

АНОТАЦІЯ

Свистунов О. О. Динаміка лазерних пучків терагерцового діапазону з фазовими сингулярностями. – 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, 2025.

Дисертаційну роботу присвячено встановленню фізичних закономірностей просторової динаміки лазерних пучків безперервного випромінювання терагерцового (ТГц) діапазону в випадку їх поширення та фокусування в вільному просторі. Для розв'язання цих задач були використанні методи сучасної радіофізики та обчислювальної електродинаміки.

Наведений огляд літератури показує, що дослідження вихрових пучків ТГц діапазону на даний час викликає значний інтерес. Такі лазерні пучки, що поєднують у собі переваги терагерцових хвиль і орбітальний кутовий момент, необхідні для вирішення важливих фундаментальних і прикладних завдань у галузі терагерцової та квантової оптики, візуалізації зображень з надвисокою роздільною здатністю, терагерцових комунікаційних систем зв'язку, захоплення та обертання мікрооб'єктів, вивчення лінійних та нелінійних відгуків матеріалів, прискорення та маніпулювання електронними згустками, виявлення астрофізичних джерел.

Існує два принципи генерації вихрових пучків: один – за допомогою пристроїв модуляції хвильового фронту для перетворення хвильового фронту звичайних ТГц хвиль; а при іншому безпосередньо збуджують ці вихрові пучки з використанням деяких лазерів накачування та/або речовин. Обмеженням на використання пристроїв заснованих на першому принципі є відсутність достатньої кількості існуючих і бажаних матеріалів в терагерцовому діапазоні, а також для цих пристроїв присутня відносно вузька смуга пропускання

терагерцових хвиль. У той час як при іншому принципі генерації можна працювати за відносно високої потужності лазера накачування з широкою смугою пропускання, незважаючи на відносно низьку ефективність перетворення. Однак, усі ці дослідження в більшості випадків проведені з використанням широкопсмугового випромінювання генераторів субпікосекундних імпульсів на основі фемтосекундних лазерів, що призводить до високої складності виготовлення лазерних систем та взаємодія якого з речовиною значно відрізняється від взаємодії при безперервному випромінюванні.

Дослідження поширення вихрових лазерних пучків у вільному просторі є важливим для розуміння особливостей їх взаємодії з навколишнім середовищем. Такі пучки характеризуються наявністю орбітального моменту імпульсу, який впливає на їх поведінку під час поширення. У вільному просторі вихори можуть демонструвати стабільність структури хвильового фронту, що дозволяє зберігати їх унікальні властивості на великих відстанях.

Фокусування вихрових лазерних пучків у терагерцовому діапазоні є складним і водночас перспективним напрямом досліджень. Сфокусовані пучки мають унікальні властивості, які можна використовувати для створення надщільних фокусів, компактних фокусів з розмірами менше дифракційної межі, оптичних голок, світлових тунелів, фокусів з плоскою вершиною, матриць фокусів та інших. Фокусування дозволяє значно збільшити інтенсивність випромінювання у заданій області, що є критично важливим для таких застосувань, як матеріалознавство, біомедичні дослідження та спектроскопія.

Останнім часом дедалі більшу увагу дослідників привертають лазерні пучки вищого порядку. Такі пучки можуть бути корисні в задачах отримання компактних фокусів з розмірами менше дифракційної межі та високої роздільної здатності. Для більш детального вивчення можливостей таких застосувань необхідне дослідження розподілів інтенсивності у фокальній області високоапертурної системи фокусування.

У другому розділі дисертації на основі дифракційних інтегралів Релея-Зоммерфельда вперше отримано аналітичні вирази для опису непараксіальної дифракції у вільному просторі мод діелектричного та металевого резонаторів терагерцового лазера у процесі їх взаємодії зі спіральною фазовою пластиною з різними топологічними зарядами ($n = 0, 1$ і 2).

Вивчені фізичні особливості просторово-енергетичних характеристик отриманих вихрових пучків при їх поширенні в різних зонах дифракції. Показано, що спіральна фазова пластина для лазерного пучка, збудженого лінійно поляризованою модою EH_{11} діелектричного резонатора, з просторової структури із максимумом інтенсивності в центрі ($n = 0$) формує кільцеву структуру ($n = 1, 2$). Для лазерних пучків, утворених азимутально поляризованою TE_{01} модою та радіально поляризованою TM_{01} модою, їх початковий кільцевий профіль ($n = 0$) перетворюється в профіль із максимумом інтенсивності в центрі ($n = 1$), а надалі знову в кільцевий ($n = 2$). За таких умов хвильовий фронт лазерного пучка, збудженого EH_{11} модою, перетворюється зі сферичного в спіральний з однією ($n = 1$) та двома ($n = 2$) точками сингулярності на осі, тоді як для фазової структури лазерних пучків, утворених TE_{01} та TM_{01} модами, з'являється область з двома та трьома точками фазової сингулярності поза віссю, відповідно.

Наведено, що у вільному просторі спіральна фазова пластина для лазерного пучка, збудженого лінійно поляризованою модою TE_{11} металевого резонатора, з профілю з максимумом інтенсивності в центрі ($n = 0$) утворює асиметричне кільце з двома максимумами ($n = 1, 2$). Для лазерних пучків, сформованих азимутально поляризованою TE_{01} модою та радіально поляризованою TM_{01} модою, початкова поперечна кільцева структура інтенсивності поля ($n = 0$) трансформується в структуру з максимальною інтенсивністю випромінювання в центрі ($n = 1$), а потім знову в кільцеву ($n = 2$). Фазовий фронт променю для основної поперечної E_y компоненти пучка, збудженого модою TE_{11} , змінюється зі сферичного на спіральний з однією ($n = 1$) та двома ($n = 2$) точками сингулярності. В той же час для хвильового фронту

E_x компоненти лазерного пучка спостерігається утворення трьох ($n = 1$) та чотирьох ($n = 2$) гвинтових витків. Тоді як у фазовому профілі поперечних компонент пучків, утворених TE_{01} та TM_{01} модами, спостерігається область з двома та трьома позаосьовими точками сингулярності фази, відповідно.

Розподіли фази для поперечних компонент лазерних пучків, збуджених модами діелектричного та металевого резонаторів з однорідною поляризацією, мають чітко сформовану вихрову структуру, як в зоні Френеля, так і в дальній зоні. Однак, для лазерних пучків, збуджених модами з неоднорідною поляризацією, розподіли фази набувають стійкої структури тільки в дальній зоні.

В третьому розділі дисертаційної роботи вперше отримано аналітичні вирази для опису компонент полів випромінювання у фокальній області лінзи для лазерного пучка, утвореного модами хвилевідного діелектричного та металевого резонаторів терагерцового лазера, у процесі їх взаємодії в вільному просторі зі спіральною фазовою пластиною.

Показано, що у фокальній області лінзи за відсутності спіральної фазової пластини, досліджуваний лазерний пучок, збуджений модою EH_{11} діелектричного резонатора, має максимум інтенсивності випромінювання на осі. Введення топологічного заряду призводить до появи мінімуму інтенсивності випромінювання на осі, а також до збільшення розміру фокальної плями. Для лазерного пучка, сформованого модами TE_{01} та TM_{01} діелектричного резонатора, з топологічними зарядами $n = 0$ і $n = 2$ розподіл інтенсивності зберігає кільцеву форму, а при $n = 1$ профіль пучка перетворюється на гаусоподібний. Хвильовий фронт із збільшенням топологічного заряду у фокальній області лінзи для компонент лазерних пучків, збуджених модами EH_{11} , TE_{01} і TM_{01} , перетворюється з сферичного на спіральний з різною кількістю гвинтових витків на осі. Представлені результати досліджень залежності відносного внеску потужності кожної компоненти поля лазерних пучків, збуджених даними модами, при різних значеннях топологічного заряду в випадку гострого фокусування.

Наведено, що лазерний пучок, сформований модою TE_{11} металевого резонатора, при топологічному заряді $n = 0$ та 2 утворює фокальну пляму з максимумом в центрі, а при значенні $n = 1$ фокусується в кільце. Хвильовий фронт E_x компоненти вихрового пучка в поперечному перерізі із зарядом $n = 1$ має три спіральних витка, а хвильовий фронт для вихрового пучка із зарядом $n = 2$ має вже чотири спіральні витки. В той же час хвильовий фронт E_y компоненти вихрового пучка в поперечному перерізі із зарядом $n = 1$ має один спіральний виток, а хвильовий фронт для пучка із зарядом $n = 2$ має два спіральні витки. Для лазерного пучка, сформованого модою TE_{01} металевого резонатора, з топологічними зарядами при $n = 1$ профіль інтенсивності пучка перетворюється на гаусоподібний, а при $n = 0$ і $n = 2$ розподіл інтенсивності зберігає кільцеву форму. Хвильовий фронт для обох компонент вихрового пучка в поперечному перерізі з зарядом $n = 1$ має два спіральні витки, а хвильовий фронт пучка для $n = 2$ профіль має три спіральні витки.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячений теоретичному та експериментальному встановленню фізичних особливостей структури поля лазерних пучків вищого порядку, збуджених комбінованими $TE_{0n}+EH_{2n}$ та $EH_{-1n}+EH_{3n}$ модами ($n = 1, 2, 3$) діелектричного резонатора терагерцового лазера, при їх поширенні та фізичних властивостей лазерних пучків, утворених даними модами, при їх помірному та гострому фокусуванні у вільному просторі. Показано, що сумарна інтенсивність поля пучка, утвореного цими комбінованими модами, визначається усіма трьома компонентами. Центральні максимуми поля лазерних пучків значно зміщуються від геометричних фокусів досліджуваних лінз зі збільшенням свого порядку n . Наведено, що поперечний розподіл сумарної інтенсивності поля пучка, сформованого модою $TE_{01q}+EH_{21q}$ діелектричного хвилевідного резонатора, в області максимальної інтенсивності сфокусованих пучків випромінювання зберігає кільцеподібний вигляд як при помірному, так і при гострому фокусуванні.

Вихрові пучки з їх стабільністю при поширенні у вільному просторі є перспективними для створення систем бездротового зв'язку у терагерцовому діапазоні, забезпечуючи високу пропускну здатність і стійкість до перешкод. Сфокусовані вихрові пучки дозволяють створювати компактні фокуси з розмірами менше дифракційної межі, оптичні голки, фокуси з плоскою вершиною, та інші. Це відкриває нові можливості для створення наноструктур, збору мікрочастинок або роботи з біологічними об'єктами. Дослідження фокусування таких пучків сприяють розробці високочутливих сенсорів, що здатні виявляти незначні зміни в середовищі або характеристиках об'єктів. Дослідження фокусування терагерцових пучків, збуджених модами вищого порядку, сприяє появі передових технологій у таких галузях як медицина, комунікації, матеріалознавство, квантова фізика і криптографія, в тому числі у сфері нових методів кодування даних у квантових комунікаціях.

Ключові слова: діелектричний хвилевідний резонатор, металевий хвилевідний резонатор, терагерцовий лазер, вихрові пучки, спіральна фазова пластина, комбіновані моди, неоднорідна поляризація, поширення випромінювання, гостре та помірне фокусування.

ABSTRACT

Svystunov O. O. Dynamics of laser beams of the terahertz range with phase singularities. Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis submitted for obtaining the Doctor of Philosophy degree in specialty 105 – Applied Physics and Nanomaterials (10 – Natural Sciences). V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The dissertation work is devoted to establishing the physical regularities of spatial dynamics of laser beams of continuous radiation of the terahertz (THz) range in the case of their propagation and focusing in free space. To solve these problems, methods of modern radiophysics and computational electrodynamics were used.

The literature review shows that the study of vortex beams in the THz range is currently of considerable interest. Such laser beams, combining the advantages of terahertz waves and orbital angular momentum, are necessary for solving important fundamental and applied problems in the field of terahertz and quantum optics, ultrahigh-resolution imaging, terahertz communication systems, capturing and rotating microobjects, studying linear and nonlinear responses of materials, accelerating and manipulating electron bunches, and detecting astrophysical sources.

There are two principles of vortex beam generation: one is by using wavefront modulation devices to convert the wavefront of conventional THz waves; and the other is directly exciting these vortex beams using some pump lasers and/or substances. The limitation to the use of devices based on the first principle is the lack of a sufficient number of existing and desirable materials in the terahertz range, and also for these devices there is a relatively narrow bandwidth of terahertz waves. While with the other generation principle it is possible to operate at a relatively high power of the pump laser with a wide bandwidth, despite the relatively low conversion efficiency. However, all these studies in most cases were carried out using broadband radiation from subpicosecond pulse generators based on femtosecond lasers, which

leads to high complexity of manufacturing laser systems and the interaction of which with matter is significantly different from the interaction with continuous radiation.

The study of the propagation of vortex laser beams in free space is important for understanding the features of their interaction with the environment. Such beams are characterized by the presence of orbital angular momentum, which affects their behavior during propagation. In free space, they demonstrate the stability of the phase front structure, which allows them to preserve their unique properties over large distances.

Focusing vortex laser beams in the terahertz range is a complex and at the same time promising area of research. Focused beams have unique properties that can be used to create ultra-dense foci, compact foci with dimensions smaller than the diffraction limit, optical needles, light tunnels, flat-top foci, foci matrices, and others. Focusing allows for a significant increase in the radiation intensity in a given area, which is critically important for applications such as materials science, biomedical research, and spectroscopy.

Recently, higher-order laser beams have attracted increasing attention of researchers. Such beams can be useful in obtaining compact foci with sizes smaller than the diffraction limit and high resolution. To study the possibilities of such applications in more detail, it is necessary to study the intensity distributions in the focal region of a high-aperture focusing system.

In the second section of the dissertation, based on Rayleigh-Sommerfeld diffraction integrals, analytical expressions were first obtained to describe the non-paraxial diffraction in free space of the modes of dielectric and metallic resonators of a terahertz laser during their interaction with a spiral phase plate with different topological charges ($n = 0, 1, \text{ and } 2$).

The physical features of the spatial and energetic characteristics of the obtained vortex beams during their propagation in different diffraction zones have been studied. It is shown that a spiral phase plate for a laser beam excited by a linearly polarized EH_{11} mode of a dielectric resonator forms a ring structure ($n = 1, 2$) from a spatial structure with an intensity maximum in the center ($n = 0$). For laser beams

formed by an azimuthally polarized TE_{01} mode and a radially polarized TM_{01} mode, their initial ring profile ($n = 0$) is transformed into a profile with an intensity maximum in the center ($n = 1$), and then again into a ring ($n = 2$). Under such conditions, the wavefront of a laser beam excited by the EH_{11} mode transforms from spherical to helical with one ($n = 1$) and two ($n = 2$) singularity points on the axis, while for the phase structure of laser beams generated by the TE_{01} and TM_{01} modes, a region with two and three phase singularity points off-axis appears, respectively.

It is shown that in free space, a spiral phase plate for a laser beam excited by a linearly polarized TE_{11} mode of a metal resonator forms an asymmetric ring with two maxima ($n = 1, 2$) from a profile with a maximum intensity in the center ($n = 0$). For laser beams formed by an azimuthally polarized TE_{01} mode and a radially polarized TM_{01} mode, the initial transverse annular structure of the field intensity ($n = 0$) is transformed into a structure with a maximum radiation intensity in the center ($n = 1$), and then again into an annular one ($n = 2$). The phase front of the beam for the main transverse E_y component of the beam excited by the TE_{11} mode changes from spherical to helical with one ($n = 1$) and two ($n = 2$) singularity points. At the same time, for the wavefront of the E_x component of the laser beam, the formation of three ($n = 1$) and four ($n = 2$) helical turns is observed. While in the phase profile of the transverse components of the beams formed by the TE_{01} and TM_{01} modes, a region with two and three off-axis phase singularities is observed, respectively.

The phase distributions for the transverse components of laser beams excited by modes of dielectric and metallic resonators with uniform polarization have a clearly formed vortex structure, both in the Fresnel zone and in the far zone. However, for laser beams excited by modes with inhomogeneous polarization, the phase distributions acquire a stable structure only in the far zone.

In the third section of the dissertation, analytical expressions were first obtained to describe the components of the radiation fields in the focal region of the lens for a laser beam formed by the waveguide modes of the dielectric and metallic resonators of a terahertz laser during their interaction in free space with a spiral phase plate.

It is shown that in the focal region of the lens in the absence of a spiral phase plate, the studied laser beam excited by the EH_{11} mode of the dielectric resonator has a maximum of radiation intensity on the axis. The introduction of a topological charge leads to the appearance of a minimum of radiation intensity on the axis, as well as to an increase in the size of the focal spot. For a laser beam formed by the TE_{01} and TM_{01} modes of the dielectric resonator, with topological charges $n = 0$ and $n = 2$, the intensity distribution retains a ring shape, and at $n = 1$ the beam profile becomes Gaussian. The wave front with an increase in the topological charge in the focal region of the lens for the components of the laser beams excited by the EH_{11} , TE_{01} and TM_{01} modes turns from spherical to helical with a different number of helical turns on the axis. The results of studies of the dependence of the relative contribution of the power of each component of the field of laser beams excited by these modes at different values of the topological charge in the case of tight focusing are presented.

It is shown that the laser beam formed by the TE_{11} mode of a metal resonator forms a focal spot with a maximum in the center at topological charges $n = 0$ and 2 , and at the value $n = 1$ it focuses into a ring. The wave front E_x of the vortex beam component in the cross section with charge $n = 1$ has three spiral turns, and the wave front for the vortex beam with charge $n = 2$ has already four spiral turns. At the same time, the wave front E_y of the vortex beam component in the cross section with charge $n = 1$ has one spiral turn, and the wave front for the beam with charge $n = 2$ has two spiral turns. For a laser beam formed by the TE_{01} mode of a metal resonator with topological charges at $n = 1$, the beam intensity profile becomes Gaussian, and at $n = 0$ and $n = 2$ the intensity distribution retains a ring shape. The wavefront for both components of the vortex beam in the cross section with charge $n = 1$ has two spiral turns, and the beam wavefront for $n = 2$ has three spiral turns.

The fourth section of the dissertation is devoted to the theoretical and experimental establishment of the physical features of the structure of the laser beam field excited by the combined $TE_{0n}+EH_{2n}$ and $EH_{-1n}+EH_{3n}$ ($n = 1, 2, 3$) modes of the dielectric resonator of a terahertz laser during their propagation in free space and the physical properties of the laser beams formed by these modes during their moderate

and tight focusing. It is shown that the total intensity of the beam field formed by these combined modes is determined by all three components. The central maxima of the laser beam field are significantly shifted from the geometric foci of the studied lenses with an increase in their order n . It is shown that the transverse distribution of the total intensity of the beam field formed by the $TE_{01q}+EH_{21q}$ mode of the dielectric waveguide resonator in the region of maximum intensity of the focused radiation beams retains a ring-shaped appearance both at moderate and at tight focusing.

Vortex beams, with their stability when propagating in free space, are promising for creating wireless communication systems in the terahertz range, providing high bandwidth and resistance to interference. Focused vortex beams allow the creation of compact foci with dimensions smaller than the diffraction limit, optical needles, flat-top foci, and others. This opens up new opportunities for creating nanostructures, collecting microparticles, or working with biological objects. Research on focusing such beams contributes to the development of highly sensitive sensors that can detect minor changes in the environment or characteristics of objects. Research on focusing terahertz beams excited by higher-order modes contributes to the emergence of advanced technologies in such fields as medicine, communications, materials science, quantum physics, and cryptography, including in the field of new methods of data encoding in quantum communications.

Keywords: dielectric waveguide resonator, metallic waveguide resonator, terahertz laser, vortex beams, spiral phase plate, combined modes, inhomogeneous polarization, radiation propagation, moderate and tight focusing.