

УДК 621.373.8

## ОПТИЧЕСКАЯ НАКАЧКА ИЗОТОПОВ РУБИДИЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ ЛАЗЕРА

© 2023 г. А. А. Антипов<sup>1</sup>, \*, А. Г. Путилов<sup>1</sup>, А. Е. Шепелев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН –  
филиал Федерального государственного учреждения “Федеральный научно-исследовательский центр  
“Кристаллография и фотоника” Российской академии наук”, Шатура, Россия

\*E-mail: antiplit@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.07.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 28.07.2023 г.

Рассмотрено применение  $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ -лазера, работающего в режиме свободной генерации, в качестве источника излучения оптической накачки паров щелочного металла рубидия. Использование дисперсионных элементов в составе резонатора лазера позволяет осуществлять плавную перестройку длины волны излучения и реализовать генерацию на длинах волн, соответствующих линиям  $D_1$  и  $D_2$  изотопов  $^{85}\text{Rb}$  и  $^{87}\text{Rb}$ . Экспериментально реализована оптическая накачка изотопов рубидия лазерным излучением с длинами волн 795 и 780 нм соответственно, демонстрируется их флуоресценция. Обсуждается вопрос применения перестраиваемого по длине волны генерации лазера в методе спин-обменной оптической накачки благородных газов.

DOI: 10.31857/S0367676523702794, EDN: FQSUVV

### ВВЕДЕНИЕ

Изотопы благородных газов, например, такие как  $^3\text{He}$  и  $^{129}\text{Xe}$  могут использоваться в обычном состоянии в качестве контрастных веществ в МРТ диагностике. Однако их применение в медицинских исследованиях ограничено, что в основном связано с небольшой степенью поляризации ядер при обычных условиях. Одним из перспективных методов получения благородных газов в спин-поляризованном состоянии с высокой степенью поляризации (гиперполяризованное состояние) является метод оптической накачки щелочных атомов и последующий столкновительный спиновый обмен с изотопами благородных газов [1, 2].

Область применения поляризованного атомарного газа: это и приложения МРТ в части диагностики патологий дыхательных путей [3–5] и исследования сыпучих материалов, а также поверхностных структур [6].

Степень поляризации благородных газов в определенной степени зависит от эффективности возбуждения паров щелочных металлов оптической накачкой. Непосредственно процесс гиперполяризации благородных газов в результате взаимодействия их ядер с возбужденными парами щелочных металлов достаточно подробно описан в ряде работ [7–12].

Нами реализована оптическая накачка паров щелочного металла рубидия. При нагревании выше температуры плавления –  $39^\circ\text{C}$  металл рубидий преобразуется в пар, который преимущественно

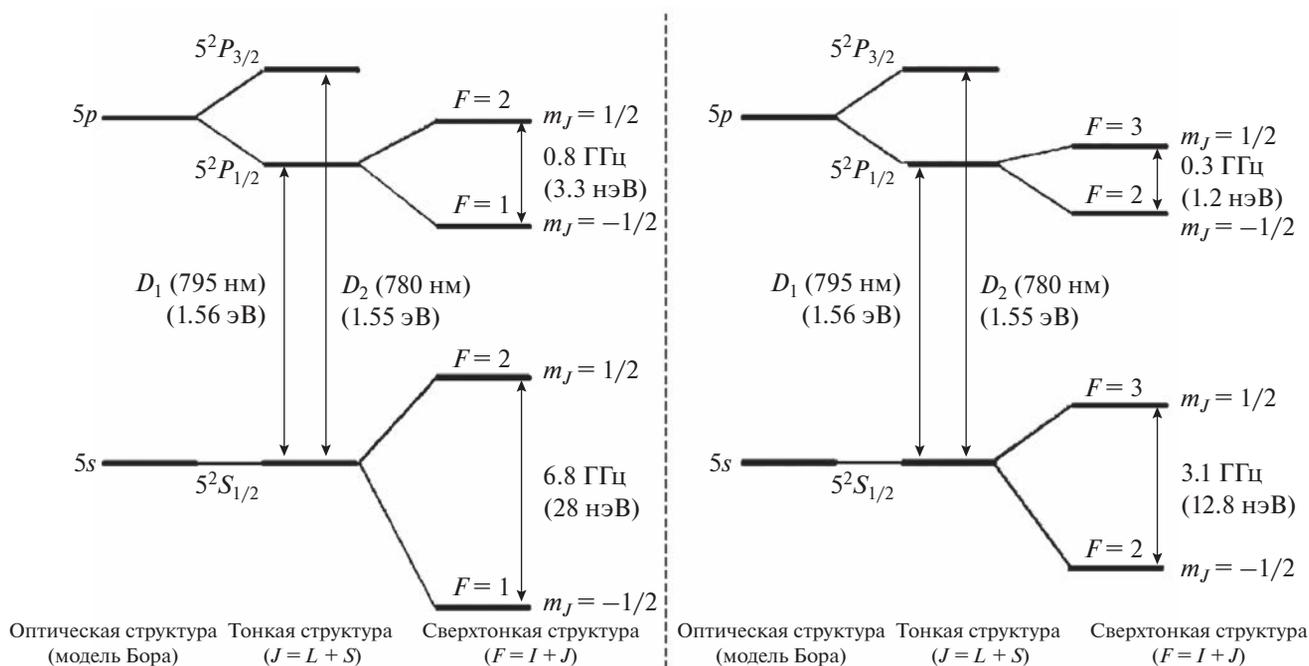
состоит из изотопов  $^{85}\text{Rb}$  и  $^{87}\text{Rb}$ . Естественная смесь изотопов составляет  $^{87}\text{Rb}$  – 28%,  $^{85}\text{Rb}$  – 72%.

Обычно оптической накачке подвергается изотоп, имеющий наибольшую концентрацию, а именно,  $^{85}\text{Rb}$  с линией перехода  $D_1$  (рис. 1) [7]. Данная линия перехода соответствует области оптического спектра  $795 \pm 0.3$  нм [13].

В качестве источников накачки Rb в настоящее время используют лазеры, генерирующие циркулярно поляризованное излучение на частоте перехода  $D_1$  со средней мощностью несколько десятков Вт. Перспективными источниками сегодня являются мощные диодные лазеры, а также, в основном, диодные лазерные решетки, средняя мощность излучения которых более 100 Вт.

Использование лазерного излучения с высокой средней мощностью позволяет накачивать пары Rb с высокой концентрацией. Это в свою очередь повышает скорость и эффективность поляризации благородных газов вследствие увеличения количества спин-обменных столкновений.

Однако эффективность применения лазерных диодов и линеек лазерных диодов в качестве источников излучения накачки в задачах гиперполяризации благородных газов весьма ограничена. Это в большей степени связано с несовершенством спектральных и пространственных параметров и характеристик излучения данных источников. В частности, излучение диодных лазеров характеризуется высокой пространственной неоднородностью распределения плотности мощ-



**Рис. 1.** Структура уровней  $D$ -линии  $^{87}\text{Rb}$  и  $^{85}\text{Rb}$ , используемых для оптической накачки, в отсутствие внешнего магнитного поля. Сверхтонкое расщепление второго возмущенного уровня  $5^2P_{3/2}$  не показано. Масштаб по энергиям не соблюден [7].

ности по сечению пучка, высокими углами расходимости (десятки градусов) и эллиптичностью пучка [14]. Все эти факторы требуют использования дополнительных оптических систем, в том числе асферических, для формирования и доставки излучения в зону оптической накачки.

Ширина спектра излучения диодных лазеров составляет 2–3 нм, что значительно превышает ширину соответствующей линии поглощения Rb [15, 16]. В связи с этим необходимо использовать дополнительные оптические элементы для уменьшения ширины спектра, например дифракционные решетки и объемные голографические решетки [17, 18].

Дополнительное использование сложных оптических элементов в составе лазера ухудшает его конструктивные и массогабаритные характеристики, а также приводит к увеличению его стоимости.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Мы предлагаем использовать в качестве источника накачки паров щелочного металла рубидия лазер на основе кристалла александрита ( $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ ). Оптическая схема лазера представлена на рис. 2. В качестве активного элемента лазера нами использовался стержень из кристалла александрита длиной 100 мм и диаметром 6.3 мм. Концентрация ионов  $\text{Cr}^{3+}$  в кристалле составляла 0.13 ат. %. Торцы стержня параллельны и просветлены в диапазоне рабочих длин волн от 700 до 850 нм [19]. Накачка активного элемента производилась импульсной лампой ИНП 6/90А.

Лампа и активный элемент помещались в квантрон К301В. Моноблочный эллиптический отражатель из цветного кварца (КЛЖ-3) с отражающим серебряным покрытием обеспечивал фильтрацию УФ спектра падающего на активный элемент излучения накачки [20].

Перестройка спектра излучения кристаллов с широкой полосой усиления обеспечивают резонаторы, в которых дисперсионные элементы, такие как призмы, дифракционные решетки, интерференционно-поляризационные фильтры являются селекторами длин волн. Для перестройки длины волны генерации кристалла александрита в диапазоне от 700 до 800 нм нами была выбрана трехгранная призма из стекла N-SF11 (SCHOTT) с преломляющим углом  $60^\circ$ . Призма устанавливалась в резонатор под углом к оптической оси излучения. Настройка на определенную длину волны осуществлялась вращением призмы или глухого зеркала. К основным видам неселективных потерь в призмном резонаторе относятся как поглощение в самой призме, так и отражение от ее граней. Для уменьшения потерь схема юстировалась с минимальной длиной оптического пути в призме и минимальным отклонением падающего поляризованного излучения на грань призмы, находящейся под углом, близким к углу Брюстера. Для дополнительной поляризации лазерного излучения в оптическую схему резонатора устанавливалась призма Глана [21].

Поворот дисперсионной призмы обеспечивал плавную перестройку спектра излучения лазера в

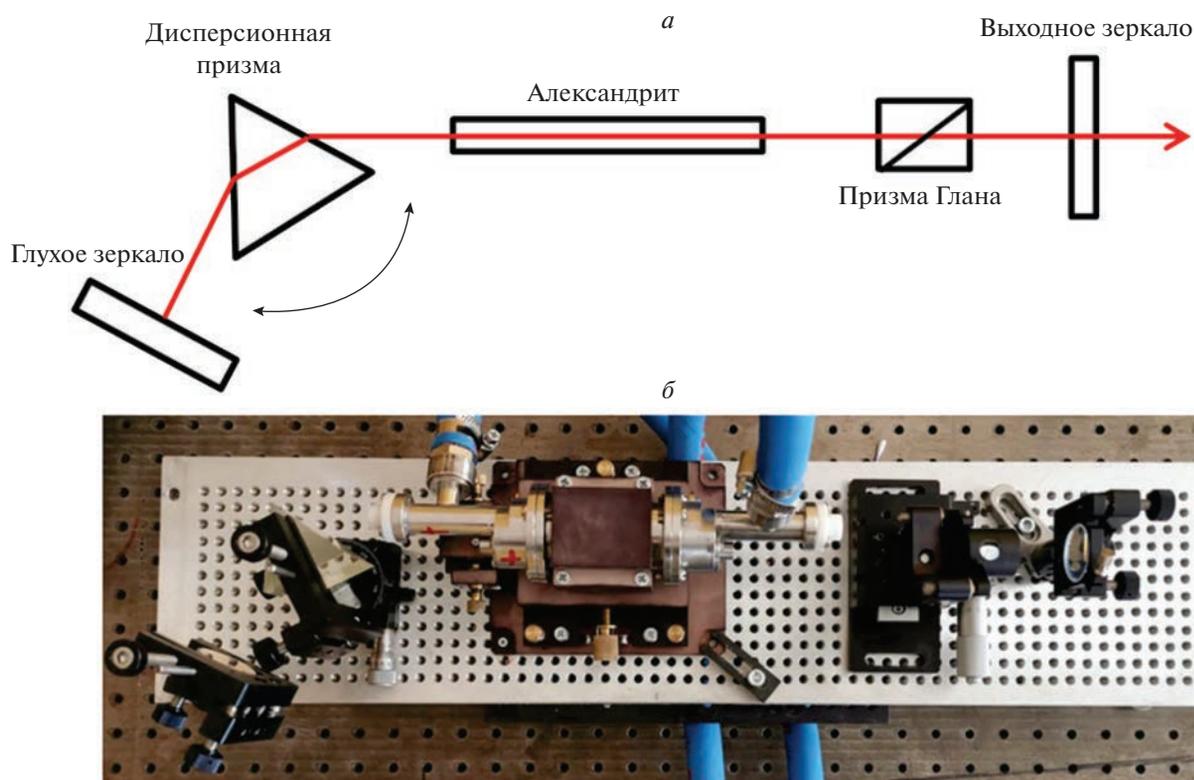


Рис. 2. Оптическая схема лазера на александрите с дисперсионной призмой (а), внешний вид лазера (б).

диапазоне 705–800 нм (рис. 3). Энергия излучения на длине волны 780 нм составляла 633 мДж, а на 795 нм – 193 мДж. Частота повторения импульсов тока накачки 10 Гц.

В эксперименте использовались перестраиваемый лазер на александрите, стеклянная ячейка с рубидием (масса  $\approx 0.04$  г) и система регистрации. Длина волны излучения лазера поочередно настраивалась на значения 795 и 780 нм, что позво-

ляло осуществлять накачку на частотах переходов D1 и D2 соответственно. Ячейка с рубидием (рис. 4) представляла собой цилиндрическую стек-

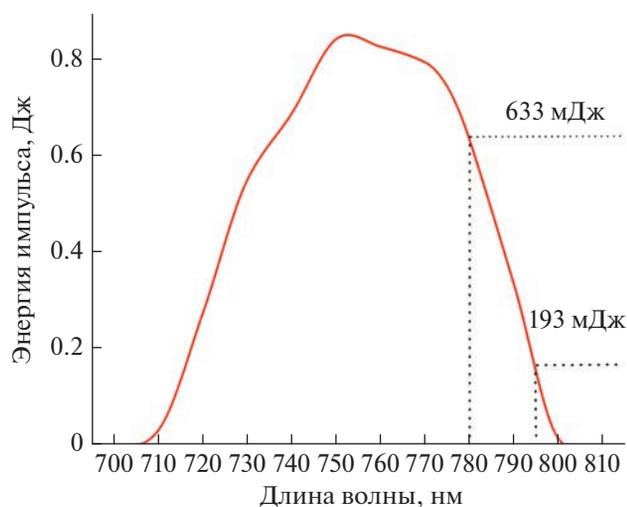


Рис. 3. Спектр перестройки лазера на александрите.

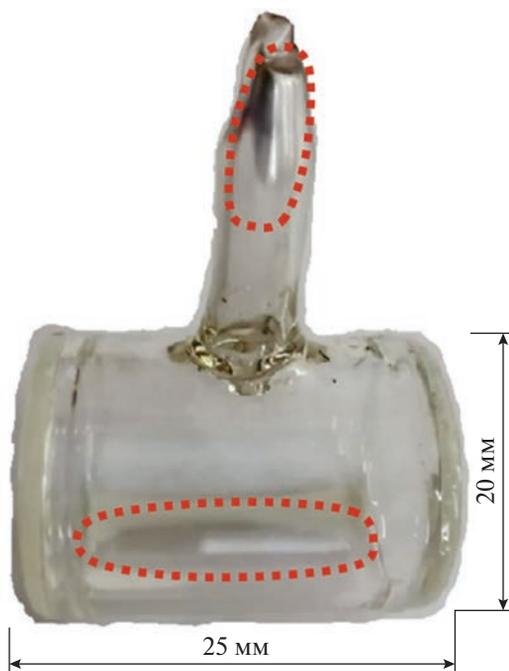
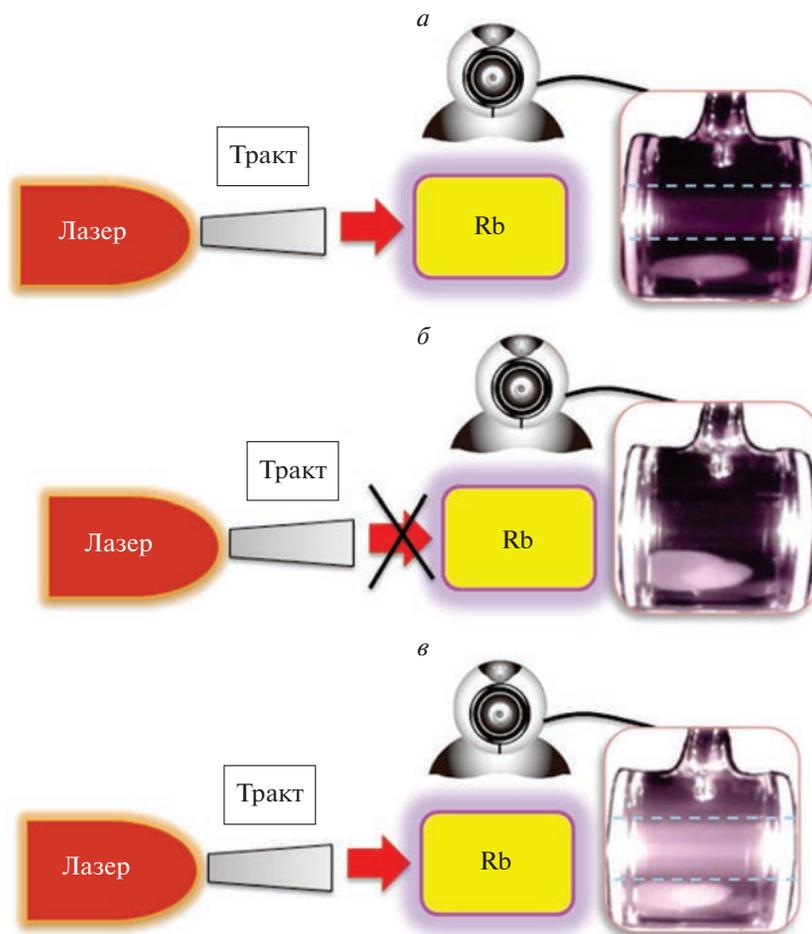


Рис. 4. Внешний вид используемой ячейки для проведения эксперимента по оптической накачке паров щелочного металла рубидия.



**Рис. 5.** Схематическое устройство оптической накачки паров Rb. Rb находится в оптической ячейке и при облучении начинает флуоресцировать: оптическая накачка на линии D1 (а), оптическая накачка на линии D2 (в). Данная флуоресценция наблюдается с помощью камеры. Область флуоресценции отмечена пунктирной линией. Отсутствие флуоресценции при отстройке дины волны накачки или выключения лазера (б).

лянную кювету диаметром 20 мм, длиной 25 мм. Области, где осел рубидий, показаны пунктирной линией. В качестве системы регистрации была использована цифровая телевизионная камера.

Лазерное излучение направлялось в оптическую ячейку с рубидием. Для формирования паров щелочного металла оптическая ячейка нагревалась до температуры порядка 120°C. При достижении данной температуры концентрация паров щелочного металла увеличивалась [22, 23], что способствовало повышению эффективности оптической накачки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При воздействии на пары рубидия излучением с длиной волны 795 нм наблюдался процесс флуоресценции (рис. 5а). При перестройке длины волны излучения на 1 нм флуоресценция не наблюдалась, аналогичная картина была и при выключении генерации лазера (рис. 5б). При

перестройке длины волны излучения на 780 нм (соответствует линии поглощения рубидия D2) флуоресценция наблюдалась на большей области рубидия (рис. 5б), чем при облучении длиной волны 795 нм. Предположительно это связано с тем, что средняя мощность излучения с длиной волны 795 нм составляла 1.9 Вт, что в 3 раза меньше средней мощности излучения с длиной волны 780 нм – 6.3 Вт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, продемонстрирована возможность использования лазера на александрите, работающего в режиме свободной генерации, в качестве источника излучения оптической накачки паров щелочного металла рубидия. При помощи дисперсионных элементов, используемых в составе резонатора лазера, получена генерация излучения на длинах 795 и 780 нм, что соответствует линиям поглощения рубидия D1 и D2. Прове-

монстрировано наличие флюоресценции рубидия при поочередном воздействии излучения с длинами волн, соответствующим линиям D1 и D2. Качественно установлено, что эффективность флюоресценции при воздействии излучением с длиной волны 780 нм выше, чем при воздействии излучением с длиной волны 795 нм. Это объясняется тем, что средняя мощность излучения с длиной волны 795 нм в 3 раза меньше средней мощности излучения с длиной волны 780 нм.

Таким образом, в работе экспериментально продемонстрирована возможность накачки паров рубидия импульсно-периодическим лазерным излучением.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-29-10022) и в рамках темы государственного задания ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН (в части создания лазерного источника). Исследования проводились с использованием оборудования межрегионального многопрофильного и междисциплинарного центра коллективного пользования перспективных и конкурентоспособных технологий по направлениям развития и применения в промышленности/машиностроении отечественных достижений в области нанотехнологий (соглашение № 075-15-2021-692 от 5 августа 2021 года).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев Г.Ю., Набиев Ш.Ш. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 5. С. 3.
2. Panayiotis N., Coffey A.M., Ranta K. et al. // J. Phys. Chem. B. 2014. V. 118. No. 18. P. 4809.
3. Rohan S., John C., Wang Z. et al. // Sci. Reports. 2020. V. 10. P. 1.
4. Albert M.S., Cates G.D., Driehuyst B. et al. // Lett. Nature. 1994. V. 370. P. 199.
5. Roos J., Mcadams H.P., Kaushik S.S. et al. // Magn. Res. Imaging Clin. North Amer. 2015. V. 23. No. 2. P. 217.
6. Gaede H.C., Song Y.Q., Taylor R.E. et al. // Appl. Magn. Res. 1995. V. 8. P. 373.
7. Григорьев Г.Ю., Лагутин А.С. // ЖТТ. 2022. Т. 92. № 9. С. 1277; Grigoriev G.Y., Lagutin A.S. // Tech. Phys. 2022. V. 67. No. 9. P. 1089.
8. Happer W., Miron E., Schaefer S. et al. // Phys. Rev. A. 1984. V. 29. P. 3092.
9. Appelt S., Ben-Amar Baranga A., Erickson C. et al. // Phys. Rev. A. 1998. V. 58. No. 2. P. 1412.
10. Kelley M., Branca R. // Appl. Phys. 2021. V. 129. Art. No. 154901.
11. Walker T., Happer W. // Rev. Mod. Phys. 1997. V. 69. No. 2. P. 629.
12. Driehuys B., Cates G.D. et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. P. 1668.
13. Nikolaou P., Whiting N., Eschmann N.A. et al. // J. Magn. Res. 2009. 197. P. 249.
14. Демкин В., Демкин А., Шадрин М. // Фотоника. 2012. № 3. С. 33.
15. Siddons P., Adams C.S., Ge C., Hughes I.G. // J. Physics B. 2008. V. 41. No. 15. Art. No. 155004.
16. Banerjee A., Das D., Natarajan V. // Europhys. Lett. 2004. V. 65. No. 2. P. 172.
17. Volodin B.L., Dolgy S.V., Melnik E.D., Downs E. // Opt. Lett. 2004. V. 29. No. 16. P. 1891.
18. Whiting N., Nikolaou P., Eschmann N.A. et al. // Appl. Phys. B. 2012. V. 106. No. 4. P. 775.
19. Антипов А.А., Путилов А.Г., Осипов А.В., Шепелев А.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 11. С. 1593; Antipov A.A., Putilov A.G., Osipov A.V., Shepelev A.E. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. P. 1359.
20. Putilov A.G., Antipov A.A., Shepelev A.E. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 1822. Art. No. 012016.
21. Putilov A.G., Antipov A.A., Shepelev A.E. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1331. Art. No. 012016.
22. <https://steck.us/alkalidata/rubidium85numbers.pdf>.
23. <https://steck.us/alkalidata/rubidium87numbers.pdf>.

### Optical pumping of rubidium isotopes by Cr<sup>3+</sup>:BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> laser radiation

A. A. Antipov<sup>a</sup>, \*, A. G. Putilov<sup>a</sup>, A. E. Shepelev<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Institute on Laser and Information Technologies of the Federal Scientific Research Centre “Crystallography and photonics” of Russian Academy of Sciences, Shatura, 140700 Russia

\*e-mail: antiplit@yandex.ru

We consider the use of a Cr<sup>3+</sup>:BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> laser in free-running operating as a source of emission for optical pumping rubidium alkali metal vapors. The use of dispersive elements in the composition of the laser cavity makes it possible to smoothly tune lasing wavelength and to realize generation at wavelengths corresponding to the D<sub>1</sub> and D<sub>2</sub> lines of the <sup>85</sup>Rb and <sup>87</sup>Rb isotopes. Optical pumping of rubidium isotopes by laser emission with wavelengths of 795 and 780 nm, respectively, is experimentally implemented, and their fluorescence is demonstrated. The question of using a wavelength-tunable laser in the method of spin-exchange optical pumping of noble gases is discussed.