

УДК 532.783

## СТОХАСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ЛАЗЕРНЫХ И СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ НЕЛАЗЕРНЫХ ДИОДАХ

В.Б. ПАХАЛОВ

Ереванский государственный университет, Армения

(Поступила в редакцию 29 июля 2009 г.)

Исследован стохастический резонанс в быстрой пороговой электронной светоизлучающей системе (лазерный диод или светоизлучающий нелазерный диод). Зарегистрировано явление стохастического резонанса, проявляющееся в немонотонном поведении оптического отклика системы при одновременном действии сигнала и шума с изменением интенсивности внешнего шума.

### 1. Введение

Стохастический резонанс (СР), или стохастическая фильтрация – к настоящему времени широко исследованное явление (см. обзоры [1-3]). Выполнено большое число экспериментальных работ, начиная с электронных бистабильных систем [4] и кончая нейронами речного рака [5]. Имеются также измерения, выполненные в лазерных динамических бистабильных системах. В работе [6] рассмотрен СР в кольцевом лазере, а в [7] – в лазере с поглощающей неоновой ячейкой (время релаксации меньше 10 нсек). Предварительно СР в лазерных диодах изучался в нашей работе [8]. В режиме СР при некотором оптимальном уровне шума улучшаются многие характеристики информационного сигнала, например, усиление, отношение сигнал/шум, когерентность и др. Поэтому представляет интерес исследование СР в оптической пороговой системе, такой как лазер или светодиод, и возможного влияния СР в оптической линии связи или в системах обработки информации. При исследовании нединамических пороговых систем предлагается отказаться от анализа бистабильных систем и представить СР как фундаментальный пороговый эффект [9]. Процесс рассматривается в виде последовательности случайных событий, в случае, когда сумма сигнала  $B \sin \omega t$  и шума  $\xi(f)$  достигает некоторого уровня  $C_{th}$ :

$$[B \sin \omega t + \xi(f)] > C_{th}. \quad (1)$$

В отсутствие шума амплитуда сигнала  $B$  недостаточна для достижения порога. В работе [9] получено выражение для отношения сигнал/шум  $S/N$  на основной частоте сигнала:

$$(S/N)_{\omega} = \left[ \left( 2f_0 \Delta_0^2 B^2 / \sqrt{3} \sigma^4 \right) \exp(-\Delta_0^2 / 2\sigma^2) \right], \quad (2)$$

где  $\Delta_0$  – порог генерации в отсутствие сигнала,  $f_0$  – частота среза низкочастотного фильтра,  $\sigma^2$  – дисперсия гауссова шума. Из приведенных там же общих уравнений можно получить  $S/N$  на второй гармонике  $2\omega$  и их отношение:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{2\omega} = \left[ \frac{\sqrt{3}f_0 B^4}{6\sigma^2} \exp\left(-\frac{\Delta_0^2}{2\sigma^2}\right) \right], \quad (3)$$

$$\frac{(S/N)_\omega}{(S/N)_{2\omega}} = \frac{4\Delta_0^2}{\sigma^2 B^2}. \quad (4)$$

Эти выражения приведены для обсуждения в дальнейшем наших результатов. Так как в обычных лазерах, в том числе и в инжекционных, после достижения инверсии населенностей через определенное время релаксации система переходит в основное состояние, здесь более подходит теория циркулярного СР, предложенного в работе [10]. Авторы называют циркулярной систему, которая проходит через возбужденную нестабильную точку и возвращается назад в стабильную нижнюю точку через время релаксации, а затем под действием внешней накачки снова переходит в нестабильную верхнюю точку и т.д. по замкнутому кругу. Отношение  $S/N$  для этого случая получено из формулы типа Крамерса для скорости переходов:

$$\alpha(t) \approx \exp\left[-\frac{U}{D}(1 - \eta \cos \omega_0 t)\right], \quad (5)$$

где  $D$  – интенсивность шума,  $\eta$  – малый сигнальный параметр,  $U$  – энергия барьера, разделяющая стабильную и нестабильную фиксированные точки. В пределе малых  $\eta$  получено отношение сигнал/шум

$$\frac{S}{N} = \left[ \frac{\eta^2 U^2}{D^2} \exp\left(-\frac{U}{D}\right) \right]. \quad (6)$$

Выражение (6) подобно выражению (2), полученному для пороговых систем, если положить порог  $U \sim \Delta_0^2$ ,  $D \sim \langle \xi^2 \rangle = \sigma^2$ . Оба выражения приводят к росту отношения сигнал/шум при оптимальной шумовой интенсивности, т.е. к СР. В работе [11] рассмотрено отношение выходного и входного отношений сигнал/шум для пороговых систем

$$\left[ \frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in}} \right]^{th} = \frac{2f_0 \Delta_0^2}{\sqrt{3}\sigma^{24}} \left[ \exp\left(-\frac{\Delta_0^2}{2\sigma^2}\right) \right]. \quad (7)$$

Отношение (7) может оставаться постоянным даже при большом шуме  $\sigma$ , если с увеличением шума увеличивать во столько же раз порог  $\Delta_0$ . Оба отношения  $(S/N)_{in}$  и  $(S/N)_{out}$  будут уменьшаться, но их отношение остается постоянным. Слабый сигнал проходит через порог посредством шума. Хотя мощность сигнала остается постоянной, полная мощность входного шума может стать не-

определенно большой. Однако мощность выходного шума, прошедшего через порог, уменьшается, т.к. увеличение шума компенсируется увеличением порога. Таким образом, порог играет роль “фильтра”. Авторы работы [11] предполагают, что это приведет к росту доли сигнала, прошедшего через порог. Этот процесс детектирования сигнала путем увеличения шума назван пороговым детектированием.

Для циркулярной системы, описываемой уравнением (6), имеются некоторые отличия. Считая входное отношение сигнал/шум как  $\eta^2/D$ , было получено

$$\left[ \frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in}} \right]^{th} = \left[ \frac{U^2}{D} \exp\left(-\frac{U}{D}\right) \right]. \quad (8)$$

Если порог и шум увеличивать, сохраняя отношение постоянным, входное отношение  $(S/N)_{in}$  будет уменьшаться, но отношение (8) будет расти линейно с порогом  $U$ .

В теории оптимальных методов приема известен метод стробирования, приводящий к увеличению отношения сигнал/шум [12]. Фактически пороговая фильтрация играет эту роль. Сам сигнал здесь выполняет роль стробирования.

В данной работе исследуется зависимость отношения  $S/N$  от внешнего шума. Будет показано, что выше области порога увеличение шума приводит к уменьшению отношения  $S/N$ .

## 2. Эксперимент

В современном научном эксперименте и в компьютерной технологии широко используется система лазерный диод или светодиод плюс фотодиод или фотоумножитель. В такой системе нами зарегистрирован СР, который возникал, когда сумма регулярной и шумовой компонент модулирующих напряжений пересекала некоторый пороговый уровень напряжения излучения лазерного диода или светоизлучающего диода.

Сигналы от генератора стандартных сигналов и генератора гауссова шума суммировались на операционном усилителе и подавались на излучающий диод. Диод был состыкован с фотодиодом. После усиления полученный сигнал с выхода фотодиода поступал на осциллограф и анализатор спектра, с помощью которого измерялось отношение энергии сигнала к энергии шума на частоте сигнала.

Имелась также возможность изменения порога путем независимого изменения напряжения смещения на диоде. Для проверки возможного вклада в СР самого фотодиода данные сопоставлялись с измерениями излучения диода фотоумножителем в обычном режиме и в режиме счета фотонов. В обоих случаях результаты были аналогичны. Приблизительно ту же схему мы использовали для изучения СР в триггере Шмидта и туннельном диоде, как в работах [4,13]. Предварительно были сняты вольтамперные и световые (ток фотодиода) харак-

теристики лазерного диода и светодиода. Фотодиод был проверен на линейность. Начиная с порогового напряжения в 1.3 В наблюдался линейный рост тока и интенсивности излучения.

Величины выходного напряжения генератора сигналов и генератора шума подбираются так, чтобы в отсутствие шума амплитуда сигнала была недостаточна для достижения порога. С добавлением шума становится возможным случайное преодоление порога. При пересечении порога шумовым импульсом излучается световой случайный импульс. На рис.1 иллюстрируется принцип получения выходных шумовых световых импульсов, несущих информацию о сигнале. Генерация излучения диода начинается при пороговом напряжении  $U_{th}$ . Напряжение смещения  $U_{bias}$  подается от дополнительного источника. На выходе фотоприемника регистрируется случайная последовательность шумовых импульсов, модулированная регулярным сигналом. Выходной спектр, измеренный с помощью анализатора спектра, содержит основную частоту сигнала и его гармонику на фоне гауссова шума.

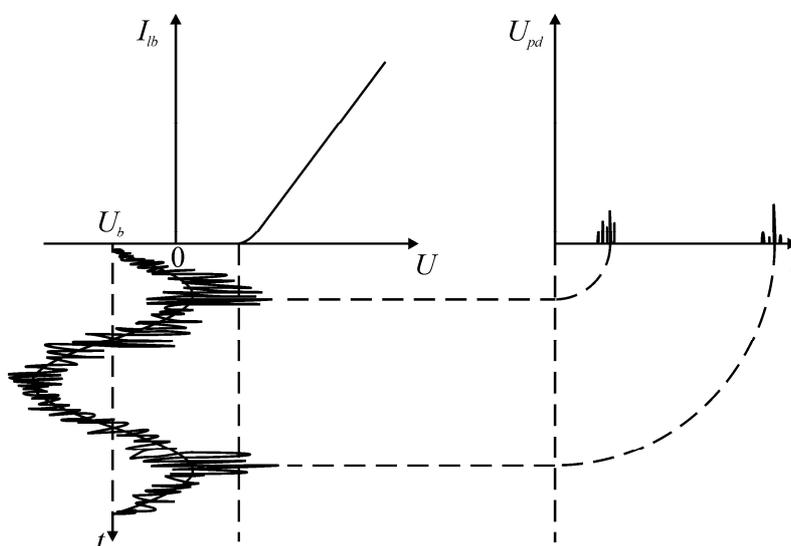


Рис.1. Схема, иллюстрирующая принцип получения выходных шумовых импульсов, модулированных сигналом.

На рис.2 приведено отношение сигнал/шум  $(S/N)_{out}$  в зависимости от входного шума, при определенной величине сигнала. Наблюдается поведение, характерное для СР. Как видно из приведенных результатов, резонанс имеет место в области порога при  $D = \sigma^2 \approx \Delta_0^2$ . Было обнаружено уменьшение максимума резонанса с увеличением сигнала, что объясняется увеличением выходного шума при увеличении входного сигнала. Эта зависимость приведена на рис.3. При увеличении величины сигнала наблюдается почти линейный рост выходного шума.

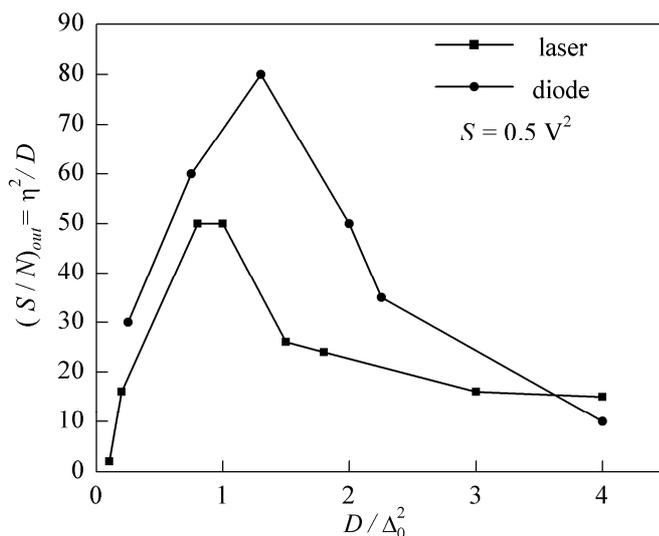


Рис.2. Экспериментальная зависимость отношения сигнал/шум от входного шума для лазерного диода и светодиода при  $S = 0.5 \text{ В}^2$ .

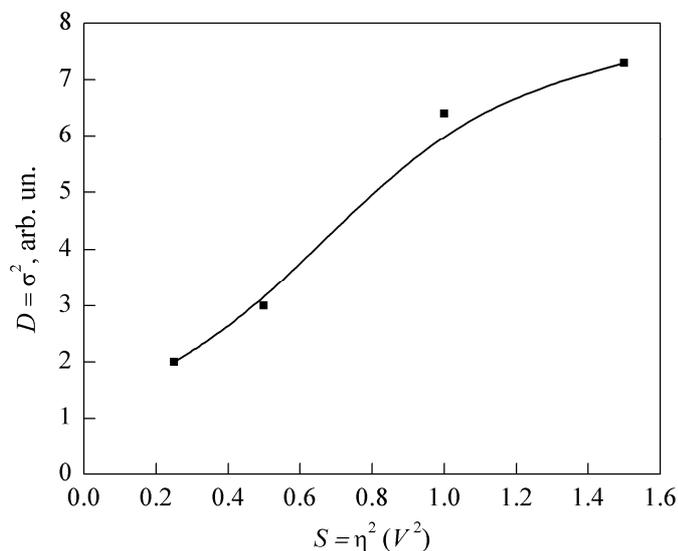


Рис.3. Зависимость выходного шума от входного сигнала.

Представляет интерес изучение приращения шума при наличии сигнала и его отсутствии в зависимости от входного шума, при разных значениях сигнала как параметра (рис.4). Видно, что положение максимумов всех кривых совпадает.

На рис.5 приведены результаты отдельного измерения входного и выходного отношений сигнал/шум, а на рис.6 – их отношения в зависимости от шума. Видно, что при малых значениях входного шума отношение  $(S/N)_{in}$  больше, чем выходное затем достигается максимум для отношения  $(S/N)_{out} / (S/N)_{in}$  в соответствии с формулой (7).

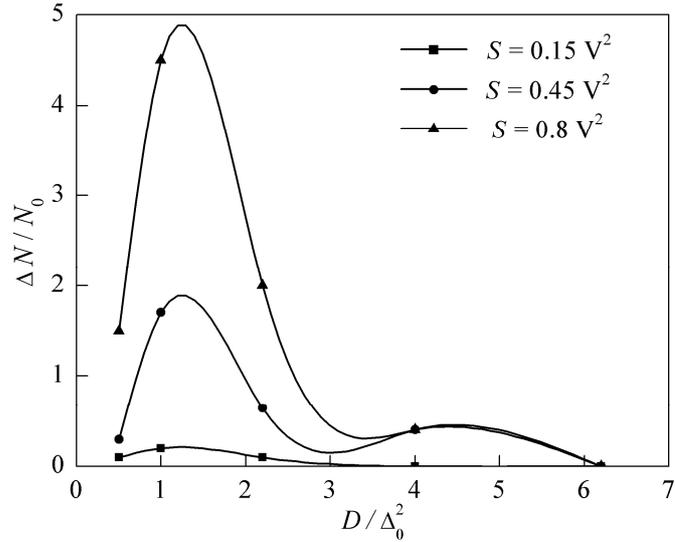


Рис.4. Зависимость относительного приращения шума при наличии сигнала по сравнению с шумом в отсутствие сигнала от входного шума.

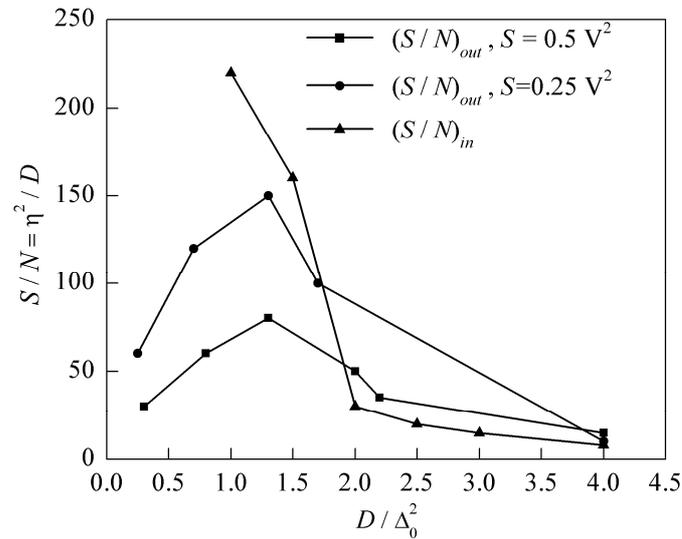


Рис.5. Раздельные измерения входного и выходного отношений сигнал/шум.

Были выполнены также предварительные измерения с независимой регулировкой порога отрицательным смещением. Это позволило нам проверить предсказания статьи для циркулярных систем [11], описанные нами выше, которые не подтвердились, так как в случае используемых сумматоров на операционных усилителях увеличение отрицательного смещения порога приводит к одновременному уменьшению и шума, и сигнала. Точнее получилось совпадение с выражением выход/вход для пороговой системы (7).

Из формул (2) и (3) видно, что на второй гармонике отношение сиг-

нал/шум сильнее зависит от величины сигнала, чем на основной частоте. В нашем эксперименте оно было на порядок больше, чем оценка по формуле (3), а из выражения (4) следует, что  $(S/N)_{2\omega}$  в  $B^2$  раз больше, чем  $(S/N)_\omega$ , при пропорциональном изменении  $\Delta_0^2$  и  $\sigma^2$ .

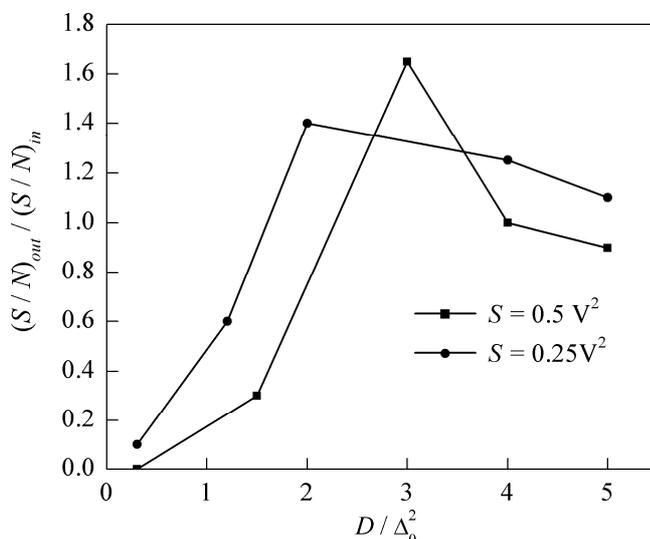


Рис.6. Зависимость отношения  $(S/N)_{out}$  к  $(S/N)_{in}$  от входного шума.

### 3. Обсуждение

1. Выполненные измерения показали возможность СР в лазерных диодах и светодиодах. Для проверки наличия СР в фотоизмерительной части подбирались различные фотодиоды и фотоумножитель в режиме счета фотонов и в обычном режиме. Используемые нами лазерные диоды обладали малым сроком службы. В процессе эксперимента мы использовали 5 различных лазеров, но все они обладали в различной степени СР. Светоизлучательные диоды оказались более долговечными, и во всех из них наблюдался СР. Предварительно для проверки электронной части были повторены эксперименты авторов работ [4,13] по СР в туннельном диоде и триггере Шмидта. Получено полное согласие с их результатами.

Необходимо также отметить основное отличие оптических схем от электронных, проявляющееся в том, что входное отношение сигнал-шум определяется на выходе электронной схемы, а выходное – на выходе оптической.

2. Хотелось бы обсудить возникновение СР как проявление возможности описания данного явления в терминах фазового перехода (ФП) I и II рода. В системах с неравновесным ФП, таких, как кольцевой лазер и лазер с поглощающей ячейкой, наблюдался СР [6,7]. При этом они могут быть представлены как бистабильные системы с ФП I рода.

В обычных He-Ne лазерах возможно описание перехода через порог генерации по аналогии с ФП II рода, исходя из роста интенсивности, степени когерентности (что ассоциируется с отношением сигнал/шум) и уровня шумов вблизи порога [14]. В нашей работе также наблюдался СР вблизи порога генерации, а в согласии с рис.4 наблюдалось приращение шумов при наличии сигнала по сравнению с шумом при его отсутствии, которое имеет “резонансный” характер вблизи порога генерации.

Автор выражает благодарность Л.С. Асланяну за полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **L.Gammaitoni, P.Hanggi, P.Yung, F.Marchesoni.** Rev. Mod. Phys., **70**, 23 (1998).
2. **В.С.Анищенко, А.Б.Нейман, Ф.Мосс, Л.Шиманский-Гайер.** УФН, **169**, 7 (1999).
3. **Ю.Л.Климонтович.** УФН, **169**, 39 (1999).
4. **S.Fauve, F.Heslot.** Phys. Lett. A, **97**, 5 (1983).
5. **Y.K.Douglass, L.Wilkens, E.Pantazelou, F.Moss.** Nature (London), **365**, 337 (1993).
6. **B.McNamara, K.Wiesenfeld, R.Roy.** Phys. Rev. Lett., **60**, 2626 (1988).
7. **L.Fioretti, R.Guodoni, E.Mannella, Y.Arimondo.** Stat. Phys., **70**, 403 (1993).
8. **V.B.Pakhalov, L.S.Aslyan, V.L.Elbakyan.** SPIE, **4751**, 503 (2002).
9. **Z.Gingi, L.W.Kiss, F.Moss.** Europhys. Lett., **29**, 191 (1995).
10. **K.Wiesenfeld, D.Pierson, et al.** Phys. Rev. Lett., **72**, 2125 (1994).
11. **F.Moss, D.Pierson, et al.** Int. Journ. of Bifurcation and Chaos, **4**, 1383 (1994).
12. **В.И.Тихонов.** Статистическая радиотехника. М., Радио и связь, 1982.
13. **R.N.Mantegna, B.Spagnolo.** Phys. Rev. E, **49**, 1792 (1994).
14. **С.А.Ахманов, В.Б.Пахалов, А.С.Чиркин.** Письма в ЖЭТФ, **23**, 301 (1976).

ՄՏՈՔԱՍՏԻԿ ՌԵԶՈՆԱՆՍՈՐ ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ  
ԵՎ ԼՈՒՍԱԸԱՌԱԳԱՅԹՈՂ ՈՉ-ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ԴԻՈՂՆԵՐՈՒՄ

Վ.Բ. ՊԱԽԱԼՈՎ

Ուսումնասիրված է ստորաստիկ ռեզոնանսը արագ շեմային էլեկտրոնային լուսաճառագայթող համակարգերում (լազերային դիոդ կամ լուսաճառագայթային ոչ լազերային դիոդ): Դիտվել է ստորաստիկ ռեզոնանսի երևույթը, որն արտահայտվում է համակարգի օպտիկական արձագանքի արտաքին աղմուկից ոչ մոնոտոն կախվածության մեջ, երբ միաժամանակ ազդում են ազդանշանն ու աղմուկը:

#### STOCHASTIC RESONANCE IN LASER AND LIGHT-EMITTING NONLASER DIODES

V.B. PAKHALOV

Stochastic resonance (SR) in a fast threshold electronic light-emitting system (laser diode or light-emitting nonlaser diode) is studied. We registered the phenomenon of SR, which is displayed in a nonmonotonic behavior of the dependence of optical response of the system at the simultaneous action of the signal and noise, when the external noise is changed.