

ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ФІЗИЧНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ У ЛЬВІВСЬКОМУ УНІВЕРСИТЕТІ ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА

Богдан ПАЛЮХ, Зиновій СТАСЮК, Михайло КОЗАК

Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Університетська 1, Львів 79000

Редакція отримала статтю 10 грудня 2010 р.

1. ВСТУП

Електроніка — галузь науки і техніки, предметом якої є вивчення явищ, пов'язаних із виникненням вільних заряджених частинок та їх рухом у силових полях. *Фізична електроніка* — розділ фізичної науки, яка вивчає фізичні принципи роботи електронних та іонних приладів (електровакуумні лампи, електронно-променеві прилади, фотоелектронні та електронно-оптичні прилади, прискорювачі заряджених частинок, електронні мікроскопи та мас-спектрометри). Прикладний аспект електроніки — створення приладів і пристроїв, що працюють на основі згаданих явищ.

Історично перші дослідження в цій галузі були пов'язані з вивченням процесів при протіканні струму в газовому середовищі, вивченням явища електронної емісії з поверхні твердих тіл та створенням електровакуумних приладів. Одним з перших дослідників газового розряду був видатний український вчений Іван Пулюй [1].

У першій половині ХХ століття в дослідженнях у галузі фізичної електроніки сформувалися два основні напрямки. В одному з них (*вакуумна і плазмова електроніка*) проводилося вивчення явищ емісії заряджених частинок з поверхні твердих тіл, балістики заряджених частинок у вакуумі та газовому середовищі, фізики плазми. Інший напрямок досліджень (*напівпровідникова електроніка*) був присвячений вивченню електронних процесів у твердих тілах і результатом цих досліджень стало створення численних приладів напівпровідникової електроніки.

Друга половина ХХ століття ознаменувалась значним розвитком технологічних можливостей експериментальних досліджень (отримання надвисокого вакууму, розвиток електронної мікроскопії та мас-спектрометрії, поява нових електронно-зондових методик і т. ін.). Це призвело до виникнення нових напрямків досліджень і часткового розмежування галузей та інтересів. Зокрема, з допомогою нових методик виявилась можливість дослідження на атомному рівні явищ на поверхні твердих тіл та в тонких шарах речовини. У результаті галузь до-

сліджень вакуумної і плазмової електроніки дещо розширилася і частково було змінено основні акценти з вивчення явищ у електровакуумних приладах на дослідження в галузі фізики поверхні та фізики плазми. Суттєво розширився діапазон досліджень у галузі електроніки твердого тіла. Зокрема, виникла *мікроелектроніка*. Вивчення процесів вимушеного випромінювання призвело до створення нової галузі електроніки — *квантової електроніки*.

Дослідження показали, що певну інформацію можуть нести не лише квазічастинки (електрони, іони, дірки, ...), але й динамічні неоднорідності у твердому тілі (поверхневі акустичні хвилі, магнітно-статичні хвилі, хвилі зарядової густини, сегнетоелектричні домени і т. ін.). Використання цих ефектів дало змогу створити *функціональну електроніку*.

Оптоелектроніка — розділ електроніки, в якому вивчаються явища взаємного перетворення електромагнітного випромінювання оптичного діапазону та електричних сигналів у твердому тілі. Метою практичної оптоелектроніки є створення пристроїв для генерації, передачі, збереження та обробки інформації.

Розвиток сучасної фізичної електроніки тісно пов'язаний з розвитком фізики наноб'єктів та використанням результатів цих досліджень для створення пристроїв *наноелектроніки*.

2. ОСНОВНІ УКРАЇНСЬКІ НАУКОВІ ШКОЛИ В ГАЛУЗІ ВАКУУМНОЇ І ПЛАЗМОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Дослідження в галузі фізичної електроніки (вакуумної і плазмової електроніки) в Україні найбільш широко проводяться в чотирьох наукових центрах (міста Харків, Київ, Львів, Ужгород) на базі університетів та наукових установ Академії наук.

Коротко проаналізуємо деякі основні досягнення шкіл фізичної електроніки Харкова, Києва та Ужгорода.

Розвиток Харківської школи фізичної електроніки розпочався роботами професора Харківського університету Д. А. Рожанського (1911-1921 роки) та А. О. Слупкіна (починаючи з 1926 року), які займалися проблемами створення генераторних ламп для надвисокочастотного діапазону (клістрон, магнетрон) [2, 3]. Згадані дослідження були продовжені в Харківському університеті та Харківському фізико-технічному інституті, заснованому в 1928 році. Харківська школа має значні успіхи в створенні систем формування потужних пучків заряджених частинок, генерації хвиль міліметрового діапазону за допомогою унікальних багаторезонаторних магнетронів. За результатами інтенсивного розвитку цієї тематики вже у 1960 році директор Інституту А. Я. Усиков, а також Кулешов, Левін, Трутень і Чернець були удостоєні найвищої в СРСР премії — Ленінської премії.

У Харківському університеті наукові дослідження в області фізичної електроніки проводилися на кафедрі напівпровідникової і вакуумної електроніки. Основним напрямком наукової діяльності кафедри була розробка теорії інтенсивних електронних пучків й експериментальне дослідження електронних гармат, які формують інтенсивні електронні пучки циліндричної і трубчатої форми, під керівництвом проф. Зінченка М. С. Був запропонований спосіб стабілі-

зації частоти магнетронних коливань динатронного типу, створена теорія трьохелектродних електронних гармат з поздовжньою компенсацією, а також розроблено рентгенівську трубку інтенсивного м'якого випромінювання. Згодом був розроблений оригінальний метод дослідження інтенсивних електронних пучків - метод вібруючого зонда і закладені основи теорії і практики розробки високоперевансних електронних прожекторів [4]. Ці наукові розробки актуальні і тепер, вони стали фундаментом для подальшого вивчення процесів розподілу електронів за швидкостями і нестійких станів в електронних потоках у трьохелектродних електронних прожекторах.

Засновниками Київської школи фізичної електроніки були члени-кореспонденти АН УРСР Моргуліс Н. Д. та Борзяк П. Г. [5, 6].

Наукова діяльність Наума Давидовича Моргуліса розпочалась у 1927 році в Київській науково-дослідній кафедрі Наркомосвіти УРСР, пізніше була продовжена в Інституті фізики АН УРСР та Київському університеті. Петро Григорович Борзяк розпочав свою наукову роботу в 1928 р. Перші дослідження Н. Д. Моргуліса і П. Г. Борзяка були присвячені створенню та вивченню ефективних електронних емітерів. У довоєнні роки наукові дослідження фізиків ІФ АН УРСР та Київського університету були присвячені емісійній електроніці та фізиці газового розряду. У повоєнні роки важливими напрямками досліджень додатково стали фізика поверхневих явищ та фізика нанооб'єктів. У наукових установах були створені потужні наукові колективи, виховувалася творча молодь. Серед учнів Н. Д. Моргуліса є три академіки та три член-кореспонденти АН України, зокрема віце-президент НАН України академік А. Г. Наумовець, академік НАН України М. Г. Находкін та член-кореспондент НАН України Ю. Г. Птушинський. Досягнення науковців Інституту фізики НАН України та Київського національного університету імені Тараса Шевченка в галузі вакуумної і плазмової електроніки здобули світове визнання. Дуже важливим результатом цих досліджень було закладення в 1952 році П. Г. Борзяком основ фотоелектронної спектроскопії (ФЕС), яка згодом стала одним з найбільш потужних і поширених методів дослідження електронної структури твердих тіл.

Надалі експериментальні і теоретичні роботи київської школи проводилися як у ІФ, так і у Київському університеті на радіофізичному факультеті, який був створений на виклик часу, що пов'язаний з необхідністю і доцільністю розвитку електроніки, і був сформований у 1952-му році.

Принципово важливими були експериментальні дослідження дифракції повільних електронів, виконані Городецьким Д. О. та Корневим О. М., на основі яких дифракція повільних електронів стала одним з найпоширеніших експериментальних методів діагностики поверхні.

Широке визнання одержали результати дослідження процесу взаємодії електронів середніх енергій з твердим тілом, які дозволили визначити важливі характеристики кінетики руху електронів у твердому тілі (Находкін М. Г., Мельник П. В., Коваль І. П., Кринько Ю. М. та інші). Ці роботи сприяли розкриттю механізму емісії нового класу ефективних емітерів із негативною спорідненістю з електроном і зіграли помітну роль у розвитку електронної спектроскопії твердого тіла та створенні нових її різновидів.

На основі дослідження механізму взаємодії електронів з діелектриками, виконаного під керівництвом проф. Находкіна М. Г., були з'ясовані особливості процесу формування прихованого електростатичного зображення при термопластичному записі інформації. Ці роботи, поряд з дослідженням механізму проявлення прихованого зображення, привели до створення систем для запису голограм у реальному масштабі часу в усій видимій області спектра, що сприяло створенню швидкодіючих напіваналогових оптоелектронних пристроїв. За ці та інші дослідження, які заклали фізичні основи запису інформації у фазових термопластичних середовищах, Находкіну М. Г., Кувшинському М. Г., Немцеву В. П., Подчерняєву І. Я. в 1970 р. була присуджена Державна премія УРСР.

Дослідження в галузі фізичної електроніки в Ужгородському університеті [7, 8] розпочалися після приїзду в місто випускника аспірантури Ленінградського університету Записочного Івана Прохоровича. Створена ним в Ужгороді школа згодом здобула широке визнання. В даний час як і у Києві та Харкові основні наукові дослідження зосереджені у двох центрах — університеті (кафедра квантової електроніки) та академічному закладі (Інститут електронної фізики).

Серед найбільш вагомих прикладних досліджень, виконаних науковцями, слід відзначити їх участь у космічних програмах на станціях "Салют", "Мир", "Шатл". Це були експерименти з лабораторного моделювання елементарних процесів у верхній атмосфері Землі і планет, калібрування польотної манометричної та мас-спектрометричної апаратури, вивчення впливу космічного випромінювання на системи космічної апаратури, участь у розробці та виготовленні окремих вузлів космічної техніки й апаратури спеціального призначення.

За вагомі здобутки вчених інституту електронної фізики в 1994 році вченим І. Записочному, В. Кельману та Ю. Шпенику було присуджено премії ім. К. Д. Синельникова НАН України. У 1995 р. Державні премії України в галузі науки і техніки отримали І.П.Записочний, О. Шпеник, А. Імре, А. Завілопуло, О. Сабад разом з вченими Ужгородського університету В. Лендєлом, Л. Шимоном і І. Алексахіним.

3. ЛЬВІВСЬКА ШКОЛА ФІЗИЧНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Експериментальні дослідження Львівських фізиків у галузі фізичної електроніки (вакуумна і плазмова електроніка) були започатковані Палюхом Богданом Михайловичем при виконанні дипломної роботи в 1948–1949 навчальному році в Інституті постійного струму (м. Ленінград) під керівництвом професора Сени Л. А. Результати дослідження ("Резонансная перезарядка ионов и атомов ртути") були опубліковані в 1950 році в одному з найавторитетніших радянських журналів ЖЭТФ (Журнал экспериментальной и теоретической физики) [9]. Після повернення до Львова Б.Палюх працює асистентом кафедри загальної фізики Львівського університету імені Івана Франка і продовжує дослідження в галузі атомних та іонних зіткнень. В 1956 році він захистив кандидатську дисертацію "Резонансна перезарядка ионів і атомів ртуті, криптону і ксенону".

З 1951 року асистентом кафедри експериментальної фізики працював випускник факультету Кушнір Роман Михайлович. За дорученням керівництва кафедри ним була створена навчальна електровакуумна лабораторія, яка з 1958 року стала базою для підготовки фахівців за спеціалізацією "Електрофізика" на потребу Львівського електролампового заводу з спеціальним конструкторським бюро (пізніше ВО "Кінескоп" та НДІ електронно-променевих приладів "Еротрон"). В 1959 році Р. Кушнір захистив кандидатську дисертацію "Резонансна перезарядка позитивних іонів і атомів калію і цезію". Отримані в роботах Б. Палюха і Р. Кушніра наукові експериментальні результати знайшли відгук у радянській та зарубіжній науковій літературі і були використані в теоретичних роботах, присвячених розвитку уявлень про атомно-іонні зіткнення. Експерименти, які здійснив Р. Кушнір, на той час були унікальними за складністю [10]. Водночас Палюх Б. і Кушнір Р. проводили наукові дослідження за державним замовленням зі створення малогабаритного генератора нейтронів для нейтронного каротажу нафтових свердловин. У створеному приладі нейтрони отримують у результаті реакції атомних ядер тритію з атомними ядрами дейтерію при бомбардуванні титанової мішені, насиченої тритієм, швидкими іонами дейтерію (енергія іонів $\sim 10^5$ eV), прискорених постійним електричним полем в умовах затrudненого газового розряду [11].

Розширення наукових досліджень в галузі фізичної електроніки в цей час було практично неможливе внаслідок слабкої матеріальної бази. У лабораторіях використовувались, в основному, скляні ртутні парострумніні вакуумні насоси, виготовлені складувом Шиманським, не вистачало джерел живлення та електровимірних приладів.

З метою освоєння нових методик дослідження в цей час широко практикували відрядження студентів для проходження навчальних практик та виконання дипломних робіт у провідні наукові центри. В результаті виконання дипломної роботи в Київському інституті фізики АН Української РСР в 1961–1962 навчальному році З. Стасюк освоїв технологічні аспекти отримання надвисокого вакууму (тиск залишкових газів у вакуумній системі 10^{-7} Па) та проведення наукових досліджень в цих вакуумних умовах. Вже в наступному навчальному році студент З. Соляник при виконанні дипломної роботи під керівництвом З. Стасюка вперше у Львові виготовив і провів дослідження автоелектронного мікроскопа-проектора. В 1975 році студент IV курсу С. Тхір після навчальної практики в Інституті фізики (м. Київ) самостійно виготовив і налаштував дифрактометр повільних електронів.

Після переходу з вересня 1962 року на кафедру загальної фізики доценти Б. Палюх, Р. Кушнір, асистенти Л. Савчин, З. Стасюк розширили коло наукових досліджень у галузі фізичної електроніки. Завдяки виконанню госпдоговірних робіт було отримано кошти для створення належної матеріальної бази необхідної для виконання наукової тематики та забезпечення спеціальних лабораторних практикумів. Допомогу в покращенні матеріальної бази наукових досліджень надав Київський Інститут фізики, з якого на баланс кафедри було передано деяке обладнання, що в той час не використовувалось в інституті. Серед основних напрямків фундаментальних наукових досліджень в цей час слід відзначити такі:

- вивчення іонно-атомних зіткнень (енергетичні залежності ймовірностей пружного розсіювання та резонансного перезарядження, рухливості низько-енергетичних іонів ртуті, інертних газів, лужних металів, магнію і кадмію) проводили Б. Палюх, Р. Кушнір, Л. Савчин, В. Чигінь, В. Злупко;
- дослідження адсорбційно-емісійних явищ (вивчення роботи виходу адсорбційних систем на основі монокристалів і плівок металів, ефективних термокатодів) проводили Б. Палюх, Р. Кушнір, З. Стасюк, Л. Сіверс, Т. Смерека, А. Яківчук, Х. Лах;
- дослідження фізичних явищ в тонких плівках металів (розмірні кінетичні явища в плівках металів товщиною 10–100 нм) проводили З. Стасюк, Р. Панчишин, Х. Лах, Б. Мельничук.

З приходом на кафедру у 1965 році Лева Іванківа розпочались наукові дослідження адсорбційних явищ на поверхні напівпровідникових матеріалів (Л. Іванків, З. Соляник, О. Гудзь, О. Пенцак).

Протягом 1966–1974 років з даної тематики кандидатські дисертації захистили: Л. Іванків, Л. Савчин, З. Стасюк, Л. Сіверс, З. Соляник, Р. Панчишин, Т. Смерека, А. Яківчук.

У кінці 60-х і на початку 70 років ХХ століття спостерігалось значне збільшення обсягів госпдоговірних науково-дослідних робіт, які виконувалися працівниками кафедри на замовлення підприємств Міністерства електронної промисловості СРСР з міст Москви, Ленінграда, Новосибірська, Києва, Львова. Найширшою за тематикою та обсягами робіт була співпраця з Спеціальним конструкторським бюро Львівського заводу кінескопів. Співпраця розпочалася із створення унікальної виміральної мас-спектрометричної системи на основі омегатронного давача РМО-4С, яка дозволила здійснювати кількісний аналіз газового складу у вакуумних приладах. Систему сконструювали на противагу приладу заводського виробництва ИПДО-1 придатного лише для якісного аналізу складу газів в діапазоні масових чисел від 2 до 44. Було суттєво відкориговано режим функціонування омегатронного датчика РМО-4С (індукція магнітного поля була збільшена з 0,32 Тл до 0,59 Тл, що дало змогу розширити діапазон досліджуваних масових чисел до меж від 2 до 84), створено нову систему реєстрації іонних струмів [12]. У згадані роки співробітники кафедри працювали в наукових лабораторіях дуже наполегливо. Окремі з них мали значні досягнення в науковому та технологічному плані. На початку 70-х років аспірантка Л. Сіверс запропонувала використати скловолоконну шайбу в якості екрана автоелектронного проектора, що дало змогу безпосередньо вимірювати емісійні струми з різних кристалографічних поверхонь монокристалічного вольфрамового вістря. У цей самий час Р. Панчишин провів унікальні експерименти при дослідженні впливу адсорбції окису барію на абсолютну диференціальну термоелектрорушійну силу плівок скандію. Б. Мельничук освоїв складні методики термічного розпилення ряду тугоплавких металів, зокрема гафнію, в умовах надвисокого вакууму. М. Козак виявив затримку емісійної активності оксидних катодів після їхньої пасивної витримки в атмосфері окису вуглецю. Особливо активно в 70-і роки проводила наукові дослідження Христина Лах. Нею було виявлено явище необо-

ротних змін емісійно-адсорбційних характеристик поверхні монокристалу ванадію при адсорбції барію. На десять років пізніше такі зміни було трактовано як явище реконструктивної адсорбції. Вона також дослідила розмірні кінетичні явища в плівках найбільш важкоплавкого металу ренію, а також вперше виявила особливості адсорбційної взаємодії барію на анізотропній поверхні (1010) монокристала ренію.

Використання омегатронного мас-спектрометра в наукових дослідженнях дало змогу отримати цілу низку результатів, які крім практичного значення дозволяли розв'язати окремі фундаментальні завдання. Спільно з співробітниками кафедри фізики напівпровідників були проведені перші мас-спектрометричні дослідження температурної та радіаційної деструкції лужно-галоїдних кристалів при їх радіолізі [13].

Спільно з співробітником Інституту геології і геохімії горючих копалин М. Братусем була здійснена розробка унікальної методики мас-спектрометричних досліджень складу індивідуальних рідинних і газових включень в кварцах з пегматитів [14]. Використання малогабаритного мас-спектрометра РМО-4С дало змогу аналізувати елементний склад в окремих бульбашках. До цього використовувалися великогабаритні мас-аналізатори, для реєстрації складу газів у включеннях кристал руйнували всередині аналізатора і одержували суміш газів з включень різної природи. Для потреб підприємств електронної промисловості було виконано комплекс мас-спектрометричних досліджень складу газового середовища в готових електронно-променевих приладах ЕПП (свіжовиготовлених і приладах, що тривало зберігалися на складах). Роботи проводили з метою прогнозування змін параметрів приладів при зберіганні. Для виконання даного комплексу робіт Л. Савчин розробив методику під'єднання давача РМО-4С до готового приладу (здійснено під'єднання з використанням епоксидних смол та часткового протравлювання зовнішньої стінки ЕПП розчином плавикової кислоти). Комплекс досліджень газового складу в приладах було здійснено З. Стасюком, Р. Панчишиним, З. Соляником і О. Пенцаком. Найбільш цікавим результатом цих досліджень було встановлення факту, що в приладах, які пройшли тривале зберігання, суттєво вищий парціальний тиск He ($\sim 10^{-2}$ Па) порівняно з тиском 10^{-6} Па у свіжовиготовлених приладах. Було показано, що причиною цього є дифузія атомів гелію з атмосфери всередину приладу крізь його оболонку. Крім цього, було зроблено висновки щодо особливостей зміни складу залишкових газів в ЕПП в процесі їх експлуатації та при тривалому зберіганні. На основі даних, отриманих в згаданій роботі, замовники сформулювали комплекс нових завдань, необхідних для подальшого покращення надійності та довговічності електронно-променевих приладів різних конструкцій, які виконувались протягом більш ніж десяти років. В результаті було виконано детальні дослідження впливу окремих компонент залишкових газів на емісійні властивості оксидних катодів різних типів. Вивчали вплив бомбардування іонами гелію та метану на структуру, емісійні властивості та довговічність катодів. Зокрема, було виявлено затримку появи емісійного струму катодів після тривалої пасивної витримки катодів в атмосфері окису вуглецю при тиску 10^{-4} Па [15]. Частина отриманих результатів опубліковано в наукових журналах з обмеженим досту-

пом, а тому вони невідомі широкому загалу науковців.

Науково-дослідна лабораторія кафедри брала участь у виконанні державної програми, присвяченої розробці безсрібних методів запису інформації (науковий керівник програми академік Микола Находкін). Було здійснене мас-спектрометричне дослідження газовиділення та термічного розкладу полідифенілсилаксанів (З. Стасюк, М. Козак, Ю. Караван) [16]. Прозорі плівки цих матеріалів на поверхні скла при бомбардуванні електронним пучком полімеризувались і ставали лише частково прозорими. Результати досліджень були використані в Київському НДІ електромеханічних приладів при створенні першої в СРСР електронно-променевої трубки з термопластичним записом інформації. На основі експериментальних даних, отриманих при дослідженні згаданих сполук, Ю. Караван захистив кандидатську дисертацію. В подальші роки для електронно-променевих приладів із значним внутрішнім газовиділенням було створено малогабаритний іонно-гетерний насос, вмонтований в електронно-оптичну систему приладу, здатний протягом тривалого часу підтримувати необхідні для роботи приладу вакуумні умови. На розроблений прилад отримано два патенти (для прикладу [17]). Проводились роботи, метою яких було покращення параметрів приладів цього класу, зокрема, забезпечення рівномірного розігріву підкладок з допомогою покриттів на основі окису олова. Кінцевою метою проекту було створення малогабаритних електронно-променевих трубок. Роботи було припинено з розпадом СРСР.

В цей самий час під керівництвом Б. Палюха проводяться науково-дослідні роботи на замовлення Центру управління космічними польотами. Здійснювався пошук термічно стійких матеріалів з низькою роботою виходу для використання в двигунах космічних апаратів та пошук покриттів, які забезпечують прозорість вікон літальних апаратів при їхній тривалій експлуатації режимі опромінення космічними променями. У 1975 році керівник робіт Б. М. Палюх був нагороджений пам'ятною медаллю і грамотою центру керування польотом спільної радянсько-американської програми "Союз-Аполон". Варто зауважити, що з українських фізиків таку нагороду отримали лише професор Ужгородського університету Записочний та керівник програми від Харківського фізико-технічного інституту.

З відходом з кафедри Л. Савчина дослідження в галузі іонно-атомних зіткнень припинились. Завершилися дослідження в галузі фізики атомних зіткнень захистами кандидатських дисертацій В. Чигінем та О. Синицьким. Пізніше В. Чигінь захистив докторську дисертацію (працював у час захисту доцентом НУ "Львівська політехніка").

В кінці 70-х і протягом 80-х років дослідження у галузі фізичної електроніки були зосереджені в трьох лабораторіях фізики поверхні і адсорбційних явищ (наукові керівники Б. Палюх, Т. Смерека), фізики поверхневих явищ (науковий керівник Л. Іванків), фізики тонких плівок (науковий керівник З. Стасюк).

Основною тематикою лабораторії фізики поверхні і адсорбційних явищ були фундаментальні дослідження в галузі фізики поверхні металів і металоплівкових адсорбційних систем. Одним з основних методів досліджень став метод дифракції електронів, впроваджений в

лабораторії М. Гупалом, Ф. Гончаром, Я. Лозовим. Початково був виконаний комплекс досліджень для встановлення природи взаємодії атомів лужних і лужноземельних елементів, адсорбованих на різних кристалографічних поверхнях монокристалів вольфраму, молібдену і ренію [18]. Подальші дослідження були присвячені систематичному вивченню адсорбції атомів рідкісноземельних елементів на поверхні монокристалів тугоплавких металів. Було виявлено, що в межах першого атомного шару адсорбованої плівки РЗЕ з ростом концентрації адатомів утворюється цілий ряд розріджених острівцевих структур, а переходи від однієї структури до іншої мають характер фазового переходу першого чи другого роду. Зокрема, при дослідженні структури адплівок РЗЕ на грані (112) вольфраму методом дифракції повільних електронів були виявлені ланцюжки адатомів, віддалених один від одного на рекордно великій відстані — сім сталих ґратки кристалу підкладки ($\sim 20 \text{ \AA}$) [19,20]. Отримані експериментальні результати дали змогу зробити висновок про те, що вирішальну роль у формуванні поверхневих структур атомів РЗЕ відіграє хімічна природа підкладки. Поряд з цим, було зроблено припущення, що важливу роль у формуванні поверхневих структур РЗЕ відіграє наявність у вольфраму і молібдену частково заповнених поверхневих електронних станів (ПЕС), саме через які відбувається непряма обмінна взаємодія адатомів. З метою перевірки цієї гіпотези в лабораторії провели дослідження адсорбції атомів лужних, лужноземельних і рідкісноземельних елементів на поверхні (112) кристала танталу, у якої згідно з теоретичними обчисленнями ПЕС відсутні. У результаті проведених досліджень було встановлено, що розріджені ланцюгові структури адплівок на грані (112) танталу не утворюються. Таким чином, гіпотеза про роль ПЕС у формуванні поверхневих структур дістала своє експериментальне підтвердження.

Поряд із дослідженнями структури адсорбованих шарів, в лабораторії широко вивчалися електронно-адсорбційні властивості металоплівкових систем, зокрема зміни роботи виходу і енергії зв'язку адатомів з поверхнею в субмоношаровій області покриття адсорбату і широкому діапазоні температур підкладки [21, 22]. Виявлено, що плівки РЗЕ, адсорбовані на окремих гранях перехідних металів, мають низьку роботу виходу ($< 3 \text{ eV}$) і при цьому володіють великою енергією зв'язку з поверхнею (аж до 6 eV), що дає змогу використовувати їх у якості ефективних емітерів електронів.

Результати дослідження структури і адсорбційно-емісійних характеристик субатомних плівок рідкісноземельних елементів на поверхні кристалів тугоплавких металів дали змогу узагальнити погляди про вплив особливостей електронної будови адсорбованого атома, зокрема ступеня заповнення 4f-оболонки на його поведінку на поверхні кристала. За результатами згаданих досліджень кандидатські дисертації захистили М. Гупало, Я. Лозовий, Ф. Гончар, І. Убогий, С. Степановський. Підготовлена до захисту докторська дисертація Т. Смереки не була захищена у зв'язку з передчасною смертю Теодора Петровича.

У лабораторії фізики поверхневих явищ під керівництвом Л. Іванківа продовжуються дослідження взаємодії газового середовища з поверхнею тугоплавких оксидів та перехідних металів. Сучасна експериментальна база лабораторії забезпечує проведення досліджень в

умовах надвисокого вакууму з використанням ряду сучасних методик, зокрема мас-спектрометрії, вимірювання роботи виходу, слабких електронних та фотонних потоків. Освоюються технології отримання тонких шарів широкого спектру матеріалів. Спільно з НВО "Енергія" проведені роботи з пошуку матеріалів для тонкоплівкових газових сенсорів, зокрема сенсорів кисню, азоту та водню для дослідження складу верхніх шарів атмосфери (Л. Іванків, О. Пенцак, З. Комаровський, С. Тхір, І. Кецман).

Співробітники лабораторії отримали ряд ефективних композицій сенсорів на основі тугоплавких оксидів (оксиди цирконію, титану, ніобію, молібдену, вольфраму), легованих благородними та перехідними металами (паладій, платина, срібло, золото), які захищені авторськими свідоцтвами СРСР. Досліджувалися взаємодія атомарних пучків та електромагнітного опромінення з поверхнею матеріалів, які входять до складу космічних апаратів (деякі тугоплавкі оксиди, хромо-нікелева шпінель), а також з'ясовувалася природа емісійних явищ, які супроводжують адсорбцію кисню на поверхні широкозонних оксидів та початкові стадії окислення металічних плівок, зокрема адсорбції та адсорболоюмінесценції (Л. Іванків, С. Тхір, І. Кецман, З. Комаровський), стану адсорбованої молекули та впливу збуджень електронної системи підкладки на її адсорбційні характеристики. Запропоновано метод вимірювання товщини плівки оксиду в процесі її росту шляхом вимірювання інтенсивності екзоemisії та методи вимірювання тиску кисню за допомогою явища адсорболоюмінесценції. Результати цих досліджень відображені у кандидатських дисертаціях О. Пенцака та З. Комаровського і у докторській дисертації Л. Іванківа (1987 р.).

У лабораторії фізики тонких плівок протягом усіх цих років проводились експериментальні і теоретичні дослідження класичного розмірного ефекту в плівках перехідних металів. На основі аналізу отриманих експериментальних даних була створена теорія провідності полікристалічних металевих шарів неоднорідної товщини (З. Стасюк, М. Бігун), яка дала змогу поєднати всі відомі теорії геометричних класичного і внутрішнього розмірних ефектів. Результати цих досліджень узагальнені в кандидатських дисертаціях Х. Лах, Б. Мельничука, А. Кузьменко, А. Лопатинського та в докторській дисертації З. Стасюка.

Поряд з цим в лабораторії було реалізовано комплекси досліджень, спрямованих на пошук нових емісійно-ефективних матеріалів та на підвищення експлуатаційних характеристик існуючих емітерів електронів. А. Бородчуком, З. Стасюком, В. Чобанюком досліджувалися фізичні властивості антимонідів лужних металів, що використовувалися як ефективні фотоелектронні емітери. Вивчено вплив газового середовища, надлишкового цезіювання та інших факторів на оптичні властивості та емісійну здатність тонкоплівкових Cs_3Sb та $(Na_2KSb)Cs$ фотоемітерів. За результатами проведених досліджень була підтверджена гіпотеза про можливість реалізації від'ємного електронного споріднення на плівках $(Na_2KSb)Cs$, встановлений ряд агресивності залишкових газів, визначені порогові тиски, а також зроблені рекомендації щодо підвищення експлуатаційних характеристик фотоелектронних приладів з фотоемітерами цього типу. Результати цих досліджень використано в кандидатській дисертації А. Бо-

родчука. В. Чобанюк захистив кандидатську дисертацію за результатами дослідження плівок халькогенідів.

З 1986 р. також проводиться пошук матеріалів, придатних для створення ефективних термокатодів багаторазового використання (М. Козак, З. Стасюк). Досліджені термоемісійні характеристики ряду подвійних та потрійних інтерметалічних сполук, вперше синтезованих на кафедрі неорганічної хімії ЛНУ імені Івана Франка. Виявлено, що ряд потрійних силіцидів і галідів, до складу яких входять атоми рідкісноземельних та перехідних d-металів задовольняють вимоги, які ставляться перед катодними матеріалами. Створено експериментальні зразки термокатодів, які були використані в ЕПТ спеціального призначення.

Фундаментальні наукові дослідження в галузі фізики тонких металевих плівок тривають до цього часу. Метою експериментальних досліджень є пошук можливостей створення електрично суцільних металевих плівок товщиною в декілька атомних шарів. Для цього в лабораторії використано метод зменшення впливу коагуляції на ріст зародків кристалізації металевої плівки з допомогою попереднього нанесення на діелектричну підкладку сурфактантних підшарів субатомної товщини. Як матеріали для сурфактантних підшарів використані сурма, германій та кремній. Вивчено вплив товщини сурфактантного підшару на структуру та електричні властивості металевих плівок. Виявлено можливість зміни розмірів кристалітів у металевій плівці. Розроблено методику формування стабільних при температурах нижчих за 370 К плівок срібла, золота, міді з металевим характером провідності (позитивний температурний коефіцієнт температурного опору) масовою товщиною 2 нм (4–5 атомних шарів). Для пояснення результатів дослідження електричних властивостей плівок використано сучасні теорії квантового розмірного ефекту. В рамках теорії функціоналу густини здійснено обчислення зонної енергетичної структури вільних плівок згаданих металів з метою встановлення межі правомірності використання існуючих теорій квантового розмірного ефекту для опису отриманих експериментальних даних [23]. Кандидатські дисертації з даної тематики захистили Б. Пенюх. і Р. Бігун.

Дослідження в галузі фізичної електроніки у Львові проводились не лише в колективі, створеному Б. Палюхом і Р. Кушнірем. На кафедрі фізики напівпровідників під керівництвом М. Цаля була створена лабораторія, яка проводила дослідження радіаційної стійкості матеріалів, пошук нових матеріалів для запам'ятовуючих електронно-променевих пристроїв. Були здійснені дослідження вторинної електронної емісії плівок різних діелектричних матеріалів (KCl, CsBr, MgO, CaF₂ та інших) з метою пошуку ефективних діелектричних матеріалів для запису інформації електронним променем. У результаті досліджень створено і впроваджено на ВО "Кінескоп" елементи пам'яті спеціальних електронно-променевих трубок, кандидатські дисертації захистили В. Травіна, І. Антонів, П. Галій, О. Поплавський.

Методи вторинної електронної емісії, оже-електронної спектроскопії, мас-спектрометрії широко використовуються для дослідження радіаційно-стимульованих процесів в іонних кристалах, зокрема процесів деструкції і радіолізу діелектричних кристалів під дією іонізуючого електромагнітного та корпускулярного випромінювання. Ре-

зультати цих досліджень були узагальнені в кандидатських дисертаціях Б. Павлика, С. Сухореброго, О. Драгана, І. Гудь. Згадані методи використовуються при проведенні досліджень деформаційних властивостей та радіаційно стимульованих процесів у напівпровідниках A_2B_6 , A_3B_6 , шаруватих напівпровідникових матеріалах та діелектриках. В останні роки захищено кандидатські дисертації В. Матульського, І. Тютюка, Т. Ненчука, О. Мельник, Б. Цибуляка В 1999 році докторську дисертацію захистив Б. Павлик, а у жовтні 2010 р. — П. Галій.

Випускники фізичного факультету продовжили наукові дослідження в галузі фізичної електроніки, працюючи в інших установах. Зокрема, випускники кінця 60-их років П. Луцишин, Б. Бундза працювали у відділі фізичної електроніки ІФ НАН України і захистили докторські дисертації. Випускник 1974 року Сухорський Ю. вивчав вплив адсорбції електропозитивних елементів на автоелектронну емісію віскерів германію у Львівському політехнічному інституті. Проблемами, пов'язаними з вивченням фізичних явищ на поверхні, займалася група науковців цього інституту під керівництвом професора Й. Набитовича (Г. Бігун, М. Лосик). Кандидатські дисертації захистили Ю. Сухорський, М. Лосик. У 1997 році Ю. Сухорський захистив докторську дисертацію.

Значні досягнення в розвитку теорії формування електронних пучків групи фізиків, які працювали раніше в СКБ ВО "Кінескоп" (Ю. Койфман, В. Циганенко). Вони розробили низку складних електронно-оптичних систем для ЕПТ спеціального призначення. Зокрема, були здійснені розрахунки систем для створення пучків малого перерізу (діаметром 10–15 мкм). Результати їхніх робіт широко цитовані в монографіях з електронної оптики.

У цей час частина науковців, вихованих львівською школою фізичної електроніки, успішно працює в наукових установах США (М. Гупало, Я. Лозовий, І. Кецман, І. Тютюко), Австрії (Ю. Сухорський), Австралії (О. Клочан), Канади (М. Фуртак) та інших країн.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] *Гайда Р.* Фізичний збірник НТШ. 1998. **3**. 11.
- [2] *Костенко А. А., Носич А. И., Ранюк Ю. Н.* Science and Science of Science. 2005. №4. 102.
- [3] *Прохоров Э. Д., Ткаченко В. М., Шеховцов Н. А.* Кафедра полупроводниковой и вакуумной электроники. Харьков: Изд. ХНУ им. В. Н. Каразина, 2002. 32 с.
- [4] *Зинченко Н. С., Жигайло Б. А.* ЖТФ, 1964. **34**, вып.7. 1306.
- [5] *Наумовець А. Г., Птушинський Ю. Г.* Дослідження з фізичної електроніки та фізики поверхні в Інституті фізики. До 75-ліття ІФ НАН України. К.: Вид. ІФ НАНУ, 2004. 27 с.
- [6] *Радіофізичний факультет: 55 років. Довідник.* К.: Вид. лаб. радіофіз. фак. КНУ імені Тараса Шевченка, 2007. 270 с.

- [7] *Записочний І. П.*. Шлях у науку. Спогади. Ужгород: Мистецька лінія, 2002. 46 с.
- [8] *Шимон Л. Л.* Досягнення фізичного факультету (1950–2000р.р.). Ужгород: Вид. Уж. унів., 2000. 33 с.
- [9] *Палюх Б. М., Сена Л. А.* ЖЭТФ, 1950. **20**, №1. 36.
- [10] *Кушнір Р. М., Палюх Б. М.* Изв. АН СССР, сер. физ. 1959. **63**, №8. 112.
- [11] *Кушнір Р. М., Палюх Б. М.* Вісник Львів. універ., сер. фіз. 1962. **1**, №8. 45.
- [12] *Кушнір Р. М., Стасюк З. В., Орищин Ю. М.* Вісник Львів. універ., сер. фіз. 1968. **3**, №11. 100.
- [13] *Дидьк Р. И., Караван Ю. В., Стасюк З. В., Цаль Н. А.* ФТТ. 1970. **12**. 3629.
- [14] *Братусь М. Д., Панчишин Р. С., Стасюк З. В.* Докл. АН СССР. 1968. **183**, №48. 256.
- [15] *Ануфриев Ю. А., Козак М. М., Мельничук Б. Л., Панчишин Р. С., Стасюк З. В.* в сб. “Качество, прочность, надежность и технологичность электровакуумных приборов”. К., “Наукова думка”, 1976. 43 с.
- [16] *Гукалов С. П., Караван Ю. В., Лесниченко А. Я., Стасюк З. В.* ЖПХ. 1972. **3**. 135.
- [17] *Пастырский Я. А., Киназ С. П., Стасюк З. В., Козак М. М. и др.* Авт. св. №1387785, зарегистр. 08.12.1987 г.
- [18] *Гупало М. С., Медведев В. К., Палюх Б. М., Смерека Т. П.* ФТТ. 1979. **21**, 4. 973.
- [19] *Медведев В. К., Смерека Т. П., Степановский С. И., Гончар Ф. М.* ФТТ. 1991. **3**, 12. 3623.
- [20] *Medvedev V. K., Smereka T. P., Stepanovskii S. I., Ubogyi I. M., Kamenetskii R. R.* Physical Collected Papers, 1998. **3**. 70.
- [21] *Лозовый Я. Б., Медведев В. К., Смерека Т. П., Палюх Б. М., Бабкин Г. В.* ФТТ, 1982. **24**, 7. 2130.
- [22] *Гончар Ф. М., Медведев В. К., Смерека Т. П., Лозовый Я. Б., Бабкин Г. В.* ФТТ, 1987. **29**, 9. 2833.
- [23] *Stasyuk Z. V.* J. Phys. Stud. 1999. **3**, №1. 102.

**THE HISTORY OF PHYSICAL ELECTRONICS
DEVELOPMENT
IN IVAN FRANKO UNIVERSITY OF LVIV**

Bohdan Palyukh, Zynovij Stasyuk, Mykhailo Kozak
Ivan Franko National University of Lviv
1 Universytetska Str., Lviv 79000

The history of scientific research development in the field of physical electronics in Ukraine is described. The main scientific achievements of Ivan Franko Lviv University physical electronics school is reviewed.