

К. ф.-м. н. И. И. ИЖНИН, к. т. н. Н. М. ВАКИВ, к. ф.-м. н. А. И. ИЖНИН,
И. М. СЫВОРОТКА, д. ф.-м. н. С. Б. УБИЗСКИЙ

Дата поступления в редакцию
11.11 2005 г.

Украина, г. Львов, Научно-производственное предприятие "Карат"
E-mail: granat@ipm.lviv.ua

Оппонент к. ф.-м. н. Л. Л. ФЕДОРЕНКО
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

МИКРОЧИПОВЫЕ ЛАЗЕРЫ С ПАССИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР Nd:АИГ/Cr⁴⁺:АИГ

Разработан макетный образец монолитного твердотельного микрочипового лазера с пассивной модуляцией добротности на основе Nd:АИГ/Cr⁴⁺:АИГ с применением метода жидкофазной эпитаксии.

Одной из основных тенденций развития современной электроники является миниатюризация компонентов. В лазерной технике эта тенденция проявляется в быстром развитии технологии производства полупроводниковых лазерных диодов. Однако несмотря на значительный прогресс в данной области и на доминирующие позиции на рынке лазерной техники лазерные диоды не могут полностью удовлетворить расширяющиеся конструкторские требования. В первую очередь это обусловлено фундаментальными физическими ограничениями для полупроводниковых лазеров. Это многомодовый режим излучения, зависимость генерируемой длины волны от температуры р-п-перехода, относительно широкая (порядка 20 МГц) полоса излучения, значительная расходимость лазерного пучка, невозможность генерировать наносекундные и субнаносекундные импульсы излучения, временная нестабильность параметров прибора и т. п.

В то же время полупроводниковые лазерные диоды с успехом используются в качестве источников излучения накачки для компактных твердотельных лазеров, которые в основном лишены недостатков, присущих полупроводниковым лазерам. Прогресс в технологии изготовления полупроводниковых лазеров послужил толчком к появлению новых подходов в конструировании твердотельных лазеров — созданию микролазеров, микрочиповых, волноводных, дисковых лазеров и т. д. Можно сказать, что в этом случае миниатюрные твердотельные лазеры трансформируют «плохое» излучение полупроводниковых лазеров в высококачественные оптические пучки.

Особое место среди миниатюрных твердотельных лазеров занимают микрочиповые лазеры с пассивной модуляцией добротности резонатора [1—3]. Благодаря своим параметрам — малой (≤ 1 нс) длительности импульса, относительно большой (1...20 кВт) пиковой мощности излучения, стабильности пучка, малым геометрическим размерам, дешевизне при массовом производстве — эти приборы находят широкое применение в прецизионной дальнометрии на

малых и средних расстояниях, при мониторинге окружающей среды, контроле загрязнения атмосферы, воды, пищевых продуктов, в медицине, робототехнике, научных исследованиях и т. д. Ключевым моментом в технологии производства микрочиповых лазеров с пассивной модуляцией добротности является осуществление оптического контакта генерирующей среды с насыщающимся поглотителем.

К решению этого вопроса существуют два подхода. Первый предложен исследователями Массачусетского технологического института (США) и базируется на термическом или клеевом соединении пластины генерирующей среды и пластины насыщаемого поглотителя [4, 5]. Иной подход был использован учеными СЕА-LETI (Франция) [6, 7]. Ими было предложено проводить наращивание монокристаллического слоя насыщаемого поглотителя методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на подложку, которая является генерирующей средой. Данный подход был с успехом продемонстрирован на монокристаллических соединениях со структурой граната, когда подложкой служила пластина генерирующей среды Nd:АИГ, на которую наращивался слой Cr⁴⁺:АИГ, являющийся пассивным модулятором. С нашей точки зрения технология изготовления активных элементов импульсных лазеров с применением метода жидкофазной эпитаксии является более привлекательной, особенно когда в качестве рабочих сред используются монокристаллические материалы со структурой граната.

В настоящей работе приведены результаты исследований, проведенных на НПП «Карат» (г. Львов) по разработке активных сред Nd:АИГ/Cr⁴⁺:АИГ, полученных методом ЖФЭ, а также основные параметры макета лазера с пассивной модуляцией добротности, созданного на их основе.

Эксперимент

Отметим, что технологические детали получения эпитаксиальных слоев Cr⁴⁺:АИГ на подложках Nd:АИГ специалистами СЕА-LETI [6, 7] опубликованы не были. Поэтому нами была разработана собственная технология, описанная в [8].

Основные проблемы при изготовлении эпитаксиальных структур для микрочиповых лазеров с пассивной модуляцией добротности связаны с необходимостью достижения высокой концентрации фотоотропных центров Cr⁴⁺ в тетраэдрических позициях гранатовой решетки при достаточно больших толщи-

нах эпитаксиальных слоев (30...200 мкм). Так как параметр решетки эпитаксиального слоя несколько меньше параметра решетки монокристаллической подложки, то это требует постоянной коррекции условий ЖФЭ-роста в течение всего процесса. С другой стороны, т. к. ионы хрома в гранатовой решетке имеют стабильную валентность Cr^{3+} , то для получения эпитаксиального слоя АИГ, легированного ионами хрома с валентностью $4+$, необходимо дополнительное легирование катионами с валентностью $2+$, например Ca^{2+} или Mg^{2+} [9—11].

На основании проведенного анализа в качестве компенсирующей примеси для проведения технологических экспериментов были выбраны ионы Mg^{2+} , т. к. они занимают преимущественно октаэдрические позиции гранатовой решетки и имеют более близкие значения ионного радиуса к ионному радиусу Al^{3+} , что в конечном итоге способствует расположению ионов Cr^{4+} в тетраэдрических позициях. Заметим, что даже в этом случае только несколько процентов общего количества ионов хрома занимают тетраэдрические позиции в зарядовом состоянии Cr^{4+} и, таким образом, создают фототропные центры, необходимые для работы пассивного модулятора добротности.

Рост эпитаксиальных пленок Cr^{4+} :АИГ на подложках Nd:АИГ проводили на модернизированной установке ЖФЭ "Garnet-3" (LPAI, Франция), содержащей 5-зонный нагревательный блок, что обеспечивало точность поддержания температуры $\pm 0,1^\circ\text{C}$ в диапазоне температур 600...1200 $^\circ\text{C}$. Эпитаксиальные слои выращивали по схеме, типичной для ЖФЭ гранатовых соединений [12] из пересыщенных растворов окислов гранатообразующих компонентов и легирующих примесей Cr и Mg в расплаве $\text{PbO}-\text{B}_2\text{O}_3$. Детали технологии описаны в [8].

В соответствии с отработанной технологией были выращены эпитаксиальные структуры Nd:АИГ/ Cr^{4+} :АИГ толщиной до 250 мкм и концентрацией фототропных центров $\geq 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Типичные спектры поглощения эпитаксиальных слоев Cr^{4+} :АИГ с различной концентрацией фототропных центров представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, коэффициент поглощения слоев на длине волны $\lambda=1,064 \text{ мкм}$ до-

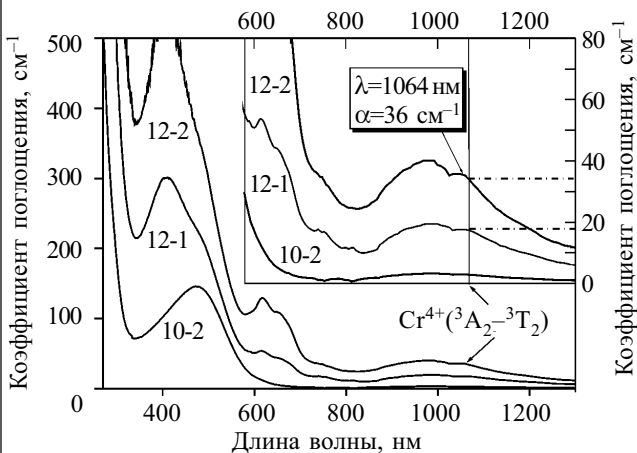


Рис. 1. Спектры поглощения эпитаксиальных слоев Cr^{4+} :АИГ с различной концентрацией фототропных центров (надписи у кривых соответствуют различным образцам)

стигал величины $\alpha \approx 40 \text{ см}^{-1}$, что свидетельствует об их пригодности для создания микрочипового лазера с пассивной модуляцией добротности.

Результаты и обсуждение

Изготовление лазерных резонаторов осуществляли с использованием известных стандартных технологических операций [6, 7]. Эпитаксиальный слой с одной из сторон структуры (нерабочей) механически сошлифовывали, после чего поверхность полировали. Толщину эпитаксиального слоя с другой стороны (рабочей) путем механической шлифовки и полировки доводили до необходимого значения. Основная проблема при такой обработке структуры диаметром 20...30 мм заключалась в необходимости сохранить плоскопараллельность резонатора не хуже $10''$.

Для формирования резонатора на соответствующие стороны структуры путем электронного напыления наносили входное и выходное многослойные диэлектрические зеркала с необходимым значением пропускания на длине волны полупроводникового лазера накачки (808 нм) и генерации микрочипового

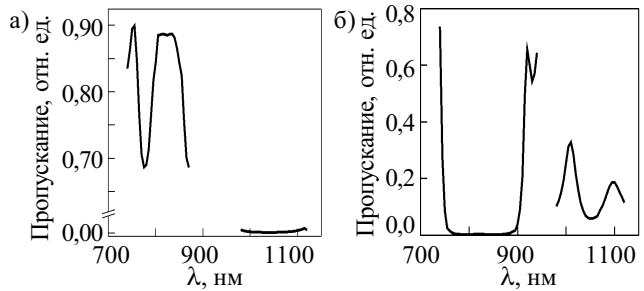


Рис. 2. Спектры пропускания входного (а) и выходного (б) зеркал резонатора

лазера (1064 нм). Входное зеркало характеризовалось высоким пропусканием ($T > 90\%$ на 808 нм) и высоким коэффициентом отражения ($R > 99\%$ на 1064 нм, см. рис. 2, а). Выходное зеркало имело высокий коэффициент отражения ($R > 99\%$ на длине волны накачки 808 нм) и пропускание $T \approx 7...10\%$ на 1064 нм (длине волны генерации микрочипового лазера) (рис. 2, б). Зеркала состояли из 25—30 периодически напыленных слоев SiO_2 и HfO_2 толщиной, кратной $\lambda/2$. После этого структура с нанесенными зеркалами разделялась на отдельные лазерные чипы размерами $2 \times 2 \text{ мм}$.

Схематическое изображение стенда для исследования характеристик микрочипового лазера представлено на рис. 3. Продольная накачка осуществлялась непрерывным 4-ваттным полупроводниковым лазером АТС-С4000 («Полупроводниковые приборы», г. С.-Петербург, Россия).

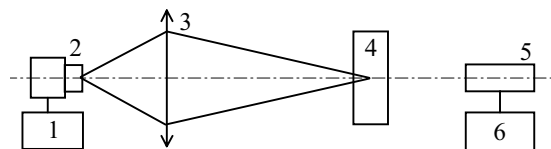


Рис. 3. Схематическое изображение макетного образца микрочипового лазера:

1 — источник питания лазера накачки; 2 — полупроводниковый лазер накачки; 3 — дополнительная фокусирующая оптика; 4 — Nd:АИГ/ Cr^{4+} :АИГ лазерный резонатор; 5 — коаксиальный фотоэлемент; 6 — цифровой широкополосный осциллограф

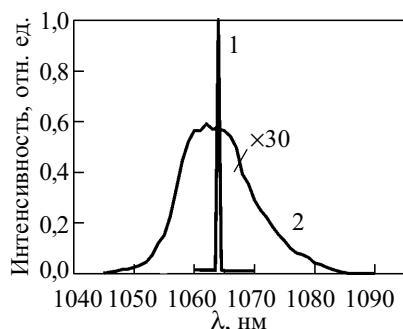


Рис. 4. Спектры излучения Nd:АИГ/ Cr⁴⁺:АИГ микрочипового лазера: 1 — режим лазерной генерации; 2 — режим спонтанного излучения

Полупроводниковый лазер содержал цилиндрическую микролинзу, которая уменьшала расхождение излучения в одной из плоскостей в 20 раз. Таким образом, результирующее расхождение излучения лазера накачки (FWHM) составляло величину $10 \times 2^\circ$. Дополнительная фокусирующая оптика 3 обеспечивала формирование пятна лазера накачки размерами 200×400 мкм на расстоянии 200 мкм от поверхности входного зеркала резонатора микрочипового лазера 4. Параметры выходных импульсов измеряли с помощью калиброванного коаксиального фотоэлемента 5 ФЭК-15 (ВНИИ ОФИ, г. Москва, Россия) со временем нарастания сигнала 250 пс и цифрового осциллографа 6 TDS 5052B (Tektronix, США) с полосой частот 500 МГц.

Существование лазерной генерации в разработанном макете Nd:АИГ/Cr⁴⁺:АИГ микрочипового лазера демонстрируют данные, приведенные на рис. 4. При мощности излучения лазера накачки меньше пороговой ($\approx 1,1$ Вт) наблюдается широкая полоса люминесценции генерирующей среды Nd:АИГ (кривая 2). Накачка резонатора с мощностью, превышающей пороговую, обеспечивала реализацию режима лазерной генерации (кривая 1), в котором наблюдается очень узкая линия излучения на длине волны 1064 нм.

Работу микрочипового лазера в режиме пассивной модуляции добротности демонстрируют данные рис. 5. Длительность импульса генерации лазера (FWHM) составляла примерно 1,3 нс при частоте повторения 5,5 кГц и мощности в импульсе 1,2 кВт.

Выводы

В результате проведенных экспериментов разработан макетный образец монолитного твердотельного микрочипового лазера с пассивной модуляцией добротности на основе эпитаксиальных структур Nd:АИГ/Cr⁴⁺:АИГ. Продемонстрирована работа микрочипового лазера в режиме пассивной модуляции добротности, что подтвердило пригодность разработанной технологии ЖФЭ-роста эпитаксиальных слоев насыщаемого поглотителя Cr⁴⁺:Y₃Al₅O₁₂ с параметрами, необходимыми для создания микрочиповых лазеров.

Излучение микрочипового лазера характеризуется следующими параметрами: длительность импульсов (FWHM) $\approx 1,3$ нс, частота повторения 5,5 кГц,

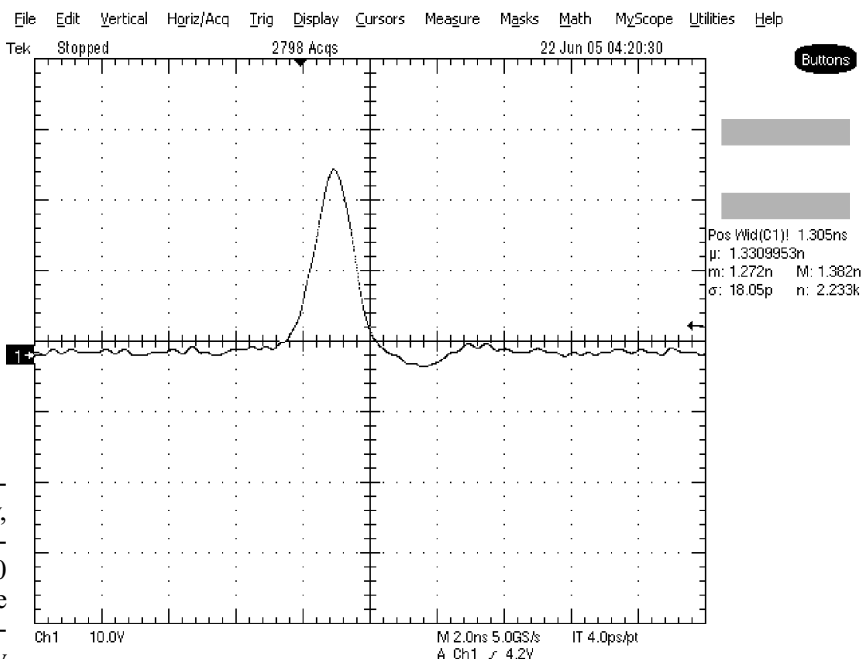


Рис. 5. Осциллограмма формы импульса излучения микрочипового лазера (шкала 400 пс/деление)

мощность излучения в импульсе 1,2 кВт. Полученные параметры соответствуют параметрам, характерным для такого типа микролазеров. Относительно малая мощность излучения в импульсе обусловлена, по нашему мнению, не до конца оптимизированными параметрами лазерных зеркал и формой пятна вводимого излучения полупроводникового лазера накачки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Zayhowski J. Microchip lasers // Optical Materials.— 1999.— Vol. 11.— P. 255—267.
2. Zayhowski J. Passively Q-switched Nd-YAG microchip lasers and applications // J. Alloys and Compounds.— 2000.— Vol. 303/304.— P. 393—400.
3. Molva E. Microchip lasers and their applications in optical microsystems // Optical Materials.— 1999.— Vol. 11.— P. 289—299.
4. Zayhowski J. Microchip lasers // The Lincoln Lab. Journal.— 1990.— Vol. 3.— P. 427—454.
5. Zayhowski J. Q-switched operation of microchip lasers // Opt. Letter.— 1991.— Vol. 16.— P. 575—577.
6. Ferretti M. YAG microchip laser development in France // EuroPhotonics.— 1997.— N 1.— P. 34—35.
7. Ferrand B., Chambaz B., Couchaud M. Liquid phase epitaxy: a versatile technique for the development of miniature optical components in single crystal dielectric media // Optical Materials.— 1999.— Vol. 11.— P. 101—114.
8. Пат. 59061 України. Спосіб виготовлення структур АИГ:Nd/АИГ:Cr⁴⁺ та ГТГ:Nd/ГТГ:Cr⁴⁺ для активних середовищ мікрочипових лазерів з пасивно-модульованою добротністю / М. М. Ваків, І. І. Бжнін, А. О. Матковський та ін.— 2003.— Бюл. № 8.
9. Sugimoto A., Nobe Y., Yamagishi K. Crystal growth and optical characterization of Cr,Ca:Y₃Al₅O₁₂ // J. Cryst. Growth.— 1994.— Vol. 140.— P. 349—354.
10. Markgraf S. A., Pangborn M. F., Dieckmann R. Influence of different divalent co-dopants on the Cr⁴⁺ content of Cr-doped Y₃Al₅O₁₂ // Ibid.— 1997.— Vol. 180.— P. 81—84.
11. Frucacz Z., Łukasiewicz T., Malinowski M., Mierczyk Z. Growth of Cr⁴⁺:YAG crystals for applications in laser technique / Proc. SPIE.— 1995.— Vol. 2373.— P. 74—78.
12. Blank S. L., Nielsen J. W. The growth of magnetic garnets by liquid phase epitaxy // J. Cryst. Growth.— 1972.— Vol. 17.— P. 302.