

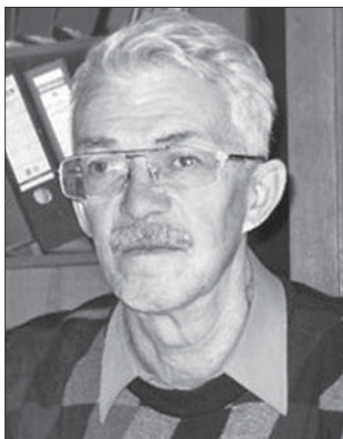
УДК 535.37

ЧАРІВНІ ПОДОРОЖІ В БЛАКИТНЕ СВІТЛО



БЕЛЯЄВ

Олександр Євгенович — член-кореспондент НАН України, в.о. директора Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України



КОЧЕЛАП

Вячеслав Олександрович — член-кореспондент НАН України, завідувач відділу теоретичної фізики Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України

Нобелівську премію з фізики 2014 року було присуджено Ісаму Акасакі (Isamu Akasaki), Хіросі Аmano (Hiroshi Amano) і Сюдзі Накамури (Shuji Nakamura) за розроблення блакитних оптичних діодів, які дозволили впровадити яскраві та енергоощадні джерела світла.

Ключові слова: блакитні оптичні діоди, Нобелівська премія, І. Акасакі, Х. Аmano, С. Накамура.

Fascinated Journeys into Blue Light — саме так назвав свою Нобелівську лекцію один з лауреатів Нобелівської премії 2014 р. з фізики професор Ісаму Акасакі (Isamu Akasaki). Як відомо, у жовтні 2014 р. Нобелівський комітет повідомив, що премію з фізики присуджено японським ученим Ісаму Акасакі (Isamu Akasaki) і Хіросі Аmano (Hiroshi Amano), а також американцю японського походження Сюдзі Накамури (Shuji Nakamura) за розроблення блакитних оптичних діодів, які дозволили впровадити яскраві та енергоощадні джерела світла. У коментарі Нобелівського комітету зазначено: «Світлодіоди червоного і зеленого діапазонів придумали давно, але нам не вистачало синіх діодів. Якщо маємо червоний, зелений і блакитний — отримуємо біле світло, як показав свого часу Ньютон. Тепер, завдяки розробленню блакитного світлодіода, ми одержали біле світло і лампочки, які можна використовувати дуже довго. Ця технологія впливає й на інші технології і поліпшує життя кожного з нас».

Історія цього відкриття зайвий раз засвідчує, як результати фундаментальних досліджень змінюють наше життя на краще. Хоча це потребує часу, іноді досить тривалого. Тому, на наш погляд, цікаво повернутися років на сто назад, у 1907 р., коли Генрі Раунд, асистент нобелівського лауреата 1909 р. Гільєрмо Марконі, вперше спостерігав випромінювання кристала карборунду (карбиду кремнію) при проходженні струму через точковий контакт з металом. Це явище, що виникає в контакті метал — напівпровідник, детально дослідив у 20–30-ті роки минулого століття радянський учений Олег Лосєв, який працював у нижньгородській радіолабораторії. Свій діод Лосєв створив



Ісаму Акасакі (Isamu Akasaki)



Хіросі Аmano (Hiroshi Amano)



Сюдзі Накамура (Shuji Nakamura)

також на основі карборунду і спостерігав слабе блакитне і жовтувато-зелене свічення. Хоча коефіцієнт перетворення електричної енергії на світлову був дуже низький, учений висловив думку про можливість створення на цій основі безінерційного джерела світла та швидкої передачі сигналів на відстані, тобто передбачив народження оптоелектроніки. Втім знадобилося кілька десятиліть для теоретичного обґрунтування явища електролюмінесценції, а саме, випромінювання світла при проходженні електричного струму. Взагалі, є різні механізми електролюмінесценції твердих тіл, однак найефективнішим виявився механізм електронодіркової випромінювальної рекомбінації, який реалізується в напівпровідникових матеріалах. Під час випромінювальної рекомбінації електрон і дірка анігілюють з випромінюванням світлового кванта — фотона з енергією, близькою до ширини забороненої зони в електронному енергетичному спектрі матеріалу. Більшість поширених напівпровідників, наприклад сполуки A_2B_6 та A_3B_5 , мають ширину забороненої зони, що відповідає інфрачервоному, ближньому інфрачервоному та довгохвильовому краю видимого спектрального діапазону. Освоєння синього та ультрафіолетового спектральних діапазонів потребує використання широкоциліндричних напівпровідників, до яких належать нітриди III групи, зокрема такі сполуки, як GaN

та AlGaIn. Останні матеріали і були в центрі уваги нобелівських лауреатів.

Перші пристрої, що випромінювали світло, мали випрямні вольт-амперні характеристики, тобто були діодами. Причина випромінювання світла в них пояснюється утворенням випрямного контакту Шотткі в місці контакту кристала напівпровідника з електродом. При сильному прямому зміщенні переходу в напівпровідник через поверхневий потенційний бар'єр завдяки тунельному ефекту інжектуються неосновні носії заряду, які рекомбінують з основними носіями заряду в напівпровіднику, випромінюючи фотони. На жаль, для досягнення достатнього рівня інжекції в діоді Шотткі необхідно прикладати досить високі напруги (до 100 В). Більш перспективним було використання $p-n$ -переходу. Для того щоб отримати інтенсивне випромінювання світла, необхідно створити умови, за яких виникають потужні зустрічні потоки електронів та дірок. Для цього напівпровідниковий матеріал легують неоднорідно: частину зразка легують донорами, що постачають електрони, другу частину — акцепторами, що захоплюють електрони і створюють дірки в заселеності енергетичних електронних станів. На межі між по-різному легованими зонами утворюється перехідний шар, так званий $p-n$ -перехід. Прикладання відповідної різниці потенціалів до двох легованих зон спричинює

електричний струм, який у кожній із зон забезпечується відповідними носіями, що існують у рівновазі, а в перехідному *p-n*-шарі підтримується нерівноважними електронами і дірками, що інжектуються у цей шар назустріч одні однім. Подальша рекомбінація інжекттованих носіїв породжує інтенсивне спонтанне чи стимульоване випромінювання світла.

Прилади, що використовують зазначені процеси, називають світлодіодами (спонтанне випромінювання) або інжекційними лазерами (стимульоване випромінювання). Такі світлодіоди було створено на основі карбіду кремнію в 60-х роках минулого століття, і хоча ефективність перетворення електричної енергії на світлову була надзвичайно низькою ($\sim 0,005\%$), їх можна вважати праотцями сучасних блакитних світлодіодів. У той самий час було запроваджено технології вирощування напівпровідникових сполук A_3B_5 , що надало революційного поштовху світлодіодній тематиці. Вже в 1962 р. Нік Холоньяк (Nick Holonyak) (працював у компанії General Electric, а потім в Іллінойському університеті) зі співавторами повідомив про спостереження когерентного випромінювання видимого (червоного) світла на *p-n*-переході в кристалі GaAsP. Практично в той самий період група вчених із Bell Laboratories у Мюррей Хілл під керівництвом Ральфа Логана (Ralph Logan) створила яскраві світлодіоди червоного і зеленого кольору на основі GaP. У Фізико-технічному інституті ім. А.Ф. Іоффе (Росія) під керівництвом Жореса Алфьорова було розроблено численні пристрої для швидкісної оптоелектроніки на основі напівпровідникових гетероструктур, у яких вірогідність випромінювальної рекомбінації досягала 99%.

Напівпровідникові світловипромінювальні діоди поступово знаходили різноманітні застосування в повсякденному житті, однак проблема отримання синього кольору залишалася невирішеною майже десятиліття. У 1971 р. Жак Панков (Jacques Isaac Pankove), співробітник RCA (пізніше IBM), провів перші дослідження спостереження випромінювання в синьому діапазоні спектра. Він використовував діод зі структурою метал—діелектрик—напівпровідник на

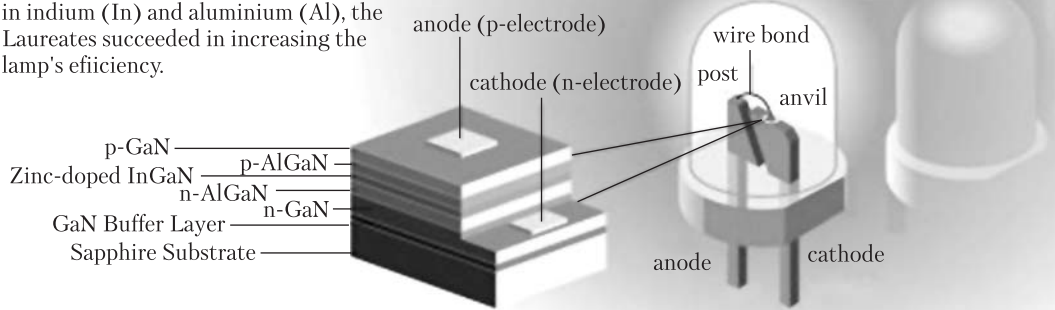


Відтворення експерименту Генрі Раунда 1907 р. На нижній вставці видно слабке випромінювання зеленого кольору

основі GaN. Це були перші світлодіоди з GaN, що випромінювали зелене і блакитне світло. У подальшому заміна домішки цинку на магній дала змогу отримати випромінювання на довжині хвилі 430 нм (фіолетове і синє свічення). На жаль, ефективність перетворення була низькою, і роботи в цьому напрямі в США було припинено. Основними причинами такого рішення стали проблеми, пов'язані з вирощуванням високоякісних плівок нітриду галію і, як тоді вважалося, з принциповою неможливістю одержати *p*-тип провідності в цих матеріалах. З такими висновками не погодилися в Університеті Нагої (Японія). Професор Ісаму Акасакі разом з учнями, серед яких був Хіросі Аmano, вважав правильним вибір матеріалів групи III-нітридів для створення світловипромінювальних діодів синього і ультрафіолетового діапазонів. З часом такої ж думки почав додержуватися і Сюдзі Накамура, співробітник Nichia Chemicals, який до цього сприймав селенід цинку як більш перспективний матеріал.

У 1986 р. Акасакі і Аmano досягли першого успіху — отримали високоякісну плівку нітриду галію. Справа в тому, що структури, які використовують для виготовлення діодів, є багатошаровими епітаксійними плівками, які вирощують на певних підкладках. У цьому разі комерційною підкладкою був сапфір. Параметри ґраток сапфіру і нітриду галію значно різняться, що призводить до виникнення сильних

Blue LED lamp. The light-emitting diode in this lamp consists of different layers of gallium nitride (GaN). By mixing in indium (In) and aluminium (Al), the Laureates succeeded in increasing the lamp's efficiency.



Багатошарова гетероструктура на основі нітридів III групи і схематичний вигляд світлодіода, розробленого Акасакі і Аmano

механічних напружень у процесі вирощування плівок. Якщо досягаються критичні товщини, напруження релаксують через утворення великої кількості дислокацій або тріщин, тобто плівки є структурно недосконалими. Акасакі запропонував використовувати складну підкладку (темплейт). Для цього сапфірову підкладку обробляли за певної температури в парі азоту — процес нітридизації сапфіру. В результаті на поверхні утворювався тонкий шар нітриду алюмінію, після чого вирощували подальші шари нітриду галію.

Над вирішенням другої проблеми, а саме, створенням шару GaN зі стабільним *p*-типом провідності, професори Акасакі і Аmano працювали кілька років. Рішення було знайдено дещо несподівано і в певному сенсі випадково. Вони досліджували діодні структури на сканувальному електронному мікроскопі і спостерігали істотне збільшення світіння діода під дією електронного променя. У подальшому оброблення електронним променем було одним із етапів технологічного маршруту виготовлення світлодіодів, і вже в 1992 р. Акасакі і Аmano презентували свій яскравий синій світлодіод.

Професор Накамура почав розроблення власного синього світлодіода в 1988 р. Два роки потому він також отримав чудові результати у вирощуванні структурно досконалих плівок GaN. Накамура запропонував спочатку вирощувати буферний шар GaN за низької температури, а наступні шари — за високої.

Слід розуміти, що за цими простими словами криється тривала і копітка робота дослідника, якому до того ж вдалося зробити правильні висновки. Накамура пояснив також механізм електронно-променевої обробки для утворення *p*-типу провідності — під дією електронного променя з плівки видаляється водень, який запобігає утворенню стійких акцепторів. Він використав більш простий і дешевий метод, а саме, додаткову термообробку структури.

Упродовж 1990-х років обидві дослідницькі групи успішно працювали над подальшим удосконаленням синіх світлодіодів, намагаючись підвищити їх ефективність і комерційну привабливість. Вони використовували різні сполуки нітриду галію, додаючи алюміній або індій. Структури, що застосовували для створення світлодіодів, ставали дедалі складнішими. Однак, безперечно, своїми відкриттями цього річчя лауреати зробили революцію в галузі технологій освітлення, відкривши можливість створення штучного білого світла.

Як уже зазначалося, отримати біле світло можна, змішуючи три кольори спектра: синій + зелений + червоний. Використання світлодіодів дозволяє зробити це двома способами. Перший полягає у використанні світлодіодів трьох кольорів. Цей метод є найпростішим і досить привабливим, оскільки є можливість, змінюючи інтенсивність кожного кольору, змінювати кольорову температуру, тобто спектр світла, яке сприймається оком, від теплого жовтого

до холодного білого. Цей метод переважно використовують для спеціальних цілей, тому що він потребує досить складного електронного керування приладом. Інший метод — синій світлодіод + люмінофор. Люмінофори — це матеріали, в яких реалізується ефект Стокса, а саме, поглинається короткохвильове світло, а випромінюється довгохвильове. Причому залежно від матеріалу спектр випромінювання може бути досить широким. Ясна річ, що при цьому втрачається ефективність перетворення електричної енергії на світлову, і все ж таки цей метод на сьогодні є найбільш популярним для створення високоефективних світловипромінювальних джерел світла.

Відкриття світлодіодів є четвертою технологією людства у створенні джерел світла — перехід від багать, смолоскипів і свічок до лампи Арганда, від неї до класичної газової лампи і, врешті-решт, до електричного освітлення за допомогою ламп розжарювання. Світлодіодна технологія ще не повністю конкурентоспроможна порівняно з традиційними, проте вона активно розвивається.

Повертаючись до досліджень, відзначених Нобелівською премією, слід зауважити, що широкощілинні сполуки і, зокрема, нітриди III групи на основі GaN та AlGaN є дуже складними матеріалами. Зазвичай вони мають велику кількість дефектів, електрично активних дислокацій тощо. Важливо також, що ці матеріали дуже складно легувати акцепторами, для того щоб отримати діркову провідність. Лауреатам довелося провести дуже значний обсяг досліджень, для того щоб встановити основні закономірності та характеристики матеріалів, знайти шляхи до успішних технологій виготовлення однорідних і гетероструктурованих *p-n*-переходів у них. Вони з'ясували, що для застосування світлодіодів з метою освітлення потрібне випромінювання з довжиною хвилі, дещо більшою ніж та, що відповідає забороненій зоні в матеріалі GaN. Учені застосували особливий тип легування випромінювального шару, який завдяки утворенню донорно-акцепторних комплексів дозволяє скерувати радіаційну рекомбінацію електронів і дірок

через донорно-акцепторне випромінювання. Це допомогло отримати випромінювання з необхідною довжиною хвилі. Однак світловипромінювальні прилади на широкощілинних напівпровідниках працюють за електричних полів та струмів, які є значно більшими за ті, що використовують в аналогічних приладах на основі традиційних A_3B_5 сполук, що зумовлює додаткові фізико-технічні проблеми, пов'язані з тепловідведенням, стійкістю контактів тощо. І цьогорічним нобеліантам великою мірою вдалося подолати ці проблеми.

Наукова спільнота високо оцінила внесок лауреатів Нобелівської премії у розвиток науки, технології та приладобудування. Водночас слід підкреслити, що, як це зазвичай характерно для важливих наукових напрямів, над проблемою матеріалів на основі нітридів III групи, і зокрема над проблемою світлодіодів на їх основі, працювали багато інших лабораторій і дослідницьких груп по всьому світу. Їхні результати також вплинули на розвиток цієї галузі науки і технології. Не залишилися осторонь і науковці України. Доречно згадати, що взагалі перше спостереження та інтерпретацію явищ, що виникають на межі між електронним і дірковим матеріалами, тобто на *p-n*-переході, в 1941 р. здійснив академік Вадим Євгенович Лашкар'єв [1]. Нітриди III групи та споріднені гетероструктури активно досліджувалися в таких академічних установах, як Інститут фізики (ІФ) та Інститут фізики напівпровідників (ІФН). Уперше теплові властивості цих матеріалів, зокрема теплоємність і теплопровідність, було вивчено професором Борисом Олександровичем Данільченком (ІФ НАН України) [2, 3]. Теплові процеси у світлодіодах досліджував член-кореспондент НАН України Павло Феофанович Олексенко (ІФН НАН України) [4, 5] (до речі, ці роботи виконувалися у співавторстві з майбутнім нобелівським лауреатом професором С. Накамуруою). Співробітники ІФН НАН України дослідили вплив розігріву носіїв і ґратки в AlGaN/GaN гетероструктурах за великих напруг і струмів [6, 7]. Було проведено великий цикл робіт зі структурних досліджень

AlGaIn/GaN матеріалів, розроблено контакти до структур і приладів на основі нітридів III групи, що витримують струми з великою густиною [8], запропоновано нові пристрої для підсилення інжекції дірок у матеріалах AlGaIn/GaN [9–11], що дали змогу збільшити ефективність перетворення електричної енергії на блакитне випромінювання. Ці та інші наукові й технологічні здобутки, а також накопичений досвід дозволили започаткувати в Україні Державну цільову науково-технічну програму з розроблення і впровадження енергоощадних світлодіодних джерел світла та освітлювальних систем на їх основі.

У чому ж полягає революційне значення робіт лауреатів Нобелівської премії? У тому, що вони відкрили людству шлях до реальної економії зовсім не безмежних енергетичних запасів нашої планети. А як відгукнулася Україна на ці досягнення? Серед усіх європейських країн економіка України є найбільш енерговитратною. З огляду на перспективи зближення з Європейським Союзом і неминуче зростання світових цін на електроенергію, розроблення і впровадження енергоощадних технологій стає особливо актуальним, оскільки дозволяє підвищити конкурентоспроможність як окремих видів вітчизняної продукції, так і економіки нашої країни в цілому. Споживання електроенергії на освітлення в Україні є вкрай неефективним, недостатньо ще використовуються енергоекономічні джерела світла. Через відсутність чіткої державної політики в галузі освітлення український ринок наповнюється енерговитратною неякісною продукцією. Досвід європейських країн, США, Китаю свідчить, що для максимального підвищення ефективності розвитку енергоощадного освітлення необхідне активне втручання держави.

На жаль, Україна сьогодні не має цільової державної програми з енергоощадного освітлення. Згадана вище Програма була розрахована на період 2009–2013 рр., основним результатом її виконання стало комплексне впровадження світлодіодного освітлення на автомобільних дорогах України, транспорті, об'єктах бюджетної сфери та житлово-комунального комплексу

з реальною економією близько 40 млн кВт·год електроенергії. Проте в березні 2014 р. постановою Уряду її дію було призупинено, що унеможливило виконання у 2014–2015 рр. запланованих важливих заходів цієї Програми з упровадження комплексних систем освітлення на значущих соціальних об'єктах. Разом з тим, реалізація завдань і заходів Програми вже істотно вплинула на соціально-економічний розвиток країни і допомогла у вирішенні проблеми економії електроенергії, яка витрачається на освітлення, створенні нових робочих місць, відродженні в Україні світлотехнічної галузі промисловості, сприяла збільшенню надходжень до бюджету за рахунок постійного нарощування виробництва світлодіодної освітлювальної продукції, поліпшенню екологічного стану навколишнього середовища завдяки зменшенню викидів в атмосферу шкідливих речовин та виключення з використання освітлювальних приладів, які містять ртуть.

На превеликий жаль, у завданнях і заходах діючої нині Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010–2015 рр. жодного пункту не присвячено впровадженню сучасних освітлювальних систем. Досвід розвинених країн світу в організації ринку систем освітлення переконливо свідчить про необхідність якнайшвидшого переходу до використання енергоощадної освітлювальної техніки, враховуючи, що понад 20 % світової електроенергії витрачається саме на освітлення. Як правило, держави заохочують такий перехід за допомогою фінансових та організаційних заходів.

З огляду на потенційні можливості наявних вітчизняних виробництв та необхідність завершення запланованих розробок, Національна академія наук України пропонує продовжити виконання завдань і заходів цієї дуже важливої для держави Програми, а враховуючи, що вартість світлодіодних освітлювальних приладів ще досить висока (хоча і зменшується з кожним роком), пропонується внести до програми

окреме завдання з розроблення, організації виробництва та запровадження, як перехідного етапу до світлодіодного освітлення, більш дешевих і високоекономічних безелектродних індукційних ламп для освітлення вулиць, прибудинкових територій, промислових об'єктів тощо. При цьому слід передбачити залучення

інвестиційних коштів з реалізацією ряду ефективних механізмів їх повернення, в тому числі з використанням інвестиційних тарифів, фінансового лізингу, енергосервісного контракту, державних гарантій тощо. Хотілося б вірити, що досвід і напрацювання українських учених все ж принесуть користь державі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Лашкарев В.Е.* Исследование запорного слоя методом термозонда // Изв. АН СРСР, сер. Физика. — 1941. — Т. 5, № 4–5. — С. 442–456.
2. *Jezowski A., Danilchenko B., Bockowski M. et al.* Thermal conductivity of GaN crystals in 4.2–300 K range // Solid State Commun. — 2003. — V. 128, N 2. — P. 69–73.
3. *Danilchenko B.A., Paszkiewicz T., Wolski S. et al.* Heat capacity and phonon mean free path of wurzite GaN // Appl. Phys. Lett. — 2006. — V. 89. — P. 061901.
4. *Сукач Г.А., Смертенко П.С., Олексеюк П.Ф., Nakamura S.* Анализ температуры перегрева активной области зеленых СИД на основе нитридов III группы // ЖТФ. — 2001. — Т. 71, № 4. — С. 76–79.
5. *Сукач Г.А., Смертенко П.С., Олексеюк П.Ф., Nakamura S.* Анализ температуры перегрева активной области гетероструктур InGaN/AlGaIn/GaN с одиночной квантовой ямой // Светодиоды и лазеры. — 2002. — № 1–2. — С. 45–47.
6. *Vitusevich S.A., Danylyuk S.V., Klein N. et al.* Separation of hot-electron and self-heating effects in two-dimensional AlGaIn/GaN-based conducting channels // Appl. Phys. Lett. — 2003. — V. 82, N 5. — P. 748.
7. *Danilchenko B.A., Zelensky S.E., Drok E. et al.* Hot-electron transport in AlGaIn/GaN two-dimensional conducting channels // Appl. Phys. Lett. — 2004. — V. 85, N 22. — P. 5421–5423.
8. Физические методы диагностики в микро- и нанoeлектронике / под ред. А.Е. Беляева и Р.В. Конаковой. — Харьков: ИСМА. 2011. — 384 с.
9. *Komirenko S.M., Kim K.W., Kochelap V.A., Zavada J.M.* Enhancement of hole injection for nitride-based light-emitting devices // Solid-State Electronics. — 2003. — V. 47. — P. 169–171.
10. *Zavada J.M., Komirenko S.M., Kim K.W., Kochelap V.A.* Efficient nitride-based short-wavelength emitters with enhanced hole injection // Institute of Physics: Conference Series. — 2003. — V. 174. — P. 401–404.
11. *Komirenko S.M., Kim K.W., Kochelap V.A., Zavada J.M.* Laterally doped heterostructures for III–N lasing devices // Appl. Phys. Lett. — 2002. — V. 81, N 24. — P. 4617.

Стаття надійшла 14.01.2015.

А.Е. Беляев, В.А. Кочелап

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины
пр. Науки, 41, Киев, 03028, Украина

ВОЛШЕБНОЕ ПУТЕШЕСТВИЕ В ГОЛУБОЙ СВЕТ

Нобелевская премия по физике 2014 г. была присуждена Исаму Акасаки (Isamu Akasaki), Хироши Амано (Hiroshi Amano) и Сюдзи Накамура (Shuji Nakamura) за разработку голубых оптических диодов, которые позволили внедрить яркие и энергосберегающие источники света.

Ключевые слова: голубые оптические диоды, Нобелевская премия, И. Акасаки, Х. Амано, С. Накамура.

А.Е. Беляев, В.А. Кочелап

Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine
41 Nauky Pr., Kyiv, 03028, Ukraine

FASCINATED JOURNEYS INTO BLUE LIGHT

Nobel Prize in Physics 2014 was awarded to Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, and Shuji Nakamura for the development of the blue optical diodes, which allowed the introduction of bright and energy-saving light sources.

Keywords: blue optical diodes, Nobel Prize, I. Akasaki, H. Amano, S. Nakamura.