

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-38-01>

УДК 537.876.23:537.877

О. В. ГУРІН, н.с.

e-mail: oleg.v.gurin@i.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1382-5338>

А. В. ДЕГТЯРЬОВ, к. ф.-м. наук, доц.

e-mail: a.v.degtyarev@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0844-4282>

М. М. ДУБІНІН, Ph.D., с.н.с.

e-mail: mykola.dubin@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7723-9592>

В. О. МАСЛОВ, д. ф.-м. наук, проф.

e-mail: v.a.maslov@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7743-7006>

К. І. МУНТЯН, н.с.

e-mail: k.i.muntean@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6479-3511>

В. М. РЯБИХ, н.с.

e-mail: v.ryabykh@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3526-292X>

О. О. СВИСТУНОВ, аспірант

e-mail: oleg.svistunov.98@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4967-5944>

В. С. СЕНЮТА, к. ф.-м. наук, с.н.с.

e-mail: vladislavsenyuta03@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6601-2379>

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
м. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ГОСТРЕ ТА ПОМІРНЕ ФОКУСУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ МОД ТЕРАГЕРЦОВОГО ЛАЗЕРА

Актуальність. Розглядається задача гострого та помірною фокусування комбінованих мод діелектричного хвильового лазера. Результати дослідження різного типу фокусування лазерних пучків мають широкий спектр потенційних застосувань, від отримання зображень і спектроскопії до зв'язку, зондування, біомедицини та розв'язання задач, які пов'язані з взаємодією електромагнітних хвиль з речовиною: діагностика тонких плівок, поверхні матеріалів, різних біологічних об'єктів та досягнення субхвильової роздільної здатності ТГц томографії.

Мета роботи — встановлення фізичних закономірностей гострого та помірною фокусування лазерних пучків випромінювання, описуваних комбінованими лінійно поляризованими модами круглого порожнистого діелектричного хвильоводу.

Матеріали та методи. Для дослідження фокусування лазерних пучків, які збуджувались модами квазіоптичного хвильового резонатора, була використана векторна теорія Релея-Зоммерфельда. Щоб експериментально дослідити ці явища, були використані добре відомі методи вимірювань просторово-енергетичних характеристик лазерних пучків в ТГц діапазоні.

Результати. Теоретично та експериментально встановлені фізичні особливості просторово-енергетичних характеристик лазерних пучків випромінювання з лінійною поляризацією поля при гострому та помірному фокусуванні у вільному просторі, які збуджуються комбінованими модами резонатора лазера на основі круглого діелектричного хвильоводу.

Висновки. Показано, що сумарна інтенсивність поля, як комбінованих $TE_{0n}+EH_{2n}$, так і $EH_{1n}+EH_{3n}$ -мод ($n = 1, 2, 3$), визначається усіма трьома компонентами та на осі має провал при обох видах фокусування. Центральні максимуми поля даних мод значно зміщуються від геометричних фокусів досліджуваних лінз зі збільшенням порядку n цих мод. Найменший діаметр фокальної плями в області максимальної інтенсивності має $EH_{11}+EH_{31}$ -мода при гострому фокусуванні, найбільший діаметр фокальної плями має при помірному фокусуванні $TE_{03}+EH_{23}$ -мода.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: терагерцовий лазер, діелектричний резонатор, комбіновані моди, поляризація, гостре фокусування, помірне фокусування

Як цитувати: Гурін ОВ, Дегтярьов АВ, Дубінін ММ, Маслов ВО, Мунтян КІ, Рябих ВМ, Свистунов ОО, Сенюта ВС. Гостре та помірне фокусування комбінованих мод терагерцового лазера. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2023; 38:7-15. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-38-01>

© Гурін О. В., Дегтярьов А. В., Дубінін М. М. та ін., 2023

Open access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

In cites: Gurin OV, Degtyarev AV, Dubinin MM, Maslov VA, Muntean KI, Ryabykh VM, Senyuta VS, Svystunov OO. Sharp and moderate focusing of the combined modes of a terahertz laser. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radiophysics and Electronics". 2023; 38:7-15. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2023-38-01>

ВСТУП

В останнє десятиріччя спостерігається різке зростання числа фундаментальних і прикладних робіт у галузі генерації та застосування випромінювання в терагерцовому (ТГц) діапазоні. За останні роки з'явився цілий ряд нових типів джерел терагерцового випромінювання від міліватних генераторів субпікосекундних імпульсів широкосмугового випромінювання на основі фемтосекундних лазерів до лазерів на вільних електронах, що генерують вузькосмугове когерентне випромінювання з середньою потужністю до сотень Вт. Незважаючи на суттєвий прогрес у галузі генерації та використання терагерцового випромінювання у зв'язку із застосуванням лазерів, даний напрямок досліджень залишається одним з таких, що найбільш швидко розвиваються в сучасній прикладній фізиці.

Випромінювання ТГц діапазону має значний потенціал для застосування в багатьох сферах, включаючи комунікації, отримання мікроскопічних зображень з високою роздільною здатністю, спектроскопію та біологічну інженерію, оскільки ТГц хвиля може проходити скрізь діелектричні матеріали, напівпровідники [1, 2]. На відміну від рентгенівського випромінювання з його іонізуючими властивостями, ТГц-випромінювання неіонізуюче та неруйнівне, із низькими енергіями фотонів, тому воно не має шкідливого впливу на біологічні тканини. Однак широке розповсюдження комерціалізації ТГц технології ще не було реалізовано через відсутність компактного широкодіапазонного та потужного ТГц джерела. Актуальною є розробка лазерів, які працюють в терагерцовому діапазоні, та вивчення характеристик вже існуючих. Також на сьогодні актуальними є дослідження з селекції та фокусування лазерних пучків. Більшість робіт в цій області представлено в оптичному діапазоні [3–6]. У ТГц діапазоні також відомо ряд робіт, які присвячено вивченню селекції та фокусуванню пучків з різною просторовою поляризацією [7–9]. Поздовжні електромагнітні поля у сфокусованих ТГц пучках радіальної та лінійної поляризації отримані в [10]. Використання електрооптичного детектування, яке є фазочутливим, дозволяє вибірково визначати поздовжні і поперечні компоненти поля. Поздовжньо поляризована терагерцова хвиля шляхом фокусування ТГц-пучка досліджена в [11]. У [12] встановленні фізичні закономірності формування та фокусування мод вищого порядку діелектричного хвилевідного резонатора ТГц лазера. Відомо, що у експериментальних моделях лазерів ефективно збуджуються комбіновані моди. Однак цьому питанню не приділялось уваги, тому їх дослідження є актуальною задачею.

Метою даної роботи є вивчення особливостей структури поля комбінованих мод $TE_{0n}+EH_{2n}$ та $EH_{-1n}+EH_{3n}$ ($n = 1, 2, 3$) діелектричного резонатора терагерцового лазера у вільному просторі та властивостей лазерних пучків, збуджених даними модами при їх помірному та гострому фокусуванні.

ТЕОРЕТИЧНІ СПІВВІДНОШЕННЯ

Моди досліджуваного лазерного резонатора, які використовуються для фокусування випромінювання, збігаються з модами круглого порожнистого діелектричного хвилеводу [13]. Поширення лазерного випромінювання у вільному просторі вздовж осі z можна описати інтегралами Релея-Зоммерфельда [14]. Теоретичну схему розрахункової моделі фокусування лазерних пучків наведено на Рис. 1. Задамо в початковій площині випромінювання у вигляді комбінованих лінійно поляризованих $TE_{0n}+EH_{2n}$ та $EH_{-1n}+EH_{3n}$ ($n = 1, 2, 3$) мод круглого діелектричного хвилеводу радіуса a_1 . Компоненти електромагнітних полів в площині джерела $z = 0$ можна описати наступними виразами [13]:

$$TE_{0n}+EH_{2n}\text{-моди:} \quad \begin{cases} \vec{E}_r(r, \phi) = A_{0n} J_1 \left(\chi_{0n} \frac{r}{a_1} \right) \sin(2\phi), \\ \vec{E}_\phi(r, \phi) = A_{0n} J_1 \left(\chi_{0n} \frac{r}{a_1} \right) (1 + \cos 2\phi), \end{cases} \quad (1)$$

$$EH_{1n}+EH_{3n}\text{-моди:} \quad \begin{cases} \vec{E}_r(r, \phi) = B_{3n} J_2 \left(\chi_{3n} \frac{r}{a_1} \right) (-\sin(\phi) + \sin(3\phi)), \\ \vec{E}_\phi(r, \phi) = B_{3n} J_2 \left(\chi_{3n} \frac{r}{a_1} \right) (\cos(\phi) + \cos(3\phi)), \end{cases} \quad (2)$$

де $A_{0n} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} J_2(\chi_{0n})}$, $B_{3n} = \frac{1}{a\sqrt{2\pi} J_3(\chi_{3n})}$ – нормуючі множники; J_2, J_3 – функції Бесселя першого роду, χ_{0n}, χ_{3n} – корені функції Бесселя.

Використовуючи векторну теорію Релея-Зоммерфельда в непараксіальному наближенні [14] та вирази 1 та 2, знаходимо компоненти поля даних мод на вхідній апертурі лінзи. Далі, врахувавши функцію фазової корекції лінзи [15], і знову застосувавши інтеграли Релея-Зоммерфельда отримаємо компоненти поля досліджуваних мод в фокальній області лінзи.

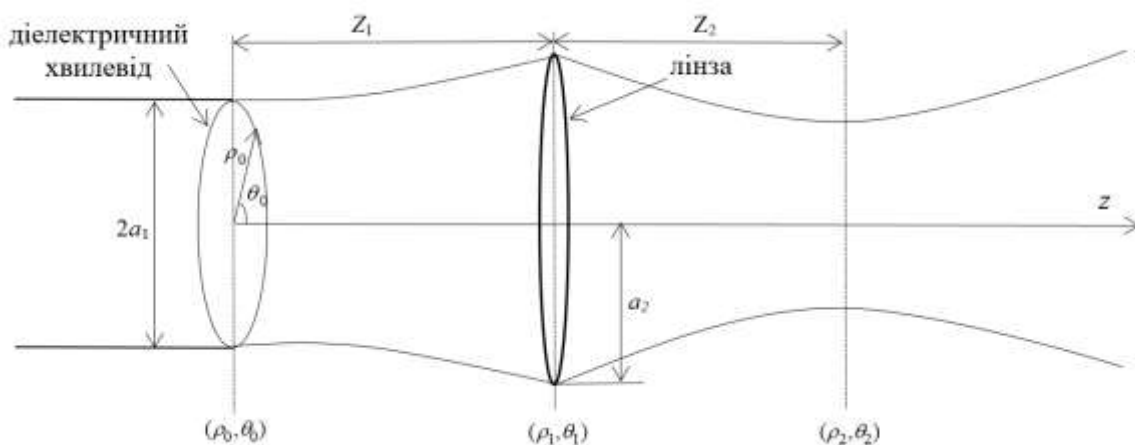


Рис. 1. Теоретична схема розрахункової моделі фокусування лазерних пучків.

Fig. 1. Theoretical scheme of the calculation model of laser beam focusing

Для лінійно поляризованих комбінованих $TE_{0n}+EH_{2n}$ -мод компоненти поля в фокальній області лінзи мають вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} E_r(\rho_2, \theta_2, z_2) &= \frac{-ik^2 z_1 z_2}{\xi_2^2} \exp(ik\xi_2) \sin(\theta_2) A_{2n} \int_0^{a_2} \frac{\exp(ik\xi_1)}{\xi_1^2} \int_0^{a_1} J_1\left(\chi_{0n} \frac{r}{a_1}\right) J_1(\gamma_1 r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2\xi_1}\right) r dr \times \\ &\quad \times J_1(\gamma_2 \rho_1) \exp\left(\frac{ik\rho_1^2}{2\xi_2}\right) Ph(\rho_1) \rho_1 d\rho_1, \\ E_\phi(\rho_2, \theta_2, z_2) &= \frac{-ik^2 z_1 z_2}{\xi_2^2} \exp(ik\xi_2) \cos(\theta_2 + 1) A_{2n} \int_0^{a_2} \frac{\exp(ik\xi_1)}{\xi_1^2} \int_0^{a_1} J_1\left(\chi_{0n} \frac{r}{a_1}\right) J_1(\gamma_1 r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2\xi_1}\right) r dr \times \\ &\quad \times J_1(\gamma_2 \rho_1) \exp\left(\frac{ik\rho_1^2}{2\xi_2}\right) Ph(\rho_1) \rho_1 d\rho_1, \\ E_z(\rho_2, \theta_2, z_2) &= \frac{ik^2 z_1}{\xi_2^2} \exp(ik\xi_2) \sin(\theta_2) A_{2n} \int_0^{a_2} \frac{\exp(ik\xi_1)}{\xi_1^2} \int_0^{a_1} J_1\left(\chi_{0n} \frac{r}{a_1}\right) J_1(\gamma_1 r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2\xi_1}\right) r dr \times \\ &\quad \times [\rho_1 J_2(\gamma_2 \rho_1) - i\rho_2 J_1(\gamma_2 \rho_1)] \exp\left(\frac{ik\rho_1^2}{2\xi_2}\right) Ph(\rho_1) \rho_1 d\rho_1. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Для лінійно поляризованих комбінованих $EH_{-1n}+EH_{3n}$ -мод компоненти поля в фокальній області лінзи мають вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} E_r(\rho_2, \theta_2, z_2) &= \frac{k^2 z_1 z_2}{\xi_2^2} \exp(ik\xi_2) B_{3n} \int_0^{a_2} \frac{2 \exp(ik\xi_1)}{\xi_1^2} \int_0^{a_1} J_2\left(\chi_{3n} \frac{r}{a_1}\right) J_1(\gamma_2 r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2\xi_1}\right) r dr \times \\ &\quad \times \left[J_3(\gamma_2 \rho_1) \sin(3\theta_2) - J_1(\gamma_2 \rho_1) \sin(\theta_2) \right] \exp\left(\frac{ik\rho_1^2}{2\xi_2}\right) Ph(\rho_1) \rho_1 d\rho_1, \\ E_\phi(\rho_2, \theta_2, z_2) &= \frac{k^2 z_1 z_2}{\xi_2^2} \exp(ik\xi_2) B_{3n} \int_0^{a_2} \frac{2 \exp(ik\xi_1)}{\xi_1^2} \int_0^{a_1} J_2\left(\chi_{3n} \frac{r}{a_1}\right) J_1(\gamma_2 r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2\xi_1}\right) r dr \times \\ &\quad \times \left[J_3(\gamma_2 \rho_1) \cos(3\theta_2) + J_1(\gamma_2 \rho_1) \cos(\theta_2) \right] \exp\left(\frac{ik\rho_1^2}{2\xi_2}\right) Ph(\rho_1) \rho_1 d\rho_1, \\ E_z(\rho_2, \theta_2, z_2) &= \frac{-k^2 z_1}{\xi_2^2} \exp(ik\xi_2) B_{3n} \int_0^{a_2} \frac{2 \exp(ik\xi_1)}{\xi_1^2} \int_0^{a_1} J_2\left(\chi_{3n} \frac{r}{a_1}\right) J_1(\gamma_2 r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2\xi_1}\right) r dr \times \\ &\quad \times \left[J_3(\gamma_2 \rho_1) \sin(3\theta_2) - J_1(\gamma_2 \rho_1) \sin(\theta_2) \right] \rho_2 \exp\left(\frac{ik\rho_1^2}{2\xi_2}\right) Ph(\rho_1) \rho_1 d\rho_1. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

де $k = 2\pi / \lambda$ – хвильове число, λ – довжина хвилі; z_1 – відстань від вихідного дзеркала резонатора до лінзи, z_2 – відстань від фокальної площини лінзи до площини спостереження; ρ_1, θ_1, z_1 – циліндричні координати в площині лінзи; $\xi_1 = \sqrt{z_1^2 + \rho_1^2}$; $\gamma_1 = k\rho_1 / \xi_1$; ρ_2, θ_2, z_2 – циліндричні координати в площині спостереження за лінзою; $\xi_2 = \sqrt{(F + z_2)^2 + \rho_2^2}$; $\gamma_2 = k\rho_2 / \xi_2$, a_1 – радіус хвильоводу; a_2 – радіус лінзи; $Ph(\rho_1) = \exp(-i\pi\rho_1^2 / \lambda F)$ – функція фазової корекції лінзи, F – фокусна відстань лінзи.

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТА ЇХ АНАЛІЗ

На підставі виразів (3) та (4) було проведено розрахунки сумарної інтенсивності поля досліджуваних комбінованих мод $I(\rho_2, \theta_2, z_2) = |E_r|^2 + |E_\phi|^2 + |E_z|^2$ при гострому та помірному фокусуванні. Довжина хвилі досліджуваного випромінювання склала 0,4326 мм (лінія генерації ТГц лазера з оптичним накачуванням на молекулі мурашиної кислоти НСООН). Довжина хвильоводу склала $L = 1848$ мм. Радіус хвильоводу $a_1 = 17,5$ мм, а радіус лінзи $a_2 = 25$ мм. Фокусна відстань лінзи відповідно згідно умов помірному фокусуванню обиралася рівною $F = 160$ мм (числова апертура лінзи [16] $NA = 0,16$), а гострого фокусування $F = 36,36$ мм ($NA = 0,68$).

На Рис. 2 зображено поперечні розподіли сумарної інтенсивності поля $TE_{03}+EH_{23}$ (а) та $EH_{-13}+EH_{33}$ (б) мод у вільному просторі на відстані 300 мм від вихідного дзеркала лазера. Дані комбіновані моди мають найбільшу розбіжність серед досліджуваних. З рисунків видно, що лінза радіусом 25 мм на цій відстані дозволяє практично повністю перехоплювати пучки досліджуваних мод.

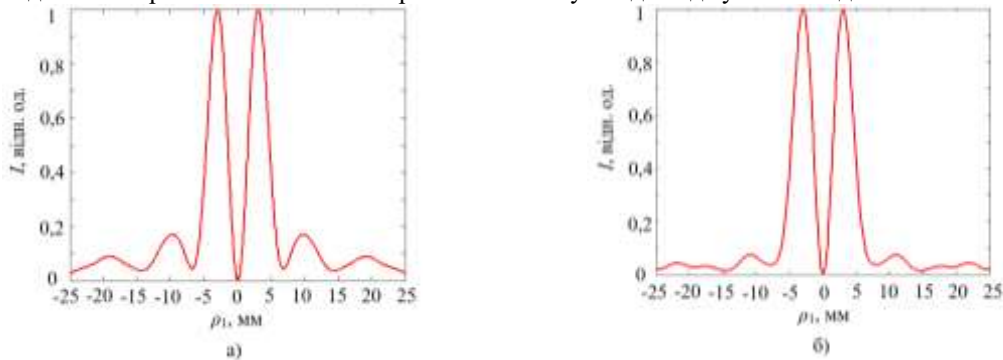


Рис. 2. Поперечний розподіл інтенсивності $TE_{03}+EH_{23}$ (а) та $EH_{-13}+EH_{33}$ (в) мод у вільному просторі на відстані 300 мм від вихідного дзеркала лазера

Fig. 2. Transverse intensity distribution of $TE_{03}+EH_{23}$ (a) та $EH_{-13}+EH_{33}$ (b) modes in free space at a distance of 300 mm from the laser output mirror

На Рис. 3 наведено розподіли сумарної інтенсивності поля комбінованих лінійно поляризованих $TE_{0n}+EH_{2n}$ -мод ($n = 1,2,3$) при помірному та гострому фокусуванні. Сумарна інтенсивність поля даних мод визначається усіма трьома компонентам та на осі має провал. Максимум поля мають центральні лепестки даних мод, які помітно зміщені від фокусу лінзи. Через складну структуру поля досліджуваних комбінованих мод їх діаметри d_σ в областях максимальних інтенсивностей z_{lmax} при гострому та помірному фокусуванні було розраховано за формулою [16]:

$$d_\sigma = 2 \sqrt{\frac{2 \int_0^\infty \int_0^\infty \rho_2^2 I(\rho_2, \theta_2, z_2) \rho_2 d\rho_2 d\theta_2}{\int_0^\infty \int_0^\infty I(\rho_2, \theta_2, z_2) \rho_2 d\rho_2 d\theta_2}}. \quad (5)$$

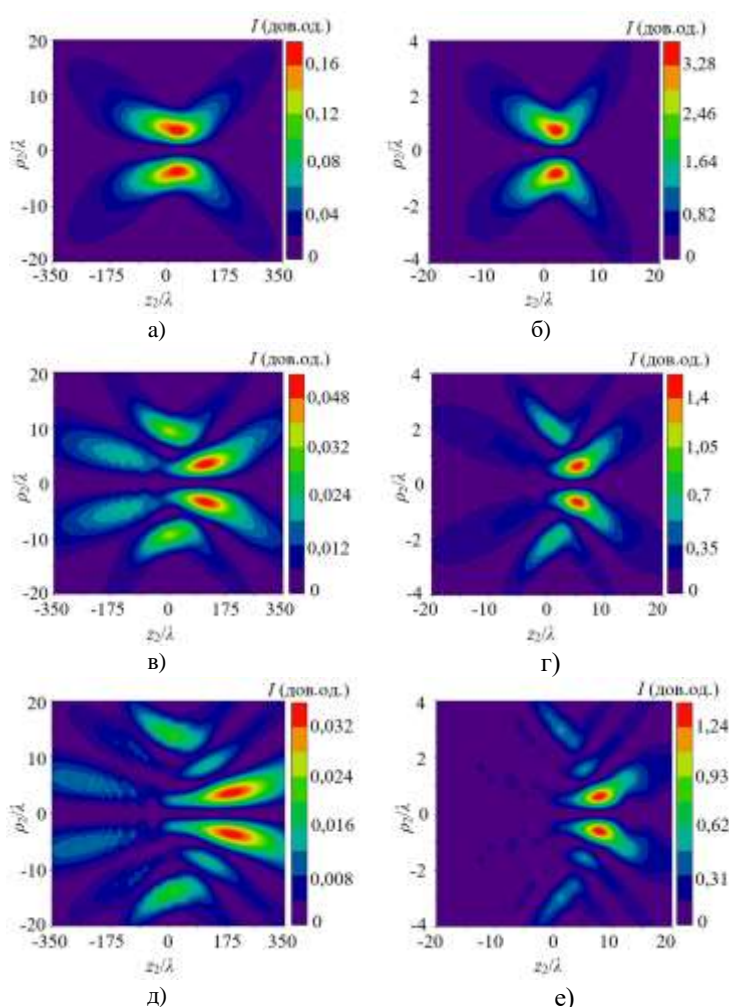


Рис. 3. Розрахункові розподіли сумарної інтенсивності поля $TE_{01}+EH_{21}$ (а, б), $TE_{02}+EH_{22}$ (в, г) та $TE_{03}+EH_{23}$ (д, е) - мод при помірному (а, в, д) та гострому (б, г, е) фокусуванні в фокальній області лінзи
Fig. 3. Calculated distributions of total field intensity $TE_{01}+EH_{21}$ (a, b), $TE_{02}+EH_{22}$ (c, d) and $TE_{03}+EH_{23}$ (d, e)-mode at moderate (a, c, e) and a sharp (b, d, e) focusing in the focal region of the lens

Максимальна інтенсивність поля $TE_{01}+EH_{21}$ -моди при помірному фокусуванні знаходиться на відстані $z_{lmax} = 11,56\lambda$, а при гострому $z_{lmax} = 1,48\lambda$. Діаметр пучка в даній області при помірному фокусуванні для моди $TE_{01}+EH_{21}$ становив $d_\sigma = 13,65\lambda$, а при гострому $d_\sigma = 4,15\lambda$. У $TE_{02}+EH_{22}$ -моди максимальна інтенсивність поля при помірному фокусуванні знаходиться на відстані $z_{lmax} = 36,98\lambda$, а при гострому $z_{lmax} = 3,79\lambda$. При цьому діаметр пучка в області максимальної інтенсивності для даної моди склав $d_\sigma = 26,74\lambda$ при помірному і $d_\sigma = 8,36\lambda$ при гострому фокусуванні. Що стосується моди

$TE_{03}+EH_{23}$, то її максимальна інтенсивність поля при помірному фокусуванні знаходиться на відстані $z_{lmax} = 64,72\lambda$, а при гострому $z_{lmax} = 4,95\lambda$. Діаметр пучка в даній області при помірному фокусуванні для моди $TE_{03}+EH_{23}$ становив $d_{\sigma} = 43,30\lambda$, а при гострому $d_{\sigma} = 14,10\lambda$.

На Рис. 4 наведено розподіли сумарної інтенсивності поля комбінованих лінійно поляризованих $EH_{-1n}+EH_{3n}$ -мод ($n = 1,2,3$) при помірному та гострому фокусуванні.

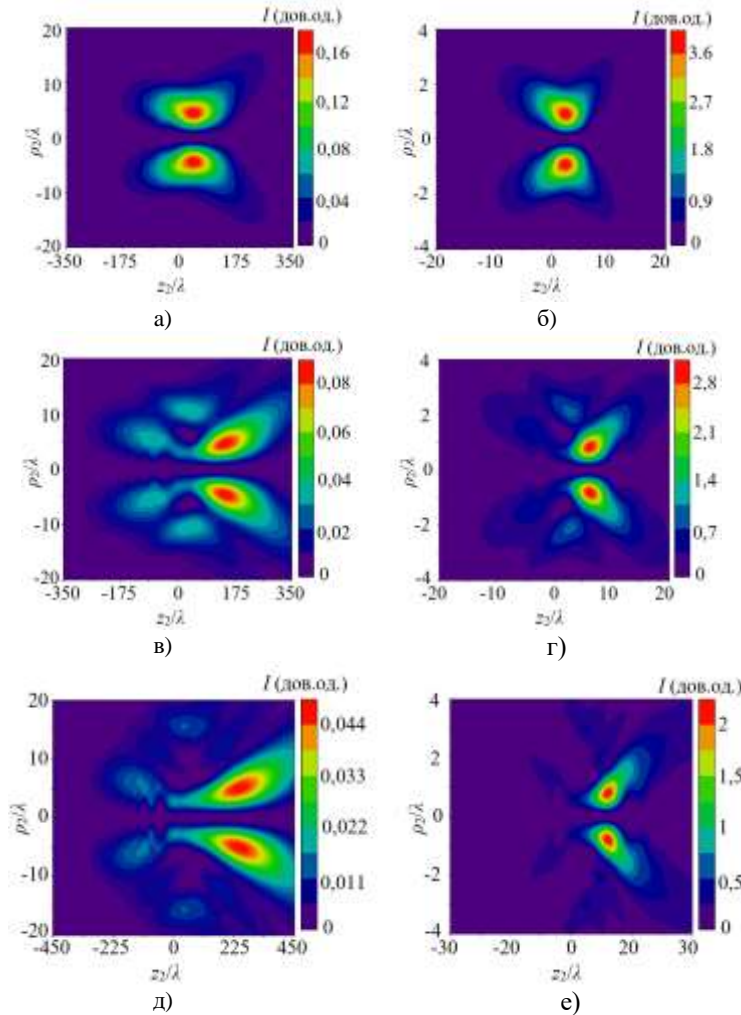


Рис. 4. Розрахункові розподіли сумарної інтенсивності поля $EH_{-11}+EH_{31}$ (а, б), $EH_{-12}+EH_{32}$ (в, г) та $EH_{-13}+EH_{33}$ (д, е) - мод при помірному (а, в, д) та гострому (б, г, е) фокусуванні в фокальній області лінзи
Fig. 4. Calculated distributions of total field intensity $EH_{-11}+EH_{31}$ (a, b), $EH_{-12}+EH_{32}$ (c, d) and $EH_{-13}+EH_{33}$ (d, e)- mode at moderate (a, c, e) and a sharp (b, d, e) focusing in the focal region of the lens

Сумарна інтенсивність поля даних мод, як і для комбінованих $TE_{0n}+EH_{2n}$ -мод, визначається усіма трьома компонентами та на осі має провал при обох видах фокусування. Максимум поля мають центральні лепестки даних мод, які також зміщені від фокальної площини. Максимальна інтенсивність поля $EH_{-11}+EH_{31}$ -моди при помірному фокусуванні знаходиться на відстані $z_{lmax} = 36,98\lambda$, а при гострому $z_{lmax} = 2,06\lambda$. Діаметр пучка в даній області при помірному фокусуванні для моди $EH_{-11}+EH_{31}$ становив $d_{\sigma} = 14,58\lambda$, а при гострому $d_{\sigma} = 2,94\lambda$. У $EH_{-12}+EH_{32}$ -моди максимальна інтенсивність поля при помірному фокусуванні знаходиться на відстані $z_{lmax} = 115,58\lambda$, а при гострому $z_{lmax} = 6,10\lambda$. При цьому діаметр пучка в області максимальної інтенсивності для даної моди склав $d_{\sigma} = 24,21\lambda$ при помірному і $d_{\sigma} = 4,27\lambda$ при гострому фокусуванні. Що стосується моди $EH_{-13}+EH_{33}$, то її максимальна інтенсивність поля при помірному фокусуванні знаходиться на відстані $z_{lmax} = 196,49\lambda$, а при гострому $z_{lmax} = 8,41\lambda$. Діаметр пучка в даній області при помірному фокусуванні для моди $EH_{-13}+EH_{33}$ становив $d_{\sigma} = 33,81\lambda$, а при гострому $d_{\sigma} = 5,24\lambda$.

Теоретичні результати розрахунку діаметрів d_σ в областях положень максимумів інтенсивності z_{lmax} (відносно фокусу) поля комбінованих мод наведено в Табл. 1.

Таблиця 1. Діаметри фокальної плями та положення максимумів інтенсивності комбінованих мод
Table 1. Focal spot diameters and positions of intensity maxima of combined modes

Типи мод	NA = 0,68		NA = 0,16	
	z_{lmax}/λ	d_σ/λ	z_{lmax}/λ	d_σ/λ
$TE_{01}+EH_{21}$	1,48	4,15	11,56	13,65
$TE_{02}+EH_{22}$	3,79	8,36	36,98	26,74
$TE_{03}+EH_{23}$	4,95	14,10	64,72	43,30
$EH_{11}+EH_{31}$	2,06	2,94	36,98	14,58
$EH_{12}+EH_{32}$	6,10	4,27	115,58	24,21
$EH_{13}+EH_{33}$	8,41	5,24	196,49	33,81

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКІВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Структурна схема хвильовідного ТГц лазера з оптичним накачуванням та експериментальної установки для його дослідження докладно описана у [12, 17]. Для збудження робочої молекули НСООН-лазера використовується працюючий у безперервному режимі генерації з розрядом постійного струму СО2-лазер, описаний у [18]. Для дослідження фокусування комбінованих мод в резонаторі ТГц лазера використовувалися вхідне неоднорідне фазоступеневе та вихідне однорідне дзеркало [12]. Спектр збуджуваних мод, отриманий експериментально з використанням даних дзеркал, наведено на Рис 5. Потужність випромінювання ТГц-лазера на модах EH_{11q} , та $TE_{01q}+EH_{21q}$ складала 3,6 мВт, а на модах $EH_{11q}+EH_{31q}$ та EH_{12q} – 2,9 мВт. Для дослідження гострого та помірнього фокусування комбінованих мод лазер налагоджувався на більш потужну лінійно поляризовану моду $TE_{01q}+EH_{21q}$. Для повного перехоплення пучка на відстані $z = 300$ мм було встановлено короткофокусну лінзу з фокусною відстанню 36,36 мм та довгофокусну лінзу з фокусною відстанню 160 мм. Було виміряно поперечні розміри пучків випромінювання даної моди при обох видах фокусування (гострому та помірному).

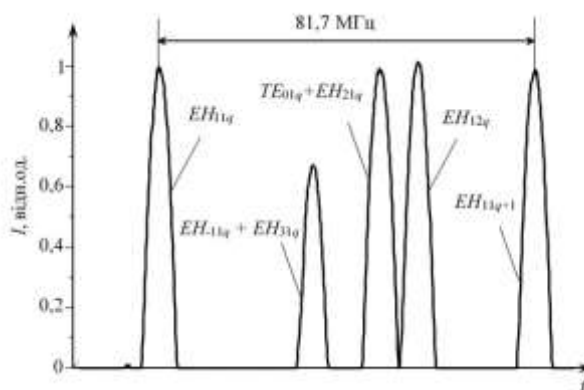


Рис. 5. Перестроувальна характеристика хвильовідного НСООН-лазера
Fig. 5. Tuning characteristic of a waveguide HCOOH laser

Теоретично та експериментально було встановлено, що максимум інтенсивності поля моди $TE_{01q}+EH_{21q}$ при помірному фокусуванні знаходиться на відстані $z_{lmax} = 11,56\lambda$, а при гострому – $z_{lmax} = 1,48\lambda$. Розподіли інтенсивності на отриманих відстанях для сфокусованої комбінованої моди при помірному та гострому фокусуванні в поперечній площині наведено на Рис. 6. З рисунків видно, що поперечний розподіл сумарної інтенсивності поля $TE_{01q}+EH_{21q}$ -моди діелектричного хвильоводу в області мінімального розміру сфокусованих пучків випромінювання зберігає кільцеподібний вигляд, як при помірному, так і при гострому фокусуванні. Експериментальні та розрахункові розподіли сфокусованої $TE_{01q}+EH_{21q}$ -моди збігаються не повністю. Розходження зумовлено використанням піроелектричного приймача з просторовою роздільною здатністю 0,2 мм та аберациєю лінзи.

Діаметр сфокусованої моди $TE_{01q}+EH_{21q}$ при помірному фокусуванні ($NA = 0,16$) в експерименті становив $FWHM = 12,9\lambda$ ($FWHM = 13,6\lambda$ – в розрахунках), а при гострому ($NA = 0,68$) в експерименті $FWHM = 2,2\lambda$ ($FWHM = 2,55\lambda$ – в розрахунках).

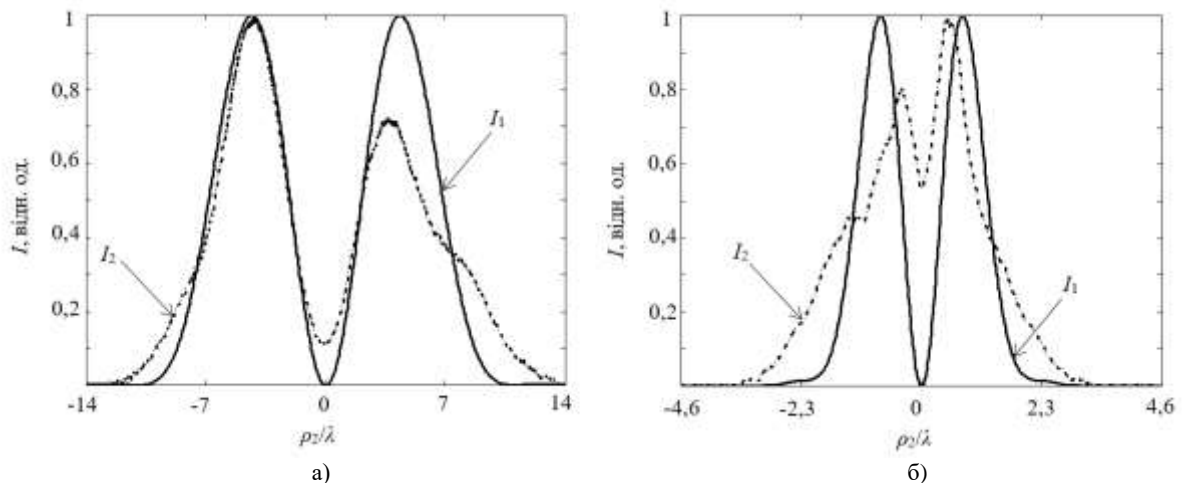


Рис. 6. Розрахункові (I_1) та експериментальні (I_2) розподіли сумарної інтенсивності поля $TE_{01q}+EH_{21q}$ -моди при помірному (а) та гострому (б) фокусуванні в поперечній площині

Fig. 6. Calculated (I_1) and experimental (I_2) distributions of the total field intensity of the $TE_{01q}+EH_{21q}$ -mode for moderate (a) and sharp (b) focusing in the transverse plane

ВИСНОВКИ

1. Теоретично та експериментально встановлено фізичні особливості просторово-енергетичних характеристик при гострому та помірному фокусуванні у вільному просторі лазерних пучків випромінювання з лінійною поляризацією поля, які збуджуються комбінованими модами резонатора лазера на основі круглого діелектричного хвилеводу.

2. Показано, що сумарна інтенсивність поля, як комбінованих $TE_{0n}+EH_{2n}$, так і $EH_{-1n}+EH_{3n}$ -мод, визначається усіма трьома компонентами. Центральні максимуми поля даних мод значно зміщуються від геометричних фокусів досліджуваних лінз зі збільшенням свого порядку n . Найменший діаметр фокальної плями в області максимальної інтенсивності має $EH_{-11}+EH_{31}$ -мода при гострому фокусуванні, найбільший діаметр плями має при помірному фокусуванні $TE_{03}+EH_{23}$ -мода.

3. Теоретично встановлено та експериментально підтверджено, що поперечний розподіл сумарної інтенсивності поля $TE_{01q}+EH_{21q}$ -моди діелектричного хвилевідного резонатора в області мінімального розміру сфокусованих пучків випромінювання зберігає кільцеподібний вигляд, як при помірному, так і при гострому фокусуванні.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. Leitenstorfer A, Moskalenko AS, Kampfrath T, Kono J, Castro-Camus E, Peng K et al. The 2023 terahertz science and technology roadmap. *Journal of Physics D: Applied Physic*. 2023 Apr;56(22): 223001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/acbe4c>
2. Valusis G, Lisauskas A, Yuan H, Knap W, Roskos HG. Roadmap of terahertz imaging 2021. *J Sensors*. 2021 Jun;21(12):4092. <https://doi.org/10.3390/s21124092>
3. Kallioniemi L, Turquet L, Lipsanen H, Kauranen M, Bautista G. Tailoring the longitudinal electric fields of high-order laser beams and their direct verification in three dimensions. *Optics Communications*. 2020 Mar; 459:124894. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124894>
4. Fu J, Yu X, Wang Y, Chen P. Generation of pure longitudinal magnetization needle with tunable longitudinal depth by focusing azimuthally polarized beams. *Applied Physics B*. 2018 Dec;124(1):11. <https://doi.org/10.1007/s00340-017-6886-5>
5. Kozawa Y, Sato S. Sharper focal spot formed by higher-order radially polarized laser beams. *Journal of the Optical Society of America A*. 2007 May;24(6):1793–1798. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.24.001793>
6. Jin X, Zgang H, Xu Y, Zhang X, Zhu H. Representation and focusing properties of higher-order radially polarized Laguerre–Gaussian beams. *Journal of Modern Optics*. 2015 Feb;62(8):626–632. <https://doi.org/10.1080/09500340.2014.999138>

7. Degtyarev AV, Dubinin MM, Gurin OV, Maslov VO, Muntean KI, Ryabykh VM, et al. Control of tightly focused laser beams in the THz range. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2021. June;3(11):2888-2892. <https://doi.org/10.1002/mop.32946>
8. Li G, Wang D, Fang L, Ran Z, Yan Q. Improvement to beam quality of optically pumped terahertz gas lasers with hole-coupling resonators. *Optical Engineering*. 2019 Feb;58(2):026104. <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.2.026104>
9. Gurin OV, Degtyarev AV, Dubinin MM, Maslov VA, Muntean KI, Ryabykh VN, et al. Focusing of modes with an inhomogeneous spatial polarization of the dielectric resonator of a terahertz laser. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2020;79(2):105–116. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v79.i2.30>
10. Winnerl S., Hubrich R., Mittendorff M., Schneider H., Helm M. Universal phase relation between longitudinal and transverse fields observed in focused terahertz beams. *New Journal of Physics*. 2012 Oct;14(49): 2-12. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/14/10/103049>
11. Minami Y., Kurihara T., Yamaguchi K., Nakajima M., Suemoto T. Longitudinal terahertz wave generation from an air plasma filament induced by a femtosecond laser. *Applied Physics Letters*. 2013 Apr; 102(15). 151106. <https://doi.org/10.1063/1.4802482>
12. Degtyarev AV, Dubinin MM, Gurin OV, Maslov VO, Muntean KI, Ryabykh VM, et al. Control over higher-order transverse modes in a waveguide-based quasi-optical resonator. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2022;27(1):129–139. <https://doi.org/10.15407/rpra27.02.129>
13. Henningsen J, Hammerich M, Olafsson A. Mode structure of hollow dielectric waveguide lasers. *Applied Physics*. B. 1990 Oct;51(4):272–284. <https://doi.org/10.1007/BF00325048>
14. Luneburg RK. *Mathematical theory of optics*. California: University of California Press; 1966. 448 p.
15. Goodman JW. *Introduction to Fourier optics*. McGraw-Hill; 1996. 457 p.
16. Greivenkamp JE. *Geometrical optics*. Arizona: University of Arizona; 2003. 128 p.
17. Gurin OV, Degtyarev AV, Dubinin NN, Legenkiy MN, Maslov VA, Muntean KI, et al. Formation of beams with nonuniform polarisation of radiation in a cw waveguide terahertz laser. *Quantum Electronics*. 2021;51(4):338–342. <https://doi.org/10.1070/QEL17511>
18. Degtyarev A., Maslov V., Topkov A. *Continuous-wave terahertz waveguide lasers*. LAP LAMBERT Academic Publishing; 2020. 80 p.

Стаття надійшла до редакції: 2 лютого 2023

Рекомендовано до друку: 10 березня 2023

SHARP AND MODERATE FOCUSING OF THE TERAHERTZ LASER COMBINED MODES

O. V. Gurin, A. V. Degtyarev, M. M. Dubinin, V. A. Maslov,
K. I. Muntean, V. M. Ryabykh, O. O. Svystunov, V.S. Senyuta

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Background: The problem of sharp and moderate focusing of combined modes of a dielectric waveguide laser is considered. The results of research on different types of focusing of laser beams have a wide range of potential applications, from imaging and spectroscopy to communication, sensing, biomedicine and solving problems related to the interaction of electromagnetic waves with matter: diagnostics of thin films, surfaces of materials, of various biological objects and achieving subwavelength resolution of THz tomography.

The aim of the work is to establish the physical behavior of sharp and moderate focusing of laser radiation beams described by combined linearly polarized modes of a circular hollow dielectric waveguide.

Materials and methods: The vector theory of Rayleigh-Sommerfeld was used to study the focusing of laser beams excited by the modes of a quasi-optical waveguide resonator. Well-known methods of measuring the spatial-energy characteristics of laser beams in the THz range for experimentally study of these phenomena were used.

Results: The physical features of the spatial-energy characteristics of laser radiation beams with linear field polarization at sharp and moderate focusing in free space have been established theoretically and experimentally.

Conclusion: It is shown that the total field intensity of both combined $TE_{0n}+EH_{2n}$ and $EH_{-1n}+EH_{3n}$ -мод ($n = 1, 2, 3$) is defined by all three components and has a dip on the axis for both types of focusing. The central maxima of the field of these modes are significantly shifted from the geometric foci of the investigated lenses as the order n of these modes increases. The $EH_{-11}+EH_{31}$ -mode has the smallest diameter of the focal spot in the region of maximum intensity with sharp focusing, the $TE_{03}+EH_{23}$ -mode has the largest diameter of the focal spot with moderate focusing.

KEYWORDS: *terahertz laser, dielectric resonator, combined modes, polarization, sharp focusing, moderate focusing*

The article was received by the editors: 2 February 2023

The article is recommended for printing: 10 March 2023