

# Эффективный многокаскадный ВРМБ-усилитель

И.М.Бельдюгин\*, В.В.Давыдов\*, В.К.Демкин\*, В.Ф.Ефимков\*\*, И.Г.Зубарев\*\*,  
С.И.Михайлов\*\*, В.Б.Соболев\*\*

*Предложена и реализована схема двухкаскадного ВРМБ-усилителя слабых сигналов с независимой накачкой каждого из каскадов усиления. Эта схема не обладает недостатками, присущими однокаскадному усилителю, т.к. в ней конкурирующее влияние коррелированных с накачкой шумовых компонент ослаблено тем, что они усиливаются либо только в первом каскаде, либо только во втором. Экспериментально показано, что данная система позволяет усиливать слабые сигналы в  $10^6 - 10^9$  раз при ширине полосы, определяемой типом используемого ВРМБ-активного вещества и его инкрементом усиления ( $10^{-2} - 10^{-4}$  см $^{-1}$ ). Получен коэффициент усиления  $\sim 10^8$  при сохранении пространственных характеристик усиливаемого сигнала.*

**Ключевые слова:** ВРМБ-усилитель, двухкаскадное усиление, усиление слабого сигнала.

## 1. Ограничения усиления ВРМБ-усилителей

Несмотря на кажущуюся простоту реализации высоких ( $\sim \exp(25 - 30)$ ) усиления, определяемых порогом начала генерации из спонтанных шумов, а также на возможность работы во всем видимом и ближнем ИК диапазоне, усилители на ВРМБ до сих пор не нашли применения в практических лазерных устройствах приема и обработки изображений. Основными отрицательными факторами здесь являются конкурирующее влияние генерации из спонтанных шумов, наличие ненулевой корреляции пространственных структур накачки и стоксова сигнала, приводящей к генерации обращенных по отношению к накачке стоксовых пространственных компонент [1], и значительное уменьшение коэффициента усиления в режиме насыщения из-за обеднения накачки при встречном распространении взаимодействующих волн [2].

Для преодоления последнего фактора в работе [2] был предложен и реализован двухкаскадный ВРМБ-усилитель, причем излучение накачки сначала подавалось в первый каскад усиления, а затем – во второй. Подобный прием позволил резко увеличить коэффициент утилизации накачки, и параметры такого усилителя приблизились к соответствующим параметрам усилителя на попутном рассеянии. В настоящей работе исследуется двухкаскадный ВРМБ-усилитель с независимой накачкой каждого из каскадов усиления. Это позволило, с одной стороны, сохранить преимущества двухкаскадной схемы [2], а с другой – в значительной мере ослабить влияние первых двух факторов, т.к. компоненты с сопряженной по отношению к накачке структурой усиливаются либо только в первом каскаде, либо только во втором.

Теоретическое рассмотрение проведем в предположении стационарности ВРМБ в случае взаимодействия монохроматических волн. Тогда пространственные компоненты излучения накачки и стоксовой волны можно представить в виде фурье-разложений по плоским волнам [3–5]:

$$E_p = \sum_n A_n(z) \exp(ik_n r), \quad E_s = \sum_m a_m(z) \exp(-ik_m r). \quad (1)$$

Пользуясь (1), можно получить [6] уравнения для средней интенсивности накачки  $I_p(z) = \sum_n |A_n|^2$ ; стоксова сигнала, коррелированного с накачкой,  $a_n^c = A_n^* \sum_m A_m a_m / I_p$  и стоксова сигнала, некоррелированного с накачкой,  $a_n^{nc} = a_n - A_n^* \sum_m A_m a_m / I_p$ :

$$\frac{dI_s^c}{dz} = 2gI_p I_s^c + gI_s^c I_s^{nc},$$

$$\frac{dI_s^{nc}}{dz} = gI_p I_s^{nc} - gI_s^c I_s^{nc}, \quad (2)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = 2gI_p I_s^c + gI_p I_s^{nc},$$

где  $z$  – продольная координата распространения сигнала;  $I_s^c = \sum_n |a_n^c|^2$  и  $I_s^{nc} = \sum_n |a_n^{nc}|^2$  – средние интенсивности коррелированной и некоррелированной с накачкой частей стоксова сигнала. В отсутствие насыщения усиления система (2) переходит в систему

$$\frac{dI_s^c}{dz} = 2gI_p I_s^c, \quad \frac{dI_s^{nc}}{dz} = gI_p I_s^{nc}, \quad (3)$$

что является иллюстрацией усиления коррелированной компоненты с двойным инкрементом, а некоррелированной – с одинарным.

Возможность применения уравнений типа (2) непосредственно следует из простых оценок числа пространственных компонент накачки ( $n \gg 1$ ) и характерных усиле-

\*Государственное унитарное предприятие "НПО «Астрофизика»", Россия, 123424 Москва, Волоколамское ш., 95

\*\*Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

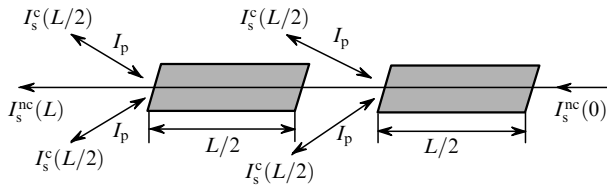


Рис.1. Принципиальная схема двухкаскадного ВРМБ-усилителя.

ний на длине продольной корреляции ( $\Gamma_c \ll 1$ ), что мы и проделали, исходя из конкретной геометрии эксперимента. Поскольку входной стоксов сигнал не связан по пространственной структуре с накачкой, то он и является некоррелированной компонентой. Критерий качественной работы ВРМБ-усилителя можно сформулировать следующим образом:  $I_s^{nc}(L) \gg I_s^c(L)$ .

Из (3) непосредственно видно, что второе уравнение описывает усиление в среднем поле накачки, а первое – хорошо известное ОВФ. Очевидно, что в случае ВРМБ-усилителя механизм ОВФ и является фактором, приводящим, с одной стороны, к появлению искажений пространственной структуры усиливаемого сигнала, а с другой – к ограничению усиления из-за насыщения, т. к. ОВФ может давать существенный вклад в весь стоксов сигнал на выходе из усилителя. Полностью устранить паразитное влияние ОВФ невозможно, поскольку вклад в ненулевую корреляцию полей вносят собственные спонтанные шумы усилителя, возможные перекрытия диаграмм направленности накачки и стоксова сигнала из-за дифракции на приемной апертуре и неоднородностях оптических элементов ВРМБ-усилителя, а также нелинейные процессы типа четырехволнового смешения «вперед» [1]. Как уже указывалось выше, двухкаскадный ВРМБ-усилитель в значительной мере лишен подобных недостатков, т. к. паразитная ОВФ-компонента стоксова сигнала усиливается практически только на половине суммарной длины усиления. Механизм действия подобной корреляционной развязки представлен на рис.1.

## 2. Двухкаскадный ВРМБ-усилитель

Для проведения экспериментальных исследований была создана лазерная установка на неодимовом стекле, включающая в себя одномодовый одночастотный задающий генератор с пассивной модуляцией добротности, систему предварительного усиления, ВРМБ-генератор стоксова излучения на основе кюветы с четыреххлористым углеродом, в которую фокусировалась часть излучения, систему развязки на ячейках Фарадея, двухкаскадный ВРМБ-усилитель и канал формирования накачки на основе двухпроходной усилительной головки типа ГОС-1000. Импульсы накачки были синхронизованы с входным стоксовым излучением с погрешностью до 4 нс при длительности  $\sim 60$  нс. Основные элементы оптической схемы изображены на рис.2.

Одномодовое одночастотное стоксово излучение проходило последовательно через систему калиброванных фильтров 2, оптические клинья 5, однократный телескоп с пространственным фильтром 4 и вводилось в двухкаскадный усилитель 6, а затем после усиления направлялось при помощи линзы 7 в ОВФ-зеркало 8. Пучок накачки с поперечным размером  $\sim 45$  мм формировался при помощи полупрозрачного и 100%-го зеркала и вводился в каскады ВРМБ-усилителя 6 при помощи фокуси-

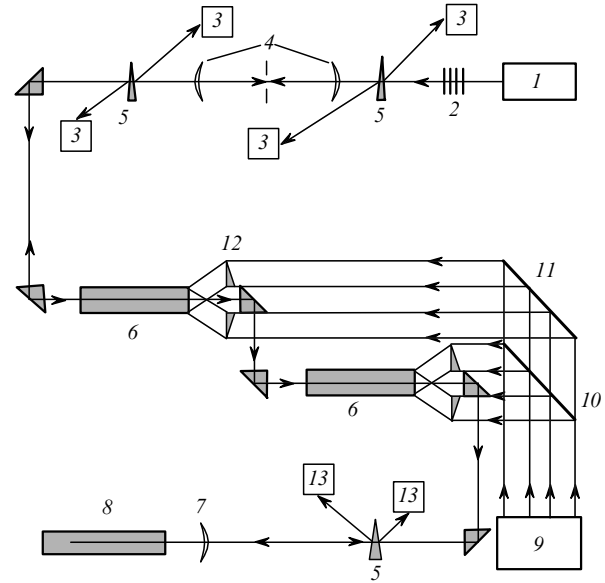


Рис.2. Схема эксперимента:

1 – источник стоксова сигнала; 2 – калиброванные фильтры; 3 – calorиметры системы регистрации нелинейных искажений при усилении; 4 – телескоп с пространственным фильтром; 5 – отводящие клинья; 6 – каскады усилителя на ВРМБ; 7 – линза, фокусирующая выходное стоксово излучение в ОВФ-зеркало; 8 – ОВФ-зеркало; 9 – источник накачки ВРМБ-усилителя; 10 – полупрозрачное зеркало; 11 – зеркало с  $R = 100\%$ ; 12 – призмные растры; 13 – calorиметры выходного и отраженного излучения.

рующих растров 12 [7] с фокусным расстоянием  $\sim 25$  см и размером каждой ячейки  $10 \times 10$  мм. Каскад усиления представлял собой светопровод квадратного сечения  $10 \times 10$  мм длиной 20 см, который был заполнен четыреххлористым углеродом. На длине волны неодимового лазера характерное время жизни акустических фононов  $\tau \sim 1$  нс, что обеспечивало стационарный режим ВРМБ и ширину полосы усиления  $\Delta\nu = 1/\pi\tau c\Gamma^{0.5}$  примерно  $10^{-2} - 10^{-3}$   $\text{см}^{-1}$ , где  $c$  – скорость света;  $\Gamma$  – суммарный инкремент усиления в обоих каскадах усиления. Система calorиметров 3 служила для определения степени нелинейных искажений сигнала при усилении. Для исключения влияния четырехволнового смешения ОВФ-зеркало размещалось на расстоянии  $\sim 12$  м от ВРМБ-усилителей, и отраженное от него излучение проходило усилители в обратном направлении, когда процесс усиления уже подходил к концу.

В экспериментах измерялись зависимости эффективности усиления от инкремента усиления при различных энергиях входного стоксова сигнала, определялись нелинейные искажения сигнала при усилении, регистрировались осциллограммы входных и выходных импульсов стоксова излучения и накачки. Регистрация временного поведения исследуемых сигналов проводилась при помощи фотоэлементов ФК50КП и скоростных осциллографов С7-19 (на рис.2 не указаны).

## 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис.3 представлены зависимости коэффициента усиления двухкаскадного ВРМБ-усилителя от полного инкремента усиления  $\Gamma$  при энергии входного стоксова сигнала  $\sim 8 \cdot 10^{-8}$  Дж. Теоретически усиление было получено в результате численного решения стационарных

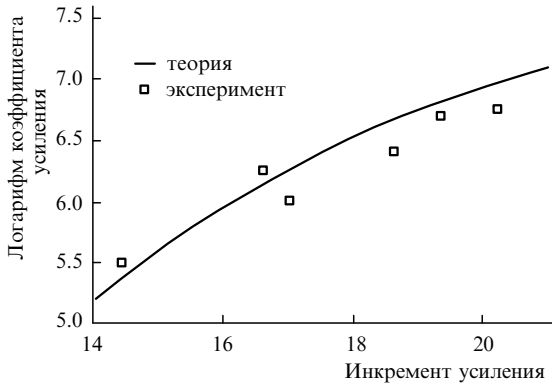


Рис.3. Теоретическая и экспериментальная зависимости коэффициента усиления двухкаскадного ВРМБ-усилителя от полного инкремента усиления при энергии входного стока сигнала  $\sim 8 \cdot 10^{-8}$  Дж.

уравнений (2) с учетом потерь из-за френелевского отражения на элементах оптической схемы усилителя и того, что  $I_s^c \sim 0$ . При энергии входного сигнала  $\sim 10^{-7}$  Дж выходной сигнал достигал энергии  $\sim 0.5$  Дж. Отметим, что однокаскадный ВРМБ-усилитель с эквивалентным инкрементом усиления  $\Gamma$  начинал возбуждаться при  $\Gamma \sim 10$ .

Нелинейные искажения сигнала определялись в процессе усиления. Первоначально устанавливался баланс между показаниями калориметров 3, измеряющих энергию сигнала до и после телескопа с пространственным фильтром. Затем в режиме усиления аналогичные измерения проводились с усиленным сигналом, отраженным от ОВФ-зеркала 8. Пространственный фильтр телескопа 4 настраивался таким образом, чтобы его пропускание в прямом направлении составляло 0.9. Баланс показаний калориметров для усиленного и отраженного от ОВФ-зеркала сигнала менялся в пределах 1 – 0.8. Это свидетельствует о достаточно малых нелинейных искажениях сигнала при усилении в  $\sim 10^6$  раз.

При уменьшении энергии входного стока сигнала до менее  $10^{-9}$  Дж и при полном максимальном инкременте усиления  $\Gamma_{max} < 20$  система переходила в режим линейного усиления, при котором возможно максимальное усиление. Для оценки энергетической эффективности может служить простая аналитическая формула, полученная в предположении взаимодействия синхронных импульсов треугольной формы:

$$K \approx \frac{\text{exp } \Gamma_{max}}{\Gamma_{max}/2}, \quad \Gamma_{max} = gI_{max}L.$$

В данном режиме происходит значительное сокращение стока импульса в процессе прохождения ВРМБ-усилителя. Вышесказанное иллюстрирует рис.4, на котором изображены результаты численного моделирования.

Экспериментально полученные значения усиления  $\sim 4 \cdot 10^7$  по энергии и  $\sim 3.5 \cdot 10^8$  по интенсивности при  $\Gamma_{max} \sim 20$  и энергии входного сигнала  $\sim 10^{-9}$  Дж находятся в хорошем согласии с расчетами. На рис.5 приведены осциллограммы выходных стоковых импульсов, полученные в режимах линейного усиления и насыщения. Хорошо заметно существенное сокращение выходного стока импульса в режиме линейного усиления.

Представляет большой интерес обратный по отношению к рассмотренному выше вариант усиления в режиме глубокого насыщения, который обычно называется ре-

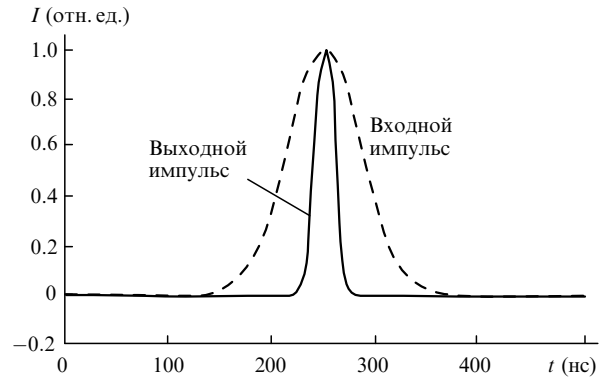


Рис.4. Укорочение стока импульса в режиме ненасыщенного усиления.

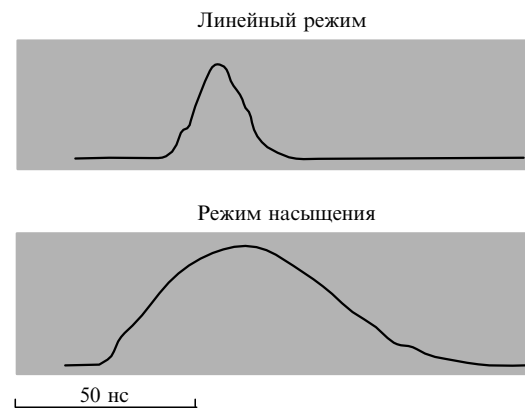


Рис.5. Осциллограммы выходных стоковых импульсов в режимах ненасыщенного усиления и насыщения.

жимом суммирования (beam combining). На рис.6 представлены теоретические зависимости временного хода взаимодействующих импульсов для энергии входного сигнала  $\sim 10^{-1}$  Дж, входных импульсов гауссовой формы и максимального суммарного инкремента  $\Gamma_{max} = 12$ . При этом энергия выходного стока сигнала сравнима с энергией накачки второго каскада, а пиковая интенсивность превышает пиковую интенсивность накачки. Для сравнения на рис.7 приведены полученные экспериментально в оговоренных выше условиях осциллограммы накачки и стока сигнала. Результаты энергетических измерений в режиме сильного насыщения приведены в табл.1.

В табл.1  $E_{out}$  – энергия выходного стока сигнала,  $E_p$  – энергия накачки второго каскада усиления. Теоретически полученное отношение этих величин близко к единице. Погрешность абсолютных измерений при по-

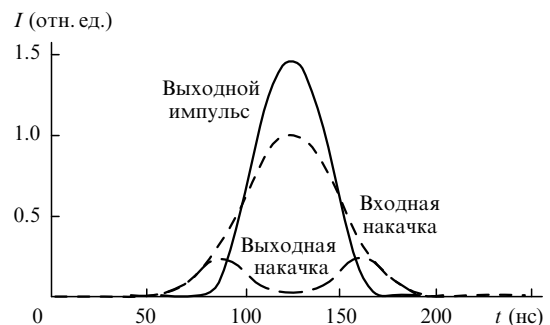


Рис.6. Рассчитанные формы импульсов в режиме насыщения.

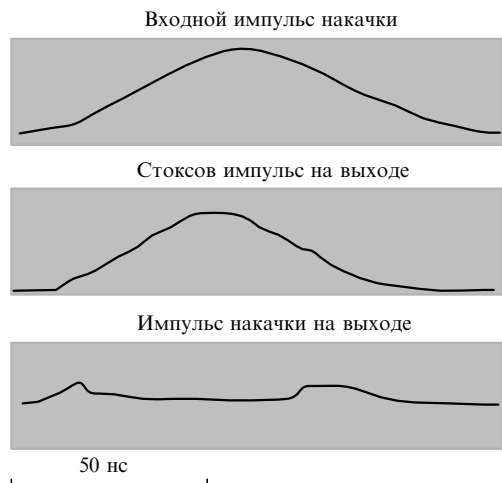


Рис.7. Осциллограммы импульсов накачки на входе и выходе из ВРМБ-усилителя, а также осциллограмма выходного стоксова импульса в режиме сильного насыщения.

Табл.1.

$E_{in}$ (мДж)	$E_{out}$ (Дж)	$E_p$ (Дж)	$E_{out}/E_p$
80	6.1	7.3	0.84
80	6.7	8.3	0.8
90	6.6	7.4	0.9
100	5.0	5.2	0.9

мощи использованных в эксперименте калориметров типа ИКТ-1Н составляла  $\sim 10\%$ . Погрешность относительной калибровки определялась стандартным способом – путем одновременных измерений энергии одного и

того же пучка – и не превышала 2–3%, откуда следует, что при  $E_{out}/E_p \sim 1$  погрешность определения данного отношения составляет 3–4%. Полученный разброс экспериментальных данных может быть объяснен неконтролируемыми изменениями длительности импульса накачки от одной лазерной вспышки к другой и возможными резкими скачками фазы стоксова сигнала [8], что приводит к частичной потере монохроматичности и, как следствие этого, к уменьшению эффективности преобразования.

Таким образом, предложенный и реализованный в данной работе двухкаскадный ВРМБ-усилитель обладает параметрами, которые сравнительно легко рассчитываются без учета паразитной генерации с ОВФ в каналы накачки. Данный усилитель обладает низкими нелинейными искажениями, что делает возможным его применение в качестве узкополосного усиливающего фильтра для приема изображений удаленных объектов с коэффициентом усиления  $\sim 10^6 - 10^9$ , а в комбинации с лазерными усилителями позволяет получить коэффициент усиления  $\sim 10^{12}$ .

1. Гордеев А.А., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Михайлов С.И., Соболев В.Б. *Квантовая электроника*, **20**, 1005 (1993).
2. Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Михайлов С.И., Соболев В.Б. *Квантовая электроника*, **20**, 1021 (1993).
3. Бельдюгин И.М., Галушкин М.Г., Земсков Е.М. *Квантовая электроника*, **3**, 2467 (1976).
4. Сидорович В.Г. *ЖТФ*, **46**, 2168 (1976).
5. Басов Н.Г., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Михайлов С.И. *Труды ФИАН*, **172**, 14 (1986).
6. Аникеев И.Ю., Зубарев И.Г., Михайлов С.И. *Квантовая электроника*, **13**, 142 (1986).
7. Грасюк А.З., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Котов А.В., Смирнов В.Г. *Труды ФИАН*, **91**, 131 (1977).
8. Басов Н.Г., Зубарев И.Г., Миронов А.Б., Михайлов С.И., Окулов А.Ю. *Письма в ЖЭТФ*, **31**, 685 (1980).