ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA, AS THE BASES OF SENSORS

PACS: 71.20.Mq, 71.20.Nr, 72.20.-i, 81.05.Cy, 81.05.Dz

ЯК ПОЧИНАЛАСЯ НАУКА ПРО НАПІВПРОВІДНИКИ (ДО 100-ЛІТНЬОГО ЮВІЛЕЮ)

М. В. Стріха

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
пр. Науки, 41, Київ, Україна
тел. (044) 525 6033, *E-mail: maksym_strikha@hotmail.com*

ЯК ПОЧИНАЛАСЯ НАУКА ПРО НАПІВПРОВІДНИКИ (ДО 100-ЛІТНЬОГО ЮВІЛЕЮ)

М. В. Стріха

Анотація. Дано короткий огляд експериментальних фактів та теоретичних гіпотез, які на початку XX століття призвели до появи нової галузі знань – науки про напівпровідники. Показано, що поняття про напівпровідники як окремий клас матеріалів уперше чітко сформулював Йоганн Кенігсбергер (1914) на основі оригінальної гіпотези про «дисоціативний механізм» провідності.

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

HOW SEMICONDUCTOR SCIENCE HAD STARTED? (TO 100 YEARS ANNIVERSARY)

M. V. Strikha

Abstract. A brief survey of experimental facts and theoretical assumptions, which had caused in the beginning of XX century the appearance of a new branch of knowledge – the semiconductors science – is presented. It is demonstrated that a concept of semiconductors as a separate class of materials was first clearly put forward by Johann Koenigsberger in 1914 on the base of his original hypothesis of the "dissociation mechanism" of conductivity.

Keywords: metals, insulators, semiconductors, conductivity, band theory, electronics

КАК НАЧИНАЛАСЬ НАУКА О ПОЛУПРОВОДНИКАХ (К СТОЛЕТНЕМУ ЮБИЛЕЮ)

М. В. Стриха

Аннотация. Дан краткий 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) на основании оригинальной гипотезы о «диссоциативном механизме» проводимости.

Ключевые слова: металлы, изоляторы, полупроводники, проводимость, зонная теория, электроника

1. Вступ

Скільки років науці про напівпровідники? На це просте запитання не зразу 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 18 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 окремий 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 20 століття призвели до появи нової галузі знань – науки про напівпровідники.

2. Провідники й ізолятори

У 1729 році англієць Стівен Грей (1679-1736) відкрив явище електропровідності [1]. Він узяв скляну пляшку і закрив її корком, у який ввіткнув металевий стрижень з кулькою зі слонової кості 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 досліди, 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 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 витокові електрики. Про свої досліди вчений 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» вперше вжив славетний італійський вчений Алессандро Вольта (1745-1827) у 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, але існують певні матеріали, через які електрометр теж розря-

джається, але упродовж певного скінченного часу. Їх Вольта й назвав «напівпровідниками».

У 1800 році, 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) зумів 1826 року встановити основний закон електричних кіл, названий його ім'ям.

3. 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 сульфіду срібла Ag_2S: при кімнатній температурі його провідність була дуже низькою, однак при 175 С 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 виявилося, 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 упродовж скоро майже півтора століття діють різноманітні експонометри. Однак фізична природа ефекту залишалась незрозумілою упродовж майже 60 років.

Наступного, 1874 року німецький фізик і винахідник Карл Фердинанд Браун (1850-1918) 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 1950-х років). Пізніше Браун активно співпрацював з винахідником радіо Гульєльмо Марконі і їх разом було вшановано Нобелівською премією з фізики 1909 року.

4. 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 18 століття вірили в існування спеціальної «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, які поводять 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, і це приводить до теплової рівноваги між електронним газом і кристалічною ґраткою (в цьому полягає відмінність електронного газу від зви-

чайного, де молекули газу розсіюються одна на одній). Середню швидкість теплового руху електронів можна оцінити як: $< u > \sim \sqrt{\frac{kT}{m_o}}$, де T – температура, k – стала Больцмана, m_o – маса електрона. При кімнатній температурі ця швидкість за порядком величин дорівнює 10^7 см/с.

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

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

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

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

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):

$$\rho(t) = \rho_o (1 + \alpha t) , \qquad (7)$$

де t – температура в градусах Цельсія, α – коефіцієнт пропорційності. (Кількісно формулу (7) для діапазону достатньо високих температур з урахуванням розсіяння електронів на коливаннях ґратки – фононах отримав Фелікс Блох лишень у 1930 році).

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 був поставлений ряд дослідів. Німецький фізик Карл Рікке в 1901 році 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). 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.

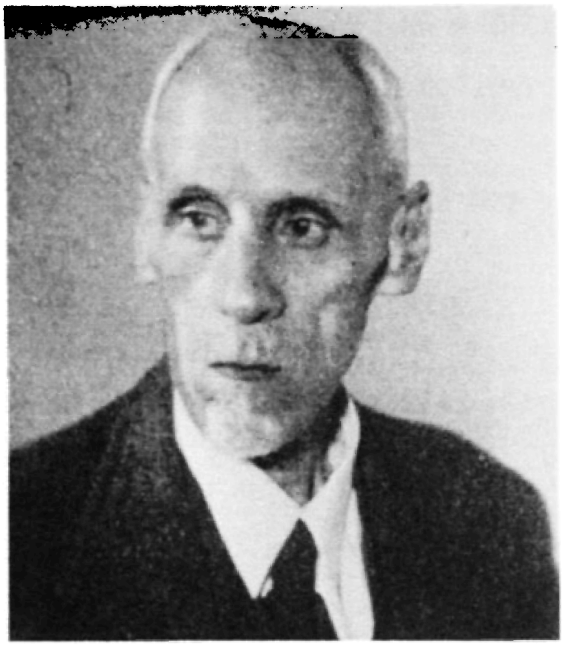

Рис.1. Йоганн Кенігсбергер

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.

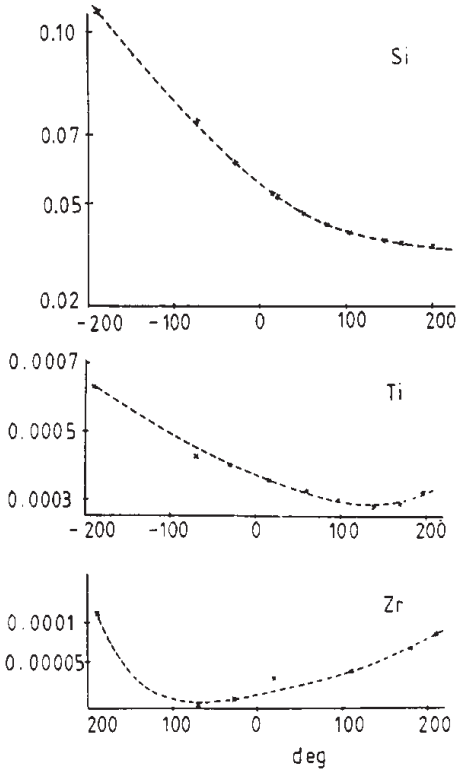

Рис.2. Температурна залежність питомого опору Si, Ti, Zr (графіки з роботи [3]).

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:

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

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

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

що очевидно може пояснити криві з мінімумами з рис.2! Хоча сам Кенігсбергер не міг запропонувати жодної моделі для визначення енергії дисоціації, однак у дальшій 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 призводить 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 терміну «напівпровідник» (нім. *Halbleiter*) Кенігсбергер при цьому не вживав. Це слово вперше застосував його студент Вейсс у захищеній 1910 року 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 професор фізики в університеті в Йені Карл Бедекер (1877-1914). Талановитий фізик, син видавця всесвітньовідомих туристичних путівників Фріца Бедекера, загинув на фронті 37-річним у перший же тиждень І 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) правила за підручник ще упродовж двох десятиліть.

Рис.3. Карл Бедекер

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. 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 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 CuI. Першою несподіванкою виявилося 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 справедливість постульованої Кенігсбергером формули (8): число носіїв справді експоненціально зростало з температурою!

У наступні роки різними дослідниками було виявлено 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.

7. 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-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), який, після навчання у Ролфа Фаулера в Кембріджі, стажувався на початку 1930-х у Лейпцігу в Гейзенберга, де й познайомився з роботами Блоха.

Рис.4. Алан Вілсон

Дві класичні статті Вілсона [6, 7] з'явилися впродовж 1931 року. 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 1914 року 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 року Вернером фон Гейзенбергом [8], який інтерпретував таким чином вільні місця у майже заповненій валентній зоні.

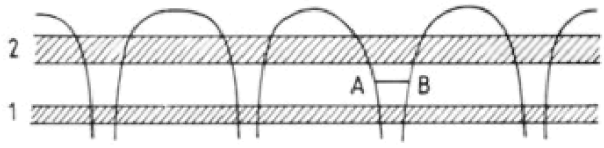

Рис.5. Найперша зонна діаграма напівпровідника з роботи А.Вілсона

В 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 розвиткові науки про напівпровідники. Паралельно в 1930 році 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) і Дебая (1912) з теорії теплоємності твердих тіл, але сам термін належить Таммові. Так на початку 1930-х було закладено підвалини теорії напівпровідників.

8. Матеріали, які змінили життя людства

Однак, цілковита нерозробленість технологій отримання «чистих» матеріалів аж до кінця 1940 років 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, хтозна, чи існують ці напівпровідники взагалі». Як відзначає автор [2] Георг Буш, таке ставлення до напівпровідників зберігалося загалом до кінця 1930-х.

Це ставлення радикально змінилося лишень після винайдення американським ученим Вільямом Шоклі (1910-1989) та його колегами Джоном Бардіним (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.

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

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). Отримані ним 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 діаметру 2 см фактично вручну. Дуже швидко застосування мікросхем радикально розширило можливості людини в усіх галузях – від обчислень і зв’язку і до побутової електроніки.

Рис.7. Перший транзистор

Стрімкий розвиток мікроелектроніки на початку 1960-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: народився в Україні в місті Ромни, у довоєнні роки був закордонним членом Наукового товариства імені Т.Шевченка у Львові) у 1954 році було створено Інститут напівпровідників у Ленінграді.

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.Миселюк, Г.А.Федорус, М.П.Лукасевич, В.К.Бернадський та інші дослідники.

Слід пам'ятати: один з великих здобутків напівпровідникової науки 20 століття пов'язаний саме з Києвом. Майбутній академік АН УРСР Вадим Лашкарьов (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 з 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 Лашкарьова [12] за своїм науковим значенням не поступалася працям Шоклі, Бардіна й Браттейна, які були вдостоєні 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.

Рис. 8. Першопрохідці: кафедра фізики напівпровідників Київського університету ім. Т. Г. Шевченка (1956 рік). 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

Після війни Вадим Лашкарьов реалізує велику програму дослідження напівпровідників. Робить він це паралельно 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 Стріха (1931-1999), творець загальної теорії контакту метал-напівпровідник, один із піонерів розвитку української сенсорики. 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 Вадима Лашкарьова. Роботи академіка Лашкарьова знайшли широке практичне застосування в електроніці, автоматиці, 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. Свєчнікова, В. Ф. Мачуліна, В. Г. Литовченка, О. Є. Бєляєва, М. Я. Валаха, В. С. Лисенка, П. Ф. Олексенка, 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, 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 [13].

9. Замість висновків: що далі?

На основі короткого огляду експериментальних фактів та теоретичних гіпотез ми показали, як на початку XX століття сформувалася нова галузь знань – наука про напівпровідники. Поняття про напівпровідники як окремий клас матеріалів уперше чітко сформулював Йоганн Кенігсбергер (1914) на основі оригінальної гіпотези про «дисоціативний механізм» провідності – і вже за це вчений заслуговує на вдячну пам'ять нащадків. Починаючи з другої половини XX 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 спінтроніки, 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 [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 задач формулює освоєння нового терагерцового діапазону хвиль випромінювачами й детекторами. В річищі ідей фізики напівпровідників лежить і чимало задач нової фізики графену [15], яка стрімко розвивається після отримання в 2004 році моношарового вуглецю і вже призвела 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 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.

На завершення автор хоче присвятити 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 і за-

гадкового класу матеріалів – напівпровідників, що їм судилося значною мірою змінити обличчя людства.

Література

1. В. І. Ільченко, О. Т. Проказа, М. В. Стріха. Фізичні теорії: люди, ідеї, події. Навчальний посібник. Луганськ: Елтон-2, 2012. – 384 с.
2. Georg Busch. 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. J. Koenigsberger, K. Shilling. Ueber die Leitfahigkeit einiger fester Substanzen // Phys. Z. – 1908. – v.9. – P. 347-352.
4. J. Koenigsberger. Das elektrische Verhalten der variablen Leiter und deren Beziehung zur Elektronentheorie // Jahrb. Radioakt. Elektron. – 1914. – v.11. – P. 84-142.
5. B. Gudden. Elektrizitatsleitung in Kristattusierten Stoffen unter Ausschluss der Metalle // Ergeb. Exakten Naturwiss. – 1924. – v.3. – P. 116-159.
6. A. H. Wilson. Theory of Electronic Semiconductors I // Poc. R. Soc. – 1931. – v.133. – P. 458-491.
7. A. H. Wilson. Theory of Electronic Semiconductors II // Poc. R. Soc. – 1931. – v.134. – P. 277-287.
8. W. Heisenberg. Zum Paulischen Ausschliessungsprinzip // Ann. Phys. Lpz. – 1931. – v.10. – H. 888-904.
9. J. Frenkel. Uberdie Warmebewegung in festen und flissigen Korpern // Z. Phys. – 1926. – v.35. – P. 652-669.
10. C. Wagner, W. Schottky. Theorie der geordneten Mishphasen // J. Phys. Chem. – 1931. – v.11. – H. 163-210.
11. W. Jost. Diffusion and electrolytic conduction in crystals (ionic semiconductors) // J. Chem. Phys. – 1933. – v.1. – P. 466-475.
12. В. Е. Лашкарев. Исследования запорного слоя методом термозонда // Известия АН СССР, сер. физ. – 1941. - №4-5. – С. 442-446.
13. Інститут фізики напівпровідників ім.В. Є. Лашкарьова. 50 років. За редакцією В. Ф. Мачуліна. – К.: Інтертехнодрук, 2010. – 446 с.
14. В. Литовченко, М. Стріха. Фотовольтаїчні перетворювачі в Україні: наукові здобутки і позанаукові виклики // Світ фізики. – 2013. – №1 (61). – С. 3-15.
15. М. В. Стріха. Фізика графену: стан і перспективи. // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – 2010. – т.1 (7), №. 3. – С.5-13.