

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

PACS 42.55.Px, 42.55.Xi, 42.40.Eq, 42.55.Lt

Линейка лазерных диодов с перестраиваемой шириной линии для накачки лазера на рубидии*

Жиенг Ли, Ронгкунг Тан, Чэнг Ху, Лин Ли

Для оптимизации источника диодной накачки мощного лазера на парах рубидия реализована линейка лазерных диодов (ЛЛД) с суженой и перестраиваемой шириной линии генерации и внешним резонатором, сформированным двумя объемными брэгговскими решетками (ОБР). За счет контроля разности температур двух таких решеток ширина линии ЛЛД, которая до их добавления составляла 1.8 нм, изменялась от 0.1 нм до 0.2 нм, тогда как выходная мощность увеличивалась не более чем на 4%. При одновременном изменении температур ОБР центральная длина волны в воздухе созданной ЛЛД перестраивалась от 779.40 до 780.05 нм.

Ключевые слова: лазер на парах щелочных металлов, линейка лазерных диодов, объемные брэгговские решетки.

1. Введение

Разработанные в последние годы лазеры на парах щелочных металлов с диодной накачкой привлекли внимание вследствие своего потенциала с точки зрения высокой мощности, отличного качества пучка и слабого влияния тепловой линзы [1–3]. О лазере на парах цезия мощностью 1 кВт с замкнутым циклом циркуляции лазерно-активной среды сообщалось в [4]. Одним из важнейших вопросов является согласование ширины линии и центральной длины волны диодного лазера накачки с аналогичными параметрами линии поглощения паров щелочного металла [5, 6]. Линия поглощения паров щелочных металлов (D2) уширена буферными газами, такими как гелий и метан, вследствие столкновительного уширения. Поэтому для достижения эффективного поглощения ширина линии коммерчески доступных лазерных диодов должна быть сужена до субнанометровых величин. Исследования показали, что при высокой мощности накачки существует радиальный градиент температуры в активной среде [7, 8]. Изменение температуры может приводить к сдвигу длины волны пика поглощения паров щелочных металлов. На практике сдвиг наблюдался в лазере на парах цезия мощностью 1 кВт [4]. Для индивидуальных областей с разными пространственными положениями в активной среде лазера киловаттного уровня мощности центральная длина волны различна из-за сдвига линии поглощения паров цезия. В результате в мощной лазерной системе на парах щелочных металлов эффективность накачки диодов со сверхузкой линией не превышает эффективность, характерную для диодов с более широкой линией. Это весьма важно для поиска точки опти-

мального согласования двух спектров. Однако внешние резонаторы, образованные плоскими решетками или одиночной ОБР, сложны при настройке ширины линии с подавлением субрезонаторных продольных мод и сохранением той же мощности [9, 10].

В настоящей статье сообщается о создании ЛЛД, использование которой решает указанные проблемы, и описывается метод оптимизации источника накачки для мощного лазера на парах щелочных металлов.

2. Экспериментальная установка

Для плоской волны, падающей на ненаклонную отражательную брэгговскую решетку, дифракционная эффективность может быть описана следующим образом [11]:

$$\eta(\lambda)_{\lambda_0} = \left\{ 1 + \frac{1 - [\lambda_0 f^2 (\lambda - \lambda_0) / (2n_{av} \delta n)]^2}{\sinh^2 \{ [2\pi n_{av} t \delta n / (\lambda_0^2 f)]^2 - [\pi f t (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0]^2 \}^{1/2}} \right\}^{-1}, \quad (1)$$

где t – толщина решетки; n_{av} – средний показатель преломления ОБР; δn – амплитуда модуляции показателя преломления; f – пространственная частота решетки, которая может быть найдена через уравнение Брэгга; λ_0 – брэгговская длина волны. Подставив $\lambda = \lambda_0$ в уравнение (1), получим максимальную дифракционную эффективность

$$\eta_0 = \tanh^2 \frac{2\pi n_{av} t \delta n}{\lambda_0^2 f}. \quad (2)$$

Для того чтобы сделать полосу ОБР обратной связи перестраиваемой, нами рассматривается система обратной связи из двух таких параллельных решеток. Предполагая, что на обеих ОБР нет второго отражения, дифракционную эффективность для системы обратной связи можно представить следующим образом:

$$\eta_1(\lambda) = \eta(\lambda)_{\lambda_1} + [1 - \eta(\lambda)_{\lambda_1}]^2 \eta(\lambda)_{\lambda_2}, \quad (3)$$

* Перевел с англ. В.В.Шувалов.

Zhiyong Li, Cheng Xu, Lin Li. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

Rongqing Tan. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China; e-mail: rqtan@mail.ie.ac.cn

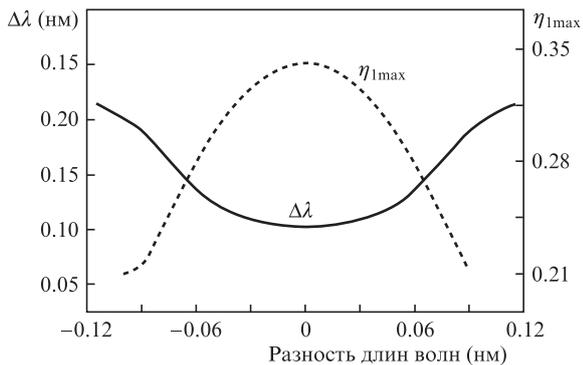


Рис.1. Полоса пропускания $\Delta\lambda$ и максимальная дифракционная эффективность η_{1max} двух ОБР с разной центральной длиной волны для плоской волны.

где λ_1 и λ_2 – брэгговские длины волн двух ОБР. Согласно уравнениям (2) и (3) и одномерному уравнению Брэгга, полоса пропускания и максимум дифракционной эффективности двух ОБР могут быть описаны так, как это показано на рис.1. В расчете две ОБР имеют одинаковые параметры (полоса пропускания $\Delta\lambda = 0.1$ нм, $\eta_0 = 0.21$, $t = 1.89$ мм, $\lambda_1 = 779.50$ нм, λ_2 – переменная длина волны, рассматриваемая в соответствии с разностью длин волн ($\lambda_2 - \lambda_1$)). Как следует из рис.1, полосу пропускания и дифракционную эффективность можно изменить настройкой разности центральных длин волн двух ОБР.

ОБР является голографическим элементом на основе фототерморефрактивного (ФТР) стекла. Коэффициент теплового изменения показателя преломления в ФТР стекле составляет около $5 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$, что приводит к тепловому сдвигу брэгговской длины волны в обеих ОБР около 7 пм/К [12]. Разность центральных длин волн может быть изменена посредством настройки температуры двух этих решеток, тогда как их пропускание остается неизменным. В результате управление разностью температур двух ОБР позволяет варьировать ширину линии ЛЛД.

Схема экспериментальной установки изображена на рис.2. ЛЛД (DILAS) состояла из 19 излучателей при ширине полоски 1 см. Коэффициент отражения выходной грани ЛЛД, на которую не было нанесено антиотражающее покрытие, был таким же, как и у обычных линеек. Обе ОБР с дифракционной эффективностью 21%, толщиной 1.89 мм и размерами поверхности 15×1.75 мм были изготовлены компанией PD-LD. Центральная длина волны ОБР составляла 779.4 нм при комнатной температуре. Расстояние от ЛЛД до ОБР1 и ОБР2 было равно 4 и 7 мм соответственно, обе ОБР и быстрый осевой кол-

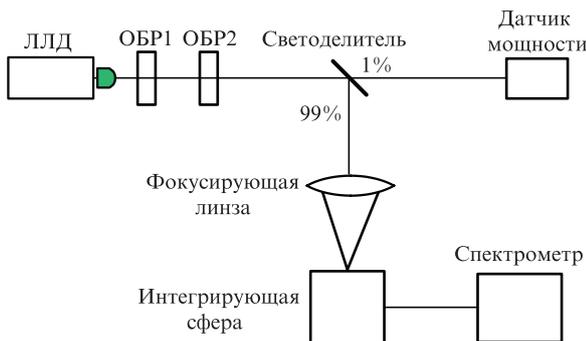


Рис.2. Экспериментальная установка для исследования ЛЛД с двумя ОБР.

лиматор имели антиотражающие покрытия на 780 нм. Для того чтобы контролировать температуру решеток эффективно, каждая из них устанавливалась на алюминиевый радиатор с термоэлектрическим охлаждением и точностью контроля температуры 0.1 К. Радиаторы были зафиксированы на шести осевых гибких платформах. Фокусирующая линза и интегрирующая сфера добавлены в систему анализа спектра для измерения полных спектральных характеристик ЛЛД.

3. Результаты экспериментов

Спектры ЛЛД в режиме свободной генерации, а также с одной и с двумя ОБР при одинаковой температуре и токе возбуждения 30 А показаны на рис.3. Ватт-амперные характеристики для трех ЛЛД представлены на рис.4. Видно, что ОБР2 нужна для сужения линии ЛЛД, которая уменьшается примерно на 21% по сравнению с ЛЛД только с ОБР1. Между тем дифференциальная эффективность уменьшается лишь на 0.10 Вт/А, т.е. не более чем на 10% от эффективности ЛЛД с ОБР1. Это происходит главным образом благодаря улучшению дифракционной эффективности при добавлении ОБР2. Как показывает расчет, она увеличивается с 21% до 35%. Более высокая дифракционная эффективность имеет преимущества в подавлении субрезонаторных мод при высоком токе возбуждения.

Спектральные характеристики ЛЛД при токе возбуждения 36 А и изменении разности температур изображены на рис.5; посредством установки подходящих температур

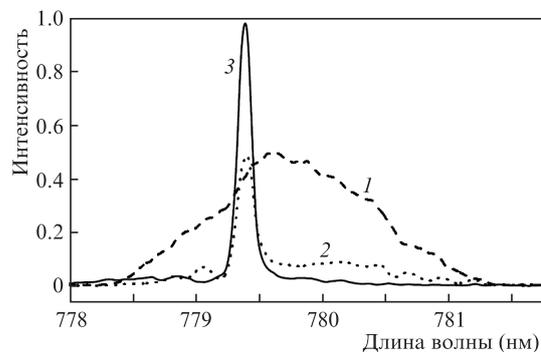


Рис.3. Спектры ЛЛД в режиме свободной генерации (1, $\Delta\lambda_{FWHM} = 1.8$ нм), а также с одной (2, 0.13 нм) и двумя (3, 0.10 нм) ОБР.

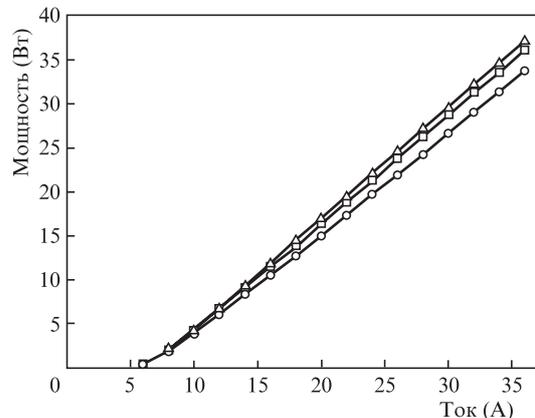


Рис.4. Зависимости мощности непрерывного излучения ЛЛД в режиме свободной генерации (Δ , дифференциальная эффективность 1.24 Вт/А), а также с одной (\square , 1.19 Вт/А) и двумя (\circ , 1.09 Вт/А) ОБР.

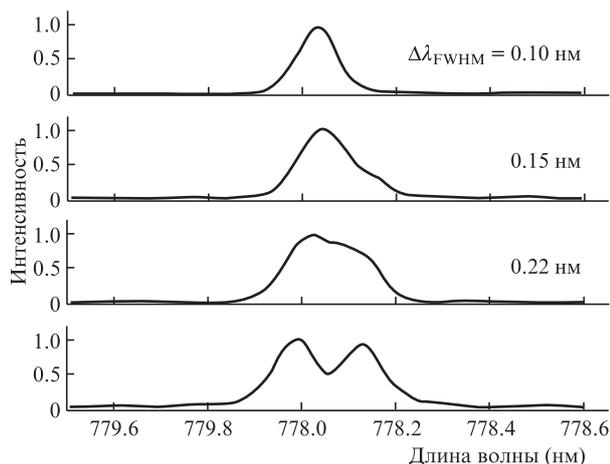


Рис.5. Спектры различной ширины для ЛЛД с двумя ОБР.

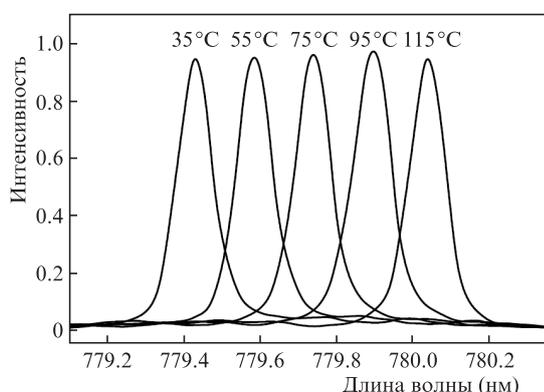


Рис.6. Спектры излучения ЛЛД с двумя ОБР при разных температурах ОБР2.

двух ОБР ширина линии может перестраиваться, тогда как центральная длина волны остается неизменной. Ширина линии может перестраиваться от 0.10 нм (что равно полюсу пропускания ОБР) до 0.22 нм (что в 2.2 раза больше полосы пропускания решетки). При больших разностях температур спектр ЛЛД имеет два пика. В процессе перестройки ширины линии выходная мощность ЛЛД растет быстрее, чем уширяется линия, однако мощность увеличивается не более чем на 4%.

Поскольку линия поглощения паров щелочных металлов меняется с давлением газа и типом металла, длина волны источника накачки для мощных лазеров на парах щелочных металлов должна быть перестраиваемой. Ее перестройка осуществляется при неизменной ширине ли-

нии путем настройки температур двух ОБР. Как следует из рис.6, нами был реализован диапазон перестройки в 0.62 нм (от 779.43 до 780.05 нм) при ширине линии 0.10 нм и токе возбуждения 36 А. Однако посредством поддержания определенных разностей температур можно реализовать и другую ширину линии.

4. Заключение

Нами реализована ЛЛД с уменьшенной шириной линии и внешним резонатором из двух ОБР. По сравнению с ЛЛД, у которой элементом обратной связи является одна решетка, наша линейка имеет лучшие эксплуатационные характеристики с точки зрения подавления субрезонаторных мод при высоком токе возбуждения. Ширину ее линии может перестраивать, задавая разность температур двух ОБР при практически неизменной выходной мощности. Эксперименты также показывают, что центральная длина волны ЛЛД может перестраиваться посредством подстройки температур ОБР при любой ширине линии в диапазоне 0.10 – 0.22 нм.

Поскольку структуру из двух ОБР можно использовать и для сужения линии генерации набора лазерных диодов, она позволяет согласовывать спектры источников накачки с линией поглощения паров щелочных атомов, что будет способствовать созданию эффективных мощных лазеров на парах щелочных металлов.

1. Krupke W.F., Beach R.J., Kanz V.K., Payne S.A. *Opt. Lett.*, **28**, 2336 (2003).
2. Zhdanov B.V., Shafer M.K., Knize R.J. *Opt. Express*, **17**, 14767 (2009).
3. Zweiback J., Krupke W.F. *Opt. Express*, **18**, 1444 (2010).
4. Богачев А.В., Гаранин С.Г., Дудов А.М., Ерошенко В.А., Куликов С.М., Микаелян Г.Т., Панарин В.А., Паутов В.О. Рус А.В., Сухарев С.А. *Квантовая электроника*, **42**, 95 (2012).
5. Gourevitch A., Venus G., Smirnov V., Hostutler D.A., Glebov L. *Opt. Lett.*, **33**, 702 (2000).
6. Beach R.J., Krupke W.F., Kanz V.K., Payne S.A., Dubinskii M.A., Merkle L.D. *J. Opt. Soc. Am. B*, **21**, 2151 (2004).
7. Yunfeng L., Bailiang P., Jing Y., Yajuan W., Meihua L. *IEEE J. Quantum Electron.*, **48**, 485 (2012).
8. Fox C.D., Perram G.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8238**, 823806 (2012).
9. Zhdanov B.V., Ehrenreich T., Knize R.J. *Electron. Lett.*, **43**, 20073302 (2007).
10. Volodin B.L., Dolgy S.V., Melnik E.D., Downs E., Shaw J., Ban V.S. *Opt. Lett.*, **29**, 1891 (2004).
11. Ciapurin I.V., Glebov L.B., Smirnov V.I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5742**, 183 (2005).
12. Venus G.B., Armen S., Vadim I.S., Glebov L.B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5711**, 166 (2005).