

УДК 681.518.52

В.Ф. Гамалій, проф., д-р фіз.-мат. наук, С.І. Осадчий, доц., канд. техн. наук, М.В. Якорєва, асп.

Кіровоградський національний технічний університет

Дослідження макету автоматизованої лазерної системи контролю малих концентрацій домішок в газових середовищах

Проведено дослідження достовірності результатів вимірювання малих концентрацій домішок у газах.

лазерна спектроскопія, контур лінії поглинання, малі концентрації домішок

Добре відомий в даний час метод внутрішньорезонаторної лазерної спектроскопії (ВРЛС) полягає в тому, що досліджувана речовина, яка має вузькі лінії поглинання, поміщається всередину резонатора широкопучкового лазера з великою шириною однорідного контуру підсилення активного середовища [1]. У тих поздовжніх модах, частоти яких співпадають з лініями поглинання досліджуваної речовини, інтенсивність генерації поступово згасає. При цьому в спектрі генерації з'являються провали, які повторюють спектр поглинання досліджуваної речовини. За рамки таких уявлень виходить, однак, цілий ряд явищ, експериментально виявлених в останній час. Одне з них - збільшення спектральної щільності випромінювання лазера поблизу ліній поглинання (так званий ефект «конденсації» випромінювання). Для пояснення ефекту конденсації були запропоновані різні механізми: поява дисперсійної лінзи через насичення поглинання на осі гауссового пучка [2], когерентні ефекти поляризації поглинаючих атомів [3], утворення решітки поглинання через насичення [4] і т. д. Важливо, що у всіх перерахованих роботах випромінювання лазера або взагалі не розкладалося по модам резонатора, або до уваги приймалися лише інтенсивності (числа фотонів), а фази коливання в окремих модах не враховувалися. В [5] було висловлено допущення, що ефект конденсації може бути пов'язаний з синхронізацією фаз поздовжніх мод резонатора. В [6] доведено експериментально, що періодична модуляція коефіцієнта посилення активного середовища призводить до конденсації випромінювання поблизу сильних ліній поглинання речовини, поміщеної всередину резонатора. В даній роботі отримані нові експериментальні результати, що дозволяють зрозуміти механізм конденсації та явищ, які її супроводжують. Пропонується модель, що пояснює ефект конденсації і інші явища, що відбуваються при наявності зовнішнього джерела періодичної модуляції коефіцієнта посилення.

Наша ціль – створення лазерної системи, яка дозволить вести контроль й ідентифікацію газових домішок в технологічних атмосферах і в повітрі в режимі реального часу. Тому використовуємо електронну реєстрацію спектрів генерації лазера.

Досліджувався спектр поглинання атмосферного повітря при кімнатній температурі і атмосферному тиску. Спектр поглинання в області 940-942 нм обумовлений присутністю парів води. Щоб засвідчитися, що ці лінії є лініями поглинання саме води, реєструвався спектр поглинання парів води при різних тисках. Для цієї цілі з кювети для дослідної речовини відкачували повітря, а потім в середину

напускали пари води.

При даній тривалості неперервної генерації, яка складала приблизно 1 мкс, мінімальний реєструє мий коефіцієнт поглинання дорівнює $k=1/\sigma \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$.

Методика дослідження достовірності значень довжин хвиль та концентрацій газів, які визначає експериментальний зразок лазерної системи контролю малих газових домішок в газових середовищах включає:

1. Визначення газового середовища з добре відомими значеннями довжин хвиль ліній поглинання, які потрапляють в спектральну область генерації багатомодового лазера на кристалі LiF з F_2^+ -центрами забарвлення 905-975 нм (9050...9750Å) (газове середовище повинно бути безпечним для дослідника в умовах роботи в лабораторії).
2. Створення технічних умов для контролюємих змін концентрацій газових компонент.
3. Реєстрування спектру генерації багатомодового лазера по розробленому алгоритму.
4. Обчислення концентрації газів згідно з математичною моделлю взаємодії внутрішньорезонаторного випромінювання багатомодового лазера з дослідною речовиною в його резонаторі по глибині провалів ліній поглинання. Для зменшення похибок вимірів визначити відносні значення концентрацій.
5. Порівняння отриманих значень центрів ліній поглинання та концентрацій речовини з відомими значеннями.
6. Визначення рівня шумів системи, які накладаються на спектр генерації багатомодового лазера.
7. Врахування величини відносної похибки значень параметрів, які вимірює лазерна система контролю малих газових домішок в газових середовищах.

У методі саме і важливо, щоб однорідна ширина лінії посилення була більше ширини лінії поглинання, тому що взаємодія з великим числом мод у межах однорідного контуру посилення приводить до вигорання активних часток, обумовленому тільки сумарною потужністю генерації в цьому контурі, і слабко залежному від спектрального розподілу інтенсивності генерації. Тому зменшення щільності фотонів з частотою відповідної лінії поглинання практично не позначиться ні на концентрації активних часток, ні на коефіцієнті підсилення на цій частоті.

Первинна реєстрація спектрального розподілу випромінювання багатомодового лазера у фокальній площині спектрографа (камери УФ-90) виконується за допомогою ПЗЗ- лінійки.

Основним елементом системи є блок обробки відеозображень. Блок призначений для перетворення аналогового відеосигналу, що надходить від ПЗЗ- датчика в масив цифрових даних, доступний для обробки центральним процесором комп'ютера. Крім того, блок виконує функції керування ПЗЗ- датчиком і містить власний мікроконтролер, що керує режимами вузлів плати. До блоку обробки відеозображень підключається ПЗЗ- датчик, який складається з ПЗЗ- лінійки, формувача напруги живлення 5 і 9 В для ПЗЗ, підсилювача відеосигналу і приймачі керуючих сигналів.

Алгоритм роботи пристрою (рис. 1) включає в себе функції, реалізовані як програмно, так і апаратно.

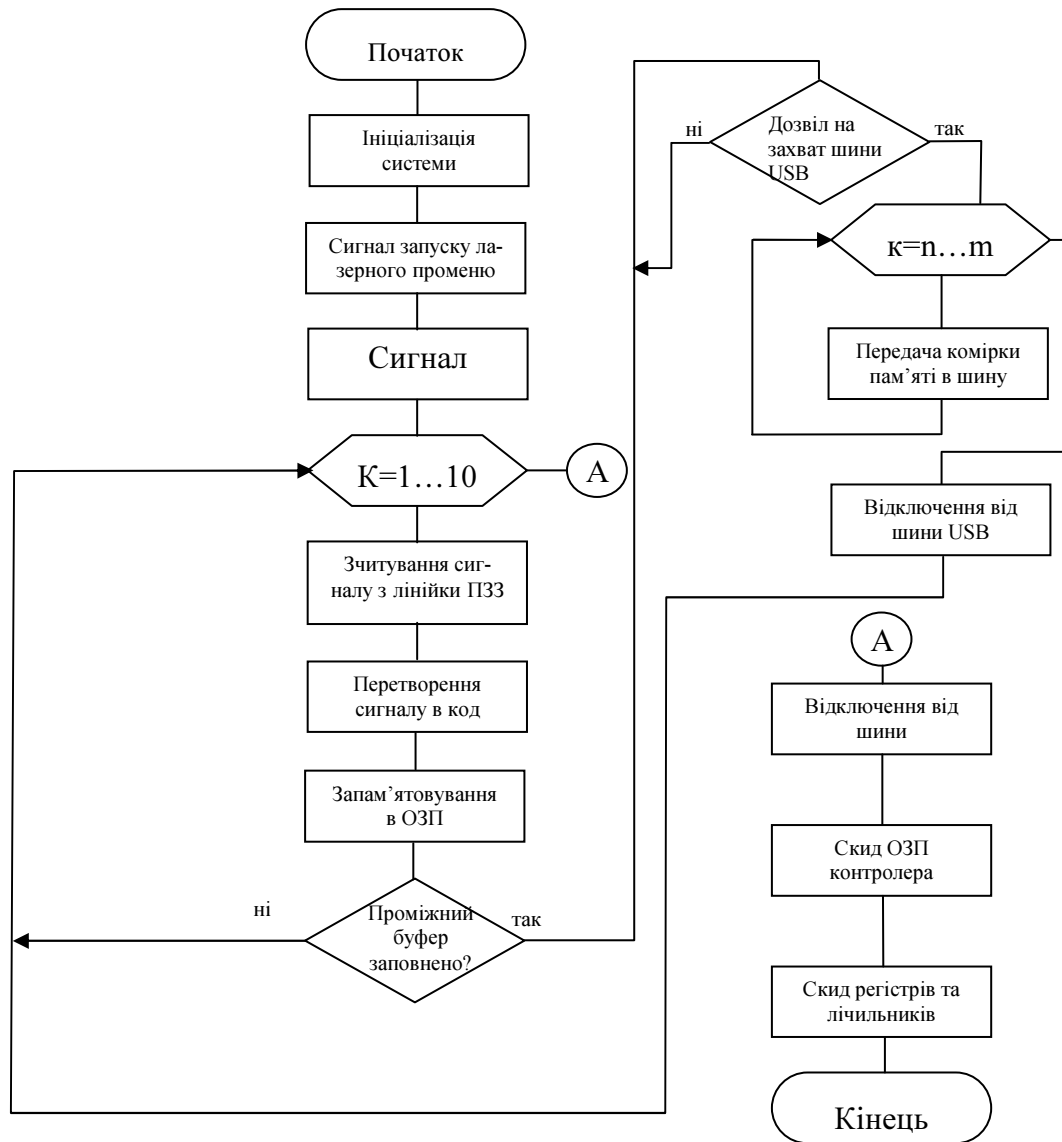


Рисунок 1 - Алгоритм функціонування пристрою реєстрації випромінювання багатомодового лазера

Для відпрацювання роботи лазерної системи контролю малих газових домішок в газових середовищах необхідно було обрати газову речовину, яка б була добре вивчена, мала багато відомих ліній поглинання, які попадають в наш спектральний діапазон. Виходячи з цих вимог було вирішено в якості дослідної речовини використовувати пари води H_2O . Є змога легко міняти концентрацію парів, і для цієї молекули існують складені таблиці спектрів поглинання для різних спектральних діапазонів (табл. 1).

Дослідження проводилося в області $\lambda=9423 \div 9435 \text{Å}$. В цю область попадає дві лінії поглинання з центрами $\lambda=9428,20 \text{ Å}$ та $\lambda=9430,62 \text{ Å}$. Обраний спектральний інтервал обумовлений характеристикою ПЗЗ-лінійки, яка при даній величині дисперсії дає змогу приймати лазерне випромінювання і реєструвати спектральний діапазон в межах до 10 Å (1 нм).

Для обчислення значень довжини хвилі, які відповідають номерам каналів ПЗЗ-лінійки, використовувалася відповідність спектра до довжин хвиль по лініям неонові безелектродної лампи.

Дослідження проводилися для різних положень дифракційної решітки. При цьому найсильніші лінії поглинання парів води спостерігали в різних місцях фокальної площини спектрального приладу.

Таблиця 1 - Спектр поглинання H_2O в діапазоні 9377-9483 Å

№	λ , Å	Коливальні переходи		Відносна інтенсивність
		$\nu_1 \nu_2 \nu_3$	$I'_{K'} - I'_{K''}$	
1	9377,65	201	20-11	203:196
2	9379,72	300	4 ₋₁ -4 ₋₂	96
3	9381,19	201	2 ₋₂ -1 ₋₁	197
4	9382,19	300	4 ₁ -4 ₋₁	55
5	9383,62	300	5 ₋₃ -5 ₋₅	34
6	9386,72	201	2 ₋₁ -1 ₀	170
7	9387,06	300	2 ₋₁ -1 ₋₁	155
8	9387,84	201	4 ₋₂ -4 ₋₃	52
9	9391,76	300	2 ₋₁ -2 ₋₁	67
10	9399,02	201	1 ₋₁ -0	153
11	9400,10	201	3 ₋₁ -3 ₋₂	71
12	9401,62	300	1 ₀ -0	98
13	9409,02	300	3 ₁ -3 ₋₁	94
14	9410,42	201	2 ₀ -2 ₋₁	196
15	9417,67	201	1 ₁ -1 ₀	190
16	9421,82	201	4 ₀ -4 ₋₁	172
17	9426,83	201	1 ₀ -1 ₁	206
18	9428,20	201	2 ₂ -2 ₁	206
19	9430,62	201	2 ₁ -2 ₂	198:210
20	9437,68	201	3 ₀ -3 ₁	210
21	9438,03	201	2 ₋₁ -2 ₀	126
22	9440,62	201	0-1 ₋₁	215
23	9441,03	201	3 ₂ -3 ₃	215
24	9442,38	201	6 ₀ -6 ₋₁	65
25	9443,30	201	4 ₂ -4 ₁	200
26	9444,40	201	5 ₁ -5 ₀	71
27	9446,02	201	4 ₁ -4 ₂	149
28	9449,19	300	1 ₋₁ -1 ₁	84
29	9450,33	201	4 ₋₁ -4 ₀	104
30	9454,06	201	5 ₀ -5 ₁	160
31	9454,63	201	3 ₋₂ -3 ₋₁	172
32	9456,10	201	4 ₄ -4 ₃	206:200
34	9460,80	201	5 ₃ -5 ₂	65
35	9461,32	201	1 ₋₁ -2 ₋₂	201
36	9464,83	300	0-1 ₀	53
37	9465,47	201	6 ₂ -6 ₁	94
38	9467,78	201	6 ₁ -6 ₂	42
40	9469,42	201	1 ₁ -2 ₀	185
41	9474,46	201	5 ₄ -5 ₅	145
42	9475,29	300	2 ₂ -3 ₋₁	72
43	9480,23	201	2 ₋₁ -3 ₋₂	201
44	9481,64	201	2 ₋₂ -3 ₋₃	211:213
45	9482,41	300	1 ₋₁ -2 ₋₁	84

Врахування нелінійності дисперсії спектрографа в програмі обчислення довжин хвиль спектральних ліній парів води дозволило досягнути точності спектральних вимірів $0,03 \text{ \AA}$ (відносна похибка $\sim 10^{-4} \%$).

Після обробки отриманих результатів за формулою $E = \sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta H_i^2 / (N+1)}$ можна зробити висновок, що рівень шуму складає 3%, що задовольняє необхідній точності роботи системи. Наявна величина шуму обумовлена неконтрольованими частотнозалежними втратами, які вносяться інтерференційними ефектами за рахунок відбиття і розсіювання світла на дзеркалах, вікнах, частинках пилу. Інтерференція світла відбитого від різних оптичних елементів в середині і зовні резонатора призводить до частотної селекції втрат завдяки високій чутливості спектрального розподілу випромінювання до частотно-залежних втрат в структурі спектру випромінювання.

Для виконання пунктів 2, 3, 4, 5, та 7 методики дослідження достовірності вимірів лазерної системи контролю малих газових домішок в газових середовищах, запропоновано дослідити спектри поглинання парів води, які при різних концентраціях знаходяться в середині резонатора багатомодового лазера на кристалі LiF з F_2^+ центрами забарвлення. На рис. 2 наведено спектри поглинання парів води при різних тисках (концентраціях), які зареєстровано на експериментальному зразку лазерної системи контролю малих газових домішок в газових середовищах.

При дослідженні спектрів поглинання парів H_2O були виміряні абсолютні значення коефіцієнтів поглинання для двох ліній (канал 430 та канал 969) по зареєстрованим спектрам поглинання і визначені концентрації $n_1 = \frac{0.45}{\sigma_1 \cdot c \cdot T}$ та

$n'_1 = \frac{0.68}{\sigma_1 \cdot c \cdot T}$ при незмінному значенні тривалості генерації T , перерізі поглинання σ на

даній довжині хвилі, c - швидкість світла. Тиск зріс в 1,5 рази з 0,1 мм рт. ст. до 0,15 мм рт. ст. і відповідно обчислена для двох ліній поглинання концентрація парів змінилася

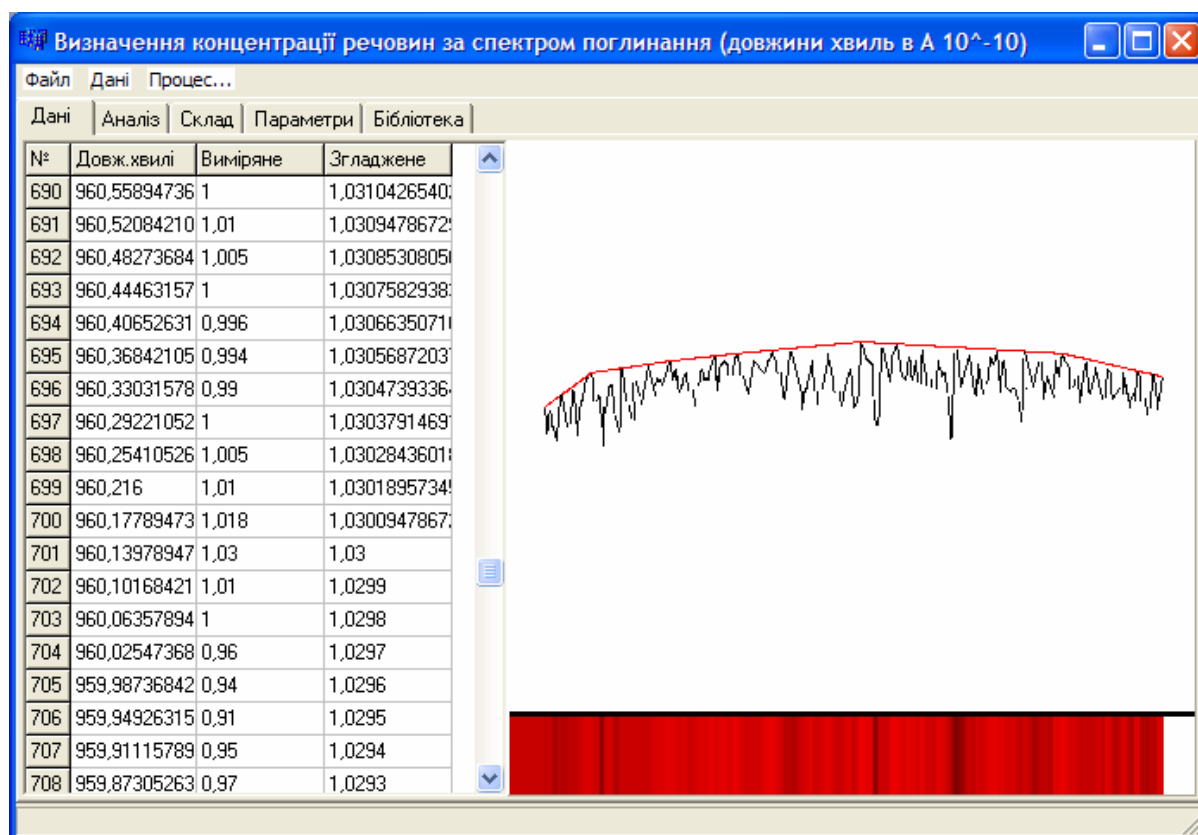
в $\frac{n'_1}{n_1} = 1,51$; $\frac{n'_2}{n_2} = 1,52$ разів.

Виміри повторювали 10 разів. Після обробки всіх результатів знайдена похибка визначення концентрацій досліджуваного газового середовища $\epsilon = 1\%$. Але це похибка при визначенні відносних концентрацій.

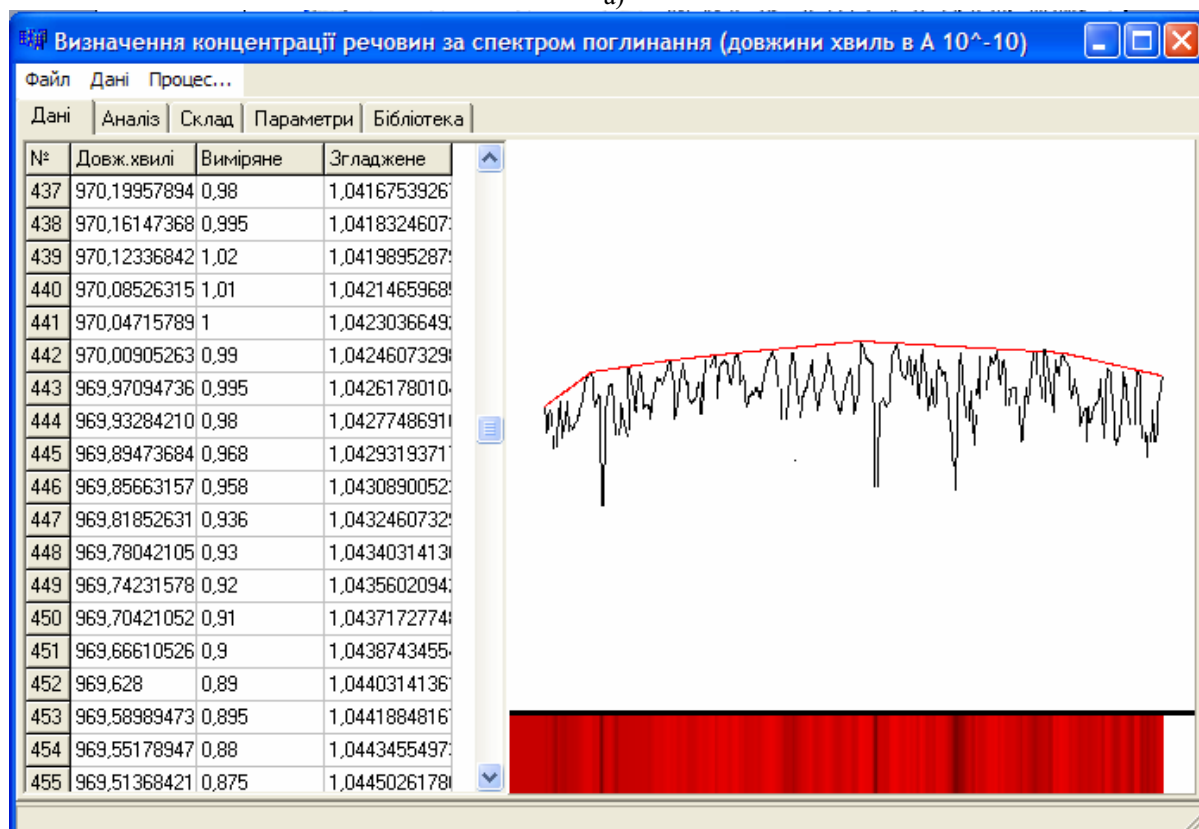
При врахуванні похибок знаходження коефіцієнта поглинання та часу T неперервної генерації багатомодового лазера на кристалі LiF в кожному імпульсі генерації загальна похибка визначення концентрації досліджуваної газової складової досягає 20%. Можна розробити шляхи удосконалення методики для зниження відносної похибки до 10%.

На рис. 3 наведено теоретичні і експериментальні залежності глибини провалу у центрі лінії поглинання від концентрації n речовини в газовому середовищі. Проведені дослідження експериментального зразка лазерної системи контролю малих концентрацій газових домішок в газових середовищах підтверджують перспективність використання таких систем в технологічних процесах, пов'язаних з газовими домішками.

Систему характеризує висока швидкість аналізу, достовірність визначення типу та концентрації газових складових.



а)



б)

Рисунок 2 - Спектр поглинання парів води при тисках: а) 0,1 мм рт. ст.; б) 0,15 мм рт. ст.

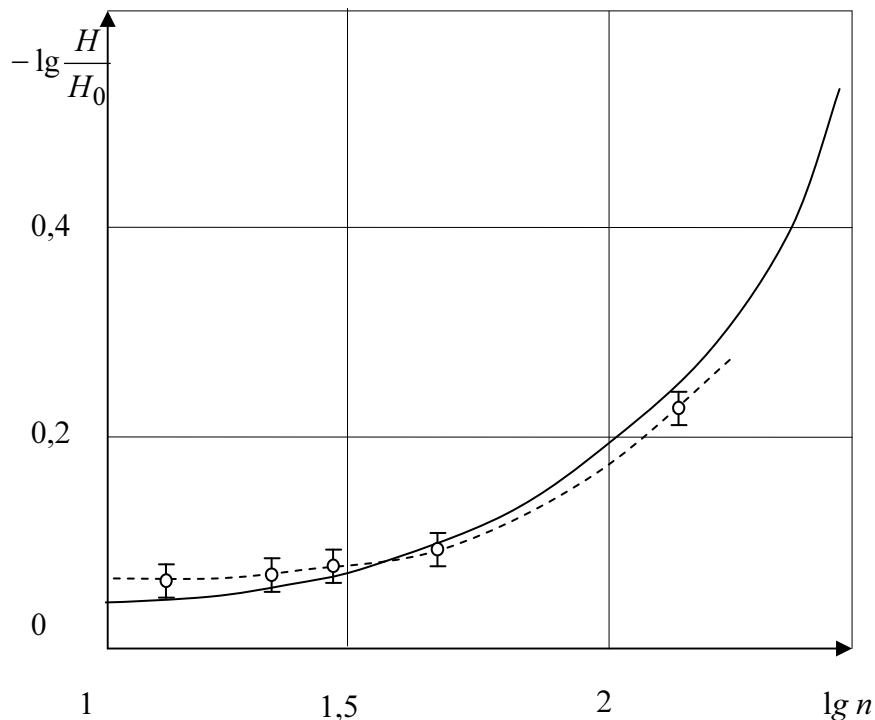


Рисунок 3 - Теоретична (—) та експериментальна (- - -) залежність відносної експозиції від концентрації n речовини в газовому середовищі

Для пояснення ефекту конденсації автори більшості робіт вводять в модель нелінійність взаємодії випромінювання з речовиною [2-4]. Суттєво, що для пояснення ефекту конденсації при наявності зовнішнього джерела періодичної модуляції коефіцієнта посилення введення нелінійності в модель не потрібно. Тому в даній роботі буде використовуватися лінійна модель.

Найбільш просто отримати рівняння моделі для кільцевого однонаправленого резонатора з тонким активним середовищем, зосередженої в одному місці. Нехай координата z відраховується від тонкого активного середовища в напрямку руху випромінювання. Поле випромінювання всередині резонатора можна вважати плоскою хвилею $E(t, z)$ (поперечна структура випромінювання не враховується). Поле випромінювання на вході і виході активного середовища буде відповідно $E(t, L)$ і $E(t, 0)$, де L - повна довжина резонатора. Як це прийнято робити в методі ВРЛС, будемо вважати, що контур посилення активного середовища набагато ширше спектра генерації і всю взаємодію випромінювання з тонким активним середовищем можна описати коефіцієнтом посилення $A(t)$ інтенсивності EE^* на один прохід:

$$E(t, 0) E^*(t, 0) = A(t) E(t, L) E^*(t, L). \quad (1)$$

В коефіцієнт посилення $A(t)$ включені всі втрати на оптичних поверхнях системи. Замість коефіцієнта посилення інтенсивності $A(t)$ зручно ввести коефіцієнт посилення напруженості поля $a(t) = \sqrt{A(t)}$, такий, що

$$E(t, 0) = a(t) E(t, L). \quad (2)$$

Рівняння руху для повільних комплексних амплітуд:

$$\frac{\partial \varepsilon_q(t)}{\partial t} = \left(\frac{\partial k(\omega)}{\partial \omega} \bigg|_{\omega=\omega_q} \right)^{-1} \left\{ \left(\frac{a_o - 1}{L} - I m k_q \right) \varepsilon_q(t) + \right. \\ \left. + \sum_{n \neq 0} \frac{a_n}{L} \varepsilon_{q-n}(t) \exp \left[i(\omega_q - \omega_{q-n} - n\Omega)t \right] \right\} \quad (3)$$

дозволяє дослідити поведінку генерації, що і буде зроблено нижче.

При чисельному моделюванні ефекту конденсації була обрана форма контуру $\sigma(\omega)$, яка відповідає умовам експериментального спостереження конденсації в [5, 6] і в цій роботі. Роль поглинаючої речовини виконували пари калію в кюветі, вставлений в резонатор лазера на розчині барвника ДОТС в диметилсульфоксиді. Лінії резонансного дублета калію ($\lambda_1 = 766,5$ нм, $\lambda_2 = 770$ нм) потрапляли в область генерації лазера. Оскільки відстань між лініями дублету істотно перевищує масштаби тієї спектральної області, в якій відбувається конденсація, при моделюванні розглядалася тільки одна лінія, а вплив сусідньої не враховувалося. Розширення лінії поглинання обумовлено як тепловим рухом, так і зіткненнями з молекулами буферного газу гелію (тиск ~ 10 мм рт. ст.). Незважаючи на те, що лоренцевське уширення (10^9 с $^{-1}$) було менше доплерівського ($6,2 \cdot 10^9$ с $^{-1}$), ми не можемо вважати контур $\sigma(\omega)$ чисто доплерівським, оскільки явища, які нас цікавлять, відбуваються в далекому крилі лінії.

Спектри $\langle H(\omega) \rangle$, обчислені для різних співвідношень між частотами $\Omega / \Delta \omega_\infty$, наведені на рис. 4. Видно, що при $\Omega / \Delta \omega_\infty \geq 1$ спектр генерації мало відрізняється від того, що відбувається в разі відсутності модуляції. Коли відношення $\Omega / \Delta \omega_\infty$ стає трохи менше одиниці, спостерігається збільшення інтенсивності генерації поблизу лінії на декілька порядків. Нарешті, при подальшому зменшенні $\Omega / \Delta \omega_\infty$, пік конденсації наближається до лінії і поступово зникає.

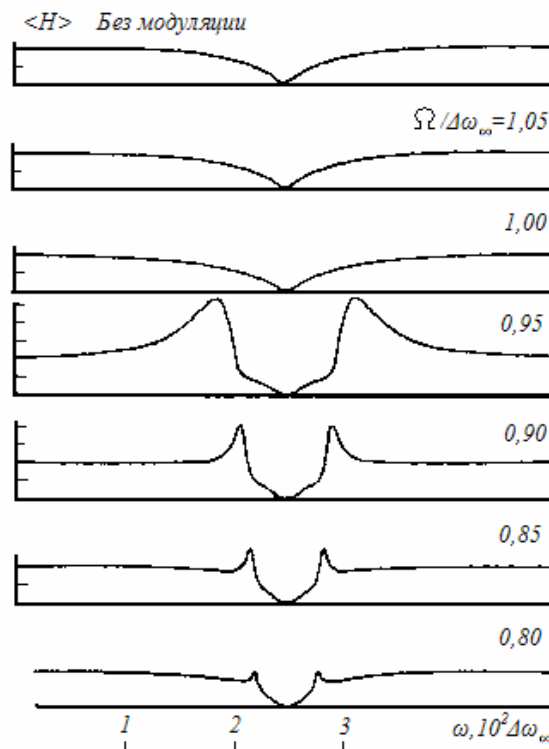


Рисунок 4 - Інтегральні спектри генерації $\langle H(\omega) \rangle$, отримані чисельним розв'язанням рівнянь моделі (3).

Масштаб по вертикалі - логарифмічний, одна маленька поділка відповідає зміні інтенсивності на порядок. У зв'язку з великою щільністю частоти окремих поздовжніх мод ω_q на графіку не показані.

Істотно, що спектральне положення піків конденсації не залежить від характеру уширення спектральної лінії. Це дозволяє визначити інтегральний перетин Σ для лінії з невідомим профілем без інтегрування по контуру. Останнє особливо істотно для вузьких спектральних ліній, ширина яких менше спектрального розділення використовуваної апаратури.

Ширина спектральної лінії практично не впливає на положення піку конденсації, але визначає можливість виникнення останньої. Якщо поглинання на частоті $\omega_{\text{конд}}$ буде занадто великим, ефект збільшення спектральної інтенсивності спостерігатися не буде. Саме цим пояснюється існування нижньої границі відношень $\Omega/\Delta\omega_{\infty}$, для якого явище ще спостерігається.

Вплив ширини лінії експериментально досліджувався в даній роботі. Ширина лінії змінювалася шляхом зміни тиску буферного газу гелію. При підвищенні тиску гелію пік конденсації зникав спочатку з однієї, а при подальшому збільшенні тиску – з обох сторін від лінії поглинання. Неодночасність зникнення піків говорить про асиметрію ударного уширення.

При достатній тривалості імпульсу генерації відбувається повна концентрація спектральної інтенсивності в області піків конденсації. Це дозволяє створити лазер, що перенастроюється, причому перебудова може здійснюватися зміною як відношення $\Omega/\Delta\omega_{\infty}$, так і концентрації поглинаючих молекул N. Генерацію безперервного лазера можна перебудовувати в межах всього контуру посилення, змінюючи частоту модуляції Ω , якщо в резонатор цього лазера вставити скло для створення хоча б невеликої дисперсії (дисперсія поблизу лінії поглинання значно сильніше).

В роботі доведено:

1) розроблена лазерна система контролю малих концентрацій газових домішок в газових атмосферах перспективна для управління технологічними процесами. Систему характеризує висока швидкість ідентифікації складу газових сумішей, достовірність визначення типу та концентрації газових складових;

2) так званий ефект «конденсації спектра», який впливає на контур лінії поглинання та похибку обчислення концентрації газових домішок, залежить від часової модуляції коефіцієнта підсилення багатомодового лазера. Дію цього ефекту можна зменшити, якщо ретельно обмежити умови виникнення модуляції.

Список літератури

1. Беликова Т.П. ЖЭТФ / Т.П. Беликова, Э.А. Свириденков, А.Ф. Сучков, Л.В. Титова, С.С. Чурилов. – 1972. – № 62 (2060).
2. Ануфрик С.С. Квантовая электроника / С.С. Ануфрик, Н.С. Зейликович, В.Г. Кукушкин, С.А. Пулькин. – 1983. – № 10 (2053).
3. Егоров В.С. Оптика и спектроскопия / В.С. Егоров, И.А. Чехонин – 1982. – № 52 (591).
4. Рубинов А.Н. Квантовая электроника / А.Н. Рубинов, М.В. Белоконов, А.В. Адамушко – 1979. – № 6 (723).
5. Баев В.М. Письма в ЖЭТФ / В.М. Баев, Т.П. Беликова, О.П. Варнавский, В.Ф. Гамалий, С.А. Коваленко, Э.А. Свириденков. – 1985. – № 42 (416).
6. Баев М.В. Кр. сообщ. по физике / М.В. Баев, В.Ф. Гамалий, З.А. Свириденков, Д.Д. Топтыгин. - ФИАН, – 1986. – № 8 (6).
7. Беликова Т.П. Квантовая электроника / Т.П. Беликова, Э.А. Свириденков, А.Ф. Сучков. – 1974. – № 1 (830).
8. McDuff O.P. IEEE J. / O.P. McDuff, S.E. Harris. – 1967. – № QE-3 (101).
9. G.H.C. New. Rep. Prog. Phys. – 1983. – № 46 (877).

В.Ф.Гамалий, С.И.Осадчий, М.В.Якорева

Исследование макета автоматизированной лазерной системы контроля малых концентраций примесей в газовых средах

Проведено исследование достоверности результатов измерения малых концентраций примесей в газах.

V.Gamaliy, S.Osadchiy, M.Yakoreva

The research prototype automated laser control system of small concentrations of impurities in the gas

A study of the reliability of the results of measurement of low concentrations of impurities in gases.

Одержано 20.03.12

УДК 622.788: 622.7.09.002

В.О. Кондратець, проф., канд. техн. наук, А.М. Мацуй, канд. техн. наук, В.О. Шалімов, доц., канд. техн. наук, О.А. Лисенко, магістр
Кіровоградський національний технічний університет

Розробка та дослідження САК струмовим режимом при вимірюванні вмісту магнітного заліза в пробах

У статті обґрунтована принципова схема і вимоги до якості системи автоматичного керування струмовим режимом приладу для вимірювання вмісту магнітного заліза у сипких здрібнених матеріалах. Показано, що її доцільно реалізувати як систему змінного струму, яка може бути побудованою з уніфікованих елементів. Визначено тип і параметри коректуючого пристрою змінного струму, який забезпечує необхідні показники якості керування.

струмовий режим, вміст магнітного заліза, коректуючий пристрій, перехідні процеси, якість керування

Зважаючи на те, що більш багата на залізо металургійна сировина ефективніше переробляється, а вміст корисного компонента в рудах все більше зменшується, виникає необхідність в збагаченні руд, які добувають як відкритим, так і підземним способом. При цьому виникає необхідність у визначенні вмісту магнітного заліза в рудах, що направляються на збагачення з кар'єрів і шахт. Така ж задача стоїть при відлагодженні та контролі за ходом технологічного процесу на магнітозбагачувальних фабриках. Відсутність ефективних засобів вимірювання вмісту магнітного заліза приводить до значного перевитрачання на транспортування, подрібнення та збагачення руд, що не відповідає вимогам законодавства України про ресурсозберігаючі технології в промисловості та основним положенням Державної науково-технічної програми "Ресурсозберігаючі технології нового покоління в гірничо-металургійному комплексі". Тема даної статті є актуальною, оскільки вона спрямована на розв'язання задачі ресурсозбереження в металургійній галузі. Матеріали даної публікації отримані в результаті виконання науково-дослідної роботи "Система комп'ютерної ідентифікації співвідношення тверде/рідке при подрібненні пісків класифікатора" (державний реєстраційний номер 0107U005470).

© В.О. Кондратець, А.М. Мацуй, В.О. Шалімов, О.А. Лисенко, 2012