

заряда, по сравнению с таковой в исходном материале сильно смещена в инфракрасную область. Если в  $\alpha\text{-WO}_3$  инжекция заряда уменьшает пропускание почти во всей видимой области спектра, то в кристаллогидрате уменьшение наблюдается лишь в узком диапазоне 1.7—2.0 эВ. Вместе с тем значения электрохромной эффективности в максимумах полос поглощения для кристаллогидрата и  $\alpha\text{-WO}_3$  близки и составляют около 80 см<sup>2</sup>/Кл. Следовательно, ухудшение электрохромной эффективности в видимой области при образовании кристаллогидрата обусловлено не потерей электрохромных свойств в новом соединении, а сильным смещением полосы поглощения в инфракрасную область. Частично такое смещение может быть вызвано кристаллизацией: так, в работе [10] показано, что при кристаллизации пленки  $\alpha\text{-WO}_3$  полоса поглощения смещается в инфракрасную область на 0.3—0.4 эВ. Однако при этом изменение поглощения наблюдается во всей видимой области спектра в отличие от кристаллогидрата, в котором инжекция заряда вызывает изменение поглощения лишь в узкой части видимой области. Возможно, это отличие обусловлено появлением встроенных молекул воды, однако для уточнения их влияния необходимо проведение дальнейших экспериментов.

Таким образом, взаимодействие пленок  $\alpha\text{-WO}_3$  с электролитом на основе водного раствора  $\text{H}_2\text{SO}_4$  приводит к образованию кристаллогидрата  $\text{WO}_3 \cdot m(\text{SO}_4) \cdot n(\text{H}_2\text{O})$  или  $\text{WO}_3 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$ , электрохромная эффективность которого в видимой области спектра значительно понижается вследствие сильного смещения края собственного поглощения в красную область спектра, а полосы поглощения, связанные с инжекцией заряда, — в инфракрасную область. Для обеспечения работоспособности приборов на основе пленок  $\alpha\text{-WO}_3$  с таким электролитом необходимо обеспечить условия, препятствующие образованию кристаллогидратов.

### Список литературы

- [1] Agnihotry S. A., Saine K. K., Chandra S. // Indian J. Pure and Appl. Phys. 1986. Vol. 24. N 1. P. 19—40.
- [2] Yamanaka K. // Jap. J. Appl. Phys. 1986. Vol. 25. N 78. P. 1073—1077.
- [3] Arnoldussen T. C. // J. Electrochem. Soc. 1981. Vol. 128. N 1. P. 117—121.
- [4] Yoshiike N., Kondo S. // J. Electrochem. Soc. 1983. Vol. 130. N 11. P. 2283—2287.
- [5] Falaras P., Froelicher M., Froment M. et al. // J. Microsc. Spectrosc. Electron. 1984. Vol. 9. N 1. P. 39—45.
- [6] Харитонов Ю. А., Буслаев Ю. А., Кузнецович А. А. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1966. № 2. С. 321—324.
- [7] Карякин А. В., Кривенцова Г. А. Состояние воды в органических и неорганических соединениях. М.: Наука, 1973. 176 с.
- [8] Sato Y., Nagakura S. // J. Sci. Light. 1955. Vol. 4. P. 120.
- [9] Schrimmer O. F., Wittner V., Baur G. et al. // J. Electrochem. Soc. 1977. Vol. 124. N 5. P. 749—753.
- [10] Cikmach P. D., Kleperis J. J., Lulis A. R. et al. // Phys. Stat. Sol. (a). 1985. Vol. 90. P. K1—K3.

Институт физики АН УССР  
Киев

Поступило в Редакцию  
20 апреля 1989 г.  
В окончательной редакции  
11 июня 1990 г.

06; 07

Журнал технической физики, т. 60, в. 12, 1990

© 1990 г.

## БИФУРКАЦИИ ДОБАВЛЕНИЯ ПЕРИОДА И ХАОС В ЛАЗЕРНОМ АВТОГЕНЕРАТОРЕ С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИЕЙ ЗАДЕРЖКИ

А. Г. Богородицкий, Э. М. Рабинович

### Введение

В последние годы появилось большое количество работ, посвященных изучению различных систем, в которых наблюдаются переходы к хаосу через последовательность бифуркаций удвоения периода по Фейгенбауму [1-3]. Но этот путь, как и переходы через квазипериодичность и перемежаемость, не является единственным. В работах [4-6] был описан

механизм стохастизации через бесконечную последовательность увеличения периода по закону натурального ряда ( $T_N = N \cdot T_0$ ,  $N=1, 2, 3, \dots$ ) для систем, состоящих из различных фильтров, активизированных полевыми или биполярными транзисторами. Однако примеры наблюдения аналогичных бифуркаций в других системах (например, в распределенных) на сегодняшний день неизвестны и вопрос о типичности этого механизма остается открытым.

Лазерный автогенератор с волоконно-оптической линией задержки (ЛАГ ВОЛЗ), как и другие генераторы с запаздывающей обратной связью (ГЗОС), относится к классу распределенных систем. Несмотря на то что ГЗОС в настоящее время изучены достаточно хорошо [7], исследование динамики ЛАГ ВОЛЗ, как новой конкретной реализации распределенной системы, остается актуальным. Новизна этого генератора заключается в том, что обратная связь осуществляется через многомодовый канал. Кроме того, использование ВОЛЗ приводит к введению в автогенератор ряда специфических элементов, которые не применяются в традиционных ГЗОС радиодиапазона. Эти особенности не дают возможности априори сделать окончательный вывод о поведении этих систем и требуют дополнительного их изучения. Анализ нелинейных динамических и хаотических явлений в ЛАГ ВОЛЗ представляет интерес с фундаментальной точки зрения, так как введенные новые элементы могут в значительной степени изменять динамику генератора.

### Структурная схема ЛАГ ВОЛЗ с резонансным усилителем. Основные передаточные характеристики

Для проведения экспериментальных исследований нелинейных динамических и хаотических режимов работы ЛАГ ВОЛЗ был разработан макет автогенератора, блок-схема которого представлена на рис. 1. Излучение полупроводникового лазера вводилось в многомодовый волоконный световод (ВС) длиной 200 м, являющийся линией задержки сигнала

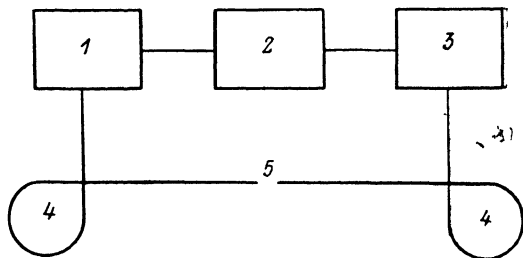


Рис. 1. Блок-схема ЛАГ ВОЛЗ.

1 — фотоприемник, 2 — резонансный усилитель, 3 — полупроводниковый лазер, 4 — волоконно-оптическая линия задержки (ВОЛЗ), 5 — разрыв ВОЛЗ.

со временем запаздывания 1 мкс. На другом конце ВС был расположен фотоприемник, который выделял переменный электрический сигнал, соответствующий огибающей оптической несущей. Далее этот сигнал, усиленный резонансным усилителем, поступал в цепь питания полупроводникового лазера. Описанная система, замкнутая в кольцо, представляет собой усилитель с положительной обратной связью, реализуемой через оптический канал, и при выполнении амплитудных и фазовых условий может являться автогенератором радиодиапазона.

Введение в ВОЛЗ разрыва позволяло при поперечном относительном смещении концов ВС регулировать число мод, возбуждаемых в световоде (их максимальное число составляло  $\sim 500$ ), и таким образом плавно изменять время задержки; при продольном смещении изменялся коэффициент обратной связи.

Для установления характера нелинейности в системе был снят ряд передаточных характеристик ЛАГ при разомкнутой цепи обратной связи (рис. 2, 3). Все характеристики носят бистабильный характер, им свойственны гистерезис и разрывность кривых. Амплитудно-частотная характеристика (рис. 2) оказалась типичной для системы, содержащей нелинейный колебательный контур. Нелинейность контура в рассматриваемой системе возникала при подключении к  $LC$ -фильтру транзистора из оконечного каскада резонансного усилителя.

Заметим, что вид передаточных характеристик системы во многом определяет ее динамику. Поэтому исходя из отсутствия падающих участков в амплитудной характеристике (рис. 3) можно предположить, что характер бифуркаций в ЛАГ ВОЛЗ будет отличен от удвоения периода по Фейгенбауму.

Для получения различных режимов работы автогенератора использовались следующие управляющие параметры: ток инжекции полупроводникового лазера, продольная и поперечная координаты в разрыве ВОЛЗ, коэффициент усиления резонансного усилителя. Очевидно, что каждый из них прямо или косвенно меняет коэффициент передачи всей системы. Именно этим, по-видимому, объясняется подобие последовательностей бифуркаций при изменении любого из вышеперечисленных параметров.

На рис. 4 приведены наиболее характерные бифуркации, наблюдавшиеся в системе при увеличении тока инжекции полупроводникового лазера. Слева направо представлены проекция фазового портрета, временная реализация и спектр сигнала. При определенном значе-

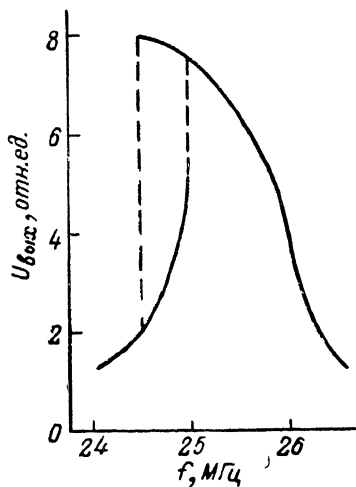


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика ЛАГ ВОЛЗ при разомкнутой цепи обратной связи.

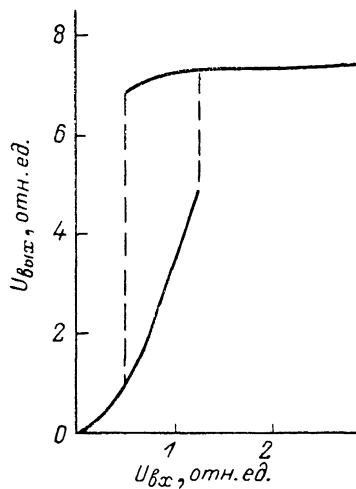


Рис. 3. Амплитудная характеристика ЛАГ ВОЛЗ при разомкнутой цепи обратной связи.

нии управляющего параметра появляется первая бифуркация рождения цикла, в системе наблюдаются колебания, близкие к гармоническим, с частотой  $f_1 = 25$  МГц. С увеличением тока инжекции происходит бифуркация двумерного резонансного тора с кратностью частот  $f_1/f_2 \sim 30$  (рис. 4, а), где  $f_2$  — частота огибающей ( $f_2 \sim 800$  кГц). В спектре колебаний появляются комбинационные частоты вида  $f_1 \pm f_2$ . При дальнейшем изменении управляющего параметра наблюдается появление удвоенного тора, период огибающей становится равным  $2/f_2$  (рис. 4, б), происходит заполнение спектра новыми комбинационными частотами  $f_1 \pm f_2/2 \pm 3f_2/2$ . Далее происходит добавление периода на торе, период огибающей становится равным  $3/f_2$  (рис. 4, в). Последней бифуркацией в цепочке усложнения динамики является рождение колебаний с периодом  $4/f_2$ . При дальнейшем увеличении тока инжекции полупроводникового лазера в системе вновь появлялись колебания, близкие к гармоническим с частотой, соответствующей следующей моде генерации ЛАГ ВОЛЗ, при этом межмодовый частотный интервал составлял 1 МГц.

Необходимо отметить, что после появления удвоенного тора рождению каждого последующего состояния предшествовали области стохастизации, которые, по-видимому, объясняются перемежаемостью этого состояния с предыдущим.

Из рис. 4, а—в видно, что при каждой бифуркации происходит добавление периода в огибающей радиосигнала с частотой  $f_1$ . Аналогичная динамика наблюдалась и для других мод генерации ЛАГ ВОЛЗ в довольно широком диапазоне управляющих параметров.

### Обсуждение результатов и выводы

Из экспериментальных данных настоящей работы следует, что механизм, приводящий к бифуркациям добавления периода, может возникать не только в сосредоточенных, но и распределенных системах.

Отличительной особенностью динамики, демонстрируемой ЛАГ ВОЛЗ как системы с запаздывающей обратной связью, является то, что изменения периода происходят в оги-

бающей, а не в самих колебаниях, что присуще безынерционным системам. Можно указать также и на более высокую частоту генерации ЛАГ ВОЛЗ по сравнению с генераторами, описанными в работах [4–6]. Но необходимо отметить и некоторое сходство этих двух внешне различных систем — это наличие нелинейного колебательного контура, который возникает из-за обычного внесением в него нелинейной емкости.

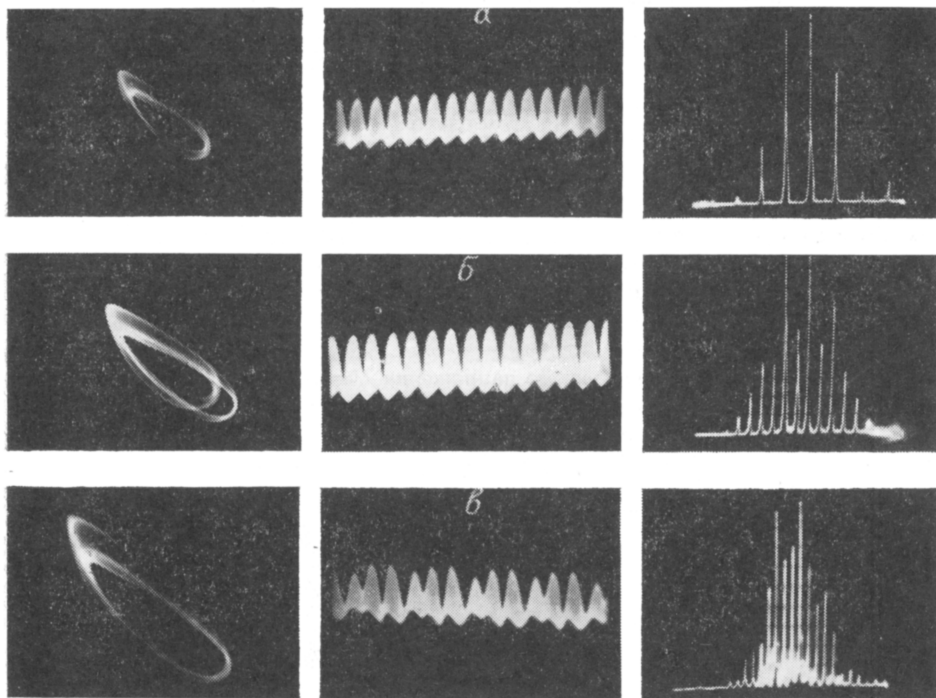


Рис. 4. Эволюция фазового портрета, временной реализации и спектра при увеличении тока инжекции полупроводникового лазера.

Развертка осциллографа составляла 2 мкс/дел., анализатора спектра — 1 МГц/дел.

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований подтверждают типичность механизма, обнаруженного в работе [4], не только для конечномерных, но и для распределенных систем. Это дает возможность предположить, что последовательности добавления периода могут появляться и в других генераторах, содержащих нелинейный колебательный контур.

В заключение авторы выражают благодарность В. С. Анищенко и Л. А. Мельникову за полезные советы и обсуждение результатов работы.

#### Список литературы

- [1] Кузнецов С. П. // Радиофизика. 1982. Т. 25. № 12. С. 1410–1428.
- [2] Дмитриев А. С., Кислов В. Я. // РИЭ. 1984. Т. 29. № 12. С. 2389–2398.
- [3] Анищенко В. С., Постнов Д. Э. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 1. С. 162–167.
- [4] Максимов Н. А., Кислов В. Я. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 16. С. 979–982.
- [5] Максимов Н. А. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 10. С. 624–628.
- [6] Максимов Н. А., Старков С. О. // РИЭ. 1985. Т. 30. № 5. С. 1022–1025.
- [7] Кузнецов С. П. // Радиофизика. 1982. Т. 25. № 12. С. 1410–1428.

Научно-исследовательский институт  
механики и физики  
Саратовский государственный университет  
им. Н. Г. Чернышевского

Поступило в Редакцию  
16 августа 1989 г.  
В окончательной редакции  
5 июня 1990 г.