

А.І. ЦОПА, д-р техн. наук, О.А. ЗАРУДНИЙ, канд. техн. наук

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРОМІНЮВАЧА ЛІДАРУ, ПОБУДОВАНОГО ЗА СХЕМОЮ ГЕНЕРАТОР-ПІДСИЛЮВАЧ

Вступ

Серед дистанційних методів контролю середньої та верхньої атмосфери одними з найбільш ефективних є лідарні, що забезпечується високою інформативністю процесів розсіювання оптичного випромінювання [1]. Сучасні лідарні дослідження в інтересах екології, метеорології та геофізики широко використовуються для моніторингу складу та динаміки атмосфери [1 – 4].

Для дослідження фотохімічних і динамічних процесів, що відбуваються у верхній мезосфері та нижній термосфері, активно застосовуються лідари, що використовують ефект резонансної флуоресценції на атомах металів та їх іонів, зокрема натрію [2, 4, 5]. У галузі атмосферних досліджень лідарні вимірювання натрієвого шару роблять важливий внесок у розуміння хімічних та динамічних процесів у районі мезопаузи [5, 6]. Крім дослідження хвильових процесів, на основі лідарних вимірювань форми спектральної лінії Na можна також відновлювати профіль температури в районі мезопаузи [7]. Як випромінювачі найчастіше використовуються рідинні лазери на органічних барвниках, що дозволяють у широких межах перестроювати довжину хвилі випромінювання.

Відомо, що застосування підсилювачів дозволяє, в загальному випадку, збільшити енергетичні параметри та ККД випромінювача лідара [1, 8], що забезпечує більший висотний діапазон лідарних вимірювань. При цьому вдається знизити вимоги до енергетичних характеристик генератора та покращити стабільність параметрів випромінювання, зменшивши навантаження на елементи резонатору. Оскільки для зондування атмосфери принципове значення має спектральна чистота випромінювання, переважно використовуються підсилювачі біжучої хвилі [8 – 10].

При побудові випромінювача лідара за схемою генератор-підсилювач в умовах постійної щільності накачування виникає проблема вибору співвідношення між протяжністю активного елемента генератора і протяжністю активного середовища підсилювача біжучої хвилі, яка б забезпечувала максимальний ККД всього випромінювача.

Основним завданням роботи була експериментальна перевірка результатів теоретичних досліджень, отриманих раніше [10 – 12], з метою визначення факторів, що впливають на вибір співвідношень довжин активних елементів генератора та підсилювача на основі органічного барвника родамін БЖ з ламповим накачуванням при обмеженій їх сумарній протяжності.

Експериментальні дослідження ефективності випромінювача проводилися за умови загальної системи накачування для генератора і підсилювача, що забезпечувало однакові часові характеристики світлових імпульсів і значень ККД накачування.

Методика експерименту та конструктивні особливості випромінювачів

Експериментальні дослідження систем генератор-підсилювач проводилися раніше різними авторами [9, 13, 14]. Встановлено, що підсилювачі біжучої хвилі практично не змінюють просторові і спектральні характеристики пучка. Основною проблемою при дослідженні енергетичних параметрів було виділення корисної частини випромінювання із сумарної, що включає посилений шум. Так, у роботі [13] використовувалося просторове рознесення пучків за допомогою дифракційної решітки. Однак цей метод зручний тільки в тому випадку, коли спектри генерації та посиленого шуму перекриваються незначно.

Більш універсальним є використання спектрографів з позиційно-чутливими елементами [8], що дозволяють виділяти спектральні складові корисного сигналу. У цьому випадку вимі-

рювання коефіцієнта посилення проводиться порівнянням інтенсивності спектрів генератора і системи генератор-підсилювач. Для підвищення точності вимірювань енергії імпульсу до і після підсилювача лінії випромінювання інтегрувалися в межах їх ширини спектра. При цьому контроль фонові складові проводився оцінкою інтенсивності поблизу крил спектральних ліній корисного випромінювання.

У даній роботі авторами використовувалася фільтрація фонового випромінювання генератора за допомогою лінзового телескопу Ньютона ($f=300\text{мм}$) і розташованої у його фокальній площині польової діафрагми з кераміки діаметром близько 1,5 мм. Енергія на вході підсилювача змінювалася за допомогою каліброваних світлоділників та світлофільтрів. Діаметри підсилювача кювет близько 9 мм і генератора 7,5 мм підбиралися таким чином, щоб діаметр пучка на вході підсилювача приблизно відповідав поперечному розміру кювети підсилювача. Вимірювання енергії проводилися каліброваним вимірником ІКТ-1м калориметричного типу.

Відомо, що ефективність систем накачування з прямолінійними імпульсними лампами залежить не тільки від їх спектрально-енергетичних характеристик, але і від типу освітлювача, що застосовується. Найбільш ефективними освітлювачами, незважаючи на деяку неминучу неоднорідність накачування, є освітлювачі з циліндричними еліптичними дзеркалами [8, 12]. Безперечною перевагою дзеркальних освітлювачів є можливість зменшення теплового впливу ламп на активний елемент особливо в характерному для лідерів частотному режимі роботи. Ця теплова дія при досить високих потужностях накачування може бути такою, що при компактному компонованні освітлювача для забезпечення високої якості пучка доведеться охолоджувати не тільки лампи, а й освітлювачі [8]. В експериментах використовувалася конструкція лазерного випромінювача на базі двоеліпсного освітлювача з суміщеним фокусом та дзеркальним покриттям. При цьому лампи розташовувалися у фокусах еліптичних циліндрів, а кювета з активною рідиною – у поєднаному фокусі, як показано на рис. 1.

Для збільшення протяжності активного середовища при постійній щільності накачування використовувався варіант конструкції лазерних випромінювачів, запропонований у [8, 12]. Суть способу полягає в послідовному поєднанні декількох двоеліпсних циліндричних освітлювачів (рис. 2), розташованих під кутом один до одного, щоб забезпечити можливість підключити лампи до розрядних ланцюгів і контуру рідинного охолодження. Рис. 2 ілюструє це на прикладі послідовного розташування двоеліпсних циліндрів, що використовуються для накачування загального АЕ. Такий спосіб дозволяє необмежено нарощувати довжину АЕ без збільшення протяжності ламп накачування. При цьому висока ефективність дзеркального освітлювача при раціональному виборі ексцентриситету поєднується з рівномірним накачуванням робочої речовини.

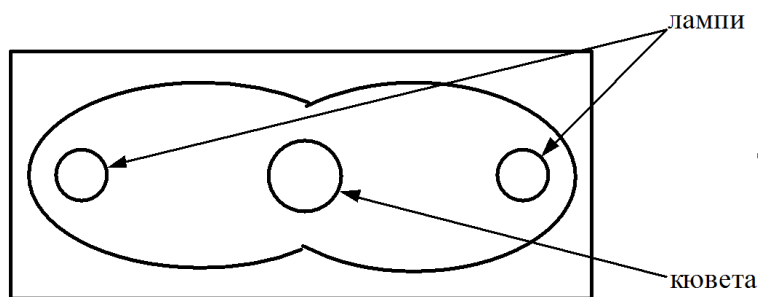


Рис. 1. Поперечний розріз двоеліпсного освітлювача кювети з активною рідиною

Для накачування активного елемента використовувалася імпульсна лампа типу ІСП-5000, яка має наступні характеристики: діаметр розрядного проміжку – 7 мм, довжина розрядного проміжку – 120мм. Гранична енергія лампи в мікросекундному діапазоні трива-

лостей залежно від тиску ксенону та тривалості імпульсу коливається від кількох сотень джоулів до одиниць кілоджоулів [8].

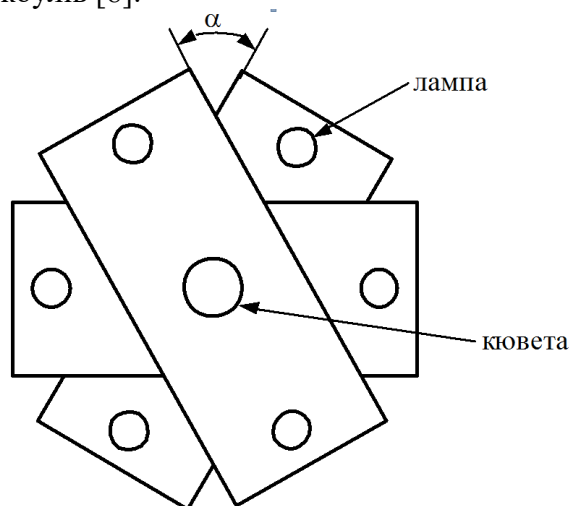


Рис. 2. Варіант послідовного поєднання двоеліптичних освітлювачів

Лазерна та підсилювальна головки мали ідентичне конструктивне виконання на базі двоеліптичних освітлювальних блоків. Довжини генератора та підсилювача змінювалися в ході досліджень з дискретністю, що визначається довжиною розрядного проміжку ламп ІСП-5000, яка дорівнює 12 см.

При виборі електричної схеми багатолампової системи накачування визначальною умовою є синхронність увімкнення всіх ламп. Несинхронність включення ламп, за часом порівняннн з часовими характеристиками розрядного імпульсу, викликає відповідну нестабільність параметрів лазерного випромінювання. У результаті аналізу літературних даних та експериментальних досліджень застосовувалася схема, представлена на рис. 3.

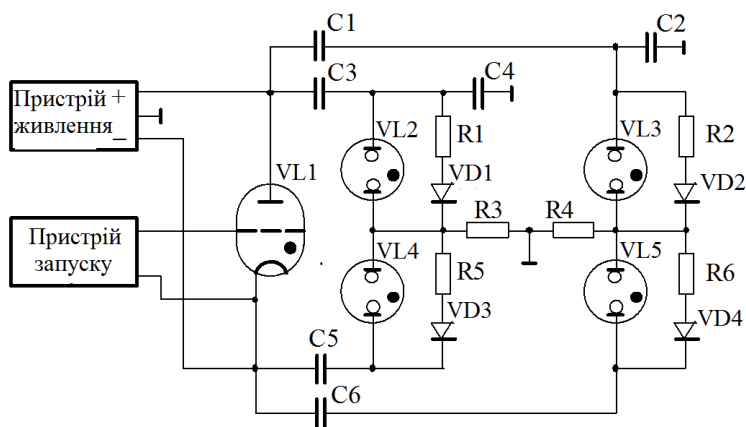


Рис. 3. Схема електрична багатолампової системи накачування

Наявність загального для усіх ламп накачування (VL2 – VL5) комутатора (VL1) забезпечує синхронність їх включення. Накопичувальні конденсатори (C1, C3, C5, C6) заряджаються від двополярного високовольтного джерела через резистори R1 – R6 і діоди VD1 – VD4. Розрядний контур утворений накопичувальними конденсаторами C3, C5 (C1, C6), розрядником VL1 і двома послідовно з'єднаними лампами-спалахами VL2, VL4 (VL3, VL5). У представленій на рис. 3 схемі до розряднику, як видно, підключені два незалежних розрядних контури. Однак схема дозволяє при необхідності збільшувати число пар ламп. Обмеженням може бути лише гранична імпульсна потужність комутатору. Послідовне з'єднання ламп забезпечує при вибраних розмірах розрядних проміжків ламп вигідніший режим узгодження і, що не менш важливо для багатолампових систем, приблизно вдвічі знижує навантаження

на розрядник за струмом комутації. Для полегшення пробою ламп необхідну асиметрію у початкові моменти розряду забезпечують конденсатори С2,С4 ємністю декілька сотен пікофарад.

Основними перевагами запропонованої схеми є такі:

- надійна синхронізація моменту включення ламп унаслідок застосування загального комутатора;
- можливість збільшення числа ламп за рахунок збільшення числа розрядних контурів, що підключаються до розрядника;
- висока напруга прикладається до ламп тільки на час дії імпульсу накачування, при цьому напруга середньої точки близька до нуля;
- напруга на кожному конденсаторі вдвічі менша за напругу, що прикладається через розрядник до ламп;
- надійний пробій розрядного проміжку лампи, оскільки через асиметрію розрядного ланцюга, що існує в початковий момент часу, до лампи прикладається подвійна напруга джерела живлення. Пробій однієї лампи, внаслідок різкого падіння напруги на ній, ініціює пробій у послідовно з'єднаних з нею ламп.

Для зменшення індуктивності розрядного кола застосовувалися малоіндуктивні елементи з використанням зворотних струмопроводів [8]. Так, зокрема, як комутатор застосовувалися малоіндуктивний розрядник типу РУ-70 і накопичувальні конденсатори типу К75-48, які з'єднувалися за допомогою коаксіальних кабелів з малим хвильовим опором. Для зменшення хвильового опору та погонної індуктивності як провідники коаксіальних кабелів використовувалися два обплетення, розділені декількома шарами фторопластової стрічки, що витримує робочу напругу розряду. Використання гнучких коаксіальних провідників дозволяє знизити механічне навантаження на електроди ламп та зменшити їх індуктивність. Багаторічний досвід експлуатації показав також їхню високу електричну надійність.

Експериментальні дослідження та обговорення результатів

В ході експериментів варіювалися протяжності активних елементів генератора і підсилювача з дискретним інтервалом, що визначається довжиною розрядного проміжку ламп накачування, рівного 120 мм. Коефіцієнт відбиття вихідного дзеркала резонатора у кожному випадку оптимізувався за максимальним значенням енергії генерації. Енергія на вході підсилювача регулювалася за допомогою комбінації світлоподілювальних пластин та нейтральних світлофільтрів. На рис. 4 зображена отримана експериментально залежність енергетичного коефіцієнта посилення підсилювача з довжиною активного елемента 360 мм від концентрації барвника активної рідини (σ_{01}^{\max} пр) при фіксованій величині вхідної енергії, що дорівнювала 0,3 Дж.

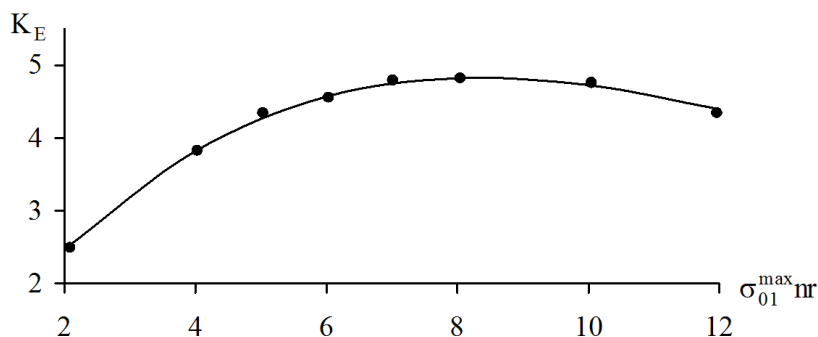


Рис. 4. Експериментально досліджена залежність енергетичного коефіцієнта посилення від концентрації активної рідини

З рис. 4 слідує, що зазначена залежність має плавний максимум і що максимальне значення енергетичного коефіцієнта посилення досягається при концентрації барвника, яка

відповідає умові $\sigma_{01}^{\max} m \approx 7 \div 8$, що якісно узгоджується з теоретичними оцінками [10]. При зазначених концентраціях барвника просторові характеристики випромінювання генератора помітно погіршуються порівняно з оптимальними при $\sigma_{01}^{\max} m \approx 5$ [10]. Тому в подальших експериментальних дослідженнях концентрація барвника 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 [8]. При цьому, як видно з рис. 4, зниження коефіцієнта посилення порівняно з максимальним значенням було незначним і становило приблизно 10 %.

На рис. 5 представлено результати вимірювань максимального енергетичного коефіцієнта посилення в режимі слабкого сигналу, тобто з вхідною інтенсивністю, значно меншою інтенсивності насичення ($I_{\text{вх}} \ll I_s$). Вхідна енергія світлового імпульсу тривалістю 2,2 мкс становила близько 0,1 мДж. Дослідження проводились при зміні довжини активного елемента підсилювача l_n від 12 до 60 см з інтервалом 12 см. Перевищення потужності накачування над порогом, що визначалось порівнянням осцилограм імпульсів накачування та генерації, дорівнювало 2,2. Тривалість світлового імпульсу накачування становила 3,5 мкс при енергії, що підводиться до кожної лампи, рівної 90 Дж. Отже, умови експерименту приблизно відповідали вихідним даним теоретичного розрахунку, представленого раніше [10].

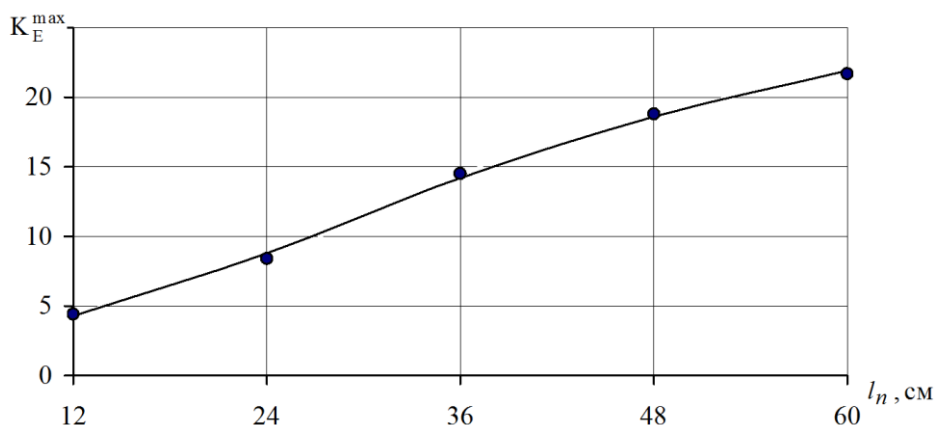


Рис. 5. Залежність максимального енергетичного коефіцієнта посилення від довжини активного елемента підсилювача у режимі слабкого сигналу

З рис. 5 видно, що енергетичний коефіцієнт посилення у даних умовах експерименту має досить велику величину і зростає зі збільшенням довжини підсилювача, що пояснюється малою величиною інтенсивності випромінювання на виході підсилювача порівняно з інтенсивністю насичення. Спочатку із зростанням довжини активного елемента підсилювача спостерігається майже експоненційне зростання коефіцієнта посилення, а в області великих довжин має місце насичення, що обумовлене зростанням інтенсивності уздовж активного елемента і збільшенням інтенсивності посиленого шуму. Результати експерименту показують потенційні можливості застосування підсилювача біжучої хвилі для посилення енергії випромінювання і якісно збігаються з результатами теоретичного аналізу [10, 16].

Режим слабкого сигналу не є оптимальним з точки зору загальної ефективності системи генератор-підсилювач. Тому доцільно було провести аналогічне експериментальне дослідження при величині вхідної інтенсивності одного порядку з інтенсивністю насичення активної рідини. На рис. 6 представлено результати вимірювань енергетичного коефіцієнта посилення для вхідного сигналу з енергією 0,3 Дж, тривалістю 2,2 мкс при зміні довжини підсилювача. Тривалість світлового імпульсу накачування становила 3,5 мкс.

З рис. 6 видно, що коефіцієнт посилення має тенденцію до насичення при протяжності підсилювача більше 50 см, що відповідає результатам теоретичних розрахунків, отриманих раніше [10, 16]. Отже, можна зробити висновок про недоцільність подальшого збільшення

довжини підсилювача понад деяку величину, яка визначається енергією на вході підсилювача та інтенсивністю накачування, оскільки це призведе до помітного зниження загального ККД випромінювача, побудованого за схемою генератор-підсилювач.

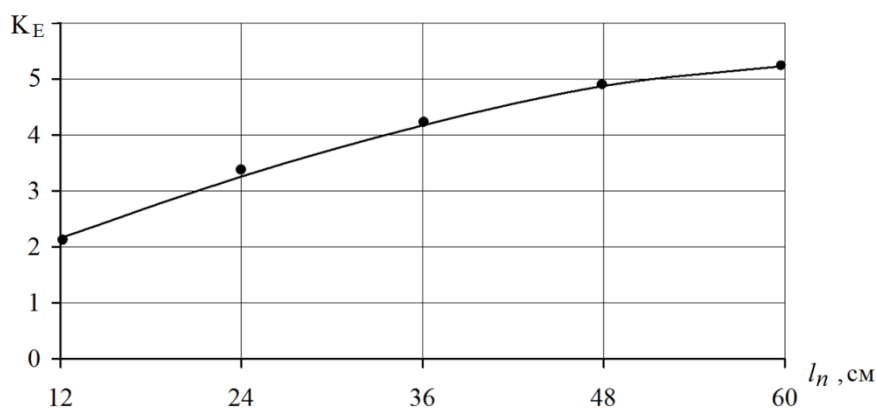


Рис. 6. Залежність енергетичного коефіцієнта посилення від довжини активного елемента підсилювача із порівняно великою вхідною інтенсивністю сигналу

З практичної точки зору важливо було також дослідити залежність енергії випромінювання при деяких фізичних обмеженнях, пов'язаних із сумарною енергією накачування системи генератор-підсилювач і, відповідно, довжиною області, що накачується. На рис. 7 представлено експериментальні результати досліджень енергії випромінювання при зміні довжини генератора при фіксованій сумарній довжині області накачування, що дорівнює 840 мм, яка обмежувалась граничним навантаженням загального комутатора (рис. 3).

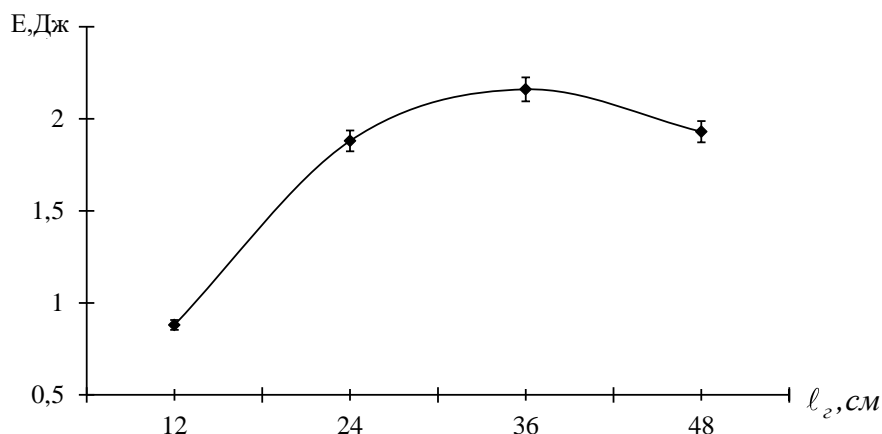


Рис. 7. Залежність вихідної енергії випромінювача, побудованого за схемою генератор-підсилювач від довжини генератора

Максимум енергії спостерігався за довжини активної області генератора 360 мм, тобто. приблизно половині загальної протяжності області, що накачується. При цьому енергія випромінювання системи генератор-підсилювач майже вдвічі перевищувала енергію генератора з тією ж довжиною, що свідчить про доцільність використання підсилювача у схемі випромінювача. Порівняння розрахункових [10] та експериментальних кривих показує, що найкраща ступінь узгодження має місце в області малих довжин підсилювача. Було встановлено, що однією з причин невідповідності коефіцієнтів посилення в області великих довжин було зниження ККД накачування зі збільшенням навантаження на загальний комутатор розрядного кола.

Висновки

1. Порівняння експериментальних результатів дослідження енергетичних характеристик системи генератор-підсилювач з теоретичними розрахунками показує їх якісну згоду і

дозволяє зробити висновок про те, що при однаковій протяжності області накачування перевага підсилювача починає позначатися лише починаючи з деякої довжини, яка залежить від щільності накачування і втрат резонатора. Якщо ж довжина області, що накачується, менше цієї величини, то вигідніше будувати випромінювач за схемою з одним тільки генератором.

2. Гранична довжина підсилювача та енергія випромінювача, побудованого за схемою генератор-підсилювач, обмежуються за рахунок зростання інтенсивності випромінювання, що посилюється уздовж активного елемента, а також збільшення інтенсивності посиленого шуму.

Список літератури:

1. Борейшо А. С., Ким А. А., Коняев М. А., Лугиня В. С., Морозов А. В., Орлов А. Е. Современные лидарные средства дистанционного зондирования атмосферы // Фотоника. 2019. Т. 13, № 7. С. 748 – 757.
2. 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).
3. 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.
4. 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).
5. Lidar observations of thermospheric Na layers up to 170 km with a descending tidal phase at Lijiang (26.7 N, 100.0 E), China / Q. Gao, X. Chu, X. Xue, X. Dou, T. Chen, J. Chen // Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2015. Pp. 9213 – 9220.
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. Sharon L. Vadas, Erich Becker, Numerical Modeling of the Excitation, Propagation, and Dissipation of Primary and Secondary Gravity Waves during Wintertime at McMurdo Station in the Antarctic // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 10.1029/2017JD027974, 123, 17, (9326 – 9369), (2018).
8. Зарудный А.А., Плетенев В.Г., Верхоробин А.Л. Лазер повышенной спектральной яркости для исследования атмосферы // Радиотехника. 1998. Вып.102. С.170 – 175.
9. Шидловский В. Р., Шраменко М.В., Якубович С.Д. Перестраиваемый низкокогерентный источник света высокой спектральной яркости // Квантовая электроника. 2021. Т. 51:4. С. 287 – 292.
10. Зарудный А.А., Цопа А.И. Энергетические характеристики передатчика лидара, построенного по схеме генератор-усилитель // Радиотехника. 2018. Вып.192. С.56 – 60.
11. Петров В.В., Петров В. А., Кушцов Г.В., Лаптев А.В., Кирпичников А. В., Пестряков Е.В. Моделирование процесса лазерного усиления с учётом зависимости теплофизических и лазерных характеристик среды от распределения температуры в активном элементе Yb:YAG // Квантовая электроника, 2020. Т. 50:4. С. 315 – 320.
12. Allain J.Y. High energy pulsed dye lasers for atmospheric sounding // Appl. Optics. 1989. V.18, №3. P.287 – 289.
13. Tunable dye laser amplifier chain for laser isotope separation / I. S. Grigoriev [et al.] // Quantum Electronics. 2004. Vol. 34, N.5. P. 447 – 450.
14. Vasnev N.A., Trigub M.V. and Evtushenko G.S. Features of Operation of a Brightness Amplifier on Copper Bromide Vapors in the Bistatic Scheme of a Laser Monitor // Atmospheric and Oceanic Optics. 2019. V. 32. No.04. P.483 – 489.
15. Звелто О. Принципы лазеров ; пер. под науч. ред. Т. А. Шмаонова. 4-е изд. СПб. : Лань, 2008. 720с.
16. Басецкий В.А., Зарудный А.А. Модель генерационных характеристик излучателя резонансного лидара // Радиотехника. 2010. Вып 160. С.124 – 129.

Надійшла до редколегії 02.02.2023

Відомості про авторів:

Цопа Олександр Іванович – д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри радіотехнологій інформаційно-комунікаційних систем. Україна; e-mail: oleksandr.tsopa@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4881-5343>

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