

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВРМБ-ЗЕРКАЛА С
ДВОЙНОЙ ПЕТЛЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В РЕЗОНАТОРЕ
ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА.**

А.Б.Васильев, О.М.Вохник, В.А.Спажакин, И.В.Терентьева

Препринт НИИЯФ МГУ № 2002 – 28/712

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова
Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д.В.Скобельцына

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВРМБ-ЗЕРКАЛА С
ДВОЙНОЙ ПЕТЛЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В РЕЗОНАТОРЕ
ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА.**

А.Б.Васильев, О.М.Вохник, В.А.Спажакин, И.В.Терентьева

Препринт НИИЯФ МГУ № 2002 – 28/712

Москва 2002

УДК 621.373:535

A.B.Vasil'ev, O.M.Vokhnik, V.A.Spazhakin, I.V.Terent'eva

E-mail: omv@optics.npi.msu.su

Preprint of Institute of Nuclear Physics ¹ 2002 – 28/712

EXPERIMENTAL REALIZATION OF SOLID-STATE LASER CAVITY WITH A DOUBLE LOOP SBS-MIRROR

Abstract

Possibility of using of a double loop SBS-mirror as a solid-state laser cavity mirror was established experimentally. Essential increase of laser output power with conservation of diffractive beam quality was achieved. An advantage of a double loop SBS-mirror in comparison with an usual one, excited by one pass of nonlinear medium, was shown experimentally.

Аннотация

Экспериментально установлена возможность подключения ВРМБ-зеркала с двойной петлей обратной связи к резонатору твердотельного лазера. Получен существенный рост выходной мощности лазерного пучка при сохранении одномодового поперечного распределения интенсивности. Экспериментально показано преимущество ВРМБ-зеркала с двойной петлей обратной связи по сравнению с обычным, возбуждаемым за один проход нелинейной среды.

Введение

Повышение качества излучения твердотельных лазеров и улучшение их энергетических характеристик весьма актуально в свете их разнообразных применений в науке, технике, медицине. Одним из способов одновременного решения обеих проблем является применение в качестве одного из зеркал лазерного резонатора нелинейно-оптического устройства, использующего обратное вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ). Возбуждение лазерным импульсом обратного ВРМБ в ячейке, установленной вблизи одного из выходных зеркал резонатора, приводит к возвращению рассеянного излучения обратно в резонатор. Поскольку частота рассеянного излучения очень близка к частоте лазерного, оно попадает в полосу усиления активной среды, и действие такой ячейки оказывается эквивалентным возникновению дополнительного зеркала, что нашло отражение в названии этого устройства - ВРМБ-зеркало. Возбуждение ВРМБ-зеркала приводит к увеличению добротности лазерного резонатора по ходу генерации и, следовательно, росту выходной энергии импульса. Если исходное лазерное излучение имеет высокое качество пучка и близко по поперечной структуре к основной моде, то эта поперечная структура при увеличении мощности пучка сохраняется вследствие обращения волнового фронта при обратном вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна, что обеспечивает генерацию мощных импульсов дифракционного качества.

Впервые твердотельный лазер с ВРМБ-зеркалом, включаемым собственным лазерным излучением, был предложен и исследован в [1]. Было экспериментально показано, что при подключении ВРМБ-зеркала выходная мощность лазерного излучения возрастает в несколько раз за счет дополнительного увеличения добротности резонатора при сохранении одномодовой поперечной структуры пучка. В дальнейшем был выполнен еще целый ряд работ, посвященных исследованию твердотельного лазера с ВРМБ-зеркалом, из которых можно указать, например [2,3].

Важной характеристикой ВРМБ-зеркала является его эффективный коэффициент отражения, который тем выше, чем больше превышен порог возбуждения вынужденного рассеяния. Обычно, при возбуждении обратного рассеяния за один проход нелинейной среды требуется достаточно высокая мощность накачки, чтобы инкремент усиления рассеянного излучения G , пропорциональный интенсивности возбуждающего пучка, достигал значений $\sim 20 \div 25$. Снижения порогового значения инкремента усиления G можно добиться при использовании для возбуждения ВРМБ оптической обратной связи. Впервые схема оптической обратной связи для уменьшения порога возбуждения была предложена в [4]. В [4] обратная связь осуществлялась за счет петлевого обхода кюветы с веществом, и порог возбуждения, как было предсказано теоретически и показано экспериментально, уменьшился в несколько раз до значений $G \sim 1.5$. Другая схема обратной связи - кольцевая - была исследована в [5], в ней также предсказанное теоретически снижение пороговой мощности накачки наблюдалось экспериментально. Эти результаты открывали перспективу создания более эффективных ВРМБ-зеркал для лазерных резонаторов.

Впервые применение схемы с обратной связью для возбуждения ВРМБ-зеркала, включаемого излучением твердотельного лазера, экспериментально исследовалось в [6]. Наблюдался значительный, в несколько раз, рост выходной мощности лазера с петлевым ВРМБ-зеркалом по сравнению с выходной мощностью лазера, в котором ВРМБ-зеркало возбуждалось, как обычно, за один проход нелинейной среды. Исследование твердотельного лазера с кольцевым ВРМБ-

зеркалом [7] также показало значительно более высокую эффективность ВРМБ-зеркала с обратной связью по сравнению с обычным.

Еще более эффективным, чем в просто петлевой схеме, возбуждение вынужденного рассеяния оказывается в петлевой схеме с возвращающим зеркалом (или схеме с двойной петлей) [8]. Как было показано в [8], в этой схеме возвращающее зеркало формирует две области параметрического взаимодействия волн возбуждающего и рассеянного излучений, что обеспечивает снижение порогового инкремента возбуждения в 2 раза по сравнению с [4]. Однако, исследования ВРМБ-зеркала с двойной петлей обратной связи в качестве зеркала лазерного резонатора до настоящего времени не проводились, и данная работа призвана восполнить этот пробел. Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование возможности подключения ВРМБ-зеркала с двойной петлей обратной связи к резонатору твердотельного лазера и изучение его влияния на динамику генерации.

Описание экспериментальной установки

В качестве исходного лазера, как и в предыдущих работах [7,8] использовался лазер на кристалле ИСГГ: Cr^{3+} , Nd^{3+} . Как известно [9], активные элементы на основе кристаллов иттрий-скандий-галлиевых гранатов, соактивированных ионами хрома и неодима, обладая рекордными для твердотельных лазеров с ламповой накачкой коэффициентами полезного действия, подвержены в то же время значительному термо-двулучепреломлению. Поэтому для генерации линейно-поляризованного излучения с высоким коэффициентом полезного действия эти кристаллы обычно помещают в поляризационно-замкнутые резонаторы (ПЗР) [10]. В настоящей работе используется схема ПЗР с кольцевым зеркалом. Оптическая схема установки приведена на Рис.1. Поляризационно-замкнутый резонатор исходного лазера образован элементами (1) - (9). Выходными зеркалами резонатора служат поверхности клиновидных стеклянных подложек (1) и (9) с коэффициентом отражения 4%. Активным элементом (3) является кристалл ИСГГ: Cr^{3+} , Nd^{3+} . Поляризаторы (2) и (4) имеют коэффициент отражения вертикально поляризованной компоненты излучения $\geq 98\%$, горизонтально поляризованной $\leq 2\%$. Вращатель плоскости поляризации (8) поворачивает плоскость поляризации линейно поляризованного излучения на 90° . Поляризатор (4), зеркала (5), (7) с коэффициентом отражения $\sim 99\%$ и вращатель плоскости поляризации (8) образуют кольцевую часть поляризационно-замкнутого резонатора. В ней размещается пассивный модулятор добротности (6) на основе кристалла ИСГГ: Cr^{4+} с начальным пропусканием $\sim 30\%$.

Вертикально и горизонтально поляризованные компоненты излучения распространяются в резонаторе по разным путям обхода. Вертикально поляризованная компонента излучения, выходящая из активного элемента слева, отражается поляризатором (4) и, проходя через вращатель (8), становится горизонтально поляризованной. Далее она, отражаясь от зеркал (7) и (5), обходит кольцо по часовой стрелке и, проходя поляризатор (4), с минимальными потерями возвращается в активный элемент. Выходящая из активного элемента справа, вертикально поляризованная часть излучения поляризатором (2) отражается в направлении выходного зеркала (9) и частично выходит из него, частично возвращается обратно в резонатор. Таким образом, для вертикально

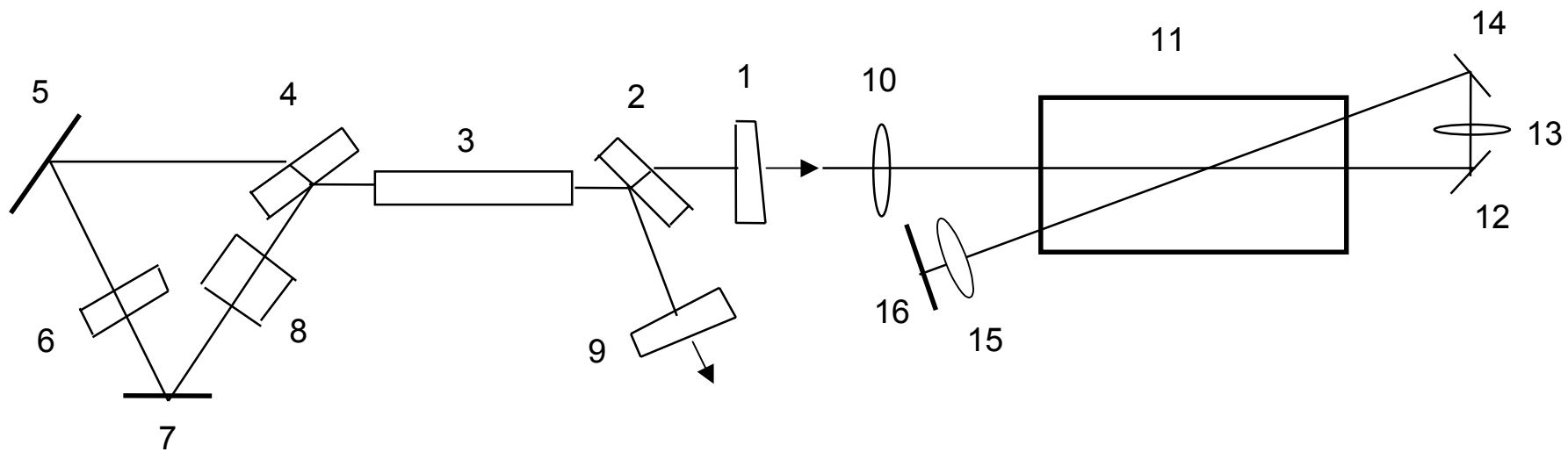


Рис.1. Оптическая схема экспериментальной установки

поляризованной компоненты излучения резонатор образован элементами (9)-(2)-(4)-(8)-(7)-(5)-(4)-(2)-(9). Обход резонатора горизонтально поляризованной компонентой, как нетрудно видеть, происходит по пути (1)-(2)-(4)-(5)-(7)-(8)-(4)-(2)-(1). Особенностью используемой схемы поляризационно-замкнутого резонатора является генерация линейно-поляризованного излучения двух взаимно-ортогональных поляризаций, выходящих каждая через “свое” выходное зеркало.

ВРМБ-зеркало с двойной петлей обратной связи образовано элементами (10)-(16) и располагается вблизи выходного зеркала (1) лазерного резонатора.

Рассмотрим принцип действия двойного петлевого ВРМБ-зеркала более подробно, следуя работе [8]. На Рис.2 приведена принципиальная схема взаимодействующих пучков. Излучение накачки в виде пучка $L1^+$ проходит через нелинейную среду (1) и зеркалами (2), (3) снова направляется в нее в виде пучка $L2^-$. Возвращающее зеркало (4) формирует еще два пучка накачки $L2^+$ и $L1^-$. Излучение стоковой компоненты вынужденного рассеяния с обращенным по отношению к накачке волновым фронтом распространяется по тому же пути в обратном направлении (пучки $S1^+$, $S1^-$ и $S2^+$, $S2^-$, показанные пунктиром). При наличии пучка $S2^+$ в поле лазерных волн $L1^+$, $L2^-$ происходит параметрическое возбуждение пучка $S1^+$. Этот пучок после отражения от зеркал (2) - (4) переходит в пучок $S2^+$, что и обеспечивает обратную связь. В приближении заданной накачки усиление волн $S1^+$, $S2^+$, взаимодействующих с волнами $L1^+$, $L2^-$, осуществляется независимо от волн $S1^-$, $S2^-$, взаимодействующих с парой накачки $L1^+$, $L2^+$. Поэтому, если не требуется возвращения излучения накачки в лазер, зеркало (4) необязательно должно быть установлено перпендикулярно падающему на него пучку $L2^+$, как это показано на Рис.2. Достаточно, чтобы в каждой из пар пучков $L1^+$, $L2^+$ и $L1^-$, $L2^-$ пересечение осуществлялось внутри среды. Схема возможной установки с неперпендикулярной ориентацией возвращающего зеркала представлена на Рис.3.

Расчет минимального значения порогового инкремента усиления $G^{пор}$, выполненный в [8], дал него при коэффициенте отражения зеркала (4), равном 100%, величину $\ln \sqrt{2}$, что в 2 раза ниже, чем в петлевой схеме [4]. Как и в других схемах с оптической обратной связью для достижения минимального порогового значения $G^{пор}$ необходимо обеспечить выполнение условия резонанса, а именно: время τ кругового облета параметрического резонатора должно быть кратно обратному значению стокова сдвига Ω в используемом веществе

$$\tau = m \cdot 2\pi / \Omega, \quad (1)$$

где $m = 1, 2, \dots$.

В настоящей работе, в отличие от [8], где возбуждение ВРМБ исследовалось в световоде, схема с двойной петлей обратной связи была реализована в реально пересекающихся пучках накачки. Выходящее из резонатора лазерное излучение, играющее роль пучка $L1^+$, линзой (10) с фокусным расстоянием ~ 10 см фокусируется в кювету (11) с нелинейно-оптической средой. Далее зеркалами (12) и (14) с коэффициентом отражения $\sim 99\%$ излучение снова направляется в кювету в виде пучка $L2^-$ таким образом, чтобы пучки пересекались в месте фокусировки пучка $L1^+$ линзой (10). Возвращающее зеркало (16) отражает пучок обратно $L2^-$ в виде пучка $L2^+$, который после обхода зеркал (12), (14) переходит в пучок $L1^-$. Области, в которых происходит параметрическое взаимодействие пар волн $L1^+$, $L2^+$ и $S1^+$, $S2^+$, также $L1^-$, $L2^-$ и $S1^-$, $S2^-$ является область пересечения пучков. Чтобы взаимодействующие лазерные пучки имели в области пересечения одинаковые угловые структуры и размеры поперечных сечений, используется софокусная система

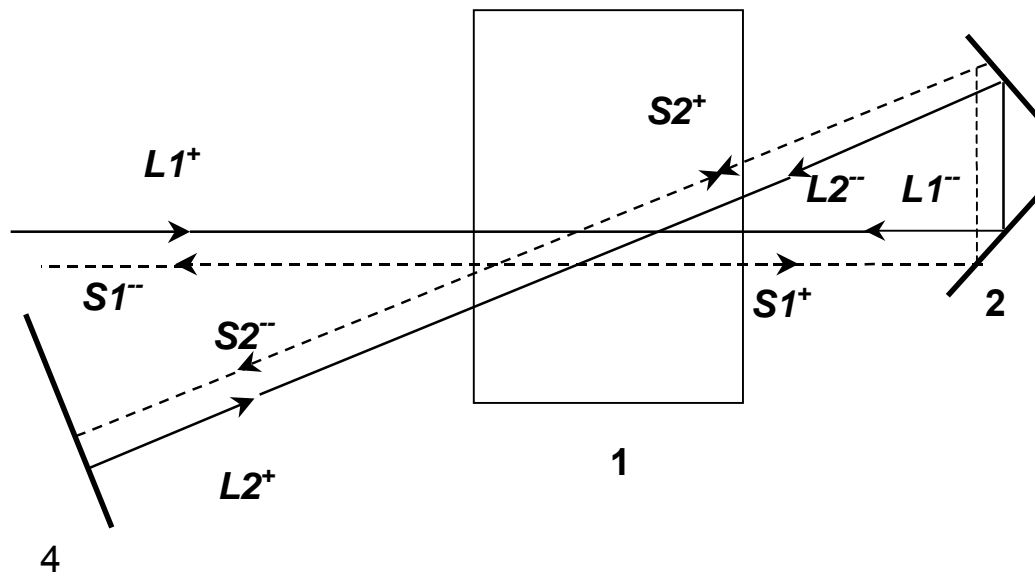


Рис.2. Принципиальная схема ВРМБ-зеркала с двойной петлей обратной связи.

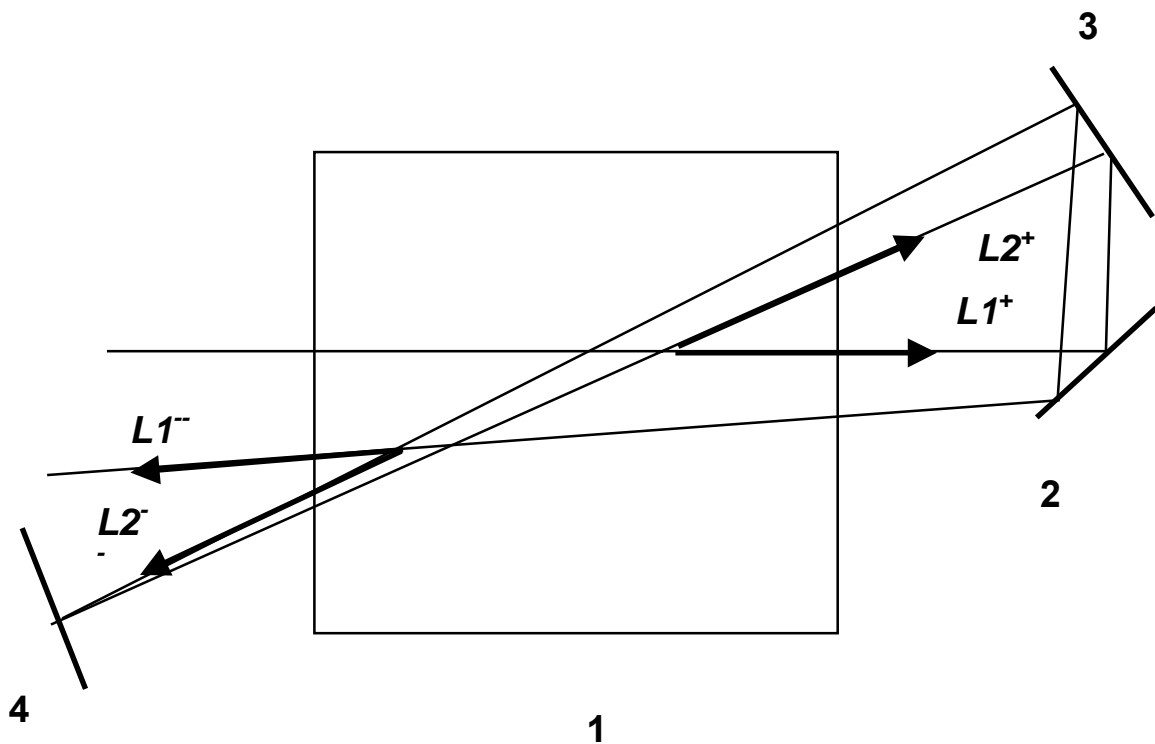


Рис.3. Схема волновых векторов при неперпендикулярной установке возвращающего зеркала

линз (14) и (15). При этом пучки $L1^+$, $L2^+$ в области пересечения сфокусированы, а $L1^-$, $L2^-$ представляют собой практически параллельные пучки диаметром ~ 1.0 мм.

Угол между пучками $L1^\pm$, $L2^\pm$ устанавливался минимально возможным с тем, чтобы область пересечения фокальных перетяжек пучков, где имеет место параметрическое взаимодействие волн, имела максимальную величину. В данной установке он равен 3.5° .

В качестве ВРМБ-активной среды используется тетрахлорид олова SnCl_4 . Выбор именно этого вещества обусловлен тем, что оно обладает одним из наиболее высоких удельных коэффициентов усиления рассеяния Мандельштама-Бриллюэна и сравнительно малым поглощением на длине волны лазерной генерации 1.06 мкм [11]. Оно помещено в кювету (11), специально герметизированную для устранения контакта вещества с воздухом. Стоксов сдвиг рассеянной компоненты ВРМБ в SnCl_4 составляет 0.076 см^{-1} [11]. Чтобы обеспечить выполнение условия резонанса (1) длина оптического пути в параметрическом резонаторе (с учетом показателей преломления окон кюветы, SnCl_4 и других элементов) должны быть кратна ~ 13.16 см. В данной установке она равна 52.6 см (кратность $m = 4$).

Контроль за пересечением взаимодействующих пучков в нелинейной среде осуществляется визуально с помощью зрительной трубы, в плоскость зрения окуляра которой выводится соответствующая плоскость сечения в кювете. Излучение направляется в зрительную трубу специально установленными ответвляющими пластинками (на Рис.1 не указаны), коэффициент отражения которых для горизонтально-поляризованной компоненты не превышает 1%, что практически не вносит потерь в петлевую схему.

Выход излучения из системы (лазер + ВРМБ-зеркало) осуществляется через зеркало (9) исходного резонатора. Для регистрации временных характеристик генерируемых лазерных импульсов используются коаксиальные фотоэлементы ФК-20 и запоминающий осциллограф С8-14. Энергия лазерного излучения измеряется с помощью измерителя ИМО-2Н.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Параметры излучения исходного лазера. Генерация в исходном поляризационно-замкнутом резонаторе возбуждается в виде одномодового гауссова пучка. Выход излучения через зеркала (1) и (9) примерно одинаков по мощности. Пиковая мощность импульсов, выходящих со стороны каждого зеркала, составляет ~ 0.1 МВт, длительность ~ 25 нсек. Диаметр пучка на выходе из резонатора ~ 2.0 мм, расходимость излучения, измеренная по пятну в фокальной плоскости объектива ~ 0.7 мрад, что близко к дифракционному пределу. Частота следования импульсов составляла 5 Гц.

Параметры излучения лазера с ВРМБ-зеркалом. При подключении ВРМБ-зеркала с двойной петлей обратной связи мощность импульсов, выходящих со стороны зеркала (9) возрастает более чем в 3 раза. На рис.4а,б представлены две типичные осциллограммы лазерных импульсов, первый из которых - это импульс излучения исходного лазера в отсутствие ВРМБ-зеркала, второй - импульс лазера с ВРМБ-зеркалом с двойной петлей обратной связи. На обеих осциллограммах хорошо виден рост амплитуды импульса при подключении ВРМБ-зеркала. Также на обеих осциллограммах по изменению плавного хода огибающей импульса 2 виден момент возбуждения вынужденного рассеяния. Характерные изломы огибающей импульса 2 на рис.4б обусловлены неравномерным во времени съемом инверсии в активной среде при резком росте отражения со стороны ВРМБ-зеркала.

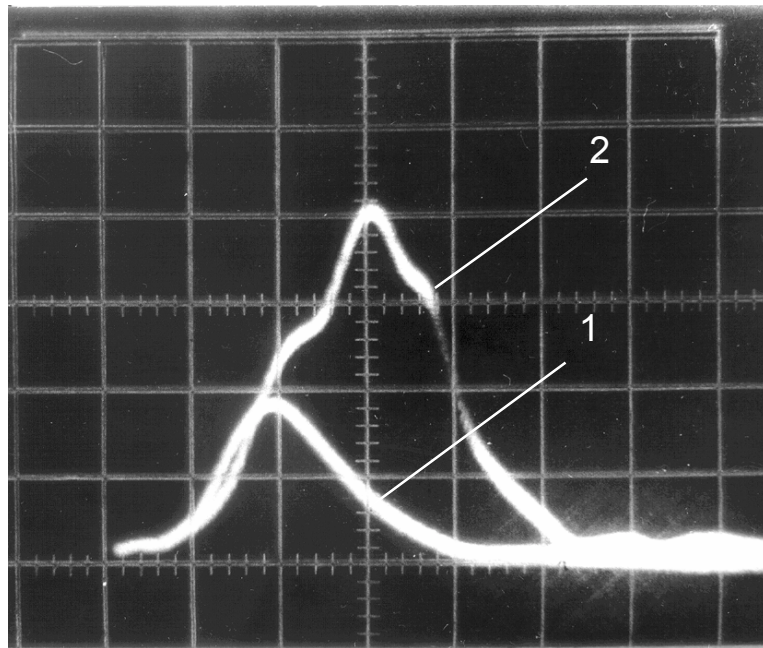
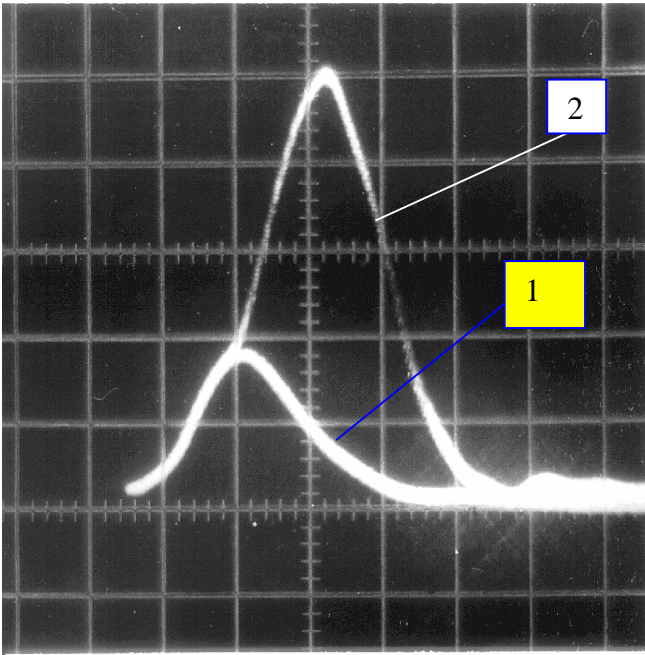


Рис. 4. Осциллограммы типичных импульсов исходного лазера (1) и лазера с двойным петлевым ВРМБ-зеркалом (2).

Для экспериментальной проверки того факта, что возбуждение ВРМБ обусловлено именно параметрическим взаимодействием волн накачки и стоксовой компоненты, производилась разъюстировка пучков в вертикальной плоскости таким образом, чтобы пучки $L1^+$, $L2^+$ и $L1^-$, $L2^-$ не пересекались, а скрещивались в нелинейной среде. В этом случае ВРМБ-зеркало практически не возбуждалось. Это объясняется тем, что интенсивность пучков накачки не обеспечивает пороговый инкремент усиления ВРМБ, который необходим для возбуждения вынужденного рассеяния за один проход нелинейной среды, несмотря на то, что при полном обходе двойного петлевого ВРМБ-зеркала лазерный пучок проходит по среде четырежды.

Приведем оценки инкрементов усиления, соответствующих условиям эксперимента. В условиях, когда пучки не пересекаются в нелинейной среде, численная оценка инкремента усиления G_L , создаваемого исходным лазерным пучком при полном обходе ВРМБ-зеркала с двойной петлей обратной связи, дает величину ~ 11 . Она складывается из усиления в областях фокальных перетяжек пучков $L1^+$, $L2^+$ и усиления, создаваемого почти не расходящимися в кювете пучками $L1^-$, $L2^-$. При этом вклад первой пары составляет ~ 10 . Он, как обычно при использовании сфокусированных пучков накачки, определяется соотношением

$$G_L = b \cdot I_L \cdot l, \quad (2)$$

где b - удельный коэффициент усиления ВРМБ, равный в используемом веществе $\sim 10^{-2}$ МВт $^{-1}$ ·см, I_L - интенсивность излучения в талии пучка, l - длина области фокальной перетяжки. Инкремент усиления, создаваемого несфокусированными пучками $L1^-$, $L2^-$, равен ~ 1 , (он определяется таким же соотношением с той лишь разницей, что при соответствующей интенсивности несфокусированного излучения вместо длины фокальной перетяжки подставляется вся длина проходимой нелинейной среды). Очевидно, что в этих условиях, соответствующих случаю возбуждения рассеяния на проход среды, ВРМБ не должно возбуждаться, поскольку пороговое значение инкремента (с учетом удвоения инкремента усиления для обращенной стоксовой компоненты) составляет $\sim 12 \div 15$.

При оценке инкремента усиления для ВРМБ-зеркала с двойной петлей обратной связи было учтено, что, во-первых, в качестве длины нелинейной среды должна фигурировать длина области пересечения фокальных перетяжек для пучков $L1^+$, $L2^+$ и длина области пересечения пучков для $L1^-$, $L2^-$, каждая из которых обратно пропорциональна величине угла между пересекающимися пучками. Во-вторых, следует учесть, что эффективная длина параметрического взаимодействия будет меньше длины области пересечения поскольку площадь области пересечения неодинакова в продольном направлении. Она минимальна в начале области пересечения, увеличивается по мере приближения к ее центру и затем снова убывает. Несложный расчет показывает, что эта неравномерность приводит к сокращению эффективной длины взаимодействия в 2,5 раза. С учетом этих соображений суммарный инкремент усиления $G_{\text{петл}}$, создаваемого исходным лазерным пучком в обеих областях пересечения оценивается величиной ~ 1.7 . Это значение существенно превышает теоретическую величину порогового инкремента $\ln\sqrt{2} \approx 0.35$, что и объясняет регулярное возбуждение ВРМБ-зеркала с двойной петлей обратной связи.

Поперечная структура выходного лазерного пучка при подключении ВРМБ-зеркала не изменяется по сравнению с исходной, оставаясь одномодовой и

сохраняя расходимость, близкую к дифракционной. Это, как известно, обусловлено тем, что стоксова компонента ВРМБ имеет обращенный по отношению к возбуждающему излучению волновой фронт, что позволяет компенсировать искажение излучения на фазовых неоднородностях в активном элементе.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе ВРМБ-зеркало с двойной петлей обратной связи впервые реализовано в качестве зеркала резонатора твердотельного лазера. Его подключение к резонатору в процессе генерации приводит к существенному, в несколько раз, повышению выходной мощности генерации при сохранении одномодовой структуры пучка. Экспериментально показано, что возбуждение ВРМБ-зеркала обусловлено именно наличием обратной связи, значительно понижающей порог возбуждения вынужденного рассеяния. Дальнейшие исследования влияния ВРМБ-зеркала с двойной петлей обратной связи на лазерную генерацию позволят выявить его особенности по сравнению с другими схемами и оценить перспективы его применения в лазерной технике.

Литература

1. П.П.Пашинин, Е.И.Шкловский. Квантовая электроника, т.15, № 9, с.1905-1908, 1988.
2. А.А.Денисов, О.Л.Куликов. Квантовая электроника, т.17, № 12, с.732-733, 1990.
3. M.Ostermeyer, A.Heuer, R.Menzel. IEEE Journal of Quantum Electronics, v.34, N.2, p.372-377, 1998.
4. В.И.Одинцов, Л.Ф.Рогачева. Письма в ЖЭТФ, т.36, № 8, с.281-284, 1982.
5. G.M.Wong, M.J.Damzen. IEEE, Journal of Quantum Electronics, v.26, 11, p.139-148, 1990.
6. О.М.Вохник, В.А.Михайлов, В.А.Спажакин, И.В.Терентьева, И.А.Щербаков. Оптика и спектроскопия, т.78, №2, с.338-340, 1995.
7. О.М.Вохник, И.В.Терентьева. Оптика и спектроскопия, т.85, №5, с.870-873, 1998.
8. В.И.Одинцов, Д.А.Николаев. Квантовая электроника, т.16, № 9, стр.1878-1881, 1989.
9. V.A.Mikhailov, A.M.Prokhorov, I.A.Shcherbakov. Laser Physics, v.1, № 6, p.590-614, 1991.
10. Г.И.Дьяконов, В.Г.Лян, В.А.Михайлов, С.К.Пак, И.А.Щербаков. Квантовая электроника, т.17, №12, с.1637-1640, 1990.
11. Н.Ф.Андреев, Е.А.Бубис, В.В.Варьгин, О.В.Палашов, Г.А.Пасманик, Е.А.Хазанов. Тезисы докладов XIV-й Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике КиНО'91, Ленинград, т.1, с.174, 1991.

Александр Борисович Васильев
Ольга Михайловна Вохник
Владимир Анатольевич Спажакин
Ирина Викторовна Терентьева

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВРМБ-ЗЕРКАЛА С ДВОЙНОЙ
ПЕТЛЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В РЕЗОНАТОРЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА.**

Препринт НИИЯФ МГУ №2002 – 28/712

Работа поступила в ОНТИ 26.11.2002 г.

ИД № 00545 от 06.12.1999
Издательский отдел
Учебно-научного центра довузовского образования

117426, Москва, ул.Обручева, 55А
119992, Москва, Ленинские горы, ГЗ МГУ, Ж-105а
Тел/Факс (095) 718-6966, 939-3934
e-mail:izdat@abiturcenter.ru
http: www.abiturcenter.ru

Гигиенический сертификат № 77.99.2.925.П.9139.2.00 от 24.02.2000
Налоговые льготы – Общероссийский классификатор продукции
ОК-005-93, том 1-953000

Заказное. Подписано в печать 09.12.2002г. Формат 60х90/16
Бумага офсетная № 2. Усл печ.л. 0.75
Тираж 30 экз. Заказ № 288

Отпечатано в Мини-типографии УНЦ ДО