

УДК 535:621.372

## ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ В.К.Р.-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА ДЛИТЕЛЬНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ КВАРЦЕВЫХ СВЕТОВОДОВ

© 2013 г. С. А. Батище, А. А. Кузьмук, Г. А. Татур

*Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси*  
Республика Беларусь, 220072, Минск, просп. Независимости, 68

Поступила в редакцию 13.04.2012 г.  
После доработки 12.07.2012 г.

Описаны оптическая схема, устройство и параметры высокоэффективного световодного преобразователя на вынужденном комбинационном рассеянии (в.к.р.) для импульсных YAG:Nd-лазеров наносекундного диапазона длительностей. Получено преобразование до 90% энергии излучения накачки в стоксовы компоненты. Рассмотрены процессы, ограничивающие эффективность в.к.р.-преобразования в световоде.

DOI: 10.7868/S003281621302002X

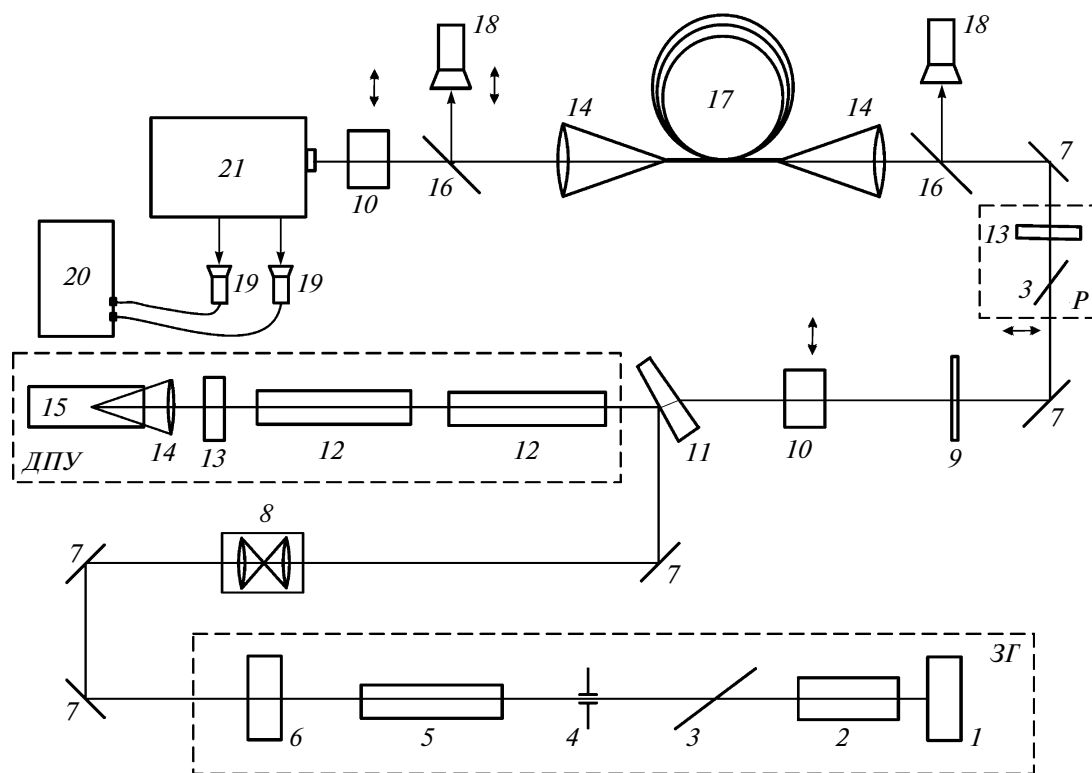
Преобразователи на вынужденном комбинационном рассеянии (в.к.р.) широко применяются для расширения спектрального диапазона работы лазеров различного типа в стоксовы и антистоксовы компоненты излучения. В качестве активной среды для в.к.р.-преобразования используются газы (молекулярный водород, аммиак и др.), жидкости (ацетон, бензол, вода и др.), а также твердые материалы (кристаллы, стекла). Для повышения эффективности в.к.р.-преобразования при использовании обычных схем фокусировки излучения накачки подбираются активные среды с высоким коэффициентом в.к.р.-усиления  $G_s$ : 1–3 см/ГВт — для газов и жидкостей и 3–50 см/ГВт — для кристаллов [1].

В [2, 3] показано, что в одномодовых кварцевых световодах происходит эффективное широкополосное в.к.р.-преобразование излучения лазера накачки. Применение волоконных световодов позволяет оптимизировать условия в.к.р.-преобразования в средах с малым значением  $G_s$  (например, в плавленом кварце, для которого, по оценкам,  $G_s \sim 0.01$  см/ГВт [4]) за счет значительного увеличения длины активной среды (десятки и сотни метров). В [5] показана возможность однопроходового преобразования в многомодовом кварцевом у.ф.-волокне диаметром 100 мкм излучения 3-й гармоники YAG:Nd-лазера (355 нм) (при плотности мощности накачки на входе световода 1.9 ГВт/см<sup>2</sup>) в 21 стоксову компоненту в диапазоне 360–527 нм и концентрации преобразования в меньшее количество стоксовых компонент в диапазоне 360–493 нм при спектрально-селективном двухпроходовом преобразовании.

В данной работе приводятся результаты исследований по созданию эффективных световодных в.к.р.-преобразователей для мощных импульсных YAG:Nd-лазеров наносекундного диапазона длительностей. Рассматриваются процессы, ограничивающие эффективность в.к.р.-преобразования в световоде.

Оптическая схема лазерной системы и средств регистрации параметров излучения представлена на рис. 1. Излучение основной частоты (1064 нм, длительность 10–30 нс) либо второй гармоники (532 нм, длительность 7–10 нс) лазерной системы на YAG:Nd<sup>3+</sup> с обращением волнового фронта на вынужденном рассеянии Мандельштама–Бриллюэна (в.р.М.Б.) в двухпроходовом усилителе ДПУ посредством линзы 14 с фокусным расстоянием 15 см фокусировалось непосредственно перед входным торцом световода 17 так, чтобы обеспечить практически полное введение излучения в световод. Фокусировка перед торцом световода позволяла предотвращать возникающее уже при малых энергиях накачки разрушение входного торца при фокусировке излучения непосредственно на входную поверхность или внутрь световода. Для в.к.р.-преобразования использовались кварц-кварцевые и кварц-полимерные световоды диаметром 200–800 мкм и длиной 8–200 м.

Излучение с выхода световода направлялось через линзу 14 на входную щель дифракционного спектрографа ДФС-452 (21), перед которым мог устанавливаться нелинейный кристалл КТР (10) для визуализации спектра выходного излучения посредством генерации его второй гармоники. Для регистрации временных характеристик в фокальной плоскости спектрографа 21 размещали



**Рис. 1.** Оптическая схема лазерной системы. *ЗГ* – задающий генератор, *ДПУ* – двухпроходовой усилитель с обращением волнового фронта, *P* – поляризационная развязка; 1 – “глухое” зеркало резонатора, 2 – пассивный затвор  $\text{LiF:F}_2$  или электрооптический  $\lambda/4$ -затвор, 3 – тонкопленочный поляризатор, 4 – диафрагма 1.2 мм, 5 – активный элемент  $\text{YAG: Nd}^{3+}$  размером  $\varnothing 4 \times 80$  мм, 6 – стеклянная пластинка, 7 – поворотные зеркала ( $\lambda = 1.06$  мкм), 8 – телескоп-развязка с увеличением  $1\times$ , 9 – светофильтр, 10 – генератор второй гармоники, 11 – клиновидная подложка, 12 – активные элементы размером  $\varnothing 6.3 \times 80$  мм, 13 – кварцевая пластинка  $\lambda/4$ , 14 – линза ( $f = +15$  см), 15 – кювета длиной 20 см с в.р.М.Б.-жидкостью, 16 – стеклянная пластинка, 17 – отрезок кварц-кварцевого (численная апертура  $N = 0.22$ ) или кварц-полимерного ( $N = 0.36$ ) световода, 18 – измеритель энергии, 19 – фотоприемник, 20 – осциллограф, 21 – спектрограф.

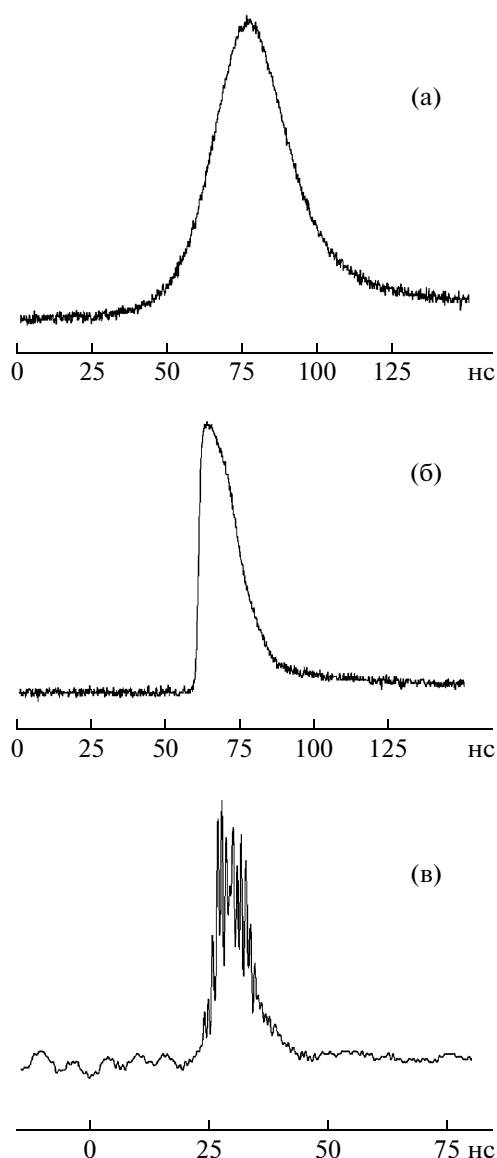
два фотоприемника 19, сигналы с которых подавались на скоростной осциллограф Tektronix TDS 5104B (20). Один из фотоприемников регистрировал излучение накачки, а второй – генерируемое в световоде в.к.р.-излучение. Спектры излучения на выходе спектрографа регистрировались цифровой фотокамерой. Энергия лазерного излучения измерялась двухканальным измерителем лазерной энергии и мощности Ophir Laserstar (18) с набором измерительных головок.

Использованием в задающем лазере пассивного ( $\text{LiF:F}_2^-$ ) или электрооптического  $\lambda/4$ -затвора, выходных зеркал различного вида (подложка с клином  $5^\circ$ , плоскопараллельная подложка из стекла К-8, стопа из двух плоскопараллельных подложек из стекла К-8 с воздушным зазором), а также изменением длины резонатора можно регулировать спектральный состав генерируемого излучения (количество продольных мод задающего лазера могло изменяться от 1 до 10) и длительность импульса излучения в диапазоне 7–30 нс. Нали-

чие обращающего в.р.М.Б.-зеркала в двухпроходовом усилителе позволило повысить порог самовозбуждения всей лазерной системы со световодом на длине волны 1064 нм. При необходимости лазер накачки можно было преобразовать в систему с однопроходовым усилителем.

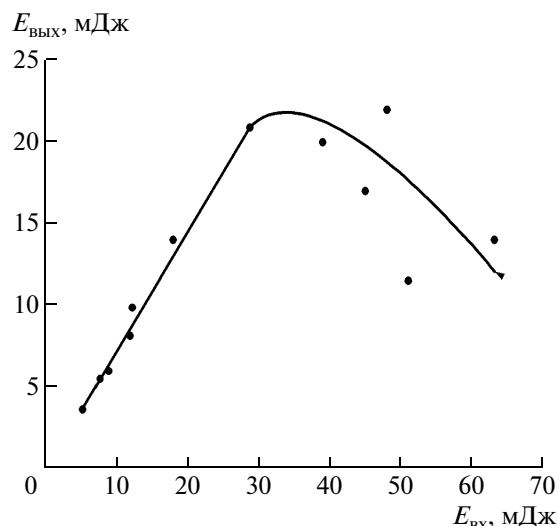
На рис. 2 показаны: импульс на выходе задающего генератора *ЗГ*, работающего в режиме одной продольной моды со структурой поля  $TEM_{00}$  (рис. 2а), соответствующий ему импульс на выходе двухпроходового усилителя *ДПУ* с в.р.М.Б.-зеркалом на ацетоне (рис. 2б), а также импульс на выходе двухпроходового усилителя *ДПУ* с в.р.М.Б.-зеркалом на ацетоне для случая одновременной генерации в задающем генераторе большого количества продольных мод (рис. 2в).

Энергия импульса излучения на выходе лазера накачки достигала 150 мДж на длине волны 1064 нм и 50 мДж на длине волны 532 нм. Между лазером накачки и световодом можно было при необходимости устанавливать поляризационную развязку *P*.



**Рис. 2.** а – импульс излучения на выходе задающего генератора, работающего в режиме одной продольной моды со структурой поля  $TEM_{00}$ ; б – соответствующий ему импульс на выходе ДПУ с в.р.М.Б.-зеркалом на ацетоне; в – импульс на выходе ДПУ с в.р.М.Б.-зеркалом на ацетоне для случая одновременной генерации в задающем генераторе большого количества продольных мод.

С использованием лазера с однопроходовым усилителем с импульсом излучения, показанном на рис. 2а ( $\Delta t = 30$  нс), были проведены предварительные эксперименты по выявлению основных процессов, препятствующих эффективной в.к.р.-генерации в световодах. На рис. 3 приведена зависимость энергии импульса излучения  $E_{\text{вых}}$  на выходе кварц-кварцевого световода диаметром 800 мкм и длиной 12 м от энергии  $E_{\text{вх}}$  импульса излу-



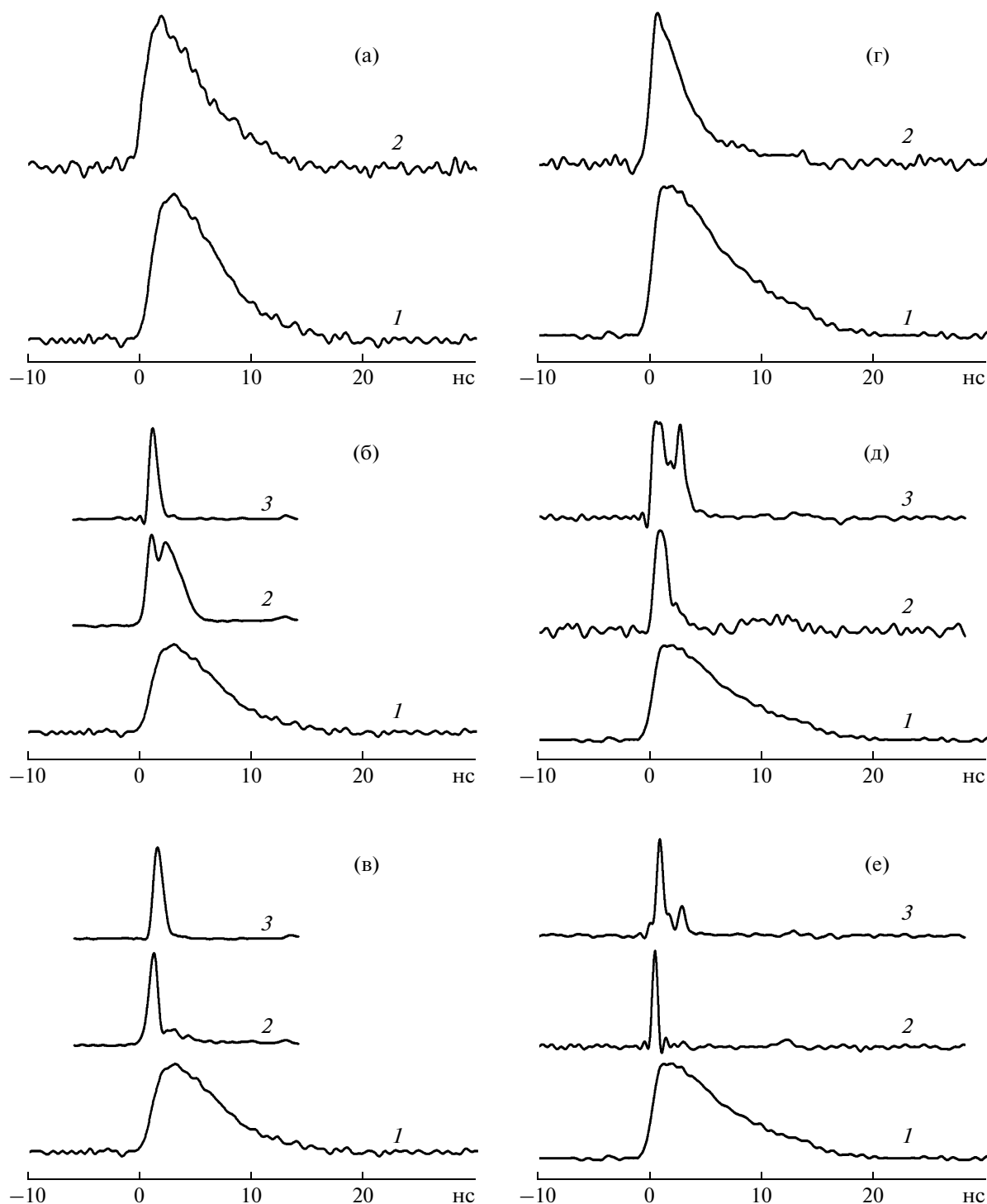
**Рис. 3.** Зависимость энергии импульса излучения  $E_{\text{вых}}$  на длине волны 1064 нм на выходе кварц-кварцевого световода от энергии импульса  $E_{\text{вх}}$  излучения, входящего в отрезок световода длиной 12 м с диаметром центральной жилы 800 мкм.

чения с длиной волны 1064 мкм, падающего на световод.

Согласно рис. 3, выходная энергия сначала возрастает практически линейно, а затем с ростом входной энергии снижается. При этом при всех уровнях накачки не наблюдалось в.к.р.-генерации. В обратном направлении из световода регистрировалось мощное в.р.М.Б.-излучение, интенсивность которого росла по мере увеличения интенсивности накачки. Таким образом, в.р.М.Б.-излучение является важнейшим конкурирующим процессом, ограничивающим эффективность в.к.р.-преобразования. Эксперименты показали, что для длинного импульса одночастотного излучения накачки энергия на выходе световода ограничена появлением идущего в обратном направлении в.р.М.Б.-излучения, тогда как для короткого импульса с достаточно широким спектральным составом – оптическим пробоем входного торца световода. Исследования показали, что приведенная на рис. 1 конфигурация лазера накачки обеспечивает наилучшие характеристики в.к.р.-преобразования.

На рис. 4 представлены импульсы излучения накачки (532 нм) на входе и выходе световода, а также импульс первой стоксовой компоненты на выходе световода в зависимости от энергии накачки на входе кварц-кварцевого световода диаметром 800 мкм, длиной 12 м (рис. 4а–4в) и кварц-полимерного световода диаметром 400 мкм, длиной 60 м (рис. 4г–4е). Энергию входного излучения на длине волны 532 нм ( $\Delta t = 7$  нс) в экспериментах можно было изменять в диапазоне 0–50 мДж.

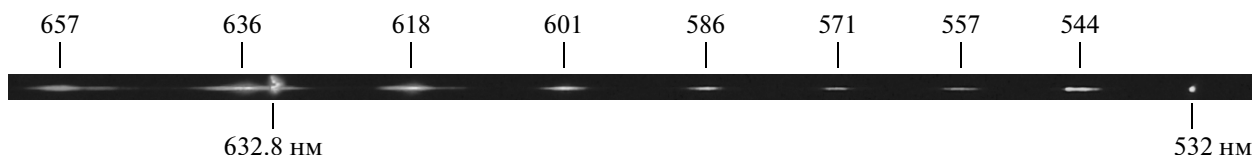
Эксперименты показали, что для кварц-кварцевого световода диаметром 800 мкм и длиной 12 м,



**Рис. 4.** Импульсы накачки с  $\lambda_p = 532$  нм на входе (1) и выходе (2) световода и первой стоксовой компоненты в.к.р.-генерации  $\lambda_{1ст}$  (3) для кварц-кварцевого световода диаметром 800 мкм, длиной 12 м (а–в) и кварц-полимерного световода диаметром 400 мкм, длиной 60 м (г–е). Осциллограммы а, г соответствуют входной энергии излучения накачки ниже порога возникновения в.к.р.; б, д – генерации одной-двух стоксовых компонент в.к.р.; в, е – генерации трех и более стоксовых компонент.

когда входная энергия излучения накачки ниже порога возникновения в.к.р., импульс накачки на выходе световода практически повторяет входной

импульс (см. рис. 4а). Рост энергии накачки сопровождается вначале сокращением среза импульса на выходе световода с последующим появ-



**Рис. 5.** Наблюдаемые в спектрографе стоксовые компоненты в.к.р.-генерации на выходе кварц-полимерного световода диаметром 600 мкм, длиной 35 м при накачке излучением с  $\lambda_p = 532$  нм.

лением провала (рис. 4б), соответствующего генерации 1-й стоксовой компоненты в.к.р. ( $\lambda_{1ст} \sim 543.5$  нм). При дальнейшем росте входной энергии импульс накачки на выходе световода трансформируется таким образом, что остается только фронт импульса длительностью  $\sim 2$  нс (рис. 4в).

Контроль спектрального состава излучения на выходе световода показывает, что при данной длине световода в диапазоне изменения входной энергии излучения накачки 0–50 мДж на выходе световода присутствует только 1-я стоксова компонента с длительностью  $\sim 2.5$  нс. Оценкой сравнением площадей импульсов накачки на выходе световода (рис. 4а и рис. 4в) получено, что  $\sim 70\%$  энергии излучения накачки преобразуется в 1-ю стоксову компоненту. При достигнутой в эксперименте энергии излучения на выходе световода 20 мДж этому соответствует  $\sim 14$  мДж в 1-й стоксовой компоненте (543.5 нм) на выходе световода.

Для кварц-полимерного световода диаметром 400 мкм и длиной 60 м подобная динамика наблюдалась при увеличении энергии накачки в пределах 0–20 мДж (максимальная энергия на  $\lambda_p = 532$  нм ограничивалась в данном случае оптическим пробоем входного торца световода). При входной энергии излучения накачки ниже порога возникновения в.к.р. импульс накачки на выходе световода практически повторяет входной импульс (рис. 4г).

Появление в спектре излучения 1-й стоксовой компоненты сопровождается вначале сокращением среза импульса накачки на выходе световода и последующим провалом интенсивности накачки, как и в случае световода длиной 12 м (см. рис. 4б). После появления 2-й стоксовой компоненты в импульсе 1-й стоксовой компоненты при определенном уровне интенсивности наблюдается провал (рис. 4д). Затем появляются последовательно третья, четвертая и более высоких порядков стоксовы компоненты, а длительность импульса накачки на выходе световода при этом сокращается до  $\sim 1$  нс (рис. 4е).

На рис. 5 показаны восемь стоксовых компонент в.к.р.-генерации на выходе кварц-полимерного световода диаметром 600 мкм и длиной 35 м, генерируемых при накачке излучением с  $\lambda_p = 532$  нм. 1-я стоксова компонента в.к.р.-излучения наблюдалась при  $E_{вх} = 6$  мДж, а все остальные – при

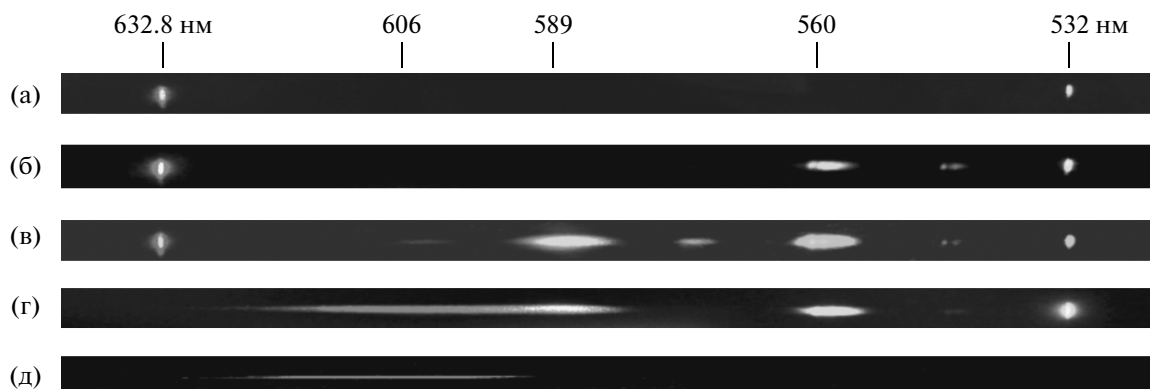
$E_{вх} > 15$  мДж. Оценка сравнением площадей импульсов накачки на выходе световода (см. рис. 4г и 4е) показывает, что  $\sim 90\%$  энергии излучения накачки преобразуется в 8 стоксовых компонент. В данном случае максимальная энергия выходного излучения достигала 12 мДж, чему соответствует  $\sim 10$  мДж в восьми стоксовых компонентах в.к.р.-излучения (543.9, 557.2, 570.7, 585.6, 600.7, 635.5, 655.5 нм).

Необходимо отметить, что энергия излучения на выходе для всех исследованных световодов не превышала 20 мДж, хотя входная энергия излучения на длине волны 532 нм могла достигать 50 мДж (при этом обеспечивалось практически полное введение излучения в световод). Вероятно, это связано, как было сказано выше, с препятствующей росту энергии излучения генерацией в обратном направлении мощного в.р.М.Б.-излучения. Кроме того, возбуждение в.к.р.-генерации в световоде исключает возможность самовозбуждения лазерной системы, так как система накачки и световод разделены плотным светофильтром, пропускающим излучение на длине волны 532 нм и поглощающим излучение с длиной волны 1064 нм.

Были проведены эксперименты по в.к.р.-генерации в световоде при накачке излучением основной частоты YAG:Nd-лазера с  $\lambda_p = 1064$  нм. Энергия излучения накачки на входе световода могла изменяться в диапазоне 0–150 мДж. Условия фокусировки были такими же, как и для  $\lambda_p = 532$  нм.

На рис. 6 показана эволюция спектра в.к.р.-генерации в кварц-кварцевом световоде диаметром 600 мкм, длиной 35 м при накачке импульсами излучения на длине волны 1064 нм при различных энергиях на выходе световода. При снятии спектрограмм, представленных на рис. 6а–6г, для визуализации стоксовых компонент перед входной щелью спектрографа был установлен кристалл DKDP, генерирующий излучение 2-й гармоники. Спектрограмма на рис. 6д снималась, когда кристалл DKDP отсутствовал. Также на спектрограммах видна линия генерации He–Ne-лазера, используемая в качестве репера.

Увеличение энергии накачки последовательно приводит к генерации 1-й (1116 нм) и 2-й (1177.3 нм) стоксовых компонент в.к.р.-излучения. Оценки показывают, что при  $\lambda_p = 1064$  нм энергия в 1-й



**Рис. 6.** Эволюция спектрального состава в.к.р. в кварц-кварцевом световоде с диаметром сердцевины 600 мкм и длиной 35 м при накачке излучением с  $\lambda_p = 1064$  нм при энергии импульса излучения на выходе световода: 6–8 мДж (а), 10–12 мДж (б), 15–18 мДж (в), ~20 мДж (г), ~20 мДж (д).

стоксовой компоненте ( $\lambda_{1ст} \sim 1116$  нм) на выходе световода достигала  $\sim 7$ –8 мДж. Дальнейшее увеличение энергии накачки, как показали эксперименты, не приводит ни к увеличению выходной энергии излучения, ни к генерации 3-й и более высокого порядка стоксовых в.к.р.-компонент. Связано это с тем, что при длине световода 35 м и максимальном уровне энергии накачки для генерации 3-й стоксовой компоненты в.к.р.-усиления недостаточно.

При увеличении энергии накачки, как говорилось выше, выходная энергия ограничена возникновением в.р.М.Б.-генерации в световоде в обратном направлении. Эксперименты показали, что увеличение энергии накачки приводит также к самовозбуждению, даже при использовании поляризационной развязки  $P$ , лазерной системы со световодом как с однопроходовым, так и с двухпроходовым (при более высоком пороге возбуждения) усилителем. Необходимо отметить появление широкой антистоксовой полосы излучения в области 580–640 нм (рис. 6г, 6д) при больших энергиях накачки, природа которого требует дополнительного исследования.

Качественный анализ спектров генерируемого в.к.р.-излучения, в том числе приведенных на рис. 5 и 6, показывает, что величина частотного

сдвига  $\Delta\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$ , между стоксовыми в.к.р.-компонентами излучения разного порядка для различных световодов лежит в пределах 416–450  $\text{см}^{-1}$ , а их спектральные ширины меняются в диапазоне 30–190  $\text{см}^{-1}$ .

В таблице приведены коэффициенты в.к.р.-усиления  $G_s$  первой стоксовой компоненты для ряда кварц-кварцевых (Q-Q) и кварц-полимерных (Q-P) световодов, рассчитанные из соотношения [6]:

$$G_s I_p L = 25, \quad (1)$$

где  $I_p$  – интенсивность излучения накачки,  $L$  – длина световода.

В таблице указаны использовавшиеся при расчетах параметры: диаметр сердцевины  $d_c$ , длина волны излучения накачки  $\lambda_p$ , энергия  $E_p$  и длительность  $\Delta t$  импульса излучения на выходе световода, соответствующие порогу в.к.р.-генерации 1-й стоксовой компоненты. При расчетах полагалось, что при пороге в.к.р.-генерации вся энергия излучения на выходе световода соответствует энергии излучения накачки. Также полагалось, что интенсивность излучения накачки постоянна по длине световода.

Согласно таблице, рассчитанные значения  $G_s$  при накачке излучением с длиной волны  $\lambda_p = 1064$

Параметры световода	Кварц-полимерный световод			Кварц-кварцевый световод	
	400	400	400	600	600
$d_c$ , мкм	400	400	400	600	600
$\lambda_p$ , нм	532	532	1064	532	1064
$E_p$ , мДж	1.3	1.6	2	2.6	10
$\Delta t$ , нс	7	7	10	7	10
$L$ , м	40	30	12	35	35
$G_s$ , см/ГВт	0.042	0.045	0.013	0.054	0.02

нм лежат в интервале 0.013–0.02 см/ГВт, что согласуется с [1]. Для  $\lambda_p = 32$  нм  $G_s$  существенно выше и лежит в пределах 0.042–0.054 см/ГВт.

Оценка коэффициента в.р.М.Б.-усиления  $G_{\text{врМБ}}$  из выражения (1) для экспериментальных данных для одночастотного излучения на  $\lambda_p = 1064$  нм, приведенных на рис. 2, дает значение  $G_{\text{врМБ}} \sim 0.16$  см/ГВт.

Это позволяет сделать вывод, что в.к.р.-генерация идет более эффективно для излучения на  $\lambda_p = 532$  нм по сравнению с  $\lambda_p = 1064$  нм, и, следовательно, конкуренция в.к.р.-генерации с в.р.М.Б.-генерацией в световоде при прочих равных условиях меньше для излучения на  $\lambda_p = 532$  нм. Для снижения конкуренции во всех случаях необходимо уменьшать длительность и расширять спектральный состав излучения накачки.

Таким образом, проведенные исследования позволили создать высокоэффективный в.к.р.-генератор на оптических световодах наносекундного

диапазона длительностей, обеспечивающий преобразование до 70% энергии излучения накачки в единственную 1-ю стоксову компоненту и до 90% – в набор большого количества стоксовых компонент разных порядков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Басиев Т.Т.* // Успехи физических наук. 1999. Т. 169. № 10. С. 1149.
2. *Johnson D.C., Hill K.O., Kawasaki B.S., Kato D.* // Electronics Letters. 1977. V. 13. № 2. P. 53.
3. *Chinlon Lin, Stolen R.H., Cohen L.G.* // Appl. Phys. Lett. 1977. V. 31. № 2. P. 97.
4. *Stolen R.H., Ippen E.P.* // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 22. № 6. P. 276.
5. *Ilko K. Ilev, Hiroshi Kumagai, Koichi Toyoda* // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 70. P. 3200.
6. *Беспалов В.И., Пасманик Г.А.* Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы. М.: Наука, 1986.