

УДК 621.373.8

Определение вклада усиленного спонтанного излучения в выходной сигнал лазерных активных оптических систем

Н.А. Васнев[✉], М.В. Тригуб*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 28.02.2025;
после доработки 13.03.2025;
принята к печати 14.03.2025

Работа посвящена исследованию состава выходного сигнала лазерных активных оптических систем на парах металлов в различных условиях работы. Выполнена экспериментальная оценка влияния временных характеристик лазерных активных оптических систем на выходную мощность излучения. Предложен метод определения вклада усиленного спонтанного излучения (ASE) в выходной сигнал самосопряженной схемы и схемы с независимым источником подсветки. На основании экспериментальных данных установлен оптимальный момент времени поступления входного сигнала в активную среду усилителя для обеспечения максимального значения «сигнал/шум» на выходе. Для схемы с независимым источником подсветки при временной задержке (–4,3; +25,8) нс на осциллограммах наблюдается полное подавление ASE в выходном сигнале. Для самосопряженной схемы достигнуть полного подавления не представляется возможным. Минимальное значение ASE в самосопряженной схеме составило 80 мВт ($\approx 2\%$ от мощности выходного сигнала). Результаты работы могут быть полезны при исследовании усилительных характеристик активных оптических систем на парах металлов, а также при визуально-оптической диагностике в схемах лазерного монитора, реализованных на их основе.

Ключевые слова: лазерная активная оптическая система, лазерный монитор, усиленное спонтанное излучение, одноканальное излучение, усиление сигналов; laser active optical system, laser monitor, amplified spontaneous emission, single-pass radiation, signal amplification.

Введение

Активные среды на парах металлов и их галогенидов, в частности на парах бромида меди, хорошо зарекомендовали себя в ряде приложений. На основе таких сред были созданы лазерные активные оптические системы, с помощью которых исследуют сварочные процессы [1], горение нанопорошков [2–4], самораспространяющийся высокотемпературный синтез [5, 6], производство нанопорошков для изготовления керамики с требуемыми физико-химическими свойствами [7, 8] и др. [9–13].

Изначально такие активные оптические системы называли лазерными проекционными микроскопами [14, 15]. Впоследствии на определенном этапе их развития был введен термин «лазерный монитор» — именно так называют лазерную активную оптическую систему, которая позволяет сформировать усиленное по яркости изображение и зарегистрировать его с помощью скоростной камеры [16–19]. Традиционно лазерный монитор состоит из одного активного элемента — герметичной газоразрядной трубки из кварцевого стекла, конструкция которой

включает контейнеры с активным веществом. Активный элемент сперва подсвечивает объект наблюдения через объектив усиленным спонтанным излучением, а затем усиливает сформированное оптическое изображение [20]. Недостатком такого устройства является отсутствие независимой регулировки параметров подсветки и усиления. Данную проблему решает бистатическая схема лазерного монитора, в которой один активный элемент используется как источник подсветки, а другой — в качестве усилителя [21–23]. Такой подход позволяет повысить качество формируемых изображений и увеличить предельно допустимую дистанцию визуализации [24, 21].

При исследованиях лазерных активных оптических систем зачастую оценивают их усилительные характеристики [25, 26]. Для лазерных мониторов коэффициент усиления важен с точки зрения обеспечения высокой яркости формируемых изображений и высокого отношения сигнал/шум [27, 28]. Известны экспериментальные работы, которые подтверждают, что преобладание усиленного спонтанного излучения в выходном сигнале лазерного монитора вносит существенные искажения в формируемые изображения [21, 29]. Поскольку в лазерном мониторе изображение усиливается за один проход, коэффициент усиления в такой системе оценивают

* Николай Александрович Васнев (vasnev_na@iao.ru);
Максим Викторович Тригуб (trigub@iao.ru).

как отношение мощности выходного сигнала к мощности входного сигнала. Данный подход прост с точки зрения реализации, однако не вполне корректен. Выходной сигнал активной среды (усилителя) представляет собой совокупность усиленного спонтанного излучения (ASE) и входного сигнала, усиленного активной средой за счет инверсной населенности (AIS). Последнюю компоненту также справедливо называть однопроходным излучением. Из-за сложности измерения этих компонент на практике разрабатываются теоретические модели, позволяющие определить вклад каждой из них [30].

В настоящем исследовании представлена экспериментальная оценка вклада ASE в выходной сигнал при двух различных конфигурациях лазерной активной оптической системы. Цель работы — уточнение параметров усиления активных сред, а также определение требований для конфигурации лазерных мониторов с минимизацией искажений формируемых изображений. Определив долю ASE, можно не учитывать ее при нахождении коэффициента усиления входного сигнала или оценке соотношения сигнал/шум, что обеспечивает более точный результат.

Активные элементы

Каждая из лазерных активных оптических систем, исследованию которых посвящена настоящая работа, выполнена на основе активных элементов (АЭ) на парах бромида меди. Активные элементы возбуждаются традиционными источниками питания с импульсным зарядом рабочей емкости [31]. В качестве высоковольтных коммутаторов использовались тиратроны. Параметры АЭ представлены в таблице.

Параметры АЭ

Параметр	АЭ1	АЭ2
Длина активной зоны, см	90	50
Диаметр канала, см	5	3,2
Активный объем, см ³	1767	402
Анодное напряжение, кВ	11,8	11,0
Накопительная емкость, пФ	1100	892
ЧСИ, кГц	16	16
Энергия накопительного конденсатора, мДж	77	54
Мощность накачки, Вт	1225	863
Мощность генерации, Вт	4,70	0,97

В результате возбуждения АЭ формируется ASE на двух длинах волны оптического диапазона: $\lambda_1 = 510,6$ нм, $\lambda_2 = 578,2$ нм. Каждый из элементов работает в режиме усиления сигнала (усилитель), а при снабжении плоскопараллельным резонатором — в режиме генератора (источник подсветки).

Самосопряженная схема

На рис. 1 схематично представлена самосопряженная схема лазерной активной оптической системы, исследованию которой посвящен первый этап работы. Схема включает один АЭ, который является одновременно источником подсветки и усилителем. Для регистрации импульсов излучения были использованы фотоприемники: 1 — фотоэлемент коаксиальный FEK 22-SPU-M (усиленное спонтанное излучение L_{ase}); 2 — фотоэлемент коаксиальный FEK 22-SPU-M (выходной сигнал L_{out}); 3 — фотодиод DET10A/M (входной сигнал L_{in}).

Кратко поясним принцип действия самосопряженной схемы. Усиленное спонтанное излучение усилителя отражается от глухого зеркала и направляется обратно в среду усилителя мощности (УМ). Таким образом, отраженное излучение является входным сигналом для УМ. Мощность выходного сигнала, усиленного за счет инверсной населенности активной среды, измеряется прибором Orphir 30C-SH (измеритель мощности — ИМ). Фотоприемники 1–3 регистрируют усиленное спонтанное излучение, выходной сигнал и входной сигнал УМ. Это возможно благодаря тому, что часть излучения отводится на фотоприемники с помощью полупрозрачных зеркал (ППЗ1, ППЗ2).

В ходе эксперимента расстояние L_1 между глухим зеркалом (З) и УМ увеличивалось с шагом 0,3 м, что позволяло изменять временную задержку t_3 между началом формирования усиленного спонтанного излучения и моментом поступления входного сигнала в активный объем УМ. Расстояние L_1 между усилителем мощности и зеркалом можно записать как

$$L_1 = x_1 + x_2, \quad (1)$$

где $x_1 = 0,3$ м — неизменное расстояние между УМ и ППЗ3, x_2 — расстояние между ППЗ3 и З, последовательно увеличиваемое с шагом 0,3 м:

$$x_2(n) = 0,1 + 0,3n, \quad (2)$$

где n — целое число, которое изменяется от 0 до 10.

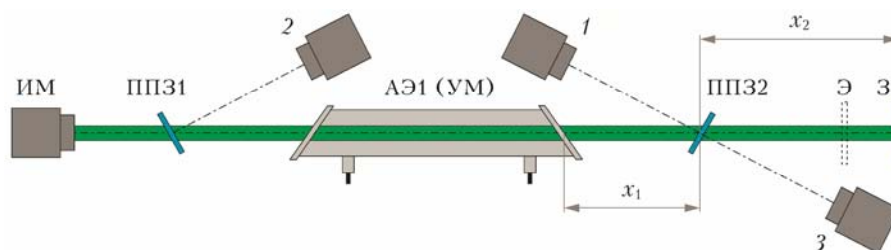


Рис. 1. Самосопряженная схема: АЭ1 (УМ) — активный элемент (усилитель мощности); 1–3 — фотоприемники; З — глухое зеркало; Э — блокировочный экран; ППЗ1, ППЗ2 — полупрозрачные зеркала 1, 2; ИМ — измеритель мощности (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.38-2025/iss.5>)

Таким образом, дистанция L_1 варьировалась в диапазоне от 0,4 до 3,4 м. Все остальные расстояния между элементами экспериментальной установки оставались неизменными.

Увеличивая дистанцию x_2 , мы можем установить, как зависит мощность выходного излучения от L_1 . Однако более целесообразно оценивать, как мощность выходного излучения зависит от временной задержки t_3 . Определяя временную задержку, необходимо учитывать, что импульсы излучения проходят оптическую трассу L_1 дважды: до зеркала и обратно в активную среду УМ. Следовательно,

$$t_3 = \frac{2L_1}{c} = \frac{2(x_1 + x_2(n))}{c} \quad (3)$$

(c — скорость света).

Для каждого значения L_1 (t_3) измерялась мощность выходного излучения P_{out} . Примеры осциллограмм, полученных при варьировании расстояния L_1 и соответственно t_3 приведены на рис. 2. Увеличение L_1 неизбежно приводит к снижению мощности входного сигнала вследствие его расходимости и потерь, поэтому его форма претерпевает изменения, а амплитуда постепенно падает. Поскольку определить максимум импульсов излучения или их полувысоту для ряда случаев не представляется возможным, измерение временной задержки между импульсами усиленного спонтанного излучения и входным сигналом осуществлялось относительно 10% от амплитуды каждого сигнала ($0,1U_m$). Сравнение измеренных значений с рассчитанными показало, что погрешность составляет менее 1 нс.

Очевидно, что чем больше расстояние L_1 (временная задержка t_3), тем позже входной сигнал поступит на вход УМ. Чтобы подчеркнуть это обстоятельство, временные задержки на рис. 2 указаны со знаком минус — такая форма записи дает понять, что входной сигнал «отстает» от усиленного спонтанного излучения.

При анализе осциллограмм (рис. 2, $a-e$) видно, что изначально форма выходного сигнала L_{out} (кривая 2) абсолютно идентична форме усиленного спонтанного излучения L_{ase} (кривая 1). Особенно хорошо это видно, если сопоставлять осциллограммы на рис. 2, $a-e$ с осциллограммой на рис. 2, z , которая была получена при размещении блокировочного экрана между глухим зеркалом и полупрозрачным зеркалом. Очевидно, что в этом случае приемники 1 и 2 фиксируют усиленное спонтанное излучение (во избежание разночтений эти осциллограммы обозначены кривыми 1' и 2' соответственно). Разница в амплитуде между импульсами объясняется различным видом используемых фотоприемников. Формы импульсов излучения при этом почти идентичны. Также видно, что с появлением входного сигнала L_{in} (кривая 3) наблюдается стремительный рост выходного сигнала L_{out} (кривая 2). Таким образом, можно утверждать, что выходной сигнал L_{out} есть ни что иное, как совокупность усиленного спонтанного излучения L_{ase} и входного сигнала L_{in} , который усиливается в активной среде УМ.

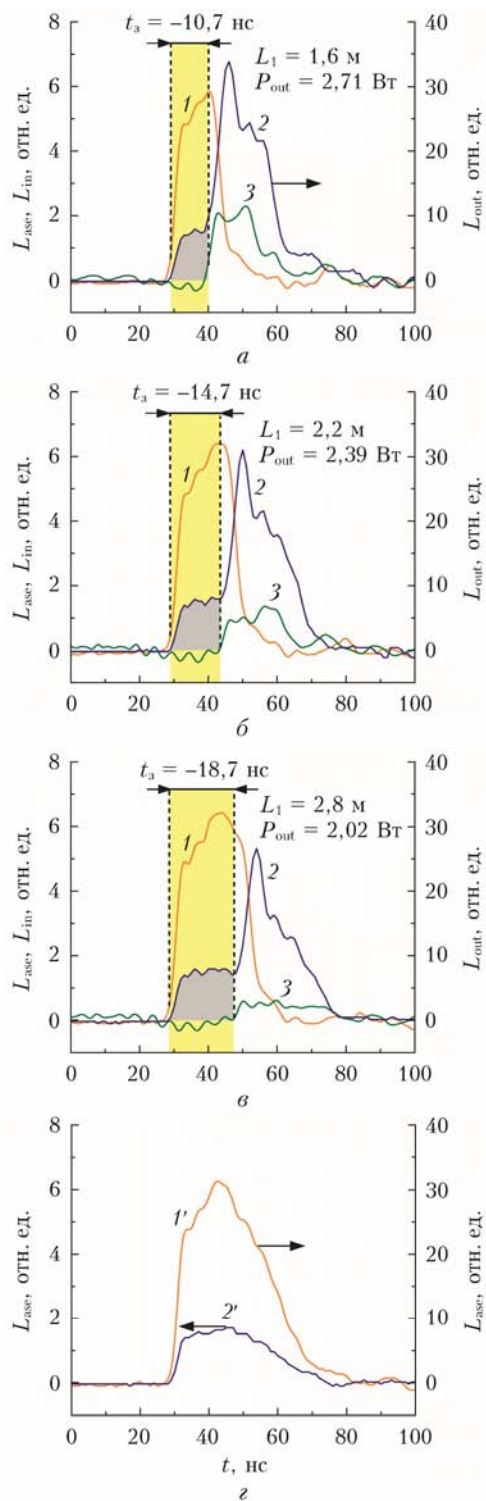


Рис. 2. Осциллограммы усиленного спонтанного излучения (кривая 1), выходного сигнала (2) и входного сигнала (3) при различной временной задержке между L_{ase} и L_{in} ($a-e$); импульсы L_{ase} (кривые 1' и 2') при наличии в схеме блокировочного экрана (z). Здесь и далее номер осциллограммы соответствует номеру фотоприемника

Наиболее важным и интересным аспектом исследования стало определение доли усиленного спонтанного излучения в выходном сигнале и, как следствие, соотношения полезный сигнал/шум. Для

этого были проинтегрированы графики выходного сигнала следующим образом: сперва определялась площадь под графиком, которая соответствовала L_{ase} (здесь и далее выделено серым) на рис. 2, а–в, а затем интегрировался оставшийся участок, который соответствовал однопроходному излучению.

Так была определена доля усиленного спонтанного излучения и однопроходного излучения в выходном сигнале для каждого значения t_3 в диапазоне $-2,7...-22,7$ нс. Поскольку для каждого значения временной задержки измерялась мощность выходного сигнала, можно без труда определить долю усиленного спонтанного излучения в мВт. Например, при $t_3 = -10,7$ нс L_{ase} составляет приблизительно 11% от L_{out} (рис. 2, а). Следовательно, L_{out} мощностью 2,71 Вт содержит 300 мВт L_{ase} (11%) и 2,41 Вт однопроходного излучения (89%).

Аналогичным образом были рассчитана мощность усиленного спонтанного излучения (P_0) и однопроходное излучение (P_1) для каждой временной задержки в интервале 2,7–22,7 нс. Результаты представлены на рис. 3. Значение ASE было наименьшим при $t_3 = -2,7$ нс – оно составило 80 мВт (~2% от мощности выходного сигнала).

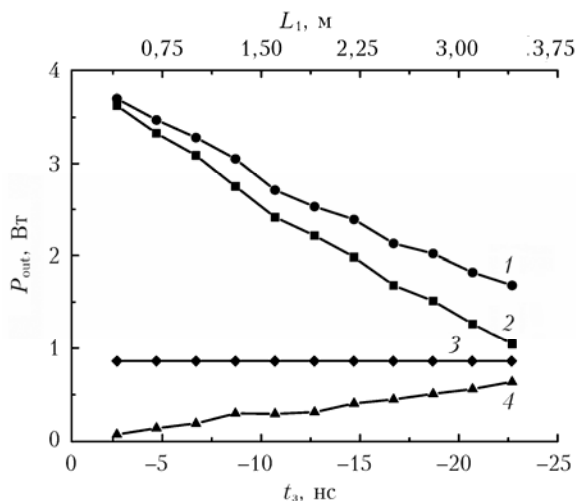


Рис. 3. Зависимости от расстояния и временной задержки мощности выходного излучения P_{out} (кривая 1), однопроходного излучения P_1 (кривая 2), ASE при отсутствии входного сигнала P_0 (кривая 3), вклада усиленного входного излучения в выходной сигнал P_0 (кривая 4)

Кроме того, проводились измерения усиленного спонтанного излучения при отсутствии входного сигнала, которое составило $860 \text{ мВт} \pm 5\%$. Результаты измерения свидетельствуют о том, что температурный режим активной среды усилителя на протяжении всего эксперимента оставался неизменным. У представленных зависимостей (аналогично рис. 2) временная задержка указана со знаком минус, чтобы подчеркнуть «отставание» входного сигнала.

Схема с независимым источником подсветки

На рис. 4 представлена схема экспериментальной установки, которая содержит два активных элемента: УМ и независимый источник подсветки (ИП). В основном она соответствует схеме на рис. 1. Главное отличие заключается в том, что в схему на рис. 4 добавлен второй активный элемент (АЭ2), который выполняет функцию ИП за счет плоскопараллельного резонатора, состоящего из глухого зеркала (З2) и полупрозрачного зеркала (ППЗ3). Лазерное излучение источника подсветки с помощью зеркал (ЗЗ, З) направляется в АЭ1, который выполняет функцию УМ. Таким образом, данная экспериментальная установка соответствует МОРА-системе (Master Oscillator Power Amplifier) или, как ее еще иначе называют, системе «генератор – усилитель мощности» [32–34]. Фотоприемники 1–3 также регистрируют L_{ase} , L_{out} и L_{in} .

В данной экспериментальной установке входным сигналом является импульс излучения источника подсветки, т.е. АЭ2. В такой конфигурации появляется возможность рассмотреть разные случаи поступления входного сигнала в АЭ1: перед, после и во время формирования усиленного спонтанного излучения АЭ1. Технически это осуществляется за счет регулировки t_3 между возбуждением АЭ1 и АЭ2 аналогично работам [35–37]. В отличие от самосоглаженной схемы, изменение задержки не приводит к изменению энергетических параметров входного сигнала.

На рис. 5 приведены примеры полученных осциллограмм. Каждому значению временной задержки соответствуют два вида изображений: слева показаны L_{ase} (кривая 1), L_{out} (кривая 2) и L_{in} (кривая 3); справа – L_{in} (кривая 3'), т.е. импульс

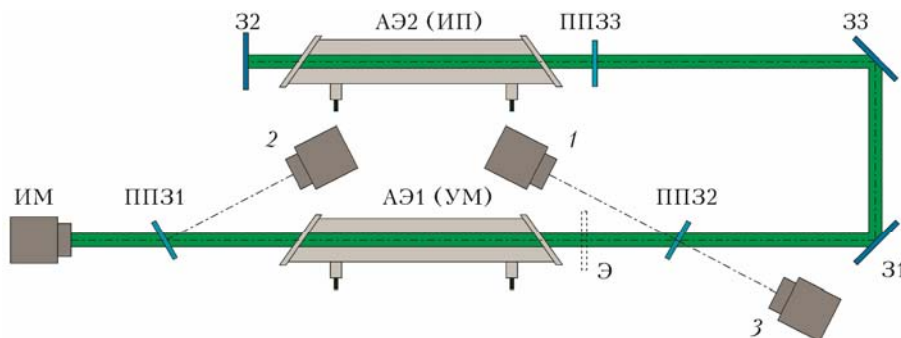


Рис. 4. МОРА-система: АЭ1 (УМ) – активный элемент 1 (усилитель мощности); АЭ2 (ИП) – активный элемент 2 (источник подсветки); 1–3 – фотоприемники; З1–З3 – глухие зеркала 1–3; ППЗ1–ППЗ3 – полупрозрачные зеркала 1–3 соответственно; ИМ – измеритель мощности; Э – блокировочный экран

генерации АЭ2, и L_{ase} (кривая 2') АЭ1 при наличии в схеме блокировочного экрана.

Для одновременной регистрации последних двух сигналов излучение АЭ2 (ИП) перекрывалось

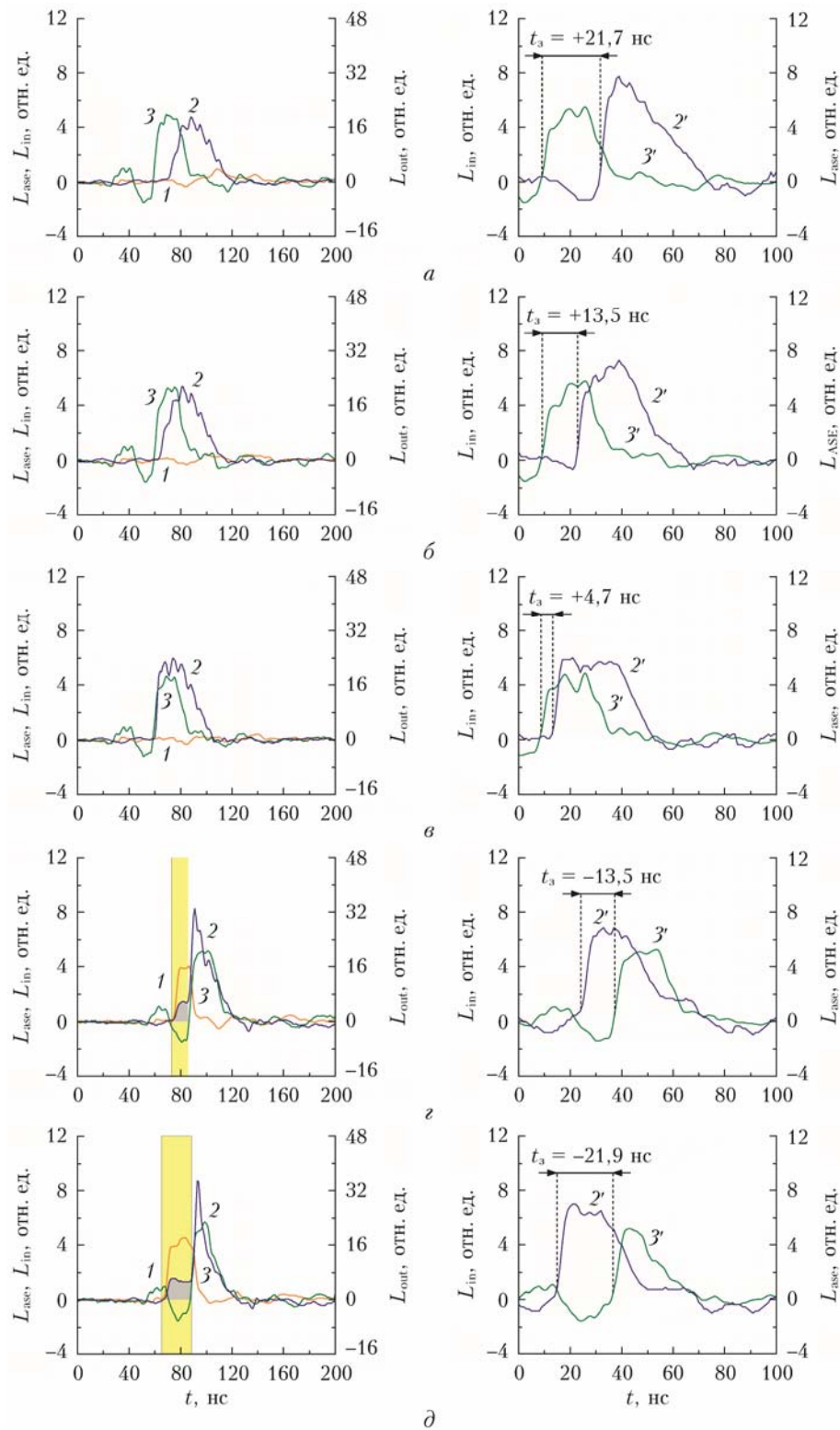


Рис. 5. Осциллограммы усиленного спонтанного излучения (кривая 1), выходного сигнала (кривая 2) и входного сигнала (кривая 3) и соответствующие им осциллограммы усиленного спонтанного излучения (кривая 2') и входного сигнала (кривая 3') при наличии в схеме блокировочного экрана при различной временной задержке между импульсами излучения ИП и УМ: $P_{out} = 2,79$ (а); 3,40 (б); 3,87 (в); 3,30 (г); 2,79 Вт (д)

блокировочным экраном, который располагался непосредственно перед входным окном АЭ1. В этом случае фотоприемником 2 регистрировалось L_{ase} . Рис. 5, а–в соответствуют случаю, когда L_{in} поступает в объем АЭ1 еще до формирования L_{ase} , которое было выбрано в качестве опорного сигнала. Условно можно сказать, что L_{in} «опережает» L_{ase} (чтобы подчеркнуть этот момент, временная задержка приводится со знаком «+»). Постепенное смещение входного сигнала относительно опорного приводило к увеличению мощности выходного излучения, максимальное значение которой составило 3,87 Вт ($t_3 = +4,7$ нс).

Анализ осциллограмм говорит о том, что наибольшая мощность излучения достигается, когда первый максимум L_{in} приблизительно совпадает с фронтом L_{ase} . Далее входной сигнал смещается настолько, что начинает поступать в объем АЭ уже после формирования его L_{ase} (в этом случае временная задержка приводится со знаком «-», поскольку L_{in} «отстает» от L_{ase} (см. рис. 2, з, д)). Можно заключить, что когда L_{in} не попадает на фронт L_{ase} , эффективность сема инверсной населенности снижается и в результате мощность L_{out} уменьшается. Следует подчеркнуть, что рис. 5 содержит лишь несколько примеров полученных осциллограмм. На самом деле в рамках эксперимента t_3 варьировалась в широком диапазоне -36...+24 нс.

Зависимость P_{out} от t_3 показана на рис. 6. Видно, что P_{out} существенно зависит от t_3 между импульсами излучения. Наиболее примечательный участок данной зависимости лежит в узком диапазоне временной задержки -6,9...+4,7 нс. Предположим, что мы увеличиваем t_3 , двигаясь из области со знаком «-» в область со знаком «+». Сначала мощность излучения постепенно нарастает, но в указанном интервале наблюдается ее «провал», после чего она достигает своего наибольшего значения. Можно предположить, что такой участок свидетельствует о наличии погрешности измерений, однако подобная зависимость выходной мощности от t_3 неоднократно повторялась на практике, кроме того, подобный результат был получен при моделировании [30]. Вероятно, такой характер изменения

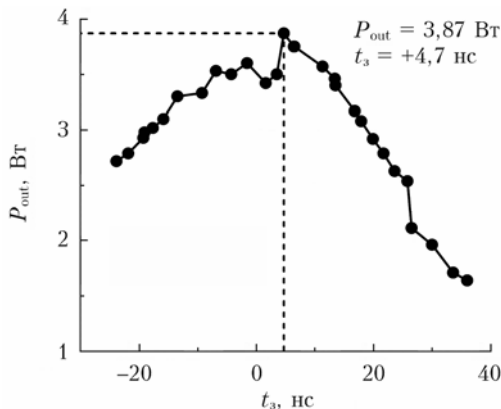


Рис. 6. Зависимость мощности выходного излучения УМ от временной задержки в МОРА-системе; пунктиром показана максимальная выходная мощность излучения

мощности в окрестности максимального значения обусловлен какими-то объективными факторами, сущность которых еще предстоит установить.

Еще одной интересной особенностью, которую стоит отметить, является отсутствие осциллограммы L_{ase} при $t_3 = -4,3...+25,8$ нс. Это, вероятно, обусловлено тем, что практически все возбужденные атомы меди идут на усиление L_{in} , в результате чего L_{ase} не формируется или же его интенсивность крайне мала. Данное обстоятельство делает возможным определение вклада L_{ase} в L_{out} преимущественно при t_3 со знаком «-», т.е. когда L_{in} УМ «отстает» от L_{ase} . Таким образом, в интервале -24...-4,3 нс были проинтегрированы импульсы излучения. В результате измерений и расчета были получены зависимости, представленные на рис. 7.

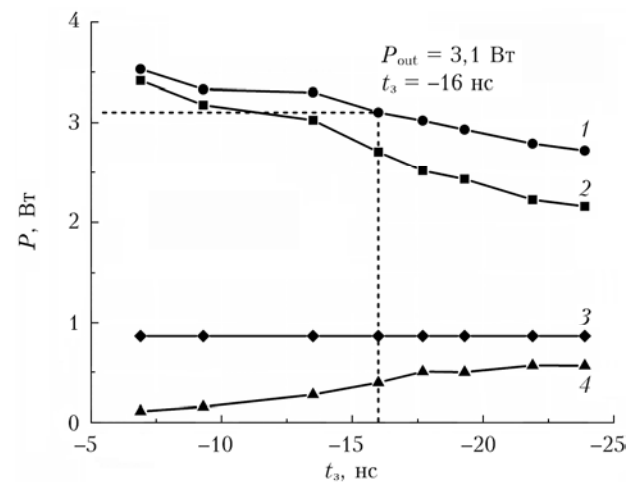


Рис. 7. Зависимость от временной задержки мощности выходного (кривая 1) и однопроходного излучения (кривая 2); мощности усиленного спонтанного излучения при отсутствии входного сигнала (кривая 3); вклада усиленного входного излучения в выходной сигнал (кривая 4)

Как и в случае самоспряженной схемы, по мере увеличения t_3 наблюдается постепенное увеличение доли L_{ase} , которая определялась тем же способом, что и в предыдущем разделе. Наименьшая доля L_{ase} , разумеется, наблюдается в том случае, когда t_3 минимальна, поскольку происходит эффективный сьем инверсной населенности и практически весь L_{out} представляет собой однопроходное излучение (98,5%). В пересчете на мощность ASE составляет всего лишь 50 мВт, а $P_1 = 3,42$ Вт. Следовательно, соотношение сигнал/шум в данном случае $3,42 \text{ Вт} / 0,05 \text{ Вт} = 69,4$. Возьмем для примера другую точку $t_3 = -16$ нс – в этом случае L_{ase} составляет приблизительно 13% от L_{out} (см. рис. 6). Следовательно, L_{out} мощностью 3,10 Вт содержит 390 мВт L_{ase} (13%) и 2,71 Вт P_1 (87%).

Соотношение сигнал/шум

Как было отмечено ранее, для лазерных активных оптических систем важным показателем является соотношение сигнал/шум, которое показывает, во сколько раз полезный сигнал превосходит фон.

В нашем случае полезный сигнал — это однопроходное излучение, а шум — усиленное спонтанное излучение.

На рис. 8 представлены зависимости соотношения сигнал/шум (P_1/P_0) от временной задержки для самоспряженной схемы и схемы с независимым ИП. При сравнении полученных зависимостей выигрывает лазерная активная оптическая система с независимым ИП. Например, при $t_3 = -7$ нс соотношение сигнал/шум в самоспряженной схеме равно 15, в то время как при использовании независимого ИП данный параметр достигает 30, т.е. в два раза больше.

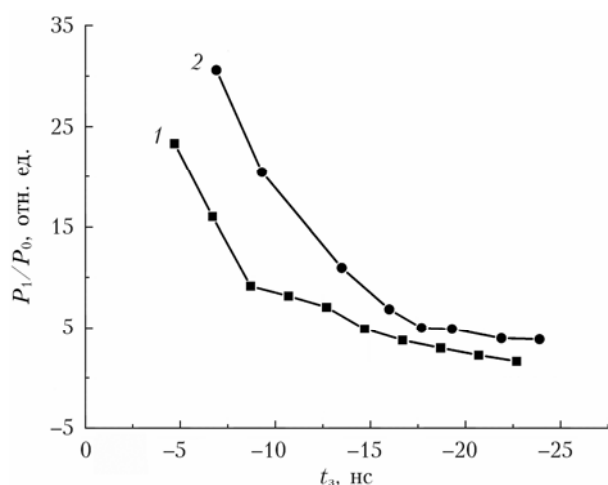


Рис. 8. Зависимость соотношения сигнал/шум от временной задержки в самоспряженной схеме (кривая 1) и схеме с независимым ИП (кривая 2)

Таким образом, для формирования изображений с высоким контрастом (соотношением сигнал/шум) необходимо обеспечивать поступление изображения (входного сигнала) в усилитель яркости (мощности) на фронте импульса усиленного спонтанного излучения или чуть раньше.

Заключение

Результаты исследования подтверждают, что выходной сигнал каждой лазерной активной оптической системы содержит две составляющие: однопроходное и усиленное спонтанное излучение. Определен характер изменения их соотношения в зависимости от условий работы. Вторая составляющая является в данном случае фоном, поэтому чем она больше, тем меньше соотношение сигнал/шум.

В самоспряженной схеме доля усиленного спонтанного излучения (шума) растет с увеличением временной задержки между началом формирования усиленного спонтанного излучения и моментом поступления в усилитель мощности входного сигнала. Другими словами, с ростом временной задержки снижается соотношение сигнал/шум. Для более точного определения данного параметра производилась оценка доли усиленного спонтанного излуче-

ния в выходном сигнале, которая не учитывалась при нахождении коэффициента усиления входного сигнала.

В системе с независимым источником подсветки наличие шума сводится к минимуму, когда амплитуда входного сигнала приходится на фронт усиленного спонтанного излучения, поскольку происходит более эффективный съем инверсной населенности. Также шум отсутствует или присутствует в пренебрежимо малых количествах, когда входной сигнал приходит раньше оптимальной временной задержки. Усиленное спонтанное излучение в этих случаях на осциллограммах зарегистрировано не было. Если входной сигнал поступает в усилитель после начала импульса ASE, то в выходном сигнале детектируются две составляющие: усиленное спонтанное и однопроходное излучения. В этом случае также определялась доля усиленного спонтанного излучения в выходном сигнале. Установлено, что чем позже в активный объем усилителя поступает входной сигнал, тем ниже соотношение сигнал/шум. Показано, что для наибольшего соотношения сигнал/шум необходимо обеспечивать поступление входного сигнала в усилитель на фронте импульса усиленного спонтанного излучения или чуть раньше. При визуализации в бистатической схеме лазерного монитора это выражается в формировании более высокого контраста изображения объекта наблюдения.

Таким образом, экспериментально показано преимущество системы с двумя активными элементами, т.е. с независимым источником подсветки, в контексте соотношения сигнал/шум. Это обусловлено разделением функций подсветки и усиления между двумя активными элементами, а также регулируемой временной задержкой, что позволяет реализовать более эффективный съем инверсной населенности в усилителе мощности.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИОА СО РАН (проект № FWRU-2021-0006 от 02.04.2021 г. (121040200025-7)).

Список литературы

1. Saraev Yu.N., Trigub M.V., Vasnev N.A., Semenchuk V.M., Nepomnyashiy A.S. The imaging of the welding processes with the use of CuBr laser // Proc. SPIE. 2019. V. 11322. P. 109.
2. Li L., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Antipov P.A., Shiyarov D.V., Gubarev F.A. In situ nanopowder combustion visualization using laser systems with brightness amplification // Proceedings of the Combustion Institute. 2021. V. 38, N 1. P. 1695–1702.
3. Li L., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Smirnov A., Gubarev F.A. Optical system with brightness amplification for monitoring the combustion of aluminum-based nanopowders // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2020. V. 69, N 2. P. 457–468.
4. Губарев Ф.А., Ким С., Лу Л., Мостовицков А.В., Ильин А.П. Оптическая система с усилением яркости для исследования поверхности нанопорошков металлов во время горения // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 3. С. 96–103.

5. Тригуб М.В., Васнев Н.А., Кутлер В.Д., Евтушенко Г.С. Применение бистатического лазерного монитора для высокоскоростной визуализации процессов горения // Оптика атмосфер. и океана. 2020. Т. 33, № 12. С. 962–968.
6. Li L., Pyin A.P., Gubarev F.A., Mostovshchikov A.V., Klenovskii M.S. Study of self-propagating high-temperature synthesis of aluminium nitride using a laser monitor // Ceramics International. 2018. V. 44, N 16. P. 19800–19808.
7. Osipov V.V., Platonov V.V., Trigub M.V., Tikhonov E.V., Vasnev N.A., Gembukh P.I., Zubarev N.M., Kochurin E.A. Experimental study of melt splashing during yttrium oxide evaporation using ytterbium fiber laser // Intern. J. Heat Mass Trans. 2024. V. 223. P. 125237.
8. Trigub M.V., Vasnev N.A., Gembukh P.I., Osipov V.V., Platonov V.V., Tikhonov E.V. Active optical system for high-speed imaging of oxides laser evaporation // Opt. Laser Technol. 2024. V. 174. P. 110635.
9. Кузнецов А.П., Бужинский Р.О., Губский К.Л., Савелов А.С., Саранцев С.А., Терехин А.Н. Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционной системой с усилителем яркости на основе лазера на парах меди // Физика плазмы. 2010. Т. 36, № 5. С. 463–472.
10. Прокошев В.Г. Микро- наноструктуры и гидродинамические неустойчивости, индуцированные лазерным излучением на поверхности твердых тел, и их диагностика методами лазерной и зондовой микроскопии: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 2009. 310 с.
11. Прокошев В.Г., Климовский И.И., Галкин А.Ф. Визуализация процесса лазерной обработки материалов при помощи усилителя яркости на основе лазера на парах меди // Изв. АН. Сер. Физ. 1997. Т. 61, № 8. С. 1560–164.
12. Абросимов Г.В., Польский М.М., Саенко В.Б. Использование лазерной среды для фотографирования поверхности, закрытой слоем плазмы // Квант. электрон. 1988. Т. 15, № 4. С. 850–854.
13. Морозова Е.А., Прохоров А.М., Савранский В.В., Шафеев Г.А. Скоростная покадровая регистрация изображений биологических объектов с использованием лазерного проекционного микроскопа // Докл. АН СССР. 1981. Т. 261, № 6. С. 1460–1462.
14. Земсков К.И., Казарян М.А., Савранский В.В., Шафеев Г.А. Лазерный проекционный микроскоп в проходящем свете // Квант. электрон. 1979. Т. 6, № 11. С. 2473–2475.
15. Земсков К.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. Лазерный проекционный микроскоп // Квант. электрон. 1974. Т. 1, № 1. С. 14–15.
16. Асиновский Э.И., Батенин В.М., Климовский И.И., Марковец В.В. Исследования областей замыкания тока на электродах слаботочной дуги атмосферного давления с помощью лазерного монитора // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 36, № 6. С. 569–575.
17. Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Галкин А.Ф., Климовский И.И., Кучерик А.О., Прокошев В.Г. О возможности исследования временной эволюции рельефа поверхностей, подвергающихся воздействию мощных потоков энергии, непосредственно во время воздействия // Квант. электрон. 2006. Т. 36, № 6. С. 569–575.
18. Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Галкин А.Ф., Квачева Л.Д., Климовский И.И., Кононов М.А., Михальцын Л.А., Кучерик А.О., Прокошев В.Г., Савранский В.В. Плавление углерода, нагреваемого сконцентрированным лазерным излучением в воздухе при атмосферном давлении и температуре, не превышающей 4000 К // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84, № 5. С. 315–320.
19. Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Галкин А.Ф., Климовский И.И., Кучерик А.О., Прокошев В.Г. Лазерная диагностика эволюции поверхности углерода под воздействием мощных лазерных импульсов // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 2. С. 137–143.
20. Земсков К.И. Усилители яркости изображения в проекционных оптических системах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1983. 184 с.
21. Васнев Н.А., Тригуб М.В., Евтушенко Г.С. Особенности работы усилителя яркости на парах бромида меди в схеме бистатического лазерного монитора // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 22, № 3. С. 247–253.
22. Исаков Б.К., Калугин М.М., Парфенов Е.Н. Исследование усиления в активных средах на переходах атомов меди и марганца применительно к созданию проекционных систем с усилителями яркости изображения // МТФ. 1983. Т. 33, № 4. С. 704–714.
23. Казарян М.А., Матвеев В.М., Петраш Г.Г. Проекционная система с усилителем яркости и автономным источником освещения // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1982. Т. 46, № 10. С. 1898–1904.
24. Губарев Ф.А., Мостовицков А.В., Ильин А.П., Ли Л., Буркин Е.Ю., Свиридов В.В. Лазерный монитор с независимой подсветкой для наблюдения процессов высокотемпературного горения нанопорошков металлов // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47, № 8. С. 20.
25. Mohammadpour Lima S., Behrouzina S., Khorasani K. Amplifying characteristics of small-bore copper bromide lasers // Appl. Phys. B. 2019. V. 125, N 6. P. 101.
26. Земсков К.И., Казарян М.А., Пехошкина Т.И., Трофимов А.Н. Проекционная система с усилителем яркости на парах хлорида меди // Квант. электрон. 1979. Т. 6, № 2. С. 391–394.
27. Петраш Г.Г., Земсков К.И., Казарян М.А. Оптические системы с усилителями яркости // Тр. Физического ин-та им. П.Н. Лебедева. М.: Наука, 1991. Т. 206. 152 с.
28. Беспалов В.И., Пасманник Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. Оптические системы с усилителями яркости. Горький: ИПФ АН СССР, 1988. 173 с.
29. Trigub M.V., Vasnev N.A., Evtushenko G.S. Operating features of a copper bromide brightness amplifier in the monostatic laser monitor // Opt. Commun. 2021. V. 480. P. 126486.
30. Trigub M.V., Kulagin A.E. Semi-empirical model of a copper bromide vapor brightness amplifier // Opt. Commun. 2024. V. 573. P. 130994.
31. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г. Стабилизированный лазер на бромиде меди с автоматизированным управлением режимами работы со средней мощностью генерации 20 Вт // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 6. С. 95.
32. Лябин Н.А. Создание современных промышленных лазеров и лазерных систем на парах меди для прецизионной микрообработки материалов: автореферат дис. ... д-ра техн. наук. М.: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана, 2014. 40 с.
33. Webb C.E., Jones J.D.C. Handbook of Laser Technology and Applications (3 vol.): Laser Components,

- Properties, and Basic Principles. Bristol and Philadelphia: IoP Publishing, 2004. 2752 p.
34. *Little C.E.* Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Application. Chichester (UK): John Wiley & Sons, 1998. 620 p.
 35. *Gubarev F.A., Burkin E.Yu., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Li L.* Two-channel system with brightness amplification for monitoring the combustion of aluminum-based nanopowders // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2021. V. 70. P. 1–9.
 36. *Труzub М.В., Васнев Н.А., Евтушенко Г.С., Димаски В.А.* Система синхронизации импульсно-периодического режима работы активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 1. С. 30–35.
 37. *Lima S.M., Behrouzinia S., Salem M.K., Elahei M., Khorasani K., Dorrani D.* Synchronization effect on the small-signal gain and saturation intensity of a CuBr laser // Opt. Quantum Electron. 2017. V. 49, N 11. P. 372.

N.A. Vasnev, M.V. Trigub. Estimation of ASE contribution at the output signal of laser active optical systems.

The paper is devoted to research of the output signal composition of metal-vapor laser active optical systems under various operating conditions. The effect of the temporal characteristics of laser active optical systems on the output signal composition is experimentally estimated. The method for determining the contribution of amplified spontaneous emission (ASE) to the output signal of self-adjoint scheme and scheme with independent illumination source is suggested. The optimal time when input signal enters to active medium of amplifier for providing maximal signal/noise ratio is determined. ASE is completely suppressed at a time delay of (–4.3; +25.8) ns in the scheme with independent illumination source. It is impossible to achieve complete suppression for the self-adjoint scheme. The minimal ASE value in the self-adjoint scheme was 80 mW, i.e., approximately 2% of the output signal power. The results can be useful in researching the amplification characteristics of active optical systems based on metal vapors, as well as in visual-optical diagnostics in laser monitor circuits on their basis.