

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 другий (магістерський)
МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ
ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ФТОІм-22-1
Стрілець І.О.
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма «Фотоніка та
оптоінформатика»
(повна назва освітньої програми)

Керівник зав. каф. ФОЕТ Гнатенко О.С.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Гнатенко О.С.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Стрільцю Івану Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання параметрів оптичних випромінювачів для проєктування інформаційно-вимірвальних систем

затверджена наказом університету від « 03 » листопада 2023 р. № 1285 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 23 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Пакет комп'ютерного моделювання Zemax.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 1 Пляма Пуассона. 2 Вибірка кілець Френеля. 3 Моделювання лазерних променів високого порядку 4 Гаусові промені. 5 Теорія гаусового пучка. 6 Інструмент physical optics propagation.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 14 слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про моделювання пучків лазерного випромінювання	05.09.23 – 29.09.23	Виконано
2	Дослідження жорстких лінз та їх матеріалів	10.10.23 – 28.10.23	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків характеристик в пакеті Zemax/Opticstudio	03.11.23 – 20.11.23	Виконано
4	Аналіз розрахунків та параметрів лазерного випромінювання	23.11.23 – 30.11.23	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	02.12.23 – 17.12.23	Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	22.12.23 – 03.01.24	Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	09.01.24 – 18.01.24	Виконано
8	Проходження перевірки на плагіат	19.01.24 – 21.01.24	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	22.01.24 – 24.01.24	

Дата видачі завдання 01 вересня 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 69 с. , 71 рис., 4 табл., 1 додаток, 20 джерел.

ВИБІРКА КІЛЕЦЬ ФРЕНЕЛЯ, ГАУСОВІ ПРОМЕНІ, ІНСТРУМЕНТ PHYSICAL OPTICS PROPAGATION, ПЛЯМА ПУАССОНА, ТЕОРІЯ ГАУСОВОГО ПУЧКА

Об'єкт дослідження – моделювання параметрів пучків лазерного випромінювання з допомогою програми Zemax.

Мета роботи – використати інструмент Physical Optics Propagation (POP) у OpticStudio (Zemax), для моделювання та знаходження параметрів пучків лазерного випромінювання.

Методи дослідження – аналітичний, чисельний та експериментальний за допомогою інструменту Physical Optics Propagation (POP) у OpticStudio (Zemax).

У роботі були розглянуті питання щодо використання фізичного оптичного розповсюдження в Opticstudio, про комп'ютерний пакет для моделювання променів – ZEMAX Opticstudio. Проведено роботу з налаштування джерела Гауса в OpticStudio, використовуючи: послідовні промені, непослідовні промені, параксіальні гаусові пучки, поширення фізичної оптики.

ABSTRACT

Explanatory note of attestation work: 69 pp., 71 Fig., 4 Tables, 1 addition, 20 sources.

SAMPLE FRENEL RINGS, GAUS BEAMS, PHYSICAL OPTICS
PROPAGATION INSTRUMENT, POISSON SPOT, GAUSI BEAM THEORY

The object of research is to model the parameters of laser beams using Zemax software.

Research methods - analytical, numerical and experimental using the tool Physical Optics Propagation (POP) in OpticStudio (Zemax).

The paper discusses the use of physical optical propagation in Opticstudio, the computer package for modeling rays - ZEMAX Opticstudio. Work has been done to adjust the Gaussian source in OpticStudio, using: sequential rays, inconsistent rays, paraxial Gaussian beams, propagation of physical optics.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	8
Вступ.....	9
1 Використання фізичного оптичного розповсюдження (pop) в opticstudio	10
1.1 Початок роботи.....	10
1.2 Довідкові файли щодо поширення фізичної оптики	10
1.3 Приклад файлу об'єктива	11
1.4 Початковий результат POP	13
1.5 Перевірка файлів променя	15
1.6 Проблеми з даними про інтенсивність пучка	17
1.7 Вирішення проблеми з вибіркою.....	21
1.8 Регулювання дискретизації в колімованому просторі	23
1.9 Недостатнє зображення.....	26
1.10 Порівняння з результатами геометричного трасування променів.....	28
1.11 Пляма Пуассона	31
1.12 Вибірка кілець Френеля	31
1.13 Приклад системи	33
1.14 Перевірка фазових даних	34
1.15 Швидша система.....	38
1.16 Прогнозування необхідної вибірки	40
2 Моделювання лазерних променів високого порядку в zemax/opticstudio.....	43
2.1 Моді Ерміта-Гауса.....	43
2.2 Моді Лагерра-Гауса.....	45
2.3 Моді Інса-Гауса	47
2.4 Гаусові промені	50
2.5 Теорія Гаусового пучка	51
2.6 Промені проти гауссівських променів	51
2.7 Технічні характеристики лазера та дані вимірювань	52
2.8 План роботи	54

2.9 Промені порівняно з параксіальним гауссівським методом та POP	62
2.10 Особливості використання POP	63
Висновки.....	67
Перелік джерел посилання	68
Додаток Б Демонстраційний матеріал	70

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

GBPS з DENC – типи пучків;

DLL – вихідний код бібліотеки;

NA – об'єктний простір;

NSC – режим об'єктиву;

POP – Physical Optics Propagation або ж фізичне оптичне розповсюдження;

PSF – вид аналізу;

SE – системний оглядач;

ZOS – zemax/Opticstudio.

ВСТУП

Лазерна техніка включає в себе пристрої та установки, які використовують лазерне випромінювання для виконання різних функцій. Наприклад, в інформаційно-вимірювальних лазерних пристроях відбувається виділення інформації про об'єкт, що міститься в лазерному випромінюванні. Медичні та технологічні установки використовують лазерне випромінювання для спрямованого впливу на об'єкт. У приймально-передаючих лазерних системах здійснюється формування та обробка лазерного випромінювання.

Технічні характеристики лазерних пристроїв визначаються властивостями лазера як джерела випромінювання. При виборі конкретного лазера важливе розуміння параметрів і характеристик, що описують його властивості. Питання моделювання параметрів та характеристик лазера, як джерела випромінювання, становить важливий етап курсу. Засвоєння цих концепцій є необхідним для ефективного використання лазера в приладі.

Параметри – це величини, що можна виразити числом, а характеристики визначають залежність параметрів одного від іншого, включаючи поняття, що описують роботу лазера.

Мета роботи – моделювання лазерних променів високого порядку в zemax/opticstudio.

1 ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ФІЗИЧНОГО ОПТИЧНОГО РОЗПОВСЮДЖЕННЯ (POP) У ПРОГРАМІ OPTICSTUDIO

1.1 Початок роботи

OpticStudio (Zemax) використовує інструмент під назвою Physical Optics Propagation (POP), який впливає на електричні поля у вільному просторі. Цей інструмент є засобом перегляду файлів променя, дозволяючи аналізувати фазу та інтенсивність променя на кожній поверхні [1].

1.2 Інформаційні матеріали про розповсюдження фізичної оптики

Перш ніж розпочати свою роботу, важливо зазирнути в інформацію про інструмент POP у довідкових файлах OpticStudio (рис. 1.1). Щоб це зробити, переходимо до розділу Help...System Help. У розділі «Зміст» ми переходимо до «Вкладка «Аналіз» > Група «Лазер та волокна» > «Про поширення фізичної оптики», як показано нижче [1].



Рисунок 1.1 – Дані про інструмент POP, які містяться у довідкових файлах OpticStudio

1.3 Приклад файлу об'єктива

Оцінюваний файл об'єктива представлений на рис. 1.2 і є дволінзовою системою. Перша лінза колімує промінь, а друга фокусує його. Обидві лінзи в цій системі є асферичними синглетами, в яких використовується асферичний елемент r^4 для компенсації сферичної аберації. В колімованій частині променів спостерігається невелике центральне затемнення. Довжина хвилі для цієї системи фіксована на рівні 1 мкм.

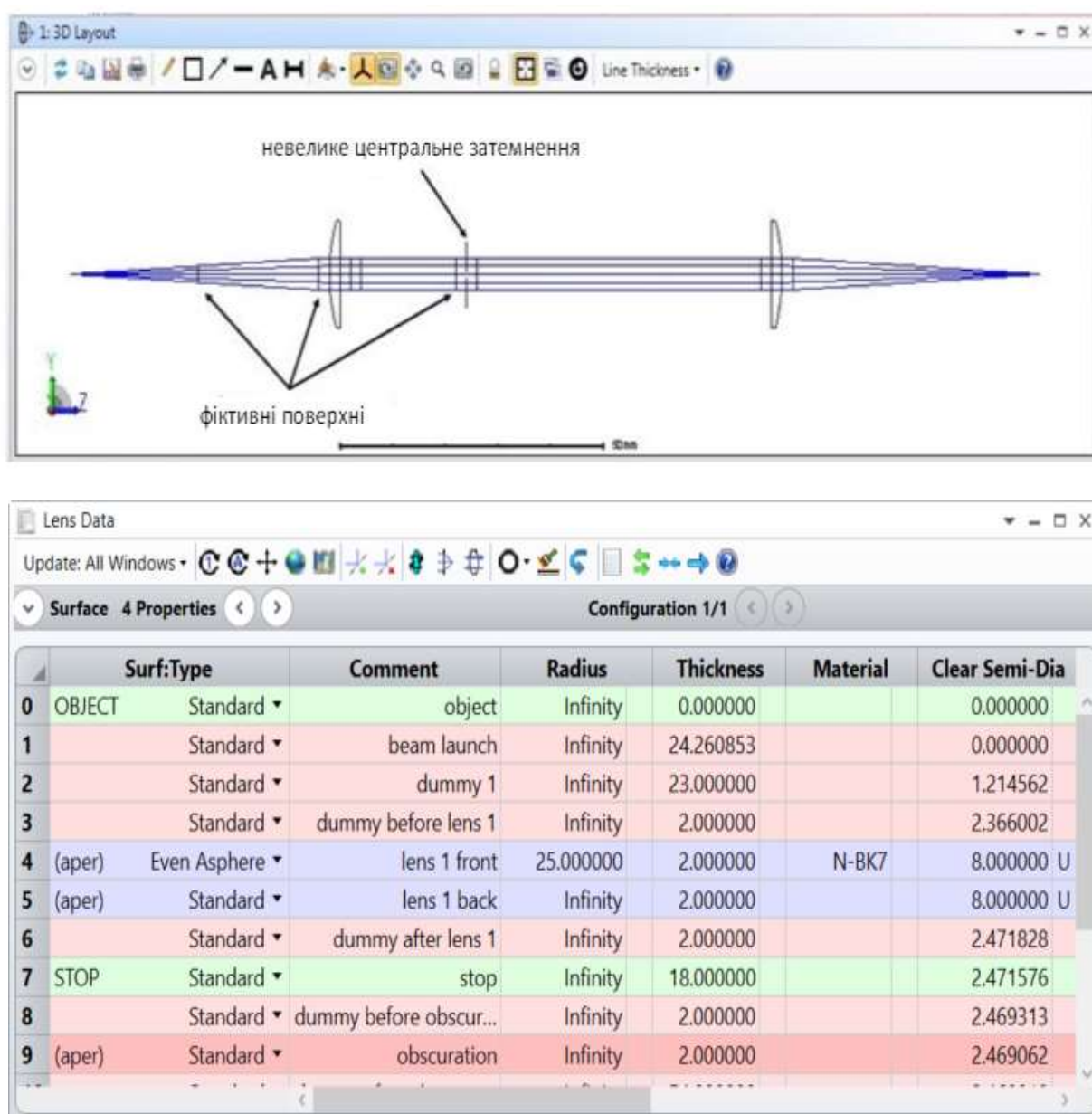


Рисунок 1.2 – Система з двох лінз та дані об'єктива

В систему вводимо промінь, який має гаусівський профіль, подібний тому, що поширюється через оптоволокно. У системному оглядачі, який представлений нижче, апертура встановлена на Object Space NA, і її значення дорівнює 0,05. Це відповідає куту розбіжності променя приблизно $2,9^\circ$ та напівдіаметру перетяжки гаусового променя приблизно 6,4 мікрметра за використанням наведеного у рівнянні нижче:

$$NA = n \sin \theta, \quad (1.1)$$

$$w_0 = \frac{\lambda}{\pi \tan \theta}. \quad (1.2)$$

Незважаючи на установки, які ми внесли, графічне представлення макету відтворює тільки геометричні промені. Однак сама композиційна схема не відображає справжній гаусовий промінь.

У нашій системі, яку ми використовуємо, промені служать відмінним інструментом для уявлення гаусового променя в областях, що розташовані одразу за межами перетяжки променя. Таким чином, ми можемо використовувати графіки контурів та інші аналітичні засоби на основі променів для перевірки результатів POP на кожному етапі, поки не будемо в безпосередній близькості до фокусу. (рис. 1.3) [2].



Рисунок 1.3 – Вибір опції «об'єктний простір»

1.4 Початковий результат POP

Розпочинаємо оцінку POP, перейшовши до розділу Analyze...Physical Optics (рис. 1.4).

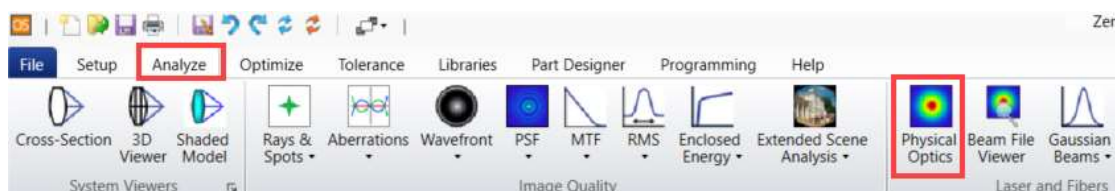


Рисунок 1.4 – Перехід до опції аналізу

Натиснувши стрілку вниз в лівому верхньому куті вікна POP для доступу до параметрів. Проаналізувавши POP, ми зауважили, що простір NA об'єкта не враховується системним оглядачем; тепер потрібно вручну встановити NA в POP [3].

Зазначимо, що у розділі "Загальні" всі ваші параметри відповідають зображенню нижче (рис. 1.5).

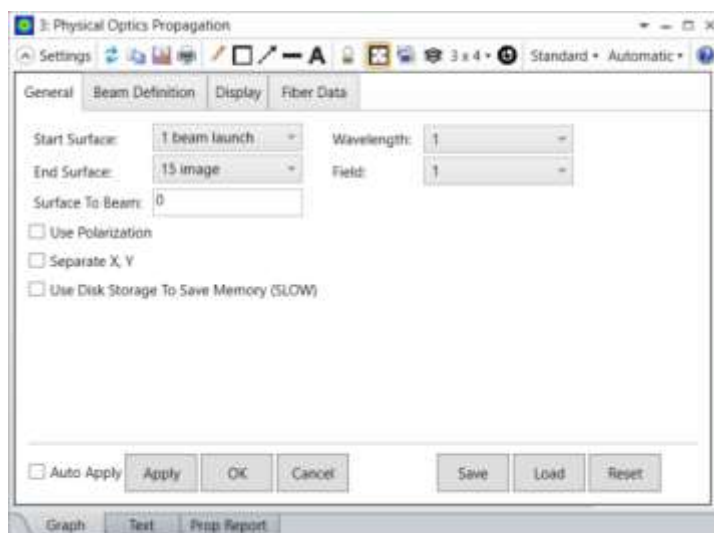


Рисунок 1.5 – Розділ «загальне», у інтерфейсі фізичного оптичного розповсюдження

У розділі "Визначення променя" оберемо "Тип променя: Гаусове звуження" та встановимо розмір звуження, відповідно до вхідної числової апертури променя, яка становить 0,05, що приблизно дорівнює 6,36 мікрометра. Це відповідає налаштуванню "Звуження X/Y": 0,00636 мм. Також встановимо сітку вибірки з щільністю 1024x1024 (X-/Y-Sampling: 1024) та X-/Y-шириною 0,1 мм (рис. 1.6).

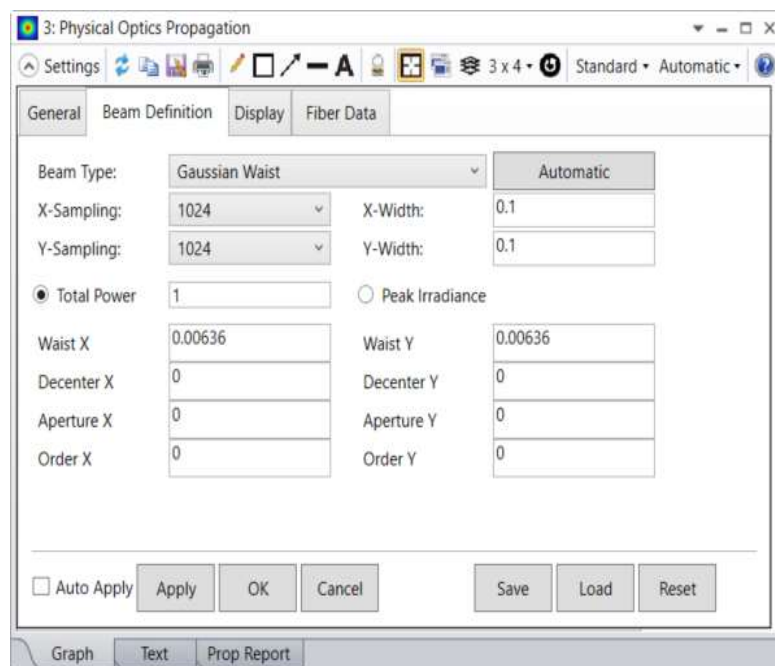


Рисунок 1.6 – Розділ «визначення променя», у інтерфейсі фізичного оптичного розповсюдження

На вкладці "Відображення" відмітили "Зберегти вихідний промінь в:" та "Зберегти промінь на всіх поверхнях". З цими налаштуваннями генерується файл Zemax Beam (.zbf) для кожної поверхні, який включає інформацію про електричне поле (рис. 1.7) [4].

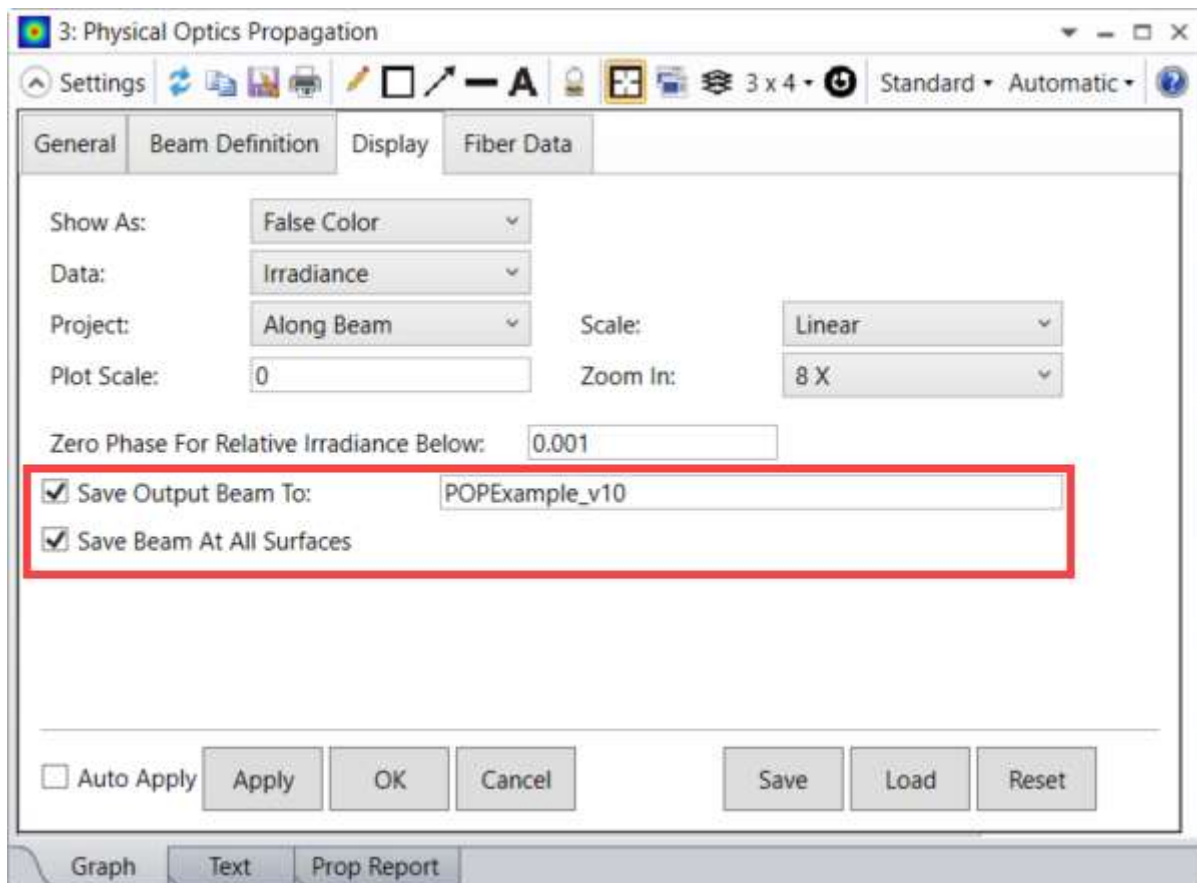


Рисунок 1.7 – Розділ «Відображення», у інтерфейсі фізичного оптичного розповсюдження

1.5 Перевірка файлів променя

Для виявлення та усунення несправностей, важливо проаналізувати файли променів, які були зафіксовані на різних поверхнях. Запустимо Beam File Viewer через Analyze...Beam File Viewer (рис. 1.8).

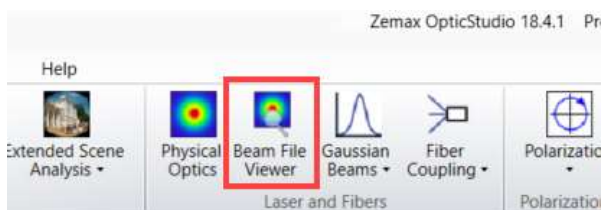


Рисунок 1.8 – Перехід у опцію «Переглядач файлів променю»

В розділі "Налаштування" у вікні "Перегляд файлів Beam" доступний відкритий список для вибору файлу .zbf. Кожен файл отримує додатковий індекс "00XX" в кінці для відзначення поверхні, яку представляє променевий файл. Файл без номера поверхні відображається на зображенні і співпадає з результатом, представленим у вікні POP (рис. 1.9).

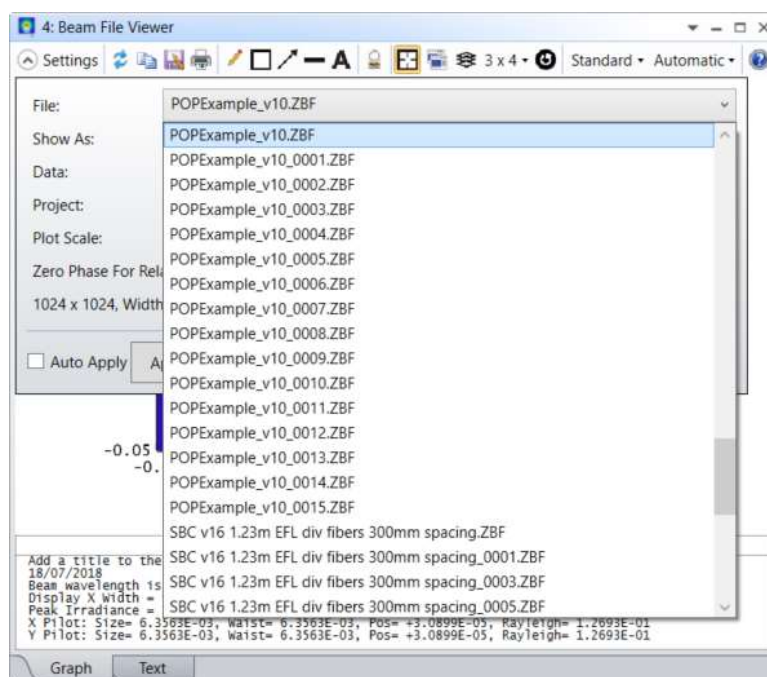


Рисунок 1.9 – Список з вибором файлів променя

Інформацію можна представляти різними способами. В основному використовується дані типу Data: Irradiance та Phase, які відображаються за допомогою опції Show As: False Color. Тим не менш, наше використання також охоплює поперечні перерізи, логарифмічні графіки та функції масштабування (рис. 1.10).

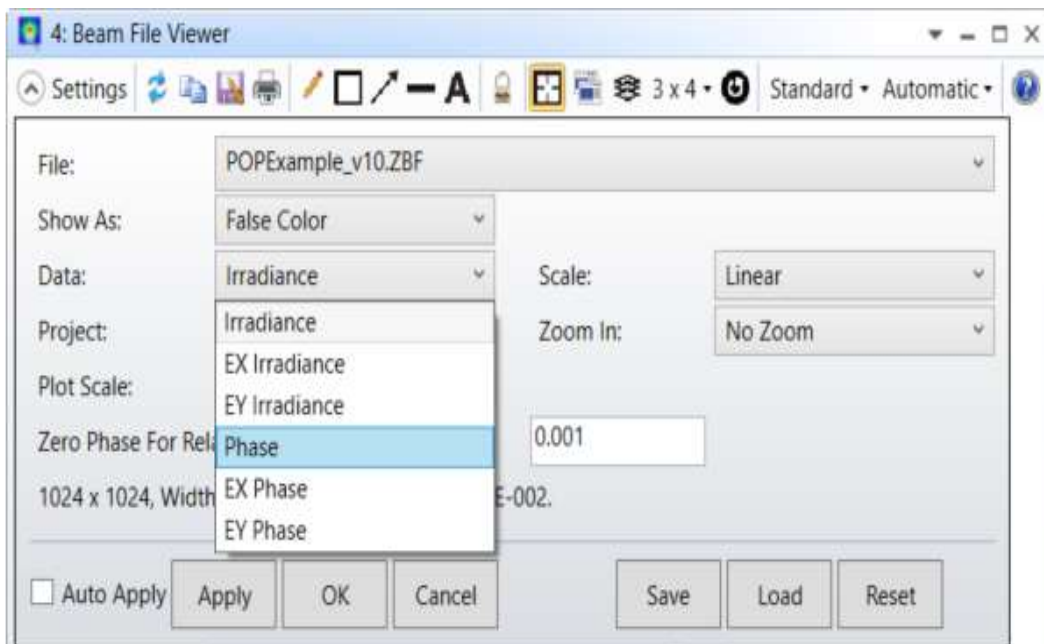


Рисунок 1.10 – Використання інформації «Data: Irradiance та Phase», що відображається як «Show As: False Color»

Поринемо в аспекти, які можуть виникнути у профілях інтенсивності променя при використанні фізичної оптики (POP) у програмі OpticStudio. Можливі проблеми включають недостатню дискретизацію променів або відсутність відповідної захисної смуги навколо променя. Ми розглянемо, як виявити ці аспекти та як можна вирішити ці питання [5].

1.6 Проблеми з даними про інтенсивність пучка

Інструмент перегляду променів використовується для аналізу променів на різних поверхнях, як показано на прикладі системи на рис. 1.11.

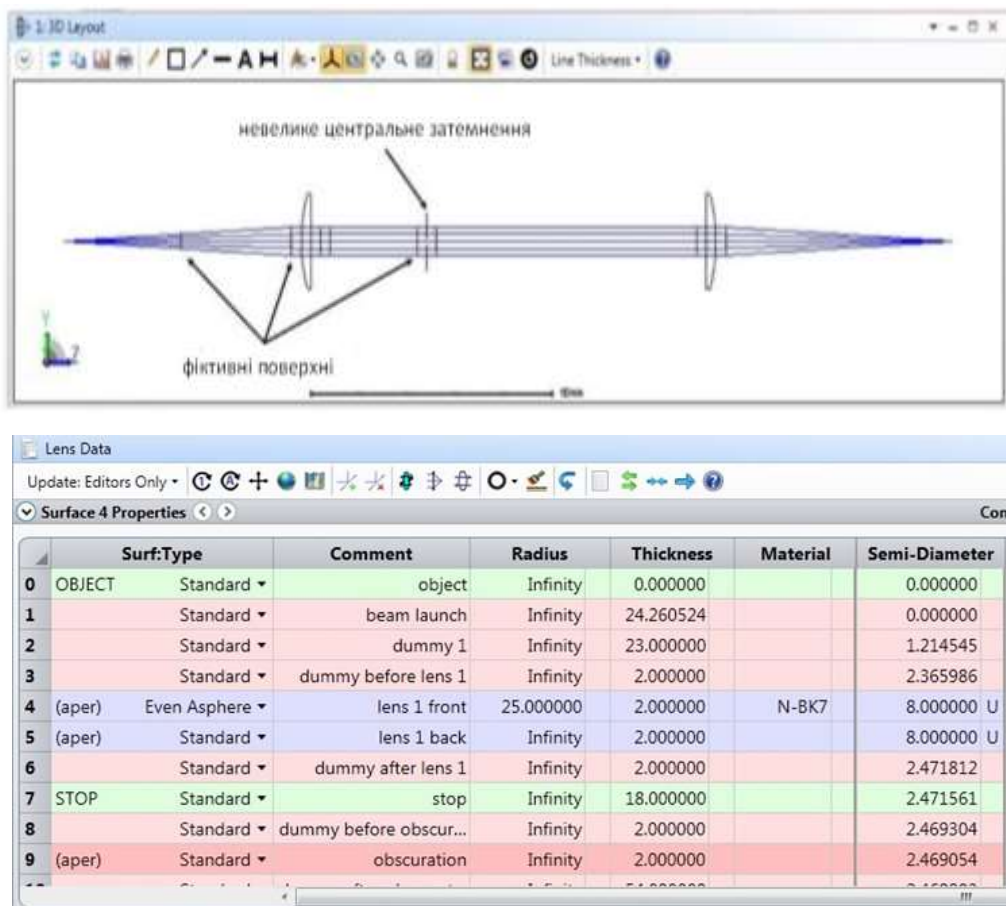


Рисунок 1.11 – Дволінзова система та дані об'єктива

Оскільки файли променів були збережені під час виконання POP, можливо перевірити їх на будь-якій поверхні, обравши відповідний файл у засобі перегляду променів (рис. 1.12).

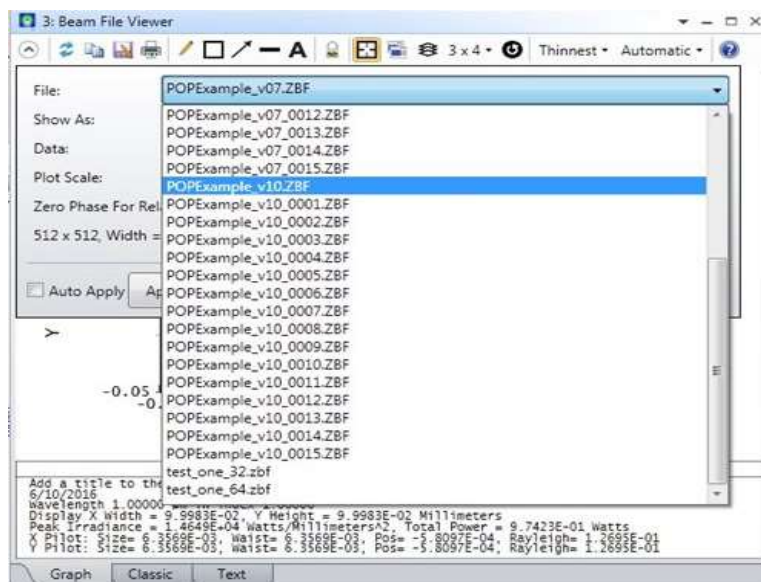


Рисунок 1.12 – Вибір відповідного файлу у засобі перегляду файлів балки

Перша поверхня – це умовна поверхня, яка розташована на площині об'єкта. Таким чином, промінь, що падає на поверхню 1, є представником променів, які введені в систему. Спостереження відповідає очікуванням: гаусів пучок із радіусом перетяжки 6,4 мікрона, як показано на зображенні нижче (рис. 1.13).

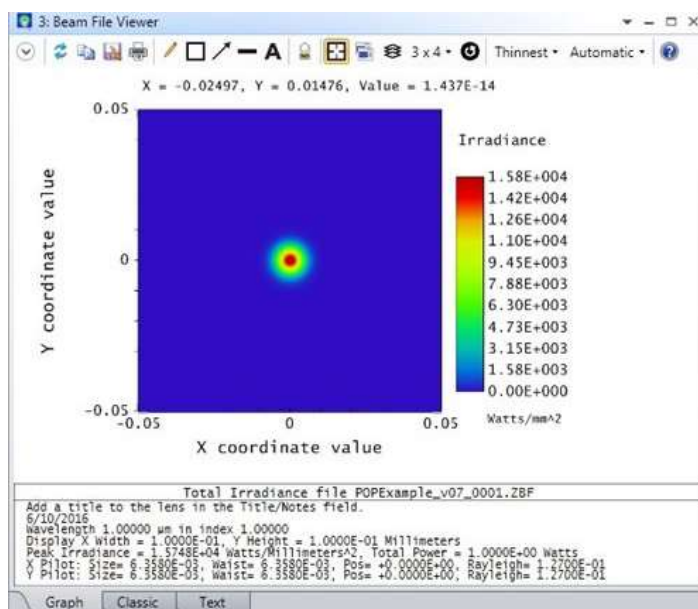


Рисунок 1.13 – Гаусів пучок із радіусом перетяжки 6,4 мк

Проте на другій поверхні розмір сітки значно збільшився до 124,2 мм, і промінь виглядає менш чітко, з низькою роздільною здатністю (рис. 1.14).

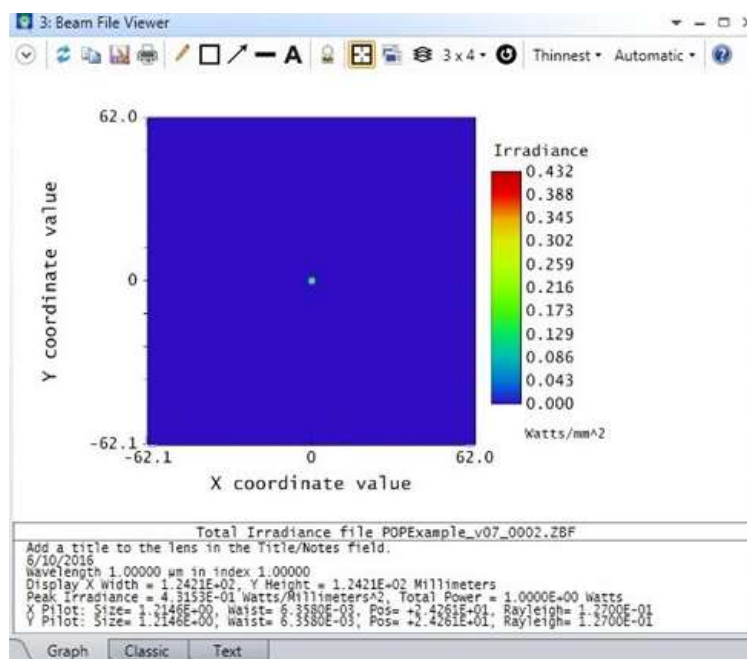


Рисунок 1.14 – Зміни у Поверхні 2

Перед першою лінзою на поверхні 4 промінь виявляє ще гірше дискретизацію зі шириною сітки 253,8 мм. Збільшення променя вказує на окремі пікселі. Границі пікселів призводять до різких змін інтенсивності, що призводить до появи високочастотних артефактів як по осях X, так і Y вздовж шляху розповсюдження променя. Щоб сказати простіше, промінь недостатньо дискретизований, що подалі може створювати проблеми (рис. 1.15) [6].

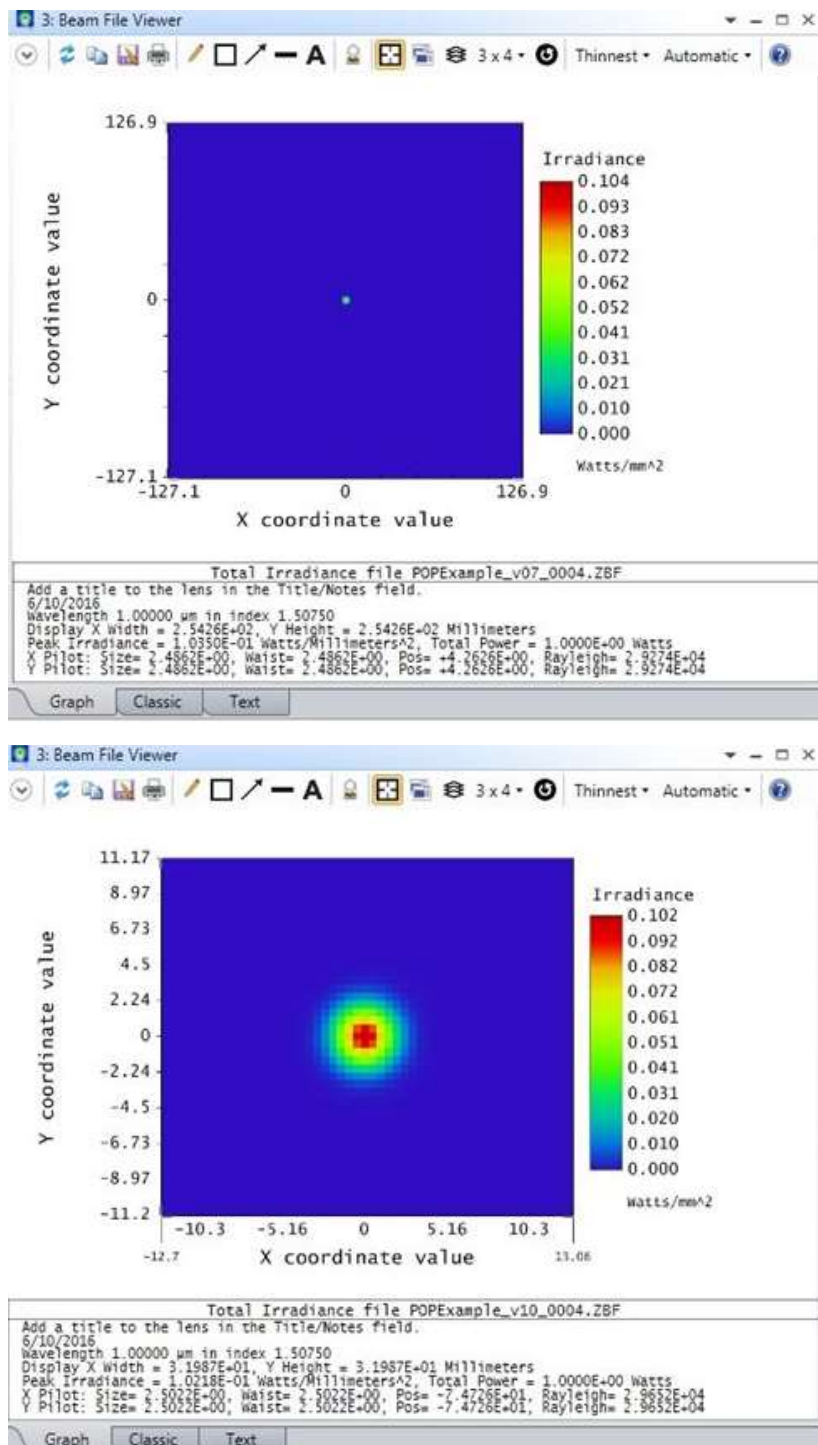


Рисунок 1.15 – Огляд дискредитації променів

1.7 Вирішення проблеми з вибіркою

Для вирішення даної труднощі збільшимо ширину початкової сітки. Промінь пройшов значну оптичну відстань від фокусу до передньої частини

першої лінзи, що, фактично, є перетворенням Фур'є променя. У випадку Фур'є-перетворень розширення на поверхні обернено пропорційне ширині сітки на попередній поверхні. Іншими словами, ширина сітки в одному просторі визначає розмір пікселя в наступному просторі, отже, більша ширина сітки на першій поверхні призводить до вищої роздільної здатності на другій поверхні (рис. 1.16).

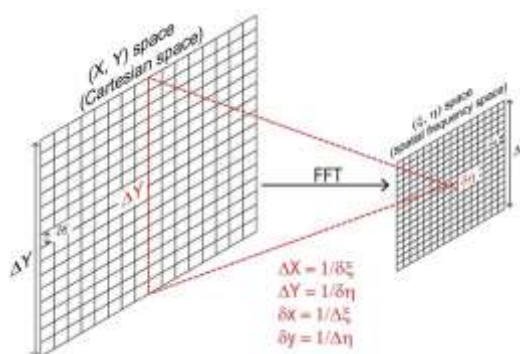


Рисунок 1.16 – Зображення вирішення проблеми з вибіркою

У даному випадку ми скоригуємо початкову ширину сітки, змінивши значення X-/Y-Width від 0,1 мм до 0,4 мм (рис. 1.17). Це призведе до поліпшення роздільної здатності на поверхнях від 2 до 4.

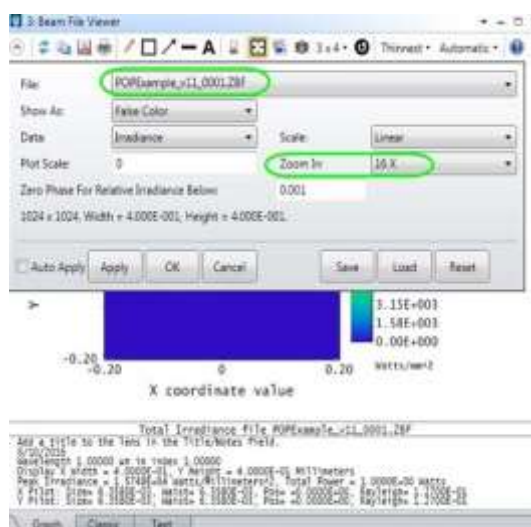


Рисунок 1.17 – Збільшення масштабу променя заданої поверхні

Після запуску POP ми перевіримо, чи промінь на поверхні 1 має адекватну роздільну здатність, збільшивши масштаб променя на цій поверхні. Також будемо враховувати, чи вибірка поперек променя залишається у нормі (рис. 1.18).

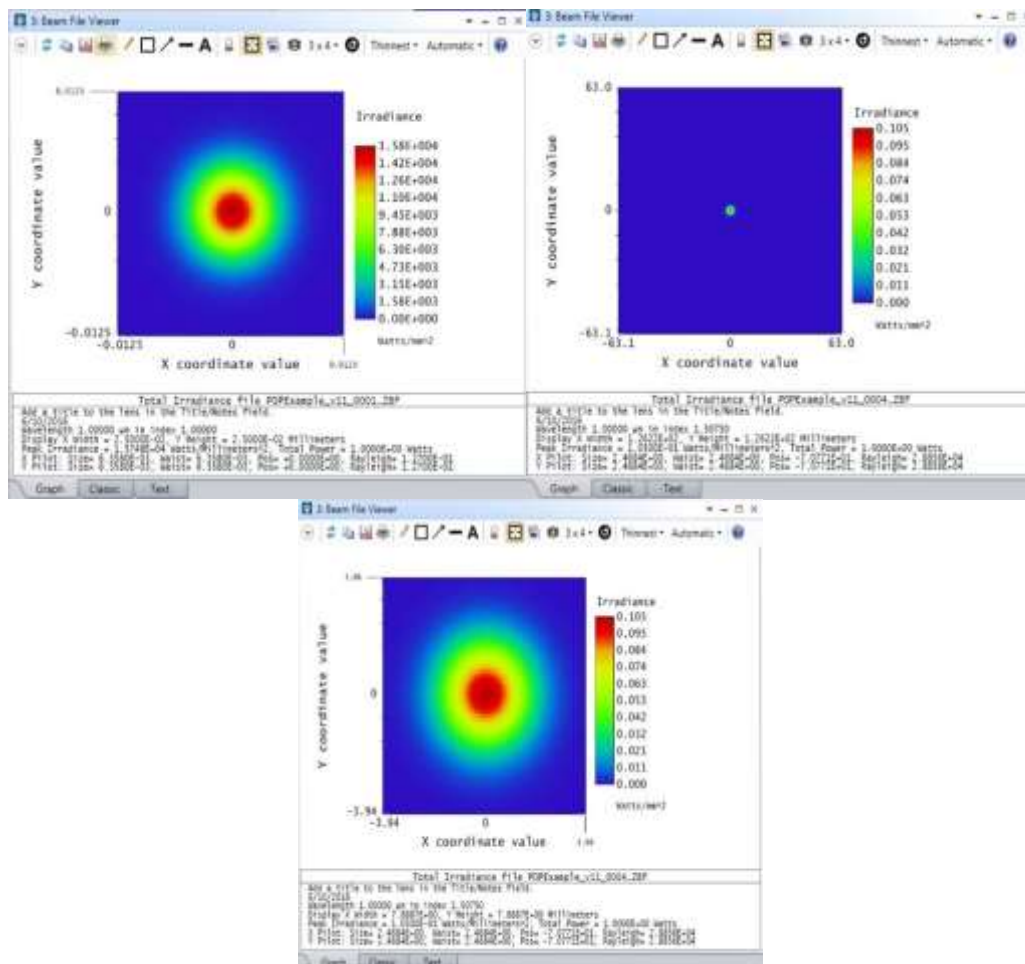


Рисунок 1.18 – Зображення вирішення проблем з вибіркою

На поверхні 4 теперішній розмір сітки становить більш обґрунтоване значення – 126 мм. При збільшенні масштабу видно, що вибірка поперек променя тепер значно поліпшилася [7].

1.8 Регулювання дискретизації в колімованому просторі

Розглянемо промінь, коли він досягає поверхні 9, де розташовано кругле затемнення. У наведеному зображенні можна помітити, що ширина сітки залишилася

незмінною, проте кругле затемнення тепер має пікселізацію. Так само, як у випадку променя з недостатньою дискретизацією на поверхні 2, різкі краї вздовж областей X та Y пікселів викликатимуть появу нереалістичних артефактів при подальшому поширенні (рис. 1.19).

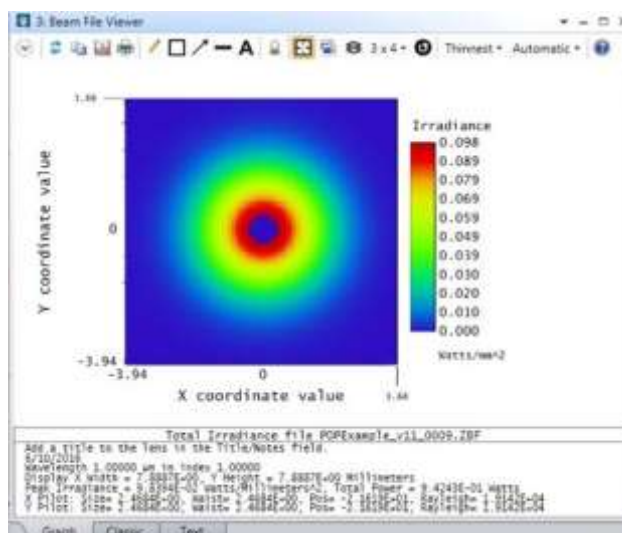


Рисунок 1.19 – Зображення нефізичних артефактів шляхом поширення

Розглядаючи аранжування, можна вбачити, що розмір променя практично не змінюється між поверхнею 3 (передня частина першої лінзи) та поверхнею 9 (затінення), оскільки промінь не пройшов значну оптичну відстань. Отже, якщо ми внесемо зміни у вибірку на поверхні 3, ми можемо автоматично застосувати ці зміни до всієї поверхні, що залишається в колімованому просторі.

Повернувшись до файлу балки на поверхні 3, можемо побачити, що загальна ширина сітки складає 120 мм. Ми вирішимо змінити вибірку цього променя в розділі Surface 3 Properties...Physical Optics у редакторі даних об'єктива. Встановимо загальну ширину сітки на рівень 30 мм, що збільшить кількість пікселів поперек променя у 4 рази (рис. 1.20).

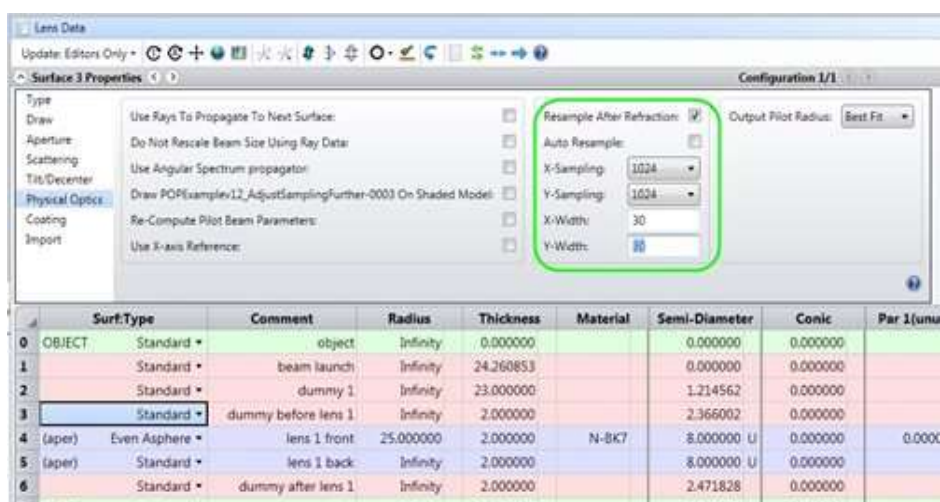
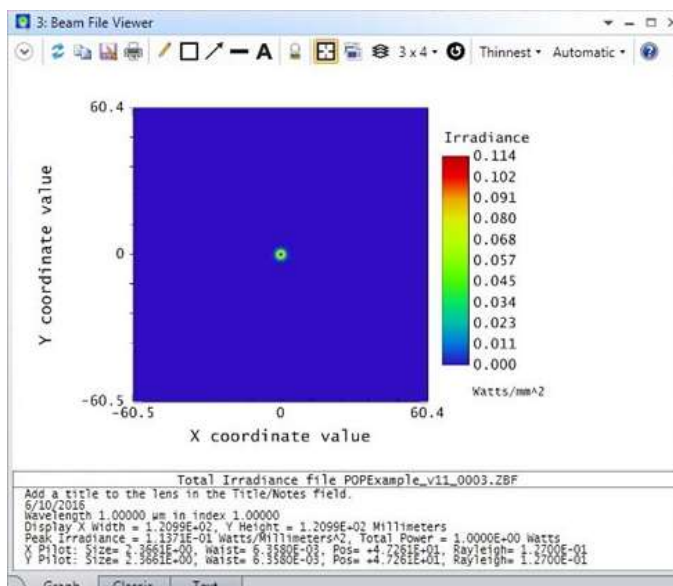


Рисунок 1.20 – Зміна вибірки променя в меню *Surface 3 Properties...Physical Optics* та зміна загальної ширини сітки задля збільшення пікселів поперек променя

При повторному запуску POP можемо зауважити, що ширина сітки на поверхні 3 тепер дорівнює 30 мм. Продовжуючи аналіз до поверхні 9 та збільшуючи масштаб, ми також спостерігаємо, що центральне затемнення тепер розширено значно краще, що допомагає мінімізувати артефакти, пов'язані з краями пікселів (рис. 1.21) [8].

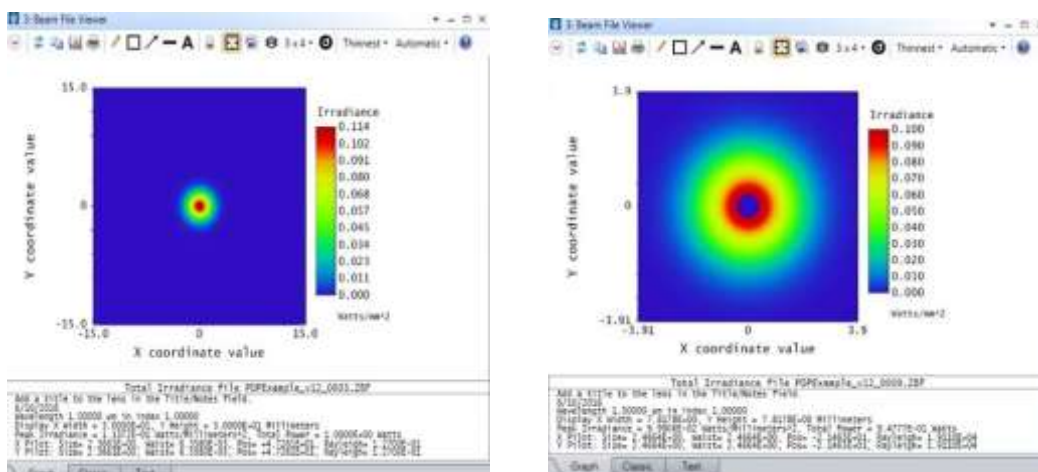


Рисунок 1.21 – Розширення центрального затемнення, для мінімізації артефактів від країв пікселів

1.9 Недостатнє зображення

З урахуванням двох попередніх змін вибірка виглядає задовільно на поверхні 13, що відповідає задній частині другого синглета. На жаль, аналіз інтенсивності променя в площині зображення (поверхня 15) вказує на те, що ця вибірка не є оптимальною (рис. 1.22).

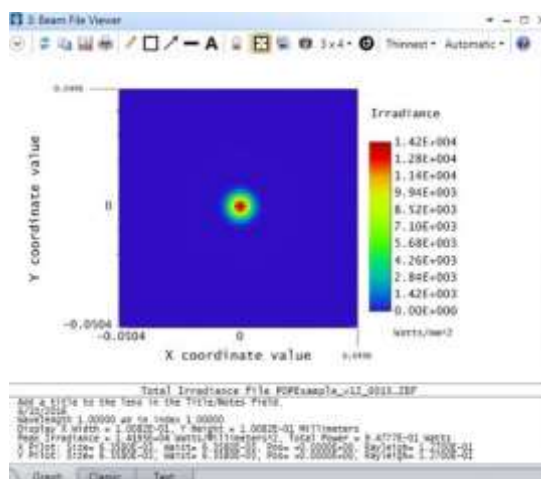


Рисунок 1.22 – Перевірка інтенсивності променя у площині зображення

Однак промінь знову проходить значну оптичну відстань, подолавши задню частину другого лінзового елемента для досягнення фокусу. Відтак, дозвіл у площині зображення обернено пропорційний загальній ширині сітки за заднім об'єктивом. Розширення ширини сітки на поверхні 14, яка розташована після другого лінзового елемента, вирішить проблему вибірки в області зображення.

Для досягнення цього ми здійсимо повторну вибірку на фіктивній поверхні зі стартовою шириною сітки 30 мм (рис. 1.23).

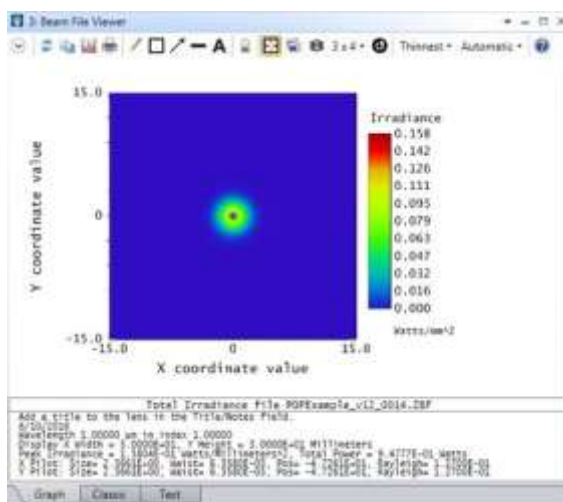


Рисунок 1.23 – Збільшення ширини сітки позаду другого об'єктива шляхом повторної вибірки на фіктивній поверхні

В параметрах поверхні внесемо зміни в ширину сітки, установивши значення X-/Y-Width на рівні 60 мм (рис. 1.24).

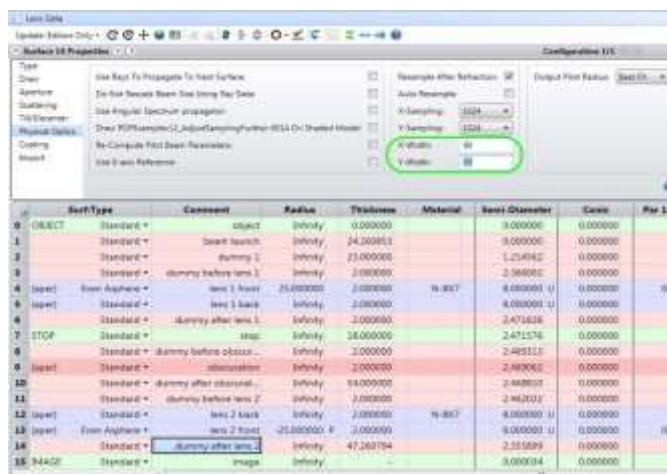


Рисунок 1.24 – Зміна ширини сітки

Після нового виконання POP можна відзначити, що промінь, подібно до попереднього випромінювання, вдало дискретизується на поверхні 14. В площині зображення роздільна здатність поперек променя поліпшується вдвічі (рис. 1.25) [9].

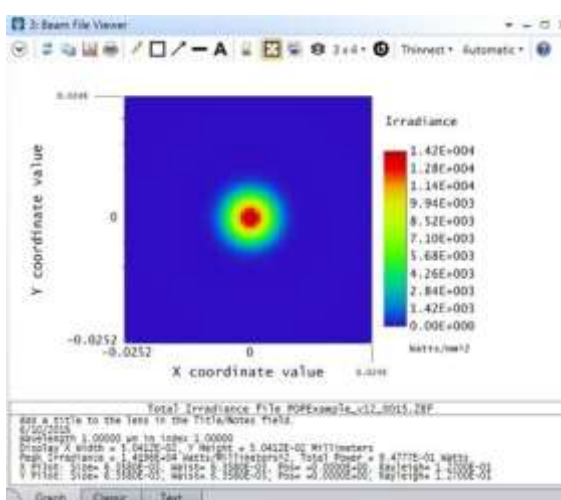


Рисунок 1.25 – Стабільна дискретизація променя

1.10 Порівняння з результатами геометричного трасування променів

Для даного прикладу, якщо знаходитися далеко від фокусу, геометричні промені можна успішно розглядати як апроксимацію гауссового променя. Таким

чином, ми можемо знову перевірити результати, отримані від POP, порівнюючи їх з результатами геометричного променя. Для такої перевірки особливо корисно використовувати діаграму сліду, оскільки вона відображає геометричні перетини променів з поверхнею та апертурою цієї поверхні (рис. 1.26).



Рисунок 1.26 – Опція діаграма відбитку

Нижче представлено приклад перевірки за допомогою діаграми посадкового місця. Для геометричних променів ми встановили аподизацію по Гаусу на 1, що робить краї променів точковими точками інтенсивності. У вікні перегляду файлів Beam можна відзначити, що у Surface 9 півдіаметр сітки становить 7,8 мм. Для порівняння в параметрах Surface 9...Aperture встановлюємо максимальний радіус: 7,2 мм. Це дозволяє створити графік контуру з аналогічним масштабом, що й у файлі променя. Зіставлення цих двох елементів показує, що розміри променів взаємодіють добре (рис. 1.27).

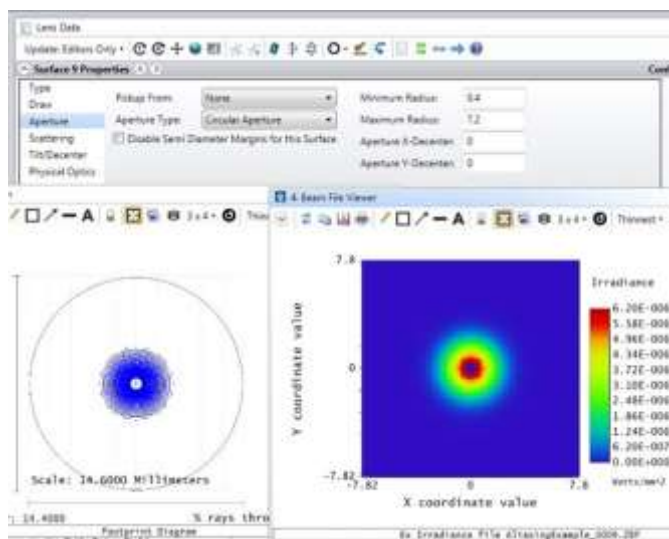


Рисунок 1.27 – Приклад перехресної перевірки з використанням діаграми посадкового місця

Але, якщо порівняти їх у фокальній площині, дві діаграми відрізняються. Це пояснюється тим, що геометричні промені фокусуються ідеально, тоді як Гаусів промінь має обмежений розмір в зоні звуження. Важливо пам'ятати, що для перехресної перевірки результатів POP неприємно використовувати діаграму сліду поблизу фокусу (рис. 1.28) [10].

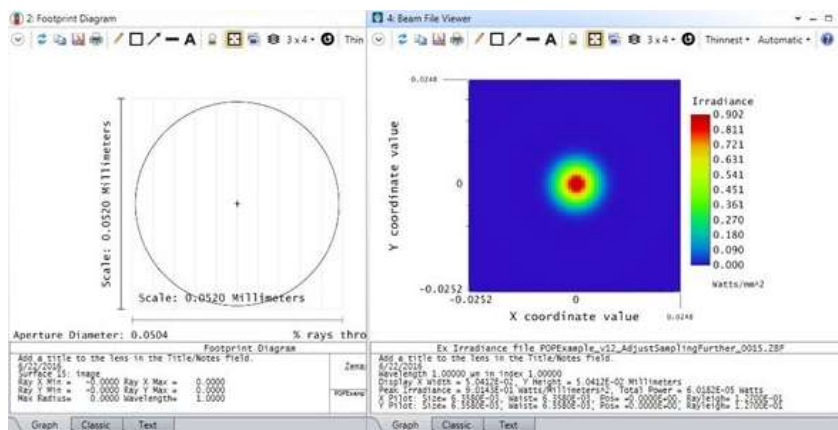


Рисунок 1.28 – Геометричні промені ідеально фокусуються, а Гаусів промінь має кінцевий розмір звуження

1.11 Пляма Пуассона

Поверхня 11 розташована перед другою лінзою і знаходиться на певній відстані від центрального затемнення. Файл променя на цій поверхні відображає цікаві особливості. Очікувані кільця Френеля розходяться від краю апертури, і в центрі променя спостерігається яскрава пляма, відома як пляма Пуассона.

Давайте коротко заглянемо в історію: у 1818 році Пуассон був суддею на конкурсі, організованому Французькою академією наук. Френель брав участь у цьому конкурсі з теорією дифракції хвиль світла. Пуассон, який вірив у корпускулярну теорію світла, сумнівався у тому, що можна очікувати яскраву пляму в центрі після затемнення. Суперечки були вирішені, коли засновник організації експериментально відтворив яскраву пляму, і тим самим Френель переміг у конкурсі (рис. 1.29) [11].

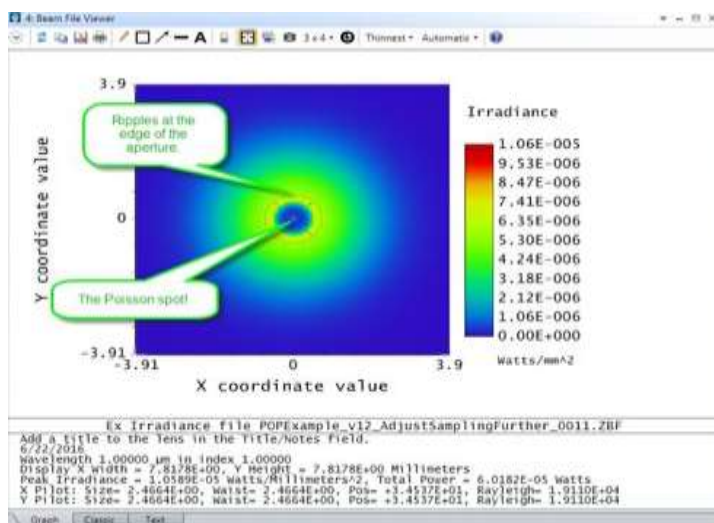


Рисунок 1.29 – Пляма Пуассона

1.12 Вибірка кілець Френеля

До речі, при аналізі поперечного перерізу променя на поверхні 11 видно, що узор брижів, відомий також як кільця Френеля, і яскрава пляма можуть бути поліпшені (рис. 1.30).

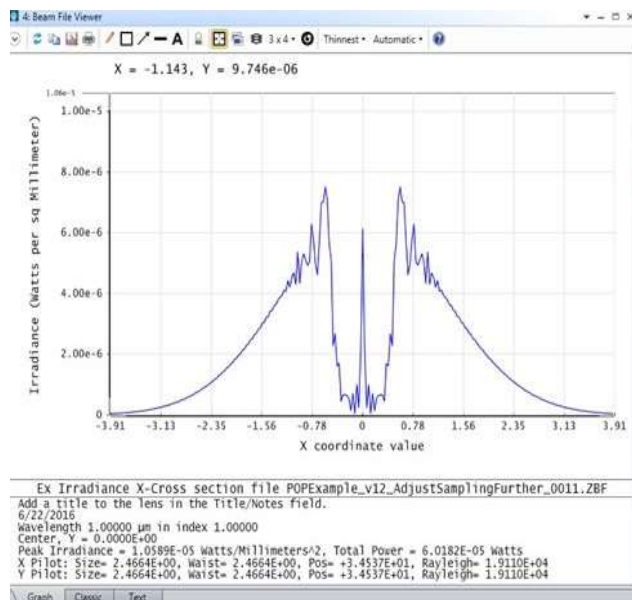


Рисунок 1.30 – Покращення вибірки брижів і яскравої плями

Можна поліпшити вибірку, зменшивши ширину сітки на поверхні 3 до менше ніж 30 мм. Проте при цьому навколо променя залишиться лише невелика захисна смуга. Найбільш оптимальним варіантом виявиться збільшення загальної вибірки з 1024 до 2048. Зміни слід внести як у вікні POP, так і у властивостях фізичної оптики окремих поверхонь, що вже були налаштовані. Наведені нижче зображення демонструють покращений результат після розширення вибірки до 2048. Якщо час обчислень обмежений апаратними можливостями комп'ютера, можливе подальше збільшення вибірки, за умови, що це не призведе до значного збільшення обчислювального часу (рис. 1.31) [12].

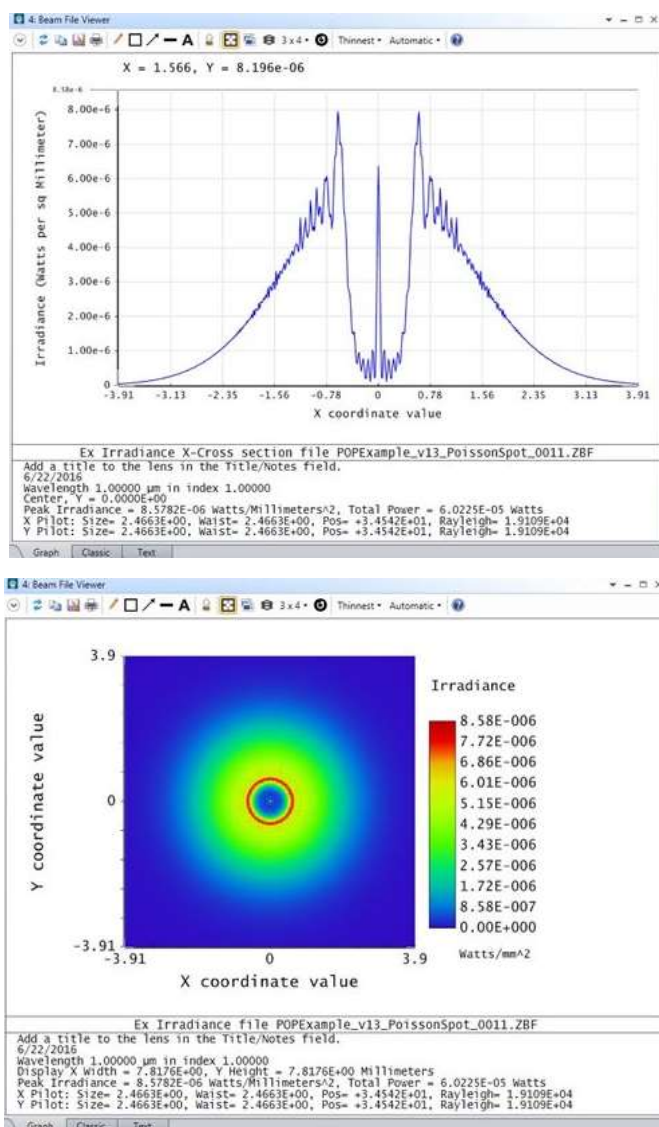


Рисунок 1.31 – Покращений результат після збільшення вибірки

1.13 Приклад системи

Для перевірки променя на різних поверхнях у прикладі системи нами скористалися засобом перегляду файлів променя Beam File Viewer (рис. 1.32).

За умови, що файли балки залишилися непошкодженими під час виконання POP, можемо використати засіб перегляду файлів балки для аналізу її характеристик на будь-якій поверхні, визначивши відповідний файл збереження [12].

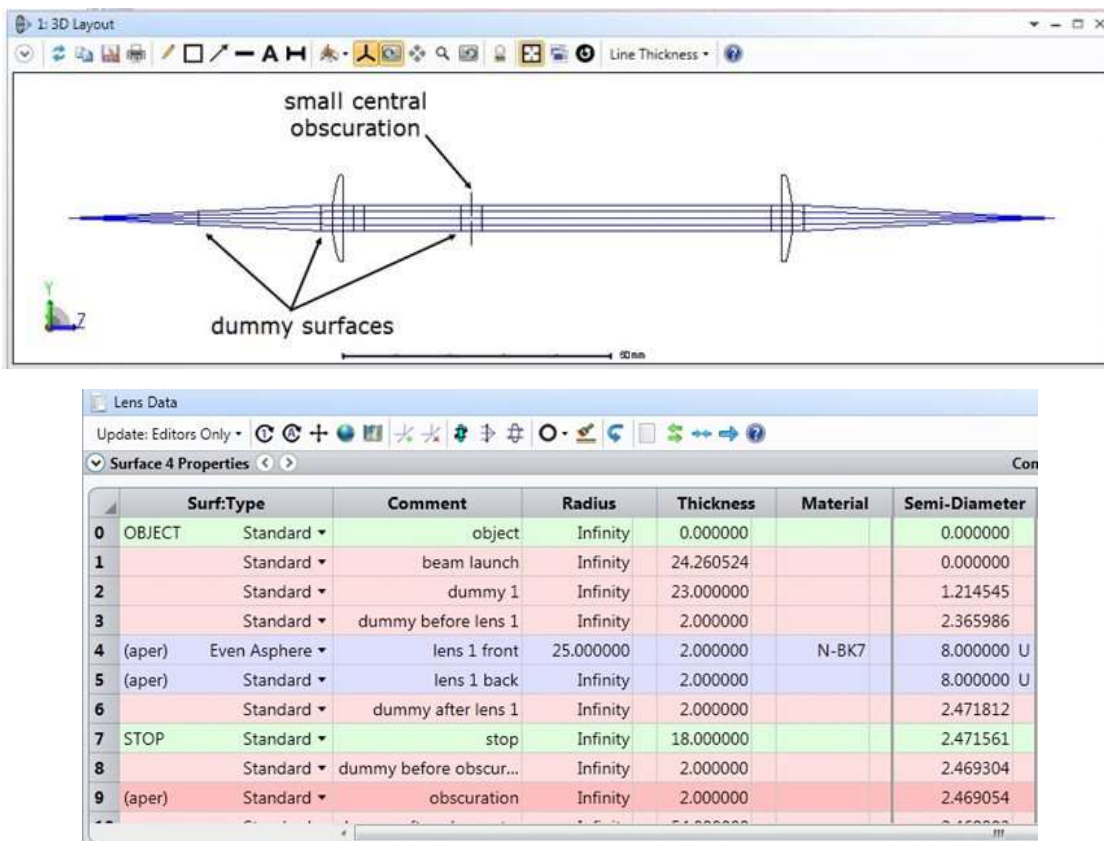


Рисунок 1.32 – Компонувальна діаграма та редактор даних об'єктива для прикладу системи

1.14 Перевірка фазових даних

Тепер, після успішного завершення вибірки амплітуди, проведемо аналіз вибірки фази. Як правило, фазові профілі змінюються швидше та вимагають більше уваги при вимірюванні, порівняно з профілями інтенсивності пучка.

Лінза зазвичай вносить квадратичну зміну фази падаючого променя. У програмі OpticStudio фаза відображається в діапазоні від $-pi$ до pi . Якщо лінза змінює фазу на величину більше, ніж pi , ми спостережемо "фазове накладання" на графіку фази. Наприклад, фаза $3p_i/2$ буде відображатися як $p_i/2$. Таке накладання фази є відповідністю та узгодженням графіка, що не вказує на реальні розриви фази, внесені лінзою у промінь!

Для аналізу фази використовуємо Beam File Viewer для дослідження передньої частини об'єктива, поверхні 4. Профіль інтенсивності на відповідному зображенні виглядає нормально (рис. 1.33).

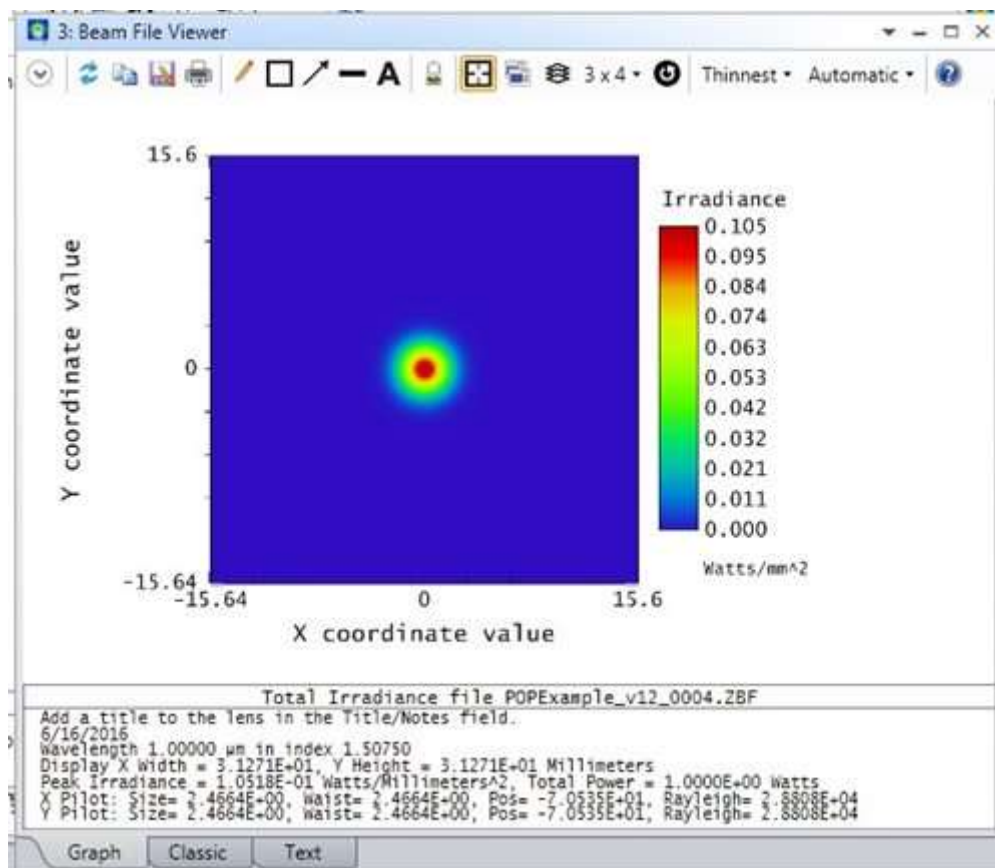


Рисунок 1.33 – Профіль інтенсивності на поверхні 4 перед першою лінзою

Тепер, завдяки Beam File Viewer, можемо відображати дані фази замість інтенсивності (рис. 1.34).

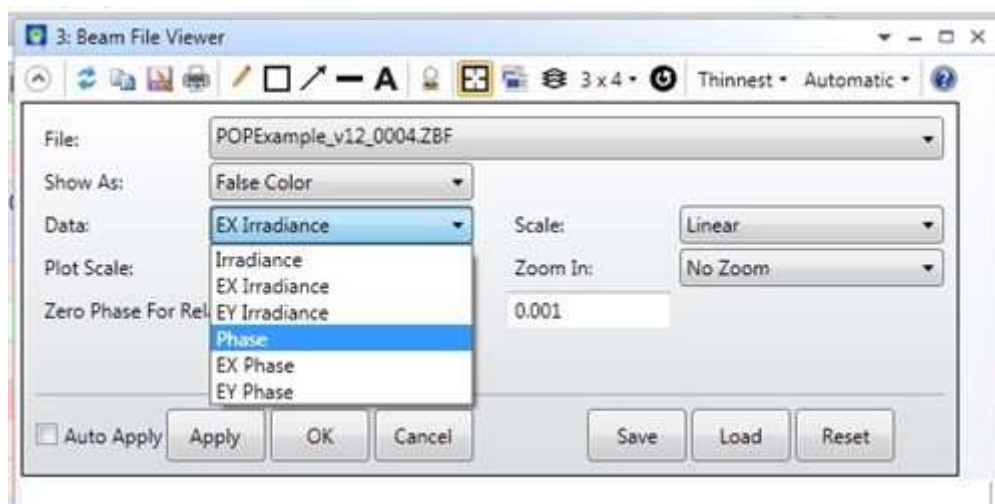


Рисунок 1.34 – Налаштування засобу перегляду файлів Beam для відображення фазових даних

Отриманий графік виглядає задовільно (рис. 1.35). З'явлення покриву у даних може бути пояснено зсувом фази. Однак усі компоненти фази виглядають належним чином семпльованими.

Можемо знову перевірити вибір фази, аналізуючи графік поперечного перерізу. (У розділі "Показати як" в налаштуваннях Beam File Viewer оберіть "Cross X" або "Cross Y".) На рис. 1.36 представлений поперечний переріз. Видно, що без згортання фази введена об'єктивом мала плавну форму і була б належним чином семпльована. (У цьому випадку форма фази відповідає r^4 , що свідчить про те, що лінза є асферичною з присутнім членом r^4 . Сферична лінза матиме форму r^2).

Важливо провести аналіз кожної поверхні у системі, щоб переконатися, що фаза правильно відібрана у всіх випадках [13].

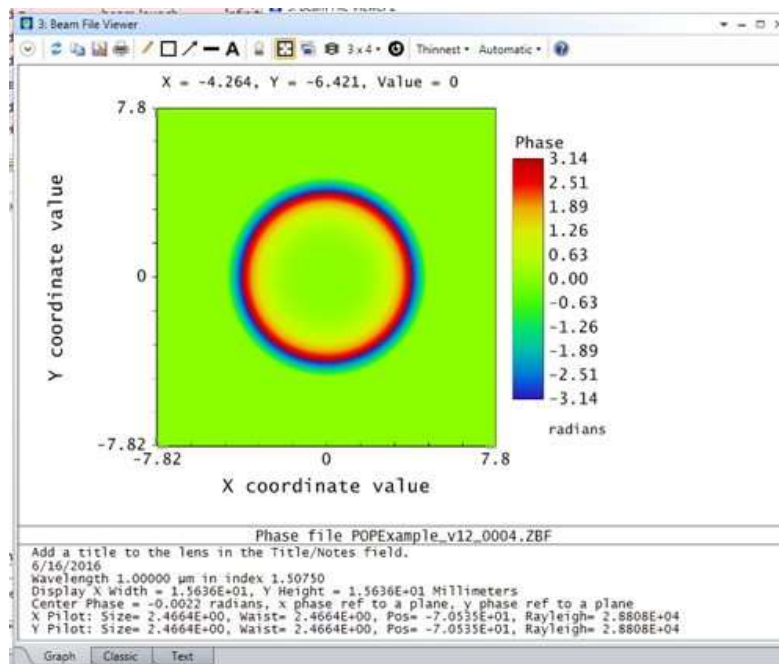


Рисунок 1.35 – Фаза на поверхні 4 перед першою лінзою. Кільця даних викликані угодою про побудову графіків, що призводить до перенесення фази

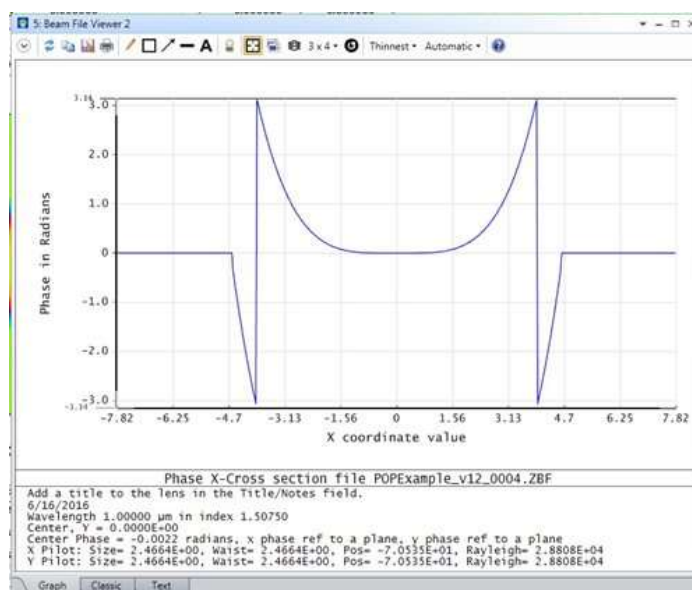


Рисунок 1.36 – Поперечний переріз фази на поверхні 4 перед першою лінзою показує, що фаза, введена лінзою, добре відібрана

1.15 Швидша система

Нижче представлена оптична система, у якої числова апертура складає 0,2, а фокусна відстань приблизно 40 мм. Об'єктиви володіють $F/\#$ приблизно 2,4. Також важливо відзначити, що обидві лінзи включають асферичні елементи на своїх вигнутих поверхнях для корекції сферичної аберації (рис. 1.37).

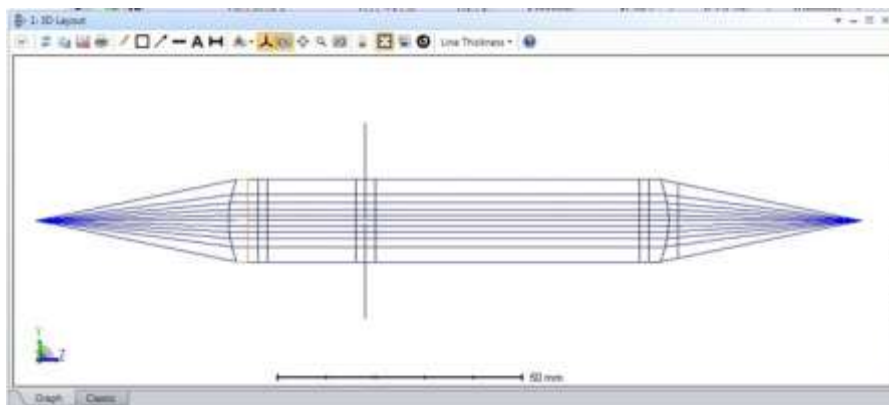


Рисунок 1.37 – Швидша система для аналізу

Радіус звуження при числовій апертурі 0,2 становить близько 1,56 мкм. Запускаємо POP із заданими параметрами, що відображено на рис. 1.38. Також я скористався методом описаним у розділі 1, щоб налаштувати вибірку перед та після лінз.



Рисунок 1.38 – Налаштування POP для швидкої системи

У передній частині першої лінзи інтенсивність променя виглядає належним чином та вибрано добре. Проте, при конструюванні фази отримується шаблон, який представлений на рис. 1.39, 1.40 і 1.41. Початкові кільця на фазі виміряні правильно. З приближенням до краю апертури нахил фази стає більш крутим, і кільця дискретизуються неякісно. Це призводить до явища аліасингу: фаза швидко змінюється, але функція моделюється повільніше, що призводить до виникнення дивних геометричних зображень, які не відображають справжню фазу об'єктива [13].

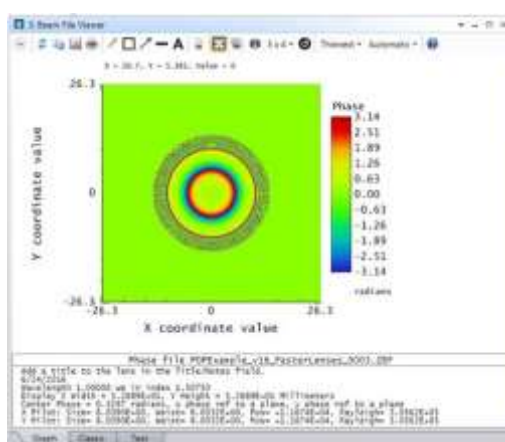


Рисунок 1.39 – Фазовий профіль перед об'єктивом 1 недостатньо дискретизований, що створює дивні візерунки через аліасинг

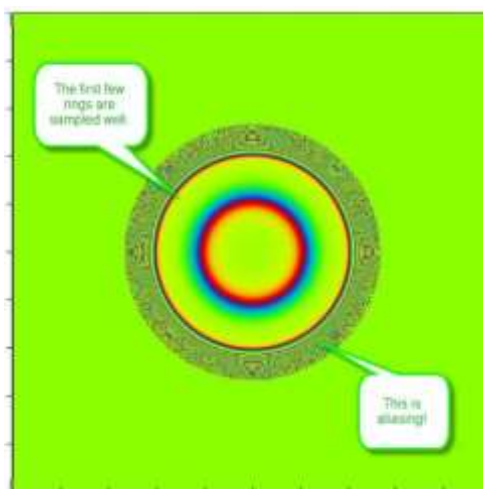


Рисунок 1.40 – Псевдоніми з'являються ближче до межі фазової функції об'єктива

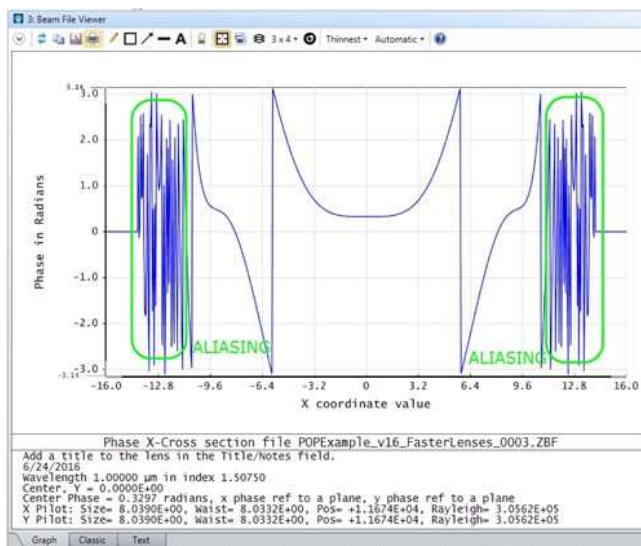


Рисунок 1.41 – Поперечний переріз фази перед лінзою також ясно показує області недостатньої дискретизації

1.16 Прогнозування необхідної вибірки

Отже, для того, щоб розширити розмір сітки та забезпечити належну вибірку фазового профілю цієї лінзи, необхідно виконати розрахунки за допомогою редактора функції якості OpticStudio (можна також скористатися макросом ZPL). Деталі розрахунку функції якості представлені на рис. 1.42.

Використовуваний план:

1. Проведемо вимір оптичних шляхів для двох променів, які знаходяться поблизу краю променя та розділені невеликою відстанню у зіниці (місце ймовірної найкрутішої зміни фази).

2. Обчислимо кількість пікселів, необхідних для вибірки зміни фази між цими променями.

3. Помножимо це на повний діаметр апертури, щоб знайти загальну кількість пікселів, необхідних для охоплення всієї апертури.

Отриманий розрахунок передбачає, що для забезпечення точності потрібно 4 пікселі на 1 хвилю оптичної різниці ходу. Розрахунок для повної зіниці показує, що нам знадобиться сітка розміром 38 000 пікселів на 38 000 пікселів.

Type	Comment								
1	BLNK	MERIT FUNCTION TO CALCULATE # OF PIXELS NEEDED IN POP							
2	BLNK								
3	BLNK	1. CALCULATE OPD							
4	BLNK	Check OPD of two rays near the edge of the pupil, separated by a small amount.							
5	BLNK	Choose a location in the pupil where the slope of the OPD is steepest.							
6	PLEN	0	3	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
7	PLEN	0	3	0.000	0.000	0.000	0.990	0.000	0.000
8	BLNK	OPD between the two rays in millimeters is:							
9	DIFF	6	7					0.000	0.000
10	BLNK	The wavelength in microns is:							
11	WLEN	1						0.000	0.000
12	BLNK	So the OPD in waves is:							
13	CONS							1000.000	0.000
14	PROD	9	13					0.000	0.000
15	DIVI	14	11					0.000	0.000
16	BLNK								
17	BLNK	2. CALCULATE # OF PIXELS BETWEEN THOSE TWO RAYS							
18	BLNK	Assume that we need 4 pixels per wave of OPD.							
19	CONS							4.000	0.000
20	BLNK	So, in the region between the two rays, we need this number of pixels:							
21	PROD	19	15					0.000	0.000
22	BLNK								
23	BLNK	3. CALCULATE THE # OF PIXELS NEEDED OVER THE ENTIRE APERTURE							
24	BLNK	The full pupil has a normalized diameter of 2.							
25	CONS							2.000	0.000
26	BLNK	The distance between the rays, in normalized coordinates, was:							
27	CONS							1.000	0.000
28	CONS							0.990	0.000
29	DIFF	27	28					0.000	0.000
30	BLNK	So across the full pupil, we need this number of pixels:							
31	DIVI	25	29					0.000	0.000
32	PROD	31	21					0.000	0.000
33	BLNK								

Рисунок 1.42 – Використання редактора Merit Function для розрахунку вибірки, необхідної для адекватної вибірки зміни фази через світлосильну лінзу

Для варіанту з 2 пікселями на 1 хвилю оптичної різниці ходу, що є меншим, ніж фактично необхідно, знадобиться сітка розміром 16 000 пікселів на 16 000 пікселів. Для зберігання такого розміру масиву потрібно 4,3 ГБ оперативної пам'яті. Для отримання додаткової інформації проведемо пошук "Вимоги до пам'яті" у довідкових файлах OpticStudio.

Розрахунки такого розміру можуть бути неможливі, залежно від апаратного забезпечення комп'ютера, або можуть зайняти занадто багато часу.

Однак для багатьох швидких систем підходить алгоритм Fibre Coupling на основі променів і POP не потрібний. Для більшості систем оптоволоконного сполучення дифракційні ефекти від країв лінз не є суттєвими. У цьому випадку використаємо розрахунки зчеплення на основі променів [14].

2 МОДЕЛЮВАННЯ ЛАЗЕРНИХ ПРОМЕНІВ ВИСОКОГО ПОРЯДКУ В ZEMAX/OPTICSTUDIO

Описано моделі, доступні в OpticStudio для визначення характеристик лазерних променів високого порядку. Після визначення такі промені можуть поширюватися в будь-якій оптичній системі, яка була розроблена в OpticStudio за допомогою Physical Optics Propagation. Промені, створені з лазерних резонаторів з прямокутними, круглими та еліптичними апертурами підсилення, можуть бути охарактеризовані за допомогою доступних моделей для пучків Ерміта-Гауса, Лагерра-Гауса та Інса-Гауса.

Загалом вихідну потужність лазера можна знайти, розв'язавши рівняння параксіальної хвилі. Найбільш відомим розв'язком цього рівняння є ідеальний одномодовий гаусів пучок. Існують інші набори ортогональних рішень, які залежать від симетрії даної системи. Їх можна використовувати для моделювання мод пучка вищого порядку. OpticStudio надає можливість моделювати три з цих інших рішень. Вибране рішення опише початковий розподіл електричного поля променя, а подальше поширення променя потім моделюється за допомогою фізичної оптики поширення (POP) [15].

2.1 Моді Ерміта-Гауса

Для конструкції лазерного резонатора з прямокутною симетрією, тобто з прямокутною апертурою посилення, відповідний розв'язок рівняння параксіальної хвилі забезпечується модами Ерміта-Гауса. Розподіл електричного поля цих мод можна записати через поліноми Ерміта. Такі режими можна моделювати в OpticStudio за допомогою вбудованого визначення променя «Gaussian Waist» у діалоговому вікні налаштувань POP (рис. 2.1).

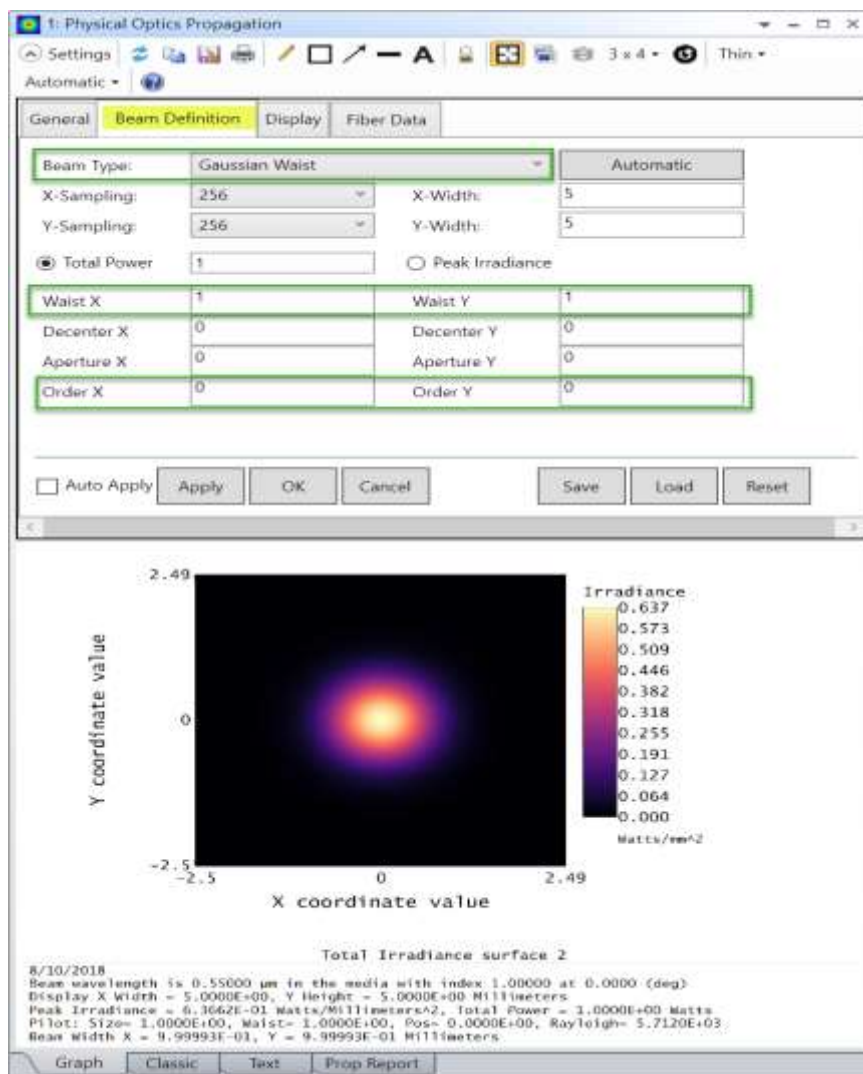


Рисунок 2.1 – Визначення променя «Gaussian Waist» у діалоговому вікні налаштувань

Основними вхідними даними для цього режиму є обхват променя в X і Y і порядок променя в X і Y. Наведені вище параметри демонструють, як моделювати режим (0,0) з однаковим розміром променя в X і Y, що відповідає одномодовому гауссовому пучку. Однак вхідний промінь також може бути вищим порядком Ерміта-Гауса, який є асиметричним по X і Y, (рис. 2.2).

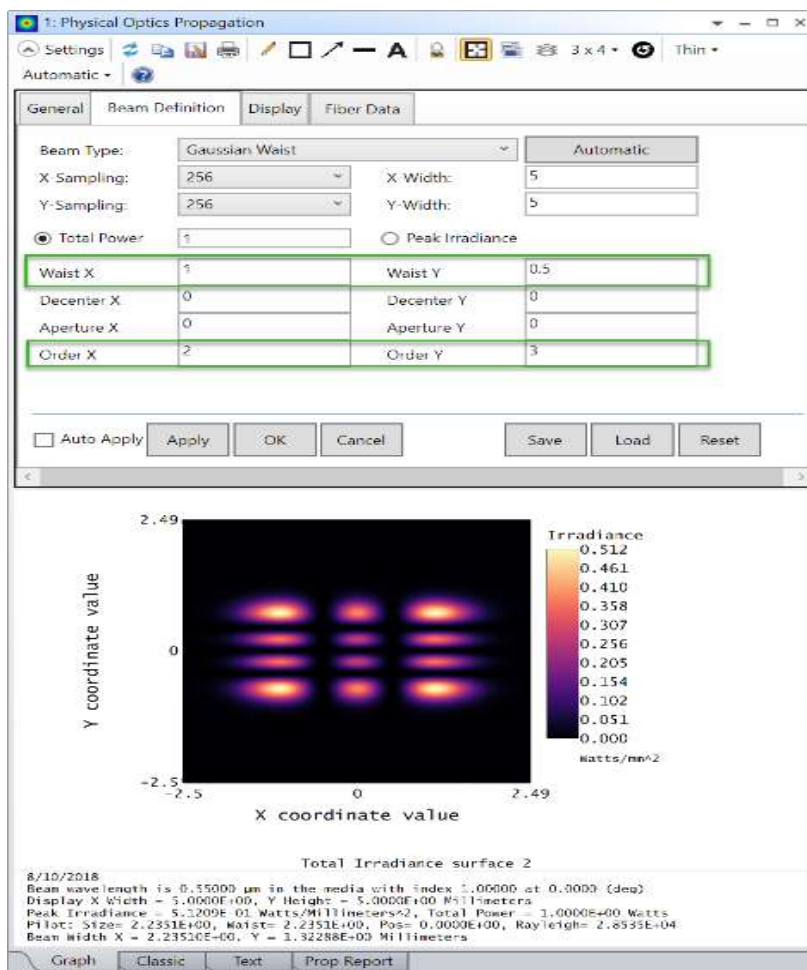


Рисунок 2.2 – Обхват променя в X і Y і порядок променя в X і Y

Моди Ерміта-Гауса зазвичай позначаються як моди $TEM_{m,n}$, де m – порядок променя в X , а n – порядок променя в Y . Знову ж таки, промінь Гауса – це промінь моди $TEM_{0,0}$.

Подальші описи вхідних параметрів для визначення пучка «Gaussian Waist» можна знайти в розділі довідкової системи під назвою «Про поширення фізичної оптики»[15].

2.2 Моді Лагерра-Гауса

Для конструкції лазерного резонатора з циліндричною симетрією, тобто з круглою апертурою посилення, відповідний розв'язок рівняння параксіальної хвилі забезпечується модами Лагерра-Гауса. Розподіл електричного поля цих мод

можна записати через поліноми Лагерра. Такі режими можна моделювати в OpticStudio за допомогою бібліотеки «Laguerre beam» DLL, що надається разом із установкою OpticStudio (рис.2.3).

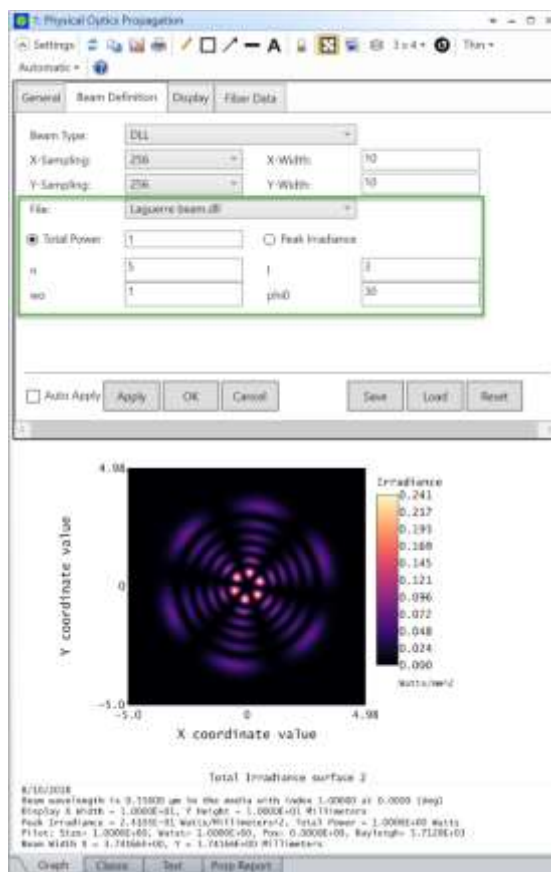


Рисунок 2.3 – Застосування бібліотек «Laguerre beam»

Вхідними даними для цієї моделі є порядок променя в радіальному (n) і азимутальному (l) напрямках, перетяжка променя (w_0) і кут обертання моди (ϕ_0). Зауважте, що вказівка $\phi_0 = 0$ еквівалентна моделюванню непарної моди Лагерра-Гауса (LGM), а вказівка $\phi_0 = 90$ еквівалентна моделюванню парної моди Лагерра-Гауса (LGM) (рис. 2.4) [15].

Вихідний код бібліотеки DLL «промінь Лагерра» можна знайти в папці інсталяції OpticStudio, яка за замовчуванням є `{Zemax}\DLL\PhysicalOptics`. Розташування цієї папки відображається на вкладці Файл...Параметри проекту...Папки:

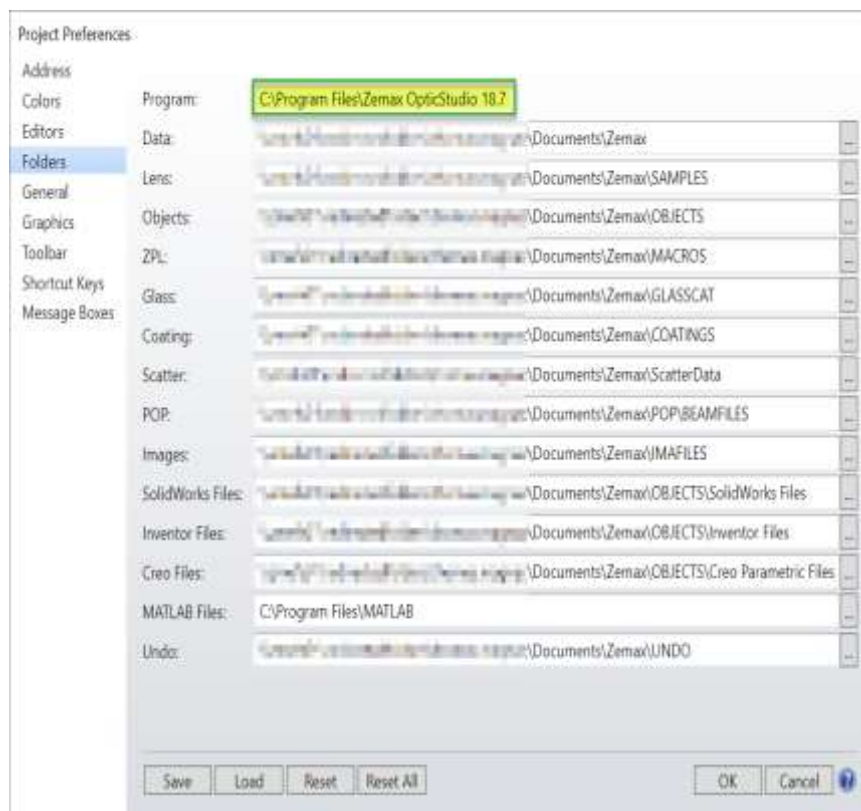


Рисунок 2.4 – Вихідний код бібліотеки DLL

2.3 Моди Інса-Гауса

Для конструкції лазерного резонатора з еліптично симетричною апертурою підсилення відповідний розв’язок рівняння параксіальної хвилі забезпечується модами Інса-Гауса. Розподіл електричного поля цих мод можна записати через поліноми Інса. Ці поліноми коротко описані в статті під назвою «Ince-Gaussian modes of the paraxial wave equation and stable resonators» Мігеля А. Бандреса та Хуліо С. Гутьєрреса-Веги (JOSA, том 21, № 5, травень 2004 р., С. 873).² Більш повний опис цих поліномів наведено в книзі «Періодичні диференціальні рівняння» Ф.М. Arscott (Pergamon Publishing, Oxford, UK, 1964).

Режими Ince-Gaussian можна моделювати в OpticStudio за допомогою DLL «Ince-Gaussian» (рис.2.5).

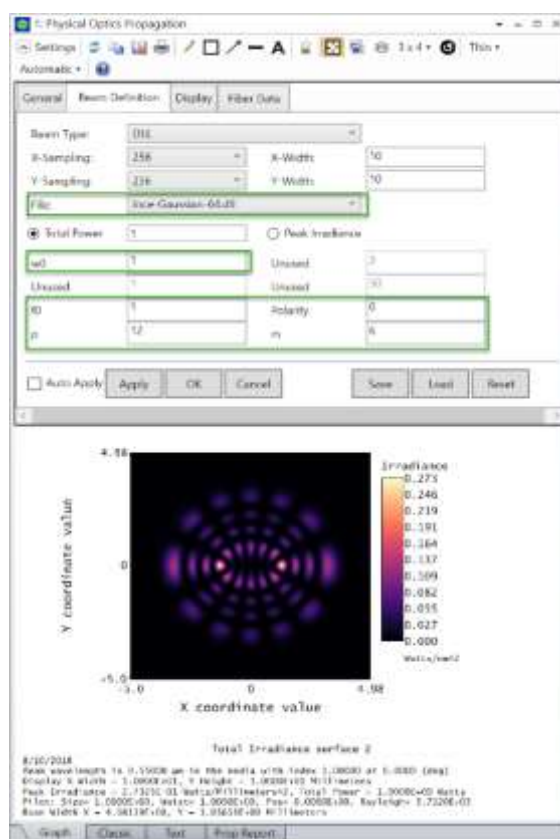


Рисунок 2.5 – Моделювання режимів «Ince-Gaussian»

Ця бібліотека DLL включена в інсталяцію OpticStudio, і її можна знайти в папці {Zemax}\DLL\PhysicalOptics, як описано в попередньому розділі.

Вихідний код для цієї DLL не буде надано. Вхідними даними для цієї моделі є порядок p і градус m , перетяжка променя (w_0), напівфокальне розділення променя (f_0) і полярність променя (0 = парне; 1 = непарне); цей останній вхід визначає, чи описується промінь парними чи непарними поліномами Інса. Повний опис кожного з вищезазначених вхідних даних наведено в статті Бандреса та Гутьєрреса-Веги. Кілька невикористаних вхідних даних просто перераховані таким чином, щоб структура вхідної таблиці для цієї моделі відповідала структурі вбудованої моделі Гауса в OpticStudio.

Як описано в статті Бандреса та Гутьєрреса-Веги, важливою частиною побудови профілю променя для мод Інса-Гауса є вирішення проблеми власних значень для даного набору вхідних даних. Ця проблема власних значень

вирішується всередині бібліотеки Ince-Gaussian DLL за допомогою підпрограм, наданих у бібліотеці CLAPACK.

З перетяжки променя та напівфокального поділу можна розрахувати безрозмірний параметр еліптичності або ж розрахований параметр еліптичності:

$$e = 2 \left(\frac{f_0}{w_0} \right)^2. \quad (2.1)$$

Як описано в статті Бандреса та Гутьєрреса-Веги, w_0 і f_0 масштабують фізичний розмір моди променя, тоді як e регулює еліптичність структури поперечного променя. Моди Інса-Гаусса представляють більш загальний розв'язок рівняння параксіальної хвилі, для якого моди Ерміта-Гаусса та Лагерра-Гаусса є граничними випадками. Зокрема, моди Ерміта-Гауса можна знайти з рішення Інса-Гауса, встановивши $e = \infty$, тоді як моди Лагерра-Гауса можна знайти з рішення Інса-Гауса, встановивши $e = 0$. Цей перехід добре продемонстровано на рис. 2.6 стаття Бандреса та Гутьєрреса-Веги. На рис. 2.7 також показаний цей перехід (для $p = 4$).

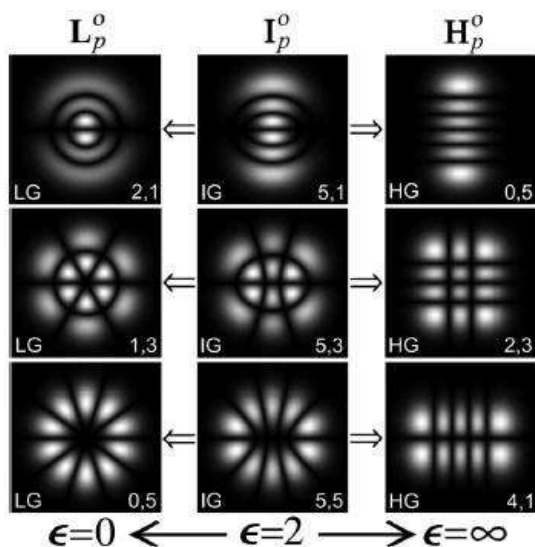


Fig. 3. Transverse shapes of the subsets L_p^o , I_p^o , and H_p^o for $p = 5$. IGMs correspond to $\epsilon = 2$.

Рисунок 2.6 – Ілюстрація переходів Бандреса та Гутьєрреса-Веги

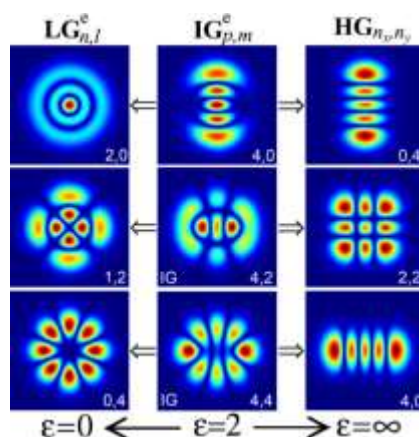


Рисунок 2.7 – Перехід Бандреса та Гутьєрреса-Веги (для $p = 4$)

DLL Інса-Гауса точно відтворює результати для режимів Лагерра-Гауса, коли e наближається до 0. Однак у цьому обмеженні обчислювально ефективніше використовувати DLL Лагерра-Гауса для моделювання цих режимів у OpticStudio. Коли e наближається до ∞ , досягається точка, коли розв'язок власного значення, обчислений DLL Інса-Гауса, розходиться. Ця розбіжна поведінка є обмеженням обчислювального алгоритму. Коли точка розбіжності досягає, результати, створені DLL Інса-Гауса, стають неточними. На жаль, ця точка не виникає для єдиного значення e (існує також залежність від p , m і полярності променя). Однак легко визначити, коли створюється розбіжне рішення, оскільки рішення не буде узгоджуватися з відповідними результатами Ерміта-Гауса (як це має бути для великих e). За таких умов для моделювання режиму променя слід використовувати опцію Gaussian Waist beam [15].

2.4 Гаусові промені

Передові можливості в OpticStudio включають:

- розгортання макетів та перегляд заштрихованих моделей;
- визначення положення системи за допомогою точок поля та апертури (рис. 2.8).

Додаткові функції, пов'язані з гауссівськими променями:

- використання калькулятора параксіального гауссівського променя;
- аналіз фізичного оптичного розповсюдження (POP).

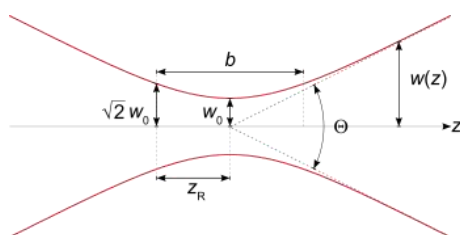


Рисунок 2.8 – Зображення рухів променів

2.5 Теорія гауссового пучка

Дана концепція є параксіальною та виключає в себе аберації. Параметри для визначення гауссівських променів можуть бути обраними будь-якими двома з трьох наведених [16]:

$$\omega_0 = \frac{\lambda}{\pi \tan \theta} \begin{cases} \text{Довжина хвилі } \lambda \\ \text{Обсяг звуження } w_0 \\ \text{Дивергенція } \theta \end{cases} \quad (2.2)$$

2.6 Промені проти гауссівських променів

Промені завжди рухаються прямо, існуючи декілька характеристик:

- колімований промінь залишається незмінним за розміром;
- розходжуючий пучок має сталу розбіжність на всьому своєму шляху.

Гауссові промені можуть розходитися або збігатися залежно від умов:

а) у діапазоні Релея:

- розмір променя змінюється дуже повільно ($z < z_R$);
- можна представити їх як колімований пучок;

б) вдалині від діапазону Релея ($z \gg z_R$):

- розмір променя лінійно змінюється з відстанню розповсюдження;

- можна моделювати промені як точкове джерело;
 в) колімований пучок променів усередині z_R (рис. 2.9).

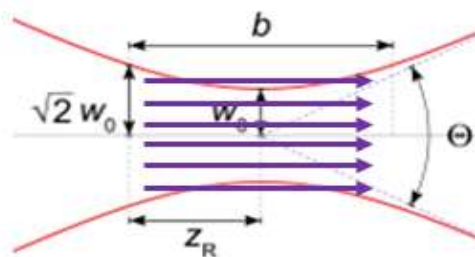


Рисунок 2.9 – Колімований пучок променів

- г) точкове джерело для $z \gg z_R$ (рис. 2.10) [17].

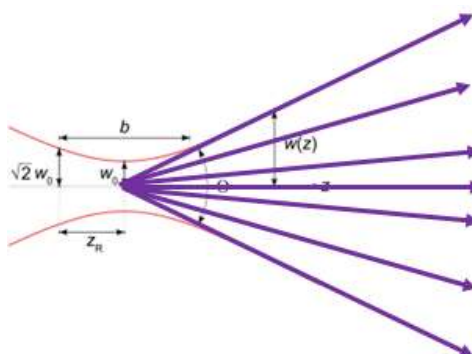


Рисунок 2.10 – Точкове джерело

2.7 Технічні характеристики лазера та дані вимірювань

Характеристики лазера описують відхилення, представлені в табл. 2.1. Лист з вимірними даними подає інформацію в різних конфігураціях.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики лазера та дані вимірювань

Optical Specifications	OBIS LG 555-20 (OEM)
Wavelength (nm)	555
FWHM Linewidth (GHz)	< 50
Pulse format	CW
Spectral Purity (%)	> 99
Output Power(mW)	> 20
Spatial Mode	TEM_{00}
Beam Quality (M^2)	< 1,2
Beam Circularity	$1,0 \pm 0,15$
Beam Waist Diameter (mm)(FW, $1/e^2$)	$1,0 \pm 0,2$
Beam Divergence (mrad)(FW, $1/e^2$)	< 1,2
Beam Waist Location (mm)	± 325
Beam Pointing Stability (μ rad/C)	< 10
Polarization Ratio	Linear, >1 00:1
Polarization Direction	Vertical, ± 5
Noise (% , RMS)(10 Hz to 1 MHz)	< 0,25
Power Stability (%) (pk-pk)	$\pm < 1$

У випадку параксiального гауссiвського пучка виявляється величина M^2 . Цей параметр використовується лише для діагностики, як вказано в табл. 2.2 та 2.3.

Таблиця 2.2 – Вхiд M^2

$M^2 = 1$	With M^2	
$w_0 = \sqrt{\frac{\lambda z_R}{\pi}}$	$w_0 = \sqrt{\frac{\lambda z_R M^2}{\pi}}$	збільшує обсяг звуження
$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$	$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda M^2}$	зменшує діапазон Релея
$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}$ for $z \gg z_R$	$\theta = \frac{\lambda M^2}{\pi w_0}$ for $z \gg z_R$	збільшує дивергенцію

Таблиця 2.3 – Приклад виміряних даних

λ	z_R	M^2	w_0
555 нм	10 м	1	1,06 мм
555 нм	10 м	1,5	1,30 мм

Особливості лазера:

а) номінальна хвильова довжина становить 555 нм;

б) виміряно на відстані 5 мм від виходу лазера:

– діаметр променя складає 2 мм;

– виміряна розбіжність становить 9 мрад (рис. 2.11).



Рисунок 2.11 – Вимірювання даних

Визначимо, що діаметр стискання складає 25 мкм.

– якби у нас була інформація про $M2$, могли би адаптуватися до цього;

– ПЗ ZOS використовує радіуси та лінзи, рівні 0,0125 мм [17].

2.8 План роботи

Спочатку треба провести моделювання лазера у програмі OpticStudio.

1. Розпочнемо з аналізу променів.

Настройка одноелементної лінзи для досягнення фокусної площини, розташованої за 100 мм від виходу лазера (рис. 2.12).

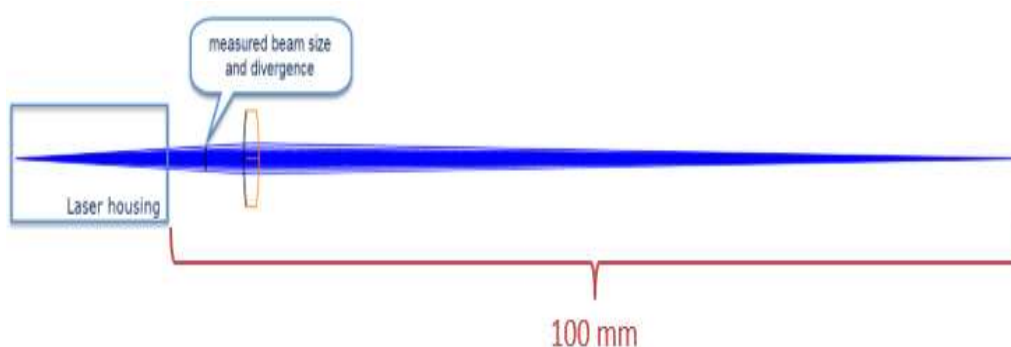


Рисунок 2.12 – Оптимізація синглетної лінзи

2. Порівняємо результати променевого аналізу з висновками, отриманими з параксіальної гаусівської діаграми та методів фізичної оптики.

3. Введемо довжину хвилі у системний оглядач.

4. Уведено вимірний розмір променя:

– системна апертура = Float від розміру столу;

– поверхня упору = імітована поверхня, на якій вимірювався розмір променя, із напівдіаметром, що дорівнює 2 мм.

5. Змінимо положення об'єкта, щоб визначити розбіжність на рівні 9 мрад.

1_rays start.zmx

6. Почнемо з нового файлу (рис. 2.13).

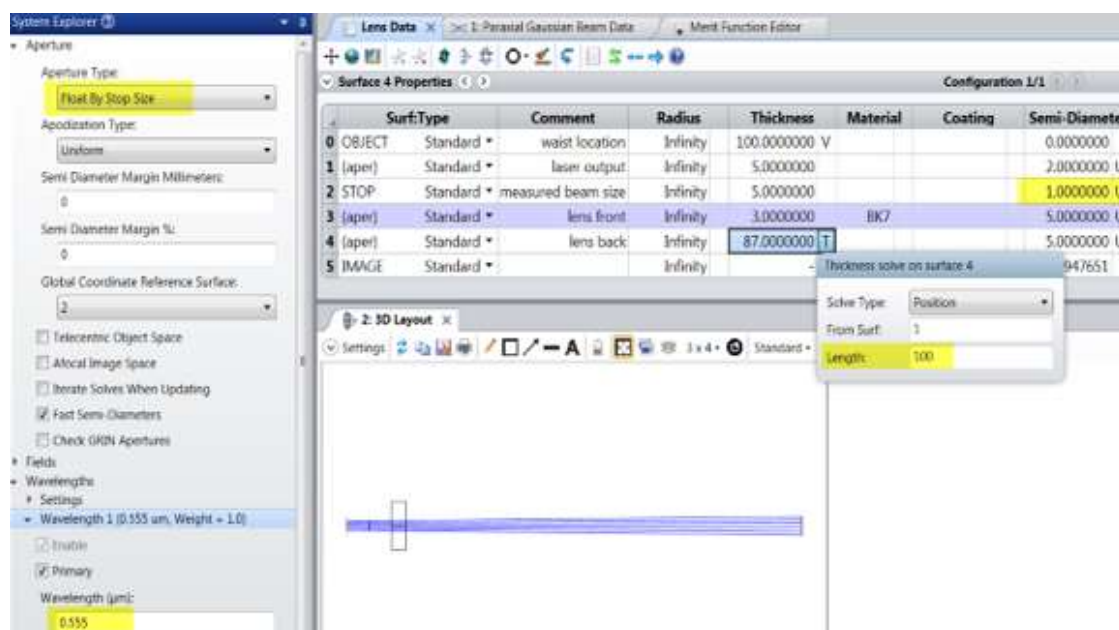


Рисунок 2.13 – Початок створення променів

2_object plane optimized.zmx

7. Змінюємо товщину об'єкта, а саме його місцезнаходження звуження.

8. RANG визначає кут променя в радіанах відносно осі z. Цей кут дорівнює 9 мрад.

9. Порівнюємо результати аналізу променя з даними калькулятора параксіального гаусового променя (див. рис. 2.14).

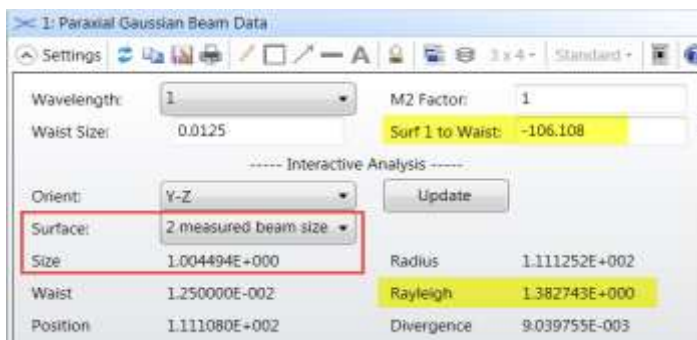


Рисунок 2.14 – Оптимізована площа об'єкта

3_gaussian apodization.zmx

10. Гаусова аподизація G визначає, наскільки швидко зменшується амплітуда променя A в залежності від координати зіниці ρ :

– нормується у центрі:

$$A(0) = 1. \quad (2.3)$$

– амплітуда в інших точках вхідної зіниці:

$$A(\rho) = \frac{1}{e^{G\rho^2}}. \quad (2.4)$$

– оскільки Амплітуда² = Інтенсивність:

$$I(\rho) = \frac{1}{e^{2G\rho^2}}. \quad (2.5)$$

– на краю зіниці $\rho = 1$:

$$I(1) = \frac{1}{e^{2G}}. \quad (2.6)$$

отже, для $G = 1$, $I(1) = \frac{1}{e^2}$ (2.7)

3_gaussian apodization.zmx

11. G може бути використано для створення моделей різних «розмірів» променів, залишаючи при цьому розмір вхідної зіниці постійним:

$$I(\rho) = \frac{1}{e^{2G\rho^2}}. \quad (2.8)$$

12. Наприклад, визначте G так, щоб амплітуда променя дорівнювала половині (0,5) діаметра вхідної зіниці:

$$I(0,5) = \frac{1}{e^{2G(0,5^2)}} = \frac{1}{e^2}, \quad (2.9)$$

$$2G(0,5^2) = 2,$$

$$G = 4.$$

4_rays_smallest spot.zmx

13. Вдосконалюємо налаштування синглета з метою досягнення розміру плями RMS (рис. 2.15).

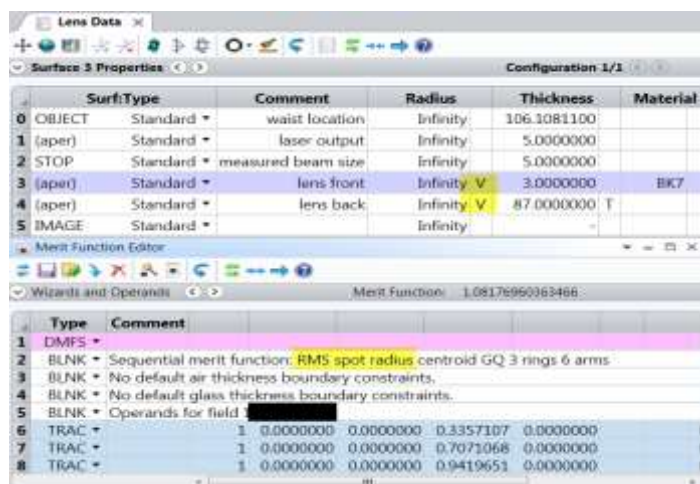


Рисунок 2.15 – Гауссова аподизація

5_rays_smallest spot_optimized.zmx

Презентацію результатів локальної оптимізації представлено на рис. 2.16.

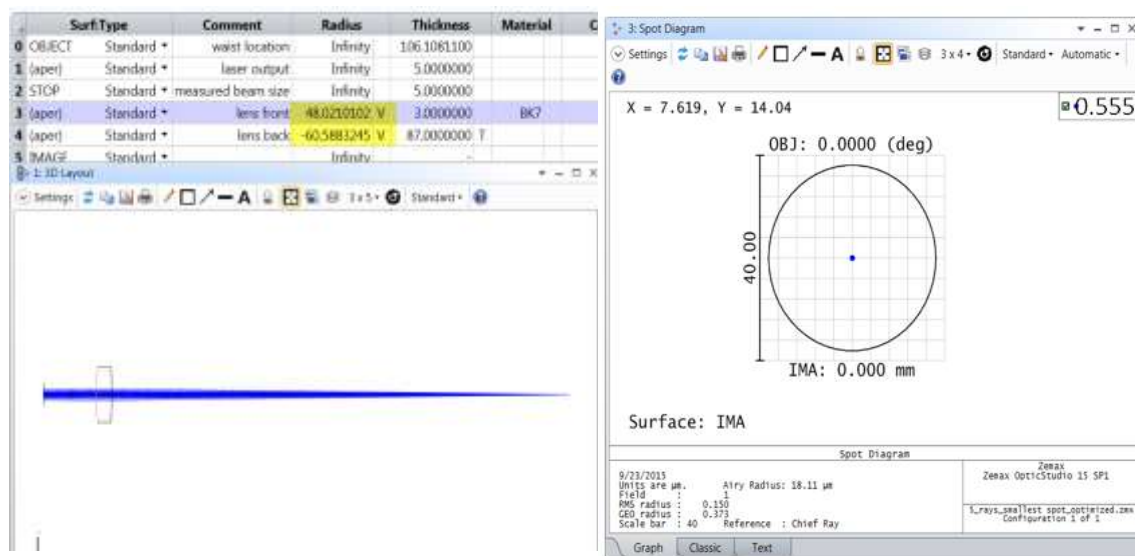


Рисунок 2.16 – Оптимізація найменшої плями променів

6_gaussian smallest spot.zmx

14. Зображений на універсальному графіку розмір параксіального гаусівського променя (GBPS) в залежності від положення площини зображення (рис. 2.17).

15. Мінімальний гаусівський промінь також виявлений під час оптимізації променів.

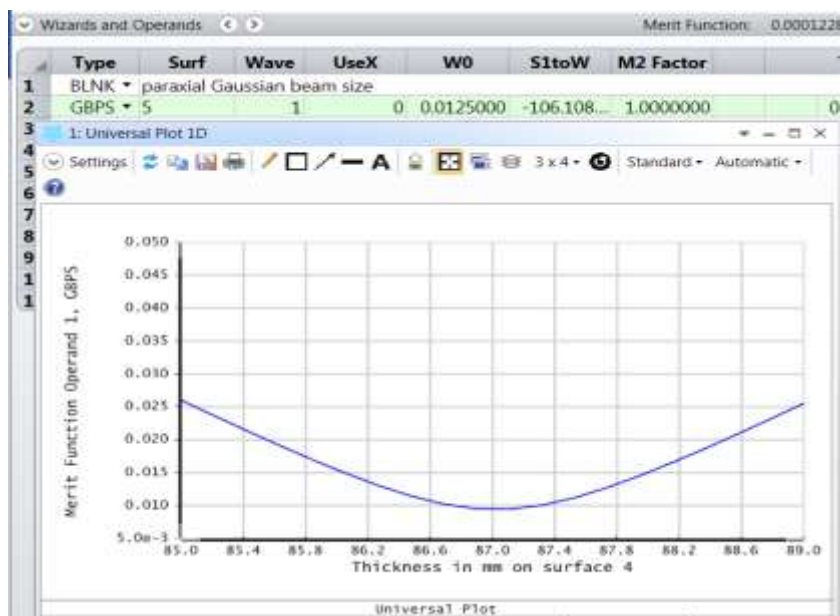


Рисунок 2.17 – Універсальний графік із розміром параксіального гауссового променя

7_converted to NSC.zmx

15. Можна також змоделювати це з непослідовними променями, використовуючи ті ж параметри параксіального гауссового променя (рис. 2.18):

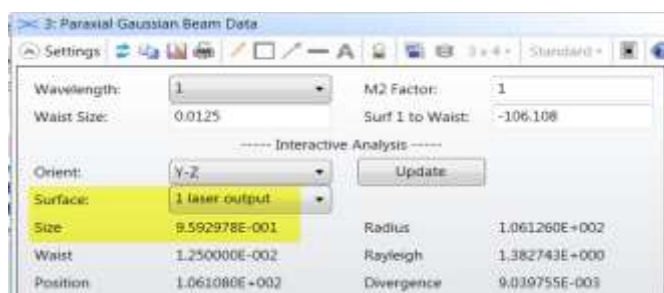


Рисунок 2.18 – Моделювання з непослідовними променями, використовуючи ті ж параметри параксіального гауссового променя

16. Змінити режим об'єктива на NSC (рис. 2.19).

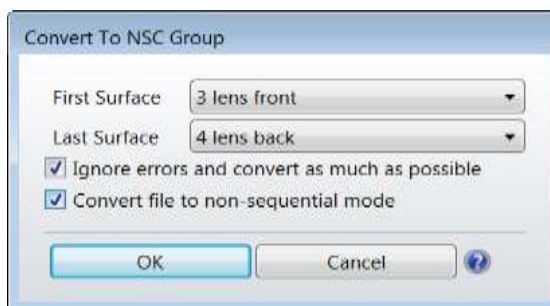


Рисунок 2.19 – Перетворення об'єктиву на режим NSC

7_converted to NSC.zmx

17. Гауссівське джерело (рис. 2.20).

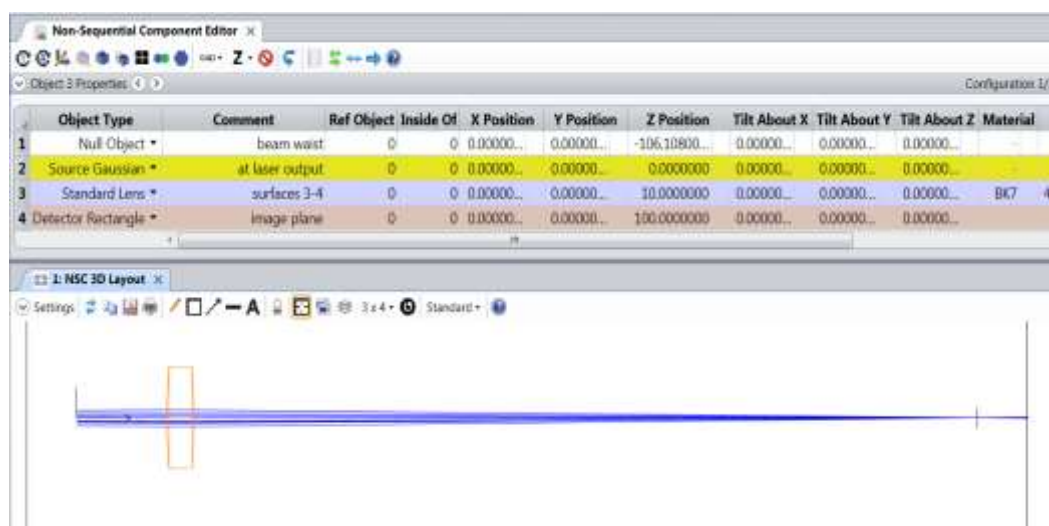


Рисунок 2.20 – Демонстрація джерела Гауса

18. Також можна скористатися діодним джерелом – воно дозволяє додатково налаштувати профіль променя, але все ж залишає геометричну природу променів.

8_denc smallest spot.zmx

19. Повернемося до попереднього файлу.

20. Порівняємо отримані результати GBPS з тими, які отримані в рамках використання DENC.

21. Розрахунки для параксіального гаусового пучка є ідеальними (рис. 2.21).

Під час розрахунків:

- враховуємо тільки потужність кожної поверхні;
- отже, потужність може бути визначена занадто оптимістично.

Type	Samp	Wave	Field	Frac	Type	Refp	ISan	IDel	Target	Weight	Value	% Contrib
1	BLNK	paraxial Gaussian beam size Y										
2	GBPS	5	1	0	0.0125000	-106.108...	1.0000000		0.0000000	0.0000000	0.0094193	0.0000000
3	BLNK	Diffraction encircled energy Y										
4	DENC	4	1	1	0.8650000		3	1	0	0.0...	10.4563552	0.0000000

Рисунок 2.21 – Розрахунки параксіального гаусового пучка

9_extended source with paraxial lens.zmx

22. Інша модель послідовних променів, особливо цінна для лазерних діодів, передбачає використання параксіальної лінзи з об'єктом, розташованим на нескінченності.

23. Звуження та розмір пучка GBPS налаштовані таким чином, щоб врахувати зміни фази від впливу параксіальної лінзи (рис. 2.22) [18].

The screenshot displays the 'Lens Data' window and the 'Merit Function Editor' window. The 'Lens Data' window shows the following configuration:

Surf Type	Radius	Thickness	Material	Coating	Semi-Diameter	Conic	TCE x 1E-6	Focal Length
0 OBJECT	Standard	Infinity	Infinity		0.000000	0.0...	0.0000...	
1 STOP	Paraxial	size			1.000000	U	0.0000...	-111.108110 V
2 (aper)	Standard	cur	48.021010	3.000000	IK7	5.000000	U	0.0...
3 (aper)	Standard	ack	-60.588325	87.000000		5.000000	U	0.0000...
4 IMAGE	Standard		Infinity		3.734218E...	0.0...	0.0000...	

The 'Merit Function Editor' window shows the following merit function configuration:

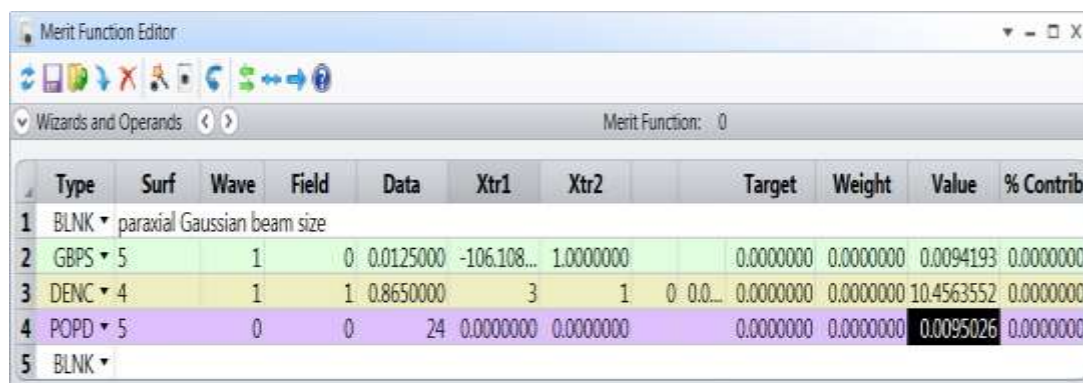
Type	Comment	Value	Weight	Units
1	BLNK	marginal ray angle in radians at surface 1		
2	RANG	1	1	0.0000000
3	BLNK	Report DBA		
4	DENC	4	1	0.8650000
5	GBPS	4	1	0.0125000

Рисунок 2.22 – Налаштування розширеного джерела з параксіальним об'єктивом

10_POP.zmx

24. Налаштуйте параметри POP та збережіть налаштування (рис. 2.23).

- опрацьовувані поверхні від 1 до 5;
- відстань до променя становить – 106,108;
- ширина рівна 0,0125, кількість зразків – 256.



Type	Surf	Wave	Field	Data	Xtr1	Xtr2	Target	Weight	Value	% Contrib
1	BLNK	paraxial	Gaussian beam size							
2	GBPS	5	1	0 0.0125000	-106.108...	1.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0094193	0.0000000
3	DENC	4	1	1 0.8650000	3	1	0 0.0...	0.0000000	0.0000000	10.4563552
4	POPD	5	0	0	24	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0095026	0.0000000
5	BLNK									

Рисунок 2.23 – Налаштування POP та збереження налаштування

2.9 Промені порівняно з параксіальним гауссівським методом та POP

Троє сценаріїв, при яких метод променів виявився непридатним, представлені у таблиці 2.4 [18].

Таблиця 2.4 – Сценарії променів, параксіального гауссу та POP

	Промені	Параксіальний гаусс	Фізичне оптичне розповсюдження
Коли промінь світла досягає проміжного фокусу, особливо поблизу оптики, що проводить до його обрізання.	НІ	НІ	ТАК
У разі цікавих дифракційних явищ, вони виявляються на значній відстані від фокусу.	НІ	НІ	ТАК
Коли цікаві дифракційні ефекти, далекі від фокусу.	НІ	ТАК	ТАК

11_POP_pinhole.zmx (рис. 2.24).

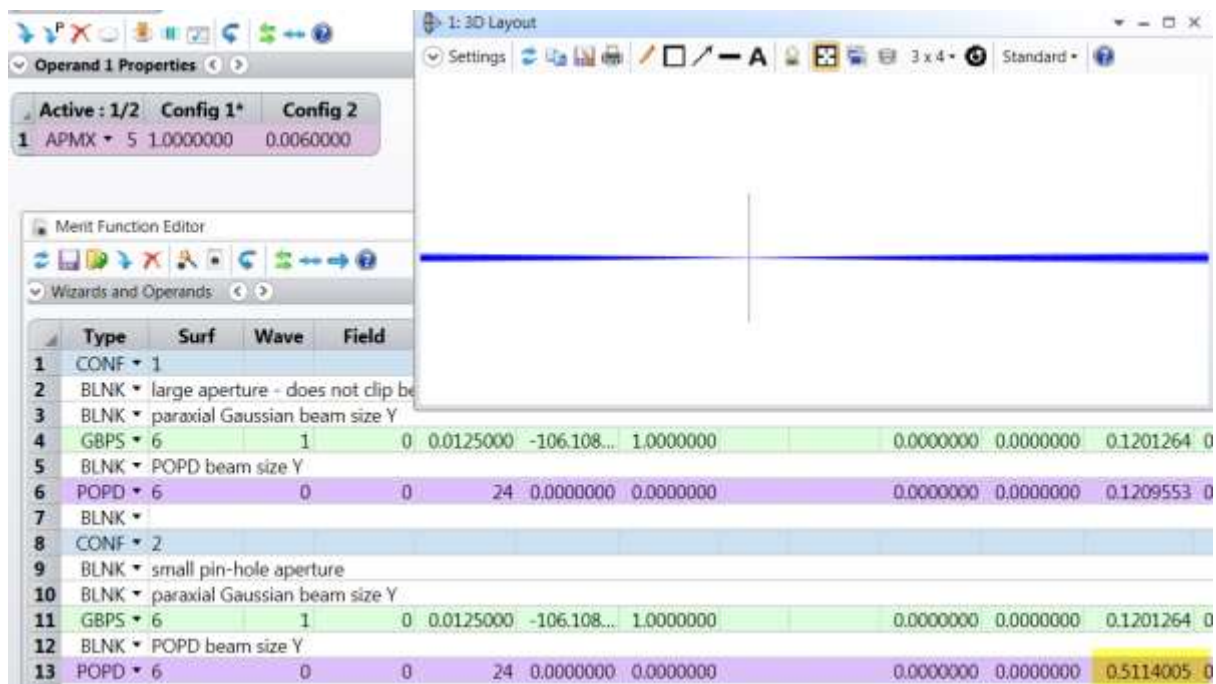


Рисунок 2.24 – Налаштування точкового отвору

12_POP_long propagation.zmx (рис. 2.25).

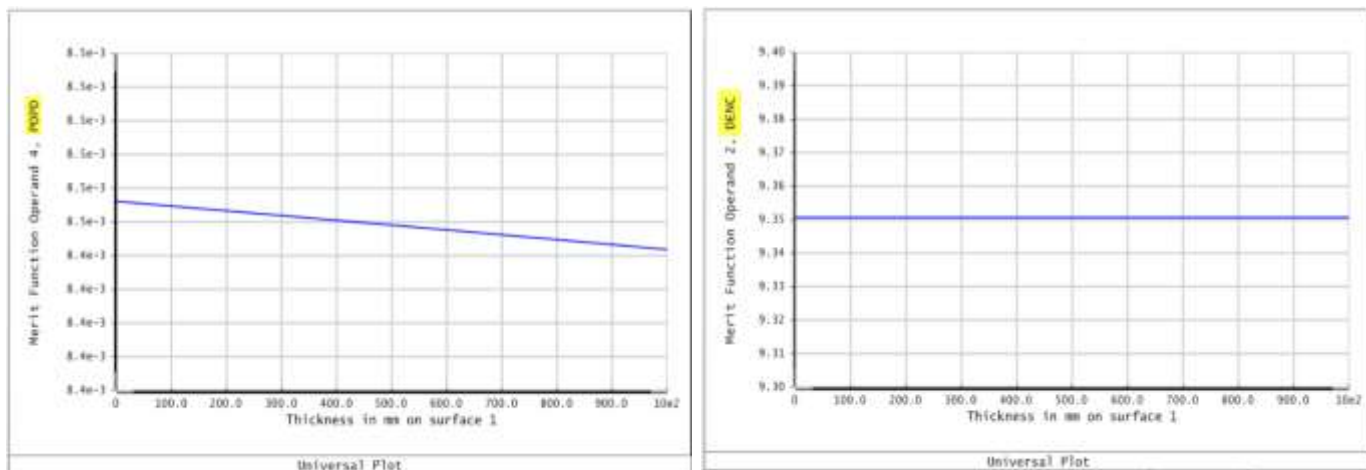


Рисунок 2.25 – Тривале поширення

2.10 Особливості використання POP

Використання POP не завжди є практичним:

– вимагає значного часу через високу частоту дискретизації;

- алгоритми дифракційного поширення в POP передбачають сталий характер фази променя;
- застосування скалярної теорії дифракції... не є точним для променів, які рухаються швидше за $F/1$;
- поширення швидких променів зазвичай добре моделюється геометричним методом трасування променів;
- виняток становить близькозоновий фокус... але для таких випадків можна скористатися іншими аналізами PSF на основі дифракції [19].

13_POP_too fast.zmx

Важливо перевірити Rgor на наявність застережень (рис. 2.26).

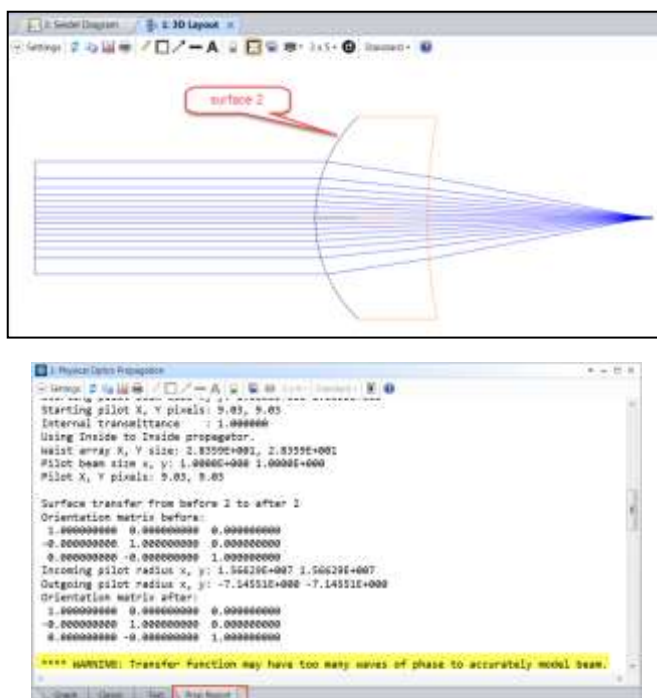


Рисунок 2.26 – Перевірка Rgor на наявність попереджень

Використайте інструмент для перегляду файлів Beam, щоб оцінити фазу після проходження через кожну поверхню (рис. 2.27).

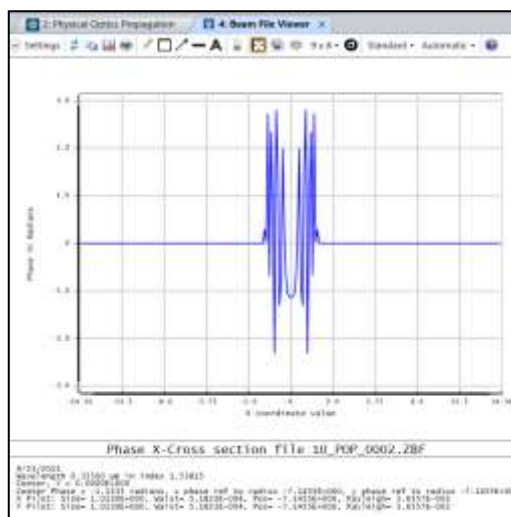


Рисунок 2.27 – Перевірка фази після кожної поверхні

13_POP_too fast.zmx

Давайте спробуємо підвищити густину зразка у параметрах визначення променя (рис. 2.28).

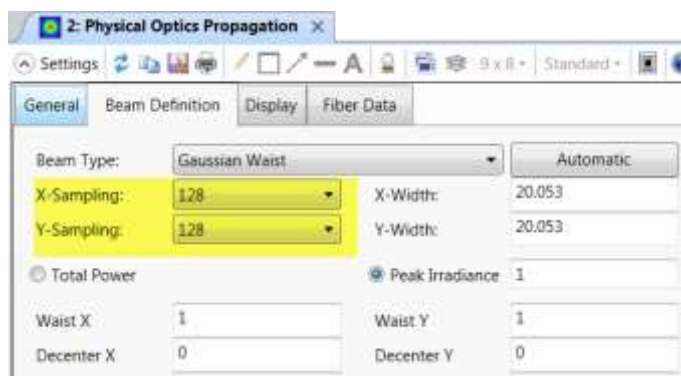


Рисунок 2.28 – Збільшення щільності вибірки в налаштуваннях визначення променя

Додаткові параметри фізичної оптики, які специфікуються для конкретної поверхні (рис. 2.29) [20].

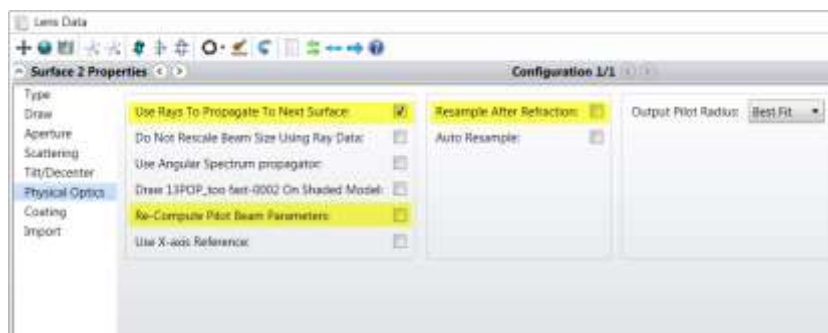


Рисунок 2.29 – Налаштування фізичної оптики

ВИСНОВКИ

У даній роботі використано засіб Physical Optics Propagation (POP) у програмному пакеті OpticStudio (Zemax). Цей інструмент розповсюджує електричні поля у вільному просторі та є засобом перегляду файлів променя, призначеним для аналізу фази та інтенсивності променя на кожній поверхні.

Додатково, в рамках цього проекту було проведено моделювання лазерів у програмному забезпеченні Zemax/Opticstudio. Розроблено розрахунковий проект, і розрахунки виконані з використанням пакета Zemax.

Всі розрахунки здійснені за допомогою пакета комп'ютерної алгебри Zemax, що є доступним для вільного використання. Промені визначаються як швидкий та ефективний засіб моделювання лазерних променів. Параксіальний аналіз гауссового пучка також відзначається високою обчислювальною швидкістю. Цей інструмент надає легкий доступ до ідеальних характеристик гауссового променя, таких як дивергенція, діапазон Релея, розмір звуження $1/e^2$, розмір променя та інші.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Guriev, I. V., Sukhoivanov, I. A., Gnatenko, A. S., & Lipkina, V. I. (2008). Multiple plane waves expansion method for dispersive media. *Telecommunications and Radio Engineering*, 67(9), 833-841.
2. Machekhin, Y. P., Gnatenko, A. S., & Kurskoy, Y. S. (2018). Photonic crystal nanolasers as optical frequency standards. *Telecommunications and Radio Engineering*, 77(13), 1169-1177.
3. Machekhin, Y. P., Kurskoy, Y. S., Gnatenko, A. S., & Tkachenko, V. A. (2018). Nanolaser superradiation in information and measuring procedures. *Telecommunications and Radio Engineering*, 77(13), 1179-1186.
4. Vasyanovich, A. V., Gnatenko, A. S., & Pustyl'nikov, D. V. (2018). Optimization of thermal regime of continuous CO₂-lasers with diffusion cooling. *Telecommunications and Radio Engineering*, 77(19), 1685-1695.
5. Мачехін Ю.П., Гнатенко О.С., Курський Ю.С., Семенець В.В., Неофітний М.В. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 1. Лазерна інформаційно вимірювальна техніка для задач військового призначення. Харків. 2019. - 156 с.
6. Gnatenko, O. S. (2021). Fiber Laser Based on Electronically Controlled Phase Plates. *Journal of Nano- & Electronic Physics*, 13(5).
7. Gnatenko, A. S., Machekhin, Y. P., & Natarova, Y. V. (2015). The control system of the pump diodes fiber ring femtosecond lasers. *Applied Radio Electronics: Sci. Journ*, 14(2), 185-188.
8. ZHYLA, O. V.; NERUKH, A. G.; GNATENKO, A. S. Airy pulse transformation by an accelerated medium boundary. In: 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL). IEEE, 2019. p. 504-507.
9. Ricklin J.C. Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implications for free-space laser communication // *Journal of the Optical Society of America A*. 2002. Vol. 19, № 9. P. 1794–1802.
10. Majumdar A.K. Free-space laser communications: principles and // New York: Springer Science & Business Media, 2008. Vol. 2. 418 p.

11. Tatarskii V.I. Wave Propagation in a Turbulent Medium. New York: McGraw-Hill, 1961. 285 p.
12. Tatarskii V.I. The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation. Tatarskii-Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations 1971. – 472 p.
13. Manning R. M. The relationship between the solutions of the parabolic equation method and first Rytov approximation in stochastic wave propagation theory // *Waves in Random and Complex Media*. 2008. Vol. 18, № 4. P. 615–621.
14. Grabner M. Measurement of the structure constant of refractivity at optical wavelengths using a Scintillometer // *Radioengineering*. 2012. Vol. 21, № 1. P. 455–458.
15. Wang S.C.H. Optical beam propagation for a partially coherent source in the turbulent atmosphere // *Journal of the Optical Society of America A*. 1979. Vol. 69, № 9. P. 1297–1304.
16. Гнатенко А. С., Мачехин Ю. П. Устойчивость режима генерации волоконного кольцевого лазера. *Радиотехника*. 2014. № 178. С. 48–51.
17. Cai Y. Propagation of various dark hollow beams in a turbulent atmosphere / Y.Cai, S. He // *Opt. Express*. 2006. Vol. 14, № 4. P.1353–1367.
18. Гнатенко О. С., Жданова Ю. В. Моделювання лазерних прецизійних інформаційно-вимірювальних пристроїв. *10-та Всеукраїнська науково-практичної конференції молодих учених і студентів*, 16-17 травня 2019 р. м. Одеса, 2019. Одеса. С. 213–214.
19. Eyyuboglu H. T. Propagation of higher order Bessel-Gaussian beams in turbulence // *Appl. Phys. B*. 2007. Vol. 88, № 2. P. 259–265.
20. Young C. Y. Turbulence induced beam spreading of higher order mode optical waves // *Opt. Eng.* 2002. Vol. 41, № 5. P.1097–1103.