

Генерация штарковских спектральных компонент в Nd:YAP- и Nd:YAG-лазерах с помощью объемных брэгговских решеток

Н.С.Воробьев, Л.Б.Глебов, В.И.Смирнов, И.В.Чапурин

Получена генерация штарковских спектральных компонент в Nd:YAP-лазере (1064 и 1073 нм) и Nd:YAG-лазере (1062 нм), работающих в режимах свободной генерации и модулированной добротности. Для этой цели были использованы отражающие объемные брэгговские решетки, помещенные в резонатор лазеров и позволяющие перестраивать спектр выходного лазерного излучения. Получена стабильная генерация штарковских компонент в обоих лазерах. Также показана возможность получения с помощью таких решеток двухчастотной генерации в лазере на неодимовом стекле.

Ключевые слова: неодимовый лазер, объемные голографические решетки, штарковские компоненты.

1. Введение

Создание объемных брэгговских решеток (ОБР), записанных в фототермофрактивном стекле (ФТРС), открыло многообещающие возможности для их широкого применения [1] как дифракционного оптического элемента нового типа. Необыкновенные свойства ФТРС позволяют записывать в нем решетки, обладающие замечательными характеристиками. К ним относятся прежде всего высокая лучевая прочность, температурная и оптическая стабильность, высокая дифракционная эффективность в широком спектральном диапазоне от видимого до ближнего ИК излучения и неограниченное время жизни. Использование ОБР в качестве внутри- или внерезонаторного оптического элемента позволяет значительно улучшить спектральные и пространственные характеристики лазера и контролировать его выходные параметры [2, 3].

Уникальные спектральные свойства ОБР делают их чрезвычайно полезным инструментом для частотной селекции выходного лазерного излучения. Максимальная дифракционная эффективность ОБР в ФТРС превышает 99 % как для отражающих, так и для пропускающих решеток. При этом их спектральная селективность может быть ~30 пм, а угловая ниже 1 мрад. Эффективная селекция продольных и поперечных мод с помощью внутрирезонаторных ОБР была продемонстрирована в различных типах лазеров [1, 4, 5]. Использование отражающей брэгговской решетки в качестве выходного зеркала в непрерывном и импульсном твердотельном лазерах дало возможность сузить и стабилизировать спектр их излучения без падения выходной мощности [2, 6–8]. В связи с

вышеизложенным представляется интересным применить ОБР для спектральной перестройки излучения лазеров, способных генерировать набор частот, которые соответствуют различным внутриатомным переходам.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты применения отражающих ОБР, помещенных в лазерный резонатор, в качестве оптического переключателя генерируемых штарковских спектральных компонент в выходном излучении Nd:YAP ($\text{Nd}^{3+}:\text{YAlO}_3$)- и Nd:YAG ($\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)-лазеров.

Известно, что кристалл $\text{YAlO}_3:\text{Nd}^{3+}$ может излучать несколько лазерных линий (штарковских компонент) в спектральном диапазоне 1058–1099 нм в результате переходов ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ [9]. Основные линии этих переходов соответствуют длинам волн $\lambda = 1064.5$ и 1079.5 нм. Для лазерного стержня Nd:YAP, который вырезан вдоль оси b , поперечные сечения поглощения зависят от поляризации таким образом, что излучение с длиной волны 1079.5 нм, поляризованное вдоль оси c , имеет наибольший коэффициент усиления, в то время как поляризованное в направлении оси a излучение достигает наибольшего усиления для 1064.5 нм. Так как максимальный коэффициент усиления для $\lambda = 1079.5$ нм выше, чем для $\lambda = 1064.5$ нм, то лазер будет генерировать поляризованное вдоль оси c излучение в отсутствие другого внутрирезонаторного поляризатора. Если же такой линейный поляризатор поместить в резонатор лазера, то его вращение приведет к увеличению потерь для преобладающей поляризации на 1079.5 нм, и лазер начнет излучать линейно поляризованный вдоль оси a свет на $\lambda = 1064.5$ нм [10, 11]. Для генерации других штарковских компонент, в частности на промежуточной длине волны 1072.6 нм, необходимо модифицировать оптическую схему лазера, внося в резонатор дополнительные дисперсионные элементы для поляризационной и спектральной селекции [12].

Nd:YAG-лазер при нормальных условиях эксплуатации и при комнатной температуре генерирует излучение на длине волны 1064.1 нм на наиболее сильном переходе ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$. Получение генерации на других частотах можно осуществить с помощью, например, эталонов или дисперсионных призм, помещенных в лазерный резона-

Н.С.Воробьев. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова 38; e-mail: vor@kapella.gpi.ru
Л.Б.Глебов. CREOL/College of Optics & Photonics, University of Central Florida, P.O. Box 162700, Orlando Florida 32816-2700; e-mail: lbglebov@creol.ucf.edu
В.И.Смирнов, И.В.Чапурин. OptiGrate, 3267 Progress Drive, Orlando, Florida 32826; e-mail: vsmirnov@optigrate.com, iciapurin@optigrate.com

тор. Эти элементы подавляют нежелательные частотные осцилляции, сохраняя при этом оптимальные условия для генерации выбранных длин волн. Использование данной техники в Nd:YAG-лазере дало возможность получить генерацию на различных штарковских переходах [13–15]. Линии 1064.1 и 1061.5 нм имеют наименьший порог генерации в Nd:YAG-лазере. При комнатной температуре доминирует переход 1064.1 нм, в то время как линия на 1061.5 нм имеет меньший генерационный порог при более низких температурах.

2. Экспериментальная установка и результаты

Схема экспериментальной установки показана на рис.1. Лазерный активный элемент 1, представляющий собой активированный ионами неодима кристалл YAP или YAG, помещался в осветитель с ламповой накачкой. Резонатор лазера был образован двумя плоскопараллельными зеркалами 2 и 3 с коэффициентами отражения 100 % и 80 % соответственно для рабочих длин волн в диапазоне 1064–1080 нм. Для выделения основной поперечной моды была использована ирисовая диафрагма 4. Отражающая ОБР 5, помещенная в резонатор, служила селектором для генерации штарковских спектральных компонент. Решетка могла поворачиваться в горизонтальной плоскости, отражая под различными углами излучение с различными длинами волн, распространяющееся в резонаторе. Режим модулированной добротности лазера обеспечивался насыщающимся поглотителем 6 (YAG:Cr⁴⁺) с начальным пропусканием 50 %. Для получения необходимой линейной поляризации выходного излучения лазера использовалась призма Глана 7. Лазер мог работать с различной частотой повторения (0.1–50 Гц) в зависимости от типа активного элемента. Энергетические, спектральные и временные параметры измерялись соответствующей аппаратурой.

В первой части эксперимента в качестве активного элемента был использован кристалл YAP:Nd, вырезанный вдоль оси *b*. Лазер работал в режиме свободной генерации. Призма Глана обеспечивала поляризацию, соответствующую основной длине волны излучения ~1080 нм. Отражающая ОБР имела на резонансной длине волны $\lambda = 1090.7$ нм максимум отражения ~97 % с полушириной 0.2 нм. Так как основная длина волны излучения Nd:YAP-лазера составляет 1080 нм, то для выполнения условий брэгговского отражения решетку нужно повернуть в плоскости дифракции. На этой длине волны брэгговский угол падения для данной решетки составляет ~12 %. Если решетка отстраивалась от брэгговского угла, то лазер излучал на основной длине волны (1080 нм). Однако при повороте ОБР в направлении брэгговского угла происходило изменение частоты излучения: основная длина волны вследствие отражения от решетки вы-

водилась из резонатора и лазер начинал генерировать на ближайшей соседней штарковской линии (1073 нм). При достижении угла максимальной дифракционной эффективности для основной частоты излучения ОБР действует как узкополосное зеркало, которое блокирует излучение на 1080 нм и прозрачно для $\lambda = 1073$ нм. Пороговая энергия накачки в этом случае увеличилась на ~15 % по сравнению с генерацией на 1080 нм. Незначительная отстройка ОБР от брэгговского угла позволяла осуществить двухчастотный режим генерации на соответствующих длинах волн.

В режиме модулированной добротности переключение частот происходило аналогичным образом. Когда ОБР устанавливалась на максимум дифракционной эффективности для основной частоты, лазер генерировал на длине волны 1073 нм. При отстройке решетки от брэгговского угла лазер излучал на $\lambda = 1080$ нм. В режиме генерации основной поперечной TEM₀₀-моды на пороге лазер излучал одиночный (40–50 нс) импульс с выходной энергией ~17 мДж на длине волны 1073 нм или ~20 мДж на 1080 нм. В случае двухчастотной генерации оба импульса излучались неодновременно и временной интервал между ними изменялся от вспышки к вспышке в пределах от 50 нс до 1 мкс. Выходное излучение на $\lambda = 1073$ нм, также как и основное на 1080 нм, было линейно поляризовано по оси *c*.

Генерация Nd:YAP-лазера на длине волны 1064 нм осуществлялась путем поворота призмы Глана на 90° и замены ранее использованной ОБР на другую. Последняя имела дифракционную эффективность ~99 % с центром на $\lambda = 1065.1$ нм и полушириной профиля отражения ~0.47 нм. При отклонении решетки от брэгговского угла для $\lambda = 1064$ нм лазер генерировал излучение этой длины волны. Поворачивая ОБР и приближая угол падения излучения к брэгговскому, можно было получить различные комбинации излучаемых длин волн: одно- (1064 или 1073 нм), двух- (1064 и 1073 или 1073 и 1080 нм) и трехволновую (1064, 1073 и 1080 нм) генерацию (рис.2), причем в режиме как свободной генерации, так и модулированной добротности. Измеренная ширина спектра штарковских компонент ограничивалась разрешением используемого спектрометра, которое равнялось ~0.15 нм в этом спектральном диапазоне. Излучение всех трех длин волн имело линейную поляризацию по оси *a*, обусловленную ориентацией внутрирезонаторного поляризатора.

В экспериментах с Nd:YAG-лазером применение вышеупомянутой отражающей ОБР с центром дифракционной эффективности на 1065.1 нм дало возможность по-

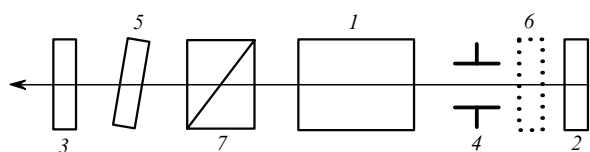


Рис.1. Схема экспериментальной установки:
1 – лазерный активный элемент; 2, 3 – плоскопараллельные зеркала; 4 – ирисовая диафрагма; 5 – ОБР; 6 – насыщающийся поглотитель; 7 – призма Глана.

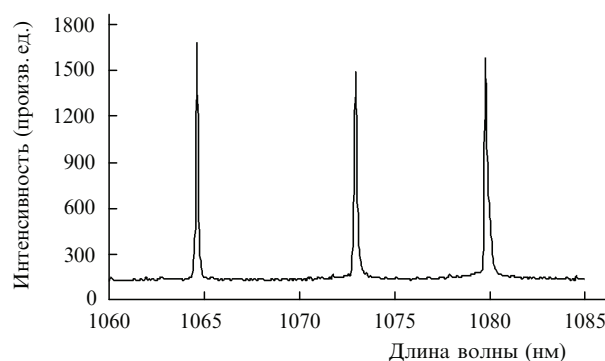


Рис.2. Спектр излучения Nd:YAP-лазера в режиме модулированной добротности.

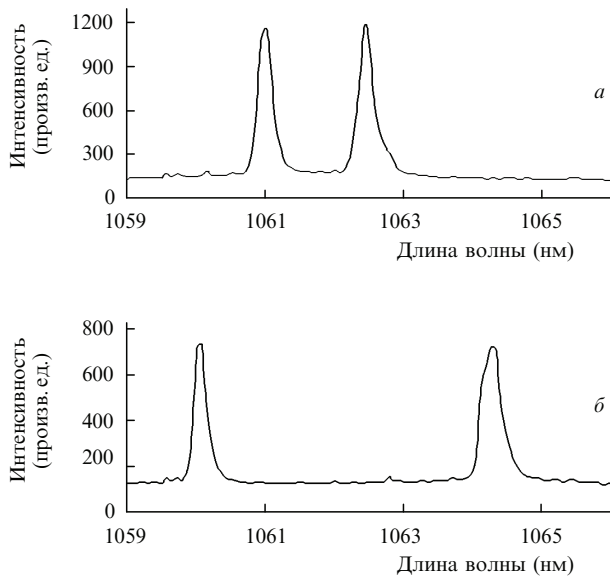


Рис.3. Спектр излучения лазера на неодимовом стекле с с внутррезонаторной ОБР, имеющей полуширину профиля отражения 0.11 (а) и 0.47 нм (б).

лучить генерацию спектральной штарковской компонент с $\lambda \sim 1062$ нм при комнатной температуре. Поворотом решетки в плоскости дифракции можно было переключать лазер на генерацию другой основной длины волны – 1064 нм. Была получена стабильная генерация основной поперечной ТЕМ₀₀-моды на обеих длинах волн в режиме свободной генерации и модулированной добротности. При определенных углах падения излучения на ОБР лазер мог работать в двухчастотном режиме.

Использование этой ОБР в качестве частотного фильтра в резонаторе неодимового лазера позволило получить устойчивый режим одновременной генерации двух спектральных компонент, являющихся частью спектра излучения неодимового стекла. Схема эксперимента была аналогична схеме, представленной на рис.1, за исключением насыщающегося поглотителя, в качестве которого был использован кристалл LiF:F₂₋ с начальным пропусканием 70%. Отражающая ОБР имела на $\lambda = 1064.4$ нм максимум отражения порядка 98.2% с полушириной 0.11 нм. Когда решетка была выведена из брэгговского резонанса и энергия накачки была близка к пороговой, лазер генерировал в режиме модулированной добротности одиночный (~400 нс) импульс с энергией ~3 мДж и гладким спектром с центром на ~1062 нм и полушириной ~5 нм. При повороте решетки в сторону брэгговского угла контур спектра излучения видоизменялся и при соответствующем положении ОБР становился двухволновым с полушириной каждой линии ~0.13 нм (с учетом спектрального разрешения спектрометра). Линии отсто-

яли друг от друга на ~1.4 нм и генерировались одновременно (рис.3,а). При этом длительность импульсов оставалась неизменной, а общая энергия уменьшалась до 1 мДж.

Режим одновременной генерации двух спектральных компонент в лазере на неодимовом стекле был также осуществлен при использовании нескольких отражающих ОБР, имеющих различные полуширины профиля отражения. Для пяти решеток были получены следующие спектральные интервалы между генерируемыми компонентами: 1, 1.4, 1.8, 2.3 и 4.2 нм. В качестве примера на рис.3,б представлен спектр излучения лазера, в резонатор которого была установлена ОБР, имеющая полуширину профиля отражения ~0.47 нм.

3. Заключение

В данной работе показана возможность применения объемных брэгговских решеток, записанных в фототерморепаративном стекле, для генерации штарковских компонент в твердотельных лазерах. Представлены экспериментальные результаты использования отражающих ОБР, помещенных в лазерный резонатор, в качестве оптического переключателя генерируемых штарковских спектральных компонент в выходном излучении Nd:YAP- и Nd:YAG-лазеров в режимах свободной генерации и модулированной добротности. Использование ОБР в качестве частотного фильтра в резонаторе лазера на неодимовом стекле позволило получить устойчивый режим одновременной генерации двух спектральных компонент.

1. Efimov O.M., Glebov L.B., Smirnov V.I. United States Patent 6,673,497 B2. January 6 (2004).
2. Chung T., Rapaport A., Smirnov V., Glebov L., Richardson M., Bass M. *Opt. Lett.*, **31**, 229 (2006).
3. Lumeau J., Glebov L., Smirnov V. *Opt. Lett.*, **31**, 2417 (2006).
4. Jacobsson B., Pasiskevicius V., Laurell F. *Opt. Lett.*, **31**, 1663 (2006).
5. Vorobiev N., Glebov L., Smirnov V. *Opt. Express*, **16**, 9199 (2008).
6. Volodin B., Dolgy S., Melnik S., Downs E., Shaw J., Ban V. *Opt. Lett.*, **29**, 1891 (2004).
7. Venus G., Glebov L., Rotar V., Smirnov V., Crump P., Farmer J. *Pros. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6216**, 621602 (2006).
8. Gourevitch A., Venus G., Smirnov V., Glebov L. *Opt. Lett.*, **32**, 2611 (2007).
9. Багдасаров Х.С., Каминский А.А. *Письма в ЖЭТФ*, **9**, 501 (1969).
10. Weber M.J., Bass M., Andringa K. *Appl. Phys. Lett.*, **15**, 342 (1969).
11. Massey G.A., Yarborough J.M. *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 576 (1971).
12. Акманов А.Г., Вальшин А.М., Ямалетдинов А.Г. *Квантовая электроника*, **12**, 2355 (1985).
13. Smith R.G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **4**, 505 (1968).
14. Акманов А.Г., Вальшин А.М., Ямалетдинов А.Г. *Квантовая электроника*, **8**, 406 (1981).
15. Бадалян А.А., Сапонджан С.О., Саркисян Д.Г., Торосян Г.А. *Письма в ЖТФ*, **11**, 1241 (1985).