

Вынужденное комбинационное рассеяние излучения ХеF*- и КгF-лазеров в парах самария и европия

В.Г. Соковиков, А.В. Клишкин*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 15.10.2013 г.

Представлены результаты оптической накачки паров самария и европия излучением эксимерных ХеCl*-, ХеF- и КгF*-лазеров. Получено электронное вынужденное комбинационное рассеяние излучения ХеF*-лазера в парах самария на длинах волн $\lambda_c = 589,1$ и $608,2$ нм. При облучении паров европия излучением КгF*-лазера наблюдалось электронное вынужденное комбинационное рассеяние в парах европия в инфракрасном диапазоне спектра на длинах волн $\lambda_c = 2501$ и 2414 нм.

Ключевые слова: оптическая накачка паров металлов, вынужденное комбинационное рассеяние на электронных переходах, преобразование частоты излучения; optical excitation of metal vapors, induced Raman scattering at electronic transitions, radiation frequency transformation.

Введение

Основной задачей квантовой электроники является создание источников когерентного излучения. Она решается двумя основными способами:

а) создание первичных источников лазерного излучения, возбуждаемых некогерентными источниками накачки;

б) преобразование первичного когерентного излучения в различные спектральные области за счет нелинейных и других процессов преобразования.

Появление эксимерных лазеров (ЭЛ) на моногалогенидах инертных газов, генерирующих мощное УФ-излучение в диапазоне 193–353 нм, также вызвало повышенный интерес к процессам преобразования УФ-излучения в видимый и ИК-диапазоны спектра.

В частности, весьма плодотворным оказалось использование паров щелочноземельных элементов и группы редкоземельных элементов (РЗЭ) для прямого преобразования излучения эксимерных [1] и перестраиваемых лазеров с накачкой эксимерными лазерами [2, 3] в видимый и инфракрасный диапазоны.

Для преобразования лазерного излучения авторы [4] предложили использовать вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) на электронных переходах (ЭВКР) в атомарных парах химических элементов. При ЭВКР на электронных переходах преобразованное излучение, как правило, концентрируется на одной стоксовой частоте в отличие от ВКР на колебательных переходах молекул и характеризуется большим стоксовым сдвигом.

Ранее было известно о наблюдении ЭВКР-излучения эксимерных лазеров в парах олова [5], бария [6–9], галлия, висмута, свинца [8] и тулия [9, 10].

Вместе с тем задача увеличения количества сред, пригодных для ЭВКР-преобразования излучения ЭЛ (и как следствие расширение спектрального диапазона преобразованного излучения), представлялась весьма актуальной. В связи с этим заметим, что на предмет получения ЭВКР не были исследованы атомные пары легкоиспаримых металлов (Sm и Eu) из группы РЗЭ.

Для реализации процесса ЭВКР в парах металлов необходимо, чтобы выбранный элемент удовлетворял следующим требованиям.

Во-первых, он должен иметь давление насыщенных паров не менее 1 мм рт. ст. при температуре кюветы 1200 °С. Сразу отметим, что и самарий, и европий этому требованию удовлетворяют.

Во-вторых, выбранный элемент должен иметь уровни энергии, которые могут использоваться как начальный, конечный и промежуточный (ПУ) уровни в схеме ЭВКР. При этом промежуточный уровень должен быть связан сильными оптическими переходами с начальным (резонансный переход) и конечным уровнями. В парах РЗЭ в качестве начального уровня, как правило, выступает основное состояние металла. Тогда, в соответствии с правилами отбора для сильных дипольных переходов, в качестве промежуточных уровней могут выступать резонансные уровни металла, а в качестве конечных – метастабильные уровни.

Таким образом, особенностью ЭВКР-преобразования в парах металлов является низкая ($P \sim 0,002 \pm 0,02$ атм) по сравнению с ВКР в сжатых газах ($P \sim 2 \pm 20$ атм), практически достижимая плотность рассеивающей среды. Поэтому для реализации эффективного ЭВКР в парах металлов

* Владимир Григорьевич Соковиков (cjrjdbrijd@mail.ru); Антон Владимирович Клишкин (tosha@asd.iao.ru).

требуется квазирезонанс между частотой накачки и частотой резонансного перехода между начальным и промежуточным уровнями атома металла. Наличие такого квазирезонанса увеличивает сечение процесса ЭВКР, компенсируя, таким образом, низкую плотность возбуждаемой среды. Анализ литературных данных показал, что величина отстройки частоты накачки от частоты резонансного перехода Δ может лежать в диапазоне от единиц до сотен обратных сантиметров.

Выбор начальных уровней процесса ЭВКР

Структура энергетических уровней атома самария имеет интересную особенность. Эта особенность заключается в том, что основное состояние самария 7F_J расщеплено на семь компонент [11], характеризующихся значениями полного момента $J = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ и волновыми числами $0; 292,3; 812; 1490; 2273; 3125; 4021 \text{ см}^{-1}$. При рабочей температуре 1390 К больцмановская заселенность возбужденных подуровней уровней основного состояния самария может оказаться достаточной для того, чтобы эти уровни могли выступать в качестве начальных в схеме ЭВКР. На это указывает величина средней кинетической энергии атомов $E_{\text{кин}} = 3kT/2 = 1460 \text{ см}^{-1}$, вычисленная для температуры $T = 1390 \text{ К}$ и для значения $k = 0,695 \text{ см}^{-1} \cdot \text{Т}^{-1}$.

Напротив, структура энергетических уровней атома европия такова, что в качестве начального уровня может выступать только основное состояние атома европия $6s6s \ ^8S_{7/2}^0$.

Выбор конечных уровней процесса ЭВКР

В качестве конечных уровней процесса ЭВКР-излучения XeCl^* - и XeF^* -лазеров в парах самария был предположительно выбран четный уровень атома самария [11] с энергией 12313 см^{-1} . Энергия возбуждения этого уровня исключает его значительное термическое заселение.

Конечным уровнем процесса ЭВКР в парах европия, облучаемых KгF^* -лазером, предположительно рассматривался нечетный уровень $^8D_{9/2}^0$ с энергией возбуждения 15680 см^{-1} [11]. Ожидаемая длина волны в этом случае будет лежать в фиолетовой области спектра с $\lambda = 407 \text{ нм}$.

Расположение уровней энергии атома европия таково [11], что в качестве конечных уровней в схеме ЭВКР при оптической накачке паров европия излучением KгF^* -лазера могут выступать нечетные высокорасположенные уровни $6s6d \ ^8D_{3/2,5/2,7/2,9/2,11/2}^0$. В этом случае длина волны процесса ЭВКР излучения KгF^* -лазера в парах европия будет лежать в инфракрасном диапазоне спектра.

Выбор промежуточных уровней процесса ЭВКР

Выбор промежуточных уровней атома самария, используемых для ЭВКР излучения XeCl^* - и XeF^* -

лазеров в парах самария, сопряжен со следующими трудностями. Первая из них уже была отмечена выше – это неопределенность с начальным уровнем в схеме ЭВКР, в качестве которого могут выступать практически все семь подуровней основного состояния самария $^7F_{0,1,2,3,4,5,6}$.

Еще одним обстоятельством, затрудняющим выбор промежуточных уровней ЭВКР и последующую интерпретацию результатов оптической накачки самария, является дефицит информации об оптических переходах в атоме самария. В обзорной части известной работы [12] относительно самария сообщается следующее: из 3500 обнаруженных переходов идентифицировано только 1270.

Ситуация становится еще более сложной, когда для оптической накачки паров самария используется излучение эксимерного XeF^* -лазера, генерирующего одновременно на пяти [13] достаточно широких колебательных полосах (353, 352, 351, 350 и 348 нм). Наиболее сильные линии содержатся в полосе с $\lambda = 351 \text{ нм}$. Самые сильные из них принято обозначать греческими буквами α, β и γ . С целью упрощения выбор промежуточного уровня был сделан только для самой сильной полосы генерации XeF^* -лазера с $\lambda = 351 \text{ нм}$. Второе упрощение заключалось в предположении, что начальным уровнем в схемах ЭВКР излучения XeCl^* - и XeF^* -лазеров в парах самария выступает самый нижний подуровень с $J = 0$. Исходя из этих предположений, для XeCl^* - и XeF^* -лазеров были условно выбраны промежуточные уровни с энергиями 28356 и 32559 см^{-1} .

Атом европия имеет по крайней мере два уровня энергии, которые могут выступать как промежуточные в схеме ЭВКР излучения KгF^* -лазера. Это четные уровни с энергией возбуждения 40374 и 40455 см^{-1} . Они взяты из уже цитируемой обзорной статьи [12], в которой приведены данные по силам осцилляторов переходов ряда РЗЭ. Уровни с энергиями возбуждения 40455 и 40374 см^{-1} были выбраны потому, что они связаны оптическими переходами с $\lambda = 247,1$ и $247,6 \text{ нм}$ с основным состоянием атома европия. С одной стороны, сила осциллятора резонансного перехода на уровень с энергией 40455 см^{-1} выше, чем у перехода на уровень с энергией 40374 см^{-1} . С другой стороны, отстройка от резонанса Δ у первого перехода больше, чем у второго.

В таблицах уровней энергии NIST [11] уровень европия с энергией возбуждения 40455 см^{-1} обозначен как $^8P_{9/2}$. Уровень с энергией возбуждения 40374 см^{-1} имеет обозначение 160 и значение полного момента $J = 7/2$.

Если обратиться к таблицам уровней энергии NIST, то количество потенциальных ПУ для процесса ЭВКР излучения эксимерного KгF^* -лазера в парах европия следует увеличить. Однако факт отсутствия резонансных переходов с этих уровней и в таблицах вероятностей переходов Корлисса и Бозмана [14], и в обзоре [12] указывает на то, что рассмотрение следует ограничить двумя промежуточными уровнями. Тем более что наличие дополнительных ПУ может оказать влияние только на величину сечения процесса ЭВКР. Длина волны процесса ЭВКР определяется стоксовым сдвигом,

величина которого задается энергией возбуждения конечного уровня.

Результат выбора промежуточных и конечных уровней ЭВКР в парах самария и европия облучаемых XeF^{*}-, XeCl^{*}- и KrF^{*}-лазеров представлен в табл. 1. Согласно этой таблице в работе предостояло экспериментально исследовать четыре комбинации, состоящие из одного эксимерного лазера и одного редкоземельного элемента.

Экспериментальная установка

Большая часть исследований проводилась на экспериментальных установках, аналогичных той, что представлена на рис. 1. Основными элементами этой установки являются ЛН – лазер накачки и К – кювета с парами исследуемого металла.

Излучение лазера накачки ЛН, сформированное неустойчивым резонатором, состоящим из зеркал M_1 и M_2 , направлялось в кювету К системой зеркал

M_3 и M_4 . Для увеличения плотности мощности излучение накачки, прошедшее через фильтр Φ_1 , фокусировалось в центральную область кюветы К. Вышедшее из кюветы преобразованное излучение и остаточное излучение накачки направлялись зеркалом M_5 на входную щель монохроматора. Для исследования спектра преобразованного излучения применялись монохроматоры МДР-3 или МДР-23. Система регистрации состояла из фотоэлектронного умножителя ФЭУ, осциллографа, интегратора с вольтметром или самописцем.

Для приготовления паров Sm и Eu использовались кюветы различной конструкции, неоднократно описанные в предыдущих работах, например [9]. Исследуемый металл помещался в керамическую трубку из окиси бериллия с внутренним диаметром 11 мм и длиной 180 мм. Все используемые кюветы работали в режиме свободной перегонки. В качестве буферного газа использовался в основном гелий.

Таблица 1

Комбинации эксимерный лазер – пары элемента, отобранные для исследования процесса ЭВКР

№ комбинации	Эксимерный лазер	Длина волны λ_n , нм	Атом	Квазирезонансный переход λ_{12} , нм	ν_{12} – промежуточный резонансный уровень M^* , см^{-1}	Отстройка Δ , см^{-1}	Конечный метастабильный уровень M^* , см^{-1}	ЭВКР λ_c , нм
1	XeF [*]	351	Sm	352,7	28356	~15	12313	618*
2	XeCl [*]	308	Sm	307,1	32559	~20	12313	495*
3	KrF [*]	248	Eu	247,6	40374	~130	15680	407, ИК
4	KrF [*]	248	Eu	247,1	40455	~210	35813	

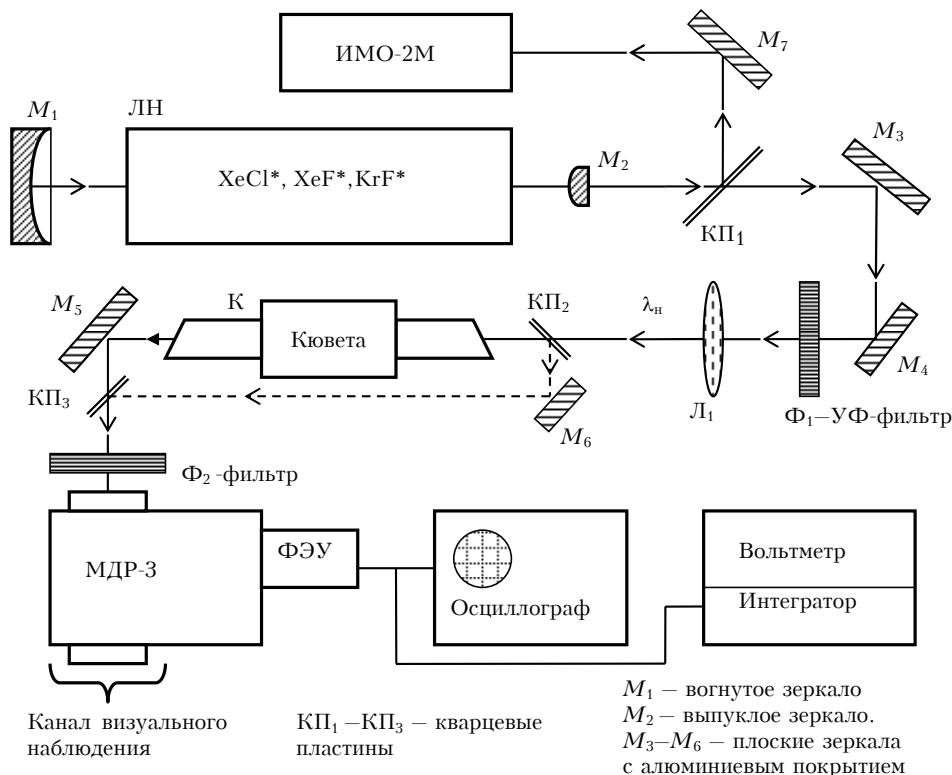


Рис. 1. Схема типичной экспериментальной установки, применяемой для исследования процесса ЭВКР излучения эксимерных лазеров в парах самария и европия

Исследование ЭВКР в парах самария

Лазер накачки на молекулах XeF^* генерировал импульсы длительностью 25 нс по основанию с энергией 4–6 мДж. Излучение, сформированное неустойчивым резонатором, фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 60 см в кювету со смесью паров самария и гелия (50–120 мм рт. ст.). При температуре кюветы 1180 °С, которой соответствует концентрация паров самария $[\text{Sm}] = 1,8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, оптическая накачка вызывала появление двух мощных линий когерентного излучения с $\lambda = 589$ и 608 нм в желтой и красной областях спектра. Высокая мощность излучения желтой и красной линий указывала на то, что они, по всей видимости, генерируются в процессе вынужденного комбинационного рассеяния. Измеренное значение длины волны $\lambda = 589$ нм оказалось достаточно близким к длине волны D_1 линии натрия. Заметим, что используемый способ получения паров РЗЭ не позволяет исключить появления некоторого количества паров натрия в кювете. Линии поглощения натрия неоднократно наблюдались в кюветках с парами РЗЭ, изготовленных на основе окиси бериллия [15]. К сожалению, низкая точность измерения длины волны не позволяла сразу исключить из рассмотрения процесс генерации желтой линии, связанный с парами натрия.

Чтобы исключить эту неопределенность, были проведены дополнительные исследования, направленные на уточнение значений длин волн наблюдаемых линий. Они заключались в следующем. На оптической оси за кюветой (или после кюветы) с парами самария устанавливалась спиртовка, в пламя которой вносилась навеска с поваренной солью NaCl . В фокальной плоскости выходной щели монохроматора наблюдались две желтые линии дублета натрия, а между ними исследуемая линия. Используя лупу со встроенной масштабной линейкой и зная точную разность линий дублета натрия, мы вычислили длину волны желтой линии преобразованного излучения, которая оказалась равной 589,1 нм. Сравнение полученной длины волны со значением, считанным с барабана длин волн монохроматора, позволило определить погрешность монохроматора, которая позволила, в свою очередь, уточнить длину волны красной линии. Она оказалась равной $\lambda = 608,2$ нм. Исследование спектрального состава преобразованного излучения в УФ- и ИК-областях не проводилось.

Уточненные значения длин волн можно считать дополнительным аргументом в пользу того, что наблюдаемое излучение появилось в результате процесса ЭВКР. Основанием для такого вывода является отсутствие линий с $\lambda = 589,1$ и 608,2 нм в таблицах спектральных линий атома и иона самария [12, 14]. Более того, точность, с которой были измерены длины волн, позволила в рамках некоторых предположений выбрать конкретные уровни атома самария, участвующие в процессе ЭВКР с $\lambda = 589,1$ и 608,2 нм.

Суть предположения заключалась в следующем. Максимальная энергия генерации XeF^* -лазера сосредоточена на вращательной компоненте β колебательной полосы с $\lambda_\beta = 351$ нм. Точное значение λ_β этой компоненты, взятое из работы [13], равно 351,1 нм. Тот факт, что это самая мощная линия генерации в сложном спектре накачки, является основанием считать, что только она участвует в процессе ЭВКР в самарии. Дальнейшая процедура поиска состояний уровней самария, участвующих в качестве начальных, промежуточных и конечных уровней в процессе ЭВКР-излучения β -компоненты (351,1 нм) XeF^* -лазера с $\lambda = 589,1$ и 608,2 нм, заключалась в следующих действиях. В качестве начального уровня последовательно выбирались компоненты расщепленного основного состояния самария $^7F_{0-6}$. Волновое число начального уровня суммировалось с волновым числом кванта накачки. Из этой суммы вычиталось значение волнового числа кванта ЭВКР отдельно для желтой и для красной линий. Полученное значение давало величину волнового числа конечного уровня. Если в таблице NIST уровней энергии значение, полученное отдельно для красной или для желтой линии, отсутствовало, то вся процедура повторялась для следующей компоненты основного состояния самария.

Последовательный перебор компонент основного состояния самария оказался удачным уже для компоненты основного состояния с $J = 2$ и значением волнового числа, равным 812 см^{-1} . Вычисленное значение волновых чисел предполагаемых конечных уровней для желтой линии оказалось равным 12313 и для красной 12847 см^{-1} . В таблицах NIST, составленных для уровней энергии самария, имеются уровни с такими волновыми числами. Это четные уровни 9D_2 и 9D_3 , принадлежащие электронной конфигурации $6s5d$ самария. Результат поиска уровней атома самария, причастных к ЭВКР излучения β -компоненты (351,1 нм) XeF^* -лазера с $\lambda = 589,1$ и 608,2 нм, представлен на рис. 2. Промежуточными уровнями в схеме ЭВКР в самарии могли выступать нечетные уровни со значениями волновых чисел, близкими к сумме волновых чисел кванта накачки (28472 см^{-1}) и найденного начального уровня (812 см^{-1}). Согласно данным таблицы NIST в качестве такого может выступать нечетный уровень с волновым числом 29282 см^{-1} ($J = 3$), а также уровни $^7F_3^0$ (29024 см^{-1}) и 7D_4 (29365 см^{-1}). Дипольные переходы с этих уровней на конечные и начальные уровни разрешены по четности и полному моменту $\Delta J = 0, \pm 1$. Напомним, что промежуточный уровень в схеме ЭВКР определяет только сечение процесса, которое задается величиной разности между его энергией возбуждения и энергией кванта накачки, а также вероятностью перехода с промежуточного уровня на начальный и конечный уровни. Взаимное расположение начального, промежуточных и конечных уровней самария показано на рис. 2. Прделанная выше процедура поиска уровней, участвующих в процессе ЭВКР в самарии, была выполнена только для случая накачки излучением

β -компоненты (351,1 нм) ХеF*-лазера и только для подуровней основного состояния самария с $J = 0, 1, 2$. Вычисления для других частот накачки ХеF*-лазера и компонент $J = 3, 4, 5, 6$ не проводились.

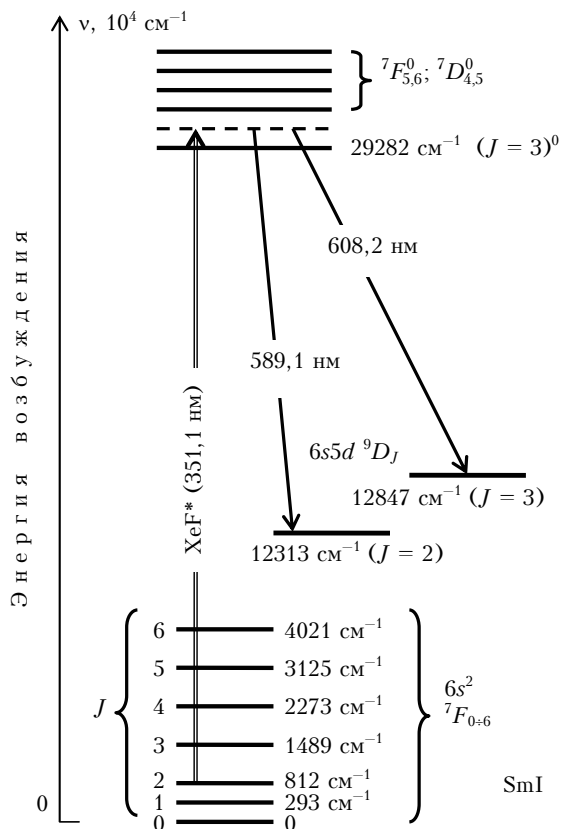


Рис. 2. Частичная диаграмма уровней атома самария, участвующих в процессе ЭВКР излучения β -компоненты ХеF*-лазера (351,1 нм) в парах самария

Предположительно указанная в табл. 1 (комбинация № 1) длина волны процесса ЭВКР на $\lambda = 618 \text{ нм}$ в эксперименте не наблюдалась.

Таким образом, есть основания считать, что наблюдаемые при оптической накачке паров самария излучением ХеF*-лазера желтая ($\lambda_c = 589,1 \text{ нм}$) и красная ($\lambda_c = 608,2 \text{ нм}$) линии когерентного излучения являются результатом действия процесса ЭВКР. Этот установленный факт отражен появлением нижнего индекса у знака длины волны λ_c . Начальным уровнем процесса ЭВКР для обеих линий выступает возбужденный четный подуровень ($J = 2$) основного состояния самария.

При исследовании комбинации № 2, в ходе которого пары самария возбуждались излучением ХеCl*-лазера, наблюдалось большое количество линий, генерирующих в видимом диапазоне. Идентификация показала, что значительная часть наблюдаемых линий принадлежала атомному спектру самария. Условно указанная в табл. 1 (комбинация № 2) длина волны процесса ЭВКР, равная 495 нм, в эксперименте не наблюдалась. Более того, интенсивность всех наблюдаемых линий была значительно ниже интенсивности линий, обусловленных процес-

сом ЭВКР в самарии (комбинация № 1, см. табл. 1). Этот факт дает основание утверждать, что даже те линии, которые не удалось идентифицировать с известными переходами в самарии, не являются линиями процесса ЭВКР. Весьма вероятно, что это еще не идентифицированные линии и поэтому они отсутствуют в таблицах спектральных линий и таблицах переходов атома самария. В табл. 2 представлены лазерные линии, наблюдаемые при оптической накачке паров самария излучением ХеCl*-лазера.

Таблица 2
Линии генерации, наблюдаемые при возбуждении паров Sm излучением ХеCl*-лазера

№ линии	λ , нм	Уровни, cm^{-1}	Переход	Интенсивность
1	510,1	—	—	слабая
2	522,4	—	—	слабая
3	537,1	—	—	сильная
4	548,5	0–18225	$^7C_1^0 - ^7F_0$	средняя
5	565,3	1490–19175	$^7F_4^0 - ^7F_3$	средняя
6	599,5	2273–18949	$^7H_3^0 - ^7F_4$	сильная
7	600,4	812–17462	$^5C_2^0 - ^7F_2$	сильная
8	592,8	3125–19990	$^7H_4^0 - ^7F_5$	средняя

Экспериментальные условия, при которых наблюдались атомные линии самария, были следующие. Ультрафиолетовое излучение эксимерного лазера ЭЛИ-5М на молекулах ХеCl* с энергией 12 мДж фокусировалось в кювету со смесью паров самария и гелия (120 мм рт. ст.) кварцевой линзой с фокусным расстоянием 60 см. Излучение накачки формировалось в неустойчивом резонаторе с увеличением $M = 15$, работающем на положительной ветви устойчивости. Приготовление паров самария осуществлялось в упрощенной кювете, которая могла использоваться до температуры не выше 950° . Пороговая концентрация паров самария [Sm], при которой наблюдались линии когерентного излучения, равнялась $1,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Такая концентрация паров соответствует температуре кюветы 870°C . Заметим, что пороговая концентрация паров, при которой в результате оптической накачки ХеCl*-лазером наблюдаются вынужденные атомные линии самария, на два порядка ниже концентрации паров, при которой наблюдалось ЭВКР в самарии (комбинация № 1). Столь существенное различие концентраций, а также меньшая интенсивность излучения линий в комбинации № 2 также указывают на то, что даже неидентифицированные линии из табл. 2 вряд ли являются линиями ЭВКР.

К сожалению, используемая упрощенная кювета не позволяла повысить концентрацию насыщенных паров самария до значений, при которых в комбинации № 1 наблюдалось ЭВКР.

Исследование ЭВКР в парах европия

В ходе этой части исследования пары европия облучались излучением эксимерного KrF*-лазера (248 нм). Лазер генерировал импульсы с энергией

15 мДж. Излучение накачки фокусировалось кварцевой линзой с фокусным расстоянием приблизительно 60 см. Среди множества линий усиленного спонтанного излучения (УСИ), генерирующих в видимом диапазоне, которые частично представлены на рис. 3, линия ЭВКР с $\lambda_c = 407$ нм не наблюдалась. О линиях УСИ в видимом диапазоне спектра при накачке паров европия излучением КгF*-лазера впервые сообщалось в работе [16]. Вместе с тем в ИК-диапазоне в нашем эксперименте наблюдались две интенсивные линии с $\lambda = 2501$ и 2414 нм. Для регистрации этих линий использовалось фото-сопротивление на основе сульфида свинца, помещенное за выходной щелью монохроматора МДР-3.

Идентификация линий показала, что они не принадлежат переходам с четных ПУ (40374 или 40455 см^{-1}) на нечетные уровни группы $6d^8D_{7/2}^0$. Это значит, что эти ИК-линии не являются линиями УСИ, возникающего между указанными группами уровней европия. Вместе с тем вычисления показали, что наблюдаемые линии с $\lambda = 2501$ и 2414 нм являются линиями процесса ЭВКР, обусловленного накачкой КгF*-лазера (248 нм) паров европия. Начальным уровнем в процессе ЭВКР выступает основное состояние европия $6s6s^8S_{7/2}^0$, а конечными уровнями являются нечетные уровни $6s6d^8D_{11/2}^0$ и $6s6d^8D_{7/2}^0$ для $\lambda_c = 2501$ и 2414 нм соответственно. Наблюдаемые линии ЭВКР имели низкий порог по концентрации паров европия $[\text{Eu}] \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Интенсивность линии с $\lambda_c = 2414$ нм была выше, чем интенсивность линии $\lambda_c = 2501$ нм. С ростом концентрации паров европия до значения $[\text{Eu}] \sim 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ интенсивность линий ЭВКР вначале росла, а затем, достигнув максимума, начинала спадать. При этом интенсивность линий видимого диапазона показывала монотонный рост. Рост концентрации буферного газа гелия вначале не оказывал существенного влияния на интенсивность линий ЭВКР, однако при концентрациях, соответствующих атмосферному давлению, вызывал падение их интенсивности. При этом вынужденное излучение на ИК-переходах $8p^8P_{9/2} \rightarrow 6d^8D_{11/2}^0$ и $8p^8P_{9/2} \rightarrow 6d^8D_{7/2}^0$, обусловленное столкновительным переносом возбуждения с виртуального уровня на промежуточный, не наблюдалось. Линии видимого диапазона, за исключением резонансных линий (601,8; 627,7; 459,4 нм и др.), продолжали генерировать и при высоких давлениях буферного газа. В этом случае накачка верхних уровней $8D_{7/2,11/2}^0$ могла осуществляться за счет процесса преддиссоциации квазимолекулы европий – гелий [16]. При низком давлении буферного газа накачка этих же уровней могла производиться в ходе процесса ЭВКР (см. рис. 3). Как было установлено выше, при высоком давлении процесс ЭВКР в ИК-диапазоне отсутствует.

Анализ литературных источников указывает на два возможных механизма возникновения вынужденного излучения вблизи резонансных линий или на самих резонансных линиях. Это либо четырехволновой параметрический процесс генерации раз-

ностной частоты, либо создание инверсии на резонансном переходе вследствие очистки основного состояния атома. Отдельного анализа заслуживают и механизмы усиления без инверсии, рассмотренные в [17, 18].

Дисперсии монохроматора МДР-3 было явно недостаточно для того, чтобы зафиксировать взаимное расположение наблюдаемого излучения относительно резонансных линий европия. Следовательно, однозначно установить факт создания инверсии на резонансном переходе за счет очистки основного состояния либо факт усиления без инверсии на резонансном переходе не представлялось возможным. Недостаточная дисперсия монохроматора также не позволяла выявить те спектральные свойства резонансного излучения (например, ширина линии), которые указывают на его параметрическую природу.

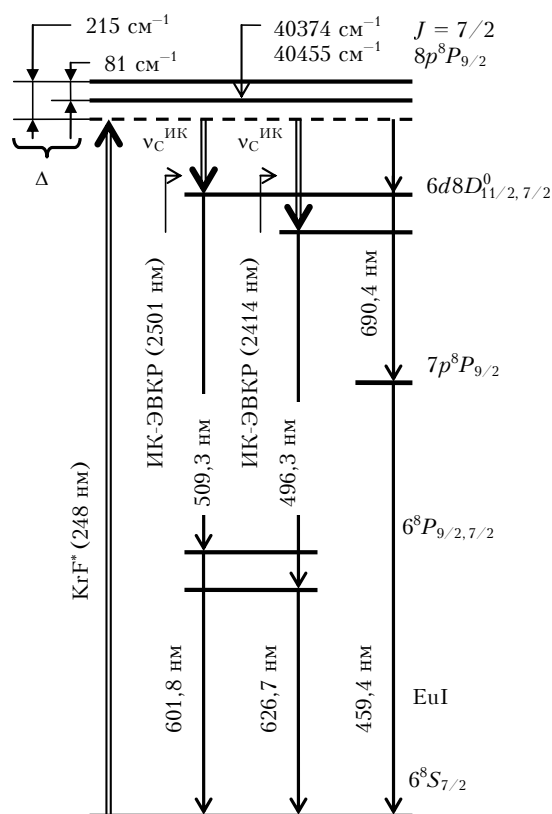


Рис. 3. Схема части вынужденных оптических переходов в атоме европия, наблюдаемых при оптической накачке паров европия излучением КгF*-лазера

На рис. 3 представлены не все линии, наблюдаемые нами при оптической накачке паров европия излучением КгF*-лазера. Более того, по техническим причинам преобразованное излучение в ИК-диапазоне спектра с $\lambda > 3000$ нм не исследовалось. Вместе с тем весьма вероятно, что такое излучение может иметь место при оптической накачке паров европия КгF*-лазером. На такую вероятность указывает картина взаимного расположения четных и нечетных уровней энергии атома европия, лежа-

щих на шкале энергии возбуждения ниже, чем энергия кванта KrF^* -лазера. Причем излучение в диапазоне $\lambda > 3000$ нм может быть результатом действия процесса ЭВКР и результатом генерации на каскадных переходах. В атоме европия есть нечетные уровни энергии, лежащие выше, чем $6s6d^8D_{11/2}^0$ и $6s6d^8D_{7/2}^0$. Эти высоколежащие уровни, как и уровни $6s6d^8D_{11/2}^0$ и $6s6d^8D_{7/2}^0$, могут выступать в качестве конечных уровней в схеме ЭВКР. Из этого следует, что при оптической накачке паров европия может генерироваться ЭВКР в диапазоне $\lambda > 3000$ нм.

Заключение

Таким образом, впервые получено ЭВКР на длинах волн $\lambda_c = 589,1$ и $608,2$ нм при оптическом возбуждении паров самария излучением XeF^* -лазера. В наблюдаемом процессе ЭВКР в парах самария участвовал возбужденный подуровень основного состояния 7F_2 в качестве начального, а четные уровни 9D_2 и 9D_3 выступали в качестве конечных уровней.

Оптическая накачка паров европия излучением KrF^* -лазера сопровождалась появлением в спектре преобразованного излучения, кроме линий УСИ, принадлежащих видимому диапазону спектра, инфракрасных линий с $\lambda_c = 2501$ и 2414 нм, обусловленных процессом ЭВКР. Конечными уровнями в этой схеме ЭВКР выступают нечетные уровни атома европия $6s6d^8D_{11/2}^0$ и $6s6d^8D_{7/2}^0$ для $\lambda_c = 2501$ и 2414 нм соответственно. Начальным уровнем в процессе ЭВКР выступает основное состояние атома европия $6s6s^8S_{7/2}^0$.

Исследование комбинаций № 2 показало наличие вынужденного излучения на ряде атомных переходов самария. Однако линий, обусловленных процессом ЭВКР при облучении паров самария излучением XeCl^* , обнаружить не удалось.

1. Сокоиков В.Г., Климкин А.В. Четырехволновые параметрические процессы, наблюдаемые при исследовании ЭВКР в парах металлов // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 3. С. 230–236.
2. Сокоиков В.Г., Климкин В.М., Прокопьев В.Е. Генерация вынужденного излучения на переходах в основное и метастабильные состояния иона европия // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 5. С. 359–363.
3. Сокоиков В.Г. Исследование двухфотонной селективной фотоионизации паров щелочноземельных и редко-

4. земельные элементов // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 2. С. 190–197.
4. Sorokin P.P., Lankard J.R., Shiren N.S., Hammond E.C., Kozyaka T.G. Stimulated electronic Raman scattering // Appl. Phys. Lett. 1967. V. 10, N 6. P. 44–46.
5. Djeu N. High power lasers and its application / Eds. K.Z. Kompa, H. Walther. Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1978. 228 p.
6. Djeu N. Efficient Raman conversion of XeF^* laser output in Ba vapor // Appl. Phys. Lett. 1977. V. 30, N 2. P. 473–475.
7. Cotter D., Zapka W. Efficient Raman conversion of XeCl^* excimer laser radiation in Ba vapor // Opt. Commun. 1978. V. 26, N 2. P. 251–255.
8. Burnham R., Djeu N. Efficient Raman conversion of XeCl^* laser radiation in metal vapor // Opt. Lett. 1978. V. 3, N 6. P. 215–217.
9. Верховский В.С., Климкин В.М., Прокопьев В.Е., Сокоиков В.Г., Тарасенко В.Ф., Федоров А.И. Исследование ВКР-излучения эксимерных лазеров на электронных переходах атомов металлов // Квант. электрон. 1982. Т. 9, № 11. С. 2151–2155.
10. Бычков Ю.И., Иванов Н.Г., Коваленко С.Е., Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н., Прокопьев В.Е. Эффективность преобразования излучения XeCl^* -лазера в парах металлов // Ж. прикл. спектроскопии. 1991. Т. 55, № 1. С. 80–83.
11. NIST Atomic Spectra Database Ver.3.0 (<http://physics.nist.gov/PhysRefData/>)
12. Пенкин Н.П., Комаровский В.А. Силы осцилляторов спектральных линий и времена жизни возбужденных состояний атомов редкоземельных элементов с достраиваемой 4f оболочкой // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. Pergamon Pres. (Printed in Great Britain). 1976. V. 16, N 3-B. P. 217–252.
13. Shimauchi M., Karasawa S., Miura T. Spectroscopic study of a discharge pumped XeF laser at high resolution // Jap. J. Appl. Phys. 1978. V. 17, N 3. P. 527–533.
14. Корлис Ч., Бозман У. Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов. М.: Мир, 1968. 562 с.
15. Бохан П.А., Кияшкина Г.С., Климкин В.М., Соломонов В.И. Высокотемпературная техника для исследования стационарных и импульсных разрядов // Эффективные газоразрядные лазеры в парах металлов. Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1978. С. 59–65.
16. Klimkin V.M., Prokopiev V.E., Sokovikov V.G. New possibilities of producing population conversion on resonance atomic and ionic transitions in chemical elements // Technical digest, XI-th All-Union Conf. Coherent and Nonlinear Opt. Part I. Erevan, 1982. P. 76–77.
17. Елецкий А.В., Смирнов Б.М. Газовые лазеры. М.: Атомиздат, 1971. 152 с.
18. Агапьев Б.Д., Горный М.Б., Матисов Б.Г., Рождественский Ю.В. Когерентное пленение населенностей в квантовых системах // Успехи физ. наук. 1993. Т. 163, № 9. С. 1–36.

V.G. Sokovikov, A.V. Klimkin. Stimulated Raman scattering of XeF^* lasers in samarium and europium vapors.

In this article the authors show the results of optical inflation of samarium and europium vapors by radiation of eximer XeCl^* , XeF , and KrF^* lasers. The authors got electronic stimulated Raman scattering radiation of XeF^* laser. In samarium, vapor radiation was got at wavelength $\lambda_c = 589.1$ and 608.2 nm. During irradiation of europium vapor by radiation of KrF^* , laser electronic stimulated Raman scattering was observed in this vapor. This radiation was observed at wavelength $\lambda_c = 2501$ and 2414 nm.