

Генерация УФ излучения по схеме многопроходный лазерный усилитель на парах меди – нелинейный кристалл

В.Т.Карпухин, М.М.Маликов

Обсуждается схема источника УФ излучения, в которой использованы многопроходный однокаскадный лазерный усилитель на парах меди и нелинейный кристалл DKDP. Особое исполнение многопроходного усилителя дало возможность существенно увеличить пиковую мощность импульса излучения на входе в нелинейный кристалл, что, в свою очередь, позволило эффективно осуществить генерацию на суммарной частоте ($\lambda = 0.271$ мкм) двух линий меди с длинами волн 0.51 и 0.578 мкм.

Ключевые слова: ультрафиолетовое излучение, нелинейный кристалл, многопроходный усилитель на парах меди.

1. Введение

Эффективность преобразования частоты лазерного излучения с помощью нелинейных кристаллов существенно зависит от плотности мощности излучения и расходимости излучения в кристалле. Импульсно-периодические лазеры и однопроходные усилители на парах меди со средней выходной мощностью 10–20 Вт имеют сравнительно низкую пиковую мощность импульса излучения (~ 50 – 100 кВт), что недостаточно для эффективного преобразования частоты. Так, например, при мощности лазерных систем на парах меди 20 Вт и малой расходимости достигнутые средние КПД преобразования во вторую гармонику и генерации суммарной частоты составляют соответственно $\sim 35\%$ и $\sim 20\%$ (с использованием кристалла ВВО) [1]. КПД преобразования на кристаллах KDP, DKDP и других, как правило, в 1.5–2 раза ниже.

Возможности применения более мощных лазеров и усилителей на парах меди в схемах преобразования частоты с одиночным кристаллом ограничиваются средней мощностью излучения (тепловым самовоздействием). В случае же использования лазеров с неустойчивым резонатором выходное излучение состоит из нескольких пучков, образующихся при различных последовательных проходах излучения в оптическом резонаторе за короткое время существования инверсии [2–4]. Все пучки имеют разную расходимость, что затрудняет их совместное использование для нелинейного преобразования [5]. Пучок, зарождающийся из спонтанных затравок после первого прохода (суперлюминесценция), и пучок, возникающий после второго прохода, обладают низкой когерентностью и большой расходимостью, что снижает эффективность их нелинейного преобразования [5], тогда

как пучок, образующийся после последнего прохода излучения, может иметь малую дифракционную расходимость, однако в нем сосредотачивается далеко не вся энергия излучения лазера [2–7].

Проблема может быть решена с помощью увеличения пиковой мощности импульса излучения при сохранении средней мощности на прежнем уровне. Необходимо также улучшить структуру пучка и сосредоточить большую часть мощности импульса излучения в малорасходящейся компоненте выходного излучения лазерной системы. Для этого, на наш взгляд, можно использовать схему генератор–многопроходный усилитель–нелинейный кристалл, предложенную в [8]. При особом исполнении многопроходного усилителя [9] амплитуда импульса излучения на выходе может быть увеличена в несколько раз, а излучение будет иметь практически однопучковую структуру с расходимостью, близкой к предельной. Впервые возможность создания источника УФ излучения по такой схеме была продемонстрирована в [10] (получена мощность излучения ~ 0.7 Вт на длине волны 0.271 мкм). В настоящей работе подробно описана схема эксперимента и приведены новые результаты. Показано, что причины, ограничивающие эффективность преобразования в [10], не носят принципиального характера, а связаны с техническими параметрами экспериментальной установки. Устранение некоторых технических недостатков позволило существенно повысить мощность УФ излучения.

2. Описание эксперимента

Оптическая схема эксперимента представлена на рис.1. В данной работе использовалась простейшая схема двухпроходного усилителя на парах меди со встречным ходом и с поляризационной развязкой лучей. Конструкция и параметры усилителя были выполнены в соответствии с [9] и подробно описаны в [11–13]. Система для генерации УФ излучения состояла из задающего генератора 1 (лазерная трубка LT-1 CU), поляризационного разветвителя 2 (призма Глана), усилительного

В.Т.Карпухин, М.М.Маликов. Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 127412 Москва, ул. Ижорская, 13/19; e-mail: mmalikov@oivtran.iitp.ru

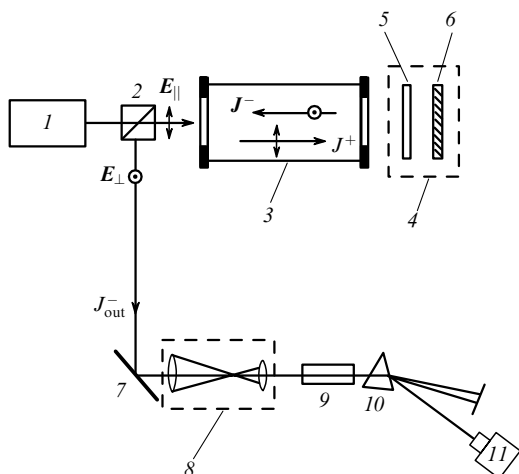


Рис.1. Схема эксперимента:

1 – задающий генератор; 2 – поляризационный разветвитель; 3 – усилительный каскад; 4 – блок возврата пучка; 5 – фазовращающая пластинка $\lambda/4$; 6 – плоское зеркало; 7 – поворотное зеркало; 8 – телескопический коллиматор; 9 – кристалл DKDP; 10 – кварцевая призма; 11 – датчик измерителя мощности излучения ИМО-4С.

каскада 3 и блока возврата пучка 4, включающего в себя четвертьволновую фазовращающую пластинку 5 и плоское зеркало 6. В отличие от [11 – 13] задающий генератор 1 был снабжен неустойчивым резонатором с коэффициентом увеличения $M = 5$. Для согласования диаметра пучка задающего генератора с диаметром разрядной трубки усилительного каскада использовался телескопический коллиматор (на рис.1 не показан). Задающий генератор излучал импульсы света с горизонтальной (в плоскости рисунка) поляризацией электрического вектора $E_{||}$. Длины волн λ_1 и λ_2 составляли 0.51 и 0.578 мкм соответственно, частота следования импульсов была равна 10 кГц, средняя мощность на входе в усилитель – примерно 0.18 Вт. Усилительный каскад был выполнен на базе трубки ГЛ-201 с рабочей камерой длиной 80 см и диаметром 20 мм.

Пучок J^+ с горизонтальной поляризацией входил в активную среду усилительного каскада 3 и поступал в блок возврата 4. Пучок J^- , идущий в обратном направлении, приобретал ортогональную поляризацию вектора E_{\perp} , поэтому он не интерферировал с J^+ и выводился из системы поляризационным разветвителем 2 в сторону поворотного зеркала 7, а затем поступал в телескопический коллиматор 8. С помощью телескопического коллиматора диаметр пучка уменьшался до 1 – 1.5 мм и пропускался через кристалл DKDP 9 длиной 4 см, в котором осуществлялась генерация суммарной частоты ($\lambda = 0.271$ мкм). УФ излучение выделялось кварцевой призмой 10. Средняя мощность лазерного излучения на входе и выходе усилительного каскада, а также мощность УФ излучения измерялись калориметрическим прибором 11. Для регистрации формы импульсов лазерного излучения использовались фотоэлемент ФЭК-22спу и стробоскопический осциллограф с полосой пропускания 3.7 ГГц. С помощью длиннофокусной линзы и набора диафрагм, помещаемых в ее фокальную плоскость, проводился анализ расходимости лазерного пучка, входящего в двухпроходный усилитель и выходящего из него. Измерялись доли энергии импульса излучения δ , приходящиеся на вырезаемые диафрагмами компоненты пучка, которым соответствовала разная расходимость в дальней волно-

вой зоне. Расходимость пучка, преобразованного коллиматором 8 (на входе в кристалл), измерялась методом калиброванных диафрагм.

3. Результаты экспериментов и обсуждение

Существенное повышение пиковой мощности импульса выходного излучения по сравнению с полученной в однопроходном варианте усилителя обусловлено особенностями исполнения схемы двухпроходного усилителя. При одинаковой мощности накачки рабочей среды усилительного каскада 3.2 кВт и мощности задающего генератора 0.18 Вт средняя мощность излучения на выходе двухпроходного усилителя, составлявшая ~ 14 Вт, не изменилась. Амплитуда же импульса излучения увеличилась до ~ 170 кВт, что примерно вдвое выше амплитуды импульса излучения однопроходного усилителя. Длительность импульса излучения (по основанию) составила ~ 20 нс. Средние мощности излучения задающего генератора с длинами волн λ_1 и λ_2 составляли соответственно 65 % и 35 % от полной, а отношение пиковых мощностей на этих длинах волн равнялось примерно двум.

На выходе двухпроходного усилителя эти соотношения немного изменились. На каждую длину волны уже приходилось ~ 50 % средней мощности излучения, а отношение пиковых мощностей уменьшилось до ~ 1.5 . Отметим, что такие изменения способствовали увеличению эффективности генерации суммарной частоты в нелинейном кристалле. На рис.2 представлены осциллограммы импульсов излучения с длинами волн λ_1 и λ_2 на выходе двухпроходного усилителя.

Часть пучка с большой расходимостью, пройдя через коллиматор 8, расширялась и выходила за апертуру кристалла. По этой причине, а также за счет потерь света в оптических элементах, средняя мощность излучения на входе в кристалл (в узком параллельном пучке диаметром ~ 1 мм) уменьшалась до ~ 12 Вт, а пиковая мощность излучения – примерно до 145 кВт. Отметим, что в однопроходном варианте усилителя пиковая мощность на выходе коллиматора была вдвое меньше. Перед входом в кристалл расходимость луча, преобразованного коллиматором 8, составила ~ 2.7 мрад.

При этих параметрах были проведены первые эксперименты. Было осуществлено эффективное нелинейное

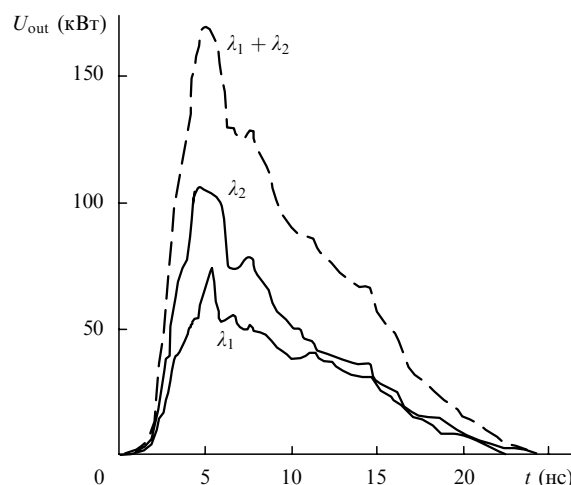


Рис.2. Осциллограммы импульсов излучения на выходе двухпроходного усилителя для различных длин волн.

Табл.1.

φ/φ_d	δ (%)	
	На выходе задающего генератора	На выходе усилителя
1.0	12	–
1.25	26	13
1.87	40	19
2.3	65	26
3.12	75	41
4.69	90	60
7.18	95	88
10.0	100	94

преобразование излучения двухпроходного усилителя на парах меди. Мощность УФ излучения с $\lambda = 0.271$ мкм составила 1.1–1.2 Вт.

Поперечное сечение пучка УФ излучения на выходе из кристалла имело овальную форму с малой осью в главной плоскости кристалла. Это позволило оценить ту часть угла расходимости входящего в кристалл пучка излучения, в пределах которой происходит эффективное нелинейное преобразование. Этот угол составил ~ 0.8 мрад, что в два раза больше, чем угол расходимости в схеме преобразования с использованием лазера на парах меди с неустойчивым резонатором (см., напр., [6]). Увеличилась и средняя мощность УФ излучения. Все улучшения в данном эксперименте мы связываем, в основном, с повышением пиковой мощности импульсов излучения на длинах волн λ_1, λ_2 и со сближением формы импульсов на этих длинах волн в результате применения схемы двухпроходного усилителя.

По всей вероятности, достигнутые выходные параметры далеки от тех, которые можно получить в данной схеме эксперимента. Это связано со следующими причинами.

Во-первых, в экспериментах мы не избавились от многопучковой структуры излучения на выходе двухпроходного усилителя, и расходимость преобразованного излучения на входе в кристалл осталась значительной. Это связано с тем, что в данной работе в задающем генераторе отсутствовала пространственная фильтрация. В табл.1 представлены доли средней мощности δ , приходящиеся на компоненты лазерного пучка с разной относительной расходимостью φ/φ_d (здесь φ_d – предельная дифракционная расходимость пучка). Видно, что на выходе задающего генератора в компоненте с дифракционной расходимостью ($\varphi/\varphi_d = 1$) сосредоточено всего 12 % мощности (~ 0.02 Вт). При таком входном сигнале режим работы двухпроходного усилителя еще далек от насыщения (см. [11, 13]) и выходная мощность не очень велика.

Во-вторых, расходимость пучка задающего генератора после двух проходов через усилительный каскад (с выключенным источником возбуждения активной среды) значительно возросла. На выходе из усилителя

значения δ для пучков с малой расходимостью уменьшались в 5–6 раз по сравнению с входными значениями. Отдельные исследования показали, что это связано с плохим качеством оптических элементов, используемых в двухпроходной схеме усилительного каскада (астигматизм, различные аберрации). Частичное устранение астигматизма оптической системы привело к уменьшению расходимости пучка на выходе усилителя и к увеличению мощности УФ излучения в 1.7 раза по сравнению с предыдущим результатом, полученным в [10]. Однако это еще не предел, т. к. для компонент пучка с малой расходимостью (см. табл.1) значения δ на выходе усилителя по-прежнему в 2–3 раза меньше, чем на входе, поэтому применение качественных оптических элементов может существенно улучшить результат.

Дальнейшая оптимизация параметров импульсов излучения на выходе многопроходного усилителя может быть обусловлена использованием более мощного задающего генератора и выделением из его излучения дифракционного пучка с достаточно высокой амплитудой импульса. Увеличение числа проходов пучка в многопроходном усилителе и уменьшение потерь света в тех элементах оптического тракта, через которые пучок проходит многократно, также будут способствовать росту пиковой мощности импульса излучения на входе в кристалл. Все это, на наш взгляд, позволит значительно повысить оптический КПД преобразования в нелинейном кристалле и мощность УФ излучения.

Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность создания эффективных источников УФ излучения на базе лазерных многопроходных усилителей на парах меди с повышенной пиковой мощностью импульса излучения. Однако для этого необходима доработка системы, цель которой – уменьшение расходимости излучения на выходе многопроходного усилителя и снижение потерь в оптическом тракте.

1. Piper J.A. In: *Pulsed Metal Vapour Lasers* (Dordrecht–London: Kluwer Acad. Publ., 1996, p.277).
2. Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г., Раутиан С.Г., Шалыгин А.М. *Квантовая электроника*, **4** (6), 1325 (1977).
3. Carman R.J. *Opt. Commun.*, **119**, 415 (1995).
4. Coutts D.W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **31** (2), 330 (1995).
5. Карпухин В.Т., Маликов М.М. *ЖТФ*, **70** (4), 87 (2000).
6. Беляев В.П., Зубов В.В., Исаев А.А., Лябин Н.А. и др. *Квантовая электроника*, **12** (1), 74 (1985).
7. Карпухин В.Т., Конев Ю.Б., Маликов М.М. *Квантовая электроника*, **25** (9), 809 (1998).
8. Карпухин В.Т., Маликов М.М. Свид. РФ на полезную модель № 22590 по заявке № 2001129954 от 08.11.01. *БИПМ*, № 10 (2002).
9. Карпухин В.Т., Маликов М.М. Свид. РФ на полезную модель № 19612 по заявке № 2001110644 от 24.04.01. *БИПМ*, № 25 (2002).
10. Карпухин В.Т., Маликов М.М. *Тезисы докл. симп. «Лазеры на парах металлов»* (Ростов-на-Дону, 2002, с.29).
11. Карпухин В.Т., Конев Ю.Б., Маликов М.М. *Изв. АН. Сер. физич.*, **66** (7), 934 (2002).
12. Карпухин В.Т., Маликов М.М. *Тезисы докл. симп. «Лазеры на парах металлов»* (Ростов-на-Дону, 2002, с.27).
13. Карпухин В.Т., Маликов М.М. *Квантовая электроника*, **33** (5), 411 (2003).