

Усиление стоксовых сигналов с ОВФ в комбинированной системе лазерного и ВРМБ-усилителей

И.М.Бельдюгин, В.Ф.Ефимков, И.Г.Зубарев, С.И.Михайлов, В.Б.Соболев

Исследованы различные варианты усиления стоксовых сигналов. Предложен и реализован ряд новых систем, таких как ВРМБ-усилитель в нестационарном режиме усиления и система комбинированного усиления типа лазерный усилитель – ВРМБ-усилитель. Найдены условия, при которых усиление происходит при минимальных искажениях пространственной структуры сигнала. Использование ОВФ-зеркала в системе комбинированного усиления позволило создать двухпроходную систему усиления и ОВФ слабых сигналов. Получены коэффициенты усиления до 10^{16} при качестве ОВФ не менее 80 %, выходной энергии ~ 1 Дж и длительности импульса ~ 30 нс.

Ключевые слова: ВРМБ-усилитель, неодимовый усилитель, ОВФ-зеркало, многопроходные схемы.

1. Введение

Исследование предельных характеристик усилителей позволяет корректно определить области и перспективы их использования. Достаточно привлекательными для этих целей представляются усилители на основе ВРМБ. Они обладают большими коэффициентами усиления при очень узких полосах усиления (см. [1] и цитированную там литературу). К недостаткам этих усилителей следует отнести большие приведенные ко входу шумы. Так, если в обычных лазерных усилителях импульсных сигналов при регистрации усиленного излучения в одной пространственной моде приведенные ко входу шумы по мощности равны одному фотону в полосе усиления ($P_{\text{noise}} = h\nu\Delta\nu$), то для ВРМБ-усилителей число шумовых фотонов в полосе усиления $k_B T / (h\Omega)$ составляет $\sim 10^3 - 10^4$, где k_B – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура среды, Ω – частота акустических фотонов, участвующих в процессе ВРМБ. При этом по абсолютной величине приведенные ко входу шумы ВРМБ-усилителей все равно оказываются меньше, чем соответствующие величины для большинства твердотельных лазерных систем, т. к. полосы усиления различаются более чем на четыре-шесть порядков в пользу ВРМБ-усилителей.

В связи с этим совершенно естественным представляется желание объединить в одной системе достоинства ВРМБ- и твердотельных лазерных усилителей. Для этого перед ВРМБ-усилителем необходимо установить твердотельный лазерный усилитель с коэффициентом усиления, большим числа приведенных ко входу шумовых фотонов ВРМБ-усилителя. В этом случае комбинированный усилитель по приведенным ко входу шумам может быть практически эквивалентен лазерному усилителю, т. е. иметь фактически один шумовой фотон в полосе усиления. Но полоса усиления при этом будет определяться

полосой ВРМБ-усилителя, а коэффициент усиления всей системы равняться произведению коэффициентов усиления комбинированных усилителей. Подобные работы проводились несколькими научными группами [2, 3]. Однако нам представляется, что в этих работах не были реализованы предельные характеристики использовавшихся систем и остались без внимания некоторые особенности подобных комбинированных систем (усилителей). К этим особенностям в первую очередь относятся возможные искажения усиливаемого излучения в твердотельных лазерных усилителях, а также одновременный учет эффектов нестационарности и насыщения для конкретной формы усиливаемых импульсов в ВРМБ-усилителях.

2. Экспериментальная установка

На рис.1 представлена схема каналов формирования излучения накачки ВРМБ-усилителя и входного стоксова сигнала. Задающий генератор 1 представлял собой лазер на неодимовом стекле с пассивной модуляцией добротности, селекцией продольных и поперечных мод, который функционировал в одночастотном и одномодовом режиме с длительностью моноимпульса ~ 50 нс по полувисоте и энергией ~ 20 мДж.

Его излучение после прохождения развязки Фарадея 2, диафрагмы 3 диаметром 4 мм и предварительного усилителя 4 делится полупрозрачным зеркалом 5 на два пучка, которые направляются в соответствующие каналы поляризаторами 7. Один из пучков поступает в генератор стоксова сигнала (линза с фокусным расстоянием $f = 30$ см и кювета со смесью Хе ($p = 39$ атм) и SF₆ ($p = 10$ атм) при суммарном давлении 49 атм). Отраженное от кюветы излучение на стоксовой частоте проходит через поляризатор, развязку Фарадея 2 и оптический ослабитель стоксова сигнала 11. Два вентиля Фарадея 2 служат для защиты генератора стоксова сигнала и задающего генератора от усиленного в обратном направлении стоксова излучения (см. ниже). Энергии и угловые характеристики входного ($E^{\text{in}}, \theta^{\text{in}}$) и усиленного в обратном направлении ($E^{\text{out}}, \theta^{\text{out}}$) стоксовых сигналов измеряются системами 13 и 14. Второй пучок от задающего генератора отражается от глухого зеркала 6 и также проходит через поляризатор. Из этого пучка мягкой диафрагмой 10 диаметром

И.М.Бельдюгин. ГУП «НПО "Астрофизика"», Россия, 125424 Москва, Волоколамское ш., 95

В.Ф.Ефимков, И.Г.Зубарев, С.И.Михайлов, В.Б.Соболев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: efimkov@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 29 мая 2006 г., после доработки – 29 сентября 2006 г.

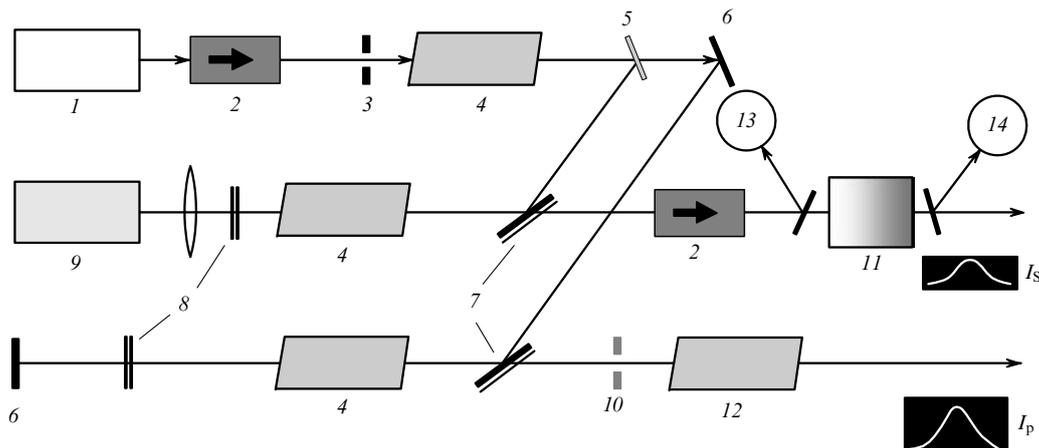


Рис.1. Схема формирования излучения накачки и стока сигнала:

1 – задающий генератор; 2 – развязка Фарадея; 3 – диафрагма; 4 – предварительный усилитель; 5 – полупрозрачное зеркало; 6 – глухое зеркало; 7 – поляризаторы; 8 – ромб Френеля; 9 – генератор стока сигнала; 10 – мягкая диафрагма; 11 – калиброванный оптический ослабитель; 12 – окончательный усилитель излучения накачки; 13 и 14 – системы регистрации характеристик входных и выходных импульсов; I_S и I_P – интенсивности стока сигнала и сигнала накачки соответственно.

6 мм вырезается центральная часть с практически однородным по поперечному сечению распределением интенсивности. Два ромба Френеля 8 служат для поворота плоскости поляризации дважды прошедшего через них излучения на 90° . Таким образом происходит формирование излучения стока сигнала и излучения накачки ВРМБ-усилителя.

Одним из важных элементов данной схемы является оптический ослабитель 11 с коэффициентом ослабления K_{att} . Он должен обеспечивать контролируемое изменение энергии входного стока импульса в широком диапазоне, превышающем двенадцать порядков величины. Энергии импульсов измерялись интегрирующими фотодиодами, сигналы с которых подавались на двухканальные цифровые осциллографы. Фотодиоды не обладают таким динамическим диапазоном. Часто используемые для ослабления оптических сигналов скрещенные поляризаторы, в том числе призмы Глана – Томсона, также не обеспечивают указанный диапазон. Формально такой диапазон можно перекрыть набором нейтральных светофильтров. Однако необходимо учесть, что в наших экспериментах используется практически монохроматическое излучение. В связи с этим возможная интерференция излучения, отраженного от поверхностей фильтров как внутри них, так и в зазоре между ними, может приводить к очень большим и неконтролируемым изменениям суммарного пропускания. Поэтому мы применяли ослабитель, который отличается от разработанного нами ранее в [1] тем, что содержит не три, а четыре секции (рис.2).

Входное стокосово излучение, падающее на плоскопараллельные стеклянные пластины, поляризовано в плоскости падения (p-поляризация). Угол падения ($\sim 23.5^\circ$) выбран таким, что при показателе преломления $n = 1.506$ коэффициент ослабления излучения при двукратном отражении от поверхности каждой пластины равен 10^3 . При этом входной пучок имел диаметр ~ 3 мм, а расстояние между центрами выходящих из пластины пучков составляло ~ 23 мм. Меняя конфигурацию диафрагм и применяя компенсирующую пластину [1], можно устанавливать коэффициент ослабления излучения K_{att} , равным 10^{3m} , где $m = 1, 2, 3, 4$. В частности, рис.2 соответствует $K_{att}^{(m=4)} = 10^{12}$, если убрать лобую из диафрагм (4 или 8), то получим $K_{att}^{(m=2)} = 10^6$, если убрать обе диафрагмы, то $K_{att} = 1$. При этом выходящее из ослабителя излучение 12 во всех случаях распространяется по одному и тому же пути. Небольшие френелевские потери излучения на поверхностях пластин автоматически учитываются при использовании методики относительного измерения коэффициентов усиления (см. ниже). Для более плавного изменения коэффициента ослабления применялись также два нейтральных светофильтра с коэффициентами ослабления 7 и 25. При использовании обоих фильтров они устанавливались с двух сторон от ослабителя 11. Благодаря высокому оптическому качеству фильтры не нарушали настройку системы при их введении в оптический тракт.

На рис.3 приведена схема комбинированного усилителя. Линза 9 с $f = 3.5$ м создает изображение мягкой

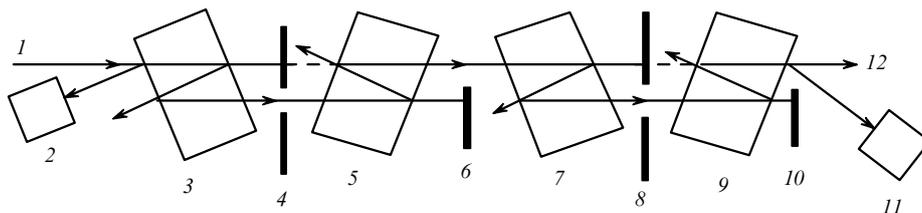


Рис.2. Оптическая схема ослабителя стока сигнала (11 на рис.1):

1 – входной стокосов сигнал; 2 – фотоприемник, измеряющий входной сигнал; 3, 5, 7, 9 – плоскопараллельные стеклянные пластины ($\varnothing 60 \times 40$ мм); 4, 8 – диафрагмы, выделяющие один из пучков, прошедших через пластину; 6, 10 – экраны; 11 – фотоприемник, регистрирующий излучение, распространяющееся в обратном по отношению к выходному ослабленному сигналу 12 направлении; штриховые линии, которых нет в реальной схеме, дополняют всю ось лазерного пучка в отсутствие диафрагм 4 и 8; преломление пучков в пластинах не показано.

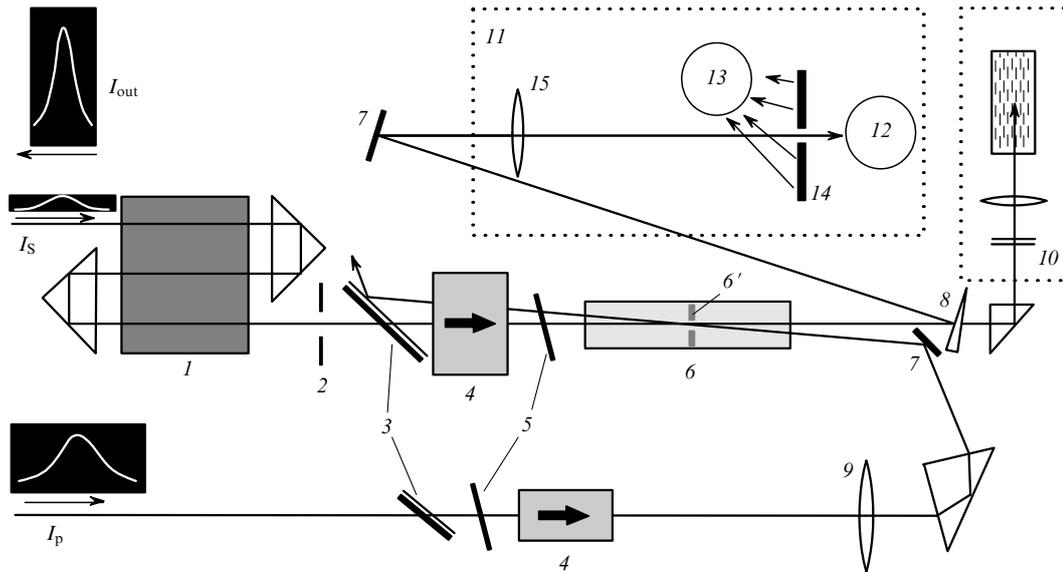


Рис.3. Оптическая схема эксперимента:

1 – трехпроходный усилитель на неодимовом стекле; 2 – фильтрующая диафрагма; 3 – поляризаторы; 4 – развязка Фарадея; 5 – пластинки из кристаллического кварца; 6 – ВРМБ-усилитель; 6' – изображение мягкой диафрагмы (10 на рис.1); 7 – глухое зеркало; 8 – оптический клин; 9 – линза, транслирующая изображение мягкой диафрагмы (10 на рис.1) в центр ВРМБ-усилителя; 10 – ОВФ-зеркало с поворотом поляризации на 90° ; 11 – система регистрации энергии усиленного сигнала и шума; 12, 13 – фотодиоды; 14 – диафрагма; 15 – линза; I_{out} – интенсивность выходного излучения.

диафрагмы (10 на рис.1) в центре ВРМБ-усилителя 6. При этом пучок накачки на всем протяжении ВРМБ-усилителя имеет практически постоянный диаметр ~ 4 мм с достаточно однородным поперечным распределением интенсивности. Входной стоксов пучок диаметром ~ 2.5 мм после усиления в трехпроходном усилителе 1 на неодимовом стекле пересекает под малым углом пучок накачки, постоянно находясь внутри него в пределах ВРМБ-усилителя. Это обеспечивает максимальный коэффициент ВРМБ-усиления и позволяет при теоретическом анализе использовать приближение плоских волн. ВРМБ-усилитель представляет собой кювету с оптическим диаметром 20 мм и длиной 50 см. Кювета заполнена такой же смесью, как и генератор стоксова сигнала. Для выравнивания давлений и парциальных концентраций смесей кюветы соединялись трубопроводом и выдерживались в течение недели. Очень важным для достижения максимального коэффициента усиления является отсутствие деполаризации на окнах кюветы ВРМБ-усилителя. Вращатели Фарадея 4, кварцевые пластинки 5 и поляризаторы 3 служат для согласования поляризаций взаимодействующих волн в ВРМБ-усилителе и для развязки предварительных каскадов установки от распространяющегося в обратном направлении излучения.

Система 11 на рис.3 регистрирует усиленное в прямом направлении стоксово излучение. Это излучение фокусируется линзой 15 в отверстие диафрагмы 14 (угловой размер $\sim 10^{-3}$ рад), и энергия импульса измеряется фотодиодом 12. Шумовое излучение ВРМБ-усилителя в направлении усиленного стоксова сигнала рассеивается матовой поверхностью диафрагмы 14 и контролируется фотодиодом 13.

Основная часть усиленного излучения проходит через стеклянный клин 8 и попадает на ОВФ-зеркало 10, собранное по стандартной схеме с поворотом поляризации выходного излучения на 90° (в качестве активного вещества используется сероуглерод CS_2). При длительности падающего на ОВФ-зеркало 10 импульса ~ 30 нс порог

отражения по энергии равен ~ 0.5 мДж. Отраженное ОВФ-излучение проходит в обратном направлении через ВРМБ-усилитель (без усиления), затем усиливается в трехпроходном усилителе 1, и его параметры измеряются системой 14 (рис.1).

Ранее нами было показано [1], что в нестационарном режиме ВРМБ-усиления максимальные коэффициенты усиления реализуются в том случае, если стоксов импульс приходит в усилитель с опережением импульса накачки на время порядка времени жизни акустических фононов активной среды. Геометрия нашей установки не позволяла в полной мере обеспечить такую задержку импульса накачки. В нашем случае указанная задержка Δ составляла 10 нс при времени жизни оптических фононов $\tau_{ph} \approx 30$ нс.

3. Экспериментальные результаты

Для определения предельных значений коэффициентов усиления применялась следующая методика относительных измерений. В качестве приемников сигналов при этом использовались интегрирующие фотодиоды, сигналы с которых подавались на цифровые осциллографы С8-9. Вместе с нейтральным светофильтром, ослабляющим излучение в 25 раз, каждый фотодиод обеспечивал линейный динамический диапазон измерения сигнала 2.5×10^4 . В процессе измерения коэффициентов усиления в прямом направлении ОВФ-зеркало 10 (рис.3) было закрыто экраном.

Сначала был измерен коэффициент усиления трехпроходного усилителя на неодимовом стекле K_{amp}^{Nd} . Для этого из ослабителя (рис.2) были убраны диафрагмы 4 и 8 и его коэффициент ослабления принят равным 1. Затем перекрывался импульс накачки ВРМБ-усилителя и выключались лампы накачки трехпроходного неодимового усилителя. В таком состоянии проводилась серия измерений параметров стоксова импульса, проходящего по пассивному усилительному тракту. На основании этих измерений определялась величина

$$\bar{T}_{\text{pas}} = \overline{E_{\text{pas}}^{(12)} / E_{\text{pas}}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{pas}}^{(12)}$ – сигнал, регистрируемый фотодиодом 12 на рис.3; $E_{\text{pas}}^{\text{in}}$ – сигнал, регистрируемый фотодиодом 13 на рис.1. Потом в ослабитель (рис.2) вводилась диафрагма 4 или 8. При этом коэффициент ослабления $K_{\text{att}}^{(2)} = 10^6$. И снова проводилась регистрация сигналов указанных фотодиодов ($E^{(12)}$ и E^{in}), но уже с включенными лампами накачки трехпроходного усилителя на неодимовом стекле. Затем вычислялось среднее значение коэффициента усиления усилителя:

$$\bar{K}_{\text{amp}}^{\text{Nd}} = K_{\text{att}}^{(2)} \frac{\overline{E^{(12)} / E^{\text{in}}}}{\bar{T}_{\text{pas}}}. \quad (2)$$

При максимальных напряжениях питания ламп накачки $\bar{K}_{\text{amp}}^{\text{Nd}} \simeq (8 \pm 1) \times 10^3$. Благодаря специальной организации трех проходов стокова сигнала по активному стержню (без пересечения пучков) даже при таком большом коэффициенте усиления усилитель был устойчив и далек от самовозбуждения. Поэтому шумы усилителя были малы, не превышали порога чувствительности фотодиода 12 (рис.3) и не влияли на проводимые измерения.

Проведенные измерения показали, что если энергия импульса накачки E_p не превышает ~ 300 мДж, то энергия собственных шумов ВРМБ-усилителя не превышает 1 % от этой величины. Дальнейшие измерения осуществлялись при данной энергии накачки. Сначала в отсутствие входного стокова сигнала была проведена серия измерений энергии собственных шумов ВРМБ-усилителя, в результате чего была определена величина

$$\bar{T}_n = \overline{E_n^{(12)} / E_n^{(13)}}, \quad (3)$$

где $E_n^{(12)}$ и $E_n^{(13)}$ – сигналы, регистрируемые фотодиодами 12 и 13 на рис.3. Затем при выключенных лампах накачки трехпроходного лазерного усилителя были проведены серии измерений коэффициента усиления ВРМБ-усилителя $K_{\text{amp}}^{\text{SBS}}$ при различных коэффициентах ослабления оптического ослабителя K_{att} (рис.1) и с учетом (1) и (3) получено

$$K_{\text{amp}}^{\text{SBS}} = K_{\text{att}} \left[\frac{E^{(12)} - \bar{T}_n E^{(13)}}{E^{\text{in}}} \right] \bar{T}_{\text{pas}}^{-1}. \quad (4)$$

Соответствующая зависимость приведена на рис.4. Максимальный достигнутый коэффициент усиления $K_{\text{amp}}^{\text{SBS}} \simeq (2 \pm 1) \times 10^9$. При этом абсолютное значение энергии усиленного стокова сигнала на выходе ВРМБ-усилителя $E_{\text{amp}}^{\text{S}}$ составило $\sim (3 \pm 1) \times 10^{-3}$ Дж. На рис.4 представлены также результаты численного моделирования коэффициента усиления, которое было выполнено с учетом насыщения усиления и нестационарности процесса ВРМБ в приближении взаимодействия плоских волн для времен жизни акустических фононов $\tau_{\text{ph}} = 20, 30$ и 40 нс и максимального стационарного инкремента усиления $\Gamma = g \times I_{\text{max}} L = 75$ (где g – коэффициент усиления, I_{max} – максимальная интенсивность накачки, L – длина активной среды). Отметим, что расчеты проводились с учетом реального временного поведения взаимодействующих импульсов. Видно, что для $\tau_{\text{ph}} = 30$ нс наблюдается практически полное согласие экспериментальных и расчетных результатов. Это значение τ_{ph} также хорошо согласуется с известными из литературы данными [4].

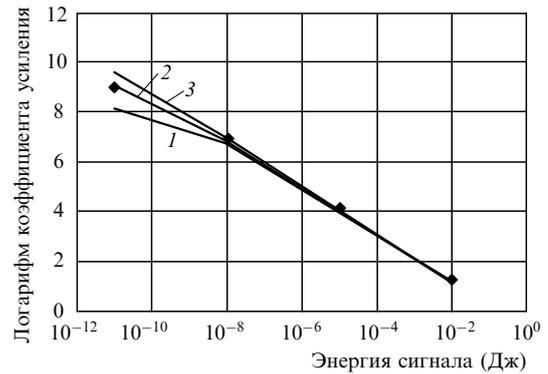


Рис.4. Зависимость коэффициента усиления ВРМБ-усилителя от энергии входного сигнала. Точки – эксперимент, сплошные кривые – результаты математического моделирования коэффициента усиления ВРМБ-усилителя при фиксированной максимальной интенсивности накачки и временах жизни акустических фононов $\tau_{\text{ph}} = 40$ (1), 30 (2) и 20 нс (3).

При полученных нами коэффициентах усиления $\sim 10^9$ начинает сказываться насыщение ВРМБ-усилителя. Однако понизить величину входного сигнала для достижения большего усиления практически невозможно. Дело в том, что шумы ВРМБ-усилителя являются когерентными и интерферируют с полем усиленного стокова сигнала, хотя фазы шумовых волн статистически меняются от импульса к импульсу. Поэтому если поля шумового излучения и усиленного сигнала сравнимы, то из-за их интерференции происходят сильные флуктуации интенсивности излучения в направлении усиленного сигнала от импульса к импульсу ввиду произвольности фаз усиленного шумового поля. И если мы хотим не просто обнаружить наличие сигнала путем многократного накопления результатов, а использовать каждый усиленный импульс, то поле усиленного стокова сигнала должно в несколько раз превышать поле шумов ВРМБ-усилителя (рис.5).

На рис.5 приведены фотографии распределения излучения, выходящего из ВРМБ-усилителя, на фоточувствительной пластинке, помещенной перед ОВФ-зеркалом 10 (рис.3), при различных амплитудах входных стоковых сигналов. При ослаблении входного сигнала в 10^{13} раз выходной сигнал отчетливо виден на фоне шумов только в одном случае из трех (рис.5,б). Это в достаточной степени «вредное» явление, которое можно назвать деструктивной интерференцией, не позволяет при довольно слабом входном сигнале провести его выделение на фоне усиленных шумов в каждой конкретной реализации. При увеличении входного сигнала на порядок выходной сигнал уверенно регистрируется в каждой вспышке, и не только за счет своей величины, но также из-за частичного подавления генерации шумов сигналом [5].

Затем аналогичным образом был измерен коэффициент усиления всей системы в прямом направлении при суммарном действии ВРМБ- и лазерного усилителей. Максимальный коэффициент усиления $K_{\text{amp}}^{(+)}$ оказался равным $\sim (2 \pm 1) \times 10^{12}$, что несколько меньше произведения коэффициентов усиления усилителей, измеренных по отдельности. Мы связываем это с деформацией как волнового фронта, так и спектрального контура стокова сигнала при усилении в трехпроходном лазерном усилителе, причем не только статической, но и динамической. Дело в том, что, по нашим оценкам, ширина полосы ВРМБ-

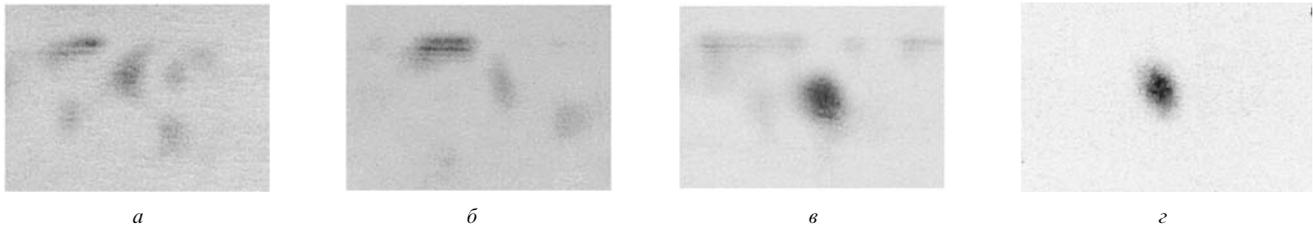


Рис.5. Фотографии усиленного излучения на входной апертуре ОВФ зеркала: входной сигнал ослаблен в 10^{13} раз (а–в), входной сигнал ослаблен в 10^{13} раз, а перед фотопластинкой установлен десятикратный ослабитель (z).

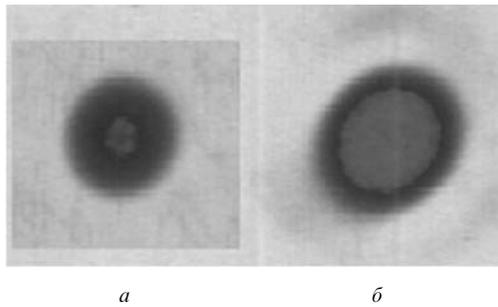


Рис.6. Фотографии распределения поля сигнала после прохождения трехпроходного усилителя на неодимовом стекле, находящегося в ненакачанном (а) и накачанном (б) состояниях.

усиления использованной смеси газов составляет $\sim 3 \times 10^{-4} \text{ см}^{-1}$. Поэтому малейшие возмущения спектра входного (в ВРМБ-усилителе) стоксова сигнала приводят к снижению коэффициента усиления. Косвенным подтверждением этого является искажение пространственной структуры стоксова пучка после трехпроходного усилителя на неодимовом стекле. Соответствующие фотографии поперечной структуры пучка на выходе усилителя в пассивном и возбужденном состояниях показаны на рис.6.

При максимальном коэффициенте усиления комбинированного усилителя в прямом направлении, энергия усиленного стоксова сигнала в несколько раз превышает пороговую энергию ОВФ-зеркала (рис.3). В данном случае коэффициент отражения излучения составлял 50 % – 60 %. Поэтому при открытом ОВФ-зеркале усиленный в

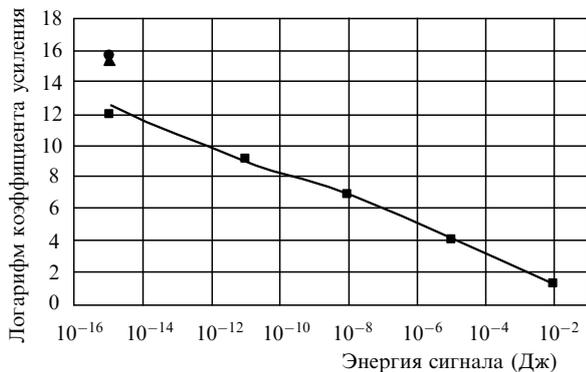


Рис.7. Зависимость коэффициента усиления системы неодимовый усилитель – ВРМБ-усилитель от энергии входного сигнала. Первые четыре точки ■ справа соответствуют усилению при неработающем неодимовом усилителе, пятая – усилению при включенном неодимовом усилителе, точка ▲ – усилению в двухпроходном усилителе с использованием ОВФ-зеркала 10 (рис.3), точка ● – проведенному численному расчету трехпроходного неодимового усилителя с учетом насыщения усиления в неодимовом стержне, пассивных потерь и пространственного распределения энергии усиливаемого импульса в приближении геометрической оптики.

прямом направлении стоксов сигнал отражается от него, проходит в обратном направлении усилительный тракт и еще раз усиливается в трехпроходном усилителе на неодимовом стекле. При использовании пассивных усилителей неослабленный стоксов сигнал также отражается от ОВФ-зеркала, и его энергия E^{out} регистрируется фотодиодом измерительной системы 14 на рис.1. Проведя, как обычно, серию измерений, вычисляем величину

$$\bar{T} = \frac{E^{\text{out}}_{\text{pas}}}{R^{\text{in}}_{\text{pas}}} \quad (5)$$

Затем устанавливаем коэффициент ослабления ослабителя $K_{\text{att}} = 6.25 \times 10^{13}$ для получения максимального коэффициента усиления комбинированного усилителя в прямом направлении. И после серии измерений вычисляем коэффициент усиления системы в обратном направлении:

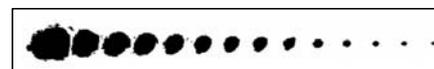
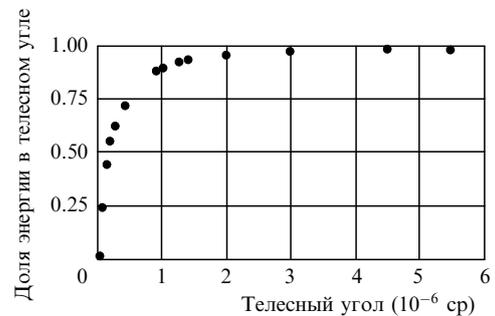
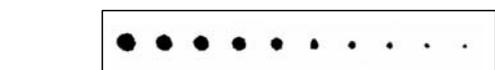
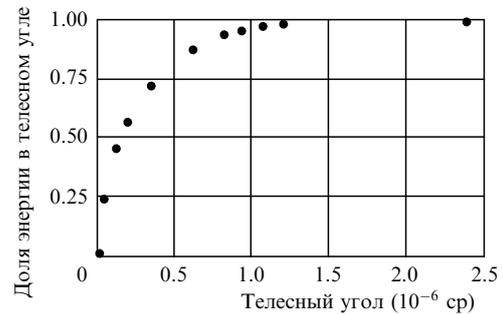


Рис.8. Зависимости доли энергии входного излучения (а) и доли выходного усиленного сигнала (б), содержащихся в данном телесном угле, от величины этого угла. Внизу – фотографии распределений, полученных при помощи автокалибровочной методики.

$$K_{\text{amp}}^{(-)} = K_{\text{att}} \frac{\overline{(E^{\text{out}}/E^{\text{in}})}}{T}.$$

В результате получаем $K_{\text{amp}}^{(-)} \simeq (0.5 - 1) \times 10^{16}$.

При этом значение энергии выходящего в обратном направлении сигнала составило ~ 1 Дж. На рис.7 приведены зависимости коэффициента усиления от энергии входного стока сигнала во всем диапазоне проведенных измерений. В двухпроходном усилителе также измерялось угловое распределение энергии во входном и выходящем в обратном направлении сигналах с использованием автокалибровочной методики, суть которой состоит в регистрации фокальных распределений энергии последовательно ослабляемого пучка. В частности, применялся зеркальный клин с известными коэффициентами отражения рабочих поверхностей. Фотографии соответствующих распределений, а также результаты их обработки представлены на рис.8. Фотографии получены при коэффициенте усиления $K_{\text{amp}}^{(-)} \simeq 5 \times 10^{15}$. Видно, что 97 % энергии входного излучения находится в угле 10^{-6} ср. Для усиленного излучения в данном угле содержится 85 % энергии, а 15 % энергии распределено по достаточно широкому, но малоинтенсивному «крыльям». Отсюда следует, что качество ОВФ в нашем случае составляет не менее 0.8.

4. Заключение

Таким образом, полученные результаты показывают следующее. Для ВРМБ-усилителей, работающих в не-

стационарном режиме рассеяния, необходимы большие интенсивности накачки для достижения тех же коэффициентов усиления, что и в стационарном режиме [6, 7]. Однако такие усилители имеют и некоторые преимущества. В частности, в нестационарном режиме рассеяния длительность усиленного импульса уменьшается всего лишь в два раза (для использовавшихся в эксперименте активных ВРМБ-сред и длительности импульса накачки). Это преимущество является важным для комбинированного усилителя, если усиленным импульсом необходимо насытить лазерный усилитель, например усилитель на неодимовом стекле. Что же касается предельных коэффициентов усиления слабых сигналов, то они определяются условиями самовозбуждения усилителей и одинаковы для стационарного и нестационарного режимов рассеяния.

1. Bel'dyugin I.M., Efimkov V.F., Zubarev I.G., Mikhailov S.I. *J. Russian Laser Research*, **23** (1), 1 (2005).
2. Беспалов В.И., Пасманик Г.А. *Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы* (М.: Наука, 1986).
3. Gross R.W.F., Garman-DuVall L., Amimoto S.T. *Opt. Lett.*, **17**, 82 (1992).
4. Мак А.А., Сомс Л.И., Фромзель В.А., Яшин В.Е. *Лазеры на неодимовом стекле* (М.: Наука, 1990, с. 101).
5. Бельдюгин И.М., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Михайлов С.И. *Препринт ФИАН № 18* (М., 2003).
6. Бельдюгин И.М., Давыдов В.В., Дёмкин В.К., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Михайлов С.И., Соболев В.Б. *Квантовая электроника*, **31** (8), 709 (2001).
7. Scott A.M., Watkins D.E., Tapster P. *J. Opt. Soc. Am. B*, **7** (6), 929 (1990).