

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
СУЧАСНА ЛАЗЕРНА КОСМЕТОЛОГІЯ

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ЛОЕТм-19-1
Донець Г.О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна техніка»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ФОЕТ Курський Ю. С.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Мачехін Ю. П.
(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна техніка»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Донець Ганні Олександрівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Сучасна лазерна косметологія

затверджена наказом по університету від " 27 "жовтня 2020 р. № 1451 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 15 грудня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи косметологічні дефекти такі як; винні плями, пігментні плями, татуювання та перманентний макіяж; лазери для вирішення косметологічних проблем з довжиною хвиль: Nd:YAG – 1,06 мкм, CO₂ – 10,6 мкм, He-Ne – 633 мкм, Ar – 488 – 515 мкм, Kr – 530-676 мкм

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Застосування лазерів в косметології. 2 Фізика процесу. 3 Розвиток та тенденції в лазерній косметології. 4 Схемавзаємодії лазерного випромінювання та біотканини.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)
 Схема оптична структурна (Л1)– взаємодія лазерного випромінювання біотканини
 Демонстраційний матеріал – 11 шт.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про лазерні системи які застосовуються у косметології	02.11.20—08.11.20	Виконано
2	Дослідження сучасного стану та напрямів розвитку лазерних технологій в косметології	09.11.20—16.11.20	Виконано
3	Взаємодія лазерного випромінювання на біологічні об'єкти	17.11.20—20.11.20	Виконано
4	Аналіз отриманих результатів розрахунків	21.11.20—24.11.20	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	25.11.20—30.11.20	Виконано
6	Оформлення графічної та демонстраційної частин	01.12.20—07.12.20	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та отримання рецензії на роботу	08.12.20—13.12.20	Виконано
8	Підготовка та захист атестаційної роботи	14.12.20—17.12.20	

Дата видачі завдання 02 листопада 2020 р.

Студент _____
 (підпис)

Керівник роботи _____ доц. каф. ФОЕТКурський Ю. С.
 (підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи: 42 с., 17 рис., 2 додатки, 3 табл., 7 джерел.

ЛАЗЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ТИПОВІ ВИДИ ПАТОЛОГІЧНИХ І КОСМЕТИЧНИХ ДЕФЕКТІВ ШКІРИ, ФІЗИКА ПРОЦЕСУ, БІОЛОГІЧНА ТКАНИНА, ЛАЗЕРНИЙ ВПЛИВ, ГОЛОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ

Об'єкт дослідження — лазери косметологічного призначення.

Мета роботи — дослідження сучасного стану та напрямків розвитку лазерних технологій в косметології.

Метод дослідження — аналітичний метод дослідження.

В роботі були розглянуті і проаналізовані лазерні методики лікування захворювань шкіри, сучасні лазерні технології в косметології, а також тенденції розвитку сучасної косметології.

ABSTRACT

Explanatory note of certification work: 42p., 17fig., 2appendices, 3 tables, 7sources.

LASER TECHNOLOGIES, TYPICAL TYPES OF PATHOLOGICAL AND COSMETIC DEFECTS OF THE SKIN, PROCESS PHYSICS, BIOLOGICAL TISSUE

The object of research is cosmetic lasers.

The purpose of the work is to study the current state and directions of development of laser technologies in cosmetology.

Research method — analytical research method.

The paper considers and analyzes laser methods of treatment of skin diseases, modern laser technologies in cosmetology, as well as trends in modern cosmetology.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка аттестационной работы: 42 с., 17 рис., 2 приложения, 3 табл., 7 источников.

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ТИПИЧНЫЕ ВИДЫ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ И КОСМЕТИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ КОЖИ, ФИЗИКА ПРОЦЕССА, БИОЛОГИЧЕСКИЕ ТКАНИ, ЛАЗЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, ГЛАВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

Объект исследования — лазеры косметологического назначения.

Цель работы — исследование современного состояния и направлений развития лазерных технологий в косметологии.

Метод исследования — аналитический.

В работе были рассмотрены и проанализированы лазерные методики лечения заболеваний кожи, современные лазерные технологии в косметологии, а также тенденции развития современной косметологии.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Застосування лазерів у косметології.....	10
1.1 Лазерні технології у косметології.....	10
1.2 Типові види патологічних і косметичних дефектів шкіри.....	14
2 Фізика процесу.....	20
2.1 Взаємодія лазерного випромінювання на біологічні об'єкти.....	20
2.2 Основні фізичні ефекти.....	23
2.3 Хромофор.....	23
2.4 Біологічний склад тканини та оптичні властивості.....	25
2.5 Неабляційний лазерний вплив.....	28
3 Розвиток та тенденції лазерної косметології.....	29
3.1 Nd: YAG лазер.....	33
3.2 Олександритовий лазер.....	37
Висновки.....	41
Перелік джерел посилання.....	42
Додаток А Графічний матеріал.....	43
Додаток Б Демонстраційний матеріал.....	45

ВСТУП

Мета роботи дослідження сучасного стану та напрямів розвитку лазерних технологій в косметології.

Сучасний етап розвитку суспільства можна образно назвати “лазерною епохою”. Лазери у тій чи іншій мірі використовуються практично у всіх сферах діяльності людини[1].

Не могло обійти стороною використання лазерів і медицину, бо проблеми медицини стоять беззаперечно на першому місці серед будь-яких інших проблем людства, і для їхнього вирішення передові методи повинні впроваджуватися якомога швидше.

Медичні лазерні технології набувають широкого застосування через їхню точність, безкровність, низький рівень побічних ефектів, прогнозованість результату застосування та інші корисні характеристики. І з медицини застосування лазерів переходить до косметології.

Лазерна терапія — метод лікування, що базується на застосуванні світлової енергії лазерного випромінювання з лікувальною метою.

Сотні досліджень повністю розкривають механізми дії низькоінтенсивного лазерного випромінювання на різному рівні, що дозволяє ефективно і безпечно застосовувати лазерне світло у лікуванні і профілактиці багатьох захворювань.

Лазерні медичні технології є багатоплановими, комплексними, різноманітними.

Лазерна терапія повинна створювати вплив лазерного випромінювання на різні частини тіла: шкіру, кістки, м'язи, жирові тканини, сухожилля, внутрішні органи та інші. При цьому кожна з цих частин має складну будову. І всі тканини тіла мають свої властивості, як оптичні, так і теплофізичні, що відрізняються від властивостей інших біологічних тканин. Тому повинен змінюватися і характер впливу на них лазерного випромінювання.

Відповідно, в кожному випадку необхідно вибирати індивідуальні параметри режиму опромінення: довжину хвилі, тривалість імпульсу, потужність, частоту проходження імпульсів. І лазерні технології дають можливість встановлення параметрів проведення процедур у широких межах. Велика різноманітність властивостей біологічних тканин і широкі можливості лазерів створюють навіть можливість специфічного впливу, наприклад, черезшкірний вплив на патологічні тканини (опромінення підшкірних тканин без пошкодження шкіри).

1 ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРІВ У КОСМЕТОЛОГІЇ

1.1 Лазерні технології у косметології

Застосування лазерів в медицині почалося з впливу на поверхню тіла. Перші успішні спроби лазерних хірургічних операцій на шкірних покриттях відносяться до середини 60-х років і зараз методи лазерної хірургії застосовуються для маніпуляцій на шкірі набагато частіше, ніж на будь-яких інших тканинах. Це пояснюється наступними факторами:

- винятковою різноманітністю і поширеністю шкірної патології і різних косметичних дефектів;
- відносною простотою і прийнятною вартістю більшості лазерних операцій (в порівнянні, наприклад, з ендоскопічними процедурами) в дерматологічній практиці в зв'язку з поверхневим розташуванням об'єктів впливу.

Всі види лазерних хірургічних втручань в дерматології можуть бути умовно поділені на два типи[5]:

- а) I тип — операції, в ході яких проводять абляцію ділянки ураженої шкіри, включаючи епідерміс;
- б) II тип — операції, вибірково націлені на ліквідацію патологій структур без пошкодження цілісності епідермісу.

Для операцій II типу принциповим є питання вибору лазера, випромінювання якого селективно поглинається епідермісом. Для операцій I типу випромінювання поглинається більш-менш рівномірно в усіх прошарках шкіри.

До операцій I типу відносяться процедури, націлені на одномоментне видалення патологічного об'єкта в ході операції.

Найчастіше використовують безперервний CO₂ лазер досить високої потужності 15—25 Вт. Це забезпечує отримання щільності потужності сфокусованого випромінювання до 100 кВт/см². При таких умовах видаляють:

- колоїдні рубці;
- великі судинні пухлини;
- бородавки;
- пігментні освіти, інші патологічні утворення;
- проводять деякі маніпуляції на нігтях.

При проведенні такої операції об'єкт як би січуть променем. Крім безперервного CO₂ лазера використовують:

- імпульсний CO₂ лазер ($\tau = 200\text{—}400$ мкс) ;
- безперервний і імпульсний Nd: YAG лазери ($\lambda = 1,06$ мкм), при цьому для локалізації впливу застосовують світловод з загостреним накінецьником;

- ХеСІ лазер (308 нм) ;
- Ho: YAG лазер (2,12 мкм).

CO₂ лазер використовують також для пошарового видалення (абляції) патологічної тканини. При цьому використовують розфокусований пучок, в якому щільність потужності випромінювання менше.

Таким чином, проводиться видалення наступних поверхневих об'єктів:

- злоякісних пухлин;
- потенційно злоякісних пухлин;
- ряду доброякісних новоутворень;
- великих післяопікових шрамів;
- проводиться ліквідація запальних шкірних захворювань (грануляція шкіри обличчя);
- кіст;
- інфекційних шкірних поразок (наприклад, бородавок при імунodefіциті, рецидивних бородавок, глибоких шкірних мікозів);
- судинних уражень;
- утворень, які обумовлюють косметичні дефекти (глибоких вугрових рубців, епідермальних родимих плям і т.п.);
- ряд інших утворень.

Важко виліковні бородавки обробляються також лазером на барвнику[6]: $\lambda = 585\text{нм}$, $d_{\text{обл}} = 5\text{мм}$; $\tau = 450\text{нс}$, $\varepsilon = 6,25\text{—}7,5\text{Дж/см}^2$. При цьому зменшується число ускладнень (кровотеча, рубцювання, вторинна інфекція, рецидив) в порівнянні з CO_2 лазером.

У деяких дерматологічних операцій використовується Er: YAG лазер (ε : 10 Дж/см^2), він дозволяє проводити дуже точні, мало травматичні операції, де практично не утворюються рубці. Видаляються родимі плями, татуювання, різні пухлини.

Розфокусований пучок CO_2 лазера використовують також в суто косметичній процедурі, так званої дермобразії, тобто пошарове видалення поверхневих шарів епідермісу з метою омолодження обличчя пацієнта. Для цього рекомендується використовувати CO_2 лазер, що працюватиме в імпульсному режимі. Тривалість імпульсу повинна бути менше 1 мкс , щоб уникнути виражених термічних ушкоджень[5].

До операцій II типу відносять процедури, в ході яких домагаються лазерного пошкодження певних підшкірних утворень без порушення цілісності шкірного покриву. Ця мета досягається підбором довжини хвилі і режиму опромінення, які забезпечують поглинання випромінювання хромофором мішені, і це призводить до її руйнування або знебарвлення.

Поглинання випромінювання може здійснюватися:

- гемоглобіном еритроцитів численних і розширених судин при винних плямах;
- пігментом меланіном різних нашкірних утворень;
- пофарбованими сторонніми частинками, що вводяться під епідерміс при татуюванні або потрапляють туди в результаті інших дій.

Найчастіше використовуються лазери, що працюють у видимій частині спектру.

Для вибору оптимальних параметрів опромінення вже в 1983 р були сформульовані наступні міркування, які залишаються актуальними і зараз[5]:

—основні тканинні Хромофор (гемоглобін крові і меланін епідермальних клітин) поглинають випромінювання інтенсивніше для більш коротких довжин хвиль;

—випромінювання проникає тим глибше, чим більше довжина хвилі випромінювання (ефективність поглинання в глибоких шарах шкіри збільшується зі збільшенням λ);

—чим менше розміри мішені, тим коротшим повинен бути імпульс;

— при занадто короткому імпульсі ще до розігріву мішені відбудеться її руйнування ударною хвилею.

Відповідно до цих міркувань в кожному конкретному випадку вибираються режими впливу.

При опроміненні патологічних судин при винних плямах переважно використання лазера з досить великою довжиною хвилі, що відповідає одному з піків поглинання гемоглобіну (418, 540, 577 нм), мілісекундні тривалості імпульсу.

В цьому випадку:

— поглинання випромінювання меланіном буде незначним;

—відносно велика довжина хвилі забезпечить досить глибокий вплив;

—тривалість імпульсу досить велика, відповідає великим розмірам мішені (судини).

У разі ліквідації татуювань вибір довжини хвилі випромінювання повинен відповідати кольору частинок, тривалість імпульсу багато менше (на 4—5 порядків) — наносекунди, для того, щоб домогтися механічного руйнування частинок при мінімальному термічному пошкодженні інших структур. На рис. 1.1 показане накопичення тепла при багато імпульсній обробці.

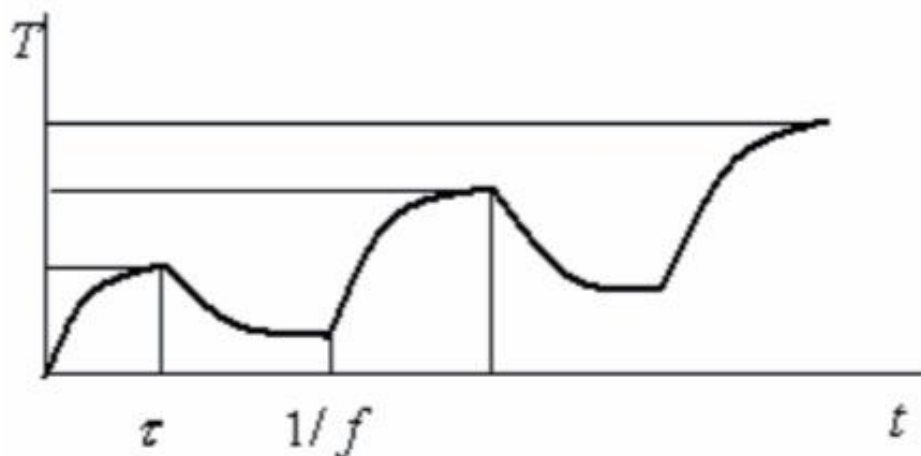


Рисунок 1.1 — Накопичення тепла при багато імпульсній обробці

1.2 Типові види патологічних і косметичних дефектів шкіри

Винні плями (PWS). Морфологічно вони представляють собою вроджену доброякісну пухлину, розташовану в товщі дерми і складається з сплетіння кровоносних судин різного калібру і ступеня кровонаповнення[1]. Вони значно розрізняються за локалізацією і розмірами, іноді досягають за площею сотень квадратних сантиметрів. Колір може варіюватися від ніжно-рожевого до темно-пурпурового. З віком ці плями темніють. Зазвичай вони розташовуються врівень зі здоровою шкірою, але іноді можуть виступати над її поверхнею. Приклад винних плям наведений на рис. 1.2.



Рисунок 1.2— Винні плями

У більшості випадків вони викликають психологічні страждання, особливо при розташуванні на обличчі. При локалізації на складках шкіри, біля очей або в кутку рота можлива травматизація ділянок винних плям або функціональні проблеми.

Пігментовані ураження шкіри. Це численна група вроджених або придбаних поразок, при яких в патологічний процес виявляються втягнутими меланін—продуктуючі клітини епідермісу. Це веснянки, пігментні (рис. 1.3), родимі і інші плями[1].



Рисунок 1.3— Пігментні плями

Їх можна лікувати блоковим або пошаровим видаленням випромінюванням CO_2 лазера або Ho: YAG лазера (операції I типу). Інший варіант — використання лазерів видимого діапазону (рубіновий, Nd: YAG з подвоєною частотою, на парах міді, на барвнику, криптонові). Випромінювання поглинається меланіном. Замість абляції має місце термічна коагуляція і некроз всіх структур пігментованого новоутворення. За ними слідує ранева реакція, яка закінчується епітелізацією і локальним рубцюванням.

Татуювання. Татуювання являє собою скупчення сторонніх включень в поверхневих шарах дерми, що додає шкірних покривів неприродну і стійку в часі забарвлення за рахунок кольору цих включень.

Розрізняють такі різновиди татуювань.

1. Аматорські татуювання (рис. 1.4) у вигляді малюнків, в яких не вирізняються художні цінності, вони наносяться аматорами.

Як барвник використовуються суспензії вугільних частинок (сажа) в воді. Суспензію вводять підшкірно голками[1].



Рисунок 1.4— Аматорське татуювання

2. Професійні татуювання(рис.1.5), монохромні або різнокольорові.

Татуювання виконуються художниками, що спеціалізуються в цій області. Як барвники використовують з'єднання[1]:

- ртуті (червоний колір);
- марганцю (пурпурний),
- хрому (зелений);
- кадмію (жовтий);
- кобальту (синій).



Рисунок 1.5— Професійне татуювання

3. Косметичні татуювання(рис. 1.6). Наносять зазвичай на шкіру губ, повік і брів з використанням одного з перерахованих вище барвників[1].



Рисунок 1.6— Косметичне татуювання(перманентний макіяж)

4. Медичні татуюванняіноді виникають за місцем підшкірного введення деяких лікарських препаратів (рис. 1.7).



Рисунок 1.7— Медичне татуювання

5. Травматичні татуювання (рис. 1.8).Є результатом попадання під епідерміс всіляких сторонніх часток невеликого розміру в результаті травм[1].



Рисунок 1.8— Травматичне татуювання

Розміри частинок барвника для татуювань складають зазвичай 150—200 мкм. Це робить неможливим видалення їх шляхом механізму фагоцитозу, так як розмір фагоцитуючої клітини багато менше. Деякі з татуювань можна видалити тільки разом з ділянкою шкіри: електрокаутером, пошаровим видаленням CO₂ лазером, особливо, якщо в складі барвника присутній кадмій (жовтий колір). В інших випадках можливе застосування більш щадного методу, що дозволяє уникнути утворення рубців: дроблення

частинок барвника до розмірів, сумісних з можливістю фагоцитозу. З цією метою використовують імпульсні лазери нс діапазону, зазвичай видиме випромінювання. Найчастіше використовують рубіновий лазер ($\lambda = 694$ нм, $\varepsilon = 4\text{—}8$ Дж /см², $\tau = 20\text{—}40$ нс). Процедуру зазвичай проводять без анестезії, після її закінчення поверхню шкіри на 15—20 хв стає білястої через скупчення під нею газоподібних продуктів абляції. Проводять 6—8 сеансів (при кольорових татуювання), з інтервалами між сеансами 6—12 тижнів.

Використовують також імпульсні лазери[6]: Nd: YAG, на Олександрію (755 нм), Nd: YAG з подвоєною частотою. При використанні лазера на Олександрію для видалення чорних і синіх татуювань можливо майже повне видалення татуювання і збереження фактури шкіри, залишається лише невелика гіпопігментація, яка зникає після сонячного засмаги. В інших випадках залишаються невеликі порушення фактури шкіри і рубцеві зміни, але багато менше, ніж при інших методиках видалення татуювань.

2 ФІЗИКА ПРОЦЕСУ ПОГЛИНАННЯ СВІТЛА ТКАНИНАМИ

2.1 Взаємодія лазерного випромінювання та біологічних об'єктів

Біотканини — це неоднорідні середовища з різним рівнем організації. Розміри клітин та елементів структури тканини різняться за розмірами — від часток нанометрів до сотень мікрометрів. В процесі поширення в неоднорідному середовищі (рис. 2.1) з поглинанням фотон змінює свій напрямок внаслідок відбиття, заломлення, дифракції або розсіювання, і може бути поглинений відповідною молекулою на своєму шляху[2].

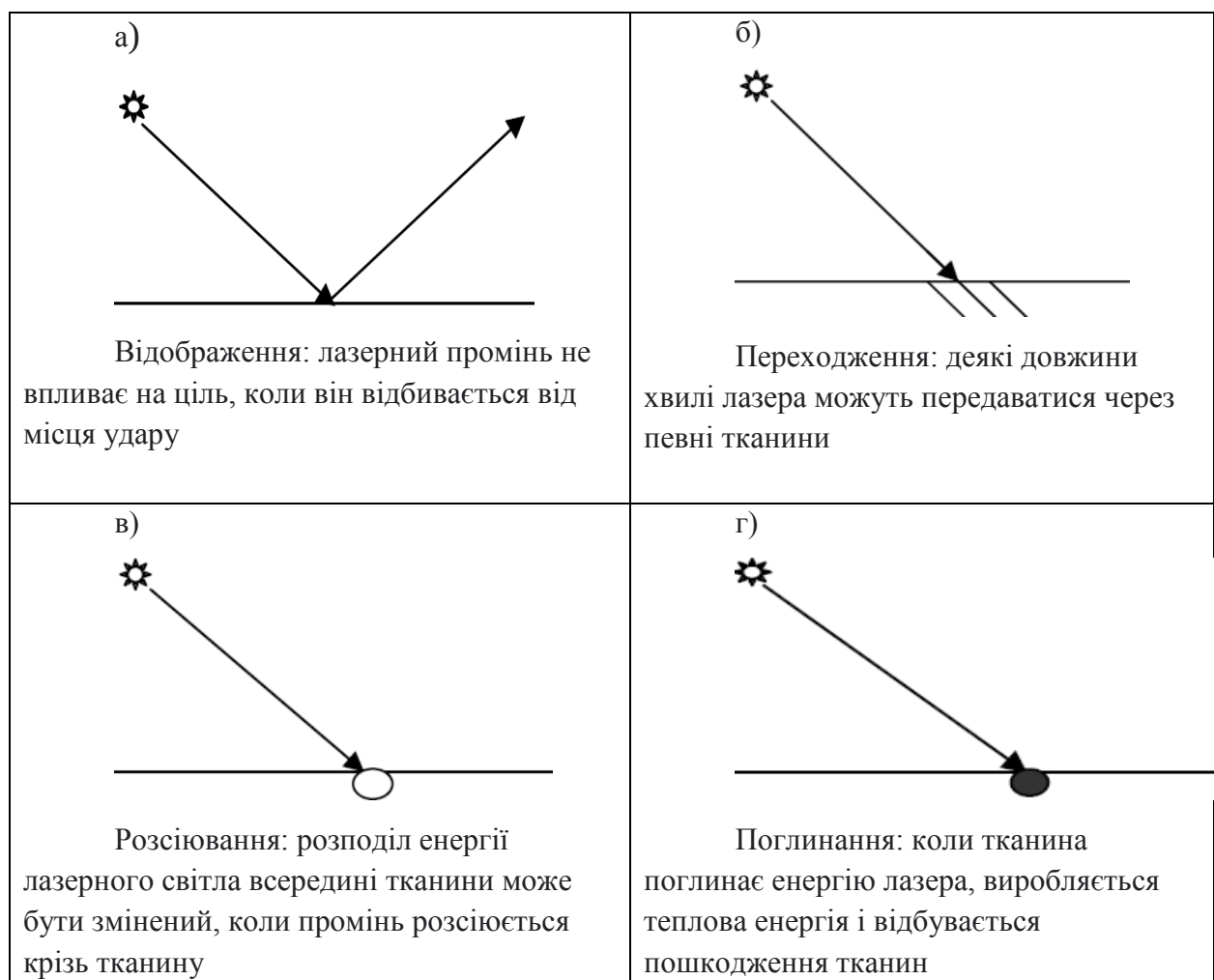


Рисунок 2.1 — Процес поширення фотона в неоднорідному середовищі

Процес поглинання світла — це перетворення світлової (променистої) енергії в якусь іншу форму енергії — зазвичай тепло — під час проходження світла через тканини. Як правило, поглинаюче середовище складається з центрів поглинання, які є частинками або молекулами, що поглинають світло.

Різні типи центрів поглинання поглинають світло в різних смугах поглинання, які визначаються як діапазони довжин хвиль, для яких середовище поглинає сильніше, ніж на сусідніх довжинах хвиль[3].

Поглинання середовища, як правило, характеризується коефіцієнтом поглинання μ_a . У нерозсіюючому середовищі промінь світла затухає з відстанню z згідно із законом:

$$I(z) = I_0 \exp(-\mu_a z), \quad (2.1)$$

де μ_a —коефіцієнт поглинання (см^{-1}) визначається як зворотна відстань z_a , на якій світло інтенсивності

$$I(z=0) = I_0 \text{ (Вт/см}^2\text{)}$$

послаблюється (за рахунок поглинання) до

$$I(z_a) = I_0 / e \approx 0,37 I_0,$$

де $e \approx 2,71828$ — «Число Ейлера».

Описані ефекти (відбиття, пропускання, розсіювання та поглинання) залежать як від світлових характеристик, так і від складу, морфології та оптичних властивостей біологічних тканин

Тепловий ефект є результатом розсіювання та поглинання енергії лазера[3].

Тепловий ефект залежить від характеристик лазера, тканин та часу взаємодії лазер-тканина, оскільки $P=W/\Delta t$:

$$A= W_A/W_I, \quad R=W_R/W_I, \quad T=W_T/W_I, \quad S= W_s/W_I, \quad (2.2)$$

де W_I — початкова енергія;

W_R — відбита енергія;

W_A — поглинена енергія;

W_T — передана енергія;

W_s — розсіяна енергія;

A — індекс поглинання;

R — індекс відбиття;

T — індекс пропускання;

S — індекс розсіювання.

Відповідно до закону про енергозбереження:

$$\begin{aligned} W_R + W_A + W_T + W_s &= W_I, \\ A + R + T + S &= 1 \quad (\text{або } 100\%). \end{aligned}$$

Спектри поглинання $A(\lambda)$ або частотне вікно.

Спектр поглинання матеріалу — це частка падаючого випромінювання, поглиненого матеріалом в діапазоні частот.

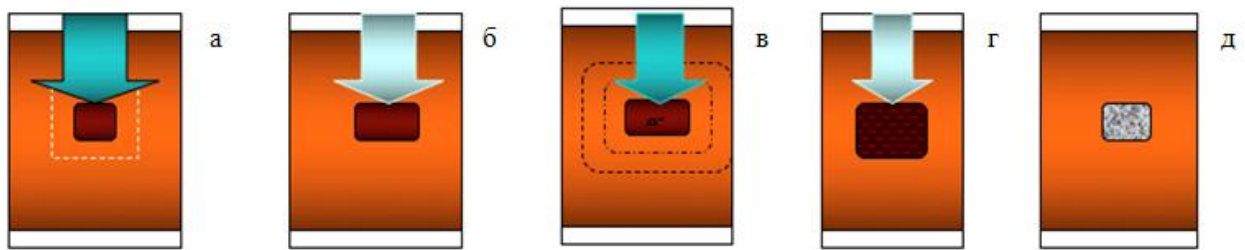
Спектр поглинання визначається атомним і молекулярним складом матеріалу.

Швидше за все поглинання випромінювання відбувається на частотах, які відповідають різниці енергій між двома квантово-механічними станами молекул.

2.2 Основні фізичні ефекти

Поглинання світла тканинами (рис. 2.2) може або спричинити випромінювання, таке як флуоресценція, або ініціювати обмеження енергії, що призводить до підвищення температури і в кінцевому підсумку руйнування тканин[3].

Усі ці явища використовуються для лазерної діагностики, терапії або хірургічного втручання, відповідно, залежно від енергії лазера або здатності тканини передавати і обмежувати світло.



а) тепло; б) фотодисоціація; в) ударна хвиля;
г) флуоресценція; д) фотохімія.

Рисунок 2.2—Поглинання світла тканинами

2.3 Хромофор

Хромофор — це частина молекули, відповідальна за її колір. Це ненасичена група, яка поглинає світло і відбиває його під певним кутом, щоб надати відтінок.

Наші очі бачать колір, який не поглинається в межах певного спектра довжини хвилі видимого світла. Хромофор — це область в молекулі, де різниця енергій між двома окремими молекулярними орбіталями знаходиться в межах видимого спектру. Отже, видиме світло, яке потрапляє на хромофор, може поглинатися, збуджуючи електрон з основного стану у збуджений[3].

У біологічних молекулах, які служать для вловлювання або виявлення світлової енергії, хромофор є тією частиною, яка викликає конформаційну зміну молекули при попаданні світла.

Основними хромофорами в біологічній тканині є:

- гемоглобін (у крові);
- меланін (у шкірі);
- вода (у всіх клітинах);
- білок.

Різні хромофори можуть поглинати світло різних діапазонів (рис. 2.3). Інфракчервоне світло поглинається переважно водою.

Видиме та ультрафіолетове світло в основному поглинаються гемоглобіном та меланіном відповідно[3].

Коли довжина хвилі зменшується у напрямку до фіолетового та ультрафіолетового кольорів, розсіювання або поглинання від ковалентних смуг у білку обмежує глибину проникнення.

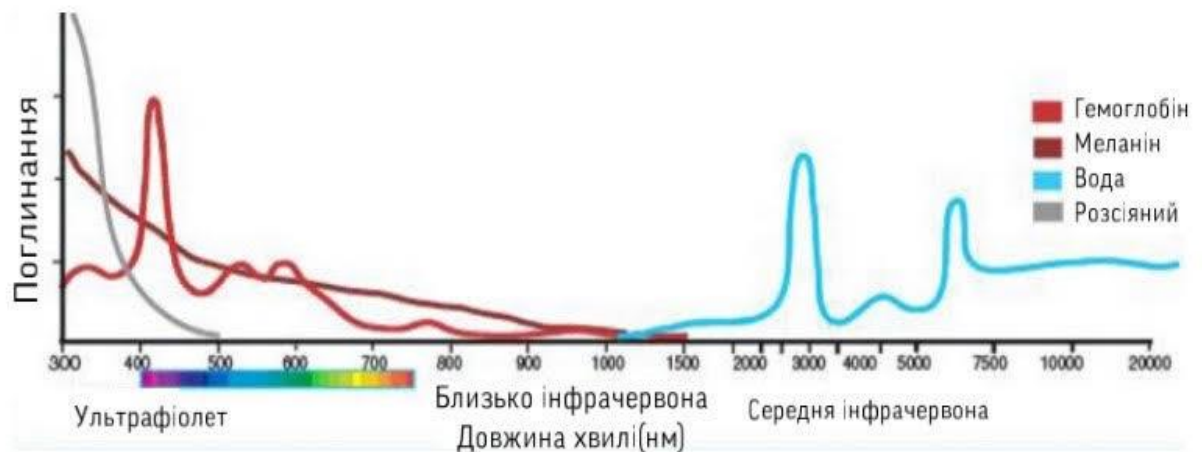


Рисунок 2.3— Спектри поглинання основного хромофору

2.4 Біологічний склад тканини та оптичні властивості

Біологічну тканину можна розділити на три групи — клітини, позаклітинний матрикс (м'яка опора) та скелет (жорстка опора) або тканини можна згрупувати як м'які тканини, опорні та тверді тканини та біологічні рідини.

М'язова тканина. Оптичні властивості м'язів залежать від орієнтації вимірювання через анізотропну природу поширення світла в м'язах[3].

Простір між м'язовими волокнами займають кровоносні капіляри більшого всмоктування. Основними поглиначами світла в м'язах є міоглобін і гемоглобін, що міститься в судинах. Спектри поглинання міоглобіну та гемоглобіну м'язів великої рогатої худоби майже рівні (рис. 2.4).

Максимуми поглинання складають 435 і 560 нм.

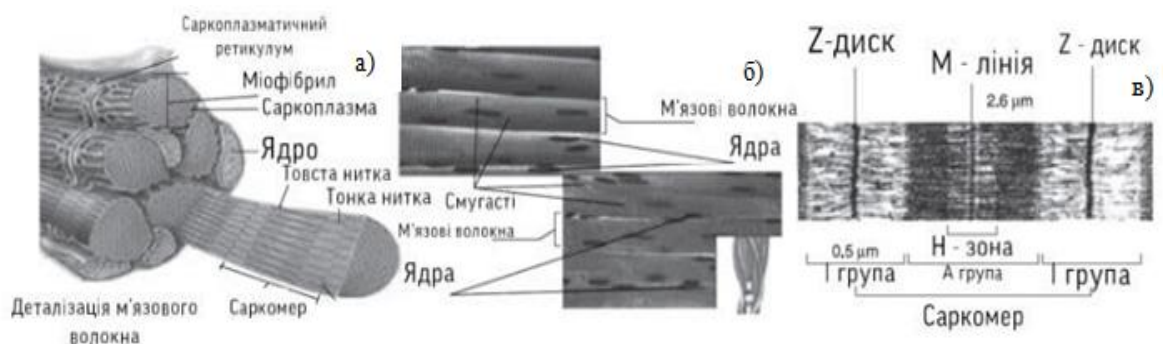


Рисунок 2.4—Спектри поглинання міоглобіну та гемоглобіну м'язів великої рогатої худоби

На рис. 2.4, апоказано схематичне зображення скелетних м'язів; на рис. 2.4, б — легка мікрофотографія скелетних м'язів людини, що показує кілька окремих м'язових волокон, розділених між собою ін'єктивною тканиною. Смугою м'язових волокон є міофібрили. Темні забарвлені форми — ядра. Збільшення в 4 рази; на рис. 2.4, в — електронна мікрофотографія розслабленого саркомеру (поздовжній розріз, 14000х).

Шкіра. Шкіра займає площу близько 2 м^2 і важить 4,5—5 кг, що становить близько 7% від загальної маси тіла. На більшій частині тіла вона товщиною 1—2 мм[3].

Шкіра складається з двох основних частин: епідермісу та дерми (рис. 2.5). Хоча епідерміс аваскулярний, він складається до 90% кератиноцитів, які функціонують як бар'єр, утримуючи шкідливі речовини і не даючи воді та іншим необхідним речовинам виходити з організму. Інші 10% клітин епідерми — це меланоцити, які виробляють і розподіляють меланін — білок, який додає пігмент шкірі та захищає тіло від ультрафіолетових променів.

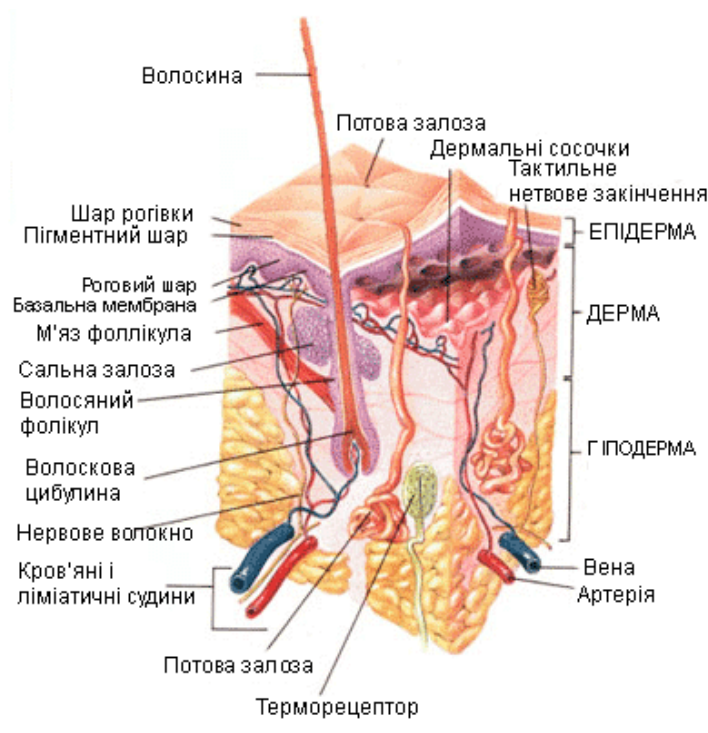


Рисунок 2.5— Схематичний розріз шкіри

Світло відбивається та/або заломлюється на поверхні шкіри, розсіюється та поглинається вздовж шляху її проходження в шкірі.

Для різних компонентів шкіри людини показник заломлення у видимому та довжині хвиль NIR коливається від значення 1,35 для інтерстиціальної рідини до 1,55 для рогового шару. У діапазоні довжин хвиль 400—1100 нм значення для його коефіцієнта розсіювання та поглинання

зменшується з довжиною хвилі. Поглинання та розсіювання епідермісу у видимому та NIR-спектральному діапазонах визначаються майже виключно вмістом меланіну та води відповідно

Спектри поглинання шкіри та компонентів шкіри: води (75%), епідермісу, меланосоми, стінки судини та цільної крові. Також представлені довжини хвиль лазерів, які зазвичай використовуються в медицині (УФ-ексимерні лазери; видимі лазери на барвниках та іонах аргону; та інфрачервоні лазери Nd: YAG, Ho: YAG, Er: YAG, CO та CO₂), що показують коефіцієнти поглинання тканини, тобто лазер-тканина коефіцієнти взаємодії для цих конкретних довжин хвиль.

Жирова тканина. У жировій тканині є клітини, отримані з фібробластів (так звані адипоцити), які спеціалізуються на зберіганні тригліцеридів (жирів) у вигляді великої краплі, розташованої в центрі. Кожен окремий адипоцит складається з ліпідів на 95% від обсягу.

Як у видимому, так і в ІЧ-діапазоні спектральні сферичні краплі ліпідів є основними розсіювачами жирової тканини. В ІЧ-діапазоні спектра основні смуги поглинання ліпідів розташовані на 1212, 1730, 1750 нм[3, 4].

Кров. Кров на сьогоднішній день є найважливішою біорідиною для лазерного лікування та діагностики. Цільна кров людини складається з 55 об.% Плазми (90% води, 10% білків) і 45 об.% Клітин (99% еритроцитів (еритроцитів) (еритроцити), 1% лейкоцитів і тромбоцитів).

Оскільки всі тканини проникають кров'ю, розподіляючись через великі судини та дрібні капіляри, всмоктувальні та розсіювальні властивості крові мають першорядне значення.

Цільна кров є сильним поглиначем у видимій NIR-зоні, однак, оскільки об'ємна частка крові в тканинах досить мала, середній коефіцієнт поглинання є помірним.

Однак, якщо джерело світла розмістити дуже близько до великої судини, практично всі фотони будуть поглинуті цілою кров'ю.

Найбільше значення поглинання крові людини виявляється при 633 нм

2.5 Неабляційний лазерний вплив

Неабляційне лазерне омолодження — це процес, при якому світлова енергія використовується для контрольованого термічного впливу на окремі компоненти дерми без пошкодження епідермісу з метою усунення вікових змін шкіри (в тому числі зморшок), а також змін, пов'язаних з впливом навколишнього середовища. Омолодження відбувається в результаті стимуляції утворення нового колагену і синтезу позаклітинної матриці. Неабляційне омолодження має також забезпечувати усунення вторинних ознак вікових змін шкіри, які не є виключно структурними (поверхневої пігментації, телеангіоектазій, гірсутизму)[4].

При неабляційному лазерному омолодженні найбільш часто застосовується випромінювання лазерів видимій та інфрачервоній (ІЧ) частини спектра. До першої групи належать Nd: YAG і Nd: YVO₄ лазери з подвоєнням частоти, КТР-лазер (зелене випромінювання, 532 нм); імпульсний лазер на барвниках жовте випромінювання, 585—595 нм); рубіновий лазер (680 нм). Їх випромінювання переважно поглинається гемоглобіном і меланіном. Ці лазери в основному використовуються для лікування вторинних вікових змін (пігментації, гірсутизму, акне).

Друга група — діодні лазери (довжина хвилі випромінювання 800—950 або 1450 нм); Nd: YAG і Nd: YVO₄ лазери (1064 нм); Nd: YAG лазер (1320 нм); Er: glass лазер (1540 нм). Їх інфрачервоне випромінювання поглинається в рівній мірі гемоглобіном, меланіном і водою (зі збільшенням довжини хвилі частка поглинання випромінювання водою істотно зростає). Застосовуються ці лазери для термічного пошкодження дерми і запуску реакції неколагенеза. До механізмів пошкодження колагену, що веде до загоєнню рани, відносять поглинання світла окремими хромофорами тканини і неспецифічне нагрівання води, навколишнього колагену, на різній глибині в залежності від показників поглинання і розсіяння променя[4].

З РОЗВИТОК ТА ТЕНДЕНЦІЇ ЛАЗЕРНОЇ КОСМЕТОЛОГІЇ

Був проведений аналіз сучасних лазерних технологій в косметології і проаналізовані актуальні лазери та виявлені тенденції їх розвитку.

Медичний лазер прекрасно зарекомендував себе, як неінвазивна методика лікування без прямого (хімічного і механічного) втручання в організм. У косметології лазерні технології застосовуються більш 30 років.

Унікальні можливості лазерного променя (джерела інтенсивного світла) дозволяють вибірково впливати на біологічні тканини людини — підшкірну клітковину, жирові відкладення, м'язи, шкіру. Промені можуть проникати в найглибші шари шкіри, що не здатні забезпечити інші технології. Під впливом лазера припиняються запальні процеси, зміцнюється імунітет, сповільнюється старіння клітин і позаклітинної сполучної тканини, поліпшується еластичність і пружність шкіри. Але, як і при будь-якому лікуванні, позитивних результатів можна досягти в разі регулярного використання лазера [4].

Сьогодні основною тенденцією розвитку лазерної косметології є розробка методик, які поєднували б ефективність, безпеку (мінімальну ймовірність ускладнень) і короткий відбудовний період. Сучасна косметологія все більше орієнтується на апаратні та ін'єкційні методики. Особливий інтерес для досліджень представляє використання радіочастот (RF-процедури) і лазерних технологій.

Погіршення екології, нездорове харчування, малорухливий спосіб життя щорічно збільшують кількість пацієнтів з чутливою шкірою. Фахівці вважають, що в найближчому часі затребуваність Догляду програм для чутливої шкіри може перевершити за популярністю навіть процедури «antiage». Зростає інтерес до професійних косметологічних процедур, розрахованих на чоловіків старше 35 років [5].

Майбутнє — за комплексними програмами по догляду за зовнішністю. І, відповідно, за універсальними косметологічними апаратами, які дозволяють фахівцеві проводити різні процедури на одній установці [6].

Велика розмаїтість розглянутих вище застосувань лазерних технологій в медицині, широкий діапазон оптичних і теплофізичних властивостей різних біологічних тканин визначають різноманітність 13 режимів, необхідних для обробки біотканини, і відповідно, велика різноманітність використовуваних лазерів. Відзначимо, що для біологічних тканин властивий резонансний характер поглинання випромінювання, що вимагає можливості забезпечення точного підбору необхідної довжини хвилі лазерного випромінювання. Тому питання вибору лазера для конкретного медичного застосування є досить принциповим.

У таблиці 3.1 та 3.2 наведені основні типи лазерів, що традиційно застосовуються в лазерній медицині.

Таблиця 3.1 — Спектри поглинання основного хромофору

Тип лазера	Довжина хвилі		Примітки
	Основна	Інші можливі	
Nd:YAG	1,06 мкм	0,53; 0,355; 0,266 мкм	
CO ₂	10,6 мкм	9,6 мкм	
He-Ne	633 нм	3,391 мкм — ІЧ 543 нм — зелений 594 нм — жовтий 604 нм — помаранчевий 612 нм — помаранчевий	$P = 100 \text{ мВт}$
Ar	488 нм — блакитний 515 нм — зелений	Ряд дискретних ліній в діапазоні 350— 30 нм (УФ — зелений)	$P = 30 \text{ Вт}$
Kr	530 нм — зелений 568 нм — жовто- зелений 676 нм — червоний	Ряд дискретних ліній в діапазоні 350 – 800 нм (УФ — ІЧ)	$P : 10 \text{ Вт}$
На барвнику	400—900 нм перебудовується в діапазоні шириною 500—100 нм для кожного лазера	—	—

Таблиця 3.2— Зображення і опис основних типів лазерів, що традиційно використовуються в лазерній медицині

Назва	Зображення	Опис	Можливості
1	2	3	4
Лазер MULTI PULSE (ASCLEPION)		Найпотужніший і безпечний карбоновий лазер для виконання малоінвазивних хірургічних втручань за рахунок ефективної коагуляції і максимального зниження крововтрати. Точність і передбачуваність впливу на тканину лазерного променя, з урахуванням контролю глибини впливу гарантує лікувальний результат і швидке загоєння	Пластична хірургія, дерматокосметологія, гінекологія, загальна хірургія, урологія, проктологія
FOTONA XS DYNAMIS		Лазерний апарат Fotona XS Dynamis — новий рівень можливостей ербієвих лазерів в косметології і дерматології. Технічні характеристики лазерів Fotona істотно відрізняються від характеристик лазерних систем інших виробників, а отже, не мають аналогів	Багаторівневе лазерне омолодження, «холодні» і «гарячі» пілінги, лазерне глибоке шліфування шкіри в цілях ліфтингу, поверхневе неабляційне омолодження (smooth-омолодження), фракційне омолодження за технологією FRAC3 (по площі), лазерна дермабразія, лазерне шліфування рубцевої тканини, фракційні методики, видалення вірусних бородавок і інших новоутворень, лазерне вагінальне омолодження, лазерне лікування нетримання сечі

Продовження табл. 3.2

1	2	3	4
Багатофункціональна лазерна система FOTONA SPYDYNAMIS		Мультифункціональна лазерна система нового покоління з технологією FT (Fotona Technology). Технологія FT — не має аналогів, абсолютно унікальна методика з високим стандартом якості. Дві лазерні системи в єдиному корпусі: Er: YAG і Nd: YAG.	Лазерна шліфовка, лазерний пілінг, лазерне smooth-омолодження, лазерний фейсліфт, лазерне ремоделювання шкіри, лазерне фракційне 4D-омолодження, лазерне лікування акне, лазерна епіляція волосся, лазерне лікування варикозу, лазерне видалення пігментації, шрамів, рубців, лазерне видалення судин, видалення родимок, бородавок, папілом
FOTONA STARWALKER MAQX		Fotona StarWalker MaQX (Словенія) — перший Q-switched лазер, який об'єднує в собі ефект взаємодії з тканинами пікосекундного лазера з рекордною енергією імпульсу наносекундного лазера. Ключові переваги Fotona StarWalker MaQX, не доступні жодній іншій лазерній системі. Вперше в одному апараті застосовані піко-, нано-, мікро- і мілі-секундний діапазони для досягнення різних ефектів взаємодії лазерного променя з тканинами	Видалення татуювань всіх кольорів, лікування акне і гіперпігментації, робота з судинними патологіями та новоутвореннями, робота з рубцями, абляційне і неабляційне омолодження, епіляція та багато інших

3.1 Nd: YAG лазер

Неодимовий лазер поєднує в собі високу ефективність і безпеку. При цьому даний апарат — багатофункціональний. Його з успіхом використовують для видалення татуювань, перманентного макіяжу (татуаж

губ, брів) і для вирішення інших естетичних завдань (лікування деяких видів пігментних плям, грибка нігтя). Існують також неодимові апарати, за допомогою яких видаляють небажане волосся на тілі та обличчі, але вони мають інший час впливу на тканину і рідко використовуються для епіляції[4].

Довжина хвилі неодимового лазерного обладнання — 1064 нм. Відмітна особливість такого обладнання — глибина, на яку проникає промінь (до 8 мм). Якщо порівнювати з іншими апаратами, то цей проникає глибше, але при цьому абсолютно не пошкоджує шкіру. Результат — татування або перманентний макіяж руйнуються, при цьому шкіра стає більш пружною та підтягнутою. Цей ефект називають "неабляційнимомолодженням". Він досягається шляхом стимуляції вироблення природного колагену при термічному впливі. Неодимовий лазер зображений на рис. 3.1.

Nd: YAG лазер відноситься до твердотільного типу. Роль активної середовища грає алюмо-ітрієвий гранат, легований іонами неодиму. Установка може працювати в безперервному і імпульсному режимі.

Все більше число салонів краси та клінік естетичної медицини віддають перевагу неодимовому лазеру. Це пояснюється його перевагами:

- затребуваність процедур, що проводяться за допомогою такого лазера (зростає клієнтська база);
- невеликі витрати часу на один сеанс (висока швидкість обслуговування клієнтів);
- передбачуваний результат курсу лазеротерапії (дозволяє підтримувати ціни на процедури на стабільно високому рівні);
- відсутні сезонні коливання попиту (неодимовим лазером можна лікувати шкіру і проводити епіляцію круглий рік);
- клієнт «прив'язаний» не до фахівця, а до салону або клініки;
- простота і зручність роботи з апаратом;
- стильний дизайн сучасних лазерних установок прикрашає інтер'єр.

Терапевтичний ефект заснований на гомогенному фототермолізу. Наддовгий імпульс з вираженим термічним компонентом

дозволяє створювати контрольований опік тканин. Він проявляється в частковій коагуляції мікросудинних русла, руйнуванні фібробластів, частковій денатурації волокон колагену[4].

У зоні дії Nd: YAG лазера виникає асептичне запалення [7]. Це створює умови для формування молодого колагену з оптимальним просторовим розташуванням, подовження його волокон. Також збільшується кількість молодих фібробластів, відбувається реваскуляризація тканин.

Довжина хвилі неодимового лазера вважається оптимальною, оскільки при високій ефективності впливу виключає будь-які побічні ефекти. За рахунок низької інтенсивності світла промінь проникає глибоко— безпосередньо до волосяного фолікула, кровоносної судини або пігменту татуювання. Колір шкіри пацієнта при цьому не грає великої ролі.



Рисунок 3.1 —Неодимовий лазер

Неодимовий SSL є одним із найбільш часто використовуваних лазерів для медичного застосування. Успіх іона Nd^{3+} + полягає в структурі його енергетичних рівнів і в спектроскопічних властивостях, придатних для генерації лазерного випромінювання[7].

Nd: YAG-лазер може генерувати чотири довжини основних хвиль: 1064, 1318, 1444, 946 нм. (рис. 3.2). З нелінійною оптикою спектр можливих генерованих довжин хвиль може бути ще більшим, починаючи від УФ і закінчуючи НІР зі змінним поглинанням у воді.

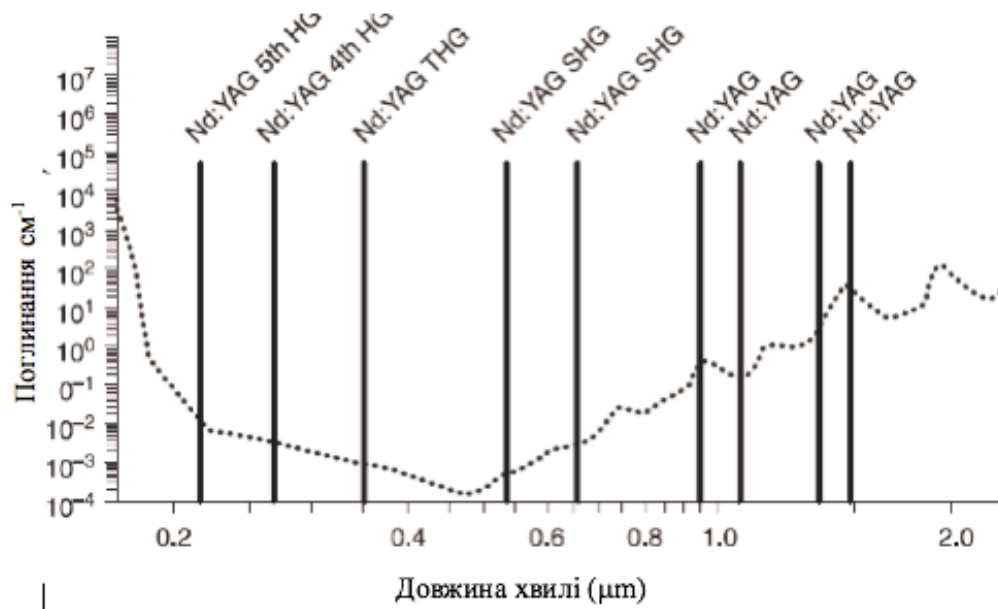


Рисунок 3.2 — Залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі

Nd: YAG лазер може бути використаний для таких процедур[6]:

- депігментація татуювань: як кустарних, так і професійно виконаних. Лазер видаляє тату різного кольору і глибини залягання в шкірі;
- депігментація перманентного макіяжу, в тому числі в анатомічно складних областях (губи, лінії брів і повік);
- корекція перманентного макіяжу, татуювань;
- усунення імпрегнації шкіри пігментом, придбаной в результаті травматичних татуювань або травм;
- видалення ксантелазм, старечих (сенільних) плям, «кавових плям» на шкірі;
- усунення родимих плям (чорних, червоних, фіолетових, коричневих);

— омолодження (антивікова терапія шкіри обличчя, шиї, рук, декольте).

Неодимова лазерна установка забезпечує:

- відсутність слідів після обробки (можливо короткочасне почервоніння шкіри);
- безболісність процедури;
- швидкість виконання (15—30 хв);
- очевидний результат (помітний вже після декількох перших сеансів курсу);
- відсутність реабілітаційного періоду як такого (пацієнт може практично відразу повернутися до повсякденних справ).

Пікосекундний Nd: YAG-лазер. Цей лазер з високою піковою потужністю включає до трьох довжин хвиль:

- $\lambda_1 = 532$ нм; $\lambda_2 = 694$ нм; $\lambda_3 = 1064$ нм;
- три активні довжини хвилі: 1064 нм, 532 нм і 694 нм (версія Plus);
- поглинання низької енергії: макс. 16 А;
- максимальна енергія до 800 мДж (1064 нм), 300 мДж (532 нм);
- короткі пікосекундні імпульси, 370 пс (532 нм) і 450 пс (1064 нм);
- швидкість повторення до 10 Гц (1064 нм і 532 нм) і до 3 Гц (694 нм).
- піко секундний ефект (тривалість імпульсу $\Delta t \approx n \times 10^{-12}$ с).

Ця система створює чистий фотоакустичний ефект для руйнування фарби та пігментації, залишаючи навколишні тканини неушкодженими.

Цей лазер завдяки своїй коротшій тривалості імпульсу та високій піковій потужності може ефективно роздрібнювати навіть найглибші пігменти шкіри та великі плями[7].

3.2 Олександритовий лазер

Олександритовий лазер — легований олександритом і хромом, — це широко регульована твердотільна вібронна система, яка працює на довжинах хвиль від 700 нм до 800 нм. (рис. 3.3)



Рисунок 3.3— Олександритовий лазер

Олександритові лазери працюють в імпульсному режимі та режимі CW, з переходом на Q та з блокуванням режиму. Основний вихід олександриту, номінально 755 нм, цінний для спектроскопічних досліджень[4].

Більш цікавий для фотохімічних застосувань— частотна подвоєна смуга від 360 нм до 400 нм, де багато реалізуються фотохімічні реакції.

Можна досягти інших довжин хвиль в ІЧ-регіоні (рис. 3.4).

Генерована ним хвиля може мати довжину до 755 нм. Цей параметр обумовлює з одного боку те, що робить промінь, а з іншого боку — його останнє місце поряд з доданими і неодимовим лазером.

Варто відзначити, що таку назву він отримав через використання в якості основи природного каменю — олександрита.

Оскільки олександритовий лазер, на відміну від неодимового, має обмежену сферу застосування (це переважно епіляція), то доцільно розглядати принцип дії саме на прикладі лазерного видалення волосся.

Як відомо, в косметології виділяють кілька фототипів шкіри в залежності від інтенсивності пігменту епідермісу і кольору волосся.

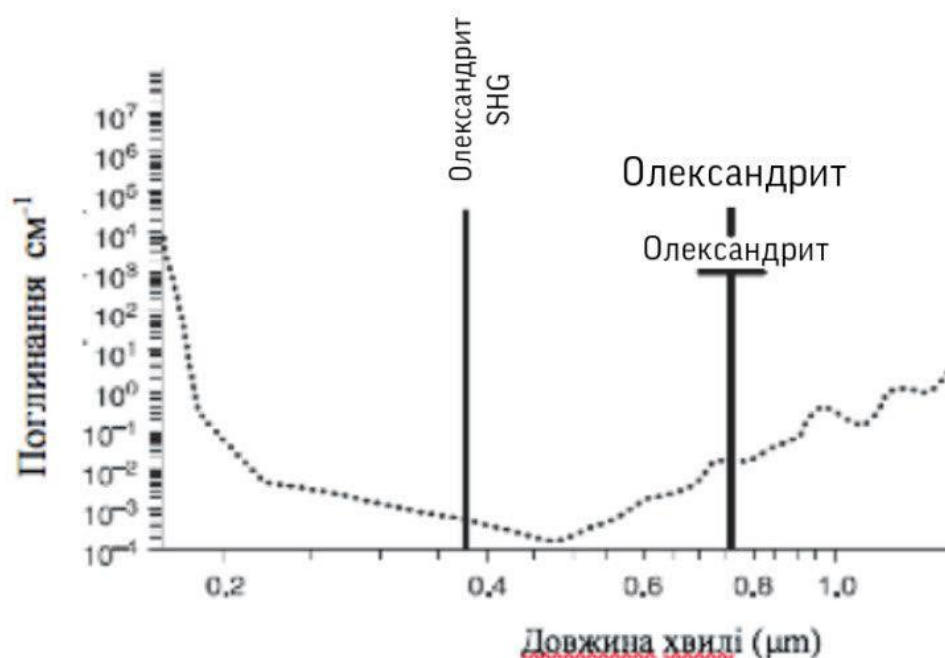


Рисунок 3.4 — Залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі

На відміну від діодного лазера, олександритовий відмінно підходить для використання при колірному типі від 1 до 4, тобто з його допомогою можна видаляти темні волоски, які ростуть на світлій шкірі[4].

Принцип дії заснований на тому, що пігментні клітини меланоцити, в яких виробляється і накопичується пігмент меланін, здатні поглинати лазерне випромінювання. Воно, в свою чергу, викликає перегрів і загибель. При цьому клітини, які містять пігмент, не зачіпаються.

Те, що робить лазер — не просто видалення волосся, а поступове зменшення кількості волосяних фолікулів. Цей же принцип дії лежить в основі видалення пігментних плям[7].

У таблиці 3.3 показані структурні компоненти Олександритового лазера.

Таблиця 3.3 — Структурні компоненти Олександритового лазера

Назва	Зображення	Опис
1	2	3
TWAIN 2940		Це лазерна насадка, яка підходить до універсального роз'єму Twain, присутнього на лазерних платформах Quanta System. Він розроблений для проведення процедур абляції, як фракційних, так і однорідних. Лазер Er: YAG 2940 нм здатний завдяки варіації параметрів імпульсу видаляти шари шкіри з мінімальними термічними пошкодженнями або виробляти більш високу коагуляцію, придатну для стимулювання вироблення колагену
TWAIN IPL		За допомогою спеціального універсального роз'єму Twain може бути оснащений накінецьниками IPL, щоб мати більшу гнучкість та універсальність у процедурах: — постійне зменшення волосся; — доброякісні пігментовані ураження; — процедури омолодження шкіри; — судинні процедури; — активні вугрі; — шліфування шкіри
Вбудований контакт SKIN COOLER		Охолоджувач шкіри повністю інтегрований в систему. У всіх протоколах, що виконуються з імпульсними лазерами, це забезпечує ефективний тепловий захист та підвищує комфорт лікування

Продовження табл. 3.3

1	2	3
SKINCRYO		Це адаптер, який інтегрує оптику імпульсного лазера з повітряним охолодженням. Цей накінецьник забезпечує найкраще зменшення болю при обробці великих площ

ВИСНОВКИ

В атестаційні роботі зроблено аналітичний огляд науково-технічної літератури, та проведений аналіз косметологічних проблем які найчастіше зустрічаються у пацієнтів.

Визначено, що лазерна методика лікування захворювань шкіри є найбільш результативною, безпечною, безболісною та застосовується у лікуванні широкого спектру захворювання шкіри, та естетичної медицини.

Був проведений аналіз сучасних лазерних технологій в косметології і проаналізовані актуальні лазери та виявлені тенденції їх розвитку.Сьогодні основною тенденцією розвитку лазерної косметології є розробка методик, які поєднували б ефективність, безпеку (мінімальну ймовірність ускладнень) і короткий відбудовний період. Сучасна косметологія все більше орієнтується на апаратні та ін'єкційні методики.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Потекаев Н. Н. Лазер в дерматологии и косметологии: учеб. Москва Россия, 2015. 289 с.
2. Гуляй П. Д. Кожные и венерические болезни: Гродно, Гродненский государственный медицинский университет, 2003. 182 с.
3. Шахно Е. А. Физические основы применения лазеров в медицине: Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2012. 129 с.
4. Харанжевский Е. В. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество: учеб. Ижевск, 2011. 175 с.
5. Федотов В. П. Аппаратная косметология: учеб. Запорожье: Просвіта, 2013. 309 с.
6. Федотов В. П. Основы практической косметологии: учеб. пособие. Запорожье: Просвіта, 2013. 312 с.
7. Курський Ю. С. Дослідження параметрів лазерного випромінювання. Радіoeлектроніка та молодь у ХХІ столітті: матер. міжнар. молод. фор. 16—18 квітня 2019 р. Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 264—265.