



**ДМИТРУК
МИКОЛА ЛЕОНТІЙОВИЧ**

**Про відділ №39 поляритонної оптоелектроніки ІФН ім. В.Є.
Лашкарьова НАНУ**

Бурхливий розвиток фізики напівпровідників в Україні розпочався в післявоєнні роки ХХ століття, а особливо у знамениті шістдесяті, коли із Інституту фізики АН УРСР виділився Інститут напівпровідників АН УРСР і невдовзі отримав нове приміщення в м. Києві по проспекту Науки, 45, а також завдяки можливості різкого збільшення чисельності співробітників як за рахунок запрошених відомих спеціалістів в цій галузі, так і з молоді, що вступила в аспірантуру або щойно приступила до роботи за призначенням вузів і технікумів. Саме тоді, коли Академію наук України очолив академік Б.Є. Патон, до аспірантури вступив нинішній керівник відділу №39 Дмитрук Микола Леонтійович.

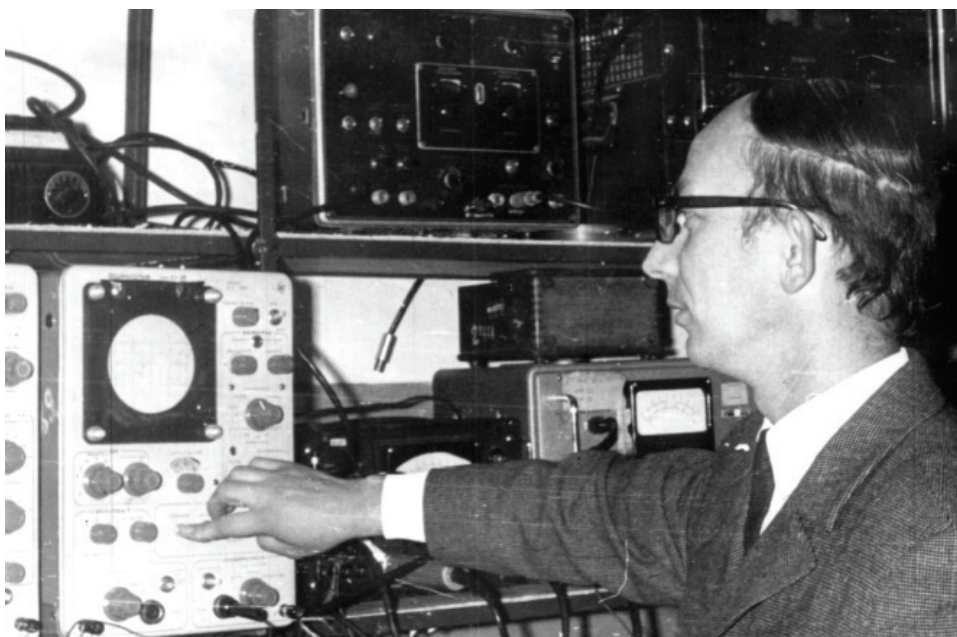
Дослідження в області фізики поверхні напівпровідників розпочались одночасно в двох відділах №9 і №10 під керівництвом професорів В.І. Ляшенка і О.В.Снітка, відповідно. Саме дослідження з фізики поверхні напівпровідників лягли в основу діяльності відділу поляритонної оптоелектроніки, тобто в основному напрямку досліджень Інституту фізики напівпровідників НАНУ (ІФН НАНУ) по взаємодії електромагнітного випромінювання з твердим тілом, зокрема з поверхнею напівпровідника [1, 2].

На початку 60-х років під керівництвом проф. В.І.Ляшенка розпочались дослідження електронних явищ на поверхні полярних напівпровідникових сполук, зокрема нині вельма популярних бінарних сполук типу A^3B^5 (і GaAs

в першу чергу), що за своєю структурою, хімічними зв'язками та об'ємними властивостями сильно відрізняються від моноатомних ковалентних Ge і Si, для котрих основи фізики поверхні на той час, в основному, були сформовані. В групі по дослідженню поверхневих явищ в кристалах GaAs (М.Дмитрук, Т.Ситенко, О.Карханіна, О.Терещенко) проведені піонерські дослідження ефекту поля (поверхневої провідності), контактної різниці потенціалів (роботи виходу), поверхневої ємності, впливу поверхні на фотоелектричні явища [3-8]. Попередній підсумок цих робіт був підведений в кандидатській дисертації М.Л. Дмитрука «Исследование электронных процессов на поверхности арсенида галлия», де були отримані зокрема такі важливі результати:

- вперше була розвинута фізична теорія поверхні, яка враховувала неповне і нерівноважне заповнення глибоких рівнів в області просторового заряду (ОПЗ), зокрема були введені так звані демаркаційні рівні в ОПЗ [6], що розділяють глибокі рівні на такі, що заповнюються згідно положення квазі-рівнів Фермі або згідно статистиці рекомбінації;
- експериментально досліджено поверхневий потенціал (вигин енергетичних зон) в залежності від стану реальної поверхні, спектр поверхневих електронних станів (ПЕС), встановлено закріплення рівня Фермі (піннінг) на реальній поверхні, тобто вкритій тонким шаром природних окислів елементів сполуки [4];
- вперше на полярних кристалах була виявлена двовимірна (2D) провідність атомарно-чистої поверхні, отриманої сколюванням полярного кристала в рідкому азоті, що стимулювало наступні дослідження приповерхневих квантово-розмірних ефектів [5];
- встановлено зв'язок так званих фотомеханічного і електро-механічного ефектів (зміна мікротвердості в світловому і електричному полях) з такими електронними характеристиками поверхні, як надлишки Гіббса вільних носіїв заряду, поверхневий вигин зон і ін. (на основі концепції поверхневої енергії/натягу).

Новим етапом досліджень з фізики поверхні було вивчення поряд з електронними явищами на поверхні також і оптичних (поляритонних), тобто фононних, екситонних, плазмонних ефектів в полярних напівпровідниках, узагальнених в докторській дисертації М.Л. Дмитрука «Электронные и поляритонные явления на поверхности и границах раздела полярных полупроводников» (1982 р.), яка була присвячена комплексному дослідженню взаємодії електромагнітного випромінювання з поверхнею полярних напівпровідників. На відміну від моноатомних (неполярних) Ge і Si



М.Л. Дмитрук під час електрофізичних досліджень поверхні GaAs (1974 р.).



Група співробітників Інституту напівпровідників АН УРСР в Херсонесі (Севастополь) в перерві засідань конференції (1980 р.).

в полярних сполуках (зокрема типу A^3B^5), що характеризуються змішаним ковалентно-йонним хімічним зв'язком, має місце так звана поляритонна взаємодія електромагнітного випромінювання з твердим тілом, коли поширення світлової хвилі вздовж поверхні супроводжується хвилею поляризації, тобто маємо поверхневий плазмонний, фононний чи плазмон-фононний поляритон в сильнолегованому напівпровіднику [1, 2, 12, 13, 15].

Крім того, ще в 70-і роки проведені піонерські дослідження поверхневих фононів в мікрокристалах полярних сполук A^3B^5 , $A^2B_2^5$ (Т. Ніколаєва) та згодом була встановлена кореляція між загасанням цих коливань і мікротвердістю кристалів.

Серед принципових результатів досліджень поляритонних явищ на поверхні полярних напівпровідників відмітимо такі:

- вперше досліджені поверхневі поляритони в анізотропних (двовісних) кристалах, твердих розчинах, на розупорядкованих поверхнях і в гетероструктурах (розщеплення фонон-поляритонного спектра шорсткою поверхнею або дифракційною ґраткою);
- виявлене поверхнево-посилене поглинання світла фрактальною поверхнею, зумовлене Андерсонівською локалізацією, проведено розрахунок області локалізації [13] (Є.Підлісний, Т.Барлас);
- вивчено спектр поверхневих і інтерфейсних плазмон-фононних поляритонів в напружених напівпровідникових надґратках (В.Романюк); згодом ця робота була відзначена Премією Президентів Академій наук України, Молдови і Білорусі [15];
- розраховані дисперсія і загасання змішаних 2D-S (двовимірних і поверхневих) плазмонних поляритонів, зокрема передбачені нові екстраординарні слабкозагасаючі моди;
- розроблено нові методи розв'язування обернених еліпсометричної і спектроскопічної задач (застосовані до надґраток, іонно-імплантованих і δ -легованих шарів), в тім числі метод поляритонної еліпсометрії, метод регуляризації Тихонова для еліпсометрії [14].

Таким чином, унікальною особливістю експериментальних і теоретичних робіт відділу стало поєднання електрофізичних методів дослідження електронних явищ на поверхні напівпровідників і оптики поверхні твердих тіл (поляритонні явища, наноплазмоніка). Це дозволило закласти новий напрямок в фізиці поверхні: електронно-поляритонні явища в твердотільних структурах і в прикладній фізиці – поляритонна оптоелектроніка. В 1996 р. в ІФН НАНУ на базі лабораторії «фізичних основ оптоелектронного матеріалознавства», очолюваної М.Л.Дмитруком, було створено Відділ

Поляритонної оптоелектроніки.

Слід підкреслити, що низка ідей, започаткованих у відділах 9 і 10 ще в 60-і роки минулого століття, виявилась вельми продуктивною і продовжує розвиватись і нині. Серед них відмітимо наступне:

- 1) явище прилипання носіїв струму на поверхневих електронних станах (ПЕС), що зумовлює нерівноважне збіднення ПЕС полярних напівпровідників та ефект фотоелектричної пам'яті або спрямлення приповерхневого вигину зон світлом, лягли в основу принципу дії приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) та нового способу запису оптичної інформації, відповідно; на основі явища фотоелектричної пам'яті розроблено нову методику діагностики ПЕС і глибоких рівнів в ОПЗ;
- 2) так зване поверхнєве легування напівпровідників металами, в основі котрого лежить осадження йонів металів з відповідним електрохімічним потенціалом у вигляді острівців (названих пізніше кластерами або наночастинками) покладено в основу нової галузі фотоніки і оптоелектроніки – плазмоніки; ця наука досліджує опосередковану взаємодію світла з провідними твердими тілами, коли спочатку збуджуються поверхнєві (локальні) коливання – плазмони, або хвилі – поверхнєві плазмонні поляритони, що лягли в основу поляризаційно-чутливих фотодетекторів, надчутливих оптохімічних сенсорів [9, 16, 18, 19];
- 3) вплив поверхні на нерівноважні (фотоелектричні) явища (прилипання носіїв струму, поверхнєва рекомбінація) залишається вельми актуальним як при розробці нових фотодетекторів (особливо поляритонного типу), так і сонячних елементів (тонкоплівкові, плазмонні, з текстурованою активною межею поділу), на котрій реалізується поляритонна взаємодія світла з напівпровідником;
- 4) розроблення способів хімічної і радіаційної обробки поверхні полярних напівпровідників призвело до отримання як атомно-гладких поверхонь, так і мікрорельєфних, а також пористих приповерхневих шарів [21, 22]. Останні широко використовуються в люмінесцентних приладах, сенсорах, як «м'які» підкладки для епітаксійного росту плівок неузгоджених гетероструктур та ін. При дослідженні радіаційної деградації напівпровідникових матеріалів і приладів на їх основі був виявлений ефект малих доз [11], що полягає в покращенні параметрів поверхні та меж поділу внаслідок радіаційно-стимульованого поверхнєво-посиленого гетерування

домішок і дефектів та релаксації механічних напружень.

- 5) На основі нових модуляційних електро-оптичних явищ плазмового, фононного (екситонного) електровідбивання світла [7] були розроблені нові методи діагностики матеріалів, зокрема метод поляритонної еліпсометрії. А методи вимірювання спектрів збудження фото-, катодо-люмінесценції дозволили визначити приповерхневі характеристики екситонів (дифузійна довжина, екситон-фононний зв'язок та ін.) [10].

Останнім часом у відділі розвивається новий напрямок в оптиці дисипативних середовищ, коли має місце нерезонансне збудження поверхневих плазмонних поляритонів (О.В.Коровін):

- на основі векторних рівнянь Максвелла розраховано вектор Пойнтінга, що дозволило узагальнити класичний закон заломлення Снелліуса [17]; зокрема передбачено відхилення площини заломлення від площини падіння в сильно дисипативних середовищах, зумовлене нерезонансним збудженням поверхневих плазмонних поляритонів [17, 23].
- передбачено аномальне пропускання світла нанорельєфними провідними плівками з різною кореляцією рельєфів обох поверхонь [20], а також вияснена фізична природа поляритонних мод, відповідальних за плазмонне підсилення пропускання світла металевими плівками з антикорельюваним періодичним рельєфом (моди Фано, Ценнека, Брюстера) [23, 26];

На основі фундаментальних експериментальних і теоретичних досліджень з фізики поверхні і оптоелектроніки у відділі здійснено ряд прикладних розробок (О.Борковська О.Маєва, С.Мамикін), а саме:

- запропоновані нові неруйнівні методи контролю профілю легування напівпровідникових плівок;
- розроблена технологія текстурування поверхні і продемонстроване використання її для створення мікро(нано)рельєфної активної межі поділу в контактах метал-напівпровідник, *p-n* і гетеропереходах високоефективних фотоприймачів і сонячних елементів [27, 28];
- створений оптохімічний поляритонний сенсор на основі багатошарових дифракційних ґраток на контакті метал-напівпровідник [25];
- створена технологія формування упорядкованих 2D ансамблів металевих нанокластерів і 1D нанодротів на поверхні напівпровідників для наноплазмонних застосувань в фотоніці, сенсоріці та ін. [19];
- виготовлені макети сонячних елементів на основі гетеропереходів

GaAs-GaAlAs з текстурованим активним інтерфейсом [24].

Таким чином, унікальний в системі Академії наук України відділ поляри-тонної оптоелектроніки, започаткований на основі евристичних ідей непрям-ої (поляри-тонної) взаємодії електромагнітного випромінювання з твердим тілом ще з 70-х років минулого століття, отримав новий потужний імпульс для розвитку з початком інтенсивного розвитку нанотехнології і нанофізи-ки [29, 30]. Саме в нанорозмірних твердотільних структурах можливе пря-ме збудження поверхневих (локальних) квазічастинок (фононів, плазмонів, екситонів, магнонів), що володіють особливими фізичними характеристика-ми і знаходять якнайширше практичне використання в мікро- і оптоелек-троніці, нанофотоніці, сенсоріці, фотовольтаїчному перетворенні сонячної енергії, медицині і захисті довкілля.

1. Н.Л.Дмитрук, В.Г.Литовченко, В.Л.Стрижевский. Поверхностные по-ляритоны в полупроводниках и диэлектриках. К., Наукова Думка, 1989 р., 374 с.
2. Венгер Є.Ф., Гончаренко А.В., М.Л.Дмитрук. Оптика малих частинок і дисперсних середовищ. К., Наукова Думка, 1999 р., 348 с.
3. Н.Л.Дмитрук. Структура, электронные состояния и электрофизиче-ские свойства поверхности арсенида галлия. Изв. вузов, физика, №1, 1980./
4. Н.Л.Дмитрук, В.И.Ляшенко. К определению поверхностного потен-циала арсенида галлия. ФТП, т.8, №2, 1966, с.578.
5. Н.Л.Дмитрук, В.И.Ляшенко. О проводимости сколотых (110) поверх-ностей GaAs. ФТП, т.1, №3, 1967, с.455.
6. N.L.Dmitruk. Non-equilibrium surface space charge in semiconductors for arbitrary ionization degree of impurities. Phys. Stat. Sol. (b), v.32, No.2, 1969, p.881-890.
7. N.L.Dmitruk, V.A.Tyagai. Theory of plasma electroreflectance of light from semiconductors. Phys. Stat. Sol. (b), v.43, No.2, 1971, p.557-562.
8. Н.Л.Дмитрук, А.К.Терещенко, О.И.Маева, В.И.Ляшенко. Влияние глу-боких уровней на ёмкость пространственного заряда и эффект поля в арсениде галлия. ФТП, т.7, №4, 1973, с.671.
9. Н.Л.Дмитрук, О.И.Маева, В.И.Полудин. Влияние металлической островковой структуры на эффект фотоэлектрической памяти. ФТП, т.10, №10, 1976, с.1925.
10. Н.Л.Дмитрук, В.Г.Литовченко, Г.Х.Талат, В.М.Леонов. Экситонная ка-

- тодолюминесценция полупроводников с учетом приповерхностного потенциального барьера. ФТТ, т.20, №2, 1978, с.518.
11. М.Л.Дмитрук, Р.В.Конакова. Поверхнево-посилене радіаційне упорядкування в напівпровідникових гетероструктурах. Вісник АН УРСР, №6, К. 1989.
 12. N.L.Dmitruk, N.A.Fidrya, O.V.Snitko, E.F.Venger. Surface relief and dissipation influence on plasmon-phonon polariton dispersion of polar semiconductors. Phys. Stat. Sol. (b), v.157, 1990, p.601-607.
 13. N.L.Dmitruk, T.R.Barlas, E.V.Pidlisnyi. Possibility of Anderson localization of phonon- polaritons in disordered composite layer on microrelief GaAs surface. Укр. Фіз. Журн., т.40, №7, 1995, стор.707-710.
 14. Н.Л.Дмитрук, Л.А.Забашта, О.И.Забашта, В.Е.Сторишко. Устойчивый метод решения обратной задачи многоугольной эллипсометрии. Поверхность, №12, 1996, с.73-78.
 15. Е.Ф.Венгер, А.В.Гончаренко, Н.Л.Дмитрук, В.Р.Романюк. Исследование фонон-поляритонных возбуждений в полупроводниковых сверхрешетках GaAs/GaPAs. ЖПС, т.66, вып.4, 1999, с. 460-466.
 16. N.Dmitruk, T.Barlas, O.Kondratenko, V.Romanyuk. Small metal (Au) particles on semiconductor (GaAs) surface. Materials Science and Engineering C 23, 2003, p.159-164.
 17. М.Л.Дмитрук, О.В.Коровін. Особливості заломлення електромагнітних хвиль на поверхні поглинального середовища. Укр. Фіз. Журн., т.49, №9, 2004, с.858-865.
 18. М.Л.Дмитрук, О.В.Коровін. Особливості заломлення електромагнітних хвиль на поверхні поглинального середовища. Укр. Фіз. Журн., т.49, №9, 2004, с.858-865.
 19. N.L.Dmitruk, O.I.Mayeva, M.V.Sosnova. Polaritonic sensors. Encyclopedia of Sensors, Edited by C.A.Grimes, E.C.Dickey, M.V.Pishko, New-York, v.8, 2006, p.21-31.
 20. N.Dmitruk, T.Barlas, N.Kotova, V.Romanyuk, A.Dmytruk. Metal 1D micro(nano) self-organized wires on semiconductor surface: Preparation, topology, and optical properties. Materials Science and Engineering C. v.27, 2007, p.1141-1144.
 21. N.L.Dmitruk, A.V.Korovin. High light transmission through thin absorptive corrugated films. Optics Letters, v.33, No.9, 2008, p. 893-895.
 22. N.Dmitruk, S.Kutovyi, I.Dmitruk, N.Berezovska, I.Simkiene, I.Subataityte. Morphology, Raman scattering and photoluminescence of porous GaAs layer. Sensors and Actuators, B: Chemical, v.126 (1), 2007, p.294-300.

23. N.L.Dmitruk, O.Yu.Borkovskaya, S.V.Mamykin, D.O.Naumenko, N.I.Berezovska et al. Fullerene C60-silver nanoparticles hybrid structures: optical and photoelectric characterization. *J. Nanoscience and Nanotechnology*, v.8, No.11, 2008, p.5958-5965.
24. N.L.Dmitruk, A.V.Korovin. Physical nature of anomalous optical transmission of thin absorptive corrugated films. *JETP letters*, v.89, No.2, 2009, p.68-72.
25. A.A.Akopyan, O.Yu.Borkovskaya, A.V.Karimov, et al. Photoconverters with AlGaAs/GaAs heterojunction on textured GaAs substrates (Physico-technological aspects). Fan Publishers, Tashkent, 2004, 178 p.
26. М.Л.Дмитрук, О.І.Маєва, С.В.Мамикін, М.В.Соснова, З.І.Казанцева, В.І.Минько. Плазмон-поляритонний фотодетектор для визначення концентрації домішок етанолу в газових сумішах. Патент України, №39869. 10.05.2009, Бюл.№5.
27. A.V.Korovin. Improved method for computing of light-matter interaction in multilayer corrugated structures, *JOSA A*. v.25, №2, 2008, p.394-399.
28. N.L.Dmitruk, A.V.Korovin, I.B.Mamontova. Efficiency enhancement of surface barrier solar cells due to excitation of surface plasmon polaritons. *Semicond. Sci. Technol.*, v.24, 2009, 125011.
29. S.Mamykin, N.Dmitruk, A.Korovin, D.Naumenko, A.Dmytruk, Yeon-Su Park. Local plasmons contribution into photocurrent of Au/GaAs surface barrier structure with Au nanoparticles on interface. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, v.12, No.4, 2009, p.315-320.
30. N.L.Dmitruk, A.V.Korovin, O.I.Mayeva, M.V.Sosnova, Role of local plasmons in interaction of light with 1D periodic ensembles of metallic nanowires. *Plasmonics*, v.4, issue 2, 2009, p.193-200.
31. N.L.Dmitruk, A.V.Goncharenko, E.F.Venger. Optics of small particles and composite media, Kyiv, Naukova Dumka, 2009, 386 p.