

СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧІ ДІОДИ: ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ, СЬОГОДЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ (до 60-річчя створення першого світлодіода)

Ю. Корчак, Ю. Фургала, Н. Корчак

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна
yuriy.korchak@lnu.edu.ua*

У роботі розглянуто історичні етапи розвитку світлодіодної техніки від моменту першого спостереження електролюмінесценції до створення сучасних світлодіодних освітлювачів та індикаторів. Особлива увага присвячена створювачу першого промислового зразка світловипромінюючого діода з випромінюванням у видимій ділянці спектру Ніку Голоняку, який має українське походження, а також проблемам при розробці світлодіода з синім випромінюванням та світлодіода білого світла. У статті описано основні переваги світлодіодних випромінювачів світла над іншими джерелами випромінювання, а також проаналізовано сучасний стан і глобальний ринок світлодіодної техніки. Насамкінець окреслено деякі перспективні напрямки розвитку світлодіодів, в тому числі органічних, зокрема, для конструювання екранів і дисплеїв та з використанням нанотехнологій.

Ключові слова: електролюмінесценція, інжекція, напівпровідниковий світлодіод, органічний світлодіод, світлодіодна лампа, світлодіодний екран.

Вмикаючи вранці кавоварку та освітлення в приміщенні, розглядаючи рекламні щити дорогою на роботу, спостерігаючи за роботою світлофорів на перехрестях, прикрашаючи ялинку і т. п. – ми бачимо цей великий винахід повсюди й постійно використовуємо його у повсякденному житті. І це світло настільки нам знайоме та звичне, що більшість із нас навіть не задумується, а що, власне, там світиться? Виявляється, що джерелом цього випромінювання є світлодіод. Тому, купуючи сьогодні світлодіодну лампу і користуючись нею, згадаймо, яким чином людству вдалося досягнути сьогоднішнього стану світлодіодної техніки. У цій статті наведено огляд ретроспективного розвитку світловипромінюючих діодів від моменту зародження до сьогодні, розглянуто різновиди світлодіодів і чим вони відрізняються, окреслено основні перспективні напрями їхнього розвитку.

Від перших спостережень електролюмінесценції ...

В основі роботи світлодіода лежить явище електролюмінесценції, тобто випромінювання світла за проходження електричного струму через напівпровідники. Вперше його спостерігав співробітник британської компанії *Marconi Company* Генрі Раунд (*Henry Round*) у 1907 році [1]. Раунд провадив дослідження, зв'язані з розробкою технології радіопередавання над поверхнею землі та морі в різний час доби. Він

пропускав електричний струм напругою від 10 до 110 вольт через кристал карборунду (карбід кремнію) і помітив, що той за малої прикладеної напруги випромінює жовтувате світло, а за вищої прикладеної напруги – світло й інших кольорів (зелене, оранжеве, голубе). Раунд опублікував коротке повідомлення про свої спостереження в журналі *Electrical World* [2], однак не став продовжувати свої дослідження в цій області.



а)

A Note on Carborundum.

To the Editors of *Electrical World*:

Sms.—During an investigation of the unsymmetrical passage of current through a contact of carborundum and other substances a curious phenomenon was noted. On applying a potential of 10 volts between two points on a crystal of carborundum, the crystal gave out a yellowish light. Only one or two specimens could be found which gave a bright glow on such a low voltage, but with 110 volts a large number could be found to glow. In some crystals only edges gave the light and others gave instead of a yellow light green, orange or blue. In all cases tested the glow appears to come from the negative pole, a bright blue-green spark appearing at the positive pole. In a single crystal, if contact is made near the center with the negative pole, and the positive pole is put in contact at any other place, only one section of the crystal will glow and that the same section wherever the positive pole is placed.

There seems to be some connection between the above effect and the e.m.f. produced by a junction of carborundum and another conductor when heated by a direct or alternating current; but the connection may be only secondary as an obvious explanation of the e.m.f. effect is the thermoelectric one. The writer would be glad of references to any published account of an investigation of this or any allied phenomena.

New York, N. Y.

H. J. Round.

б)

Рис. 1. Генрі Раунд ((Henry Round) (1881-1966) (а) та його коротке повідомлення про спостереження електролюмінесценції у карборунді в журналі *Electrical World* (б) [3].

У 1923 році радянський дослідник-інженер Олег Володимирович Лосєв (рис. 2, а) спостерігав у радіолабораторії м. Нижній Новгород свічення діодів на основі карбиду кремнію і оксиду цинку. Найімовірніше О. В. Лосєв не знав про роботу свого попередника, але на відміну від Генрі Раунда, він зумів оцінити вагу відкриття. Продовживши роботу в цьому напрямі, інженер створив низку винаходів, які базувалися на принципі електролюмінесценції.

Проводячи досліди із детекторами з карборунду SiC, він спостерігав інтенсивне зеленувате свічення (рис.2, б). Лосєв встановив, що це свічення є холодним і не зв'язаним із нагріванням кристалу чи металевого електроду. Тоді вважалося, що свічення відбувається всередині кристалу, а не на його поверхні та характер свічення істотно залежить від полярності прикладеної напруги. У своїх роботах Лосєв розрізняє два типи випромінювання: свічення I і свічення II. Наведений ним опис дозволяє ототожнювати свічення I з тим, що зараз називається передпробійним свіченням, а свічення II – з інжекційною люмінесценцією напівпровідника. Лосєв виявив, що свічення II виникає лише в кристалах, які мають на поверхні зеленого карборунду шари сірого кольору, причому свічення локалізується поблизу цих шарів. Пізніше, проводячи вимірювання з допомогою мікротермомозонду, він визначив, що сірий карборунд має провідність діркового типу, а зелений – електронного. У 1927 році О. В. Лосєв детально описав досліджуваний ефект у журналі «Телеграфія и телефония без проводов» і визначив мінімальний струм, необхідний для виникнення свічення. На рисунку 3 наведена вольт-амперна характеристика випромінюючого контакту карборунд-метал, отримана Лосєвим [4].



а)



б)

Рис. 2. Олег Володимирович Лосєв (1903-1942) [5] (а); перша світлина із зображенням електролюмінесценції, яку спостерігав О. В. Лосєв на контакті карборунд-метал [6] (б).

За період з 1924-32 рр. він опублікував низку робіт, в яких була доведена нетеплова природа випромінювання, представлені спектри випромінюваного світла і вольт-амперна характеристика діодів. У цей час О. В. Лосєв отримав патент та авторське свідоцтво на «Світлове реле» [7, 8].

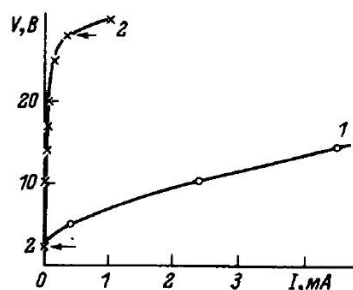


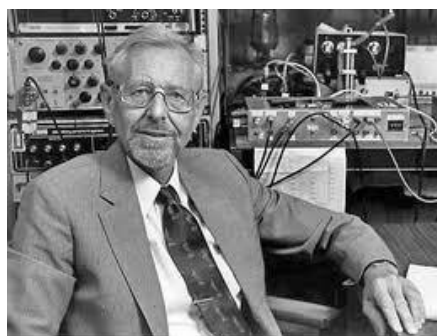
Рис. 3. Вольт-амперна характеристика випромінюючого контакту карборунд-метал [4]: 1 – пряма гілка, 2 – зворотна гілка (стрілки вказують на значення струму, за якого свічення стає помітним для ока).

Лосєв першим у світі довів електролюмінесценцію напівпровідників, тобто випромінювання ними світла під час протікання електричного струму. Це дійсно був перший крок на шляху створення світлодіодів, але протягом кількох десятиліть цьому відкриттю не знаходили практичного застосування.

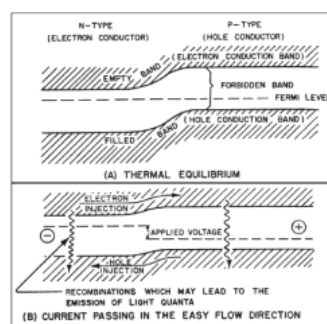
У 1935-36 рр. французький фізик Жорж Дестрію (*Georges Destriau*, 1903-1960), проводячи досліді в паризькій лабораторії Марії Кюрі, виявив свічення кристалу сульфіді цинку з домішками іонів міді у випадку прикладання до нього змінного

електричного поля [9]. Саме він дав цьому явищу усім відому назву «*електрофотолюмінесценція*» чи «*електролюмінесценція*». Дестріо, однак, з перших днів відзначав пріоритет у цьому відкритті О. В. Лосева, часто називаючи спостережуване світіння «*світлом Лосева*».

Промислова розробка напівпровідникових ламп розпочалась лише у 1951 році. У США був створений центр із розробки «напівпровідникових ламп», що діють на основі «*ефекту Лосева*». Очолив його американський фізик і винахідник чеського походження Курт Леговец (*Kurt Lehovec*, 1918-2012) (рис. 4, а).



а)



б)

Рис. 4. Професор Курт Леговец (*Kurt Lehovec*, 1918-2012) [10] (а); перше коректне пояснення інжекційної електролюмінесценції на *p-n*-переході з використанням енергетичної зонної діаграми, яку здійснив К. Леговец із співробітниками [11] (б)

Курт Леговец, Карл Аккардо (*Carl Accardo*) і Едвард Джамгочян (*Edward Jamgochian*) опублікували у 1951 році [11] свої дослідження електролюмінесценції на промислових зразках кристалу SiC, отриманих від *Carborundum Company*. Кристалічні зразки карборунду випромінювали світло в діапазоні довжин хвиль 450-650 нм із зовнішньою квантовою ефективністю 10^{-6} . Припускаючи, що їхні зразки SiC володіють *p-n*-переходом, автори вперше запропонували інтерпретувати електролюмінесценцію як явище, спричинене інжекцією неосновних носіїв заряду через *p-n*-перехід і подальшою їх рекомбінацією з основними носіями заряду та випромінюванням квантів світла. Однак, враховуючи використання комерційних кристалів SiC та той факт, що автори не описували процесів легування, наявність *p-n*-переходу в кристалі SiC була малоімовірною, але не неможливою.

... до промислових зразків світлодіодів

Черговий виток історії з діодами запустив вчений з США Рубін Браунштайн (*Rubin Braunstein*, 1922-2018), який зробив нове відкриття в 1955 році, працюючи в компанії *RCA Corporation*. Він встановив: якщо пропускати напругу через діоди на основі арсеніду галію, вони починають випромінювати інфрачервоні промені [12]. Однак, Рубін Браунштайн цей винахід не запатентував. Тому офіційним «днем народження» світлодіода можна вважати 1961 рік, саме тоді Джеймс Роберт Байард (*James R. Biard*, 1931-) і Гарі Піттман (*Gary Pittman*, 1930-2013) з компанії *Texas Instruments* відкрили і пізніше запатентували технологію інфрачервоного (~ 900 нм) світлодіода [13, 14].

Перший у світі практично застосовний світлодіод, який працював в області видимого світла (червоний діапазон спектру), розробив Нік Голоняк (*Nick Holonyak*, 1928 -) в Університеті Іллінойса (США) для компанії *General Electric* у 1962 році і саме він вважається «батьком сучасного світлодіода».

Що найприємніше: видатний винахідник має українське походження. Тому зупинімося на цій неординарній та унікальній особистості більш детально.

Нік Голоняк народився вже в Іллінойсі, куди його батьки переїхали із Підкарпатської Русі (сьогоднішнє Закарпаття, Україна) окремо один від одного і зустрілися та одружилися уже в США. Народився видатний вчений 3 листопада 1928 року у м. Зейглері (*Zaigler*), штат Іллінойс. Хрестили його в українській греко-католицькій церкві та назвали на честь батька Миколи, але на американський манер — Нік. Нік та його сестра були першими в сім'ї, хто отримав шкільну освіту. Сім'я жила бідно, батько багато та важко працював на вугільних копальнях Південного Іллінойсу, мати вела домашнє господарство. Вони були неосвіченими, але були однодумцями в тому, що їхні діти обов'язково мають вчитися.

Ніка з дитинства притягувала наука, книги, він постійно бачив, як руками створюються різні речі. У дворі будинку завжди щось ремонтувалося, збиралося, розбиралося. Як згадував він пізніше: «Розумієте, це фізичний світ – робити речі з дерева, з гуми, із заліза, з будь-чого. Це були бідні люди, вони не наймали теслю чи ще когось. Вони робили усе для себе самі» [15].

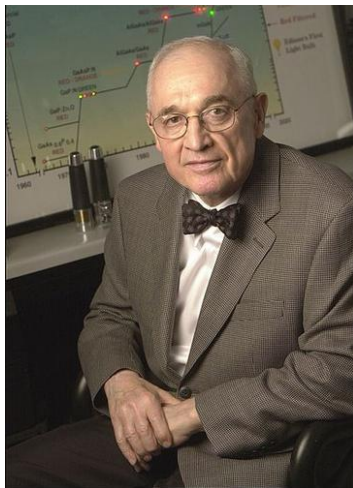
Спостерігаючи за важким матеріальним становищем батьків, Нік відчував, що не має права витратити їхні гроші та намагався підпрацювати, де тільки міг. Збирав сміття, здавав макулатуру, підстригав траву в найближчому замиському клубі, а в 15 років навіть намагався влаштуватися на військову службу, збрехавши про свій вік, але не пройшов перевірку. Пізніше влаштувався на залізницю, де контроль був не такий жорсткий, та й робітники були дуже потрібні. Він там пропрацював три літа підряд (1944-46 рр.): 10 годин в день, 6 днів у тиждень, 65 центів за годину роботи. Одного разу дорогу дуже розмило і робітникам довелося працювати 33 години підряд без обіду і перерви. Повернувшись додому надзвичайно змученим, Нік дійшов до висновку, що це не життя, а виживання, і це зовсім не те, чого він хоче в житті.

Саме тоді він задумався про Іллінойський університет, котрий саме відкривав свої двері у місті неподалік в Урбана-Шампейні, і вступив на навчання до нього. Усі накопичені гроші Нік Голоняк витратив на навчання, але їх все рівно не вистачало, і в перші роки навчання йому довелося відпрацювати на сталеливарному заводі та допомагати батькові з ремонтом навколишніх будинків. В університеті Іллінойса Нік зустрівся із шалено конкуренцією. Групи були переповнені. Не відповідаєш певним стандартам, не витримуєш темпу – і на твоє місце одразу займає інший. Однак Нік з успіхом проходив усі необхідні курси, і у 1950 році здобув ступінь бакалавра, а пізніше і магістра (1951).

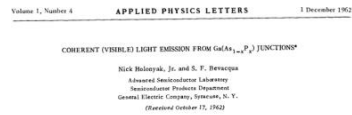
Коли з'явилася можливість стати першим аспірантом Джона Бардіна (*John Bardeen*, 1908-1991) (у майбутньому – двічі Нобелівського лауреата), він жодної миті не сумнівався і перейшов у лабораторію винахідника транзистора. Про початок роботи в цій лабораторії Нік Голоняк пізніше згадував: «Йому (Бардіну) потрібні були люди з дослідницькими здібностями та лабораторним досвідом, тому що ми збиралися займатися дивними речами. Насправді ми розпочинали в голій кімнаті. Ми повинні були побудувати усе – стенди, усю апаратуру. Наша картина розпочиналася з чистого аркуша» [15]. Джон Бардін був прекрасним керівником, він кожного дня приходив у

лабораторію, даючи вказівки, цікавлячись ідеями, забезпеченістю засобами та матеріалами і Голоняку було дуже комфортно з ним працювати. Як результат, Нік Голоняк у 1954 році здобув ступінь доктора філософії в галузі електротехніки.

Однак, Нік хотів зайняти свою нішу. Доки більшість колег працювали над удосконаленням інфрачервоного випромінювання, українець хотів зробити його видимим і в 1962 році йому це вдалося. У цьому році в Іллінойському університеті під керівництвом Ніка Голоняка були створені перші світлодіоди видимої області спектру (710 нм) промислового призначення на основі структур GaAsP/GaP [16]. Пізніше він продовжив свої дослідження в цьому ж університеті, де були створені світлодіоди жовто-зеленого та червоного випромінювання. Аспірант Голоняка Джордж Крафорд (*George Crawford*) створив у 1972 році перший жовтий світлодіод і десятикратної яскравості червоний та червоно-оранжевий світлодіоди [17].



а)



Recently Hall, Fessenden, Klippenberg, Selzer, and Cuddeback (HFKSC) reported generation of coherent infrared radiation from forward-biased GaAs p-n junctions. We wish to report similar generation of shorter wavelength coherent (visible) radiation from forward-biased GaAs_{1-x}P_x p-n junctions. As in the experiments reported by Hall and others, evidence for coherent light emission in GaAs_{1-x}P_x is based upon the observation of a threshold current beyond which the light intensity increases sharply, upon the pronounced narrowing of the spectral distribution of emitted light beyond threshold, and upon the sharply beamed radiation pattern of the emitted light. Again as in the case described by HFKSC, the stimulated emission is believed to occur as the result of transitions between states of equal wave number in the conduction and valence bands. It is believed this occurs because of the choice of the ratio of P to As in GaAs_{1-x}P_x so that the crystal is a "direct" semiconductor.

In the present case the conditions on (1) junction design and doping, (2) degree of inversion (by injection) of carriers in conduction band and valence band states in the junction transition region, and (3) geometrical relationship of the junction plane to the mounting auxiliary "carrier" faces for stimulated emission are as described in ref. 1.

Our GaAs_{1-x}P_x diodes are rectangular parallel-plate or cube-like with two opposite parallel sides carefully polished and with an active (junction) area ~10² cm². In each diode a different junction lies 10 μ or deeper from one contact surface into the crystal and is perpendicular to the two polished surfaces. Most of our diodes have been fabricated on <100> GaAs_{1-x}P_x prepared by the halogen-vapor transport and synthesis procedure we have previously described.¹ These impurity concentrations greater than 10¹⁹ cm⁻³ have been employed.

Essentially, the diodes have "direct" valence characteristics and fast energy non-forward conduction as a rule comparable to that of high quality GaAs p-n junctions. As expected, because of the larger (variable) bandgap of GaAs_{1-x}P_x, the diodes require higher forward voltages than GaAs junctions (e.g., 1.5 V (diode 28A) as compared to 1.0 V in the "control" leading to steep current increase). The overall high quality and efficiency of these junctions is indicated by the fact that in free air (300°K) currents from 20 mA to over 100 mA do not overheat the junctions and are sufficient to produce easily perceptible red light emission.

The evidence for stimulated emission may be concisely presented by referring to Fig. 1, which represents data taken on diode 28A while it was immersed in liquid nitrogen. Below ~11,000 A/cm² the light intensity varied linearly with current (optical-current, rather than to square law). Above ~11,000 A/cm² the light intensity increased sharply with current (super-linear region) and began to assume a narrower pulse width than the somewhat rounded input current pulse. This threshold behavior characterizes the onset of stimulated emission.

As shown by curve (a) of Fig. 1 the spectral width below or near threshold (11,000 A/cm²) was ~120 Å. Although it is not shown on Fig. 1, the spectral width at 10,000 A/cm² narrowed to ~20 Å and, as shown by curve (b), narrowed to ~12 Å at 15,000 A/cm². This, then, is consistent with the onset of stimulated emission. Whereas the GaAs junctions described by Hall and others emitted coherent radiation near 850 Å, it will be noted that for diode 28A we have been able to shift the wavelength to a sharply peaked output at 7100 Å.

б)

Рис. 5. Нік Голоняк (1928-) [18] (а); світлина першої сторінки публікації про створення світлодіода у видимій області спектру [16] (б).

У 1963 році він знову відновив співпрацю з Бардінім і займався проблемами квантових ям та лазерів на квантових ямах. З 2007 року Нік Голоняк завідує успадкованою від Бардіна кафедрою електротехніки, обчислювальної техніки і фізики в Іллінойському університеті та проводить дослідження з лазером на квантових точках та інтегральними оптоелектронними системами. Голоняк прожив зі своєю дружиною Катериною 51 рік. Він більше не веде навчальні заняття, але дослідженнями займається повний робочий день (рис. 6). Разом з Мілтоном Фенгом (*Milton Feng*) у 2004 році вони створили дослідницький центр транзисторних лазерів при університеті, який фінансує агентство з перспективних оборонних науково-дослідних розробок США [18].



Рис. 6. Нік Голоняк із своїм винаходом в університетській лабораторії [19].

На сьогодні Нік Голоняк має величезний науковий доробок. Крім винаходу світлодіода, він отримав 41 патент на інші винаходи. До них відносяться червоний напівпровідниковий лазер, зазвичай відомий як лазерний діод (він використовується в CD та DVD-плеєрах і мобільних телефонах) і тиристорний *rprp*-ключ із замкнутим емітером (використовується в димері та електроінструментах). Брав безпосередню участь у створенні першого димеру фірми *General Electric*. 10 з 60 його колишніх аспірантів займаються розробкою нових світлодіодних технологій в компанії освітлювальних приладів фірми *Philips* у Силіконовій долині.

За свої видатні наукові досягнення Нік Голоняк був удостоєний численної кількості нагород. Зокрема, у 1989 році він отримав медаль Едісона за «Визначну наукову кар'єру в області електротехніки та великий внесок у розвиток напівпровідникових матеріалів і пристроїв». У 1995 році Нік Голоняк став лауреатом півмільйонної премії уряду Японії за «Видатний внесок у наукові дослідження і практичне застосування світлодіодів і лазерів». У 2003 році він був нагороджений медаллю Пошани IEEE. Згодом отримав Міжнародну енергетичну премію «Глобальна енергія», Національну медаль за технології та інновації, орден Лінкольна, а в 2004 – премію Лемельсона розміром півмільйона доларів. Він також отримав медаль Фредеріка Іва Оптичного товариства США. Багато його колег висловлюють впевненість, що Голоняк заслуговує на Нобелівську премію за винахід світлодіода, і вірять що цей день настане. 9 листопада 2007 Нік Голоняк був удостоєний встановлення пам'ятного знаку в університетському містечку Іллінойсу, цим було визнано його величезний внесок у розвиток лазерів на квантових ямах. Знак розташований в Інженерному дворику Бардіна, на тому місці, де колись стояла стара науково-дослідна лабораторія електротехніки. У 2008 році Нік Голоняк був введений у Зал Національної Слави винахідників США.

До 1968 року світлодіоди коштували по 200\$ за штуку, що, звичайно ж, істотно стримувало їхнє широке застосування. Їхня світлова ефективність на той час становила близько 1-2 лм/Вт. У 1968 році була створена перша світлодіодна лампа на основі фосфіду галію, призначена для індикатора *Monsanto*. У цьому ж році в США компанія *Hewlett-Packard* створила перший у світі світлодіодний екран, призначений для реклами.

Це був дисплей з низькою яскравістю, інформація на котрому відображалася лише червоним кольором [20].

Подальше створення світлодіодів йшло в напрямку розширення спектрального діапазону їхнього випромінювання, зокрема, в бік короткохвильової області, і підвищення яскравості свічення та здешевлення виробництва. Для цього потрібно було виготовити *p-n*-переходи в широкозонних напівпровідниках, наприклад, у кристалах нітриду галію. Було з'ясовано, що, якщо у кристалах GaN галій частково замінити індієм, тобто синтезувати систему $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, то можна отримати свічення від фіолетового до зеленого кольорів у залежності від вмісту індію. Однак виникла серйозна технологічна проблема щодо створення *p-n*-переходу. Якщо систему $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ *n*-типу вдалося створити, то за жодних технологічних прийомів дістати цей матеріал *p*-типу провідності жодним чином не вдавалося.

Перший синій світлодіод створив у 1971 році американський інженер-фізик Жак Ісаак Панков (*Jacques Isaac Pankove*, 1922-2016, при народженні – Яков-Ісаак Євсейович Панчешніков, народився в м. Чернігів (сучасна Україна)) в лабораторії компанії *RCA* (США) з використанням кристалів нітриду галію на сапфіровій підкладці [21]. Однак, він мав доволі низький коефіцієнт квантової ефективності та й його виготовлення було зв'язано із серйозними затратами в зв'язку із використанням сапфірової підкладки.

Крім того, наприкінці шістдесятих – початку сімдесятих років група радянських вчених під керівництвом Ж.І. Алфьорова (1930-2019) створили «багатопрхідні подвійні гетероструктури», завдяки яким значно збільшився зовнішній світловий вихід [22]. Цього вдалося досягнути завдяки суттєвому зменшенню області рекомбінації. Спочатку Ж. І. Алфьоров запропонував гетероструктури, які базувалися на GaAs та його твердих розчинах (типу AlGaAs), а деякий час згодом він створив гетероструктури з іншими напівпровідниковими комбінаціями. У підсумку вдалося досягнути 15%-ого зовнішнього світлового виходу для червоної області спектру (світловіддача близько 10 лм/Вт) та не менше 30% – для інфрачервоного випромінювання. У 1968 році Ж. І. Алфьоров створив перший напівпровідниковий гетеролазер на основі структури GaAs-AlGaAs. Сумарно це стало своєрідним «проривом» в області науки і техніки, за що Ж. І. Алфьоров у 2000 році був нагороджений Нобелівською премією.

Перший діодний пристрій на основі макромолекул (органічний світлодіод) був створений у 1987 році в компанії *Eastman Kodak* Чін Танем (*Ching W. Tang*, 1947 -) (США, Гонконг) і Стівеном ван Слайком (*Steven Van Slyke*, 1956 -) (США) [23]. Випромінювання світла в органічному світлодіоді (OLED) відбувається в тонкому плоскому люмінесцентному шарі органічного напівпровідника, в який із двох електродів інжектуються електрони та дірки. У межах люмінесцентного шару електрони й дірки рекомбінують, утворюючи екситони, частина з яких гине, випромінюючи фотон. Для інжекції електронів використовуються метали з малою роботою виходу (Ca, Mg, Al). Для інжекції дірок – напівпрозорий електрод із InSnO. Люмінесцентний шар може складатися або з малих органічних молекул, наприклад, Alq₃, або зі спряжених полімерів, наприклад, поліфенілінвініліну (PPV). Для покращення характеристик діоду використовують також додаткові провідні шари для електронів і дірок.

Наприкінці 1980-х років японські вчені Ісаму Акасахі (*Isamu Akasaki*, 1929 -) і Хіросі Аmano (*Hiroshi Amano*, 1960 -) в університеті Нагої (Японія) створили сині світлодіоди на основі нітриду галію з домішками магнію, удосконаливши метод епітаксійного вирощування кристалу [24]. Лише в 1990 році, завдяки Сюдзі Накамура (*Shuji Nakamura*, 1954 -), співробітнику японської корпорації *Nichia Chemical Industries*,

який створив технологію промислового вирощування синіх і зелених світлодіодів, промисловість отримала можливість виробляти сині світлодіоди. Сюдзі Накамура створив надпрецизійну установку для епітаксialного вирощування дуже тонких і досконалих шарів $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Надтонкі шари $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ почергово наносили на пластину-підкладку з карбиду кремнію, створюючи надгратки, а *p*-тип матеріалу одержували методом електронного опромінення [25]. Уже в 1993 році *Nichia* вдалось налагодити виробництво нових «дешевих» синіх світлодіодів з силою світла 1 кд. У 1994 р. С. Накамура створив перший синій світлодіод комерційного призначення. Він був виконаний на основі гетероструктури $\text{InGaN}/\text{AlGaIn}$ з активним шаром InGaIn , легованим цинком. На початку 90-х рр. світловіддача світлодіодів досягає 30 лм. У 1997 р. компанією *Nichia* запатентовані основні етапи технології. Об'єм реалізації блакитних і зелених світлодіодів, які виробляє ця компанія, досягає 20 мільйонів штук у місяць.



Рис. 7. Нобелівські лауреати з фізики у 2014 році Ісаму Акасахі, Хіросі Амано і Сюдзі Накамура (зліва направо) [19].

У 2014 році Ісаму Акасахі (Японія), Хіросі Амано (Японія) і Сюдзі Накамура (Японія, США) отримали Нобелівську премію з фізики «за винахід ефективних блакитних світлодіодів, які привели до появи яскравих та енергозберігаючих білих джерел світла» (рис. 7). Це відкриття «замкнуло коло» – разом із червоним і зеленим світлодіодами з'явилася можливість отримання широкого діапазону кольорів і відразу почали з'являтися найрізноманітніші RGB-пристрої. Крім того, поява «дешевих» синіх світлодіодів створила передумови для побудови білих світлодіодів. Їх створення йшло трьома шляхами.

Перший з них полягав у використанні в одному корпусі світлодіода трьох різних кристалічних матеріалів, які випромінювали світло відповідно в червоній, зеленій та синій ділянці спектру. Результатом змішування цих трьох випромінювань й було біле світло. Вперше це реалізував і запатентував Джон Стінсон (*J. W. Stinson*) у 1991 році [26]. Як випромінювачі в синій та зеленій області спектру було використано кристали

InGaN, а у червоній – кристали GaAlAs. Ця конструкція білого світлодіода містила три аноди та один спільний катод (рис. 8).

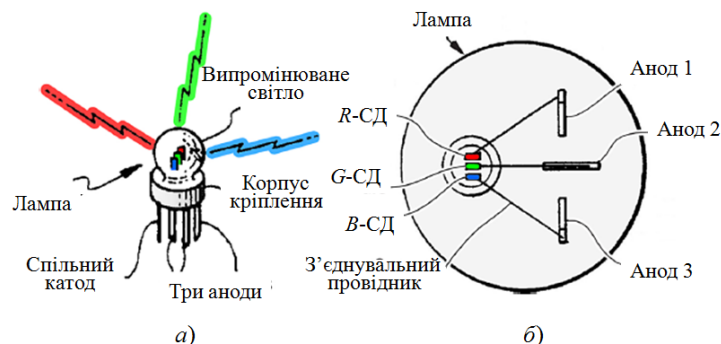


Рис. 8. Реалізація білого світлодіода з використанням червоного, зеленого та синього світлодіодів в одному корпусі: вигляд збоку (а) та зверху (б) [27].

Другий підхід використовував напівпровідниковий випромінювач в ультрафіолетовій або фіолетовій області спектру та фотолюмінофори, які перетворювали це випромінювання відповідно в червоне, зелене та синє (так зване повне перетворення), які в подальшому змішувалися, утворюючи біле світло (рис. 9, а).

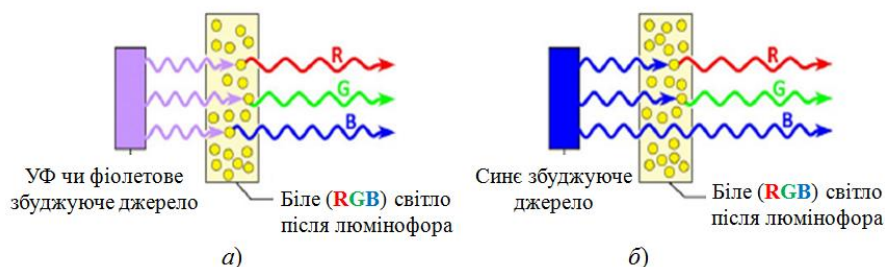


Рис. 9. Ілюстрація повного (а) і часткового (б) перетворення випромінювання фотолюмінофором у складові білого світла [27].

Уперше про такий світлодіод згадується ще у 1973 році [28]. Як джерело УФ чи фіолетового випромінювання пропонувалося використовувати кристал нітриду галію. Однак, практичного втілення ця ідея не отримала, оскільки через достатньо велике Стоксівське зміщення ці світлодіоди мали занадто малу ефективність.

Третій напрям – найуспішніший – передбачав використання синього випромінювача та фотолюмінофору, який перетворював це синє випромінювання відповідно в червоне та зелене (часткове перетворення) (рис. 9, б). Саме цей підхід вперше реалізував японський інженер-дослідник Юта Шімізу (*Yuta Shimizu*) у 1996 році [29], який у той час працював у *Nichia Company*. Як фотолюмінофор він застосував

ISSN 2224-087X. Електроніка та інформаційні технології. 2021. Випуск 15

легований церієм ітрію-алюмінієвий гранат $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ (YAG:Ce), а як синій випромінювач – кристал нітриду індію-галію InGaN з довжиною хвилі випромінювання 450 нм. Суміш утвореного в результаті флуоресценції зеленого та червоного випромінювання давала жовтий колір, який у поєднанні із синім випромінюванням сприймався людським оком як біле світло. Крім того, використання твердого розчину із частковою заміною ітрію на гадоліній в гранаті $(Y_{1-x}Gd_x)_3Al_5O_{12}:Ce$ зумовлювало зміщення піку флуоресценції в бік більших довжин хвиль з переважаючою червоною компонентою, а твердого розчину $Y_3(Al_{1-x}Ga_x)_5O_{12}:Ce$ – у бік коротших довжин хвиль із переважаючою зеленою компонентою [30]. Це дозволило змінювати кольорову температуру випромінювання від 2 500 до 6 500 К. Перші зразки таких білих світлодіодів, які в цей час почала виробляти *Nichia Company*, мали світлову ефективність 5 лм/Вт (рис. 10).

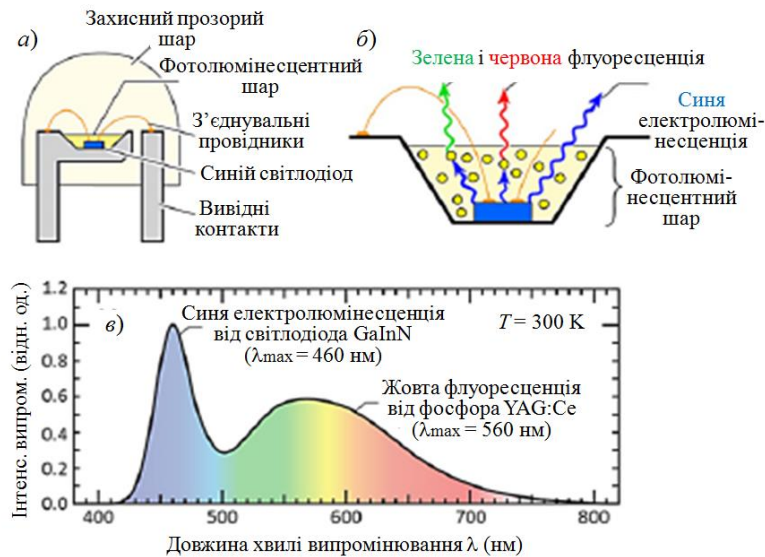


Рис. 10. Структура (а), механізм утворення білого світла з частковим перетворенням (б) та спектр випромінювання (в) білого світлодіода [31].

І, напевно, можна стверджувати, що саме з цього моменту розпочинається розвиток світлодіодів не тільки як індикаторних джерел світла, але і як джерел освітлення. Відразу стартує боротьба за підвищення енергоефективності світлодіодів. Виробники за цих 25 років досягнули значних успіхів – світимість світлодіодів збільшилася більше як у 200 разів – сучасні потужні світлодіоди досягають величин до 250-300 люменів на 1 Вт затраченої енергії (рис. 11).

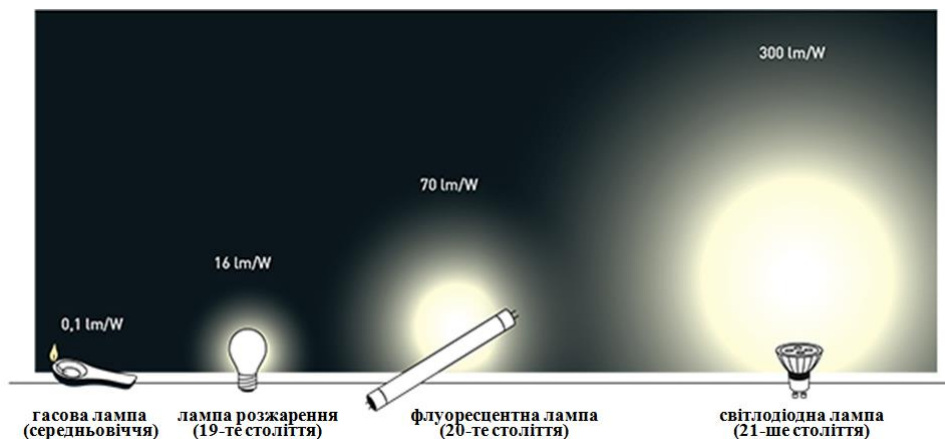


Рис. 11. Ілюстрація величин світловіддачі для різних джерел освітлення [32].

Сучасний стан та перспективи світлодіодної техніки

Вважається, що із 60-х років минулого століття розвиток світлодіодної техніки йде в геометричній прогресії, причому технічні параметри покращуються в два рази через кожні 36 місяців, аналогічно до закону Мура. Ця залежність отримала назву *закону Гейтца* (за іменем Роланда Гейтца (*Roland Haitz*)). На сьогодні промисловості вдалося отримати дуже яскраві світлодіоди, світловіддача котрих уже суттєво перевищує характеристики люмінесцентних ламп, що дозволяє створювати екрани, які володіють високою яскравістю та контрастністю. Такі екрани здатні відображати інформацію навіть за яскравого сонячного світла.

Окрім цього, світлодіоди сьогодні широко використовуються як індикатори, в оптопарах, як джерела світла в оптоволоконних мережах, для підсвічування рідкокристалічних екранів мобільних пристроїв та телевізійних приймачів. Потужні світлодіоди можуть використовуватися як джерела світла в ліхтарях, лампах побутового та промислового призначення.

Ось деякі кількісні та якісні характеристики сучасних світлодіодів [33]:

- світлодіодні лампи можуть бути в 7-10 разів енергоефективнішими, ніж традиційні лампи розжарювання, і здатні скоротити споживання енергії більше ніж на 80 %, оскільки лампи розжарювання близько 97 % своєї енергії витрачають на генерацію тепла. Світлодіоди споживають на 50-80% менше електричної енергії, в порівнянні з традиційними джерелами світла. Світлодіодна лампа потужністю 7 Вт здатна замінити будь-яку 50-ватну лампу розжарювання;

- якісна світлодіодна лампа має ресурс понад 50 тисяч годин, що, у свою чергу, в десятки разів більше, ніж у звичайних ламп (для ламп розжарювання – 1-1,5 тисяч годин, для люмінесцентних ламп – до 24 тисяч годин). Виходячи з цих даних, за приблизними підрахунками, отримуємо не менше 15 років безвідмовної роботи за умови 8 годин щоденної безперервної експлуатації;

- світлодіоди не містять ртуті та відповідно мають значно менший вплив на навколишнє середовище, в порівнянні з тими ж таки лампами розжарювання і

люмінесцентними лампами. До речі, світлодіодні лампи, внаслідок своєї підвищеної енергоефективності та практично повної відсутності негативного впливу на навколишнє середовище, мають досить велику перевагу над люмінесцентними лампами. Протягом наступних кількох років ця перевага, як очікується, буде тільки збільшуватися, беручи до уваги регулярне вдосконалення світлодіодних технологій;

- завдяки своїм унікальним фізичним властивостям світлодіодні лампи мають так званий миттєвий запуск: у порівнянні з іншими джерелами світла, при включенні світлодіодної лампи моментально отримується повна яскравість, на яку вона розрахована, тоді як лампам розжарювання і люмінесцентним лампам потрібен порівняно довге «прогрівання»;

- найменший у світі світлодіод створила японська компанія *Rohm*, що спеціалізується на розробці електронних компонентів. Його довжина становить 1 міліметр, а ширина – 0,8 міліметра. Товщина найкрихітнішого в світі світлодіода становить усього 0,2 міліметра;

- світлодіоди характеризуються механічною міцністю, стійкістю до вібрацій та не потребують постійного технічного обслуговування;

- використання світлодіодних освітлювальних приладів дає змогу сфокусувати світло в певному напрямку. Це особливо важливо за освітлення таких ділянок, як робочі місця чи стелажі з товаром у магазинах, супермаркетах тощо. Таким чином забезпечується економічність використання електроенергії та водночас підвищується ефективність використання освітлення, адже акцент освітлення спрямований на ті об'єкти, які цього потребують.

Сьогодні й надалі продовжується робота над удосконаленням світлодіодної продукції та популяризації її на світовому ринку. У першу чергу увагу інженерів-розробників привертають використання унікальних можливостей, які надають нанотехнології, та створення органічних світлодіодів.

Зокрема, нові підходи до створення світлодіодів надасть відкриття, здійснене в середині 2020 року групою дослідників, яку очолювали вчені з Національного інституту стандартів і технологій (NIST, США). Вони створили світлодіодне джерело світла нового типу [34], суть якого полягає в наступному. У звичайних світлодіодів, незважаючи на низку значних переваг, є один суттєвий недолік. Збільшення струму, який проходить через світлодіод, зумовлює на початку збільшення яскравості світла, яке він випромінює. Однак, достатньо швидко досягається так званий момент насичення, подальше збільшення струму через світлодіод призводить до падіння його яскравості та до збільшення паразитного тепла, яке він виділяє. Цей недолік, відомий під терміном «провал ефективності», є головною перешкодою для використання світлодіодів у комунікаційних технологіях, медицині та інших галузях, де вимагаються джерела світла високої ефективності.

Плануючи створити мікроскопічний світлодіод для використання на мінімальному масштабному рівні, на рівні елементів кристалів мікросхем, вчені використали нову просторову структуру. Замість планарної (площинної) структури кристалів, які використовують у звичайних світлодіодах, новий світлодіод має довгий і тонкий світловипромінювальний елемент із оксиду цинку. Кожен з цих елементів має довжину близько 5 мікрометрів (рис. 12). Матриці таких «тривимірних» світловипромінювальних елементів, подібні на гребінець, можуть бути об'єднані в структури, довжина яких вимірюється сантиметрами.

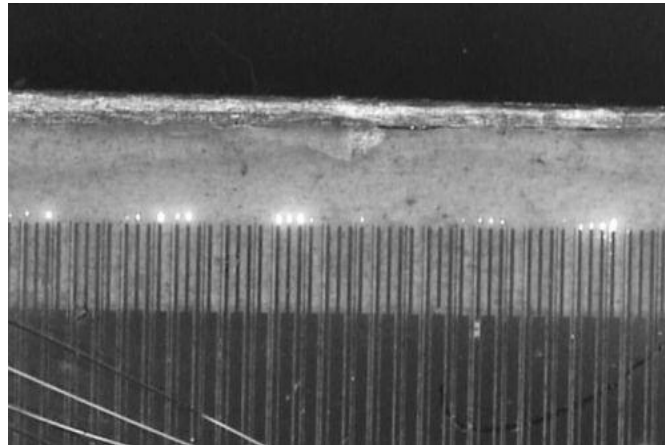


Рис. 12. Просторова структура світлодіодів, створених вченими Національного інституту стандартів і технологій (NIST, США) [34].

Як показали дослідження, новий світлодіод здатен випромінювати світло, яке знаходиться на межі між фіолетовим кольором та ультрафіолетом, яскравість якого в 100-1000 разів перевищує яскравість найкращих із існуючих на сьогодні світлодіодів. Якщо звичайні світлодіоди, площа кристалів яких не перевищує одного квадратного мікрметра, здатні випромінювати світло потужністю до 22 нановат, то потужність світла, випромінюваного новим світлодіодом, складає порядку 20 мікروات. Продовжуючи збільшувати струм через світлодіод, вчені виявили унікальний ефект – до певного моменту світлодіод випромінював світло відносно широкого діапазону, але за збільшення струму до певної межі спектр його випромінювання звузився і перетворилося в дві чіткі фіксовані спектральні лінії у фіолетовій області спектру. Інакше кажучи, цей мініатюрний світлодіод перетворився в мініатюрний дводіапазонний напівпровідниковий лазер. Це, у свою чергу, відкриває нові перспективи перед таким світлодіодом-лазером. Адже такі мініатюрні лазери є основою систем хімічного аналізу, мобільних комунікаційних систем наступного покоління, високоякісних пристроїв відображення інформації, медичних приладів і т.п.

Незважаючи на низку переваг органічних світлодіодів над іншими джерелами випромінювання (висока яскравість свічення – 100 000 кд/м², можливість створення гнучких світлових поверхонь, тощо) є одна проблема, яка останнім часом перешкоджає широкому поширенню цієї технології, зокрема, в моніторах та телевізорах. Вона полягає в тому, що «червоний» OLED і «зелений» OLED можуть безперервно працювати на десятки тисяч годин довше, ніж «синій» OLED. Це візуально спотворює зображення, причому час якісного показу стає неприйнятним для комерційно життєздатного пристрою. На сьогодні «синій» OLED таки досяг позначки в 17,5 тис. годин (приблизно 2 роки) безперервної роботи. Цього вдалося досягнути завдяки створенню умов для утворення високоенергетичного триплетного екситона в «синьому» OLED [35]. Вчені-дослідники й надалі не припиняють пошукових робіт у цьому напрямку. Основне призначення органічних світлодіодів пов'язане із використанням у різноманітних

дисплеях та екранах. Передбачається, що в найближчі десять років вони стануть основною екранною технологією. Окрім цього, перспективу у використанні OLED бачать світові автовиробники, в першу чергу, при конструюванні автомобільних фар та освітлення панелі приладів.

Сьогодні одним із основних напрямів практичного використання світловипромінюючих діодів є їхнє застосування для побутового та промислового освітлення. Лампи розжарення уже практично відійшли в історію, газорозрядні та ртутні лампи недовговічні, малоефективні, і, до того ж, можуть суттєво забруднювати навколишнє середовище. Впевнено та рішуче їм на зміну йдуть світлодіоди – відкриття, яке терпляче чекало свого часу, коли розвиток супутніх технологій надасть йому нове життя та бурхливий розвиток.

Світлодіодне освітлення у XXI столітті є одним із найперспективніших напрямків у малій енергетиці. Застосування світлодіодних світильників і ламп на промислових підприємствах, складах, у торговельних комплексах, офісних центрах, міських мережах вуличного освітлення, на автомагістралях і в кожному домі в багато разів підвищує енергоефективність. Сьогодні світлодіодне освітлення, звісно, потребує серйозних грошових вкладень, але з цілковитою впевненістю можна сказати, що економія на електроенергії, яка становить до 90%, за дуже короткий час окупить всі затрати.

Світлодіодне освітлення – це вже не розкіш, а енергоефективний засіб для підвищення комфорту та якості життя! За прогнозом *Coherent Market Insights*, світовий ринок LED-ламп (рис. 13) щороку на 16,6% і вже до кінця 2024 року сягне \$120 млрд. [36]. Численні споживчі переваги LED-освітлення, про які вище зазначалося, зумовили всесвітню «кампанію з просування» світлодіодного освітлення. Низка країн навіть ввела заборону ламп розжарювання і стала субсидувати виробників LED-ламп, що все більше стимулює зростання обсягів LED-ринку. Основними виробниками світлодіодних ламп у світі на сьогодні є компанії *Nichia* (Японія) – 25 % глобального ринку ламп, *Osram* (Німеччина), *Samsung Electronics* (Південна Корея), *Seoul Semiconductor* (Південна Корея), *Philips Lumileds* (Нідерланди), *Cree* (США), *LG Innotek* (Південна Корея) [37].

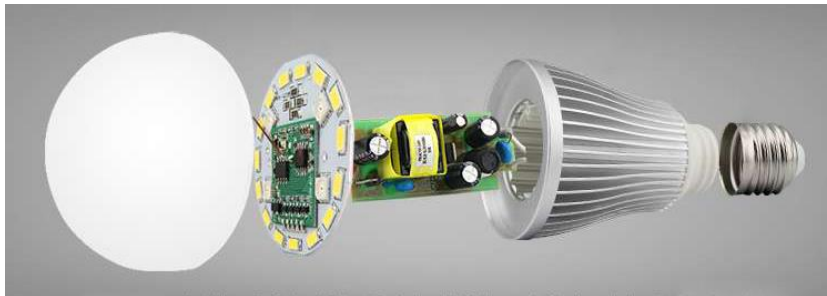


Рис. 13. Сучасна побутова світлодіодна лампа [38].

Одним з найважливіших ринків для виробників LED-освітлення стала сьогодні Азія, частка ринку якої вже у найближчі роки стане найбільшою з усіх. Тільки в Китаї, відомому своїм прагненням до скорочення шкідливих викидів, до кінця 2024 року ринок світлодіодів сягне позначки 24 млрд. доларів. Центральним сегментом продажів є

промислові світлодіодні світильники завдяки зниженню фінансових і часових витрат на обслуговування освітлення.

Що стосується ринку України: в 2009-2014 рр. була проведена Державна програма із впровадження світлодіодного освітлення в Україні, завдяки якій було зекономлено 80,6 млн. кВт-год. електроенергії або 180 млн. грн. З кожним роком кількість світлодіодних світильників в Україні збільшується. У 2019 році в Києві проведена заміна старих ртутних ламп у 20 тисячах ліхтарів на нові світлодіодні світильники. Згідно профільної київської програми до 2022 року передбачена заміна всіх вуличних світильників столиці. Намагаються не відставати від Києва й інші великі міста України.

Ще один перспективний напрям використання світлодіодів – у виробництві LED та OLED екранів і дисплеїв. Уже на сьогодні реалізовано дійсно унікальні проекти. Наприклад, компанія *Mitsubishi Electric* виготовила найбільший у світі дисплей, ідентичний трьом тенісним кортам, складеним разом. У цьому гігантському екрані застосували технологію *Aurora Vision* – його поверхня складається з кількох мільйонів яскравих світлодіодів. Причому, повторюваний візерунок з точок трьох базових кольорів підібраний таким цікавим чином, що дозволяє отримати максимальне розділення в кольорі з заданою кількістю світлодіодів. Новинка, встановлена на іподромі в Токіо, має висоту 11,2 метра, а глибину – 66,4 метра, тобто площа її становить близько 744 квадратних метрів (рис. 14, а). Коштував такий екран 28 мільйонів доларів, а його замовником виступила Японська Асоціація Верховонів *JRA*. Тепер вболівальники можуть спостерігати за деталями змагань в усій красі та ще й одночасно бачити деталі, відзняті кількома камерами.

У Китаї в Пекіні сконструйований повноколірний світлодіодний екран величезних розмірів. Його запуск був присвячений літній Олімпіаді-2008. Екран вбудований у піддашок над пішохідною зоною і розташований на висоті 24 метрів при вході до мегамоллу міста. Комбінація з п'яти світлодіодних екранів утворює суцільну поверхню розмірами 250×30 м і має площу 7500 м² – справді гігантський світлодіодний екран (рис. 14, б).



а)

б)

Рис. 14. Найбільший світлодіодний дисплей в Токіо (Японія) (а)
та світлодіодний екран у Пекіні (Китай) (б) [39].

Основна увага в цьому сегменті ринку на сьогодні надається поступовому переходу від пасивних екранів LED LCD, коли світлодіодна матриця використовувалася для підсвічування в рідкокристалічних екранах, до активних, коли матриця світлодіодів сама формує зображення (OLED, на реальних квантових крапках).

Відповідно до типу органічних матеріалів, OLED діляться на пристрої з малою молекулою OLED (SMOLED) та органічним полімерним пристроєм OLED (полімер). OLED-дисплеї мають вищу ефективність і легшу вагу, що робить їх порівнянними з продуктивністю РК-екрану. Окрім того, OLED-дисплеї можуть використовуватися як прозорі екрани, зокрема, як віконні екрани та екрани комп'ютера. Ці дисплеї також можуть бути вбудовані в автомобільні вітрові скла для навігації під час водіння [40].

Основними виробниками LED та OLED екранів і дисплеїв сьогодні в світі є *Samsung Electronics* (Південна Корея), *LG* (Південна Корея), *Sony* (Японія), *Philips* (Нідерланди), *Mitsubishi Electric* (Японія). Очікується, що світовий ринок світлодіодних та OLED-дисплеїв досягне 121 мільярда доларів у 2023 році [40]

Висновки

Підсумовуючи, можна констатувати, що сучасний світлодіодний випромінювач, зрештою як і кожне відкриття, пройшов свій історичний унікальний шлях протягом більше ста років від моменту першого спостереження електролюмінесценції до сьогоднішнього його стану. У статті свідомо основну увагу присвячено джерелам спонтанного випромінювання, про лазерні діоди згадується лише трохи. Напівпровідникові лазери теж пройшли свій тернистий шлях до сучасного стану і його опис був би теж не менш об'ємним і цікавим.

Особливе місце в цій роботі займає опис особистості всесвітньо визнаного «батька сучасного світлодіода» Ніка Голоняка. По-перше, це викликано його українським корінням, а по-друге, – на прикладі цього видатного вченого можна прослідкувати, як праця, бажання і розум здатні подолати усі життєві перепони на шляху до мети.

Унікальні характеристики та параметри сучасних світлодіодів, їх переваги над іншими типами випромінювачів, зумовлюють їхнє визначальне місце в найближчій перспективі при створенні освітлювальної та індикаторної техніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Captain H. J. Round [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.electronic-notes.com/articles/history/pioneers/captain-h-j-round.php>
- [2] Round H. J. A Note on Carborundum / H. J. Round // *Electrical World*. – 1907. – V. 49. – P. 309.
- [3] Schubert E. Fred. Light-Emitting Diodes. 3rd Edition / E. Fred Schubert. – New York: Rensselaer Polytechnic Institute Troy, 2018. – 672 p.
- [4] Лосев О. В. Светящийся карборундовый детектор и детектирование с кристаллами / О. В. Лосев // *Телеграфия и телефония без проводов*. – 1927. – № 5 (44). – с. 485-494.
- [5] *Кожневский С. Р., Вечер В. В.* Олег Лосев – пионер твердотельной полупроводниковой электроники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.epos.ua/view.php/pubs_computer_history_Ukraine_losev

- [6] *Lossev O. V.* Oscillating Crystals / O. V. Lossev // *Wireless World and Radio Review*. – 1924. – V. 271. – P. 93-96.
- [7] *Лосев О. В.* Световое реле / О. В. Лосев // Патент № 12191, заявка № 14672 от 28.02.1927, опубл. 31.12.1929 (вып. 3, 1930).
- [8] *Лосев О. В.* Световое реле / О. В. Лосев // Авторс. свид. № 25675, заявка № 84078 от 26.02.1931, опубл. 31.03.1932.
- [9] *Destriau G.* Recherches sur les scintillations des sulfures de zinc aux rayons / G. Destriau // *B: Journal de Chemie Physique*. – 1936. – V. 33. – P. 587–625.
- [10] Professor Kurt Lehovec [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ithistory.org/honor-roll/professor-kurt-lehovec>
- [11] *Lehovec K. et al.* Injected Light Emission of Silicon Carbide Crystals / K. Lehovec, C. A. Accardo, and E. Jamgochian // *The Physical Review*. – 1951. – V. 83, N 3. – P. 603-607.
- [12] *Braunstein R.* Radiative Transitions in Semiconductors / R. Braunstein // *The Physical Review*. – 1955. – V. 99, N 6. – P. 1892-1893.
- [13] *Biard J. R.* GaAs Infrared Source / J. R. Biard, E. L. Bonin, W. N. Carr, G. E. Pittman // *International Electron Devices Meeting, Washington, D.C.* – 1962. – V. 8. – P. 96.
- [14] *Biard J. R.* Semiconductor Radiant Diode / J. R. Biard, G. E. Pittman // *U.S. Patent 3293513* – Issued: Dec. 20th, 1966.
- [15] Ник Холодняк. «Магический прибор» и его изобретатель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.litmir.me/br/?b=649599&p=4>
- [16] *Holonyak N., Jr.; Bevacqua S. F.* Coherent (visible) Light Emission from Ga(As_{1-x}P_x) Junctions / N. Holonyak, S. F. Bevacqua // *Applied Physical Letters*. – 1962. – V. 1, N 4. – P. 82- 83.
- [17] Як творювалися світлодіодні лампи? Трохи фактів (Електронний ресурс). – Режим доступу: <https://milight.com.ua/ua/kak-sozdavalis-svetodiodnye-lampy-nemnogo-faktov/>
- [18] Ник Холодняк: біографія [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.people.su/ua/119416>
- [19] Светодиод. История развития [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.flashled.com.ua/articles/717-led>
- [20] История светодиодов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.tkachestva.ru/svet_hystory.htm
- [21] *Pankove J. I.* Electroluminescence in GaN / J. I. Pankove, E. A. Miller, D. Richman, J. E. Berkeyheiser // *Journal of Luminescence*. – 1971. – Vol. 4, N 1. – P. 63-66.
- [22] *Алфёров Ж. И.* Инжекционные лазеры на основе гетеропереходов в системе AlAs – GaAs с низким порогом генерации при комнатной температуре / Ж. И. Алфёров, В. М. Андреев, Е. Л. Портной, М. К. Трукан // *Физика и техника полупроводников*. – 1969. – Т. 3. – с. 1328-1332.
- [23] *Tang C. W.* Organic electroluminescent diodes / C. W. Tang, S. A. Van Slyke // *Applied Physics Letters*. – 1987. – V. 51, N 12. – P. 913-915.
- [24] *Amano H.* Fabrication and Properties of GaN p-n Junction LED / H. Amano, I. Akasaki // *Mater. Res. Soc. Extended Abstract (EA-21)* – 1990. – p.165-168 (Fall Meeting 1989).
- [25] *Nakamura S.* High-power GaN P-N junction blue-light-emitting diodes / S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 1991. – V. 30, N 12A. – P. L1998-L2001.
- [26] *Stinson J. W.* Variable color light emitting diode / J. W. Stinson // *U. S. Patent US4992704A*. – 1991. – V. 4, N 992. – P. 704.
- [27] *Cho J.* White light emission diodes: History, progress and future / J. Cho, J. H. Park, J. K. Kim, E. F. Schubert // *Laser Photonics Rev.* – 2017. – V.11, N 2. – 1600147.

- [28] *Tabuchi S.* Light emitting semiconductor apparatus / S. Tabuchi // Japanese Utility Model Patent Application Publication No. S50-79379. – 1973.
- [29] *Shimizu Y.* Sheet-like light source / Y. Shimizu // Japanese Patent Application H09-7614. – 1996.
- [30] *Shimizu Y.* Light emitting device having a nitride compound semiconductor and a phosphor containing a garnet fluorescent material / Y. Shimizu, K. Sakano, Y. Noguchi, T. Moriguchi // Japanese priority patent application to U. S. Patent 5, 998, 925. – 1996.
- [31] *Bando K.* Development and Application of High-brightness White LEDs / R. Bando, Y. Noguchi, K. Sakano, Y. Shimizu // Tech. Digest Phosphor Res. Soc. 264th meeting. – 1996. – P. 5-14.
- [32] Нобелевскую премию по физике вручат за светодиоды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lenta.ru/news/2014/10/06/nobel/>
- [33] Цікаві факти про світлодіоди [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://tsikave.ostriv.in.ua/publication/code-6CC6C1BC37F8F/list-15006C12727>
- [34] Создан новый тип наноразмерных светодиодов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://portaltele.com.ua/news/technology/sozdan-novyy-tip-nanorazmernih-svetodiodov.html>
- [35] *Jiun-Haw Lee.* Blue organic light-emitting diodes: current status, challenges, and future outlook / Jiun-Haw Lee, Chia-Hsun Chen, Pei-His Lee, Hung-Yi Lin, Man-Kit Leung, Tien-Lung Chiu, Chi-Feng Lin // Journal of Materials Chemistry C. – 2019. – V. 20. – P. 5874-5888.
- [36] До 2025 року світовий ринок LED-ламп перевищить \$120 млрд. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://enext.ua/uk/press/reviews/k-2025-godu-mirovoy-gynok-led-lamp-prevysit-120-mlrd/>
- [37] The Nichia quality difference [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ledrise.eu/led-strips-modules/our-profesional-led-strips/strip-linearz-led-nichia-2800-4000-lm-m.html>
- [38] Як створювалися світлодіодні лампи? Трохи фактів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://milight.com.ua/ua/kak-sozdavalis-svetodiodnye-lampy-nemnogo-faktov/>
- [39] Історія створення й розвитку світлодіодів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.bio-tec.ch/uk/article/history>
- [40] Очікується, що світовий ринок світлодіодних та OLED-дисплеїв досягне 121 мільярда доларів у 2023 році [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://m.ua.achieva-es.com/news/achieva-18727672.html>

**LIGHT-EMITTING DIODES: CREATION HISTORY, PRESENT AND PROSPECTS
(to the 60th anniversary of the first LED)**

Yu. Korchak, Yu. Furgala, N. Korchak

*Ivan Franko National University of Lviv,
107 Tarnavsky St., UA-79017 Lviv, Ukraine
yuriy.korchak@lnu.edu.ua*

The historical stages of development of LED technology from the moment of the first observation of electroluminescence on Carborundum crystals to the creation of modern LED illuminators and indicators are considered in the work. Special attention is paid to the creator of the first industrial design of a light-emitting diode with radiation in the visible part of the

spectrum, Nick Holonyak (1962), who is of Ukrainian origin, as well as problems in the development of a blue-emitting diode. The creation of such an LED allowed the creation of a white LED in the mid-1990s, which significantly expanded the range of uses of LED devices, in particular, for lighting.

The article describes the main advantages of LED light emitters over other radiation sources, as well as analyzes the current state and the global market of LED technology. Thanks to the characteristics of LED luminaires such as brightness, energy efficiency, long service life, minimal environmental impact, many countries today implement government programs and encourage the gradual replacement of incandescent and fluorescent lamps with LEDs. This is also facilitated by the improvement of technologies for the production of LED lamps, which causes them to become cheaper. Impressive examples of large LED screens created in Japan and China are also given. The LED market is expected to reach \$24 billion by the end of 2024.

Finally, some promising areas of LED development are outlined. The first studies of nanosized LEDs have already been published, which leads to some modification of their properties with greater capabilities. If the lifetime of blue light-emitting organic materials can be sufficiently extended, new developments in the creation of displays based on organic LEDs (OLED) have great prospects. A successful solution to this problem will allow in the future the use of OLED, for example, to create transparent window screens, in particular, in car windshields for navigation while driving.

Key words: electroluminescence, injection, semiconductor LED, organic LED, LED lamp, LED screen.

*Стаття: надійшла до редакції 10.03.2021,
доопрацьована 15.03.2021,
прийнята до друку 18.03.2021*