

В.Г. ЛИТОВЧЕНКО

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
(*Просп. Науки, 41, Київ 03680; e-mail: lvq@isp.kiev.ua*)

МОЇ НАУКОВІ КОНТАКТИ З В.Є. ЛАШКАРЬОВИМ

1. Вступ, персональні враження

В.Є. Лашкарьов (1903–1973 рр.) – видатний учений України в галузі фізики напівпровідників та їх прикладних проблем. Основні досягнення отримано в галузі перших досліджень поверхні методом дифракції повільних електронів, досліджень фотоелектричних властивостей об'єму та поверхні напівпровідників та вивчення в них термоелектричних ефектів. Зокрема останні привели до світового рівня відкриття p - n -переходу, виготовленого на базі гетеропереходу $Cu-Cu_2O-CuO$ (публікація в *Ізв. АН ССРСР*, 1941 р.). Структури з p -переходом є до цього часу базовими для електронного приладобудування.

З академіком Вадимом Євгеновичем Лашкарьовим (рис. 1), видатним фізиком ХХ століття, я вперше познайомився в 1953 році, коли він читав спецкурс з фізики та електроніки напівпровідників студентам 5-го курсу радіофізичного факультету Київського Університету, куди я був зарахований (у середині 1953 року), під час формування цього нового факультету (до цього я навчався на фізичному факультеті). При розподілі студентів по спеціалізаціях мене відібрав у теоретичну спеціальність академік С.І. Пекар, чим, зізнаюсь, я був засмучений, бо вже з другого курсу, як волонтер, добровільно відвідував напівпровідникові лабораторії з вакуумними постами, великими електромагнітами, технологічними пічками, в яких молоді викладачі та старші студенти – “випікали” всілякі оксидні напівпровідники – вишневого, яскраво синього, чорного, зеленого – різних кольорів. Завдяки цьому я був представлений В.Є. Лашкарьову,

До 110 річчя з дня народження В.Є. Лашкарьова

який посприяв переведенню мене на його кафедру. Для мене це скінчилось дуже прискіпливою задачею курсу лекцій С.І. Пекаря по квантовій механіці (десь близько двох годин), зрештою, з відмінною оцінкою.

В.Є. Лашкарьов же, після закінчення навчання в Університеті, зарахував мене, разом з моїм другом по курсу Віталієм Стріхою, до престижної новоствореної НВЧ спецлабораторії, спочатку інженером, а через семестр – старшим інженером (підставою було те, що, крім необхідності заповнити вакансії, я отримав червоний диплом відмінника).

Згадую з подякою, як фахово і інформативно проводив В.Є. Лашкарьов семінари – навчав якісно реферувати наукові журнали, особисто пропо-



Рис. 1. Академік АН УССР В.Є. Лашкарьов

© В.Г. ЛИТОВЧЕНКО, 2014



Рис. 2. На засіданні наукового семінару в кабінеті В.Є. Лашкарьова (1960 р.) (зліва направо: В.І. Ляшенко, Г.В. Лашкарьов, І.М. Дикман, В.Г. Литовченко, М.К. Шейнкман, Г.А. Федорус, К.Д. Глінчук, Н.Б. Лук'янчикова, В.Є. Лашкарьов)

нуючи статті по самих нових досягненнях транзисторної фізики та техніки. Студенти захоплено дослухались до його коментарів, порад, навчалися високій культурі спілкування, поваги до осіб різного рангу. В цьому я ще більш впевнився, коли працював у згаданій лабораторії Університету – він підтримував йому одному помітне нове і значне. І вмів без образ відкинути незначне, що тільки відволікало.

Отже, моя праця в Університеті проходила в лабораторії НВЧ, керівником якої був В.Є. Лашкарьов, а замісником – трохи старша від нас (на 2 курси) Наталя Миколаївна Омеляновська, інтелегентна та доброзичлива жінка. Згодом довгий час цю унікальну лабораторію очолював Віталій Ілларионович Стріха, який сформував для неї оригінальний та перспективний напрям – фізика реальних контактів метал–напівпровідник.

Звичайно, в лабораторії були також і фахові обслуговуючі співробітники І. Радзієвський, Г. Зарубін, сором'язлива лаборантка Дарія Михайлівна та ін.

2. Дослідження з фізики поверхні напівпровідникових НВЧ детекторів, виконані під керівництвом В.Є. Лашкарьова

Мені доручили ділянку по дослідженню електричних властивостей германієвого та кремнієвого матеріалу, з якого виготовлювались точкові НВЧ детектори. Моєму тепер уже колезі – Віталію Стрі-

сі – ділянку по вимірюванню та дослідженню параметрів цих діодів, випростувачів для радіолокаторів. Трохи за нас старший Револьт Миколаєвич Бондаренко відповідав за технологію. Тобто НВЧ лабораторія працювала на повну потужність вже майже з самого початку її заснування передусім завдяки великому впливу В.Є. Лашкарьова, одного з найдосвідченіших напівпровідниковців світового масштабу. Близько за півтора року, маючи оптимальні умови для творчої праці, я (у співпраці з співробітниками цієї нової НВЧ лабораторії В.І. Стріхою та В.М. Добровольським) виконав два цикла робіт: 1) з фізики поверхні в точкових контактах напівпровідників з металічним електродом, тобто, в НВЧ точкових діодах; та 2) з фізики легування “промислових” напівпровідників – германія та кремнію. Це були одні з перших (а деякі й перші) результати з фізики промислово важливих напівпровідників. Зокрема це стосується досліджень реальної поверхні напівпровідників – напрямку фізики твердого тіла, що тільки починався розвиватись.

На рис. 2 подане фото засідання наукового семінару В.Є. Лашкарьова на початку 60-х років, в якому я брав участь як активний учасник. Хочу звернути увагу на велику кількість молодих науковців, яких активно залучав В.Є. Лашкарьов до обговорень на семінарах, які він проводив.

Слід відзначити, що дослідження В.Є. Лашкарьова в галузі напівпровідників (термоелектричних, фотоелектричних, рентгенівських властивостей) розпочались ще в 1939–1941 роках в Інституті фізики АН України та Київському державному Університеті. Досліджувались широкзонні напівпровідники, переважно з прямозонною структурою з великим внеском іонного зв'язку (оксидні CuO , Cu_2O , ZnO , Fe_2O_3 , SeO_x , Ag_2S_3 та ін.).

Дослідження властивостей поверхні спочатку проводились переважно на плоскому контакті метал–напівпровідник В.Є. Лашкарьовим разом з досвідченими фізиками В.І. Ляшенко, Г.А. Федорусом, а результати були опубліковані у відомих фізичних журналах – в ЖЭТФ; Изв. АН та ін. (1938–1941 рр.). Вже тоді В.Є. Лашкарьов виконав прекрасний цикл досліджень по конденсаторній фото-ерс та по термо-ерс точкового контакту. Саме останні дослідження привели до видатного відкриття В.Є. Лашкарьовим в 1940 році – відкриття бар'єрної структури p - n -переходу, яка стано-

вить основу сучасної напівпровідникової електроніки.

Дослідження В.Є. Лашкарьова в післявоєнні роки було також пов'язано з прямозонними напівпровідниками, переважно – fotocутливими III-V (CdS, CdSe, CaTe, InSb та ін.), хоча за його увагою не залишилися матеріали прикладної електроніки – германій та кремній, тобто напівпровідники з валентним зв'язком та з алмазоподібною кристалічною структурою.

Поштовхом для активних досліджень Ge було відкриття “поверхневого транзистора” (1947 р.), виготовленого на напівпровідникових структурах з плоскою, хімічно травленою поверхнею з суміжними точковими контактами.

Поштовх для досліджень більш хімічно стійкого напівпровідника кремнія дали розробки планарної технології, а також створення польового транзистора на основі SiO₂-Si структури. Кремнієві транзистори вперше були запропоновані в 1957 році фірмою BELL.

Нижче наведемо декілька результатів, отриманих згаданими вже співробітниками НВЧ лабораторії (Н. Омеляновською, В. Литовченко, В. Стріхою, Р. Бондаренко та ін.) у співавторстві або під керівництвом В.Є. Лашкарьова.

У перших наших публікаціях було досліджено **властивості поверхні германія та кремнію в точковому контакті**, описана повільна зарядка-розрядка поверхневих станів широко вживаного точкового НВЧ діода конструкції: “бронзова голка – хімічно оброблена реальна поверхня германія”. Виявлено визначальний вплив поверхневих станів на величину бар'єра та на поверхневі фотоэффекти: конденсаторну фото-ерс, а також на провідність тонких пластин (так званий ефект поля). Ці досліді стали базовими при формуванні загальної тематики названої спеціальної лабораторії на всі наступні роки.

Згодом, після мого вступу до аспірантури в Інститут фізики Академії наук України (1957 рік), я провів дослідження поверхні германія та кремнію під керівництвом професора Василя Івановича Ляшенко, замісника В.Є. Лашкарьова по відділу, при активному і частому спілкуванні та обговоренні з В.Є. Лашкарьовим отриманих результатів.

Як приклад цього згадується активна участь В.Є. Лашкарьова у обговоренні дискусійних питань, ініційованих новосибірськими фізиками

(очолованими А.В. Ржановим) про природу поверхневих фотоэффектів, про вплив поверхневої області просторового заряду та прилипання фотоносіїв на поверхні напівпровідників, про особливості кінетики фотопровідності та про природу фотовольтаїчних ефектів в умовах сильного впливу поверхні, рекомбінації на ній, про дискретний чи неперервний характер енергетичного спектра поверхневих станів і т. ін. Дискусія (що розпочалась в 1965 році на школі з фізики поверхні (Ужгородський Університет, база Скалка) продовжувалась декілька років, і кінець їй поклав лист В.Є. Лашкарьова до А.В. Ржанова, теж директора (Новосибірського Інституту напівпровідників), де, після детального з нами обговорення, Вадим Євгенович чітко виклав фізичну суть позиції киян на природу та відмінності поверхневих фотоэффектів від об'ємних. Суть відмінності полягала у локалізації поверхневого захопленого заряду та формуванні ізольованих поверхневих бар'єрів, що відсутні у випадку об'єму. В листі-відповіді В.Є. Лашкарьов дипломатично написав: ми прийшли до висновку, що наші фізики правильно розуміють фізику досліджуваних явищ, а розходження з вами, на нашу думку, носять скоріше термінологічний характер.

3. Дослідження рекомбінаційних властивостей легованого германію

Наступний етап досліджень та цикл публікацій з авторством В.Є. Лашкарьова були викладені в центральних академічних фізичних журналах: ЖТФ, 1957 р., ФТТ, 1959 р., УФЖ, 1959 р.). Було отримано нові результати з легування германію мілкою донорною домішкою групи V антимоніду (Sb), та акцепторною домішкою – берилію (Be), групи II. А саме, було показано, що досліджені добре розчинні домішки вводять мілкі рівні (центри), що в першу чергу зсуває об'ємний рівень Фермі. Причому сурма не вводить додаткових рекомбінаційних центрів, а лише впливає на зростання рекомбінації через зміну заповнення зарядами вже існуючого “власного” центра, ймовірно, пов'язаного з комплексами структурних дефектів, що виникають при рості кристала. Тоді як інша картина реалізується для берилію, додатково до цього механізму, берилій також вводить нові рекомбінаційні рівні, тому не є бажаною легуючою домішкою.



Рис. 3. Керівник Відділення – член-кореспондент НАН України, професор В.Г. Литовченко

Перша робота, опублікована разом з В.Є. Лашкар'ювим у центральному журналі в 1957 році (ЖТФ, 1957 р., т. 27, в. 11, с. 2437), мала назву: “Зависимость времени жизни сторонних носителей тока от концентрации примеси сурьми в германий”, В.Є. Лашкар'юв, В.Г. Литовченко, І.М. Омеляновська, Р.М. Бондаренко і В.І. Стріха. Її значення полягало в тому, що для роботи біполярних напівпровідникових приладів важливу роль відіграє така характеристика матеріала, як час життя збуджених носіїв струму. Було відомо, що введення домішок у германий (наприклад, нікелю, заліза, сурьми та деяких інших), різко зменшує величину часу життя, але не була з'ясована природа цих змін. У даній роботі вперше вплив домішок сурьми досліджувався в широкому діапазоні концентрацій цієї домішки, тому була ідентифікована природа змін часу життя носіїв струму.

У роботах, що були виконані незабаром під керівництвом В.Є. Лашкар'юва (УФЖ, 1959 р., т. 4, № 3, с. 372–375. “Властивості германію з домішкою берилію” автори В.Є. Лашкар'юв, Р.М. Бондаренко, В.М. Добровольський, Г.П. Зубрін, В.Г. Литовченко, В.І. Стріха), досліджувався германий, легований елементом другої групи системи Менделєєва – берилієм. Вирощування кристалів германію провадилося методом Чохральського. Одержані монокристали германія мали передбачений розрахунками питомий опір. З'ясувалась також дуже висока розчинність берилію, а саме, максимальна розчинність берилію при температурі затвердіння розплаву досягала 10^{19} см^{-3} .

Детальне дослідження германія, легованого берилієм, було описано в роботі, опублікованій в новому на той час центральному академічному журналі “Фізика Твердого Тіла” (ФТТ), 1959 р., (збірник. ст. № 2, с. 39–46): “Электрические и рекомбинационные свойства германия с примесью бериллия”, В.Є. Лашкар'юв, Р.М. Бондаренко, В.М. Добровольський, Г.П. Зубрін, В.Г. Литовченко і В.І. Стріха.

4. Висновки

Підсумуємо описані вище матеріали по дослідженню поверхні та рекомбінації в германії, виконані під безпосереднім керівництвом В.Є. Лашкар'юва:

1. Вперше встановлено важливий вплив поверхневих ефектів (зарядження поверхневих рівнів, наявність проміжного діелектричного шару, зміна потенціального бар'єра) на роботу точкових НВЧ діодів.

2. Отримано оригінальний результат з легування германія мілкою донорною домішкою групи V – антимонід (Sb). Показано, що ця широко вживана домішка не є рекомбінаційною, а формує мілкі легуючі донори. Рекомбінацію забезпечує інший центр, з глибоким рівнем 0,22 еВ, який в основі має структурний дефект, що завжди присутній для прийнятої технології виготовлення германія (метод Чохральського).

3. Вперше досліджено рекомбінацію сильно розчинного в германії акцепторного елемента групи II берилію (Be). Встановлено, що Be є двозарядною домішкою, тому формує 2 рівні: мілкий $E_v = 0,07 \text{ еВ}$ (легуючий) та глибокий $E_v \sim 0,17 \text{ еВ}$, що є рекомбінаційним.

4. Показана надвисока ефективність легування берилієм завдяки високій його розчинності (10^{19} см^{-3}). Встановлено механізм цього ефекту – малий розмір атомів Be ($r_a \sim 1 \text{ \AA}$), завдяки чому він легко вбудовується у вузли ґратки без її істотної деформації.

Фізичні ефекти та об'єкти досліджень, які запропонував В.Є. Лашкар'юв, залишаються актуальними і нині, і повністю відповідають світовому рівню напівпровідникової науки.

1. Н.М. Омеляновська, В.Г. Литовченко, В.І. Стріха, Р.М. Бондаренко, *Довгочасові інерційні явища на точковому германієвому контакті* (Науковий щорічник за 1956 рік, Видавництво Київського університету, 1957.)

2. В.І. Стріха, Р.М. Бондаренко, Н.М. Омеляновська, В.Г. Литовченко, *Вплив питомого опору і об'ємного часу життя носіїв струму матеріалу на струмову чутливість детекторів сантиметрового діапазону* (Вісник Київського Університету, Серія Фізика та хімія, 1958).
3. В.Є. Лашкарьов, В.Г. Литовченко, Н.М. Омеляновська, Р.М. Бондаренко, В.І. Стріха, *Залежність часу життя сторонніх носіїв струму від концентрації домішки сурми в германії* (Вісник Київського Університету, Серія Фізика та хімія, 1958).
4. В.Е. Лашкарёв, В.Г. Литовченко, Н.М. Омеляновская, Р.Н. Бондаренко, В.И. Стриха, *ЖТФ* **27**, 2437 (1957).
5. В.Є. Лашкарьов, Р.М. Бондаренко, В.М. Добровольський, Г.П. Зубрін, В.Г. Литовченко, В.І. Стріха, *УФЖ* **4**, 372 (1959).
6. В.Е. Лашкарёв, Р.Н. Бондаренко, В.Н. Добровольский, Г.П. Зубрин, В.Г. Литовченко, В.И. Стриха, *ФТТ* **2**, 39 (1959).
- 1958, *Журнал технической физики*, Том XXVIII, в. 3. (Авторы выражают признательность руководителю Отдела академику АН УССР В.Е. Лашкарёву и К.Б. Толпыго за обсуждение этой работы).
2. В.Н. Добровольский, В.Г. Литовченко, К расчёту объёмного времени жизни и скорости поверхностной рекомбинации носителей тока, Киевский государственный университет, ПТЭ, № 6, 1959.
3. В.Г. Литовченко, Розрахунок швидкості поверхневої рекомбінації та об'ємного часу життя носіїв струму у випадку несиметричних граничних умов, *УФЖ*, т. IV, № 3, 1959.
4. В.Г. Литовченко, Исследование быстрых поверхностных состояний кремния, *ФТТ*, 1959. Окремий випуск.
5. В.Г. Литовченко и О.В. Снитко, Длинновременные изменения эффекта поля в кремнии, *ФТТ*, Том II, в. 5. 1960.
6. В.Г. Литовченко и О.В. Снитко, Поверхностные свойства кремния. *ФТТ*, Том II, в. 4. 1960.
7. V.G. Litovchenko, The kinetics and amplitude characteristics of the small field effect at semiconductor surfaces during steady state illumination, *Surf. Sci.* **1**, 291 (1964).
8. В.Г. Литовченко, В.Г. Попов, *Физика поверхности и микроэлектроника. Новое в жизни науки и техники. Знание*, Физика, серия 1'90.

Одержано 29.01.14

**Публікації, які обговорювались
або ініціювались В.Є. Лашкарьовим**

1. В.И. Ляшенко и В.Г. Литовченко, Влияние адсорбции молекул на работу выхода и проводимость германия (1. Амплитудные характеристики; 2. Кинетика процесса),