

УДК 621.373:826.038.823

В.М. Бакуменко<sup>1</sup>, С.В. Петров<sup>1</sup>, П.С. Шпак<sup>1</sup>, О.І. Солонець<sup>2</sup><sup>1</sup>Українська інженерно-педагогічна академія, Харків<sup>2</sup>Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ВИЗНАЧЕННЯ РЕЛАКСАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ СУБМІЛІМЕТРОВИХ ЛАЗЕРІВ З ОПТИЧНИМ НАКАЧУВАННЯМ

В роботі запропонована методика визначення релаксаційних параметрів субміліметрових лазерів з оптичним накачуванням при дослідженні перехідного процесу сигналу на виході лазера при східчастому сигналі накачування на вході. Методика дозволяє уникнути систематичної похибки, пов'язаної з сигналом накачування, пропорційної швидкості накачування (або інтенсивності накачування). Показані особливості використання даної методики для молекул типу симетричної дзиги на прикладі молекули  $\text{CH}_3\text{Br}$  та несиметричної дзиги на прикладі молекули  $\text{HCOOH}$ .

**Ключові слова:** субміліметровий лазер, релаксаційні параметри.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Для визначення коливальної релаксації  $\Gamma$  субміліметрових лазерів з оптичним накачуванням (СММЛОН) найчастіше використовується метод дослідження перехідного процесу сигналу на виході лазера при східчастому сигналі накачування на вході [1]. Перевагами цього методу є простота, достатньо високе відношення сигнал/шум, а також можливість проводити вимірювання в тих же умовах, в яких молекула, що досліджується, використовується в якості робочої речовини лазера. Недоліком методу є систематична похибка, пропорційна швидкості накачування (або інтенсивності накачування).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [2] проаналізовано вихідні характеристики СММЛОН на молекулах  $\text{HCOOH}$ . В роботі [3] проаналізовано напрямки використання висококогерентного субміліметрового (СММ) випромінювання, які в значній мірі залежать від характеристик СММ лазера та набору СММ елементів, необхідних для різних застосувань. Проведено експериментальні дослідження параметрів СММЛОН при зміні активного середовища, залежність потужності генерації лазера від параметрів середовища та резонатора, а також від частотних характеристик останнього.

**Формулювання мети статті.** Метою статті є розробка методики визначення релаксаційних параметрів субміліметрових лазерів з оптичним накачуванням з урахуванням систематичної похибки, пов'язаної з швидкістю накачування.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Аналіз релаксаційних процесів у лазері при східчастому накачуванні, проведений на основі спрощеної моделі робочої молекули [1] показує, що вихідна потужність субміліметрового лазера (пропорційна різниці населеностей рівнів  $n_2$  і  $n_3$ , що

знаходяться в коливальному стані  $N_6$  і між якими відбувається субміліметровий перехід) може бути представлена у виді постійної складової та компонент, що спадають по експоненціальному закону. Швидкість загасання компонент залежить від характеру різноманітних релаксаційних процесів. Складаюча, що визначає процес, обумовлений коливальною релаксацією, може бути представленою у виді  $A_1 e^{-\lambda_1 t}$ , де початкове значення  $A_1$  і швидкість загасання  $\lambda_1$  знаходяться з формул:

$$A_1 = \frac{f_1(f_2 - f_3)Nw}{\lambda_1(1 + \alpha)} \chi; \quad (1)$$

$$\lambda_1 = \Gamma + \Delta\Gamma, \quad (2)$$

де  $f_1$ ,  $f_2$  і  $f_3$  – відносні населеності лазерних рівнів  $n_1$ ,  $n_2$  і  $n_3$ ;  $N$  – загальна кількість молекул газу;  $w$  – швидкість накачування;

$$\chi = 1 - \frac{N_3^0 \lambda_1}{f_1 N w}; \quad (3)$$

$$\alpha = \Gamma_{36} / \Gamma_{63}; \quad (4)$$

$$\Delta\Gamma = f_1 w (1 + \Gamma_{36} / (\Gamma_{63} + \Gamma_{36})), \quad (5)$$

де  $\Gamma_{63}$  – швидкість переходу із стану  $\nu_6$  в стан  $\nu_3$ ;  $\Gamma_{36}$  – швидкість зворотного переходу;  $N_3^0$  – початкова населеність стану  $N_3$ .

З урахуванням того, що

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{\text{диф}}}{p} + \Gamma_{V-T} \cdot p; \quad (6)$$

$$w = w_0 / p, \quad (7)$$

де  $\Gamma_{\text{диф}}$  – швидкість дифузії;  $\Gamma_{V-T}$  – швидкість коливально-поступальної релаксації;  $w_0$  – швидкість накачки при заданому тиску, вираз для  $\chi$  матиме вигляд:

$$\chi = 1 - \frac{N_3^0}{f_1 N} \times \frac{\Gamma_{\text{диф}} + \Gamma_{V-T} \cdot p^2}{w_0}. \quad (8)$$

Для аналізу виразу (8) необхідно розглянути два граничних випадки.

Якщо

$$\Gamma_{V-T} \cdot p \gg \frac{\Gamma_{\text{диф}}}{p}, \quad (9)$$

тобто процеси зіткнення переважають над дифузійними, рівняння (8) приймає вигляд:

$$\chi = 1 - \frac{N_3^0}{f_1 N} \times \frac{\Gamma_{V-T} \cdot p^2}{w_0}. \quad (10)$$

З рівняння (10) можна визначити  $w_0$ . Для цього необхідно отримати експериментальні залежності  $\lambda_1(p)$  та  $A_1(p)$ . З останньої залежності визначається значення  $p$ , при якому  $A_1(p) = 0$ , та використовується для визначення  $\lambda_1$  з першої залежності. Отримане значення підставляється замість  $\Gamma_{V-T}$  в рівняння (10) для визначення  $w_0$  і потім  $\Delta\Gamma$ . Така методика використовувалась при визначенні релаксаційних параметрів молекули  $\text{CH}_3\text{Br}$ .

При протилежному знаку в нерівності (9), тобто у випадку переваги дифузії над процесами зіткнень вираз (8) приймає вигляд:

$$\chi = 1 - \frac{N_3^0}{f_1 N} \frac{\Gamma_{\text{диф}}}{w_0}. \quad (11)$$

Аналіз залежності (11) показує, що  $\chi$  не залежить від  $p$ , і, відповідно, залежність  $A_1(p)$  не проходить через нуль. Така ситуація має місце для більшості переходів молекули  $\text{HCOOH}$ . Методика визначення  $w_0$  в цьому випадку описана далі. Підставляючи  $w_0$ , яке отримано з виразу (11) при  $\chi = 0$ , в рівняння (2) і розв'язуючи останнє відносно  $\Gamma_{\text{диф}}$ , можна отримати:

$$\Gamma_{\text{диф}} = \lambda_{10} \left( 1 - \left( 1 - \alpha (1 + \alpha) N_3^0 / N \right) \right), \quad (12)$$

де  $\lambda_{10}$  – значення  $\lambda_1$  при  $A_1 = 0$ .

**Аналіз результатів досліджень для молекули  $\text{CH}_3\text{Br}$ .** На рис. 1 наведені осцилограми вихідного сигналу лазера на переході  $P_{3(22)}$  (в коливальному стані  $\nu_6$ ) молекули  $\text{CH}_3\text{Br}$  (довжина хвилі 715,4 мкм) при східчастому накачуванні  $\text{CO}_2$ -лазером, що працював на переході R 14 (довжина хвилі 10,28 мкм) з вихідною потужністю 10 Вт [1]. Для сигналів, які спостерігались, характерними являлись 2 режими.

Для першого з них (рис. 1, а), тиск 3,5 Па, три-

валість розгортки 0,5 мс/под., чутливість 2 мВ/под.) після зростаючої ділянки, яка визначається швидкістю зростання переднього фронту імпульсу підкачування, спостерігалось спадання сигналу до стаціонарного значення спочатку з більшою швидкістю, а потім з меншою.

Для іншого режиму (рис. 1, б), тиск 13,3 Па, тривалість розгортки 0,5 мс/под., чутливість 5 мВ/под.) остання ділянка являлась не спадаючою, а зростаючою. Перехід від одного режиму до іншого здійснювався шляхом збільшення тиску або зменшення потужності накачування. При даній потужності накачування лазерна генерація спостерігалась в діапазоні тисків 3...16 Па; при цьому перехід від одного режиму до іншого, що характеризується присутністю тільки першої ділянки, відбувався при тиску  $p = 8$  Па.

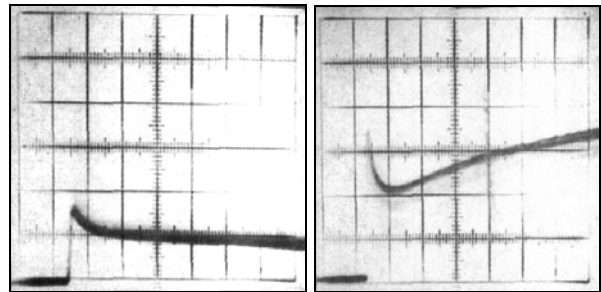


Рис. 1. Осцилограма вихідного сигналу лазера на переході  $P_{3(22)}$  молекули  $\text{CH}_3\text{Br}$

при різних режимах:

- а – тиск 3,5 Па, тривалість розгортки 0,5 мс/под., чутливість 2 мВ/под.;  
б – тиск 13,3 Па, тривалість розгортки 0,5 мс/под., чутливість 5 мВ/под.

Визначаючи швидкість загасання повільної компоненти  $\lambda_1$  при тиску  $p = 8$  Па, і використовуючи отриману величину для визначення  $w$  з (10), а потім  $\Delta\Gamma$ , знаходиться швидкість коливальної релаксації  $\Gamma$ , яка вже не утримує в собі систематичної похибки, зумовленої сигналом накачування. Відповідно з методикою, представленою в роботі [1]:  $\Gamma_{V-T} = 0,045$  Па/мс,  $\Gamma_{\text{диф}} = 0,53$  Па/мс.

**Аналіз результатів досліджень для молекули  $\text{HCOOH}$ .** На рис. 2 наведені осцилограми вихідного сигналу лазера на молекулах  $\text{HCOOH}$ .

З наведених осцилограм знаходилась швидкості загасання, які для різних переходів складали:  $(2,65 \pm 0,15)$  кПа/с для переходу 398,6 мкм;  $(2,35 \pm 0,13)$  кПа/с для переходу 742,6 мкм;  $(2,08 \pm 0,20)$  кПа/с для переходу 669,5 мкм.

При однаковій потужності сигналу накачування в зв'язку з різним коефіцієнтом поглинання цього сигналу у субміліметровій комірці швидкість накачування для кожного з переходів різна, тому різ-

ними являються і швидкості загасання.

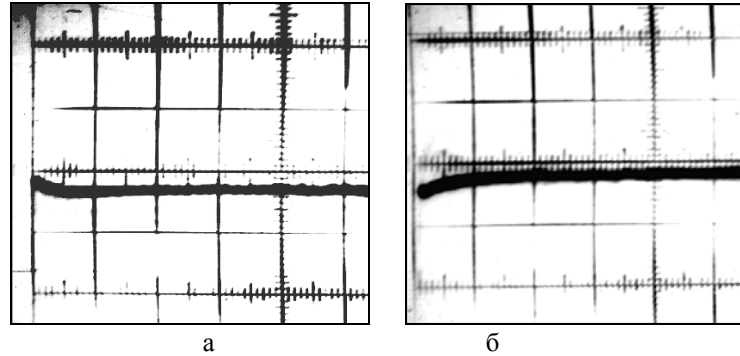


Рис. 2. Осцилограми вихідного сигналу лазера при тиску 5 Па для переходів: а – 669,5 мкм; б – 742,6 мкм

Для виключення похибки, пов'язаної з швидкістю накачування, для кожного з переходів вимірювались залежності  $A_1(p)$  для побудови  $A_1(\lambda_{10})$  (рис. 3). З цієї залежності знаходилась величина  $\lambda_{10}$  (при  $A_1 = 0$ ), що підставлялась в вираз (12). Після корекції результату були знайдені швидкість дифузії  $\Gamma_{\text{диф}} = (1,96 \pm 0,15)$  кПа/с і швидкість коливальної релаксації  $\Gamma_{V-T} = (40 \pm 0,4)$  Па/с.

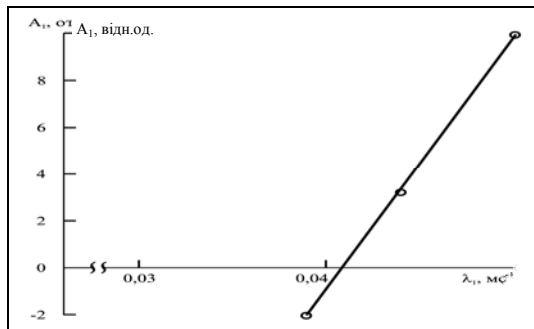


Рис. 3. Залежність початкового значення перехідного процесу  $A_1$  від швидкості загасання

## ВИСНОВКИ

Запропонована методика визначення релаксаційних параметрів субміліметрових лазерів з оптич-

ним накачуванням при дослідженні перехідного процесу сигналу на виході лазера при східчастому сигналі накачування на вході дозволяє уникнути систематичної похибки, пов'язаної з сигналом накачування, пропорційної швидкості накачування (або інтенсивності накачування).

Показані особливості використання даної методики для молекул типу симетричної дзиги на прикладі молекули  $\text{CH}_3\text{Br}$  та несиметричної дзиги на прикладі молекули  $\text{HCOOH}$ .

## Список літератури

1. Бакуменко В.М. Исследование релаксационных характеристик  $\text{CH}_3\text{Br}$ -лазера с оптической накачкой / В.М. Бакуменко, Л.Д. Фесенко, А.С. Шевырев // Известия вузов. Радиофизика. – 1987. – Т. 30, № 8. – С. 973-979.
2. Определение релаксационных параметров молекулы  $\text{HCOOH}$  / В.М. Бакуменко, Л.Д. Фесенко, А.В. Бакуменко, Н.Ю. Шумейко // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – Х.: ХГТУРЭ, 1998. – Вып. 105. – С. 176-182.
3. Экспериментальное исследование волноводного субмиллиметрового лазера с оптической накачкой / Г.Н. Грачев, В.Ф. Захарьяш, В.М. Клементьев, А.Г. Хамоян // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 28, № 2. – С. 147-150.

Надійшла до редколегії 10.11.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.В. Голкін, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ЛАЗЕРОВ С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ

В.М. Бакуменко, С.В. Петров, П.С. Шпак, О.І. Солонець

В работе предложена методика определения релаксационных параметров субмиллиметровых лазеров с оптической накачкой при исследовании переходного процесса сигнала на выходе лазера при ступенчатом сигнале накачивания на входе. Методика позволяет избежать систематической ошибки, связанной с сигналом накачки, пропорциональной скорости накачки (или интенсивности накачки). Показаны особенности использования данной методики для молекул типа симметричной юлы на примере молекулы  $\text{CH}_3\text{Br}$  и несимметричной юлы на примере молекулы  $\text{HCOOH}$ .

**Ключевые слова:** субмиллиметровый лазер, релаксационные параметры.

## DETERMINATION OF RELAXATIONS PARAMETERS OF SUBMILLIMETER LASERS WITH OPTICAL PUMPING

V.M. Bakumenko, S.V. Petrov, P.S. Shpak, O.I. Solonets

The method of determination of relaxations parameters of submillimeter lasers with the optical pumping is in-process of being researched at research of transient of signal on the output of laser at the step signal of pumping on an entrance. A method allows to avoid a bias error, related to the signal of pumping, proportional speed of pumping (or pumping intensities). The features of the use of this method are retined for the molecules of type of symmetric top on the example of molecule of  $\text{CH}_3\text{Br}$  and asymmetrical top on the example of molecule of  $\text{HCOOH}$ .

**Keywords:** submillimeter laser, relaxations parameters.