

4. Поляков В. М., Сажин В. И., Свистунов К. В., Семеней Ю. А., Тинин М. В., Унучков В. Е. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, № 12, с. 1866.
5. Егорова В. Н., Егоров И. Б., Манаенкова Н. И., Фищук Д. И., Тушенцева И. А., Цедиллина Е. Е. В кн.: Взаимодействие радиоволн КВ и УКВ диапазонов с ионосферой. — М: ИЗМИРАН, 1980, с. 88.
6. Слуцкий А. А. — ЖЭТФ, 1963, 45, № 4 с. 978
7. Тинин М. В. В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. — М: Наука, 1976, вып. 39, с. 166
8. Тинин М. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 24, № 10, с. 1200.
9. Афонасьев Н. Т., Свистунов К. В., Тинин М. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1982, 25, № 2, с. 133.

Иркутский государственный
университет

Поступила в редакцию
9 января 1984 г.

УДК 535.325.4

О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СПЕКТРОМЕТРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ КОГЕРЕНТНОЕ СПОНТАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В. Л. Вакс, Л. И. Герштейн, М. Л. Герштейн

В работе проведен сравнительный анализ чувствительности спектрометров двух типов: работающего на эффекте когерентного спонтанного излучения и классического, в котором поглощение обнаруживается по изменению мощности электромагнитной волны, прошедшей через исследуемый газ. Показано, что чувствительности обоих типов спектрометров практически одинаковы. Установлено прямое соотношение между мощностью электромагнитной волны, вызывающей поляризацию в газе, коэффициентом поглощения и мощностью электромагнитной волны, переизлученной газом.

В последние годы значительно повысился интерес к использованию для целей микроволновой спектроскопии газов когерентного спонтанного излучения (КСИ) [1, 2]. Впервые на существование такого излучения указал Дике в 1954 г. [3]. Суть его заключается в том, что если в образце газа создается поляризация в резонансных условиях, то после вывода генератора из резонанса волна поляризации будет излучать в ту же самую моду поля, которая ее возбудила. Под резонансными условиями понимается случай нахождения частоты излучения генератора внутри линии стационарного перехода.

Широкое использование КСИ в микроволновой спектроскопии потребовало получения оценок предельных возможностей используемых для этой цели спектрометров (СКСИ), в частности, оценки такого важного параметра, как предельная чувствительность спектрометра.

Попытка получить такую оценку была предпринята в работе [5]. В ней утверждается, что выше некоторой критической частоты чувствительность СКСИ значительно превосходит чувствительность спектрометра, сигналом от линии поглощения в котором является изменение мощности излучения в результате взаимодействия с образом газа и который мы будем называть классическим (КС). Примером такого спектрометра является, например, штарк-спектрометр [10]. В работе [6] также высказано утверждение о возможности уменьшения мощности шумов приемной системы за счет использования КСИ. Исходя из этого положения в работе [6] предложена и конструкция спектрометра, который, по мнению автора, обеспечит выигрыш в чувствительности.

В данной работе показано, что принципиальной разницы в чувствительности СКСИ и КС нет, поэтому есть смысл рассматривать лишь преимущества, достигаемые за счет различной технической реализации спектрометров.

Для описания процессов, связанных с КСИ, используется классический подход, при котором КСИ может рассматриваться как излучение совокупности согласованных по фазе диполей. Справедливость такого подхода отмечали многие авторы [7, 8]. Такой подход представляет интерес в первую очередь для спектроскопистов-экспериментаторов, так как в полученные оценочные выражения входят величины, непосредственно измеряемые при спектроскопическом эксперименте.

Рассмотрим связь процессов поглощения и КСИ газа в ячейке спектрометра. Процесс поглощения [4] заключается в том, что в газе под действием электромагнитной волны, излучаемой генератором (ГИ), наводятся поляризационные токи, обусловленные, например, колебаниями связанных в молекулах зарядов. Колеблющиеся заряды излучают электромагнитную волну, когерентную с возбуждающей. При резонансе эти волны находятся в противофазе и амплитуда поля за ячейкой определится как разность амплитуд:

$$E_1 = E_0 - E_{изл}. \quad (1)$$

где E_0 — амплитуда волны, излучаемой ГИ, $E_{изл}$ — амплитуда электромагнитной волны, излучаемой газом.

Поглощение проявляет себя как резонанс источников поляризации. При этом источникам поляризации требуется время для создания уставившейся амплитуды колебаний — это время ($\tau=1/\Delta\omega$) обратно пропорционально ширине линии поглощения газа. Нарастание амплитуды колебаний источников поляризации приводит к нарастанию поглощения, что и объясняет хорошо известную зависимость коэффициента поглощения от времени [9]. Действительно, газ сразу же после «выключения» резонансного взаимодействия прозрачен для резонансной волны, и лишь по истечении времени установления τ поглощение приобретает характерное для данной линии поглощения значение.

Если теперь при установившемся поглощении «выключить» резонансное взаимодействие, то источники поляризации в газе будут продолжать излучать резонансную волну в течение того же времени τ , причем амплитуда волны, излучаемой газом, непосредственно после выключения будет равна $E_{изл}$, а затем будет падать из-за уменьшения амплитуды поляризации и пропадания фазировки.

Мощность, излучаемая ГИ и падающая на ячейку с газом, равна

$$P_{пад} = KSE_0^2 \quad (2)$$

где S — площадь поперечного сечения ячейки, K — коэффициент, связанный с выбором системы единиц.

Мощность, поглощаемая газом в ячейке,

$$P_{погл} = KS(E_0^2 - E_1^2), \quad (3)$$

где E_1 — амплитуда поля за ячейкой. Мощность, излучаемая газом после прекращения резонансного взаимодействия,

$$P_{изл} = KSE_{изл}^2. \quad (4)$$

Из (1)–(4) следует соотношение между $P_{пад}$, $P_{изл}$ и $P_{погл}$:

$$P_{изл}/P_{погл} + P_{погл}/P_{изл} + 2 = 4P_{пад}/P_{погл}. \quad (5)$$

Отношение $P_{погл}/P_{пад}$ известным образом выражается через коэффициент поглощения γ и длину ячейки L [10] и в интересующем нас случае малых поглощений, когда $P_{пад} \gg P_{погл} \gg P_{изл}$, (5) принимает вид

$$P_{погл}/P_{пад} \approx \gamma L. \quad (6)$$

Тогда отношение излучаемой газом мощности к мощности, излучаемой ГИ, имеет вид

$$P_{изл}/P_{пад} \approx (1/4)(\gamma L)^2. \quad (7)$$

Итак, мы установили простое соотношение (7), в которое входят лишь величины, непосредственно измеряемые в эксперименте. Оценим $P_{изл}$ и $P_{погл}$ для характерных для спектроскопии газов значений γ , L . $P_{пад}$ Пусть $\gamma = 10^{-7} \text{ см}^{-1}$, $L = 10^2 \text{ см}$, $P_{пад} = 10^{-3} \text{ Вт}$. Получаем $P_{погл} = 10^{-8} \text{ Вт}$, $P_{изл} = 2.5 \cdot 10^{-14} \text{ Вт}$.

Работа СКСИ, так же как и КС, связана с необходимостью модуляции излучения ГИ, заключающейся в периодическом «включении» и «выключении» взаимодействия излучения ГИ с газом, причем, если в КС период модуляции выбирается больше, чем время установления τ , то в СКСИ наоборот — период модуляции меньше τ . Это приводит к тому, что в СКСИ амплитуда КСИ при «включенном» взаимодействии не успевает значительно возрасти, а при «выключенном» взаимодействии значительно упасть, поэтому можно считать, что установившаяся амплитуда КСИ вызвана непрерывной электромагнитной волной, излучаемой ГИ, с амплитудой, вдвое меньшей, чем у промодулированной волны. Тогда (7) с учетом модуляции в СКСИ можно записать так:

$$P_{изл} \approx (1/16)(\gamma L)^2 P_{пад}. \quad (8)$$

Теперь перейдем непосредственно к рассмотрению чувствительности СКСИ. Чувствительность спектрометра определяется минимально обнаружимым с его помощью коэффициентом поглощения, который в свою очередь определяется минимально обнаружимым на фоне шума сигналом в приемнике. Условия обнаружимости сигнала можно записать в виде

$$E/E_{ш} = 1, \quad (9)$$

где E — изменение напряженности на приемнике, обусловленное коэффициентом поглощения, $E_{ш}$ — эффективная напряженность шумового поля.

Используя (8) и (9), а также связь между эффективной напряженностью шумового поля и мощностью шума $P_{ш}$, можно получить минимально обнаружимый коэффициент поглощения

$$\gamma_{\min \text{СКСИ}} = (4/L) (P_{\text{ш}}/P_{\text{пад}})^{1/2}. \quad (10)$$

Выражение для чувствительности КС получено в [10], с учетом модуляции оно может быть записано в виде

$$\gamma_{\min \text{ КС}} = (4/\sqrt{2}L) (P_{\text{ш}}/P_{\text{пад}})^{1/2}. \quad (11)$$

Естественно предположить, что шумы в обоих типах спектрометров (аддитивные тепловые шумы) одинаковы, ГИ и ячейка с газом — одни и те же.

Таким образом, чувствительности СКСИ и КС практически одинаковы. Следовательно, вопрос о преимуществе одного из двух рассмотренных типов спектрометров в определенной области частот сводится только к вопросу о возможности их практической реализации.

В заключение заметим, что полученная формула для минимально обнаружимого коэффициента поглощения (10) в случае СКСИ экспериментально была подтверждена с помощью макета спектрометра, описанного в [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Schwendeman R. H. — Ann. Rev. Phys. Chem., 1978, **29**, p. 537.
2. Ekkers J., Flygare W. H. — Rev. Sci. Instrum., 1976, **44**, № 4, p. 448.
3. Dicke R. H. — Phys. Rev., 1954, **93**, № 1, p. 99.
4. Крауфорд Ф. Волны. — М.: Наука, 1976.
5. Крупинов А. Ф., Буренин А. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1979, **22**, № 3, с. 305.
6. Крупинов А. Ф. — Вестник АН СССР, 1978, № 7, с. 18.
7. Аллен Л., Эберли Дж. Оптический резонанс и двухуровневые атомы. — М.: Мир, 1978.
8. Макомбер Дж. Динамика спектроскопических переходов. — М.: Мир, 1979.
9. Флайгер У. Строение и динамика молекул. — М.: Мир, 1982, с. 2
10. Таунс И., Шавлов А. Радиоспектроскопия. — М.: ИЛ, 1959.
11. Вакс В. Л., Герштейн Л. И., Масловский А. В. Тезисы докладов XIX Всесоюзного съезда по спектроскопии. — Томск, 1983, ч. 4, с. 74.

Институт прикладной физики
АН СССР

Поступила в редакцию
20 января 1984 г.

УДК 53.072-51

О РОЖДЕНИИ СТРАННОГО АТТРАКТОРА В СИСТЕМАХ, БЛИЗКИХ К ГАМИЛЬТОНОВЫМ

B. С. Афраймович, M. И. Рабинович, A. Д. Угодников

1. Проблема сохранения стохастического поведения в гамильтоновых системах при учете слабой диссипации является сейчас одной из наиболее принципиальных физических проблем, возникающих при исследовании неавтономных гамильтоновых систем (конечномерных моделей теории поля, заряженных частиц, движущихся в периодических полях, и т. д.). В данной работе предлагается механизм возникновения странного аттрактора из стохастического множества гамильтоновой системы, позволяющий ответить на вопрос о границе стохастической области в фазовом пространстве гамильтоновой системы и выделить характеристики, ответственные за близость свойств стохастичности в диссипативной и исходной гамильтоновой системах.

Будем рассматривать гамильтоновы системы с полутора степенями свободы. Стохастичность в таких системах связана с присутствием внешних периодических полей. При малых полях такие системы демонстрируют почти регулярное поведение, описываемое теорией КАМ [1]. С ростом амплитуды внешнего поля характер движения усложняется*, и при достаточно больших амплитудах движение становится сильно стохастическим, регулярное поведение остается лишь при специально выбранных начальных условиях — островки устойчивости [2]. В общем случае число таких островков определить трудно, однако в достаточно простых системах, подобных тем, которые мы здесь рассматриваем, число их с физической точки зрения можно считать конечным (см. рис. 1).

* Инвариантные торы разрушаются, оставляя «в память» о себе резонансные цепочки периодических движений, кантороторы [2] и т. д.