

МИКОЛА ГОЛОНЯК І ДВ-ТЕХНОЛОГІЇ

Ярослав ДОВГІЙ

Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Кирила і Мефодія 8, Львів 79005
e-mail: dovgy@physics.lnu.edu.ua

Редакція отримала статтю 12 березня 2013 р.

Діодні випромінювачі (ДВ) — це нові джерела світла, створення яких спричинило революцію у світлотехніці. Американський фізик українського походження Микола Голоняк 50 років тому (1962) був одним з перших, хто започаткував ДВ-технології. У даній статті висвітлено основні етапи творчої біографії проф. М. М. Голоняка і показано його вплив на розвиток напівпровідникової електроніки наших днів.

Діодні випромінювачі (ДВ) — когерентні (лазерні діоди — L-діоди) і некогерентні (світлодіоди — S-діоди) — це новий клас джерел світла, що характеризуються очевидними перевагами над звичними випромінювачами: високий коефіцієнт перетворення електричного струму у світлове випромінювання, малі розміри, великий ресурс тощо.

L-діоди застосовують у лазерних принтерах, CD та DVD системах, як лазерні указки, пристрої для лазерних шоу і т.п. Їх використовують як джерела збудження інших твердотільних лазерів, зокрема волоконних лазерів. У результаті ними створено компактні і високопотужні (до десятків кіловат) лазерні пристрої з к.к.д. до 70%. Такі комплекси успішно застосовують у машинобудуванні. Наприклад, на автомобільних заводах фірми “Фольксваген” функціонують понад 500 зварювальних лазерних комплексів цього типу. До речі, дослідження з лазерного зварювання та лазерного оброблення твердих і надтвердих матеріалів було розпочато в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона ще з 1965 року. Лазерне зварювання має низку суттєвих переваг: вищу точність, рівність та чистоту зварних швів, відсутність великих зон прогріву, а звідси й деформацій. Аналогічні лазерні зварювальні установки застосовують і в авіаційній промисловості. Ця технологія виявилася ефективною також для виготовлення “композитних” матеріалів.

S-діоди найчастіше застосовують у пристроях оптичної індикації та в інтегральних оптико-електронних схемах. Підсвітка рідких кристалів здійснюється світлодіодами. У найближчій перспективі ці джерела світла стануть звичними у світлофорах, освітлювальних системах, у керованих багатощільових світлопроміньовальних пристроях для сільського господарства, лісівництва, фотополімерної поліграфії тощо. Відомо, що в Україні

технопарк на базі Інституту фізики напівпровідників НАН України також працює над подібним проектом. Ці мініатюрні випромінювачі мають перспективу і для метрології як тестові джерела випромінювання видимого діапазону.

Державна цільова науково-технічна програма “Розробка і впровадження енергозберігаючих світлодіодних джерел світла та освітлювальних систем на їх основі” була затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 9 липня 2008 р. зі змінами, затвердженими 21 грудня 2011 р.

Якщо пріоритет відкриття діодних випромінювачів (цілком випадкового відкриття) належить Олегу Лосеву (1922), то у розробленні сучасної технології світлодіодів та лазерних діодних випромінювачів вирішальна роль належить Миколі Голоняку.

Пропонована стаття присвячена 85-річчю від дня народження цього видатного американського фізика українського походження. Його батьки із Закарпаття. У листі від 27 серпня 1997 р. він про себе писав мені таке: “Я, звичайно, вважаю себе американцем Карпаторусинського походження”.



Студент Микола Голоняк (1950)

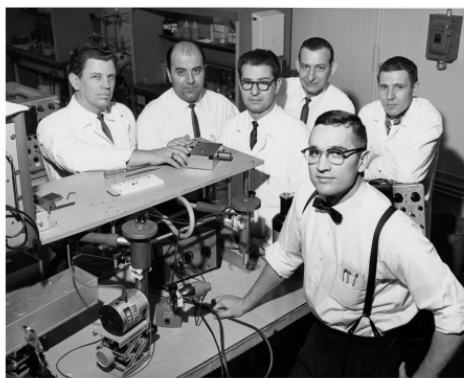
Микола Голоняк (Nick Holoniyak) був винахідником і розробником першого промислового світлодіода і лазерного діода (1962) на основі матеріалу $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ [1]. Він був серед перших розробників лазерів на гетеропереходах, що випромінюють у видимій області спектра. З його іменем пов'язане виникнення нового напрямку сучасної світлотехніки – розроблення технології та дослідження основних властивостей діодних випромінювачів, а також інших важливих пристроїв сучасної напівпровідникової електроніки.

Народився М. Голоняк 3 листопада 1928 р. в Зейглері (Zeigler), штат Іллінойс, США. Його батько Микола Голоняк походив з незаможної багатодітної родини. Він прибув до Америки понад сто років тому (1909), залишивши вдома двох братів і сестер. Працював шахтарем. Його старший брат загинув в австро-угорській армії під час Першої світової війни, а молодший згодом переїхав до Америки, де також працював шахтарем на копальнях Південного Іллінойсу. Мати Ганна (дівоче прізвище Росоха) також походила із Закарпаття (із сусіднього села). Вона була сиротою, прибула до Америки 1921 р. разом з молодшим батьковим братом. Тут батьки познайомилися й одружилися.

Син Миколи і Ганни Голоняків був дуже здібний до навчання. Успішно закінчивши школу, він поступив до Іллінойського університету, де здобув звання бакалавра (1950), магістра (1951) і доктора філософії (1954) у галузі електротехніки. По закінченні аспірантури одружився. Дружина – Катерина. Він був студентом і першим аспірантом славного Джона Бардіна, двічі лауреата Нобелівської премії.

В 1955-57 рр. служив в армії у військовій частині, що була дислокована в Японії. Цікавий момент: як вояк тодішньої окупаційної армії в Японії, д-р Микола Голоняк за сприяння Дж. Бардіна зустрівся там і подружився з японськими фізиками Мітіо Хатаяма (Mitio Hatayama) і Макото Кікучі (Makoto Kikuchi), які згодом прославилися як подвижники японського електронного прориву: Хатаяма заснував дослідницьку лабораторію “Sony”, а Кікучі став його наступником. Як згадує проф. Голоняк, він провів там спеціальний семінар з кремнієвих технологій для Кікучі та його колег, заздалегідь попередивши американських адвокатів, що не розголошуватиме низки ноу-хау. Можливо, це стало поштовхом для початку розвитку мікроелектронної технології в Японії (1956-57 рр.), адже корпорація “Sony” і у наш час відома своєю першокласною електронною продукцією. На прохання Кікучі наш герой навіть ухитрився тоді дістати кусочок досконалого монокристала кремнію, присланого швидкою армійською поштою. Вірогідно це міг бути шматок того досконалого кристала Si, що його у Массачусетському технологічному інституті на замовлення декількох фірм виробував Олександр Смакула. До речі, із найдосконалішої кремнієвої технології започатковувалося функціонування відомої “Силіконової долини” (Silicon Valley).

Після служби в армії М. Голоняк працював у лабораторії з досліджень напівпровідників фірми “General Electric”, де започаткував систематичні дослідження напівпровідникових тунельних діодів, заклавши технологічні основи виготовлення р-п-р-пристроїв та методичні основи низькотемпературної тунельної спектроскопії. Ці праці носили піонерський характер, а їх автор був перпопрохідцем у цих надзвичайно перспективних напрямках фізики і техніки напівпровідників.



Проф. М. Голоняк і співробітники лабораторії

В 1960-62 рр. М. Голоняк перший отримав р-п-перехід в системі $\text{Ga}_x\text{As}_{1-x}\text{P}$, так що сконструйовані ним на цій системі в 1962 р. світлодіоди і напівпровідникові лазери видимого діапазону спектра набули комерційної ваги. (Зазначимо, що GaAs -ні інжекційні лазери генерують у ближній ІЧ-області: $\lambda = 0,85$ мкм).

З 1963 р. М. Голоняк став професором Іллінойського університету (факультет електронної і комп'ютерної техніки) та членом Центра передових досліджень цього університету. Разом зі своїми студентами та аспірантами він налагодив виробництво з розплаву напівпровідникових бінарних кристалів групи $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, а також твердих розчинів і по-різному легованих систем на їх основі. Вперше було одержано червоно-оранжево-жовто-зелені діодні випромінювачі (когерентні і некогерентні) на легованих азотом сплавах $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$, $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}_{1-z}\text{As}_z$, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ та $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$, а також на гетеропереходах у різних потрібних і чотириконтинентних системах на основі III-V , таких, наприклад, як $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$, $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}_{1-z}\text{As}_z$.

У 1970-71 рр. в лабораторії М. Голоняка протягом 6 місяців стажувався Жорес Алфьоров. Саме він ініціював у Фізтеху масштабний проект – виготовлення мікроелектронних пристроїв на гетеропереходах (рис.1) [2]. Цей успішний проект завершився тим, що 2000 року акад. Ж. І. Алфьоров став Нобелівським лауреатом.



Між друзями-фізиками немає жодних секретів.
(Акад. Жорес Алфьоров в лабораторії проф. Миколи Голоняка)

Починаючи з 1976 р., дослідження проф. Голоняка стосуються фізики і технології світлодіодних та лазерних випромінювачів на квантових ямах, а також технології інтегральних оптикоелектронних систем. До речі, термін “quantum well laser” вперше ввів у фізику саме проф. М. М. Голоняк.

Розроблені професором Миколою Голоняком надзвичайно тонкі технології виготовлення гетероструктур і надструктур (надграток) знаходили якнайшвидше комерційне (промислове) впровадження, оскільки в цьому були зацікавлені найпотужніші (часто конкуруючі) фірми таких країн як США, Японія та ін. Це особливо стало відчутним тоді, коли в 1978 р. проф. М. Голоняк першим отримав і продемонстрував лазер безсерв-

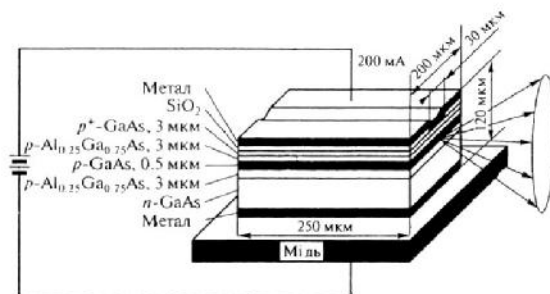
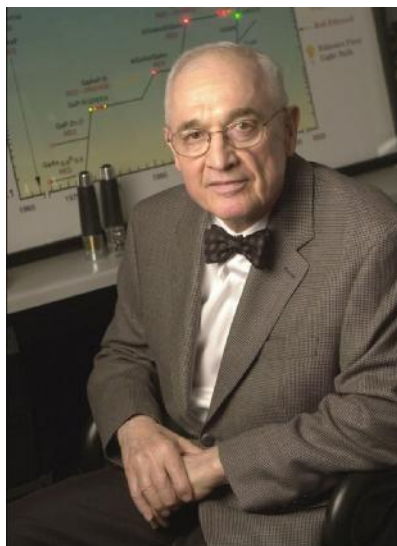


Рис. 1: Схема L-діода з подвійною гетероструктурою

ної дії на “quantum well” при кімнатній температурі. Як ми тепер знаємо, навіть лазерні указки та різноманітні пристрої для лазерних шоу завдячують цьому винаходу. На відзначення цих пріоритетних винаходів 2007 р. в Іллінойському університеті була встановлена пам’ятна таблиця.



Проф. М. Голоняк і пам’ятна таблиця на його честь

Як зазначено вище, ще в 1956-57 рр. д-р М. Голоняк зробив вирішальний внесок у створення кремнієвих р-п-р-п ключів і керованих кремнієвих випрямлячів (тиристорів). Цей напівпровідниковий прилад є сьогодні основою багатьох енергетичних установок. Піонерська робота Миколи Голоняка із співавторами з лабораторії “Белл Телефон”, опублікована 1956 р., зіграла унікальну роль в розвитку силової кремнієвої електроніки і

кремнієвої мікроелектроніки. Створена тоді дифузійна технологія р-п-р-п ключів стала основою розробки 1957 р. у фірмі “Дженерал Електрик” перших силових керованих випрямлячів. Таким чином, професор Микола Голоняк став основним творцем силових кремнієвої електроніки – основи сучасної перетворюючої техніки в енергетиці.

І хоч глибокошановний герой нашої оповіді вирізняється серед академічної еліти надзвичайною скромністю (у листах до мене він волів із замилюванням писати про свого Вчителя Джона Бардіна, про себе ж мінімум тексту), всеж з енциклопедичних видань знаємо, що різні міжнародні визнання, титули та відзнаки не могли оминути його. Ось деякі з них: редактор серії монографічних видань “Solid State Physics Electronics” і член редколегії “Proc. IEEE” (1966-74), член редколегій журналів “Solid State Electronics” (1960-91), “J. Appl. Phys.” (1978-80) та “Appl. Phys. Lett.” (1978-80), член Національної інженерної академії США (1973), Національної академії наук США (1984), почесний член Американської академії мистецтв і науки (1984), почесний член науково-інженерного товариства IEEE (1994), почесний член Американського фізичного товариства та Американського оптичного товариства, іноземний член Національної академії наук України, член редакційної ради “Українського фізичного журналу”. Про нагороди згадаємо дещо пізніше.



М. Голоняк і Дж. Бардін у лабораторії Голоняка. 1973 р.
Проф. М. Голоняк показує вперше створені ним у 1970 р.
червоно-оранжево-жовто-зелені світлодіоди

Новий етап у розвитку світлотехніки, що зумовлений світлодіодною революцією, по-справжньому розпочався недавно, з 1990-х років. Це галузь високих технологій, точніше нанотехнологій.

Суттєвий поступ у світлодіодній технології було здійснено 1991 року в Японії. Річ у тім, що для детальної передачі кольорових відтінків (є така наука – кольорознавство) необхідні три основні кольорні компоненти червона (red), зелена (green) і синя (blue) – т.зв. RGB-компоненти. Перші світлодіоди випромінювали в червоній ділянці спектра. Проф. Голоняк зумів виготовити також світлодіоди в оранжевій, жовтій та зеленій ділянках, а ось синього кольору добитись було неможливо. Для цього необхідно було

виготовити р-п-переходи в пірокозонних напівпровідниках, наприклад, в нітриді галію (GaN). Було з'ясовано, що якщо в 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 (що виражається індексом x). Однак виникла серйозна технологічна проблема щодо створення р-п-переходу. Якщо систему $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ п-типу вдавалося створити, то за жодних технологічних прийомів дістати цей матеріал р-типу ніяк не вдавалося.

І ось восени 1991 р. японський фізик і технолог Судзі Накамура (Shuji Nakamura) опублікував статтю, де повідомлялося про створення надпрецизійної установки для епітаксialного вирощування дуже тонких і досконалих шарів $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ та про освоєння технології отримання р-п-переходів з яскраво синім свіченням. Надтонкі шари $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ по чергово наносили на пластину-підкладку з карбїду кремнію (SiC), створюючи надгратки. А р-тип матеріалу одержували методом електронного опромінення [3]. Цей проект коштував 3 млн. доларів.



Проф. С. Накамура

З 1993 р. японська фірма "Nichia", де працював С. Накамура, розпочала промисловий серійний випуск цих світлодіодів, що яскраво світилися з силою світла 1 кд. Це був справжній прорив у діодній світлотехніці, адже якщо на "синій" чип-світлодіод нанести відповідний люмінофор, то завдяки перетворенню частини світлового потоку у зелено-жовто-червоні тони можна врешті дістати біле світло. А це вже заявка на кардинальні зміни всієї освітлювальної техніки.

Можемо стверджувати, що з початком ХХІ сторіччя розгортається справжня світлодіодна революція.

Світова науково-технологічна еліта належно відзначила першопрохідців цього напрямку. Про Нобелівську премію Жореса Алфьорова вже згадувалося. Микола Голоняк за внесок у царині фізики і технологій світлодіодів видимого діапазону та діодних лазерів нагороджений премією фірми General Electric (1962), відзнаками науково-інженерного товариства IEEE (1973, 1975, 1976, 1981), медаллю John Scott (1975, Філадельфія), медаллю Американського електрофізичного товариства (1983), першою премією фірми Sigma Xi Monie (1988), медаллю Едісона (1989), національною ме-

даллю США у царині науки (1990), відзнакою Американського оптичного товариства (1992), нагородою Національної академії наук США за промислове впровадження наукових здобутків (1993), дипломом Американської асоціації з електроніки з нагоди її 50-річчя (1993, "Американський внесок у майбутнє"), медаллю Американського товариства з інженерної освіти (1993), відзнакою ім. Джона Бардіна (1995), премією Міжнародного комітету "Глобальна енергія" (2003) та ін.



Президент США Джордж Буш і нагороджені професори Микола Голоняк, М. Джордж Крефорд і Рассел Дін Дюпуї

В 1992 р. проф. М. Голоняку присвоєно почесне звання доктора *honoris causa* Фізико-технічного інституту ім. А. Ф. Йоффе (м. С.-Пб, Росія). В 1994 р. він отримав почесне звання доктора техніки Нотр-Дамського університету (США), а в 1995 р. наукову премію Японії.

Кафедра електротехніки, комп'ютерної техніки та фізики в Іллінойському університеті, яка тепер носить ім'я Джона Бардіна і де постійно працює професор Микола Голоняк, починаючи з 1993 р. спонсорується японською корпорацією "Sony".

6 листопада 2003 р. у Білому Домі Президент США Джордж Буш вручив Миколі Голоняку Національну медаль з технологій (National Medal of Technology and Innovation). Тринадцять років тому Голоняк отримав Національну медаль з науки (National Medal of Science) з рук Буша батька. Лише п'ять інших вчених були удостоєні обидвох цих нагород, які є виявом найвищої пошани за визначні досягнення в царині науки і технологій, своєрідними американськими Нобелівськими преміями

А Судзі Накамура у вересні 2006 р. був відзначений відомою премією "Millennium". Цю премію засновано в Фінляндії 2002 року за ініціативою Фінської академії технологій. Її присуджують раз на два роки. Це високопрестижна премія рівня Нобелівської (1 млн. євро). Достатньо сказати, що попереднім лауреатом (2004) був винахідник Інтернету Тім Бернерс-Лі (Tim Berners-Lee).

Описана вище технологія діодних випромінювачів – типовий приклад сучасної нанотехнології. З допомогою складної високовакуумованої і автоматизованої технологічної установки, де комбінується наносення шарів



Національна медаль США з науки

з програмованим електронним опроміненням, надтонкі пари $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ товщиною біля 3 нм наносять по чергово у череміжку з бар'єрними шарами GaN (біля 7 нм) на SiC-підкладку, що структурно близька до GaN. Так нині синтезують надгратки з випромінювальними $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -шарами.



Національна медаль США з технологій та інновацій

Зазначимо, що подібного роду продукти нанотехнологій не мають природних аналогів.

Випромінювальні $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -шари при детальному розгляді виявляю-

ться суттєво неоднорідними, а саме, у площині цих шарів спостерігаються острівкові скупчення In, у результаті чого утворюються квантові точки.

Отже, схематично описані вище гетероструктурні композиції є джерелами рекомбінаційного випромінювання в короткохвильовій ділянці спектра. За даного механізму в системі $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ маємо фантастично високу ефективність перетворення електричної енергії у світлову – біля 50% інтегрально (біле світло) і ще вище для певних спектральних складових.

Література

- [1] *Holonyak N., Bevacqua S.* Coherent (visible) light emission from $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ junctions. *Appl. Phys. Lett.* 1962. **1**. N 4. 82-83.
- [2] *Алферов Ж. И.* Полупроводниковые гетероструктуры (Обзор). *Физика и техника полупроводников.* 1977. **11**. N 11. 2072-2083.
- [3] *Nakamura S., Mukai T., Senoh M.* High-power GaN P-N junction blue-light-emitting diodes. *Jpn. J. Appl. Phys.* 1991. **30**. N 12A. L1998-L2001.

NICK HOLONYAK AND LED TECHNOLOGIES

Yaroslav DOVHYJ

Ivan Franko National University of Lviv,
8 Kyryla i Mefodija Str., Lviv UA-79005, Ukraine
e-mail: dovgy@physics.lnu.edu.ua

Light-emitting diodes (LED) are the new light sources which creation entailed revolution in light engineering. 50 years ago the American physicist of the Ukrainian origin Nick Holonyak (1962) was one of the first who initiated LED Technologies. This article reflects the main stages of the creative life story of prof. N. Holonyak and his influence on the development of the nowadays semiconductor electronics.