

ДИФРАКЦІЙНЕ БАГАТОПРОХІДНЕ МЕТАДЗЕРКАЛО ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

В. В. Панасюк¹, В. Б. Тараненко²

¹ Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

² Інститут прикладної оптики НАН України

Анотація

У даній роботі розглянуто модифікацію дифракційного метадзеркала, що має багатопрхідну структуру. Це 2D осесиметрична періодична структура, розташована перед плоским дзеркалом на відстані кількох мікрометрів. У порівнянні зі звичайним дзеркалом, при відбитті монохроматичного пучка від багатопрхідного дифракційного метадзеркала (БДМ) відбувається розширення пучка та зменшення його розбіжності. В роботі обговорюється використання цього ефекту, відомого як ефект суперколімації, з метою покращення якості лазерного випромінювання та підвищення його яскравості.

Ключові слова: Яскравість, якість, метадзеркало, інтерферометр Фабрі-Перо

Вступ

Лазерні технології, засновані на принципі індукованого випромінювання, вже давно задають нові стандарти в сучасній науці та промисловості. Ці технології виконують важливі завдання в медицині, науці, телекомунікаціях та інших галузях, гарантуючи високу точність і ефективність. Однак проблема збільшення яскравості лазерних пучків залишається актуальним і перспективним напрямком досліджень, незважаючи на досягнутий прогрес.

Дослідження в цій галузі відкривають широкий спектр можливостей. Наприклад, збільшення яскравості лазерів може призвести до створення більш ефективних медичних методик, зменшення кількості втручань і підвищення точності хірургічних процедур. З іншого боку, висока яскравість лазерного променя є важливим фактором у розвитку технологій обробки матеріалів і промислових застосувань. Наприклад, лазерна обробка матеріалів для виробництва електроніки та інших високоточних компонентів може бути більш ефективною за рахунок збільшення інтенсивності променя. Також у сфері наукових досліджень вища яскравість дає змогу проводити детальніші й точніші експерименти у фізиці та інших наукових галузях.

Продовжуючи аналізувати та досліджувати цю тему, ми відкриваємо нові горизонти можливостей лазерних технологій та робимо свій внесок у створення майбутніх інновацій. Розуміння основ і тенденцій розвитку високоякісних лазерних систем є важливою передумовою для реалізації їхнього потенціалу в широкому спектрі застосувань.

1. Лазери

Лазер використовує випромінювання атомів у вигляді світлових квантів через стимульовану емісію. Активне середовище, таке як тверде тіло, газ чи рідина, піддається впливу накачувача, який вводить енергію, і генерує світловий пучок.

Лазери знаходять застосування в різних галузях. Для точних маніпуляцій у хірургії, різання та маркування матеріалів у промисловості, високоточних вимірювань у науці, для передачі даних у комунікаціях та інше.

Одним з ключових параметрів лазера є його яскравість, яка визначається відношенням потужності променя до площі та кута напрямку. Цей параметр важливий для характеристики інтенсивності світла та ефективності системи.

Формула для обчислення яскравості:

$$B = \frac{P}{\pi D^2 \theta} \quad (1)$$

де P – потужність лазерного променя, D – діаметр пучка на рівні $1/e^2$, θ – кут напрямку променя.

Підвищення яскравості вказує на покращення збільшення інтенсивності світла та ефективності лазерної системи.

1.1. Якість лазерного пучка

Якість лазерного пучка вимірюється за допомогою параметра M^2 , або параметр якості пучка, який визначає, наскільки близько лазерний пучок до ідеального гауссового пучка.

Визначення: Параметр якості пучка використовується для опису якості лазерного пучка. Ідеальний гауссовий пучок має $M^2 = 1$. Чим більше значення

M^2 відхиляється від 1, тим більше лазерний пучок відхиляється від ідеального гауссового профілю.

M^2 можна вивести з формули кута розбіжності:

$$\theta = M^2 \frac{\lambda}{\pi \omega_0} \implies M^2 = \theta \frac{\pi \omega_0}{\lambda}, \quad (2)$$

де λ – довжина хвилі (в середовищі); ω_0 – радіус променя в звуження балки.

Розбіжність лазерного променя (точніше, кут розбіжності променя) – це міра того, наскільки швидко промінь розширюється далеко від звуження променя рис.1, тобто в дальньому полі.

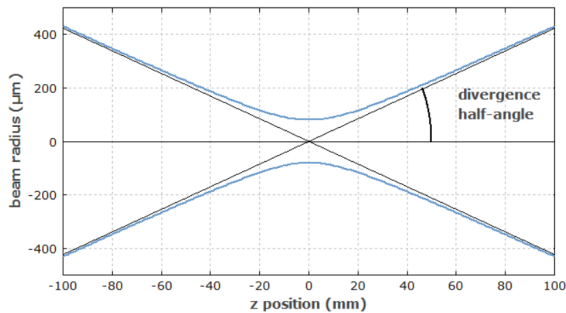


Рис. 1. Асимптотична зміна радіуса променя (показана синім кольором) вздовж напрямку променя визначає напівкутову розбіжність гауссового лазерного променя [1]

Визначення якості лазерного пучка важливо для оцінки ефективності та точності випромінювання. Для цього використовується параметр, відомий як M^2 (M -квадрат), який є безрозмірною величиною та відображає ступінь подібності лазерного пучка до ідеальної гаусівської форми. Малий показник M^2 (зазвичай, $M^2 < 1.5$) свідчить про те, що лазерний пучок має близьку до ідеальної гаусівської форми та високу якість. З іншого боку, значення $M^2 > 1.5$ може вказувати на асиметрію, неоднорідність або інші аномалії в структурі пучка. Розглядання та покращення цього параметра важливе для реалізації точних та ефективних лазерних систем [2].

1.2. Поперечні моди лазера

Лазерні системи, які є основними джерелами світла, мають унікальну здатність генерувати та підтримувати специфічні режими коливань світла у поперечному напрямку резонатора. Ці режими, відомі як поперечні моди. Одномодові лазери використовуються в ситуаціях, коли потрібна висока стабільність, наприклад, у вимірювальних системах. Натомість багатомодові лазери можуть бути корисні в ситуаціях, коли потрібна гнучкість та висока енергетична видача.

Одномодовий режим означає, що лазер використовує одну поперечну моду, зазвичай це основна або фундаментальна мода (зазвичай TEM₀₀). Щоб досягти цього режиму, потрібно виконати декілька

умов. Резонатор має бути налаштований таким чином, щоб підтримувати тільки одну поперечну моду. Наприклад, довжина резонатора має бути встановлена так, щоб основна мода мала максимальну інтенсивність на дзеркалах. Цей режим можна спостерігати в стабільних резонаторах, де моди резонатора зберігають свою форму протягом тривалого часу.

Багатомодовий режим означає, що лазер використовує декілька поперечних мод одночасно. Щоб досягти цього режиму, потрібно виконати інші умови. Резонатор може бути більшим, що дозволяє мати більше поперечних мод. Також у деяких випадках багатомодовий режим може спостерігатися в нестабільних резонаторах, де моди резонатора можуть змінювати свою форму з часом. А ще відсутність елементів, які вибірково пригнічують деякі моди можуть дозволити багатомодовий режим.

Також певний вплив на режими роботи лазера має геометрія резонатора. Взавши до уваги число Френеля [3].

$$N_F = \frac{\alpha^2}{L\lambda} \quad (3)$$

Довжина резонатора визначає дискретні довжини хвиль, які можуть утворювати стоячі хвилі в резонаторі. Оптимальна довжина може бути налаштована для одномодового або багатомодового режимів. А розміри дзеркал резонатора впливають на роздільну здатність поперечних мод. Для одномодового режиму дзеркала повинні бути великими, щоб підтримувати фундаментальний мод.

В загальному, геометрія резонатора є ключовим фактором для контролю одномодового або багатомодового режимів лазера, і вона може бути оптимізована для конкретних додаткових вимог і застосовувана лазерної системи.

2. Використання Двовимірних Метадзеркал

Компактні мікролазери є простими та ефективними джерелами когерентного випромінювання, але стикаються з проблемою низької вихідної потужності в одному поперечному режимі через обмеження резонатора. Однак існує новий підхід до вирішення цієї проблеми. Він використовує осесиметричне дифракційне метадзеркало для суперколімації лазерного променя. Схематичне зображення показано на рис. 2 [4]:

Цей метод використовує концентричну діелектричну дифракційну решітку перед дзеркалом, що дає добре колімований пучок зі значно збільшеною осьювою компонентою в дальньому полі. Використання електронно-променевої літографії для створення точного профілю метадзеркала дозволяє оптимізувати дизайн і виробництво. Застосування цього методу до мікролазерних систем може значно підвищити яскравість та якість лазерних пристроїв і відкрити нові перспективи їх використання.

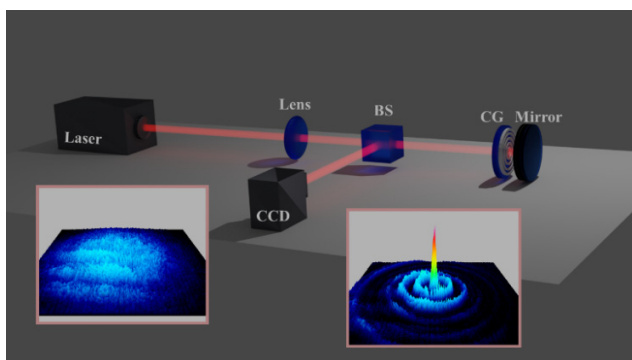


Рис. 2. Схема експерименту та виміряні профілі далекого поля падаючого променя та променя, відбитого від осіметричного дифракційного відбивача [4]

3. Спектральні характеристики та симуляція оптичної порожнини Фабрі-Перо

Інтерферометр Фабрі-Перо – це лінійний оптичний резонатор, який складається з двох дзеркал із високим відбиттям (з деяким малим коефіцієнтом пропускання) [5].

Від залежності відбитого електричного поля та довжини хвилі можна взяти інформацію про спектральні характеристики Фабрі-Перо рис. 3. Що вказує на те, як реагує система на різні довжини хвиль світла. Побудувавши залежність скориставшись:

$$E_{\text{refl}}(\lambda) = r_1 \frac{\exp\left(-i \frac{4\pi n l \cos(\theta)}{\lambda}\right)}{\left(1 - \sqrt{R_1 R_2} \exp\left(-i \frac{4\pi n l \cos(\theta)}{\lambda}\right)\right)^2}$$

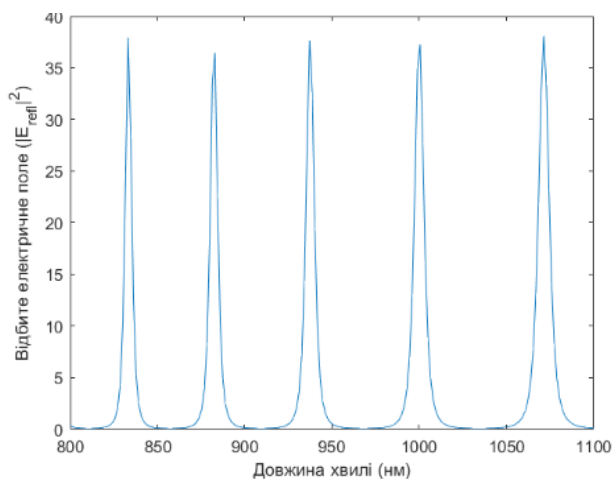


Рис. 3. Залежність відбитого електричного поля від довжини хвилі

Положення і ширина піків на графіку відповідають довжинам хвиль, які збуджують резонансні моди. Ширина піку відображається в тій області спектра, де Фабрі-Перо ефективно відбиває світло. Це називається добротністю резонатора і вказує на його

якість: чим вища добротність, тим менша ширина піку, що свідчить про високу якість резонатора. Існує також форма піку, яка надає інформацію про внутрішню структуру резонатора і вплив розкиду лінійної ширини. Висота піку відображає ефективність відбиття світла в резонаторі на певній довжині хвилі.

Додавши в порожнину резонатора Фабрі-Перо круглу дифракційну решітку і розташувачий її майже впритул до другого дзеркала резонатора можна отримати кращі характеристики резонатора і самого лазера що видно на рис. 4.

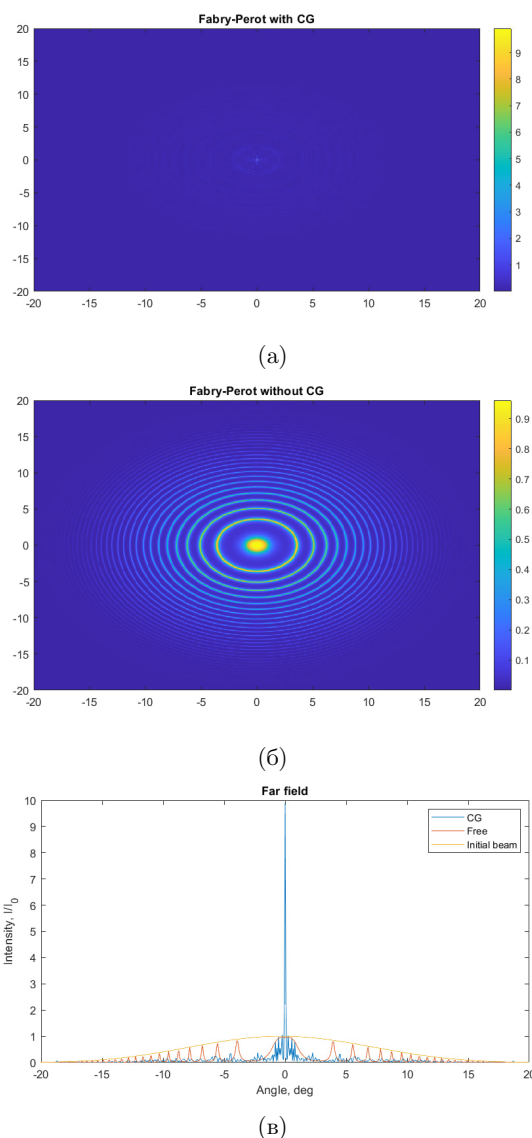


Рис. 4. а) Фабрі-Перо з CG (круглим решітчастим елементом). Колір показує інтенсивність відносно максимальної інтенсивності. б) Фабрі-Перо без CG. Колір показує інтенсивність відносно максимальної інтенсивності. в) Дальнє поле. На цьому графіку показано розподіл інтенсивності в дальньому полі вздовж центральної вісі пучка.

4. Висновки

Дифракційні метаодзеркала (дифракційні двовимірні ґратки, розміщені впритул до дзеркал) виявляють ефект суперколімації. Цей ефект проявляється у значному збільшенні інтенсивності осової компоненти відбитого випромінювання. Теоретичні розрахунки показують, що заміна одного з дзеркал лазерного резонатора на дифракційне метаодзеркало покращує якість лазерного випромінювання.

Однак компактні мікролазери також мають проблему обмеженої здатності генерувати інтенсивні лазерні пучки в одному поперечному режимі. Збільшення площі накачування збільшує вихідну потужність, але часто призводить до випромінювання пучків в декількох поперечних модах, що знижує якість випромінювання.

Перелік використаних джерел

1. *Paschotta R.* Beam Divergence. — DOI: <https://doi.org/10.61835/761>.
2. *Paschotta R.* Beam Quality. — DOI: <https://doi.org/10.61835/8mq>.
3. *Paschotta R.* Fresnel Number. — DOI: <https://doi.org/10.61835/uvi>.
4. *R. A. Lymarenko D. Gailevicius I. M.* Super-collimation by axisymmetric diffractive metamirror // Optica Publishing Group. — 2021. — DOI: [10.1364/OL.424033](https://doi.org/10.1364/OL.424033).
5. *Paschotta R.* Fabry & ndash. — DOI: <https://doi.org/10.61835/qrw>.