стадії тестування можливості їх впровадження як компонентів люмінесцентних біомаркерів спільно з ТОВ "Наномедтех".
- Встановлені особливості взаємодії електронних збуджень у гібридних наногетероструктурах, в яких поєднуються переваги нуль-вимірних структур та двовимірних фотонних кристалів, є основою для створення високоефективних інфрачервоних детекторів і тунельно-інжекційних лазерів.
- Для ефективного використання SERS-спектроскопії було розроблено металеві підкладки на основі наноструктурованого золота та срібла, для яких характерні такі параметри як значне підсилення раманівського сигналу від осаджених на них речовин, стабільність з часом, поверхнева однорідність, простота приготування та невисока собівартість.
- Авторами отримано 31 авторських свідоцтв та патентів, у тому числі 3 міжнародні патенти.

Представлена робота є підсумком колективних досягнень авторів, що привели до розвитку сучасного наукового напрямку в Україні – **фотоніки напівпровідникових і діелектричних наноструктур**, яка визначає сукупність взаємопов'язаних фотофізичних і фотохімічних процесів у напівпровідникових і діелектричних наноструктурах. Ця робота є логічним завершенням багаторічних експериментальних і теоретичних досліджень, які становлять значний внесок у розв'язання широкого кола фундаментальних і прикладних проблем цього напрямку науки: синтезу різного типу напівпровідникових та діелектричних наноструктур, вивчення їх характеристик, дослідження зовнішніх впливів на їх параметри, їх взаємодії, аналізу та створення систем збудження, локалізації, підсилення та виведення випромінювання з наноструктур, теоретичного моделювання та характеристики фізичних процесів на різних етапах.