

# Энергетические характеристики излучения саморазогревного промышленного лазера KULON-10 Cu-M

Н.М.Лепёхин, Ю.С.Присеко, В.Г.Филиппов, В.Т.Карпухин,  
М.М.Маликов, Н.А.Лябин, А.Д.Чурсин

*Исследованы энергетические характеристики промышленного лазера на парах меди KULON-10 Cu-M, работающего в режиме высокоскоростной импульсной модуляции излучения, осуществляемой специальными дополнительными импульсами тока. Определён диапазон временных задержек дополнительного импульса относительно основного импульса тока накачки, в котором можно плавно изменять пиковую мощность импульсов излучения лазера, их энергию и длительность. Результаты экспериментов показывают, что пиковая мощность импульса излучения, суммарного по длинам волн, в полном угле расходимости достигает 120 кВт при номинальной задержке. Измерены средние и пиковые мощности, энергии и длительности импульсов излучения отдельных компонент лазерного пучка с разной расходимостью (вплоть до дифракционной). Впервые показано, что с уменьшением задержки (от номинального значения) существенно уменьшаются доля энергии импульса излучения, приходящаяся на слабо расходящуюся компоненту пучка, и длительность импульса генерации. Дана оценка перспективы использования лазера серии KULON для нелинейного преобразования частоты излучения.*

**Ключевые слова:** лазер на парах меди, характеристики излучения, оперативное управление, расходимость излучения, пиковая мощность, длительность импульса излучения.

## 1. Введение

Современные промышленные лазеры на парах меди (ЛПМ) [1], работающие в видимом диапазоне излучения, представляют собой мощный прецизионный инструмент для микрообработки широкого спектра материалов, обеспечивающий высокое качество изделий и высокие скорости обработки. Кроме того, ЛПМ перспективны для создания на их базе источников УФ излучения [2, 3], что может существенно расширить область применения этих лазеров. Эффективность практического использования ЛПМ в различных прецизионных технологических процессах, а также возможность создания источников УФ излучения в значительной степени зависят от энергетических, пространственных и временных характеристик импульсов излучения. Поэтому исключительный интерес представляют исследования важнейших характеристик излучения промышленных ЛПМ: средней и пиковой мощностей, энергии импульса, его длительности, а также относительной доли энергии, сосредоточенной в слабо расходящихся (дифракционных) компонентах лазерного пучка, и их абсолютной пиковой мощности излучения.

В настоящее время в ООО «ОЭП ВЭИ» (г. Истра) разработаны [4] и сертифицированы [5] промышленные

ЛПМ серии KULON, выполненные на базе отпаянных саморазогревных активных элементов LT-10Cu (производства НПП «Исток», г. Фрязино) со средней мощностью излучения в установившемся режиме 10 Вт. Принципиальным отличием лазера KULON-10 Cu-M от других ЛПМ этой серии является возможность оперативного управления энергетическими характеристиками излучения, что достигается при работе лазера в режиме сдвоенных импульсов путём введения так называемого канала высокоскоростной импульсной модуляции, обеспечивающего фазоимпульсную регулируемую задержку  $\tau_{del}$  дополнительного импульса возбуждения по отношению к основному импульсу накачки [6–8].

Известно [9, 10], что, вводя дополнительные импульсы возбуждения, можно оперативно и целенаправленно изменять средние и импульсные характеристики лазерного излучения, а также стабилизировать выходные параметры ЛПМ. Однако скорость управления параметрами излучения при этом недостаточно высока для ряда применений. Так, например, в [9] скорость изменения частоты следования импульсов излучения не превысила 1–2 кГц/мин при погрешности стабилизации энергии в импульсе 1.5%–3%.

Разработанный лазер KULON-10 Cu-M позволяет безынерционно (практически с произвольной скоростью) управлять параметрами излучения. Детальное описание работы этого лазера и особенностей использования сдвоенных импульсов тока представлено в работе [7]. Отметим только, что суть способа высокоскоростной импульсной модуляции заключается в изменении условий эффективной генерации лазера за счёт регулирования населённости метастабильных лазерных уровней с помощью дополнительного импульса возбуждения, энергия которого достаточна для заселения нижних (метастабильных) лазерных уровней и недостаточна для засе-

Н.М.Лепёхин, Ю.С.Присеко, В.Г.Филиппов. ООО «Опытно-экспериментальное производство Всероссийского электротехнического института им. В.И.Ленина», Россия, Московская обл., 143500 Истра, а/я 33; e-mail: info@schema5.ru

В.Т.Карпухин, М.М.Маликов. Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412 Москва, Ижорская ул., 13/19; e-mail: mmalikov@oivtran.iitp.ru

Н.А.Лябин, А.Д.Чурсин. ФГУП «НПП "Исток"», Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, ул. Вокзальная, 2а

Поступила в редакцию 11 июля 2006 г., после доработки – 29 января 2007 г.

ления верхних (резонансных) уровней. Путем изменения времени появления дополнительного импульса относительно основного импульса возбуждения достигается режим генерации (при отставании дополнительного импульса от основного) или режим гашения излучения лазера (при опережении дополнительным импульсом основного).

Здесь и ниже будем считать, что положительные задержки  $\tau_{del}$  соответствуют отставанию дополнительного импульса от основного импульса накачки, а отрицательные – опережению дополнительным импульсом основного. Кроме того, для обеспечения стационарного температурного режима газоразрядной трубки источник накачки лазера поддерживает постоянным суммарный энерговыход от основного и дополнительного импульсов возбуждения во всем диапазоне регулирования.

Данный способ управления параметрами излучения позволяет при погрешности стабилизации энергии в импульсе 1% – 1.5% осуществлять по любому наперед заданному закону высокоскоростную импульсную модуляцию доз лазерного излучения с точностью до одного импульса, изменять частоту следования импульсов генерации от номинальных значений вплоть до моноимпульсного режима, создавать любую последовательность импульсов генерации (с частотой, не превышающей номинальную), а также выполнять импульсное регулирование цветности излучения. Всё это даёт возможность легко подбирать наиболее эффективный режим работы ЛПМ для того или иного технологического процесса.

В настоящей работе представлены результаты исследования перечисленных выше характеристик излучения промышленного лазера KULON-10 Cu-M. Изучено влия-

ние задержки дополнительного импульса тока на выходные характеристики излучения, а также показана возможность оперативного управления длительностью импульса генерации. В отличие от работ [6–8], в нашей работе в оптический резонатор промышленного лазера был введён элемент, поляризующий его излучение, что необходимо для ряда применений, в частности для нелинейного преобразования частоты излучения.

## 2. Описание эксперимента

Схема эксперимента представлена на рис.1. В качестве лазерного излучателя использовалась газоразрядная лазерная трубка LT-10 Cu 1, находящаяся в неустойчивом телескопическом резонаторе, образованном сферическим вогнутым зеркалом 2 диаметром 35 мм и выпуклым зеркалом 3 диаметром 1.5 мм с радиусами кривизны соответственно 2210 и 15 мм. Коэффициент увеличения резонатора был равен 150. Излучение выводилось через просветленную пластинку 4 диаметром 35 мм, в центре которой приклеено зеркало 3 под углом  $4^\circ$  к оптической оси. Для поляризации излучения лазера использовалась призма Глана 5. Длина резонатора  $L = 1105$  мм, диаметр газоразрядной лазерной трубки  $D = 14$  мм, длина активного объёма  $l = 495$  мм. Накачка лазера осуществлялась с помощью источника питания 6 с каналом высокоскоростной импульсной модуляции 7, управляемого от стандартного генератора импульсов 8 (типа Г5-56). На выходе лазера фон сверхизлучения «обрезался» диафрагмой 9 диаметром 14 мм. Пространственный фильтр состоял из линзы 10 с фокусным расстоянием  $f = 5300$  мм и набора диафрагм 11, располагавшихся точно в фокусе линзы 10. Диаметр  $d$  отверстий диафрагм

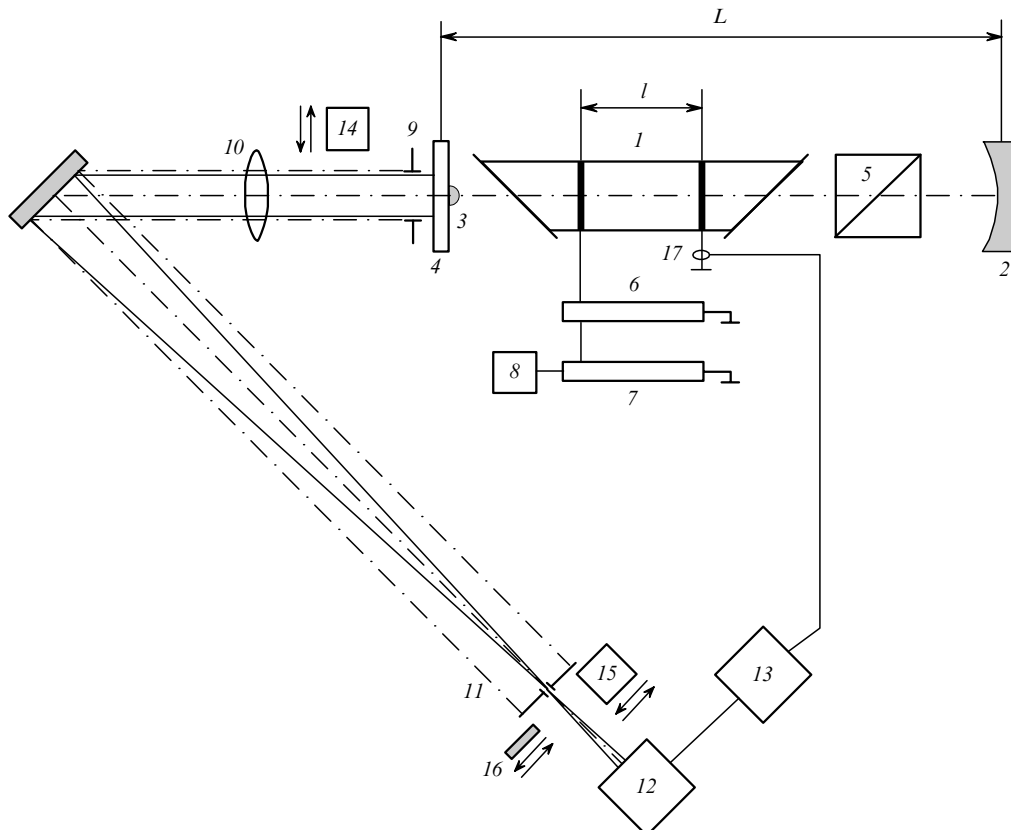


Рис.1. Схема эксперимента.

11 варьировался от 0.5 до 10 мм, при этом пространственный фильтр выделял из лазерного пучка компоненты с расходимостью  $\varphi \approx d/f$ , которая изменялась от  $\varphi_d$  до  $20\varphi_d$  (здесь  $\varphi_d \approx 2.44\lambda/D$  – предельная дифракционная расходимость лазерного пучка).

Форма импульсов излучения регистрировалась фотоприемником 12 (ФЭК-22СПУ-М) и осциллографом 13 (Tektronix TDS 3054B) с полосой пропускания 500 МГц. Средняя (по частоте следования импульсов) мощность излучения на выходе излучателя контролировалась термоэлектрическим преобразователем 14 (ТИ-5), а на входе фотоприемника 12 – измерителем мощности 15 («Москит»). Перед фотоприёмником 12 и измерителем мощности 15 устанавливался зелёный (СЗС20) или жёлтый (ОС11) стеклянный фильтр 16, что позволяло измерять среднюю мощность и регистрировать форму импульса излучения на линиях генерации лазера с длинами волн 0.510 и 0.578 мкм. Для обеспечения линейного режима работы фотоприемника 12 излучение ослаблялось набором нейтральных стеклянных ослабителей. Импульсы тока накачки и частота их следования регистрировались осциллографом 13 с помощью пояса Роговского 17. Энергия импульсов излучения определялась как отношение средней мощности (измеренной измерителем 14 или 15) к частоте следования импульсов лазера. Пиковая мощность импульсов излучения находилась по осциллограммам, при этом для пересчёта (калибровки) сигнала осциллографа использовались измеренные значения энергии этих импульсов.

Эксперименты и измерения проводились в условиях установившегося температурного режима работы лазера. Учитывались потери излучения во всех оптических элементах. Мощность, отбираемая от источника питания 6, составляла  $\sim 1.9$  кВт, частота следования импульсов накачки – 12.8 кГц. Амплитуда тока основного импульса возбуждения равнялась  $\sim 380$  А, дополнительного – примерно 70 А. Длительность по основанию основного импульса тока составляла  $\sim 120$  нс, дополнительного – примерно 140 нс. Диапазон регулирования задержки  $\tau_{del}$  равнялся 2 мкс.

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Все мощностные характеристики излучения исследуемого лазера при введении в схему поляризирующего оптического элемента 5 изменились незначительно. Средняя мощность излучения лазера  $W$  (суммарная по длинам волн в полном угле расходимости) уменьшилась на 10% – 12% и составила 9–10 Вт при задержке дополнительного импульса тока  $\tau_{del} \approx +300$  нс, которую далее будем называть оптимальной.

Зависимость средней мощности излучения лазера  $W$  от времени задержки  $\tau_{del}$  представлена на рис.2. Видно, что в области задержек от  $-700$  до  $-200$  нс средняя мощность мала и изменяется незначительно. При  $\tau_{del} \approx -200 \dots 100$  нс дополнительный импульс возбуждения почти полностью гасит импульс излучения. В интервале задержек от  $-100$  до  $-50$  нс наблюдается резкое увеличение мощности до номинальной величины, и этот интервал можно использовать для оперативного регулирования средней и пиковой мощностей, длительности импульса, а также энергии импульса излучения лазера. Точность стабилизации энергии от импульса к импульсу для указан-

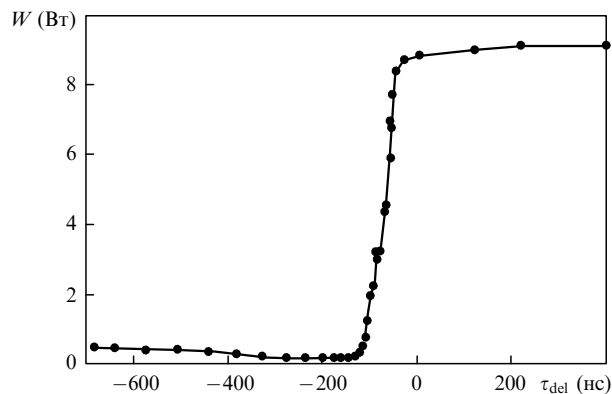


Рис.2. Зависимость средней мощности излучения лазера от времени задержки дополнительного импульса тока канала модуляции.

ного интервала в настоящее время не исследована. В области положительных задержек 0–400 нс средняя мощность излучения стабильна и достигает своего максимального значения.

На рис.3 представлены доли энергии импульса излучения  $\delta = W_\varphi/W$ , сосредоточенные в компонентах лазерного пучка с разной расходимостью (от дифракционной до полной). Здесь  $W_\varphi$  – средняя мощность излучения, измеренная на выходе пространственного фильтра при различных диаметрах  $d$  выходной диафрагмы, которым соответствуют разные относительные расходимости  $\varphi/\varphi_d$ . Зависимость была получена при оптимальной задержке дополнительного импульса и разбросе средней выходной мощности лазера, определяемой мощностью накачки, от 7.8 до 9.7 Вт. Все экспериментальные точки хорошо ложатся на одну кривую. При отрицательных значениях  $\tau_{del}$  доля энергии  $\delta$  в компонентах лазерного пучка с малой расходимостью была значительно меньше, чем при оптимальной задержке. Так, например, для пучков, прошедших через диафрагму с  $d = 1.5$  мм ( $\varphi/\varphi_d \approx 3$ ), величина  $\delta$  уменьшалась с 21% до 8% при изменении  $\tau_{del}$  от +290 до  $-110$  нс.

На рис.4 представлена зависимость пиковой мощности излучения  $U_p$  компонент суммарного по длинам волн пучка с различными расходимостями от  $d$  и  $\varphi/\varphi_d$  при оптимальной задержке и  $W \approx 7.9$  Вт. Там же показаны зависимости  $U_p$  от  $d$  для длин волн лазерного излучения

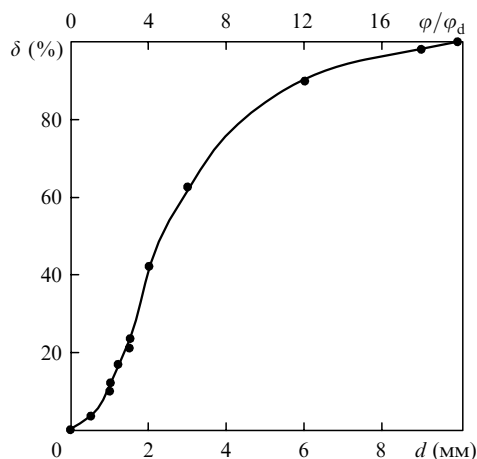


Рис.3. Доля энергии импульса излучения в компонентах лазерного пучка с разной расходимостью при оптимальной задержке дополнительного импульса.

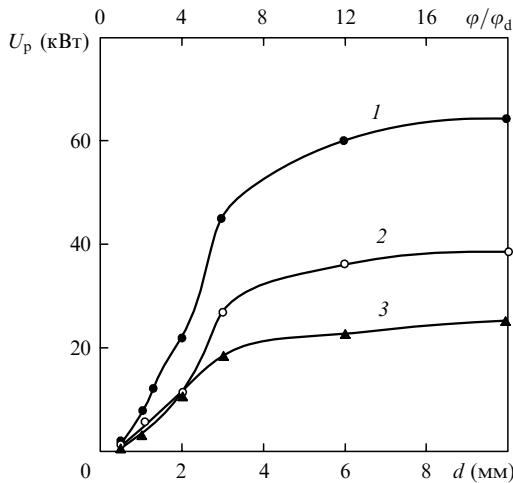


Рис.4. Пиковая мощность излучения компонент пучка с различными расходимостями: 1 – суммарный по длинам волн пучок; 2 – зелёная линия генерации (0.510 мкм); 3 – жёлтая линия генерации (0.578 мкм).

Табл.1.

$W$ (Вт)	$d$ (мм)	$\varphi/\varphi_d$	$U_p$ (кВт)		
			0.510 мкм	0.578 мкм	0.510 мкм и 0.578 мкм
9.3	1.5	3	13	10	23
	10	20	70	50	120
9.8	1.5	3	20	17	30
	10	20	–	–	–

0.510 мкм (зелёная линия) и 0.578 мкм (жёлтая). В табл.1 приведены значения  $U_p$ , полученные при более высокой мощности накачки и средней мощности излучения  $W \approx 9 - 10$  Вт. Видно, что максимальное значение пиковой мощности суммарного по длинам волн излучения достигало 120 кВт в полном угле расходимости и 30 кВт для пучка с расходимостью  $3\varphi_d$ .

Влияние задержки дополнительного импульса тока на форму импульсов излучения в полном угле расходимости пучка лазера продемонстрировано на рис.5, а на рис.6 аналогичные зависимости представлены для пространственной компоненты пучка с расходимостью, равной  $3\varphi_d$ .

Из сравнения рис.5,а и б следует, что с уменьшением задержки от оптимальной до  $\tau_{del} \approx -66$  нс пиковая мощность  $U_p$  суммарного по длинам волн излучения уменьшается на  $\sim 33\%$ , в то время как суммарная средняя мощность  $W$  – на  $\sim 44\%$ : с 9.4 до 5.3 Вт. Если при оптимальной задержке пик «жёлтого» и «зелёного» импульсы появляются раньше «жёлтого», то при  $\tau_{del} \approx -66$  нс картина обратная – пиковая мощность импульса на жёлтой линии излучения значительно больше, чем на зелёной и «жёлтый» импульс опережает «зелёный». Доля энергии «жёлтого» импульса (от суммарной энергии) возрастает с 45% до 70%. Аналогично ведут себя импульсы излучения для пучка с расходимостью  $3\varphi_d$  (рис.6,а и б).

Таким образом, с уменьшением задержки дополнительного импульса возбуждения наблюдается рост вклада в полную мощность генерации лазера излучения на жёлтой линии и падение полной мощности. Отметим, что этот эффект хорошо согласуется, например, с результатами [11] и не связан с перегревом рабочей среды, что позволяет, в свою очередь, оперативно управлять сред-

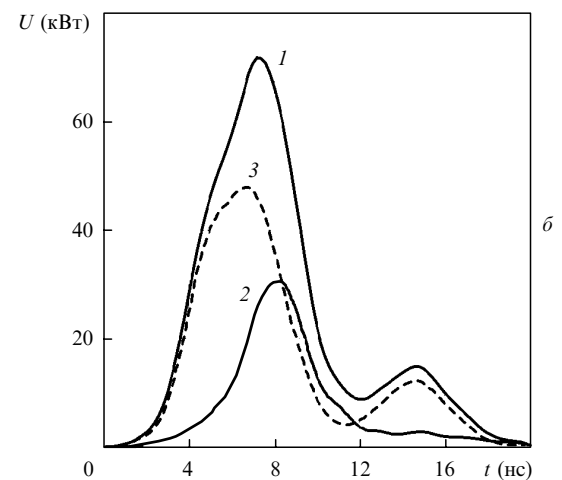
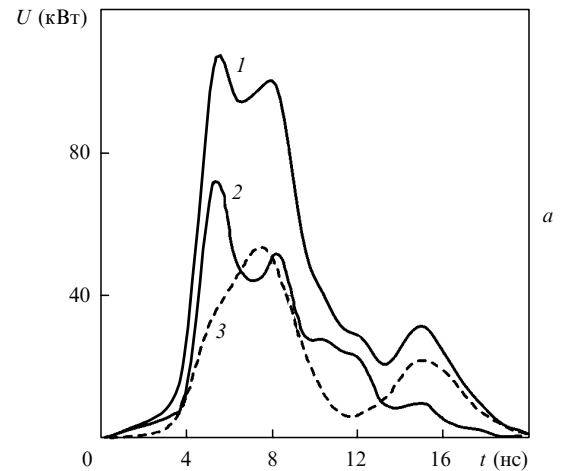


Рис.5. Мощность излучения  $U$  в полном угле расходимости пучка лазера при  $\tau_{del} = +300$  нс,  $W \approx 9.4$  Вт (а) и  $\tau_{del} = -66$  нс,  $W \approx 5.3$  Вт (б): 1 – суммарный по длинам волн пучок; 2 – зелёная линия генерации (0.510 мкм); 3 – жёлтая линия генерации (0.578 мкм).

ней и пиковой мощностями ЛПМ при одновременном изменении цветности излучения.

Как следует из рис.5 и 6 задержка  $\tau_{del}$  также заметно влияет на длительность импульсов излучения. Уменьшение длительности происходит в большей степени для «зелёного» импульса, чем для «жёлтого». Кроме того, уменьшение длительности больше для компонент пучка с малой расходимостью, чем для излучения в полном угле расходимости. Сравнение импульсов излучения при  $\tau_{del} \approx +300$  нс и  $-66$  нс в пучке с расходимостью  $3\varphi_d$  (рис.6) иллюстрирует сказанное выше: длительность «зелёного» импульса по основанию снизилась примерно вдвое – с 16 до 8 нс, а по полувысоте – с 6 до 4 нс. При этом амплитуда импульса излучения уменьшилась с  $\sim 13.3$  до  $\sim 5$  кВт. Более существенное уменьшение длительности импульса излучения наблюдается только при  $\tau_{del} < -100$  нс, как это показано на рис.7. Здесь длительность «зелёного» импульса уменьшилась ещё в  $\sim 1.5$  раза. Однако в этой области задержек мощность генерации очень мала, а пиковая мощность не превышает 2.2 кВт.

Полученные результаты демонстрируют возможность оперативного управления длительностью импульса излучения. Отметим, что при этом необходимо выполнить жёсткие требования к стабильности и точности задания величины  $\tau_{del}$  в очень узком временном интервале шириной  $\sim 200$  нс.

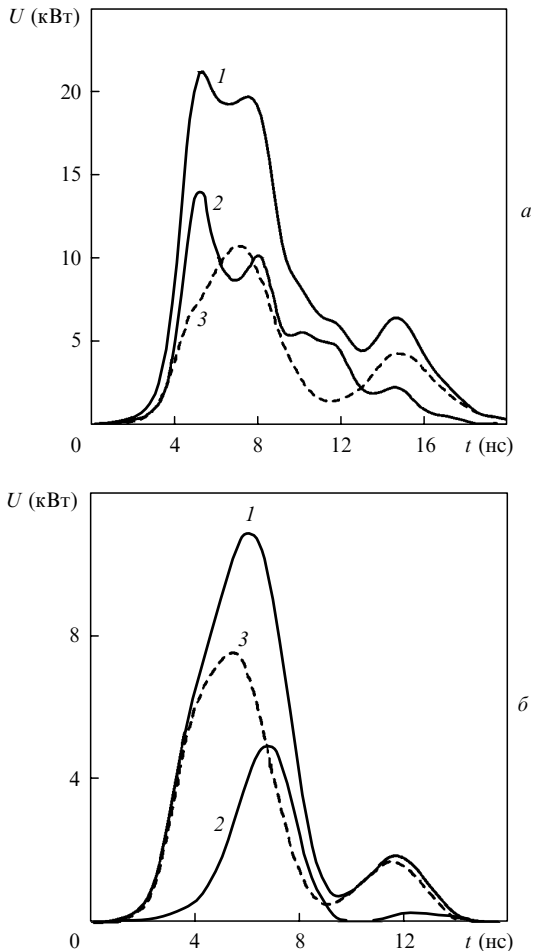


Рис. 6. Мощность излучения  $U$  для компоненты с расходимостью  $3\varphi_d$  при  $\tau_{del} = +300$  нс,  $W_\varphi \approx 1.9$  Вт (а) и  $\tau_{del} = -66$  нс,  $W_\varphi \approx 0.8$  Вт (б): 1 – суммарный по длинам волн пучок; 2 – зелёная линия генерации (0.510 мкм); 3 – жёлтая линия генерации (0.578 мкм).

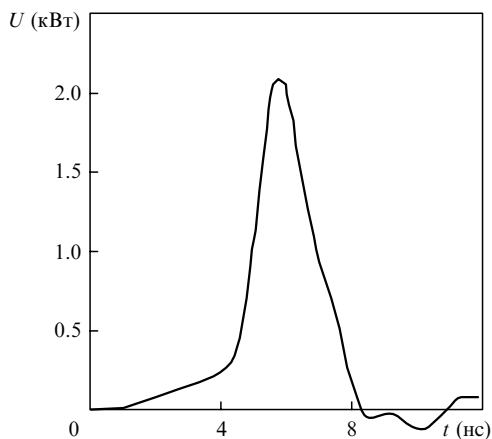


Рис. 7. Мощность излучения  $U$  зелёной линии генерации (0.510 мкм) для компоненты с расходимостью  $3\varphi_d$  при  $\tau_{del} = -110$  нс,  $W_\varphi \approx 0.05$  Вт.

#### 4. Заключение

Результаты экспериментов показали, что безынерционный метод высокоскоростной импульсной модуля-

ции излучения [7], реализованный в промышленном лазере KULON-10 Cu-M, позволяет не только дозировать число импульсов излучения и изменять среднюю мощность лазера, но и управлять характеристиками отдельных импульсов, такими как пиковая мощность, энергия и длительность. Диапазон задержки дополнительного импульса тока, в котором возможно такое управление, составил  $\sim 100$  нс. Получены количественные характеристики влияния задержки дополнительного импульса тока на импульсные и средние параметры излучения лазера. Отметим, что перечисленные выше параметры импульсов меняются при изменении задержки дополнительного импульса одновременно, но в разной степени.

Впервые исследовано влияние задержки дополнительного импульса тока на параметры импульсов излучения в слабо расходящихся компонентах лазерного пучка. Показано, что уменьшение задержки от номинальной приводит к сокращению доли энергии, приходящейся на слабо расходящиеся компоненты пучка. Однако их пиковая мощность уменьшается в меньшей степени, чем энергия.

Результаты выполненной работы в совокупности с результатами работы [8] дают достаточно полную информацию о параметрах излучения промышленных лазеров KULON-10 Cu-M, необходимую при выборе режимов работы лазера во многих технологических процессах.

Измеренные пиковые мощности и распределения энергии импульса излучения по пространственным компонентам пучка оказались примерно такими же, как и в работах [2, 3] по нелинейному преобразованию частоты излучения ЛПМ, где использовался активный элемент ГЛ-201 с большей средней мощностью излучения (20 Вт). Это позволяет надеяться на получение с помощью промышленного лазера KULON-10 Cu-M УФ излучения мощностью 0.1–0.3 Вт с длинами волн 0.255, 0.271 и 0.289 мкм, т. е. с параметрами, близкими к полученным в [2, 3]. Следует подчеркнуть, что в этом случае управление частотой и средней мощностью УФ излучения может эффективно и просто осуществляться также методом высокоскоростной импульсной модуляции.

1. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. *Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения* (М.: Физматлит, 2005, с. 312).
2. Карпунин В.Т., Маликов М.М. *ЖТФ*, **70** (4), 87 (2000).
3. Карпунин В.Т., Конев Ю.Б., Маликов М.М. *Квантовая электроника*, **25** (9), 809 (1998).
4. Лазер газовый КУЛОН 01,02,03,04,05,06. *Технические условия № ЮВИЕ. 433713.001ТУ*.
5. Лазер газовый КУЛОН 01,02,03,04,05,06. *Сертификат соответствия № РОСС. RU.МЕ20.НО1050*.
6. Лепёхин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г. и др. В кн.: *Сборник научных трудов*. Под ред. В.А.Петрова (М.: Изд-е МНТОРЭС им. А.С.Попова, 2003, с. 72, 73).
7. Лепёхин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г. *Прикладная физика*, № 1, 8 (2006).
8. Лепёхин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г. *Прикладная физика*, № 1, 110 (2005).
9. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. *Квантовая электроника*, **10** (5), 974 (1983).
10. Евтушенко Г.С. и др. *ЖПС*, **49** (5), 745 (1988).
11. Исаев А.А., Казаков В.В., Лесной М.А., Маркова С.В., Петраш Г.Г. *Квантовая электроника*, **13** (11), 2302 (1986).