



МАЛЮТЕНКО ВОЛОДИМИР КОСТЯНТИНОВИЧ

Відділ плазмових явищ в напівпровідниках (відділ 24)

Відділ плазмових явищ (відділ 24) в напівпровідниках був створений в 1976 р. шляхом відокремлення з відділу фотоелектричних явищ (відділ 3), заснованого акад. АН УРСР В. Є. Лашкарьовим у 1960 р. і керованого на той час чл.-кор. НАН України М. К. Шейнкманом. Станом на той час загалом були сформовані основи зонної теорії і кінетичної теорії напівпровідників, вивчені особливості поведінки (електричні, термоелектричні, фотоелектричні і оптичні властивості) та структура переважної більшості напівпровідникових приладів, розпочався бурхливий розвиток напівпровідникових приладів. То були часи продовження активної фази «холодної» війни, і перевага надавалась, у першу чергу, дослідженням військового і подвійного призначення. Цілком істотно особливого значення набула інфрачервона ділянка спектра, актуальними стали дослідження властивостей вузькозонних напівпровідників (InAsSb, CdHgTe) та взаємодії напівпровідників з випромінюванням у цій ділянці спектра. Негайно з'ясувалося, що практично відсутня інформація про поведінку нерівноважних носіїв заряду (які одержали назву «електронно-діркова плазма») в цих матеріалах, а практичного використання набули лише приймачі (детектори) інфрачервоного випромінювання. Отже, завдання новоствореному відділу було цілком логічно сформульовано: *вивчити властивості просторово-неоднорідної електронно-діркової плазми в умовах високих рівнів інжекції, створити нові типи приладів, в яких*

напівпровідникова плазма визначала б взаємодію приладу (матеріалу) з середовищем саме в інфрачервоному діапазоні, розробити методи діагностики її параметрів. З часу створення відділу ним керує професор В. К. Малуєнко, колишній аспірант акад. АН УРСР В. Є. Лашкарьова. В залежності від завдань та особливостей фінансування в діяльності відділу чітко виділяються три періоди.

Період екстенсивного розвитку припадає на перше десятиріччя існування відділу. За цей час була вивчена поведінка плазми в вузькозонних напівпровідниках (переважно в InAsSb, HgCdTe) в екстремальних умовах, якими були: ударна іонізація, лазерне опромінення, власне та зовнішнє магнітні поля (*pinch-effect* та *magnetoconcentration effect* відповідно), високий всебічний тиск. Детально вивчались реакція плазми на ці збудження, а також динамічна модифікація її параметрів, таких, зокрема, як механізми рекомбінації, просторовий розподіл, оптичні властивості в інфрачервоному діапазоні, властивості поверхні. В практичному плані запропоновані модулятори і джерела інфрачервоного випромінювання, датчики магнітного поля, детектори інфрачервоного випромінювання з рекордною на той час швидкістю, високочутливі датчики температури, вивчена природа плазмових нестабільностей в напівпровідниках. В результаті, хоч завдання відділу і формулювались військово-промисловим комплексом, ключові наукові досягнення були опубліковані в провідних наукових журналах Радянського Союзу, таких як Письма в ЖЭТФ, Письма в ЖТФ, ФТТ, ФТП, ЖЭТФ (майже всі ці всесвітньо-відомі видання вже тоді друкувались і виходили в англійському варіанті, отже, результати відділу були доступні широкому загалу). У співдружності з колегами з Інституту фізики АН УРСР опублікована перша стаття науковців СРСР в міжнародному журналі *Infrared Physics* (Bolgov S., Malyutenko V., Peshko I., Soskin M., Fegorenko L., Khizniak A., «Detection of ultrashort laser pulses by the transverse sweep-out InSb detector», *Infrared Physics* 15, 65, 1975). Визнанням провідної на той час ролі співробітників відділу у вивченні фізичних властивостей напівпровідників в інфрачервоному діапазоні стало запрошення завідувача відділом зробити оглядову доповідь про досягнення в Україні в цій галузі науки і техніки на міжнародній конференції в США (V. K. Malyutenko, «HdCdTe and other infrared material status in the Ukraine», *Journal of Electronic Materials* 25, 1231, 1995).

На відміну від першого періоду діяльності відділу (який характерний аномально високими рівнями інжекції і концентраціями плазми) у другому періоді топ-темою відділу стали особливості плазми в умовах екстремально-

низьких нерівноважних концентрацій електронів і дірок — так звані «ефекти ексклюзії та екстракції носіїв заряду». Саме в той час у фізику напівпровідників науковцями відділу було введено поняття «негативна люмінесценція» (*negative luminescence*), вивчені фундаментальні параметри і властивості цього явища, створені принципово нові оптоелектронні прилади. Саме завдяки піонерським розробкам з негативної люмінесценції співробітники відділу стали широковідомими в світі, їх публікації широко цитуються, а визначення цього поняття у формулюванні, що було запропоновано і обґрунтовано українськими науковцями (*S. Bolgov, V. Malyutenko, and V.I.Pipa, «Luminescence of semiconductors under carrier deficiency conditions», Sov. Phys. Semicond., 17, 134, 1983*), ввійшло в енциклопедичні видання (дивись, зокрема, «Отрицательная люминесценция», *Физическая Энциклопедия, т.3, стр. 513, 1992*; «Negative luminescence»; «Отрицательная люминесценция», *Физика твердого тела, Энциклопедический словарь т.1, 649, 1996*; *Wikipedia*) і стало візитною карткою відділу. З фундаментальної точки зору важливим стало відкриття таких особливостей явища як температурна активація потужності негативної люмінесценції, незалежність цієї потужності від рівня збудження та механізму рекомбінації електронно-діркової плазми. В практичному плані важливість явища визначається можливістю «виключення» реального фізичного об'єкта з поля зору спостерігача в інфрачервоному діапазоні спектра (*Stealth effect*), яку вперше продемонстрували також співробітники відділу. Зазначимо, тільки нещодавно ефект зникнення об'єкта з поля зору спостерігача продемонстровано за допомогою використання метаматеріалів.

Важливим здобутком третього поточного періоду можна вважати вивчення фундаментальних властивостей явища теплового випромінювання напівпровідникової плазми в умовах, далеких від рівноважного стану. Зокрема було встановлено, що еволюція плазми у просторі і часі супроводжується потужними потоками інфрачервоного випромінювання (діапазон 3-12 мкм) в непрямоzonних напівпровідниках (германій, кремній), які взагалі вважаються вкрай неефективними випромінювачами. В результаті виконання тривалого контракту на замовлення Лабораторії військово-повітряних сил США спільним колективом були теоретично обґрунтовані, створені і запатентовані в США і Україні динамічні сцени, здатні з рекордною швидкістю симулювати в інфрачервоному діапазоні переміщення як холодних, так і нагрітих об'єктів (*Malyutenko V., Michailovskaya K., Malyutenko O., Bogatyrenko, V., Snyder D. «Infrared dynamic scene simulating device based*

on light down-conversion», IEE Proceedings: Optoelectronics 150, 391, 2003). Було також обґрунтовано і продемонстровано новий оптичний спосіб перетворення частоти оптичного випромінювання, так званий принцип light down-conversion. Використовуючи цей принцип перетворення світла з видимого в інфрачервоний діапазон, продемонстровано ефект оптичного підсилення світла в такому нетрадиційному для оптоелектроніки матеріалі як кремній (Malyutenko V., Bogatyrenko, V., «High-temperature Si linear light down converter with 220% efficiency», *Phys. Rev B* 76, 113201, 2007). На основі принципу light down-conversion нещодавно теоретично обґрунтовано можливість оптичного охолодження напівпровідників; існування явища продемонстровано шляхом охолодження масивного зразка кремнію (V. K. Malyutenko, V. V. Bogatyrenko, and O. Yu. Malyutenko, «Silicon radiative cooler and optical amplifier by light down conversion», *Proc. SPIE* 7606, 760617 (2010)). Використовуючи унікальні експериментальні можливості, створені у процесі виконання закордонних замовлень (грантів), співробітники відділу останнім часом вивчають поведінку плазми у світлодіодах з метою підвищення ефективності світлодіодів видимого діапазону (A. V. Zinovchuk, O. Yu. Malyutenko, V. K. Malyutenko, «The effect of current crowding on the heat and light pattern in high-power AlGaAs light emitting diodes», *J. Appl. Phys.* 104, 033115, 2008).

Характерною рисою постановки досліджень у відділі є традиційна співпраця з теоретиками. Саме співробітництво з фізиками-теоретиками (А. Акоюн, І. Бойко, В. Владіміров, З. Грибніков, В. Піпа, А. Подольцев) надавало їм статус закінченості і фундаментальності, сприяло підвищенню рівня досліджень і дисертацій (3 докторських, 25 кандидатських), що були захищені за тематикою відділу. Саме можливість виконання досліджень у відділі на високому рівні і наявність публікацій в рейтингових англійських журналах сприяли подальшій кооперації з науковцями провідних міжнародних установ. Такими партнерами в різні часи (в хронологічному порядку) стали: *Centre National de la Recherche Scientifique, and Lab. Pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnetique* (Франція), *Lawrence Berkeley National Laboratory and Air Force Research Laboratory США*, *Institute of Electron Technology* (Польща), *ФТІ ім. Іоффе та Інститут напівпровідникових приладів* (Росія), *Interuniversity Microelectronic Center* (Бельгія). В результаті міжнародної кооперації, яка перманентно є для відділу нормою, близько 30% робіт (з загальної чисельності понад 150 публікацій) виконувались спільно з іноземними колегами. Докорінно змінилась географія публікацій-останніми роками роботи відділу публікуються в *Physical Review, Applied*

Physics Letters, Journal of Applied Physics, Infrared Physics & Technology, SPIE Proceedings. Більша частина наукових публікацій відділу відображена у міжнародних пошукових базах Scopus і Scirus. Тільки починаючи з 2000 року 50 наукових доповідей були зроблені на міжнародних конференціях.

Значним є також внесок співробітників відділу у створення нових типів приладів і технологій вивчення параметрів напівпровідників. Зокрема, ця діяльність відзначена більш ніж 100 авторськими свідоцтвами СРСР, патентами України, Польщі, США, а такі прилади, як широкоспектральні інфрачервоні випромінювачі, демонструвались у 2007 р. на міжнародному ярмарку у Ганновері.

Наукові і прикладні здобутки співробітників відділу вагомо відзначені в Україні і за кордоном. *За створення приладів криогенної техніки проф. В.К.Малютенка нагороджено Премією Ради Міністрів СРСР, 1983 р. (керівник – Л.Й.Зарубін), а за створення приладів інфрачервоної техніки 5 співробітників відділу стали лауреатами Державної Премії УРСР, 1987р. (В. К. Малютенко- керівник роботи, С. С. Болгов, А. І. Ліптуга, Г. І. Тесленко, Є. І. Яблонівський).* Проф. В. К. Малютенко довгий час працював членом міжнародної редколегії журналу Infrared Physics & Technology, як експерт НАТО вивчав актуальність розробок в галузі оптоелектроніки в установах Франції, Німеччини, Бельгії, багаторазово виступав з оглядовими доповідями на міжнародних конференціях.



Професор В.К. Малютенко, канд. фіз.-мат. наук С.С. Болгов, А.І. Ліптуга готують презентацію матеріалів на здобуття Державної премії УРСР, 1987 р.