

## БИСТАБИЛЬНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ВЫНУЖДЕННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

*В. И. Белотицкий, Е. А. Кузин, М. П. Петров, В. В. Спири*

Теоретически рассматриваются характеристики инвертора оптических сигналов, основанного на эффекте ВКР. Показывается, что если сигнал с выхода инвертора подать на его вход, то образуется кольцевая волоконная структура, по которой могут устойчиво циркулировать оптические импульсы двух амплитуд — большой и малой. Небольшие случайные отклонения амплитуд импульсов от их устойчивых величин компенсируются в процессе циркулирования. Такая структура может служить основой для создания полностью оптической динамической кольцевой памяти.

В последнее время возрос интерес к использованию нелинейных оптических свойств материалов для разработки оптических цифровых систем сверхбыстрой обработки информации. В работах [1, 2] рассматривались принципиальные возможности создания оптических логических элементов с использованием механизмов вынужденного комбинационного рассеяния света и вынужденного рассеяния Мандельштама—Бриллюэна в оптических волокнах и было показано, что производительность таких элементов может достигать  $10^{10} \div 10^{13}$  переключений в секунду при потребляемой энергии  $10^{-10} - 10^{-12}$  Дж/переключение. Одним из видов цифровых процессоров, в которых в ближайшее время могут быть использованы оптические логические элементы, являются кольцевые структуры и процессоры. Например, в [3] описан кольцевой процессор для реализации модели Изинга. Простейшим типом кольцевого процессора является также волоконное кольцевое динамическое запоминающее устройство в виде отрезка оптического волокна, выход которого связан со входом через простейший логический элемент — повторитель.

Возможность функционирования такой динамической памяти была продемонстрирована в [4], где в качестве повторителя использовалось оптико-электронное устройство, осуществляющее преобразование входного оптического сигнала в электрический, регенерацию его обычным электронным способом и затем преобразующее электрический сигнал снова в оптический.

Оптико-электронный повторитель в [4] позволил осуществить бистабильную динамическую кольцевую структуру, обеспечивающую циркуляцию больших сигналов, вводимых в кольцевую структуру, и подавление слабых оптических импульсов, если их мощность меньше определенной величины.

В настоящей работе рассматривается возможность получения стабильной и бистабильной динамической структуры при использовании в качестве усилителя-повторителя оптических усилителей на основе вынужденного комбинационного рассеяния света.

На рис. 1 схематически представлена динамическая кольцевая структура. Она включает усилитель и цепь обратной связи. По кольцевой структуре могут распространяться световые импульсы, причем время обхода импульсом структуры больше, чем длительность светового импульса. В зависимости от передаточной характеристики усилителя  $P_{\text{вых}}(P_{\text{вх}})$  могут реализовываться различные по своим свойствам кольцевые структуры.

На рис. 2 приведены типичные характеристики усилителя, обеспечивающих стабильную (а) и бистабильную (б) структуры. В первом случае возможно длительное циркулирование импульса только с одним определенным значением мощности. Стабильное значение мощности импульса определяется точкой пересечения передаточных характеристик усилителя и цепи обратной связи. В случае отсутствия в цепи обратной связи как затухания, так и усиления ее характеристика определяется соотношением  $P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}}$ . Усилитель с характеристикой типа 1 обеспечивает стабильное циркулирование импульса с мощностью  $P_{\text{ст}}$ . Причем если в кольцевой структуре окажется импульс мощностью, большей или меньшей  $P_{\text{ст}}$ , то он по мере циркулирования будет изменять свою амплитуду до стабильного уровня. Очевидно, что такой усилитель нельзя использовать для построения, например, кольцевой памяти, поскольку любой шумовой сигнал по мере его циркулирования будет стремиться по мощности к величине  $P_{\text{ст}}$ , равной мощности сигнала.

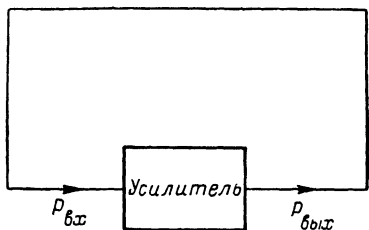


Рис. 1. Схематическое представление динамической кольцевой структуры.

Если передаточной характеристике усилителя соответствует кривая 2, то единственной точкой пересечения характеристик усилителя и цепи обратной связи является точка  $O$ . В этом случае стабильными являются импульсы с мощностью, равной нулю.

На рис. 2, б приведен другой тип передаточной характеристики усилителя (4). Эта характеристика пересекается с линией 3 обратной связи в точках  $A, B, C$ . Точки  $A, C$  являются стабильными и импульсы с соответствующими мощностями могут циркулировать по кольцевой структуре длительное время. Импульс

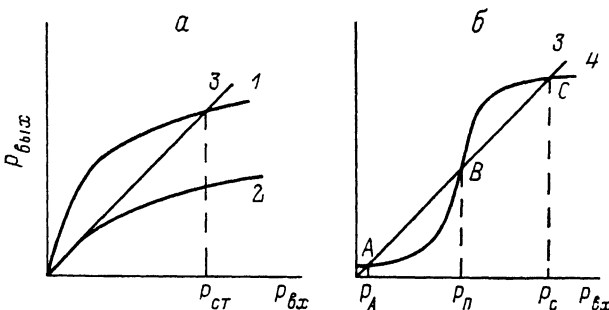


Рис. 2.

с мощностью, соответствующей точке  $B$ , не может циркулировать длительное время, так как любое случайное изменение его амплитуды приведет к убеганию импульса из точки  $B$  либо в точку  $A$ , либо в точку  $C$ . В этом смысле точка  $B$  является неустойчивой. Таким образом, усилитель с характеристикой типа 4 может обеспечить получение бистабильной кольцевой структуры. Причем импульсы с мощностью, меньшей  $P_{\text{н}}$  (рис. 2, б), будут стремиться при циркулировании в точку  $A$ , а импульсы с мощностью, большей  $P_{\text{н}}$ , — в точку  $C$ . Математическое условие, которому должна удовлетворять характеристика усилителя для обеспечения бистабильной структуры, можно записать в виде

$$\left. \frac{dP_{\text{вых}}}{dP_{\text{вх}}} \right|_{P_{\text{вх}}=P_{\text{н}}} > 1. \quad (1)$$

Это условие записано для случая отсутствия как затухания, так и усиления сигнала в цепи обратной связи.

Для рассмотрения вопроса о получении стабильной и бистабильной кольцевой структуры при использовании ВКР усилителя воспользуемся соотношениями, описывающими усилитель световых импульсов на основе вынужденного

комбинационного рассеяния света (ВКР) при попутном распространении световых импульсов в стекловолкне [5], без учета затухания света в стационарном режиме

$$P_{\text{н вых}} = \frac{P_0}{1 + \frac{\nu_{\text{н}}}{\nu_{\text{с}}} \frac{P_{\text{с вх}}}{P_{\text{н вх}}} \exp \left\{ \frac{g P_0}{S} l \right\}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{с вых}} = \frac{P_0 \frac{P_{\text{с вх}}}{P_{\text{н вх}}} \exp \left\{ \frac{g P_0}{S} l \right\}}{1 + \frac{\nu_{\text{н}}}{\nu_{\text{с}}} \frac{P_{\text{с вх}}}{P_{\text{н вх}}} \exp \left\{ \frac{g P_0}{S} l \right\}}, \quad (3)$$

где

$$P_0 = \frac{\nu_{\text{н}}}{\nu_{\text{с}}} P_{\text{с вх}} + P_{\text{н вх}},$$

$P_{\text{н вх}}$ ,  $P_{\text{н вых}}$ ,  $P_{\text{с вх}}$ ,  $P_{\text{с вых}}$  — соответственно мощности световых импульсов накачки и стоксова сигнала на входе и выходе стекловолкна на частотах  $\nu_{\text{н}}$  и  $\nu_{\text{с}}$ ;  $l$  — длина волкна;  $S$  — площадь поперечного сечения сердцевины;  $g$  — коэффициент ВКР усиления.

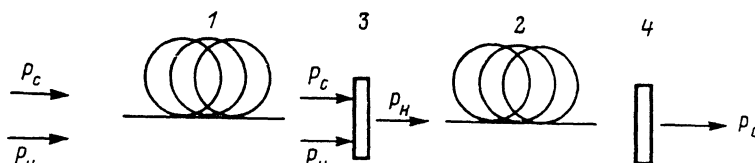


Рис. 3. Схема ВКР инвертора.

1, 2 — отрезки волкна; 3 — устройство ввода света, обеспечивающее передачу из волкна 1 в волкно 2 излучения с длиной волны накачки; 4 — устройство, обеспечивающее вывод только стоксова излучения.

В принципе в качестве информационного сигнала можно использовать как излучение с длиной волны накачки, так и излучение со стоксовой длиной волны. В результате возникают четыре возможных варианта выбора входных и выходных сигналов: 1) как входной, так и выходной сигнал имеют длину волны накачки; 2) входной сигнал имеет стоксову длину волны, выходной сигнал имеет длину волны накачки; 3) входной сигнал имеет длину волны накачки, выходной сигнал имеет стоксову длину волны; 4) как входной, так и выходной сигналы имеют стоксовы длины волн.

Легко видеть, что первые три варианта не обеспечивают длительной циркуляции импульсов, поскольку либо отсутствует усиление (вариант «1»), либо частоты входного и выходного сигналов разные (варианты «2», «3»). В варианте «4» мы получаем усилитель сигналов с характеристикой типа 1 или 2 (рис. 2, а). Такая характеристика обеспечивает стабильную структуру, но не может обеспечить бистабильной структуры, если только одновременно не реализуются какие-либо иные нелинейные процессы. Однако сложные цепи, состоящие из нескольких усилителей, позволяют получить бистабильную динамическую кольцевую структуру. Покажем последнее на одном интересном примере.

На рис. 3 схематически представлен предложенный в [2] ВКР инвертор, состоящий из двух отрезков волкна 1, 2 и устройства ввода света 3, обеспечивающего ввод из волкна 1 в волкно 2 только излучения накачки. Входной сигнал имеет стоксову длину волны и подается на вход волкна 1 синхронно с накачкой. При малых уровнях мощности стоксового входного сигнала или при его отсутствии импульс накачки проходит по первому отрезку волкна практически без ослабления, поскольку его параметры выбраны такими, чтобы мощность импульса накачки была ниже пороговой мощности ВКР, и вводится во второй отрезок волкна. Параметры второго отрезка волкна подбираются так, чтобы мощность введенного в него импульса накачки оказалась больше порогового уровня ВКР. В результате на выходе второго отрезка волкна возникает мощный стоксов импульс. При больших уровнях мощности стоксового импульса, вводимого в отрезок волкна 1, в нем возникает взаимодействие импульса на-

начки и стоксового импульса, приводящее к истощению накачки. Если уровень ниже порогового уровня мощности ВКР во втором отрезке волокна, и мощного стоксова импульса на выходе не образуется. Таким образом, при отсутствии входного стоксового импульса на выходе наблюдается мощный импульс, и, наоборот, наличие стоксового импульса на входе инвертора приводит к его отсутствию на выходе. Обратим внимание, что в этом случае входной и выходной сигналы могут иметь одинаковые частоты, если волокна 1 и 2 имеют одинаковые сдвиги частоты при ВКР. Именно этот случай и будем рассматривать ниже.

Образует кольцевую структуру, соединив последовательно два инвертора и подав сигнал с выхода второго инвертора на вход первого. Для исследования свойств полученной кольцевой структуры найдем передаточную характеристику  $P_{\text{вых}}(P_{\text{вх}})$ , описанного выше инвертора. Воспользуемся для этого выражениями (2) и (3). Будем считать, что мощность стоксового импульса на входе как первого, так и второго волокна много меньше мощности накачки, причем

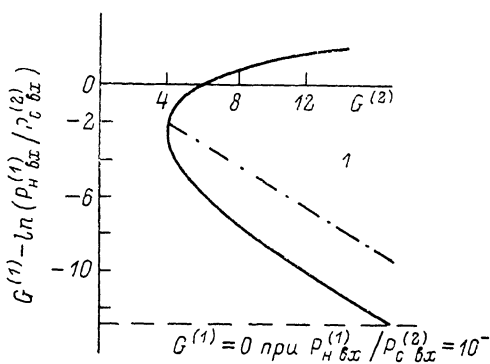


Рис. 4. Область существования бистабильных режимов работы кольцевой системы. 1 — бистабильная область, вне 1 — область с одним стабильным состоянием.

на вход второго волокна стоксов импульс либо подается от вспомогательного источника, либо образуется за счет спонтанного рассеяния накачки. Кроме того, пренебрежем истощением накачки в волокне 2 и будем считать, что  $v_c = v_n$ . Тогда из (2) и (3) получим следующие соотношения (индексы «1» и «2» относятся к волокну 1 и 2 соответственно):

$$P_{\text{нвх}}^{(1)} \approx \frac{P_{\text{нх}}^{(1)}}{1 + \frac{P_{\text{свх}}^{(1)}}{P_{\text{нх}}^{(1)}} \exp \left\{ \frac{g^{(1)} P_{\text{нвх}}^{(1)} l^{(1)}}{S^{(1)}} \right\}}, \quad (4)$$

$$P_{\text{свх}}^{(2)} \approx \exp \left\{ \frac{g^{(2)} \gamma P_{\text{нвх}}^{(1)} l^{(2)}}{S^{(2)}} \right\}, \quad (5)$$

где  $\gamma$  — коэффициент передачи излучения накачки с выхода первого волокна во второе. Введем обозначения

$$G^{(1)} = \frac{g^{(1)} P_{\text{нх}}^{(1)} l^{(1)}}{S^{(1)}}, \quad G^{(2)} = \frac{\gamma g^{(2)} P_{\text{нх}}^{(1)} l^{(2)}}{S^{(2)}}. \quad (6)$$

Учитывая, что входным сигналом инвертора  $P_{\text{вх}}$  является  $P_{\text{свх}}^{(1)}$ , а выходным сигналом  $P_{\text{свх}}^{(2)}$ , передаточную характеристику инвертора можно записать в виде

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{свх}}^{(2)} \exp \left\{ \frac{P_{\text{нвх}}^{(1)} G^{(2)}}{P_{\text{нх}}^{(1)} + P_{\text{вх}} \exp \{G^{(1)}\}} \right\}. \quad (7)$$

Известно, что два инвертора, включенных последовательно, выполняют роль усилителя-повторителя. Далее будем считать, что два инвертора идентичны по своим параметрам. Анализ соотношения (7) показывает, что такой усилитель может обладать как характеристикой, близкой к характеристике  $I$  (рис. 2, а), так и характеристикой типа 4 (рис. 2, б) в зависимости от соотношений параметров входящих в (7):  $G^{(1)}$ ,  $G^{(2)}$ ,  $P_{\text{нх}}^{(1)}$ ,  $P_{\text{свх}}^{(2)}$ . Для получения бистабильной кольцевой структуры должно выполняться соотношение (1), но так как производная  $dP_{\text{вых}}/dP_{\text{вх}}|_{P_{\text{вх}}=P_{\text{н}}}$  равна произведению соответствующих производных для инверторов и, как следует из (7), они отрицательны, то для получения бистабильной кольцевой структуры должно выполняться условие, накладываемое на производную передаточной характеристики одного инвертора в точке  $P_{\text{вх}}=P_{\text{н}}$

$$\left. \frac{dP_{\text{вых}}}{dP_{\text{вх}}} \right|_{P_{\text{вх}}=P_{\text{н}}} < -1. \quad (8)$$

Вычислив производную из соотношения (7) и учитывая, что  $P_{\text{вх}} = P_{\pi} = P_{\text{вых}}$ , получим, что для обеспечения бистабильной структуры необходимо

$$-\frac{P_{\pi} P_{\text{нвх}}^{(1)} G^{(2)} \exp\{G^{(1)}\}}{(P_{\text{нвх}}^{(1)} + P_{\pi} \exp\{G^{(1)}\})^2} < -1 \quad (9)$$

или

$$P_1 = P_{\text{нвх}}^{(1)} \frac{G^{(2)} - 2 - \sqrt{G^{(2)}(G^{(2)} - 4)}}{2 \exp\{G^{(1)}\}} < < P_{\pi} < P_2 = P_{\text{нвх}}^{(1)} \frac{G^{(2)} - 2 + \sqrt{G^{(2)}(G^{(2)} - 4)}}{2 \exp\{G^{(1)}\}}. \quad (10)$$

Из соотношения (10) следует, что для существования бистабильной циркулярной структуры  $G^{(2)}$  должно быть больше 4. При  $P_1 = P_{\pi} = P_2$  модуль производной (8) равен 1. Подставляя  $P_1, 2$  из (10) в (7), вместо  $P_{\text{вх}}$  и  $P_{\text{вых}}$  получим

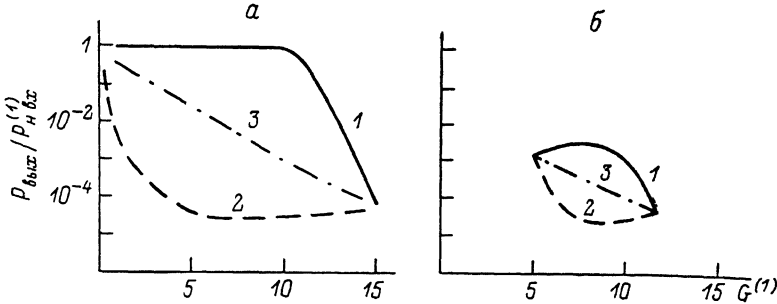


Рис. 5. Относительные мощности стабильных импульсов, соответствующих логической единице (1), нулю (2),  $P_{\text{вх}} = P_{\text{вых}}$  (3).

условия, которые связывают параметры, необходимые для получения бистабильной динамической циркулярной структуры

$$G^{(1)} = \ln \frac{G^{(2)} - 2 \pm \sqrt{G^{(2)}(G^{(2)} - 4)}}{2} + \ln \frac{P_{\text{нвх}}^{(1)}}{P_{\text{свх}}^{(2)}} - \frac{2G^{(2)}}{G^{(2)} \pm \sqrt{G^{(2)}(G^{(2)} - 4)}}. \quad (11)$$

Кривые, соответствующие соотношению (11), приведены на рис. 4. Они ограничивают область параметров  $G^{(1)}$  и  $G^{(2)}$ , при которых рассматриваемая структура будет бистабильной (область 1 на рис. 4). Ясно, что  $G^{(1)} < 0$  не имеет физического смысла, поэтому линия  $G^{(1)} = 0$  также ограничивает область параметров, при которых реализуется бистабильная динамическая структура.

Из (9) следует, что максимальное значение модуля производной  $dP_{\text{вых}}/dP_{\text{вх}}|_{P_{\text{вх}}=P_{\pi}}$  равно  $G^{(2)}/4$  и достигается при  $P_{\pi} = P_{\text{нвх}}^{(1)}/\exp\{G^{(1)}\}$ . Для обеспечения последнего необходимо, чтобы  $G^{(1)}$  и  $G^{(2)}$  были связаны соотношением

$$G^{(1)} = -\frac{G^{(2)}}{2} + \ln \frac{P_{\text{нвх}}^{(1)}}{P_{\text{свх}}^{(2)}}$$

(штрихпунктирная линия на рис. 4).

При учете затухания света в выражениях (2) и (3) мы приходим к тем же выводам, но параметры  $G^{(1)}$ ,  $G^{(2)}$  и др. принимают несколько иные значения

$$G^{(1)} = \frac{g^{(1)} P_{\text{нвх}}^{(1)}}{\alpha^{(1)} S^{(1)}} (1 - l^{-\alpha^{(1)}} l^{(1)}), \quad G^{(2)} = \frac{g^{(2)} P_{\text{нвх}}^{(1)} l^{-\alpha^{(1)}} l^{(2)}}{\alpha^{(2)} S^{(2)}} (1 - e^{-\alpha^{(2)}} l^{(2)}),$$

$P_{\text{свх}}^{(2)}$  следует заменить на  $P_{\text{свх}}^{(2)} \exp\{-\alpha^{(2)} l^{(2)}\}$ , где  $\alpha^{(1)}$ ,  $\alpha^{(2)}$  — коэффициенты затухания света в первом и втором волокнах.

Вычислим интенсивности стоксовых сигнальных импульсов, соответствующих стабильным состояниям. Как мы увидим ниже, эти интенсивности не отвечают условиям, при которых справедливы (4) и (5). Поэтому проведем расчет численно на основании точных выражений (2), (3). Расчет будем производить

в следующей последовательности. Стоксов сигнальный импульс мощностью  $P_{\text{с вх}}^{(1)}$  и импульс накачки мощностью  $P_{\text{н в}}^{(1)}$  вводим в волокно 1 инвертора. С помощью соотношения (2) определим мощность накачки на выходе волокна 1. Затем введем эту накачку в волокно 2 инвертора и с помощью соотношения (3) определим мощность стоксового импульса на выходе инвертора. Подадим выходной импульс снова на вход инвертора и проделаем всю процедуру вычислений еще раз. После достаточно большого числа шагов мы приходим, в зависимости от параметров инвертора, к двум различным ситуациям. В одной из них мощность импульса как на входе, так и на выходе каждого инвертора стремится к одному и тому же значению. Такое поведение соответствует наличию только одного стабильного состояния кольцевой системы. В другой ситуации мощности на выходе инвертора принимают два значения (большое и малое), чередующиеся через один шаг. Эти мощности соответствуют двум стабильным состояниям бистабильной кольцевой системы. Импульс большой интенсивности можно считать, как это обычно принято, логической единицей, импульс малой интенсивности — логическим нулем. На рис. 5 приведены результаты численного расчета стабильных амплитуд логических единиц и нулей. Кроме того, на этом же рисунке приведены значения мощностей входного стоксового импульса, соответствующего условию  $P_{\text{вх}} = P_{\text{вых}}$ . Эта линия разделяет амплитуды нулей и единиц. Если амплитуда импульса лежит выше линии, соответствующей  $P_{\text{вх}} = P_{\text{вых}}$ , то такой импульс является единицей; если ниже, то нулем. В расчетах считалось, что отношение мощности затравочной стоксовой волны на входе в волокно 2 к мощности накачки равно  $10^{-5}$ .

Рис. 5 показывает зависимость стабильных амплитуд нулей и единиц от  $G^{(1)}$  при фиксированном значении  $G^{(2)}$ . Мы видим, что при  $G^{(2)} = 20$  (рис. 5, а) имеется область значений  $G^{(1)}$  от 0 до 15, при которых кольцевая система является бистабильной. Причем стабильная амплитуда единицы почти всюду равна мощности накачки, а стабильная амплитуда нуля близка к мощности затравочной шумовой стоксовой волны. При уменьшении  $G^{(2)}$  область значений  $G^{(1)}$ , при которых система является бистабильной, сужается, и при  $G^{(1)} = 6$  (рис. 5, б) система является бистабильной при значениях  $G^{(1)}$  от 6 до 11.5, что хорошо соответствует результатам (рис. 4). Уменьшение  $G^{(2)}$ , как мы видим, приводит также к уменьшению стабильной мощности логической единицы.

Уровень входного сигнала, соответствующего условию  $P_{\text{вх}} = P_{\text{вых}}$ , всюду заметно меньше  $P_{\text{н вх}}^{(1)}$ , что оправдывает приближения, использованные при получении результатов (рис. 4).

Таким образом, мы видим, что предложенные в [2] ВКР инверторы позволяют полностью оптическими методами реализовать бистабильные кольцевые системы, на базе которых возможно построение таких устройств, как например полностью оптическая динамическая волоконная память, способная запоминать информацию, поступающую на нее со скоростями до  $10^{11}$  бит/с и даже более.

### Литература

- [1] Кузин Е. А., Петров М. П. Автометрия, 1986, № 2, с. 87—92.
- [2] Кузин Е. А., Петров М. П., Спиринов В. В. Письма ЖТФ, 1986, т. 12, № 7, с. 406—409.
- [3] Walker A. C. Appl. Opt., 1986, v. 25, N 10, p. 1578—1585.
- [4] Беловолов М. И., Головин Н. И., Головина Т. И. и др. Квант. электр., 1985, т. 12, № 1, с. 214—216.
- [5] Auyeung J., Yariv A. IEEE J. Quant. Electron., 1978, v. QE-14, N 15, p. 347—352.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
8 апреля 1987 г.