

Увеличение мощности генерации на атомных и ионных переходах химических элементов

В.М.Климкин, В.Г.Соковиков

Исследован способ увеличения мощности импульсной генерации на атомных и ионных переходах химических элементов, полученной путем преобразования УФ излучения эксимерных лазеров в кюветах с парами металлов. При этом способе часть УФ излучения, прошедшая через кювету с парами металла, используется для накачки раствора красителя таким образом, что кювета-преобразователь с парами металла является задающим генератором, а кювета с раствором красителя – усилителем. Исследования выполнены на примере усиления слабых спектральных компонентов преобразованного в парах ртути и бария излучения ХеСI-лазера. В усилительном каскаде применена продольная накачка красителя и использована схема подавления самовозбуждения. В результате подбора красителей найдено, что для усиления лазерной линии ртути с длиной волны $\lambda = 546.1$ нм близким к оптимальному является спиртовой раствор уранина, а для усиления лазерных линий бария с $\lambda = 533$ и 648.2 нм наилучшие результаты достигнуты при использовании спиртовых растворов родамина 6G и оксазина 17 соответственно. Зарегистрировано десятикратное увеличение мощности генерации на переходе ртути с $\lambda = 546.1$ нм и почти двадцатипятикратное – на переходах бария с $\lambda = 533$ и 648.2 нм.*

Ключевые слова: лазеры на парах металлов, лазеры на красителях, лазеры на парах ртути и бария, преобразование УФ лазерного излучения.

1. Введение

Источники лазерного излучения, резонансного атомным спектральным переходам, представляют интерес, во-первых, для изучения свойств высоковозбужденных состояний атомных частиц, таких как радиационные времена жизни, константы тушения, сечения фотоионизации, а во-вторых, для наблюдения и исследования процессов передачи возбуждения в атомно-молекулярных реакциях и т. д.

Известен способ создания таких источников, основанный на использовании лазеров на красителях. Однако лазеры на красителях, пригодные для выполнения указанных выше задач, являются многокаскадными, довольно сложными оптико-механическими устройствами, так как требуют введения в резонатор лазера дополнительных устройств для сужения спектра, поддержания стабильности длины волны излучения, подавления фоновое излучения и т. д.

Новые возможности решения указанных выше задач открывают наблюдаемые в ряде работ эффекты генерации (преобразования) лазерного излучения в парах химических элементов при распространении в них импульсного лазерного УФ излучения [1–6].

В настоящей работе проведены исследования возможности увеличения импульсной мощности лазерного излучения на атомной линии ртути с $\lambda = 546.1$ нм и атомных линиях бария с $\lambda = 533$ и 648.2 нм, которое генерируется при распространении УФ излучения в парах этих

элементов. Такие лазерные линии лежат в видимой области спектра и представляют интерес как объекты исследования возможности увеличения мощности излучения на этих линиях путем его усиления в усилителях на основе органических красителей.

2. Условия наблюдения генерации лазерного излучения в парах химических элементов и свойства излучения

Распространение квазирезонансного, а в общем случае – мощного нерезонансного лазерного излучения в парах химических элементов сопровождается интересными физическими явлениями преобразования исходного излучения в другие спектральные диапазоны. В частности, прохождение такого излучения через столб паров химических элементов часто сопровождается электронным вынужденным комбинационным рассеянием (ЭВКР) [7]. При наличии квазирезонансов ЭВКР становится высокоэффективным процессом. При распространении в столбе паров металлов коротковолнового излучения, например импульсного УФ излучения эксимерных лазеров, спектр преобразованного излучения, кроме мощных компонентов вынужденного электронного рассеяния, содержит большое число слабых спектральных компонентов, обусловленных вынужденными, а возможно, и сверхизлучательными по Дике [8, 9], переходами между инвертированными состояниями атомных частиц [1–6]. Исследования временных характеристик преобразованного излучения показали, что импульсы преобразованного атомами или ионами излучения наблюдаются, как правило, на переднем фронте импульса УФ накачки.

При наличии квазирезонанса в спектре атома распространение лазерного УФ излучения через протяженный столб паров приводит к созданию протяженной среды,

В.М.Климкин, В.Г.Соковиков. Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, 634021 Томск, Академический просп., 1; e-mail: klimkin@asd.iao.ru

Поступила в редакцию 22 мая 2006 г., после доработки – 15 августа 2006 г.

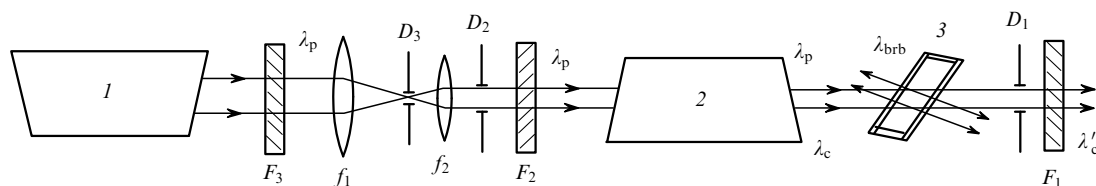


Рис.2. Оптическая схема экспериментальной установки:

1 – лазер накачки; 2 – кювета с парами металла (преобразователь); 3 – кювета с красителем; $F_1 - F_3$ – оптические фильтры; $D_1 - D_3$ – диафрагмы; f_1, f_2 – линзы; $\lambda_p = 308$ нм – излучение накачки; λ_c – преобразованное излучение; λ_{brb} – широкополосное излучение красителя; λ'_c – излучение, усиленное в красителе.

металла, инжестировалась далее в кювету с раствором красителя 3. Не использованная в парах часть УФ излучения эксимерного лазера направлялась в кювету с красителем соосно с инжеструемым излучением.

Исследуемый раствор красителя помещался в кварцевую кювету толщиной 1 см. Окна кюветы были наклонены к оптической оси системы для предотвращения самовозбуждения усилителя и пространственного разделения усиленного излучения и излучения красителя при его возможном самовозбуждении. Кювета не имела системы прокачки, поэтому частота следования импульсов накачки не могла превышать 2 Гц, а энергия импульсов накачки – 10 мДж. Концентрация красителя подбиралась экспериментально в пределах, типичных для усилительных каскадов лазеров на красителях.

Исходное и прошедшее через краситель излучение анализировались по интенсивности, временной зависимости и спектральному составу.

В частности, с целью выявления влияния процесса усиления на спектральный состав инжеструемого компонента были выполнены измерения спектральных ширин инжестрированного и усиленного излучений. Для этой цели был использован интерферометр Фабри–Перо ИТ-51-30 с базой 8 мм, скрещенный с монохроматором МДР-3. Прошедшее через интерферометр излучение проецировалось на щель монохроматора объективом МТО-1000. Сканирование спектра осуществлялось постановкой дополнительной узкой диафрагмы поперек входной щели монохроматора и ее перемещением вдоль щели. Излучение, прошедшее через интерферометр, диафрагму и монохроматор, регистрировалось ФЭУ. Импульсы ФЭУ интегрировались стробоскопической системой регистрации сигналов «Брукдил» и записывались на самописец. Спектральное разрешение такой схемы регистрации контуров линий генерации контролировалось по записям спектра излучения одночастотного He–Ne-лазера.

Для исследования спектрального состава излучения паров в широком диапазоне длин волн использовалась только часть системы регистрации (монохроматор МДР-3 с указанной системой «Брукдил»).

Временные характеристики излучения измерялись при помощи коаксиального фотоэлемента или лавинного фотодиода ЛФД-2 и регистрировались на скоростном осциллографе.

5. Результаты опытов и их обсуждение

Свойства предложенной схемы исследовались на примере усиления спектральных компонентов преобразованного в парах ртути и бария излучения ХеCl*–лазера. Наиболее подробно исследовалось усиление излучения длинноволнового компонента триплета ртути ($\lambda = 546.1$ нм). Этот компонент удобен тем, что для его усиления

существует целый ряд эффективных органических красителей. Кроме того, конструкции кювет для создания паров ртути проще, чем конструкции кювет, предназначенных для создания паров высокотемпературных металлов.

Для исследования усиления излучения ртути с $\lambda = 546.1$ нм мы выбрали спиртовой раствор уранина как наиболее подходящий из числа имеющихся в наличии. Спектральное положение полос поглощения и люминесценции уранина и подлежащей усилению линии ртути Hg ($^3S_1 - ^3P_2$) представлены на рис.3, а и б. На рис.3, б показано также спектральное положение линии накачки и линий триплета ртути. Как видно из рис.3, длинноволновый компонент триплета Hg ($^3S_1 - ^3P_2$ с $\lambda = 546.1$ нм) лежит в полосе усиления уранина, коротковолновые ($^3S_1 - ^3P_1$ с $\lambda = 435.8$ нм и $^3S_1 - ^3P_0$ с $\lambda = 404.7$ нм) – в полосе поглощения. Поэтому усиление реализуется только для длинноволнового компонента. Коротковолновые компоненты поглощаются в растворе уранина. Для синей и фиолетовой линий излучения ртути, которые, так же как и зеленая, инжестрируются в кювету с красителем, спиртовой раствор уранина является отсекающим светофильтром.

Исследование спектрального состава излучения на выходе кюветы с красителем показало, что, несмотря на принятые меры, наряду с усиленным инжеструемым излучением на $\lambda'_c = 546.1$ нм в спектре присутствует ши-

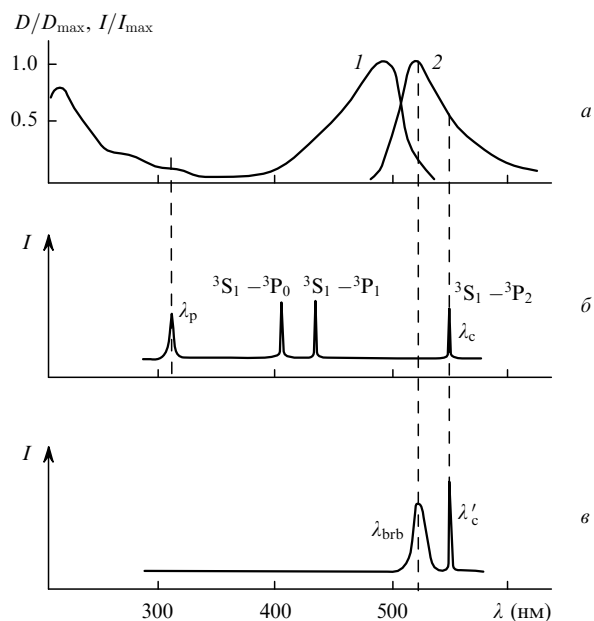


Рис.3. Нормированные спектры поглощения $D(\lambda)$ (1) и люминесценции $I(\lambda)$ (2) красителя уранина (а), спектральный состав излучения, инжестрированного в краситель (б), и спектр излучения, усиленного в красителе (в); $D(\lambda)$ – оптическая плотность.

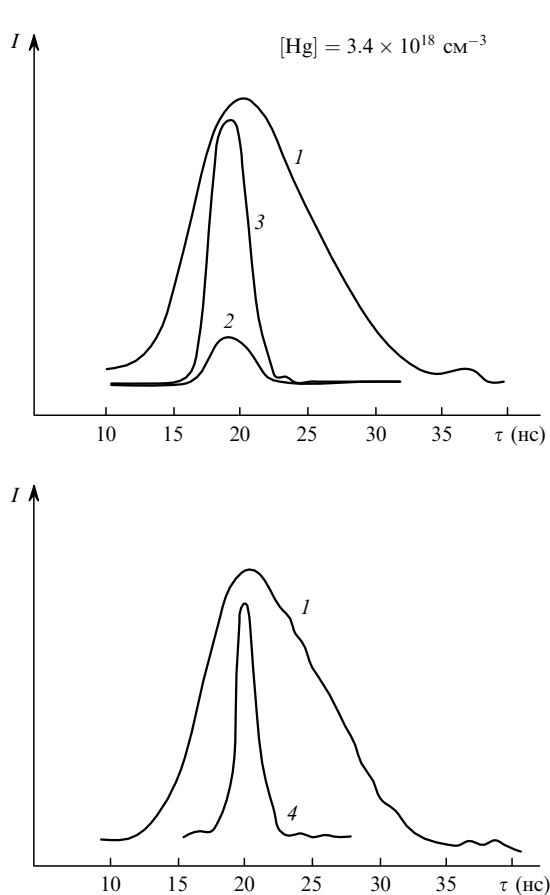


Рис.4. Осциллограммы импульсов накачки (1), инжектируемого излучения с $\lambda_c = 546.2$ нм (2), излучения с $\lambda'_c = 546.1$ нм, усиленного в кювете с красителем (3), и широкополосного излучения красителя $\lambda_{brb} = 530$ нм (4).

рокополосное лазерное излучение с максимумом $\lambda_{brb} = 530$ нм (см. рис.3,б). Было установлено, что при повороте кюветы с красителем вокруг оси, перпендикулярной направлению распространения излучения накачки, широкополосная генерация всегда наблюдается в направлении нормали к окнам кюветы (см. рис.2), а направление распространения усиленного компонента сохраняется, испытывая лишь параллельные смещения от оси накачки. Это обстоятельство позволяет пространственно разделить оба компонента и исследовать их спектральные и временные свойства.

На рис.4 представлены осциллограммы импульсов накачки, инжектируемого компонента преобразованного в парах ртути излучения и импульса излучения, усиленного в кювете с красителем. Эти данные соответствуют энергии накачки $E_p = 4.3$ мДж и энергии инжектируемого излучения $E_c = 3$ мкДж. Сравнение амплитуд инжектируемого и усиленного импульсов показали, что, несмотря на наличие самозбуждения усилителя, имеет место десятикратное усиление интенсивности инжектируемого излучения. Были также установлены две особенности процесса усиления: длительность импульса широкополосной генерации красителя меньше длительности импульса излучения усиленного компонента; широкополосное излучение появляется с задержкой в несколько наносекунд относительно усиленного компонента. Повидимому, благодаря этим особенностям широкополосная генерация не составляет существенной конкуренции процессу усиления. Однако такая конкуренция может



Рис.5. Интерферограммы лазерной линии ртути ($\lambda = 546.1$ нм), усиленной в красителе (1) и инжектированной в краситель (2), а также линии генерации He-Ne-лазера (3). Интенсивности приведены в произвольных единицах.

иметь место, например, при более коротких импульсах УФ накачки. В этом случае необходимо принимать более эффективные меры для подавления широкополосной генерации.

Известно, что общим свойством радиационного распада сильно инвертированных (с полным усилением на проход, превышающим 20) переходов [10] является наличие нескольких сверхизлучающих компонентов, распределенных в пределах спектрального интервала, определяемого типом уширения исследуемого перехода. При этом интенсивности таких компонентов хаотически изменяются от импульса к импульсу. На рис.5 представлены интерферограммы инжектированного в краситель и усиленного импульсов излучения длинноволнового триплета ртути с $\lambda = 546.1$ нм, из которых видны различия в интенсивностях компонентов тонкой структуры инжектируемого и усиленного излучений. Эти различия обусловлены тем, что наша система записи интерферограмм не позволяла одновременно контролировать спектральный состав каждого отдельного инжектируемого и усиленного импульсов. Поэтому приведенные на рис.5 интерферограммы не иллюстрируют истинного отношения интенсивностей компонентов, так как они записаны в разные моменты времени, а показывают только, что дополнительное усиление в красителе происходит, по крайней мере, в пределах всего спектрального контура инжектируемого излучения.

Аналогичные исследования были выполнены с двумя компонентами преобразованного в парах бария (при разных давлениях буферного газа гелия) излучения XeCl^* -лазера. Для усиления стимулированного излучения на резонансном переходе бария с $\lambda = 553$ нм (рис.6) и атомном переходе с $\lambda = 648.2$ нм использовались растворы красителей родамина 6G и оксазина 17 соответственно. В

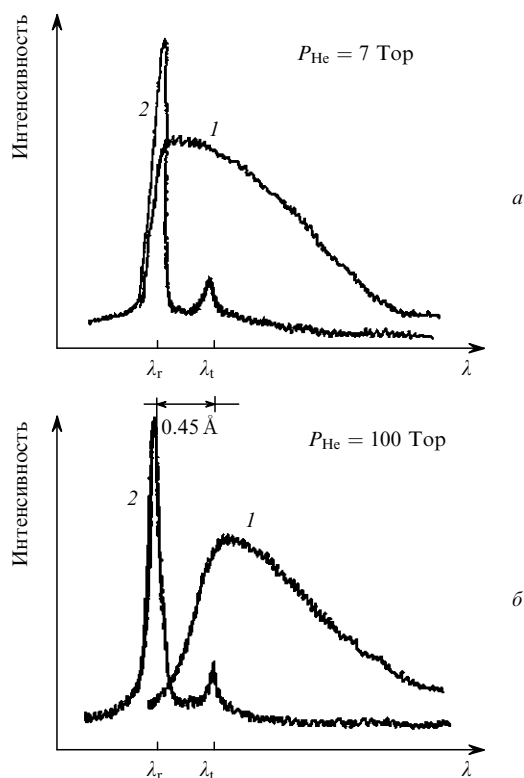


Рис.6. Спектры лазерного излучения на резонансном переходе бария ($\lambda = 533$ нм) (1) при двух давлениях гелия, а также спектр резонансной линии бария (λ_r), наблюдаемый в лампе с полым катодом (2); λ_t – длина волны спектральной линии, принадлежащей триплетному переходу атома бария.

первом случае достигалось более чем десятикратное усиление инжектируемого сигнала, во втором случае – почти двадцатипятикратное. Последний результат свидетельствует о том, что большое усиление достигается при совпадении спектра инжектируемого излучения с максимумом полосы усиления красителя. С этой точки зрения выбор красителя родамин 6G для усиления резонансной линии бария не является удачным, так как инжектируемый компонент попадает на коротковолновое крыло полосы усиления родамина 6G. (Лучшие результаты по усилению излучения резонансной линии бария с $\lambda = 533$ нм следует ожидать при использовании красителя флуоресцин 27.) Усиление излучения атомарного бария сопровождалось также широкополосной генерацией, которая возникала в областях спектра, близких к максимумам полос усиления используемых красителей, а именно, $\lambda_{brb} = 570$ нм для родамина 6G и 645 нм для оксазина 17.

6. Заключение

Таким образом, на примере усиления слабых лазерных линий ртути и бария в растворах органических кра-

сителей показано, что приставка к эксимерному лазеру, состоящая из кюветы с парами металла и кюветы с раствором красителя, позволяет получать стимулированное излучение достаточно высокой интенсивности на большом числе атомных и ионных переходов. Возможность дальнейшего увеличения мощности излучения на таких переходах без сомнения имеется и лежит на пути совершенствования конкретных схем усиления. В частности, весьма удачным может оказаться переход от продольной схемы накачки к поперечной накачке нескольких кювет-усилителей с красителем. Такой подход позволит использовать готовые каскады усиления стандартных систем лазеров на красителях с накачкой излучением эксимерных лазеров, в которых узел задающего генератора на красителе вместе с системой спектральной селекции заменен на кювету с парами нужного изотопа металла в качестве одночастотного задающего генератора.

В заключение мы хотели бы еще раз обратить внимание на простоту описанного способа получения лазерного излучения, привязанного по спектру к атомным и ионным линиям химических элементов. Он не требует применения внутрирезонаторных дисперсионных элементов высокого разрешения, систем контроля и стабилизации частоты. Например, для ряда практических задач особый интерес представляет получение генерации на резонансных линиях атомов и ионов некоторых металлов, стабильной по спектральной частоте. Эта задача может быть решена на основе результатов данной работы при использовании сверхсветимости на резонансных линиях атомов металлов, наблюдаемой при фотодиссоциации УФ лазерным излучением паров галогенидов металлов [11].

1. Клишкин В.М., Соковиков В.Г., Федорищев В.Н. *Тез. докл. Всесоюз. совещ. «Инверсная населенность и генерация на переходах в атомах и молекулах»* (Томск, 1986, ч. I, с. 175–176).
2. Клишкин В.М., Прокопьев В.Е., Соковиков В.Г. *Тез. докл. Всесоюз. конф. по когерентной и нелинейной оптике* (Ереван, 1982, ч. I, с. 76–77).
3. Верховский В.С., Клишкин В.М., Прокопьев В.Е., Соковиков В.Г., Тарасенко В.Ф., Федоров А.И. *Квантовая электроника*, **9**, 2151 (1982).
4. Клишкин В.М., Соковиков В.Г., Федорищев В.Н. *Тез. докл. Всесоюз. совещ. «Инверсная населенность и генерация на переходах в атомах и молекулах»* (Томск, 1986, ч. I, с. 90–91).
5. Клишкин В.М., Соковиков В.Г., Николаев В.Н., Щеглов В.Б. *Письма в ЖЭТФ*, **34** (3), 111 (1981).
6. Vokor J., Freeman R.R., Cooke W.E. *Phys. Rev. Lett.*, **48** (18), 1242 (1982).
7. Бахрамов С.А., Тартаковский Г.Х., Хабибулаев П.К. *Нелинейные резонансные процессы и преобразование частоты в газах* (Ташкент: ФАН, 1981, с. 34).
8. Dicke R.H. *Phys. Rev.*, **93**, 99 (1954).
9. Меньшиков Л.И. *УФН*, **169**, 113 (1999).
10. Ищенко В.И., Лисицын В.Н., Ражев А.М., Раутиан С.Г. *Письма в ЖЭТФ*, **19** (11), 669 (1974).
11. Ehrlich D.J., Osgood R.M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **16**, 257 (1980).