

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra30.03.202>
УДК 535-1, 535-4

М.І. Дзюбенко, Ю.Ю. Каменів, В.П. Радіонов

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
вул. Акад. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна
E-mail: mid41@ukr.net

ДВОЧАСТОТНИЙ ЛАЗЕР ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

Предмет і мета досліджень. Освоєння терагерцового (ТГц) діапазону частот потребує розвитку джерел випромінювання, зокрема вдосконалення ТГц (субміліметрових) лазерів. Для гетеродинних ТГц-приладів потрібні лазери, здатні генерувати випромінювання двох частот. Метою роботи є дослідження процесу генерації випромінювання в ТГц-лазерах та створення джерел, здатних одночасно генерувати випромінювання двох частот з можливістю їх окремого виведення.

Методи та методологія. Досліджено тридзеркальний лазер, резонатор якого утворено металевим дзеркалом по один бік активного елемента та двома вихідними дзеркалами по інший бік. Вихідні дзеркала виконані у вигляді металевих ґраток з взаємно перпендикулярною орієнтацією провідників. Кожна з ґраток, разом з металевим дзеркалом, утворює резонатор для лінійно поляризованого випромінювання, напрямком вектора електричної напруженості якого паралельний до напрямку провідників. Фактично в одному активному об'ємі лазера розташовані два окремих резонатори, що генерують ортогонально поляризовані пучки випромінювання. Різниця частот регулюється в межах смуги випромінювання активної речовини шляхом зміни відстані між решітками. Контроль частот здійснюється за допомогою вдосконаленого авторами мікрометричного механізму переміщення дзеркала, який виконує функції хвилеміра. Різниця частот вимірюється за допомогою частотовимірвальних приладів радіочастотного діапазону.

Результати. Досліджено двочастотний газорозрядний лазер, що працює на лінії випромінювання 337 мкм. Досліджено модовий склад лазерної генерації. Показано, що досліджуваний лазер може одночасно генерувати ортогонально поляризоване випромінювання двох частот. Отримано одночасну генерацію ортогонально поляризованих пучків лазерного випромінювання з різницею частот від 60 кГц до 4.5 МГц. Розроблено методику вимірювання та регулювання різниці частот без застосування електронної частотовимірвальної апаратури. У випадку використання мод з однаковим поперечним енергетичним розподілом замість двочастотної генерації відбувається миттєва зміна частоти і поляризації випромінювання при певній оптичній довжині резонатора. Це дає можливість здійснювати частотну та поляризаційну модуляцію лазерного випромінювання. Показано можливість імпульсно-частотної та імпульсно-поляризаційної модуляції лазерного ТГц-випромінювання.

Висновки. Використання двочастотних ТГц-лазерів прискорить розвиток різноманітних гетеродинних систем в ТГц-діапазоні. Розроблені методи поляризаційної та частотної модуляції сприятимуть розвитку телекомунікаційних систем ТГц-діапазону.

Ключові слова: терагерцовий діапазон, полоса випромінювання, двочастотний лазер, поляризаційна модуляція.

Вступ

Терагерцовий (ТГц) діапазон електромагнітних хвиль активно досліджується і застосовується. У цьому діапазоні поєднуються фізичні принципи

та технічні засоби, що використовуються у радіо- й оптичному діапазонах, принципи геометричної оптики поєднуються з хвилевими та фотонними властивостями [1–3]. Використовуються поляризаційні, фазові та частотні параметри ТГц-ви-

Ц и т у в а н н я: Дзюбенко М.І., Каменів Ю.Ю., Радіонов В.П. Двочастотний лазер терагерцового діапазону. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2025. Т. 30. № 3. С. 202–210. <https://doi.org/10.15407/rpra30.03.202>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025

 Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

промінювання [4–7]. Комплексне застосування властивостей ТГц-випромінювання дозволяє використовувати його в багатьох галузях — від засобів зв'язку до систем контролю та зондування різноманітних об'єктів [8–10]. Поєднання лазерних систем з гетеродинними методами обробки сигналу знайшло застосування, зокрема, в інтерферометрах для діагностики плазми на установках керованого термоядерного синтезу [11]. Для роботи інтерферометра необхідно забезпечити стабільну різницю між частотами сигнального і гетеродинного каналів мінімум у кілька десятків кілогерців. З цією метою в інтерферометрах застосовувались механічні зміщувачі частоти з використанням ефекту Доплера. Випромінювання одного ТГц-лазера розділяється у два канали. Зсув частоти здійснюється механічним зміщувачем в одному з каналів, зокрема, шляхом відбиття випромінювання від поверхні обертового диска зі східчастою насічкою. Це дозволяє отримати достатньо стабільний зсув частоти, але створює вібрації, що вносять завади. Східчаста поверхня обертового диска спричинює паразитну амплітудну модуляцію. Крім того, механічні зміщувачі не дозволяють забезпечити достатньо високі значення різницевої частоти через обмежену швидкість обертання диска.

Для одержання різницевої частоти можуть використовуватися пучки випромінювання від двох ТГц-лазерів, що працюють на різних частотах. Терагерцові лазери можуть перестроюватись у межах смуги посилення активної речовини. Зокрема, у газорозрядних HCN-лазерах смуга посилення активної речовини складає близько 14 МГц [12], що цілком задовольняє потреби гетеродинних систем. Однак складно отримати стабільну різницю частот від двох окремих лазерів, адже нестабільність газового розряду та нестабільність температури конструктивних елементів по-різному і несинхронно впливають на частоту випромінювання кожного з двох лазерів.

Суттєво підвищити стабільність різниці частот дозволяє багаточастотний лазер з паралельними резонаторами, що мають окремі рухомі дзеркала, спільне вихідне дзеркало та окремі вихідні лазерні пучки [13]. Зручно, що в паралельних резонаторах з одним спільним дзеркалом можна встановлювати потрібну різницю частот, користуючись механізмами переміщення

дзеркал без застосування додаткових частотомірних приладів. Проте такий лазер має доволі складну конструкцію. Крім того, випромінювання різних частот поширюється в активній речовині різними шляхами, що не дозволяє цілком уникнути негативного впливу поперечних неоднорідностей активної речовини лазера.

Суттєво підвищити стабільність різниці частот вдається, якщо пучки випромінювання різної частоти посилюються в спільному об'ємі активної речовини і розповсюджуються в ній однаковими шляхами [14, 15]. Однак за таких умов може виникати конкуренція мод, що ускладнює та обмежує двочастотний режим генерації. Водночас така конкуренція надає змогу здійснювати поляризаційну та частотну модуляцію лазерного випромінювання.

Перспективним напрямком отримання джерел випромінювання для гетеродинних лазерних систем є розробка двочастотних ТГц-лазерів, які здатні одночасно генерувати лазерне випромінювання двох частот у спільному пучку з розділенням їх в різні канали. Це дозволить отримати достатньо суттєву і стабільну різницю частот, оскільки будь-які нестабільності активної речовини та елементів конструкції однаково впливатимуть на генерацію випромінювання обох частот. Схема двочастотного лазера з одним спільним рухомим дзеркалом надає можливість встановлювати різницю частот і визначати частоти в кожному каналі без застосування додаткових частотомірних приладів. Метою роботи є дослідження процесу генерації випромінювання в ТГц-лазерах та створення джерел, здатних одночасно генерувати випромінювання двох частот з можливістю їх окремого виведення та регулювання значення і різниці частот.

1. Методи і прилади досліджень

Дослідження двочастотної генерації проведено з використанням газорозрядного HCN-лазера. Використовувалась лінія випромінювання з довжиною хвилі 337 мкм і частотою 890 ГГц. Лазер мав тридзеркальний резонатор (рис. 1), особливістю якого є наявність двох резонаторів у спільному об'ємі активного середовища. Газовий розряд генерується в розрядній трубці 1 діаметром 40 мм і довжиною 1200 мм за допомогою джере-

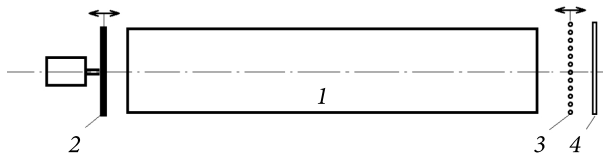


Рис. 1. Двочастотний тридзеркальний ТГц-лазер: 1 — розрядна трубка з активною речовиною; 2 — рухоме дзеркало; 3, 4 — частково прозорі дзеркала у вигляді ортогонально розташованих металевих ґраток

ла струму та електродів (на рис. 1 не показані). Розрядна трубка водночас є хвилеводом резонатора. Активна речовина синтезується безпосередньо в газовому розряді. Для цього через дозувальну систему подаються метан та азот. Тиск у розрядній трубці дорівнює близько 1 мм рт. ст. З одного боку розрядної трубки розташоване рухоме дзеркало 2, споряджене механізмом переміщення вздовж резонатора. З іншого боку розташовані два частково прозорих дзеркала 3, 4, які виконані у вигляді ґраток з паралельних металевих дротинок з діаметром перерізу ≈ 10 мкм і періодом ≈ 50 мкм. Ґратки споряджені механізмом для зміни відстані між ними та розташовані так, що їхні дротинки взаємно перпендикулярні. Завдяки такому розташуванню в лазері фактично утворено два резонатори зі спільною активною речовиною та спільним рухомих дзеркалом 2. Ґратки є вихідними дзеркалами для кожного з резонаторів. Оскільки металеві провідники кожної з ґраток розташовані перпендикулярно, то і лазерне випромінювання в кожному з двох резонаторів має ортогональну одна до одної лінійну поляризацію. Кожна з ґраток створює резонатор для лінійно поляризованого лазерного випромінювання, вектор напруженості електричного поля якого орієнтований паралельно до провідників ґратки. Більша частина випромінювання відбивається всередину резонатора, а решта випромінювання виходить назовні. Для ортогонально поляризованого випромінювання така ґратка майже прозора і не створює суттєвих перешкод. Хоча, якщо ґратка розташована всередині іншого резонатора, її негативний вплив відчутний. Тобто ґратка 3 більш негативно впливає на резонатор, утворений ґраткою 4, ніж навпаки. Для отримання двочастотної генерації потрібно, щоб відстань між ґратками 3, 4 на кілька мікрометрів відрізнялась від цілого числа півхвиль.

Однак ця різниця не повинна перевищувати відстань переміщення рухомого дзеркала ΔL , в межах якої спостерігається генерація (для дослідженого лазера ΔL складає ≈ 14 мкм). Для двочастотного лазера було розроблено спеціальний юстувальний пристрій, на якому встановлено дві решітки з можливістю регулювання відстані між ними.

Особливістю ТГц-лазерів є те, що відстань за шкалою частот між власними частотами резонатора зазвичай набагато більша за ширину смуги випромінювання активної речовини, що визначає роботу в одночастотному режимі. У цьому випадку генерація можлива лише при певних дискретних довжинах резонатора, тому для роботи потрібно проводити налаштування резонансної довжини шляхом зміни відстані між дзеркалами. Для цього непрозоре дзеркало споряджено пристроєм для осьового переміщення у вигляді мікрометричного гвинта зі шкалою в мікрометрах. Це дозволяє використовувати резонатор як хвилемір для ідентифікації ліній випромінювання. Точності відліку в один мікрометр цілком достатньо, щоб за відстанню між півхвилями відрізнити, наприклад, лінію випромінювання 337 мкм від лінії 311 мкм. За допомогою такого мікрометричного механізму можна виконувати більш складні завдання: вимірювати смугу випромінювання активної речовини та налаштовувати лазер на потрібну частоту з цієї смуги, оскільки невелика зміна довжини хвилі випромінювання ($\approx 10^{-3}$ мкм) помножується на кількість хвиль, що укладається між дзеркалами резонатора (≈ 3500) і призводить до зміни резонансної довжини приблизно на 3.5 мкм. Таку зміну нескладно контролювати.

При налаштуванні лазера на резонансну довжину максимум генерації припадає на центральну частоту лінії випромінювання, коли відстань між дзеркалами дорівнює $M\lambda_0/2$, де λ_0 — центральна довжина хвилі активної речовини. Генерація спостерігається в межах переміщення рухомого дзеркала:

$$\Delta L = M \frac{\lambda_{\max}}{2} - M \frac{\lambda_{\min}}{2} = M \frac{\Delta \lambda}{2}, \quad (1)$$

де M — ціле число півхвиль; λ_{\min} , λ_{\max} — мінімальна та максимальна довжина хвилі, за яких

відбувається генерація на даній лінії випромінювання; $\Delta\lambda$ — діапазон довжин хвиль, у якому спостерігається генерація.

Оскільки число M півхвиль, що розміщуються між дзеркалами, дорівнює $2L/\lambda_0$ (де L — довжина резонатора), то діапазон перестроювання за довжиною хвилі дорівнює

$$\Delta\lambda = \frac{2\Delta L}{M} = \frac{\Delta L\lambda_0}{L}. \quad (2)$$

Для переходу в область частотного вимірювання можна використати рівність відносної зміни частоти та довжини хвилі:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cong \frac{\Delta f}{f_0}.$$

Формула (2) в такому випадку набуває вигляду

$$\Delta f \cong \frac{\Delta L \cdot f_0}{L}. \quad (3)$$

За формулами (2) і (3) можна визначити діапазон перестроювання лазера в межах лінії випромінювання. Така методика дозволяє вимірювати смугу перестроювання навіть по межі зриву генерації, чого складно досягти за допомогою частотомірювальної апаратури, оскільки для вимірювання потрібен певний мінімальний рівень потужності. Також можна налаштовувати лазер на потрібну частоту з цього діапазону. Таке налаштування здійснюють у два етапи. Спочатку виконують налаштування на центральну частоту лінії випромінювання, що відповідає яскраво вираженому максимуму потужності випромінювання. Зазвичай центральні частоти ліній випромінювання вже відомі і виміряні з високою точністю — ці значення беруться за основу. Другим етапом є переміщення рухомого дзеркала у бік укорочення або подовження резонатора від максимуму потужності випромінювання на величину, відповідну заданому зміщенню частоти випромінювання щодо центральної частоти. Зсуву дзеркала $L_{зсув}$ (відносно максимуму потужності) відповідатиме зміна довжини хвилі та частоти відносно центру лінії на величину

$$\lambda_{зсув} = (L_{зсув} \cdot \lambda_0) / L, \quad f_{зсув} = (L_{зсув} \cdot f_0) / L. \quad (4)$$

Так, для HCN-лазера з довжиною хвилі випромінювання 337 мкм ($f_0 = 0.89$ ТГц) та дов-

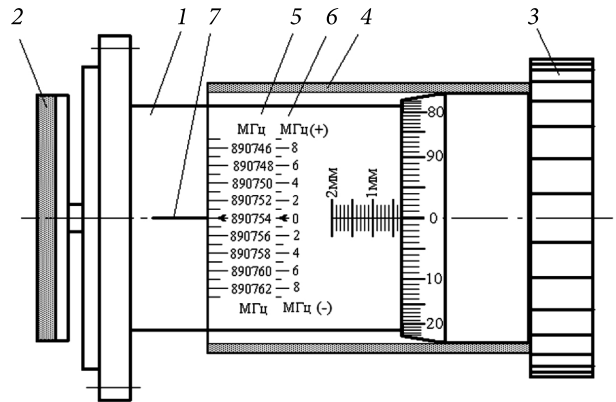


Рис. 2. Схема мікрометричного механізму переміщення дзеркала зі шкалами частотного налаштування та різниці частот: 1 — корпус механізму переміщення дзеркала; 2 — дзеркало резонатора; 3 — рукоятка обертання з мікрометричною шкалою; 4 — прозора насадка зі шкалою частотного налаштування 5 та шкалою відстройки від центральної частоти 6; 7 — нерухомий курсор

жиною резонатора 1.2 м переміщення дзеркала на 1 мкм відповідатиме зміні довжини хвилі на $2.8 \cdot 10^{-4}$ мкм та зміні частоти на 0.74 МГц.

Для зручності користування механізм переміщення дзеркала було вдосконалено (рис. 2) і споряджено шкалами частотного налаштування та різниці частот 5, 6, що відградуєвані в мегагерцах і нанесені на прозору циліндричну насадку 4, яка може обертатись відносно рукоятки 3.

Методика налаштування на задану частоту наступна. Поворотом гвинта 3 досягають максимуму потужності, що відповідає налаштуванню на центральну частоту. Після цього, повертаючи насадку 4, встановлюють значення центральної частоти 890754 МГц навпроти курсора 7. Тепер при повороті рукоятки 3 разом з насадкою 4 на шкалі 5 навпроти курсора 7 відображається значення частоти випромінювання в межах смуги генерації. Для вимірювання різниці частот при двочастотній генерації використовується шкала 6. Спочатку налаштовують на максимум генерації один з резонаторів і встановлюють значення «0» навпроти курсора 7. Після цього, при налаштуванні на максимум генерації з ортогональною поляризацією, навпроти курсора 7 на шкалі 6 буде значення різниці частот. Налаштувавши один з резонаторів на конкретне значення частоти, частоту другого резонатора з ортогональною поляризацією можна визначити,

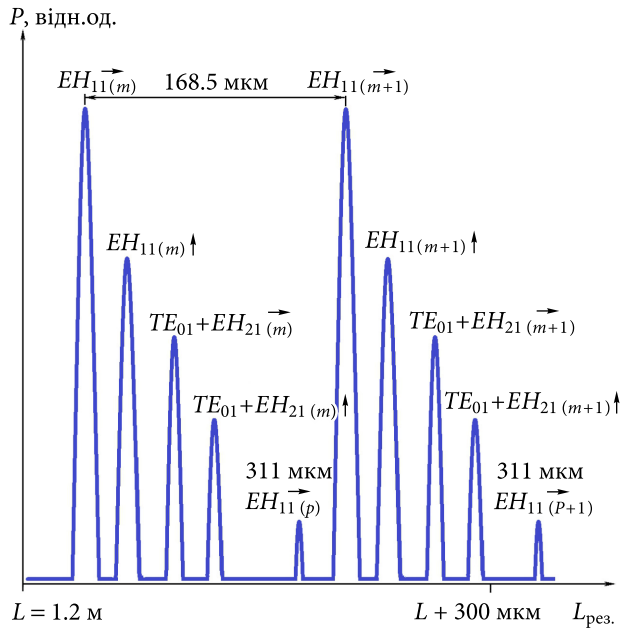


Рис. 3. Залежність потужності лазерного випромінювання від зміни довжини резонатора тридзеркального HCN-лазера

додавши різницю частот зі знаком «+» або «-». Тобто можна визначити різницю частот і частоту кожного з резонаторів.

Для візуальної ідентифікації мод механізм переміщення дзеркала було споряджено електро-механічним приладом плавного обертання. Контроль лазерного випромінювання здійснювався за допомогою піроелектричного приймача. Також для контролю були застосовані додаткові частотомірювальні прилади.

Випромінювання з ортогональними поляризаціями спрямовувалось в окремі канали за допомогою металевої ґратки з напрямком провідників, паралельним провідникам однієї з ґраток лазера, яка розміщувалась під кутом 45° до напрямку розповсюдження випромінювання. Така ґратка відбиває під кутом 90° лінійно поляризоване випромінювання та вільно пропускає ортогонально поляризоване випромінювання.

2. Результати експерименту та їх аналіз

На рис.3 наведено експериментальну залежність потужності лазерного випромінювання від зміни довжини резонатора тридзеркального HCN-лазера. Спостерігається набір поперечних мод, характерний для хвилевідного резонатора

[11]. Вертикальними стрілками позначено вертикально поляризоване випромінювання, горизонтальними стрілками — горизонтально поляризоване. Видно, що генеруються найбільш потужні поперечні моди EH_{11} та менш потужні моди $(TE_{01} + EH_{21})$ обох поляризацій випромінювання з довжиною хвилі 337 мкм. Крім того, генерується мода EH_{11} горизонтально поляризованого випромінювання з довжиною хвилі 311 мкм. Фактично працюють два окремих резонатори. Перший — утворений дзеркалом 2 і ґраткою 3 з горизонтальними провідниками (рис. 1). Цей резонатор генерує горизонтально поляризоване випромінювання. Другий резонатор, що утворений дзеркалом 2 і ґраткою 4 з вертикальними провідниками, генерує вертикально поляризоване випромінювання. Вертикально поляризоване випромінювання менш потужне через втрати, які в цей резонатор вносить ґратка 3. Кількість та потужність різних мод можуть відрізнятися, якщо застосовувати ґратки різної густоти, але загальна тенденція співвідношень їх потужностей зберігається. Ситуація повторюється при переміщенні рухомого дзеркала на половину довжини хвилі. Взаємне розташування всіх мод з довжиною хвилі 337 мкм практично не змінюється на всій ділянці переміщення дзеркала (1 см). Суттєво змінюється лише розташування сплеску потужності випромінювання з довжиною хвилі 311 мкм. При цьому цей сплеск може перетнутися з будь-яким іншим, що має довжину хвилі 337 мкм.

Якщо змінювати відстань між ґратками 3 і 4 (рис. 1), то весь набір горизонтально поляризованих мод (рис. 3) буде пересуватись відносно набору вертикально поляризованих мод. Тобто можна досягти положення, коли якісь моди з ортогональними поляризаціями цілком або частково «зіллються». Це дає можливість отримати одночасну їх генерацію з певною різницею частот.

Для практичного застосування у першу чергу інтерес становить найбільш потужна мода EH_{11} . Проте в експериментальних дослідженнях не вдалося досягти двочастотного режиму генерації на ортогонально поляризованих модах EH_{11} . На рис. 4 наведено експериментально отриману картину часткового «злиття» двох ортогонально поляризованих мод EH_{11} . Одночасна генерація цих мод не відбувається. При плавно-

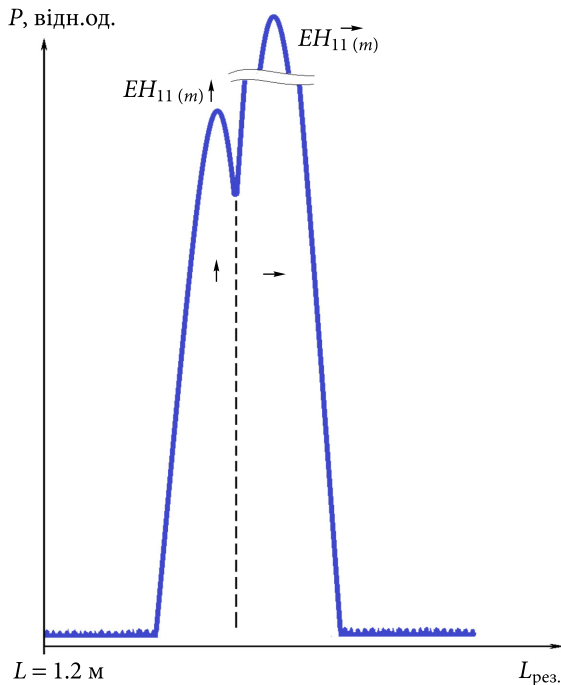


Рис. 4. Часткове «злиття» двох ортогонально поляризованих мод EH_{11} в лазерному випромінюванні тридзеркального HCN-лазера

му переміщенні рухомого дзеркала резонатора в точці «западини» між «сплесками» потужності випромінювання (рис. 4) відбувається миттєва зміна поляризації та частоти лазерного випромінювання. Проміжна частота приладами контролю при цьому не реєструється. Якщо змістити ці моди так, що їх максимуми співпадуть, то генерація на слабшій моді взагалі не виникає. Це відбувається вочевидь унаслідок конкуренції двох мод у резонаторі, адже ці моди взаємодіють з активною речовиною в одній і тій же області.

Миттєву зміну поляризації випромінювання можна використати з практичною метою, зокрема, для поляризаційної та частотної модуляції випромінювання. Експериментально здійснювалася модуляція випромінювання із застосуванням п'єзокерамічної пластини, що встановлювалася під рухомих дзеркалом 2 резонатора (см. рис. 1). Дзеркало налаштовувалось у положення, близьке до зміни поляризації. Підключена до електроживлення п'єзокерамічна пластинка переміщувала дзеркало на 0.5 мкм. Цього переміщення виявилось достатньо для зміни поляризації і в один, і в інший бік.

Окрім механічного переміщення дзеркала, зміну поляризації вдається здійснювати шляхом змі-

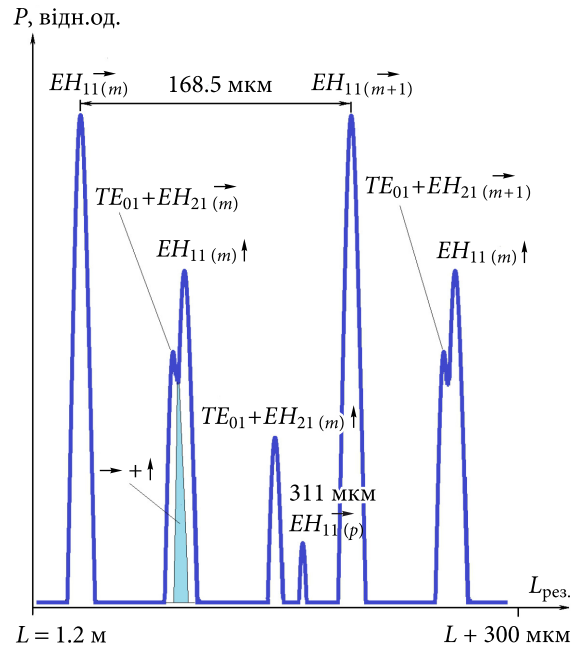


Рис. 5. Часткове «злиття» двох ортогонально поляризованих мод EH_{11} та $(TE_{01}+EH_{21})$ в лазерному випромінюванні тридзеркального HCN-лазера. Сірим кольором позначено зону одночасної генерації ортогонально поляризованих випромінювань

ни інтенсивності газового розряду в активній речовині, оскільки при цьому змінюється оптична довжина резонатора. Особливістю такої модуляції є те, що, незалежно від конфігурації фронту командного сигналу, поляризація лазерного випромінювання майже миттєво змінюється на 90° . Також миттєво, без проміжних значень, змінюється частота лазерного випромінювання. Отже, можна отримати імпульсну модуляцію з імпульсами, максимально наближеними до прямокутної форми. Різниця частот, що виникає за такої модуляції, знаходиться в діапазоні ширини смуги випромінювання активної речовини.

Двочастотного режиму вдається досягти за одночасної генерації ортогонально поляризованих мод EH_{11} та $(TE_{01}+EH_{21})$, оскільки енергетичний розподіл цих мод по перерізу резонатора не співпадає. Випромінювання на моді EH_{11} має максимальну енергію в осевій зоні резонатора, а випромінювання на моді $(TE_{01}+EH_{21})$ в осевій зоні має мінімум енергії. Такий випадок двочастотної генерації ілюструє рис. 5, де показано часткове «злиття» моди EH_{11} з вертикальною поляризацією та моди $(TE_{01}+EH_{21})$ з горизонтальною поляризацією. Завдяки тому, що випромінюван-

ня з горизонтальною поляризацією слабше, потужність цих двох мод відрізняється несуттєво. У наведеному випадку спостерігалась одночасна генерація двох цих мод на ділянці збігу контурів потужності (сіра зона на рис. 5). Різниця частот складала 2 МГц і не змінювалась при переміщенні рухомого дзеркала в межах ділянки, на якій відбувалась двочастотна генерація; змінювалась лише взаємна потужність ортогонально поляризованих випромінювань. У точці «западини» потужності ортогонально поляризованих випромінювань однакові. Зміна різниці частот досягається зміною відстані між ґратками 3 і 4 (см. рис. 1). При цьому змінюється відстань між максимумами «сплесків» потужності мод, що одночасно генеруються. Експериментально проводилося перестроювання різниці частот від 60 кГц до 4.5 МГц.

Також була отримана одночасна генерація на ортогонально поляризованих модах ($TE_{01}+EH_{21}$). Ці моди мають енергетичний розподіл з перетином у вигляді «вісімки». У таких ортогонально поляризованих модах «вісімки» не перетинаються, і їх конкуренція в активному середовищі мінімальна. За одночасної генерації таких мод була отримана різниця частот від 60 кГц до 3.5 МГц.

У дослідженому лазері спостерігався також збіг резонансної довжини моди EH_{11} випромінювання 311 мкм з модами EH_{11} та ($TE_{01}+EH_{21}$) випромінювання 337 мкм; при цьому спостерігались ознаки конкуренції і одночасної генерації.

Однак одночасна генерація не досліджувалась, оскільки різниця частот складала 69 ГГц, що виходить за межі спроможності застосованої частотомірювальної апаратури.

Висновки

Досліджено лазер з тридзеркальним резонатором, який дозволяє отримувати двочастотну генерацію з різницею частот у межах смуги посилення активної речовини (від 60 кГц до 4.5 МГц для HCN-лазерів). Здійснювалося транслявання випромінювання різних частот по окремих каналах. Запропоновано і випробувано методику налаштування двочастотного лазера на задану різницю частот з визначенням частоти в кожному каналі з використанням вдосконаленого мікрометричного механізму переміщення дзеркала резонатора. У тридзеркальному лазері отримано керовану частотну та поляризаційну модуляцію.

Отримані експериментальні результати двочастотної генерації та частотної і поляризаційної модуляції випромінювання дають можливість використовувати ТГц-лазери в різноманітних гетеродинних приладах та телекомунікаційних системах. Досліджені фізичні принципи можуть використовуватись також у лазерах інших діапазонів при подібних співвідношеннях довжини резонатора, довжини хвилі випромінювання та смуги посилення активної речовини, коли виконуються умови одномодової генерації.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Headland D., Monnai Y., Abbott D., Christophe F., Withawat W. Tutorial: Terahertz beamforming, from concepts to realizations. *APL Photonics*. 2018. Vol. 3, Iss. 5. 051101. DOI: 10.1063/1.5011063
2. Forbes A. Advances in orbital angular momentum lasers. *J. Light. Technol.* 2023. Vol. 41, Iss. 7. P. 2079–2086. DOI: 10.1109/JLT.2022.3220509
3. Дегтярьов А.В., Дубінін М.М., Маслов В.О., Мунтян К.І., Свистунов О.О. Поширення терагерцових вихрових лазерних пучків у вільному просторі. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2024. Т. 29, № 2. С. 127–136. DOI: 10.15407/rpra29.02.127
4. Zhang R., Cui Y., Sun W., Zhang Y. Polarization information for terahertz imaging. *Appl. Opt.* 2008. Vol. 47, Iss. 34. P. 6422–6427. DOI: 10.1364/AO.47.006422
5. Kosiak O.S., Bezborodov V.I., Nesterov P.K. Wideband quasi-optical polarization phase shifter operating in the THz frequency range. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2017. Vol. 76, Iss. 3. P. 227–236. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i3.3
6. Bezborodov V.I., Kiseliov V.K., Nesterov P.K., Yanovsky M.S. A Terahertz Phase Frequency Changer with the Crystal Quartz Phase Sections. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*. 2006. Vol. 27, Iss. 5. P. 725–734. DOI: 10.1007/s10762-006-9110-y
7. Polupanov V.N., Nesterov P.K., Yanovsky M.S., Bezborodov V.I. Energy of Processes of Electromagnetic Radiation Parameters Transformation by Quasi-Optic Phase Shifters and Frequency Shifters. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2008. Vol. 67, Iss. 11. P. 945–952. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v67.i11.10
8. Nagatsuma T., Ducournau G., Renaud C.C. Advances in terahertz communications accelerated by photonics. *Nat. Photonics*. 2016. Vol. 10, Iss. 6. P. 371–379. DOI: 10.1038/nphoton.2016.65

9. Wang S.S., and Zhang X.C. Pulsed terahertz tomography. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2004. Vol. 37, Iss. 4. R1. DOI: 10.1088/0022-3727/37/4/R01
10. Shen S., Hao C., Liang B., Liu J. Terahertz fan-beam computed tomography. *Opt. Lett.* 2024. Vol. 49, Iss. 9. P. 2481–2484. DOI: 10.1364/OL.523116
11. Nesterov P.K. Quasi-Optical Interferometers with Enhanced Phase Sensitivity. *Telecommunications and Radio Engineering.* 2003. Vol. 60, Iss. 3–4. P. 137–145.
12. Dzyubenko M.I., Kamenev Yu.Ye., Radionov V.P. Terahertz range gas-discharge lasers Part 1: Particularities of lasant excitation. *Telecommunications and Radio Engineering.* 2017. Vol. 76, Iss. 18. P. 1623–1638. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i18.40
13. Радіонов В.П., Нестеров П.К., Кісельов В.К. Способи отримання багаточастотної генерації в резонаторі лазера терагерцового діапазону. *Радіофізика та електроніка.* 2015. Т. 6(20), № 2. С. 78–82. DOI: 10.15407/rej2015.02.078
14. Hutchinson I.H. Polarization modulation of a submillimetre laser. *Optics Commun.* 1981. Vol. 38, Iss. 3. P. 201–206. DOI: 10.1016/0030-4018(81)90324-2
15. Rochefort P.A., Brannen E., Kucеровsky Z. Multiple line and polarization control in a far infrared laser with a compound grating resonator. *Appl. Opt.* 1991. Vol. 30, Iss. 9. P. 1019–1024. DOI: 10.1364/AO.30.001019
16. Marcatili E.A.J., and Schmeltzer R.A. Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers. *Bell Syst. Tech. J.* 1964. Vol. 43, Iss. 4. P. 1783–1809. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1964.tb04108.x

Стаття надійшла 29.04.2025

REFERENCES

1. Headland, D., Monnai, Y., Abbott, D., Christophe, F., Withawat, W., 2018. Tutorial: Terahertz beamforming, from concepts to realizations. *APL. Photonics*, **3**(5), 051101. DOI: 10.1063/1.5011063
2. Forbes, A., 2023. Advances in orbital angular momentum lasers. *J. Light. Technol.*, **41**(7), pp. 2079–2086. DOI: 10.1109/JLT.2022.3220509
3. Degtyarev, A.V., Dubinin, M.M., Maslov, V.A., Muntean, K.I., Svistunov, O.O., 2024. Free-space propagation of terahertz laser vortex beams. *Radio Phys. Radio Astron.*, **29**(2), pp. 127–136 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra29.02.127
4. Zhang, R., Cui, Y., Sun, W., Zhang, Y., 2008. Polarization information for terahertz imaging. *Appl. Opt.*, **47**(34), pp. 6422–6427. DOI: 10.1364/AO.47.006422
5. Kosiak, O.S., Bezborodov, V.I., Nesterov, P.K., 2017. Wideband quasi-optical polarization phase shifter operating in the THz frequency range. *Telecommunications and Radio Engineering*, **76**(3), pp. 227–236. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i3.3
6. Bezborodov, V.I., Kiseliyov, V.K., Nesterov, P.K., Yanovsky, M.S., 2006. A Terahertz Phase Frequency Changer with the Crystal Quartz Phase Sections. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, **27**(5), pp. 725–734. DOI: 10.1007/s10762-006-9110-y
7. Polupanov, V.N., Nesterov, P.K., Yanovsky, M.S., Bezborodov, V.I., 2008. Energy of Processes of Electromagnetic Radiation Parameters Transformation by Quasi-Optic Phase Shifters and Frequency Shifters. *Telecommunications and Radio Engineering*, **67**(11), pp. 945–952. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v67.i11.10
8. Nagatsuma, T., Ducournau, G., Renaud, C.C., 2016. Advances in terahertz communications accelerated by photonics. *Nat. Photonics*, **10**(6), pp. 371–379. DOI: 10.1038/nphoton.2016.65
9. Wang, S.S., and Zhang, X.C., 2004. Pulsed terahertz tomography. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **37**(4), R1. DOI: 10.1088/0022-3727/37/4/R01
10. Shen, S., Hao, C., Liang, B., Liu, J., 2024. Terahertz fan-beam computed tomography. *Opt. Lett.*, **49**(9), pp. 2481–2484. DOI: 10.1364/OL.523116
11. Nesterov, P.K., 2003. Quasi-Optical Interferometers with Enhanced Phase Sensitivity. *Telecommunications and Radio Engineering*, **60**(3–4), pp. 137–145.
12. Dzyubenko, M.I., Kamenev, Yu.Ye., Radionov, V.P., 2017. Terahertz range gas-discharge lasers Part 1: Particularities of lasant excitation. *Telecommunications and Radio Engineering*, **76**(18), pp. 1623–1638. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v76.i18.40
13. Radionov, V.P., Nesterov, P.K., Kiseliyov, V.K., 2015. Methods of producing multifrequency generation in the laser terahertz range. *Radiophys. Electron.*, **6**(20)(2), pp. 78–82. DOI: 10.15407/rej2015.02.078
14. Hutchinson, I.H., 1981. Polarization modulation of a submillimetre laser. *Opt. Commun.*, **38**(3), pp. 201–206. DOI: 10.1016/0030-4018(81)90324-2
15. Rochefort, P.A., Brannen, E., Kucеровsky, Z., 1991. Multiple line and polarization control in a far infrared laser with a compound grating resonator. *Appl. Opt.*, **30**(9), pp. 1019–1024. DOI: 10.1364/AO.30.001019
16. Marcatili, E.A.J., and Schmeltzer, R.A., 1964. Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers. *Bell Syst. Tech. J.*, **43**(4), pp. 1783–1809. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1964.tb04108.x

Received 29.04.2025

M.I. Dzyubenko, Yu.E. Kamenev, V.P. Radionov

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NAS of Ukraine

12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

DUAL-FREQUENCY TERAHERTZ LASER

Subject and Purpose. The development of the terahertz (THz) frequency range reflects recent progress in radiation sources, in particular, THz (submillimeter) lasers. Heterodyne THz devices require dual-frequency lasers capable of emitting two different THz frequencies simultaneously. This work aims to study the process of radiation generation in THz lasers, spurred by a search for dual-frequency laser sources that can produce two frequencies simultaneously and provide options for separate outputs.

Methods and Methodology. The dual-frequency generation is investigated using a three-mirror laser with a resonator formed by a metal mirror on one side of the active element and two output mirrors on the other. The output mirrors are metal gratings arranged so that the conducting bars of one grating are perpendicular to those of the other. Together with the metal mirror, each grating forms a resonator for linearly polarized radiation with the electric field vector directed parallel to the grating conductors. So, the active volume of the laser contains two separate resonators that generate orthogonally polarized radiation beams. Their frequency difference is adjusted within the emission band of the active substance by changing the distance between the gratings. The frequency control employs a custom micrometric mechanism enhanced by the authors. It fine-tunes the mirror position and acts as a wavemeter. The frequency difference is measured using radio frequency devices.

Results. The dual-frequency generation was examined using a gas-discharge 337- μm laser. The mode composition of the laser output was identified, evidencing that the investigated laser can simultaneously generate orthogonally polarized radiation of two frequencies. The simultaneous generation of orthogonally polarized laser beams has been demonstrated, with the frequency difference ranging from 60 kHz to 4.5 MHz. A method has been developed to regulate and measure the frequency difference without resorting to electronic frequency-measuring equipment. Notably, when using modes with the same transverse energy distribution, dual-frequency generation does not appear. Instead, given a specific optical length of the resonator, an instant change in the radiation frequency and polarization occurs, providing opportunities to modulate the THz laser radiation frequency and polarization. The possibility of pulse-frequency and pulse-polarization modulations of THz laser radiation has been demonstrated.

Conclusions. The use of dual-frequency THz lasers will enhance various heterodyne systems in THz technologies. The developed polarization and frequency modulation methods will contribute to the THz telecommunication systems.

Keywords: *terahertz range, emission band, dual-frequency laser, polarization modulation.*