

АНОТАЦІЯ

Дубінін М. М. Формування, діагностика та управління випромінюванням сфокусованих лазерних пучків терагерцового діапазону. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали (10 – Природничі науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертаційну роботу присвячено теоретичним та експериментальним дослідженням фізичних закономірностей формування, фокусування хвильових лазерних пучків безперервного випромінювання терагерцового діапазону з неоднорідною просторовою поляризацією та управління випромінюванням сфокусованих лазерних пучків. Для розв’язання цих задач були використанні методи сучасної радіофізики, обчислювальної електродинаміки і математичної фізики.

Проведений огляд літератури показує, що в квантовій радіофізиці активно розвивається новий науковий напрямок пов’язаний з формуванням просторово неоднорідних мод з необхідним станом поляризації, а також з фокусуванням та управлінням цих мод. В оптичному діапазоні запропоновані як внутрішньорезонаторні, так і позарезонаторні методи формування вихідних пучків із заданим станом поляризації. Однак вони дають далеко не повне і не комплексне рішення проблем і відрізняються досить високою складністю виготовлення лазерних систем і, відповідно, їх вартістю. Відомі внутрішньорезонаторні методи вимагають введення складних додаткових оптичних елементів в резонатор для забезпечення формування мод з просторово-неоднорідною поляризацією, а позарезонаторні методи відрізняються високою чутливістю до заданого початкового профілю випромінювання.

Методи і підходи формування лазерних пучків з необхідною поляризаційною структурою в терагерцовому (ТГц) діапазоні розвинені лише в декількох роботах і всі вони належать до позарезонаторної групи методів, запропонованих з використанням імпульсного випромінювання. У зв'язку з цим актуальним завданням квантової радіофізики є пошук нескладних та енергетично ефективних внутрішньорезонаторних методів формування і селекції поперечних мод із заданим станом поляризації вихідного безперервного випромінювання в лазерах ТГц діапазону, що й стало однією з цілей досліджень автора, описаних в даній роботі.

В оптичному діапазоні також встановлені фізичні принципи фокусування лазерних пучків з неоднорідною просторовою поляризацією випромінювання, показана можливість управління світловими полями з субхвильовими розмірами областей локалізації енергії. Для ТГц діапазону властивості сфокусованих лазерних пучків з неоднорідною просторовою поляризацією вивчені лише в невеликій кількості робіт. У даних роботах досліджувалося випромінювання міліватних генераторів субпікосекундних широкосмугових імпульсів фемтосекундних лазерів взаємодія якого з речовиною значно відрізняється від взаємодії при безперервному випромінюванні. Такий підхід призводить до досить високої складності виготовлення лазерних систем. Для розширення можливостей науково-технічних застосувань актуальним є дослідження розподілів інтенсивності в фокальній області фокусувальних систем при різних типах неоднорідної просторової поляризації безперервного ТГц випромінювання.

Тому у другому розділі дисертаційної роботи було запропоновано методику розрахунку та отримано кількісні показники для коефіцієнтів відбиття і проходження хвильових мод для дифракційного дзеркала у вигляді великомасштабної багатокільцевої діафрагми, розташованої усередині порожнистого круглого діелектричного хвильоводу. Виходячи з цього, вперше запропоновано, теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено метод формування окремої поперечної моди з азимутальною поляризацією

поля в лазерному резонаторі ТГц діапазону, що спирається на виконанні одного з дзеркал хвилевідного квазіоптичного резонатора у вигляді шару діелектрика з нанесеною на нього азимутально-симетричною металевою великомасштабною дифракційною решіткою.

Вперше запропоновано напівпрозоре азимутально-симетричне дрібномасштабне дифракційне дзеркало без зовнішніх кіл, яке селекує небажані моди і формує необхідну моду с азимутальною поляризацією випромінювання. Однак експериментально доведено, що дане дзеркало має меншу енергетичну ефективність у порівнянні з напівпрозорим дрібномасштабним дифракційним дзеркалом з просвітленим центром.

Вперше запропоновано, теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено метод формування вищої EH_{12q} -моди в лазерному резонаторі, що спирається на розміщенні канавки шириною $2,3\text{--}2,8\ \lambda$, що розсіює, на поверхні одного з дзеркал хвилевідного квазіоптичного резонатора. Це дозволяє значно збільшити втрати для всіх небажаних мод, а втрати для вищої EH_{12q} -моди залишити практично незмінними, що забезпечує її переважне збудження.

Вперше запропоновано та експериментально підтверджено метод формування поперечної TM_{01q} -моди з радіальною поляризацією випромінювання на виході лазера з напівпрозорим радіально-симетричним дифракційним дзеркалом із центром, що відбиває випромінювання.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячений встановленню фізичних особливостей просторово-енергетичних характеристик при помірному та гострому фокусуванні у вільному просторі пучків випромінювання з різною просторовою поляризацією поля, збуджуваних модами резонатора лазера на основі порожнистого круглого діелектричного хвилеводу. Теоретично та експериментально показано, що у радіально поляризованої TM_{01} -моди при гострому фокусуванні випромінювання в розподілі поля спостерігається значне зростання осьової інтенсивності, що обумовлено зростанням внеску поздовжньої компоненти поля у загальну інтенсивність даної моди, яке

відсутнє при помірному фокусуванні. Показано, що лінійно поляризована EH_{11} -мода має максимум поля на осі пучка при обох видах фокусування. При гострому фокусуванні фокальна пляма цієї моди має найменший діаметр.

Теоретично досліджено просторово-енергетичні характеристики при помірному та гострому фокусуванні у вільному просторі пучків випромінювання з різною просторовою поляризацією поля, що збуджуються модами резонатора ТГц-лазера на основі порожнистого круглого металевих хвилеводу. Вперше встановлено, що максимум поля на осі пучка при обох видах фокусування, а також найменший діаметр в фокусі має несиметрична TE_{11} -мода.

У четвертому розділі дисертаційної роботи вперше теоретично і експериментально досліджена можливість управління параметрами фокальної області гостро сфокусованих лазерних пучків випромінювання, збуджуваних модами резонатора ТГц лазера на основі порожнистого круглого діелектричного хвилеводу. Запропонована фокусувальна система у вигляді короткофокусної лінзи, центральна область якої перекривалася поглинаючими масками з різними розмірами. Показано, що використання поглинаючих масок дозволяє зменшити діаметр пучка в фокальній області та значно збільшити глибину фокуса лінійно поляризованої EH_{11} -моди і азимутально поляризованої TE_{01} -моди.

Запропоновані і досліджені в дисертації методи і схеми формування та селекції поперечних мод з різною просторовою поляризацією поля в хвилевідних квазіоптичних резонаторах можуть бути використані при розробці та створенні нових конструкцій лазерних систем з керованими характеристиками для наукових і прикладних досліджень – одномодових лазерів з заданою формою та поляризацією вихідного пучка.

Результати досліджень фокусування лазерних пучків можуть бути використані для розв'язання задач, що пов'язані з взаємодією електромагнітних хвиль з речовиною: діагностика поверхні матеріалів, тонких плівок, біологічних об'єктів, досягнення субхвильової роздільної здатності

ТГц томографії, для радіолокаційних та телекомунікаційних застосувань тощо.

Запропонований метод управління гостро сфокусованими лазерними пучками може бути застосований в таких додатках, як отримання терагерцових зображень (в тому числі протяжних об'єктів), лазерна абляція, генерація оптичного розряду, де потрібно фокусування терагерцового випромінювання з підвищеною глибиною фокуса.

Ключові слова: терагерцовий діапазон, хвилевідний лазер, безперервне випромінювання, формування пучка, неоднорідне дзеркало, неоднорідна поляризація, діелектричний резонатор, металевий резонатор, фокусування, мода, управління випромінюванням.