

ДВ-революція у світлотехніці

До 50-річчя відкриття ДВ-технологій



Ярослав Довгий
доктор фіз.-мат. наук, заслужений
професор Львівського
національного університету імені
Івана Франка,
голова Фізичної комісії НТШ,
м. Львів

Вступ

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. Їх використовують як джерела збудження інших твердотільних лазерів, зокрема волоконних лазерів. У результаті нині створено компактні і високопотужні лазерні пристрої (до десятків кіловат) 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 істотних 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 багаточільових світлоопромінювальних пристроях для сільського господарства, лісівництва, фотополімерної поліграфії тощо. Відомо, що в Україні технопарк на базі Інституту фізики напівпровідників НАН України також працює над таким проектом. Ці мініатюрні випромінювачі мають перспективу і для метрології як тестові джерела випромінювання видимого діапазону.

Хто мав нагоду виступати або давати інтерв'ю на телебаченні, зауважив, яка духота в кабіні ТБ-диктора від освітлювальних потужних ламп розжарення. Нові ж світлодіодні освітлювачі забезпечують значно комфортніші умови праці. Те саме стосується салонів і кабін авіалайнерів тощо.

S- та L-діоди з погляду фізики твердого тіла

Світлодіод — це напівпровідниковий пристрій, що перетворює електричну енергію в некогерентне випромінювання оптичного діапазону. Активна область такого випромінювача є *p-n*-переходом (рис. 1). Як видно, в *n*- і *p*-областях напівпровідника електрони та дірки вироджені. Якщо ж до *p-n*-переходу прикласти напругу прямого зміщення, то у результаті інжекції неосновних носіїв крізь цей перехід виникатиме випромінювання. Напруга прикладається невисока (близько 2 В) з дотриманням полярності у провідному напрямку. Інжекція неосновних носіїв струму (наприклад, елект-

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.

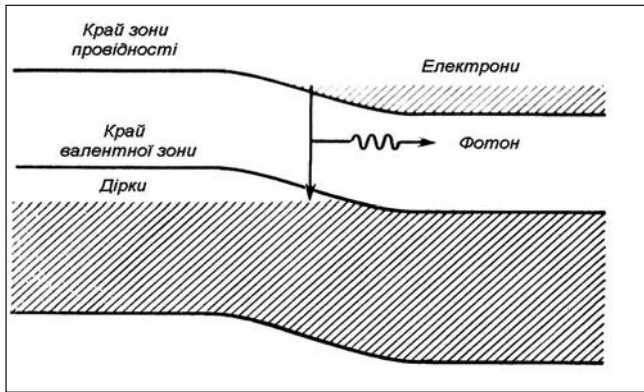


Рис.1. Активна область р-п-переходу

ронів) в активну область призводить до їх рекомбінації з основними носіями (наприклад, дірками), у результаті чого електрична енергія перетворюється у світлову. Це — випромінювальна рекомбінація. Можлива також безвипромінювальна рекомбінація, коли енергія збудження перетворюється в тепло. Що вища випромінювальна рекомбінація, то більша світлова ефективність або світловий к.к.д. S-діода. Це залежить від параметрів базового напівпровідника. Встановлено, що випромінювальна рекомбінація ефективніша у прямозонних напівпровідниках. Іншими словами, у рамках двозонної моделі процес рекомбінації належить розуміти як перехід електрона з енергетичного стану зони провідності у вакантний (незайнятий) стан валентної зони. Це так звана міжзонна рекомбінація. З рис.1 легко зрозуміти, що енергія квантів випромінювання $h\nu \approx E_g$, де E_g — ширина забороненої зони напівпровідника.

Загалом можливі такі випромінювальні переходи збуджених носіїв у напівпровідниках:

- 1) міжзонна рекомбінація;
- 2) випромінювальні переходи із зони провідності на акцепторні рівні;
- 3) випромінювальні переходи з донорних рівнів у валентну зону;
- 4) переходи з донорних локальних рівнів на акцепторні;
- 5) внутрішньозонні переходи, зокрема, явища, зумовлені т.зв. гарячими носіями (гальмівне випромінювання).

Для підсилення світла й одержання лазерної генерації необхідний оптичний резонатор. У L-діодах у ролі дзеркал резонатора слугують відполіровані грані напівпровідника, оскільки відбивна здатність на межі кристал-повітря достатньо висока. Старанно відполіровані грані кристала є плоскпаралельними (резонатор типу Фабрі-Перо) і перпендикулярними до площини р-п-переходу. Вихідне випромінювання, тобто промінь лазерної генерації, поширюється у площині р-п-переходу, як показано на рис. 2.

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*.

Чародій світла:

Микола Голоняк і ДВ-технології

Винахідником першого промислового світлодіода і лазерного діода (1962) на основі матеріалу $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ є *Микола Голоняк* (*Nick Holonyak*), американський фізик українського походження, батьки якого із Закарпаття. (У листі від 27 серпня 1997 р. він про себе писав мені так: "Я, звичайно, вважаю себе американцем Карпаторусинського походження"). Він був серед перших розробників лазерів на гетеро-переходах, що випромінюють у видимій області спектра.

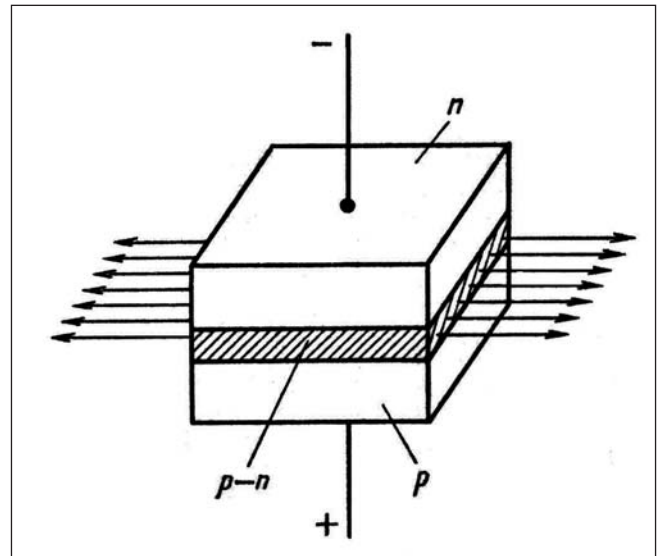


Рис.2. Схема L-діода

З іменем *М. Голоняка* пов'язане виникнення нового напрямку сучасної світлотехніки — розроблення технології та дослідження основних властивостей діодних випромінювачів, а також інших важливих пристроїв сучасної напівпровідникової електроніки.

Микола Голоняк народився 3 листопада 1928 р. в Зейлері (Zeigler), штат Іллінойс, США. Його батько Микола Голоняк походив з неможливої 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 із молодшим батьковим братом. Тут їхні 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. Він був студентом і першим аспірантом славного *Джона Бардіна*, двічі лауреата Нобелівської премії.

Після закінчення аспірантури одружився і одразу ж у 1955-57 роках пішов служити 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 шматочок досконалого монокристала кремнію, присланого швидкою армійською поштою. Вірогідно, це міг бути шматок того досконалого кристала Si, що його у Массачусетському технологічному інс-



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

титуті на замовлення декількох фірм вирощував **Олександр Смакула**. До речі, із найдосконалішої кремнієвої технології започатковувалось 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 *p-n-p-n*-пристроїв та методичні основи низькотемпературної тунельної спектроскопії. Ці праці мали піонерський характер, а їхній автор був першопрохідцем у цих надзвичайно перспективних напрямках фізики і техніки напівпровідників. В 1960-62 рр. **М. Голоняк** перший отримав *p-n*-перехід у системі $Ga_xAs_{1-x}P$, і сконструйованим 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: 0,85 мкм).

З 1963 р. **М. Голоняк** став професором Іллінойського університету (факультет електронної і комп'ютерної техніки) та членом Центру передових досліджень цього університету. Разом зі своїми студентами та аспірантами він налагодив вирощування з розплаву напівпровідникових бінарних кристалів групи АІІВV, а також твердих розчинів і порізнному легованих систем на їх основі. Вперше було одержано червоно-оранжево-жовто-зелені діодні випромінювачі (когерентні і некогерентні) на легованих азотом сплавах $In_{1-x}Ga_xP$, $In_{1-x}Ga_xP_{1-z}As_z$, $Al_xGa_{1-x}As_{1-y}P_y$ та $GaAs_{1-x}P_x$, а також на гетеропереходах у різних потрійних і чотирик компонентних системах на основі АІІВV, таких, наприклад, як $Al_xGa_{1-x}As_{1-y}P_y$ та $In_{1-x}Ga_xP_{1-z}As_z$.

У 1970-71 рр. в лабораторії **М. Голоняка** протягом 6 місяців стажувався **Жорес Алфьоров**. Саме він ініціював у лєнінградському Фізтеху масштабний проект — виготовлення мікроелектронних пристроїв на гетеропереходах (рис. 3). Цей успішний проект завершився тим, що 2000 року академік **Ж.І. Алфьоров** став Нобелівським лауреатом.

Починаючи з 1976 р., дослідження професора **Голоняка** стосуються фізики і технології світлодіодних та лазерних випромінювачів на квантових ямах, а також технології інтегральних оптоелектронних систем. До речі, термін "quantum well laser" вперше ввів у фізику саме професор **Микола Голоняк**. Розроблені ним 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 1978 року професор **М. Голоняк** першим отримав і продемонстрував лазер безперервної дії на "quantum well" при кімнатній температурі. Як ми тепер знаємо, навіть лазерні указки та різноманітні пристрої для лазерних шоу завдячують цьому винаходу.

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



Між друзями-фізиками немає жодних секретів.
Академік **Жорес Алфьоров** у лабораторії професора **Миколи Голоняка**

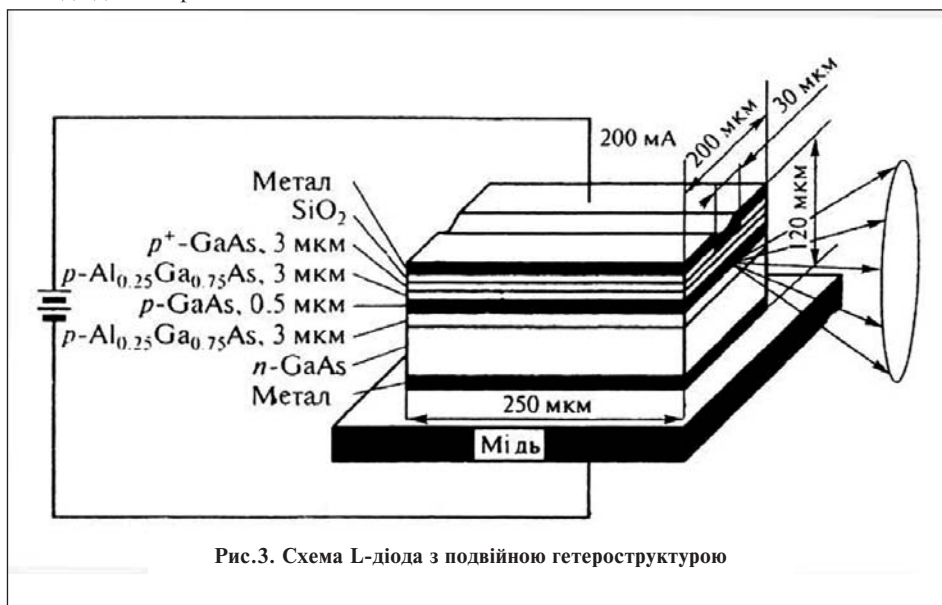


Рис.3. Схема L-діода з подвійною гетероструктурою



Професор С. Накамура

Створена тоді дифузійна технологія *p-n-p-n* ключів стала основою розробки 1957 р. у фірмі "Дженерал Електрик" перших силових керованих випрямлячів. Таким чином, професор **Микола Голоняк** став основним творцем сигової кремнієвої електроніки — основи сучасної перетворюючої техніки в енергетиці.

І хоч глибокошановний герой нашої оповіді вирізняється серед академічної еліти надзвичайною скромністю (у листах він волів із замилюванням писати про свого Вчителя **Джона Бардіна**, про себе ж — мінімум тексту), все ж з енциклопедичних видань знаємо, що різні міжнародні визнання, титули та відзнаки не могли оминати його. Ось деякі з них: редактор серії монографічних видань "*Solid State Physics Electronics*" і член редколегії "*Proc. IEEE*" (1966-74), член редколегії 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.

Новий етап ДВ-технології

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

Істотний 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 *p-n*-переходи в широкозонних напівпровідниках, наприклад, у 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 свідчення від фіо-

летового до зеленого кольорів залежно від вмісту індію (що виражається індексом x). 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 ніяк не вдалося.

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

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.

Дозвольте здивувати вас, шановний читачу, зіставленням параметрів двох типів джерел світла з майже однаковою світловіддачею — ламп розжарення та світлодіодних випромінювачів. Активна випромінювальна область S-діода (область *p-n*-переходу) в 10^5 разів менша від розміру нитки розжарення звичайної (наприклад, 100-ватної) лампочки; якщо паспортний ресурс, тобто тривалість безперервного горіння останньої близько 500 годин, то світлодіод може світити понад 100 тис. годин! Разюча відмінність у к.к.д., спектральному розподілі випромінювання тощо.

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 згадано. **Микола Голоняк** за внесок у галузі 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 медаллю 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 іншими.

В 1992 р. проф. **М. Голоняку** присвоєно почесне звання доктора *honoris causa* Фізико-технічного інституту ім. А.Ф. Йоффе (м. Санкт-Петербург, 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 Іллінському університеті, яка тепер названа ім'ям Джона Бардіна, і де постійно працює професор **Микола Голоняк**, починаючи з 1993 р. спонсорується японською корпорацією "Sony".

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).

Діодні випромінювачі і нанотехнології

Описана вище технологія діодних випромінювачів — типовий приклад сучасної нанотехнології. З допомогою складної високовакуумованої і автоматизованої технологічної установки, де комбінуються нанесення шарів з програмованим електронним опроміненням, надтонкі шари $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ товщиною близько 3 нм наносять по чергово з бар'єрними шарами GaN (близько 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.

Зазначимо, що такі продукти нанотехнологій не мають природних аналогів.

Випромінювальні $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -шари при детальному розгляді виявляються істотно 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 цього механізму в системі $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ маємо фантастично високу ефективність перетворення електричної енергії у світлову — близько 50% інтегрально (біле світло) і ще вище для певних спектральних складових.

Лазери нового покоління

Є одна науково-технічна галузь, де особливо успішно використовуються діодні випромінювачі. Це нове покоління твердотільних лазерів (ТТЛ) з діодним збудженням. Поперечне збудження напівпровідниковими діодними

випромінювачами або т.зв. напівпровідниковими діодними лінійками (рис. 4) на промисловому лазерному ринку за останні роки перевершило 50%. (Можливе також т.зв. позовдженне збудження, але воно складніше в реалізації і застосовується рідше).

Лазерна діодна лінійка — це компактний (шириною близько 10 мм) монолітний потужний випромінювач, виготовлений за технологією інтегральних схем. Вона містить близько 100 однакових лазерних структур. Типові параметри: інтегральна потужність випромінювання понад 100 Вт при струмі біля 100 А, к.к.д. перевищує 50%. Тривалість імпульса $\sim 10^{-4}$ с, частота повторення імпульсів близько 100 Гц.

Для збудження активних елементів залежно від їхньої конфігурації в ТТЛ можуть застосовуватися також двомірні діодні матриці, які можуть містити сотні або тисячі L-діодів.

Застосування монолітних або напівмонолітних конструкцій, що включають в одному елементі активне середовище, оптичний резонатор, а також компакту систему збудження з блоком керування — це явні переваги ТТЛ з діодним збудженням.

У чому переваги ДВ-збудження над ламповим? Відзначимо найголовніші з них.

1) При діодному збудженні к.к.д. на порядок вищий, ніж при збудженні імпульсними лампами. Це зумовлено двома причинами — високим к.к.д. діодних випромінювачів, а також вузьким спектром цих випромінювачів, який можна добре узгодити зі спектром поглинання активного середовища ТТЛ.

2) Завдяки малій інерційності діодних випромінювачів легко забезпечується стабілізація вихідних параметрів лазера та керованість цими параметрами.

3) Великий ресурс роботи (близько 10^5 годин).

4) Відсутність у спектрі випромінювання напівпровідникових діодів УФ-складової дозволяє збільшити термін придатності активних елементів, оскільки такі процеси, як виникнення центрів забарвлення та фотохімічні перетворення стають неактуальними.

5) За умови нині вже розроблених оптимальних інженерних рішень застосування діодного збудження дозволяє досягти значно вищої потужності генерації ТТЛ, ніж це було при ламповому збудженні. Це відкриває нові можливості наукових і технологічних застосувань лазерів нового покоління.

6) Твердотільні лазери з діодним збудженням можуть бути вельми малих розмірів, вони менш критичні щодо температурного режиму роботи.

Замість висновків

При з'ясуванні механізмів рекомбінаційного випромінювання в напівпровідниках ми вище вказали лише на міжзонну рекомбінацію носіїв. Проте дуже важливими є й інші механізми, оскільки легування та породження у міжзонному інтервалі локальних рівнів дозволяє цілеспрямовано впливати на структуру спектра вихідного випромінювання. Ці проблеми є цілком конкретними — підбір складу твердого розчину напівпровідника, вибір легуючих домішок, їх концентрацій, режимів імплантації тощо.

У цій статті немає змоги детально зупинитися на цих проблемах. Але без такої конкретики дослідник не матиме жодних шансів на успіх у цих складних технологіях. Берімо приклад з професорів *М. Голоняка*, *Ж. Алфьорова* та *С. Накамури*: успіх матиме той, хто фахово вникатиме у сутність явищ і в тонкощі технології. Поверховість і верхоглядство — нехай це буде не для нас!

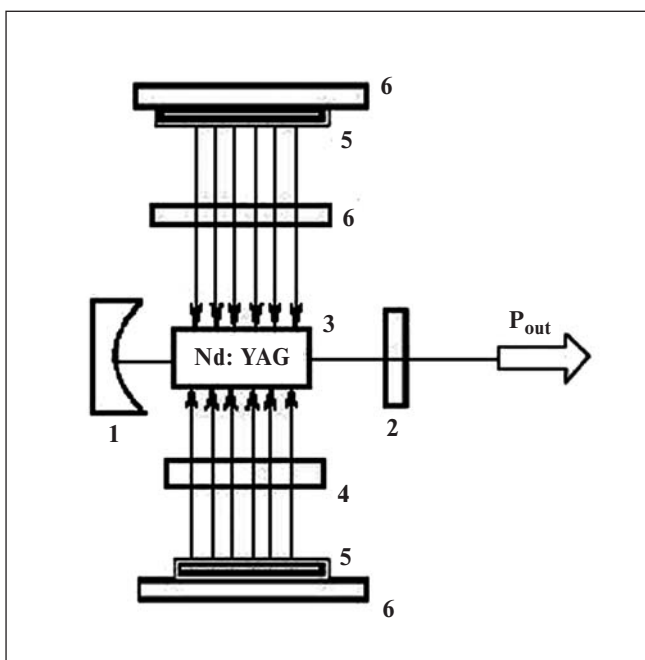


Рис. 4. Схема поперечного ДВ-збудження в неодимовому лазері.
1,2 — дзеркала резонатора; 3 — активний елемент;
4 — циліндрична лінза; 5 — діодна лінійка;
6 — термостабілізатор