

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИПРОМІНЮВАЧА  
РЕЗОНАНСНОГО ЛІДАРУ З ОДНОПРОХОДОВИМ ПІДСИЛЮВАЧЕМ**

**Вступ**

Резонансні лідари широко використовуються для досліджень верхньої атмосфери в інтересах геофізики, метеорології та екології навколишнього середовища. Особлива увага приділяється дослідженням вмісту атомів та іонів металів, що утворюються на висотах більше 80 км за рахунок абляції метеорної речовини [1 – 3].

Верхні шари атмосфери заповнені хвилями, які зароджуються в нижніх атмосфери від штормових систем і потоків повітря над гірською місцевістю, а потім поширюються вгору. Ці хвилі відіграють ключову роль у встановленні складу та температурних структур шляхом перемішування верхніх шарів атмосфери і збурюючими хімічними реакціями важливих реактивних речовин, таких як атомарний кисень і озон. З допомогою метеоритного натрію Na, що потрапляє в атмосферу шляхом випаровування космічного пилу на висоті від 78 до 110 км і який використовується як індикатор таких вторинних гравітаційних хвиль, проводяться дослідження цих хвиль резонансними лідарами [4 – 6]. Результати таких досліджень можуть також бути використані, наприклад, для виміру висотного розподілу вмісту аерозолів у верхній тропосфері та стратосфері [7].

Відомо, що передавач резонансного лідара, призначеного для дослідження домішок верхньої атмосфери, повинен володіти малою розбіжністю випромінювання, вузькою шириною спектральної лінії, можливістю плавної перебудови довжини хвилі випромінювання і великою енергією в імпульсі [8, 9]. Рідинні лазери на органічних барвниках з дисперсійним резонатором і ламповим накачуванням найкраще підходять для цієї мети, оскільки мають можливість перестроювання довжини хвилі випромінювання [8, 10].

З лідарного рівняння випливає [9, 10], що основними характеристиками передавача, які визначають ефективність резонансного лідара є енергія і смуга лінії випромінювання, безпосередньо пов'язана з ефективним перетином розсіювання речовини [11]. Однак між цими двома характеристиками лазерного генератора існує параметрична зв'язок, тобто, прагнення до звуження смуги генерації призводить до неминучого зниження енергії випромінювання через додаткові втрати, що вносяться в резонатор елементами селекції. У роботах [12, 13] показано, що при оптимальному виборі характеристик дисперсійного резонатора можливе досягнення максимальної ефективності використання енергії випромінювання передавача при взаємодії з атомами атмосферної домішки, що досліджується.

Для подальшого підвищення енергетичних характеристик передавача лідара у схемі випромінювача можуть бути використані оптичні підсилювачі. Оскільки для резонансного зондування атмосфери принципове значення має спектральна чистота випромінювання переважно використання підсилювачів біжучої хвилі [11, 14, 15]. У цьому випадку спектральні та просторові характеристики вихідного пучка випромінювача змінюються незначно, оскільки в однопроходових підсилювачах, на відміну від багатопроходових, немає накопичення аберацій. Крім того, надійність однопроходових підсилювачів забезпечується відсутністю дзеркальних покриттів. Теоретичний аналіз показав високу ефективність їх застосування у схемі генератор-підсилювач [11].

Мета роботи – експериментальна перевірка результатів теоретичного аналізу спектрально-енергетичних параметрів випромінювача з ламповим накачуванням, побудованого за схемою генератор-підсилювач, отриманих раніше [11].

### Методика експерименту

В експериментах використовувалася конструкція лазера [10], з плоско-паралельним резонатором. Як генераційне середовище використовувався спиртовий розчин барвника родамін 6Ж. Інтервал зміни довжин активних елементів генератора та підсилювача вибирався рівним 12 см, що відповідало розрядному проміжку ламп ІСП-5000, які використовувалися в експериментальних дослідженнях.

Як внутрішньорезонаторні селектори в експериментах використовувалися юстируємі інтерферометри Фабрі – Перо з пластинами середньої оптичної якості (якість обробки  $\sim \lambda/50$  на діаметрі 40 мм) [10]. Відхилення в товщині зазору по діаметру пучка випромінювання визначалося в основному якістю юстування дзеркал. При цьому налаштування інтерферометрів здійснювалося на стенді вручну таким чином, щоб величина кута нахилу при налаштуванні на резонансну лінію знаходилася в межах 5 – 10 мрад. Доцільність використання юстованих інтерферометрів замість цілісних еталонів очевидно впливає з порівняння внесених ними неселективних втрат. Попередні розрахунки показують [12], що втрати, внесені юстованими інтерферометрами при малих кутах нахилу виявляються значно меншими, ніж цілісних еталонів вищої якості, для яких ці кути, у загальному випадку, значно більше. Виняток становить варіант, в якому як останній ступінь селекції застосовуються еталони з базою близько декількох міліметрів. У цьому випадку граничні кути нахилу для одного порядку інтерференції невеликі та використання цілісного еталону виправдане зручністю експлуатації та стабільністю характеристик.

Як основний селектор у дослідженнях використовувалася конструкція вимірювального інтерферометра ІТ-51, з інваровими прокладками, в якому пластини з кварцового скла мали діелектричні просвітлювальні і відбиваючі покриття. Перевищення бази резонатора над довжиною активного елемента генератора дорівнювало 85 см. Для протидії паразитної модуляції спектральної лінії вихідне дзеркало і найближчий інтерферометр були віддалені від вікон кювети на відстань не менше 25 см. З цією ж метою вікна кювети з активною рідиною були просвітлені та нахилені один до одного та до осі резонатора на кути не менше 0,5 град.

Спектр випромінювання розраховувався за допомогою машинної обробки реєстрованих ПЗЗ матрицею інтерферограм, отриманих за допомогою вимірювального інтерферометра ІСП-51 і об'єктива з фокусною відстанню 800 мм. Енергія випромінювання вимірювалася за допомогою вимірювача калориметричного типу ІКТ-1М.

Оптична схема лазера з дисперсійним резонатором, що використовувалася в експериментах представлена на рис. 1.

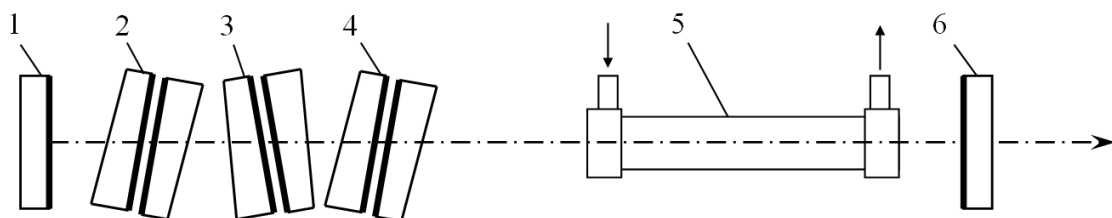


Рис. 1. Схема розташування оптичних елементів генератора

На рис. 1 позначено: 1 – «глухе» дзеркало; 2, 3, 4 – інтерферометри-селектори; 5 – кювета з барвником; 6 – вихідне дзеркало резонатора.

Тут доречно зробити пояснення з приводу встановлення селекторів у резонаторі, оскільки можливі два варіанти їх розміщення: між «глухим» дзеркалом і кюветою і між кюветою і вихідним дзеркалом. При малих втратах в резонаторі це немає значення, тому розташування

селектору у переважній більшості випадків не має особливого значення. Однак ситуація різко змінюється для великих втрат, що як раз є характерним для даного випадку.

При значних втратах на виведення випромінювання (малій величині коефіцієнта відбиття вихідного дзеркала) і з урахуванням неселективних втрат, що вносяться внутрішньорезонаторними інтерферометрами не можна нехтувати зміною інтенсивності випромінювання по довжині резонатора, тому з точки зору ККД стаціонарної генерації зовсім не байдуже, яким чином розташований селектор всередині резонатора.

Відомо, що потужність квазістаціонарної генерації будь-якого лазера визначається виразом [13]

$$P_z = \frac{\nu_z}{\nu_n} \cdot p_0 \cdot p_1 \cdot p_3 \cdot (P_n - P_{nn}),$$

де  $\nu_z, \nu_n$  – відповідно частоти генерації та накачування;  $p_0$  – ККД системи накачування;  $p_1$  – частина енергії накачування, що збуджує молекули на робочий рівень;  $p_2$  – відношення імовірностей спонтанних і вимушених переходів;  $p_3$  – коефіцієнт, що характеризує співвідношення корисних і шкідливих втрат в резонаторі;  $P_n$  – потужність накачування;  $P_{nn}$  – порогова потужність накачування.

Розглянемо спочатку варіант розміщення селектора так, як показано на рис. 1. Якщо посилення кювети з барвником за один прохід позначити  $K$ , інтенсивність генерації  $I_z$ , коефіцієнт відбиття вихідного дзеркала  $R$ , а коефіцієнт пропускання селектора  $T_c$ , то можна показати, що втрати потужності в селекторі через його неповне пропускання будуть рівні

$$[I_z \cdot R / (1 - R)] \cdot K \cdot (1 - T_c^2).$$

Врахуємо також, що у стаціонарному режимі має виконуватися умова

$$K^2 \cdot T_c^2 \cdot R = 1.$$

Отже, згідно з визначенням  $p_3$  отримаємо вираз

$$p_3 = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{R}}{1 - R} \cdot (T_c^{-1} - T_c)}.$$

Аналогічно для варіанта розміщення селектора між кюветою та вихідним дзеркалом, отримаємо

$$p_3 = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{R}}{1 - R} \cdot (T_c^{-1} - T_c)}.$$

Розрахунки, проведені з використанням отриманих виразів, показують, що завжди енергетично вигідніше встановити селектор між «глухим» дзеркалом і кюветою з активною рідиною. Це зумовлено зміною сумарної інтенсивності зустрічних хвиль по довжині резонатора. При цьому чим менша сума інтенсивностей, тим, зрозуміло, менше втрати, які вносять селектор. Тому в експериментах використовувався варіант розміщення селекторів, показаний на рис. 1 і в наступному порядку (рахуючи від «глухого» дзеркала): інтерферометр з базою 2, 0,3 і 8 мкм.

Для генератора в експериментах використовувалася конструкція лазерної головки, яка забезпечувала можливість зміни довжини активного елемента із збереженням постійної щільності енергії накачування. Довжина підсилювача варіювалася з інтервалом 12 см у діапазоні 24 – 60 см [11].

Як основний критерій оцінки ефективності системи генератор-підсилювач використовувалася величина ефективної випромінюваної енергії, яка визначається виразом [12]

$$E_{ef} = E_0 \cdot \sigma_{ef} / \sigma_{max},$$

де  $E_0$  – енергія випромінювання передавача;  $\sigma_{ef}$  – ефективний перетин розсіювання на атомах домішки;  $\sigma_{max}$  – перетин поглинання (розсіювання) у максимумі лінії.

Очевидно, що  $E_{ef}$  характеризуватиме енергію випромінювання лазера, що потрапляє в спектр поглинання домішки, яка досліджується. Величина ефективної випромінюваної енергії була обрана в якості основного критерію оцінки ефективності роботи передавача резонансного лідара, оскільки згідно з рівнянням лазерної локації [8, 9] визначає рівень прийнятого сигналу.

### Експериментальні дослідження та обговорення результатів

На рис. 2 представлено результати вимірювань для системи з чотирилампового генератора з дисперсійним резонатором, характеристики якого представлені вище і підсилювача. Протяжність підсилювача в експерименті була незмінною і дорівнювала 600 мм. Концентрація барвника в експериментах вибиралася з умови  $\sigma_{01}^{max} m \approx 5$ , що давало можливість використання як для генератора, так і для підсилювача загальної системи прокачування активної рідини. За допомогою каліброваних світлоділників та світлофільтрів енергія на вході підсилювача змінювалася від 1 до 0,3 Дж. Тут же наведено результати теоретичних розрахунків [11] за вихідних даних, що відповідають експерименту (пунктирна крива). У розрахунках враховувалося зниження ККД накачування на 10 %, пов'язане із збільшенням навантаження на розрядник. З рис. 2 видно, що результати розрахунків та експериментальні результати є близькими.

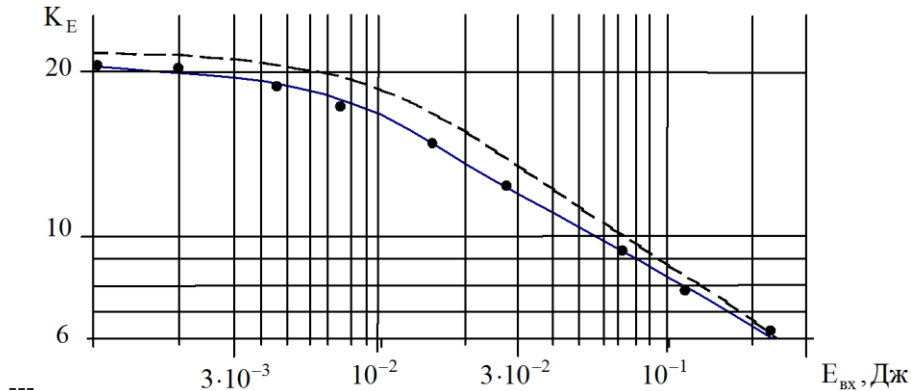


Рис. 2. Експериментальна залежність коефіцієнту підсилення від вхідної енергії

Найкраще узгодження спостерігається в області високих енергій, коли роль посиленої люмінесценції в балансі потужностей невелика. Дещо гірше узгодження в області малих вхідних енергій можна пояснити невідповідністю моделі рівномірного розподілу інтенсивності посиленого шуму реальної ситуації, що має місце в підсилювачі біжучої хвилі. Інтенсивність посиленого шуму на краях кювети значно перевищує інтенсивність у середині [12], тому хід розрахункової залежності коефіцієнта посилення в області малих енергій дещо відрізняється від експериментальної кривої у бік менших значень.

На рис. 3 представлено експериментальні результати досліджень ефективної енергії випромінювання системи генератор-підсилювач  $E_{ef}$  (суцільна лінія) при зміні довжини генератора  $\ell_2$  при збереженні сумарної протяжності генератора і підсилювача, що дорівнює 84 см. Тут же для порівняння представлена залежність енергії випромінювання  $E$  в широкому варіанті (пунктир) за тих самих умов експерименту.

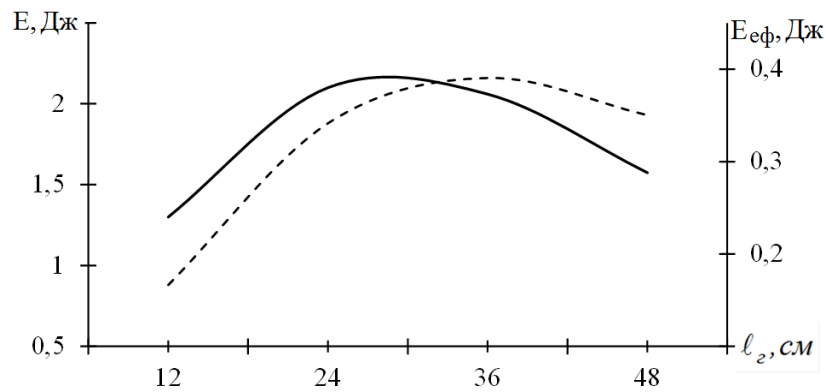


Рис. 3. Залежність енергетичних характеристик випромінювача від довжини генератора

Коефіцієнт відбиття вихідного дзеркала генератора у кожному випадку підбирався з умови отримання максимальної енергії випромінювання генератора. Порівняння представлених на рис. 3 кривих показує відмінність оптимальних співвідношень довжин генератора і підсилювача щодо різних критеріїв. Якщо ставиться завдання отримання максимальної енергії випромінювача з широкосмуговим варіантом генератора, оптимальним є приблизно однакові довжини генератора і підсилювача. Якщо система оптимізується за  $E_{\text{eff}}$ , то оптимальна довжина генератора змінюється у бік менших значень. Це пов'язано, перш за все, зі зміною спектральної ширини випромінювання при зміні протяжності генератора. Зіставлення теоретичних [11, 12] та експериментальних залежностей показує їх згоду.

На рис. 4 представлено результати вимірювань кута розходження випромінювання  $\theta$  системи генератор-підсилювач залежно від довжини підсилювача та при фіксованій довжині генератора 24 см, що є близькою к оптимальній.

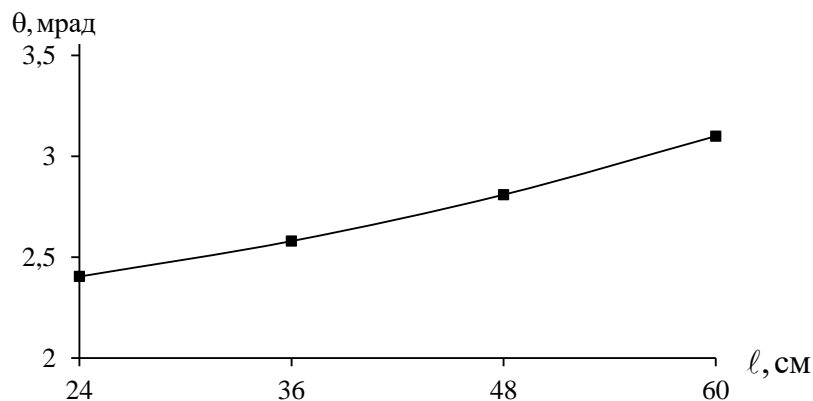


Рис. 4. Залежність кута розходження випромінювання від довжини підсилювача

З рис. 4 видно, що кут розходження випромінювання монотонно зростає від вихідних 2,3 мрад генератора до приблизно 3 мрад системи генератор-підсилювач при максимальній протяжності підсилювача. Порівняно незначне збільшення розбіжності випромінювання обумовлено наведеними термооптичними спотвореннями в активному елементі підсилювача при ламповому накачуванні і може бути компенсовано застосуванням коліматора в оптичній схемі передавача лідару.

### Висновки

Для лідарних досліджень верхньої атмосфери резонансним способом необхідний випромінювач лідару значної потужності і вузької смуги спектру випромінювання. Використання одного лише генератора в схемі передавача обмежує можливості збільшення спектральної яскравості випромінювання. Використання в схемі випромінювача оптичного підсилювача дозволяє при відносно невеликій потужності генератора досягти значного покращення його

енергетичних характеристик. Результати експериментальних досліджень однопроходового підсилювача дозволяють зробити висновок про суттєве підвищення енергетичного потенціалу резонансного лідара із зберіганням спектральної чистоти випромінювання. При цьому отримано незначне зростання кута розходження випромінювання. Збільшення протяжності накачуваної області однопроходового підсилювача має обмеження переважно за рахунок підвищення негативного впливу посиленої широкосмугової люмінесценції. Експериментальні дослідження системи генератор-підсилювач підтверджують висновки теоретичного аналізу і свідчать про те, що при фіксованій сумарній протяжності накачуваної області існує оптимальне співвідношення довжин генератора та підсилювача, при якій досягається максимальна величина ефективної енергії випромінювання передавача.

#### Список літератури:

1. Chu X., Nishimura Y., Xu Z., Yu Z., Plane J. M. C., Gardner C. S., & Ogawa Y. (2020). First simultaneous lidar observations of thermosphere-ionosphere Fe and Na (TIFe and TINa) layers at McMurdo (77.84°S, 166.67°E), Antarctica with concurrent measurements of aurora activity, enhanced ionization layers, and converging electric field // *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL090181. doi: 10.1029/2020GL090181.
2. Chu X., Chen Y., Cullens C. Y., Yu Z., Xu Z., Zhang S.-R. et al. (2021). Mid-latitude thermosphere-ionosphere Na (TINa) layers observed with high-sensitivity Na Doppler lidar over Boulder (40.13°N, 105.24°W) // *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL093729. doi: 10.1029/2021GL093729
3. Swenson G. R., Salinas C. C. J. H., Vargas F., Zhu Y., Kaufmann M., Jones M. Jr., et al. (2019). Determination of global mean eddy diffusive transport in the mesosphere and lower thermosphere from atomic oxygen and carbon dioxide climatologies // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 13,519–13,533. doi:10.1029/2019JD031329.
4. Chu X., Gardner C. S., Li X., & Lin C. Y.-T. (2022). Vertical transport of sensible heat and meteoric Na by the complete temporal spectrum of gravity waves in the MLT above McMurdo (77.84°S, 166.67°E), Antarctica // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2021JD035728. doi: 10.1029/2021JD035728.
5. J. Wu, W. Feng, X. Xue, D. R. Marsh, J. M. C. Plane, X. Dou. The 27-Day Solar Rotational Cycle Response in the Mesospheric Metal Layers at Low Latitudes, *Geophysical Research Letters*, 10.1029/2019GL083888, **46**, 13, (7199-7206), (2019).
6. Kylee Branning, Mark Conde, Miguel Larsen, Riley Troyer, Resolving Vertical Variations of Horizontal Neutral Winds in Earth's High Latitude Space-Atmosphere Interaction Region (SAIR) // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 10.1029/2021JA029805, **127**, 5, (2022).
7. Mikhalev A.V., Tashchilin M.A. and Sakerin S.M. Effect of Atmospheric Aerosol on Ground-Based Airglow Observations // *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2019, V.32. No.04. pp.410–415.
8. X. Chu and G. Papen. Resonance fluorescence lidar for measurements of the middle and upper atmosphere // *Laser Remote Sensing*, T. Fujii, and T. Fukuchi, Eds., pp. 179–432, CRC Press (2005).
9. Norman Hodgson, Horst Weber. *Laser Resonators and Beam Propagation: Fundamentals, Advanced Concepts and Applications*. 2nd Edition. Springer, 2005.
10. Зарудный А.А., Плетенев В.Г., Верхоробин А.Л. Лазер повышенной спектральной яркости для исследования атмосферы // *Радиотехника*. 1998. Вып.102. С.170–175.
11. Zarudnyi A.A., Tsopa A.I. Power Characteristics of the Lidar Transmitter Assembled in Generator-Amplifier Circuit-Design // *Telecommunication and Radio Engineering*. 2019. Vol. 78(1). P. 31–37.
12. Спектральные характеристики передатчика резонансного лидара на основе лазера на красителях с дисперсионным резонатором / В.Л. Басецкий, А.А. Зарудный // *Радиотехника*. 2012. Вып. 169. С. 359–363.
13. Weber M. J. *Handbook of Lasers* // *Laser & Optical Science & Technology*. CRC Press, 2019.
14. Tunable polymer dye laser pumped by two 513 nm diodes / O. A. Burdukova [et al.] // *Laser Physics Letters*. 2020. Vol. 17, no. 2. P. 795–801.
15. Tunable dye laser amplifier chain for laser isotope separation / I. S. Grigoriev [et al.] // *Quantum Electronics*. 2004. Vol. 34, N.5. P. 447–450.

Надійшла до редколегії 15.05.2024

Відомості про автора:

**Зарудний Олександр Андрійович** – канд. техн. наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем; Україна, e-mail: [oleksandr.zarudnyi@nure.ua](mailto:oleksandr.zarudnyi@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1612-0256>