

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
ВИКОРИСТАННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ УФ-ДІАПАЗОНУ
У ПРОМИСЛОВИХ ТА МЕДИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи МТЮЛС-21-1
Михайло ФОКІН
(власне ім'я, прізвище)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія
оптоінформаційних та лазерних систем»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ФОЕТ Ольга АФАНАСЬЕВА
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри ФОЕТ _____
(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО
(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

Кафедра Фізичних основ електронної техніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія оптоінформаційних та лазерних систем»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Фокіну Михайлу Вікторовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Використання лазерного випромінювання УФ-діапазону у промислових та медичних технологіях

затверджена наказом університету від «23» травня 2025 р. № 408 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 23 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Фізико-технічні характеристики імпульсних УФ-лазерів.

2. Анатомічні та фізіологічні особливості структур ока. 3. Застосування УФ-лазерів у промислових технологіях

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Які фізичні властивості імпульсних ультрафіолетових лазерів роблять їх ефективними для хірургії ока? 2 Ефективність лазерної обробки в імпульсному режимі

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 25 слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про УФ лазери	07.05.25–13.05.25	Виконано
2	Дослідження фізичних основ УФ лазерів в різних галузях	14.05.25–22.05.25	Виконано
3	Дослідження та аналіз типів, конструкцій та експлуатацій лазерів	23.05.25–27.05.25	Виконано
4	Дослідження та порівняння УФ лазерів з іншими типами лазерів	28.05.25–30.05.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	31.05.25–09.06.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	10.06.25–13.06.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	14.06.25–19.06.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	20.06.25–22.06.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	24.06.25–25.06.25	Виконано

Дата видачі завдання 05 травня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. каф. ФОЕТ Ольга АФАНАСЬЕВА
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 42 с., 8 рис., 2 табл., 14 джерел, 1 додаток.

ВИМІРЮВАННЯ, ВИПРОМІНЮЮВАННЯ, ЗАСТОСУВАННЯ,
МАТЕРІАЛИ, МЕТАЛИ, ПОГЛИНАННЯ, УФ ЛАЗЕРИ, УФ
ОФТАЛЬМОЛОГІЯ.

Об'єкт дослідження – УФ лазери в офтальмології та інших сферах застосування.

Метою даного дослідження є всебічне вивчення властивостей ультрафіолетового (УФ) випромінювання, механізмів його поглинання різними матеріалами та біологічними структурами, а також аналіз можливостей і перспектив застосування УФ-лазерів у різних галузях науки, техніки та медицини. Особлива увага приділяється використанню УФ-лазерів в офтальмології, де вони знаходять широке застосування у процедурах корекції зору, лікуванні захворювань рогівки та хірургічному втручанні високої точності.

Однак сучасні технології дозволяють застосовувати УФ-випромінювання і в інших напрямках, таких як стерилізація та знезараження поверхонь, фотолітографія в мікроелектроніці, дослідження структури матеріалів, мікрообробка надтвердих речовин, створення нано- і мікроструктур, а також у криміналістиці, біотехнологіях і фармацевтичній промисловості.

Метод дослідження – теоретичний і експериментальний. Проведено аналіз властивостей УФ-випромінювання та експеримент із гравірування матеріалів лазерним променем.

Таким чином, мета роботи полягає не лише у вивченні основних фізичних та біологічних аспектів впливу УФ-випромінювання, а й у систематизації знань про його практичне застосування, а також в оцінці потенціалу розвитку нових технологій, заснованих на використанні УФ-лазерів.

ABSTRACT

Explanatory Note of the Qualification Work: 42p., 8 fig., 2 tables, 14 sources, 1 applications.

ABSORPTION, APPLICATION, MATERIALS, METALS
MEASUREMENT, OPHTHALMOLOGY, UV LASERS, UV RADIATION.

Object of the study: UV lasers in ophthalmology and other fields of application.

The aim of this study is a comprehensive examination of the properties of ultraviolet (UV) radiation, the mechanisms of its absorption by various materials and biological structures, and an analysis of the possibilities and prospects for the application of UV lasers in various fields of science, technology, and medicine. Special attention is given to the use of UV lasers in ophthalmology, where they are widely applied in vision correction procedures, the treatment of corneal diseases, and high-precision surgical interventions.

However, modern technologies allow UV radiation to be used in other areas as well, such as sterilization and disinfection of surfaces, photolithography in microelectronics, materials structure analysis, microprocessing of superhard substances, the creation of nano- and microstructures, as well as in forensics, biotechnology, and the pharmaceutical industry.

The research method is theoretical and experimental. An analysis of the effects of UV-vipromining and an experiment on the engraving of materials by laser exchange were carried out.

Thus, the purpose of the work is not only to study the fundamental physical and biological aspects of UV radiation effects, but also to systematize knowledge about its practical applications and to assess the potential for developing new technologies based on the use of UV lasers.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Аналітичний огляд УФ-лазерів.....	9
1.1 Взаємодія лазерного випромінювання з речовиною.....	9
1.2 Загальна характеристика УФ-лазерів.....	13
1.3 Принцип роботи УФ-лазера.....	16
1.4 Переваги УФ-лазерів над іншими типами лазерів.....	17
2 Застосування УФ-лазерів в обробці матеріалів.....	20
2.1 Лазерне маркування УФ-випромінюванням.....	20
2.2 Лазерне різання.....	24
2.3 Фотолітографія: створення мікросвіту на кремнієвих пластинах.....	25
2.4 Очищення поверхонь: гарантія бездоганної якості.....	28
3 Застосування УФ-лазерів в медицині.....	30
3.1 Хірургія рогівки.....	30
3.2 Лікування катаракти.....	32
3.3 Лікування глаукоми.....	33
3.4 Операції на сітківці.....	34
3.5 Ризики для очної тканини.....	35
Висновки.....	39
Перелік джерел посилання.....	41
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	43

ВСТУП

У сучасній офтальмології однією з найважливіших тенденцій є впровадження лазерних технологій, які дозволяють проводити надточні, малотравматичні та ефективні хірургічні втручання. Серед них особливе місце займають імпульсні ультрафіолетові лазери, зокрема ексимерні лазери, які відкрили нові можливості у лікуванні рефракційних порушень зору та інших патологій очей. Ці лазери працюють у короткохвильовому ультрафіолетовому діапазоні (близько 193 нм), що забезпечує надзвичайно точне видалення мікроскопічних шарів тканини без нагрівання або пошкодження навколишніх клітин. Такий механізм дії дозволяє зберегти архітектоніку ока, зменшити ризик ускладнень і значно прискорити процес загоєння після хірургії.

Основна перевага імпульсних ультрафіолетових лазерів полягає в їхньому фотохімічному ефекті: під дією коротких імпульсів лазерного випромінювання відбувається молекулярне руйнування тканини, без істотного теплового впливу. Завдяки цьому метод лазерної абляції став особливо популярним у рефракційній хірургії – галузі, що займається виправленням короткозорості, далекозорості та астигматизму.

Найпоширенішими процедурами є LASIK, PRK і LASEK, які базуються на використанні ексимерного лазера для remodelювання форми рогівки з метою покращення зорової функції. Ці процедури вже давно зарекомендували себе як безпечні, ефективні та прогнозовані методи відновлення зору.

Крім корекції рефракційних порушень, ультрафіолетові імпульсні лазери застосовуються й у лікуванні інших офтальмологічних станів. Наприклад, при кератоконусі лазерна терапія у поєднанні з колагеновим крослінкінгом сприяє укріпленню структури рогівки. Також лазери використовуються при вторинній глаукомі – у процедурі трабекулопластики або трабекулостомії для покращення відтоку внутрішньоочної рідини, що допомагає знизити внутрішньоочний тиск. У випадках катаракти лазери дозволяють виконувати надточні розрізи рогівки та капсули кришталика, покращуючи якість операції та зменшуючи ризик

ускладнень. Такі універсальні властивості роблять ультрафіолетові імпульсні лазери незамінним інструментом в арсеналі офтальмолога.

Наукові дослідження та клінічні випробування продовжують підтверджувати ефективність і безпечність використання ексимерних лазерів. Розробляються нові модифікації лазерних установок, які дозволяють ще точніше контролювати глибину і площу впливу. Такі технології створюють передумови для персоналізованої хірургії – коли параметри втручання налаштовуються індивідуально під кожного пацієнта, з урахуванням особливостей його очей та зорових потреб. Більше того, мінімальна інвазивність процедур на основі ультрафіолетового лазера дозволяє проводити операції амбулаторно, без необхідності госпіталізації, що робить їх доступними для широких верств населення.

Отже, впровадження імпульсних ультрафіолетових лазерів в офтальмологічну хірургію стало справжнім проривом, що суттєво підвищив рівень безпеки, ефективності та комфорту хірургічного втручання. Завдяки таким технологіям лікарі отримали змогу не лише відновлювати зір мільйонам людей, а й робити це з максимальною точністю та мінімальними ризиками.

Перспективи подальшого розвитку лазерних систем відкривають нові горизонти для хірургічного лікування офтальмологічних захворювань і зміцнюють позиції лазерної медицини як провідного напрямку сучасної офтальмології.

Усе це свідчить про те, що імпульсні ультрафіолетові лазери стали не просто технічним інструментом, а й повноцінною складовою високоточних медичних технологій XXI століття. Вони дозволяють досягти унікального балансу між високою ефективністю та мінімальним ризиком для пацієнта, що є надзвичайно важливим у делікатній сфері офтальмохірургії. Завдяки постійному вдосконаленню обладнання та методик, лазерна хірургія очей поступово переходить на новий рівень – рівень персоналізованої медицини, де враховується кожна анатомічна особливість пацієнта.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД УФ-ЛАЗЕРІВ

1.1 Взаємодія лазерного випромінювання з речовиною

Основою лазерних промислових та медичних технологій є тепловий та/або фізико-хімічний вплив лазерного випромінювання на матеріал, що обробляється. Під дією випромінювання, що поглинається матеріалом, на його поверхні і в об'ємі можуть проходити різні теплофізичні процеси [1–3].

Більшість сучасних лазерних технологій засновані на тепловому ефекті випромінювання. Коли лазерний промінь падає на поверхню матеріалу, певна частина випромінювання відбивається нею, а інша частина проникає глибоко в матеріал і поглинається ним. Поглинання випромінювання речовиною в першому наближенні описано законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$q(x) = q_0(1 - R)\exp(-\alpha x), \quad (1.1)$$

де $q(x)$ – щільність потужності випромінювання в речовині на відстані x від поверхні,

q_0 – щільність потужності падаючого випромінювання;

R – коефіцієнт відбиття поверхні;

α – показник ослаблення світла в речовині.

Тепло, що поглинається, за рахунок теплопровідності поширюється вглиб матеріалу. Далі відбувається подальше нагрівання матеріалу, а після того, як температура перевищить першу критичну, починається плавлення. При подальшому лазерному впливі продовжується процес нагрівання, цього разу – до другої критичної, температури випаровування (кипіння). Після її досягнення починається процес випаровування речовини з поверхні, що обробляється. Це супроводжується іонізацією забруднень та поверхневих домішок, завжди присутніх в тому чи іншому матеріалі.

Якщо інтенсивність випромінювання занадто висока, випаровування створює високотемпературну непрозору плазму. Плазмова хмара поглинає

лазерне випромінювання, що падає, екранує поверхню зразка і таким чином перешкоджає подальшому впливу променя на речовину. Цього негативного явища при лазерній обробці матеріалів слід уникати [3].

Тому необхідно враховувати теплофізичні аспекти лазерного нагрівання при розробці будь-якого технологічного процесу, що здійснюється за допомогою лазера.

Фотохімічна дія лазерного випромінювання – це процес, у якому поглинена лазерна енергія викликає хімічні зміни у речовині. Це може включати зміну швидкості хімічних реакцій, фотодисоціацію молекул, а також ініціювання або зміну ходу складних хімічних процесів. У медицині та косметології цей ефект використовується, наприклад, у фотодинамічній терапії, де лазерне випромінювання активує фотосенсибілізатори, які потім руйнують ракові клітини або бактерії. Фотохімічна дія лазерного випромінювання – це процес, у якому поглинена лазерна енергія викликає хімічні зміни у речовині. Це може включати зміну швидкості хімічних реакцій, фотодисоціацію молекул, а також ініціювання або зміну ходу складних хімічних процесів. У медицині та косметології цей ефект використовується, наприклад, у фотодинамічній терапії, де лазерне випромінювання активує фотосенсибілізатори, які потім руйнують ракові клітини або бактерії.

Лазерне випромінювання, поглинене речовиною, перетворюється на енергію збуджених електронних станів молекул. Ці збуджені стани можуть бути нестабільними та призводити до різних хімічних змін, таких як розрив хімічних зв'язків або перенесення атомів та груп атомів.

Вибір лазера для проведення певного виду обробки визначається специфікою впливу лазерного випромінювання на даний матеріал і особливостями поставленого технологічного завдання. Для маркування неметалічних матеріалів підходить нагрівання нижче температури розм'якшення, тому що основним механізмом є фотохімічний. Термічна обробка потребує в залежності від очікуваного результату нагрівання до температур нижче або вище температури плавлення. Лазерне гартування при нагріванні

вище температури фазових перетворень, але нижче температури плавлення, тобто гартування з твердого стану, дозволяє провести зміцнення сталевих виробів із збереженням геометричних характеристик поверхні, що дуже важливе для прецизійних деталей, наприклад, елементів паливної апаратури [4–7].

Лазерне різання металів відбувається при нагріванні вище температури плавлення, а гравірування – вище температури випаровування. Тому головною характеристикою лазера, що використовується в таких технологіях, є його потужність. Для імпульсних лазерів розглядають потужність в імпульсі і середню потужність, яка залежить від тривалості та частоти проходження імпульсів, а також від когерентності, спрямованості, монохроматичності і поляризації випромінювання [2, 8].

Характер процесів, що були описані, а отже, і результат цієї взаємодії значною мірою залежать від коефіцієнта поглинання матеріалу на довжині хвилі випромінювання лазера.

Традиційно в промисловості для обробки матеріалів застосовуються лазерні джерела з випромінюванням ближнього ІЧ- (твердотільні та волоконні лазери) та далекого ІЧ-діапазонів (СО₂-лазери). Вибір типу джерела залежить від коефіцієнта поглинання випромінювання того чи іншого матеріалу на певній довжині хвилі: поглинальна здатність металів зменшується із зростанням довжини хвилі (рис. 1.1), для неметалів ця залежність більш складна (рис. 1.2) і характеризується високим поглинанням в області далекого ІЧ- та для деяких матеріалів і УФ-діапазонів.

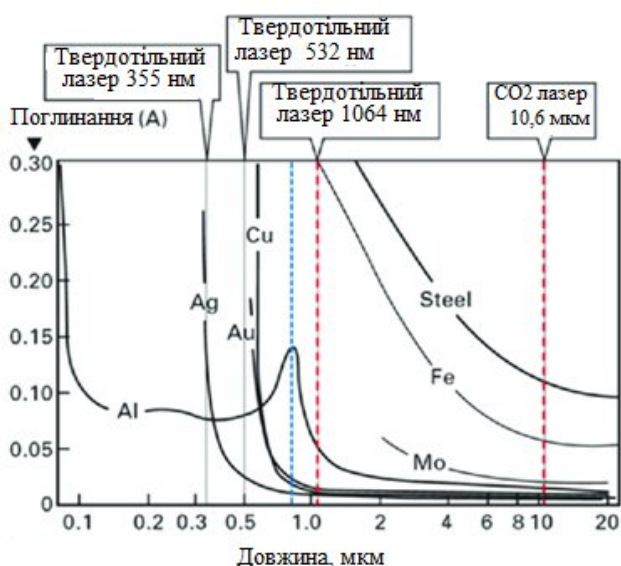


Рисунок 1.1 – Коефіцієнт поглинання деяких металів в залежності від довжини хвилі випромінювання [4]

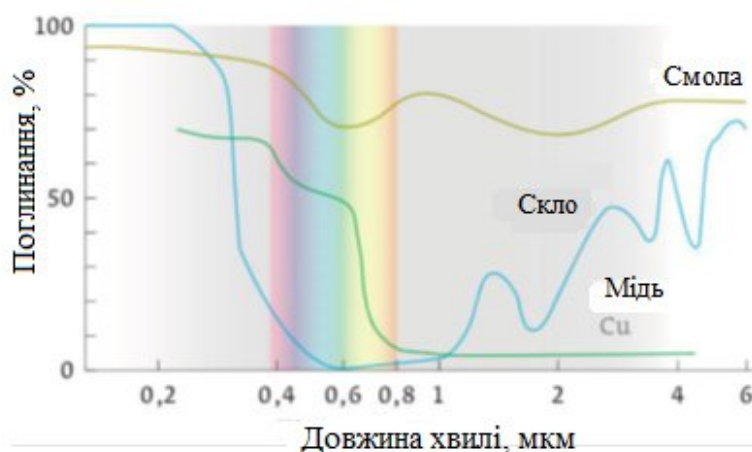


Рисунок 1.2 – Спектр поглинання матеріалів, що в основному використовуються для друкованих плат [4]

Отже, обробка металів з використанням волоконних ($\lambda = 1,53 - 1,56$ мкм та $1,064$ мкм) та твердотільних Nd:YAG-лазера або Nd:YVO₄-лазерів, що мають довжину хвилі $\lambda = 1,064$ мкм, більш ефективна в порівнянні з обробкою CO₂-лазером, що має довжину хвилі $\lambda = 10,6$ мкм [3–5]. Використання

випромінювання з ще меншою довжиною хвилі, наприклад, УФ, обмежується малою потужністю УФ-лазерів або їх високою вартістю [6].

Лазерне випромінювання УФ-діапазону можна одержати за рахунок генерації третьої гармоніки, що реалізується як каскадний процес. Частотне потроєння – це процес нелінійного перетворення частоти, де одержувана оптична частота втричі перевищує частоту вхідного лазерного променя.

Для генерації третьої гармоніки (355 нм) у твердотільному лазері з діодним накачуванням використовуються нелінійно-оптичні явища. Генерація реалізується за такою схемою: основна довжина хвилі $\lambda = 1064$ нм збуджує на першому нелінійному кристалі титаніл-фосфату калію (KTiOPO_4) другу гармоніку з $\lambda = 532$ нм (відповідної зеленої області спектру). Кристали титаніл-фосфату калію фізично і хімічно інертні, мають високу нелінійно-оптичну ефективність. Ці нелінійні кристали найчастіше використовуються для подвоєння частоти випромінювання твердотільних лазерів. Потім випромінювання основний і другий гармонік поєднується на другому нелінійному кристалі, в результаті чого на виході випромінюється третя гармоніка з довжиною хвилі 355 нм.

1.2 Загальна характеристика УФ-лазерів

УФ-лазери (ультрафіолетові лазери) – це тип лазерів, які випромінюють світло в ультрафіолетовому (УФ) діапазоні електромагнітного спектра, зазвичай у межах довжин хвиль від 10 нм до 400 нм. Це випромінювання має вищу енергію, ніж видиме світло, завдяки коротшій довжині хвилі, і саме ця особливість робить УФ-лазери унікальними та дуже корисними в багатьох сферах.

Основні Характеристики:

1) довжина хвилі: УФ-лазери працюють у діапазоні від 193 нм до 355 нм. Це дуже короткі хвилі, завдяки чому досягається висока точність і роздільна здатність при обробці матеріалів;

2) енергія фотонів: фотони УФ-випромінювання мають велику енергію (понад 6 еВ при 193 нм), що дозволяє розривати хімічні зв'язки – тому лазер легко випаровує матеріал;

3) мінімальний тепловий вплив: завдяки «холодній абляції», УФ-лазер майже не нагріває навколишню область, що важливо для точних і безпечних процедур.

4) імпульсний режим: УФ-лазери часто працюють у наносекундному або пікосекундному режимі — це дозволяє точно дозувати енергію й обробляти матеріал пошарово;

5) висока точність: через малу довжину хвилі промінь можна фокусувати до мікронного розміру, тому лазер підходить для мікрообробки, літографії та хірургії.

Основна особливість УФ-лазерів полягає у високій точності та здатності взаємодіяти з матеріалами на мікро- та нано-рівні. Завдяки цьому вони широко використовуються в науці, медицині, промисловості, а також у криміналістиці, мікроелектроніці та біотехнологіях. Наприклад, у виробництві мікросхем або друкованих плат потрібна надзвичайно висока точність, і саме УФ-лазери здатні створювати ультратонкі лінії та отвори, не пошкоджуючи навколишній матеріал. У медицині УФ-лазери застосовують у процедурах фототерапії, для стерилізації інструментів, а також у хірургічних втручаннях, де потрібна висока точність та мінімальна інвазивність. Крім того, вони можуть бути використані для лікування певних захворювань шкіри, таких як псоріаз чи вітіліго.

Іншою важливою сферою застосування є спектроскопія – метод дослідження речовин за допомогою аналізу їхньої взаємодії зі світлом. Завдяки високій енергії, УФ-лазери здатні збуджувати молекули та атоми до станів, недосяжних за допомогою видимого або інфрачервоного світла. Це дозволяє отримати більш точну та детальну інформацію про структуру речовини. УФ-лазери також широко використовуються для зчитування й аналізу біомолекул, таких як ДНК або білки. У галузі безпеки та криміналістики УФ-лазери можуть виявляти сліди, невидимі для ока – наприклад, кров, відбитки пальців або інші

біологічні рідини, що світяться під дією ультрафіолету. Ці властивості також активно використовують у системах ідентифікації, перевірки справжності документів, купюр або предметів мистецтва.

Ще однією унікальною рисою УФ-лазерів є так зване «холодне випаровування» – явище, при якому матеріал видаляється без теплового впливу. Це особливо важливо для обробки крихких, термочутливих або надзвичайно тонких матеріалів, які можуть бути зруйновані навіть мінімальним нагріванням. Завдяки цьому УФ-лазери є незамінними в нанотехнологіях та виготовленні пристроїв з високою щільністю елементів. Створення УФ-лазерів може базуватися на різних технологіях. Наприклад, газові лазери, такі як ексимерні (на основі сумішей благородних газів і галогенів), здатні генерувати потужне імпульсне випромінювання в УФ-діапазоні. Також використовуються твердофазні лазери з нелінійними кристалами, які за допомогою множинного перетворення частоти (гармонік) дозволяють отримати короткохвильове УФ-випромінювання. УФ-лазери можуть працювати як в імпульсному, так і в безперервному режимі, залежно від потреб користувача. Не варто забувати і про небезпеку, пов'язану з використанням УФ-лазерів. Через високу енергію випромінювання вони можуть пошкоджувати шкіру, очі та навіть викликати мутації на клітинному рівні, тому робота з ними вимагає суворого дотримання техніки безпеки, використання захисного одягу, окулярів та спеціального обладнання. Загалом, УФ-лазери (зображення на рисунку 1.3 [5]) – це потужний інструмент, який відкриває нові можливості для науки, техніки та медицини. Їх унікальні фізичні властивості дозволяють проводити високоточні процеси на мікроскопічному рівні, що є ключовим у сучасних технологіях майбутнього.

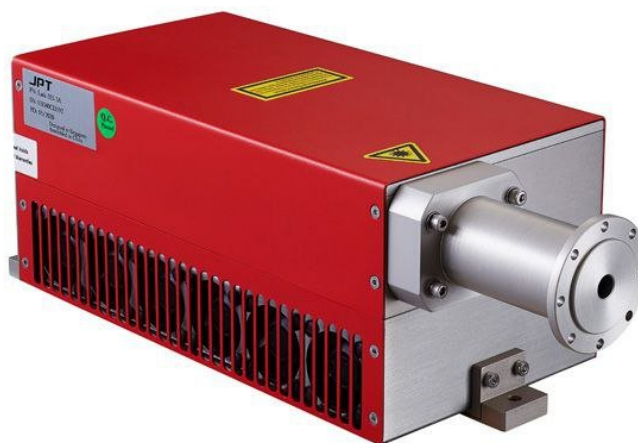


Рисунок 1.3 – Зображення УФ-лазера

1.3 Принцип роботи УФ-лазера

Ультрафіолетовий лазер генерує когерентне випромінювання в ультрафіолетовому діапазоні (від 10 нм до 400 нм). Його дія базується на фізичному явищі стимульованого випромінювання. Усе починається з того, що зовнішнє джерело енергії (наприклад, електричний розряд або інше лазерне випромінювання) збуджує частинки (атоми, молекули або іони) в активному середовищі. У результаті цього збудження частинки переходять на вищий енергетичний рівень. Коли створюється стан інверсії населеності – тобто більше частинок перебувають у збудженому стані, ніж у основному – виникає можливість для лазерного випромінювання.

Після цього запускається процес стимульованої емісії: коли одна збуджена частинка стикається з фотоном певної енергії, вона випускає ще один фотон з такою ж довжиною хвилі, напрямком та фазою. Цей процес лавиноподібно наростає, коли фотони багаторазово відбиваються між дзеркалами, що утворюють оптичну резонаторну порожнину. Одне з дзеркал напівпрозоре – саме через нього виходить сформований лазерний промінь. Щоб отримати ультрафіолетове випромінювання, зазвичай використовують або спеціальні активні середовища, які самі випромінюють в УФ-діапазоні (наприклад,

ексимерні газові суміші), або застосовують нелінійні кристали для перетворення довгих хвиль (наприклад, 1064 нм від Nd:YAG-лазера) у коротші – через подвоєння, потроєння або учетверення частоти.

1.4 Переваги УФ-лазерів над іншими типами лазерів

УФ-лазери мають переваги, яких немає в інших лазерів:

1) вища точність і роздільна здатність обробки УФ-випромінювання має дуже коротку довжину хвилі (наприклад, від 193 нм до 355 нм), а отже, і меншу дифракцію. Це дозволяє фокусувати промінь у дуже малу точку – до мікронів або навіть субмікронів. Формула, що показує залежність роздільної здатності від довжини хвилі [8]:

$$d \approx \frac{\lambda}{2 \times NA}, \quad (1.2)$$

де d – мінімальний розмір фокусування;

λ – довжина хвилі;

NA – числова апертура лінзи.

Чим менше λ , тим менше d , тобто вища точність. УФ-лазери тут значно випереджають ІЧ-лазери (1064 нм), CO₂-лазери (10 600 нм) чи діодні (від 800 нм до 980 нм);

2) мінімальний тепловий вплив (холодна абляція) УФ-фотони мають достатньо енергії для фотохімічної абляції – тобто руйнування зв'язків у матеріалі без значного теплового впливу. Це дозволяє обробляти делікатні матеріали (біотканини, полімери) без оплавлення, чого не можна досягти з ІЧ-лазером.

Приклад: енергія фотона визначається як [8]:

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1.3)$$

де h – стала Планка ($6,626 \times 10^{-34}$ Дж·с),

c – швидкість світла (3×10^8 м/с),

λ – довжина хвилі.

Чим коротша хвиля, тим більша енергія фотона. У 193 нм – $\sim 6,4$ еВ, а в 1064 нм (Nd:YAG) – лише $\sim 1,17$ еВ. Саме тому УФ-фотони можуть без нагріву розривати молекули (рис. 1.4) [9];

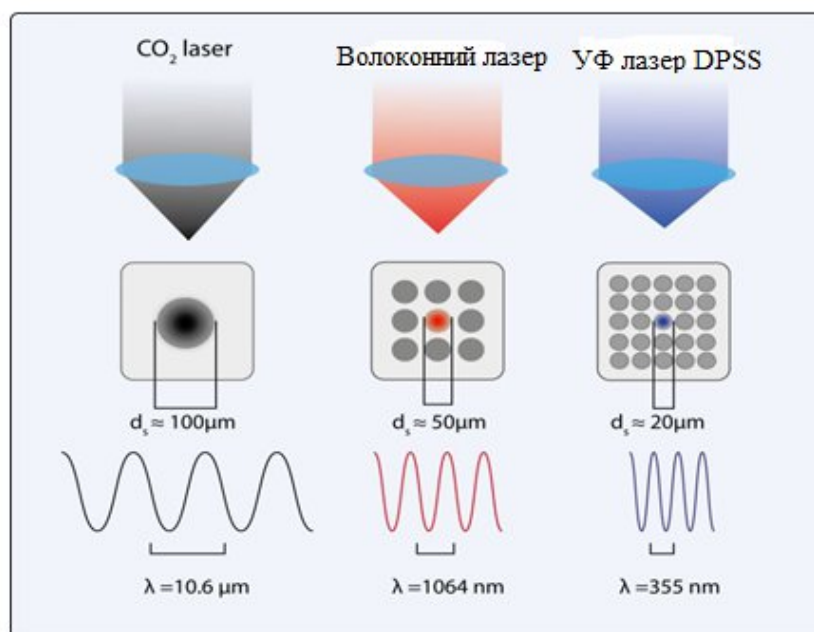


Рисунок – 1.4 – Порівняння УФ-лазерів з іншими

3) обробка широкого спектра матеріалів УФ-лазери здатні ефективно працювати з прозорими, керамічними, органічними й полімерними матеріалами, які погано взаємодіють з довгохвильовим випромінюванням. Наприклад, багато пластиків прозорі для ІЧ-лазера, але чудово поглинають УФ-випромінювання;

4) висока якість обробки країв. Завдяки точному і не термічному впливу, краї після різання чи мікрообробки залишаються рівними, без задирок, тріщин чи зон теплового впливу. Це важливо у мікроелектроніці, медицині й оптиці;

5) ідеальні для мікро- і наноструктурування Мала довжина хвилі та імпульсний режим дозволяють створювати гравіювання й отвори діаметром у

кілька мікронів або менше. Це недосяжно для довгохвильових лазерів без складної оптики чи додаткових методів;

б) можливість стерилізації та знезараження УФ-фотони можуть руйнувати ДНК/РНК мікроорганізмів, тому такі лазери ефективні не тільки в технічних, а й у біомедичних застосуваннях (лазерна дезінфекція, знезараження інструментів тощо). Якщо хочеш, можу зробити ще порівняльну таблицю УФ-, ІЧ- і видимих лазерів або підготувати приклади застосувань у різних сферах.

2 ЗАСТОСУВАННЯ УФ-ЛАЗЕРІВ В ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ

У сучасному світі, де технологічний прогрес нестримно рухається вперед, а потреби у все більш досконалії електроніці зростають експоненціально, роль інноваційних технологій обробки матеріалів стає абсолютно критичною. Серед таких передових інструментів особливо виділяються ультрафіолетові (УФ) лазери. Вони є не просто інструментом, а справжнім наріжним каменем, що забезпечує надзвичайну точність та бездоганну чистоту обробки матеріалів, що є абсолютно незамінним для виробництва електроніки та, зокрема, мікроелектроніки.

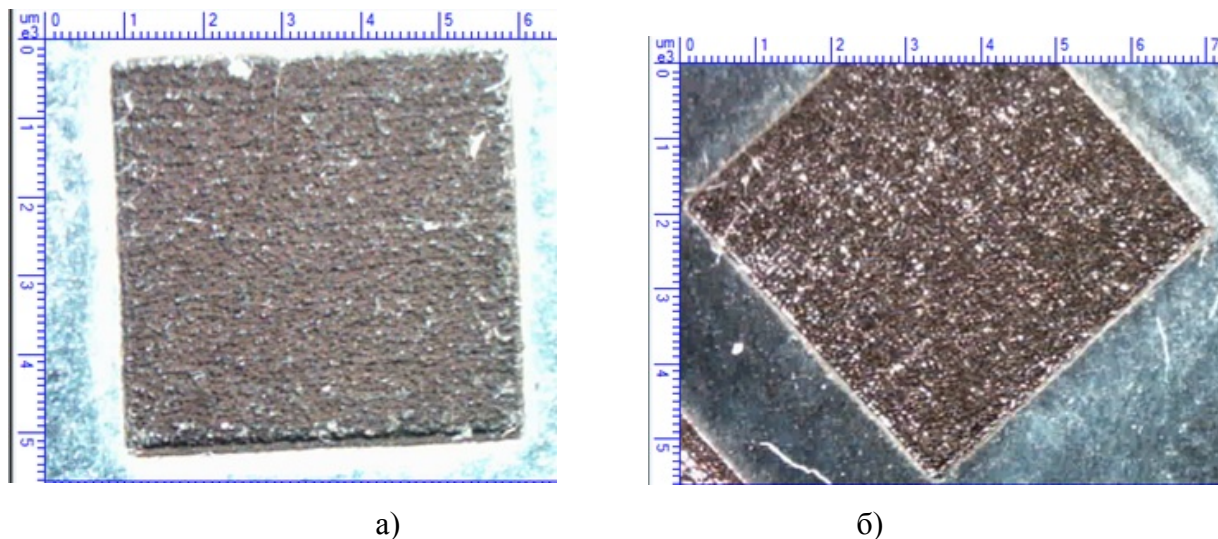
2.1 Лазерне маркування УФ-випромінюванням

Лазерне маркування являє собою нанесення текстових і графічних зображень на поверхню виробу під впливом високоінтенсивного лазерного випромінювання. Маркування деталей, вузлів або кінцевого виробу дозволяє виробнику контролювати обсяг продукції, що випускається, її якість і просувати свою торгову марку. Одним із методів маркування продукції є гравірування – видалення частини матеріалу під дією сфокусованого випромінювання. Гравірування найчастіше наносять на метал (зазвичай на вироби з вуглецевої і нержавіючої сталі), кераміку, оргскло і акрил. При цьому видаляється шар матеріалу: до 0,5 мм при художньому або 3,5 мм при глибокому гравіруванні.

Маркування стає добре видимим, оскільки падаюче світло розсіюється в каналах поруч з немаркованим матеріалом. Технологія отримала широке застосування у всіх галузях виробництва. У мікроелектроніці воно застосовується для маркування заготовок, виробів і оснащення на всіх стадіях розробки і виробництва, наприклад, для кремнієвих пластин [4].

В кваліфікаційній роботі проводилось дослідження впливу довжини хвилі лазерного випромінювання на гравірування металів. В результаті експериментів із застосуванням Nd:YAG-лазера ($\lambda = 1,06$ мкм) було гравірування поверхні з

частковим оплавленням. На рисунку 2.1 наведений вигляд поверхні, обробленої при середній потужності 17 Вт і швидкості обробки від 5 мм/с до 20 мм/с. Частота проходження імпульсів змінювалась від 20 кГц до 2 кГц.



- а) частота проходження імпульсів 4 кГц, швидкість обробки 5 мм/с;
 б) частота проходження імпульсів 12 кГц, швидкість обробки 20 мм/с.

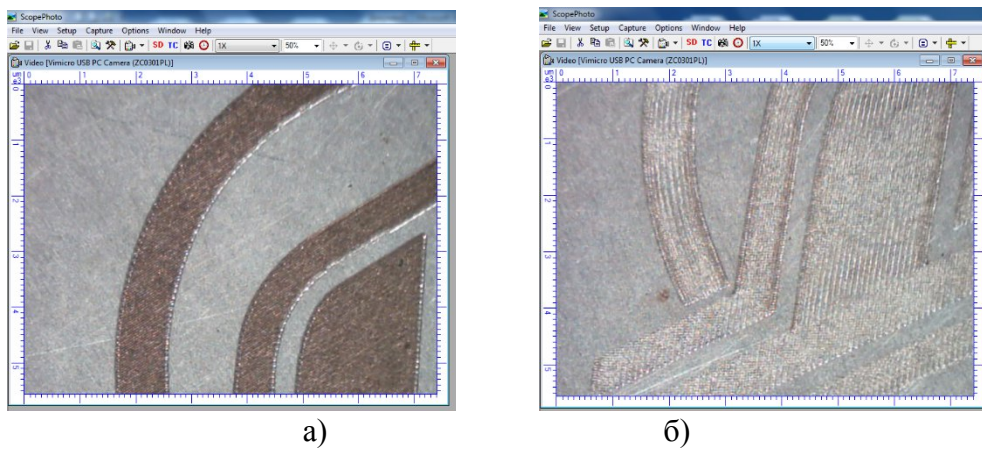
Рисунок 2.1 – Рельєф поверхні при різних режимах обробки

Порівняння рельєфу зразків, оброблених за різними режимами, свідчить, що зміна параметрів в досліджених межах дозволяє одержати грубе зображення з оплавленням за допомогою гравірувальної установки на базі Nd:YAG-лазера.

У цій роботі лазерну обробку проводили також з використанням твердотілого Nd:YVO₄-лазера з діодним накачуванням (початкова довжина хвилі $\lambda = 1,06$ мкм) і нелінійним кристалом, потужністю 5 Вт і довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 0,355$ мкм, що працює в імпульсному режимі ($\tau = 10$ нс). Частота випромінювання 50 кГц, діаметр плями фокусування становив 75 мкм та 150 мкм. Довжина хвилі $\lambda = 0,355$ мкм забезпечується за рахунок генерації третьої гармоніки.

Проведені дослідження свідчать, що гравірування променем з довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 0,355$ мкм дозволяє одержати якісне зображення без

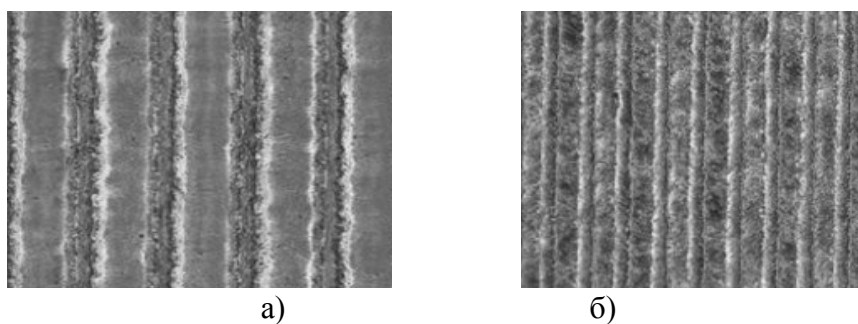
оплавлення поверхні (рис. 2.2). За однакових умов на зображення впливає діаметр плями фокусування.



а) 75 мкм; б) 150 мкм.

Рисунок 2.2 – Лазерне гравірування з різним діаметром плями фокусування

Важливою характеристикою обробки є також інтервал сканування, який визначає відстань між лініями обробки, так звану роздільну здатність. На рис. 2.3, а) [10], показаний результат лазерної обробки при скануванні металевої поверхні з роздільною здатністю 20 ліній/мм.



а) 20 ліній/мм; б)- 30 ліній/мм.

Рисунок 2.3 – Лазерне гравірування з розділенням

У цьому випадку рисунок кожної лінії створюється незалежно від інших і підсумкове зображення формується послідовно - лінія за лінією. Для створення

плівки однорідного кольору товщина лінії повинна варіюватися в межах від 20 мкм до 50 мкм. На цьому зображенні, отриманому за допомогою скануючого електронного мікроскопа, між лініями сканування видно поверхню вихідного матеріалу, однак неозброєним оком вона непомітна.

При лазерній обробці можливий такий режим сканування, при якому буде відбуватися перекриття ліній руху пучка лазера (рис. 2.3, б) [10]. В даному випадку розділення складає 30 ліній/мм. Колір обробленої поверхні має більшу однорідність, ніж при скануванні з роздільною здатністю 20 ліній/мм.

Сканування з перекриттям ліній дає більш контрастне маркування, але крайні лінії відрізняються за забарвленням від інших за рахунок меншої кількості енергій, що припадає на решту площі обробленої лазером поверхні.

Лазерне маркування полімерів застосовується майже для усіх класів комерційних пластиків. Маркування може бути засноване на термічному (рис. 2.4) [11], або фотохімічному ефекті (рис. 2.5) [11]. Для термічного маркування досить ефективно застосовуються CO₂-лазери типу ТЕА, випромінювання яких однаково добре поглинається практично всіма видами полімерів. Найбільш ефективні ці лазери в тих випадках, коли потрібна висока продуктивність, а висока точність зображень не є визначальною вимогою.

На рисунку 2.4 такі позначення: 1 – канавка, одержувана в результаті нагріву, плавлення і випаровування матеріалу, 2 – зона обвуглення матеріалу, 3 – зона матеріалу з частково зміненою структурою/

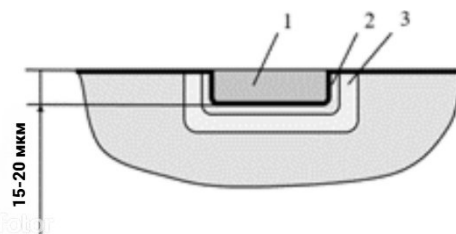
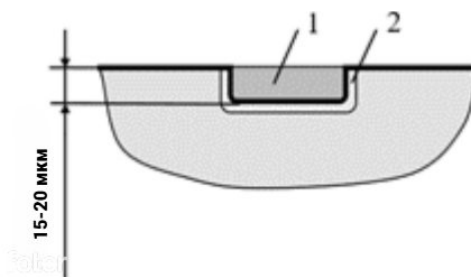


Рисунок 2.4 – Поверхневий шар деталі після маркування, заснованому на термічному ефекті

Маркування може здійснюватися не тільки випаровуванням матеріалу, а й знебарвленням під дією ультрафіолетового випромінювання. У цьому випадку також використовується третя гармоніка лазерного випромінювання.



- 1 – зона матеріалу зі зміненим кольором;
2 – зона з незначними структурними змінами.

Рисунок 2.5 – Поверхневий шар деталі після ультрафіолетового лазерного маркування

Інтенсивне ультрафіолетове випромінювання знебарвлює практично всі сучасні полімерні матеріали – під дією лазерного променя формується біле маркування на темному полі. Полімери, пофарбовані в білий колір (основний пігмент TiO_2), набувають маркування сріблясто-сірого кольору за рахунок відновлення іонів титану.

2.2 Лазерне різання

Різання є однією із перших операцій застосування лазерів. Основним механізмом руйнування металів при різанні є плавлення та витіснення розплаву із зони обробки струменем допоміжного газу. Для такої обробки традиційно застосовують потужні і надійні волоконні лазери, випромінювання яких майже не поглинається діелектриками.

Поглинання лазерного випромінювання діелектриками обумовлено наявністю коливальних ступенів свободи кристалічної решітки, домішками, дефектами, міжмолекулярними коливаннями тощо. Діелектричні матеріали

добре поглинають випромінювання CO₂-лазерів на довжині хвилі $\lambda = 10,6$ мкм, проте ІЧ-лазери видаляють матеріал шляхом інтенсивного локального нагріву, при цьому виникають продукти карбонізації, обвуглені краї та високі термічні напруження. Порівняння різання діелектриків випромінюванням з різною довжиною хвилі свідчить, що при різанні CO₂-лазером є сліди карбонізації матеріалу, при УФ-різанні – чистий, рівний край різу [4].

Завдяки тому, що випромінювання $\lambda = 0,35$ мкм однаково добре поглинається металами і діелектриками, УФ-лазери можуть застосовуватися для роздільних) операцій в мікроелектроніці. Лазерне різання УФ-лазером дозволяє виконати різання гнучких друкованих плат з високою якістю. Зменшення діаметру плями фокусування УФ-лазера у порівнянні з фокусуванням CO₂-лазера дозволяє знизити потужність випромінювання і проводити більш якісне різання. До того ж, випромінювання CO₂ лазера повністю відбивається металами, що унеможливорює різання гнучких друкованих плат з металевими ланцюгами.

2.3 Фотолітографія: створення мікросвіту на кремнієвих пластинах

У сфері мікроелектроніки, де кожен нанометр має значення, УФ лазери знаходять своє найбільш значуще застосування у фотолітографії (рис. 2.6) [12].

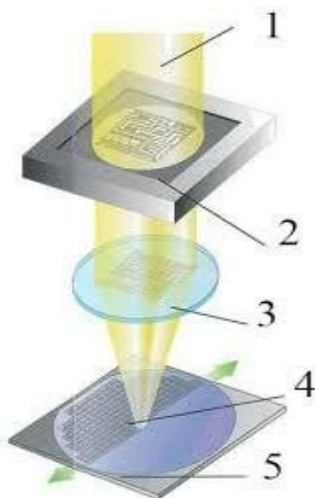


Рисунок 2.6 – Схематичне зображення проекційного методу фотолітографії

В методі фотолітографії задіяні такі структурні елементи: 1 – джерело, 2 – шаблон, 3 – оптична система, 4 – фоторезистор, 5 – підкладка з кремнію.

Цей складний і багатоетапний процес є фундаментом для формування складних мікроструктур на кремнієвих пластинах. Висока роздільна здатність, яка, як відомо, обернено пропорційна довжині хвилі (згідно з принципами дифракції), дозволяє створювати елементи неймовірної мініатюризації, такі як транзистори та провідні доріжки шириною менше 50 нм. Без цієї можливості було б неможливо виготовляти сучасні мікросхеми, процесори та мікроконтролери, які є "мозком" усієї електронної апаратури, від смартфонів до суперкомп'ютерів.

Лінійна роздільна здатність у літографії може бути наближено виражена як [12]:

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}, \quad (2.1)$$

де R – роздільна здатність;

k_1 – коефіцієнт процесу (залежить від багатьох факторів);

λ – довжина хвилі світла;

NA – числова апертура оптичної системи.

Чим менша λ і чим більша NA , тим вища роздільна здатність. Сучасні друковані плати, особливо ті, що використовуються у смартфонах, ноутбуках чи передових сенсорах, часто складаються з багатьох шарів. Це дозволяє розмістити набагато більше електронних компонентів на меншій площі, роблячи пристрої компактнішими та потужнішими. Щоб з'єднати провідні доріжки, розташовані на різних шарах, необхідні вертикальні контакти – так звані перехідні отвори або vias.

Саме ці крихітні отвори дозволяють електричному струму перетікати з одного шару на інший, забезпечуючи повноцінне функціонування схеми. Без точного та чистого мікросвердління неможливо було б створити складні багатошарові схеми, на яких базується вся сучасна мікроелектроніка.

Чому ж саме ультрафіолетові лазери є найкращим вибором для мікросвердління? Відповідь криється в їхніх унікальних властивостях:

«Холодна» обробка: на відміну від лазерів з більшою довжиною хвилі, УФ-лазери взаємодіють з матеріалом за принципом фотоабляції. Це означає, що енергія УФ-фотона настільки висока, що вона руйнує молекулярні зв'язки в матеріалі без значного нагрівання навколишніх ділянок. Уявіть, що ви не просто «плавите» матеріал, а буквально «випаровуєте» його, не залишаючи слідів термічного впливу. Це критично важливо, оскільки надмірне нагрівання може призвести до деформації шарів, пошкодження ізоляції або навіть розшарування плати.

Висока роздільна здатність: коротка довжина хвилі УФ-випромінювання дозволяє сфокусувати лазерний промінь у надзвичайно малу пляму. Це дає можливість створювати отвори діаметром всього в кілька мікрометрів (що в десятки разів тонше за людську волосину!), з чіткими краями та без задирок. Для порівняння, механічне свердління таких мініатюрних отворів практично неможливе, а якщо й можливе, то з великим ризиком пошкодження.

Універсальність матеріалів: УФ-лазери ефективно працюють з широким спектром матеріалів, що використовуються в друкованих платах. Це і ізоляційні діелектричні шари (наприклад, склотекстоліт FR-4, поліімід), і тонкі металізовані плівки (мідь), які є провідними доріжками. Ця універсальність робить УФ-лазери незамінними для створення складних багатошарових структур.

Типовий процес мікросвердління з використанням УФ-лазера виглядає наступним чином:

- 1) позиціонування плати: друкована плата точно позиціонується під лазерним променем за допомогою високоточних систем керування рухом;
- 2) програмування лазера: комп'ютерне програмне забезпечення точно визначає місця, де мають бути просвердлені отвори, а також їхній діаметр та глибину;

3) імпульсна дія: УФ-лазер випромінює короткі, але потужні імпульси енергії. Кожен імпульс «видаляє» крихітну частинку матеріалу;

4) пошарове свердління: для глибоких отворів лазер може працювати в декілька проходів, поступово видаляючи матеріал шар за шаром, забезпечуючи при цьому максимальну чистоту та точність;

5) контроль якості: Після свердління отвори перевіряються на відповідність заданим параметрам, часто за допомогою оптичних систем контролю.

Порівняно з традиційними методами свердління, такими як механічне свердління або плазмове травлення, мікросвердління УФ-лазерами пропонує низку значних переваг:

– висока швидкість: УФ-лазери можуть свердлити тисячі отворів за секунду, що значно підвищує продуктивність виробництва;

– відсутність механічного контакту: немає ризику зносу свердел, їхнього ламання або пошкодження матеріалу через механічний тиск;

– мінімальні відходи: «холодна» абляція залишає дуже мало залишкового матеріалу, що спрощує подальше очищення;

– висока надійність: отвори, зроблені УФ-лазером, мають ідеальну геометрію та гладкі стінки, що покращує якість електричних контактів та загальну надійність кінцевого продукту;

Таким чином, мікросвердління за допомогою УФ-лазерів є ключовою технологією, яка дозволяє створювати все більш складні, компактні та функціональні електронні пристрої. Це справжня ювелірна робота, що вимагає високої точності та передових технологій, і без неї неможливо уявити сучасний світ електроніки.

2.4 Очищення поверхонь: гарантія бездоганної якості

Ще один критично важливий напрямок застосування УФ лазерів – це очищення поверхонь від залишків фоторезисту або органічних забруднень, що

можуть залишатися після процесів травлення чи осадження. УФ лазер забезпечує фотохімічне розщеплення забруднень без будь-якого пошкодження підкладки. Ця «безконтактна» та «безтермічна» методика очищення є абсолютно критичною для збереження цілісності мікронних і субмікронних структур, де навіть найменше забруднення або пошкодження може призвести до збою функціонування пристрою.

3 ЗАСТОСУВАННЯ УФ-ЛАЗЕРІВ В МЕДИЦИНІ

3.1 Хірургія рогівки

Хірургія рогівки за допомогою ультрафіолетових лазерів – це один із найбільш точних і технологічно досконалих методів втручання в офтальмології. Завдяки особливостям дії УФ-випромінювання (зокрема ексимерного лазера з довжиною хвилі 193 нм), стало можливим не лише коригувати рефракційні порушення зору, а й проводити лікувальні процедури, пов'язані зі зміцненням або заміною тканини рогівки. Найбільш поширеними видами хірургії рогівки із застосуванням УФ-лазерів є фоторефракційна кератектомія (ФРК), крос-лінкінг рогівки та трансплантація рогівки.

Фоторефракційна кератектомія (ФРК) — це одна з перших методик лазерної корекції зору, яка й сьогодні залишається актуальною, особливо у випадках тонкої рогівки або коли LASIK не рекомендований. Під час ФРК з поверхні рогівки видаляється епітелій, після чого ексимерний УФ-лазер з надзвичайною точністю аблює (випаровує) необхідний шар стріми для зміни кривизни рогівки. Це дозволяє скоригувати короткозорість, далекозорість та астигматизм. Лазер видаляє тканину не шляхом нагрівання, а за рахунок фотохімічного розриву молекулярних зв'язків, тому навколишні ділянки залишаються неушкодженими. Хоча період загоєння після ФРК триває довше, ніж після LASIK, ця процедура вважається безпечною, ефективною та передбачуваною.

Крос-лінкінг рогівки — це метод зміцнення рогівки, який застосовується переважно для лікування кератоконусу – захворювання, при якому рогівка стоншується і випинається вперед, набуваючи конічної форми. Процедура полягає у нанесенні на рогівку спеціального розчину рибофлавіну (вітаміну В2), після чого поверхня опромінюється УФ-світлом. Ультрафіолет активує рибофлавін, який спричиняє утворення додаткових ковалентних зв'язків між колагеновими волокнами стріми. Внаслідок цього рогівка стає міцнішою, стабільнішою та менш схильною до подальшої деформації. Крос-лінкінг не

змінює заломлювальної сили рогівки, але зупиняє прогресування хвороби. У деяких випадках його комбінують із ФРК для одночасного зміцнення й корекції зору.

Трансплантація рогівки (кератопластика) – це хірургічне втручання, що передбачає заміну ураженої або помутнілої рогівки на донорську тканину. Хоча сама трансплантація виконується хірургічним шляхом, УФ-лазери можуть застосовуватись на різних етапах операції. Зокрема, ексимерний лазер використовується для надточного розрізу тканини рогівки – як пацієнта, так і донорської — що забезпечує ідеальну відповідність країв та щільне прилягання трансплантата. Такий підхід значно зменшує ризик ускладнень, підвищує прозорість нового шару та пришвидшує відновлення зору. Крім того, лазерне моделювання дозволяє створити оптимальну кривизну рогівки після пересадки. Таким чином, ультрафіолетові лазери стали універсальним інструментом в арсеналі офтальмологів. Вони не лише допомагають покращити зір шляхом корекції форми рогівки, а й дозволяють лікувати її структурні захворювання та забезпечують високу точність при хірургічних втручаннях. Усі ці процедури поєднує одне: мінімальна інвазивність, максимальна точність та довготривалий результат для пацієнта. На рисунку 3.1 [13], зображено етапи лазерної корекції зору методом LASIK.

Етапи лазерної корекції зору методом LASIK

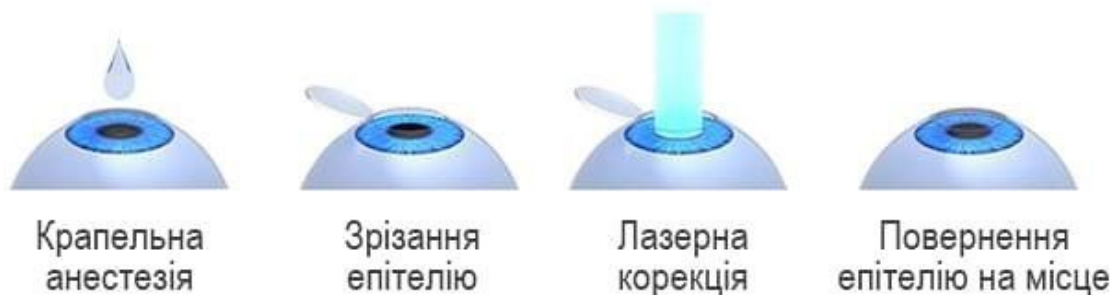


Рисунок 3.1 – Етапи лазерної корекції зору методом LASIK

3.2 Лікування катаракти

Лікування катаракти за допомогою ультрафіолетового лазера не є традиційним методом, однак УФ-лазерні технології можуть бути застосовані на певних етапах або в дослідницьких і експериментальних методиках лікування. Основне хірургічне лікування катаракти – це видалення помутнілого кришталика з подальшою імплантацією штучної інтраокулярної лінзи (ІОЛ). Проте роль лазерних технологій, зокрема УФ-лазерів, в офтальмології постійно розширюється.

У класичному підході для видалення катаракти використовується ультразвукова факоемульсифікація або фемтосекундний лазер. Ультрафіолетовий лазер не застосовується для руйнування кришталика напряму, оскільки щільна структура кришталика вимагає більш потужного механічного або фотодеструктивного впливу. Проте, у дослідницьких умовах, УФ-лазери, зокрема ексимерні (наприклад, ArF 193 нм), вивчаються як інструмент для надточного мікророзтину тканин ока, наприклад, для створення точного розрізу капсули кришталика (капсулотомії) або обробки передньої капсули без теплового пошкодження.

Деякі наукові розробки також досліджують можливість “відновлення” прозорості кришталика на ранніх стадіях катаракти шляхом вибіркової фотохімічної дії УФ-лазера на білкові структури, що спричиняють помутніння. Це не є загальноприйнятою практикою, але відкриває перспективу безопераційного або малотравматичного лікування катаракти в майбутньому.

Інша сфера застосування УФ-лазера – обробка внутрішньоочних лінз або поверхні імплантів, щоб забезпечити їхню біосумісність або запобігти вторинному помутнінню капсули, яке іноді виникає після імплантації ІОЛ. Для цього застосовується дуже контрольована дія лазера, яка може змінити властивості поверхні матеріалів без порушення їхньої оптичної якості.

Отже, хоча УФ-лазер не є основним інструментом для видалення катаракти, він має потенціал у суміжних процедурах, які підвищують точність,

безпеку та ефективність лікування. Найбільш активно такі технології поки що розвиваються в експериментальній і прикладній офтальмології. У майбутньому УФ-лазери можуть зайняти важливу нішу в мікроінвазивному втручанні на кришталику та імплантатах.

3.3 Лікування глаукоми

Лазерне лікування глаукоми може проводитися на різних етапах і має кілька форм залежно від типу захворювання (відкрите чи закритокутове): Лазерна трабекулопластика – найбільш поширене втручання при відкритокутовій глаукомі. За допомогою спеціального лазера (найчастіше – аргонного або селективного) впливають на трабекулярну сітку – структуру в передній камері ока, через яку відтікає внутрішньоочна рідина. Після лазерної стимуляції структура цієї сітки змінюється: відкриваються додаткові дренажні канали, що знижує тиск. Селективна лазерна трабекулопластика (SLT) є більш щадним методом, оскільки впливає лише на пігментовані клітини, залишаючи інші тканини неушкодженими.

Лазерна іридотомія – застосовується при закритокутовій глаукомі або профілактично у пацієнтів з вузьким кутом передньої камери. За допомогою лазера створюється невеликий отвір у райдужці, що покращує циркуляцію внутрішньоочної рідини та знижує тиск. Цей отвір допомагає уникнути блокування відтоку рідини, що особливо важливо при загрозі гострого нападу глаукоми.

Циклофотокоагуляція (CPC) – метод, при якому лазер впливає на цилиарне тіло (структуру, яка виробляє внутрішньоочну рідину), щоб зменшити її продукцію. Це більш радикальний підхід, який використовують, коли інші методи не дають результатів, або при болісній, далеко зайшлій глаукомі. Лазер впливає через склеру або через ендоскопічне обладнання безпосередньо з внутрішньої сторони ока. Мікроінвазивна хірургія з лазерним супроводом – сучасні методи, зокрема імплантація мікروشунтів або стентів, часто

виконуються під контролем лазера або в поєднанні з лазерною обробкою трабекули, щоб забезпечити тривалий ефект зниження тиску.

Щодо ультрафіолетових лазерів, то вони не є основним інструментом у лікуванні глаукоми, оскільки мають переважно фотохімічну, а не термічну дію, яка необхідна для коагуляції або стимуляції тканин. Однак їх потенціал у майбутньому розглядається в плані надточного моделювання дренажних структур ока без перегріву тканини, що може зменшити рубцювання та покращити тривалість ефекту. Загалом, лікування глаукоми лазером має такі переваги: мінімальна інвазивність, швидкість проведення, можливість амбулаторного виконання, відсутність необхідності загального знеболення та короткий реабілітаційний період. Водночас вибір методики залежить від типу глаукоми, ступеня підвищення тиску, анатомічних особливостей ока та реакції пацієнта на попереднє лікування. Для багатьох пацієнтів саме лазерна терапія є ефективною альтернативою хірургії, особливо на ранніх стадіях хвороби, допомагаючи уникнути більш агресивного втручання.

3.4 Операції на сітківці

Операції на сітківці, зокрема лазерна коагуляція, відіграють важливу роль у лікуванні широкого спектру захворювань очного дна. Одним із основних методів є лазерна фотокоагуляція, що застосовується при діабетичній ретинопатії, тромбозах вен сітківки, розривах і відшаруваннях сітківки, а також при віковій макулодистрофії (ВМД).

Суть лазерної коагуляції сітківки Лазерна коагуляція полягає у спрямованому впливі лазерного променя на патологічні ділянки сітківки. Світлова енергія лазера трансформується в теплову, що викликає мікроскопічне термічне пошкодження тканини. Це стимулює утворення рубців, які зміцнюють сітківку, зупиняють ріст новоутворених судин і зменшують проникність патологічних капілярів. Фізична основа методу: Поглинання лазерної енергії пігментом меланіном у пігментному епітелії сітківки [14]:

$$Q = \mu a \cdot \Phi, \quad (3.1)$$

де Q – кількість поглинутої енергії;

μa – коефіцієнт поглинання тканини;

Φ – щільність потоку енергії.

Після впливу формується коагуляційна точка діаметром $\sim 100\text{--}500$ мкм, яка з часом перетворюється в щільний рубець.

Застосування при віковій макулодистрофії (ВМД). ВМД – це дегенеративне ураження макули (центральної частини сітківки), що призводить до втрати центрального зору. Вона буває двох типів:

– «Суха» форма ВМД – зустрічається найчастіше, але прогресує повільно;

– «Волога» форма – агресивна форма, при якій виникають патологічні судини під макулою (неоваскуляризація), що можуть кровоточити й набрякати.

Лазерна коагуляція застосовується саме при вологій формі ВМД. Вона знищує ці аномальні судини, запобігає подальшому крововиливу та збереженню зору

У деяких випадках також застосовують фото динамічну терапію (ФДТ), коли фотосенсибілізатор (вертепорфін) активується лазером для вибіркового руйнування новоутворених судин.

Переваги лазерної коагуляції: зупиняє прогресування ретинопатії; зменшує ризик відшарування сітківки; стабілізує зір при ВМД; процедура малоінвазивна, проводиться амбулаторно; триває від 10 хв до 30 хв; не потребує наркозу.

3.5 Ризики для очної тканини

Ультрафіолетові лазери, особливо ексимерні (наприклад, ArF 193 нм), активно використовуються в офтальмології завдяки своїй здатності здійснювати надзвичайно точну фотоабляцію тканин рогівки. Проте, як і будь-яка технологія,

лазерна дія має потенційні ризики, пов'язані з біологічним впливом на очні тканини. Один із головних ризиків – фототоксичність. УФ-випромінювання має достатню енергію фотонів, щоб розривати ковалентні зв'язки у клітинах. При абсорбції такої енергії в тканинах виникають вільні радикали, які можуть ініціювати оксидативний стрес, порушення структури білків і ДНК, що призводить до апоптозу або некрозу клітин. Особливо вразливими є епітеліальні клітини рогівки та ендотелій. Якщо останній зазнає ушкодження, це необоротно, оскільки ендотеліальні клітини в оці не відновлюються, що може призвести до набряку рогівки та зниження зору.

Ще один фактор ризику – це локальне нагрівання тканини. Хоча ексимерні лазери за своєю природою є переважно фотохімічними, тобто їх дія не базується на нагріванні, проте при надмірній інтенсивності або тривалому опроміненні все ж можливе накопичення тепла. Це здебільшого стосується поверхні рогівки. Невелике, але швидке підвищення температури може спричинити мікроопіки, зневоднення стромальних волокон, що в результаті ускладнює регенерацію та може призвести до утворення помутнінь. Крім того, теплова дія здатна змінити конфігурацію колагенових волокон, що відображається на прозорості й оптичних властивостях рогівки.

Ще одним серйозним аспектом є можливість порушення мікроструктури тканини в зоні лазерного впливу. У разі некоректного калібрування параметрів лазера або недосконалого алгоритму сканування можна отримати нерівномірне видалення шару рогівки. Це призводить до залишкових аберацій в оптичній зоні: сферичні аберації, кома, гало-ефекти, які особливо помітні при нічному зорі. Занадто глибока абляція також може спричинити структурне ослаблення рогівки, що в перспективі загрожує розвитком ектазії – поступового патологічного розтягування тканини.

Особливу небезпеку становить і непрямий вплив УФ-випромінювання на кришталік і сітківку. У нормальних умовах ці структури ока захищені, оскільки УФ-промені мають обмежену проникність у глибокі тканини. Однак у разі порушення оптичного шляху (наприклад, за відсутності належних фільтрів або

при дефектах у системі наведення лазера) розсіяне УФ-випромінювання може досягти кришталика і сприяти фотохімічним змінам білків, що прискорює розвиток катаракти. Аналогічно, при дуже інтенсивному або неконтрольованому розсіяному випромінюванні ризикує постраждати й сітківка, яка вкрай чутлива до світлових пошкоджень.

Для розуміння впливу УФ-лазера на тканини можна звернутись до фізичної формули енергії фотона [15]:

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad (3.2)$$

де h – стала Планка;

c – швидкість світла;

λ – довжина хвилі.

Для лазера з довжиною хвилі 193 нм енергія фотона складає приблизно 6,4 еВ — цього достатньо для руйнування органічних молекулярних зв'язків у тканині без теплового ефекту, але за певних умов це може бути небезпечно.

Незважаючи на ці ризики, сучасні системи ексимерної хірургії обладнані механізмами контролю енергії, системами автоматичної компенсації мікрорухів ока (eye-tracking), дозуванням імпульсів та охолодження мповерхні, що значно знижує ймовірність ускладнень. Саме завдяки цим технологіям ультрафіолетовий лазер вважається відносно безпечним при дотриманні чітких протоколів. Водночас фахівці завжди повинні враховувати індивідуальні особливості ока, ступінь дії та тривалість процедури, щоб мінімізувати навіть віддалені наслідки лазерного втручання. На рисунку 3.2 [15], зображено проникнення випромінювання у шкіру.

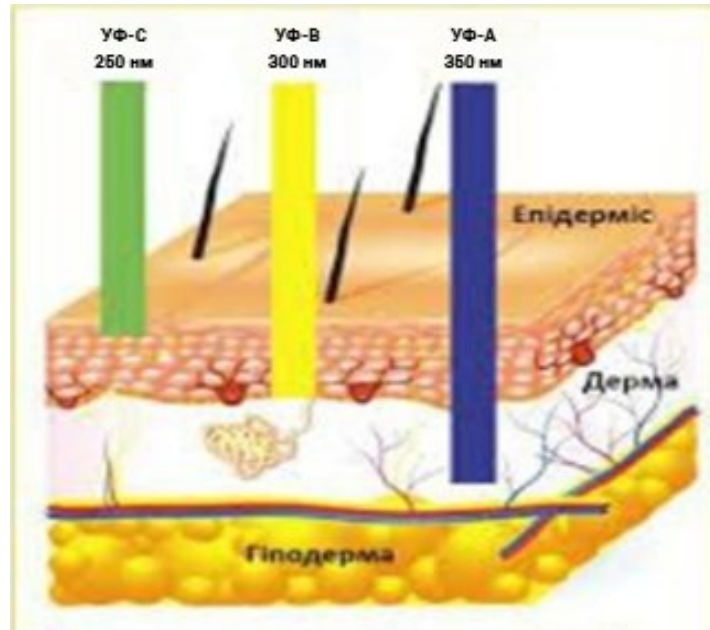


Рисунок 3.2 – Зображення проникнення випромінювання у шкіру

ВИСНОВКИ

УФ-випромінювання має коротку довжину хвилі й високу енергію, що зумовлює його здатність до впливу на матеріали та біологічні структури. Залежно від довжини хвилі (UVA, UVB, UVC) випромінювання може по-різному поглинатися речовинами. Органічні матеріали, полімери, а також оксиди металів, як-от діоксид титану або оксид цинку, мають високу ефективність поглинання в ультрафіолетовому діапазоні. Вони активно використовуються для фільтрації УФ-випромінювання в косметиці, медицині, оптичних приладах.

На відміну від діелектриків, метали не пропускають ультрафіолетові промені, але взаємодіють з ними через поверхневе відбивання та поглинання. Наприклад, алюміній та срібло здатні ефективно відбивати УФ-хвилі, тоді як мідь та хром частіше поглинають їх, перетворюючи енергію випромінювання на тепло. Особливу роль відіграє стан поверхні — полірування, наявність оксидних плівок або забруднень можуть значно змінити властивості металу щодо УФ-випромінювання.

Ультрафіолетові лазери, що генерують промені в діапазоні від 193 нм до 355 нм, мають надзвичайно широкий спектр застосувань. В офтальмології вони використовуються для мікрохірургії рогівки — зокрема в таких операціях, як LASIK чи фототерапевтична кератектомія. Завдяки точному і неглибокому проникненню в тканини, УФ-лазери дозволяють змінювати форму рогівки без серйозного пошкодження навколишніх клітин. Це дає можливість відновлювати зір з високою точністю та мінімальним відновленням.

Окрім офтальмології, УФ-лазери застосовуються в дерматології, стоматології, для стерилізації поверхонь, в мікроелектроніці (гравіювання мікросхем), спектроскопії та криміналістиці. Їхня перевага — у здатності зосереджувати велику енергію на надзвичайно малій площі, що дозволяє виконувати прецизійні маніпуляції з матеріалами або біологічними структурами.

Отже, УФ-випромінювання – потужний інструмент сучасної науки і техніки. Його взаємодія з матеріалами, як металами, так і діелектриками,

відкриває широкі перспективи для практичного застосування — від медицини до промисловості. А сучасні УФ-лазери дають змогу виконувати надточні завдання, які ще кілька десятиліть тому здавалися фантастикою.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Laser machining by short and ultrashort pulses, state of the art and new opportunities in the age of the photons J Meijer, K Du, A Gillner, D Hoffmann, VS Kovalenko CIRP Annals, 2002
2. O.S. Hnatenko, O.V. Afanasieva, N.O. Lalazarova, Yu.S. Kurskoy, E.N. Odarenko, Y.V. Sashkova, O.V. Ivanchenko // J. Nano- Electron. Phys. 2023. Vol. 15, No 1. 01007.
3. Peyre P., Fabbro R. Laser shock processing: a review of the physics and applications // Optical and Quantum Electronics. 1995. Vol. 27. P. 1213–1229.
4. Molpeceres C., Lauzurica S., Garcia-Ballesteros J. J., Morales M., Ocana J. L. Advanced 3D micromachining techniques using UV laser sources. Microelectronic Engineering. 2007. 84. P. 1337–1340.
5. Що таке УФ-лазер в одній статті. Застосування. Chengdu MRJ-Laser Technology Co., Ltd. URL: <https://www.mrjlaser.com> (дата звернення 08.05.2025).
6. R. Eason (ed.) Pulsed Laser Deposition of Thin Films: Applications-Led Growth of Functional Materials. Wiley: New York, 2007. 712 p.
7. Bergstrom D., Powell J., Kaplan A.F.H. A ray-tracing analysis of the absorption of light by smooth and rough metal surfaces // *Journal of Applied Physics* 2007. Vol. 101. No. 11. P. 113504/1-11.
8. Лазерні джерела випромінювання та їх застосування в мікроелектроніці — Ужгородський національний університет <https://www.uzhnu.edu.ua/uk> (дата звернення 08.05.2025).
9. Переваги та відмінні особливості УФ-лазерної мікрообробки — TEYU Chiller https://www.teyuchiller.com/advantages-of-uv-laser-processing_n1743
10. Лазерне випромінювання. Енциклопедія Сучасної України http://esu.com.ua/search_articles.php?id=53146 (дата звернення 08.05.2025).
11. Лазерне випромінювання. Основні напрямки використання в біології і медицині. Перспективи розвитку Буковинський медичний вісник <https://medvisnyk.org.ua/index.php/journal> (дата звернення 03.06.2025).

12. Семенов А.О., Попов С.В., Сахно Т.В., Тарасенко Д.С. Ультрафіолет: сфери використання та джерела випромінювання. Монографія. Полтава: ПП «Астрая», 2023. 190 с. <https://www.pdau.edu.ua/> (дата звернення 02.06.2025).

13. Світлолікування. Методичні <https://www.uzhnu.edu.ua/uk>

14. Ультрафіолетове випромінювання. Studies.in.ua URL: <https://www.studies.in.ua/ultrafioletove-viprominyuvannya/> (дата звернення 02.06.2025).