

АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНИХ ТА СВІТЛОДІОДНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА НА КВАНТОВО-РОЗМІРНИХ СТРУКТУРАХ ДЛЯ ФОТОМЕДИЦИНИ

В.І. Осінський, С.В. Павлов, С.Є. Тужанський, О.С. Камінський

Центр оптоелектронних технологій,
04136 Україна, м. Київ, вул. Північно-Сирецька, 3;
Вінницький національний технічний університет, кафедра загальної фізики та фотоніки,
Україна, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
E-mail: psv@vstu.vinnica.ua

УДК 681.7.069.24

В роботі проаналізовано стан розвитку оптоелектронних технологій, зокрема, напівпровідникових лазерних та світлодіодних джерел випромінювання, проведено їх порівняльний аналіз, показана перспективність створення світловипромінюючих квантово-розмірних гетероструктур та їх подальшого застосування у фотобіології та фотомедицині.

Ключові слова: квантово-розмірні структури, лазери, світлодіодні випромінювачі, фототерапія, фотобіологія.

Вступ

Все більшого поширення у фототерапії та біомедичних дослідженнях набуває застосування напівпровідникових лазерних та світлодіодних джерел випромінювання. Визначальним фактором розвитку методик світлолікування, що обумовлює межі подальшого їхнього застосування, є фізико-технічні характеристики (ФТХ) випромінювачів. Основним фактором, який стримує масовий перехід до твердотільних джерел випромінювання є їхня недостатня енерге-

тична ефективність перетворення електричної енергії у світлову. Економічно доцільним масовий перехід до діодних джерел світла (ДДС) стане тоді, коли їх енергетична ефективність досягне 150-200 лм/Вт. Особливо це стосується біомедичних технологій.

Порівняльний аналіз типових сучасних лазерних (ЛД) та світлодіодних (СД) джерел випромінювання терапевтичної дії наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Аналіз лазерних та світлодіодних випромінювачів для фототерапії

ФТХ	ЛД	СД	Особливості застосування
Спектральний діапазон, мкм	0,6-1,55	0,4-1,55	ЛД із УФ-спектром є відносно дорогими та малосерійними приладами
Напівширина довжини хвилі, нм	0,1-1	10-20	Спектральна «чистота» ЛД є недоліком для фототерапії
Середній кут розбіжності, град	15-30	20-50	Дозволяє СД опромінювати більшу площу об'єкта
Колімованість випромінювання	висока	низька	Забезпечує можливість дистанційного застосування ЛД
Мінімальний розмір сфокусованої плями випромінювання, мкм	>100	~2000	Разом із високою колімованістю є важливою перевагою ЛД, що забезпечує високу ефективність введення енергії (50-70%) у світловод
Максимальна густина потужності, Вт/см ² (дистанційно / світловод)	200/ 5000	0,1/ 0,005	Обмежує можливість застосування СД (тільки контактні методики)
Максимальна імпульсна потужність, Вт / мінімальна тривалість імпульсу, мксек	100/ 0,07	0,25/ 100	Імпульсний режим роботи є перевагою ЛД над СД

Окремої уваги заслуговують такі особливості ЛД, як когерентність, висока монохроматичність та здатність керувати поляризацією випромінювання. Перші дві властивості, хоча й не є такими визначальними у фототерапії, як у хірургії та діагностиці, але мають вплив на глибину проникнення випромінювання у біотканини. Важливою особливістю ЛД є можливість керування поляризацією як при дистанційному опроміненні, так і значною мірою при застосуванні волоконного інструментарію.

Мета роботи – проаналізувати стан розвитку оптоелектронних технологій, зокрема, напівпровідникових лазерних та світлодіодних джерел та показати перспективність створення світловипромінюючих квантово-розмірних гетероструктур та їх застосування для фотобіології та фотомедицини.

Аналіз проблеми

У ході розробок світлодіодів за останні десятиріччя було досягнуто наступних результатів. Червоні діоди на основі твердих розчинів арсенідів галію-алюмінію $Al_xGa_{1-x}As$ досягли зовнішнього квантового виходу випромінювання η_e більш 15%. Діоди з фосфіду галію Ga, що світяться жовтувато-зеленим кольором, мають $\eta_e \sim 0,1\%$, але близькість спектру випромінювання до максимуму чутливості ока ($\lambda = 555$ нм) забезпечила їм у 70-90-х роках ХХ ст. широке застосування. ККД промислових зразків червоних, оранжево-жовтих і жовто-зелених світлодіодів на основі гетероструктур із твердих розчинів $In_yAl_xGa_{1-x-y}$ був доведений до кінця 90-х років до 25-55%. Істотним фізико-технологічним результатом у гетероелектроніці було одержання в 1965 році Н.Н. Сиротою і В.І. Осінським ефективних світлодіодів на чотирьохкомпонентних твердих розчинах InGaAs [1], у яких виявилось можливим керувати в широких межах не лише шириною забороненої зони, але й іншими параметрами, такими як параметри ґратки, коефіцієнти термічного розширення, показник заломлення. Фактично були отримані перші надяскраві світлодіоди з квантовими точками, що дозволило знизити пороги генерації гетеролазерів і широко застосовувати випромінювачі на гетероструктурах у волоконно-оптичних лініях зв'язку. У гетерогенних структурах з безліччю потенціальних ям з

розмірами, порівняними з довжиною хвилі де Бройля, енергетичний спектр електронів і дірок залежить від розмірів потенціальної ями (товщини наночарів). Це дозволяє регулювати колір світіння, змінюючи не лише склад напівпровідника, а й товщину потенціальної ями, яка називається в цих умовах квантовою.

Набір квантових ям різних розмірів дозволив одержати на багатокомпонентних твердих розчинах InGaAs широкий спектр випромінювання світлодіодів, ширина якого складала 350 Å. За рахунок розмірного квантування вперше був отриманий зсув на 200 Å спектру випромінювання від інфрачервоної області GaAs у видиму червоно-жовту область. Гетерогенні структури з вихідних матеріалів інфрачервоного світіння арсенід галію і фосфід індію засвітили яскравим жовто-червоним світінням. Це були перші надяскраві світлодіоди видимого діапазону на квантоворозмірних гетероструктурах. Інтенсивність їх випромінювання в 170 разів перевищувала відповідні значення для активних шарів з найбільш поширених бінарних з'єднань арсеніду галію і фосфіду індію [2].

Матеріали та технологія

Світловіддача діодних випромінювачів з різних матеріалів для всіх основних кольорів перевищила світловіддачу ламп розжарювання. Нітрид галію Ga, представник групи $A^{III}B^V$, на відміну від кубічних кристалів GaAs, In, AlAs кристалізується як в кубічній, так і в гексагональній ґратці типу вюрцита (постійні ґратки $a = 3,18$ Å, $c = 5,18$ Å). Остання модифікація має ширину забороненої зони $E_g = 3,5$ еВ. Вирощування монокристалів цього напівпровідника непросте завдання, тому що температура плавлення Ga $\sim 2000^\circ\text{C}$, а рівноважний тиск пар азоту повинен бути 40 атм. Ga – прямозонний напівпровідник; нелеговані кристали Ga мають велику концентрацію донорів, що обумовлюють провідність *n-типу* і концентрацію електронів $n = 10^{18}-10^{19}$ см⁻³. Кристали аналогічних з'єднань – нітридів алюмінію та індію Al і In – також гексагональні. Постійні їх ґраток сильно відрізняються ($a = 3,11, 3,54$ Å і $c = 4,98, 5,70$ Å); це - прямозонні напівпровідники з $E_g = 6,5$ і 1,8 еВ відповідно. Бінарні з'єднання утворюють потрійні тверді розчини $Ga_{1-x}Al_x, Ga_{1-x}In_x$, причому останні мають великі

області поганої розчинності в центрі потрібної діаграми. У ряді $Ga_{1-x}In_x$ можна так підібрати параметр x , що енергія E_g буде відповідати фіолетовій, блакитній або зеленій області спектра.

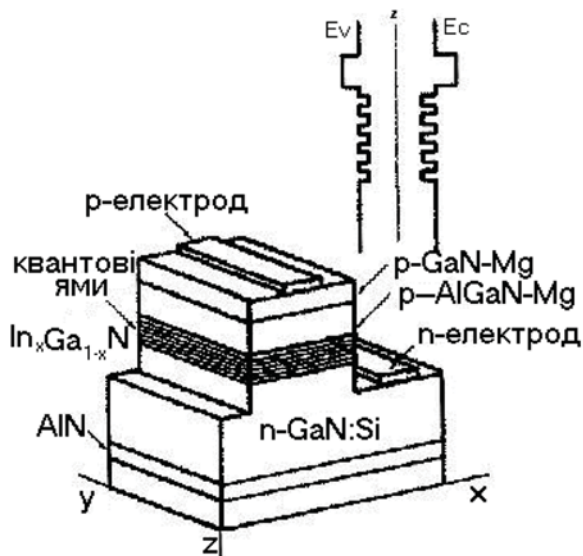


Рис. 1. Схема світлодіода на основі гетероструктур типу Ga/InGa/AlGa/Ga із множинними квантовими ямами

Для створення повної колірної гами світлодіодів істотним є розробка технології вирощування гетероструктур з мінімальною кількістю дефектів на границях. Допомогає те, що в надтонких шарах невідповідність параметрів ґратки у визначених випадках викликає на гетерограницях лише пружну деформацію розтягу або стискання. А чисто пружна деформація не супроводжується утворенням дислокацій і дефектів – центрів безвипромінювальної рекомбінації.

Для керування багатьма світлодіодами з різними кольорами світіння важливі їх вольт-амперні характеристики. По-перше, світлодіод повинен працювати в оптимальному режимі, щоб цілком реалізувати свій ресурс; по-друге, яскравість світлодіодів можна легко керувати, а якщо застосовувати змішування кольорів, таким же легким стає керування кольором приладу, до складу якого входять світлодіоди різних кольорів. Робочий режим світлодіода обирається на прямій вітці ВАХ. Дуже важливо, щоб струм, що протікає через світлодіод, не перевищував гранично допустимий прямий струм $I_{пр}$, інакше світлодіод вийде з ладу.

Важливим кроком по створенню високоефективних світлодіодів, придатних

для використання у світлосигнальних приладах і приладах дистанційного керування, був зроблений в результаті розробки концепції багатопрхідних подвійних гетероструктур у системі GaAlAs, одержуваних методом рідинної епітаксії. У ближньому інфрачервоному діапазоні енергій 1,33...1,54 eV ($\lambda_{max} = 805-930$ нм) був досягнутий $\eta_{вн} = 23-35\%$. При цьому внутрішній квантовий вихід випромінювання наближається до 100%. У червоному діапазоні енергій 1,8-1,91 eV ($\lambda_{max} = 650-680$ нм) $\eta_{вн}$ промислових зразків досягає 10-12%, що дозволяє одержати світлову віддачу до 10 лм/Вт і значно перевищити світлову віддачу ламп розжарювання з червоним світлофільтром. Зовнішній квантовий вихід випромінювання лабораторних зразків світлодіодів з GaAlAs досягає 18%. При подальшому підвищенні енергії випромінювання в даній системі квантовий вихід випромінювання знижується внаслідок наближення складу до непрямозонного.

Суттєвий прогрес у створенні високоефективних світлодіодів обумовлений розробкою нової технології: епітаксального вирощування багатошарових гетероструктур методом металоорганічного хімічного вакуумного нанесення (MOCVD). При використанні цієї технології істотне підвищення світлової віддачі в діапазоні енергій 1,92-2,16 eV (червоний-жовто-зелений діапазон спектра з $\lambda_{max} = 575-640$ нм) було досягнуто у результаті створення багатопрхідних подвійних гетероструктур у системі AlGaIn як на підкладці GaAs, так і на прозорій підкладці Ga. Це з'єднання є прямозонним у діапазоні енергій 1,9-2,26 eV. При створенні структур AlGaIn на прозорій підкладці Ga була застосована технологія фізичного з'єднання структури AlGaIn у місці вилученої підкладки GaAs із пластиною Ga при впливі тиску і температури. Пристрій структури представлений на рис. 1. Структура світлодіода з множинними квантовими ямами являє собою досить складний «пиріг». На сапфіровій підкладці, після буферного шару Al (товщиною 30 нм), вирощений шар $n-Ga:Si$ (4 мкм). Потім йде активний нелегований шар, що складається з п'яти квантових ям, що чергуються, $In_xGa_{1-x}N$ (3-4 нм) і бар'єрів GaN (4-5 нм). Ефективна ширина забороненої зони квантових ям $In_xGa_{1-x}N$ відповідає випромінюванню від блакитної до жовтої області спектру (450-580 нм), якщо склад

активного шару змінюється в межах $x = 0,2-0,4$; вона залежить і від товщини d . Розташований вище бар'єрний широкозонний шар $p\text{-Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N:Mg}$ (100 нм) інжектує дірки і узгоджує ґратку з ґраткою верхнього шару $p\text{-Ga:Mg}$ (0,5 мкм), на який нанесений металевий контакт Ni-Au. Другий металевий контакт (Ti-Al) з нижнім шаром $n\text{-Ga}$ створюється після з травлювання частини структури.

Зовнішній квантовий вихід випромінювання структури AlGaInP/GaAs знаходиться в діапазоні 5-7%. Для структур AlGaInP/GaP $\eta_{\text{вн}}$ значно вище і досягає 23,7% при $\lambda_{\text{max}} = 635,6$ нм. У промисловому виробництві $\eta_{\text{вн}}$ структур AlGaInP/GaP складає 10-12%. Внаслідок збільшення значення відносної функції видності світлова віддача світлодіодів у жовто-червоному діапазоні спектру зростає до 20 лм/Вт (структури GaInAlP/GaAs) і до 30 лм/Вт (структури GaInAlP/Ga). Максимальне значення світлової віддачі склало 50,3 лм/Вт при

$\lambda_{\text{max}} = 607,4$ нм. Енергія випромінювання визначається співвідношенням Al і Ga у $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}$. При $x = 0,2$ спостерігається червоно-жовтогаряче світіння, при $x = 0,35$ – жовте світіння. На основі структур AlGaIn створені високоефективні світлодіоди в червоно-жовтогарячій ($\lambda_{\text{max}} = 620-645$ нм), жовтій ($\lambda_{\text{max}} = 590-594$ нм) і жовто-зеленій ($\lambda_{\text{max}} = 575$ нм) областях видимого спектру. У більш короткохвильовій області випромінювання ефективність структур AlGaIn знижується внаслідок наближення складу з'єднання до непрямозонного.

Багатошарові гетероструктури на основі нітридних з'єднань методом MOCVD для створення світлодіодів із синім і зеленим світінням вперше одержав Ш. Накамура [3]. Ним отримана подвійна гетероструктура в системі $n\text{-Ga}/n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}/p\text{-AlGa}$ з нелегованою активною областю у виді одиночної квантової ями $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (рис. 2). Товщина активної області ≈ 30 А.

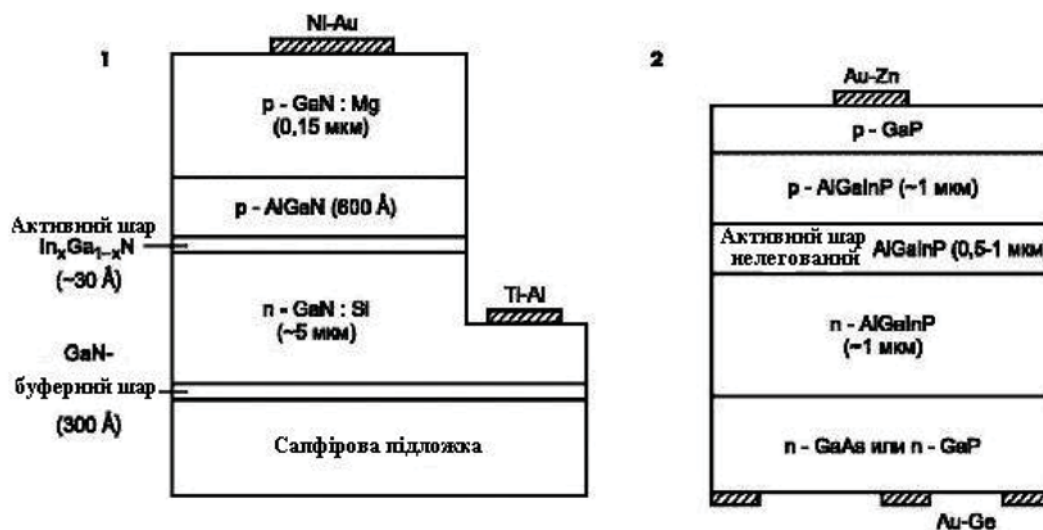


Рис. 2 Будова світловипромінюючих кристалів: 1– на основі InGaN, 2– на основі AlGaInP

Якщо у вищеписаній структурі вміст In в активній області $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ близько до 0, то одержуємо або ультрафіолетове випромінювання ($\lambda_{\text{max}} = 375-400$ нм), або фіолетове світіння ($\lambda_{\text{max}} = 400-455$ нм). При величині $x = 0,2$ одержуємо синє світіння з $\lambda_{\text{max}} = 455-485$ нм, при $x = 0,45$ одержуємо зелене світіння з $\lambda_{\text{max}} = 505-530$ нм. Структури вирощуються на сапфіровій підкладці (Al_2O_3), що прозора для випромінювання, яке генерується, що також сприяє

підвищенню зовнішньої оптичної ефективності світлодіодів.

Зовнішній квантовий вихід випромінювання досягає максимуму в синьо-зеленій області спектру ($h\nu = 2,3-2,7$ еВ). При струмі 20 мА при $\lambda_{\text{max}} = 470$ нм (синє світіння) $\eta_{\text{вн}}$ досягає 14%, а при $\lambda_{\text{max}} = 525$ нм (зелене світіння) $\eta_{\text{вн}} = 11\%$. При зниженні прямого струму до 1 мА $\eta_{\text{вн}}$ у синьо-зеленій області спектру підвищується до 18%, а при $J_{\text{пр}} = 0,1$ мА $\eta_{\text{вн}}$ досягає 21%. В ультрафіолетовій області спектру

($\lambda_{\max} = 375$ нм) $\eta_{\text{вн}}$ досягає 7% при $I_{\text{пр}} = 20$ мА і $\approx 9\%$ при $I_{\text{пр}} = 1$ мА. По світловій віддачі світлодіоди зеленого і синього світіння з InGa (37 лм/Вт при $I_{\text{пр}} = 20$ мА і ≈ 60 лм/Вт при $I_{\text{пр}} = 1$ мА) перевершують лампи розжарювання у 2-3,5 рази і наближаються до світлової віддачі люмінесцентних ламп (60-80 лм/Вт).

Висновки

Сучасний рівень технології багатоконпонентних напівпровідників A^3B^5 дозволяє створювати багатоелементні світлодіодні і лазерні структури з безліччю дискретних спектрів і смуг, що можуть генерувати суцільний спектр у широкому діапазоні. Такі технології створені в Центрі оптоелектронних технологій НДІ мікроприладів (м. Київ). Найбільший інтерес для фотомедицини представляють світлодіодні структури, квантоворозмірні структури з RGB-синтезом білого спектру або мультиспектральні одночипові джерела. При цьому в реальному масштабі часу за допомогою програмувальних мікросхем можна керувати інформаційними параметрами та параметрами потужності діодних джерел.

Найбільш перспективні для застосування в біомедицинській практиці є мультиспектральні одночипові світлодіоди на основі багатоконпонентних наноструктур в системі AlGaInNPs.

Поряд з такими технологіями як СД, так і ЛД є конкурентноспроможними джерелами випромінювання для фототерапії. Основною перевагою СД є низька вартість, широкий спектральний діапазон та відносна простота конструкції, що дозволяють створювати гнучкі поліхромні матричні пристрої із великою кількістю випромінювачів, які здатні опромінювати великі площі об'єкта (солярії та ін.). Найбільший в Україні асортимент матричних СД виробів для фотомедицини представлений у корпорації «Лазер і здоров'я» (м. Харків).

До переваг ЛД над СД, в першу чергу, слід віднести високі направленість, ефективність узгодження із волоконними світловодами та густину потужності лазерного випромінювання, а також кращі характеристики роботи в імпульсному режимі (табл. 1).

Вказані особливості ЛД реалізовані у розробленому на базі ВНТУ двоканальному ($\lambda_1 = 660$ нм та $\lambda_2 = 850$ нм) цифровому пристрої «Quantron-laser». Пристрій працює із волоконним інструментарієм, який виготовляється підприємством «Фотоніка Плюс»

(м. Черкаси). Особливістю «Quantron-laser» є зміна глибини модуляції, можливість одночасної роботи двох ЛД та висока точність зміни частоти генерації (від 0,1 Гц до 10 кГц), яка забезпечується використанням сучасної елементної бази (програмованих логічних інтегральних схем).

Література

1. Аналіз властивостей лазерних та напівпровідникових джерел для фототерапії / В.І. Осинський, С.В. Павлов, С.Е. Тужанський, Г.Л. Лисенко // Матеріали ХХХІІ Международной научно-практической конференции «Применение лазеров в медицине и биологии» (Гурзуф, 7-10 октября 2009 г.). – Х., 2009. – С. 194 - 196.
2. Біомедицинські оптикоелектронні інформаційні системи і апарати, Ч.3 / В.П. Кожем'яко, З.Ю. Готра, З.М. Микитюк та ін. // Лазерні біомедицинські системи: Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2000. – 143 с.
3. Осинський В.І. Интегральная оптоэлектроника.. – М.: Наука и техника, 1977. – 248 с.
4. Осинский В.И. Космические нанотехнологии создания гетерогенных информационных сред // Технології створення перспективних комп'ютерних засобів та систем з використанням новітньої елементної бази. – К., 2000.
5. Осинский В.И. Генерация белого излучения в наноструктурах многокомпонентных полупроводников / В.И. Осинский, В.Г. Вербицкий, Н.Н. Ляхова. – Винница, 2000.
6. Осинский В.И. Нанотехнологии зонной инженерии лазеров, светодиодов и фотоприемников / В.И. Осинский, В.Г. Вербицкий. – Винница, 2000.
7. Кожем'яко В.П. Оптоелектронна схематехніка / В.П. Кожем'яко, С.В. Павлов, М.Г. Гарновський. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 215 с.
8. Павлов С.В. Перспективи розвитку біомедицинської оптики у проблемі комплексного діагностування та терапії людини / С.В. Павлов, А.М. Коробов, Н.В. Ганиш // Матеріали ІV Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні питання та організаційно-правові засади співробітництва України та КНР у сфері високих технологій» (Київ, 10 жовтня 2007 р.). – К., 2007.
9. Павлов С.В. Аналіз методів розповсюдження випромінювання в біологічних середовищах на основі застосування методу Монте-Карло / С.В. Павлов, Т.І. Козловська, В.П. Думенко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2008 – №2(16) – С.139-144.
10. Патент № 43610 UA. МПК А 61 В 3/06. Оптико-електронний пристрій для фототерапії ока / Й.Р. Салдан, С.В. Павлов, Ю.І. Салдан, М.П. Бакало. (№ у 2009 02604; Заявл. 23.03.2009; Опубл. 25.08.2009. – Бюл. № 16). – 4 с.

*АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ И СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ
ИЗЛУЧЕНИЯ НА КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ ДЛЯ ФОТОМЕДИЦИНЫ*

В.И. Осинский, С.В. Павлов, С.Е. Тужанский, О.С. Каминский

Центр оптоэлектронных технологий,

04136 Украина, г. Киев, ул. Северно-Сирецкая, 3;

Винницкий национальный технический университет, кафедра общей физики и фотоники,

Украина, г. Винница, Хмельницкое шоссе, 95,

E-mail: psv@vstu.vinnica.ua

В работе проанализировано состояние развития оптоэлектронных технологий, в частности, полупроводниковых лазерных и светодиодных источников излучения, проведен их сравнительный анализ, показана перспективность создания светоизлучающих квантово-размерных гетероструктур и их дальнейшего применения в фотобиологии и фотомедицине.

Ключевые слова: *квантово-размерные структуры, лазеры, светодиодные излучатели, фототерапия, фотобиология.*

*ANALYSIS AND PROSPECTS OF APPLICATION LASER AND LIGHTDIOD SOURCES OF RADIATION ON
QUANTUM-SIZES STRUCTURES FOR PHOTOMEDICINE*

V.I. Osinskiy, S.V. Pavlov, S.E. Tuzhanskiy, O.S. Kaminskiy

Center of optoelektronic technologies,

04136 Ukraine, Kiev, Severno-Siretskaya Str., 3;

Winnitca National Technical University, Department of General Physics and Fotonika,

Ukraine, Winnitca, Khmelnitkiy highway, 95,

E-mail: psv@vstu.vinnica.ua

Development of optoelektronic technologies status is analysed in this work, in particular, semiconductor lasers and lightdiod sources of radiation, their comparative analysis is conducted, shown perspektiv of creation of light emitting quantum-sizes geterostruktur and their further application in photobiology and photomedicine.

Key words: *quantum-sizes structures, lasers, lightdiod, phototherapy, photobiology.*