

УДК 621.373.826

Атомные линии усиленного спонтанного излучения, наблюдаемые при оптической накачке паров иттербия излучением KrF^* -лазера

В.Г. Сокоиков¹, В.Е. Прокопьев², А.В. Клишкин^{1*}

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

² Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический 2/3

Поступила в редакцию 15.01.2018 г.

Представлены результаты, полученные при квазирезонансной оптической накачке паров иттербия излучением KrF^* -лазера ($\lambda_n = 248$ нм). Исследовалось преобразованное излучение видимого диапазона, доступное для визуального наблюдения. Обнаружены интенсивные линии усиленного спонтанного излучения, вызванные переходами между группами четных ($6s5d^1D_2$, $6s6d^3D_{1,2,3}$) и нечетных уровней иттербия ($6s6p^1P^0_1$, $6s6p^3P^0_{0,1,2}$). Зарегистрировано когерентное излучение на резонансных линиях иттербия с $\lambda = 398,8$ и $555,6$ нм, обусловленных соответственно переходами $6s6p^1P^0_1 \rightarrow 6s6s^1S_0$ и $6s6p^3P^0_1 \rightarrow 6s6s^1S_0$ в атоме иттербия. Качественно рассмотрена последовательность процессов, приводящая к образованию инверсии на атомных переходах иттербия.

Ключевые слова: пары металлов, оптическая накачка, лазеры на парах металлов, электронное вынужденное комбинационное рассеяние, усиленное спонтанное излучение; metal vapors, optical pumping, metal vapor lasers, stimulated electronic Raman scattering, amplified spontaneous emission.

Введение

Пары металлов представляют собой весьма перспективные среды для создания лазеров [1, 2], отдельное место среди которых занимают газоразрядные импульсные лазеры на парах редкоземельных элементов (РЗЭ). Можно выделить две причины постоянного интереса к парам РЗЭ (Sm, Eu, Tm, Yb) как к активным лазерным средам. Техническая причина обусловлена относительно невысокими температурами испарения этих элементов [3]. Вторая причина связана с удачным расположением энергетических уровней атомов и ионов, позволяющим создавать инверсию населенности как между отдельными уровнями, так и между группами уровней РЗЭ. В частности, расположение уровней двух генерирующих в импульсном разряде переходов иттербия позволило сравнить их максимальные частоты следования [4].

Более того, в ряде работ было показано, что инверсия населенности на переходах атомов [5–8] и ионов [9–11] может быть получена при оптической УФ-накачке паров РЗЭ.

В настоящей работе сообщается об экспериментальном исследовании множества линий усиленного спонтанного излучения (УСИ), принадлежащих

переходам атома иттербия, которые появляются в результате оптической накачки паров иттербия излучением эксимерного KrF^* -лазера с длиной волны генерации $\lambda_n = 248$ нм. Эта работа продолжает исследования [4]. Ее цели: идентификация переходов, наблюдаемых при оптической накачке паров иттербия излучением KrF^* -лазера, выделение процессов, ответственных за появление инверсии на переходах атома иттербия, а также сравнение процессов создания инверсии на переходах иттербия с процессами, ответственными за создание инверсии на атомных переходах других РЗЭ (Sm, Eu) [8] и бария [7].

Экспериментальная техника

Большая часть исследований проводилась на экспериментальной установке представленной на рис. 1. Основные элементы установки – лазер накачки ЛН и кювета К с парами иттербия.

Излучение KrF^* -лазера накачки, сформированное неустойчивым резонатором, состоящим из зеркал M_1 и M_2 , направлялось в кювету системой зеркал M_3 и M_4 . Мощность излучения накачки, отраженного кварцевой пластиной $KП_1$ и зеркалом M_7 , измерялась калориметром ИМО-2. Для увеличения плотности мощности излучение накачки, прошедшее через фильтр Φ_1 , фокусировалось в центральную область кюветы кварцевой линзой Л.

* Владимир Григорьевич Сокоиков (gel@asd.iao.ru); Владимир Егорович Прокопьев (prokop@ogl.hcei.tsc.ru); Антон Владимирович Клишкин (tosha@asd.iao.ru).

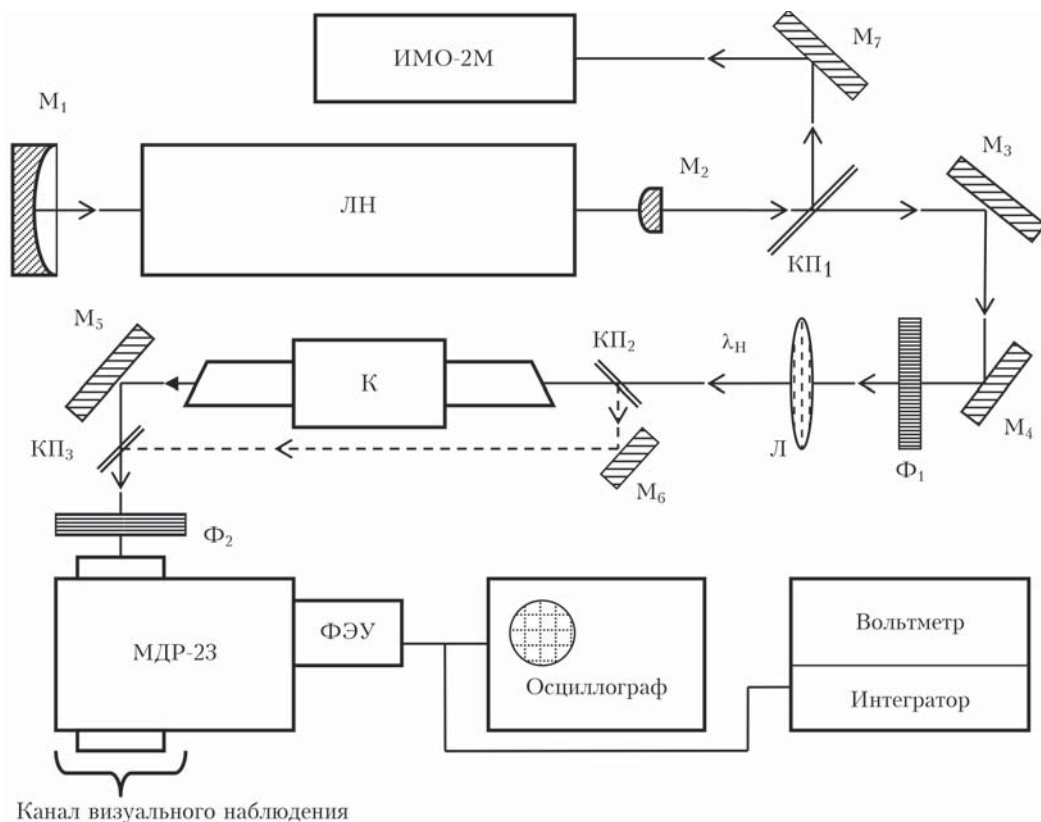


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, применяемой для исследования процессов преобразования УФ-излучения в парах иттербия: ЛН – лазер накачки (KгF*-лазер); К – кювета; М₁ – вогнутое, М₂ – выпуклое зеркала, М₃–М₆ – плоские зеркала с Al покрытием; КП₁–КП₃ – кварцевые пластины; Л – кварцевая линза с фокусным расстоянием $f = 64$ см; Ф₁ – УФ-фильтр, Ф₂ – фильтр

Спектр генерации эксимерного лазера на молекулах KгF* состоит из одной широкой полосы с максимумом на $\lambda_n = 248$ нм. Энергия генерации нашего KгF*-лазера достигала 10–15 мДж при длительности импульса генерации 20÷25 нс по основанию.

Вышедшее из кюветы преобразованное излучение и остаточное излучение накачки направлялись зеркалом М₅ на входную щель монохроматора МДР-23. Фильтр Ф₂ поглощает остаточное излучение накачки. Фильтры Ф₁ и Ф₂ для устранения влияния спонтанного излучения, возникающего при газоразрядном возбуждении активной среды эксимерного лазера, на процесс регистрации преобразованного излучения выбирались из стандартного набора цветных стекол.

Фотоэлектрическая схема регистрации состояла из фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), осциллографа и стробируемого интегратора с вольтметром. Универсальные ФЭУ-100 и ФЭУ-106 регистрировали свет в ультрафиолетовом и видимом диапазонах спектра.

Наличие канала визуального наблюдения в системе регистрации позволило значительно упростить процесс идентификации наблюдаемых спектральных линий. В отличие от фотоэлектрического способа регистрации, непосредственное наблюдение спектральных линий в фокальной плоскости монохроматора позволяет однозначно отличать лазерные линии от спонтанных. По этой причине в данной

работе исследовались в основном линии УСИ, расположенные в видимом диапазоне спектра.

Среди легкоиспаряемых лантаноидов (Sm, Eu, Tm, Yb) иттербий испаряется при самой низкой температуре. Поэтому для приготовления паров Yb мы использовали сравнительно простую кювету с внешним трубчатым нагревателем, в который помещалась кварцевая труба с вкладышем из окиси бериллия. Внутренний диаметр керамического вкладыша был равен 10 мм, длина – 20 см. Кусочки металлического иттербия располагались внутри керамического вкладыша. Кювета работала в режиме свободной перегонки. В качестве буферного газа применялся в основном гелий.

Результаты оптической накачки паров иттербия

Для накачки паров Yb использовалось излучение KгF*-лазера ($\lambda_n = 248$ нм). Выбор лазера обусловлен наличием квазирезонанса накачки с резонансным переходом иттербия $6s6s^1S_0 - 6s7p^1P^0_1$ с $\lambda = 246,5$ нм [12]. Излучение KгF*-лазера при возбуждении этого перехода имеет отстройку $\Delta \sim 320$ см⁻¹.

Излучение накачки ($\lambda_n = 248$ нм) фокусировалось в центр кюветы, затем включался ее нагрев. По мере повышения температуры кюветы росла

концентрация паров Yb. Начиная с концентраций [Yb] $\sim 1,3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ облучение приводило к появлению вынужденного излучения на ряде переходов Yb, лежащих в видимом диапазоне спектра. Примерное равенство интенсивностей излучения лазерных линий, распространяющихся в направлении накачки и навстречу накачке, указывало на то, что это линии УСИ. Для сравнения интенсивностей линий применялась оптическая схема, состоящая из двух кварцевых пластин КП₂ и КП₃ и зеркала с алюминиевым покрытием М₆, расположенных в порядке, показанном на рис. 1. Разумеется, в процессе измерения зеркало М₅ заменялось кварцевой пластиной. Сравнивались амплитуды сигналов, полученные с помощью ФЭУ и наблюдаемые на экране осциллографа.

Идентификация наблюдаемых лазерных линий, лежащих в видимом диапазоне спектра, показала, что эти линии УСИ принадлежат оптическим переходам атома Yb. Идентифицированные линии представлены на рис. 2.

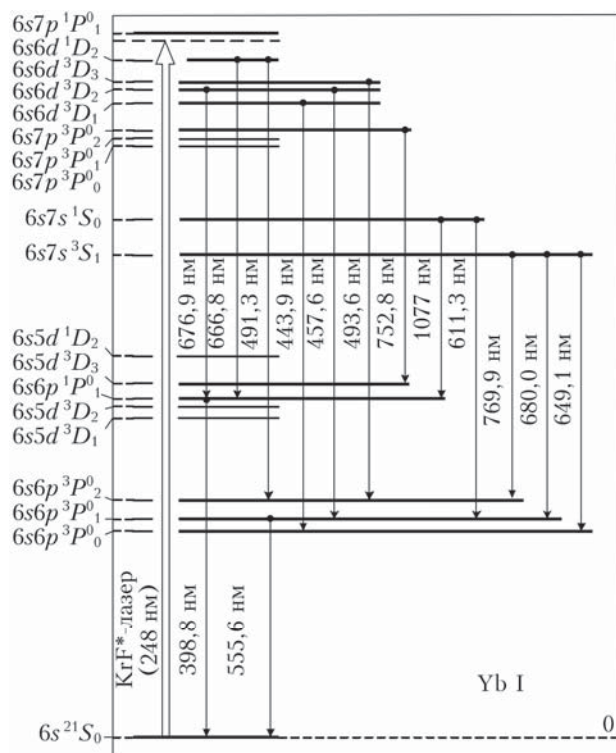


Рис. 2. Линии УСИ, обусловленные вынужденными переходами между уровнями энергии атома Yb, наблюдаемыми при оптической накачке паров иттербия излучением KrF*-лазера

Типичная длительность импульса линий УСИ, измеренная с помощью коаксиального элемента, составляла 12÷16 нс по основанию импульса. Импульсы излучения всех наблюдаемых линий УСИ появлялись на переднем фронте импульса накачки.

Практически все линии УСИ видимого диапазона, представленные на рис. 2, принадлежат пере-

ходам с четных ($6s5d^1 D_2$, $6s6d^3 D_{1,2,3}$) на нечетные уровни иттербия ($6s6p^1 P^0_1$, $6s6p^3 P^0_{1,2}$).

Обсуждение результатов

Как уже отмечалось выше, большинство наблюдаемых линий УСИ принадлежат переходам, начинающимся с четных уровней ($6s5d^1 D_2$, $6s6d^3 D_{1,2,3}$). Они на шкале энергии возбуждения расположены ниже квазирезонансного нечетного уровня иттербия $6s7p^1 P^0_1$. Похожее взаимное расположение уровня, квазирезонансного накачке, и нижележащих групп четных и нечетных уровней имело место при квазирезонансной накачке паров европия излучением KrF*-лазера [8] и паров бария излучением ХеСI*-лазера [7]. При этом, так же как и при накачке паров иттербия, наблюдалось появление множества линий УСИ на атомных переходах европия и бария с уровней, расположенных ниже квазирезонансного.

В работах [7, 8] рассмотрены процессы, сопровождающие квазирезонансную накачку паров Ва и Еu, ответственные за создание инверсии на переходах, расположенных ниже квазирезонансных уровней Ва($7p^1 P^0_1$) и Еu($8p^8 P_{9/2}$) соответственно. Применительно к случаю накачки паров Yb, рассматриваемому в настоящей работе, можно выделить определенную последовательность процессов, ответственных за создание инверсии на переходах атома иттербия. Для этого обратимся к рис. 3, на котором представлены наиболее интенсивные линии УСИ атома иттербия.

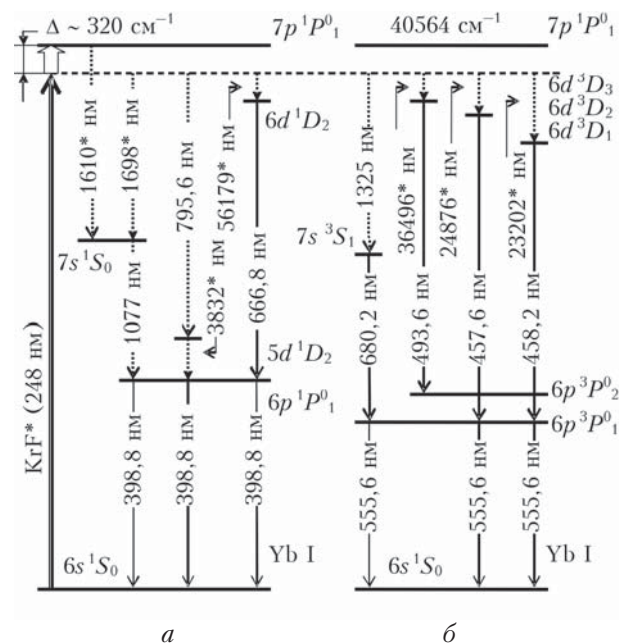


Рис. 3. Схема вынужденных оптических переходов в атоме Yb, наблюдаемых при оптической накачке паров Yb излучением KrF*-лазера, в синглетной (a) и триплетной (б) системах уровней Yb; (* — длина волн для вакуума)

Известно [13], что квазирезонансная накачка приводит к селективному заселению квазирезонансного уровня. В нашем случае это уровень

Yb($7p^1P^0_1$). Процесс заселения квазирезонансного уровня принято называть поглощением, индуцированным столкновениями (ПИС). На рис. 3 ПИС изображено короткой белой стрелкой, направленной к уровню Yb($7p^1P^0_1$). Селективная накачка уровня $7p^1P^0_1$ автоматически создает инверсию населенности между этим квазирезонансным уровнем и лежащими ниже «пустыми» уровнями $6s5d^1D_2$, $6s6d^3D_{1,2,3}$.

Радиационная релаксация населенности нечетного квазирезонансного уровня $7p^1P^0_1$ в виде вынужденных ИК-переходов на уровни противоположной четности представляет собой один из процессов накачки четных уровней иттербия $6s5d^1D_2$, $6s6d^3D_{1,2,3}$. Такой процесс наблюдался при накачке паров бария излучением ХеСl*-лазера. Была обнаружена радиационная релаксация на ИК-переходе бария $7p^1P^0_1 \rightarrow 7s^1S_0$ с $\lambda = 2317$ нм [7]. На рис. 3, а пунктирной стрелкой указан аналогичный радиационный переход в иттербии $7p^1P^0_1 \rightarrow 7s^1S_0$ с длиной волны $\lambda = 1610^*$ нм. Другие возможные ИК-переходы с квазирезонансного уровня $7p^1P^0_1$ на рис. 3, а не представлены.

Вторым процессом накачки $6s5d^1D_2$ и $6s6d^3D_{1,2,3}$ может выступать процесс электронного вынужденного комбинационного рассеяния (ЭВКР). В этом случае уровни $6s5d^1D_2$ и $6s6d^3D_{1,2,3}$ — это конечные уровни ЭВКР, а квазирезонансный уровень $7p^1P^0_1$ — промежуточный. В ходе процесса ЭВКР под действием накачки ($\lambda_n = 248$ нм) происходит перенос населенности с основного состояния иттербия $6s6s^1S_0$ на конечные состояния $6s5d^1D_2$ и $6s6d^3D_{1,2,3}$ атома Yb. ЭВКР такого вида наблюдалось при квазирезонансной накачке паров Ва [7] и Eu [8].

Пунктирными линиями на рис. 3 показаны ЭВКР-переходы, которые экспериментально не регистрировались, но существование которых предполагалось исходя из правил отбора для дипольных переходов. В частности, на рис. 3 представлен процесс ЭВКР излучения KGF*-лазера, в котором в качестве конечных уровней участвуют синглетный $6s6d^1D_2$ (40062 см^{-1}) и триплетные уровни $6s6d^3D_3$ (39966 см^{-1}), $6s6d^3D_2$ (39838 см^{-1}) и $6s6d^3D_1$ (39809 см^{-1}). В этом случае преобразованное излучение с длинами волн $\lambda = 56179^*$; 36496^* ; 24876^* ; 23202^* нм будет лежать в дальнем и в среднем ИК-диапазонах спектра. Заметим, что комбинационное рассеяние с таким большим стоксовым сдвигом уже наблюдалось. При гиперкомбинационном рассеянии в парах стронция было зафиксировано излучение с $\lambda \sim 16000$ [14] и даже 20000 нм при комбинационном рассеянии в парах цезия [15].

При высоком давлении буферного газа весьма вероятными становятся процессы преддиссоциации [16–18] или столкновительной релаксации населенности промежуточного уровня иттербия $7p^1P^0_1$. При этом происходит столкновительные перенос населенности с нечетного квазирезонансного $7p^1P^0_1$ на четные уровни Yb $6s5d^1D_2$ и $6s6d^3D_{1,2,3}$. В результате этих столкновительных процессов оптиче-

ские ИК-переходы между промежуточным уровнем $7p^1P^0_1$ и нижележащими синглетным $6s6d^1D_2$ и триплетными уровнями иттербия $6s6d^3D_3$, $6s6d^3D_2$ и $6s6d^3D_1$ шунтируются столкновительными переходами.

К сожалению, в настоящей работе изучалась только видимая область спектра излучения, преобразованного в парах иттербия. Действие вынужденной радиационной релаксации, ЭВКР и преддиссоциации проявляется в ИК-области спектра. Наличие интенсивных линий УСИ или ЭВКР прямо указывают на механизм накачки. Отсутствие линий либо их исчезновение при повышении давления активной среды (паров металла или буферного газа) может трактоваться как включение процесса преддиссоциации. Чтобы выделить вклад каждого из рассмотренных выше процессов накачки уровней иттербия $6s6d^3D_3$, $6s6d^3D_2$ и $6s6d^3D_1$, следует провести дополнительные исследования преобразованного излучения в ИК-диапазоне.

Тем не менее, принимая во внимание результаты ранее выполненных работ [7, 8], есть основания предполагать, что действие вышеперечисленных процессов может служить объяснением механизма накачки уровней $6s5d^1D_2$, $6s6d^3D_{1,2,3}$ и появления множества линий УСИ на переходах атома иттербия (см. рис. 2). Напомним, что атомы бария, европия и иттербия имеют качественно похожую структуру уровней энергии [19]. Условия возбуждения паров Ва [7] и Eu [8] и условия возбуждения паров Yb, реализованные в настоящей работе, качественно похожи. Поэтому можно ожидать, что и результаты накачки будут также похожими.

Заметим, что большинство линий УСИ, представленных на рис. 2, 3 в качестве нижнего лазерного уровня имеют нечетные уровни $6s6p^1P^0_1$ и $6s6p^3P^0_1$. Эти уровни — резонансные. Они связаны с основным состоянием иттербия $6s6s^1S_0$, оптическими переходами с $\lambda = 398,8$ и $555,6$ нм.

В настоящей работе зарегистрировано когерентное излучение вблизи или на указанных выше резонансных линиях иттербия, однако оно носило нерегулярный характер. Точно установить диапазон экспериментальных условий, в которых можно уверенно наблюдать когерентное излучение на упомянутых ранее резонансных линиях не удалось. Эксперименты, направленные на изучение природы резонансного излучения и условий его наблюдения, предполагается провести в будущем.

Заключение

В работе представлены результаты, полученные при оптической накачке паров иттербия излучением KGF*-лазера ($\lambda_n = 248$ нм). Выбор лазера обусловлен наличием квазирезонанса накачки с резонансным переходом иттербия $6s6s^1S_0$ – $6s7p^1P^0_1$ с $\lambda = 246,5$ нм [19]. По техническим причинам исследовалось преобразованное излучение видимого диапазона, доступное для визуального наблюдения.

При фокусировке излучения лазера накачки с $\lambda_n = 248$ нм в кювету с парами иттербия были

обнаружены интенсивные линии усиленного спонтанного излучения, вызванные переходами между группами четных ($6s5d^1D_2$, $6s6d^3D_{1,2,3}$) и нечетных уровней ($6s6p^1P^0_1$, $6s6p^3P^0_{1,2}$) иттербия.

Зарегистрировано когерентное излучение на резонансных линиях иттербия с $\lambda = 398,8$ и $555,6$ нм. Указанные линии обусловлены соответственно переходами $6s6p^1P^0_1 \rightarrow 6s6s^1S_0$ и $6s6p^3P^0_1 \rightarrow 6s6s^1S_0$ в атоме иттербия. Однозначно определить экспериментальные условия наблюдения этих линий пока не удалось.

Рассмотрена последовательность процессов, приводящая к образованию инверсии на атомных переходах иттербия. Согласно результатам, изложенным в работах [7, 8], можно дать следующее объяснение факту появления инверсии на переходах атома иттербия в нашем случае. При низкой плотности среды накачка уровней $6s5d^1D_2$, $6s6d^3D_{1,2,3}$ может быть обусловлена радиационной релаксацией квазирезонансного уровня $6s7p^1P^0_1$ или процессом ЭВКР. Если плотность возбуждаемой среды велика, накачка указанных уровней Yb может быть обусловлена столкновительной релаксацией (в частности, преддиссоциацией) квазирезонансного уровня $6s7p^1P^0_1$. При этом происходит столкновительные перенос населенности с нечетного квазирезонансного $7p^1P^0_1$ на четные уровни иттербия $6s5d^1D_2$ и $6s6d^3D_{1,2,3}$.

Работа выполнена в рамках бюджетного Проекта П.10.1.1. Исследование генерационных свойств атомов металлов и их соединений для создания источников когерентного излучения и прецизионная молекулярная спектроскопия.

1. *Справочник по лазерам*. В 2-х т. Т. 1 / под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. Радио, 1978. 504 с.
2. *Исаев А.А., Петраш Г.Г.* Исследование импульсных газовых лазеров на атомных переходах // Тр. ордена Ленина Физ. ин-та им. П.Н. Лебедева АН СССР. М.: Наука, 1975. Т. 81. С. 3–88.
3. *Таблицы физических величин*. Справочник / под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
4. *Климкин В.М., Прокопьев В.Е., Сокоиков В.Г.* Исследование зависимости мощности генерации на ИК-линиях иттербия от частоты следования накачки // Квант. электрон. 1982. Т. 8, № 4. С. 722–725.
5. *Верховский В.С., Климкин В.М., Прокопьев В.Е., Сокоиков В.Г., Тарасенко В.Ф., Федоров А.И.* Ис-

следование ВКР излучения эксимерных лазеров на электронных переходах атомов металлов // Квант. электрон. 1982. Т. 9, № 11. С. 2151–2155.

6. *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, XIth All-Union Conf. Coherent. And Nonlinear Opt., Part I. Erevan. 1982. P. 76–77.
7. *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.
8. *Сокоиков В.Г., Климкин А.В.* Вынужденное комбинационное рассеяние излучения XeF* и KrF-лазеров в парах самария и европия // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 4. С. 295–301; *Sokovikov V.G., Klimkin A.V.* Stimulated raman scattering of XeF* and KrF laser radiation in samarium and europium vapors // Atmos. Ocean. Opt. 2014. T. 27, N 5. P. 447–453.
9. *White J., Bokor J., Henderson D.* Optically pumped atomic thulium lasers // IEEE J. Quantum Electron. 1982. V. QE-18, N 3. P. 320–322.
10. *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.
11. *Сокоиков В.Г.* Исследование двухфотонной селективной фотоионизации паров щелочноземельных и редкоземельных элементов // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 2. С. 190–197.
12. *Корлис Ч., Бозман У.* Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов. М.: Мир, 1968. 562 с.
13. *Carlsten J.L., Szöke A., Raymer M.G.* Collisional redistribution and saturation of near resonance scattered light // Phys. Rev. A. 1977. V. 15, N 3. P. 1029–1045.
14. *Reif J., Walther H.* Generation of tunable 16 μ m radiation by stimulated hyper-Raman effect in strontium vapor // Appl. Phys. 1978. V. 15. P. 361–364.
15. *Бахрамов С.А., Тартаковский Г.Х., Хабибуллаев П.К.* Нелинейные резонансные процессы и преобразование частоты в газах. Ташкент: ФАН, 1981. 160 с.
16. *Trainor D.W., Mani S.A.* Atomic calcium laser: Pumped via collision-induced absorption // J. Opt. Soc. Am. 1978. V. 68, N 11. P. 1203–1205.
17. *Madigan M., Hocker L.O., Flint J.H., Dewey C.F.* Pressure dependence of the infrared laser lines in barium vapor // IEEE J. Quantum. Electron. 1980. V. QE-15, N 12. P. 1294–1296.
18. *Эксимерные лазеры* / под ред. Ч. Ройдза. М.: Мир, 1981. 245 с.
19. *Прокопьев В.Е., Яценко А.С.* Диаграммы Гроттриана нейтральных атомов. Препр. / Ин-т автоматики и электротехники СО АН СССР (Новосибирск). 1981. № 160. 52 с.

V.G. Sokovikov, V.E. Prokop'ev, A.V. Klimkin. ASE atomic lines observed under optical pumping of Yb vapors by KrF* laser radiation.

Results on quasi-resonant optical pumping of Yb vapors by KrF* laser radiation ($\lambda_p = 248$ nm) are presented. The converted radiation is studied in the visible range available for visual observation. Strong lines of amplified spontaneous emission are detected. These lines are due to transitions between the even groups ($6s5d^1D_2$, $6s6d^3D_{1,2,3}$) and odd levels ($6s6p^1P^0_1$, $6s6p^3P^0_{1,2}$) of ytterbium. Coherent radiation is detected on Yb resonance lines with $\lambda = 398.8$ and 555.6 nm, which are caused, respectively, by $6s6p^1P^0_1 \rightarrow 6s6s^1S_0$ and $6s6p^3P^0_1 \rightarrow 6s6s^1S_0$ transitions in the Yb atom. A sequence of processes that lead to the formation of inversion at the Yb atomic transitions is qualitatively examined.