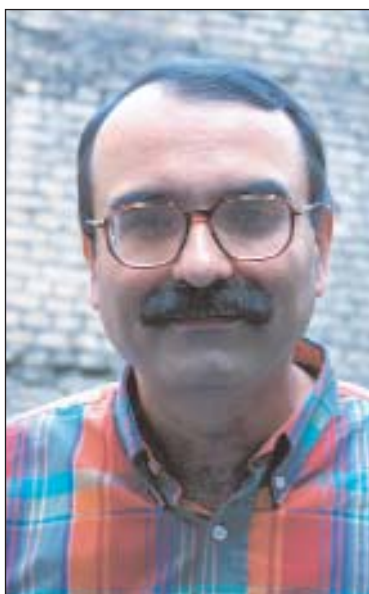


Непомічений ювілей

(науці про напівпровідники — 100 років)

Скільки років науці про напівпровідники? На це просте запитання не зразу дадуть відповідь навіть ті, що все своє життя пропрацювали в цій галузі. Адже з окремими напівпровідниками (наприклад, з кремнієм) люди мали справу з давніх-давен. Починаючи з XVIII століття, учені активно досліджували 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 певний клас матеріалів?

1. Провідники й ізолятори



Максим Стріха
доктор фіз.-мат. наук,
головний науковий
співробітник
Інституту фізики
напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова
НАН України,
професор Київського
національного університету
імені Тараса Шевченка,
м. Київ

У 1729 році англієць *Стівен Грей* (1679—1736) відкрив явище електропровідності [1]. Він узяв скляну пляшку і закрит її корком, у який увіткнув металевий стрижень з кулькою зі слоновієї кістки на кінці. Потім він наелектризував пляшку клаптем сукна. Виявилося, що електрика перейшла з пляшки 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, але й вугільні стрижні, м'язи людини і тварин. Причому, почавши від коротких металевих стрижнів, учений довів наявність провідності в дротів завдовжки до 250 метрів. Він пересвідчився: електрика однаково легко перетікає як горизонтальними, так і вертикальними провідниками (тоді електрику уявляли як особливу рідину, тому досліджуваний Греєм факт потребував експериментальної перевірки).

Водночас Греєві вдалося виявити: не проводять каучук, віск, шовкові нитки й порцеляна, які можуть слугувати ізоляторами, що перешкоджають витоковій електрики. Про свої дослідження учений повідомив у листі до Королівського товариства від 8 лютого 1731 року. 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" уперше вжив славетний італійський учений *Алессандро Вольт* (1745—1827) в доповіді перед Лондонським Королівським товариством 14 березня 1782 року. Доторкаючись до електрометра різними предметами, він встановив, що доторк металу призводить до миттєвого розряду електрометра, доторк діелектрика не розряджає електрометра зовсім, проте існують певні матеріали, через які електрометр теж розряджається, але упродовж певного скінченного часу. Їх *Вольт* й назвав "напівпровідниками".

У 1800 році, поставивши одне на одне понад сто металевих (цинк і срібло) кружалець, розділених змоченим солоною водою папером, *Вольт* 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 відкрити термопару (вона давала стабільнішу напругу, аніж "вольтів стовп"), німецький учений **Георг Симон Ом** (1787—1854) зумів 1826 року сформулювати основний закон електричних кіл, названий його ім'ям.

2. Напівпровідники: перші експериментальні факти

Використовуючи "вольтів стовп", англійський фізико-хімік **Гемфрі Деві** (1778—1829) у 1821 році 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) у 1833 році виявив дивовижну властивість сульфиду срібла Ag_2S : при кімнатній температурі його провідність була дуже низькою, однак при 175°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, але й світло. У 1839 році молодий французький фізик **Едмон Беккерель** (1820—1891), помістивши в електроліт платівку хлориду срібла з платиновими контактами, вперше спостеріг явище фотоефекту — появи напруги при освітленні. Англійський інженер **Вілловбі Сміт** (1828—1891) у 1873 році встановив факт різкого зменшення опору селену при його освітленні. На цьому ефекті впродовж майже півтора століття діють різноманітні експонетри. Однак фізична природа ефекту залишалась незрозумілою протягом майже 60 років.

Наступного, 1874 року німецький фізик і винахідник **Карл Фердинанд Браун** (1850—1918) відкрив, що точковий контакт металу зі сульфідом металу може бути випростувачем: пропускати струм в одному напрямку і не пропускати в другому. Це відкриття широко застосовувалося в перших "детекторних" приймачах, які не потребували електричного живлення (йому тому використовувалися в українських селах аж до 1950-х років). Пізніше Браун активно співпрацював з винахідником радіо **Гульєльмо Марконі** — їх разом було вшановано Нобелівською премією з фізики 1909 року.

3. Класична теорія електропровідності

Новим потужним методом вивчення твердих тіл стало застосування ефекту Холла, відкритого американцем **Едвіном Холлом** (1855—1938) у 1879 році. 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 спе-

ціальної "електричної рідини", здатної перетікати між тілами). У 1897 році англійський учений **Джозеф Джон Томсон** (1856—1940) 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) побудував класичну електронну теорію електропровідності металів (1900). Згідно з нею, струм у металі переносять електрони, що поведуться себе як класичний ідеальний газ. У проміжках між зіткненнями (середній час вільного пробігу між двома зіткненнями позначимо τ) вони рухаються вільно, пробігаючи деякий шлях l . Зіткнення електронів відбуваються переважно з іонами ґратки. 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 так: $\langle u \rangle \sim (kT/m_0)^{1/2}$, де T — температура, k — стала Больцмана, m_0 — маса електрона. При кімнатній температурі ця швидкість за порядком величин дорівнює 10^7 см/с.

З прикладанням електричного поля напруженістю E електрони починають рухатися з прискоренням:

$$a = (e/m_0)E. \quad (1)$$

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

$$v = (a\tau)/2. \quad (2)$$

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 кількість в одиниці об'єму — його можна експериментально визначити з ефекту Холла), e — заряд одного електрона. Підставивши в цей вираз середню швидкість електронів (2), отримаємо:

$$j = (e^2n\tau/2m_0)E. \quad (4)$$

Цей вираз збігається із 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):

$$\sigma = e^2n\tau/2m. \quad (6)$$

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 мають розсіюватися інтенсивніше, середній час життя і провідність зменшуватимуться. Так теорія якісно пояснила встановлене експериментально ще **Деві** збільшення

питомого опору металів $p = 1/\sigma$ з температурою (що справедливо для діапазону не надто низьких температур):

$$p(t) = p_0(1 + \alpha t), \quad (7)$$

де t — температура в градусах Цельсія, α — коефіцієнт пропорційності. Кількісно формулу (7) для діапазону достатньо високих температур з урахуванням розсіяння електронів на коливаннях ґратки — фонах вивів **Фелікс Блох** лише 1930 року.

Нарешті, на якісному рівні стала зрозумілою 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 був поставлений ряд дослідів. Німецький фізик **Карл Рікке** 1901 року взяв три циліндри (два мідних та 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.

4. Кенігсбергер уводить новий клас матеріалів: напівпровідники

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). Професор Кенігсбергер був різнобічним ученим, його праці стосувалися електричних, оптичних і термічних властивостей багатьох природних мінералів та штучних сполук. Крім того, учений цікавився спектроскопією, термічним випромінюванням і геофізичними явищами.

У роботі [3] **Кенігсбергер** разом із **Шілінгом** показав, що температурна залежність питомого опору низки матеріалів (наприклад, титану й 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:

$$N = N_0 \exp(-Q/(t+273)), \quad (8)$$

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

$$p(t) = p_0(1 + \alpha t) \exp(-Q/(t+273)), \quad (9)$$

що, очевидно, може пояснити криві з мінімумами на

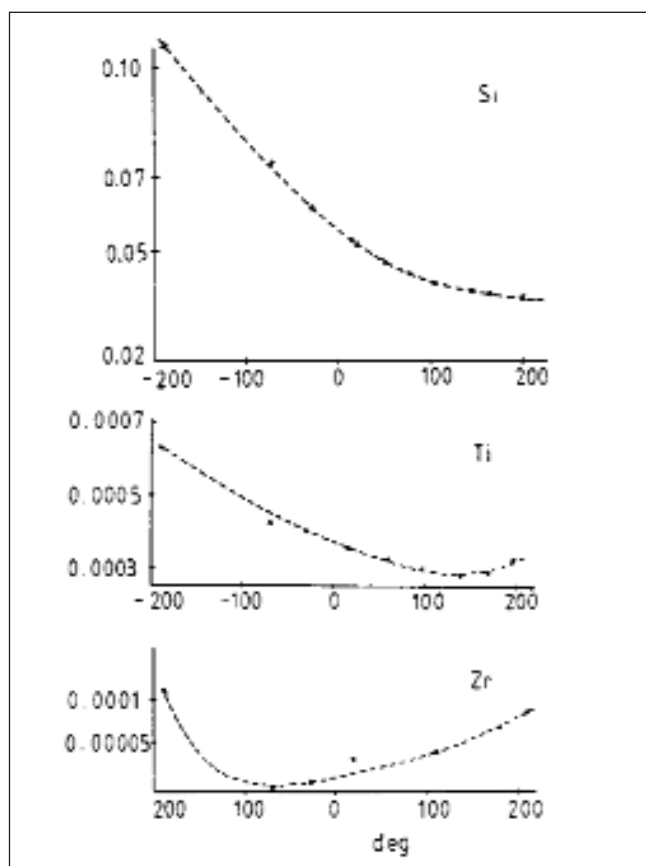


Рис. 1. Температурна залежність питомого опору Si, Ti, Zr (графіки з роботи [3])

рис. 1. Хоча сам Кенігсбергер не міг запропонувати жодної моделі для визначення енергії дисоціації, однак у дальшій роботі [4] він розділив усі матеріали на метали, ізолятори та "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 роком — часом появи роботи [4]. Адже віднині експериментальні факти стосувалися вже не розрізнених "аномальних" матеріалів, а нового класу речовин з цілком визначеними властивостями.

Цікаво, що самого терміна "напівпровідник" (нім. Halbleiter) Кенігсбергер при цьому не вживав. Це слово вперше застосував його студент **Вейсс** у захищеній 1910 року докторській дисертації. Але навіть така термінологічна неузгодженість не заважає **оголосити саме Йоганна Кенігсбергера "батьком" сучасного поняття "напівпровідники"**.

5. Нові експериментальні факти

Паралельно з *Кенігсбергером* і його учнями напівпровідникові матеріали активно вивчав також професор фізики в Університеті в Єні *Карл Бедекер* (1877—1914). Талановитий фізик, син видавця все-світньовідомих туристичних путівників *Фріца Бедекера*, загинув на фронті 37-річним у перший же тиждень Першої світової війни. Тому перелік його праць короткий, але головні його роботи відзначаються великою ретельністю й піонерським підходом, а книга "Електричні явища в металічних провідниках" (1911) правила за підручник ще впродовж двох десятиліть.

Чи не найбільшим "бичем" тодішнього експерименту щодо провідності була дуже погана відтворюваність результатів. У 1907 році *Бедекер* запропонував новий метод виготовлення зразків. Він наносив тонкі плівки міді, срібла, кадмію, талію та свинцю на скляну або слюдяну підкладку розпорошуванням. При цьому товщину отриманої плівки учений визначав точним зважуванням. Потім ці плівки витримувалися в кисні, або ж парі сірки, селену, арсену чи йоду для отримання потрібних сполук.

Найцікавіші результати здобули на йодиді міді CuI . Отримані плівки мали дуже високу, суто металічну провідність, але, залишені на повітрі при кімнатній температурі, робилися майже ізоляторами. Але поновне експонування плівки в парі йоду повертало металічну провідність, зменшуючи опір на кілька порядків. Причому такий оборотний процес можна було повторити кілька разів. Звідси впливав очевидний висновок: провідність критично залежала від вмісту в зразку йоду.

Саме *Бедекер* першим виміряв ефект Холла в напівпровідниковій плівці 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 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 наступні роки різні дослідники виявили чимало сполук із напівпровідниковими властивостями.

Чи не "найпопулярнішою" з них став закис міді Cu_2O . Як показав професор Геттінгенського університету *Бернард Гудден* (1892—1945), автор чи не першого огляду з провідності напівпровідникових сполук [5], опір різних зразків Cu_2O при кімнатній температурі міг різнитися на 6—7 порядків. При цьому провідність закису міді зростала при збільшенні тиску кисню.

6. Поява теорії напівпровідників

Напівпровідники поставили неабияку загадку перед теоретиками, і розгадати її класична фізика не могла принципово. У 1927 році, 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), тоді пост-док у Гейзенберга в Лейпцігу, у 1928 році 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 т. зв. "режим Блоха—Грюнаїзена" $\rho \sim T^2$. Проте Блох навіть не намагався пояснити існування металів, напівпровідників та ізоляторів.

Тому "батьком" зонної теорії твердих тіл можна вважати британця *Алана Вілсона* (1906—1995), який, після навчання у *Ролфа Фаулера* в Кембріджі, стажувався на початку 1930-х у Лейпцігу в Гейзенберга, де й ознайомився з роботами Блоха.

Дві класичні статті Вілсона [6, 7] з'явилися впродовж 1931 року. В них учений вперше запровадив звичний для нас малюнок 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 1914 року поділ на метали, діелектрики і напівпровідники дістав пояснення й підтвердження.

Варто зазначити, що остаточно поняття "дірок" як носіїв струму з позитивним зарядом було запроваджене того ж 1931 року *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 дальшому розвитку науки про напівпровідники. Паралельно 1930 року російський учений *Гор 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) і *Дебая* (1912) з теорії теплоємності твердих тіл, але сам термін належить *Таммові*. Так на початку 1930-х років були закладені підвалини теорії напівпровідників.

7. Матеріали, які змінили життя людства

Однак, цілковита нерозробленість технологій отримання "чистих" матеріалів аж до кінця 1940-х рр. 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 року: "З напівпровідниками працювати не варто, вони — суцільна плутанина, хтосьна, чи існують ці напівпровідники взагалі". Як відзначає автор [2] *Георг Буш*, таке ставлення до напівпровідників зберігалось загалом до кінця 1930-х.

Таке ставлення радикально змінилося лишень після винайдення американським ученим *Вільямом Шоклі* (1910—1989) та його колегами *Джоном Бардінім* (1908—1991) і *Волтером Браттейном* (1902—1987) транзистора на *p-n* переходах (1951). Цей винахід уможливив неймовірний технологічний прорив людства практично в усіх галузях і був вшанований Нобелівською премією 1956 року. Слід 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). Його результати лягли в основу фундаментальної монографії "Електрони і дірки в напівпровідниках" (1950).

Першу інтегральну мікросхему — два транзистори, опір і декілька конденсаторів — було зібрано 1959 року на одному кристалі діаметром 2 см фактично вручну. Дуже швидко застосування мікросхем радикально розширило можливості людини в усіх галузях — від обчислень і зв'язку і до побутової електроніки.

Стрімкий розвиток мікроелектроніки на початку 1960-х стимулював активні дослідження в галузі фізики напівпровідників у всьому світі. Проте в Україні розвиток фізики напівпровідників почався значно раніше. Ще з 1929 року під керівництвом засновника Інституту фізики ВУАН Олександра Гольдмана тривали роботи з дослідження нових аспектів фотогальванічного ефекту Беккереля, у яких брали участь також *О.Г. Мислюк*, *Г.А. Федорус*, *М.П. Лукасевич*, *В.К. Бернадський* та інші дослідники.

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), повернувшись в Україну після відбуття заслання в Архангельську на посаду завідувача відділу напівпровідників Інституту фізики й одночасно — завідувача кафедри фізики в Київському університеті імені Тараса Шевченка, робить головне відкриття свого життя. Досліджуючи за допомогою термозонду запірні шари примітивних міднозакисних випрямлячів, учений відкрив *p-n*-перехід. Тоді ж він з'ясував роль *p-n*-переходу у виникненні вентильного фотоефекту — 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. А фотоефект у напівпровідниках забезпечує роботу відомих усім сьогодні сонячних батарей. Проте тоді на цю роботу не звернули тієї уваги, на яку вона заслуговувала. Можливо, через те, що точилася Друга світова війна, можливо, тому, що вона суттєво випереджала тодішній розвиток технології германію і кремнію, яким у наступному десятилітті судилося стати основними напівпровідниковими матеріалами.

Після війни *Вадим Лашкар'юв* реалізує велику програму дослідження напівпровідників. Робить він це водночас в Інституті фізики і в Київському університеті імені Тараса Шевченка. Тут він створює і в 1952—57 роках очолює потужну кафедру фізики напівпровідників, яку пізніше упродовж понад 20 років очолював його учень *Віталій Стрїха* (1931—1999), творець загальної теорії контакту метал-напівпровідник, один із піонерів розвитку української сенсоріки. На базі відділу напівпровідників Інституту фізики у 1960 році було організовано новий Інститут напівпровідників АН УРСР, який учений очолював упродовж наступного десятиліття і який сьогодні носить ім'я В.Є. Лашкар'юва. Роботи академіка Лашкар'юва 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*, *П.І. Баранського*, *С.В. Свєчкінова*, *В.Ф. Мачуліна*, *В.Г. Литовченка*, *О.Є. Бляєва*, *Є.Ф. Венгера*, *В.С. Лисенка*, *П.Ф. Олексенка*, *Ф.Ф. Сизова*; *М.Л. Дмитрука*, теоретиків *С.І. Пекара*, *К.Б. Толпига*, *К.Д. Товстока*, *М.Ф. Дейгена*, *І.М. Дикмана*, *Е.Й. Раїби*, *В.О. Кочелана*, *І.І. Бойка*, *З.С. Грібнікова*, *Ф.Т. Васька* та багатьох інших першорядних учених. Докладніше про сторінки розвитку фізики напівпровідників можна довідатися з праці [13].

8. Що далі?

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 неprincipiові деталі.

Однак перехід до наносистем, де рух носіїв принципово квантований, поява на додачу до традиційної "зарядової електроніки" також спінтроніки, де пере-



Рис. 2. Першопрохідці: кафедра фізики напівпровідників Київського університету ім. Т.Г. Шевченка (1956 рік).

Зліва направо сидять:
Н.Я. Карханіна, В.І. Ляшенко,
В.Є. Лашкар'єв, 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

носятся 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 [14], 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 завдань формує освоєння нового терагерцового діапазону хвиль випромінювачами й детекторами. В річищі ідей фізики напівпровідників лежить і чимало завдань нової фізики графену [15], яка стрімко розвивається після отримання в 2004 році моношарового вуглецю і вже зумовила появу 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, 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 славні сторінки минулого (які самі по собі важливі для сьогоднішніх і майбутніх дослідників), але й поновити суспільну дискусію про роль науки і високих технологій для сьогоднішньої України. А для цього потрібно, щоб непомічений досі ювілей нарешті помітили.

Автор присвячує цей нарис 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 й загадкового класу матеріалів — напівпровідників, що їм судилося значною мірою змінити обличчя людства. ■

Література

1. Ільченко В.І., Проказа О.Т., Стріха М.В. Фізичні теорії: люди, ідеї, події. Навчальний посібник.— Луганськ: Елтон-2, 2012. — 384 с.
2. Busch G. Early history of the physics and chemistry of semiconductors — from doubts to fact in a hundred years // Eur. J. Phys. — 1989. — v.10. — P. 254—264.
3. Koenigsberger J., Shilling K. Ueber die Leitfähigkeit einiger fester Substanzen // Phys. Z. — 1908. — v. 9. — P. 347—352.
4. Koenigsberger J. Das elektrische Verhalten der variablen Leiter und deren Beziehung zur Elektronentheorie // Jahrb. Radioakt. Elektron. — 1914. — v. 11. — P. 84—142.
5. Gudden B. Elektrizitätsleitung in Kristallisierten Stoffen unter Ausschluss der Metalle // Ergeb. Exakten Naturwiss. — 1924. — v. 3. — P. 116—159.
6. Wilson A.H. Theory of Electronic Semiconductors I // Proc. R. Soc. — 1931. — v. 133. — P. 458—491.
7. Wilson A.H. Theory of Electronic Semiconductors II // Proc. R. Soc. — 1931. — v. 134. — P. 277—287.

8. Heisenberg W. Zum Paulischen Ausschliessungsprinzip // Ann. Phys. Lpz. — 1931. — v. 10. — P. 888—904.
9. Frenkel J. Ueber die Wärmebewegung in festen und flüssigen Körpern // Z. Phys. — 1926. — v. 35. — P. 652—669.
10. Wagner C., Schottky W. Theorie der geordneten Mischphasen // J. Phys. Chem. — 1931. — v. 11. — P. 163—210.
11. Jost W. Diffusion and electrolytic conduction in crystals (ionic semiconductors) // J. Chem. Phys. — 1933. — v. 1. — P. 466—475.
12. Лашкар'єв В.Е. Исследования запорного слоя методом термозонда // Известия АН СССР, сер. физ. — 1941. — № 4—5. — С. 442—446.
13. Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкар'єва. 50 років // За редакцією В.Ф. Мачуліна. — К.: Інтертехнодрок, 2010. — 446 с.
14. Литовченко В., Стріха М. Фотовольтаїчні перетворювачі в Україні: наукові здобутки і позанаукові виклики // Світ фізики. — 2013. — №1 (61). — С. 3—15.
15. Стріха М.В. Нова "фізика графену": стан і перспективи // Світ фізики. — 2010. — № 3. — С. 3—10.