



ЦАРЕНКО Олег

професор, кандидат технічних наук,

olegtsarenko55@gmail.com

Researcher ID: [AAS-5356-2020](https://orcid.org/0000-0002-4373-8510)

<https://orcid.org/0000-0002-4373-8510>

Центральноукраїнський державний
педагогічний університет імені
Володимира Винниченка,
м. Кропивницький



РІЖНЯК Ренат

професор, доктор історичних наук

rizhniak@gmail.com

Researcher ID: [Q-3371-2019](https://orcid.org/0000-0002-1977-9048)

<https://orcid.org/0000-0002-1977-9048>

Центральноукраїнський державний
педагогічний університет імені
Володимира Винниченка,
м. Кропивницький

ФУНДАТОРИ ЗАРОДЖЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ВІТЧИЗНЯНОЇ НАПІВПРОВІДНИКОВОЇ ГАЛУЗІ

В статті розкриваються результати просопографічного дослідження історії розвитку вітчизняної напівпровідникової електроніки. Теоретична та технологічна база вітчизняної напівпровідникової електроніки була закладена ще на початку 20-х років ХХ століття дослідженнями О. Г. Гольдмана. Наступні теоретико-практичні розвідки українських вчених проводилися на передових рубежах світових досягнень. Основна мета дослідження полягає у розкритті внеску вітчизняних вчених-фізиків у розвиток науково-технічних досліджень принципів роботи напівпровідникової електроніки.

Фундаментальні дослідження з теорії напівпровідників були розпочаті на початку 30-х рр. ХХ ст., коли вийшла перша теоретична робота уродженця

м. Єлисаветграда І.Є. Тамма, в якій передбачалося існування на поверхні кристалів особливих електронних станів, названих спочатку поверхневими, а потім «таммівськими».

В статті досліджується творча діяльність чотирьох фундаторів напівпровідникової електроніки, життя та наукові розвідки яких була пов'язана з Україною, – Олександра Генріховича Гольдмана, Єлпідифора Анемподистовича Кирилова, Вадима Євгеновича Лашкарьова та Олександра Вікторовича Красилова. О. Г. Гольдман започаткував фізичні дослідження властивостей діелектриків і напівпровідників і відкрив явище фотополаризації діелектриків, дослідив і описав фотоелектричний ефект у напівпровідникових сонячних елементах та явище випрямлення в напівпровідниках, Є. А. Кирилов відкрив та дослідив тонку структуру спектра поглинання фотохімічно пофарбованого галоїдного срібла, В.Є. Лашкарьов, фактично, першим у світі відкрив явище р-п-переходу та зображення першої зонної діаграми р-п-переходу, дослідив ефект з фото-Е.Р.С. у закису міді, відкрив біполярну дифузю нерівноважних носіїв струму в напівпровідниках, О.В. Красилов створив перший у бувшому СРСР транзистор та перший зразок площинного сплавного германієвого транзистора, заклавши своїми дослідженнями основи технології виробництва мікросхем. Наукові розробки цих вчених та їх колективів заклали надійний фундамент виробництва напівпровідникових електронних приладів та їх застосування споживачами.

Ключові слова: *просопографія, вітчизняні фундатори, науково-технічні дослідження, електроніка, напівпровідники, діелектрики, р-п-перехід, транзистор.*

THE FOUNDERS OF ORIGIN AND DEVELOPMENT OF THE DOMESTIC SEMICONDUCTOR INDUSTRY

The article reveals the results of the prosopographic study of the history of domestic semiconductor electronics. The theoretical and technological base of the domestic semiconductor electronics was laid in the early 20s of the twentieth century by a researcher O. H. Holdman. The next theoretical and practical investigations of the Ukrainian scientists were conducted at the forefront of the world achievements. The main purpose of the study is to reveal the contribution of the domestic physicists in the development of scientific and technical research on the principles of semiconductor electronics.

A fundamental research on the theory of semiconductors was started in the early 30s of the twentieth century, when the first theoretical work of a native of Yelisavetgrad I.Ye. Tamm was released, that predicted the existence on the surface of the crystals of special electronic states, called superficial at first and then "Tamm's".

The article examines the creative activities of the four founders of semiconductor electronics, whose life and scientific research was associated with Ukraine – Oleksandr Henrikhovych Holdman, Yelpidyfor Anempodystovych Kyrylov, Vadym Yevhenovych Lashkaryov and Oleksandr Viktorovych Krasyllov. O.H.

Holdman initiated physical studies of the properties of dielectrics and semiconductors and discovered the phenomenon of photopolarization of dielectrics, investigated and described the photoelectric effect in semiconductor solar cells and the rectification phenomenon in semiconductors, Ye.A. Kyrylov discovered and investigated the fine structure of the absorption spectrum photochemically dyed silver halide, V.Ye. Lashkaryov, in fact, was the first in the world to discover the phenomenon of p-n junction and the image of the first band diagram of the p-n junction, studied the effect of photo-ERS. in copper oxide, discovered bipolar diffusion of nonequilibrium current carriers in semiconductors, O.V. Krasnylov created the first transistor in the former USSR and the first example of a planar alloy germanium transistor, laying his research on the foundations of the chip production technology. The scientific developments of these scientists and their teams have laid a solid foundation for the production of semiconductor electronic devices and their use by consumers.

Key words: *prosopography, domestic founders, scientific and technical research, electronics, semiconductors, dielectrics, p-n junction, transistor.*

Постановка проблеми. Одним з важливих етапів розвитку теоретичної та технологічної бази електроніки – від випадкових спостережень явищ статичної електрики до використання квантових ефектів у комп'ютері – було становлення та впровадження напівпровідникової електроніки, яке прийнято відлічувати з часу відкриття транзисторів: 1947 р. – точково-контактні транзистори, 1949 р. – площинні транзистори. Фактично ж напівпровідникові прилади були створені та використовувалися за десятки років до появи транзисторів. Так, фотоелектричні явища в напівпровідниках були відкриті ще в ХІХ ст. – створені перші фотоелементи на основі селену. У напівпровідникових структурах була виявлена нелінійність вольтамперних характеристик і були створені напівпровідникові випрямлячі на основі селену та закису міді. На початку ХХ ст. були створені й отримали широке практичне застосування детектори електромагнітних випромінювань з використанням притискового металевого вістря до напівпровідника (роботи О. В. Лосева) [26].

У попередній праці [32] ми дослідили внесок вчених-фізиків, життя та наукова діяльність яких була пов'язана з Україною, у розвиток вакуумної електроніки. Продовжуючи традицію та усвідомлюючи необхідність встановлення історичної справедливості розкриємо роль українських

науковців-фундаторів у справі зародження та розвитку вітчизняної напівпровідникової галузі.

Аналіз досліджень і публікацій. Найбільш фундаментальною працею з історії розвитку фізики та біографістики фізики до сьогодні залишається монографія Ю. О. Храмова «Історія фізики» [30] та його ж книга «Фізики: Біографічний довідник» [29], у яких український класик історії науки і техніки у контексті системного розкриття історії фундаментальних фізичних ідей, теорій, наукових напрямів та діяльності визначних персоналій вчених-фізиків окреслив основні напрями та внесок українських вчених у розвиток вакуумної та напівпровідникової електроніки. Серед інших фундаментальних історичних джерел, що розкриває контекст розвитку напівпровідникової електроніки на теренах бувшої союзної держави, можна назвати дослідження О. Є. Малютіна та І. В. Філіпова [18]. В українській історіографії контекст розвитку теоретичних обґрунтувань напівпровідникових технологій та практики їх створення та впровадження добре представлені у роботах, в яких висвітлюється вже більш ніж 60-річне функціонування Інституту фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН УРСР висвітлюють роботи О. Є. Беляєва [9] (як редактора ювілейного видання), [2], О. М. Царенка та М. І. Садового [31], М. В. Стріхи [26], [28], В. Мачуліна [19]. Важливий пласт інформації про розвиток технології напівпровідників містить в описі історії Одеського університету [3]. Особливими та інформаційними у цьому контексті є біографічні джерела Б. Кияка та О. Проскури [12], І. Б. Грушицької та Л. І. Сухотеріної [8], В. Г. Литовченко [16], а також електронні ресурси [4], [6], [11], [23] та інші. Втім, у вітчизняній історіографії відсутні системні розвідки щодо біографістики розвитку теоретико-практичних напрацювань в галузі напівпровідникової електроніки в Україні.

Отже, **мета дослідження** полягає у розкритті внеску українських вчених-фізиків у розвиток науково-технічних досліджень принципів роботи напівпровідникової електроніки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Системні дослідження напівпровідників вітчизняними науковцями було запроваджено на початку 1920-х рр. Київською науково-дослідною кафедрою Наркомосвіти УСРР під керівництвом О. Г. Гольдмана [28]. Аналогічні роботи проводилися в середині 1920-х рр. у Фізико-математичному інституті колишнього Імператорського Новоросійського університету (м. Одеса) під керівництвом професора Є. А. Кирилова [3; 23]. Тому не дивно, що вже в 1935 р. у м. Одесі була проведена III Всесоюзна конференція з напівпровідників, де Є. А. Кирилов доповідав про спектральні дослідження фотоефекту на кристалах куприту. В центрі уваги п'ятидесяти учасників конференції, які також виступали з доповідями, стали дослідження внутрішнього фотоефекту в монокристалах куприту і діелектриках, теорія фотопровідності, явища поляризації в полікристалічному оксиді міді при температурі рідкого повітря; термоелектричні властивості окислу міді, електропровідність оксиду ванадію, нові властивості темної та світлової провідності селену, фотоелектричні явища в оксиді міді під дією магнітного поля [23; 28]. Це були дійсно перші кроки у розвитку нової галузі знань – фізики напівпровідників і не тільки в Україні, а й у світі.

Фундаментальні ж дослідження з теорії напівпровідників розпочато лише на початку 30-х рр. ХХ ст. Так, 1932 року вийшла перша теоретична робота І. Є. Тамма, в якій передбачалося існування на поверхні кристалів особливих електронних станів, названих спочатку поверхневими, а потім «таммівськими» [10].

У Москві дослідженнями з фізики напівпровідників займався Фізичний інститут Академії наук СРСР (ФІАН), який було створено 1934 р. Очолив інститут С. І. Вавилов. Незабаром у ФІАНі з'явилися: Лабораторія фізичної оптики (Г. С. Ландсберг); Лабораторія люмінесценції (С. І. Вавилов); Лабораторія спектрального аналізу (С. Л. Мандельштам), Лабораторія фізики діелектриків (Б. М. Вул); Лабораторія теоретичної фізики (І. Є. Тамм).

Керівники відділів ФІАНу незабаром стали головними «напівпровідниківцями» СРСР [17; 19].

1939 р. У. Шоклі, досліджуючи електронну структуру ковалентних кристалів типу алмазу (до яких, у тому числі, відносяться напівпровідники кремній та германій), довів існування в них поверхневих електронних станів і дав наочну інтерпретацію цього явища мовою хімічних зв'язків. І лише 1947 р. Дж. Бардін передбачив, що заповнення або збіднення поверхневих станів відіграє вирішальну роль у формуванні так званого бар'єру Шоттки – перепаду електростатичного потенціалу на контакті напівпровідників з металом чи напівпровідником іншої провідності. Це було власне перше використання «таммівських станів» для пояснення широкого кола явищ і в фізиці твердого тіла, і в фізиці напівпровідників [26; 28].

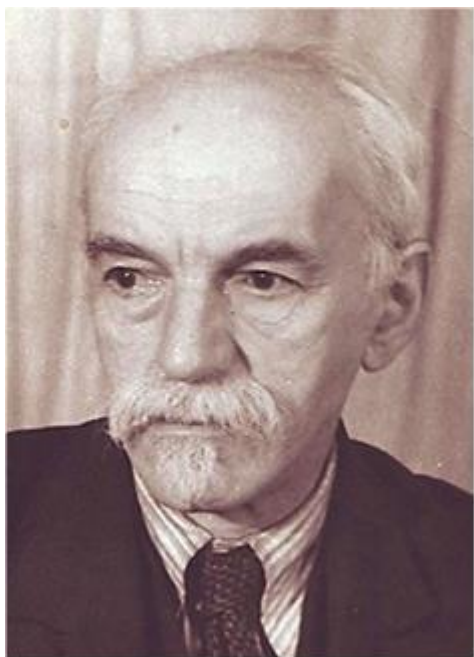
Отож, дещо детальніше про українських вчених в галузі напівпровідників та про їх внесок у створення напівпровідникової промисловості.

Засновник і перший директор Інституту фізики АН УРСР, діючий член НАН УРСР, академік-секретар Відділення математичних та природничих наук НАН УРСР, перший редактор українського фізичного журналу **Олександр Генріхович Гольдман** (1884–1971) залишив помітний слід у започаткуванні фізичних досліджень властивостей діелектриків і напівпровідників в Україні та по праву має бути в перших рядах з іменами виданих фізиків ХХ ст.

Ще 1905–1908 рр. О. Г. Гольдман відкрив явище фотополяризації діелектриків та на прикладі полікристалічної сірки дослідив і пояснив умови запису, зберігання та стирання інформації у фотопровідних діелектриках. З часом, явище фотополяризації діелектриків стало базовим для ксерографії [5; 7].

1918 р. була створена Українська академія наук і першим президентом був призначений академік В. І. Вернадський. На той час О. Г. Гольдман вже був відомий у науковому світі. У післяреволюційній Україні не вистачало дипломованих спеціалістів, і молодий вчений долучився до вирішення проблем наукових кадрів. Викладаючи фізику в декількох київських інститутах, він залучає слухачів до розгляду різнобічних фізичних проблем, організує відкриті

наукові засідання, семінари [6]. О. Г. Гольдман ставить своєю метою створення в Києві фізичного наукового центру. За його ініціативою 1921 р. було засновано дослідницьку лабораторію, яка вже 1922 р. була реорганізована в Київську науково-дослідницьку кафедру фізики Наркомосвіти УСРР. Шляхом організації семінарів кафедра об'єднала навколо себе значущу частину київських фізиків. Почалося створення експериментальної бази, наукової бібліотеки, проведення дослідів, підготовка аспірантів.



О.Г. Гольдман

О. Г. Гольдман є фундатором Київської школи з фізики напівпровідників, один із організаторів Української асоціації фізиків та організатор і редактор журналу «Фізичні записи», перший номер якого вийшов у грудні 1926 р. Журнал видавався до початку Великої вітчизняної війни й відіграв важливу роль у формуванні фізичної науки як в Україні, так і в світі [9].

1927 р. О. Г. Гольдман піднімає питання про створення в Києві фізичного інституту, а 1929 р. на базі кафедри фізики був створений Київський науково-дослідний інститут фізики, який він і очолював до 1938 р. 1934 р. Інститут увійшов до складу АН УСРР. Усі передвоєнні роки О. Г. Гольдман проводить значну роботу з підготовки наукових кадрів, з розвитку різних напрямів прикладної фізики. Так, у 1930-х рр. О. Г. Гольдман започаткував дослідження фотоелектричних явищ у твердотільних вентильних фотоелементах (Se, Cu_2O , Ag_2S , Fe_2O_3), досліджував перетворення світлової енергії на електричну та утворення запірного шару [6; 9], займався розробкою теорії твердих випрямлячів і фотоелементів. Частина цих досліджень випереджала реальний час і з успіхом була продовжена у 1960-ті рр. [9].

На жаль, таку видатну особистість не обійшли репресії. 1937–38 рр. О. Г. Гольдман був висланий (без рішення суду) у Казахстан. Вирок було

скасовано Верховним Судом УРСР за відсутністю складу злочину 1956 р. [12]. Лише 1959 р. О.Г. Гольдман повертається до наукової роботи та очолює Лабораторію електролюмінесценції Інституту фізики АН УРСР. Він енергійно починає розвивати дослідження в новій галузі та створює своє оригінальне обладнання, а Лабораторія завойовує світове визнання. У 1960-ті рр. О.Г. Гольдман з учнями досліджує та описує фотоелектричний ефект у напівпровідникових сонячних елементах, явище випрямлення в напівпровідниках, робить внесок у створення теорії контакту метал–напівпровідник [2].

Єлпідифор Анемподистович Кирилов (1883–1964) – український фізик, доктор фізико-математичних наук, професор. З 1921 р. очолює кафедру експериментальної фізики, а з 1926 р. – директор Українського науково-дослідного інституту фізики в м. Одесі у системі Наркомосвіти УСРР, який був створений за його ініціативою.



Є.А. Кирилов

Основні його роботи присвячені оптиці, зокрема дослідженню оптичних та фотоелектричних явищ у галогенідах срібла, внутрішнього фотоефекту, фізичних основ фотографічного процесу. 1930 р. Є.А. Кирилов встановив, що між фотоелектричними та фотохімічними явищами існує тісний зв'язок і механізми цих процесів мають багато спільного. Було відкрито негативний фотоефект і доведено, що негативний фотоефект пов'язаний з утворенням прихованого фотографічного зображення [3; 8].

У період з 1945–1965 рр. тематика Українського науково-дослідного інституту фізики була значно розширена. Тут досліджували такі проблеми: фізика фотографічного процесу, оптичні та фотоелектричні властивості галогенідів срібла, кристалізація переохолоджених рідин, фізика аеродисперсних систем та напівпровідникова електроніка [3].

Впродовж 1946–1953 рр. Є. А. Кирилов дослідив цикл спектрів поглинання тонких шарів галоїдного срібла. За відкриття та дослідження тонкої структури спектру поглинання фотохімічно пофарбованого галоїдного срібла професору Є. А. Кирилову – першому в Одеському університеті – 1952 р. було присуджено Державну премію СРСР [11].

У 1920–1930-х рр. з'являються перші промислові напівпровідникові прилади: мідно-закисні випрямлячі, які винайшли й впровадили у практику Л. Грендаль і Х. Гейгер [26] та потужні селенові випрямлячі, які виготовлялись на основі патентів Ф. Прессе [4; 28]. Однак, пояснення механізму випрямлення змінного струму з фізичної точки зору на той момент ще не було [4; 31]. Саме над цими проблемами 1939 р. (після повернення у м. Київ із м. Архангельська, де перебував на виселенні) **Вадим Євгенович Лашкарьов** (1903–1974), майбутній академік АН УРСР, розпочинає інтенсивні дослідження в Інституті фізики АН УРСР та на кафедрі фізики Київського державного університету імені Тараса Шевченка. В. Є. Лашкарьов представляв школу А. Ф. Йоффе, який, у свою чергу, був учнем видатних європейських фізиків.



В.Є. Лашкарьов

Досліджуючи за допомогою термозонду запірні шари міднозакисних випрямлячів, В. Є. Лашкарьов відкрив р-п-перехід та зобразив першу зонну діаграму р-п-переходу [14; 20]. У 1940 р. В. Є. Лашкарьов показав, що в міднозакисних і селенових випрямлячах запірний 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 увесь інший його об'єм, що знаходиться з іншої сторони від запірного шару. Таке уявлення про запірний шар дало можливість пояснити той факт, що в кристалічних діодах ефект випрямлення не залежить

від природи металу контактної пружинки. Було експериментально також доведено можливість випрямлення в контакті між двома напівпровідниками з електронною і дірковою провідністю [15]. Тоді ж учений з'ясував роль р-п-переходу у виникненні вентильного фотоефекту – появу різниці потенціалів при освітленні контакту областей напівпровідника з двома типами провідності. Ця робота В. Є. Лашкарьова за своїм науковим значенням не поступалася працям Шоклі, Бардіна й Браттейна, які були удостоєні Нобелівської премії за відкриття транзистора (1956 р.) [4]. Адже функціонування р-п-переходу лежить в основі роботи сучасних напівпровідникових приладів – від простих випрямлячів до найскладніших інтегральних схем. Проте, в силу низки несприятливих обставин (тотальна ізоляція наших учених – стаття В. Є. Лашкарьова з'явилася перед початком Другої світової війни, та її англomовний переклад став доступним лише починаючи з 2008 р.) робота В. Є. Лашкарьова лишилася практично невідомою на Заході. Тут першовідкривачем р-п-переходу традиційно вважають Р. Ола, який 27.05.1941 р. (після того як з'явилася друком робота В. Є. Лашкарьова) подав заявку, а сам патент було видано лише 1946 р. Тому, хоча Р. Ол і працював самостійно в тому ж напрямі, пріоритет В. Є. Лашкарьова у відкритті р-п-переходу не може бути поставлено під сумнів [27].

Під час війни, перебуваючи в Уфі (1941–1944 рр.), В. Є. Лашкарьов працював у одній з науково-дослідних установ міста, де розробив та впровадив промисловий випуск потужних міднозакисних випрямлячів для живлення польових військових радіостанцій [28; 31]. За його безпосередньої участі впродовж короткого часу в Уфі було налагоджено виробництво напівпровідникових випрямлячів, що використовувалися в апаратурі зв'язку, і фотоелементів, що застосовувались для сигналізації у вимірювальній техніці.

Після повернення до Києва (1944 р.), очолюючи кафедру фізики напівпровідників Київського державного університету імені Тараса Шевченка, В. Є. Лашкарьов паралельно працював у Інституті фізики АН УРСР, де вдало розгорнув широкі теоретичні та експериментальні дослідження фоточутливих

прямозонних напівпровідників. За короткий час він дослідив важливий ефект з фото-Е.Р.С. у закису міді. Значення експериментальних робіт виходило далеко за рамки самої проблеми механізму виникнення фото-Е.Р.С. Крім цього В. Є. Лашкар'юв розробив теорію цього явища і показав, що не вентильна-Е.Р.С. (або так званий Дембера-ефект) визначається дифузією неосновних носіїв струму, рух яких є лідируючим і викликає біполярну дифузію від освітленого електрода в глибину зразка. Одночасно була розвинена теорія нестационарної фотопровідності, передбачена й реалізована на досліді можливість управління фотопровідністю зовнішнім електричним полем. При цьому були введені звичні всім зараз поняття про розтягнуте і стиснуте поле довжини дифузійного зміщення, а звідси природнім продовженням з'явилися роботи з біполярної провідності [15; 27].

Поза увагою В.Є. Лашкар'юва не залишились і алмазоподібні напівпровідники германій та кремній. Однак, цілковита нерозробленість технологій отримання «чистих» матеріалів аж до кінця 1940-х рр. ставила під сумнів саму можливість експериментального дослідження власних напівпровідників. Усі реальні тогочасні напівпровідники були «брудними», сильно домішковими, а результати на них – погано відтворюваними. М. В. Стріха [28] процитував лист В. Паулі до Р. Паєрлса, написаний 1931 р.: *«З напівпровідниками працювати не варто, вони – суцільна плутанина, хто знає, чи існують ці напівпровідники взагалі»*. А вже починаючи з другої половини ХХ ст. розвиток напівпровідникової теорії й технологій привів до науково-технічної революції, яка радикально розширила можливості людства. І тут вагомий внесок також належить В. Є. Лашкар'юву: він відкрив біполярну дифузію нерівноважних носіїв струму в напівпровідниках, а на початку 1950-х виготовив перші точкові транзистори в лабораторних умовах. У 1950-ті рр. В. Є. Лашкар'юву вдалося вирішити проблему масового вибракування монокристалів германію. Досить точними дослідженнями, проведеними в Інституті фізики АН УРСР В. Є. Лашкар'ювим та А. Г. Миселюком, було доведено, що досягнутий рівень технології монокристалів германію дозволяє

створювати точкові діоди та тріоди із заданими характеристиками [16]. Ці дослідження стимулювали пришвидшення промислового випуску перших (у бувшому СРСР) германієвих діодів та транзисторів.

Цікавий факт приводить О. Нітусов [24] про перспективність робіт того часу В. Є. Лашкарьова: піонер радянської обчислювальної техніки – академік С. О. Лебедев, який створив в Києві першу радянську ЕОМ (МЕОМ, 1949–1951) і заснував там наукову школу, приїжджав до Києва в день свого 50-річчя (2 листопада 1952 р.). Там він почув про транзистори Лашкарьова і, ігноруючи підготовлені в його честь торжества (а Лебедев взагалі не любив ніякого офіціозу, справедливо вважаючи його марною тратою часу), відправився прямо в лабораторію при Інституті фізики АН Української РСР. Познайомившись з В. Є. Лашкарьовим і його розробками, Лебедев запропонував своєму аспіранту А. І. Кондалеву почати проектування ряду пристроїв ЕОМ на базі напівпровідникових транзисторів і діодів, що той і зробив після тримісячного стажування у В. Є. Лашкарьова.

Починаючи з 1951 р. Інститут фізики АН УРСР під керівництвом В. Є. Лашкарьова працював над створенням перших (в СРСР) точкових транзисторів. Саме тоді вдається подолати цілий ряд наукових та технологічних проблем, характерних для технології напівпровідників того часу [2].

1960 р. рішенням Ради Міністрів УРСР було створено Інститут напівпровідників Академії наук УРСР на базі відділів та лабораторій Інституту фізики АН УРСР на виконання Постанови Ради Міністрів УРСР від 3 вересня 1960 р. № 1449 «Про організацію у складі Академії наук УРСР Інституту напівпровідників». Вирішальне значення при цьому мало те, що в Інституті фізики АН УРСР на той час склалися наукові школи з фізики нерівноважних процесів у напівпровідниках і теорії напівпровідників, очолювані академіком АН УРСР проф. В. Є. Лашкарьовим та доктором фіз.-мат. наук, проф. С. І. Пекарем. Великий внесок у створення і організацію подальшої діяльності Інституту зробили також перші керівники науково-дослідних відділів і лабораторій, створених у 1960–61 рр.: доктор фіз.-мат. наук

М. Ф. Дейген, кандидат фіз.-мат. наук М. П. Лисиця, доктор фіз.-мат. наук, проф. В. І. Ляшенко, кандидат хім. наук І. Б. Мізецька, кандодат фіз.-мат. наук О. Г. Міселюк, кандидат фіз.-мат. наук Е. Й. Рашба, кандидат техн. наук С. В. Свечніков, кандидат фіз.-мат. наук О. В. Снітко, кандидат фіз.-мат. наук Г.А. Федорус [9].

Розглядаючи історію становлення вітчизняної напівпровідникової електроніки, звичайно ж не можна не згадати **Олександра Вікторовича Красилова** (1910–2003), уродженця м. Васильків, Київської губернії, випускника Київського політехнічного інституту (1932 р.), автора цілого ряду

нових напрямів конструювання та виготовлення напівпровідникових приладів, винахідника першого в СРСР діючого макету транзистора.



Красилов О.В.

Трудову діяльність О. В. Красилов розпочав як науковий співробітник галузевої вакуумної лабораторії заводу «Світлана» (м. Ленінград) [1; 22]. Мабуть саме це вирішило його всю подальшу долю, оскільки усі великі винаходи О. В. Красилова пов'язані з роботою в російських (радянських на той період) науково-дослідних інститутах (НДІ). Так, у 1941–1943 рр. в евакуації в Новосибірську він брав участь у створенні радіолампового заводу,

а вже з 1943 р. був призначений начальником вимірювального відділу НДІ-160 у м. Фрязіно, Московської обл. (нині – науково-виробниче підприємство «Исток»), де були створені перші вітчизняні надвисокочастотні змішувальні діоди, а потім і перші радянські транзистори [1; 24].

Це був важливий період в житті О. В. Красилова. Він, перш за все, пов'язаний з тим, що 1943 р. в НДІ-160 почалися розробки, спрямовані на підвищення ефективності радіолокаційних станцій за рахунок застосування нових електронних приладів магнетронів, клістронів та інших. Важливість цієї роботи була зумовлена тим, що радіолокаційні станції (РЛС), створені до

Великої Вітчизняної війни, працювали в метровому діапазоні хвиль і в них змішувачі використовувалися на радіолампах. Однак в США, Німеччині та Англії під час війни стали проектуватися РЛС для роботи в більш короткохвильових діапазонах, в яких лампові змішувачі працювати були неспроможні. Завдання створення вітчизняних кристалічних змішувачів постало при проектуванні в СРСР першої радіолокаційної станції дальнього виявлення П-20 «Перископ», що мала працювати в сантиметровому діапазоні хвиль. 1949 р. станція пройшла державні випробування, показала відповідність заданим вимогам, була прийнята на озброєння Військами ППО, ВМФ і почала використовуватися на великих аеродромах Цивільного повітряного флоту в якості радіорелейних станцій [22].

Як вже відзначалося, 1947 р. став знаменним створенням першого напівпровідникового тріода. Так, 21.12.1947 р. В. Шоклі, Дж. Бардін і У. Браттейн демонструють перший у світі точковий транзистор. Інформація про цей винахід з'явилася в журналі «The Physical Review» в липні 1948 р. Починаючи з 1947 р. в СРСР також інтенсивно велися роботи в галузі напівпровідникових підсилювачів – в ЦНДІ-108 (лабораторія С. Г. Калашникова) та в НДІ-160 (лабораторія О. В. Красилова). Вже через 4 місяці після публікації у США 15.11.1948 р. О. В. Красилов у журналі «Вісник інформації» розміщує статтю під назвою «Кристалічний тріод» [13; 24]. Це

була перша публікація в СРСР про напівпровідниковий транзистор. Таким чином, перший радянський транзистор в СРСР був створений незалежно від роботи американських вчених [13; 21].

Вестник Інформації
№ 21 (41) 15 ноября 1948 г.

Кристалічний тріод

С 1948 року в державній мережі з'явилася можливість в галузі напівпровідникових кристалічних тріодів, що дозволило виміряти їхні характеристики.

Основні частини кристалічного тріода, що мають велику площу поверхні, складаються з кристалу германію, який в процесі виготовлення тріода піддається дифузійній обробці. Після цього кристал германію встановлюється в спеціальну оправку, в якій він піддається дифузійній обробці. Після цього кристал германію встановлюється в спеціальну оправку, в якій він піддається дифузійній обробці.

Германій в той час, в якому він використовується в кристалічних тріодах, являє собою чистий елемент. Кристалічний тріод виготовляється з кристалу германію, який в процесі виготовлення тріода піддається дифузійній обробці. Після цього кристал германію встановлюється в спеціальну оправку, в якій він піддається дифузійній обробці.

Найбільш важливою властивістю кристалічного тріода є його здатність підсилювати сигнал. Це досягається за рахунок того, що кристал германію в процесі виготовлення тріода піддається дифузійній обробці. Після цього кристал германію встановлюється в спеціальну оправку, в якій він піддається дифузійній обробці.

Вестник Інформації № 21

Рис. 1. Характеристики кристалічного тріода при різних режимах роботи. Криві 1-4 відповідають різним значенням напруги зміщення. Криві 5-8 відповідають різним значенням напруги зміщення.

Максимальна ефективність кристалічного тріода при різних режимах роботи становить 10-15%. Це досягається за рахунок того, що кристал германію в процесі виготовлення тріода піддається дифузійній обробці. Після цього кристал германію встановлюється в спеціальну оправку, в якій він піддається дифузійній обробці.

Для роботи кристалічного тріода необхідно використовувати спеціальну оправку, в якій він піддається дифузійній обробці. Після цього кристал германію встановлюється в спеціальну оправку, в якій він піддається дифузійній обробці.

У 1950–1952 рр. О. В. Красилов спільно з Ф. А. Щиголем створюють промислові зразки точкових транзисторів, які маркувались С1 і С2. Вони послужили основою перших транзисторних приймачів і слухових апаратів [21]. Паралельно до цих робіт, впродовж 1951–1953 рр. О. В. Красилов керує випуском серії низькочастотних германієвих діодів, якими були забезпечені перші в СРСР обчислювальні машини на напівпровідниках, так звані ЕОМ «Стріла», яка містила 4000 радіоламп і 12000 кристалічних діодів. Серійне виробництво цих машин розпочалося наприкінці 1953 р., а вже через кілька років про цю ЕОМ напишуть: «Машина «Стріла» належить до класу великих машин і має високорозвинену і логічно закінчену структуру, що забезпечує її більшу продуктивність при розв’язанні складних і громіздких за обсягом обчислювальних задач» [22; 33].

Того ж 1953 р. в лабораторії О. В. Красилова був отриманий перший в СРСР зразок площинного сплавного германієвого транзистора і це був прорив у розвитку всієї вітчизняної електронної техніки. У процесі цих робіт були вивчені основні властивості германію, способи його обробки, принципи конструювання приладів, методи їх випробувань, шляхи досягнення необхідної герметичності та надійності, в тому числі для роботи в особливих умовах [13; 33].

1960 р. у відділі О. В. Красилова розпочаті роботи з освоєння нового перспективного напівпровідникового матеріалу – арсеніду галію, розроблено надвисокочастотні (НВЧ) генераторні тунельні діоди, отримані перші зразки приладів з монокристалічними гетеропереходами, перші зразки генераторів Ганна, розпочато розробку планарної технології на арсеніді галію для НВЧ польових транзисторів [21]. Ці та інші досягнення напівпровідникової галузі заклали основи технології виробництва мікросхем.

У відділі О. В. Красилова фундаментальну наукову і практичну школу пройшли багато фахівців, які ще довго були основними розробниками, теоретиками і дослідниками приладів, очолюючи найважливіші напрямки напівпровідникової науки й технології.

1961 р. було прийнято Державну постанову «Про розвиток напівпровідникової промисловості», якою передбачалося будівництво заводів та НДІ у Києві, Мінську, Єревані, Нальчику та інших містах. У Києві завод та НДІ на Нивках було збудовано у 1964 р. Згодом великі напівпровідникові заводи було побудовано у Запоріжжі, Світловодську, Чернівцях, Івано-Франківську, Херсоні, Вінниці [2]. Таким чином, вже на початку 1960-х рр. потреби ракетної та космічної техніки, а потім і обчислювальних машин, приладобудування та інших галузей економіки повністю стали задовольнятися транзисторами й іншими електронними компонентами вітчизняного виробництва.

Висновки та перспективи подальших розвідок. Просопографічне дослідження розвитку вітчизняної напівпровідникової електроніки дозволяє логічно висновити наступне.

1. Українські вчені протягом усього періоду розвитку напівпровідникової електроніки не стояли осторонь світових досліджень, активно проводячи успішні власні науково-технічні розвідки. Це дало можливість вітчизняній ракетно-космічній галузі та високотехнологічним сферам промисловості продуктивно застосовувати високотехнологічне сучасне обладнання у своїй діяльності.

2. Внесок вітчизняних вчених-фізиків у розвиток напівпровідникової електроніки полягав у розв'язанні таких теоретичних та практичних проблем – започаткування фізичних досліджень властивостей діелектриків і напівпровідників, відкриття явища фотополяризації діелектриків, дослідження й опис фотоелектричного ефекту у напівпровідникових сонячних елементах та явища випрямлення в напівпровідниках, створення теорії контакту метал–напівпровідник (О. Г. Гольдман), відкриття та дослідження тонкої структури спектру поглинання фотохімічно пофарбованого галоїдного срібла (Є. А. Кирилов), незалежне відкриття р-п-переходу та зображення першої зонної діаграми р-п-переходу, з'ясування ролі р-п-переходу у виникненні вентильного фотоефекту, дослідження важливого ефекту з фото-Е.Р.С. у закису

міді, відкриття біполярної дифузії нерівноважних носіїв струму в напівпровідниках, виготовлення на початку 1950-х років перших точкових транзисторів у лабораторних умовах (В. Є. Лашкар'юв), створення (1948 р.) першого в бувшому СРСР транзистора та створення (1953 р.) першого в СРСР зразка площинного сплавного германієвого транзистора, закладення основ технології виробництва мікросхем (О. В. Красилов). Науково-технічні розробки і винаходи українських вчених та їх колективів зумовили започаткування стратегічної державної програми розвитку напівпровідникової галузі спочатку в бувшому СРСР, а потім і в Україні.

Список використаних джерел та літератури

1. 100 лет Красилову Александру Викторовичу – создателю первых отечественных транзисторов. URL: <https://sites.google.com/site/izobretenietranzistora/home/pervyj-sovetskij-tranzistor>
2. Беляев О.Є. Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкар'юва НАН України – 58 років у складі НАН України. *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*. 2019. Вып. 54. С. 3–8.
3. Букатевич Н.І. Історія Одеського університету за 100 років / відпов. ред. О.І. Юрженко. К.: Вид-во Київського ун-ту, 1968. 422 с
4. Вадим Євгенович Лашкар'юв (До шістдесятиріччя з дня народження). *Український фізичний журнал*. 1963. Т. 8, № 10. С. 1047–1050.
5. Гольдман Олександр Генріхович. Енциклопедія історії України: у 10 т. / редкол.: В.А. Смолій та ін.; Інститут історії України НАН України. К.: Наукова думка, 2004. Т. 2. 518 с.
6. Гольдман Александр Генрихович. URL: <https://amp.ru.google-info.cn/5210936/1/goldman-aleksandr-genrikhovich.html#article>.
7. Гольдман О.Г. Фотоелектричні явища, проблема перетворення світлової енергії на електричну та огляд з цих питань Українського науково-дослідного інституту фізики при ВУАН. У кн.: ВУАН на службі соціалістичного будівництва. Праці ювілейної сесії ВУАН, присвяченої 15-літтю Жовтневої революції. Київ, 1933. С. 117—135.
8. Грушицька І.Б., Сухотеріна Л.І., Є.А. Кирилов – фундатор одеської школи наукової фотографії. *Наука та наукознавство*. 2015. № 3. С. 129-137
9. Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкар'юва НАН України. 1960–2020 / редкол.: О.Є. Беляев (голова) та ін.; НАН України, Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкар'юва. Київ: Академперіодика, 2020. 290 с.
10. Келдыш Л.В. Таммовские состояния и физика поверхности твердого тела. (К 90-летию со дня рождения И. Е. Тамма). *Природа*. 1985. № 9. С. 17–33.
11. Кириллов Елпидифор Анемподистович. URL: <https://www.eduspb.com/node/689>.

12. Кияк Б. Проскура О. Доля академіка Олександра Гольдмана. URL: <https://web.archive.org/web/20150924114741/http://www.sbu.gov.ua/sbu/doccatalog/document?id=43135>.

13. Красилов А.В., Ройзин Н.М. Десять лет полупроводниковой электроники. *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. 1958. Т. 1. №6. С. 639–646.

14. Лашкарев В. Е. Исследования запорного слоя методом термозонда. *Известия АН СССР, серия физическая*. 1941. №4-5. С. 442-446.

15. Литовченко В. Г. Дослідження напівпровідників, що привели до відкриття р-n переходу українськими ученими. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 2015. Т. 12. № 3. С.28–34.

16. Литовченко В.Г. Мої наукові контакти з В.Є. Лашкар'ювим – першовідкривачем р-n-переходу. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2014. Т. 15, № 3. С. 449–456.

17. Малашевич Б.М. 50 лет отечественной микроэлектронике. Краткие основы и история развития. Москва: Техносфера, 2013. 800 с.

18. Малютин А.Е., Филиппов И.В. История электроники. Москва, Электронный учебник, 2006. 213 с.

19. Мачулін В. Напівпровідники в усіх вимірах (Інституту фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкар'юва НАН України — 50 років). *Вісник НАН України*. 2010. № 10. С. 42–46.

20. Національна академія наук України. Видатні досягнення. 1918–2018. К.: «Фенікс», 2018. С. 80–81.

21. Нитусов А. Транзисторная история или о вкладе советских и российских учёных в разработку полупроводниковых транзисторов. URL: <https://www.computer-museum.ru/technlgy/triod.htm>

22. Носов Ю. Транзистор – наше все: к истории великого открытия. *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2008. №2. С. 118–123.

23. Одеський фізик Є.А. Кирилов як особистість та науковець. URL: <http://www.history.odessa.ua/publication10/stat79.htm>.

24. Первый советский транзистор. URL: <https://sites.google.com/site/izobretenietranzistora/home/pervyj-sovetskij-tranzistor>

25. Передісторія створення інституту напівпровідників АН УРСР. URL: https://isp.kiev.ua/images/Page_Image/History/50_years_institute/4.pdf

26. Стріха М.В. Сторіччя науки про напівпровідники: витоки і український внесок. *Український фізичний журнал*. 2014. Т.59. №8. С. 830–839.

27. Стріха М.В. Непомічений ювілей (науці про напівпровідники – 100 років). *Світгляд*. 2013. №5 (43). С. 64–69.

28. Стріха М.В. Як починалась наука про напівпровідники. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 2013. Т. 10. № 3. С. 11–21.

29. Храмов Ю.А. Физики: Биографический справочник. – К.: Наукова думка, 1977. – 512 с.

30. Храмов Ю.А. История физики / Ю.А. Храмов; НАН Украины, Центр исследований научно-технического потенциала и истории науки им.

Г.М. Доброва, Укр. о-во историков науки; Ин-т гуманит. исследований. – Киев: Феникс, 2006. – 1175 с.

31. Царенко О., Садовий М. Внесок українських учених у розвиток науки про напівпровідники. *Наукові записки Центральноукраїнського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка. Серія: Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти*. 2017. Т. 2, № 12. С. 123–130.

32. Царенко О.М., Ріжняк Р.Я. Вітчизняні фундатори вакуумної електроніки. *Історія науки і біографістика*. 2021. 3. <http://inb.dnsgb.com.ua/2021-3/index.html>

33. Чечнев А. Загадочная «Точка» и неизвестная «Плоскость». URL: <https://www.computer-museum.ru/articles/histekb/4090/>

References

1. 100 let Krasilovu Aleksandru Viktorovichu – sozdatelyu pervykh otechestvennykh tranzistorov [100 years old of Krasilov Alexander Viktorovich – the creator of the first domestic transistors]. URL: <https://sites.google.com/site/izobretenietranzistora/home/pervyj-sovetskij-tranzistor> [in Russian].

2. Bieliaiev O.Ye. (2019. Vol. 54). Instytut fizyky napivprovodnykiv im. V.Ye. Lashkarova NAN Ukrainy – 58 rokiv u skladi NAN Ukrainy [The Institute of Semiconductor Physics V.Ye. Lashkaryova of the National Academy of Sciences of Ukraine – 58 years in the National Academy of Sciences of Ukraine]. *Optoelektronika y poluprovodnykovaia tekhnika – Optoelectronics and semiconductor technology*. P. 3–8 [in Ukrainian].

3. Bukatevych N.I. (1968). Istoriia Odeskoho universytetu za 100 rokiv / vidpov. red. O.I. Yurzhenko [History of Odessa University for 100 years / ed. OI Yurzhenko]. K.: Published by Kyiv University. 422 p. [in Ukrainian].

4. (1963. Т. 8, № 10.) Vadym Yevhenovych Lashkarov (Do shistdesiatyrichchia z dnia narodzhennia [To the sixtieth anniversary of his birth]). *Ukrainskyi fizychnyi zhurnal – Ukrainian Physical Journal*. P. 1047–1050 [in Ukrainian].

5. (2004). Holdman Oleksandr Henrikhovych. Entsyklopediia istorii Ukrainy: u 10 t. / redkol.: V.A. Smolii ta in. ; Instytut istorii Ukrainy NAN Ukrainy [Encyclopedia of the History of Ukraine: in 10 volumes / editor: V.A. Smolii and others. ; Institute of History of Ukraine, National Academy of Sciences of Ukraine]. K.: Naukova dumka, Т. 2. 518 p. [in Ukrainian].

6. Gol'dman Aleksandr Genrihovich. URL: <https://amp.ru.google-info.cn/5210936/1/goldman-aleksandr-genrihovich.html#article> [in Russian].

7. Holdman O.H. (1933). Fotoelektrychni yavyscha, problema peretvorennya svitlovoi enerhii na elektrychnu ta ohliad z tsykh pytan Ukrainskoho naukovo-doslidnoho instytutu fizyky pry VUAN. U kn.: VUAN na sluzhbi sotsialistychnoho budivnytstva. Pratsi yuvileinoi sesii VUAN, prysviachenoї 15-littiu Zhovtnevoi revoliutsii [Photoelectric phenomena, the problem of conversion of light energy into electricity and a review of these issues of the Ukrainian Research Institute of Physics

at the All-Ukrainian Academy of Sciences. In the book: *All-Ukrainian Academy of Sciences in the service of socialist construction. Proceedings of the anniversary session of the Ukrainian Academy of Sciences, dedicated to the 15th anniversary of the October Revolution*]. Kyiv. P. 117–135 [in Ukrainian].

8. Hrushytska I.B., Sukhoterina L.I., Ye.A. (2015. № 3). Kyrylov – fundator odeskoi shkoly naukovoï fotohrafii [*Kyrylov is the founder of the Odessa school of scientific photography*]. *Nauka ta naukoznavstvo – Science and science studies*. P. 129–137 [in Russian].

9. (2020). Instytut fizyky napivprovidnykiv im. V.Ye. Lashkarova NAN Ukrainy. 1960–2020 / redkol.: O.Ye. Bieliaiev (holova) ta in.; NAN Ukrainy, Instytut fizyky napivprovidnykiv im. V.Ye. Lashkarova [*Institute of Semiconductor Physics V.Ye. Lashkaryov National Academy of Sciences of Ukraine. 1960–2020 / editor: O.Ye. Belyaev (chairman) and others; NAS of Ukraine, Institute of Semiconductor Physics. V.Ye. Lashkaryova*]. Kyiv: Akadempriodyka. 290 p. [in Ukrainian].

10. Keldysh L.V. (1985. № 9). Tammovskie sostoyaniya i fizika poverhnosti tverdogo tela. (K 90-letiyu so dnya rozhdeniya I. E. Tamma) [*Tamm states and physics of a solid surface. (On the occasion of the 90th anniversary of the birth of I. Ye. Tamm)*]. *Priroda – Nature*. P. 17–33 [in Russian].

11. Kirillov Elpidifor Anempodistovich. URL: <https://www.eduspb.com/node/689> [in Russian].

12. Kyiak B., Proskura O. Dolia akademika Oleksandra Holdmana [*The fate of Academician Olexander Holdman*]. URL: <https://web.archive.org/web/20150924114741/http://www.sbu.gov.ua/sbu/doccatalog/document?id=43135> [in Ukrainian].

13. Krasilov A.V., Rojzin N.M. (1958. T. 1. №6). Desyat' let poluprovodnikovoj elektroniki. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij [*Ten years of semiconductor electronics. Proceedings of higher educational institutions*]. *Radioelektronika – Radio electronics*, P. 639–646 [in Russian].

14. Lashkarev V. E. (1941. №4-5). Issledovaniya zapornogo sloya metodom termozonda [*The investigations of the barrier layer using the thermal probe method*]. *Izvestiya AN SSSR, seriya fizicheskaya – The news of the USSR Academy of Sciences, physical series*. P. 442-446 [in Russian].

15. Lytovchenko V. H. (2015. T. 12. № 3.) Doslidzhennia napivprovidnykiv, shcho pryvely do vidkryttia p-n perekhodu ukrainskymy uchenymy [*The studies of semiconductors that led to the discovery of the p-n junction by the Ukrainian scientists*]. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. P. 28–34 [in Ukrainian].

16. Lytovchenko V.H. (2014. T. 15, № 3). Moi naukovi kontakty z V.Ye. Lashkarovym – pershovidkryvachem p-n-perekhodu [*My scientific contacts with V.Ye. Lashkaryov – the discoverer of the pn junction*]. *Fizyka i khimiia tverdoho tila – Solid state physics and chemistry*. P. 449–456 [in Ukrainian].

17. Malashevich B.M. (2013). 50 let otechestvennoj mikroelektronike. Kratkie osnovy i istoriya razvitiya [*50 years of domestic microelectronics. The brief foundations and history of development*]. Moskva: Tekhnosfera. 800 p. [in Russian].

18. Malyutin A.E., Filippov I.V. (2006). Istoriya elektroniki [*History of Electronics*]. Moskva, Elektronnyj uchebnyk. 213 p. [in Russian].
19. Machulin V. (2010. № 10). Napivprovidnyky v usikh vymirakh (Instytutu fizyky napivprovidnykiv im. V. Ye. Lashkarova NAN Ukrainy — 50 rokiv) [*Semiconductors in all dimensions (50 years of The V.Ye Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine)*]. *Visnyk NAN Ukrainy – Bulletin of the NAS of Ukraine*. P 42–46 [in Ukrainian].
20. (2018). Natsionalna akademiia nauk Ukrainy. Vydatni dosiahnennia. 1918–2018 [*National Academy of Sciences of Ukraine. Outstanding achievements. 1918–2018*]. K.: «Feniks». P. 80–81 [in Ukrainian].
21. Nitusov A. Tranzistornaya istoriya ili o vklade sovetskih i rossijskih uchyonyh v razrabotku poluprovodnikovyyh tranzistorov [*Transistor history or the contribution of Soviet and Russian scientists to the development of semiconductor transistors*]. URL: [https://www.computer-museum.ru /technlgy/triod.htm](https://www.computer-museum.ru/technlgy/triod.htm) [in Russian].
22. Nosov YU. (2008. №2). Tranzistor – nashe vse: k istorii velikogo otkrytiya [*The transistor is our everything: to the history of the great discovery*]. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes – Electronics: Science, Technology, Business*. P. 118–123 [in Russian].
23. Odeskyi fizyk Ye.A. Kyrylov yak osobystist ta naukovets [*Odessa physicist E.A. Kyrylov as a person and a scientist*]. URL: <http://www.history.odessa.ua/publication10/stat79.htm> [in Ukrainian].
24. Pervyj sovetskij tranzistor [*The first Soviet transistor*]. URL: <https://sites.google.com/site/izobretenietranzistora/home/pervyj-sovetskij-tranzistor> [in Russian].
25. Peredistoriia stvorennia instytutu napivprovidnykiv AN URSR [*Prehistory of the Institute of Semiconductors of the USSR Academy of Sciences*]. URL: https://isp.kiev.ua/images/Page_Image/History/50_years_institute/4.pdf [in Ukrainian].
26. Strikha M.V. (2014. T.59. №8). Storichchia nauky pro napivprovidnyky: vytoky i ukraïnskyi vnesok [*Centuries of semiconductor science: origins and the Ukrainian contribution*]. *Ukraïnskyi fizychnyi zhurnal – Ukrainian Physical Journal*. P. 830–839 [in Ukrainian].
27. Strikha M.V. (2013. №5 (43)). Nepomichenyi yuvilei (nautsi pro napivprovidnyky – 100 rokiv) [*Unnoticed anniversary (science of semiconductors - 100 years)*]. *Svitohliad*. P. 64–69 [in Ukrainian].
28. Strikha M.V. (2013 T. 10. № 3). Yak pochynalas nauka pro napivprovidnyky [*How the science of semiconductors began*]. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. P. 11–21 [in Ukrainian].
29. Hramov YU.A. (1977). Fiziki: Biograficheskij spravochnik [*The physicists: A Biographical Handbook*]. – K.: Naukova dumka. 512 p. [in Russian]
30. Hramov YU.A. (2006). Istoriya fiziki / YU.A. Hramov; NAN Ukrainy, Centr issledovanij nauchno-tekhnicheskogo potenciala i istorii nauki im. G.M. Dobrova, Ukr. o-vo istorikov nauki; In-t gumanit. Issledovanij [*History of physics / Yu.A. Hramov; NAS of Ukraine, Center for Research of Scientific and Technical*

Potential and History of Science named after G.M. Dobrova, Ukr. Society of Historians of Science; Institute of Humanities. Research]. Kiev: Phoenix. 1175 p. [in Russian]

31. Tsarenko O., Sadovyi M. (2017. Т. 2, № 12). Vnesok ukrainskykh uchenykh u rozvytok nauky pro napivprovodnyky [*The contribution of the Ukrainian scientists to the development of the science of semiconductors*]. *Naukovi zapysky Tsentralnoukrainskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Vynnychenka. Serii: Problemy metodyky fizyko-matematychnoi i tekhnolohichnoi osvity – Scientific notes of the Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State Pedagogical University. Series: Problems of methods of physical-mathematical and technological education*. P. 123–130 [in Ukrainian].

32. Tsarenko O.M., Rizhniak R.Ya. (2021. 3) Vitchyzniani fundatory vakuumnoi elektroniky [*Domestic founders of vacuum electronics*]. *Istoriia nauky i biohrafistyka – History of science and biography..* <http://inb.dnsgb.com.ua/2021-3/index.html> [in Ukrainian].

33. СHechnev A. Zagadochnaya «Tochka» i neizvestnaya «Ploskost'» [*The mysterious «Point» and the unknown «Plane»*]. URL: <https://www.computer-museum.ru/articles/histekb/4090/> [in Russian].

Рецензенти:

Анищенко Н.Г., д.і.н., доцент

Бородай.І.С., д.і.н., професор

Надійшла до редакції 23.11.2021 р.