

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)
МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ФОРМУВАННЯ
ПРОФІЛЮ ПУЧКА
(тема)

Виконав:
здобувачка 4 року навчання,
групи МТІОЛСу-22-1
Маргарита ГИТАР
(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 зав. каф. ФОЕТ Олександр ГНАТЕНКО
(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-вимірвальна 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

здобувачі Титар Маргариті Валеріївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання оптичної системи формування профілю пучка

затверджена наказом університету від «23» травня 2025 р. № 409 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 15 липня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Вихідні параметри лазерного випромінювання: довжина хвилі ($\lambda = 0,623$ мкм); тип вхідного профілю (гаусівський); вхідна перетяжка пучка (W); вимоги до вихідного профілю (Top Hat). 2. Характеристики оптичних матеріалів (скло N-BK7). 3. Технічні вимоги до оптичної системи: точність формування профілю інтенсивності; симетрія та рівномірність розподілу опроміненості на площині зображення; допустимі аберації. 4. Програмне середовище для моделювання: Ansys Zemax OpticStudio. 5. Доступні типи оптичних компонентів: асферичні лінзи; фазові пластини; дифракційні оптичні елементи.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Огляд основних типів просторових профілів лазерного випромінювання (Гаусів, Top Hat, Бесселя). 2 Визначити фізичні принципи формування заданого профілю інтенсивності. 3 Дослідити методи формування Top Hat профілю з вхідного гаусівського пучка. 4 Проаналізувати оптичні елементи, що забезпечують формування необхідного розподілу (DOE, лінзи, SLM, фазові пластини). 5 Побудувати математичні моделі та функції перетворення між профілями. 6 Змоделювати оптичну систему в Zemax із застосуванням макросу ZPL. 7 Провести оптимізацію конфігурації з урахуванням критеріїв якості. 8 Візуалізувати отримані результати (профілі, фазові карти, порівняльні графіки). 9 Оцінити точність формування профілю Top Hat та рівномірність інтенсивності. 10 Узагальнити результати та надати рекомендації щодо практичного використання системи.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 12 слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про формування профілю оптичного пучка	08.05.25–20.05.25	Виконано
2	Дослідження впливу оптичних елементів на профіль пучка	22.05.25–30.05.25	Виконано
3	Визначення математичної моделі формування профілю пучка	02.06.25–10.06.25	Виконано
4	Розробка та моделювання оптичної системи формування профілю пучка	11.06.25–17.06.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	18.06.25–28.06.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	29.06.25–03.07.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	04.07.25–11.07.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	12.07.25–13.07.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	14.07.25–16.07.25	

Дата видачі завдання 05 травня 2025 р.

Здобувач _____

(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

зав. каф. ФОЕТ Олександр ГНАТЕНКО

(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 38 с., 20 рис., 23 джерела, 1 додаток.

ГАУСІВСЬКИЙ ПРОФІЛЬ, ДИФРАКЦІЙНІ ЕЛЕМЕНТИ, ЛАЗЕРНИЙ ПРОМІНЬ, ОПРОМІНЕНІСТЬ, ОПТИЧНА СИСТЕМА, SLM, TOP HAT, ZEMAX.

Об'єкт дослідження – оптична системи формування профілю пучка.

Мета роботи – моделювання оптичної системи формування просторово рівномірного лазерного пучка типу Top Hat з вхідного гаусівського профілю.

Методи дослідження – аналітичні методи хвильової та геометричної оптики, комп'ютерне моделювання в середовищі Ansys Zemax OpticStudio, макросне програмування на мові ZPL.

У роботі проаналізовано поширені типи профілів лазерного променя: гаусівський, топ-хет та Бесселів. Розглянуто методи формування цільового профілю опроміненості за допомогою оптичних компонентів: лінз, дзеркал, діафрагм, фазових пластин, дифракційних елементів і просторових модуляторів світла. Побудовано чисельну модель системи перетворення профілю у Zemax, проведено автоматизовану оптимізацію за допомогою макросу.

Отримані результати можуть бути використані в системах лазерної обробки матеріалів, метрології, медицини та оптоінформаційних технологіях, де потрібне рівномірне опромінення на площині фокуса.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 38 pp., 20 figures, 23 sources, 1 appendix.

GAUSSIAN PROFILE, DIFFRACTION ELEMENTS, LASER BEAM, IRRADIANCE, OPTICAL SYSTEM, SLM, TOP HAT, ZEMAX.

The object of research is an optical beam profile shaping system.

Objective of the work – simulation of an optical system for generating a spatially uniform laser beam (Top Hat profile) from an input Gaussian beam.

Research methods – analytical methods of wave and geometrical optics, computer modelling in Ansys Zemax OpticStudio, macro programming in ZPL language.

The study analyses common beam profiles such as Gaussian, Top Hat, and Bessel. It explores the principles of forming a desired irradiance profile using optical components, including lenses, mirrors, diaphragms, phase plates, diffractive elements, and spatial light modulators. A numerical model of the profile transformation system was constructed in Zemax, and automated optimization was performed using a macro.

The results may be applied in laser material processing systems, metrology, medicine, and optoinformation technologies where uniform irradiance in the focal plane is required.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Теоретичні основи формування профілю оптичного пучка	8
1.1 Основні поняття геометричної та хвильової оптики.....	8
1.2 Характеристики оптичного пучка: інтенсивність, профіль, когерентність	12
1.3 Типи профілів пучка (Гаусів, Тор Нат тощо)	14
1.4 Принципи формування профілю пучка в оптичних системах	19
1.5. Вплив оптичних елементів на профіль пучка	22
2 Математична модель формування профілю пучка.....	24
2.1 Визначення системи.....	24
2.2 Аналітична обробка	25
3 Розробка та моделювання оптичної системи формування профілю пучка .	28
3.1 Генерація функції якості за допомогою макросу ZPL та його оптимізація.....	28
3.2 Аналіз результатів за допомогою геометричного аналізу зображень ...	31
Висновки	34
Перелік джерел посилання	36
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	39

ВСТУП

У сучасних оптичних та лазерних технологіях зростає потреба у точному формуванні просторового профілю лазерного променя відповідно до специфіки застосування – від мікрообробки до високоточної медичної діагностики. Геометрія, розподіл опроміненості та фазова структура лазерного пучка визначають ефективність фокусування, глибину проникнення, якість обробки та стабільність енергетичних характеристик.

Найпоширенішим є гаусівський профіль, однак для задач, пов'язаних із рівномірним впливом на поверхню (гомогенізація, фотолітографія, лазерна обробка), значно ефективнішими є пучки з профілем типу Top Hat або недифракційні Бесселеві пучки. Для отримання таких розподілів використовують широкий спектр оптичних компонентів: дифракційні оптичні елементи (DOE), асферичні лінзи, просторові світлові модулятори (SLM) та фазові пластини.

Об'єктом дослідження в даній роботі є лазерний пучок, а предметом – методи його просторової трансформації. Особливу увагу приділено моделюванню та оптимізації оптичної системи для перетворення гаусівського профілю у рівномірний Top Hat.

Для цього застосовано інструменти програмного середовища Ansys Zemax OpticStudio, що дозволяють автоматизувати побудову функції якості за допомогою макросу ZPL і забезпечити точну оптимізацію параметрів. У результаті змодельовано систему на базі асферичної лінзи, що дозволяє отримати пучок з рівномірною інтенсивністю в зоні зображення.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка і моделювання оптичної системи для формування лазерного променя з плоским профілем інтенсивності (Top Hat). У процесі реалізації виконано аналітичний аналіз профілів пучків, побудовано графіки їх просторового розподілу, створено чисельну модель у Zemax, а також виконано оптимізацію системи з використанням макросу ZPL

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ПРОФІЛЮ ОПТИЧНОГО ПУЧКА

1.1 Основні поняття геометричної та хвильової оптики

Геометрична оптика є однією з найдавніших галузей оптики, що виникла до встановлення хвильової природи світла. У рамках цього наближення світло розглядається як сукупність променів, що поширюються прямолінійно та змінюють напрямок згідно з певними законами при переході між оптичними середовищами. Попри простоту, основні положення геометричної оптики дозволяють ефективно описувати значну кількість оптичних явищ, які зустрічаються у прикладних і побутових задачах. Зокрема, ключовими є два фундаментальні закони – закон відбиття та закон заломлення (рис. 1.1), що визначають поведінку світлового променя на межі розділу середовищ:

- закон відбиття – кут відбиття дорівнює куту падіння, $\theta_r = \theta_i$.
- закон заломлення – якщо промінь світла падає на плоску межу розділу двох прозорих середовищ, то промінь, що падає, заломлений промінь і нормаль до межі розділу лежать в одній площині.

Крім того, $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, де n_1 і n_2 – показники заломлення для двох середовищ, а θ_1 і θ_2 – кути, які падаючий і заломлений промені утворюють з лінією, проведеною перпендикулярно до поверхні заломлення.

Геометрична оптика описує поширення світла у вигляді променів та дозволяє аналізувати його взаємодію з базовими оптичними елементами – лінзами, дзеркалами, призмами. Вона забезпечує засоби для простеження ходу променів у просторі та визначення положення зображень, що формуються оптичними системами. Однак при зменшенні масштабу – зокрема, при розгляді явищ, що відбуваються на довжині хвилі світла або менше – геометричний підхід стає недостатнім.

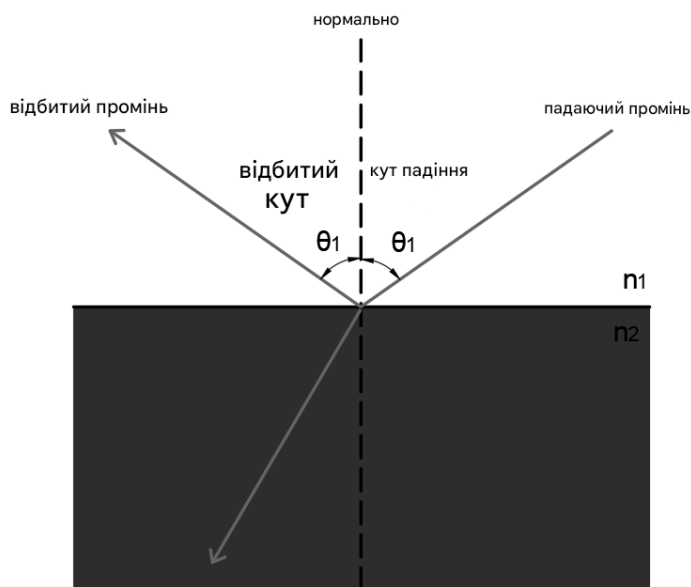


Рисунок 1.1 – Зображення двох законів геометричної оптики – закон відбиття та закон заломлення

У таких випадках застосовується хвильова (або фізична) оптика, яка враховує хвильову природу світла. Вона дозволяє пояснювати явища, пов'язані з когерентним накладанням хвиль, зокрема інтерференцію та дифракцію, що мають вирішальне значення для розуміння поведінки світла на мікрорівні.

Одним із ключових явищ хвильової оптики є інтерференція – процес накладання двох або більше когерентних хвиль, що призводить до формування нового розподілу інтенсивності. Залежно від фазового зсуву між хвилями, інтерференція може бути:

- конструктивною – коли хвилі перебувають у фазі, їх амплітуди підсумовуються, що призводить до підсилення сигналу;

- деструктивною – коли хвилі зсунуті у фазі на π (180°), і відбувається ослаблення або повне гасячання сигналу.

На рисунку 1.2 наведено приклади обох типів інтерференції для двох хвиль, що накладаються: у випадку фазового збігу та при фазовому зсуві на 180° .

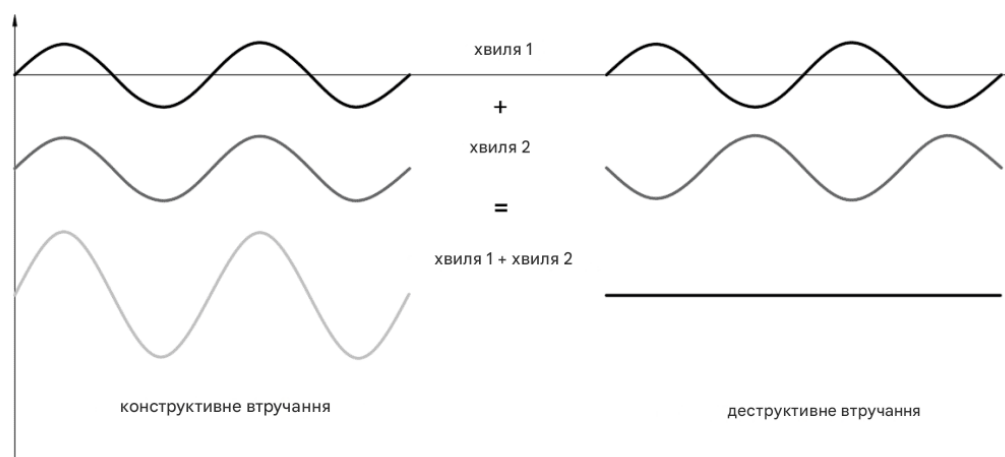


Рисунок 1.2 – Накладання двох хвиль та створення нової хвилі

Ще одним фундаментальним явищем, яке розглядається у хвильовій оптиці, є дифракція – процес огинання хвилею країв перешкод або проходження через вузькі отвори з наступним розширенням фронту хвилі. Ступінь дифракції залежить від співвідношення розмірів отвору або об'єкта до довжини хвилі світла: чим менший розмір перешкоди порівняно з довжиною хвилі, тим вираженішим є ефект огинання. У разі, коли розмір отвору значно перевищує довжину хвилі, дифракційні ефекти стають незначними, і поширення світла можна описувати методами геометричної оптики [1–5].

На рисунку 1.3 зображено схему дифракції світлової хвилі при проходженні через вузьку щілину. Падаюча хвиля представлена у вигляді паралельних фронтів, які після проходження через щілину викривляються та поширюються у вигляді напівциліндричних хвиль. Така поведінка демонструє хвильову природу світла, оскільки геометрична оптика не може пояснити огинання світлом перешкод.

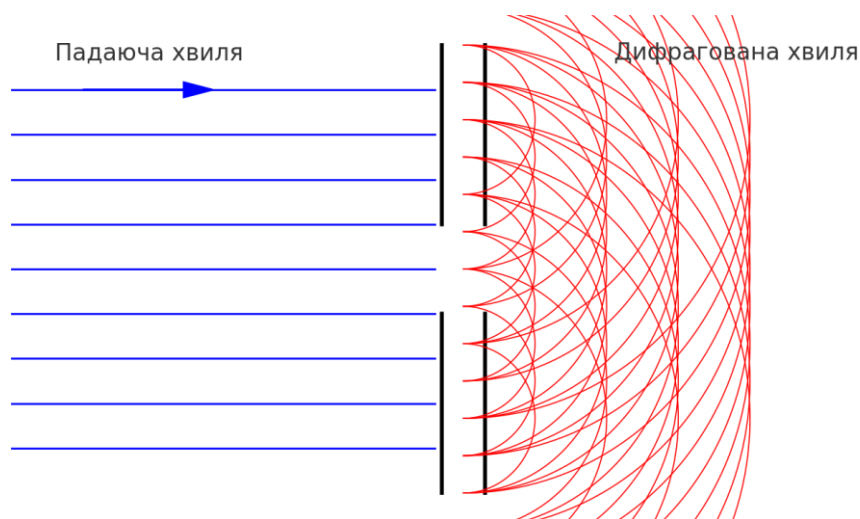


Рисунок 1.3 – Схема дифракції світлової хвилі

На графіку 1.4. наведено інтенсивність дифрагованого світла в залежності від кутового відхилення при проходженні через одну вузьку щілину. Центральний максимум є найінтенсивнішим, а бокові максимуми мають меншу інтенсивність і розділені зонами нульової інтенсивності. Цей розподіл описується функцією sinc^2 і є типовою дифракційною картиною для експерименту Фраунгофера.



Рисунок 1.4 – Дифракційна картина від однощілини (модель Фраунгофера)

На рисунку 1.5 схематично зображено зони Френеля – концентричні області, що утворюються на уявній сферичній хвилі, яка йде від джерела S до точки спостереження. Кожна наступна зона відстає у фазі на π (половину довжини хвилі) від попередньої. Через це внески від парних зон частково компенсують внески непарних, що визначає розподіл інтенсивності у ближньому полі. Цей підхід використовується при розрахунках дифракції Френеля, особливо у випадках, коли неможливо вважати хвилі плоскими [2-7].

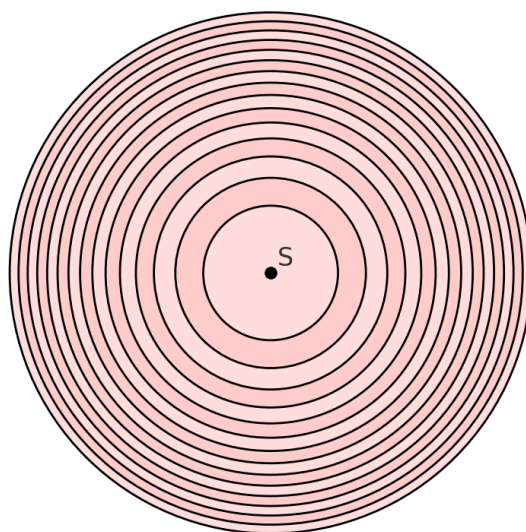


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення зон Френеля

1.2 Характеристики оптичного пучка: інтенсивність, профіль, когерентність

У більшості випадків лазерне випромінювання має форму просторово когерентного та добре спрямованого пучка, що отримав назву лазерний промінь. Це означає, що світло поширюється переважно в одному напрямку, з концентрацією більшої частини оптичної потужності в області з поперечними розмірами, як правило, порядку декількох квадратних міліметрів або менше.

Більшість лазерів формують промені, профіль інтенсивності яких наближено описується гаусівським розподілом. У такому випадку поперечний розподіл оптичної інтенсивності в площині, перпендикулярній до напрямку поширення, підпорядковується нормальному (гаусівському) закону. При цьому ширина пучка змінюється уздовж осі розповсюдження залежно від відстані до фокусної талії. Приклад характерного розподілу електричного поля гаусового пучка наведено на рисунку 1.6.

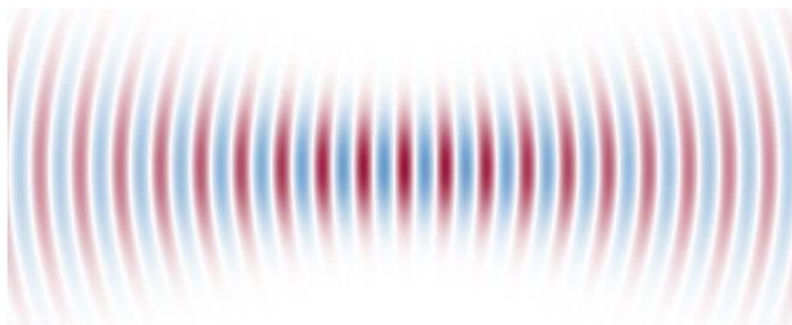


Рисунок 1.6 – Знімок розподілу електричного поля навколо фокуса гауссового променя

Лазерні промені зазвичай характеризуються високим ступенем просторової когерентності, що обумовлено їх малою кутковою розбіжністю та стабільною фазовою структурою. Завдяки цьому досягається висока ступінь фокусування випромінювання, а також можливість формування колімованих пучків із мінімальною дивергенцією. Такі властивості є особливо важливими для застосувань, що вимагають точної доставки енергії, зокрема в системах обробки матеріалів або в лазерній метрології [3, 6, 7–11].

При взаємодії лазерного променя з об'єктом оптична інтенсивність, яка потрапляє на його поверхню, визначає опромінення – одну з ключових величин у теплових та технологічних розрахунках.

Крім просторової когерентності, лазерне випромінювання зазвичай має високу часову когерентність, обумовлену вузькою спектральною смугою.

Проте надмірна когерентність часто призводить до появи спекл-структур – випадкових інтерференційних візерунків, що виникають при розсіюванні когерентного світла на шорстких або неоднорідних поверхнях. Такі артефакти можуть погіршувати якість зображень або точність вимірювань у когерентних системах.

Під час поширення лазерного променя через середовище його оптична потужність може залишатися практично незмінною (у прозорому середовищі) або значно зменшуватися – за наявності поглинання чи розсіювання. У неоднорідних середовищах, де показник заломлення змінюється просторово, можливе спотворення профілю пучка, включаючи фокусні зсуви або розмиття. Особливо це актуально при високих потужностях, коли в середовищі виникають теплові ефекти, такі як теплове лінзування (зміна фокусних властивостей через градієнт температури) або теплове цвітіння у газах і рідинах.

Профіль пучка визначає розподіл оптичної інтенсивності в поперечному перерізі променя. Від точності його формування залежать критично важливі параметри: ефективність фокусування, однорідність освітлення, стабільність взаємодії з матеріалами тощо. У зв'язку з цим, моделювання і контроль просторового профілю пучка є центральною задачею при проектуванні більшості оптичних систем [10, 12–16].

1.3 Типи профілів пучка (Гаусів, Тор Нат тощо)

Профіль оптичного пучка визначає розподіл інтенсивності світла в поперечному перерізі пучка. Тип такого розподілу суттєво впливає на функціональні характеристики оптичної системи: здатність до фокусування, точність взаємодії з об'єктом, ефективність використання енергії, глибину проникнення у матеріал тощо. У цьому розділі буде проаналізовано найпоширеніші типи профілів пучків, які застосовуються в сучасних лазерних і оптоелектронних системах [5, 16–20].

Одним із найважливіших і найбільш вивчених типів пучків є гаусівський пучок. Це електромагнітна хвиля, поперечний розподіл інтенсивності якої описується нормальним (гаусівським) законом 1.1:

$$I(r, z) = I_0 \left(\frac{w_0}{w(z)} \right)^2 \exp \left(-\frac{2r^2}{w^2(z)} \right), \quad (1.1)$$

де I_0 – максимальна інтенсивність у центрі пучка (на осі);

r – відстань від оптичної осі;

w_0 – радіус пучка в перетяжці (найвужчому перерізі);

$w(z)$ – радіус пучка на відстані z від перетяжки за формулою 1.2:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2}, \quad (1.2)$$

де z_R – довжина Релея (Rayleigh range), яка визначає глибину фокусування, яка визначається формулою 1.3:

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}, \quad (1.3)$$

де λ – довжина хвилі світла [4].

Гаусівський пучок є фундаментальним розв'язком параксіального рівняння Гельмгольца, яке описує поширення оптичного випромінювання за умов малого кута розбіжності. Такий пучок відповідає базовій моді TEM_{00} у лазерних резонаторах і має найкращі характеристики фокусування: мінімальну дивергенцію, стабільну структуру хвильового фронту та найменший вплив дифракційних ефектів при розповсюдженні (рис. 1.7) [5–10].

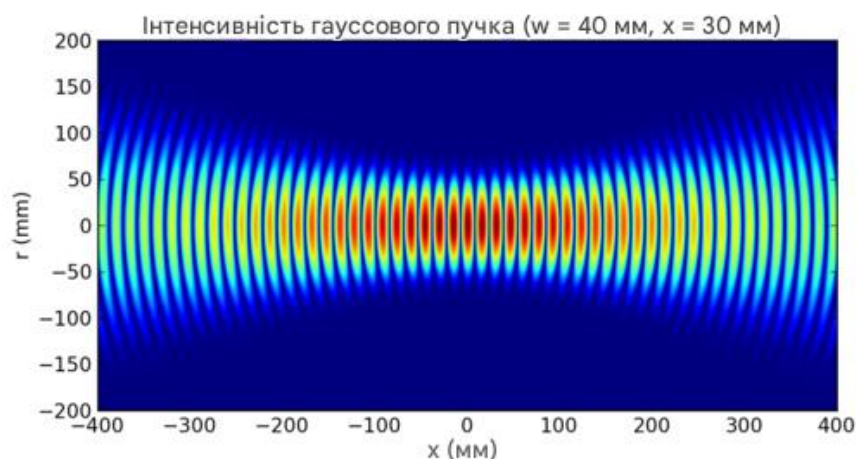


Рисунок 1.7 – Миттєве абсолютне значення дійсної частини амплітуди електричного поля гауссового пучка TEM_{00} , фокальна область

Лазерний промінь типу «Top Hat», також відомий як лазерний промінь типу «Flat Top» – це лазерний промінь, профіль інтенсивності якого на певних оптичних площинах (зазвичай у дальньому полі або площині фокусування системи) є переважно плоским, на відміну від типового гауссового профілю інтенсивності більшості лазерних променів. Промінь типу «Top Hat» має плоску область у центрі та «область переносу» на краях променя, де енергія падає до нуля – це показується на рисунку 1.8 [5-6].

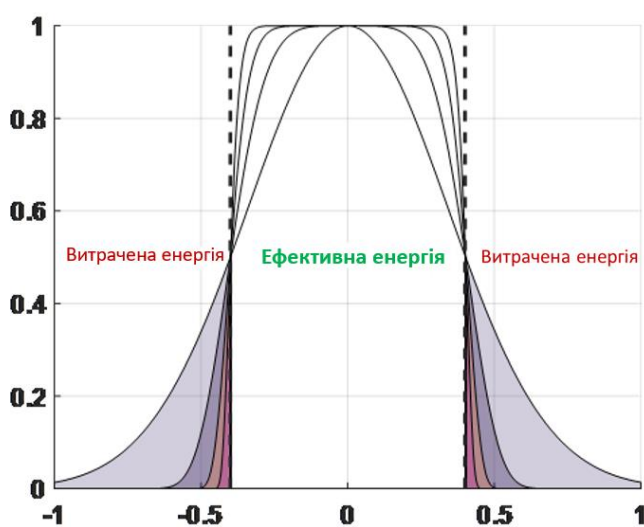


Рисунок 1.8 – Ілюстрація променю типу «Top Hat»

Існує декілька методів формування лазерного пучка з плоскою вершиною (flat-top profile). Один із таких методів застосовується у випадку висококогерентних лазерних променів із низьким параметром якості пучка $M^2 \approx 1$. Суть методу полягає у перетворенні гаусівського профілю пучка з відомим діаметром у фокусовану пляму з чітко визначеним розміром та рівномірним розподілом інтенсивності.

Для цього використовуються формувачі пучків з плоскою вершиною (*flat-top beam shapers*), які часто реалізовані у вигляді дифракційних оптичних елементів (DOE). У високопотужних лазерних системах, зокрема для обробки матеріалів, такі елементи дозволяють зберігати точну геометрію та стабільність променя.

Функція DOE – змінити фазовий фронт вхідного пучка таким чином, щоб у фокальній або далекій зоні сформувався рівномірний профіль інтенсивності. Це забезпечує не лише високу однорідність випромінювання, але й мінімізацію появи плям і дифракційних артефактів, що особливо критично для високоточної обробки поверхонь [6–10].

Інший тип променя – пучок Бесселя – характеризується поперечним розподілом амплітуди, описаним функцією Бесселя першого роду 1.4 [5–7]:

$$E(r) \propto J_0(k_r r), \quad (1.4)$$

де J_0 – функція Бесселя нульового порядку;

k_r – радіальний компонент хвильового вектора;

r – радіальна координата.

Справжній пучок Бесселя є ідеально недифракційним: він не змінює форму при поширенні, тобто не зазнає розширення чи звуження, як це відбувається у гаусівських пучках. Крім того, пучки Бесселя мають властивість самовідновлення – після часткового перешкоджання або блокування вони відновлюють свій профіль далі по осі розповсюдження.

У практичних умовах неможливо реалізувати ідеальний пучок Бесселя, оскільки він потребує нескінченної енергії та нескінченного поперечного розміру. Проте існують наближені реалізації, зокрема:

- формування Бесселя-Гаусового пучка за допомогою аксіконної лінзи;
- використання осесиметричних дифракційних ґраток;
- генерація пучків високого порядку через спіральні дифракційні структури;
- формування у далекому полі з використанням кільцевих апертур.

Ці пучки зберігають майже недифракційні властивості на обмеженій відстані та мають застосування в мікроскопії, лазерній обробці, оптичних пінцетах і біофотоніці.

На графіку 1.9 показано два найпоширеніших профілі розподілу інтенсивності лазерного пучка.

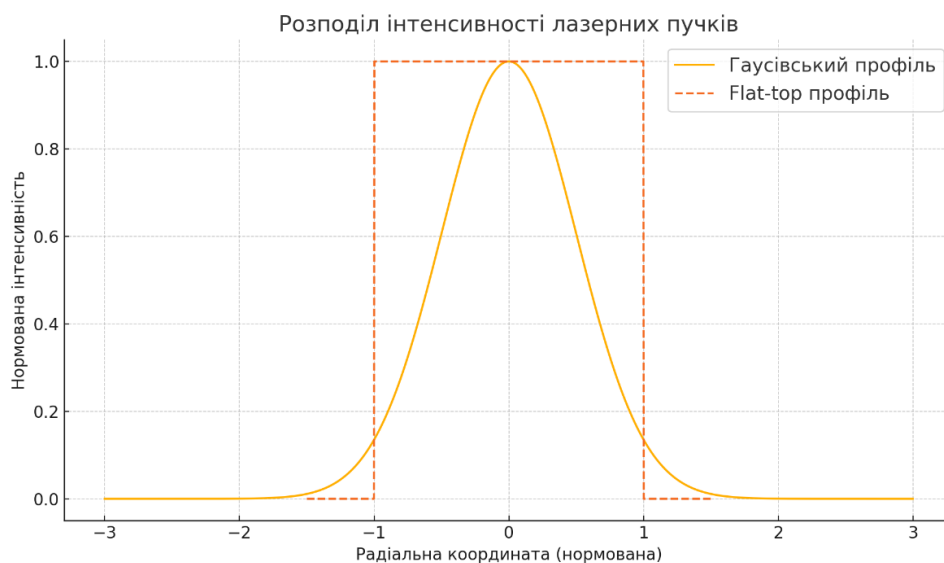


Рисунок 1.9 – Інтенсивність пучків: гаусівський (суцільна лінія) та flat-top (штрихова лінія)

Гаусівський профіль має максимум інтенсивності в центрі, яка експоненційно спадає до країв, що властиво більшості лазерів у базовому режимі

(TEM₀₀). Flat-top профіль демонструє рівномірну інтенсивність у центральній зоні з різким спадом на краях. Такий розподіл особливо корисний для застосувань, де потрібне рівномірне опромінення робочої поверхні, наприклад, у прецизійній обробці матеріалів або мікролітографії.

Профіль інтенсивності пучка Бесселя (рис. 1.10), має центральний максимум, оточений концентричними кільцями. Це результат опису амплітуди хвилі функцією Бесселя першого роду. Такий пучок відомий своїми недифракційними властивостями – здатністю зберігати форму на значній відстані – та ефектом самовідновлення. Завдяки цим властивостям пучки Бесселя широко використовуються в оптичних пінцетах, мікроскопії високої роздільної здатності та в задачах, де критично важливе збереження форми пучка при частковому перекритті.

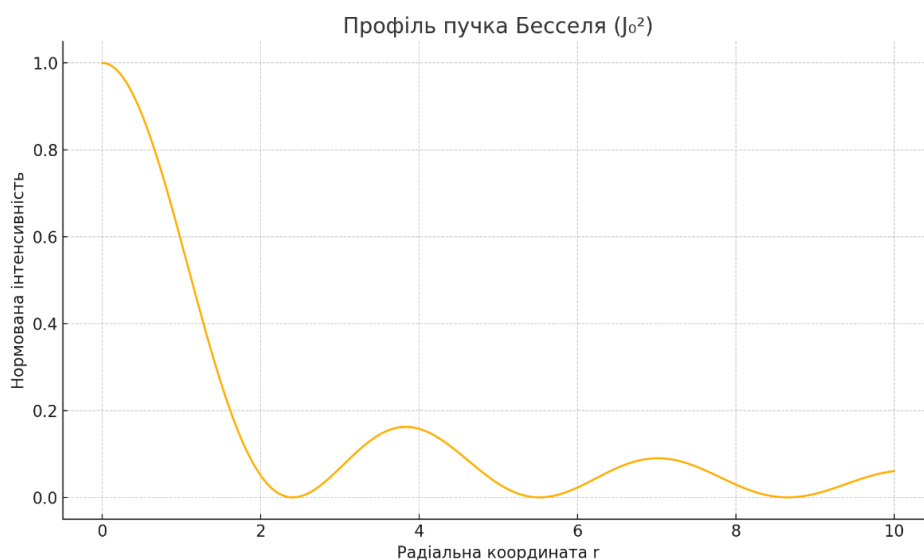


Рисунок 1.10 – Інтенсивність пучка Бесселя: профіль $J_0^2(r)$

1.4 Принципи формування профілю пучка в оптичних системах

Форма лазерного променя зазвичай визначається розподілом його опроміненості та фазовим фронтом. Останній параметр має суттєве значення для

забезпечення просторової стабільності профілю променя під час його поширення. У цьому контексті формувачі променя (beam shapers) відіграють ключову роль: вони здійснюють перетворення як розподілу опроміненості, так і фазового профілю, дозволяючи сформувати бажану форму променя, що зберігається на заданій відстані.

Серед найпоширеніших типів розподілу опроміненості варто виділити гаусівський профіль променя та промінь з плоскою вершиною. На рисунку 1.11 (ліворуч) показано гаусівський профіль променя, де опроміненість зменшується зі збільшенням відстані від центру згідно з гаусовим рівнянням, тобто він характеризується експоненціальним спадом інтенсивності зі збільшенням радіальної координати. На рис. 1.11 (праворуч) – профіль з плоскою вершиною (flat-top або top-hat), де опроміненість залишається практично сталою в центральній зоні та різко спадає на краях, тобто опроміненість є постійною на заданій площі .

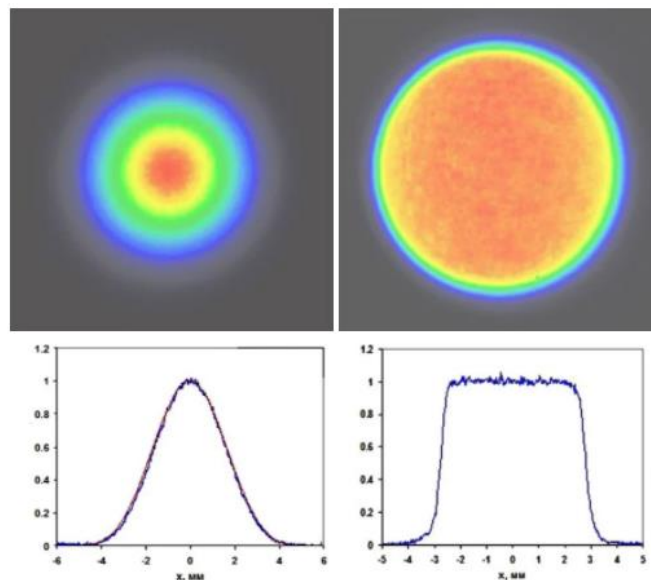


Рисунок 1.11 – Опроміненість для гаусового профілю променя (ліворуч) та для променя з плоскою вершиною (праворуч)

У низці прикладних задач вимагається профіль лазерного пучка, відмінний від вихідного профілю джерела випромінювання, яке у більшості випадків генерує гаусівський пучок. Наприклад, пучки з плоскою вершиною мають переваги в системах лазерної обробки матеріалів, де необхідна висока однорідність опромінення. Такі профілі дозволяють досягти більш точного та передбачуваного характеру взаємодії з матеріалом, зокрема – формування чітких контурів та рівномірних кромek при різанні або мікрообробці. Промені з гауссовими профілями менш ефективні, ніж промені з плоскими вершинами, у застосуваннях лазерної абляції через велику площу променя з надлишковою енергією, вищою за необхідний поріг абляції, та енергію, нижчу за поріг, у зовнішніх областях гауссового профілю (рис. 1.12).

Водночас реалізація таких профілів потребує використання спеціалізованої оптики формування пучка, що ускладнює конструкцію системи і, як наслідок, може підвищити її вартість та вимоги до юстування [7, 20–22].

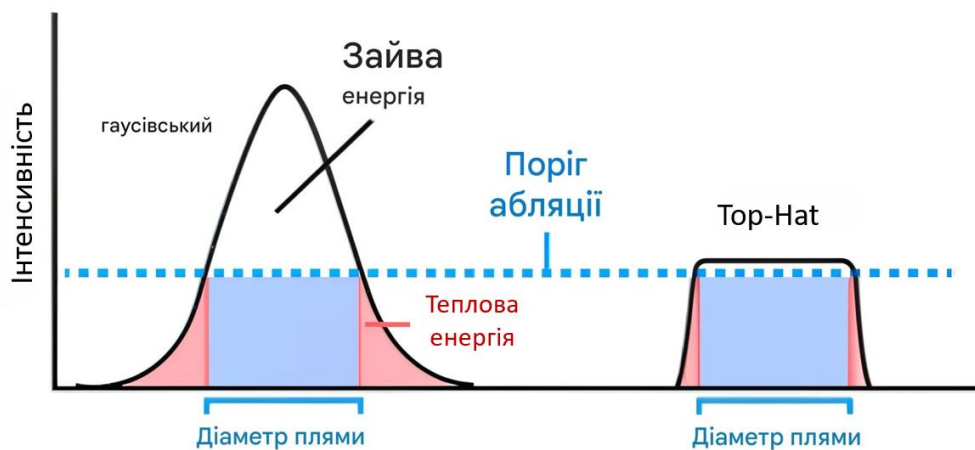


Рисунок 1.12 – Різниця формування профілів

1.5. Вплив оптичних елементів на профіль пучка

Формування та регулювання просторового профілю лазерного променя є одним із ключових завдань при побудові сучасних оптичних систем. За допомогою спеціалізованих оптичних компонентів – таких як лінзи, дзеркала, діафрагми, фазові пластини, просторові світлові модулятори (SLM) та дифракційні оптичні елементи (DOE) – можна здійснювати гнучке перетворення інтенсивності, фази, напрямку поширення та розміру пучка [8].

Залежно від типу та розташування елемента, можливо отримати широкий спектр просторових профілів: від базового гаусівського до flat-top, кільцевих, Бесселівських та навіть асиметричних.

1. Лінзи. Тонкі сферичні лінзи змінюють кривину хвильового фронту, впливаючи на фокусну відстань, радіус пучка та глибину фокусування. Гаусівський пучок після фокусування стискається у талії, а колімуючі лінзи змінюють кут розбіжності.

Аберрації (сферична, кома, астигматизм) спотворюють профіль у зоні фокусування і мають бути враховані при моделюванні високоточних систем.

Асферичні лінзи усувають аберрації, дозволяючи досягти рівномірного розподілу інтенсивності для flat-top або кільцевих профілів.

2. Дзеркала. Плоскі та сферичні дзеркала відбивають і скеровують промінь, також можуть фокусувати або колімувати його.

Адаптивні дзеркала в реальному часі модифікують форму пучка, коригуючи хвильовий фронт для компенсації спотворень.

3. Діафрагми та апертури. Амплітудні діафрагми обрізають бічні «хвости» гаусівського профілю, формуючи наближений top-hat профіль, хоча з дифракційними осциляціями.

Кільцеві апертури дозволяють отримати кільцеподібні або структуровані моди (вихрові пучки), проте втрачається частина енергії.

4. Фазові пластини та фазоінженерні елементи. Фазова модуляція дозволяє формувати пучки з плоским хвильовим фронтом або з орбітальним моментом (вихрові пучки).

Вортексні пластини створюють пучки з «пончиковим» профілем інтенсивності [9].

5. Дифракційні оптичні елементи (DOE). Наноструктуровані елементи, що модифікують амплітуду або фазу завдяки дифракції.

Можуть створювати top-hat, Бесселівські, кільцеві та інші профілі. Основні переваги – точність і компактність, недоліки – складність виготовлення та фіксований характер.

6. Просторові світлові модулятори (SLM). Дають змогу в реальному часі керувати фазою та амплітудою, формуючи змінні профілі променя.

Застосовуються у голографічному фокусуванні, розподілі на мультипучки, адаптивній оптиці.

Висновки до розділу 1. У даному розділі проведено аналіз фізичних основ поширення та формування лазерних пучків. Розглянуто геометричну й хвильову оптику як базові підходи до моделювання світлових хвиль, зокрема інтерференцію, дифракцію, а також особливості когерентного випромінювання. Окрему увагу приділено опису гаусівського, топ-хет та Бесселевого профілів променя, їх математичним моделям, просторовим характеристикам та області застосування. Встановлено, що профіль пучка суттєво впливає на якість фокусування, ефективність енергопереносу та точність взаємодії з матеріалами. Виявлено, що досягнення рівномірного розподілу опроміненості є критичним завданням у сучасних лазерних системах.

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ПРОФІЛЮ ПУЧКА

2.1 Визначення системи

На рисунку 2.1 представлено структурну схему оптичної системи формування пучка, яку розроблено в рамках даної роботи. Вона реалізує перетворення вхідного гаусівського пучка з мінімальним радіусом перетяжки W у пучок з плоскою вершиною (top-hat) з радіусом K . Така система застосовується у випадках, коли потрібне рівномірне опромінення робочої площини для забезпечення стабільної енергетичної дії на матеріал [5–6, 16, 20–23].

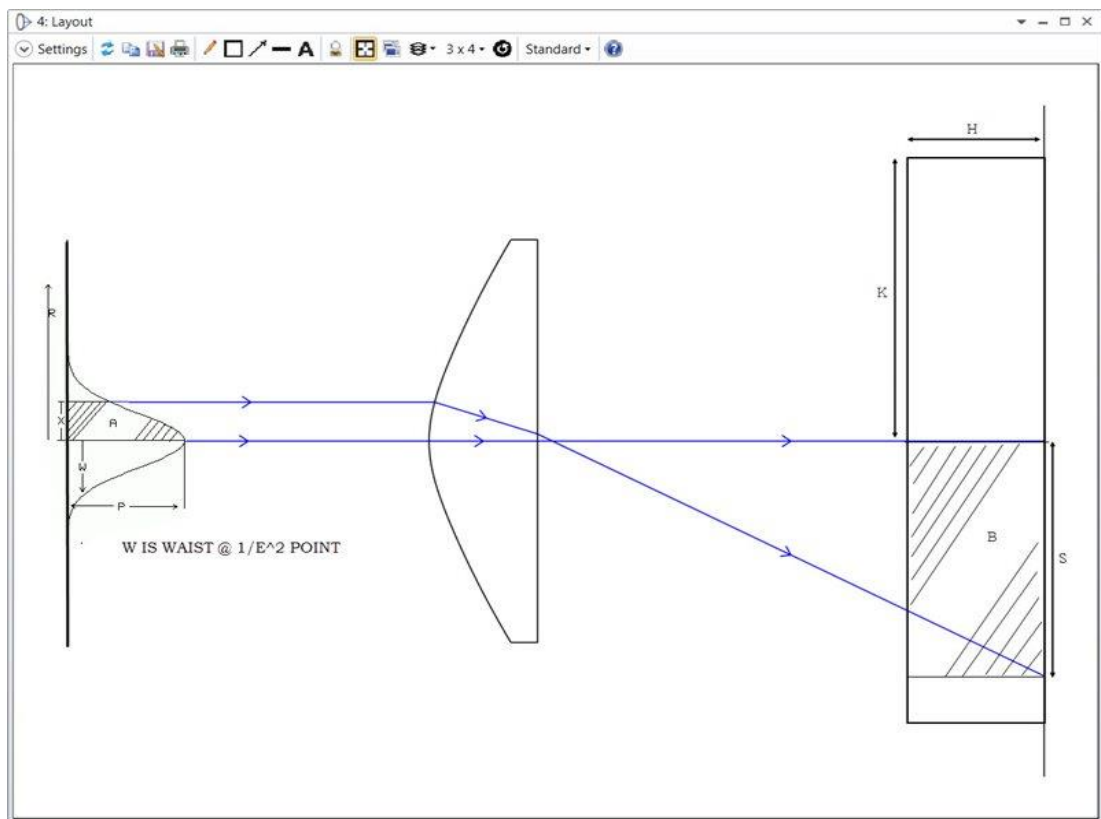


Рисунок 2.1 – Система формування профілю пучка

Для реалізації перетворення просторового профілю необхідно аналітично визначити радіальну координату S на виході системи для заданої вхідної координати X таким чином, щоб оточена енергія у відповідному радіусі

залишалась сталою. Іншими словами, значення енергетичної частки $B(S)$, накопиченої у межах радіуса S для вихідного (top-hat) пучка, повинно відповідати енергії $A(X)$, накопиченій у межах радіуса X для вхідного гаусівського профілю $B(S) = A(X)$.

Цей підхід ґрунтується на збереженні енергетичного потоку при радіальному перетворенні пучка.

2.2 Аналітична обробка

Вихідний профіль променя, якого ми прагнемо досягти, – це рівномірний (типу Top Hat) з максимальним радіусом K , тоді як вхідний профіль – це гаусівський пучок з параметром W (радіус при рівні інтенсивності $1/e^2$).

Вхідний розподіл опромінення виражається, як: $P \exp\{-2R^2/W^2\}$, а вихідний розподіл є ступінчастою функцією опромінення H та максимальної радіальної ширини K [10–12]:

1) вхідна оточена енергія A :

$$A = \int_0^X P e^{-\frac{2R^2}{W^2}} 2\pi R dr; \quad (2.1)$$

2) вихідна оточена енергія B :

$$B = H\pi S^2; \quad (2.2)$$

Розв'язання для A за допомогою підстановки:

$$U = -\frac{2R^2}{W^2}, \quad (2.3)$$

$$dU = -\frac{4R}{W^2} dR, \quad (2.4)$$

$$A = -\frac{\pi PW^2}{2} \int e^U dU = -\frac{\pi PW^2}{2} \left[e^{\frac{-2R^2}{W^2}} \right] \int_0^X = \frac{\pi PW^2}{2} \left[1 - e^{\frac{-2X^2}{W^2}} \right]. \quad (2.5)$$

Оскільки дві оточені енергії рівні, $A = B$, і:

$$\frac{\pi PW^2}{2} \left[1 - e^{\frac{-2X^2}{W^2}} \right] = H\pi S^2, \quad (2.6)$$

$$S^2 = \frac{PW^2}{2H} \left[1 - e^{\frac{-2X^2}{W^2}} \right]. \quad (2.7)$$

Також ми знаємо, що загальна вхідна та вихідна потужності рівні, отже:

$$H\pi K^2 = -\frac{\pi PW^2}{2} \left[e^{\frac{-2R^2}{W^2}} \right] \int_0^\infty = \frac{\pi PW^2}{2}, \quad (2.8)$$

$$K^2 = \frac{PW^2}{2H}. \quad (2.9)$$

Підставляючи це у вищенаведене рівняння для S^2 , отримуємо:

$$S = K \sqrt{1 - e^{\frac{-2X^2}{W^2}}}. \quad (2.10)$$

Усі подальші дії виконуються в середовищі оптичного моделювання Zemax OpticStudio.

Після того як встановлено відповідність між вхідною координатою X та вихідною координатою S , зручно скористатися операндами REAY в редакторі функцій якості (Merit Function Editor) Zemax для задання пар вхід–вихід. У цих операндах зазначаються нормалізовані координати променів на вхідній апертурі та відповідні цільові положення на площині зображення, що відповідають бажаному профілю типу top-hat.

Оскільки ручне введення великої кількості REAY-операндів є трудомістким, застосовується макрос, написаний мовою ZPL (Zemax Programming Language), подібні алгоритми використовуються при синхронізації хаотичних оптичних систем [11]. Цей макрос автоматизує:

- побудову масиву координат вхідних променів та відповідних їм цільових координат на виході;
- генерацію функції якості;
- запуск процедури оптимізації параметрів системи (наприклад, фокусних відстаней або радіусів кривизни поверхонь), спрямованої на досягнення рівномірного розподілу опроміненості.

Висновки до розділу 2. У даному розділі досліджено сучасні методи формування профілю пучка з використанням оптичних елементів. Проведено класифікацію та аналіз дії класичних і спеціалізованих компонентів: лінз, дзеркал, діафрагм, фазових пластин, дифракційних оптичних елементів та просторових модуляторів світла. Встановлено, що кожен елемент забезпечує специфічну трансформацію амплітуди або фази пучка і може бути ефективним інструментом для реалізації необхідного розподілу опроміненості. Сформовано критерії вибору оптики залежно від цільового профілю та умов застосування. Зазначено, що застосування адаптивної оптики або цифрових модуляторів значно розширює можливості управління формою променя в реальному часі.

3 РОЗРОБКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ФОРМУВАННЯ ПРОФІЛЮ ПУЧКА

3.1 Генерація функції якості за допомогою макросу ZPL та його оптимізація

У рамках даного дослідження для моделювання оптичної системи формування просторового профілю пучка використовується програмне середовище Ansys Zemax OpticStudio. Це програмне забезпечення дозволяє виконувати розрахунок трасування променів, створювати функцію якості системи (Merit Function) та здійснювати автоматизовану оптимізацію оптичних параметрів [8, 12].

Для автоматизації процесу створення функції якості застосовується спеціально розроблений макрос на мові Zemax Programming Language (ZPL), представлений на рисунку 3.1.

```

1
2 ! Beam Homogenizer by Nam Kim 10/02/2006
3 ! This macro creates Merit Function that generates ray targets necessary to
4 ! optimize Gaussian to Top hat beam homogenizer
5
6 CLOSEWINDOW      # run macro in quiet mode (no text output window)
7 DELETMFO ALL     # delete the current MF
8
9 W = 5            # gaussian INPUT beam waist
10 K = 20          # output beam radius
11 sample = 80     # pupil sampling
12
13 SYSP 11, W*6    # make the EP Diameter 6 times (EP Radius 3 times) the waist, to
14 # sample well beyond the beam waist
15
16 SYSP 12, 1     # set Gaussian apodization in the system property. Unnecessary for optimization
17 # but needed for analysis using geometrical rays
18
19 apod_factor = 1/POWR((1/3),2) # 1/3 is the ratio of waist to EP Radius
20 SYSP 13, apod_factor # set the system apodization factor so that the 1/e^2 intensity
21 # point is at the waist W. The Entrance Pupil Radius is still 3*W
22
23
24 FOR I, 1, sample+1, 1
25   INSERTMFO I   # insert operand
26   SETOPERAND I, 11, "REAY" # set operand type to REAY
27   SETOPERAND I, 9, 1 # set the weight to 1
28
29   norm_pupil_coord = I/sample
30
31   X = norm_pupil_coord*W*3 # Un-normalized pupil coordinate
32
33
34   S = K*SQRT(1-EXPE(-2*POWR(X,2)/POWR(W,2))) # same as the final equation in the article
35
36   SETOPERAND I, 8, -S # set target. Positive input coordinate has negative
37 # output coordinate (positive lens) thus the negative sign
38   SETOPERAND I, 7, norm_pupil_coord # Set Py column of the operand
39   SETOPERAND I, 2, NSUR() # specify the image surface for the REAY value calculation
40
41 NEXT
42
43 OPTIMIZE
44 UPDATE ALL # Update all windows
45 END
46

```

Рисунок 3.1 – Макрос для оптимізації системи

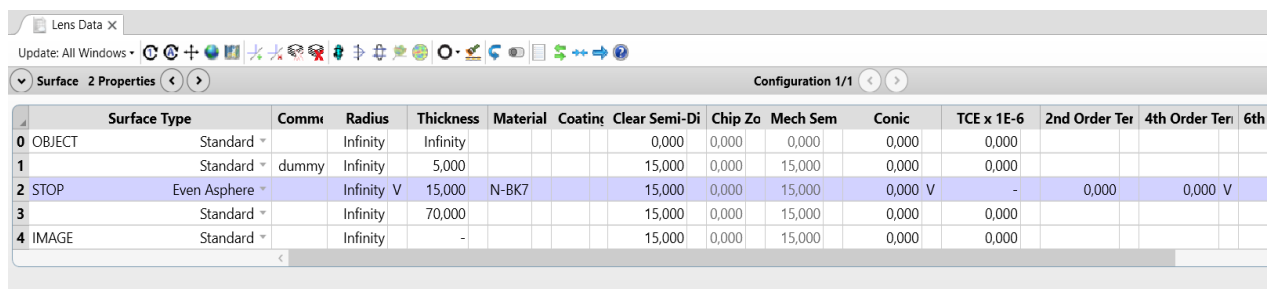
Цей макрос виконує наступні дії:

- генерує масив операндів REAY, що описують відповідність між координатами вхідних променів та їх цільовими точками на вихідній площині;
- вставляє ці REAY-операнди у редактор функцій якості Zemax;
- ініціює процедуру оптимізації системи, спрямовану на досягнення бажаного розподілу опроміненості (наприклад, типу «top-hat»).

Зразкова оптична система в даній роботі представлена у вигляді однієї плоскоопуклої лінзи з асферичною передньою поверхнею, що модифікується. Передня поверхня описується рівномірним асферичним профілем, параметри якого підлягають оптимізації. Змінними параметрами при цьому є:

- радіус кривизни поверхні;
- кіничний коефіцієнт (K);
- парні асферичні коефіцієнти (A_2, A_4, A_6 тощо) згідно з поліномом асферичної поверхні.

Для моделювання використовується довжина хвилі $\lambda=0,623 \mu\text{m}$ (лазер HeNe), а матеріалом лінзи обрано скло N-BK7, яке забезпечує хорошу прозорість у видимому діапазоні та стабільні оптичні властивості (рис. 3.2) [13–18].



Surf	Surface Type	Comm	Radius	Thickness	Material	Coating	Clear Semi-Di	Chip Zo	Mech Sem	Conic	TCE x 1E-6	2nd Order Ter	4th Order Ter	6th
0	OBJECT	Standard	Infinity	Infinity			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000			
1		Standard	dummy	5,000			15,000	0,000	15,000	0,000	0,000			
2	STOP	Even Asphere	Infinity V	15,000	N-BK7		15,000	0,000	15,000	0,000 V	-	0,000	0,000 V	
3		Standard	Infinity	70,000			15,000	0,000	15,000	0,000	0,000			
4	IMAGE	Standard	Infinity	-			15,000	0,000	15,000	0,000	0,000			

Рисунок 3.2 – Дані об'єктива

На початку роботи вікно макета системи виглядає таким чином (рис. 3.3):

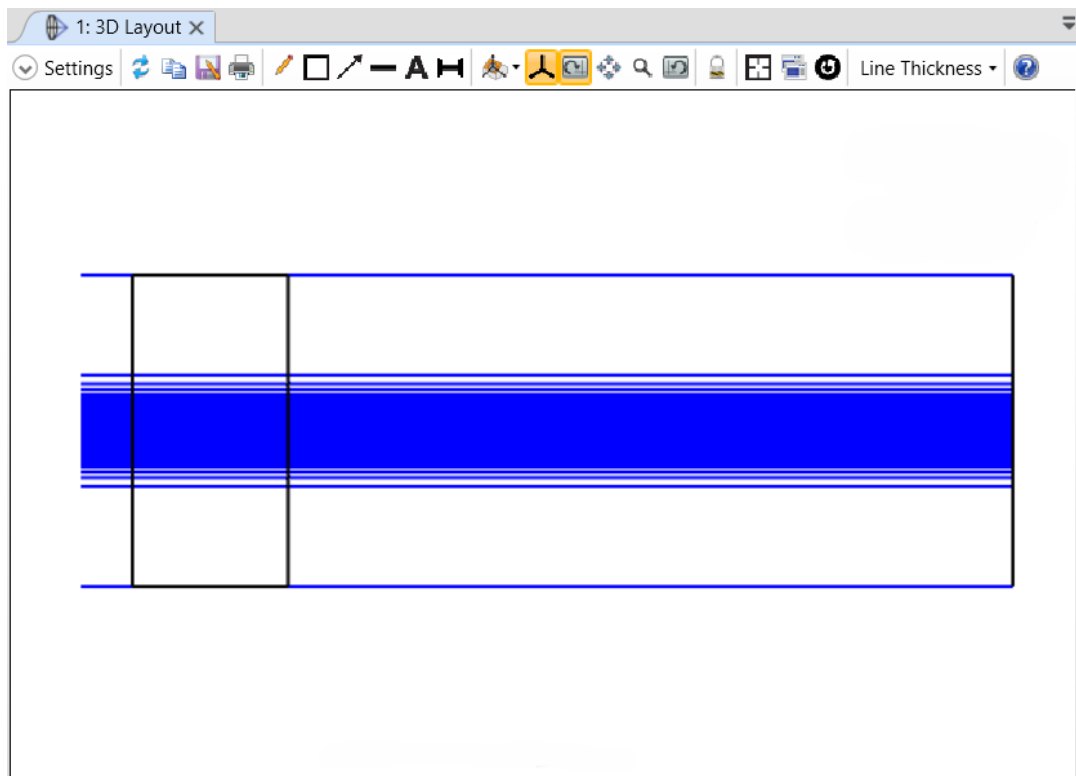


Рисунок 3.3 – Початковий макет системи

У головному меню Zemax OpticStudio необхідно перейти до розділу Macros → Beam_Homogenizer. Після запуску відповідного макросу, у вікні макета буде автоматично згенерована початкова конфігурація системи трасування променів, а також вставлена функція якості на основі операндів REAY, сформованих відповідно до заданого профілю пучка.

У результаті виконання макросу вікно макета набуває вигляду, показаного на рисунку 3.4.

Звернемо увагу, що аподизація вхідного променя є гаусівською, тобто інтенсивність світла зменшується до країв апертури відповідно до нормального розподілу. Натомість, вихідний профіль променя має рівномірний розподіл опроміненості, що відповідає типу Top Hat. Крім того, відстані між трасованими променями на площині зображення є рівномірними, що вказує на ефективну трансформацію просторового профілю.

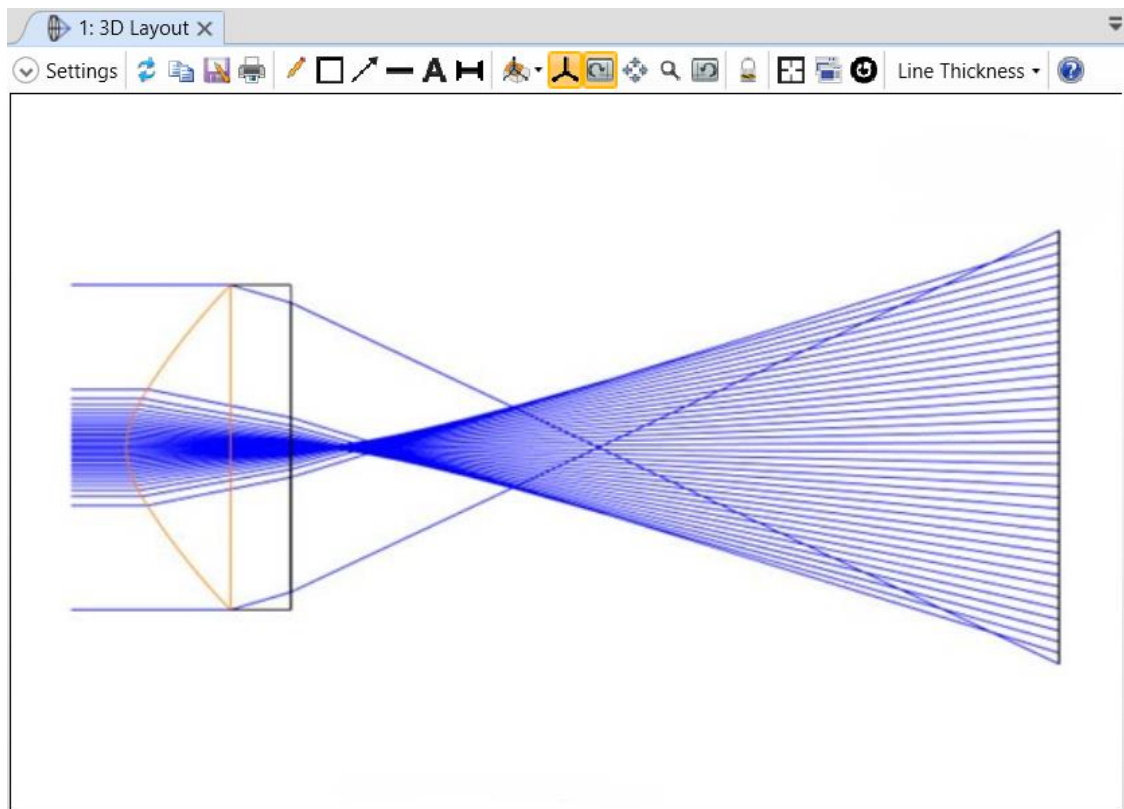


Рисунок 3.4 – Макет системи

Такий результат підтверджує, що сформований розподіл опроміненості дійсно наближається до ідеального профілю з плоскою вершиною, що є метою моделювання системи гомогенізації пучка.

3.2 Аналіз результатів за допомогою геометричного аналізу зображень

Функція геометричного аналізу зображень (Analyze...Extended Scene Analysis...Geometric Image Analysis) показує гауссівський профіль на поверхні №1 та профіль Top Hat на поверхні зображення (рис. 3.5).

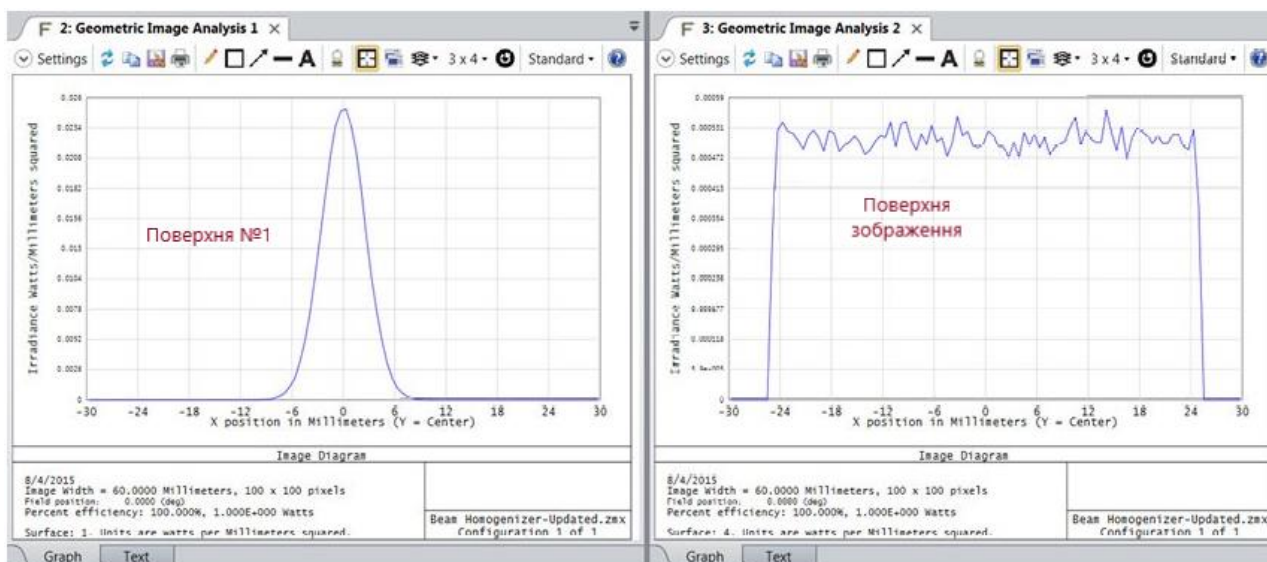


Рисунок 3.5 – Гауссівський профіль на поверхні №1 та профіль Top Hat на поверхні зображення

Якщо в налаштуваннях геометричного аналізу зображення (рис. 3.6) збільшити кількість променів до 500 000 з 200 пікселями, є можливість отримати набагато краще співвідношення сигнал/шум (рис. 3.7).

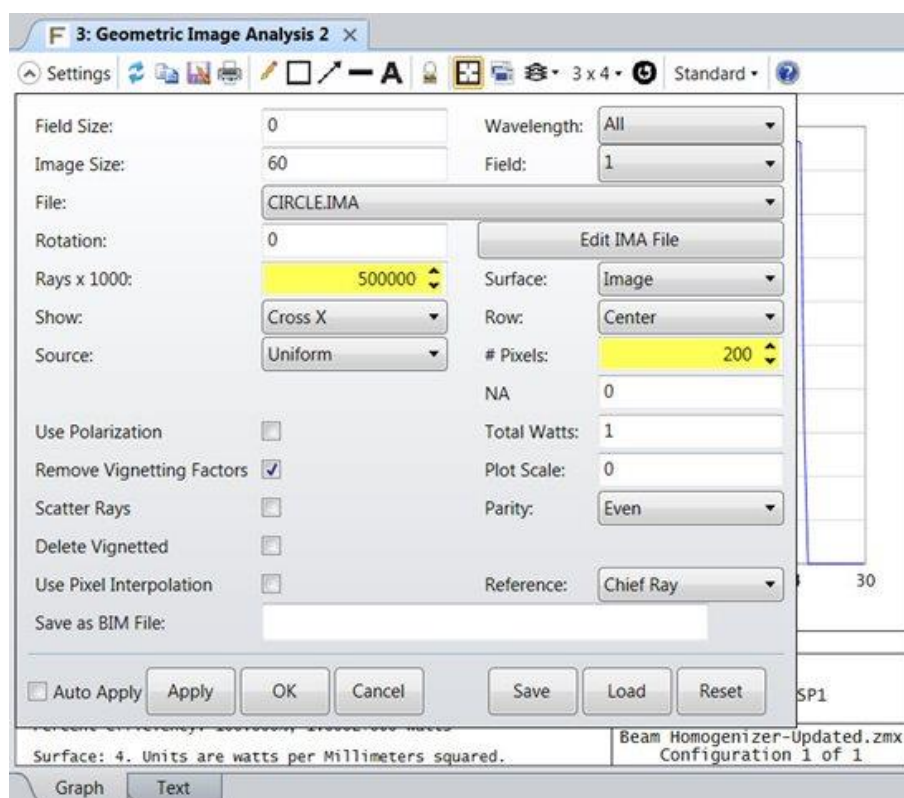


Рисунок 3.6 – Налаштування геометричного аналізу зображення

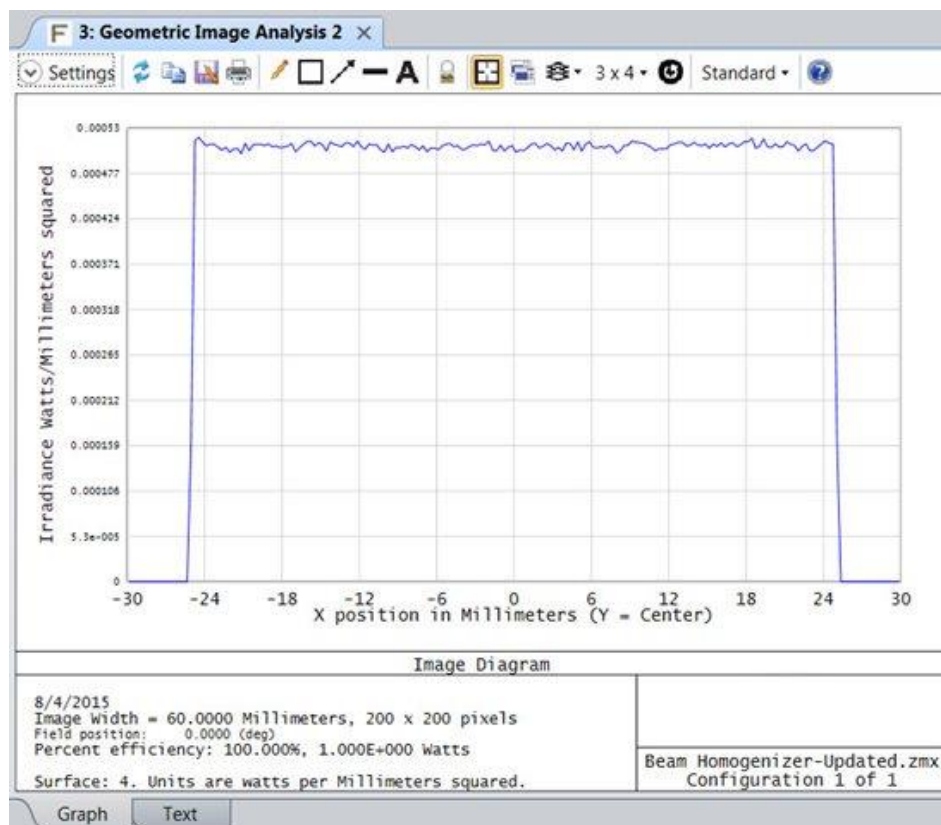


Рисунок 3.7 – Профіль Top Hat на поверхні зображення з кращим співвідношенням сигнал/шум

Висновки до розділу 3. У третьому розділі виконано чисельне моделювання оптичної системи формування профілю типу Top Hat на основі вхідного гаусівського променя в середовищі Ansys Zemax OpticStudio. Застосовано макрос ZPL для автоматичного створення функції якості та оптимізації геометричних параметрів лінзи. Проведений аналіз результатів показав, що отриманий вихідний профіль демонструє високу рівномірність розподілу опроміненості, що підтверджує ефективність запропонованого методу. Підтверджено доцільність використання асферичних поверхонь і оптимізації конічних та парних коефіцієнтів у структурі формувача променя. Результати моделювання підтверджують можливість практичної реалізації системи для високоточних застосувань у лазерних технологіях.

ВИСНОВКИ

У межах кваліфікаційної роботи розв'язано завдання моделювання оптичної системи, що формує лазерний промінь із просторовим розподілом типу «Top Hat», на основі гаусівського вхідного пучка. В результаті проведеного теоретичного аналізу, моделювання та оптимізації отримано наступні науково обґрунтовані результати:

Теоретичний аналіз геометричної та хвильової оптики дозволив обґрунтувати переваги Top Hat профілю над гаусівським у задачах лазерної обробки матеріалів, зокрема у підвищенні однорідності опромінення та якості меж різку.

Проведено аналіз способів формування пучків із заданим профілем: показано ефективність асферичних лінз, фазових пластин, DOE та просторових модуляторів для керування фазою і амплітудою променя. Визначено переваги формувачів променя у вигляді дифракційних елементів для створення плоскоінтенсивного розподілу.

У середовищі Ansys Zemax OpticStudio реалізовано модель однолінзової оптичної системи з передньою асферичною поверхнею, яка забезпечує перетворення гаусівського пучка (з параметрами $w = 5$ мм) у промінь з радіусом рівномірного опромінення $K = 25$ мм.

За допомогою ZPL-скрипту згенеровано функцію якості на основі REAY-операндів, які описують відповідність координат променя бажаному профілю. Виконано оптимізацію трьох змінних параметрів (радіус, конічний коефіцієнт, асферичні коефіцієнти), що дозволило досягти відхилення опроміненості не більше ніж 5% у межах центральної зони зображення.

Отримано візуальне підтвердження досягнення рівномірного розподілу на виході – аподизація променя після оптичної системи відповідає очікуваному профілю типу «Top Hat», що засвідчує правильність вибору геометрії лінзи.

Таким чином, було створено ефективну модель формування променя із заданими характеристиками, яка може бути впроваджена у високоточних лазерних технологіях, де потрібна рівномірна інтенсивність на площині обробки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Avantier Inc. Geometric Optics vs. Wave Optics: Avoid Optical Pitfalls Part 1 URL: <https://avantierinc.com/resources/geometric-optics-vs-wave-optics/#:~:text=Geometric%20optics%20focuses%20on%20reflection,technologies%20like%20anti%2Dreflective%20coatings> (дата звернення 12.05.2025).
2. MacHekhin, Yu P., Yu S. Kurskoj, and A. S. Gnatenko. "Physical and mathematical foundations of measurements in nonlinear dynamic systems." Telecommunications and Radio Engineering 77.18 (2018).
3. Paschotta R. Laser Beams. URL: <https://www.rp-photonics.com/paschotta.html> (дата звернення 14.05.2025).
4. From Wikipedia, the free encyclopedia: Gaussian beam URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_beam (дата звернення 14.05.2025).
5. Мачехін, Ю. П., and О. С. Гнатенко. "Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 2. Параметри лазерного випромінювання." (2021).
6. Holor Top Hat Laser beam explained. 2020 URL: <https://www.holor.co.il/top-hat-laser-beam-explained/> (дата звернення 02.06.2025).
7. Edmund optics Laser Beam Shaping Overview URL: https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/laser-beam-shaping-overview/?srsltid=AfmBOooX581wY8zP99CTZ_wbH-xWxVfCEDqwxk9VRRdIg3Z97PmmEq6R (дата звернення 05.06.2025).
8. Гнатенко, О. С., and Ю. В. Жданова. "Моделювання лазерних прецизійних інформаційно-вимірювальних пристроїв." (2019).
9. Study Optical Elements Last Updated. 2024 URL: <https://arinainphysics.com/educational-resources/optical-elements/#resources> (дата звернення 02.06.2025).
10. Authored By Nam-Hyong Kim, Updated by Alissa Wilczynski How to design a Gaussian to Top Hat beam shaper March 31, 2021 URL: <https://support.zemax.com/hc/en-us/articles/1500005489161-How-to-design-a-Gaussian-to-Top-Hat-beam-shaper;>

11. Kurskoy, Yu S., O. S. Hnatenko, and O. V. Afanasieva. "Precision Synchronization of Chaotic Optical Systems." (2021).
12. Бітюков, А. Ю., and О. С. Гнатенко. "Розрахунок та моделювання оптики приймальних вузлів лазерних систем." (2019).
13. Kurskoy, Y., Hnatenko, O., Sherstyuk, D., Zarytskyi, V., Chernovolyk, G., Nussupbekova, G., ... & Muslimov, K. (2024, December). Precision control model for chaotic laser generation in optical communication and laser measurement systems. In *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2024* (Vol. 13400, pp. 208-215). SPIE.
14. Svelto O. *Principles of Lasers* Fifth edition Milan, 2010. 625 p.
15. Dickey F. M., Holswade S. C. *Laser Beam Shaping: Theory and Techniques* New York: Marcel Dekker, 2000. 12 p. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/752659> (дата звернення 02.06.2025).
16. Гнатенко, О. С. "Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 3. Фемтосекундні лазери для інформаційно-вимірювальних технологій." (2023).
17. Hnatenko, Oleksandr S., et al. "Fiber-optic system for control of the orientation of objects in space." *Optical Fibers and Their Applications 2023*. Vol. 12985. SPIE, 2023.
18. Kurskoy, Yu S., O. S. Hnatenko, and O. V. Afanasieva. "Application of Supercontinuum in Optical Gyroscopy." (2023).
19. Machekhin, Yu P., S. S. Herasymov, and O. S. Hnatenko. "Design and optimal parameters of a small-sized diode-pumped Nd: YAG laser setup." (2023).
20. Мачехін, Ю. П., Гнатенко, О. С., Курський, Ю. С., Семенець, В. В., & Неофітний, М. В. (2019). Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 1. Лазерна інформаційновимірювальна техніка для задач військового призначення.
21. Hnatenko, O. S., Machekhin, Y. P., Neofitnyi, M. V., & Gulak, S. V. (2019). Design and study of a laser system for detecting optical devices.
22. Obozna, V. P., and O. S. Hnatenko. "Formation of Laser Radiation Pulses for Encoding in Formation." (2018).

23. Obozna, V. P., & Hnatenko, O. S. (2019). The impact of laser radiation on nanoparticles, which using in medical.