

Василь Ляшенко — видатний український фізик, засновник наукової школи з фізики поверхні напівпровідників



Володимир Литовченко
доктор фіз.-мат. наук, професор,
член-кореспондент НАН України,
зав. відділу Інституту
фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова
НАН України, м. Київ



Максим Стріха
доктор фіз.-мат. наук,
професор Київського
національного університету
імені Тараса Шевченка, м. Київ

Нещодавно минуло 110 років від дня народження видатного українського фізика, вихователя великої когорти вчених, професора Київського університету *Василя Івановича Ляшенка* (30.01.1902 — 18.03.1975 рр.).

Народився В.І. Ляшенко в селі Носівка Чернігівської області в сім'ї залізничника. Закінчив технікум (1924 р.), а потім — Київський університет, тоді — Київський інститут народної освіти (рис. 1).

У 1928 р. був направлений до аспірантури щойно створеного Інституту фізики Академії наук, де став працювати від 1931 року (від 1937 р. — старший науковий співробітник), 1935 року захистив кандидатську дисертацію.

Брав активну участь у громадській діяльності української інтелігенції епохи Відродження, зокрема, приятелював з відомими письменниками *Остапом Вишнею* (згодом репресованим), *Леонідом Смілянським* та іншими (рис. 2).

Василь Іванович був першим деканом фізичного факультету і його викладачем у відновленому Київському університеті в 1931—1941 роках.

Під час війни в 1943—44 роках працював у Конотопі завідувачем району, завідувачем кафедри фізики в Учителському інституті та заступником директора з навчальної роботи. Наприкінці 1944 р. за викликом Академії наук України повернувся до Києва, де продовжував працювати в Інституті фізики АН спочатку старшим науковим співробітником (у відділі *В.Є. Лашкарьова*). Мав клеймо людини, яка перебувала на окупованій німцями території (та ще й безпартійний), отже, ненадійної з обмеженим кар'єрним ростом.

Від 1960 р., при створенні Інституту напівпровідників, він стає завідувачем нового, створеного ним, відділу електроніки поверхні напівпровідників.

У 1945—1953 рр. Василь Іванович працює також в Київському університеті на посаді доцента, а у 1956—1960 рр. — професором та завідувачем кафедри напівпровідників університету.

За довгий час плідної наукової та педагогічної роботи *В.І. Ляшенко* створив новий напрям і важливу наукову школу, яка сприяла створенню в Україні нового напрямку — твердотільної електроніки та мікроелектроніки, що прийшла на зміну домінуючій тоді вакуумній електроніці. Завдяки цьому саме йому та вихованому ним колективі вчених була присуджена в 1970 р. одна з перших Державних премій УРСР в галузі науки і техніки.



В.І. Ляшенко (1902—1975)

Василь Іванович має великі заслуги перед фізичною наукою України. Він стоїть у одному ряду її фундаторів в часи передвоєнного відродження. Варто назвати імена таких його сучасників і колег, як **Вадим Євгенович Лашкар'юв**, **Олександр Генріхович Гольдман**, **Петро Григорович Борзяк**.

Він — “збирач” багатьох у майбутньому видатних фізиків, серед яких згадаймо теоретиків **Олександра Сергійовича Давидова**, **Соломона Ісаковича Пекара**, а після війни — експериментаторів **Олега Вячеславовича Снітка**, **Володимира Григоровича Литовченка**, **Генрісту Павлівну Пеку**, **Віталія Іларіоновича Стріху**, **Валентина Миколайовича Добровольського**.

Василь Ляшенко був одним із головних фундаторів Інституту фізики напівпровідників, приклавши багато зусиль для його створення і його плідної роботи, був значний період заступником академіка-секретаря Відділення фізики та астрономії Академії наук України.

Найбільш яскравим досягненням **В.І. Ляшенка** стало створення першої в Радянському Союзі наукової школи з фізики поверхні напівпровідників, яка стала (і залишається досі) базовою для формування багатьох лабораторій із фізики напівпровідників. До цієї школи, крім співробітників свого відділу (яку зараз очолює його учень **В.Г. Литовченко**), входять декілька відділів Інституту фізики напівпровідників НАН України, в тому числі відділ “Атомарно чистої поверхні”, який довго очолював академік НАН України **О.В. Снітко**, а згодом — член-кореспондент

НАН України **Б.М. Нестеренко** та **А.В. Саченко**; відділ “Сенсорики” (завідувач член-кореспондент НАН України **Є.Ф. Венгер**), відділ “Оптики квантово-розмірних ефектів” (очолює доктор фіз-мат. наук **Д.В. Корбутяк**), відділ “Фотоелектричних перетворювачів” (доктор фіз-мат. наук **А.П. Горбань**, а нині — доктор фіз-мат. наук **В.П. Костильов**), відділ “Поляритонних явищ” (доктор фіз-мат. наук **М.Л. Дмитрук**). **В.І. Ляшенко** створив (деякі разом із **В.Є. Лашкар'ювим**) також лабораторії в інших установах, зокрема: лабораторію “Контактних явищ” у Київському державному університеті (незабаром її очолив проф. **В.І. Стріха**, рис. 3), Лабораторію адсорбційних явищ у Львівському університеті (проф. **Л.І. Іваньків**), Лабораторію шаруватих структур в Ужгородському університеті (проф. **М.І. Довгошей**, проф. **Ю.В. Попик**), в Чернівецькому та інших університетах України.

Із цієї школи вийшло понад 100 кандидатів фіз.-мат. наук, понад 20 докторів, 5 членів Національної академії наук України, велика кількість високофахових інженерів і викладачів.

Перші роботи з дослідження напівпровідників **В.І. Ляшенком** були поставлені та виконані в Інституті фізики Академії наук та Київському університеті під керівництвом академіка **О.Г. Гольдмана**, а згодом, разом з **В.Є. Лашкар'ювим** (після його повернення із заслання) ще в передвоєнні тридцять-сорокові роки, — на класичних тоді матеріалах — селені (Se), оксиді міді (Cu_2O), сірчатосрібних плівках, закисі міді, що були основою для виготовлення випростувачів струму, які використовувались в силових пристроях. Ці пристрої були запропоновані лише за декілька років до цього німецькими фізиками (*L. Grondahl, Phys. Rev., 27, 813, 1926, W. Scottky, W. Deutschmann, Phys. Zst., 20, 839, 1929*). **В.І. Ляшенко** запропонував нові, зокрема залізооксидні випростуючі, матеріали, інформація щодо яких була вміщена в одній із перших його публікацій у 1935 р. [1].

В.І. Ляшенком були також проведені перші дослідження приконтактних ефектів для ділянок “контактний метал (Pb) — напівпровідник” шляхом вимірів розподілу потенціалу вздовж зразків. Раніше (1935 р.) в роботах **Д.М. Наследова** та **Л.М. Семенова** було виявлено істотний контактний опір як для анодного, так і катодного режиму ввімкнення зразка, причому опір не залежав від величини і полярності прикладеного поля. Результат був пояснений наявністю “неякісним” приконтактним високоомним шаром (PbSe). **В.І. Ляшенко** (разом зі своїм співробітником **Г.А. Федорусом**) [2] відкрили на контакті метал-напівпровідник новий ефект, названий ними високовольтною поляризацією приконтактної частини напівпровідників. Ефект полягав у створенні високоомного приконтактного шару, опір якого сильно змінювався від величини і полярності застосованої напруги — від надмалої величини (при катодній полярності) до багаторазового перевищення опору об'єму зразка (при анодній поляризації). Був зроблений фізично обґрунтований висновок:

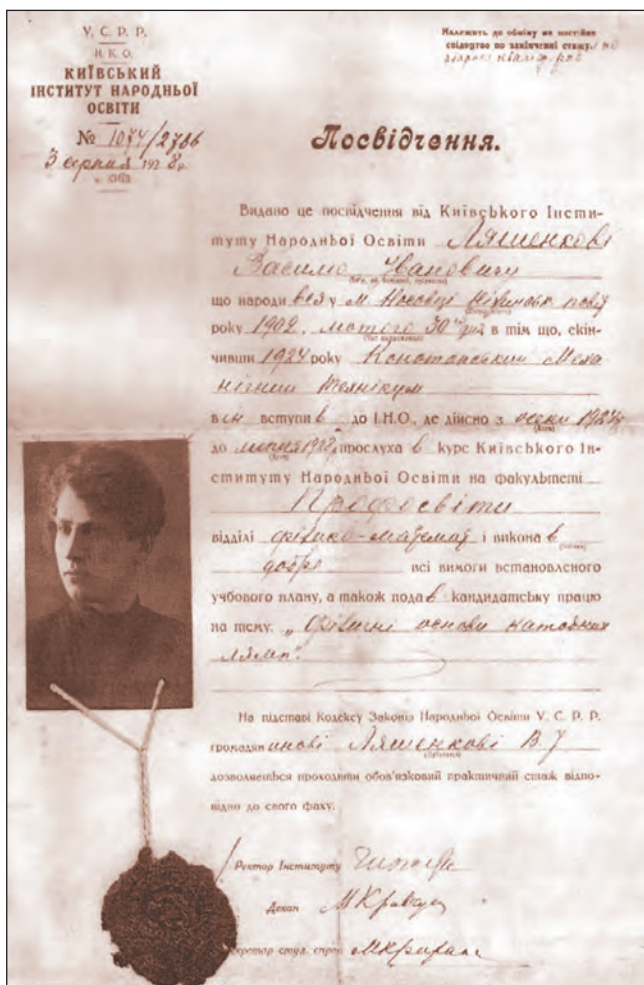


Рис. 1. В.І. Ляшенко під час закінчення Київського інституту народної освіти

наявність додаткового стрибка потенціалу на анодному контакті, зумовленого формуванням об'ємного заряду та високовольтної поляризації (виснаження) електронних напівпровідників.

Таким чином, ця робота є однією з пріоритетних у відкритті запірного шару (названого згодом Шотткі бар'єром) на контакті метал-напівпровідник. Трохи пізніше в роботах **В.Є. Лашкарьова** запірний шар був знайдений на контакті $\text{Cu-Cu}_2\text{O-CuO}$ і вперше пояснений виникненням $p-n$ -переходу ($\text{CuO}(n)-\text{Cu}_2\text{O}(p)-\text{Cu}$), який також був названий запірним шаром.

Отже, до відкриття запірних шарів у напівпровіднику поблизу поверхні на межі поділу метал-напівпровідник та пояснення природи такого ефекту безпосередньо причетні українські вчені — **В.І. Ляшенко**, **В.Є. Лашкарьов** та їхні співробітники ще в передвоєнні роки. Важливо підкреслити, що саме ці структури є базовими в сучасній напівпровідниковій електроніці.

На основі цих досліджень ще до війни **Василь Ляшенко** підготував докторську дисертацію, але війна зашкодила її захисту. Результати цих досліджень **пізніше** були ретельно проаналізовані **С.І. Пекарем** у докторській дисертації.

На жаль, ізоляційний стан наукових зв'язків та воєнні події перешкодили широкому ознайомленню світової наукової спільноти з цими інноваційними на той час результатами, і Україна, де-факто, втратила пріоритет серед низки фундаментальних відкриттів у напівпровідниковій електроніці. Зараз ми намагаємося цей пріоритет повернути [17, 18].

У наступний, вже повоєнний період, **В.І. Ляшенко** зосередив свої зусилля на "поверхневій тематиці", залучаючи до досліджень більш широке коло методів



Рис. 2. Серед студентських друзів (зліва направо: письменник Леонід Смілянський, Василь Ляшенко, Остап Губенко-Вишня)



Рис. 3. Керівництво кафедри фізики напівпровідників і спецлабораторії НВЧ радіофізичного факультету Київського університету зі співробітниками в 1950-ті роки.

Перший ряд: Н.Я. Карханіна, В.І. Ляшенко, В.Є. Лашкар'юв, Ю.І. Карханін, Г.А. Холодар, Ю.І. Грищенко;
другий ряд: І.Г. Самбур, Г.А. Зубрін, Г.П. Пека, В.І. Стріха, Р.М. Бондаренко; **третій ряд:** у центрі — В.І. Кожевін

та фізичних явищ, зокрема, на встановленні зв'язку електричних (робота виходу, приповерхнева провідність, фотоелектрична провідність, адсорбційні та каталітичні явища в напівпровідникових об'єктах). Ці роботи виконувались **В.І. Ляшенком** разом із новими, післявоєнними, співробітниками (**І.І. Степко**, **А.М. Павленко** та інші), а від 1950-х років — разом із **О.В. Снітком**, **В.Г. Литовченком** та деякими іншими.

За цими результатами опубліковано велику кількість принципів робіт, серед яких особливе місце посідає оглядова стаття, написана **В.І. Ляшенком** разом із **В.Є. Лашкар'ювим**, що вийшла в Ювілейному збірнику, присвяченому 70-річчю академіка **А.Ф. Йоффе** в 1950 році [3]. Результати роботи були виконані практично одночасно з відомими фундаментальними публікаціями з електроадсорбційних явищ, дослідженими **Бардиним** та **Бреттеном**. У цих роботах було встановлено екранування зовнішнього поля та дипольного поля адсорбованих молекул зарядженими поверхневими центрами. На початку дослідів київських авторів були виконані на традиційних фоточутливих напівпровідниках (Cu_2O , CdS), тоді як західні вчені почали дослідження моноатомних напівпровідникових матеріалів — германію та кремнію. Саме на цих непрямозонних напівпровідниках з великою LD (довжиною дифузії електронів), як відомо, **Шоклі**, **Бардин** та **Бреттен** відкрили в 1947 році транзисторний ефект (використовуючи контактне поле в двох сусідніх металічних точкових електродах). У той же час, фоточутливі багатокомпонентні II—VI,

III—V та інші інтерметалічні сполуки стали в майбутньому базовими при створенні НВЧ-приладів, фотоприймачів, лазерів високоефективних сонячних батарей та інших сучасних напівпровідникових приладів.

В.І. Ляшенка цікавило при постановці цих дослідів фундаментальне питання — який механізм електричної дії адсорбційних молекул у випадку так званої реальної (вкритої тонким природним захисним шаром окислу) домінує: вплив колективного заряду вільних носіїв (як уважав відомий теоретик **Ф.Ф. Волькенштейн**) чи заряду локальних центрів. Для цього були досліджені ізотерми електроадсорбції на добре відтворюваній реальній поверхні германію (спільно зі співробітниками **І.І. Степко**, **В.Г. Литовченком**, **Г.П. Романовою**, **А.А. Сербюю**) [4—12].

Відомо, що за типом ізотерми можна визначити характер адсорбційності поверхні, а за енергетичними параметрами ізотерми — ідентифікувати енергетичні характеристики системи “адатом—поверхня”. Отже, були класифіковані стани реальної поверхні:

- 1) гомогенна чи гетерогенна;
- 2) тип зарядності (донорна чи акцепторна) поверхні напівпровідника (не пов'язані з дипольним моментом);
- 3) були ідентифіковані параметри адсорбційних центрів: глибоких (міцно зв'язаних молекул водневого типу — спирти ($E = 0,3 \text{ eV}$), більш слабо зв'язаних (ацетон — $0,22 \text{ eV}$) та слабо зв'язаних (CO , $E = -0,1 \text{ eV}$, акцептор).

Гетерогенна поверхня означає, що центри адсорбції не взаємодіють, а мають певну функцію розподілу центрів по енергії $\Phi(Ea)$. Така поверхня описується ізотермою Фрейндліха—Сіпса, що має вигляд досить різкої залежності зміни заряду поверхні від парціального тиску p з насиченням при досягненні одного чи декількох таких моношарових покриттів ($\theta = 1, 2, 3 \dots$):

$$n_a/NT_a = P(p)/(p+N_f/4kT \cdot e^{-Ea/kT})^m,$$

де m — порядок адсорбції, а параметр ізотерми $p^* = N_f/4kT \cdot e^{-Ea/kT}$ задає енергію адсорбційного центра. В той же час, квазігомогенна поверхня (молекули взаємодіють) характеризується більш плавною ($n_a \sim t \ln P$) ізотермою Тьомкіна-Брунауера

$$p = C \cdot e^{-n_a/NT_a},$$

що пов'язане з поступовим зарядженням все менш активних адсорбційних центрів відповідно до міри збільшення тиску P . І лише при великих тисках газу P спостерігається тенденція до насичення при повному заповненні центрів: $n_a \sim N_f$. Було з'ясовано, що свіжа протравлена та очищена прогрівом у вакуумі поверхня кремнію, германію та ін. монокристалічних напівпровідників, як правило, є гетерогенною, тоді як стара та окислена — є більш гомогенною, n_a стає досить слабозмінною [9—11]. Фундаментальним результатом для формування селективного напівпровідникового газового сенсора був висновок, що значення енергії активації адсорбцентрів істотно відрізнялись для різних типів молекул і майже не змінювались в процесі старіння поверхні на повітрі.

Наступний цикл робіт, виконаний **В.І. Ляшенком** із групою молодих співробітників (**О.В. Снітко**, **В.Г. Литовченко**, **А.П. Горбань**, **Р.О. Литвинов**, **В.С. Лисенко**) з дослідження поверхні найбільш актуальних на той час напівпровідників — германію та кремнію — методами ефекту поля, віброуючого електроду (контактного потенціалу) та фото стимульованих нерівноважних ефектів (фото потенціалу або так званої конденсаторної фото-ерс, фотопровідності, фотомагнітної та демберівської фото-ерс). Були встановлені основні параметри поверхневих центрів (енергія активації, перерізи захоплення, густина), що є характерними для реальної поверхні. На основі цих досліджень була висунута так звана трьохшарова модель реальної поверхні, в якій центри мають природу, близьку до радіаційно-стимульованих центрів [12].

У дослідах на однокомпонентних напівпровідниках (на тонких зразках германію та кремнію) було відкрито важливий ефект — прилипання нерівноважних фотоносіїв на поверхні (**В.І. Ляшенко**, **В.Г. Литовченко**, **О.В. Снітко**), що виявилось істотним вже при кімнатній температурі [14]. Цей цикл робіт був узагальнений в монографії [15] в 1968 р. (рис. 4), за яку **В.І. Ляшенку** та його співробітникам була присуджена Державна премія УРСР в галузі науки і техніки (1970 р.).



Рис. 4. Одна з перших монографій з фізики поверхні напівпровідників (1968 р.): **В.І. Ляшенко**, **В.Г. Литовченко**, **В.І. Стриха**, **Л.В. Ляшенко**, **І.І. Степко**.
Электронные явления на поверхности полупроводников

Отже в 60—70-ті роки минулого століття школою, якою керував **В.І. Ляшенко**, були закладені основи фізики реальної поверхні напівпровідників (монокристалічних — непрямозонних кристалів типу Ge і Si, та двокомпонентних A_2B_6 , CdS, CuO). Зокрема було експериментально доведено існування поверхневих електронних станів (ПЕС) та встановлено їхній енергетичний спектр (для деяких він є дискретним, для інших — неперервним). У результаті були пояснені основні закономірності фотоелектричних явищ (фотопровідність, фото-ерс, фотоємність та ін.) в наближенні квазірівноваги в ОПЗ (постійність квазірівнів Фермі в ОПЗ при умові суттєвого перевищення дифузійної довжини нерівноважних носіїв заряду над дебаєвською довжиною екранування) [5—16].

Було також досліджено істотний вплив поверхні на параметри приладів твердотільної електроніки (діодів, транзисторів, інтегральних схем). У відділі **В.І. Ляшенка** були створені прилади, дія яких базувалась на так званих поверхневих ефектах, а саме, координатно чутливий кремнієвий фотоприймач та сонячний елемент на основі нової конструкції поверхневого (комбінованого) p - n переходу на контакті метал-напівпровідник, сенсор газового середовища (**А.П. Горбань**, **А.А. Серба**, **В.П. Костильов** та інші).

Під керівництвом **В.І. Ляшенка** було також розроблено корисні методи визначення електронних параметрів поверхні полярних напівпровідників (а також параметрів меж поділу напівпровідник—метал та діелектрик), а саме, а) визначення поверхневих бар'єрів методом Кельвіна, б) рухливості, залежно від

поверхневого потенціалу (тобто поверхневий вигин зон), в) отримана таблиця енергетичних спектрів поверхневих рівнів, встановлені локальні властивості та інше [6–12].

Багато результатів досліджень, виконаних представниками наукової школи **В.І. Ляшенка**, знайшли значне практичне застосування і були узагальнені в першій в СРСР монографії із фізики поверхні [15]. Зокрема, це стосується відкриттів поверхневих люмінесценції та дослідження поверхневих екситонів, їх конденсації та поверхневої рідкої плазми (**В.Г. Литовченко, В.О. Зуєв, Д.В. Корбутяк, Г.О. Сукач**, [14]), відкриття прискореного планарного гетероїзмовання та інженерія ефективних каталізаторів на основі кластерів оксидів перехідних металів (**Б.М. Романюк, В.М. Попов, Т.І. Горбанюк**), керованої самоорганізації при формуванні нанорозмірного матеріалу (**В.П. Мельник, І.П. Лісовський**).

Останній цикл робіт **В.І. Ляшенка** був присвячений дослідженню фотоелектричних явищ прямозонних напівпровідників зі змішаним іонно-ковалентним типом хімічного зв'язку (GaAs, CdS та ін.), вплив на їхні властивості приповерхневої. Ці роботи були виконані на складних, двокомпонентних (III–V та ін.) напівпровідниках разом із групою співробітників (**М.Л. Дмитрук, Т.М. Ситенко, О.Ю. Борковська** та інші). В результаті були пояснені основні закономірності фотоелектричних явищ (фотопровідність, фото-ерс, фото ємність та ін.) в наближенні квазірівноваги в ОПЗ (постійність квазірівнів Фермі в ОПЗ при умові суттєвого перевищення дифузійної довжини нерівноважних носіїв заряду над дебаєвською довжиною екранування) [16, 17].

На особливу увагу заслуговує внесок **В.І. Ляшенка** в освітню та наукову діяльність у Київському університеті після війни. Починаючи від 1957 року, він

читає в університеті основний курс зі спеціалізації “фізика напівпровідників”. Під його керівництвом (або за його консультативної допомоги) було виконано декілька кандидатських дисертацій, а саме — **В.І. Стрихою** (з проблеми впливу поверхні на параметри точкових діодних структур), **В.М. Добровольським** (процеси розсіювання вільних електронів в тонкоплівкових та поверхневих шарах), **В.А. Бродовим** (вплив поверхні на характеристики багатокомпонентних напівпровідників) тощо. Тому не дивно, що саме **Віталію Іларіоновичу Стріці** Василь Іванович запропонував написати окремий розділ до монографії [15] за матеріалами, отриманими в очолюваній школі, а саме, про особливості електричних процесів у діодних структурах з реальною поверхнею. Оригінальність здобутих **В.І. Стрихою** результатів полягала в узагальненні моделі контакту метал—напівпровідник Шоттки, а саме 1) у введенні проміжного тунельно-прозорого квазідіелектричного шару; 2) у врахуванні поверхневих локальних рівнів та їх перезарядки; 3) у врахуванні поляризаційних сил на границях метал—діелектрик та діелектрик—напівпровідник у точковому контакті; 4) у врахуванні впливу розмірного квантування в полі приконтактного просторового заряду.

Врахування цих ефектів створює додаткові можливості для формування нових характеристик НВЧ-приладів, а саме, приладів енергонезалежної пам'яті, газочутливих сенсорів, надчутливих НВЧ-сенсори та інших. Окрема публікація щодо використання перелічених механізмів була згодом вміщена в ювілейному випуску Українського фізичного журналу “Золоті сторінки української фізики”.

Наукові праці школи **В.І. Ляшенка** і тепер активно продовжуються дослідниками Інституту фізики напівпровідників НАН України та іншими академічними й університетськими колегами [18]. ■

Література

1. Ляшенко В. Випростувач із сполуками заліза // Українські фізичні записки ВУАН. — 1935. — Т. 111. — вип. 2. — С. 43–51.
2. Ляшенко В.І., Федорус Г.А. Высоковольтная поляризация в записи меди и селене при низких температурах // ЖЭТФ.—1938. — т. 8, № 7. — С. 818–824; Известия АН СССР, Математич. и естеств. науки.—1938.— С. 641–650.
3. Лашкарёв В.Е., Ляшенко В.И. Электронные состояния на поверхности полупроводника. Сборник, посвященный 70-летию А.Ф. Иоффе. —М.-Л., Изд. АН СССР, 1950.
4. Ляшенко В.И., Романова Г.Ф., Степко И.И. Изменения Ук-поверхности германия при адсорбции и катализе. — Проблемы кинетики и катализа, 1958. — С. 11–116.
5. Brattain W., Bardeen J. Bell Syst. Techn. Journal. 1953. —Vol. 32, is. 1.
6. Ляшенко В.И., Степко И.И. Влияние адсорбции на поверхностные заряды и проводимость полупроводника // Изв. АН СССР, сер. физ.— 1952.—16.—С. 211.
7. Ляшенко В.И. Изменение работы выхода и проводимости у сернистого молибдена под влиянием адсорбции // Труды Института физики АН УССР.—1953.— 4.— С. 33.
8. Ляшенко В.И., Снитко И.И. Влияние адсорбции молекул и внешнего электрического поля на фотопроводимость полупроводников// Радиотехника и электроника. Том II, -1957.— вып.3.— С. 269–277.
9. Ляшенко В.И., Литовченко В.Г. Влияние адсорбции молекул на работу выхода и проводимость германия // ЖТФ.—1958.— т. 28, в.3.—С. 448–460.
10. Литовченко В.Г., Ляшенко В.И., Фролов О.С., Исследование электрофизических свойств поверхности Ge // В Сб. “Поверхностные свойства полупроводников”, Изд. АН СССР.— 1962.— С. 147–164.
11. Литовченко В.Г. Сб. Полупров. техн. и микроэл.—1972, в. 9.— С. 92–126; ЖФХ.—1978.—70, № 12.—С. 3063–3070.
12. Литовченко В.Г., Ляшенко В.И., Фролов О.С. Метод визначення поверхневого потенціалу на напівпровідниках у широкому діапазоні питомих опорів // Укр. физ. ж.—1965. — 10, № 12. — С. 1334.
13. Литовченко В.Г., Ляшенко В.И. Прилипание неравно-весных носителей на поверхности Ge // ФТТ.—1962.— т. 4, в. 8. — С. 1985–1993.
14. Дмитрук Н.Л., Ляшенко В.И., Терещенко А.К., Зуев В.А. Фотоэлектрические явления в приповерхностной области арсенида галлия // ФТП. — 1970.— т.4, № 4. — С. 654–662.
15. Ляшенко В.И., Литовченко В.Г., Стриха В.И., Ляшенко Л.В., Степко И.И. Электронные явления на поверхности полупроводников.— К. : Наукова думка, 1968.
16. Дмитрук Н.Л., Ляшенко В.И., Терещенко А.К. УФЖ.— 1972.— т. 17, № 8.— С. 1356.
17. Lytovchenko V.G., Korbutyak D.V. Luminescent properties of near-surface semiconductive layers and quantum superlattices // Ukr. J. Phys. — 2011. — Vol. 56, No. 10.
18. Litovchenko V.G., Strikha M.V. 100 Years of Semiconductor Science. The Ukrainian Contributions // European Phys. News.— 2014.— No 45/1.