

М.В. СТРИХА

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України  
(*Просп. Науки, 41, Київ 03680; e-mail: maksym\_strikha@hotmail.com*)

## СТОРИЧЧЯ НАУКИ ПРО НАПІВПРОВІДНИКИ: ВИТОКИ І УКРАЇНСЬКИЙ ВНЕСОК

*Дано огляд експериментальних фактів та теоретичних гіпотез, які на початку ХХ століття привели до появи нової галузі знань – науки про напівпровідники. Показано, що поняття про напівпровідники як окремих клас матеріалів уперше чітко сформулював Йоганн Кенігсбергер (1914 р.) на основі оригінальної гіпотези про “дисоціативний механізм” провідності. Продемонстровано пріоритет українського вченого Вадима Лашкарьова у відкритті р–п-переходу, що лежить в основі приладів сучасної електроніки.*

*Ключові слова:* метали, ізолятори, напівпровідники, провідність, зонна теорія, електроніка.

### 1. Вступ

Скільки років науці про напівпровідники? На це просте запитання не відразу дадуть відповіді навіть ті, хто все своє життя пропрацювали в цій галузі. Адже з окремими напівпровідниками (наприклад, з кремнієм) люди мали справу з давніх-давен – щоправда, не в їхній “електричній іпостасі”. Починаючи з XVIII століття, учені активно вивчали електричні властивості різних матеріалів, які ми сьогодні називаємо напівпровідниковими. Але, де та межа, яка відокремлює розрізнені емпіричні спостереження від напівпровідникової науки з власним чітко окресленим предметом дослідження? Коли фізики почали чітко виокремлювати напівпровідники як окремих клас матеріалів? Відповідь на це запитання спробуємо дати далі на основі огляду експериментальних фактів та теоретичних гіпотез, які накопичувалися упродовж тривалого часу й на початку ХХ століття привели до появи нової галузі знань – науки про напівпровідники.

### 2. Провідники й ізолятори

У 1729 р. англієць Стівен Грей (1679–1736 рр.) відкрив явище електропровідності [1]. Він узяв скляну пляшку і закрив її корком, у який ввіткнув металевий стрижень з кулькою зі слонової кістки на кінці. Потім він наелектризував пляшку клаптом сукна. Виявилось, що електрика перейшла з пля-

шки на кульку – це можна було визначити з притягування до неї дрібних порошин, клаптів паперу тощо.

Продовжуючи дослід, Грей встановив, що електрику добре проводять не лише металеві дроти, а й вугільні стрижні, м’язи людини і тварин. При цьому, почавши від коротких металевих стрижнів, учений довів наявність провідності в дротів довжиною до 250 метрів. Він пересвідчився: електрика однаково легко перетікає як горизонтальними, так і вертикальними провідниками (тоді електрику уявляли як особливу рідину, і досліджуваний Греєм факт, відтак, вимагав експериментальної перевірки).

Водночас Грей встановив: не проводять каучук, віск, шовкові нитки і порцеляна, які можуть слугувати ізоляторами, що перешкоджають витоковій електрики. Про свої дослідження вчений повідомив у листі до Королівського товариства від 8 лютого 1731 р. Проте, причини такої відмінності в поведінці різних речовин учений пояснити, звісно ж, не міг.

Як стверджує у своїй інформативній розвідці з ранньої історії напівпровідників Георг Буш [2], саме слово “напівпровідник” вперше вжив славетний італійський вчений Алессандро Вольта (1745–1827 рр.) у доповіді перед Лондонським Королівським товариством 14 березня 1782 р. Доторкаючись до електрометра різними предметами, він встановив, що доторк металу призводить до миттєвого розряду електрометра, доторк діелектрика не

розряджає електрометра зовсім, але існують певні матеріали, через які електрометр теж розряджається, але упродовж певного скінченного часу. Їх Вольта й назвав “напівпровідниками”.

У 1800 р., поставивши одне на одне понад сто металевих (цинк і срібло) кружалець, розділених змоченим солоною водою папером, Вольта отримав досить потужне джерело електрики – “вольтів стовп”. На противагу попереднім джерелам електрики, в основі яких лежала електризація тертям, “вольтів стовп” діяв не одну мить розряду, а постійно, що відкрило величезні можливості перед фізиками й інженерами. Використовуючи щойно відкриту термопару (вона давала стабільнішу напругу, аніж “вольтів стовп”), німецький учений Георг Симон Ом (1787–1854 рр.) зумів, урешті-решт, 1826 р. встановити основний закон електричних кіл, названий його ім'ям.

### 3. Напівпровідники: перші експериментальні факти

Використовуючи “вольтів стовп”, англійський фізико-хімік Гемфрі Деві (1778–1829 рр.) у 1821 р. встановив факт залежності електричної провідності від температури, причому зі збільшенням температури провідність металів (тоді вживали термін “сила провідності” – “conducting power”) зменшувалася. Геніальний учень Деві Майкл Фарадей (1791–1867 рр.) у 1833 р. виявив дивовижну властивість сульфиду срібла  $\text{Ag}_2\text{S}$ : при кімнатній температурі його провідність була дуже низькою, однак, при  $175^\circ\text{C}$  різко зростала до “металічних” значень. Таким чином, було відкрито, що провідність з температурою може в окремих речовинах зростати. На жаль, Фарадей, який віддавав перевагу якісним експериментам, не залишив при цьому жодних кількісних таблиць чи графіків.

Пізніше виявилось, що на провідність твердих тіл може впливати не лише температура, а й світло. У 1839 р. молодий французький фізик Едмон Беккерель (1820–1891 рр.), помістивши в електроліт платівку хлориду срібла з платиновими контактами, вперше спостеріг явище фотоефекту – появи напруги при освітленні. Англійський інженер Вілловбі Сміт (1828–1891 рр.) у 1873 р. встановив факт різкого зменшення опору селену при його освітленні. На цьому ефекті упродовж скоро майже півтора століття діють різноманітні експонеме-

три. Однак, фізична природа ефекту залишалась незрозумілою упродовж майже 60 років.

Наступного, 1874 р. німецький фізик і винахідник Карл Фердинанд Браун (1850–1918 рр.) відкрив те, що точковий контакт металу з сульфідом металу може бути випростувачем: пропускати струм в одному напрямку і не пропускати в іншому. Це відкриття широко застосовувалося в перших “детекторних” приймачах, які не потребували електричного живлення (й тому використовувалися в українських селах аж до 50-х років ХХ ст.). Пізніше Браун активно співпрацював з винахідником радіо Гульєльмо Марконі і їх разом було вшановано Нобелівською премією з фізики у 1909 р.

### 4. Класична теорія електропровідності

Новим потужним методом вивчення твердих тіл стало застосування ефекту Холла, відкритого американцем Едвіном Холлом (1855–1938 рр.) у 1879 р. Проте, фізична природа носіїв заряду в провідниках, які відхиляються при русі магнітним полем, все ще була незрозумілою (це питання довго лишалося відкритим, від XVIII століття вірили в існування спеціальної “електричної рідини”, здатної перетікати між тілами). У 1897 р. англійський учений Джозеф Джон Томсон (1856–1940 рр.) показав, що катодні промені складаються з негативно заряджених частинок – електронів. Так було остаточно вирішено питання про матеріальні переносники електричного струму.

На основі цих відкриттів німецький учений Пауль Друде (1863–1906 рр.) побудував класичну електронну теорію електропровідності металів (1900 р.). Згідно з нею, струм у металі переносять електрони, які поводять себе як класичний ідеальний газ. У проміжках між зіткненнями (середній час вільного пробігу між двома зіткненнями позначимо  $\tau$ ) вони рухаються вільно, пробігаючи деякий шлях  $l$ . Зіткнення електронів відбуваються переважно з іонами ґратки, і це приводить до теплової рівноваги між електронним газом і кристалічною ґраткою (в цьому полягає відмінність електронного газу від звичайного, де молекули газу розсіюються одна на одній). Середню швидкість теплового руху електронів можна оцінити як:  $\langle u \rangle \sim \sqrt{\frac{kT}{m}}$ , де  $T$  – температура,  $k$  – стала Больцмана,  $m$  – електрона. При кімнатній температурі ця швидкість за порядком величин дорів-

ноє  $10^7$  см/с. З прикладанням електричного поля з напруженістю  $E$  електрони починають рухатися з прискоренням:

$$a = \frac{e}{m}E. \quad (1)$$

Середня швидкість електронів, що переносять струм у полі, становитиме приблизно половину тієї швидкості, яку електрон набуде перед черговим зіткненням:

$$v = \frac{a\tau}{2}. \quad (2)$$

Густину струму з його “електростатичного визначення” (струм – це заряд, що проходить через одиницю перерізу за одиницю часу) легко записати як:

$$j = env. \quad (3)$$

Тут  $n$  – концентрація електронів (їх число в одиниці об’єму – його можна експериментально визначити з ефекту Холла),  $e$  – заряд одного електрона. Підставивши в цей вираз середню швидкість електронів (2), отримаємо

$$j = \frac{e^2 n \tau}{2m} E. \quad (4)$$

Цей вираз збігається з записом закону Ома для ділянки кола в диференціальній формі:

$$j = \sigma E. \quad (5)$$

Більше того, пояснивши закон Ома, теорія дала й вираз для питомої електропровідності (величини, оберненої питомому опору):

$$\sigma = \frac{e^2 n \tau}{2m}. \quad (6)$$

Оскільки концентрація електронів у всіх металах приблизно однакова, залежність провідності від температури й характеристик металу визначається середнім часом вільного пробігу. Більше того, оскільки з підвищенням температури електрони повинні розсіюватися інтенсивніше, середній час життя і провідність мають падати. Так, теорія якісно пояснила встановлене експериментально ще Деві збільшення питомого опору металів  $\rho = 1/\sigma$  з температурою (що справедливо для діапазону не надто низьких температур):

$$\rho(t) = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (7)$$

де  $t$  – температура в градусах Цельсія,  $\alpha$  – коефіцієнт пропорційності. (Аналітично формулу (7) для діапазону достатньо високих температур з урахуванням розсіяння електронів на коливаннях ґратки – фононах – отримав Фелікс Блох лише у 1930 р.).

Нарешті, на якісному рівні стала зрозуміла й різниця між металами й діелектриками: в перших є багато електронів провідності (це зумовлює їхній характерний “металічний” блиск – поверхневий заряд добре відбиває світло), у других – електронів провідності чомусь немає.

Для підтвердження теорії Друде було поставлено низку дослідів. Німецький фізик Карл Рікке в 1901 р. взяв три циліндри – два мідні й один алюмінієвий – з добре відшліфованими торцями, зважив їх і склав послідовно в коло мідь–алюміній–мідь. Через такий складений провідник протягом року безперервно пропускали постійний струм. За рік через цей провідник пройшов велетенський заряд близько  $3,42 \cdot 10^6$  Кл. Дослідження циліндрів показало, що пропускання струму не вплинуло на вагу циліндрів. Більше того, не було виявлено проникнення одного металу в інший на торцях циліндрів. Таким чином, досліди показували, що перенесення заряду в металі здійснюється не атомами, а таки електронами.

## 5. Кенігсбергер вводить поняття про новий клас матеріалів

Однак наявності матеріалів, опір яких з температурою зменшується, теорія Друде пояснити не могла. Наступний крок у спробах пояснити таку “аномалію” зробив професор Фрайбурзького університету в Німеччині Йоганн Георг Кенігсбергер (1874–1946 рр.) (рис. 1). Професор Кенігсбергер був різнобічним ученим, його праці стосувалися електричних, оптичних та термічних властивостей багатьох природних мінералів та штучних сполук. Крім того, учений цікавився спектроскопією, термічним випромінюванням і геофізичними явищами.

У роботі [3] Кенігсбергер разом з Шіллінгом показав, що температурна залежність питомого опору низки матеріалів (наприклад, титану і цирконію), має вигляд кривої з мінімумом, а опір кремнію знижується в усьому досліджуваному діапазоні температур.

Намагаючись пояснити отримані залежності, Кенігсбергер постулював, що насправді носії провідності в будь-якому матеріалі з'являються в результаті дисоціації атомів на вільні електрони та позитивні іони, кількість яких дорівнює:

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{Q}{t + 273}\right), \quad (8)$$

де величина  $Q$  пропорційна енергії дисоціації. Це припущення дозволило модифікувати вираз (7) як

$$\rho(t) = \rho_0 (1 + \alpha t) \exp\left(\frac{Q}{t + 273}\right), \quad (9)$$

що, очевидно, може пояснити криві з мінімумами з рис. 2! Хоча сам Кенігсбергер не міг запропонувати жодної моделі для визначення енергії дисоціації, однак у подальшій роботі [4] він розділив усі матеріали на метали, ізолятори і “змінні провідники” (нім. *variable Leiter*) саме за значенням  $Q$ : для ізоляторів  $Q$  прямує до нескінченності (отже, вільних електронів провідності в них немає), а для металів при високих температурах – до нуля (тому в металах число електронів провідності дорівнює числу іонів – Друде виходив саме з цього припущення). У “змінних провідниках” натомість значення  $Q$  скінченне, що приводить до експоненціального зниження їхнього питомого опору з підвищенням температури!

Слід наголосити: Кенігсбергер також експериментально показав, що значення  $Q$  у “змінних провідниках” критично залежить від ступеня їхнього очищення й наявності структурних недосконалостей досліджуваних зразків. Це дає нам змогу датувати початок науки про напівпровідники саме 1914 р. – часом появи роботи [4]. Адже відніні експериментальні факти стосувалися вже не розрізних “аномальних” матеріалів, а нового класу речовин з цілком визначеними властивостями. Цікаво, що самого терміну “напівпровідник” (нім. *Halbleiter*) Кенігсбергер при цьому не вживав. Це слово вперше застосував його студент Вейсс у захищеній 1910 р. докторській дисертації. Але навіть ця термінологічна неузгодженість не заважає оголосити саме Йоганна Кенігсбергера “батьком” сучасного поняття “напівпровідники”.

## 6. Нові експериментальні факти

Паралельно з Кенігсбергером і його учнями напівпровідникові матеріали активно вивчав також

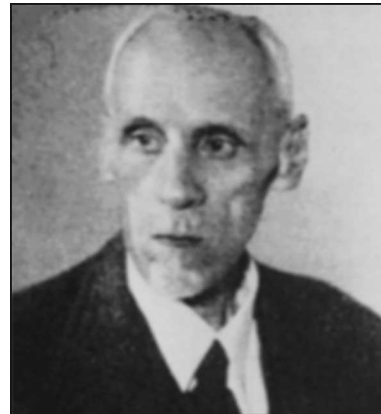


Рис. 1. Йоганн Кенігсбергер

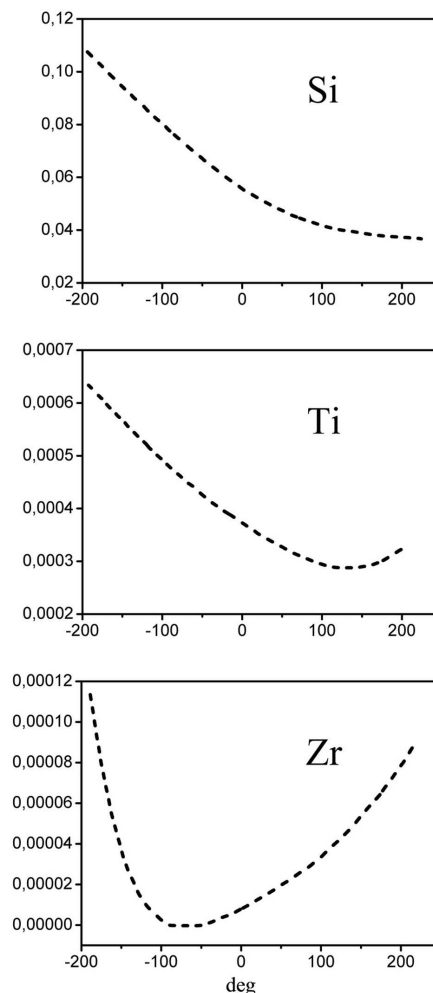


Рис. 2. Температурна залежність питомого опору Si, Ti, Zr (графіки з роботи [3])

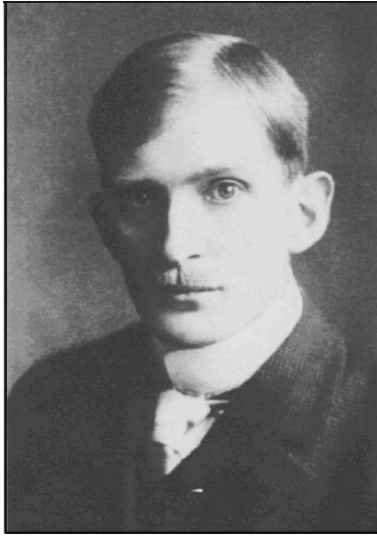


Рис. 3. Карл Бедекер

професор фізики в університеті в Йені Карл Бедекер (1877–1914 рр.) (рис. 3). Талановитий фізик, син видавця всесвітньо відомих туристичних путівників Фріца Бедекера, загинув на фронті 37-річним у перший же тиждень І-ї Світової війни. Тому його список праць короткий, але головні його роботи відзначаються великою ретельністю й піонерським підходом, а книга “Електричні явища в металічних провідниках” (1911 р.) правила за підручник ще упродовж двох десятиліть.

Чи не найбільшим “бичем” тодішнього експерименту щодо провідності була дуже погана відтворюваність результатів. У 1907 р. Бедекер запропонував новий метод виготовлення зразків. Він наносив тонкі плівки міді, срібла, кадмію, талію та свинцю на скляну або слюдяну підкладку розпоршуванням. При цьому товщину отриманої плівки учений визначав точним зважуванням. Потому ці плівки витримувалися в кисні, або ж парах сірки, селену, миш’яку чи йоду для отримання потрібних сполук.

Найцікавіші результати було отримано на йодиді міді  $\text{CuI}$ . Отримані плівки мали дуже високу, суто металічну провідність, але, залишені на повітрі при кімнатній температурі, робилися майже ізоляторами. Але поновне експонування плівки в парах йоду повертало металічну провідність, зменшуючи опір на кілька порядків. Причому такий оборотний процес можна було повторити кілька разів. Звідси

випливав очевидний висновок: провідність критично залежала від вмісту в зразку йоду.

Саме Бедекер першим виміряв ефект Холла в напівпровідниковій плівці  $\text{CuI}$ . Першою несподіванкою виявилось те, що полярність холлівської напруги була протилежною до тієї, яка, за аналогічної геометрії досліду, спостерігалася у вісмуті. Отже, слід було припустити, що струм у  $\text{CuI}$  переносять носії з позитивним зарядом! Так, було вперше виявлено діркову провідність у напівпровіднику – хоч ані слова “дірка”, ані слова “напівпровідник” вжито при цьому ще не було. Але, вимірюючи величину сталої Холла і припустивши, що струм переносять носії одного виду, Бедекер підтвердив справедливості постульованої Кенігсбергером формули (8): число носіїв справді експоненціально зростало з температурою!

У подальші роки різними дослідниками було виявлено чимало сполук із напівпровідниковими властивостями. Чи не “найпопулярнішою” з них став закис міді  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Як показав професор Геттінгенського університету Бернад Гудден (1892–1945 рр.), автор чи не першого огляду з провідності напівпровідникових сполук [5], опір різних зразків  $\text{Cu}_2\text{O}$  при кімнатній температурі міг різнитися на 6–7 порядків. При цьому провідність закису міді зростала при збільшенні тиску кисню.

## 7. Поява теорії напівпровідників

Напівпровідники поставили неабияку загадку перед теоретиками, і розгадати її класична фізика не могла принципово. У 1927 р., відразу ж після створення основ квантової механіки, Вольфганг Паулі й Енріко Фермі розробили теорію сильно виродженого електронного газу в металах, а швейцарець Фелікс Блох (1905–1983 рр.), тоді пост-док у Гейзенберга в Лейпцігу, у 1928 р. отримав загальний вигляд хвильових функцій у періодичному потенціалі і двома роками пізніше розвинув теорію температурної залежності опору металів з урахуванням розсіяння носіїв на коливаннях іонів ґратки. Він отримав відомий “класичний” граничний випадок для високих температур ( $\rho \sim T$ ) і показав, що за низьких температур може реалізуватися так званий “режим Блоха–Грюнайзена”  $\rho \sim T^5$ . Проте, Блох навіть не намагався пояснити існування металів, напівпровідників та ізоляторів.

Тому “батьком” зонної теорії твердих тіл можна по праву вважати британця Аллана Вілсона (1906–1995 рр.) (рис. 4), який, після навчання у Ролфа Фаулера в Кембріджі, стажувався на початку 30-х рр. у Лейпцігу в Гейзенберга, де й познайомився з роботами Блоха.

Дві класичні статті Вілсона [6, 7] з’явилися впродовж 1931 р. В них учений вперше запровадив звичну для нас картинку з зонами дозволених енергій і забороненими зонами поміж ними, ввів поняття “донорів” і “акцепторів”, запропонував розрізняти “власні” (*intrinsic*) і “домішкові” (*extrinsic*) напівпровідники, де провідність у першому випадку зумовлена переходами електронів між двома дозволеними зонами, а в другому – переходами з домішкового рівня в дозволену зону. Таким чином, інтуїтивно запроваджене Кенігсбергером поняття “енергії дисоціації” отримало фізичний зміст енергії забороненої зони (реально за стану тодішніх технологій – енергії термічної активації домішкового рівня), а запропонований у 1914 р. поділ на метали, діелектрики і напівпровідники отримав пояснення й підтвердження.

Варто зазначити, що остаточно поняття “дірок” як носіїв струму з позитивним зарядом було запроваджено того ж 1931 р. Вернером фон Гейзенбергом [8], який інтерпретував таким чином вільні місця у майже заповненій валентній зоні.

У ті ж роки незалежно Френкель [9], Вагнер і Шотткі [10] та Йост [11] розробили власні моделі точкових дефектів у кристалічних ґратках, які не лише дозволили описати електронну провідність іонних кристалів, а й відіграли велику роль у подальшому розвитку науки про напівпровідники. Паралельно в 1930 р. російський учений Ігор Тамм розробив квантову теорію розсіяння світла в кристалах і ввів уявлення про пружні коливання в твердому тілі (фонони). Ідея фонона містилася вже в ранніх роботах Ейнштейна (1907 р.) і Дебая (1912 р.) з теорії теплоємності твердих тіл, але сам термін належить Таммові. Так, на початку 30-х рр. було закладено підвалини теорії напівпровідників.

## 8. Матеріали, які змінили життя людства

Однак, цілковита нерозробленість технологій отримання “чистих” матеріалів аж до кінця 40-х рр.



Рис. 4. Аллан Вілсон

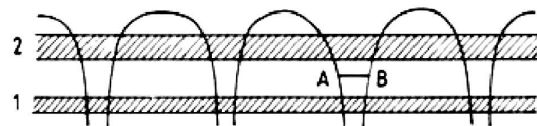


Рис. 5. Найперша зонна діаграма напівпровідника з роботи А. Вілсона

XX ст. ставила під сумнів саму можливість експериментального дослідження “власних” напівпровідників. Усі реальні тогочасні напівпровідники були “брудними”, сильно “домішковими”, а результати на них – погано відтворюваними. У [2] процитовано лист Паулі до Рудольфа Паєрлса, написаний 1931 р.: “З напівпровідниками працювати не варто, вони – суцільна плутанина, хтозна, чи існують ці напівпровідники взагалі”. Як відзначає автор [2] Георг Буш, таке ставлення до напівпровідників зберігалось загалом до кінця 30-х рр.

Таке ставлення радикально змінилося лише після винайдення американським ученим Вільямом Шоклі (1910–1989 рр.) та його колегами Джоном Бардіним (1908–1991 рр.) і Волтером Браттейном (1902–1987 рр.) (див. рис. 6) транзистора на *p-n*-переходах (1951 р.) (рис. 7). Цей винахід уможливив неймовірний технологічний прорив людства практично в усіх галузях і був вшанований Нобелівською премією 1956 р. Необхідно відзначити: працюючи над винаходом, Шоклі розв’язав диференціальні рівняння для дифузійного й дрейфового руху носіїв струму, побудував модель рекомбінації через домішкові рівні (модель Шоклі–Ріда). Отримані ним результати лягли в основу фундаментальної монографії “Електрони і дірки в напів-



Рис. 6. Джон Бардін, Вільям Шоклі, Волтер Браттейн



Рис. 7. Перший транзистор

провідниках” (1950 р.). Першу інтегральну мікросхему – два транзистори, опір і декілька конденсаторів – було зібрано 1959 р. на одному кристалі діаметра 2 см фактично вручну. Дуже швидко застосування мікросхем радикально розширило можливості людини в усіх галузях – від обчислень і зв’язку і до побутової електроніки.

### 9. Напівпровідники: український внесок

Стрімкий розвиток мікроелектроніки на початку 60-х стимулював активні дослідження в галузі фізики напівпровідників у всьому світі. Немалою мірою це було стимульовано ще й тодішньою гонкою озброєнь, яка пришвидшила розвиток науки про напівпровідники в СРСР. Так, з ініціативи учня Карла Рентгена Абрама Йоффе (1880–1960 рр.: народився в Україні в місті Ромни, у довоєнні роки був закордонним членом Наукового товариства

імені Т. Шевченка у Львові) у 1954 р. було створено Інститут напівпровідників у Ленінграді.

Проте, в Україні розвиток фізики напівпровідників почався значно раніше. Ще з 1929 р. під керівництвом засновника Інституту фізики ВУАН Олександра Гольдмана (1884–1971 рр.) тривали роботи з дослідження нових аспектів фотогальванічного ефекту Беккереля, у яких брали участь також О.Г. Миселюк, Г.А. Федорус, М.П. Лукасевич, В.К. Бернадський та інші дослідники. На жаль, 1938 р. О. Гольдмана було заарештовано за звинуваченням в “українському націоналізмі” (попри єврейське походження вченого!), і він зумів повернутися до наукової роботи лише через десятиліття у зв’язку з ув’язненням і засланням.

Слід пам’ятати: один з великих здобутків напівпровідникової науки ХХ століття пов’язаний саме з Києвом. Майбутній академік АН УРСР Вадим Лашкар’юв (1903–1974 рр.), повернувшись в Україну після відбуття заслання в Архангельську на посаду завідувача відділу напівпровідників Інституту фізики й одночасно – завідувача кафедри фізики в Київському університеті ім. Тараса Шевченка, робить головне відкриття свого життя. Досліджуючи за допомогою термозонда запірні шари міднозакисних випрямлячів, учений відкрив  $p-n$ -перехід (першу зонну діаграму  $p-n$ -переходу з роботи В. Лашкар’юва [12] наведено на рис. 8). Тоді ж учений з’ясував роль  $p-n$ -переходу у виникненні вентильного фотоелектричного ефекту – появи напруги при освітленні контакту областей напівпровідника з двома типами провідності.

Ця робота Лашкар’юва [12] за своїм науковим значенням не поступалася працям Шоклі, Бардіна й Браттейна, які були удостоєні Нобелівської премії. Адже функціонування  $p-n$ -переходу лежить в основі роботи сучасних напівпровідникових приладів – від простих випрямлячів до найскладніших інтегральних схем.

Проте, в силу низки несприятливих обставин (стаття з’явилася в російськомовному журналі перед початком Другої світової війни, її англomовний переклад [13] став доступний лише починаючи з 2008 р.) вона лишилася практично невідомою на Заході. Тут першовідкривачем  $p-n$ -переходу традиційно вважають [14] Рассела Шумейкера Ола (Russell Shoemaker Ohl, 1898–1987 рр.). Однак заявку на патент Ола [15], який прийнято вважати доказом його пріоритету, було подано 27 трав-

ня 1941 р. (вже потому, як робота В. Лашкарьова з'явилася друком), а сам патент було видано лише 25 червня 1946 р. Слід також відзначити, що найперші присвячені  $p$ - $n$ -переходам у германії й сульфіді свинцю друківані статті з'явилися на Заході лише 1947 р. (огляд цих статей наведено в класичній роботі В. Шоклі [16]). Тому, хоча Р. Ол і працював самостійно в тому самому напрямку, пріоритет В. Лашкарьова у відкритті  $p$ - $n$ -переходу не може бути поставлено під сумнів.

Після війни Вадим Лашкарьов реалізує велику програму дослідження напівпровідників. Робить він це паралельно в Інституті фізики і в Київському університеті ім. Тараса Шевченка. Тут він створює і в 1952–1957 рр. очолює потужну кафедру фізики напівпровідників, яку пізніше упродовж понад 20 років очолював його учень Віталій Стріха (1931–1999 рр.), творець загальної теорії контакту метал–напівпровідник, один із піонерів розвитку української сенсорики. На базі відділу напівпровідників Інституту фізики у 1960 рр. було організовано новий Інститут напівпровідників АН УРСР, який учений очолював упродовж наступного десятиліття і який сьогодні носить ім'я Вадима Лашкарьова. Роботи академіка Лашкарьова знайшли широке практичне застосування в електроніці, автоматичній, телемеханіці, обчислювальній техніці.

Розвиток напівпровідникової науки в Україні пов'язаний з іменами експериментаторів В.І. Ляшенка, П.Г. Борзяка, О.В. Снітка, М.П. Лисиці, Б.О. Нестеренка, М.К. Шейнкмана, Л.І. Даценка, Є.А. Салькова, Д.Г. Семака, Г.А. Шепельського, В.В. Ільченка, П.І. Баранського, С.В. Свечнікова, В.Ф. Мачуліна, В.Г. Литовченка, О.Є. Беляєва, М.Я. Валаха, В.С. Лисенка, П.Ф. Олексенка, С.М. Рябченка, Ф.Ф. Сизова, М.Л. Дмитрука, В.А. Сминтини, теоретиків С.І. Пекара, К.Б. Толпига, К.Д. Товстюка, М.Ф. Дейгена, І.М. Дикмана, Е.Й. Рашби, П.М. Томчука, В.О. Кочелапа, І.І. Бойка, З.С. Грібнікова, Ф.Т. Васька та багатьох інших першорядних учених. Докладніше про сторінки розвитку фізики напівпровідників можна довідатися з книги [17].

### 10. Замість висновків: що далі?

На основі короткого огляду експериментальних фактів та теоретичних гіпотез ми показали, як

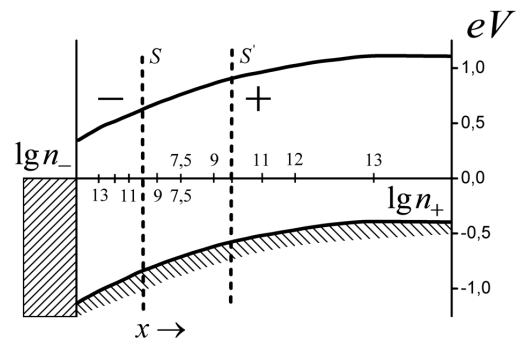


Рис. 8. Найперша схема  $p$ - $n$ -переходу (з роботи [12]). Область  $p$ -провідності розташовано праворуч від вертикальної лінії  $S'$ , а область  $n$ -провідності ліворуч від вертикальної лінії  $S$ . Цифри нижче і вище від осі абсцис позначають логарифми концентрацій дірок ( $n_+$ ) і електронів ( $n_-$ )



Рис. 9. Першопрохідці: кафедра фізики напівпровідників Київського університету ім. Т.Г. Шевченка (1956 р.). Зліва направо сидять: Н.Я. Карханіна, В.І. Ляшенко, В.Є. Лашкарьов, Ю.І. Карханін, Г.А. Холодар, Ю.І. Гриценко; стоять: І.Г. Самбур, Є.М. Березняковський, В. Житков, В.Є. Кожевін, Г.П. Пека, Г.П. Зубрін, В.І. Стріха, Р.М. Бондаренко

на початку ХХ століття сформувалася нова галузь знань – наука про напівпровідники. Поняття про напівпровідники як окремий клас матеріалів уперше чітко сформулював Йоганн Кенігсбергер (1914 р.) на основі оригінальної гіпотези про “дисоціативний механізм” провідності – і вже за це вчений заслуговує на вдячну пам'ять нащадків. Починаючи з другої половини ХХ століття розвиток напівпровідникової науки й технологій призвів до справжньої науково-технічної революції, яка радикально розширила можливості людини.



Однак, починаючи з певного етапу, кожна наука проходить стадію своєрідної “вичерпаності”. Це стосувалося й фізики напівпровідників, де після побудови зонної теорії і теорії домішкових станів, глибокого вивчення транспорту носіїв та оптичних переходів в основних напівпровідникових матеріалах, появи технологій отримання високочистих матеріалів напівпровідникової електроніки з наперед заданими властивостями почало здаватися, що основні фундаментальні проблеми вже розв’язано, залишилися важливі, але загалом непринципові деталі.

Однак перехід до наносистем, де рух носіїв принципово квантований, поява на додачу до традиційної “зарядової електроніки” також спітроніки, де переноситься не заряд, а проекція спіну, дали на межі нового тисячоліття потужний поштовх “традиційній”, здавалося б галузі. Додатковим імпульсом стали потреби розвитку фотовольтаїки, яка, за оцінками експертів, покликана зробити важливий внесок у розв’язання енергетичних проблем людства і забезпечення сталого, екологічно безпечного розвитку [18], і сенсорики – адже тільки сенсори в режимі реального часу здатні дати відповіді на тисячі й тисячі питань, які ставить життя перед людиною. Низку окремих цікавих фундаментальних і прикладних задач формулює освоєння нового терагерцового діапазону хвиль випромінювачами й детекторами. В річищі ідей фізики напівпровідників лежить і чимало задач нової фізики графену [19], яка стрімко розвивається після отримання в 2004 р. моношарового вуглецю і вже привела до появи цілої низки інших аналогічних матеріалів (борат молібдену, сіліцен, германен тощо).

На жаль, поважною перешкодою для розвитку напівпровідникової науки в Україні є жалюгідний стан орієнтованої на застарілі технології ресурсовитратної національної економіки, фактична загибель української мікроелектроніки, відсутність національного замовника на роботи в багатьох високотехнологічних напрямках. Ця проблема має позанауковий характер, і вирішено її може бути лишень спільними зусиллями політиків, бізнесу і всього суспільства.

Тому відзначення 100-річчя напівпровідників дає ще одну добру нагоду не лише згадати славі сторінки минулого (які самі по собі важливі для сьогоднішніх і майбутніх дослідників), а й по-

новити суспільну дискусію про роль науки і високих технологій для сьогоднішньої України. А для цього потрібно, щоб непомічений досі ювілей нарешті помітили. Цій меті має слугувати й ця стаття, й робота [20], де пріоритет Вадима Лашкарєва в справі відкриття  $p-n$ -переходу вперше продемонстровано широкій європейській фізичній спільноті.

На завершення автор хоче присвятити цю статтю світлій пам’яті свого батька, одного з піонерів напівпровідникової науки в Україні Віталія Іларіоновича Стріхи, а також усім дослідникам з того прекрасного і героїчного покоління, які починали вивчення нового і загадкового класу матеріалів – напівпровідників, що їм судилося значною мірою змінити обличчя людства.

1. В.І. Ільченко, О.Т. Проказа, М.В. Стріха, *Фізичні теорії: люди, ідеї, події*. Навчальний посібник. (Елтон-2, Луганськ, 2012), 384 с.
2. G. Busch, Eur. J. Phys. **10**, 254 (1989).
3. J. Königsberger and K. Schilling, Phys. Z. **9**, 347 (1908).
4. J. Königsberger, Jahrb. Radioakt. Elektron. **11**, 84 (1914).
5. B. Gudden, Ergeb. Exakten Naturwiss. **3**, 116 (1924).
6. A.H. Wilson, Theory of electronic semiconductors I, Proc. R. Soc. **133**, 458 (1931).
7. A.H. Wilson, Theory of electronic semiconductors II, Proc. R. Soc. **134**, 277 (1931).
8. W. Heisenberg, Ann. Phys. (Leipzig) **10**, 888 (1931).
9. J. Frenkel, Z. Phys. **35**, 652 (1926).
10. C. Wagner and W. Schottky, J. Phys. Chem. **11**, 163 (1931).
11. W. Jost, J. Chem. Phys. **1**, 466 (1933).
12. В.Е. Лашкарєв, Известия АН СССР, сер. физ. №4–5, 442 (1941).
13. V.E. Lashkaryov, Ukr. J. Phys. **53**, Spec. issue., 53 (2008).
14. M. Riordan and L. Hoddeson, IEEE Spectrum 46 (June 1997).
15. R.S. Ohl, Light-Sensitive Electric Device, U.S. Patent 2402662.
16. W. Shockley, Bell Syst. Techn. J. 435 (July 1949).
17. *Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарєва. 50 років*, за редакцією В.Ф. Мачуліна (Інтертехнодрок, Київ, 2010), 446 с.
18. В. Литовченко, М. Стріха, Світ фізики № 1 (61), 3 (2013).
19. В. Гусинін, В. Локтев, С. Шаратов, Вісник НАН №12, 51 (2010).
20. V.G. Lytovchenko and M.V. Strikha, Europhys. News **45**, 15 (2014).

Одержано 29.01.14

*М.В. Стриха*

СТОЛЕТИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ  
НАУКИ: ИСТОКИ И УКРАИНСКИЙ ВКЛАД

Резюме

Дан обзор экспериментальных фактов и теоретических гипотез, которые в начале XX века привели к появлению новой отрасли знаний – науки о полупроводниках. Показано, что понятие о полупроводниках как отдельном классе материалов впервые четко сформулировал Йоганн Кенигсбергер (1914 г.) на основании оригинальной гипотезы о “диссоциативном механизме” проводимости. Продемонстрирован приоритет украинского ученого Вадима Лашкарева в открытии  $p-n$ -перехода, который лежит в основе приборов современной электроники.

*M. V. Strikha*

THE CENTENNIAL OF SEMICONDUCTOR  
SCIENCE: ORIGINS AND UKRAINIAN CONTRIBUTION

Summary

A review of experimental facts and theoretical hypotheses, which resulted in the appearance of a new branch in our knowledge, semiconductor science, at the beginning of the 20th century, has been made. Johan Königsberger is shown to be the first who, on the basis of the original hypothesis about the “dissociation mechanism” of conductivity, put forward the idea of semiconductors as a separate class of substances in 1914. A priority of the Ukrainian scientist Vadym Lashkaryov in the discovery of  $p-n$ -junction, which forms the basis of modern electronic devices, has been demonstrated.