

УДК 621.373.8

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНА ДЛЯ СПИН-ОБМЕННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКИ

© 2020 г. А. А. Антипов^{1, 2, *}, А. Г. Путилов^{1, 2}, А. В. Осипов^{1, 2}, А. Е. Шепелев¹

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

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых”, Владимир, Россия

*E-mail: antiplit@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.06.2020 г.

После доработки 10.07.2020 г.

Принята к публикации 27.07.2020 г.

Обсуждается метод спин-обменной оптической накачки для поляризации благородных газов с использованием перестраиваемого лазера. Рассмотрена возможность создания твердотельного источника лазерного излучения с применением дисперсионных элементов в его резонаторе для обеспечения реализации метода спин-обменной оптической накачки.

DOI: 10.31857/S0367676520110058

Поляризация благородных газов наиболее эффективно реализуется по механизму не прямой спин-обменной оптической накачки [1–5], атомы которых активно применяются в приложениях ядерного магнитного резонанса [6]. Поляризованный атомарный газ является зондирующим компонентом в процессе исследования структуры различных поверхностей и сыпучих материалов [7] и в приложениях магнитно-резонансной томографии для диагностики патологии дыхательных путей [8–10].

Реализация метода не прямой спин-обменной накачки подразумевает поэтапную спин-поляризацию электронов атомов щелочного металла с последующим транспортом крутящего момента ядрам благородного газа. Для прямой оптической накачки ансамблей атомов щелочных металлов используются лазеры, генерирующие излучение с круговой поляризацией в ИК-диапазоне [11, 12], имеющие возможность точной подстройки длины волны на соответствующие электронные переходы атомов щелочных металлов. Подобные лазерные системы также могут найти применение в изучении и наблюдении спинового и фотонного эха [13–15] и в телекоммуникационных оптических сетях [16].

Основным компонентом метода спин-обменной оптической накачки (СООН) являются пары щелочного металла, которые в результате прямой оптической накачки приобретают электрон-спин-

поляризованное состояние. Электрон-спин-поляризованные атомы щелочного металла взаимодействуют с ядрами атомов благородного газа перенося на них спиновую поляризацию. Процесс спинового обмена можно условно представить следующим образом [17] (стрелкам показана возможная поляризация ориентация спинов частиц):

$$A(\uparrow) + B(\downarrow) \leftrightarrow A(\downarrow) + B(\uparrow), \quad (1)$$

Механизм спинового обмена обусловлен неупругими и упругими столкновениями [1, 10, 17], что обуславливает не прямую поляризацию ядер атомов благородного газа широко применяемого в методах ЯМР и технологиях МРТ [6, 8, 10, 18].

Широко применяемый способ оптической накачки атомов Rb представлен и подробно описан в работе [19]. Основным источником энергии излучения для оптической накачки является лазер, излучающий в спектральном диапазоне поглощения паров щелочного металла, например Rb. Пары Rb состоят преимущественно из изотопов ⁸⁵Rb и ⁸⁷Rb с естественным соотношением $n_{85}/n_{87} = 2.8$ [2]. Согласно работам [7–10] оптической накачке подвергается изотоп ⁸⁵Rb, у которого переход D1 [20] соответствует энергетическому переходу на длине волны накачки 794.7 нм. Для эффективной оптической накачки используют твердотельные (Ti:Sa) и полупроводниковые лазеры, длина волны генерации которых соответствует переходу D1 [9, 29].

Средняя мощность излучения Ti:Sa лазера, применяемого для СООН, не превышает 1–2 Вт. Перспектива их широкого использования в системах поляризации благородных газов ограничена по следующим причинам: серийно изготавливаемые образцы кристаллов Ti:Sa имеют малые размеры, в совокупности с малым временем жизни верхнего лазерного уровня (2–3 мкс). Создание лазеров с высокой средней мощностью на кристалле Ti:Sa крайне затруднительно и требует мощных источников накачки, в качестве которых используют лазерные диоды, волоконные или твердотельные лазеры с преобразованием спектра выходного излучения. Сложность и высокая стоимость Ti:Sa лазеров не позволяет широко использовать их для СООН благородных газов.

Для оптической накачки паров Rb используются полупроводниковые наборные решетки и матрицы лазерных диодов (МЛД) [9, 20, 21]. К основным недостаткам МЛД можно отнести высокую пространственную неоднородность профиля выходного лазерного излучения, большие углы расходимости и, как следствие, трудности коллимирования лазерного луча в зону оптической накачки. Полная ширина спектра излучения МЛД на уровне половинной амплитуды (FWHM) составляет 2–3 нм, что является очень высоким значением, исходя из необходимых условий возбуждения атомов щелочных металлов. Данные аспекты являются причиной недостаточной интенсивности лазерного излучения в зоне накачки, что в свою очередь обуславливает низкую степень поляризации Rb. Для увеличения концентрации поляризованного газа необходимо уменьшать спектральную ширину полосы излучения на один–два порядка за счет применения дисперсионных оптических элементов [19]. Промышленное применение мощных МЛД для эффективной накачки паров Rb крайне затруднительно [21].

Альтернативным источником излучения с соответствующими пространственно-энергетическими и спектральными характеристиками, необходимыми для реализации СООН является твердотельный лазер на александрите [22].

Активатором в кристалле александрита выступает трехвалентный хром. Ионы Cr³⁺ в кристалле обладают невысоким значением сечения перехода $3.0 \cdot 10^{-19}$ см² при 300 К. В отличие от кристалла Ti:Sa, время жизни верхнего лазерного уровня кристалла александрита составляет 260 мкс, при комнатной температуре. Сечение перехода и время жизни верхнего лазерного уровня температурно-зависимые. С ростом температуры кристалла происходит увеличение сечения перехода, приводящее к увеличению выходной мощности излучения лазера. Габаритные размеры, цилиндриче-

ских активных элементов из кристалла александрита, могут составлять 10 × 120 мм. Оптические потери на рабочей длине волны не превышают 0.001–0.003 см⁻¹. Для создания мощных лазеров на александрите возможно применение ламповой, полупроводниковой или лазерной накачки.

Спектр излучения лазера на александрите лежит в пределах 700–820 нм, центральная линия генерации составляет ~755 нм. В зависимости от типа и мощности оптической накачки, возможно создание лазеров на александрите, работающих как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме.

Предварительный анализ и расчет оптической схемы показали, что для эффективной перестройки выходного спектра излучения лазера на александрите необходимо применять трехэлементный интерференционно-поляризационный фильтр (фильтр Лио). Фильтр Лио представляет собой стопу двулучепреломляющих пластин с соотношением толщин 2 : 1 : 6. Стопа помещена в поворотную оправу. Вращение оправы вокруг собственной оси и точное выставление спектра излучения осуществляется микрометрическим винтом. К основным достоинствам двулучепреломляющих фильтров можно отнести высокую лучевую стойкость, малый уровень неселективных потерь.

Для определения длины резонатора необходимо учитывать набег фазы электромагнитной волны, при прохождении между зеркалами резонатора. При центральной длине волны генерации лазера на александрите ~755 нм оптимальная длина резонатора, с учетом фазового условия генерации, находится в диапазоне от 446 до 460 мм с шагом в 1 мм. Резонансная частота генерируемого излучения составляет $3.9 \cdot 10^{14}$ Гц. Добротность резонатора при использовании полупрозрачного зеркала с коэффициентом отражения ~0.75, определенным исходя из амплитудного условия генерации, составляет $26 \cdot 10^6$. Полученное значение добротности резонатора позволяет сделать вывод, что потеря энергии электромагнитной волны за один проход резонатора минимальна. Расчетная оптимальная длина резонатора позволяет использовать юстировочные элементы для точной настройки резонатора и применять серийно выпускаемые квантроны.

Для проведения исследовательских и экспериментальных работ был разработан и собран лабораторный макет импульсно-периодического перестраиваемого лазера с ламповой накачкой (рис. 1) [23]. Лампа накачки помещалась в эллиптический отражатель из кварца КЛЖ-3, который служил фильтром отсечки УФ излучения накачки. Необходимость дополнительной фильтрации излучения накачки обусловлена деградацией кри-

сталла александрита при воздействии на него УФ излучения, что приводит к необратимому изменению оптико-физических свойств активного элемента и снижению энергетических характеристик лазера. На внешнюю сторону эллиптического отражателя нанесено серебряное высокоотражающее покрытие, обеспечивающее отражение излучения накачки $\geq 95\%$ в спектре поглощения кристалла александрита.

В качестве активного элемента использовался стержень из кристалла александрита длиной 100 мм и диаметром 6.3 мм. Концентрация ионов Cr^{3+} в кристалле составляла 0.13 ат. %. Данный кристалл способен генерировать лазерное излучение в диапазоне 720–800 нм.

Для компенсации тепловой линзы, которая возникает в кристалле во время накачки световым импульсом, отражающее зеркало представляло собой положительную сферу. Выходное зеркало плоское с коэффициентом отражения на рабочей длине волны 0.7.

Как было отмечено ранее, двулучепреломляющий фильтр и юстировочные механизмы были размещены внутри резонатора под углом Брюстера к оптической оси.

Работа лазера осуществлялась при частоте повторения импульсов накачки от 1 до 15 Гц. При установке и настройке двулучепреломляющего фильтра была получена плавная перестройка спектра излучения в диапазоне $\sim 720\text{--}800$ нм. Начальная динамика перестраиваемого спектра лазерного излучения представлена на рис. 2 [24]. Интенсивность излучения для разных длин волн указана в относительных единицах.

Полоса пропускания фильтра Лио обеспечивает генерацию двух граничных мод одновременно. В некоторых положениях при вращении фильтра имела место одновременная генерация на двух длинах волн (рис. 3) [24]. Данное явление представляет интерес для дальнейшего изучения ввиду того, что перестраиваемые спектры генерации находятся в области полос поглощения Rb с максимумами на длинах волн 780 и 794.7 нм, что соответствует изотопам ^{87}Rb и ^{85}Rb [25, 26].

Проведенные исследования показывают перспективность разрабатываемого перестраиваемого твердотельного лазера для поляризации благородных газов. Использование в качестве активного элемента кристалла александрита позволяет создать лазер высокой мощности, работающий как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах с возможностью реализации режима модулированной добротности [23, 27]. Применение дисперсионных элементов в резонаторе лазера на александрите позволяет перестроить центральную длину волны излучения для эффективной накачки

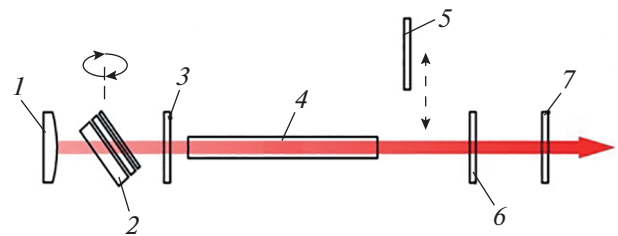


Рис. 1. Оптическая схема твердотельного лазера, где 1 – глухое зеркало, 2 – двулучепреломляющий фильтр (фильтр Лио), 3 – пластина $\lambda/2$, 4 – активный элемент, 5 – тонкий эталон, 6 – полупрозрачное зеркало, 7 – пластина $\lambda/4$.

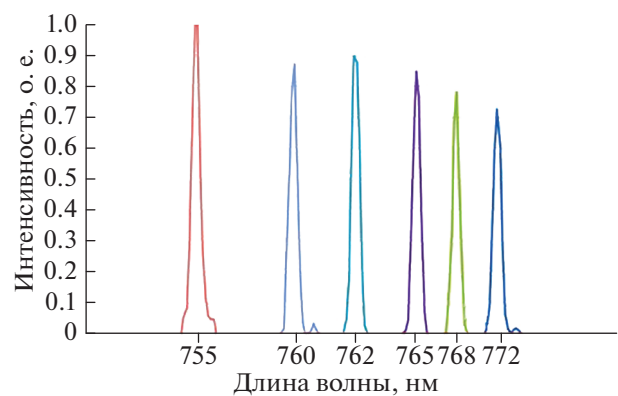


Рис. 2. Зависимость начальной настройки длины волны лазера от вращения двулучепреломляющего фильтра.

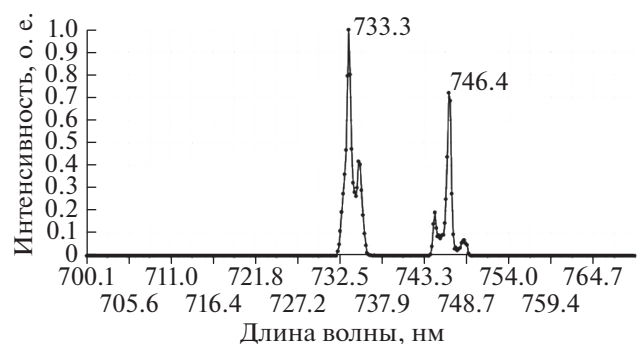


Рис. 3. Спектр одновременной генерации двух длин волн лазера на александрите с фильтром Лио.

изотопов ^{87}Rb и ^{85}Rb : 780 нм и/или 794.7 нм [24, 28]. Дальнейшее исследование перестраиваемого твердотельного лазера может привести к развитию метода СООН, в том числе для МРТ приложений, и созданию фотонной фабрики для получения высокополяризованного благородного газа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-29-10022) и частично в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 075-15-2019-1838 от 06.12.2019 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев С.П., Доватор Н.А., Картошкин В.А.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 2. С. 57.
2. *Дмитриев С.П., Доватор Н.А., Пестов Е.Н. и др.* // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. № 19. С. 11.
3. *Knize R.J., Wu Z., Happer W.* // Adv. Atom. Mol. Phys. 1988. V. 24. № 1. P. 223.
4. *Walker T.G., Happer W.* // Rev. Mod. Phys. 1997. V. 69. № 2. P. 629.
5. *Gentile T.R., Nacher P.J., Saam B., Walker T.G.* // Rev. Mod. Phys. 2017. V. 89. № 4. Art. № 045004.
6. *Chen L., Zhoua B., Lei G. et al.* // AIP Adv. 2017. V. 7. Art. № 115101.
7. *Gaede H.C., Song Y.Q., Taylor R.E. et al.* // Appl. Magn. Reson. 1995. V. 8. P. 373.
8. *Rohan S., John C., Wang Z. et al.* // Sci. Rep. 2020. V. 10. P. 1.
9. *Albert M.S., Cates G.D., Driehuyst B. et al.* // Lett. Nat. 1994. V. 370. P. 199.
10. *Roos J., Mcadams H.P., Kaushik S.S. et al.* // Magn. Reson. Imag. Clin. North. Amer. 2015. V. 23. № 2. P. 217.
11. *Разжев А.М., Чуркин Д.С., Каргапольцев Е.С. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 7. С. 944; *Razhev A.M., Churkin D.S., Kargapol'tsev E.S. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. № 7. P. 776.
12. *Бадиков В., Бадиков Д., Дорошенко М.* // Фотоника. 2010. Т. 20. № 2. С. 8.
13. *Осадько И.С.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 12. С. 1594.
14. *Каримуллин К.Р., Аржанов А.И., Наумов А.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 11. С. 1620; *Karimullin K.R., Arzhanov A.I., Naumov A.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 11. P. 1478.
15. *Сазонов С.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 1. С. 112; *Sazonov S.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2011. V. 75. № 1. P. 105.
16. *Лефлер Ш.* // Фотоника. 2015. Т. 54. № 6. С. 48.
17. *Картошкин В.А.* // Опт. и спектроск. 2016. Т. 121. № 3. С. 355.
18. *Картошкин В.А.* // Опт. и спектроск. 2010. Т. 108. № 6. С. 914.
19. *Driehuys B., Cates G.D., Miron E. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. P. 1668.
20. *Oros A.M., Shah N.J.* // Phys. Med. Biol. 2004. V. 49. P. 105.
21. *Nelson I., Chann B., Walker T.G.* // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. № 11. P. 1356.
22. *Ксенофонтов М.А., Поляков А.В.* // Фотоника. 2010. Т. 22. № 4. С. 44.
23. *Antipov A., Putilov A.* // Proc. VII Intern. Conf. MMNSI. (Suzdal, 2018). P. 64.
24. *Putilov A., Antipov A., Shepelev A. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1331. № 1. Art. № 012016.
25. <https://steck.us/alkalidata/rubidium85numbers.pdf>.
26. <https://steck.us/alkalidata/rubidium87numbers.pdf>.
27. *Teppitaksak A., Minassian A., Thomas M., Damzen J.* // Opt. Expr. 2014. V. 22. Art. № 16386.
28. *Putilov A., Antipov A., Shepelev A.* // EPJ Web Conf. 2019. V. 220. Art. № 03026.
29. *Happer W., Miron E., Schaefer S. et al.* // Phys. Rev. 1984. V. 29. P. 3092.