

Зависимость порогового инкремента ВРМБ-усилителя от геометрических параметров

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

Исследовано влияние параметров активной среды ВРМБ-усилителя на порог ВРМБ. Показана универсальность выражения для порогового инкремента усиления, справедливого в большом диапазоне изменения параметров. Экспериментально получен пороговый инкремент усиления в светопроводе, где спонтанные шумы могут усиливаться в большом телесном угле. Проведены эксперименты по ВРМБ-усилению в светопроводе слабых изображений. Получен коэффициент усиления $\sim 10^6$ при несущественном изменении качества изображения.

Ключевые слова: ВРМБ-усилитель, светопровод, инкремент усиления.

1. Введение

ВРМБ-усилители обладают уникальным набором таких параметров, как полоса и коэффициент усиления [1, 2]. В частности, самый яркий естественный источник света оптического диапазона – солнце, в полосе стандартного ВРМБ-усилителя в одной пространственно-временной моде излучает менее одного шумового кванта. Поэтому данные усилители представляют несомненный интерес как для локаторов оптического диапазона, так и для приемников изображений объектов, подсвеченных лазерным излучением.

Легко понять, что максимальные линейные коэффициенты усиления (в режиме малого насыщения) реализуются при таких интенсивностях возбуждающего излучения, которые близки к пороговым для ВРМБ. При дальнейшем росте интенсивности накачки начинается резкое возрастание в выходном излучении собственных шумов ВРМБ-усилителя и насыщение его коэффициента усиления [1, 2]. Таким образом, максимальный линейный коэффициент усиления $K^{\max} \approx \exp G^{\text{th}}$, где $G^{\text{th}} = gI_p^{\text{th}}l$ – пороговый инкремент усиления; g – удельный коэффициент усиления на единицу длины усилителя и на единицу интенсивности возбуждающего излучения; I_p^{th} – пороговая интенсивность входного излучения накачки; l – длина усилителя. Обычно принято считать, что пороговый инкремент $G^{\text{th}} \approx 25$. Отсюда получаем, что предельный коэффициент усиления ВРМБ-усилителя $K^{\max} \leq \exp 25 \approx 7 \times 10^{10}$. Для импульсных сигналов это значение определяет коэффициент усиления по мощности. Исследование проводится в приближении плоских волн, а процесс усиления считается стационарным. Наличие поперечной гауссовой структуры пучков усиливаемого стоксова излучения и накачки, нестационарность процесса усиления и изменение во времени коэффициента усиления – все это приводит к снижению измеряемого предельного коэффициента усиления [1, 2].

Пороговый инкремент усиления $G^{\text{th}} \approx 25$ приводится практически во всех книгах и статьях, посвященных различным типам вынужденного рассеяния (ВР). Эта величина оказалась адекватной тем экспериментальным условиям, при которых наблюдались самые разные процессы ВР с уровня спонтанных шумов. Однако она не является абсолютной, а зависит от геометрических параметров активной области. Поэтому максимальный коэффициент усиления, в том числе и ВРМБ-усилителя, также зависит от геометрии эксперимента. Исследованию этой зависимости и посвящена настоящая работа.

2. Расчет параметров ВРМБ-усилителя

Уравнение, описывающее в стационарном режиме усиление стоксова сигнала с интенсивностью I_S в ВРМБ-усилителе при наличии спонтанных шумов в приближении плоских волн и заданной интенсивности накачки (т. е. $I_p(z) = I_p(0) = I_p$), имеет вид [3, 4]

$$\frac{dI_S}{dz} = \frac{\partial R}{\partial o} \delta o I_p + g I_p I_S. \quad (1)$$

Здесь $\partial R / \partial o$ – дифференциальный коэффициент рассеяния возбуждающего излучения (R в см^{-1}) в единичный телесный угол o ; δo – телесный угол ВРМБ-усилителя; стоксов сигнал распространяется в положительном направлении оси z . Во всех исследованиях ВРМБ под телесным углом δo подразумевается угол, в пределах которого стоксово излучение распространяется, не выходя за пределы пучка накачки, по всей длине активной среды l . Как и для всякой оптической системы, величина $\sqrt{\delta o}$ является угловой апертурой ВРМБ-усилителя. В простейшей схеме ВРМБ-усилителя, в которой активная область образуется самим пучком накачки с поперечным размером d и для которой угловая апертура равна $2d/l$, телесный угол $\delta o \approx (2d/l)^2$.

Уравнение (1) решаем при граничном условии $I_S(z=0) = I_S(0)$, где $I_S(0)$ – интенсивность внешнего входного усиливаемого стоксова сигнала. Решение уравнения (1) при этом имеет вид

$$I_S(l) = \frac{\partial R}{\partial o} \frac{\delta o}{g} [\exp(g I_p l) - 1] + I_S(0) \exp(g I_p l). \quad (2)$$

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

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

Поскольку на практике требуются очень высокие коэффициенты усиления, в выражении (2) $\exp(gI_p l) \gg 1$, и его можно переписать в виде

$$I_S(l) = \left[\frac{\partial R}{\partial o} \frac{\delta o}{g} + I_S(0) \right] \exp(gI_p l). \quad (2a)$$

Отсюда следует, что даже если на входе усилителя внешний стоксов сигнал отсутствует ($I_S(0) = 0$), на выходе усилителя все равно имеется стоксово излучение. При этом величину

$$I_{SN}(0) = \frac{\partial R}{\partial o} \frac{\delta o}{g} \quad (3)$$

можно рассматривать как интенсивность приведенных ко входу ($z = 0$) шумов ВРМБ-усилителя. Эти шумы не зависят от интенсивности возбуждающего излучения и определяются только параметрами (в том числе геометрическими) активной среды.

Из выражения (2) следует, что процесс ВРМБ с уровня спонтанных шумов, описываемый первым членом в правой части (2), вообще говоря, не имеет порога. При любой сколь угодно малой интенсивности возбуждающего излучения I_p на выходе наблюдается рассеянное излучение на стоксовой частоте. Однако для всех видов ВР имеется так называемый экспериментально наблюдаемый порог ВР. Он определяется переходом от экспоненциального усиления стоксовых шумов, описываемого выражением (2a) при $I_S(0) = 0$, к их усилению в режиме насыщения накачки. Пороговой интенсивностью накачки I_p^{th} при этом считается такое значение I_p , при котором интенсивность усиленных спонтанных шумов $I_{SN}(l)$ составляет определенную, заметную часть от интенсивности накачки:

$$I_{SN}(l) = \frac{I_p^{th}}{\eta}. \quad (4)$$

Конечно, величина η зависит от чувствительности используемой измерительной аппаратуры. Однако общепринято считать, что $\eta = 10^2$ (режим малого насыщения), и именно при этом значении пороговый инкремент $G^{th} \simeq 25$.

Найдем пороговый инкремент усиления. Для этого, используя выражения (4), (2a) (при $I_S(0) = 0$) и (3), получим выражение

$$I_{SN}(l) = \frac{I_p^{th}}{\eta} = \frac{\partial R}{\partial o} \frac{\delta o}{g} \exp(gI_p^{th} l). \quad (5)$$

Умножая обе части равенства (5) на gl , вводя обозначение $A = \eta l (\partial R / \partial o) \delta o$ и учитывая, что $G^{th} = gI_p^{th} l$, после преобразования получаем

$$G^{th} - \ln G^{th} = \ln \frac{1}{A}. \quad (6)$$

Коэффициент дифференциального рассеяния $\partial R / \partial o$ для различных сред меняется в довольно широких пределах: от $\sim 10^{-8}$ до $\sim 10^{-6} \text{ см}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ (при $\lambda \approx 1 \text{ мкм}$) [3]. У большинства используемых в экспериментах сред он составляет $\sim 10^{-7} \text{ см}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. В широких пределах меняются также экспериментальные условия наблюдения ВРМБ. При этом телесный угол δo , в котором может распространяться и усиливаться спонтанное излучение, обычно из-

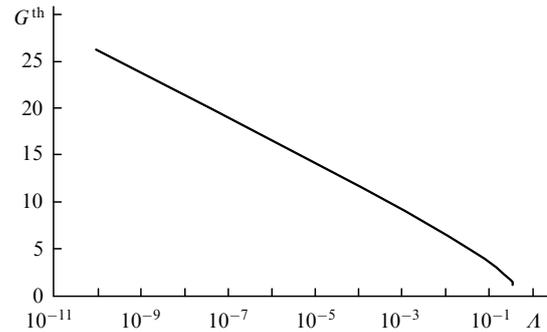


Рис.1. Расчетная зависимость порогового инкремента усиления G^{th} от величины A .

менялся в диапазоне $\sim 10^{-6} - 10^{-4}$ ср. Возьмем стандартные значения параметров: $\eta = 10^2$, $l = 10 \text{ см}$, $\partial R / \partial o = 10^{-7} \text{ см}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$, $\delta o = 10^{-5}$ ср. Для этих значений

$$A = \eta l \frac{\partial R}{\partial o} \delta o = 10^{-9}. \quad (7)$$

Тогда из решения уравнения (6) получим $G^{th} \simeq 25$. Как уже упоминалось, именно это пороговое значение инкремента чаще всего используется в литературе, причем для различных типов ВР. Отметим, что оно меняется лишь на $\pm 10\%$ при изменении A на ± 1 порядок.

С другой стороны, уменьшение интенсивности накачки (инкремента G) на 10% относительно ее порогового значения ($G^{th} \simeq 25$) согласно (2a) приведет к уменьшению интенсивности выходного стоксова излучения более чем на порядок. А вот увеличение интенсивности накачки относительно ее порогового значения на ту же величину приведет к такому росту $I_S(l)$, когда необходимо уже обязательно учитывать истощение накачки. Именно поэтому определенное указанным выше способом экспериментальное значение пороговой интенсивности возбуждающего излучения I_p^{th} является достаточно хорошей характеристикой процесса ВРМБ и воспроизводится в экспериментах различных авторов.

Тем не менее величина A зависит от двух параметров – длины l и телесного угла δo , которые мы можем изменять в очень широких пределах (на много порядков). Здесь отметим, что при рассеянии в «свободном» пространстве (т. е. в простейшей геометрии) данные параметры являются зависимыми (при увеличении длины уменьшается телесный угол). Напротив, при использовании световода они, очевидно, становятся независимыми. Это приведет к существенному изменению значения порогового инкремента G^{th} . Зависимость $G^{th}(A)$, полученная на основе численного решения уравнения (6), представлена на рис.1.

Существенно изменять длину активной среды ВРМБ-усилителя можно только в том случае, если использовать оптоволокно. При этом длина когерентности возбуждающего излучения должна быть не меньше длины оптоволоконка. И если длина оптоволоконка равна 1 км, а все остальные параметры в (7) останутся прежними, то, как видно из рис.1, значение порогового инкремента составит ~ 14 . Максимальное значение коэффициента усиления будет равно всего лишь $\exp 14 = 1.2 \times 10^6$.

3. Постановка задачи

Поскольку нас интересуют усилители импульсных сигналов, длину активной среды изменить существенно мы

не можем. В работах [1, 2] мы изучали ВРМБ-усилитель пространственно одноимодовых сигналов. Параметры активной среды были близки к их значениям в (7). Коэффициент ВРМБ-усиления по энергии составил $\sim 2 \times 10^9$, что несколько меньше теоретического предела. Такой усилитель вполне подходит для оптического локатора. Однако если мы хотим усиливать изображение объектов, подсвеченных лазерным излучением, то нам необходимо увеличивать угловую апертуру усилителя. В простейшей оптической схеме ВРМБ-усилителя область усиления определяется пучком накачки, т. е. его поперечным размером d , и длиной активной среды l . Поле накачки должно быть однородным, т. к. в неоднородном поле инкремент усиления для стоксова сигнала, обращенного по отношению к накачке, удваивается. Идеальным с этой точки зрения является пространственно однородный пучок накачки. В указанной схеме ВРМБ-усилителя стоксов пучок должен распространяться в направлении, практически обратном направлению распространения пучка накачки, поскольку в большинстве выполненных экспериментов выполнялось неравенство $d \ll l$. Это обстоятельство препятствует применению ВРМБ-усилителя в лазерной системе с высоким усилением, т. к. возможности оптических изоляторов, предотвращающих проникновение излучения накачки в канал лазерного усилителя, ограничены.

Весьма привлекательным представляется использование светопровода. В наших работах [5, 6] стоксов пучок направлялся по оси светопровода, в то время как пучки накачки, образованные призмным растром, отражались от стенок. Поскольку идеальным для ВРМБ-усиления является пространственно однородное поле накачки, целесообразно направить пучок накачки по оси светопровода, а стоксов пучок заставить отражаться от стенок. Такое отражение (конечно, полное) возможно, если коэффициент преломления активной среды больше коэффициента отражения материала стенок светопровода. При этом осуществляется угловое разделение пучков накачки и стоксова излучения, что позволяет отказаться от оптических изоляторов. Для устранения ограничения стоксова пучка на входном и выходном торцах светопровода необходимо, чтобы ось стоксова пучка проходила через центры торцов светопровода. Этим определяются дискретные углы распространения стоксовых пучков, отсчитываемые от оси светопровода в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, параллельных стенкам: $\alpha_i = \arctan(di/l)$, где $i = 1, 2, 3, \dots$ – число отражений от стенок. Максимальное значение α_i внутри светопровода ограничено углом полного внутреннего отражения. Вне светопровода углы увеличиваются в соответствии с законами преломления. Таким образом, при использовании светопровода возможно одновременное усиление многих стоксовых пучков (мультиплицирование).

Несмотря на большое число работ, посвященных ВРМБ в светопроводе, шумовые характеристики такого устройства изучены мало. В настоящей работе исследуются возможности усиления слабых сигналов (изображений) в светопроводе и влияния на этот процесс спонтанных шумов.

4. ВРМБ-усилитель со светопроводом и накачкой одноимодовым излучением

На рис.2 представлена блок-схема каналов формирования излучения накачки ВРМБ-усилителя (I_p) и входного стоксова сигнала (I_s) (полная схема этих каналов по-

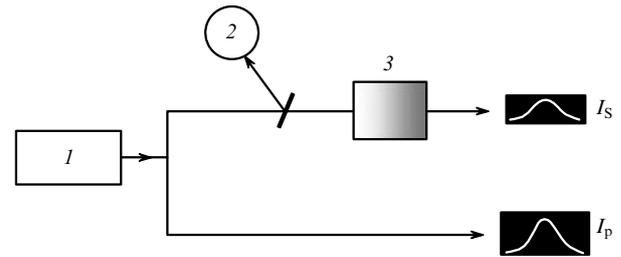


Рис.2. Блок-схема каналов формирования излучения накачки и стоксова сигнала:

1 – задающий генератор; 2 – датчик регистрации энергии и формы импульсов стоксова пучка; 3 – оптический ослабитель; I_p и I_s – интенсивности излучения накачки и стоксова сигнала.

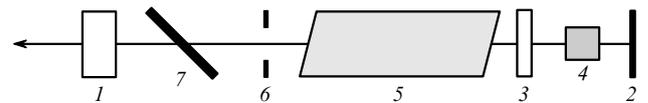


Рис.3. Оптическая схема ЗГ:

1 и 2 – выходное и глухое зеркала резонатора; 3 – вспомогательное зеркало (зеркала 1 и 3 представляют собой плоскопараллельные стеклянные пластинки); 4 – пассивный модулятор добротности на основе кристалла LiF:F^{2+} ; 5 – активный элемент на основе неодимового стекла; 6 – апертурная диафрагма диаметром 2.5 мм для селекции поперечных мод; 7 – диэлектрический поляризатор; длина резонатора 1.2 м, длительность импульса по полувысоте 50 нс.

казана на рис.1 работы [2]). Задающий генератор (ЗГ) 1, схема которого приведена на рис.3, представлял собой лазер на неодимовом стекле с пассивной модуляцией добротности и селекцией частотных и поперечных мод. Лазер функционировал в одночастотном и одноимодовом режиме с длительностью моноимпульса ~ 40 нс по полувысоте и энергией ~ 20 мДж. Излучение ЗГ делится на два канала, в каждом из которых используются неодимовые усилители и оптические развязки. В канале стоксова сигнала осуществляется сдвиг частоты ЗГ в активной ВРМБ-среде (сероуглерод CS_2). Выходными элементами канала стоксова сигнала являются показанные на рис.2 датчик регистрации энергии и формы импульсов стоксова пучка 2 и оптический ослабитель 3. Схема последнего описана в работе [2].

Схема эксперимента по усилению изображения в светопроводе приведена на рис.4. Пучок накачки с интенсивностью I_p , имеющий горизонтальную поляризацию, с помощью двукратного телескопа Галилея 1 увеличивается в поперечном размере и пропускается через мягкую диафрагму квадратного сечения со стороны квадрата 7.5 мм. Линзы 3 и 4 образуют настроенный телескоп Кеплера. Поляризатор 5, вращатель Фарадея 6 и кварцевая 45° -ная пластинка 7, после которых плоскость поляризации остается горизонтальной, служат для оптической развязки. После них пучок накачки направляется двумя поворотными призмами в усилитель на силикатном неодимовом стекле. С помощью призмы-крыши 11 организуется второй проход усиливаемого излучения по усиливающему стержню. Далее излучение накачки направляется в ВРМБ-усилитель 12, представляющий собой кювету с сероуглеродом CS_2 , коэффициент преломления которого $n_1 = 1.62$. В кювете находится светопровод квадратного сечения 1×1 см и длиной 20 см. Стенки светопровода представляют собой пластины с оптической полировкой из

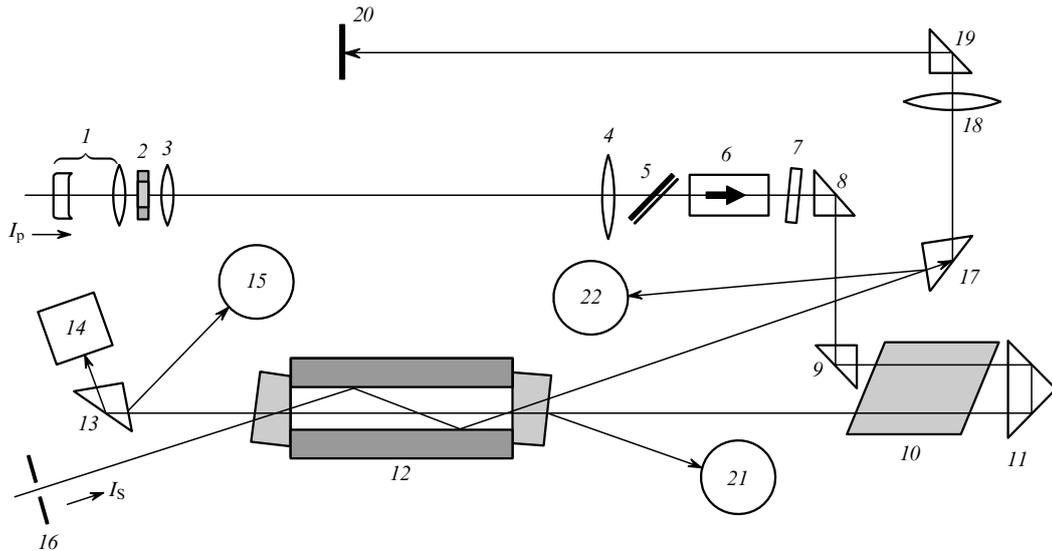


Рис.4. Схема эксперимента по усилению изображения:

1 – телескоп Галилея; 2 – мягкая диафрагма квадратной формы; 3 – линза с фокусным расстоянием $F = 100$ см; 4 – линза с $F = 150$ см; 5 – поляризатор; 6 – вращатель Фарадея; 7 – 45° -ная кварцевая пластинка; 8, 9, 13, 17, 19 – поворотные призмы; 10 – усиливающий неодимовый стержень $\varnothing 45 \times 580$ мм; 11 – призма-крыша; 12 – светопровод размером $1 \times 1 \times 20$ см с активной средой из CS_2 ; 14 – калориметр; 15 – фотодиод; 16 – диафрагма-объект; 18 – линза с $F = 100$ см; 20 – фотоэкран в плоскости изображения; 21 и 22 – датчики энергии.

CaF_2 с коэффициентом преломления $n_2 = 1.43$. ВРМБ-усилитель находится вблизи плоскости изображения мягкой диафрагмы 2, образованной телескопом Кеплера (линзы 3 и 4). Размер изображения составлял 10.5×10.5 мм. Ось пучка накачки совпадает с осью светопровода. Вышедший из ВРМБ-усилителя пучок накачки призмой 13 направляется в калориметр 14 типа ИКТ-1Н, а отраженное от граней призмы 13 излучение – в фотодиод 15 для измерения формы импульса накачки, прошедшего через ВРМБ-усилитель. Фотодиод 15 Det10A подсоединен к цифровому запоминающему осциллографу Rigol DS 5202CA с полосой пропускания 200 МГц.

Стоксов пучок с интенсивностью I_S после диафрагмы-объекта 16 поступает в светопровод ВРМБ-усилителя практически синхронно с излучением накачки. Пучок проходит через центр левого (по схеме) торца светопровода, испытывает два отражения от стенок и выходит из центра правого торца. Вышедший из светопровода стоксов пучок направлялся двумя поворотными призмами на фотоэкран 20, на котором линзой 18 формируется изображение диафрагмы-объекта 16. Отраженное от граней призмы 17 излучение направлялось в датчик энергии 22. Датчик энергии 21 контролирует энергию накачки ВРМБ-усилителя, регистрируя излучение, отраженное от стеклянного окна кюветы. Датчики энергии 21, 22, а также 2 на рис.2 представляют собой фотодиоды с интегрирующей цепочкой, импульсы от которых подавались на цифровые запоминающие осциллографы Rigol DS 5022M с полосой пропускания 25 МГц. Датчики энергии калибровались с помощью калориметра ИКТ-1Н. Диафрагма-объект 16 представляла собой круглую диафрагму диаметром 3.5 мм, частично перекрытую двумя непрозрачными пластинками с прямыми углами так, что объект имел вид гриба.

5. Экспериментальные результаты

Прежде всего в отсутствие стоксова сигнала была измерена зависимость энергии излучения, прошедшего че-

рез светопровод, от входной энергии. На рис.5 приведены три зависимости: экспериментальная, в отсутствие потерь и расчетная. Видно, что при входной энергии накачки ~ 0.4 Дж начинаются потери энергии. Это есть не что иное, как демонстрация достижения порога генерации шумового стока излучения.

Воспользуемся выражением (7), подставив в него величины $\eta \approx 10^2$, $\partial R/\partial \sigma \approx 10^{-7}$ $cm^{-1} \cdot sr^{-1}$ и $l \approx 20$ см. Что касается телесного угла $\delta \sigma$, то он образован конусом с углом при вершине, равным двойному углу полного внутреннего отражения. Последний для $n_1 = 1.62$ и $n_2 = 1.43$ составляет $\sim 29^\circ$, т.е. $\delta \sigma \sim 1$ ср. В итоге получаем $G^{th} \approx 10.5$. В то же время инкремент усиления $G = gI_p l$ для импульса накачки с энергией 0.4 Дж и длительностью 40 нс равен 10. Здесь $g = 5 \times 10^{-2}$ cm/MWt , $I_p = 10$ MWt/cm^2 , $l = 20$ см. Близость величин G^{th} и G свидетельствует о хорошем согласии расчетных и экспериментальных данных.

На рис.6 приведены осциллограммы импульсов входного и выходного излучения накачки. Этот рисунок по-

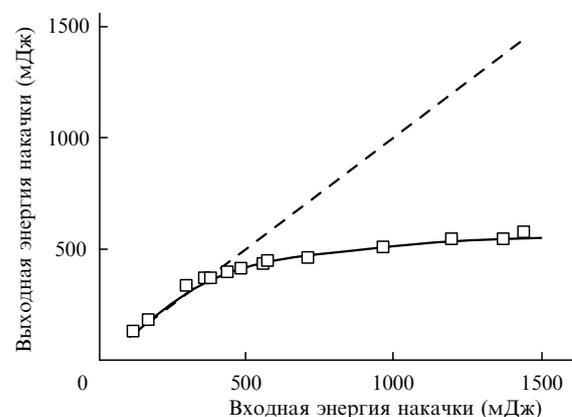


Рис.5. Зависимости энергии накачки на выходе из светопровода от входной энергии: экспериментальная (точки), в отсутствие потерь (выходная энергия равна входной) (штриховая прямая) и расчетная (сплошная кривая).

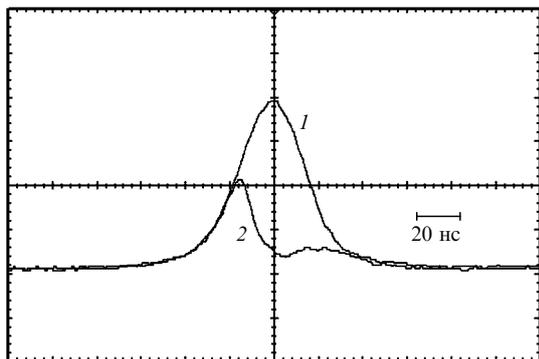


Рис.6. Осциллограммы импульсов входного (1) и выходного (2) излучения накачки.

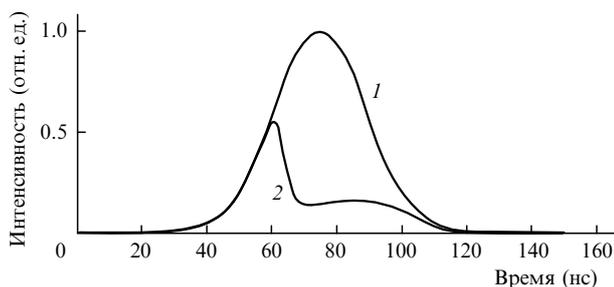


Рис.7. Расчетные временные зависимости интенсивности импульсов входного (1) и выходного (2) излучения накачки.

лучен наложением двух осциллограмм, зарегистрированных фотодиодом 15. Сначала путем подбора необходимых светофильтров, располагаемых перед фотодиодом, была получена осциллограмма импульсов выходного излучения накачки. Затем при тех же условиях накачки 300-кратный фильтр был вынут из этого набора и установлен перед кюветой. В этом случае выходная энергия накачки равна входной, а форма импульса выходной энергии повторяет форму импульса входной ввиду полного отсутствия ВРМБ. Измеренная при этом датчиком 21 входная энергия составила 1.3 Дж, а измеренная калориметром 14 выходная энергия – 0.5 Дж. На рис.7 показаны рассчитанные с помощью математического пакета программ MathCAD 13 временные зависимости интенсивности импульсов входного и выходного излучения накачки с учетом времени жизни фононов для сероуглерода $\tau_{ph} = 7$ нс. Принятое в расчетах значение входной энергии накачки было равно 1.3 Дж. Из рис.6 и 7 видно хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных.

Исследование усиления слабых изображений осуществлялось следующим образом. Сначала без ослабления стокового пучка (в оптическом ослабителе 3 на рис.2) и без накачки ВРМБ-усилителя проводилась привязка показаний датчиков энергии 2 на рис.2 и 22 на рис.4. Одновременно на фотозкране 20 (рис.4) было получено изображение объекта. Затем вводилось ослабление сигнала в 10^6 раз и энергия накачки увеличивалась до значения, при котором сигнал усиливался также в 10^6 раз. Энергия накач-

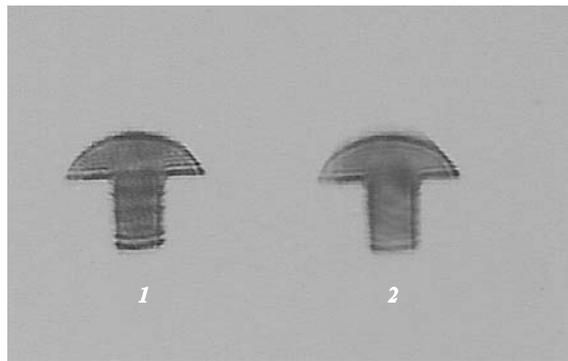


Рис.8. Изображения объекта при ослаблении стокового сигнала в 10^6 раз и усилении энергии в 10^6 раз (1) и без ослабления сигнала и усиления энергии (2).

ки при этом составляла 1.7 Дж, инкремент усиления $G = gI_p l \sim 40$. На фотозкране снова было получено изображение объекта. На рис.8 представлены результаты исследований, показывающие отсутствие сильных искажений при усилении сигнала в 10^6 раз. Заметна лишь более выраженная интерференционная структура при усилении.

6. Заключение

Таким образом, в настоящей работе показано, что максимальные коэффициенты линейного ВРМБ-усиления, определяемые пороговой интенсивностью накачки, зависят от геометрических параметров ВРМБ-усилителя, прежде всего от телесного угла $\delta\theta$, определяемого в проведенных экспериментах углом полного внутреннего отражения от стенок светопровода. Поэтому для достижения максимального коэффициента усиления при приеме и усилении изображений объектов, подсвеченных лазерным излучением, необходимо согласовывать угловые апертуры принимаемого изображения и ВРМБ-усилителя, а также использовать специальные схемы последнего.

Авторы выражают признательность В.И.Ковалеву, дискуссия с которым подтолкнула их к мысли опубликовать данную работу, часть результатов которой была получена несколько лет назад [7].

1. Bel'dyugin I.M., Efimkov V.F., Mikhailov S.I., Zubarev I.G. *J. Rus. Laser Res.*, **26** (1), 1 (2005).
2. Бельдюгин И.М., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Михайлов С.И., Соболев В.Б. *Квантовая электроника*, **37** (1), 43 (2007).
3. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* (М.: Наука, 1985).
4. Беспалов В.И., Пасманик Г.А. *Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы* (М.: Наука, 1986).
5. Гордеев А.А., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Михайлов С.И., Соболев В.Б. *Квантовая электроника*, **20** (10), 1005 (1993).
6. Бельдюгин И.М., Давыдов В.В., Демкин В.К., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Михайлов С.И., Соболев В.Б. *Квантовая электроника*, **31** (8), 709 (2001).
7. Бельдюгин И.М., Ефимков В.Ф., Зубарев И.Г., Михайлов С.И. *Препринт ФИАН № 1* (М., 2003).