

## **Історія створення напівпровідникового діода (детектора)**

**Підготовлено:**

Коженевский С.Р.

Вечер В.В.

30.10.2012

Те, що сьогодні – наука, завтра – техніка.

*Едвард Теллер*

### **Вступ**

Кому надано право кваліфікувати нову технологію як радикально нову, чи говорячи мовою журналістів — революційну? Це питання хвилювало багатьох вчених світу. На наш погляд, найповнішу відповідь на це питання дав історик, дослідник розвитку електроніки та електротехніки, керівник школи комунікацій у Вестмінстерському університеті, професор Брайан Вінстон (B. Winston) у своїй книзі "Media Technology and Society. A History: from the Telegraph to the Internet": *"...термін "революція" є риторичним прийомом і його взагалі зовсім неправильно застосовувати для опису розвитку інформаційних та комунікаційних технологій. Насправді ж в історичному літописі можна спостерігати повільніший темп змін, ніж передбачається, а також регулярність у появі інноваційних структур та їх подальше масове поширення, що може стати моделлю для всіх таких змін".* Одним із прикладів такої "революції" може бути історія розвитку напівпровідникової техніки.



Конструкції перших точкових діодів (Музей ТОВ "ЕПОС")

Розробки у сфері інформаційних та комунікаційних технологій найчастіше відносять до "комп'ютерних наук", але дати визначення, що таке "комп'ютерні науки" досить складно: одні вважають їх фундаментальними науками, інші - міждисциплінарними науково-технічними дослідженнями, треті - новою кібернетикою. Однак стосовно науки, знання комп'ютера займає таке ж положення, як знання фізичних інструментів щодо фізики. Найчастіше до комп'ютерних наук відносять знання у галузі інформаційних систем, засобів комунікації, автоматизації та контролю, засобів математичного моделювання, а також засобів автоматизованого проектування. Але, по суті, все це виникло спочатку з електроніки. Тому, досліджуючи історію напівпровідникової техніки як складової історії

виникнення електроніки, ми одночасно розглядаємо і передумови того, що зараз називають комп'ютерною революцією.

## **Перші дослід з напівпровідниками**

Напівпровідники, як новий матеріал для електротехніки, стали застосовувати лише у середині минулого століття, а термін напівпровідники був уперше запропонований та використаний у публікації німецького фізика Кенісберга у 1914 році.

Перші ж дослідження напівпровідників було проведено Майклом Фарадеєм у 1833 році. Продовжуючи роботи свого вчителя Хемпфрі Деві, Фарадеєм було встановлено той факт, що електропровідність сірчастого срібла зі зростанням температури підвищується на відміну від металів, у яких вона зі зростанням температури падає. У наступні роки Фарадей спостерігав такі ж ефекти ще в ряді різних матеріалів, чим власне і відкрив новий напрямок в експериментальній фізиці - фізику напівпровідників або як називали її на той час - кристалофізику. Але як окрема галузь науки, фізика напівпровідників відокремилася від загальної фізики лише у 1930-х роках.

У той час дослідники не мали ні теоретичної, ні експериментальної бази для дослідження напівпровідників, тому деякий час вивчення напівпровідникових кристалів робилося дуже повільно і залишалося в тіні вивчення інших напрямів у фізиці. Так тривало до тих пір, поки в 1873 році не було виявлено, що опір матеріалу селену (Se), який використовувався для ізоляції телеграфного кабелю, змінюється при освітленні. Це відкриття сталося випадково під час проведення робіт з прокладання телеграфного кабелю між Англією та континентальною Європою. Тому саме роботи у новій галузі (електромагнітний телеграф) призвели до початку використання напівпровідникових матеріалів у електротехніці.

## **Винахід електричного телеграфу**

До середини XIX століття основним та єдиним видом зв'язку між континентами була пароплавна пошта. Про події та новини з інших країн люди дізнавалися із запізненням на цілі тижні, а іноді й місяці. Тому створення електричного телеграфу стало "революцією" у комунікації людей. Після того, як ця технічна новинка з'явилася в більшості країн, а земну кулю опоясали телеграфні лінії, були потрібні лише години або хвилини, щоб найважливіші новини стали відомими на всіх континентах земної кулі. Електричний телеграф став одним із найважливіших винаходів в історії людства і підштовхнув вчених до бурхливого розвитку засобів зв'язку.

Для роботи електричного телеграфу використовувався електричний струм, який практично зі швидкістю світла переміщався провідниками і переносив повідомлення на великі відстані. Кожне нове відкриття в електриці практично відразу знаходило застосування в різних способах зв'язку.

Схема електричного телеграфу народжувалася з великими муками, оскільки всі її елементи на той час були технічними новинками. Як джерело

електрики використовувалися електричні "сухі" батареї. Нещодавно винайдені електромагнітні реле знайшли застосування як підсилювачі-комутатори. Досліджувалися різні метали як електричні проводи, а для них проводилися пошуки ізоляції. Вибиралися способи реєстрації телеграфних сигналів, що передавались, створювалася система їх кодування і ретрансляції.

Одним із найважливіших відкриттів у телеграфії було те, що повідомлення можна було передавати по одному дроту, якщо заземлити його інший кінець у точці прийому. Після цього стали на одній станції тракту передачі заземлювати позитивний полюс батареї, а на іншій – негативний, при цьому відпала потреба тягнути другий провід, як це робили на початку. "Земля" при цьому була провідником для зворотного струму.

Найбільшу роль у становленні електричного телеграфу зіграв Семюел Морзе. Він витратив більшу частину життя на розвиток цього засобу зв'язку. Незважаючи на те, що за професією він був художником і дуже слабо розбирався в теоретичних питаннях електрики, його наполегливість і здатність залучити потрібних людей, дозволили створити геніально просту систему передачі повідомлень по проводах на великі відстані. Майже все Семюелю Морзе доводилося робити самому. Під час розробки схеми свого телеграфу він наробив багато помилок, знаходячи та виправляючи які, розвивав практику електрозв'язку. Завдяки його дослідом стало зрозуміло, що потрібна надійна ізоляція оголених електричних проводів; для посилення слабких сигналів, що передаються по лінії, необхідне застосування електромагнітного реле; ланцюг передачі повідомлень повинен складатися з багатьох наступних один за одним простих сегментів телеграфного тракту. Першу телеграфну лінію завдовжки 64 км прокладали між Вашингтоном та Балтімором. Її вирішили прокласти під землею, але незабаром з'ясувалося, що ізоляція не витримала вологості та утворилася велика кількість коротких замикань у лінії. Часу на розгляд із ізоляцією не було і проводи стали підвішувати над землею на спеціальних телеграфних стовпах.

Розроблена схема телеграфного апарату Морзе була простою і дуже ефективною. Тому цей електричний телеграф набув ширшого поширення у світі, а розроблена під керівництвом Морзе система кодування повідомлень використовується і сьогодні в аматорському радіозв'язку.

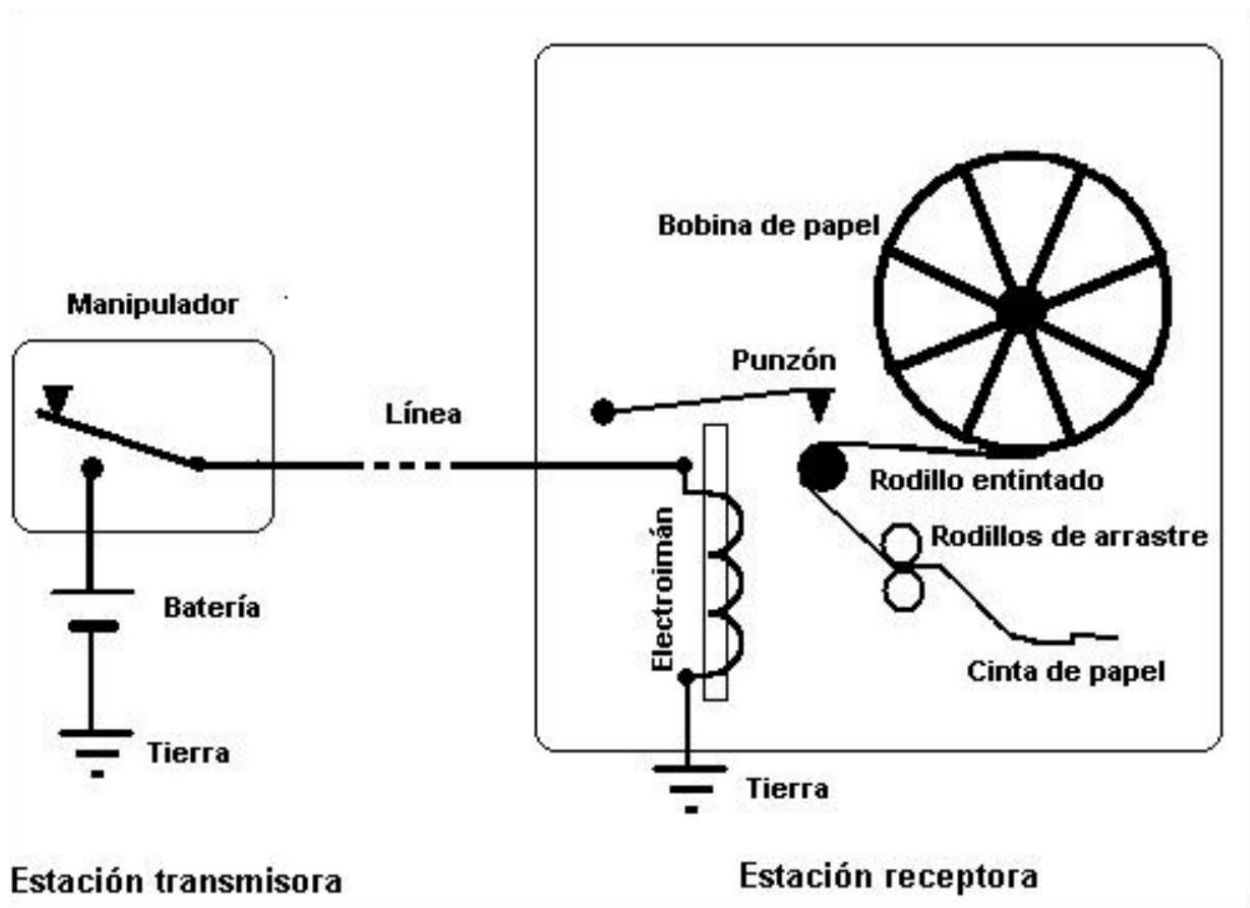


Схема електричного телеграфу С. Морзе

У перших своїх дослідах Морзе використовував для своєї мети лише одну електричну батарею, тому передати сигнал на виконавчий пристрій міг тільки на невелику відстань. Чим довшим був провід, тим більшим був його опір. Тонкий електричний провід легко розривався. Тому надалі телеграфні дроти стали робити або великого перерізу або у вигляді багатожильного плетеного кабелю.

Ізоляція проводів приносила також багато незручностей. Потрібен був кабель великої протяжності, міцності та ізольованості, щоб прокласти його під водою на великі відстані та на великих глибинах.

Спроби з'єднати електричним зв'язком континентальну Європу та Англію почалися ще в 1840 році, коли англійський професор Уїтстон представив на розгляд парламенту проєкт прокладання підводного електричного кабелю від англійського Дувра до французького берега, але не отримав згоди, відповідно і грошей. Ідею прокладання під водою телеграфних кабелів, через два роки перехопив Семюель Морзе, який на той час вже зв'язав телеграфним кабелем береги бухти Нью-Йорка і забезпечив передачу повідомлення з використанням власного запатентованого коду — коду Морзе. У коді Морзе літери видаються комбінаціями коротких і довгих сигналів - "крапок" і "тире". Тоді ж він передбачив, що незабаром телеграф зв'яже Старе Світ з Новим. Що, власне, і сталося через десятиліття. Щоправда, телеграфний зв'язок пропрацював лише один місяць, після чого

телеграф замовк назавжди. Основною причиною швидкого виходу з експлуатації телеграфної лінії була низька якість ізоляції електричних провідників. У той час основними матеріалами для їхньої ізоляції служили натуральні полімери: каучук і гуттаперча, а зовні кабель обвивався бронею із сталевого дроту. Для прибережних ділянок броню на кабелі виготовляли у два, а то й у три шари для захисту від рибальських снастей та якорів кораблів.

У 1873 році англійський фізик У. Сміт запропонував використовувати як ізоляцію селен. Технологія ізоляції була наступною: селен нагрівали до температури 220 – 230 °С, при якій він переходив у рідку фазу, а після цього його наносили на мідний провідник як ізолятор. Після остигання селенового шару виходила порівняно товста "скляна" ізоляція на телеграфному кабелі. При випробуваннях цього кабелю як телеграфної лінії він виявив цікаве явище: при освітленні навіть дуже слабким "місячним" світлом питома провідність кабелю змінювалася. Причиною такого явища виявились цікаві ефекти, виявлені в ізоляційному матеріалі кабелю. Саме ці ефекти стали основою перших селенових фотоопорів, серійне виробництво яких почалося в 1876 році.

**Довідка:** Селен — хімічний елемент групи 16, 4-го періоду в періодичній системі Менделєєва, має атомний номер 34, позначається символом Se (лат. Selenium).

Селен був відкритий в 1817 році Берцеліусом і Ганном при дослідженні опадів, які утворювалися в свинцевій камері при виробництві сірчаної кислоти. Новий елемент через хімічну схожість з елементом Теллур (Te) був названий грецьким словом "селен", що означає "місяць". Майже п'ятдесят років селен залишався лабораторною рідкістю. Починаючи з 1873 року, селен почав застосовуватися для створення фотоелементів і цей рік став початком широкого проникнення селену в різні галузі промисловості. На сьогоднішній день селен знаходить застосування у металургії, хімічному виробництві, електроніці та медицині.

У природі селен зустрічається у складі близько 50 мінералів, проте вміст селену в земній корі не перевищує  $1,4 \cdot 10^{-5}\%$ . Мінерали, що містять селен, є великою частиною селеніди важких металів, такі як берцеліаніт  $\text{Cu}_2\text{Se}$ , науманіт  $\text{Ag}_2\text{Se}$  та інші. Селен зазвичай присутній у сульфідах: піриті, галеніті, халькопіриті, - в концентраціях близько сотих відсотка. Найбільші запаси селену приурочені до гідротермальних сульфідних родовищ — колчеданових, мідно-цинкових, мідно-молібденових та поліметалевих.

У сучасній промисловості селен отримують декількома способами:

- Вилученням з мідь електролітних шлаків і шлаків сірчано-кислотного та целюлозно-паперового виробництва, що містять мідь;
- Вилучення з побічних продуктів свинцевого виробництва;
- Отримання вторинного селену із утилізації копіювального обладнання.

Селенові фотоопори стали використовуватися в різних оптичних приладах. Виникла потреба пояснити причину цього явища та розпочати пошук нових світлочутливих матеріалів. Так на рубежі XX століття фізики почали детально вивчати різні матеріали, які за їх властивостями не можна було віднести ні до провідників, ні до діелектриків.

## Фізичні процеси у напівпровідниках

Формування уявлень про фізичні процеси, що відбуваються в напівпровідниках, утруднялося різноманітним виявленим явищам. Проводячи їх дослідження, член Національної американської академії Едвін Г. Холл у 1879 р. відкрив гальваномагнітний ефект у напівпровіднику зі струмом, поміщеним у магнітне поле. Сутністю цього явища було виникнення поперечного електричного поля та різниці потенціалів у напівпровіднику, яким проходить електричний струм, при розміщенні їх у магнітне поле, перпендикулярне напрямку струму. Теоретики тих років могли пояснити поведінку електронів у металах, але пояснити таку поведінку напівпровідників у магнітному полі вони не могли.

Проте вже на початку XX століття природа електропровідності напівпровідників отримала правильне пояснення. Цьому успіху значною мірою сприяли роботи німецького електрохіміка І. Кенігсбергера.

Кенігсбергер міркував так. Провідність визначається величиною струму, що протікає через переріз площею  $1 \text{ м}^2$  під дією електричного поля напруженістю  $1 \text{ В/м}$ . Оскільки електричний струм - це впорядкований рух заряджених частинок, то він залежатиме від концентрації цих частинок, швидкості їх упорядкованого руху і величиною заряду, що переноситься кожною часткою:

$$Q = N \cdot v \cdot q \quad (1)$$

Таким чином, Кенігсбергер припускав, що зміна електричної провідності напівпровідників залежить від концентрації в ньому електронів.

Заряд частинки  $q$  є постійним, що не залежить від температури. Тому цю величину можна виключити зі списку факторів, що зумовлюють залежність провідності від температури.

Швидкість руху частинок  $v$  з температурою зростає. Але тепловий рух частинок не впорядкований, а хаотичний. Зростання швидкості хаотичного руху збільшує кількість зіткнень цих частинок одна з одною, і в результаті швидкість упорядкованого перенесення заряду  $v$  (а саме це є обов'язковою ознакою електричного струму) зменшується. В результаті провідність має зменшуватися зі зростанням температури, що ми й спостерігаємо в металах.

Залишається припустити, що із зростанням температури у напівпровідниках збільшується концентрація частинок – носіїв заряду. І це збільшення настільки велике, що перекидає теплове зменшення швидкості упорядкованого перенесення заряду.

У своїй роботі, опублікованій Кенігсбергером у 1906 році, він писав: *"При підвищенні температури в оксидах і сульфідах кількість провідних вільних квантів електрики - електронів - збільшується, поки не стане граничною, після чого їх поведінка уподібнюється металам, в яких при нормальній температурі майже всі електрони вільні."*

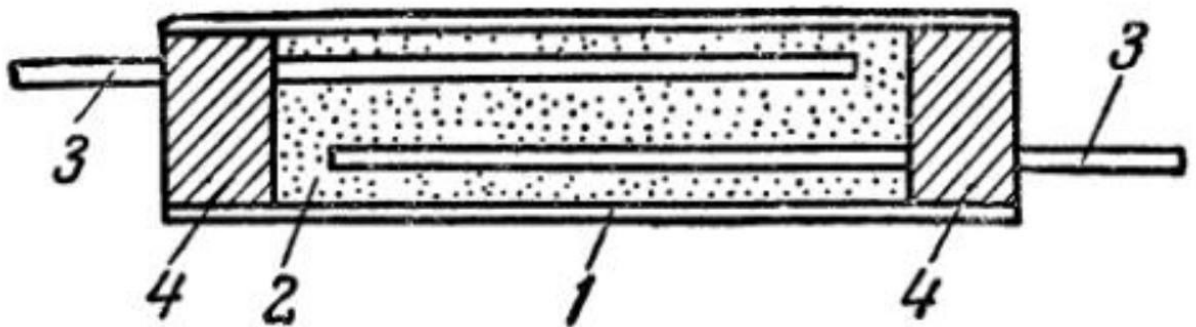
Крім характерної температурної залежності у провідності, клас напівпровідників з точки зору Кенігсбергера характеризується ще кількома основними властивостями:

- величиною їх питомого опору в межах від  $10^{-8}$  до  $10^1$  Ом\*м;
- великими значеннями їх термо-ЕРС (електрорушійна сила) у парі з металом;
- недотриманням закону Ома на контакті напівпровідник-метал;
- їх чутливістю до світла.

### Ера кристалічного детектора

Наступним етапом, який наблизив розвиток твердотільної електроніки, стало створення першого кристалічного детектора. Власне, детектори стали логічним продовженням розвитку технологій зв'язку. В 1895 році Олександр Попов провів перші експерименти, які підтвердили можливість телеграфування повідомлень з використанням електромагнітних хвиль. Незалежно від Попова, у Великій Британії Марконі провів аналогічні експерименти із запізненням у кілька місяців. Таким чином, Попов і Марконі відкрили еру телеграфії без проводів.

У своїх дослідях Олександр Попов використав новий прилад – детектор радіохвиль (когерер). Пристрій когерера показано на малюнку. Він був невеликою колбою заповненою металевими (окисленими) опилками, які заповнювали проміжок між двома металевими електродами. Електродами служили платинові дротики, оскільки цей метал дуже стійкий до корозії. У цій схемі когерер виступав у ролі детектора радіосигналу.



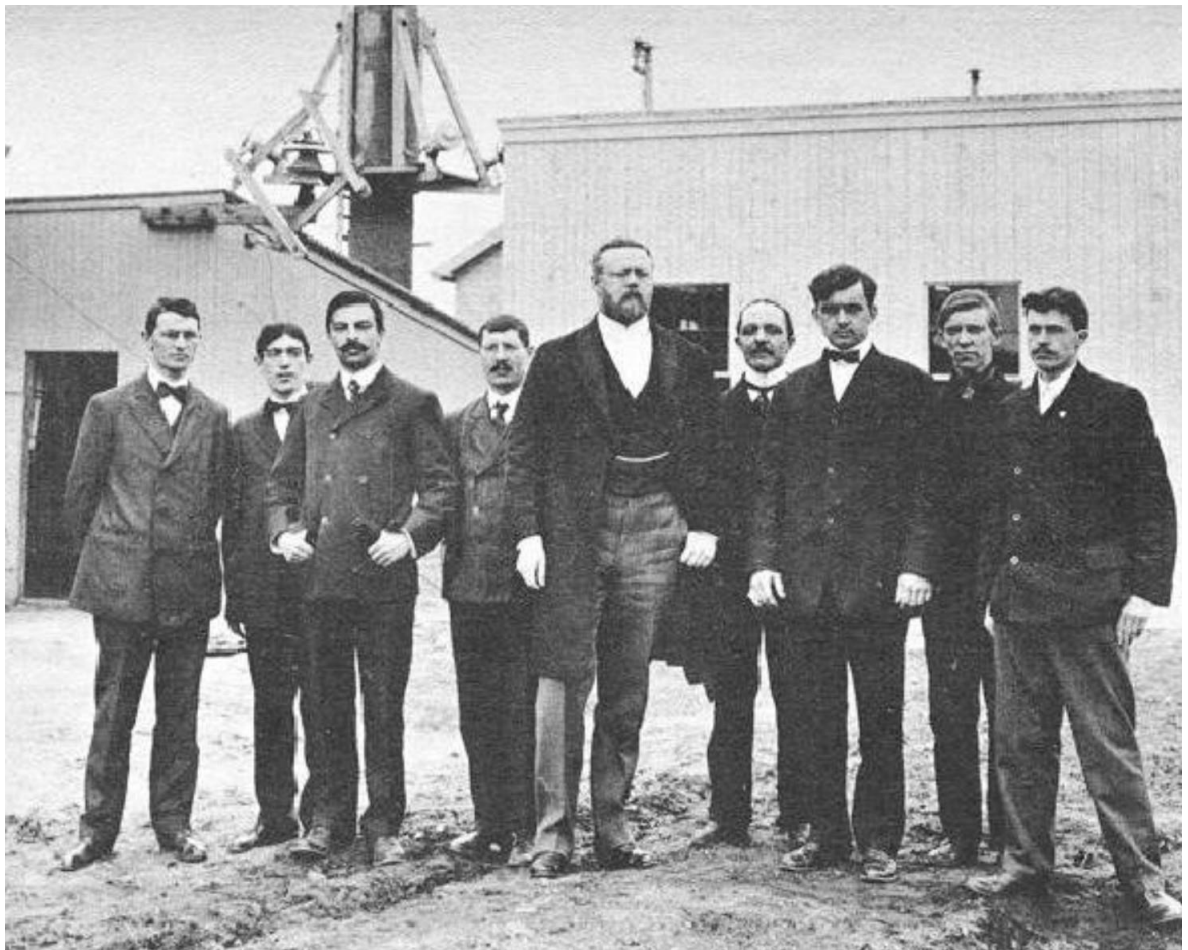
Конструкція когерера (вид зверху).

1-скляна трубка, 2-металевий порошок, 3-платинові електроди,  
4-пробки

Робота когерера ґрунтувалася на тому, що його опір зменшується у кілька десятків разів при додатку до нього незначного високочастотного електромагнітного поля. При цьому металевий порошок (опилки) намагнічуються і злипаються один з одним, забезпечуючи кращу електричну провідність. Опір такого намагніченого порошку різко зменшується. Таким чином когерер виконує функцію перетворення електромагнітного сигналу

високої частоти в електричний струм низької частоти, тобто здійснюється детектування радіосигналу. Поповим було виявлено, що якщо приєднати трубку до виводів когерера, то в моменти приходу електромагнітного сигналу чути клацання різної тривалості, тобто когерер виділяє (детектує) низькочастотну складову електромагнітного сигналу.

У 1903 році працівник компанії NESCO (National Electric Signal Company) Реджинальд Обрі Фессенден отримав патент на "рідинний бареттер" - детектор, заснований на властивостях зони дотику електрода і електроліту. Цей пристрій став найважливішим відкриттям з часів когерера – завдяки його використанню було здійснено перший голосовий зв'язок. Зі щоденника Фессендера: *"Під час перших випробувань були передані не тільки мова, а й записані на фонографі мовні повідомлення і музика. Всі радіоповідомлення, що отримуються, відрізнялися чіткістю і розбірливістю і в цьому відношенні помітно вигравали в порівнянні зі звичайними лініями провідного зв'язку"*.



Реджинальд Фессенден в центрі зі співробітниками. Брант-Рок. 1906.

Незважаючи на початок застосування для передачі голосових повідомлень з 1903 року радіозв'язку, бездротові телеграфи існували ще понад 20 років. А перші голосові мовні радіостанції з'явилися лише 1915 року.

У 1906 році американський інженер Грінліф Віттер Піккард отримує патент на винахід кристалічного детектора. У своїй патентній заявці він пише: "Контакт між тонким металевим провідником і поверхнею деяких матеріалів з кристалічною структурою (кремній, пірит, галеніт, германій та ін.) випрямляє та викликає демодуляцію височастотного струму, який виникає в антені при прийомі радіохвиль". Тонкий металевий провідник, за допомогою якого здійснюється контакт з поверхнею кристала, зовні дуже нагадував котячі вуса, тому в технічній літературі часто зустрічається назва цього детектора – "котячий вус" Піккарда.

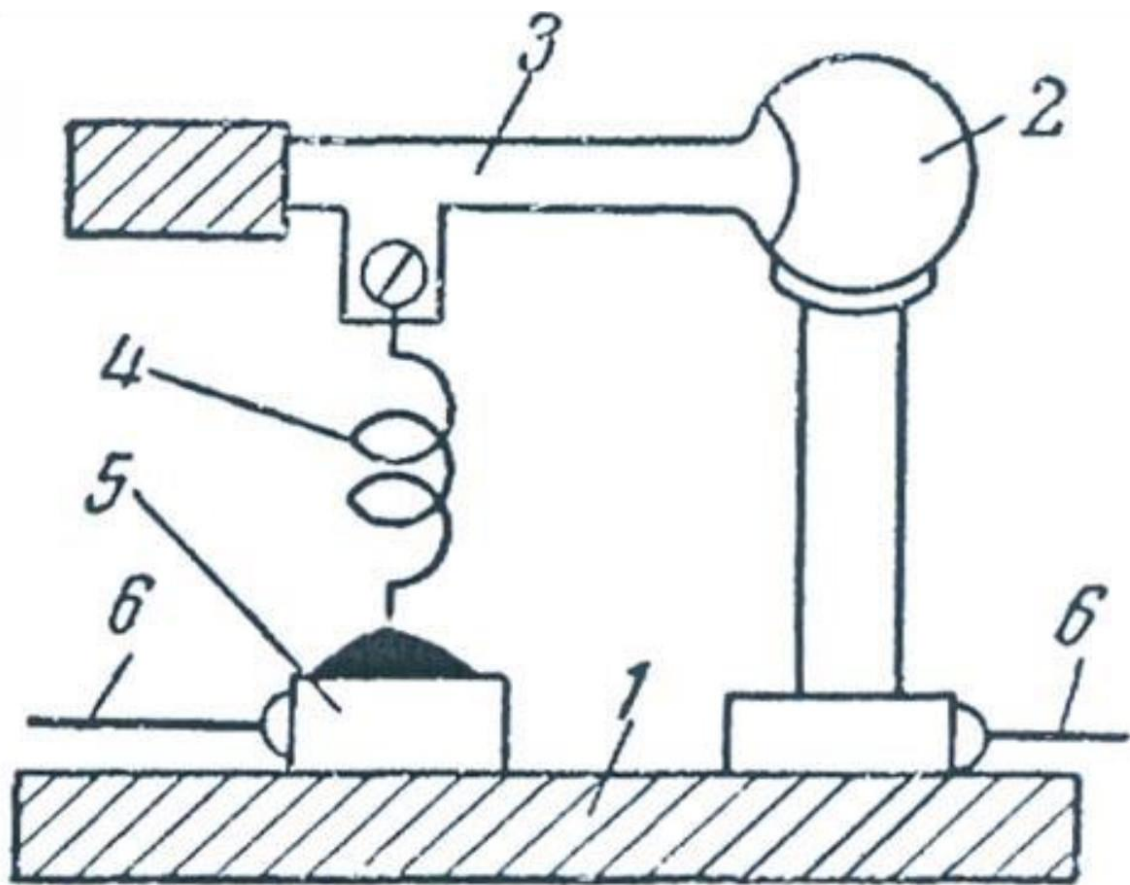


Один із перших кристалічних детекторів —  
"Котячий вус" Піккарда

**Довідка.** Подальший розвиток радіотехніки призвів до того, що кристалічний детектор отримав загальне визнання як необхідний і суттєвий елемент приймального пристрою, що забезпечує демодуляцію сигналу, який приймається. До першої світової війни у всіх приймальних пристроях комерційного та військового типів завжди фігурував кристалічний детектор, який виконував функцію перетворювача сигналу високої частоти в сигнал низької частоти.

У період першої світової війни, коли в радіотехніку почала впроваджуватись електронна лампа, з'явилися перші лампові детектори. Спочатку для цієї мети застосовувалися двоелектродні, а потім і триелектродні лампи. Лампові детектори мали одну істотну перевагу в порівнянні з кристалічними детекторами того часу. Вони забезпечували надійну та стійку роботу приймача, чого не можна було тоді досягти за допомогою кристалічних детекторів.

Кристалічні детектори виготовлялися на той час із природних кристалів різних мінералів — свинцевого блиску, цинкіту, піриту та інших, які є провідниками електричного струму з низькою електропровідністю (напівпровідниками). За наявності точкового контакту одного з цих напівпровідників з вістря тонкого металевого дроту, згорнутого у вигляді пружинки, можна було досягти ефекту детектування. Не всі точки поверхні кристала мали "чутливість" до детектування. Тільки при слабкому натисканні пружинки на поверхню кристала детектування виходило хорошим. Оператору при налаштуванні приймача доводилося, таким чином, крім налаштування високочастотних ланцюгів займатися ще налаштуванням детектора, оскільки постійний контакт між металевою пружинкою та кристалом у детекторах на той час був відсутній. Пружинка зазвичай зміцнювалася на спеціальних кулькових шарнірах, що дозволяли вручну регулювати контакт (малюнок). Контакт часто бував нестійкий, легко збивався від струсу і виходив із ладу.



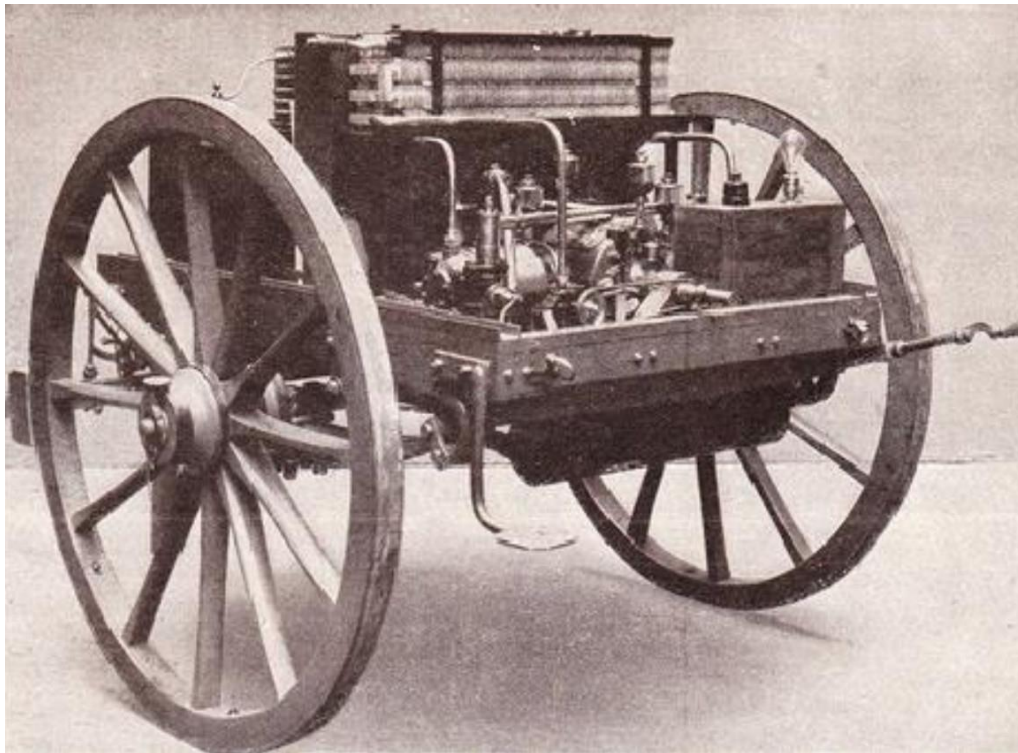
Конструкція перших кристалічних детекторів

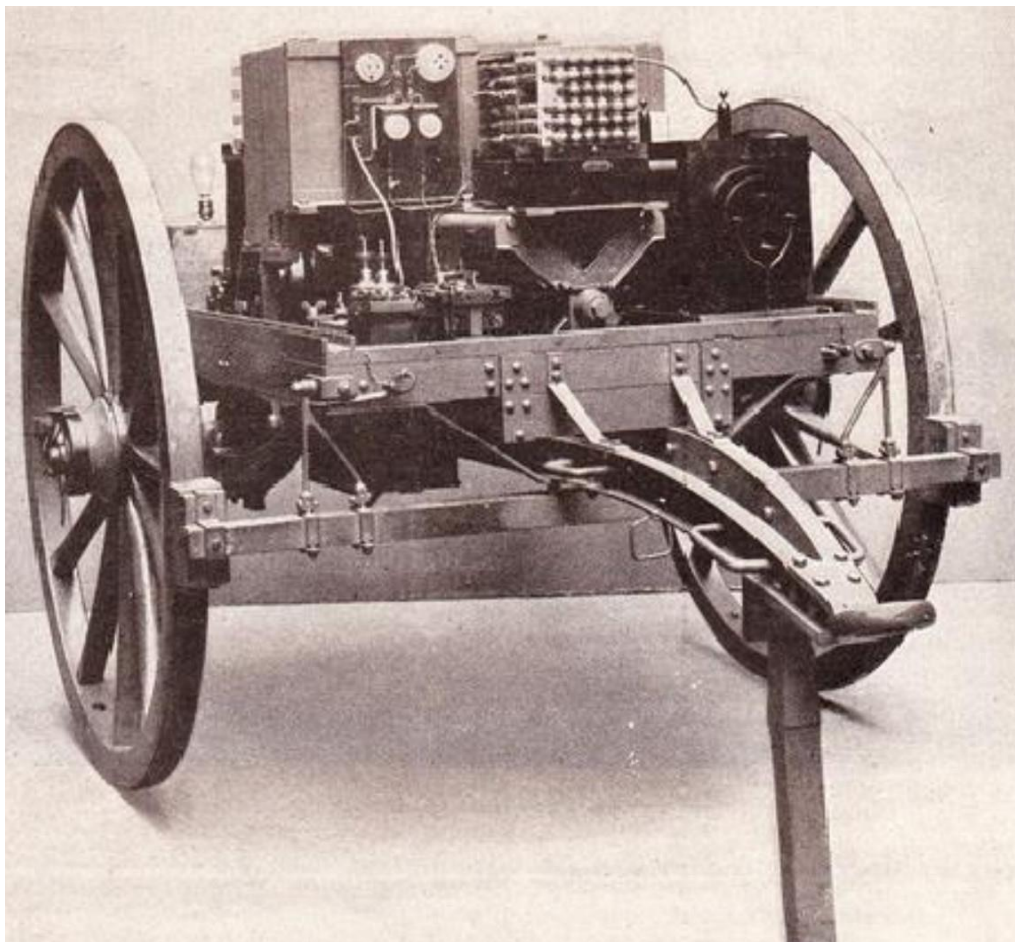
1- основа; 2-стійка із шарніром; 3-рижачок; 4-контактна пружинка;  
5-чашечка з кристалом 4; 6-виводи.

Таким чином, кристалічний детектор, який зіграв виключно велику позитивну роль у перший період розвитку радіотехніки, мав водночас низку недоліків, які стали виявлятися в міру того, як до апаратури почали пред'являтися більш жорсткі вимоги. Головним недоліком кристалічного детектора, були його нестійкість у роботі та складність налаштування.

В цей же час на кристалічні детектори звернули увагу низка компаній із різних країн світу. Радіозв'язок дуже цікавив військових. На деякий час

кристалічні детектори стають предметом досліджень. Так, наприклад, компанія Марконі вкладає тисячі фунтів стерлінгів у дослідження та виробництво кристалічних детекторів. Згідно з архівними документами Російської Академії Наук РАН, у дореволюційній Росії дослідженнями та виробництвом кристалічних детекторів займалося Російське товариство бездротових телеграфів і телефонів (РТБТіТ), яке було створено в м. Києві Семеном Мойсейовичем Айзенштейном в 1906 році на власні кошти. А вже в 1908 році в Санкт-Петербурзі указом царя Миколи II було створено акціонерне товариство РТБТіТ із статутним капіталом 1,2 млн. рублів (на сьогодні цей капітал становив би приблизно понад 25 мільйонів гривень).





Мала (польова) військова радіостанція



Кінна радіостанція з бойовим розрахунком

Серед основних цілей цього товариства були й дослідження щодо застосування напівпровідників.

На початку 1914 р., перед війною, Кенігсбергер опублікував перший в історії огляд по властивостях напівпровідників. У ньому Кенігсбергер вводить, нарешті, поняття "класу напівпровідників": "Напівпровідниками... будуть називатися провідники з металевою провідністю, опір яких дуже

сильно змінюється з температурою..." Описуючи кількісно залежність провідності від температури, Кенігсбергер пропонує:

$$\sigma = A e^{-q/T} \quad (2), \text{ де}$$

$\sigma$  – провідність

$T$  – температура

$A$  і  $q$  – коефіцієнти, що характеризують зразок напівпровідника.

Завдяки опублікованим роботам Кенігсбергера, на потужностях РТБТіТ стали випускатися перші кристалічні детектори для військових радіостанцій.





Кристалічні детектори виробництва Р.Т.Б.Т. і Т

Початок першої світової війни відсунув завдання досліджень напівпровідників на другий план. З перших днів війни всі заводи радіопромисловості в Росії працювали, щоб забезпечити якісним зв'язком Росію з союзною Антантою. Це було життєво необхідно, оскільки провідний зв'язок із союзними країнами Росією, Францією та Англією проходив через території супротивника. Так указом Миколи II саме суспільство РТБТіТ мало побудувати в найкоротші терміни кілька стаціонарних радіостанцій для зв'язку з союзниками. Згідно із збереженими матеріалами, протягом 3 місяців 1914 р. були побудовані 3 радіостанції в Царському селі, в Москві на Ходинці та в Твері.

Створення Тверської приймальної радіостанції відіграло ключову роль в історії напівпровідникової техніки. Саме тут зібрався унікальний дослідницький колектив на чолі із професором В.К. Лебединським та М.О. Бонч-Бруєвичем.

Випадкова зустріч в одному з приміських (як їх називали на той час дачних) поїздів професора Лебединського із ще нікому невідомим юнаком Олегом Лосєвим вплинула на долю подальшого розвитку напівпровідникової техніки. Неабиякі знання в галузі фізики, і явне прагнення радіотехніки молодого Олега Лосєва (на той час він навчався ще в школі), підштовхнули Лебединського до підтримки юнака в його починаннях. Так Олег Лосєв у свої 15 років почав вивчати ази радіотехніки на Тверській радіостанції.



Олег Лосев

Тоді ніхто не міг навіть припустити, що цей юнак зможе досягти всесвітньої слави. Час йшов, у країні все змінилося: зрікся престолу цар Микола II, потім було створено Тимчасовий Уряд, потім Жовтнева революція, громадянська війна і голод. Завдяки інтересу Тимчасового уряду до радіо, а також зусиллям В.К. Лебединського та М.О. Бонч-Бруневича у Нижньому Новгороді на початку 1917 року створюється радіолабораторія. За масштабами проведених досліджень та виробленої продукції на той час, її, напевно, можна було б порівняти з "силіконовою долиною" США. Так, у стінах цієї Нижегородської радіолабораторії створюються перші потужні радіопередавачі, розвивається теорія антен, проводяться унікальні дослідження в галузі радіозв'язку. У стінах лабораторії були створені перші проекти потужних радіостанцій для масової радіофікації країни, як тоді прийнято було говорити – "для створення "газети без паперу і відстаней". У 1920 році, в радіолабораторії з'являється Олег Лосев і через деякий час під керівництвом В.К. Лебединського починає проводити дослідження кристалічних детекторів.

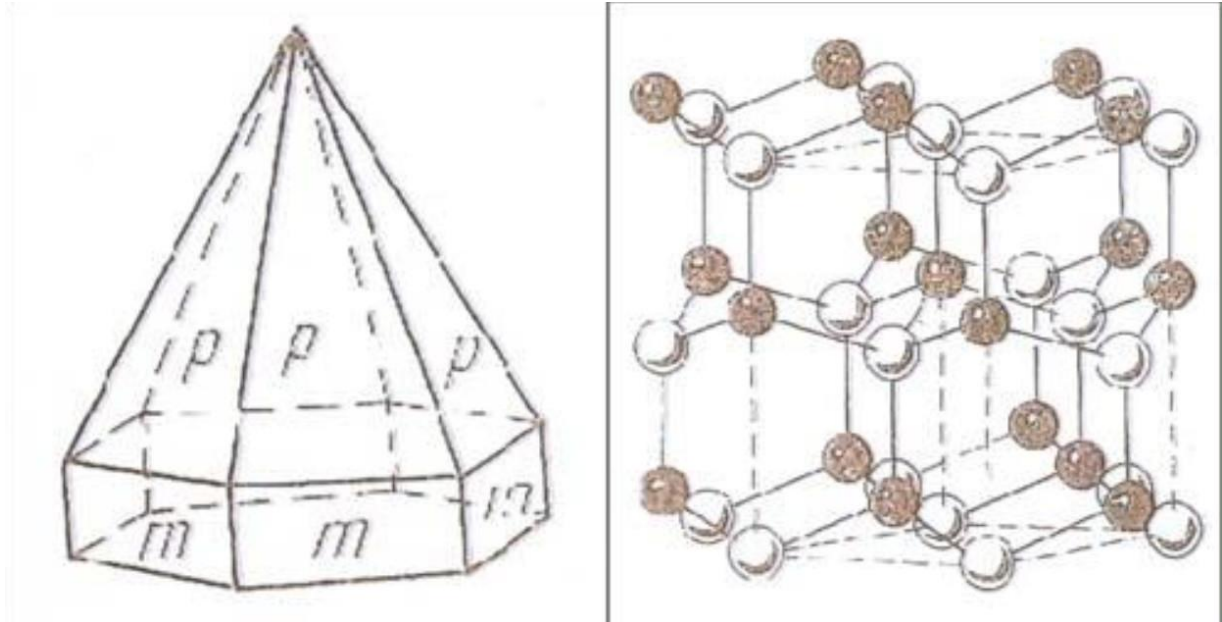
У 1922 році, проводячи досліди з кристалом цинкиту - простим оксидом цинку ( $ZnO$ ), він робить велике відкриття, яке отримало визнання не тільки в Радянському Союзі, а й у всьому світі.

**Довідка:** Цинкіт (червона цинкова руда) рідкісний мінерал класу простих оксидів цинку. Відкритий у 1845 році австрійським мінералогом В. Хайденгером.

Належить до простих оксидів. Назву отримав за вмістом у ньому цинку. Хімічний склад – Zn – 80,3%, O – 19,7%. Часто частина цинку заміщається марганцем (Mn). Очевидно, домішки марганцю є причиною забарвлення.

Сингонія гексагональна, вид симетрії гексагонально-пірамідальний.

Атоми цинку утворюють щільну гексагональну упаковку, в якій кожен атом (іон) кисню оточений чотирма іонами Zn по тетраедру.



Зазвичай утворює суцільні, листясті та зернисті агрегати. Кристали різні у вигляді гексагональної призми, яка нагорі закінчується гексагональною пірамідою, а внизу – моноедром.



Фізичні властивості. Чистий ZnO – безбарвний. Через домішки колір темно-червоний, яскраво-червоний, оранжево-жовтий. Риска – оранжево-жовта. Блиск близький до діамантового, напівметалевий. Злам раковистий, тендітний. Питома вага – 5,68. Твердість 4,0-4,5. Мікротвердість – 150-318. Має властивості напівпровідника.

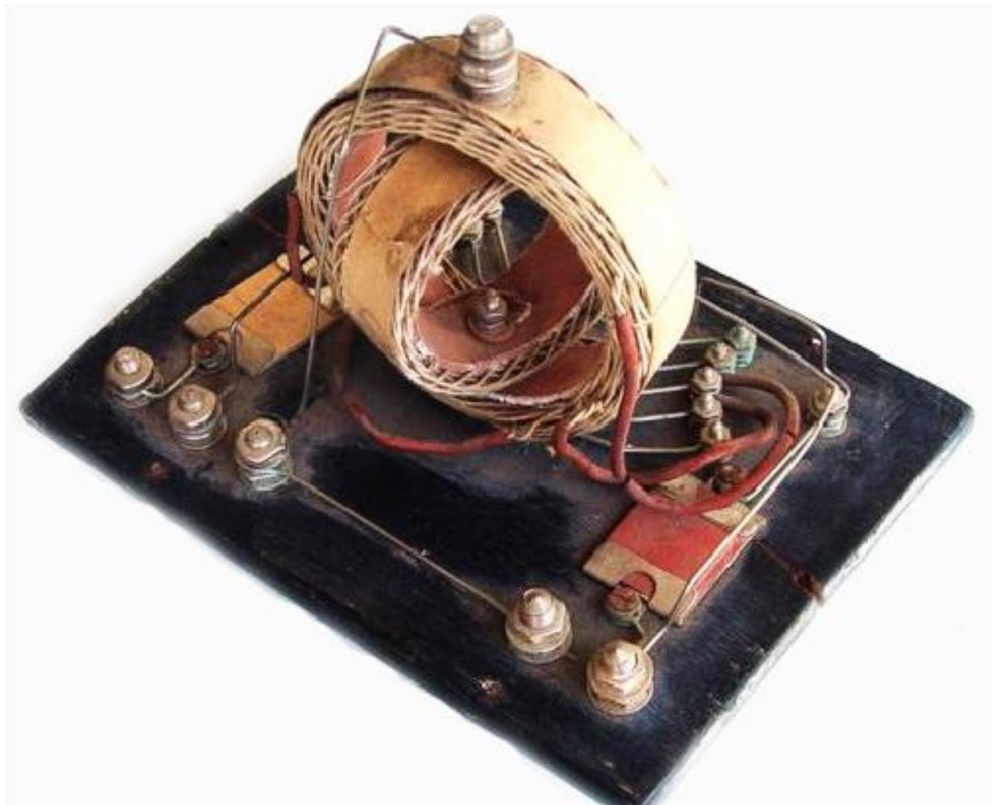
Найбільш знамениті родовища цинкіту - Франклін Фернас та Стерлін-Хілл у штаті Нью-Джерсі (США), де мінерал зустрічається разом із білим та червоним кальцитом. Там

знайдено дуже гарні зразки, дуже цінні з наукової точки зору. Відомі знахідки цинкіту у Польщі, Іспанії та Австралії. Колись важлива цинкова руда, цинкіт після виснаження американських родовищ перетворився на справжню рідкість для колекціонерів каменю.

Дослідження Лосева показали, що кристалічний детектор може бути одночасно і підсилювачем, і генератором малопотужних коливань. Найбільшою мірою ці властивості має детекторна пара: цинкіт-вугілля і цинкіт-сталь. Приймач, у якому використовуються зазначені властивості кристалічного детектора, отримав назву "кристадин". Перевага кристадину в порівнянні з ламповим детекторним приймачем полягала у простоті його пристрою та дешевизні: він споживав мало енергії, а для його роботи було достатньо кількох елементів сухих електричних батарей.

Звичайно, на той час кристадин не був серйозним конкурентом для ламп, він був ненадійним і примхливим у роботі. Проте багато радіоаматорів самі збирали кристадин Лосева, оскільки використання останнього давало широке поле для творчості. Наприклад, ось що було написано про кристадин в одному з журналів Радіоаматор за 1923 рік: "...кристадином тільки останнім часом зацікавилися; безсумнівно — кристалічний детектор ще не сказав свого останнього слова. Для любителя тут відкривається широке поле для експериментування (виробництва дослідів)."





Один із варіантів кристадина Лосева

На сторінках цього журналу ми знаходимо електричні схеми різних приладів із застосуванням в них кристалічного детектора.

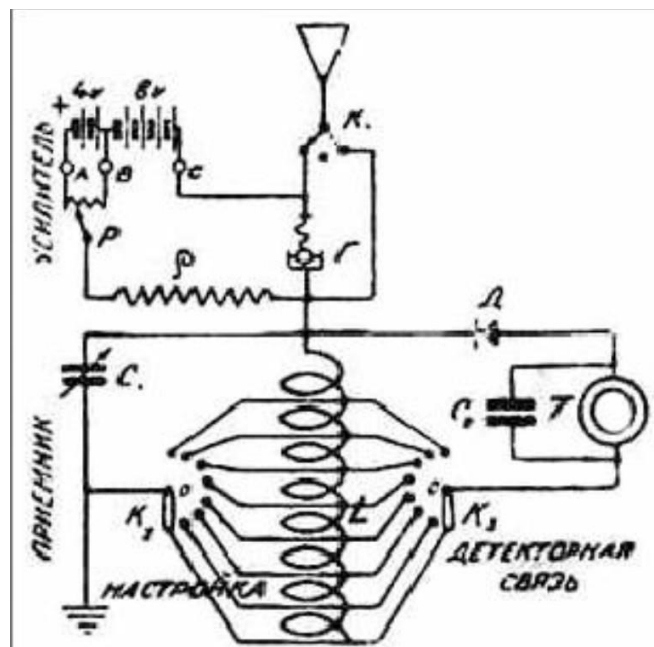
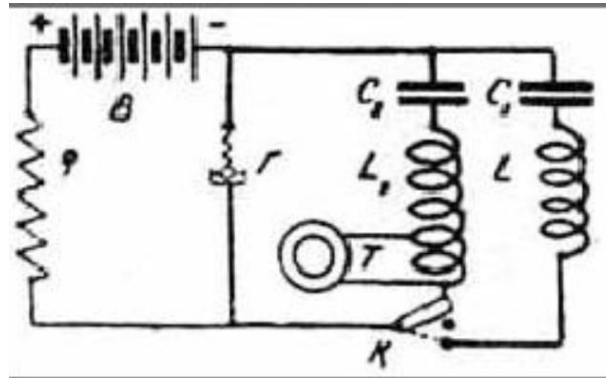
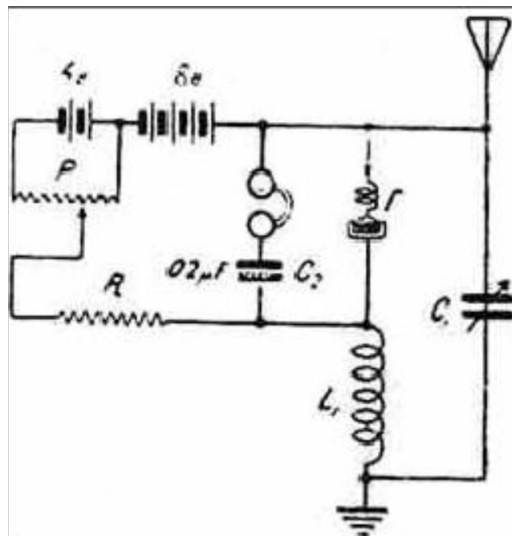


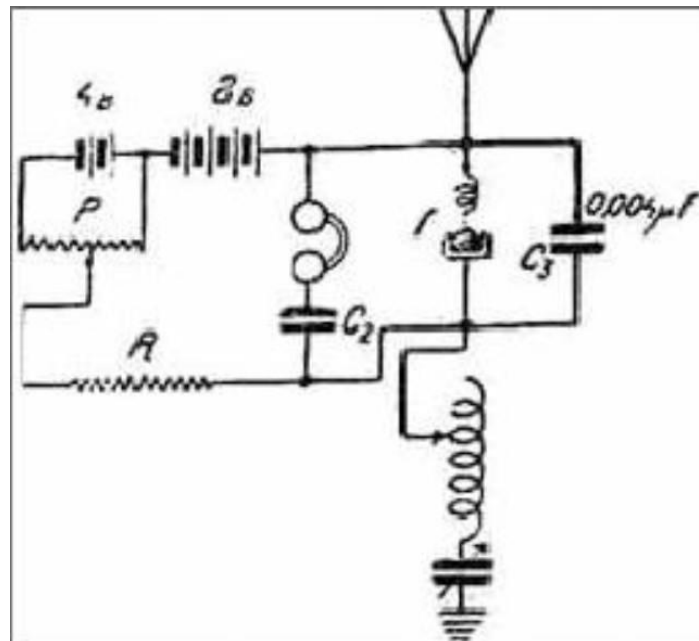
Схема детекторного підсилювача високої частоти



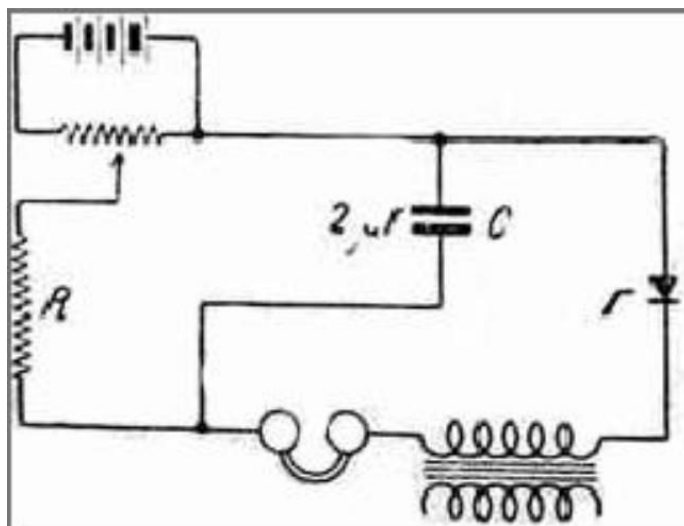
Детекторний генератор високої та низької частоти



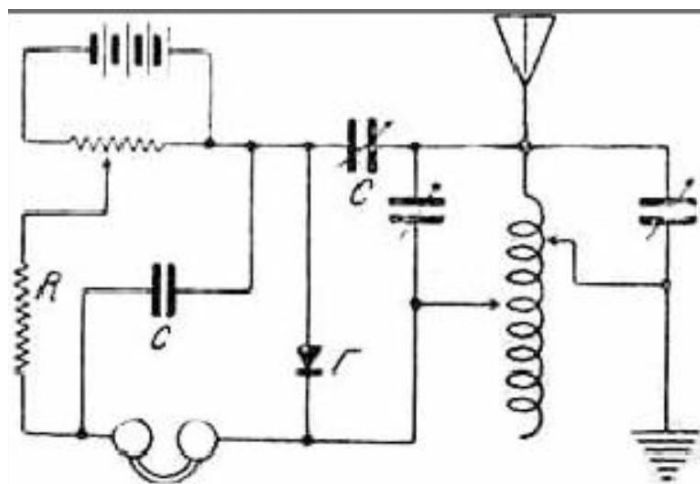
Регенеративний приймач для прийому довгих хвиль



Регенеративний приймач для прийому коротких хвиль



Підсилювач низької частоти



Цинкитний переривник

Завдяки простоті схеми та легкості в налаштуванні, кристадин Лосєва набуває широкого поширення. А статті автора цього устрою з'являються у науково-технічній періодиці як Радянського Союзу, так і в іноземних виданнях.

Продовжуючи свої роботи, О. Лосєв проводить дослідження кристалічних детекторів, побудованих на основі різних матеріалів, оскільки він розглядає не лише з'єднання цинкіт-сталь, а й інші. У таблиці 1 наведено основні його напрацювання, що друкувалися у 1920-х роках минулого століття у радіотехнічних журналах.

Таблиця 1

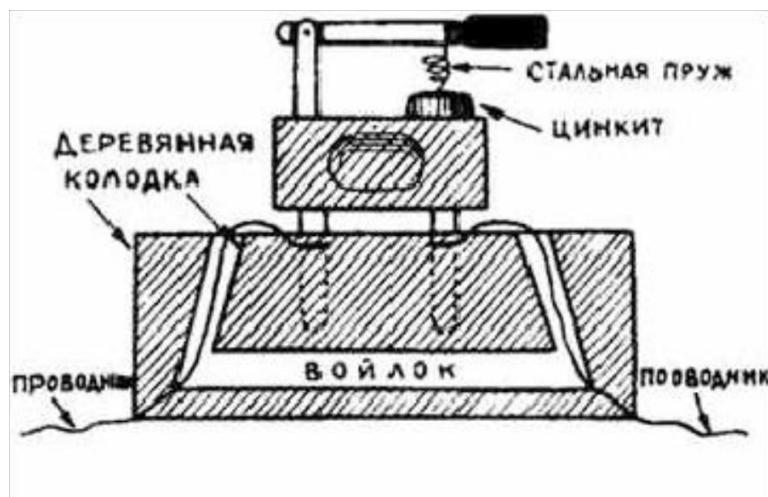
| № п/п | Кристал      | Знак дод. до кристалу напруги | Пара до нього | Знак доклада напруги | Стійкість та сила коливань | Примітка                                                                            |
|-------|--------------|-------------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | Цинкіт       | +                             | Вугілля       | -                    | 10                         | Коливання порівняно легко виходять при напрузі 8-12 вольт                           |
| 2     | Цинкіт       | -                             | Вугілля       | +                    | 7                          |                                                                                     |
| 3     | Цинкіт       | +                             | Сталь         | -                    | 8-10                       |                                                                                     |
| 4     | Цинкіт       | -                             | Сталь         | +                    | 5                          |                                                                                     |
| 5     | Цинкіт       | +                             | Мідь          | -                    | 7                          |                                                                                     |
| 6     | Цинкіт       | +                             | Цинк          | -                    | 4                          |                                                                                     |
| 7     | Цинкіт       | +                             | Магній        | -                    | 8                          | Коливан. виходять легко, але нестійкі                                               |
| 8     | Цинкіт       | +                             | Вольфрам      | -                    | 7                          |                                                                                     |
| 9     | Цинкіт       | +                             | Алюміній      | -                    | 2                          |                                                                                     |
| 10    | Цинкіт       | -                             | Алюміній      | +                    | 3                          |                                                                                     |
| 11    | Свинц. блиск | +                             | Сталь         | -                    | 2-3                        |                                                                                     |
| 12    | Свинц. блиск | +                             | Мідь          | -                    | 2                          | Напруга 25—20 в.; генерація виходить не з усіма кристалами.                         |
| 13    | Свинц. блиск | -                             | Мідь          | +                    | нет                        |                                                                                     |
| 14    | Свинц. блиск | +                             | Нікель        | -                    | 2                          |                                                                                     |
| 15    | Пірит        | +                             | Сталь         | -                    | 4                          |                                                                                     |
| 16    | Пірит        | +                             | Вугілля       | -                    | 5                          |                                                                                     |
| 17    | Халькопирит  | -                             | Цинк          | +                    | 2                          | Колив. виходять тільки з деякими. сорт. халькопириту                                |
| 18    | Халькопирит  | -                             | Алюміній      | +                    | 2                          |                                                                                     |
| 19    | Феросиліцій  | +                             | Вугілля       | -                    | 1                          | Колив. дуже нестійкі. І виходять лише з деякими сортами феросиліцію, напр. 15—20 в. |
| 20    | Феросиліцій  | +                             | Графіт        | -                    | 4                          |                                                                                     |
| 21    | Феросиліцій  | +                             | Сталь         | -                    | 1-2                        |                                                                                     |

Також О. Лосєв розробляє та публікує методики створення кристалічних детекторів у домашніх умовах. Одна з методик, описана в журналі Радіо Усім №9 за 1924 рік: "...Для початківця можна рекомендувати взяти генеруючою парою кристал - цинкіт і пружинку - сталь. Цинкіт необхідно вибрати хорошої якості. Однак переплавлення не кожен може зробити, і можна, звичайно, використовувати цинкіт без переплавлення.



Вугільна пластина

Переплавлення можна зробити на вольтовій дузі кіноапарата, однак, при мінімальному струмі. Цинкіт кладеться на вугільну пластинку і засипається перекисом марганцю (для запобігання розпилюванню при високій температурі). Між кристалом і другим вугільним електродом виникає при відповідному наближенні електродів вольтова дуга, яка і плавить цинкіт. Плавка триває до того часу, поки цинкіт не перетвориться на овальний королек, на що потрібно 15—20 секунд. За плавкою спостерігають через закопчене або темно-червоне скло.



Конструкція цинкітного детектора

Після плавки цинкіт очищається від чорної кірки і розколюється, кристал закріплюється в чашку детектора свіжим злом назовні. Пружинка робиться зі сталі в 0,2 мм товщиною і складається з 2-х витків (діаметр витка 7-8 мм). Детектор для запобігання струсу найкраще ставити в особливий верстат."

У цей же період гумористи країни совєтів висміюють кристалічні детектори, над якими радіоаматори "чаклували" у пошуках стійкого сигналу. Такі висміювання були не випадковими, часом навіть радіоаматори зі стажем

витрачали багато годин на пошук "стабільно працюючої точки". Тому часто люди, віддалені від радіоаматорства, казали, що в кристалі детектора сидить "нечиста сила". Лише на початку 30-х років ХХ ст. було встановлено, що присутні в кристалах небажані домішки впливають на "якість" роботи детекторів.



Шарж на роботу радіоаматора з кристалічним детектором

У 1928 році О. Лосев робить ще одне важливе відкриття, яке лягло в основу сучасних світлодіодів. Досліджуючи кристали карборунду (карбід кремнію), він відкриває електролюмінесценцію. Причому не маючи ні теоретичної бази, ні необхідного технічного обладнання О. Лосев стверджує, що природа двох його відкриттів (генерація коливань та свічення) від початку має єдину фізичну основу.

**Довідка:** Карборунд, карбід кремнію - бінарна неорганічна хімічна сполука кремнію з вуглецем. Хімічна формула  $\text{SiC}$ . У природі зустрічається у вигляді надзвичайно рідкісного мінералу — мусаніту. Найчастіше цей мінерал у природі зустрічається як включення в метеоритах. Вперше був виявлений у 1905 році при вивченні складу метеориту з Каньйону Діабло в Арізоні Анрі Муассоном.

У 1932-1933 рр. вже у Ленінграді О. Лосев докладно досліджував фоторезистивний ефект, властивий багатьом напівпровідниковим матеріалам. Їм, зокрема, було показано високу фоточутливість фоторезисторів на основі PbS (сульфід свинцю, свинцевий блиск). Наприкінці 1930-х років високочутливі фоторезистори на основі PbS були розроблені й у Німеччині; вони знаходили велике застосування під час Другої світової війни. Фоторезистори на основі PbS досі є одними з найбільш широко

застосовуваних фоторезисторів інфрачервоного (ІЧ)-діапазону, особливо в головках самонаведення та в космічних системах раннього виявлення запусків ракет.

## **Становлення фізики напівпровідників**

У 1926 р. австрійський фізик, лауреат Нобелівської премії Ервін Шредінгер розробив теорію руху мікрочастинок, так звану хвильову механіку. З її допомогою почалося формування уявлення про електронні "ансамблі", зонну теорію валентності тощо. Одна з перших задовільних теорій напівпровідників була побудована членом Лондонського королівського товариства Аланом Х. Вільсоном. Він запропонував "зонну теорію", за якою енергетичні стани електронів у твердому тілі створювали безперервні зони. Уявлення про структуру твердого тіла, що склалося в ці роки, призвело до введення поняття "дірки". Ці "дірки" поводитися подібно до збуджених електронів, характеризувалися рухливістю і щільністю струму. Термін "діркова провідність" згодом уперше ввів радянський фізик член-кореспондент АН СРСР Я.І. Френкель.

На початку 30-х років ХХ ст. німецьким фізиком Вальтером Шоттки експериментально було встановлено два типи напівпровідників – "надлишкові" та "дефектні". До "надлишкових" він відносив напівпровідники, які мали негативне значення ефекту Холла. Нині їх визначають як напівпровідники n-типу (від negative). "Дефектні" називалися зразки, що мають позитивне значення ефекту Холла, р-тип (від слова positive).

Важливу роль у розвитку теорії напівпровідників на початку 30-х років ХХ ст. зіграли роботи, які проводились в СРСР під керівництвом академіка Абрама Федоровича Іоффе. У 1931 р. він опублікував статтю з пророчою назвою: "Напівпровідники – нові матеріали електроніки".

На початку 30-х років ХХ ст., уряди розвинених країн наголошували на створення та розвиток радіолокації. Основним завданням, яке ставилося перед вченими, була розробка технології далекого виявлення бомбардувальників противника, що летять. До середини 30-х років ХХ ст. було розроблено перші радіолокаційні станції. У цей час фізика напівпровідників виділилася в окрему науку, а інтерес до напівпровідникових детекторів був особливо високий. Це було зумовлено двома причинами:

По-перше, напівпровідникові детектори (діоди) привертали до себе увагу фізиків, які цікавилися процесами, що відбуваються на межі контакту метал-напівпровідник у детекторі.

По-друге, незважаючи на те, що в радіотехніці панували електровакуумні прилади, кристалічний детектор продовжували застосовувати на ультрависоких частотах, де він виявився найефективнішим.

Так, наприклад, 3 січня 1934 року на Василівському острові в Санкт-Петербурзі, були успішно проведені випробування першої експериментальної установки з прийому відбитих від літака радіохвиль. У

ній були застосовані кристалічні детектори, які підтвердили практичну можливість реалізації ідей радіолокації.

До середини 30-х років XX ст. основним завданням для фізиків, які працюють з напівпровідниковою технікою, було завдання пояснити фізичну природу явищ на контакті метал-напівпровідник. Жодна теорія тих років її не пояснювала. Вченим вже вдалося експериментально отримати злиток кремнію, у якого з одного боку була провідність типу p, а з іншого n-типу. Історією стала подія, коли співробітник компанії "Bell Labs" Рассел Ол, вирізав з цього зливка зразок, що містить у собі p-n перехід. Це було в 1935 році, який найімовірніше і необхідно вважати роком створення p-n переходу, який в даний час є основою діодів та транзисторів, а також інтегральних мікросхем та мікропроцесорів.

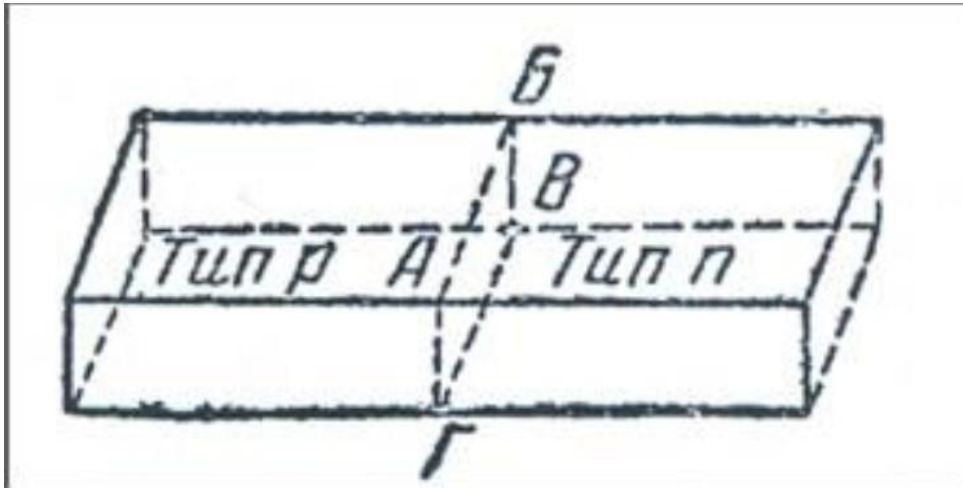
У Радянському Союзі на початку 30-х років XX ст. проводився цілий комплекс теоретичних та експериментальних досліджень процесів у контактах метал-напівпровідник, а також контактах напівпровідників з різним типом провідності, які ми зараз називаємо p-n переходами. Саме тоді почали зароджуватися основи теорії випрямлення струму на p-n переході.

**Довідка.** У 1937 р. акад. А.Ф. Іоффе та А.В. Іоффе звернули увагу на можливість випрямлення в контактному шарі, утвореному двома напівпровідниками з провідністю різного типу. Теорія випрямлення в такому шарі без урахування контактної різниці потенціалів тоді була розроблена Б.Й. Давидовим та згодом О.І. Губановим.

Кордон зіткнення двох напівпровідників з провідностями різного типу характеризується тим, що в тонкому прикордонному шарі між ними має місце перехід провідності одного типу до провідності іншого типу. У зв'язку з цим області зіткнення електронних і діркових напівпровідників отримали назву електронно-діркових переходів провідності або коротше переходів типу n-p або p-n.

Найбільш послідовна теорія випрямлення струму на контакті різних напівпровідників була розроблена співробітником ФТІ АН СРСР Борисом Йосиповичем Давидовим в 1938 р. Він запропонував власну теорію проходження струму в діодних структурах напівпровідників, у тому числі з різним типом провідності, названих пізніше p-n переходами.

Їм були опубліковані матеріали, згідно з якими передбачалося існування замикаючого шару в спеціально вирощеному монокристалі германію, об'єм якого розмежований поверхнею, що поділяє германій типу p і германій типу n (малюнок). Розділяюча поверхня АБВГ у цьому випадку поверхнею переходу типу p-n. Утворення замикаючого шару в переході типу p-n для германію повністю вкладалося в теорію утворення замикаючого шару в контакті між двома окремими напівпровідниками з провідністю різного типу.



Вирощений монокристал германію, в якому поверхня АБВГ є межею між германієм типу р та германієм типу n

Експерименти показали, що за таких умов утворення замикаючого шару прикордонна площа між германієм типу р і германієм типу n може мати значну площу та обмежується тільки величиною вирощеного монокристалу. При цьому було виявлено, що перехід типу р-n між двома різними об'ємами германію типу р і типу n в цьому випадку характеризується більшою однорідністю та стійкістю, ніж при природному утворенні на поверхні напівпровідника тонкого шару з провідністю іншого типу у разі контакту тонкого вістря металевої пружинки.

Було передбачено, що контакт між двома напівпровідниками з різними типами провідності повинен характеризуватись вольтамперною характеристикою нелінійного типу, властивій кристалічному діоду і що такий контакт може служити для випрямлення або перетворення струму.

**Довідка.** У нормальному кристалічному діоді здійснюється контакт між металевою, найчастіше — вольфрамовою, контактною пружинкою та напівпровідником типу n або типу р. Таким чином, описаний механізм утворення замикаючого шару в контакті між напівпровідниками типу n і типу р, здавалося б, не має безпосереднього відношення до кристалічного діода, але проведені дослідження процесів у контактному шарі напівпровідникових випрямлячів, вперше проведені радянськими фізиками, показали, що це не так. У 1940 р. проф. В.Є. Лашкарьов показав, що в міднозакисних і селенових випрямлячах замикаючий шар розташований не на самій поверхні напівпровідника, а в його об'ємі на невеликій глибині від поверхні, причому поверхневий шар напівпровідника випрямляча характеризується провідністю іншого типу, ніж вся решта його об'єму, що знаходиться по інший бік від замикаючого шару.

Замикаючий шар знаходиться не на поверхні напівпровідника, а в його об'ємі на невеликій глибині від поверхні і існує в напівпровіднику незалежно від контакту з металом. Таке уявлення про замикаючий шар дало можливість пояснити той факт, що в кремнієвих і германієвих кристалічних діодах ефект випрямлення, не залежить від природи металу контактної пружинки. Тим часом, якби він визначався здебільшого контактною різницею потенціалів, то ефект випрямлення мав би дуже помітно залежати

від природи металу контактної пружинки. Так само було експериментально доведено можливість випрямлення в контакті між двома напівпровідниками з електронною та дірковою провідністю.

Таким чином, можна вважати, що замикаючий шар, що утворюється в об'ємі германію і кремнію поблизу поверхні на межі розділу напівпровідників з електронною та дірковою провідністю, є домінуючим фактором з точки зору випрямлення в германієвих і кремнієвих діодах. Це не виключає того, що в деяких типах напівпровідникових випрямлячів домінуючим може бути замикаючий шар, що утворюється внаслідок контактної різниці потенціалів на межі метал-напівпровідник. У деяких випадках може мати місце спільна дія обох замикаючих шарів.



Борис Давидов

Відповідно до результатів досліджень було прийнято, що випрямлення в таких діодах відбувається за рахунок замикаючого шару, що знаходиться в об'ємі германію або кремнію на дуже невеликій глибині від поверхні. Цей шар існує незалежно від того, є контакт між металевою пружинкою і поверхнею германію або кремнію. Замикаючий шар утворюється внаслідок того, що в результаті обробки поверхні германію та кремнію в процесі їх виготовлення на цих напівпровідниках у природних умовах утворюється найтонший поверхневий шар з провідністю іншого типу, ніж провідність об'єму цих напівпровідників.

У запропонованій Б.І. Давидовим теорії вперше було дано теоретичне обґрунтування р-n переходу та введено поняття інжекції.

**Довідка:** Інжекція - фізичне явище, що спостерігається в напівпровідниках, при якому при пропусканні електричного струму в прямому напрямку через р-п-перехід у прилеглих до переходу областях створюються високі концентрації нерівноважних ("інжектованих") носіїв заряду.

Величини зворотних струмів, розраховані з теорії Б.І. Давидова, були набагато порядків менше, які спостерігаються в випрямлячах, що існували на той час, на основі закису міді і селену. Як показали наступні дослідження, на протікання струму в напівпровідникових випрямлячах, що існували тоді, явище інжекції не мало помітного впливу. Воно визначається процесами в шарі об'ємного заряду р-п-переходу. На жаль, відомості про дослідження Б.І. Давидова на сьогоднішній день відсутні у довідниках про радянських фізиків. Цей дивовижний факт — результат не лише випадкової помилки у його особистій справі, де були переплутані ініціали. Час, коли він працював на благо науки, наклав трагічний відбиток на його кар'єру фізика-теоретика. У 1952 році він був звільнений з Курчатівського інституту як "неблагонадійний" громадянин, але все ж таки зміг продовжувати свою роботу в Інституті фізики Землі, де він займався дослідженнями.

В 1941 році В.Є. Лашкарьов та К.М. Косаногов, які, як і Давидов належали до Ленінградської школи фізиків, довели, що випрямлення в детекторах з урахуванням структури оксид міді — закис міді визначається гетероконтактом напівпровідників р- і n-типів провідності. Модель пояснення природи фізики цього процесу пропонувалися Д.М. Наследовим та Г.Б. Абдуллаєвим, але, незважаючи на численні дослідження, теорія напівпровідникових випрямлячів на основі закису міді та селену протягом багатьох років не була створена.

**Довідка.** Коли вчені змогли зрозуміти детектуючі (випрямляючі) властивості р-п переходів, промисловістю стали випускатися різні вентильні пристрої. До появи площинних кремнієвих і германієвих діодів масово вироблялися селенові діоди, набрані в стовпчики або плоскі конструкції, які радіоаматори називали "шоколадками" (малюнок).

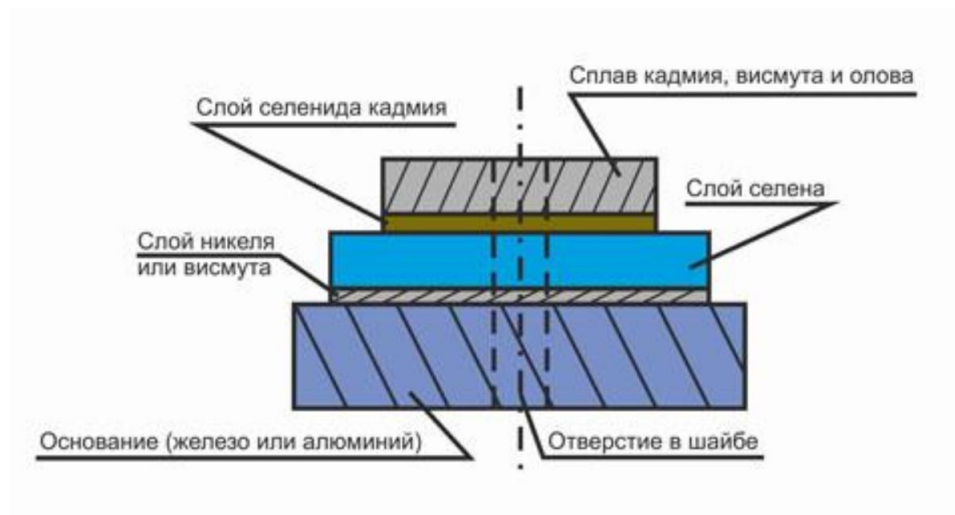


### Селеновий випрямляч плоскої конструкції (шоколадка)



Селенові стовпчики (Музей ТОВ "ЕПОС")

Завдяки простоті пристрою, надійності їх дії селенові випрямлячі швидко витіснили всі інші види випрямлячів. Селеновий випрямляч складається з набору окремих шайб селенів, кожна з яких є елементарним самостійним випрямлячем (діодом). Селенова шайба має властивість вентиля (діода), тобто добре проводить струм в одному напрямку (від залізної основи до контактного сплаву) і дуже погано – у зворотному напрямку (див. мал.).



### Конструкція селенової шайби (діода)

Селенова шайба складається з алюмінієвої або залізної пластини круглої або квадратної форми, покритої з одного боку шаром кристалічного селену, який є електродом з дірковою (р-тип) провідністю. Для створення другого електрода на поверхню селену наноситься сплав із олова, кадмію та вісмуту. При дифузії кадмію в селен утворюється тонкий шар селеніду-кадмію, що має електронну (n-тип) провідність. На межі між селеном та селенідом-кадмієм утворюється р-n перехід.

Вентильні якості селенової шайби як і будь-якого вентиля визначаються величиною його опору в провідному (прямому) і не провідному (зворотному напрямку).

З'єднуючи паралельно або послідовно такі шайби, можна зібрати селеновий випрямляч для струму або напруги будь-якої величини:

1. Струмове навантаження селенової випрямної шайби визначається її площею. Максимально допустима щільність струму в прямому напрямі має перевищувати величини 100-200 мА/см<sup>2</sup>. Для випрямлення великих струмів застосовується паралельне з'єднання пластин.

2. Допустима зворотна напруга на селеновій шайбі становить величину 20-40 В, тому для застосування селенових випрямлячів при більш високих напругах шайби селенові з'єднують послідовно в стовпи.

До недоліків селенових випрямлячів належать:

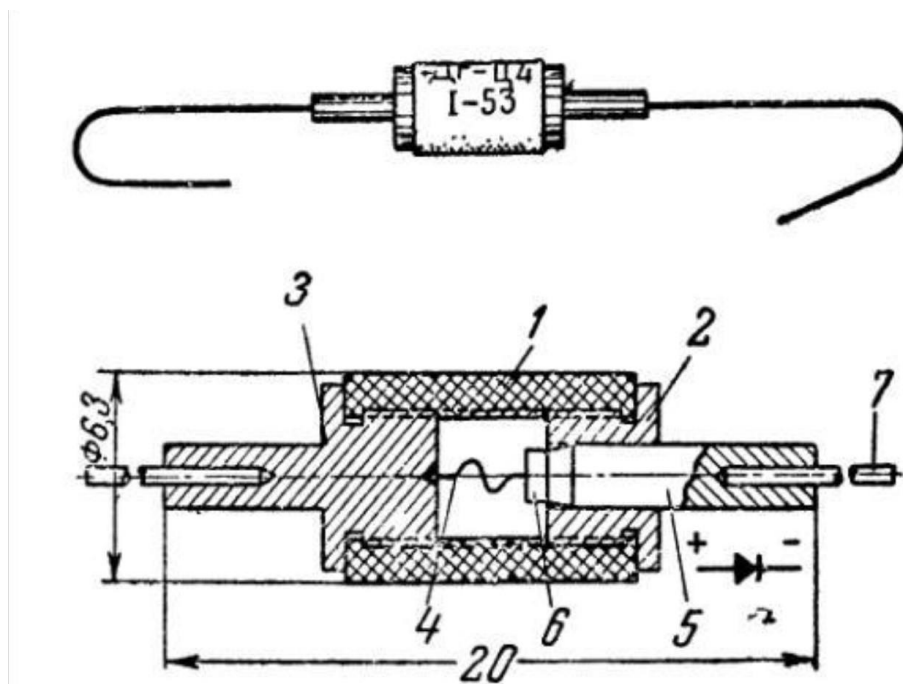
1. Висока ємність, тому вони використовуються тільки в низькочастотних пристроях.

2. Низька робоча температура, не вище +75-125 °С (при вищій температурі розплавляється контактний сплав кадмію з вісмутом та оловом).

До середини 40-х років XX століття проведені теоретичні дослідження показали необхідність і можливість створення нових напівпровідникових приладів. Причиною цього став той самий інтерес військових до застосування напівпровідників у радіолокації. У СРСР для розгортання робіт з радіолокації були створені спеціалізовані науково-дослідні та конструкторські бюро: ЦНДІ-108, НДІ-160, КБ-1 та ін. Ці роботи були "закритими", тому навіть зараз немає повної інформації про ті роботи, які проводились у цих лабораторіях.

До 1944 року в СРСР для радіолокації використовували НВЧ-детектори за схемою О. Лосєва. Застосування таких детекторів, як у польових, і у стаціонарних умовах було дуже непростим завданням. Обслуговуючому персоналу станції радіолокації доводилося витратити багато часу для пошуку "стабільної точки" на поверхні кристала.

Враховуючи велику важливість діапазону НВЧ радіохвиль для радіолокації, у ЦНДІ-108 було поставлено завдання розробити більш надійне точково-контактне з'єднання в детекторі НВЧ. Це дослідження в архівах значиться як НДР "Контакт". За його основу прийнято варіант зварного (вварного) точкового контакту металу з кристалом германію. На малюнку представлена конструкція германієвого діода, виконаного як точна копія детектора О. Лосєва, лише зменшена у кілька десятків разів. Діод був конструкцією, в якій тонка вольфрамова пружинка своїм вістрям спиралася на монокристал германію. Пружинка і кристал кріпилися до металевих фланців, в які запресовувалися гнучкі контакти. Конструкція від вологи та пошкоджень захищалася керамічною втулкою (див. малюнок).



Зовнішній вигляд конструкції вітчизняного германієвого діода типу ДГ-Ц 4.

- 1-керамічна втулка; 2 і 3 - металеві фланці;  
4 - вольфрамова пружинка; 5 - кристалотримач;  
6 - германій; 7 - виводи

Для виробництва детекторів цього типу у великій кількості знадобилися монокристали германію, власне виробництво яких тоді СРСР було відсутнє.

**Довідка:** Кристалічні діоди, в яких контакт малої площі між напівпровідником та металом здійснюється за допомогою вістря тонкої металевої пружинки, отримали назву – кристалічний діод з точковим контактом.

Функціонування деяких напівпровідникових випрямлячів (купорокських і селенових), розроблених раніше, було можливе при різних площах контакту від скільки завгодно малих до великих. Площа контакту в таких випрямлячах визначає лише гранично допустиму величину струму, що протікає, а також ємність, яка шунтує замикаючий шар.

Величина площі контакту в германієвих та кремнієвих діодах має для практики їх застосування дуже велике значення:

Мала площа контакту в кремнієвих і германієвих діодах є їх безперечною перевагою для застосування в техніці НВЧ, так як вони характеризуються малою ємністю, яка шунтує замикаючий шар. Ця ємність у германієвих та кремнієвих діодах має величину близько 1 пф, завдяки чому їх і вдається застосовувати як змішувачі та детектори на сантиметрових хвилях.

Кристалічні діоди типу германієвих і кремнієвих, у яких контакт малої площі між напівпровідником і металом здійснюється за допомогою вістря тонкої металевої пружинки, мають назву кристалічних діодів з точковим контактом. Слід наголосити, що точковий контакт є необхідним для існування замикаючого шару в таких діодах. Відомо, що при збільшенні площі контакту між германієм (або кремнієм) і металевою поверхнею випрямляючі властивості такого кристалічного діода пропадають, так як пропадає замикаючий шар. Ця обставина використовується, зокрема, при здійсненні контакту між напівпровідником та металевою основою патрона, в якому змонтований германієвий або кремнієвий діод. Задача цього контакту у тому, щоб створити повну електричну провідність між виводом патрона і об'ємом напівпровідника. Утворення замикаючого шару в цьому контакті було б перешкодою при використанні кристалічного діода. Контакт без замикаючого шару між поверхнею кремнію (або германію) та металевою основою патрона здійснюється завдяки тому, що поверхня контакту тут вибирається великою.

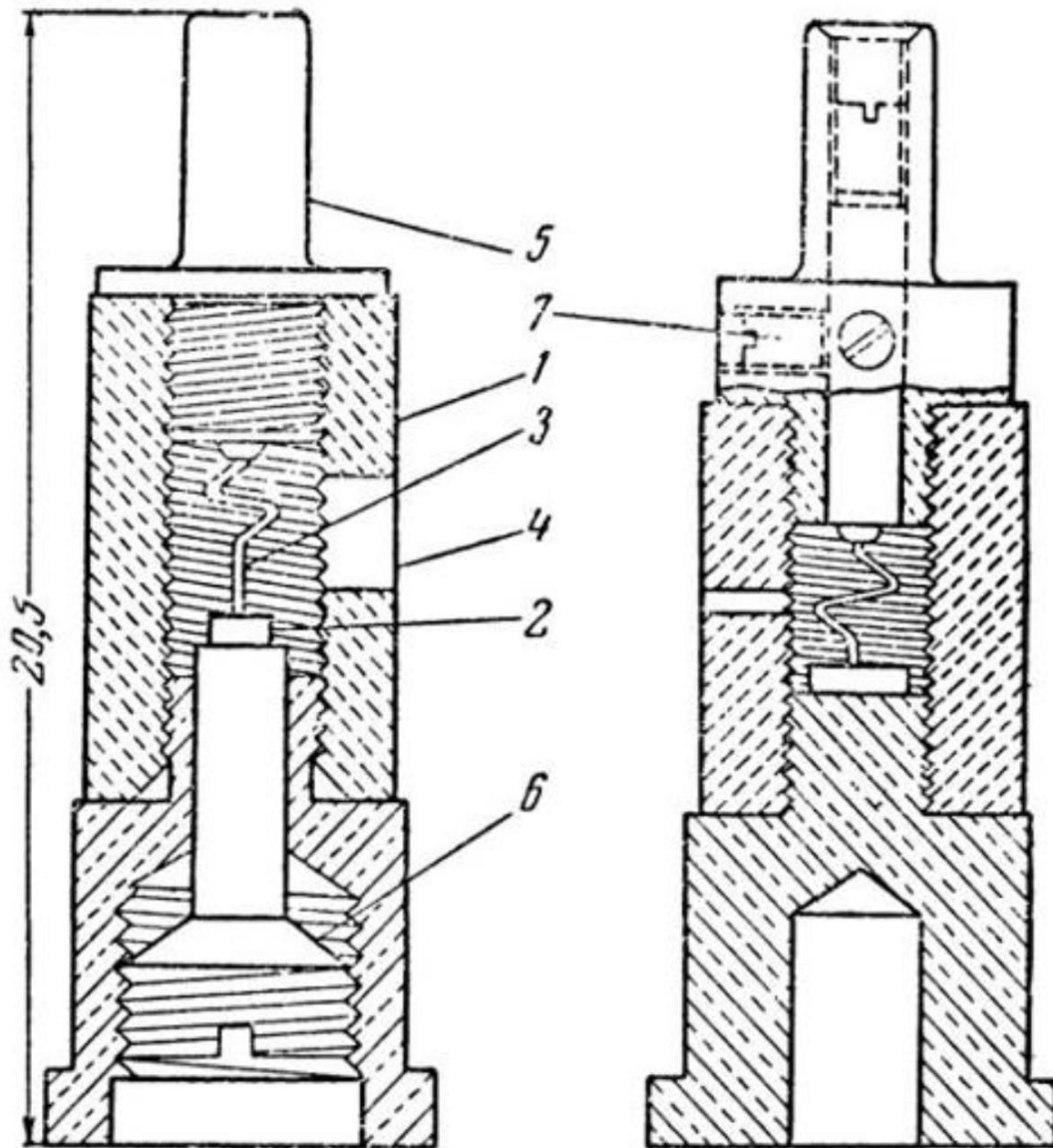
Таким чином, замикаючий шар проявляється в контакті між кремнієм (або германієм) і металом лише у разі контакту малої площі, тобто. точкового контакту. Нормальна площа контакту кристалічному діоді з точковим контактом має порядок  $10^{-6}$  см<sup>2</sup>.

Контактна пружинка в кристалічних діодах з точковими контактами виготовляється з тонкого вольфрамового дроту діаметром близько 0,1 мм, загостреного на кінці. Вольфрам застосовується для контактних пружинок внаслідок його твердості та пружності.

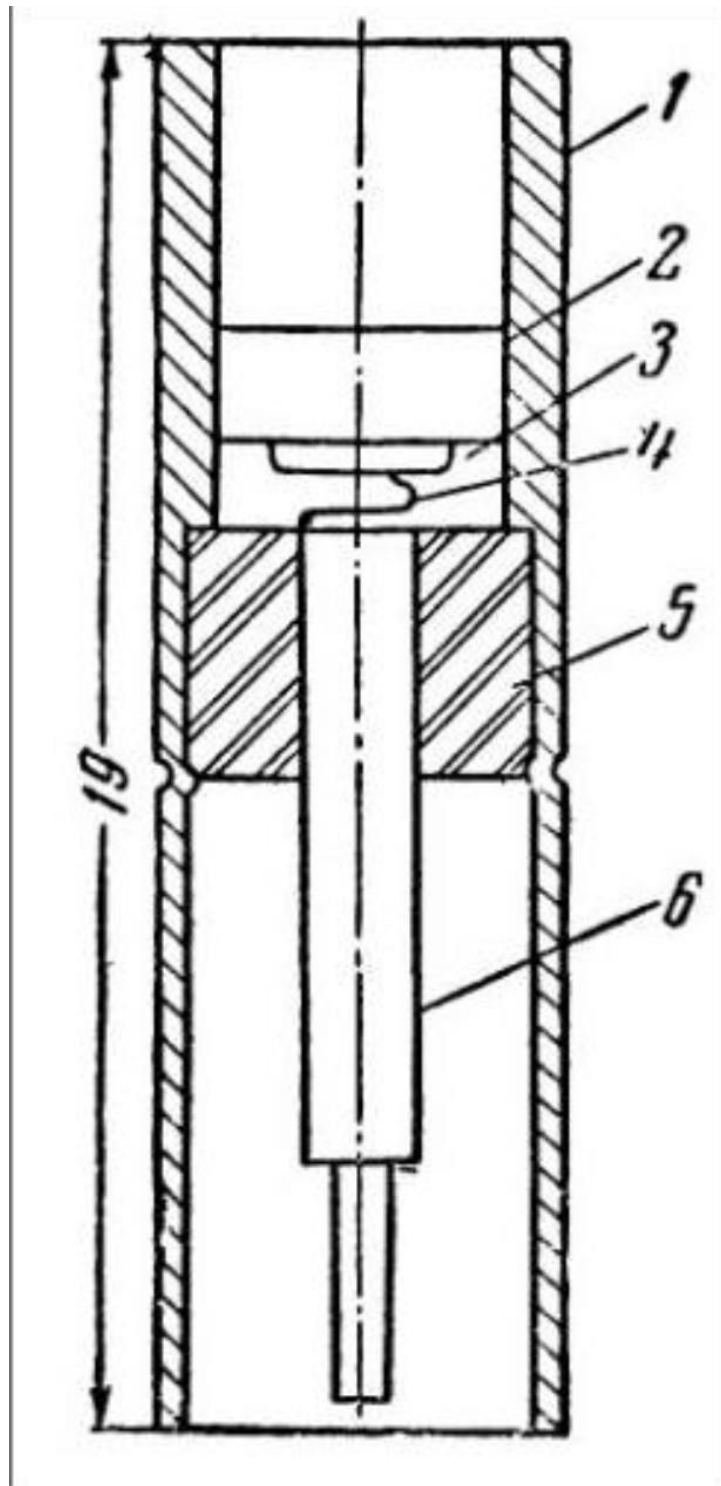
Причина пропадання нелінійних властивостей контакту металу з напівпровідником зі збільшенням площі контакту пов'язані з неоднорідним станом поверхневого шару германію або кремнію, що утворюється в природних умовах. Поверхневий шар, який, як зазначалося, характеризується провідністю іншого типу, ніж основного об'єму германію, має "плямисту" структуру. Це означає, що у поверхневому шарі германію домішки, що утворюють домішкову провідність цього шару, розподілені нерівномірно. Є невеликі області, де є домішки. У таких областях провідність поверхневого шару має інший тип, ніж провідність об'єму германію, внаслідок чого в них утворюється замикаючий шар. Але поруч із такою невеликою областю (невеликою "прямою") може виявитися область, де домішних атомів немає. У цій області відсутній поверхневий шар з провідністю іншого типу, провідність основного об'єму германію, і, отже, не утворюється замикаючого шару. Контакт металу з провідником у цій області буде лінійним. Опір його визначатиметься лише опором об'єму напівпровідника. Якщо площа контакту досить велика, то контакт металу з напівпровідником здійснюватиметься не тільки через області "плям", де є домішкові атоми, але також через ті області, де домішкових атомів немає. Так як опір контакту в цих областях малий, то вони будуть надавати шунтуючу дію на ті області контакту, де є замикаючий шар. Таким чином, при великій площі контакту в ній будуть ділянки поверхні, в яких домішкових центрів дуже мало або зовсім немає. Ці ділянки і

порушуватимуть дію замикаючого шару в сусідніх ділянках контакту. Внаслідок цього за великої площі порушуватимуться і нелінійні властивості контакту.

Тому в найкоротші терміни було розроблено технології очищення та вирощування германію з необхідними електрофізичними властивостями. Саме на цих зразках були розроблені нові типи НВЧ детекторів із вварним контактом. Конструкція вітчизняних германієвих діодів діапазону НВЧ наведена малюнку.



Конструкція керамічних патронів 1-керамічна оболонка; 2-кремній; 3-вольфрамова контактна пружинка; 4- отвір у кераміці для заповнення порожнини воском;  
5-кінець штирка; 6-головка винта;  
7-два настановні гвинти закріплення пружинки у потрібному положенні.



Конструкція коаксіального патрона 1-зовнішній провідник; 2-штифт; 3-кремній; 4-контактна пружина; 5-ізоляційна шайба; 6-внутрішній провідник.

Пізніше директор ЦНДІ-108 Аксель Іванович Берг домігся можливості організувати виробництво монокристалів германію в Гіредметі (Державний науково-дослідний та проєктний інститут рідкометалевої промисловості). Підключення Гіредмету до проблеми отримання германію відіграло важливу роль у подальшому розвитку всієї напівпровідникової електроніки.



Аксель Берг

У Гіредметі розробка технології отримання германію проводилася починаючи з 1946 року під керівництвом Миколи Павловича Сажина. Постачання монокристалів германію гарної якості, але невеликого діаметру було налагоджено лише у 1953 році.



Микола Павлович Сажин

У 1949 році на фірмі Bell Telephone Labs були розроблені та запропоновані перші плоскістні діоди на основі германію з р-п переходом. У цьому ж році була опублікована робота В. Шоклі "Теорія плоскістних р-п переходів". Отримані експериментально струми характеристики р-п

переходів виявилися близькими до розрахункових з запропонованої теорії Б.І. Давидовим. У СРСР перша стаття по германієвих р-п переходів була направлена в журнал "Вісник інформації" А. Красиловим у вересні 1949 року.

4 вересня 1952 року було підписано Постанову Ради Міністрів СРСР про проведення НДР "Розробка германієвих діодів, що замінюють малопотужні лампи" (шифр "Плоскість") з терміном закінчення в третьому кварталі 1953 року. Проведення НДР доручалося: ФТІ АН СРСР, ЦНДІ-108 та НДІ-160. Підприємство Гіредмет було залучено для розробки технології отримання германію. У травні 1953 року у ФТІ АН СРСР Ж.І. Алферовим були створені перші площинні германієві діоди. НДР "Плоскість" була прийнята Державною комісією СРСР у жовтні 1953 року. Розроблені діоди мали параметри, що відповідають затвердженому технічному завданню, а найкращі конструкційні рішення були досягнуті у ЦНДІ-108 та ФТІ АН СРСР.

У 1954 році у Фізико-технічному інституті були створені германієві діоди з діаметром р-п переходу до 3 см. Також цього року були створені конструкції випрямлячів із водяним охолодженням та робочими струмами до 200 А.

У березні 1958 року постановою уряду СРСР для першого атомного підводного човна, почалися роботи над германієвими випрямлячами на струми в кожному діоді до 1000 А.

Пізніше розроблені технології та конструкції нових типів діодів були впроваджені на заводі "Електровипрямляч" (м. Саранськ), на якому було організовано їх виготовлення. Завдяки героїчним зусиллям вчених СРСР, на початок 1960 року завод "Електровипрямляч" став флагманом виробництва напівпровідникових діодів, а теоретичні та експериментальні роботи учених СРСР довгий час дозволяли продукції цього заводу бути конкурентоспроможною на світовому ринку.

Таким чином, на початок 1960-х років напівпровідникові діоди поступово витісняли електровакуумні діоди. Напівпровідникові діоди масово почали застосовувати в радіоприймачах, відеодетекторах, НВЧ-техніці та силовій електроніці.

## **Висновок**

Незважаючи на багаторічні дослідження напівпровідників, які виникли завдяки "лабораторній випадковості", напівпровідники по праву почали називати "другим золотом" у світі. Завдяки застосуванню цих нових матеріалів вдалося домогтися вражаючого прогресу, що безперервно розвивався в обчислювальній техніці і в комп'ютеризації. А це своєю чергою відкрило нові напрями розвитку як техніки, але й технологічного прогресу людства.

[http://www.icfcst.kiev.ua/MUSEUM/TXT/Diode\\_ukr.pdf](http://www.icfcst.kiev.ua/MUSEUM/TXT/Diode_ukr.pdf)