

УДК 535:371.623

Активный элемент на переходах атома натрия с оптической накачкой импульсами наносекундной длительности

Г.С. Евтушенко^{1,2}, Т.Д. Петухов¹, В.Б. Суханов¹, В.О. Троицкий¹,
А.Н. Куряк¹, М.В. Тригуб^{1*}

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

² Республиканский исследовательский научно-консультационный центр экспертизы,
123317, г. Москва, ул. Антонова-Овсеенко, 13, стр. 1

Поступила в редакцию 26.12.2019 г.

В работе представлены результаты разработки активного элемента на переходах атома натрия с продольной и поперечной накачкой. Экспериментально исследована возможность получения излучения на резонансных переходах при возбуждении активной среды с помощью импульсов наносекундной длительности различной энергии и спектрального состава. Накачка среды осуществлялась с помощью лазера на красителях и CuVg-лазера. Зафиксировано излучение на D -линиях натрия при накачке желтой линией излучения CuVg-лазера.

Ключевые слова: лазеры, источники излучения, оптическая накачка, спектроскопия, преобразование сигналов; lasers, radiation sources, optical pumping, spectroscopy, signal conversion.

Введение

Лазеры на парах металлов позволяют решать довольно широкий круг задач. Для определения температуры в верхних слоях атмосферы можно использовать лидарные технологии, позволяющие исследовать спектральные характеристики излучения паров щелочных металлов на высотах > 100 км [1], что предполагает возбуждение уровней D_1 и D_2 . Существуют задачи коррекции систем с адаптивной оптикой, решаемые с помощью искусственных звезд [2, 3]. Одной из перспективных задач, для решения которых могут быть использованы активные среды на парах металлов, является скоростная визуализация с активной спектральной фильтрацией. Возможности систем визуализации с усилителями яркости на самоограниченных переходах в парах металлов продемонстрированы в ряде работ (например, [4]). Достаточно перспективной может стать разработка активных оптических систем на основе сред на парах щелочных металлов, которые имеют высокую эффективность преобразования оптического излучения. Наилучшие результаты с точки зрения мощности генерации были получены для лазеров на парах цезия и рубидия, где расстояние между уровнями D_2 и D_1 составляет 10 нм и более,

а D -линии находятся в ближнем ИК-диапазоне. Для возбуждения таких лазеров используются мощные лазерные диоды, что обуславливает активное развитие этого направления и появление мощных систем DPAL (Diode Pumped Alkali Laser) [5–7].

Для решения задач мониторинга окружающей среды и визуально-оптической диагностики наиболее востребованными будут системы, работающие в видимой и ближней ИК-областях спектра. Для этих целей наиболее перспективны среды на парах калия и натрия. Расстояние между уровнями D_2 и D_1 в атоме калия составляет 4 нм, а у натрия – 0,6 нм, что существенно меньше, чем у цезия и рубидия. Вследствие эффективного обмена энергией в присутствии буферного газа, давление которого должно быть достаточно высоким, между резонансными уровнями натрия устанавливается больцмановское распределение населенностей. Все это затрудняет получение высокой инверсной населенности в среде на резонансных переходах натрия и калия при использовании широкополосной оптической накачки.

Существуют два способа создания инверсной населенности между D -уровнями и основным состоянием атома натрия. Первый – резонансная накачка уровня D_2 излучением на длине волны $\lambda = 589$ нм с последующим излучательным переходом с уровня D_1 (589,6 нм) [5, 7–12]. Второй – нерезонансная накачка с отстройкой от линии D_2 в коротковолновую область. Согласно данным [12, 13] такой метод эффективен при высоком давлении буферного газа (как правило, инертного) за счет передачи энергии в межатомных соударениях его

* Геннадий Сергеевич Евтушенко (ime@tpu.ru); Тимофей Дмитриевич Петухов (smileedition@gmail.com); Виктор Борисович Суханов (qel@asd.iao.ru); Владимир Олегович Троицкий (qel@asd.iao.ru); Алексей Николаевич Куряк (alex@asd.iao.ru); Максим Викторович Тригуб (trigub@iao.ru).

атомов с атомами натрия. При этом можно использовать излучение достаточно широкого диапазона (575–589 нм). Одна из разновидностей такого типа возбуждения – «эксимерная» накачка [14–16]. Механизм возбуждения основан на предположении о существовании квазимолекул из атомов щелочного металла и буферного газа (Xe, Ar, CH₄, C₂H₆), поглощение которых лежит в диапазоне $\lambda = 545\text{--}570$ нм [17]. В этом случае также необходимо использование активных элементов с высоким давлением буферного газа. В литературе [17, 18] для резонансного и нерезонансного возбуждения паров натрия используют излучение перестраиваемых лазеров на красителях с $\lambda = 575\text{--}589$; 545–570 нм. Упрощенная схема накачки приведена на рис. 1. Кроме лазеров на красителях для возбуждения паров натрия используется параметрический генератор.

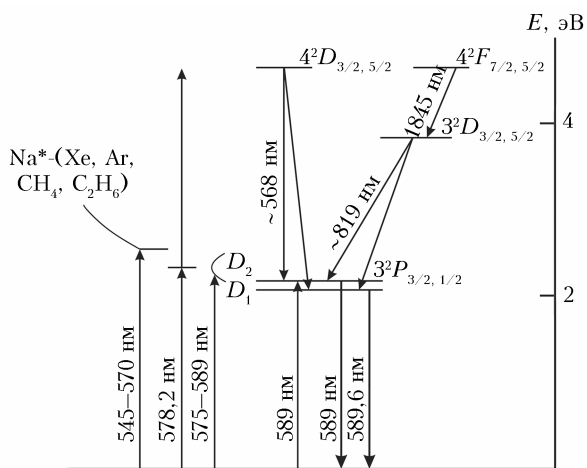


Рис. 1. Упрощенная схема рабочих переходов натрия и области оптической накачки

В [11] представлены результаты экспериментов по возбуждению паров натрия излучением с длиной волны вблизи 578 нм, которые свидетельствуют о перспективности такой накачки. В этом случае появляется возможность использовать лазер на парах бромида меди для получения излучения на атомных и молекулярных переходах натрия [19, 20].

Цель настоящей работы – разработка активного элемента на переходах атома натрия для формирования индуцированного излучения на D -линиях. В рамках работы исследуется возможность возбуждения среды импульсами излучения наносекундной длительности с различной энергией и спектральным составом.

Техника эксперимента

В экспериментах использована кювета размером 31×22 мм (рис. 2). Основой служит кварцевая трубка. Отростки для ввода и вывода излучения выполнены из трубки диаметром 18 мм. Выходные окна кювет изготовлены из оптического стекла с качеством не хуже $\lambda/10$. Вкладыш с размещенным в нем

натрием выполнен из вольфрамовой фольги. Нагреватель из нихромовой нити намотан на внешнюю стенку кюветы. Теплоизолятор изготовлен из плиты КТП. Для регулировки, контроля и стабилизации температуры кюветы был разработан термостабилизатор с точностью 1°C ; температура измерялась с помощью термопары, расположенной возле нагревателя, внутри теплоизолятора.

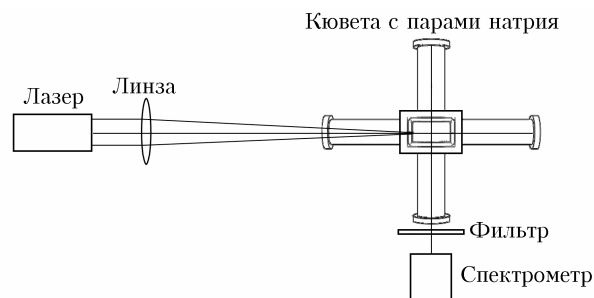


Рис. 2. Конструкция кюветы с поперечной накачкой

Спектры излучения фиксировались с помощью спектрометра Ocean Optics USB4000-VIS-NIR-ES с разрешением 1,5 нм и монохроматора SOLAR MSDD 1000 с CDD камерой Andor iDus 420 и разрешением 0,021 нм. Для возбуждения паров натрия использовалось два типа лазеров. Первый – лазер на красителе ЛЖИ-501, перестраиваемый по длинам волн, с накачкой лазером LOTIS LS2134UTF. Энергия импульса накачки достигала 170 мДж, частота следования импульсов – 10 Гц. Для резонансного возбуждения применялся краситель Родамин С. Энергия импульса излучения на $\lambda = 589$ нм с шириной спектра 0,5 нм составляла 0,67 мДж. Для нерезонансного возбуждения использовался краситель родамин 6Ж. Энергия импульса излучения на $\lambda = 560$ нм с шириной спектра 5 нм составляла 5 мДж.

Также для накачки применялся CuVг-лазер с частотой следования импульсов 10,8 кГц. При использовании неустойчивого резонатора энергия импульса излучения CuVг-лазера (суммарная по линиям 510,6 и 578,2 нм) составляла 0,5 мДж, на линии 578,2 нм – 0,2 мДж. Излучение на линии 510,6 нм подавлялось полосовым фильтром [21].

Как известно, ширина линии поглощения излучения в кювете напрямую связана с ее температурой и давлением буферного газа [22]. Для оптимизации возбуждения в рамках работы были экспериментально получены спектры пропускания паров натрия в кювете (рис. 3). При этом варьировались концентрация паров натрия за счет изменения температуры кюветы, а также давление и тип буферного газа.

Полученные спектры поглощения позволяют экспериментально оценить максимально возможную отстройку спектра линии возбуждения от D -линий натрия. По результатам исследования были определены рабочие диапазоны концентраций атомов натрия и давлений буферного газа (гелия, ксенона и аргона), при которых линии излучения поглоща-

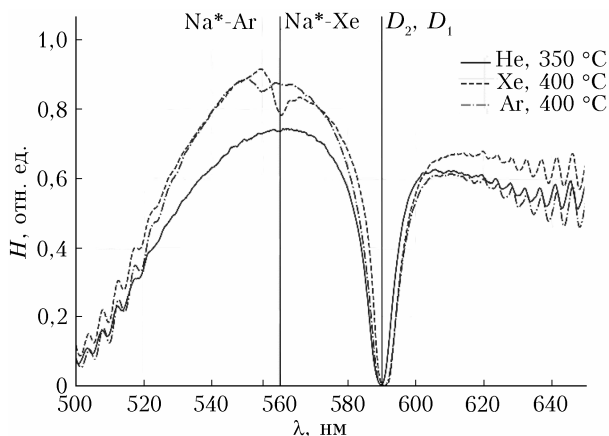


Рис. 3. Спектр пропускания кюветы при различных условиях работы

ются и уверенно регистрируются. Это обеспечивается при температурах $< 250\text{ }^\circ\text{C}$ и начальном давлении буферного газа < 500 торр. Концентрация атомов натрия при этом не превышает $5 \cdot 10^{13}\text{ см}^{-3}$.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Схема эксперимента с возбуждением лазером на красителях позволила исследовать резонансное и нерезонансное возбуждение. При резонансной накачке (краситель родамин С) в поперечном направлении (относительно накачки) регистрировалось как рассеянное излучение накачки (непоглощенное), так и излучение, соответствующее линиям натрия. На рис. 4, а представлены результаты возбуждения паров натрия при накачке в линию D_2 . При оптимальной температуре кюветы ($150\text{ }^\circ\text{C}$) регистрировалось излучение, соответствующее линии D_1 натрия с полушириной $\sim 0,1$ нм. При охлаждении кюветы до $80\text{ }^\circ\text{C}$ излучение на линии D_1 пропадало, а интенсивность рассеянного излучения накачки уменьшалась (пунктирная кривая на рис. 4, а). Следует отметить, что аналогичная картина наблюдалась при накачке паров натрия в линию D_1 . При этом регистрировалось излучение D_2 с полушириной $0,127$ нм, которое пропадало при охлаждении кюветы. Учитывая, что излучение появлялось при настройке на обе D -линии, можно утверждать, что имеет место эффективный обмен энергией между D -уровнями за счет высокого давления буферного газа Хе и Не.

Для нерезонансной накачки с помощью лазера на красителе (родамин 6Ж) в кювету был закачан буферный газ Хе. Область поглощения молекулы NaXe имеет максимум в районе 560 нм [5]. Температурный режим кюветы и, следовательно, концентрация атомов натрия в активной зоне подбирались таким образом, чтобы поглощение было максимальным. Несмотря на то что энергия импульса накачки была на порядок выше (5 мДж), чем при резонансной накачке, величина сигнала спонтанного излучения на D -линиях натрия была существенно ниже, чем при резонансной накачке. В качестве примера на рис. 4, б приведен спектр регистрируемого из-

лучения при температуре кюветы $100\text{ }^\circ\text{C}$. Видно, что амплитуда полезного сигнала (спонтанного излучения) незначительно превышает уровень шумов приемника, что говорит о низкой эффективности возбуждения в условиях эксперимента. Ранее нами было показано, что при нерезонансной накачке натрия излучением лазера на красителе (пириктин 597) с максимумом в районе 585 нм и шириной линии 5 нм по полувысоте и энергиях накачки > 2 мДж наблюдалось вынужденное излучение на D -линиях натрия [22, 23], интенсивность которого также была значительно ниже, чем при резонансном возбуждении.

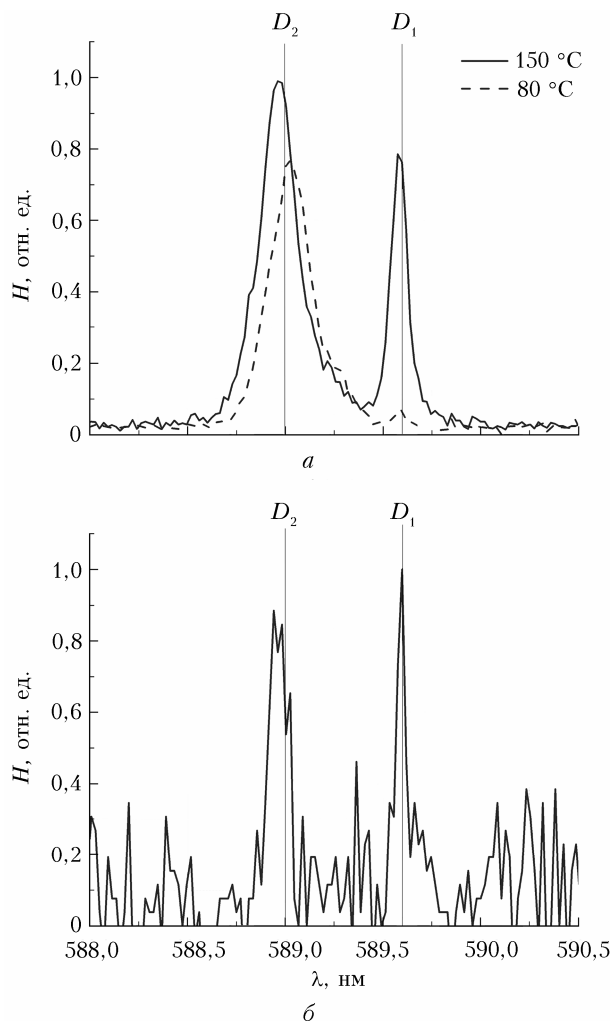


Рис. 4. Спектры излучения при возбуждении лазером на красителях при резонансной (а) и нерезонансной накачке (б)

Еще одним вариантом нерезонансной накачки стал эксперимент по возбуждению паров натрия излучением лазера на парах бромида меди с $\lambda = 578,2$ нм, что близко по энергетике к двухфотонному переходу $3^2S_{1/2} - 4^2D_{5/2,3/2}$ (или $3^2S_{1/2} - 4^2F_{7/2,5/2}$). Энергия двух фотонов $578,2$ нм составляет $4,293$ эВ, а энергия верхних уровней $4^2D_{5/2,3/2}$ ($4^2F_{7/2,5/2}$) натрия — $4,29$ эВ. В этом эксперименте использовался буферный газ Хе с давлением 500 торр, а энергия импульса накачки на $578,2$ нм составила $0,2$ мДж.

Как показали эксперименты, при температуре активной среды 150 °С, помимо рассеянного излучения накачки, в спектре свечения уверенно регистрируется излучение, соответствующее D -линиям натрия (рис. 5, *а*).

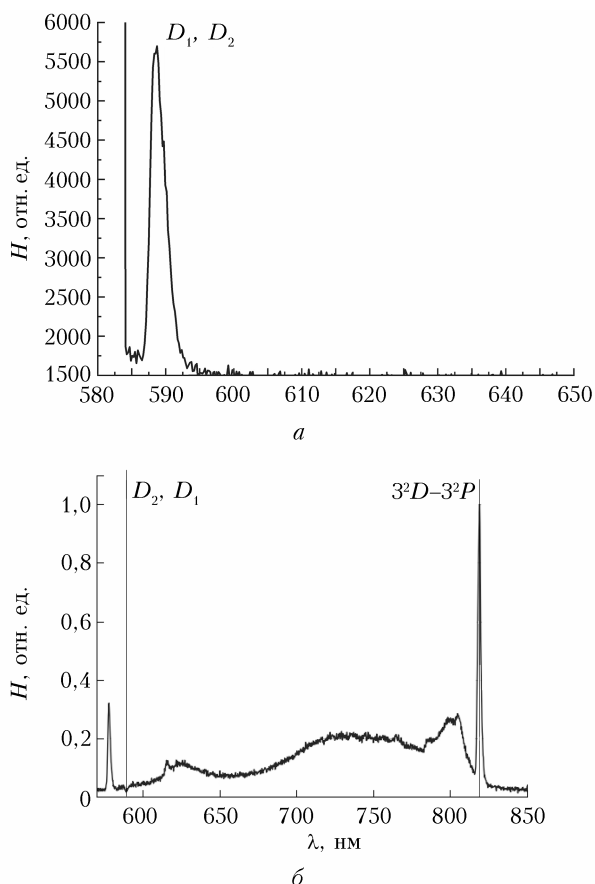


Рис. 5. Спектры излучения при накачке CuVg-лазером при температуре кюветы 150 (*а*), 200 °С (*б*)

К сожалению, указанные линии не разделялись с помощью используемого в эксперименте спектрометра Ocean Optics. При повышении температуры активной среды наблюдалось интенсивное излучение на линии 810 нм (рис. 5, *б*), что мы связываем с двухфотонным возбуждением излучением 578,2 нм верхних уровней натрия $4^2D_{5/2, 3/2}$, $4^2F_{7/2, 5/2}$ с последующим их радиационным распадом. При этом на интересующих нас D -линиях наблюдалось поглощение излучения (рис. 5, *б*). А в области 600–800 нм появляются полосы излучения молекул Na_2 и $NaXe$. В случае накачки линией 510,6 нм (энергия излучения на которой в 1,5–2 раза превышает энергию на линии 587,2 нм) вторичное излучение в районе D -линий натрия и в ИК-области спектра не наблюдалось. В этом эксперименте, несмотря на меньшую энергию импульса накачки желтой линией CuVg-лазера, по сравнению с резонансной накачкой лазером на красителе, наблюдается более высокая спектральная плотность излучения, поскольку ширина линии излучения на переходах меди на два порядка меньше, чем у лазера на кра-

сителе. Можно полагать, что это и послужило основой для эффективного каскадного заселения D -уровней натрия через верхние состояния атома натрия $4^2D_{5/2, 3/2}$ ($4^2F_{7/2, 5/2}$).

Заключение

Разработан активный элемент на переходах атома натрия при возбуждении оптическими импульсами наносекундной длительности. Проведены экспериментальные исследования способов накачки паров натрия импульсами с различной спектральной плотностью. Упомянутые способы реализованы путем применения двух типов лазеров с разной энергией импульса возбуждения, его спектральной плотностью, частотой следования импульсов накачки (от единиц до десятков кГц).

Экспериментально показано, что нерезонансная накачка D -уровней натрия в область 554–570 нм через образование молекул $Na-Xe$ существенно уступает по эффективности резонансной накачке, по крайней мере, при давлении буферного газа менее одной атмосферы. Для нерезонансной оптической накачки в область 575–589 нм необходима энергия импульса как минимум на порядок больше, чем при резонансной накачке.

Важным результатом является получение излучения на резонансных линиях атома натрия при нерезонансной накачке излучением желтой линии лазера на парах бромида меди. Тот факт, что энергия в импульсе на линии накачки 578,2 нм была при этом втрое меньше, чем в эксперименте с резонансной накачкой, а также отсутствие излучения при накачке зеленой линией (510,6 нм) говорят о высокой эффективности возможного механизма двухфотонной накачки через верхние состояния натрия $4^2D_{5/2, 3/2}$, $4^2F_{7/2, 5/2}$ с последующим каскадным заселением резонансных D -уровней.

Авторы выражают благодарность Д.В. Шиянову, В.Г. Соковику за помощь в проведении экспериментов и обсуждение полученных результатов.

Разработка активного элемента и оценка эффективности возбуждения активной среды на переходах атома натрия выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-79-10096).

Исследование спектральных характеристик излучения среды выполнено в рамках проекта ИОА СО РАН № АААА-А17-117021310150-0.

1. Alpers M., Eixmann R., Fricke-Begemann C., Gerding M., Höffner J. Temperature lidar measurements from 1 to 105 km altitude using resonance, Rayleigh, and rotational Raman scattering // Atmos. Chem. Phys. 2004. V. 4, iss. 3. P. 793–800.
2. Шалагин А.М. Мощные лазеры на парах щелочных металлов с диодной накачкой // Успехи физ. наук. 2011. Т. 181, № 8. С. 1011–1016.
3. Богачев А.В., Гаранин С.Г., Дудов А.М., Ерошенко В.А., Куликов С.М., Михаелян Г.Т., Панарин В.А., Паутов В.О., Рус А.В., Сухарев С.А. Лазер на парах цезия с диодной накачкой и прокачкой лазерной среды по замкнутому циклу // Квант. электрон. 2012. Т. 42, № 2. С. 95–98.

4. *Тригуб М.В., Платонов В.В., Федоров К.В., Евтушенко Г.С., Оситов В.В.* CuBr-лазер в задачах визуализации процессов получения наноматериалов // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 3. С. 249–253; *Trigub M.V., Platonov V.V., Fedorov K.V., Evtushenko G.S., Ositov V.V.* CuBr laser for nanopowder production visualization // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 4. P. 376–380.
5. *Krupke W.F.* Diode pumped alkali lasers (DPALs) – A review (rev 1) // Prog. Quantum. Electron. 2012. V. 36, N 1. P. 4–28.
6. *Gao F., Chen F., Xie J.J., Li D.J., Zhanga L.M., Yanga G.L., Guo J., Guo L.H.* Review on diode-pumped alkali vapor laser // Optik. 2013. V. 124, iss. 20. P. 4353–4358.
7. *Pitz G.A., Anderson M.D.* Recent advances in optically pumped alkali lasers // Appl. Phys. Rev. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5006913> (last access: 26.11.2019).
8. *Антутов С.Н., Плеханов А.И., Шалагин А.М.* Сверхсветимость на резонансном переходе атомов Na при оптическом возбуждении // Опт. и спектроскоп. 1984. Т. 56, № 2. С. 215–222.
9. *Konefal Z., Ignaciuk M.* Stimulated collision induced processes in sodium vapor in the presence of helium // Appl. Phys. B. 1990. V. 51. P. 285–291.
10. *Konefal Z., Ignaciuk M.* Stimulated processes in sodium vapour in the presence of molecular buffer gas systems // Opt. Quantum Electron. 1993. V. 28. P. 169–180.
11. *Hager G.D., Perram G.P.* A three-level analytic model for alkali metal vapor laser: Part I. Narrowband optical pumping // Appl. Phys. B. 2010. V. 101, N 1. P. 45–56.
12. *Марков Р.В., Плеханов А.И., Шалагин А.М.* Инверсия заселенностей на переходах в основное состояние атомов при нерезонансном поглощении лазерного излучения // ЖЭТФ. 2001. Т. 120, № 5. С. 1185–1193.
13. *Марков Р.В., Пархоменко А.И., Плеханов А.И., Шалагин А.М.* Генерация на резонансном переходе атомов натрия при нерезонансном оптическом возбуждении // ЖЭТФ. 2009. Т. 136, № 2. С. 211–233.
14. *Hu Shu, Gai Bao-Dong, Cao Zhan-Li, Guo Jing-Wei, Wang Fan.* Experimental and theoretical evaluation of the absorption coefficients of excimer pairs of sodium with noble gases and alkanes // Acta Phys.-Chim. Sin. 2016. V. 32, N 4. P. 848–854.
15. *Mironov A.E., Goldschlag W., Eden J.G.* Alkali D₂ line laser optically pumped by two color free-free absorption // Proc. SPIE. 2016. V. 9729. P. 972906.
16. *Readle J.D., Wagner C.J., Verdeyen J.T., Spinka T.M., Carroll D.L., Eden J.G.* Excimer-pumped alkali vapor lasers: A new class of photoassociation lasers // Proc. SPIE. 2010. V. 7581. P. 75810.
17. *Yanfei Lü, Xihe Zhang, Shutao Li, Jing Xia, Weibo Cheng, Zheng Xiong.* All-solid-state cw sodium D₂ resonance radiation based on intracavity frequency-doubled self-Raman laser operation in double-end diffusion-bonded Nd³⁺:LuVO₄ crystal // Opt. Lett. 2010. V. 35, N 17. P. 2964.
18. *Taylor L., Feng Y., Bonaccini D.C.* High power narrowband 589 nm frequency doubled fibre laser source // Opt. Express. 2009. V. 17, N 17. P. 14687–14693.
19. *Kuryak A.N., Sokovikov V.G., Troitskii V.O.* Investigation of resonance radiation of natrium vapor excited by CuBr-laser // Abstracts of the IX Int. Conf. “Atomic and Molecular Pulsed Lasers”. Tomsk: IAO SB RAS, 2009. P. 130.
20. *Канорский С.И., Каслин В.М., Якушев О.Ф.* Na₂-лазер с оптической накачкой // Квант. электрон. 1980. Т. 7, № 10. С. 2201–2203.
21. *Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Троицкий В.О.* Исследование усилительных характеристик CuBr-лазера // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 2. С. 162–164.
22. *Petukhov T.D., Evtushenko G.S., Tel'minov E.N.* Amplification of spontaneous emission on sodium D-lines using nonresonance broadband optical pumping // Proc. SPIE. 2018. V. 10614. P. 1061403.
23. *Петухов Т.Д., Евтушенко Г.С., Тельминов Е.Н.* Усиленное спонтанное излучение на D-линиях натрия при нерезонансной оптической накачке // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 10. С. 888–892; *Petukhov T.D., Evtushenko G.S., Tel'minov E.N.* Amplified spontaneous emission on sodium D-lines using nonresonant optical pumping // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 1. P. 101–105.

G.S. Evtushenko, T.D. Petukhov, V.B. Sukhanov, V.O. Troitskii, A.N. Kuryak, M.V. Trigub. **Sodium vapor active element excited by nanosecond optical pulses.**

A transverse-pumped sodium vapor active element has been developed. A possibility of lasing at resonant transitions upon active medium excitation using nanosecond pulses of various energies and spectral conditions has been experimentally investigated. The medium was pumped using a dye laser and a CuBr laser. Radiation was detected on sodium D lines when pumping with CuBr laser yellow emission line.