

ДІОДНІ ВИПРОМІНЮВАЧІ ДЛЯ ІНДИКАТОРНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Ярослав ШОПА

Львівський національний університет імені Івана Франка,
кафедра загальної фізики,
вул. Кирила і Мефодія 8, Львів 79005
e-mail: shopa@franko.lviv.ua

Редакція отримала статтю 12 березня 2013 р.

Висвітлен коротку історію винайдення світлодіодів. Розглянуто основні технології відображення інформації за допомогою напівпровідникових діодних випромінювачів на прикладах індикаторів, кластерів, панелей, матричних екранів.

Ключові слова: світлодіоди, індикатори, матричні екрани.

1. ВСТУП

Явище електролюмінесценції, на якому ґрунтується робота сучасних діодних випромінювачів чи світлодіодів (СД, англійське скорочення LED, Light Emitting Diodes) відоме принаймні від початку 20 ст. [1]. Свічення карбіду кремнію спостерігав 1907 р. Г. Раунд (Henry Joseph Round, рис. 1), який досліджував можливість застосування карбіду кремнію (SiC) у детекторах радіосигналів. Раунд тоді працював асистентом у самого Марконі, тому пошук нових принципів детектування радіосигналів для заміни незручних вакуумних діодів був для нього важливим завданням. Раунд помітив жовте, зелене та оранжеве свічення на катоді під час протікання струму крізь контакт метал–карбід кремнію, про що детально написав у листі до журналу “Electrical World” [2].

Незалежно від Раунда аналогічні експерименти повторив 1923 р. російський інженер О.В. Лосєв, який досліджував контакт із пари карбід кремнію–сталевий провідник і помітив свічення. Його спостереження також були опубліковані [4], але про це явище на кілька десятиліть забули, оскільки не бачили йому практичних застосувань. Домінували лампи розжарення та газорозрядні лампи. Про це відкриття свого співвітчизника нагадав 2007 р. у відомому журналі “Nature Photonics” російський фізик Н. Желудєв [5]. Разом з тим, свою статтю він присвятив 100-річчю оптоелектроніки, яка на його думку започаткована якраз Раундом.

Інжекційна люмінесценція $p-n$ -переходів найефективнішою є у бінарних сполуках типу $A^{III}B^V$. Рекомбінаційне інфрачервоне випромінювання в арсеніді галію (GaAs) спостерігав 1955 р. Браунштайн (R. Braunstein)

PACS number: 01.60.+q



Рис. 1: Генрі Раунд (1871-1966) — один з піонерів радіозв'язку. Сьогодні німецька Вікіпедія вважає його винахідником світлодіодів [3], а випромінювання світла напівпровідниками називає ефектом Раунда.

[6]. Перші СД на основі $\text{Ga}(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)$, які випромінювали видиме світло, виготовила 1962 р. група інженерів компанії General Electric під керівництвом Миколи Голоняка [7, 8]. Пізніше Голоняк згадував, що вже тоді він легко передбачав сфери застосування своїх виробів: світлові табло, семи-сегментні цифрові дисплеї, алфавітно-цифрові індикатори тощо.

Згодом, у 1960-70-х рр., поступово були створені СД від червоного до зеленого кольорів. Найпопулярнішими матеріалами для них стали GaP (червоний, зелений) та GaAsP (жовтий, червоний). Коли Судзі Накамура (Shuji Nakamura) в 1990 р. винайшов дешевий синій СД [9], стало можливим створювати досить ефективні та функціонально зручні світлодіодні схеми з перекриттям усього видимого спектру.

Останнім часом набули поширення органічні світлодіоди (англ. Organic Light Emitting Diode, OLED), які мають активні пари у вигляді тонкого органічного напівпровідника [10]. Електрони та дірки, інжектовані в цю пару, рекомбінують, випромінюючи фотони світла. Органічні СД забезпечують високу яскравість, покривають увесь видимий спектр і є дуже дешевими у виробництві. Такі системи використовувались у телевізійних екранах, комп'ютерних моніторах, малих портативних системах (таких, як мобільні телефони, кишенькові комп'ютери), рекламній та інформаційній індустрії. OLED також можна застосовувати як джерела світла, хоча вони випромінюють менше світла на одиницю площі, ніж тверді неорганічні світлодіоди.

Фізичні принципи роботи СД та хронологію їхнього вивчення й впровадження можна легко відшукати у багатьох джерелах, серед яких найвідомішою зараз є книга Шуберта [1]. Сьогодні СД справді широко застосовують для індикації стану електронних схем, побудови багатоелементних знакових індикаторів в системах відображення цифрової та графічної інформації.

2. СВІТЛОДІОДИ ДЛЯ МОНТАЖУ В ПРИЛАДАХ

Світлодіодні індикатори виготовляють із низки певним чином розташованих окремих напівпровідникових випромінювачів. Подаючи живлення на цевні $p-n$ -переходи індикатора, одержують випромінювання потрібних світлодіодів. Свічення індикатора має вигляд знака чи символу. Для живлення напівпровідникових індикаторів потрібна постійна напруга переважно від 1,6 до 3,5 В. Навіть однакові СД мають деякий розкид параметрів і тому вимагають різних напруг живлення. Якщо увімкнути їх паралельно через один резистор, то один із діодів світитиме яскравіше та споживатиме більший струм, поки не вийде з ладу. Така схема багатократно прискорює природну деградацію напівпровідникового кристала. Якщо СД з'єднувати паралельно, то кожен із них повинен мати свій обмежувальний резистор (рис. 2). Послідовне ж увімкнення гарантує однаковий струм СД, однак розподіл напруги між елементами електричного кола слід акуратно розраховувати.

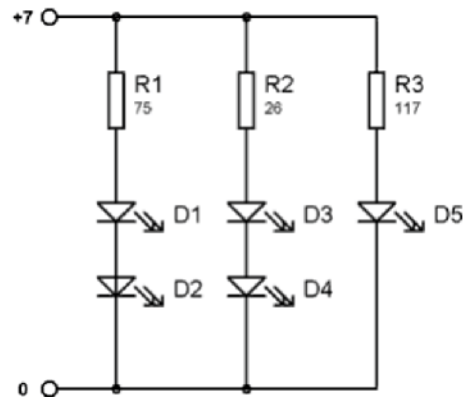


Рис. 2: Схеми паралельного та послідовного увімкнення 5-ти різних СД з джерелом напруги 7 В: 1-й червоний, напруга 3 В, струм 20 мА; 2-й зелений, напруга 2,5 В, струм 20 мА; 3-й синій, напруга 3 В, струм 50 мА; 4-й білий, напруга 2,7 В, струм 50 мА; 5-й жовтий, напруга 3,5 В, струм 30 мА.

Для того, щоб одержати потрібний колір свічення, вибирають СД, які генерують світло певної довжини хвилі, або пропускають його через світлофільтр. Вибір кольорів можна оцінити за даними фірми TOYO Led Electronics LDT [11]. Як бачимо з рис. 3, відомі зараз структури перекривають усю видиму ділянку спектру, що дає змогу будувати багатофункціональні індикатори.

Переваги світлодіодних індикаторів полягають у чіткій формі символів і знаків, малій напрузі живлення, невеликій споживаній потужності. Початково яскравість була недостатньою для спостереження у денному світлі, навіть за умов великого струму. Не одразу СД стали порівняно дешевими. Достатньо згадати, що у 1960-х роках вартість одного СД видимого діапазону свічення перевищувала 100 американських доларів. Тоді їх виготовляли невеликими партіями, майже вручну, з великим коефіцієнтом браку.

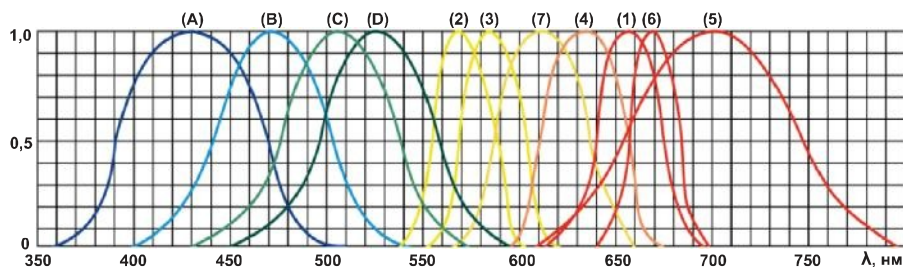


Рис. 3: Відносні інтенсивності випромінювання напівпровідникових світлодіодів у видимому діапазоні: 1 – GaAsP/GaAs, 655 нм у максимумі; 2 – GaP, 568 нм; 3 – GaAsP/GaP, 585 нм; 4 – GaAsP/GaP, 635 нм; 5 – GaP, 700 нм; 6 – GaAlAs/GaAs, 660 нм; 7 – GaAsP/GaP, 610 нм; A – GaN/SiC, 430 нм; B – InGaN/SiC, 470 нм; C – InGaN/SiC, 502 нм; D – InGaAl/SiC, 523 нм.

3. ІНДИКАТОРИ, ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ

Залежно від вимог, можна використовувати різні конструкції індикаторів – від одиничних СД до світлодіодних кластерів і панелей підвищеної яскравості.

Для відтворення мнемонічних символів, букв і цифр використовують цифро-буквені індикатори. Серед них є одиничні, які відображають один символ чи одну цифру. В однорозрядних виводи всіх випромінювачів світла не з'єднані між собою, а виведені з корпусу для приєднання до пристрою керування. Сегментні мають індикатор із кількох випромінювачів, в якому відображення одного знака чи символу забезпечує одне джерело світла.

Газорозрядний індикатор переважно трубка з інертним газом неонем та незначною кількістю ртуті. Між анодом і катодом має бути прикладена напруга від 120 до 180 В, що дуже незручно для сучасних приладів на інтегральних схемах. Однак у 1950-1970-х рр. якраз такі індикатори рис. 4 домінували в техніці. Потім їх поступово замінили вакуумно-люмінесцентними, рідкокристалічними та світлодіодними. Зараз більшість найменувань газорозрядних індикаторів вже не виробляють. Чи так само закінчиться ера світлодіодних індикаторів? На це питання відповіді поки немає. Але сьогодні вони домінують на ринку індикаторної техніки.

Цифровий семисегментний індикатор, що має вісім елементів – сім сегментів для індикації цифри і один – для крапки. Робочий струм може досягати 60 мА на сегмент. Це означає, що густина струму в одному сегменті складає понад 50 А/см^2 . Формально 7-сегментний індикатор може показувати $2^7 = 128$ станів, однак далеко не всі з них використовують. Окрім цифр та коми, інколи на таких індикаторах зображають букви.

Для роботи індикатора передбачено 9 виводів: один спільний до катодів усіх сегментів, а решта 8 – до анода кожного сегмента. Це т. зв. «схема зі спільним катодом», однак виготовляють також індикатори зі спільним анодом. Існують спеціальні мікросхеми семисегментних децифраторів, які переводять чотирибітний код у відповідну комбінацію сигналів на індикаторі.

Значно функціональнішими для відображення інформації є матричні

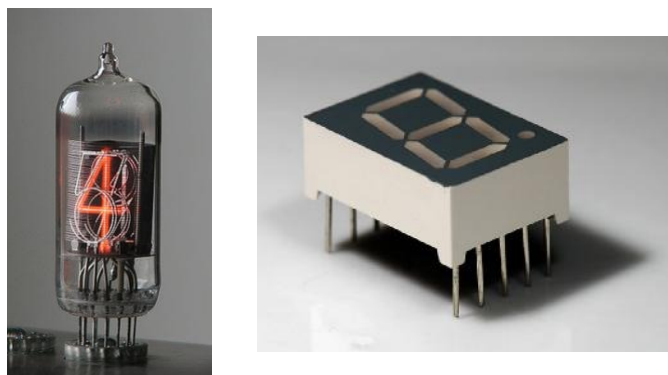


Рис. 4: Два індикатори, що є представниками різних поколінь: неоновий газорозрядний з готовими анодами – ліворуч та семисегментний напівпровідниковий – праворуч.

Індикатори, всередині яких контакти напівпровідникових випромінювачів світла об'єднані певним способом у матрицю. Тоді подаючи живлення на певний рядок і стовпець, ініціюють свічення наперед заданої комірки. Найпоширеніші моделі цих індикаторів мають розділення 5×7 , 5×8 та 8×8 пікселів. Часто з них формують пристрої відображення "біжучий рядок". Є також готові блоки для відображення одного чи кількох рядків символів рис. 5.



Рис. 5: Світлодіодна одноколірна матриця для відображення символічної та псевдографічної інформації.

Найважливішими параметрами матричних індикаторів є кут огляду, кількість кольорів, яскравість, роздільна здатність по горизонталі та вертикалі, контрастність, споживана потужність, час відгуку тощо. На матричні індикатори можна виводити значно більшу кількість символів: цифри, букви усіх алфавітів (залежно від розділення), розділові знаки, псевдографічні елементи, прості рисунки, навіть ієрогліфи. Більш звичною порівняно із сегментними індикаторами є також форма символу, що важливо переважно для букв.

4. КЛАСТЕРИ ТА МАТРИЧНІ ЕКРАНИ

У середині 1990-х р. винайшли зелені СД з достатньою яскравістю і чистотою кольору, тоді й почали впроваджувати світлодіодні кластери. Вони різняться кількістю СД, геометричними розмірами, кольором свічення, яскравістю, напругою живлення, керуванням. Використовують кілька типів кластерів, які можуть складатися лише із СД, або містити разом із СД також електронні схеми керування.

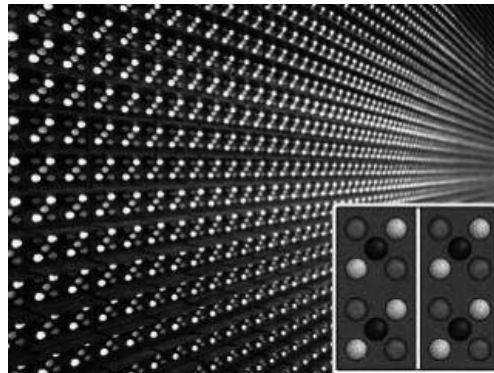


Рис. 6: Світлодіодний екран з пікселями, які є кластерами з будовою 2R2G1B: по два червоних і зелених утворюють квадрат, один синій у центрі.

Одноколірні кластери бувають червоного, синього, зеленого, жовтого, білого кольорів. Значного поширення набули двоколірні (наприклад, червоний плюс зелений) і багатоколірні (наприклад, RGB). Розміри кластера переважно залежать від кількості СД та площі поверхні (рис. 6). Схема керування займає незначний об'єм, але найсуттєвішою проблемою великих екранів є значна споживана потужність. Наприклад, 2RGB чи RGB піксель споживає 0,3 Вт; тоді 1 кв. м екрана з популярним кроком між пікселями 19 мм потребує 830 Вт на шіку білого кольору, а весь екран з невеликим розділенням 320×240 пікселів і розміром 6×4 м (площа 24 кв.м) споживає потужність 20 кВт.

Світлодіодні кластери використовують в електронних табло, зовнішній рекламі, декоративній підсвітці інтер'єру чи архітектури. Одне із характерних застосувань кластерів великого розміру – світлофори та інші пристрої керування дорожнім рухом. Вони дають змогу змінювати інформацію залежно від часу доби та погоди, їх добре видно за умов яскравого денного світла, вночі та під час туману.

5. ТЕХНІЧНІ ТА ФІЗІОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ВЕЛИКИХ ЕКРАНІВ

Сучасні великі світлодіодні екрани – це електронні системи, які за складністю можна порівняти із великими інтегральними схемами, але значні геометричні розміри, маса та електрична потужність додають нових суттєвих ознак, що притаманні лише цим пристроям.

Зрозуміло, що спочатку зображення для великих екранів формують на комп'ютері, тому його якість відповідає можливостям відеосистем комп'ютера. Зображення на світлодіодному екрані має точно відтворювати вихідне зображення. Стандартним є 24-бітний колір кодування (TrueColor), коли значення яскравості кожного каналу подають у вигляді 8-ми бітного числа. Отже, ідеальний екран високої якості має передавати 2^{24} кольорів, тобто майже 17 мільйонів.

У приміщеннях переважно використовують скрани з мінімальною яскравістю 600 кандел на квадратний метр (кд/кв.м). Цього цілком достатньо для більшості приміщень, однак в умовах високої яскравості освітлення (демонстрація моделей одягу, автосалони) може знадобитися вища (до 2000 кд/кв.м) яскравість. Екрани ж із яскравістю до 5000 кд/кв.м можна використовувати поза приміщеннями навіть з прямими сонячними променями.

Інтенсивність випромінювання СД лінійно залежить від струму, який у ньому протікає. Але такий спосіб модуляції неприйнятний для великих екранів, оскільки вимагає складних електронних схем керування й, окрім того, від струму залежать спектри випромінювання СД. Тому зображення на світлодіодному екрані генерується переважно за допомогою методу широтно-імпульсної модуляції (ШІМ — англ. PWM). Це процес керування шириною (тривалістю) високочастотних імпульсів згідно із заданим низькочастотним модулюючим сигналом (відеосигналом). Наприклад, для досягнення 50 % яскравості СД струм має тривати тільки половину періоду повторення імпульсів, а щоб досягти 25 % яскравості струм вмикають тільки на одну чверть періоду (тривалості циклу ШІМ).

Чим більше логічних рівнів підтримуються ШІМ на екрані, тим вища якість зображення. Такий спосіб дає змогу встановлювати лінійну залежність між поточним (середнім значенням) і логічним рівнем яскравості. ШІМ з N рівнями гарантує, що реальна яскравість СД для всіх цих рівнів буде змінюватися лінійно. Іншими словами, яскравість світлодіода з ШІМ на рівні 1 буде точно в два рази меншою, ніж на рівні 2 і в 256 разів меншою, ніж на рівні $2^8 = 256$.

Згідно із методом ШІМ, якщо частота оновлення світлодіодного екрана дорівнює 100 Гц, то для забезпечення максимальної яскравості (100 %) струм має протікати упродовж усього періоду оновлення, тобто $1/100$ с = 10 мс. Щоб зменшити яскравість у два рази, цей час має бути зменшеним до 5 мс, а на решту 5 мс СД слід вимкнути. Потім цикл повторюється за таким же правилом. Для досягнення тільки 1 % рівня яскравості СД вмикається на 0,1 мс і вимикається на решту 9,9 мс.

Однак добре відомо, що людське око сприймає яскравість нелінійно. Згідно із емпіричним законом Вебера-Фехнера фізіологічне відчуття людиною яскравості джерела світла пропорційне до логарифма інтенсивності світла [12]. Це означає, що за малої інтенсивності світла око помітить навіть незначні зміни в яскравості, тоді як за умов високої інтенсивності такі ж зміни яскравості залишаться непоміченими. Отже, часто високий динамічний діапазон екранів є надлишковим.

Великі світлодіодні скрани, окрім того, переважно побудовано так, щоб запобігти протіканню струму усіма СД одночасно. Вони розділені на групи (зазвичай два, чотири або вісім), які працюють незалежно. Цей метод дає змогу зробити такі відеоекрани дешевішими за рахунок зменшення кількості схем керування (два, чотири або вісім разів, відповідно) та ефективніше

відводити тепло від електронних схем, які комутують великі струми.

Якщо, наприклад, екран має дві світлодіодні групи, то, використовуючи метод поділу часу, струм подають лише до однієї групи, інша група у той момент вимкнена. Після одного періоду оновлення зображення друга група ввімкнена у той час як перша гасне. Разом з тим, це означає, що частота оновлення усієї інформації на екрані стає у два рази меншою.

Ще однією проблемою є ефект мерехтіння зображення, який непомітний тільки за умови, що частота оновлення достатньо висока. Тоді окремі спалахи світла на екрані "згладжуються" в нашому мозку. Згідно із законом Блоха [13] час згладжування триває близько 10 мс, але також залежить й від яскравості світлових спалахів. Якщо екран мерехтить з достатньо високою частотою, людське око не помічає пульсацій яскравості. Порогова частота залежить від низки факторів, наприклад, спектру джерела світла, розташування джерела світла відносно ока, рівня яскравості. Однак у більшості випадків ця частота не перевищує 100 Гц.



Рис. 7: Світлодіодний дисплей довжиною 460 м над Fremont Str. у Лас Вегасі.

Оскільки великий світлодіодний екран має багато електронних компонентів з цифровим керуванням, то частина споживаної ним електричної

енергії випромінюється у вигляді електромагнітного випромінювання, яке може спричинити електромагнітні завади. Це також слід враховувати під час роботи з такими системами.

Вважають, що найбільший світлодіодний телевизор у світі сьогодні розташований на Cowboys Stadium Texas, він має розміри 49×22 м, що відповідає площі приблизно 1070 кв.м. Значно більші розміри має світлодіодний дисплей у вигляді арки над вулицею Фрімонт (англ. Fremont Street) у Лас Вегасі (рис. 7), який складено із більше як 12 млн. СД, а керування ними забезпечує 10 комп'ютерів. Однак, цей дисплей не призначений для відтворення телевізійних зображень.

ВИСНОВКИ

Побудова індикаторів, табло, екранів на основі СД передбачає розв'язання низки наукових, технічних, фізіологічних проблем. Їхнє вдосконалення триває в напрямку пошуку нових матеріалів та електричних схем керування, зменшення споживаної потужності, поліпшення роздільної здатності, функціональності у застосуванні та чіткості зображень. Зменшення вартості виробів на основі СД сприяє їхньому широкому впровадженню у побутову техніку. Вважають, що недовзі традиційні сьогодні рідкокристалічні панелі будуть витіснені світлодіодними. На черзі нові принципи використання СД, наприклад, технології Li-Wi пavidка (до 10 ГБ/с) і дешева бездротова система комунікації, що є оптичною версією Wi-Fi.

Література

- [1] Шуберт Ф. Светодиоды. Пер. с англ. под ред. А. Юновича. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008. 496 с.
- [2] Round H.J. A note on carborundum. Electrical World. 1907. **49**. 309.
- [3] http://de.wikipedia.org/wiki/Henry_Joseph_Round
- [4] Лосев О. Действие контактных детекторов: влияние температуры на генерирующий контакт. Телеграфия и телефония без проводов. 1923. № 18. 45-62.
- [5] Zheludev N. The life and times of the LED – a 100-year history. Nature Photonics. 2007. **1**. 189-192.
- [6] Braunstein R. Radiative transitions in semiconductors. Phys. Rev. 1955. **99**. 1892-1893.
- [7] Holonyak Nick, Bevacqua S. F. Coherent (visible) light emission from Ga(As_{1-x}P_x) junctions. Applied Physics Letters. 1962. **1**, Nr. 4. 82-83.
- [8] Holonyak Jr. N. Active region in visible-light diode laser. Electronics. 1963. **36**. 35.
- [9] Nakamura S., Mukai T. and Senoh M. Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-Light-Emitting-Diodes. Appl. Phys. Lett. 1994. **64**. 1687-1689.

- [10] Mertens R. The OLED Handbook: A Guide to OLED Technology, Industry & Market. OLED-Info. 2011. 107 P.
- [11] <http://www.toyo-led.com>
- [12] Большая советская энциклопедия: В 30 т. М.: "Советская энциклопедия". 1969-1978.
- [13] Большой психологический словарь. Под ред. Б. Г. Мещерякова, В. П. Зинченко. СПб.: Прайм-Еврознак; М.: ОЛМА-ПРЕСС. 2004. 666 с.

DIODE EMITTERS FOR INDICATOR AND INFORMATION SYSTEMS

Yaroslav SHOPA

Ivan Franko National University of Lviv,
Chair of General Physics
8 Kyryla i Mefodija Str., Lviv UA-79005, Ukraine
e-mail: shopa@franko.lviv.ua

A brief history of the invention of LEDs is described. The basic technologies of displaying the information using semiconductor diode emitters on the examples of indicators, clusters, panels, dot matrix displays are considered.

Keywords: LED, indicators, matrix screens