

# Эффективные широкоапертурные стержневые усилители на неодимовом стекле

А.К.Потемкин, К.А.Журин, А.В.Кирсанов, Е.А.Копелович, М.В.Кузнецов, А.А.Кузьмин, Ф.А.Флат, Е.А.Хазанов, А.А.Шайкин

*Приведены результаты экспериментальных исследований стержневых усилителей на неодимовом фосфатном стекле с диаметром активного элемента 60–100 мм. Накачка усилителей осуществлялась при помощи трубчатых импульсных ламп ИПП-16/250, установленных в унифицированный осветитель с зеркальным двухсекционным отражателем. Для питания ламп разработан компактный высоковольтный емкостный накопитель энергии с контуром предыонизации.*

**Ключевые слова:** усилитель на неодимовом стекле, зеркальный отражатель, емкостный накопитель энергии, контур предыонизации.

## 1. Введение

В настоящее время существует потребность в сравнительно компактных, относительно дешевых и простых в эксплуатации лазерных системах с активными элементами (АЭ) на основе неодимовых стекол, обеспечивающих в импульсе длительностью  $\sim 1$  нс энергию до 500 Дж. Такие системы необходимы прежде всего для накачки параметрических усилителей в петаваттных лазерных системах чирпованных импульсов [1]. Кроме того, они могут быть использованы для накачки лазеров на Ti:сапфире [2], для чего требуется длительность импульса излучения около 30 нс.

Подобные лазерные системы в настоящее время создаются на основе дисковых или стержневых усилителей. Дисковые усилители практически не имеют ограничений по излучаемой энергии, в то время как предельная энергия неодимовых лазеров со стержневыми усилителями не превышает 300–500 Дж [3–5] при длительности импульса порядка 1 нс. Однако использование стержневых усилителей с накачкой от импульсных ксеноновых трубчатых ламп, как правило, проще и дешевле по сравнению с использованием дисковых усилителей. Стоимость изготовления и эксплуатации лазерной системы в целом в значительной степени определяется эффективностью выходных каскадов ее усилителей.

В настоящей работе приведены результаты исследований и модернизации широкоапертурных стержневых усилителей на неодимовом стекле, описанных в работах [3, 5–7], с целью повышения их эффективности. Модернизация усилителей касалась в основном конструкции их отражателей, типа и числа ламп накачки, а также электрической схемы питания ламп.

Большинство описываемых в литературе конструкций стержневых усилителей предполагают под каждый раз-

мер АЭ использование собственных уникальных осветителей. Это касается как отражателей, так и ламп накачки. Однако это не всегда рационально, т. к. для поддержания непрерывной работы лазерной установки требуется постоянно иметь в запасе некоторый ассортимент осветителей, необходимых для быстрого восстановления работоспособности лазера. Поэтому задача создания эффективного унифицированного осветителя АЭ выходных каскадов усиления достаточно актуальна.

Описываемые в настоящей работе усилители позволяют использовать любые АЭ диаметром от 60 до 100 мм и длиной 300–330 мм в одном осветителе. В работе также описывается емкостный накопитель энергии (ЕНЭ) для питания импульсных ламп накачки усилителей. На основании проведенных испытаний предложенных усилителей сделан вывод об эффективности их использования.

## 2. Отражатель усилителя

По типу поверхности отражатели можно разделить на зеркальные и диффузные. Каждый тип имеет свои преимущества и недостатки. Зеркальные отражатели, обеспечивая более эффективную передачу света на активный элемент, как правило, эффективнее диффузных отражателей. Однако неудачный выбор формы зеркального отражателя может свести на нет все его преимущества [8]. Другим недостатком зеркальных отражателей является то, что с их помощью не всегда просто обеспечить равномерное распределение коэффициента усиления (КУ) в объеме АЭ. В диффузных отражателях легче обеспечить равномерность КУ, но труднее – высокую эффективность.

В усилителях с тесной упаковкой ламп, описанных в [5, 6], как с зеркальными, так и с диффузными отражателями, из-за большой доли излучения накачки, попадающего обратно в лампу, высокая эффективность обеспечивается только при малых нагрузках на лампы, когда плазма в них достаточно прозрачна. При высоких нагрузках, т. е. когда от усилителей требуется не только высокая эффективность, но и высокие значения КУ, лампы сильно поглощают излучение, не попавшее в АЭ. В результате длительность импульса накачки сокращается, и спектр излучения ламп смещается в синюю сторону [9–11]. Это

А.К.Потемкин, К.А.Журин, А.В.Кирсанов, Е.А.Копелович, М.В.Кузнецов, А.А.Кузьмин, Ф.А.Флат, Е.А.Хазанов, А.А.Шайкин. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: ptmk@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 25 января 2011 г., после доработки – 21 февраля 2011 г.

приводит к уменьшению эффективности усилителей с тесной упаковкой в случае высокой нагрузки на лампы.

Как упоминалось выше, тип поверхности отражателя осветителя и его форма сильно влияют на эффективность лазерного усилителя. Так, в работе [3] экспериментально продемонстрировано двукратное увеличение эффективности усилителя с АЭ диаметром 100 мм при замене диффузного отражателя зеркальным. На рис.1 показаны поперечные сечения усилителей с АЭ диаметром 100 мм, оснащенных такими отражателями. В усилителе на рис.1,а источниками накачки являются 18 ламп ИНП-16/250 [12]. Он оснащается диффузным отражателем из керсила. «Тесная геометрия» осветителя с предельным количеством ламп приводит к высокой равномерности КУ по поперечному сечению АЭ, однако система питания для такого количества ламп очень дорогая и громоздкая.

Разработанный нами унифицированный осветитель (рис.1,б) оснащен в отличие от предыдущего варианта всего восемью лампами ИНП-16/250 и зеркальным отражателем, который изготавливается из полированной латуни с нанесенным гальваническим способом серебром или из полированной алюминиевой фольги с защитным покрытием [13]. Оба варианта отражателя дают примерно одинаковый КУ, однако отражатель из алюминиевой фольги гораздо дольше не теряет эффективности, в то время как серебряный отражатель требует регулярной полировки и чистки. Так, при активной эксплуатации усилителей в установке [1, 3] в течение двух лет, за которые было сделано ~1000 вспышек, отражатели из алюминиевой фольги не требовали никакой чистки, в то время как отражатели с серебряным покрытием нужно было 2–3 раза в год очищать от окисла, чтобы КУ не изменялся.

Отражатель имеет двухсекционную конструкцию. Форма каждой секции близка к эвольвенте окружности с радиусом, равным радиусу лампы (форма «Винстона») [14, 15]. Такая форма отражателя позволяет эффективно передавать энергию с поверхности ламп на поверхность АЭ. При этом минимальное количество энергии, излучаемой лампами, попадает обратно. Мы численно промоделировали процесс передачи энергии ламп на АЭ при помощи зеркальных и диффузных отражателей. Эти оценки показали существенное увеличение эффективности (до 1.5–2 раз) при переходе от диффузного отражателя к зеркальному в форме эвольвенты или близкому к нему (по форме) двухсекционному отражателю. Размеры цилиндрических по-

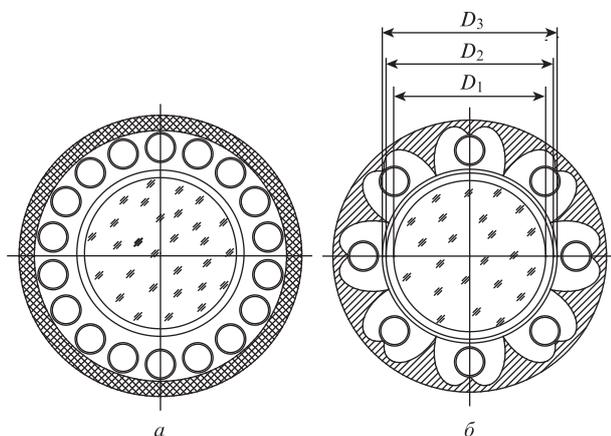


Рис.1. Поперечное сечение усилителя с диффузным отражателем и тесной упаковкой ламп (а) и унифицированного усилителя (б). Диаметр АЭ 100 мм.

Табл.1. Размеры кюветных узлов АЭ.

$D_1$ (мм)	$D_2$ (мм)	$D_3$ (мм)
60	95	100
85	108	114
100	108	114

верхностей АЭ (диаметр  $D_1$ ), окружающей АЭ воды ( $D_2$ ) и стеклянной гильзы ( $D_3$ ) влияют на фокусировку излучения ламп в АЭ, а следовательно, на эффективность усилителей и на поперечное распределение КУ в АЭ. В табл.1 приведены эти размеры для усилителей, испытанных в данной работе.

### 3. Емкостный накопитель энергии усилителя

Электрическое питание импульсных ламп усилителя с диффузным осветителем старой конструкции (рис.1,а) осуществляется с помощью ЕНЭ на основе фольговых конденсаторов К75-28, имеющих емкость 100 мкФ и номинальное рабочее напряжение 3 кВ [10]. В данном осветителе используется последовательный поджиг каждой из 18 ламп накачки. В целом, ЕНЭ состоит из девяти отдельных блоков. Суммарный объем и масса системы электропитания составляет соответственно около 3 м<sup>3</sup> и 2000 кг на один усилитель. Большое количество соединительных шин и силовых контактов, через которые протекает значительный по величине (до 10 кА) ток разряда ЕНЭ, определяет высокие затраты на изготовление и эксплуатацию такого накопителя.

Для питания восьми ламп накачки модернизированного зеркального осветителя унифицированной конструкции (рис.1,б) был разработан компактный высоковольтный емкостный накопитель энергии ЕНЭ-60 на базе четырех тонкопленочных конденсаторов (ЭЛКОД, Санкт-Петербург) с самовосстанавливающимся диэлектриком типа К75-100, имеющих емкость 100 мкФ и номинальное рабочее напряжение 17 кВ [16]. Максимальная запасаемая в ЕНЭ-60 энергия  $E_{\max} = 58$  кДж, а допустимая амплитуда импульса разрядного тока – 20 кА. Габаритные размеры ЕНЭ-60 600×800×1755 мм (менее 1 м<sup>3</sup>), масса около 400 кг, что меньше соответствующих параметров низковольтного накопителя более чем в три раза по объему и в пять раз по массе.

На рис.2 приведена упрощенная электрическая схема ЕНЭ-60. Основой данного накопителя являются два идентичных разрядных модуля А1 и А2, каждый из которых работает на четыре последовательно соединенные лампы накачки ИНП-16/250.

В конденсаторе  $C_1$  запасается половина энергии ЕНЭ, требуемая для питания ламп Л1–Л4 (Л5–Л8). Передача энергии в лампы осуществляется с помощью специально разработанного тиристорного коммутатора ТК1, выполненного на четырех последовательно включенных тиристорах типа ТИ143-320-50 (ОАО «Электровыпрямитель», Саранск). Критический режим разряда, при котором обеспечивается полная передача энергии из ЕНЭ в лампы, реализован с помощью воздушного дросселя  $L_1$ .

Для повышения срока службы ламп накачки поджиг ламп в ЕНЭ-60 осуществляется с помощью дополнительного малоэнергетического контура предыонизации (ПИ) [17], состоящего из накопительного конденсатора  $C_2$  ( $C_2 \ll C_1$ ), тиристорного коммутатора ТК2 и токоформирующей цепи  $L_2-R$ .

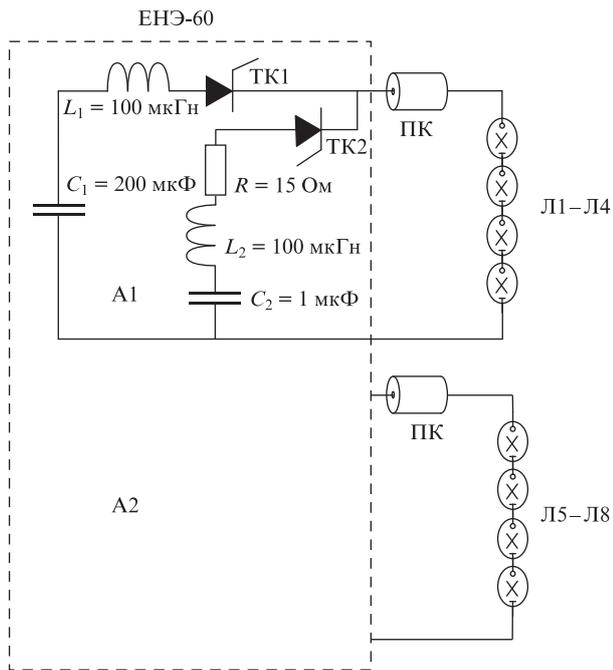


Рис.2. Упрощенная электрическая схема разрядного контура ЕНЭ-60:

TK1 – основной тиристорный коммутатор; TK2 – тиристорный коммутатор схемы предыонизации (ПИ); ПК – передающая кабельная линия (кабель РК50-11-13); C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> – накопительные конденсаторы; L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> – токоформирующие дроссели; Л1–Л8 – импульсные лампы ИНП-16/250.

При включении ТК2 за счет емкости передающей кабельной линии и емкости отражателя усилителя на землю на цепочке ламп формируется импульс перенапряжения, который имеет колебательный характер (частота ~0.5 МГц) и амплитуду первого пика, превышающую зарядное напряжение на ЕНЭ (U) примерно на 30%–35%, что достаточно для надежного пробоя цепочки из четырех ламп. При этом через лампы протекает импульс тока, амплитуда которого ~500 А (рис.3,а).

Через интервал времени Δt, составляющий ~80 мкс (рис.3,а), запускается основной коммутатор ТК1, что приводит к протеканию через лампы импульса рабочего тока амплитудой до 10 кА. Величина Δt подбиралась экспериментально таким образом, чтобы обеспечить минимальное напряжение на лампах в момент включения ТК1 и возникновения основного импульса тока.

Как показали проведенные исследования, поджиг ламп без контура ПИ путем подачи на них напряжения от основного накопительного конденсатора C<sub>1</sub> при включении ТК1 (рис.3,б) приводит к разрушению ламп менее чем через 10 срабатываний. Разрушение ламп происходило не только после вспышки ламп, но и в момент времени, близкий к пиковому значению тока (рис.4). Это противоречит известному механизму разрушения ламп при использовании традиционных систем их поджига [10]. По-видимому, данное явление объясняется тем, что при таком поджиге разряд ламп происходит в режиме, отличном от паспортного, который не позволяет лампам работать с ресурсом, определяемым изготовителями.

Зарядка накопительных конденсаторов C<sub>1</sub> и C<sub>2</sub> обоих модулей до заданного напряжения 10–14 кВ осуществляется от одного зарядного устройства (на рис.2 не показано). Очевидно, что для получения высокой эффективно-

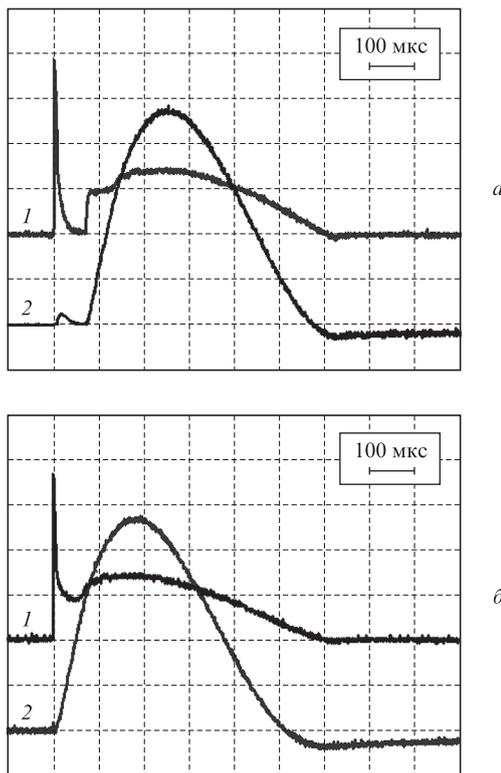


Рис.3. Осциллограммы напряжения на четырех лампах (луч 1, 5 кВ/дел.) и тока через лампы (луч 2, 2 кА/дел.) при использовании контура ПИ (а) и без ПИ (б); U = 13.5 кВ.

сти лазерного усилителя необходимо стремиться максимально повышать величину энергии, передаваемой из накопителя в лампы, при одновременном обеспечении требуемого ресурса их работы (количество вспышек до разрушения лампы).

Как известно, ресурс ламп накачки определяется параметром нагрузки

$$f_x = E/E_x, \tag{1}$$

где E – энергия, передаваемая в лампу от ЕНЭ; E<sub>x</sub> = 22000 ld(LC)<sup>1/4</sup> – энергия разрушения лампы в джоулях [9]; l и d – длина и диаметр разрядного промежутка (в сантиметрах); L и C – индуктивность и емкость разрядного

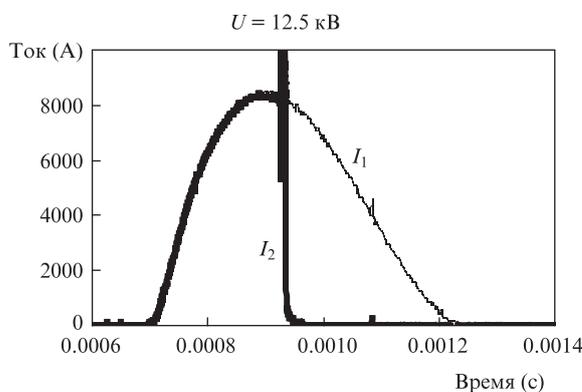


Рис.4. Осциллограммы импульсов тока для ЕНЭ-60 без схемы ПИ при разрушении ламп. В контуре 1 лампы не разрушились (I<sub>1</sub>), а в контуре 2 лампы разрушились во время вспышки при параметре нагрузки f<sub>x</sub> = 0.376 (жирная линия I<sub>2</sub>).

контура (в генри и фарадах). Так, для ламп ИНП-16/250 энергия  $E_x = 10.5$  кДж.

При внешнем поджиге ламп, рекомендуемом производителями, их ресурс (примерное количество вспышек, которые лампы выдерживают без разрушения) эмпирически связан с параметром нагрузки степенной зависимостью:

$$N_x = f_x^{-8.5}. \tag{2}$$

В мощных лазерных системах максимальные значения параметра нагрузки обычно выбираются в диапазоне 0.3–0.5. Для параметра нагрузки  $f_x = 0.4$ , который достигается при зарядном напряжении ЕНЭ-60 13 кВ, ресурс лампы ИНП-16/250 в соответствии с (2) должен превышать 2400. Для режима редко повторяющихся импульсов, характерного для работы мощных лазерных усилителей (одна вспышка в 30 мин), такое количество безотказных срабатываний, как правило, вполне приемлемо.

Емкостный накопитель ЕНЭ-60 с контуром ПИ позволил произвести более 50 срабатываний лазерного усилителя при повышенной нагрузке ламп ( $f_x = 0.483$ ) без их разрушения.

#### 4. Измерение коэффициента усиления

Для измерения КУ усилителей, собранных на базе унифицированного осветителя, в качестве АЭ использовались неодимовые фосфатные стекла типа ГЛС-22. Для предотвращения «сброса люминесценции» торцы усилителей скашивались на угол  $7.5^\circ$ , а боковая поверхность подвергалась травлению. Концентрация ионов неодима в стеклах для каждого диаметра стержня подбиралась такой, чтобы поперечное распределение КУ было близко к равномерному. Для усилителей с АЭ диаметром 100 и 85 мм это значение составило  $3 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , а для усилителей с диаметром АЭ 60 мм –  $6 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  [7]. На рис.5 приведена упрощенная оптическая схема измерения КУ. Задающий генератор (ЗГ) с АЭ из Nd:YLF с частотой повторения 2 Гц генерировал импульсы длительностью 15 нс с энергией 1 мДж. После расширения телескопом, лазерный пучок проходил через АЭ усилителя, объектив О и попадал на ПЗС-камеру. Объектив проецировал выходную поверхность АЭ на ПЗС. Посредством расщепителей часть излучения ответвлялась на входе и выходе усилителя и направлялась на фотоприемники. Регистрируя распределение интенсивности излучения на выходе холодного усилителя (при КУ, равном 1), можно определить поперечное распределение КУ. С помощью фотодиодов на входе и выходе усилителя измерялся интегральный по поперечному сечению АЭ коэффициент усиления.

На рис.6 в первой колонке приведены распределения КУ по поперечным сечениям для усилителей с АЭ различных диаметров. Накопитель ЕНЭ-60 в процессе измерения

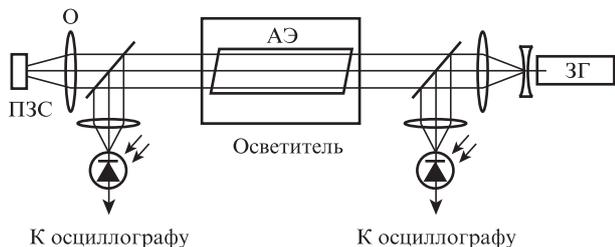


Рис.5. Оптическая схема измерения КУ в усилителях.

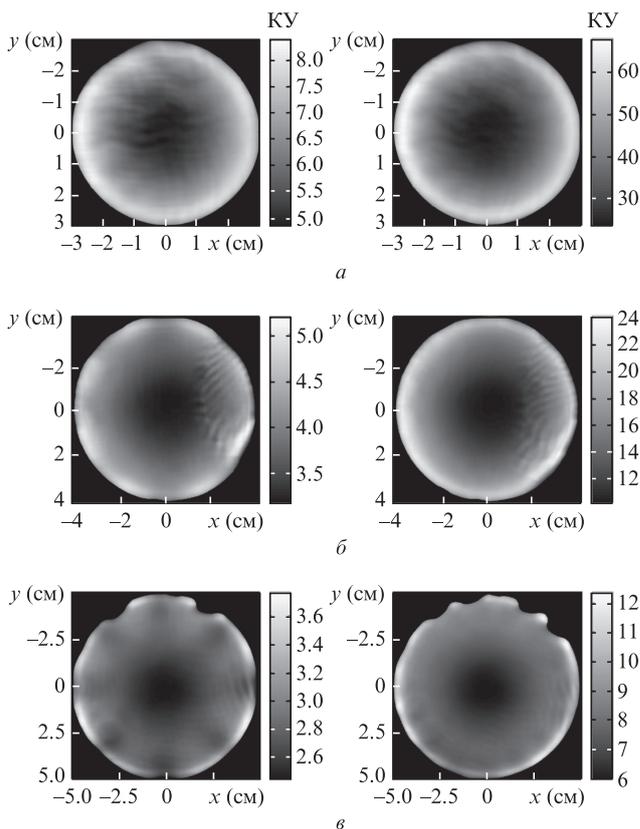


Рис.6. Поперечное распределение КУ усилителей, собранных на базе унифицированного осветителя для АЭ диаметром 60 мм и длиной 300 мм,  $E = 36$  кДж (а), для АЭ диаметром 85 мм и длиной 300 мм,  $E = 33$  кДж (б) и для АЭ диаметром 100 мм и длиной 300 мм,  $E = 36$  кДж (в). Левая колонка – экспериментальные данные, правая колонка – численное моделирование КУ двух усилителей, повернутых вокруг оси друг относительно друга на угол  $\pi/8$ .

ния работал в штатном режиме, т.е. со схемой ПИ. Как видно из рисунка, вариации КУ наблюдаются в основном в радиальном направлении, в то время как в азимутальном направлении они становятся заметными только в АЭ большого диаметра. Однако следует отметить, что такие изменения КУ не препятствуют использованию подобных усилителей. Радиальные вариации, наблюдаемые, как правило, и в усилителях с диффузным отражателем [5], обычно компенсируются подходящим профилем лазерного пучка. Азимутальные вариации можно уменьшить при парном использовании усилителей. При этом усилители разворачиваются вокруг оси один относительно другого на угол  $\pi/8$ . На рис.6 во второй колонке приведены результаты численного умножения поперечных распределений КУ, показанных в первой колонке, на поперечное распределение КУ, повернутое на угол  $\pi/8$ . Как видно из рис.6, парное использование усилителей заметно снижает азимутальные вариации КУ. Так, на радиусе, равном 80% от радиуса АЭ, азимутальная вариация КУ для двух неразвернутых усилителей с АЭ диаметром 100 мм составляет 12%–13%, а для двух развернутых усилителей – не более 6%–7%. Для многокаскадного усилителя последовательное применение подобной методики, при которой пары развернутых на угол  $\pi/8$  усилителей разворачиваются на угол  $\pi/16$ , может свести азимутальные вариации КУ к пренебрежимо малому уровню.

Поперечное распределение КУ при изменении энергии накачки меняется незначительно. Поэтому для измерения за-

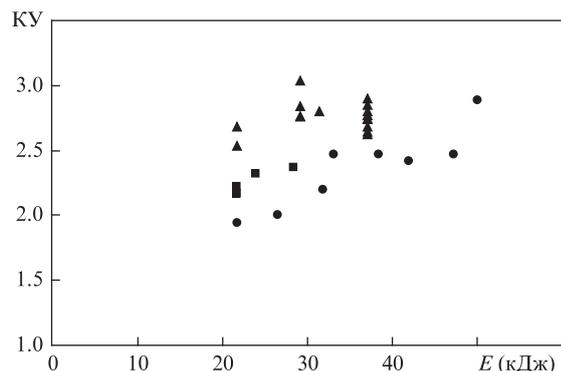


Рис.7. Зависимость среднего по поперечному сечению КУ для усилителя с АЭ из неодимового фосфатного стекла диаметром 100 мм и длиной 300 мм от энергии накопителя. Отражатель зеркальный (рис.1,б), накопитель ЕНЭ-60 без схемы ПИ (■); отражатель зеркальный (рис.1,б), накопитель ЕНЭ-60 со схемой ПИ (▲); отражатель диффузный (рис.1,а), накопитель низковольтный (●).

всисмоостей КУ от энергии накачки далее мы приводим только усредненные по поперечному сечению АЭ значения КУ.

Для усилителей с АЭ диаметром 100 мм было проведено сравнение значений КУ для различных типов отражателей и ЕНЭ. Схематический разрез усилителей с диффузным отражателем и 18 лампами накачки представлен на рис.1,а, накопитель для этого типа усилителей собирался по традиционной схеме на низковольтных конденсаторах LNK-P4X-55-400 (ICAR, Италия) или на конденсаторах К75-40.

Как следует из рис.7, КУ усилителей с АЭ из неодимового фосфатного стекла диаметром 100 и длиной 300 мм при использовании ЕНЭ-60 с контуром ПИ на 20%–25% выше, чем КУ усилителей без ПИ, что согласуется с результатами работы [18]. Если учесть, что без ПИ лампы с высокой вероятностью (не более чем за 10 импульсов) разрушались, то выгода от использования системы ПИ становится еще очевиднее. Анализ различных типов отражателей показал почти двукратное увеличение эффективности усилителей с зеркальными отражателями (рис.1,б) по сравнению с усилителями, оснащенными диффузными отражателями (рис.1,а). Усилители с АЭ других размеров исследовались только в случае ЕНЭ-60 со схемой ПИ и зеркальными отражателями.

На рис.8 приведены зависимости КУ от энергии, запасенной в конденсаторах накопителя, для АЭ различных

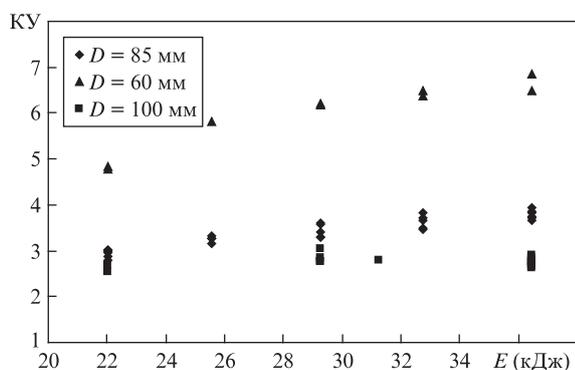


Рис.8. Зависимость среднего по поперечному сечению КУ для усилителей с АЭ различных диаметров, собранных на базе унифицированного осветителя с питанием от ЕНЭ-60.

диаметров. Как видно из этого рисунка, для усилителей с АЭ диаметром 100 мм КУ не превышает 3 при энергии  $E = 30$  кДж. Для усилителей меньших размеров рост КУ наблюдается и при  $E > 30$  кДж.

## 5. Заключение

На основании приведенных в настоящей работе исследований можно сделать следующие выводы.

Унифицированный ряд эффективных усилителей с АЭ большой апертуры (диаметр 60–100 мм), оснащенных зеркальным двухсекционным отражателем формы «Винстон», обладает незначительными азимутальными вариациями поперечного распределения КУ. Эти неоднородности легко компенсируются путем поворота усилителей вокруг их оси на различные углы.

Использование разработанного нами компактного высоковольтного емкостного накопителя энергии ЕНЭ-60 со схемой ПИ для питания ламп накачки усилителей способствовало уменьшению габаритов лазерной установки, повышению КУ усилителей и позволило работать с параметрами нагрузки, превышающими 0.4, без разрушения ламп. При этом была достигнута мощность излучения 330 ГВт в импульсе длительностью 1 нс. Высокая (70%) эффективность преобразования излучения лазера во вторую гармонику подтверждает высокое качество лазерного излучения в установках при использовании усилителей [3].

- Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Yakovlev I.V. *Laser Phys. Lett.*, **4** (6), 421 (2007).
- Yanovsky V., Chvykov V., Kalinchenko G., Rousseau P., Planchon T., Matsuoka T., Maksimchuk A., Nees J., Cheriaux G., Mourou G., Krushelnick K. *Opt. Express*, **16** (3), 2109 (2008).
- Poteomkin A.K., Kirsanov A.V., Martyanov M.A., Khazanov E.A., Shaykin A.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **45** (7), 854 (2009).
- Ешметьева Е.В., Королев В.И., Меснянкин Е.П., Серебряков В.А., Шашкин В.В., Яшин В.Е. *Квантовая электроника*, **19** (9), 837 (1992).
- Баянов В.И., Бордачев В.И., Крыжановский В.И., Серебряков В.А., Чарухчев А.В., Щавелев О.С., Яшин В.Е. *Квантовая электроника*, **11** (2), 310 (1984).
- Баянов В.И., Бордачев Е.Г., Волынкин В.М., Крыжановский В.И., Мак А.А., Моторин И.В., Никонова В.М., Серебряков В.А., Стариков А.Д., Чарухчев А.В., Щавелев О.С., Яшин В.Е. *Квантовая электроника*, **13** (9), 1891 (1986).
- Потемкин А.К., Катын Е.В., Кирсанов А.В., Лучинин Г.А., Мальшаков А.Н., Мартыанов М.А., Матвеев А.З., Палашов О.В., Хазанов Е.А., Шайкин А.А. *Квантовая электроника*, **35** (4), 302 (2005).
- Калинин Ю.А., Мак А.А. *Опт.-мех. пром.*, №2, 61 (1970).
- Koehn W. *Solid-state Laser Engineering* (Berlin: Springer, 1976).
- Маршак И.С. *Импульсные источники света* (М.: Энергия, 1978).
- Даниэль Е.В., Колпакова И.В. *ЖПС*, **10** (4), 592 (1969).
- Будник В.Н., Малашенков В.А., Писулин В.А., Розанов А.Г., Самодергина Т.А., *Опт.-мех. пром.*, №10, 2 (1981).
- Воронич И.Н., Гаранин С.Г., Зарецкий А.И., Игнатъев И.В., Кириллов Г.А., Муругов В.М., Осин В.А., Сухарев С.А., Чарухчев А.В. *Квантовая электроника*, **34** (6), 509 (2004).
- Siegrist M.R. *Appl. Opt.*, **15** (9), 2167 (1976).
- Murray J.E., Powell H.T., in *Laser Program Annular Report*. Ed. by M.L.Rufer, P.W.Murphy (Livermore, Cal., USA, 1984, p.4–13).
- <http://www.elcod.spb.ru>.
- Smith D.L., Hammon J., Wilson J.M., Harjes H.C., Moore W.B.S., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **28** (5), 1316 (2000).
- Larson D. *LLNL. ICF Quarterly Report* (Livermore, Cal., USA, 1995, p.1–6).