

ЛАЗЕРНІ ТА ФОТОННІ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА ДЛЯ ФОТОМЕДИЦИНИ

Осінський В. І., Павлов С. В. *, Тужанський С. Є. *, Камінський О. С., Темчишена А. В. *

Центр оптоелектронних технологій,
вул. Північно-Сирецька, 3, м. Київ, 04136 Україна;
*Вінницький національний технічний університет,
кафедра лазерної загальної фізики та фотоніки,
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021 Україна
e-mail: psv@vstu.vinnica.ua

В роботі проведено аналіз, класифікацію та визначені основні особливості застосування лазерних й нелазерних джерел світла у медицині, показано перспективність їх розвитку та використання для фототерапії.

Ключові слова: лазери, світлодіодні випромінювачі, квантові гетероструктури, фототерапія.

Актуальність

Фотонні технології у медицині сьогодні стали важливою ланкою державної політики охорони здоров'я у найбільш розвинутих країнах світу. Однією з таких технологій є фототерапія (ФТ), яка являє собою використання оптичного випромінювання (інфрачервоного — ІЧ, видимого і ультрафіолетового — УФ) з лікувальною та профілактичною метою. Застосування світла в медицині базується на дії електромагнітного випромінювання (ЕМВ) оптичного діапазону спектра на біологічні тканини і клітини, а також на фотофізичних, фотохімічних і фотобіологічних процесах у останніх. Світло викликає зміни на багатьох рівнях біологічного об'єкту: субклітинному, клітинному, тканинному, органному, системному; реакція всього організму супроводжується посиленням регіонарного кровообігу, нормалізацією системної термодинаміки, підвищенням синтезу білків та ферментів, зростанням рівня енергообміну у клітинах, покращенням мікроциркуляції в тканинах, імуномодуляцією. Світло через нервову систему впливає на загальний стан здоров'я людини, що необхідно враховувати в пристроях штучного освітлення.

Внаслідок усього вищезазначеного створення нових, більш ефективних й безпечних джерел випромінювання для використання у фотомедицині залишається актуальним завданням вітчизняної науки та техніки.

Основні джерела оптичного випромінювання

Сьогодні в медицину впроваджується все більша кількість методів лікування, у яких застосовуються фотонні прилади. Широкого розвитку набули оптичні методи реєстрації та перетворення біомедичної інформації для неінвазивних методів діагностики.

Розглядаючи фотонні технології для медицини, слід зауважити, що в них присутні такі риси, які роблять їх конкурентноспроможними з іншими технологіями ФТ. Лише джерела лазерного випромінювання (ЛВ) і світлодіоди (СД) мають такі унікальні можливості, як мікропроцесорне керування мультиспектральністю, динамічні властивості в широкому частотному діапазоні, часова та просторова когерентність ЕМВ. Таких можливостей не дають традиційні джерела світла — лампи розжарювання, люмінесцентні (звичайні та енергозберігаючі), газорозрядні лампи, тому їх використання у ФТ на сьогоднішній день обмежено.

Звичайне теплове джерело світла характеризується тим, що його збуджені атоми випромінюють фотони при переході з верхніх електронних рівнів на нижні неузгоджено (спонтанно). Таке випромінювання зветься спонтанним. В лазерах, навпаки, збуджені атоми активного елемента випромінюють фотони узгоджено завдяки наявності оптичного резонатора, який здійснює позитивний зворотній зв'язок, що дозволяє стимулювати процеси випромінювання фотонів атомами, які знаходяться у збудженому стані. Таке випромінювання зветься стимульованим. Воно відрізняється від спонтанного

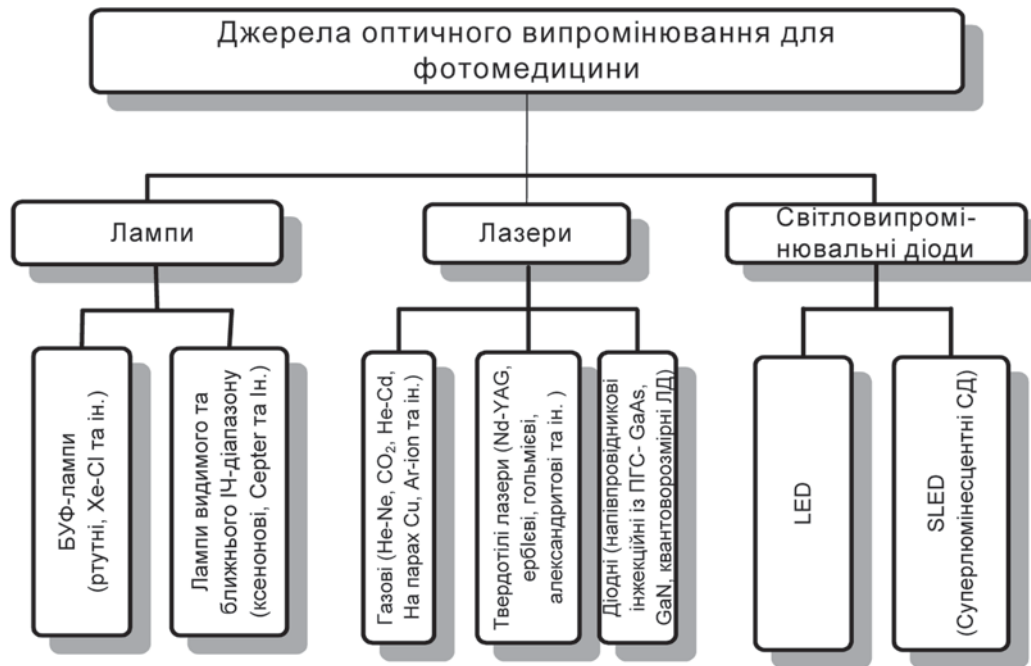


Рис. 1. Основні джерела оптичного випромінювання.

тим, що має високу ступінь когерентності, монохроматичності, поляризації, направленості.

В оптичному діапазоні починають чітко проявлятися одночасно хвилеві і корпускулярні властивості ЕМВ. Хвилеві властивості оптичного випромінювання спостерігаються особливо в явищах, пов'язаних з його розповсюдженням (відображення, заломлення, інтерференція, дифракція, поляризація), а корпускулярні — при взаємодії світла з речовиною.

Основні джерела світла для фотомедицини показані на рис. 1.

В останні десятиріччя ХХ ст. у медицині набули розповсюдження методи лазерної терапії — завдяки таким властивостям лазерного випромінювання, як можливість дистанційної дії на біооб'єкти, широкий енергетичний діапазон, передача з великою вибірковістю випромінювання по волоконних світловодах до будь-якої точки тіла, в тому числі і в кровеносні судини; знеболювальний ефект; відсутність кровотечі при хірургічних втручаннях, тощо.

Порівнюючи лазери газові, на парах міді, напівпровідникові, твердотільні та ін., можна казати, що найпопулярнішими у ФТ протягом довгих часів були гелій-неонові лазери, які працюють на багатьох лініях видимого та ближнього ІЧ діапазонів спектра; потужні вуглекислотні лазери найчастіше застосовувались у лазерній хірургії. Твердотільні лазери й досі знаходяться на озброєнні лазерних хірургів, незважаючи на те, що мають низький коефіцієнт корисної дії (ККД). Менш поширені

лазери з рідким робочим тілом — на барвниках та ін. Недоліками напівпровідникових лазерів залишаються їх порівняно невелика потужність, велика ширина спектральної лінії, великий кут розходження, який становить одиниці і навіть десятки кутових градусів. Знаходять застосування у фотомедицині найінтенсивніші лазери на парах міді, які здійснюють генерацію на двох довжинах хвиль (510,5 нм — зелена лінія та 578,2 — жовта лінія), а також лазери на азоті, які випромінюють в УФ області спектра на довжині хвилі 0,3371 мкм при потужності до 2 мВт в імпульсі — справа в тому, що поблизу цієї області лежать максимуми поглинання ряду найважливіших біохімічних компонентів клітини.

У останні роки найбільша увага приділяється світлодіодам (СД). Нові штучні джерела світла — над'яскраві СД, які є джерелами спонтанного випромінювання, відрізняються від лазерних джерел своєю простотою, надійністю, довговічністю, можливістю варіювання спектра випромінювання в широкому діапазоні, високою інтенсивністю світіння в заданому куті; вони дають можливість вибору хвилі випромінювання в будь-якій ділянці видимого і ближнього ІЧ діапазонів спектра.

На основі напівпровідникових над'яскравих СД виготовлені, наприклад, універсальні медичні апарати для ФТ — фотонні матриці Корбова серії «Барва — Флекс». Їх відмінною особливістю є те, що вони мають гнучку основу. Це дозволяє матрицям повторювати форму

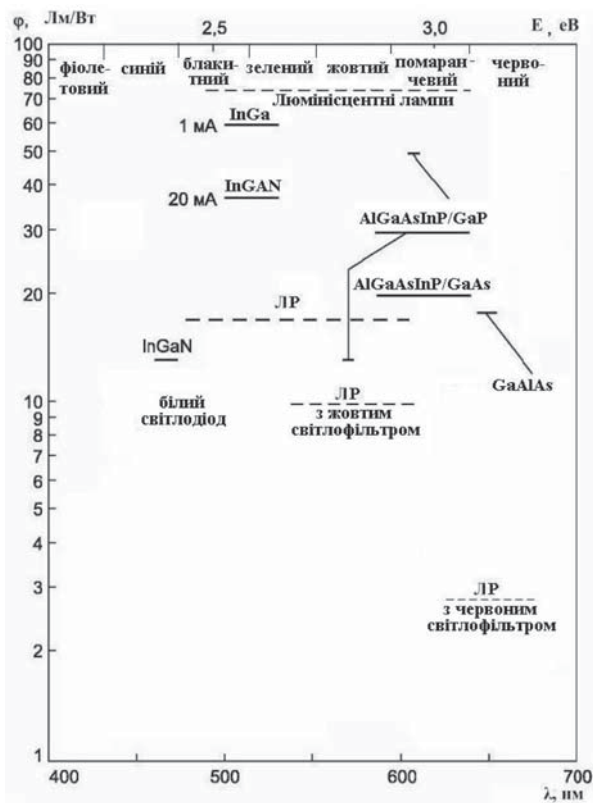


Рис. 2. Характеристики напівпровідникових СД

поверхні тіла людини, до якої вони прикладаються, щоб забезпечити максимально ефективну передачу випромінювання СД без втрат на відбиття на границі «повітря — шкіра людини». При контактному способі опромінення практично все світло поглинається тканинами організму. При компресії тканин фотонною матрицею досягається найбільша глибина проникнення для світла з даною довжиною хвилі; окрім того, за рахунок ущільнення тканин знижується ступінь дивергенції випромінювання, розсіювання [3].

За допомогою фотонних матриць Коробова можна проводити ФТ таких захворювань, як інфаркт міокарду, ішемічна хвороба серця, інсульт, туберкульоз, пневмонія, бронхіальна астма, ангіна, фарингіт, отит, діабет, виразка шлунку та 12-палої кишки, простатит, аднексит, травми, опіки, відмороження, тощо.

Застосування квантових гетероструктур у фотомедицині

Характеристики напівпровідникових СД у порівнянні зі світловою віддачею деяких інших джерел світла представлені на рис. 2.

Такий СД включає в себе напівпровідниковий перехід, в якому при проходженні електричного струму генерується оптичне випромінювання ІЧ, видимої чи УФ області спектра.

Прості й надійні оптоелектронні джерела (рис. 3), на відміну від лазерних джерел, можуть «закривати» усю ширину спектральної смуги поглинання будь — якого фоторецептора, але при цьому випромінювання СД є некогерентним. На відміну від теплових джерел випромінювання СД має більш вузький спектр (10-50 нм), внаслідок чого в видимій області сприймається як однокольорове [1].

У теперішній час досить перспективним є застосування багатокомпонентних напівпровідників АІІВV (табл. 1). Вони дозволяють створювати світлодіодні та лазерні структури з множиною дискретних спектрів та смуг, які можуть генерувати суцільний спектр у широкому діапазоні. Найбільшу зацікавленість з точки зору фотомедицини викликають СД-структури білого світла. Для вирішення конкретних прикладних задач можуть використовуватись білі СД з перетворенням синього або УФ-випромі-

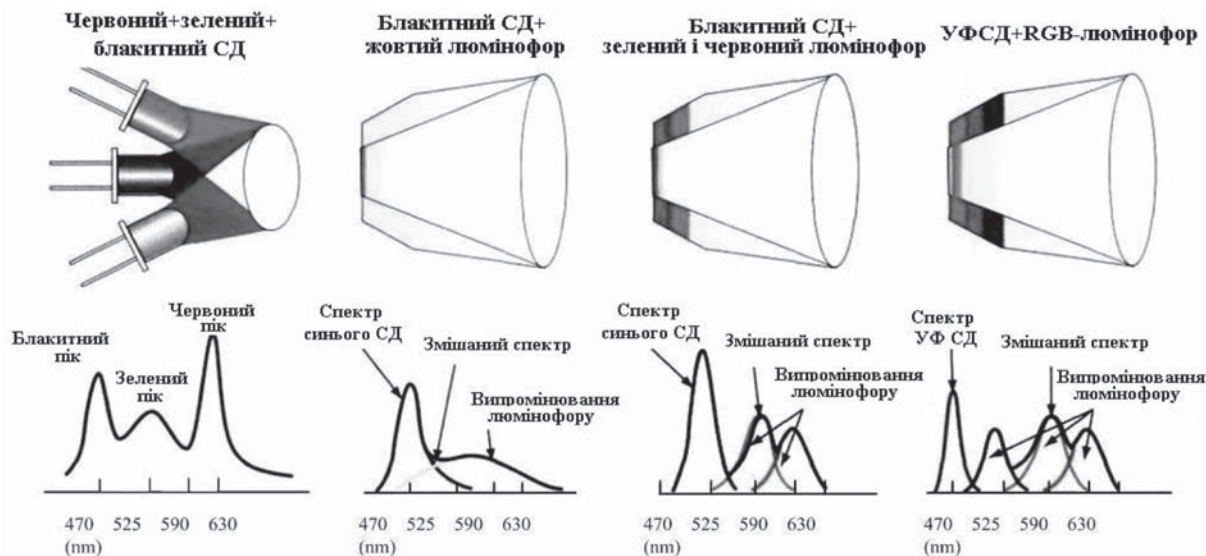


Рис. 3. Конструкції та характеристики світлодіодних джерел світла

нювання в люмінофорах, RGB — синтез білого спектру або мультиспектральні одноступеневі джерела. При цьому в реальному часі за допомогою програмованих мікросхем можна керувати інформаційними параметрами СД-джерел випромінювання білого світла.

Таблиця 1.

Характеристики випромінювання багатокомпонентних напівпровідників типу АІІВV

Напівпровідникове з'єднання	λ_{\max} , нм	$\lambda_{0,5}$, нм
GaAlAs	650	22
AlGaInP	639	19
AlGaInP	620	17,5
AlGaInP	594	16
InGaN	526	35
InGaN	470	25

Випромінювання монохроматичних спектрів білої світлодіодної матриці представлено на рис. 4.

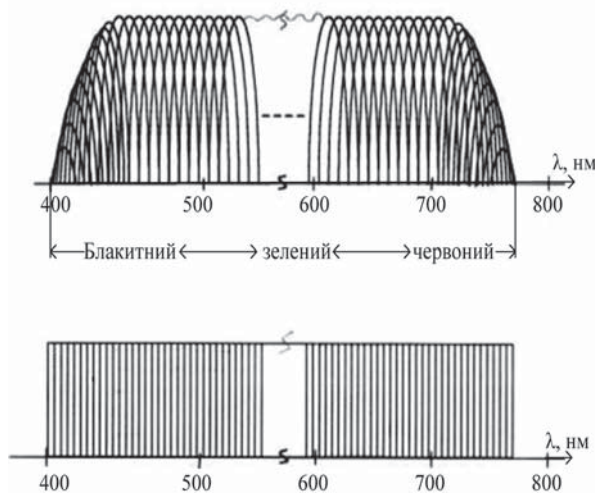
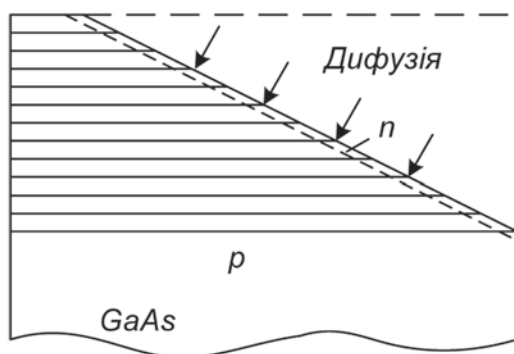
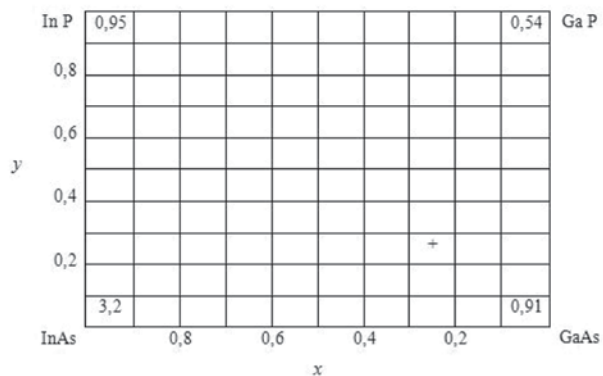


Рис. 4. Випромінювання монохроматичних спектрів білої світлодіодної матриці

На рис. 5, а представлено перекриття монохроматичних спектрів n-p гетеропереходів, які створюють спектр білого світла світлодіода та гетеролазера. На рис. 5, б — матриця випро-



а)



б)

Рис. 5. Матриця випромінювачів різних спектральних смуг

мінювачів різних спектральних смуг на основі четверної системи $Ga_{1-x}In_xAs_{1-y}P_y$.

Розглядаючи спектральні характеристики білих СД, слід зауважити, що останні є перспективними джерелами випромінювання для сучасної фотомедицини — не в останню чергу завдяки тому, що над'яскраві (суперлюмінесцентні) СД з енергетичною ефективністю 150–200 лм/Вт та високим значенням ККД забезпечують низьке енергоспоживання [2].

Особливості взаємодії оптичного випромінювання з біотканиною

Однією з центральних проблем в установці механізму біологічної дії світла є питання про природу фоторецепторів — речовин, які поглинають діюче випромінювання і тим самим беруть участь в перших стадіях процесу [4]. До них, в першу чергу, відносять пігменти, які характеризуються вибірковою поглинанням в тій чи іншій частині спектра оптичного діапазону.

Основною властивістю фотонної терапії є те, що світло видимого та інфрачервоного діапазонів спектру нормалізує роботу регуляторних систем організму людини (імунної, ендокринної та центральної нервової) [9].

Під дією світла видимого та інфрачервоного діапазонів спектру підвищується еластичність стінок кровоносних судин, підвищується еластичність еритроцитів, зростає кисень-транспортна функція крові, прискорюються процеси регенерації тканин, нормалізуються реологічні показники крові.

Світло видимого та інфрачервоного діапазонів спектру має протизапальну, протинабрякову, загуюючу і безпечну дію, нормалізує артеріальний тиск

Світло видимого та інфрачервоного діапазонів спектру не має протипоказань до застосування в якості терапевтичного чинника [5].

Фізіологічна дія світла залежить від довжини хвилі випромінювання і кількості поглинутих тканиною квантів. ІЧ випромінювання з довжинами хвиль від 0,8 мкм до 1,2 мкм має глибину проникнення в біологічні тканини до 80 мм; з довжинами хвиль від 1,5 мкм і більше має глибину проникнення до 50 мкм, тому що практично повністю поглинається водою [8].

Енергія ІЧ (довжина хвилі 830 нм) і видимого червоного (685 нм) випромінювання при поглинанні тканинами переходить, в основному, в теплоту, викликаючи посилення кровообігу, випоту і обміну речовин в тканинах, що сприяє розсмоктуванню запальних вогнищ і зменшенню інтенсивності болювого синдрому не тільки в місці безпосередньої дії на шкіру, але і у внутрішніх органах [7].

Оптичні технології, які застосовують ІЧ випромінювання, з успіхом використовуються у дерматології, стоматології, неврології, гінекології, урології, проктології; для лікування захворювань органів дихання, серцево-судинної та нервової систем, опорно-рухового апарату, а також при травмах, опіках, відмороженнях, у загальній фізіотерапії і рефлексотерапії.

Під впливом ІЧ випромінювання може з'явитися еритема, що утворюється за рахунок розширення поверхневих кровоносних судин. Деякі лікарські засоби, мазі на вазеліні, фарбники (наприклад, еозин, метиленовий синій), метаболіти, що входять до складу жовчі, гематопорфірин, тощо, здатні підвищувати чутливість організму до світла і можуть провокувати розвиток важких загальних та місцевих реакцій на ділянках тіла, що піддалися опромінюванню, набряків і навіть некрозу.

Крім фототерапії інфрачервоним випромінюванням, існують такі варіанти світлолікування:

1. УФ-терапія з використанням коротковильового (100–275 нм), середньохвильового (276–320 нм) та довгохвильового (321–400 нм) УФ-випромінювання. Це, наприклад, екстракорпоральне опромінення крові, терапія деяких захворювань шкіри, тощо.

2. Хромотерапія (кольоротерапія) — лікувальне застосування видимих світлових променів у діапазоні спектра 401–780 нм з використанням світла окремої довжини хвилі або вузької спектральної смуги. Відповідно особливостям фотобіологічної взаємодії, промені окремої частини спектрального діапазону мають різну вибірковість і глибину поглинання. Промені у спектральному діапазоні 590–760 нм максимально глибоко проникають крізь

шкіру — до 3–4 см, а в діапазоні 400–430 нм — до 0,5 см.

Зорова рецепція забезпечує розвиток психофізіологічних реакцій на різні кольори. При тому, червоне світло (630–660 нм) активізує, зігріває, підвищує емоційний тонус, усуває наслідки загальмованості, занепаду сил; оранжеве (600–630 нм) — відновлює, поживляє, зігріває, стимулює, знімає скутість, м'яко стимулює емоційний тонус і відновлює нервові процеси; жовте (570–600 нм) — укріплює, м'яко стимулює, підсилює підпорогові процеси, виводить із заціпеніння, укріплює нервову систему; зелене (520–550 нм) — врівноважує, розслабляє, заспокоює, знімає напругу, ослабляє біль, підтримує психофізичний баланс; блакитне (480–510 нм), синє (440–470 нм) — заспокоює, охолоджує, пом'якшує, прояснює свідомість, нормалізує баланс процесів збудження/гальмування, знижуючи перезбудження, концентрує внутрішню енергію; фіолетове (400–430 нм) — надихає, стимулює розумову працездатність, знижує нервові збудження, притупляє біль. Особливостями дії хромотерапії є психофізичний (седативний або збуджуючий), інформаційний, тепловий, імуностимулюючий ефекти [6].

Квазі-лазеротерапія — своєрідний варіант хромотерапії з використанням діодів, які випромінюють світло в межах того чи іншого кольору. Вона відрізняється від лазеротерапії тим, що остання використовує монохроматичне світло — наприклад, гелій-неоновий лазер має довжину хвилі тільки 632,8 нм, а червоний квазілазер випромінює світло в межах 671–780 нм.

3. Лікування білим світлом при використанні всього оптичного спектру, яке було поширене у медицині ще з кінця XIX ст. Фототерапія білим світлом з впливом на зоровий аналізатор — лікувальний метод, в якому використовується світло переважно (близько 80%) видимого діапазону (довжина хвилі 401–780 нм) і частково (15–20%) ІЧ (780–3000 нм) з виключенням УФ випромінювання. Механізм її дії — загальний для світлолікування.

Біле світло надає загальноностимулюючий вплив на залози внутрішньої секреції, включаючи епіфіз. ФТ цього виду застосовується, коли виникають сезонні та несезонні депресії; при наявності високої маси тіла (ожиріння); передменструального синдрому; інсомнії (безсоння); психовегетативних порушень; дистонічних гіперкінезів; паркінсонізму; тощо.

ФТ як варіант «найбільш природного» лікування (людина постійно знаходиться в оточенні

природного ЕМВ) веде до значних загальних та специфічних реакцій на різних рівнях організму та терапевтичної дії. Якщо ми розглядатимемо окрему клітину, то спостерігатимемо відновлення порушеного мембранного потенціалу; прискорення праці іонних pomp; відновлення активності мітохондріальних окислювальних процесів (тканинного дихання); зменшення перекисного шляху окислення; запуск нормального обміну речовин і енергії (зменшення дефіциту АТФ); стимуляція мітотичної активності, регенерації [10].

У формених елементах крові мають місце: пряма фотомодифікація з генералізацією ефекту при освітленні від 1–3% до 30% об'єму циркулюючої крові; зменшення перекисного окислення (за умов адекватної дози) у мембранах еритроцитів та лейкоцитів протягом не менш 24 годин; підвищення осмотичної стійкості еритроцитів; відновлення рецепторної функції фагоцитів; посилення фагоцитарної активності лейкоцитів, пролонгація їх функціонування; посилення вироблення антитіл і імуноглобулінів; стимуляція функції тромбоцитів.

У рецепторах відбувається регенерація при їх пошкодженні; відновлення нормальних взаємовідносин (відносної кількості) різних рецепторів; стимуляція продукції антиалергенних субстанцій. У шкірі, слизових оболонках спостерігаються: прискорення регенерації та активація епітелізації ран, ерозій, виразок та ін.; зменшення запальних процесів та алергічних реакцій; прискорення розсмоктування гематом, свіжих рубців; покращення косметичного стану; стимуляція імунокомпетентних клітин Лангерганса. У сполучній тканині — стимуляція протизапальних процесів; покращення мікроциркуляції.

На рівні внутрішніх органів має місце підвищення «працездатності» за рахунок зменшення перекисного окислення та ін. На рівні організму — відновлення і стимуляція імунної системи в цілому з підвищенням стійкості до інфекційних захворювань; ефекти протизапальний та знеболюючий; системно-регулюючий та стресовий; гормонорегулюючий та ін.

Висновок

Подальший розвиток фотонних технологій для фотомедицини є досить перспективною галуззю і вимагає більшого вкладення в неї сил і ресурсів. При цьому слід вирішувати фізико-технологічні проблеми підвищення еквівалентної енергетичної ефективності діодних джерел

світла, в яких враховуються інформаційно-біологічні аспекти, пов'язані з особливостями створення такими джерелами інформаційного потоку і його сприйняття людиною.

Розробки, направлені на ефективність оптикоелектронних джерел, є безумовно, перспективними. Реверсивне включення світлодіодних гетероструктур для реєстрації параметрів випромінювання в динамічному режимі дозволяє регулювати за допомогою вбудованого мікропроцесора інтенсивність і частоту світлових імпульсів кожного заданого кольору і забезпечити інтелектуалізацію самого процесу опромінювання. Застосування інтегральних діодних джерел світла забезпечує широкі можливості покращення здоров'я людини і є перспективним для застосування в медицині.

Література

1. Вуйцік В. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / В. Вуйцік, З. Ю. Готра, О. З. Готра, В. В. Григор'єв та інші. — Під редакцією З. Ю. Готри. — Т.3, книга 2. — Львів: Ліга-Пресс, 2007. — 367 с.
2. Кожем'яко В. П. Біомедичні оптико-електронні інформаційні системи і апарати: навчальний посібник / В. П. Кожем'яко, З. Ю. Готра, З. М. Микитюк та інші. // Частина 3. Лазерні біомедичні системи. — Вінниця: ВДТУ, 2000. — 143 с.
3. Коробов А. М., Коробов В. А., Лесная Т. А. Фототерапевтические аппараты Коробова серии «Барва». — Харьков.: ИПП «Контраст», 2008. — 176 с.
4. Кузьмич В. В. Основные принципы и особенности транскутанной «отражательной» оксиметрии // Медицинская техника. — 1993. — № 3. — С. 36–42.
5. Осинський В. І. Аналіз властивостей лазерних та напівпровідникових джерел для фототерапії / В. І. Осинський, С. В. Павлов, С. Е. Тужанський та інші. // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Применение лазеров в медицине и биологии» (Гурзуф, 7–10 октября 2009 г.). — Харьков, 2009. — С. 194–196.
6. 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.
7. Павлов С. В. Перспективи розвитку біомедичної оптики у проблемі комплексного

- діагностування та терапії людини / С. В. Павлов, А. М. Коробов, Н. В. Ганиш // Актуальные вопросы и организационно-правовые основы сотрудничества Украины и КНР в сфере высоких технологий: IV Международная научн. — практ. конференция (Киев, 10 октября 2007 г.). — Киев, 2007. — С.83–87.
8. Павлов С.В. Фізичні основи біомедичної оптики / С. В. Павлов, В. П. Кожем'яко, П. Ф. Ко- лісник та ін. — Вінниця: ВНТУ, 2010. — 152 с.
9. Прикладная лазерная медицина. Учебное и справочное пособие / Под ред. Х.-П. Берльена, Г.Й. Мюллера. — М.: Интерэксперт, 1997. — 356 с.
10. Tuchin V.V. (ed.). Handbook of Optical Biomedical Diagnostics. — Bellingham: SPIE, 2002. — 1093 p.

ЛАЗЕРНЫЕ И ФОТОННЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА ДЛЯ ФОТОМЕДИЦИНЫ

Осинский В.И., Павлов С.В., Тужанский С.Е.*, Каминский А.С., Темчишена А. В.**

Центр оптоэлектронных технологий,

**Винницкий национальный технический университет,*

кафедра лазерной общей физики и фотоники

В работе проведен анализ, классификация и выделены главные особенности применения лазерных и фотонных источников света в фотомедицине, показана перспективность их развития и использования для фототерапии.

Ключевые слова: *лазеры, светодиодные излучатели, квантовые гетеро структуры, фототерапия.*

LASER AND PHOTONIC LIGHT SOURCES FOR PHOTOMEDICINE

Osinskiy V., Pavlov S., Tuzhanskiy S.*, Kaminskiy O., Temchyshena A.**

Optoelectronic Technology Center,

**Vinnitsa National Technical University,*

Department of General Physics and Laser Photonics

There have been studied, classified and allocated the main features and application of laser and nonlaser light sources for photomedicine shown promising areas for further development of their use in phototherapy.

Keywords: *lasers, LED, quantum heterostructures, phototherapy.*