

УДК 628.94

В.В. Головенський¹**Д.В. Лісовенко²**, к.т.н., доц.¹ *Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету, Україна*² *Військова академія (м. Одеса), Україна*

РЕТРОСПЕКТИВА, СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ СВІТЛОДІОДНИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ У СВІТЛОСИГНАЛЬНИХ ПРИСТРОЯХ

Розглянуті етапи розвитку технології і конструкцій випромінюючих р-п - і гетероструктур на основі напівпровідникових з'єднань типу $A^{III}B^V$ і $A^{II}B^{VI}$ та їх твердих розчинів для виготовлення світлодіодів з різними довжинами хвиль випромінювання. Приведена динаміка підвищення їх ефективності у порівнянні з лампами розжарювання. Показано, що на сьогодні світлова віддача світлодіодів значно перевищує лампи розжарювання у всіх основних кольорах випромінювання.

Ключові слова: світлодіод, перетворення електричної енергії, прожектор, мембрана.

Найважливішим досягненням людства є розробка приладів, що генерують штучне світло. На сьогодні найбільш поширеними джерелами світла є лампи розжарювання з світловіддачею 8–17 лм/Вт (ККД – 1,1–1,25 %) і терміном служби ~ 1000 годин. Більш краща характеристика газорозрядних ламп, світловіддача яких у 3–6 разів вища, ніж у ламп розжарювання, термін служби у 8–10 разів довший, але ККД знаходиться на рівні 10–12 % [1].

Ще у минулому столітті фізики зрозуміли, що процес перетворення енергії електричного струму у світло, при розжаренні тіла, яке його випромінює, дуже не ефективний. Тому розпочався пошук альтернативних методів перетворення електричної енергії у світло. У 1923 році О.В. Лосевим було винайдено явище люмінесценції кристала карборунда при пропусканні через нього електричного струму [2]. Однак практичне використання цього явища стало можливим лише в 60–70-тих роках минулого століття після виявлення ефективної люмінесценції напівпровідникових з'єднань типу $A^{III}B^V$ – фосфіду і арсеніду галію та їх твердих розчинів. У результаті на їх основі було створено напівпровідникові джерела світла – світлодіоди та інжекційні лазери, які заклали фундамент нової галузі техніки – оптоелектроніки [3].

Світлодіод – це напівпровідниковий прилад з двома контактами, що перетворює енергію електричного струму в світлоу. З фізики напівпровідників відомо, що на межі розділу напівпровідника з дірчастою (р- областю) і електронною (п- областю) провідністю створюється так званий р- п- перехід. При позитивній полярності зовнішнього джерела струму на контакт до р-області (і негативної – на контакт до п-області) потенційний – бар'єр в р-п- переході знижується і електрони з п-області інжектуються в р- область, а дірки з р-області – в п-область. Інжектвані електрони і дірки рекомбінують, передаючи свою енергію квантам світла (випромінювальна рекомбінація), або через дефекти і домішки – тепловим коливанням ґрат (безвипромінювальна рекомбінація). Ймовірність випромінювальної рекомбінації пропорційна концентрації електронно-дірчастих пар, тому разом з підвищенням концентрацій основних носіїв в р- і п-областях бажано зменшувати товщину активної області, в якій відбувається рекомбінація. Але в звичайних р-п переходах ця товщина не може бути менше дифузійної довжини – середньої відстані, на яку дифундують інжектвані носії заряду, поки не рекомбінують.

Перший крок до створення високоефективних світлодіодів, придатних для використання в світлосигнальних приладах і приладах дистанційного керування був зроблений в результаті розробки Ж.І. Алфьоровим із співробітниками концепції багатоперехідних гетероструктур в системі AlGaAs [4, 5]. При цьому товщина активної області рекомбінації може бути значно менше дифузійної

довжини, внутрішній квантовий вихід випромінювання (η_i) теоретично може наближатись до **100 %**. Для практики, однак, важливіший зовнішній квантовий вихід випромінювання – відношення числа випромінюваних у зовнішнє середовище квантів світла до числа електронно-дірчастих пар, що перетинають р-п перехід. Він характеризує перетворення електричної енергії в світлову і, крім внутрішнього квантового виходу, враховує коефіцієнт інжекції пар в активну область і коефіцієнт виведення світла в зовнішнє середовище.

Коефіцієнт корисної дії світловипромінювального приладу обмежується ще й втратами на джоулеве тепло, тому опір всіх областей структури і омичних контактів на выводах має бути малим. Сприйняття ж випромінювання людиною, око якої по-різному сприймає різні ділянки оптичного спектру (відповідно до кривої видимості), висуває свої вимоги до світлових і спектральних характеристик випромінювачів.

Випромінювані світлові кванти мають виходити в зовнішнє середовище в заданому тілесному куті з мінімальним їх поглинанням усередині приладу. Малі розміри напівпровідникових світлодіодів відрізняють їх від ламп розжарювання, в протилежність лампам діод – майже точкове джерело світла з площею кристала $(0,25 \times 0,25) - (0,5 \times 0,5)$ мм.

Кристал покривається опуклим або плоским пластмасовим ковпачком розмірами 3–10 мм. Показник заломлення пластмаси вибирається так, щоб збільшити коефіцієнт виводу випромінювання. Конструкція ковпачка забезпечує фокусування випромінювання в потрібному тілесному кутку 5–45°. Утримувач кристала відводить тепло від активної області.

Працюючи, одиночний світлодіод споживає дуже невелику енергію: при напрузі 2-4 В і струмі 10–30 мА, електрична потужність варіює від 20 до 120 мВт. Для порівняння – мініатюрна лампа розжарювання працює при напрузі близько 12 В і струмі 50-100 мА. Для отримання великих світлових потоків десятки і сотні світлодіодів об'єднують в світлові панелі. Можливість фокусування випромінювання в кожному елементі дозволяє створювати світлові панелі зі спрямованим випромінюванням.

У ході розробок світлодіодів за останні десятиріччя перерахована вище складна комбінація параметрів виконувалася послідовно для світлодіодів різних довжин хвиль, і ось з якими результатами. Червоні діоди на основі твердих розчинів арсенідів, галію-алюмінію AlGaAs досягли зовнішнього квантового виходу випромінювання η_e більше 15 %. Діоди з фосфіду галію GaP, що світяться жовтувато-зеленим кольором, мають $\eta_e \sim 0,1 \%$, але близькість спектру випромінювання до максимуму чутливості ока ($\lambda = 555$ нм) забезпечила їм в 70–90-х роках минулого століття широке застосування. ККД промислових зразків червоних, оранжево-жовтих і жовто-зелених світлодіодів на основі гетероструктур з твердих розчинів $\text{In}_y\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{P}$ були доведені до кінця 90-х років до $\eta_e = 25\text{--}55 \%$ [6].

Ефективні світлодіоди для зеленувато-блакитної, блакитної, синьої та фіолетової частин спектру були створені тільки в 90-і роки. Зробити їх можна на основі напівпровідників з великою шириною забороненої зони: карбіду кремнію SiC, з'єднань групи $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$, нітридів групи $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. У випромінювачів на основі ZnSe ($\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$) великий квантовий вихід, але вони недовговічні і мають великий електричний опір. У карбідо-кремнієвих випромінювачів дуже малий ККД, оскільки SiC – непрямозонний напівпровідник.

Останніми часом стався справжній прорив у розробках блакитних і зелених світлодіодів. В приладах на основі нітрида галію і його твердих розчинів GaN, InGaN, AlGaN зовнішній квантовий вихід збільшений до $\eta_e = 9\text{--}16 \%$ [7-10].

Нітрид галію GaN, представник групи $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ на відміну від кубічних кристалів GaAs, InP, AlAs кристалізується в гексагональних ґратах і має ширину забороненої зони $E_g = 3,5$ еВ. Вирощування монокристалів цього напівпровідника – непросте завдання, оскільки температура плавлення GaN $\sim 2000^\circ\text{C}$, а рівноважний тиск парів азоту має досягати 40 атм.

GaN – прямозонний напівпровідник; нелеговані кристали GaN мають велику концентрацію донорів, що обумовлюють провідність n-типу і концентрацію електронів $n = 10^{18}-10^{19} \text{ см}^{-3}$ [11].

Кристали аналогічних з'єднань – нітридів алюмінію і індію AlN і InN – також гексагональні, що дуже розрізняються постійними ґратами ($a = 3,11, 3,54 \text{ \AA}$ і $c = 4,98, 5,70 \text{ \AA}$); це – прямозонні напівпровідники з $E_g = 6,5$ і $1,8 \text{ eV}$ відповідно. Бінарні з'єднання допускають утворення потрійних твердих розчинів $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$, $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$. У багатьох $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ можна так підібрати параметр x , що енергія E_g відповідатиме фіолетовій, блакитній або зеленій області спектру.

Ще в 70-х роках група Ж. Панкова з лабораторії компанії IBM створила фіолетові та блакитні діоди на основі епітаксialьних плівок GaN. Квантовий вихід був достатній для практики, але термін їх служби був обмежений. В р- області р-п переходу концентрація дірок була мала, і опір діодів виявився дуже великим, вони досить швидко перегрівалися і виходили з ладу.

На початку 80-х років Г.В. Сапарін і М.В. Чукичев у Московському державному університеті ім. М.В.Ломоносова віднайшли, що після дії електронного пучка зразок GaN, легований Zn, локально стає яскравим люмінофором. Були запропоновані пристрої оптичної пам'яті з просторовим дозволом 1–10 мкм. Але причину яскравого світіння – активацію акцепторів Zn під впливом пучка електронів – тоді з'ясувати не вдалося.

Цю причину розкрили І. Акасаки і Х. Аmano з Нагойського університету [12].

Справа виявилася в тому, що домішкові атоми при зростанні кристала реагували з неодмінно присутніми атомами водню, утворювали нейтральний комплекс Zn-H⁺ і припиняли працювати акцепторами. Обробка електронним пучком руйнувала зв'язки Zn-H⁺ і повертала атомам Zn акцепторну роль. Зрозумівши це, японські вчені зробили принциповий крок у створенні р-п переходів з GaN. Для аналогічного акцептора – Mg – було показано, що обробкою скануючим електронним пучком можна р-шар GaN з домішкою Mg зробити яскраво люмінесцуючим, має велику концентрацію дірок, яка необхідна для ефективної інжекції дірок в р-п перехід. Автори заявили патент на ефективне легування GaN р-типу.

У 1989 р. Ш. Накамура (компанія «Нічия Кемікал») почав дослідження плівок нітридів елементів III групи, вирощених методом газової епітаксії з металоорганічних з'єднань. Він пішов далі Акасаки – замінив обробку електронним пучком нагрівом в атмосфері N_2 . Водень взаємодіяв з азотом, утворюючи NH_3 , і не перешкоджав атомам Mg працювати акцепторами. Підібраними режимами легування і термообробки були одержані ефективно інжектуючі шари р- типу з великою концентрацією дірок в GaN- гетероструктурах [13]. У технології були враховані особливості легування домішками Mg і Zn. Були вирощені при порівняно низьких температурах структури $\text{GaN}/\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{N}$, $\text{GaN}/\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$, $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x/\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{N}$ з товщиною активних шарів до 10^2 nm і шорсткістю гетеромеж порядку одного атомного шару. Спочатку були створені світлодіоди з подвійних гетероструктур $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}/\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{N}$ з активним шаром $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}:\text{Zn}$. Максимуми блакитного і зеленого світла з яскравостями 1 і 2 кд доводилися на 460 і 520 нм, а зовнішній квантовий вихід склав 3 і 2 %.

На наступному етапі розробок перейшли до багатошарових гетероструктур $\text{GaN}/\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ з нелегованим активним шаром $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ товщиною до 2–3 нм. Фізичні принципи, раніше використані при створенні приладів на основі $\text{GaAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ і $\text{GaAs}/\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{P}$, послужили основою нових структур.

У надтонких шарах позначаються ефекти розмірного квантування – залежності енергетичного спектру електронів і дірок від товщини шару, коли останню порівняти з довжиною хвилі де Бройля. Таким чином, відкрилася можливість регулювати колір світіння, змінюючи не склад напівпровідника, а товщину потенційної ями, названої в цих умовах квантовою.

Було дуже важливо розробити технологію вирощування нових структур, забезпечуючи на межах мінімальне число дефектів. Допомогло те, що в надтонких шарах невідповідність параметрів ґрат у певних випадках викликає на гетеромежах лише пружну деформацію розтягування або стиснення. А чисто пружна деформація не супроводжується утворенням дислокацій і дефектів – центрів без випромінюваної рекомбінації.

Структура світлодіода з численними квантовими ямами є досить складним «пирогом». На сапфіровій підкладці, після буферного шару AlN (завтовшки 30 нм), вирощується відносно товстий (4 мкм) шар $n\text{-GaN:Si}$. Потім йде активний нелегований шар, що складається з п'яти квантових ям, які чергуються $n\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ (3-4 нм) і бар'єрів GaN (4-5 нм). Ефективна ширина забороненої зони квантових ям $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ відповідає випромінюванню від блакитної до жовтої області (450-580 нм), якщо склад активного шару змінюється в межах $x = 0,2-0,4$; вона залежить і від товщини шару, що формує квантову яму. Розташований вище бар'єрний широкозонний шар $p\text{-Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N:Mg}$ (100 нм) інжектує дірки і погоджує ґрати з ґратами верхнього шару $p\text{-GaN:Mg}$ (0,5 мкм), на який нанесений металевий контакт Ni-Ai. Другий металевий контакт (Ti-AI) нанесений на нижній шар $p\text{-GaN}$ створюється після підбивання частини структури.

У 1999 р. компанії «Нічія Кемікал», «Тойода Госей», «Хьюлетт-паккард», «Крії» випускали по декілька десятків мільйонів блакитних і зелених світлодіодів за місяць. У липні 1999 р. Накамура повідомив, що світлоспроможність цих приладів досягає 60 лм/Вт, а потужність жовтих на основі InGaN – 6 мВт.

Крім світлодіодів, що випромінюють світло видимого діапазону, особливе місце займають світлодіоди інфра-червоного діапазону, у яких зовнішній квантовий вихід досягає 80 %. Такі діоди використовуються для підсвічування об'єктів спостереження для систем нічного бачення, в охоронних пристроях та пультах управління електронними системами.

За останнє десятиліття відбувся якісний стрибок у поліпшенні параметрів напівпровідникових гетероструктур, застосованих для виготовлення світлодіодів. Нове покоління гетероструктур на GaN і твердих розчинах $InGaN$, $AlGaIn$ забезпечили створення ефективних світлодіодів зеленого, блакитного і фіолетового випромінювання. Раніше на основі GaN і твердих розчинів були створені ефективні світлодіоди червоного, оранжевого і жовто-зеленого випромінювання [9, 14, 15]. При цьому світлодіоди, на відміну від ламп розжарювання, випромінюють світло у форматі вузької смуги, ширина якої складає 20-50 нм. Вони займають проміжне становище між лазерами, світло яких монохроматичне, і лампами різних типів, які випромінюють біле світло (суміш випромінювання різних довжин хвиль). Таке «вузькосмугове» випромінювання називають «квазімонохроматичним». Як джерело «кольорового» світла, світлодіоди давно обігнали лампи розжарювання зі світлофільтрами. Так, світлова віддача лампи розжарювання з червоним світлофільтром складає всього 3 лм/Вт, тоді як червоні світлодіоди дають 50-65 лм/Вт. Для жовто-помаранчевих світлодіодів світловіддача перевищує 100 лм/Вт; у синьо-зеленій частині спектру вдалося домогтися світловіддачі 60-80 лм/Вт. Винахід синіх світлодіодів замкнув «RGB-коло» – можливим стало отримання будь-якого кольору простим змішуванням кольорів. При цьому можуть бути використані як окремі світлодіоди різних кольорів, так і трьохкристальні світлодіоди, які об'єднують кристали червоного ($\lambda = 605-650$ нм), синього ($\lambda = 430-480$ нм) і зеленого ($\lambda = 520-550$ нм) випромінювання в одному корпусі [16, 17, 18].

Завдяки сукупності унікальних властивостей світлодіодів, виробництво все нових і нових поколінь світлодіодів з поліпшеними світлотехнічними характеристиками з'явилась можливість їх використання в різних світлосигнальних і навігаційних приладах замість ламп розжарювання.

До 90-х років світлодіоди використовувалися для передачі і візуалізації інформації в світлових індикаторах, табло, приборних панелях автомобілів і літаків, у рекламних екранах. За останнє десятиліття відбулося значне вдосконалення епітаксимальної технології напівпровідникових світлодіодів, тому світловіддача світлодіодів стала більшою, ніж у ламп розжарювання у всіх основних кольорах видимого діапазону. Світлова віддача ламп розжарювання складає всього 10-17 Лм / Вт, тому 100 ватна лампа розжарювання в середньому створює світловий потік в 1400 Лм. Світильники зібрані на світлодіодах з середньою світловіддачею, наприклад 70 Лм / Вт, що створюють світловий потік 1400 Лм, будуть споживати 20 Вт, а світильники зроблені на більш сучасних світлодіодах зі світловою віддачею 140 Лм / Вт будуть споживати всього 10 Вт,

випромінюючи той же світловий потік. Через кілька років буде досягнутий ККД для діодів білого світла, які забезпечать світловий потік – приблизно 350 Лм / Вт, тобто 4 світлодіода замінять по світловому потоку 100 Вт лампочку розжарювання.

У зв'язку з цим можна зробити важливий **висновок** – необхідно розробляти і проектувати світлодіодні світильники. Основні виробники світлодіодних світильників і прожекторів найчастіше використовують потужний багатокристальний світлодіод. Тобто повторюють усі недоліки прожекторів на основі ламп розжарювання з відбивачами. Тобто у такому прожекторі неможливо управляти світловим потоком – індикатрисою випромінювання, також не виключена катастрофічна відмова прожектору при виході з ладу світлодіода. Тому треба звернути увагу на можливість використання у світлодіодних прожекторах оптичного пристрою, що складається з декількох сотень світлодіодів, які розміщуються на гнучкій мембрані. Змінюючи кривизну мембрани з'являється можливість управління світловим потоком [19].

Список використаних джерел

1. Щаренко В.В. *Енергообеспечение в освещении* / В.В. Щаренко, Р.Р. Пилипчук // *Энергообеспечение*. -2000. – №8. – С. 15–22.
2. Лосев О.В. *У истоков полупроводниковой техники: Избранные труды*. – Л., 1972. – 265с.
3. Коган Л.М. *Полупроводниковые светоизлучающие диоды*. – М., 1983 – 317с.
4. *Физика и техника полупроводников* / Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, Д.З. Гарбузов, В.Д. Румянцев – М., 1975. – Т.9, вып. 7. – С. 462 – 468.
5. *Физика и техника полупроводников* / Ж.И. Алфёров, В.Г. Агафонов, Д.З. Гарбузов и др. – М., 1976. – Т. 10, вып. 7. – С. 1497–1506.
6. Коган Л.М. *Полупроводниковые светодиоды: современное состояние*// *Светотехника*, – 2000. – № 6. – С. 11–15.
7. Craford M.G. // *MRS Bulletin*. – 2000. – Vol. 25. №10, – P. 27–31.
8. Берг А., Дин 77. *Светодиоды: Пер. с англ.; Под ред. А.Э. Юновича*. – М., 1979. – 392 с.
9. Алфёров Ж.И. *Физика и техника полупроводников*. – М., 1998. – Т. 32. №1. – С. 3 – 18.
10. Nakamura S., Fasol G. *The blue Laser Diode; GaN based Light Emitters and Lasers-Hei delberg*, 1997. – 224 p.
11. Nakamura S. et al. // *Jap. J. Appl. – Part II*. – 1999. – Vol.38. №7a. – P.3976.
12. Amano H., Kito M, Hiramatsu K, Akasaki I. // *Jap. J. Appl. Phys.* – 989. – Vol.28. №9. – P. 2112–2114.
13. *Group III Nitride Semiconductor Compounds: Physics and Applications* / Ed. B. Gil.-Oxford, 1998. – 256 p.
14. Щаренко В.В., Пилипчук Р.Р. *Энергообеспечение в освещении* // *Энергообеспечение*. - 2000. – №8. – С. 15–22.
15. Craford M.G. *Visible Tight Emitting Diodes: Past, Present and Very Bright Future* // *MRS Bulletin*. – 2000. – Vol. 28. №12. – P. 21–25
16. Юнович А.Э. *Свет из гетеропереходов* // *Природа*. – 2001. – № 6. – С. 38–46.
17. Conway, Kathryn, Zhou, Tutao. *Led Lamp With Reflector and Multicolor Adjuster*// *Pat cut Wo 00/24709*. – 2000. – P 112–227/
18. Абрамов В.С., Агафонов Д.Р., Рыжиков И.В. и др. *Белые светодиоды* // *Светодиоды и лазеры*. – 2003. – В. 1–2. – С.25–29.
19. Лісовенко Д.В. *Світловий прилад (прожектор) дальньої дії спостереження* // *Патент на корисну модель № 41377 Бюл. № 10. 25.05.2009 р.*

Рецензент: М.Ю. Яковлев, д.т.н., с.н.с., Науковий центр Сухопутних військ, національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів

**РЕКТРОСПЕКТИВА, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ
В СВЕТОСИГНАЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ**

В.В. Головенский, Д.В. Лисовенко

Рассмотрены этапы развития технологии и конструкций излучающих p-n - и гетероструктур на основе полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ и их твердых растворов для изготовления светодиодов с различными длинами волн излучения. Приведена динамика повышения их эффективности в сравнении с лампами накаливания. Показано, что на сегодня световая отдача светодиодов значительно превышает лампы накаливания во всех основных цветах излучения.

Ключевые слова: светодиод, преобразования электрической энергии, прожектор, мембрана.

**RECTROSPECTIVE, MODERN STATUS AND PROSPECTS OF USING LED RADIATORS
IN LIGHT-SIGNAL EQUIPMENT**

V. Golovensky, D. Lisovenko

The stages of development of technology and designs of emitting p-n and heterostructures based on semiconductor compounds such as $A^{III}B^V$ and $A^{II}B^{VI}$ and their solid solutions for the manufacture of LEDs with different wavelengths of radiation are considered. Dynamics of increase of their efficiency in comparison with incandescent lamps is given. It is shown that for today light output of light-emitting diodes considerably exceeds incandescent lamps in all basic colors of radiation.

Keywords: LED, convert electrical energy, spotlight, membrane.