

Усилительная система перестраиваемого лазерного излучения для лазерного разделения изотопов

И.С.Григорьев, А.Б.Дьячков, В.П.Лабозин, С.М.Миронов, С.А.Никулин, В.А.Фирсов

Описана усилительная система перестраиваемого излучения на основе лазеров на красителе, предназначенная для экспериментов по лазерному разделению изотопов в атомном паре (АВЛИС). Система, накачиваемая лазерами на парах меди, состоит из задающего генератора и усилительного каскада, в который входят предусилитель и три основных усилителя, работающих в режиме насыщения. Задающим генератором каскада является лазер на красителе с дифракционной решёткой, работающей в режиме скользящего падения. В каскаде используется продольная накачка активной среды. Эффективность основных усилителей каскада равна 50 % – 55 %. Средняя мощность лазерного излучения на выходе из конечного усилителя составляет 100 Вт.

Ключевые слова: лазерное разделение изотопов, технология АВЛИС, лазерный усилитель, продольная накачка.

1. Введение

Перестраиваемое лазерное излучение, используемое для разделения изотопов в атомных парах (технология АВЛИС), должно обладать характеристиками, которые обеспечивают высокую изотопическую селективность и производительность процесса. Основными условиями при получении необходимой селективности являются точность настройки по длине волны на нужный изотоп, её долговременная стабильность и оптимальная спектральная ширина излучения, которая наилучшим образом совпадает со спектром поглощения избранного изотопа. Производительность процесса разделения зависит от пространственной однородности и расходимости пучка света, которые при больших длинах обрабатываемого пара обеспечивают его пространственное перекрытие с лазерным излучением, а также от мощности излучения – главного условия эффективной ионизации атома в элементарном акте взаимодействия.

Для генерации перестраиваемого излучения, которое удовлетворяет этим требованиям, в установках АВЛИС используются лазерные системы, состоящие из усилительных каскадов на основе лазеров на красителях, накачиваемых лазерами на парах меди (ЛПМ). В наиболее мощных системах средняя мощность накачки достигает нескольких киловатт, а мощность перестраиваемого излучения – 2.5 кВт [1–3].

В настоящей статье рассмотрен один из усилительных каскадов лазерной системы установки АВЛИС, который по мощности накачки и выходной мощности перестраиваемого излучения занимает промежуточное положение между самыми мощными системами и системами сравнительно небольшой мощности [4–6]. Особенностью данного усилительного каскада является приме-

нение продольной накачки усилителей [7]. Различные варианты продольной накачки численно исследовались также в работе [8]. Традиционно же в лазерных системах АВЛИС для накачки генераторов и усилителей используется поперечная накачка. Считается, что в условиях поперечной накачки по сравнению с продольной возможно снижение лучевой нагрузки на окна кювет усилителей.

Предпочтение в пользу поперечной накачки сделано, видимо, и в связи с тем, что, как показано в широко цитируемой работе [7], эффективность преобразования излучения накачки в продольном случае ниже, чем в поперечном, за счёт относительно большей потери квантов накачки в результате их поглощения с верхнего лазерного уровня. Однако в тех лазерных средах, где этот эффект мал, продольная накачка может быть такой же эффективной, как и поперечная. Кроме того, с ее помощью совмещать лучи накачки с усиливаемым лучом в активной области намного проще. В нашем случае продольная накачка позволила создать простую, компактную и легко юстируемую линейку усилителей. Настоящая работа является продолжением работ по развитию лазерного комплекса АВЛИС в РНЦ «Курчатовский институт» [9].

2. Схема накачки

Усилительная система построена по традиционной схеме: задающий генератор, предусилитель и основные усилители, работающие в режиме насыщения (рис.1). При общей мощности накачки на выходе системы ЛПМ 300–320 Вт мощность, направляемая на накачку задающего генератора и каскада усиления, составляет 220–230 Вт (частота повторения импульсов света 10 кГц, длительность импульсов 25 нс). Транспортировка излучения накачки к кюветам с красителями осуществляется посредством полупрозрачных и глухих диэлектрических зеркал. Всего в установке используется около 30 диэлектрических зеркал, на которых теряется до 10 Вт мощности накачки. Основные, самые мощные усилители накачиваются жёлтыми компонентами излучения медных лазе-

И.С.Григорьев, А.Б.Дьячков, В.П.Лабозин, С.М.Миронов, С.А.Никулин, В.А.Фирсов РНЦ «Курчатовский институт», Россия, 123182 Москва, пл. Курчатова, 1; e-mail: mironov@imp.kiae.ru

Поступила в редакцию 11 марта 2004 г.

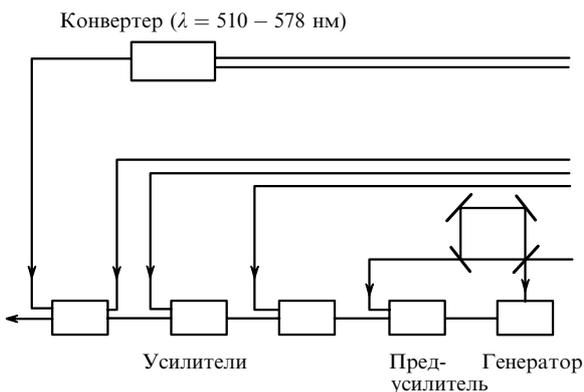


Рис.1. Схема накачки лазерной системы.

ров (578 нм), а генератор и предусилитель – одной из зелёных компонент (510 нм). Разделение исходных пучков излучения ЛППМ на различные спектральные компоненты производится дихроичными зеркалами, за исключением одного пучка. Этот пучок, содержащий зелёную и жёлтую компоненты излучения, полностью конвертируется в излучение с $\lambda = 578$ нм в специальном конвертере [10]. Жёлтая компонента излучения после конвертера также используется для накачки усилительной линии. Преимущественное использование жёлтой компоненты связано с тем, что она эффективнее, чем зелёная, преобразуется в излучение красной области спектра (630 – 640 нм), которое мы используем в процессах АВЛИС. Наиболее эффективными красителями для данного спектрального диапазона оказались красители Cresyl Violet (накачка с $\lambda = 578$ нм) и DCM ($\lambda = 510$ нм). В экспериментах применяются этанольные растворы этих красителей.

3. Задающий генератор

Задающий генератор представляет собой модификацию лазера с дифракционной решеткой, работающей в режиме скольжения падения [11, 12] (рис.2).

Накачка задающего генератора производилась в поперечном направлении к оптической оси двумя импульсами с задержкой между ними 10 нс. Это позволяет увеличить длительность импульса задающего генератора до 20 нс, для того чтобы максимально согласовать длительность импульса усиливаемого пучка с длительностью импульса накачки последующих усилителей. По сравнению с [12] в резонатор лазера дополнительно введены два оптических элемента – кварцевая гиротропная пластинка 3 (расположена между кюветой лазера и призмным телескопом) и коллимирующая цилиндрическая линза 5 (находится между дифракционной решёткой и телескопом).

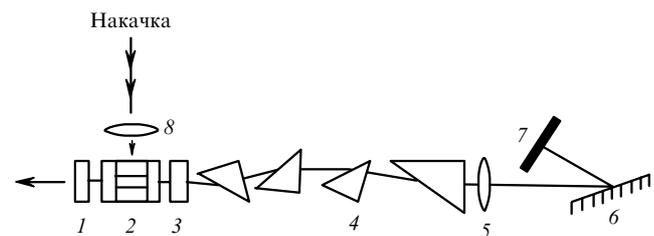


Рис.2. Принципиальная схема задающего генератора: 1 – выходное зеркало; 2 – кювета; 3 – гиротропная пластинка; 4 – призмный телескоп; 5, 8 – цилиндрические линзы; 6 – дифракционная решетка; 7 – глухое зеркало.

Кварцевая пластинка предназначена для того, чтобы, с одной стороны, согласовывать в активной среде направление (вертикальное) поляризации накачки и генерируемого света [13] и, с другой стороны, обеспечивать горизонтальное направление поляризации для пучка, распространяющегося через телескоп и дифрагирующего на решетке, поскольку пропускание телескопа и эффективность дифракции на решетке в лазере данной конструкции максимальны при горизонтальном направлении поляризации. Использование пластинки и линзы позволило поднять КПД лазера приблизительно в два раза. Настройка на заданную длину волны осуществлялась поворотом глухого зеркала 7 с помощью шагового двигателя, управляемого компьютером. Механизм поворота обеспечивал минимальный контролируемый шаг перестройки 0.005 Å.

Кювета генератора (размеры рабочей зоны кюветы 10 × 0.35 мм) изготовлена из кварцевого стекла по технологии глубокого оптического контакта. Длина резонатора лазера равна 35 см. В лазере реализуется многомодовый режим генерации, и ширина спектральной линии излучения, усреднённая по многим импульсам генерации, составляет 1.5 ГГц. При использовании вместо глухого зеркала дифракционной решётки, работающей в режиме автоколлимации, ширина спектральной линии генерации может быть уменьшена до 1 ГГц. Измерения спектральной ширины лазерной линии производились с помощью сканирующего интерферометра Фабри – Перо (область свободной дисперсии 7.5 ГГц, резкость 200). Необходимо отметить, что при дальнейшем прохождении каскада усиления импульс уширялся примерно на 10%. Мощность излучения задающего генератора составляла 500 – 600 мВт, выходное излучение было практически полностью линейно поляризовано (направление поляризации – вертикальное).

4. Усилители

Излучение задающего лазера фокусировалось в каждый следующий усилитель сферическими линзами. Совпадение во времени импульса накачки и импульса опорного излучения в кюветах усилителей осуществлялось с помощью линий задержки. К сожалению, из-за временной нестабильности фронта импульса накачки точность совпадения не могла быть лучше 2 нс. Излучение накачки фокусировалось сферическими линзами и поступало в усилители в продольном направлении (рис.3). Сведение опорного пучка и пучка накачки в кюветах усилителей осуществлялось с помощью призмы, установленной в специальном юстировочном узле (зеркало 3). Согласование диаметров пучков в активной зоне достигалось

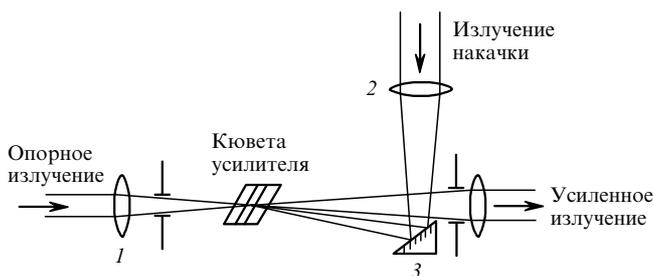


Рис.3. Схема продольной накачки усилителя: 1, 2 – формирующие линзы; 3 – призма-зеркало.

простым перемещением линз 1 и 2 вдоль соответствующих лазерных пучков.

Отсутствие боковых окон в поперечном направлении существенно упростило и конструкцию усилительных кювет. Кюветы предусилителя и основных усилителей изготовлены из нержавеющей стали и представляют собой сварную унифицированную сборку. Канал, по которому движется поток красителя, состоит из сопла, плоской части и диффузора. Сменяемые окна кюветы сделаны из высококачественного кварцевого стекла толщиной 6 мм и диаметром 20 мм и просветлены в диапазоне длин волн 510–650 нм. Общий вид кюветы представлен на рис.4.

Для мощных лазерных усилителей существенное значение имеет скорость прокачки раствора красителя через усилительную кювету. Она должна быть такой, чтобы происходила полная смена активного объёма между импульсами света. Для этой цели нами был разработан блок прокачки, основными элементами которого являются центробежный насос и фильтр тонкой (0.2 мкм) очистки раствора. Блок прокачки обеспечивает на входе в кювету давление ~ 3 кг/см². Для подавления кавитации давление на выходе из кюветы поддерживается равным 1–1.3 кг/см². Расход раствора красителя, прокачиваемого через кювету, составляет 25 л/мин, при этом скорость раствора в плоской части канала достигает 20 м/с. Несмотря на довольно высокую скорость, которая соответствует турбулентному характеру движения жидкости (число Рейнольдса $\sim 6 \times 10^4$), геометрия канала обеспечивает хорошее гидродинамическое качество потока, необходимое для получения оптической однородности активной среды. Общий объём красителя, циркулирующего в системе, равен 30 л.

Накачка кювет предусилителя и основных усилителей системы, за исключением конечного, производится с одной стороны – навстречу усиливаемому пучку. Конечный усилитель каскада накачивается двумя пучками с разных сторон. Для получения максимальной мощности в одном из этих пучков исходный пучок накачки, содержащий зелёную и жёлтую компоненты, фокусируется в отдельную кювету, где компонента с $\lambda = 510$ нм конвертируется в компоненту с $\lambda = 578$ нм. Механизм конверсии заключается в том, что в соответствующей среде зелёная компонента создаёт инверсию, а жёлтая её снимает, усиливаясь при этом. Наиболее эффективное преобразование (до 85 % от исходной мощности) происходит при исполь-

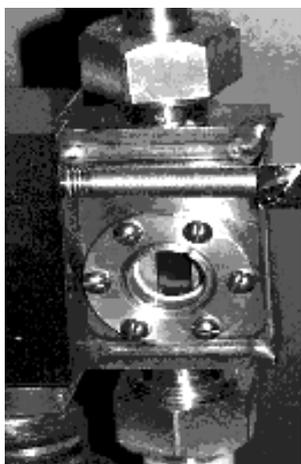


Рис.4. Кювета усилителя.

зовании в качестве активной среды лазера красителя Ruyromethene-597. Мощность излучения после такого конвертера составляет 100 Вт. Затем это излучение коллимируется и направляется в конечный усилитель навстречу усиливаемому пучку. Эффективность конечного усилителя каскада равняется 55 %. Наибольшая мощность, полученная на выходе из него, достигает 102 Вт. Таким образом, общая эффективность всей системы составляет приблизительно 45 %. Её основные параметры приведены ниже.

Мощность накачки (Вт)	220–230
Выходная мощность перестраиваемого излучения (Вт)	100
Частота импульсов излучения (кГц)	10
Длительность импульсов (нс)	20–25
КПД основных усилителей (%)	50–55
Диапазон длин волн (нм)	630–640
Спектральная ширина излучения (ГГц)	1.5–2
Нестабильность длины волны за 8 ч (ГГц)	< 1
Уровень фона (%)	3
Примесь горизонтальной поляризации (%)	5

Во время работы системы мощность излучения контролируется с помощью фотодиода, в который попадает остаточное излучение, прошедшее через расположенное в выходном пучке поворотное зеркало. Запись и отображение мощности производится компьютером в режиме реального времени. На выходе из линейки усилителей с помощью телескопа формируется пучок диаметром 20–30 мм; для его транспортировки в ионизационную камеру используются зеркала с плоскостностью менее $\lambda/10$. Расходимость пучка составляет ~ 0.1 мрад и не превышает удвоенной дифракционной расходимости. Для оперативного контроля однородности лазерного излучения мы используем фотографии лазерного пятна, полученные с помощью цифровой фотокамеры. Цифровое изображение анализируется специальной компьютерной программой, которая позволяет получать наглядную графическую и цифровую информацию о распределении интенсивности в пятне (рис.5).

Основными факторами, определяющими качество выходного излучения, являются однородность излучения накачки и степень перекрытия его с усиливаемым пучком. Это перекрытие зависит, разумеется, от тщательности юстировки, а также от механической стабильности всей лазерной системы (в частности, от неизменности положения пучков накачки). Для повышения стабильности перспективным представляется использование для транспортировки излучения ЛПМ оптоволоконной техники. Заметим, что оптоволоконно позволяет повысить пространственную однородность излучения накачки.



Рис.5. Фотография лазерного пятна и качественное распределение интенсивности по его диаметру с пространственным разрешением ~ 1 % на входе в ионизационную камеру (расстояние до оконечного усилителя 10 м).

5. Выводы

Таким образом, в настоящей работе описана усиленная система, несколько лет работающая в составе опытной установки по разделению изотопов. Проведенные эксперименты продемонстрировали стабильность её спектральных параметров. Эксперименты также показали, что изменения мощности усилительной системы связаны главным образом с нестабильностью параметров ЛПМ, но не превышают 10 % от номинального значения. Следует отметить, что мощность накачки, которой мы располагаем на выходе системы ЛПМ, при необходимом перераспределении и использовании соответствующих лазерных красителей позволит получить перестраиваемое излучение с мощностью ~ 100 Вт в спектральном диапазоне 550–640 нм.

Авторы выражают благодарность А.Б.Белоусову и В.И.Суслову за создание и обслуживание комплекса ЛПМ, А.В.Майорову – за программу обработки цифровых фотографий лазерного пятна.

1. Bass I.L., Bonanno R.E., Hackel R.P., Hammond P.R. *Appl. Opt.*, **31** (33), 6993 (1992).
2. Konagai C., Kimura H., Fukasava T., Seki E., Abe M., Mori H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3886**, 243 (2000).
3. Lompré L.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3886**, 232 (2000).
4. Кострица С.А., Мишин В.А. *Квантовая электроника*, **22**, 542 (1995).
5. Держиев В.И., Кузнецов В.А. и др. *Квантовая электроника*, **25**, 771 (1998).
6. Бохан П.А., Закревский Д.Е. и др. *Квантовая электроника*, **31**, 132 (2001).
7. Hargrove R.S., Kan T. *IEEE J. Quantum Electron.*, **16**, 1108 (1980).
8. Takehisa K. *Appl. Opt.*, **33** (27), 6360 (1994).
9. Григорьев И.С., Дьячков А.Б., Лабозин В.П., Миронов С.М., Михайлов И.В., Фирсов В.А. *Опт. ж.*, **9**, 74, (1995).
10. Дьячков А.Б., Лабозин В.П. *Квантовая электроника*, **32**, 825 (2002).
11. Dupre P. *Appl. Opt.*, **26** (5), 860 (1987).
12. Григорьев И.С., Миронов С.М., Михайлов И.В. *Препринт РНЦ «Курчатовский институт» № 5860/14* (М., 1995).
13. Михайлов И.В. *Квантовая электроника*, **22**, 1213 (1995).