

## R/S АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННОГО СО-ЛАЗЕРА

© 2007 Э.Е. Венцлавович, В. С. Казакевич

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Впервые проведен R/S анализ временных рядов импульсов излучения электроионизационного СО-лазера с резонаторами различных типов. Показано что параметр Херста не зависит от энерговклада, длины волны импульса излучения, но зависит от состава рабочей смеси лазера. Использование данного метода должно позволить усовершенствовать математическую модель лазера на окиси углерода.

### Введение

Отличительной особенностью электроионизационного СО-лазера (СО-ЭИЛ) являются его высокие выходные энергетические характеристики и богатый спектр излучения. Вместе с тем СО-ЭИЛ – сложная для анализа система, отличающаяся многообразием взаимосвязанных процессов, которые определяют динамику его излучения. Среди созданных к настоящему времени газовых лазеров, электроионизационные СО-лазеры (СО-ЭИЛ) обладают наибольшими КПД генерации (~ 35-45%) и удельными энергозатратами (до 150-200 Дж/л-Амага). До настоящего времени исследование СО-ЭИЛ проводилось либо экспериментально, либо путем численного расчета при использовании существующей модели. Однако наличие в этой модели большого количества взаимозависимых параметров молекулы СО делают такой расчет достаточно приближенным. В данной работе предлагается использовать метод R/S - анализа, позволяю-

щий объединить два этих подхода.

### Эмпирический закон Херста

Свой эмпирический закон гидрогеолог Харольд Эдвин Хёрст открыл, занимаясь изучением особенностей водного баланса Нила. Впоследствии оказалось, что многие другие природные явления хорошо описываются этим законом [1].

Суть закона Херста состоит в следующем. Предположим, мы изучаем некий природный процесс  $Z(t)$ , зависящий от времени  $t$ .

Разобьем все время наблюдения на ряд  $i$  ( $i=0,1,2,3...N$ ) временных интервалов длительностью  $\Delta t$ . Тогда  $Z=Z(i)$  есть временной ряд этого процесса (рис.1). Найдем, согласно Херсту, среднее значение величины  $Z$ .

$$\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N Z_i. \quad (1)$$

Затем определим величину  $X(i,N)$  отклонения от среднего значения



Рис. 1. Временной ряд процесса

$$X(i, N) = \sum_{j=0}^i (Z_j - \bar{Z}). \quad (2)$$

Далее определим величину  $R$ , которая носит название максимального размаха исследуемого ряда

$$R = \max \left( X \left( \frac{i}{N} \right) \right) - \min \left( X \left( \frac{i}{N} \right) \right) \quad (3)$$

и среднее квадратичное отклонение наблюдений

$$S = \frac{\sqrt{\sum (Z_i - \bar{Z})^2}}{N}. \quad (4)$$

Как показал Херст, для многих природных явлений справедливо следующее равенство

$$\frac{R}{S} = N^H, \quad (5)$$

где величина  $H$ , впоследствии названная показателем Херста, может меняться от 0 до 1.

Показатель Херста, определяемый как

$$H = \frac{\lg \left( \frac{R}{S} \right)}{\lg(N)}, \quad (6)$$

где  $R$  – максимальный размах исследуемого ряда;  $S$  – СКО наблюдений;  $n$  – количество наблюдений, служит удобной мерой устойчивости статистического явления.

### Показатель Хёрста

Если показатель Херста принимает значения  $0 < H < 1$ , но не равен 0,5, то ряд является фракталом, поведение которого существенно отличается от случайных блужданий при  $H = 0,5$  [2].

Для процесса с  $H > 0,5$  тенденция к увеличению в прошлом означает тенденцию к увеличению в будущем. И наоборот, тенденция к уменьшению в прошлом означает, в среднем, продолжение уменьшения в будущем. Такой процесс называется персистентным.

При  $H=0,5$  никакой выраженной тенденции процесса не проявляется, и нет оснований считать, что она появится в будущем.

Случай  $H < 0,5$  характеризуется антиперсистентностью – рост в прошлом означает уменьшение в будущем, а тенденция к уменьшению в прошлом делает вероятным увеличение в будущем.

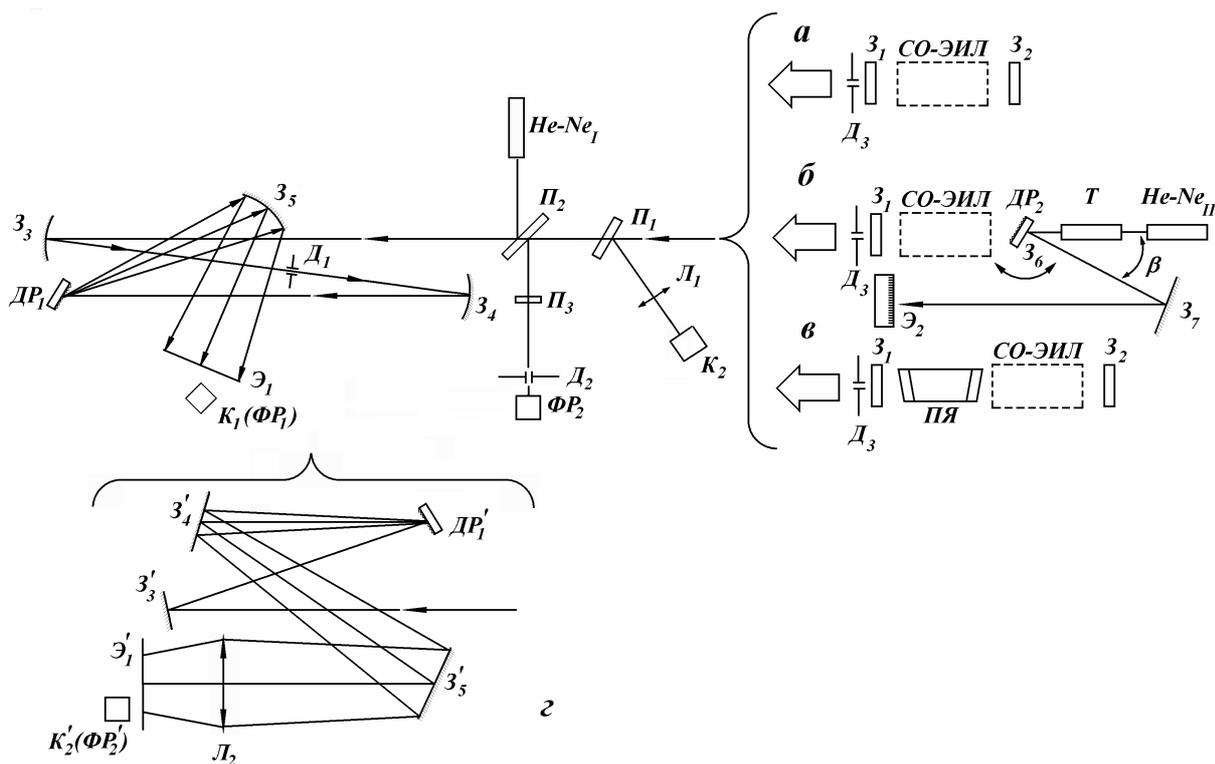
Этот подход и был использован при исследовании временных рядов излучения импульсного электроионизационного СО-лазера.

### Методика эксперимента

Экспериментальные исследования излучения импульсного электроионизационного СО-лазера проводились на установке, основой которой являлся охлаждаемый до криогенных температур импульсный СО-ЭИЛ-С лазер [4]. В экспериментах использовался либо неселективный резонатор лазера, либо селективный резонатор, одним из элементов которого была отражательная дифракционная решетка ( $ДР_2$ ,  $t=0,01$  мм, угол блеска  $\alpha_0 = 30^\circ$ ) (рис. 2 (а-г)). В ходе работы измерялись спектрально-временные и энергетические характеристики излучения СО-ЭИЛ. Спектрограф для измерений строился по известной схеме Эберта [5].

Излучение лазера, проходя через плоскопараллельные пластины  $П_1$  и  $П_2$  из  $CaF_2$  и последовательно отражаясь от сферических зеркал  $З_3$  ( $R=2000$  мм) и  $З_4$  ( $R=3000$  мм), образующих вместе со щелью  $Д_1$  коллиматор, падало на дифракционную решетку  $ДР_1$  ( $t=0,01$  мм, угол блеска  $\alpha_0 = 30^\circ$ ), образуя угол  $\theta = 24,29^\circ$  с нормалью к плоскости решетки. Дифрагированные лучи с помощью зеркала  $З_5$  ( $R=3000$  мм), фокусировались на экран  $Э_1$ , где для измерения абсолютного значения энергии излучения на отдельных колебательно-вращательных переходах молекулы СО или регистрации формы импульса излучения устанавливались либо калориметр  $К_1$ , либо охлаждаемый жидким азотом фоторезистор  $ФР_1$  на основе  $He: Au$  (временное разрешение  $\sim 10^{-7}$  сек). Часть энергии излучения, отраженная от граней пластины  $П_1$  и сфокусированная линзой  $Л_1$  на калориметр  $К_2$  (аналогичный калориметру  $К_1$ ), позволяла судить о полной энергии излучения электроионизационного СО-лазера. Форма импульса излучения СО-ЭИЛ регистрировалась фоторезистором  $ФР_2$  (аналогичным  $ФР_1$ ).

Юстировка оптических элементов схемы и зеркал резонатора лазера осуществлялась с помощью гелий-неонового лазера  $He-Ne_1$ , излучение которого пластиной  $П_2$  заводилось в спектральную часть схемы, а последовательным отражением от плоскости  $П_2$  и  $П_4$  направлялось в резонатор лазера [6].



**Рис. 2.** Принципиальная схема измерения спектрально-временных характеристик излучения импульсного СО-ЭИЛ:

а – СО-ЭИЛ с неселективным резонатором; б – СО-ЭИЛ с селективным резонатором (дифракционная решетка); в – СО-ЭИЛ с селективным резонатором (поглощающая водяная ячейка); г – спектральная схема с разрешением  $\sim 4\text{ см}^{-1}$

### Результаты и анализ полученных данных

В результате выполнения экспериментов были получены временные характеристики излучения импульсного СО-ЭИЛ для разных газовых смесей и с резонаторами различных типов.

Ряд осциллограмм импульсов излучения представлен на рис. 3.

Для получения временных рядов излучения проводилась оцифровка осциллограмм с помощью программы Graph Digitizer 1.8. Определение показателя Хер-

	Селективный резонатор, Qвкл=490Дж/л× Амага 12 → 11(P14) $\lambda = 1800,43\text{ см}^{-1}$		Селективный резонатор, Qвкл=490Дж/л× Амага 14 → 13(P14) $\lambda = 1750,23\text{ см}^{-1}$
	Селективный резонатор, Qвкл=500Дж/л× Амага 12 → 11(P19) $\lambda = 1780,3\text{ см}^{-1}$		Неселективный резонатор, Qвкл=410Дж/л× Амага 10 → 9(P10) $\lambda = 1870,7\text{ см}^{-1}$

**Рис. 3.** Форма импульсов излучения СО-ЭИЛ для резонаторов различных типов для смеси СО: N2 - 1:9, N=0,5 Амага, развертка 25мкс/дел

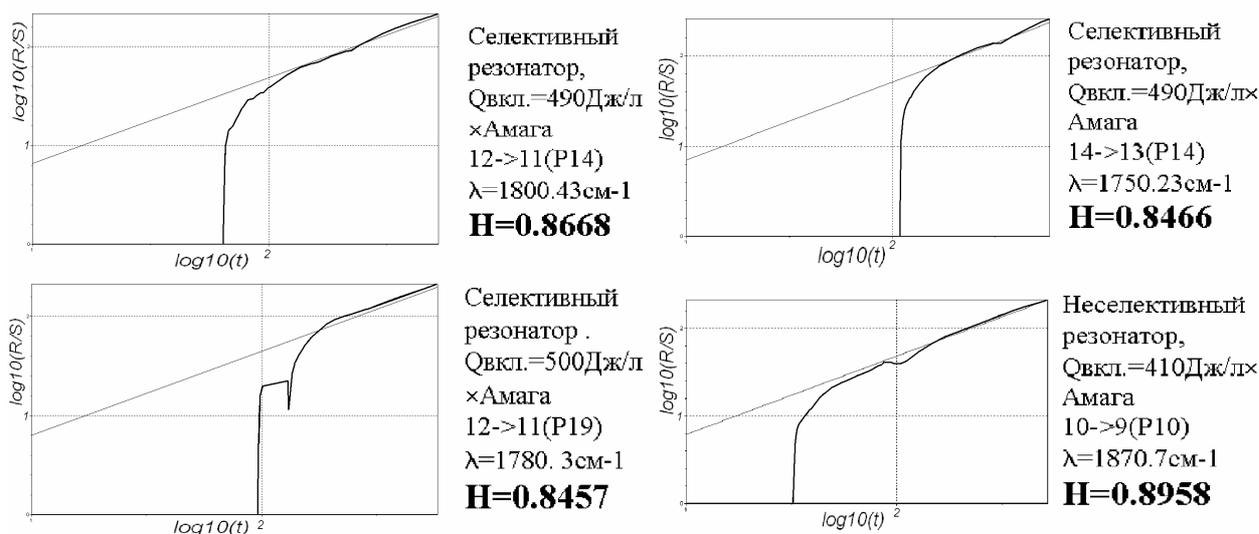


Рис. 4. R/S анализ временных рядов мощности излучения СО-ЭИЛ с резонаторами различных типов для смеси СО:N<sub>2</sub>-1:9, N=0.5 Амага

ста осуществлялось на основе анализа временных рядов с использованием программы FRACTAN. Результаты R/S анализа временных рядов мощности излучения СО-ЭИЛ с резонаторами различных типов для смеси СО:N<sub>2</sub>-1:9, N=0.5 Амага представлены на рис. 4

Как показали эксперименты, для гелий-содержащих и безгелиевых смесей показатель Херста практически не зависит ни от длины волны импульса излучения, ни от величины энерговклада

Для смеси СО:N<sub>2</sub>=1:9 показатель Херста оказался в среднем равен  $H=0,8679$ , а для смеси СО:N<sub>2</sub>:He =1:9:10 эта величина составила  $H=0,8367$ . Таким образом, по-

казатель Херста является своего рода “визитной карточкой” смеси определенного состава. Поскольку величина  $H$  для обеих смесей лежит в диапазоне  $0.5 < H < 1$ , это означает, что временные ряды импульсов излучения СО-ЭИЛ персистентны. Однако, из этого следует также и то, что среди большого ряда процессов, происходящих в колебательно-возбужденной системе молекул окиси углерода, есть некая причина, вносящая элемент хаоса, проявляющийся в особенностях временных характеристик излучения лазера. Этот важный момент обязательно должен присутствовать в теоретической модели, которая претендует на то, что она правильно описывает работу

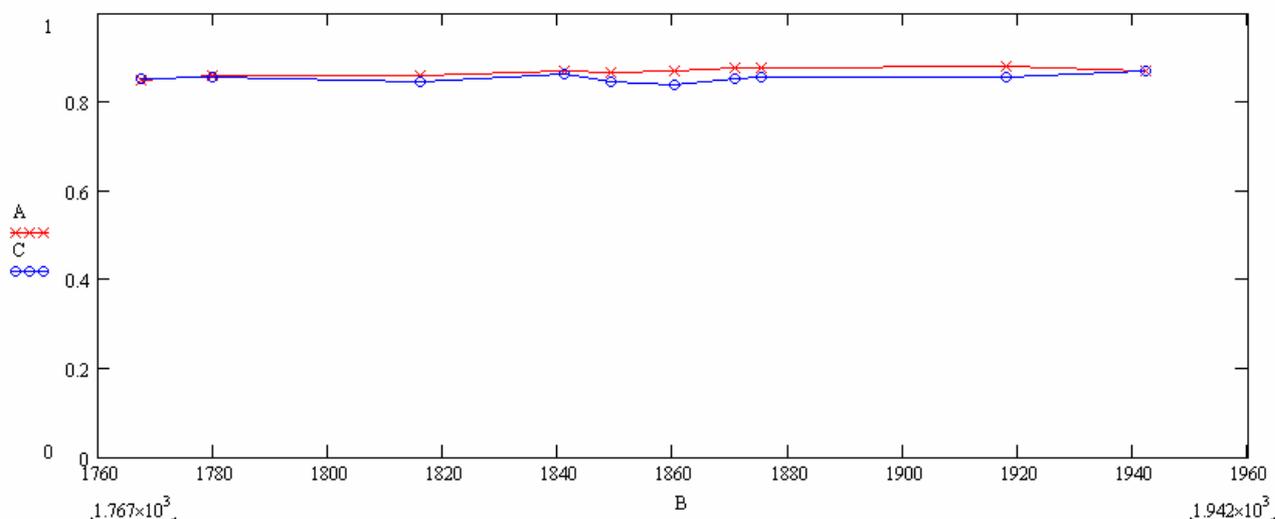


Рис. 5. Сравнение поведения показателя Херста при разных энерговкладах (селективный резонатор): А – показатель  $H$  для 526,00 Дж; С – показатель  $H$  для 578,34 Дж; В – длина волны в обратных см

импульсного СО-ЭИЛ. В этом случае критерием правильности модели лазера, может служить тот факт, что величина показателя Херста временных рядов излучения импульсного СО-ЭИЛ, рассчитанных теоретически, соответствует показателю, полученному на основании экспериментальных данных.

### Выводы

1. Впервые проведен  $R/S$  анализ временных рядов излучения импульсного СО-ЭИЛ с резонаторами различных типов.

2. Показано, что для СО-ЭИЛ с составом рабочей смеси  $\text{CO}:\text{N}_2=1:9$  показатель Херста в среднем равен  $H=0,8679$ . Для смеси  $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}=1:9:10$  эта величина равна  $H=0,8367$ .

3. Для гелийсодержащих и безгелиевых смесей показатель Херста временных рядов излучения СО-ЭИЛ практически не зависит ни от длины волны импульса излучения, ни от величины энерговыклада.

4. Показатель Херста является характеристикой, использование которой может позволить проверить существующие теоретические модели этого лазера на адекватность описания процессов, протекающих в активной среде СО-ЭИЛ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анищенко В.С.* Сложные колебания в простых системах: Механизмы возникновения, структура и свойства динамического хаоса в радиофизических системах. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.
2. *Fraser A.M., Swinney H.L.* Independent coordinates for strange attractors from mutual information// *Phys. Rev. A* 33, 1134-1140 (1986).
3. *Готовчиков И.Ф.* Прогнозирование валютных курсов // *Финансовый менеджмент* 2003. №4.
4. *В.С. Казакевич.* Спектрально-временные характеристики излучения импульсного электроионизационного СО-лазера, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. М., 1985.
5. *Малышев В.И.* Введение в экспериментальную спектроскопию М.: Наука, 1978.
6. *Казакевич В.С., Морозов К.В., Петров А.Л., Попков Г.Н.* Особенности работы СО ЭИЛ с возбуждением от формирующей ЛС – линии // *Лазерная физика и технология. Российская академия наук Физический институт им. П.Н. Лебедева. Сборник трудов Самарского филиала.* М., 2005.

### THE R/S -ANALYSIS OF RADIATION TIME SERIES OF PULSE EBCD CO-LASER

© 2007 T. E. Ventslavovich, V. S. Kazakevich

Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

The R/S -analysis of radiation time series of pulse EBCD CO-laser is carried out for the first time. It is shown that Hurst's parameter does not depend on pumping energy, wavelengths of a radiation pulse, but depends on laser gas mixture. Use of the given method should allow to improve theoretical model of the EBCD carbon monoxide laser .