

А.И. Жилиба

ПРЕДЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ АБСОРБЦИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Показано, что предельная чувствительность рассматриваемого абсорбционного спектрометра в два раза выше по сравнению со спектрометром, в котором основной источник шума — пуассоновский шум потока зондирующих лазерных фотонов (естественные флуктуации интенсивности).

Предельная чувствительность и точность измерительных устройств, использующих лазеры, определяются уровнем естественных флуктуаций интенсивности. В [1–3] зарегистрировано подавление шума фототока ниже дробового уровня в замкнутой оптоэлектронной системе, включающей лазер с отрицательной обратной связью. В связи с этим необходимо рассмотреть возможности применения данной оптоэлектронной системы, например, в качестве основы для абсорбционного спектрометра.

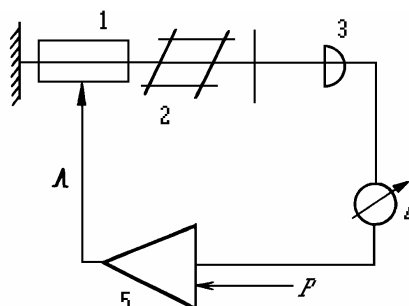


Рис. 1. Принципиальная схема спектрометра: 1 — перестраиваемый лазер; 2 — поглощающая ячейка; 3 — фотодетектор; 4 — регистрирующее устройство; 5 — дифференциальный усилитель

Определим предельную чувствительность абсорбционного спектрометра на базе оптоэлектронной системы с обратной связью фотоприемник — накачка (рис. 1). Для этого рассмотрим трехуровневую модель работы лазера (рис. 2). Основная особенность схемы возбуждения и генерации активной среды лазера; каждый фотоэлектрон накачки разменивается на фотон индуцированного излучения; релаксация с уровня 3 на уровень 1 отсутствует. Будем описывать поведение фотонов и фотоэлектронов следующей системой стохастических скоростных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{n} &= -Cn + p - qC_{\text{out}}n + F; \\ i &= qC_{\text{out}}n + f, \end{aligned} \quad (1)$$

где n — плотность числа фотонов в резонаторе лазера; i — фототок; C — скорость выхода фотона из резонатора лазера; $p - C_{\text{out}}n = \Lambda$ — результирующая накачка атомов активной среды лазера, где p — внешняя накачка; q — квантовая эффективность фотоприемника; C_{out} — скорость прибытия фотонов на фотоприемник; F, f — случайные ланжевеновские силы. Согласно корпускулярной теории фотодетектирования уравнения (1) дополняются корреляционным соотношением [4] $\langle f(0)f(\tau) \rangle = qC_{\text{out}}\bar{n}\delta(\tau)$.

Если бы все генерируемые лазерные фотоны без потерь достигали фотодетектор и со стопроцентной эффективностью разменивались на фотоэлектроны, т. е. $C = C_{\text{out}}$, $q = 1$, а также отсутствовали потери фотоэлектронов в цепи обратной связи, то существовало бы балансное соотношение

$$\bar{n} + i = p - Cn. \quad (2)$$

Подобное балансное соотношение возникает и при изучении статистики фотонов, генерируемых лазером с регуляризованной накачкой [5]. При вышеоговоренных условиях случайные силы в уравнениях (1) связаны соотношением $F_0 = -f_0$. Ноль в индексе F, f подчеркивает, что это соотношение верно

только в определенных выше приближениях. Это обстоятельство позволяет нам в описании поведения фотонов и фотоэлектронов использовать следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{n} &= -(C + qC_{\text{out}})n + p - f_0 + f_1; \\ i &= qC_{\text{out}}n + f_0 + f_2 + f_3; \\ \langle f_0(0)f_0(\tau) \rangle &= qC_{\text{out}}\bar{n}\delta(\tau). \end{aligned} \quad (3)$$

Отметим, что при $C_{\text{out}} = C$, $q = 1$ следует, что $f_1 = f_2 = 0$.

В конечном итоге нас интересует чувствительность данного абсорбционного спектрометра. Для этого на основе (3), после линеаризации, найдем спектр мощности фототока

$$\begin{aligned} \langle (\delta i)^2 \rangle_{\Omega} &= qC_{\text{out}}\bar{n} \left\{ 1 + \frac{C_{\text{out}}^2 + \alpha}{\Omega^2 + (C + qC_{\text{out}})^2} \right. \\ &\left. - 2C_{\text{out}} \frac{C + qC_{\text{out}}}{\Omega^2 + (C + qC_{\text{out}})^2} + (1 - q) + \langle f_3^2 \rangle / qC_{\text{out}}\bar{n} \right\} \Delta f, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\alpha \equiv (\text{Im} \kappa \text{cth} \hbar\omega / 2\kappa_B T) / qC_{\text{out}}\bar{n}$.

Коррелятор $\langle f_1(0)f_1(\tau) \rangle_{\Omega}$ определяется из флуктуационно-диссипационной теоремы [6], которая связывает этот коррелятор с коэффициентом поглощения $\Delta C \equiv \text{Im} \kappa$ и средним числом тепловых фотонов $\text{cth} \hbar\omega / 2\kappa_B T$ соотношением

$$\langle f_1(0)f_1(\tau) \rangle_{\Omega} = \text{Im} \kappa \text{cth} \hbar\omega / 2\kappa_B T.$$

Случайная сила f_2 учитывает источник шума, связанный с неидеальностью фотодетектора $q < 1$. Корреляционные свойства для f_2 следующие: $\langle f_2(0)f_2(\tau) \rangle = q(1 - q)C_{\text{out}}\bar{n}\delta(\tau)$, [7].

Последнее слагаемое в (4) отражает тепловой шум фототока.

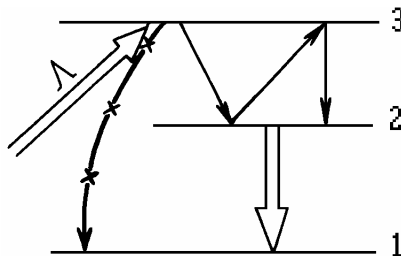


Рис. 2. Схема возбуждения и генерации рабочих уровней лазера

Отклик фототока на стационарное ослабление потока фотонов, прошедших через поглощающую ячейку, имеет следующий вид:

$$\langle \delta i \rangle_{\Omega=0}^2 = \eta \frac{q^2 C_{\text{out}}^2 \bar{n}^2}{1 + q\beta}, \quad (5)$$

где $\eta \equiv (\Delta C / C)^2$, $\beta = C_{\text{out}} / C$. На основе (4) и (5) найдем минимально обнаруживаемое значение η_{min} из условия сигнал/шум = 1:

$$\eta_{\text{min}} = \left[\left(\frac{[1(1 - \beta) + q\beta]^2}{1 + q\beta} + \frac{\alpha/C^2}{1 + q\beta} \right) / (qC_{\text{out}}\bar{n}) \right] + [(1 - q) + \langle f_3^2 \rangle / qC_{\text{out}}\bar{n}] (1 + q\beta) / qC_{\text{out}}\bar{n} \Delta f. \quad (6)$$

Из (6) следует, что наибольшая чувствительность спектрометра будет при следующих параметрах оптоэлектронной схемы: $q = 1$, $\beta = 1$ и условии: $2\langle f_3^2 \rangle / qC_{\text{out}}\bar{n} \ll 1$, $2\alpha/C^2 \ll 1$.

Таким образом, предельная чувствительность анализируемого спектрометра в два раза выше по сравнению со спектрометром, где основной источник шума — это шум идеального лазера (пуассоновский шум фотонов).

В заключение отмечу, что вопрос о предельно обнаруживаемом значении поглощения в абсорб-

ционном спектрометре на основе лазера с отрицательной обратной связью обсуждался в [8], на основе других предположений при записи исходных соотношений.

1. Machida S., Yamamoto Y. // Opt. Commun. 1986. V. 57. P. 270.
2. Yamamoto Y., Imoto N., Machida S. // Phys. Rev. 1986. V. 33. P. 3243.
3. Фофанов Я.А. // РЭ. 1988. Т. 33 С. 177; Квантовая электроника. 1989. Т. 12. С. 2593.
4. Александров Е.Б., Голубев Ю.М., Ломакин А.В., Носкин В.А. // УФН. 1983. Т. 104. С. 547.
5. Голубев Ю.Н., Соколов И.В. // ЖЭТФ. 1984. Т. 87. P. 408.
6. Callen H.B., Welton T.A. // Phys. Rev. 1951. V. 83. P. 34.
7. Трошин А.С. // Оптика и спектроскопия. 1991. Т. 70. Вып. 3. P. 662.
8. Чурнсайнд Дж.Х., Гордов Е.П. // Оптика атмосферы. 1991. Т. 5. № 2. С. 131.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
6 декабря 1991 г.

A.I. Zhiliba. Limiting Sensitivity of an Absorption Spectrometer Based on the Use of an Optoelectronic System with a Negative Feedback.

It is shown in this paper that the limiting sensitivity of the absorption spectrometer under consideration is two times higher than that of a spectrometer in which the main source of noise is the Poisson noise of a laser photons flux (natural fluctuations of the intensity).