

ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ YAG:ND³⁺-ЛАЗЕР С НАРУШЕНИЕМ КОГЕРЕНТНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЕТОВОДЕ

© 2012 г. С. А. Батище, А. А. Кузьмук, Г. А. Татур

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси
Республика Беларусь, 220072, Минск, просп. Независимости, 68
Поступила в редакцию 28.02.2011 г.

Описаны оптическая схема и устройство высокоэнергетического YAG:Nd³⁺-лазера, генерирующего импульсы излучения наносекундной длительности на длинах волн 1064 нм (0.8 Дж), 532 нм (160 мДж) и 266 нм (40 мДж) с нарушенной в световоде когерентностью и сглаженным распределением интенсивности в поперечном сечении пучка. Рассмотрены процессы, влияющие на эффективность генерации некогерентного излучения.

Для устранения неоднородности распределения интенсивности (р.и.) в поперечном сечении лазерного пучка, связанной со спекл-структурами, появляющимися вследствие высокой пространственной когерентности излучения, служат такие устройства и методы, как вращающиеся рассеиватели [1], динамические диффузионные экраны на основе жидкокристаллических модуляторов [2], акусто-оптические методы [3], нарушение когерентности излучения при прохождении через оптический световод [4].

В данной статье приведены результаты исследований, направленных на создание мощного высокоэнергетического лазера на YAG:Nd³⁺ наносекундного диапазона длительности с улучшенным р.и. в поперечном сечении лазерного пучка, достигнутым путем нарушения когерентности излучения в многомодовом оптическом световоде. Такие лазеры требуются, в частности, в системах субмикронной литографии, высококачественной лазерной очистки художественных произведений и др.

На рис. 1 приведена оптическая схема лазерной системы, при реализации которой были получены наилучшие результаты. Схема содержит задающий генератор *ЗГ*, двухпроходовой усилитель *ДПУ* с обращением волнового фронта на основе вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (в.р.М.Б), световод *С* с линзами ввода-вывода лазерного излучения, однопроходовой усилитель *ОПУ*, генераторы второй G_{II} и четвертой G_{IV} гармоник, оптическую поляризационную развязку *ОПР*. Все рабочие поверхности оптических деталей просветлены.

Лазер охлаждается дистиллированной водой. Для питания импульсных ламп задающего лазера и усилителей используются соответственно блоки питания БПЛ-66/33 с регулируемой энергией накачки и БПЛ-75/33У с фиксированной энергией 75 Дж. Длительность свечения ламп ~120–150 мкс. Частота следования импульсов регулируется в диапазоне 1–10 Гц.

Излучение задающего лазера (энергия импульса излучения ~5–7 мДж) со структурой поля TEM_{00} и длиной волны 1064 нм после усиления в *ДПУ* с обращением волнового фронта через поляризатор *9* направляется в волоконный многомодовый световод *14* (в экспериментах использовались как кварц-кварцевые, так и кварц-полимерные световоды с диаметром светонесущей жилы 200, 600 и 800 мкм и длиной 5–250 м). Фокусное расстояние линз плазменного телескопа-развязки *8* подобрано таким образом, чтобы излучение задающего лазера проходило в усилитель беспрепятственно, а излучение обратной волны вызывало оптический пробой в фокусе линзы для защиты оптических элементов от повреждения. Лазерное излучение с нарушенной в световоде когерентностью усиливается в *ОПУ*.

Эксперименты показали, что наилучшие результаты по нарушению когерентности достигаются тогда, когда задающий лазер генерирует максимально большое количество продольных мод и, следовательно, импульс излучения обладает развитой временной структурой. В качестве примера на рис. 2 приведены такие импульсы излучения и их фурье-образы на выходе задающего лазера (рис. 2а, 2в соответственно) и на выходе двухпроходового усилителя с в.р.М.Б.-зеркалом на ацетоне (рис. 2б, 2г соответственно).

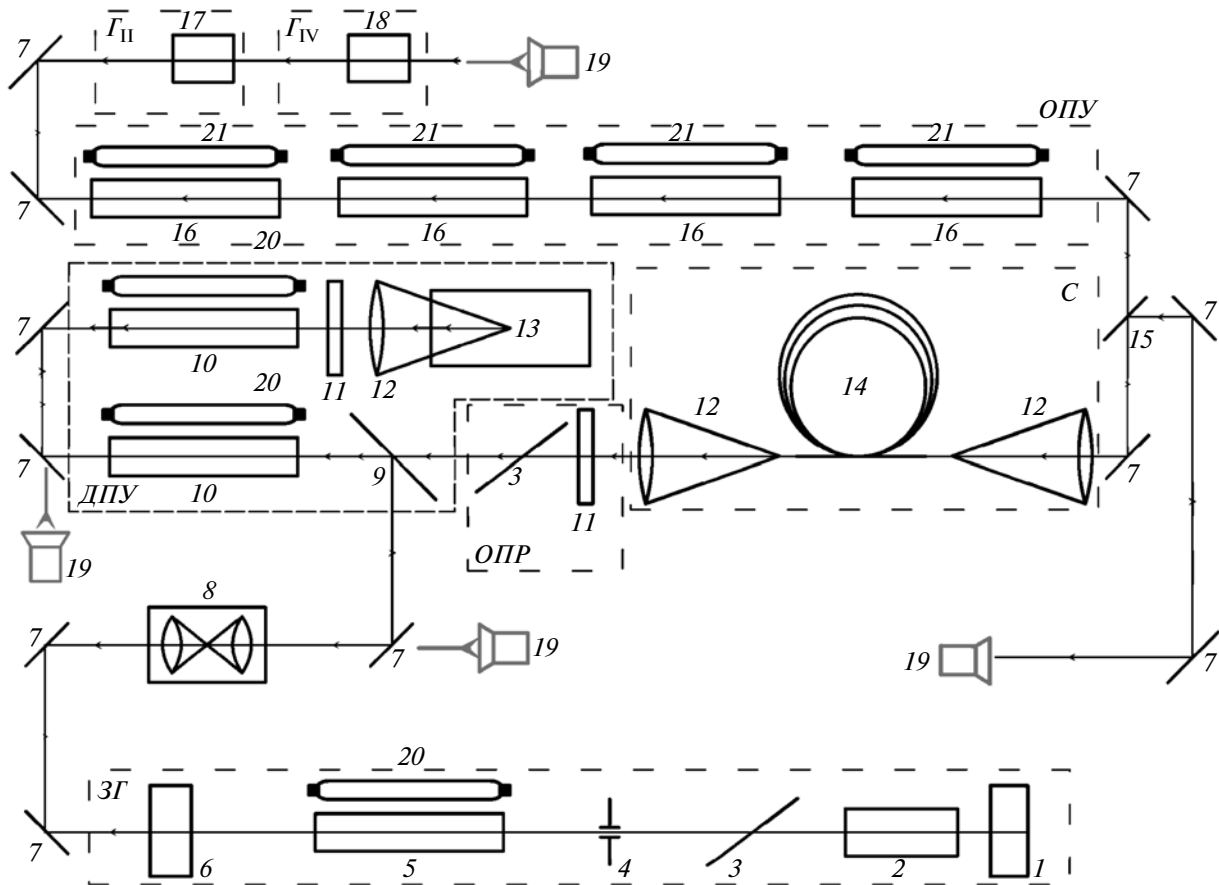


Рис. 1. Оптическая схема лазера. 3Г – задающий генератор; ДПУ – двухпроходовой усилитель с обращением волнового фронта; ОПУ – однопроходовой усилитель; С – световод; ГII, ГIV – генераторы второй и четвертой гармоник соответственно; ОПП – оптическая поляризационная развязка; 1 – “глухое” зеркало резонатора; 2 – электрооптический модулятор добротности на кристалле DKDP (в экспериментах использовался также пассивный затвор из LiF:F₂⁻ с начальным пропусканием ~30%); 3 – тонкопленочный поляризатор; 4 – регулируемая диафрагма; 5, 10 – активные элементы YAG:Nd³⁺ размером Ø4 × 80 мм и Ø6.3 × 80 мм соответственно; 6 – 5-градусный стеклянный клин; 7 – поворотные зеркала (λ = 1.06 мкм); 8 – однократный плазменный телескоп-развязка; 9 – поляризатор; 11 – кварцевая пластинка λ/4; 12 – линза (f = +15 см); 13 – кювета длиной 20 см с в.р.М.Б.-жидкостью; 14 – отрезок оптического световода; 15 – стеклянная пластинка; 16 – активные элементы YAG:Nd³⁺ размером Ø10 × 100 мм со скошенными торцами; 17 – кристалл КТР (5.5 × 12 × 12 мм); 18 – кристалл DKDP (25 × 12 × 12 мм); 19 – фотоприемник; 20, 21 – импульсные лампы производства Heraeus Noblelight Ltd. с разрядным промежутком Ø5 × 60 мм и Ø8 × 80 мм соответственно.

В данном случае одновременно генерируются 9 продольных мод излучения (межмодовое расстояние ~166 МГц) в диапазоне до 1.5 ГГц. Все линии сохраняются и уширяются после обращения в ацетоне. Сокращение длительности импульса и расширение спектрального состава в результате обращения волнового фронта также улучшает условия для получения в световоде излучения с нарушенной когерентностью.

При прохождении многочастотного лазерного излучения через световод достаточной длины по достижении определенной энергии наблюдается

сглаживание неоднородности р.и., обусловленной спекл-структурой, в излучении на выходе световода. При этом происходит изменение спектрально-временной структуры излучения на выходе световода. Это иллюстрирует рис. 3, где представлены временная форма импульсов лазерного излучения с энергией ~2 мДж и их фурье-образы на входе (рис. 3а, 3в соответственно) и на выходе (рис. 3б, 3г соответственно) кварц-полимерного световода диаметром 400 мкм и длиной 60 м. Видно, что линии на частотах в диапазоне от 0.6 до 1.3 ГГц в фурье-образе импульсов на выходе световода практически исчезают.

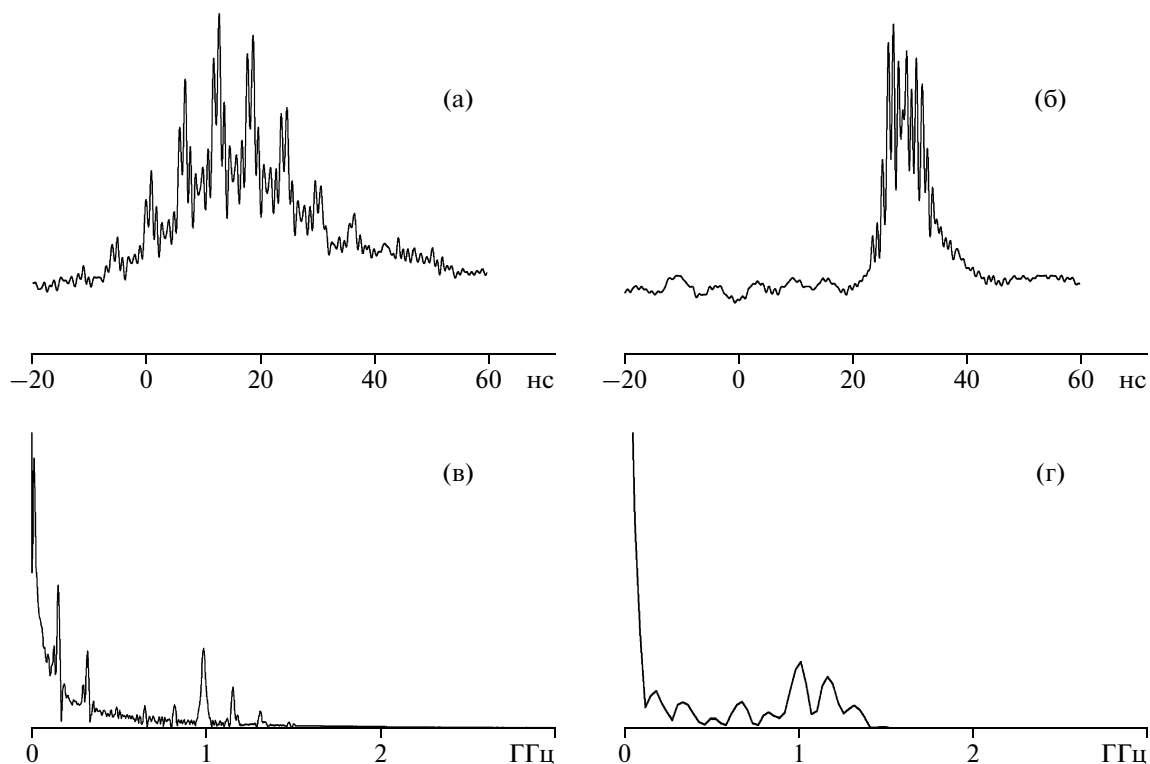


Рис. 2. Импульс излучения (а) и его фурье-образ (в) на выходе задающего лазера с эффективной длиной резонатора 90 см, с электрооптическим затвором на кристалле DKDP и 5-градусным стеклянным клином в качестве выходного зеркала и соответствующий импульс (б) и его фурье-образ (г) на выходе двухпроходового усилителя с в.р.М.Б.-зеркалом на ацетоне.

Это, предположительно, может быть связано с взаимодействием лазерного многочастотного излучения с гиперзвуковыми волнами, генерируемыми на разностных частотах спектральных линий в материале световода, интенсивность которых определяется частотой и амплитудой биений. В результате нестационарной модуляции показателя преломления, обусловленной указанными гиперзвуковыми волнами, за время лазерного импульса происходит изменение частоты излучения ряда спектральных линий, в результате чего они пропадают в фурье-образе. В р.и. это взаимодействие проявляется в сглаживании спекл-структуры в излучении на выходе световода.

Прохождение мощного импульсного излучения через световод инициирует ряд нелинейных процессов, которые эффективно противодействуют нарушению когерентности излучения. Одним из таких процессов является генерация в обратном направлении мощной первой стоксовой компоненты в.р.М.Б. Это излучение, как показали исследования, при его возбуждении регистрируется со стороны входного торца световода и распространяется в обратном направлении.

Эксперименты для световода диаметром 400 мкм показали, что для короткого лазерного импульса, представленного на рис. 2б, максимальная энергия излучения, проходящего через световод, составляла 8–9 мДж, в то время как для длинного импульса (рис. 2а) не превышала 2–4 мДж. При этом для длинного импульса излучения энергия на выходе световода ограничена появлением идущей в обратном направлении обращенной волны, а для короткого импульса – оптическим пробоем материала световода. Для защиты лазерной системы от воздействия обратной волны используется поляризационная развязка *ОПР*, которая также снижает порог самовозбуждения всей лазерной системы.

Дополнительное увеличение энергии и длины световода приводит к генерации вынужденного комбинационного рассеяния (в.к.р.), которое также эффективно противодействует нарушению когерентности в связи с ослаблением интенсивности проходящего излучения. Это иллюстрирует рис. 3д, на котором представлена временная форма импульса лазерного излучения на выходе кварц-полимерного световода диаметром 400 мкм и длиной 200 м при входной энергии ~4 мДж. Наблюдается

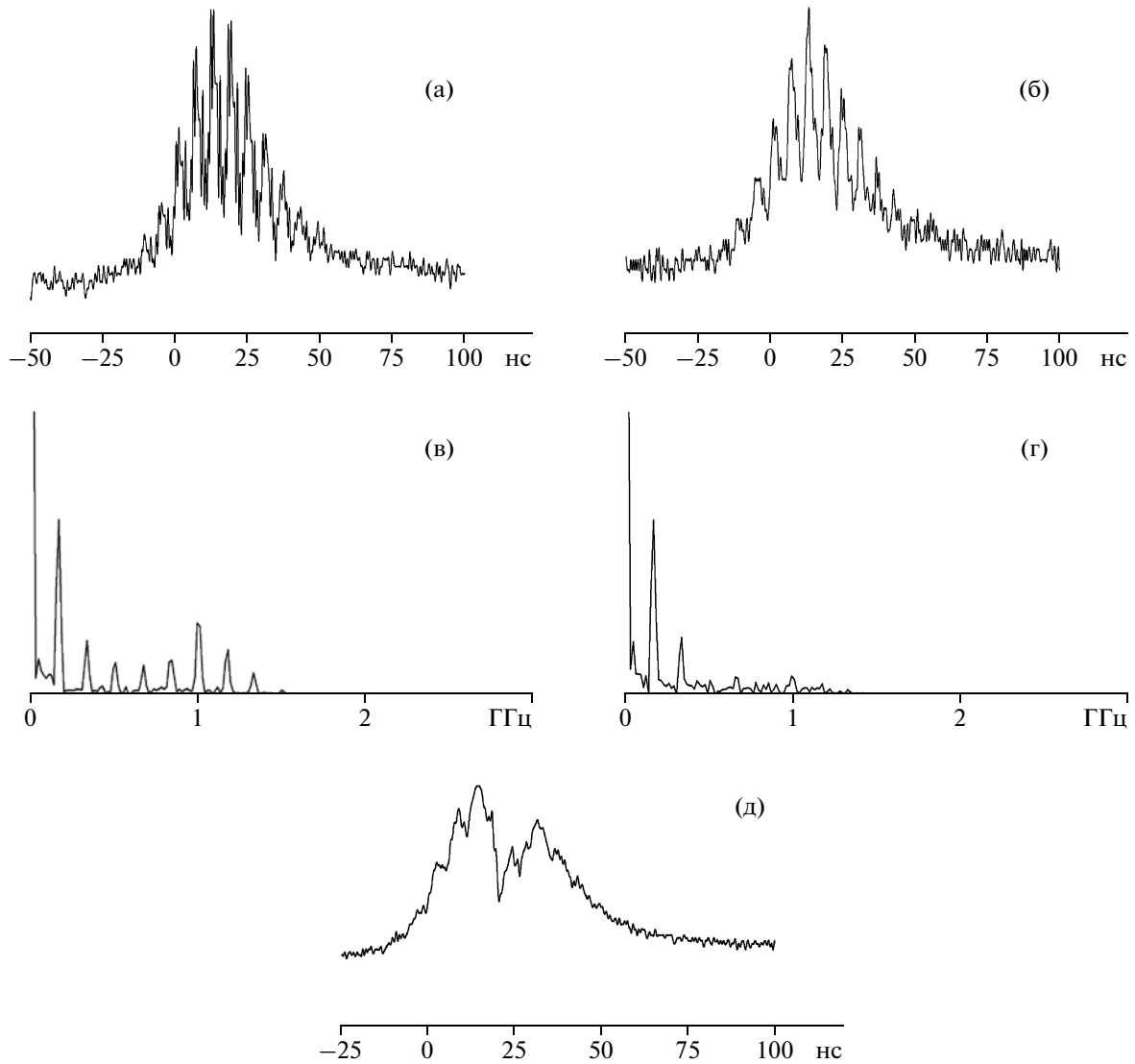


Рис. 3. Импульсы на длине волны 1064 нм (а, б) и их фурье-образы (в, г) на входе (а, в) и выходе (б, г) кварц-полимерного световода диаметром 400 мкм и длиной 60 м для значений энергии импульса лазерного излучения ниже порога в.к.р. (~2 мДж на входе световода); д – импульс лазерного излучения на выходе кварц-полимерного световода диаметром 400 мкм и длиной 200 м при входной энергии ~4 мДж.

глубокий провал в интенсивности излучения на выходе световода, который, как показали исследования спектра выходного излучения, соответствует импульсу первой стоксовой компоненты в.к.р.-генерации, распространяющемуся в попутном направлении.

Увеличение энергии импульса излучения, представленного на рис. 2а, на выходе световода свыше 1.4 мДж обеспечивало практически полное сглаживание спекл-структуры. При этом потери излучения в световоде составляли 20–35%. Использование усилителя *ОПУ* позволило увеличить энергию излучения до 0.1–0.2 Дж. Возможность дальнейшего увеличения выходной энер-

гии излучения ограничена двумя процессами. Во-первых, при увеличении энергии излучения, падающего на световод, свыше 4 мДж в результате в.р.М.В. в световоде начинает генерироваться мощная обратная волна. Во-вторых, при увеличении усиления в усилителе *ОПУ* (за счет последовательного включения в работу 1–4 каскадов усилителя) происходит самовозбуждение всей лазерной системы.

Использование двухпроходowego усилителя *ДПУ* с обращением волнового фронта в оптической схеме лазерной системы позволяет повысить пороги генерации обратной волны в световоде и самовозбуждения всей системы. Для такого слу-

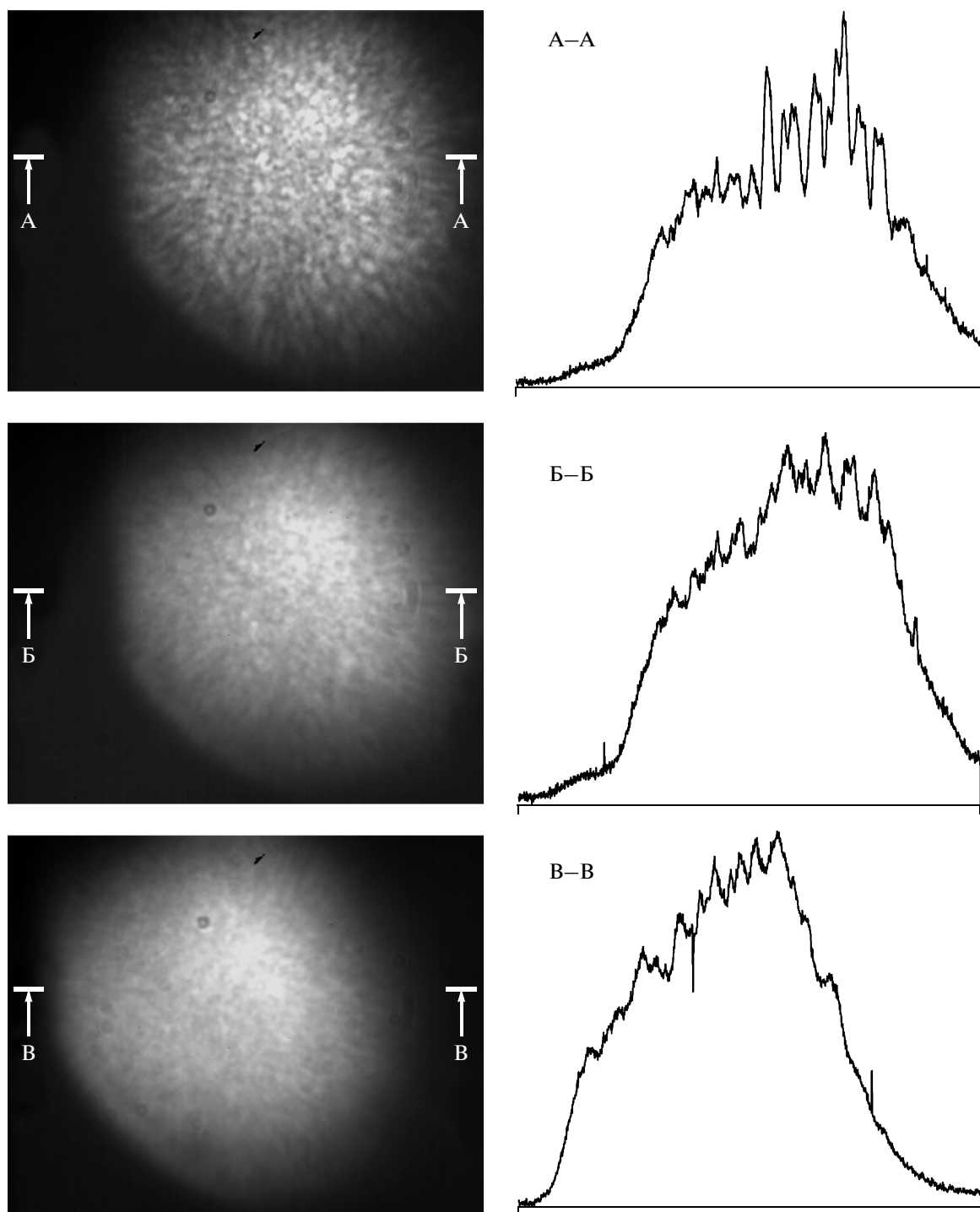


Рис. 4. Поперечное распределение интенсивности лазерного излучения на длине волны 1064 нм на выходе кварц-кварцевого световода диаметром 400 мкм и длиной 60 м при энергии импульса лазерного излучения на его входе 4.6 (А-А), 12 (Б-Б) и 17 мДж (В-В).

чая на рис. 4 показаны изменения в поперечном распределении интенсивности лазерного пучка на длине волны 1060 нм на выходе кварц-кварцевого световода с диаметром центральной жилы 400 мкм длиной 60 м и значениях энергии излучения на входе световода 4,6, 12 и 17 мДж. Видно, что увеличение входной энергии приводит к существенному сглаживанию спекл-структуры. Использование усилителя *ОПУ* позволяет получать энергию декогерентного излучения 0,8 Дж на длине волны 1064 нм, 160 мДж на 532 нм, –40 мДж на 266 нм при длительности ~10 нс и гладком р.и.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Martienssen W., Spiller E.* // Am. J. Phys. 1964. V. 32. P. 919.
2. *Ostrovsky A.S., Hernandez-Garcia E.* // Revista Mexicana de Fisica. 2005. V. 51. № 5. P. 442.
3. *Stiens J., Vounckx R., Kotov V., Shkerdin G.* // Proc. of the 5th World Congress on Ultrasonics. Paris, 7–10 September 2003. P. 17.
4. *Кицак А.И., Кицак М.А.* // Квантовая электрон. 2006. Т. 36. № 1. С. 27.