

Д. ф.-м. н. А. О. МАТКОВСКИЙ, И. М. СЫВОРОТКА,
 д. ф.-м. н. С. Б. УБИЗСКИЙ, С. С. МЕЛЬНИК,
 к. т. н. Н. М. ВАКИВ, к. ф.-м. н. И. И. ИЖНИН

Украина, Львовский НИИ материалов НПП "Карат",
 НИЦ "Кристалл" НУ "Львовская политехника"
 E-mail: <granat@carat.lviv.ua> <crystal@polynet.lviv.ua>

Дата поступления в редакцию
 18.02 2002 г.

Оппонент к. ф.-м. н. Я. М. ЗАХАРКО
 (ЛНУ им. И. Франко, г. Львов)

МИКРОЧИПОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Описаны современные твердотельные микролазеры с пассивной модуляцией добротности с накачкой полупроводниковым лазером, их конструкции и сферы применения.

Общая тенденция современной микроэлектроники — миниатюризация электронных и электронно-оптических компонентов — выдвигает такие же требования к твердотельным лазерам. Одновременно резко повышаются требования к качественным характеристикам излучения, возможности генерации импульсов малой и средней (несколько десятков кВт в импульсе) мощности, стабильности, надежности при одновременном уменьшении или, по крайней мере, сохранении на существующем уровне потребительского соотношения "мощность/стоимость".

Благодаря быстрому прогрессу в технологии полупроводников современный сектор рынка микролазеров почти полностью представлен полупроводниковыми инжекционными лазерами. Однако, невзирая на доминирующее положение, полупроводниковые лазеры не могут удовлетворить потребности техники в полном объеме из-за принципиальных физических ограничений. К числу последних относятся многомодовый состав излучения, большой угол расхождения и асимметрия пучка излучения, сильная зависимость длины волны генерации от температуры $p-n$ -перехода, практическая невозможность генерации коротких (нано- и субнаносекундных) импульсов, неудовлетворительная временная стабильность [1—3].

Удовлетворить всему комплексу выдвинутых требований могут компактные твердотельные лазеры с диодной накачкой, которые лишены большинства отмеченных недостатков полупроводниковых лазеров [1, 4, 5]. Микролазеры с рабочим объемом излучателя $\sim 1 \text{ мм}^3$ фактически играют роль преобразователя "некачественного" излучения полупроводникового лазера накачки в практически идеальное одночастотное, линейно поляризованное одномодовое излучение с распределением интенсивности в луче, близким к дифракционно-ограниченному гауссовому. (Микролазеры, изготовленные методами групповой технологии, принятыми в производстве полупроводниковых интегральных микросхем, получили название микрочиповых.)

Для иллюстрации преимуществ, которые обеспечивает микролазер, рассмотрим его простейшую схему (рис. 1). Микролазер — это тонкая пластина активной среды, на полированные поверхности которой нанесены зеркала резонатора в виде тонких диэлектрических слоев с дихроическими характеристиками [1, 5, 6]. Одно из них (входное зеркало) является антиотражающим для излучения накачки и полностью отражающим для излучения генерации, другое (выходное) — отражающим для излучения накачки и частично пропускающим для генерируемых в активной среде лучей. Длина резонатора подбирается таким образом, чтобы выполнялось условие генерации одной продольной моды резонатора. Благодаря малым размерам лазера обеспечивается не только одномодовый и одночастотный режим излучения, но и более высокая, по сравнению с традиционными твердотельными лазерами, температурная и временная стабильность свойств.

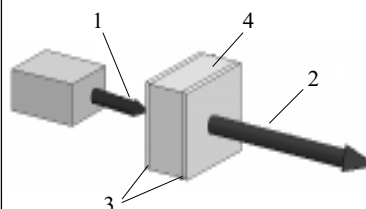


Рис. 1. Модель микролазера с продольной накачкой:

1 — излучение накачки;
 2 — выходящий лазерный луч;
 3 — зеркала резонатора;
 4 — активная среда

Первые микролазеры на основе высококонцентрированных (до $5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$) неодимовых кристаллов $\text{NdP}_5\text{O}_{14}$, $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$ и $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ были созданы еще в 1970-е годы [7]. Благодаря особенностям кристаллической структуры концентрационное гашение в этих материалах при высокой концентрации неодима не наблюдается. Это обеспечивает достижение больших коэффициентов усиления и дает возможность применять в лазерах активные элементы довольно малых размеров. Например, в микролазерах на основе кристаллов $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$ получена генерация в непрерывном режиме на длине волны $\lambda=1,05 \text{ мкм}$ мощностью несколько милливатт при пороге накачки 0,35 мВт и дифференциальном к. п. д. $\sim 15\%$. Поскольку в кристаллах с высокой концентрацией активатора излучение накачки эффективно поглощается уже на глубинах 100...200 мкм, то активные среды таких микролазеров изготавливались в форме пластин толщиной менее 1 мм и длиной до 10 мм.

К микролазерам принадлежат также лазеры с волноводным распространением света в активной генерирующей среде. Они представляют собой тонкий слой вол-

новода, заключенного между слоями материала с меньшим показателем преломления [2, 5, 8]. Типичная конструкция волноводного лазера на основе эпитаксиальной двухслойной структуры представлена на **рис. 2**. Современное состояние и проблемы мощных волноводных лазеров (до 10 Вт в непрерывном режиме излучения) представлены в [9].

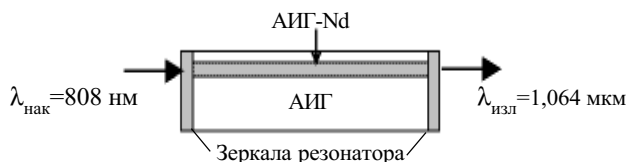


Рис. 2. Микролазер с волноводным распространением света в генерирующей среде ($\lambda_{\text{нак}}$ и $\lambda_{\text{изл}}$ — длины волн накачки и излучения лазера)

Настоящая статья посвящена преимущественно другому типу микролазеров, а именно, микрочиповым лазерам с модуляцией добротности и продольной накачкой.

Идея реализации микролазера с диодной накачкой активной среды и с пассивным модулятором добротности, изготавливаемого по групповой технологии, впервые была предложена в 1989 г. в Lincoln Laboratory (США) [4, 6, 10, 11]. Несколько позже свой подход к реализации микрочипового лазера начали разрабатывать специалисты научного центра СЕА LETI (Франция) [12, 13]. Следует заметить, что обе идеи одинаковы, однако технологические подходы к реализации лазеров в каждом случае существенно отличаются, что будет отмечено ниже.

Схематически конструкция микролазера с пассивным модулятором добротности с генерирующей средой на основе монокристалла $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}$ (АИГ-Nd), излучающего на длине волны $\lambda=1,064$ мкм, приведена на **рис. 3**. Толщина активной среды составляет 750...1500 мкм, концентрация ионов неодима — около 1 ат.% и более. Накачка осуществляется лазерным

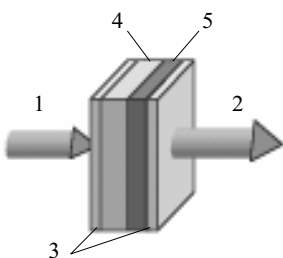


Рис. 3. Микрочиповый лазер с пассивной модуляцией добротности:

1 — излучение накачки; 2 — выходящий лазерный луч; 3 — зеркала резонатора; 4 — активная среда; 5 — пассивный абсорбер

диодом на основе гетероструктур GaAs-AlGaAs с $\lambda_n = 808$ нм. Схема энергетических уровней ионов неодима, лазерные переходы и фрагмент спектра поглощения АИГ-Nd в области накачки представлены на **рис. 4** [2, 3, 14].

В приведенной модели в качестве пассивного модулятора добротности используется монокристаллический слой алюмоиттриевого граната, содержащий ионы четырехвалентного хрома в тетраэдрических катионных позициях (АИГ- Cr^{4+}). Характерной особенностью кристаллов с ионами Cr^{4+} в тетраэдрической анионной координации является способность к т. н. насыщающемуся поглощению излучения в области максимума их полосы

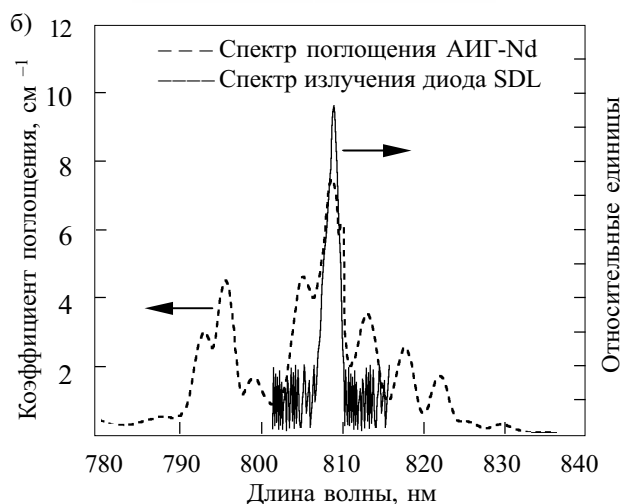
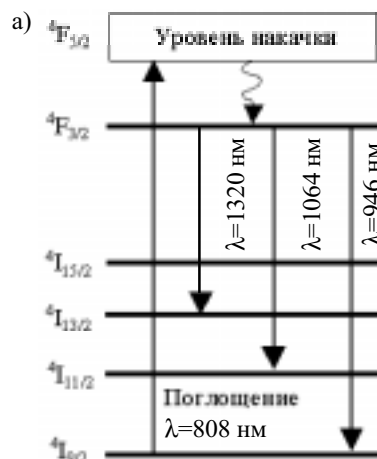


Рис. 4. Схема энергетических уровней ионов неодима и лазерные переходы в АИГ-Nd (а); спектр излучения GaAlAs диода накачки на фоне фрагмента спектра поглощения АИГ-Nd (б)

поглощения (переход ${}^3\text{A}_2 \rightarrow {}^3\text{E}({}^3\text{T}_2)$), т. е. около 1,1 мкм [15—17]. Эта особенность, получившая название фототропии, приводит к просветлению материала модулятора (насыщающегося поглотителя) при высокой плотности потока излучения.

Схема энергетических уровней ионов Cr^{4+} в тетраэдрическом анионном окружении представлена на **рис. 5**. При малой мощности излучения активной среды АИГ-Nd с длиной волны 1,06 мкм происходит возбуждение электронов с основного уровня на уровень ${}^3\text{E}({}^3\text{T}_2)$, которые, через короткое время после поглощения кванта падающего света, без излучения переходят на уровень ${}^3\text{B}_2({}^3\text{T}_2)$. Затем большая их часть снова без излучения возвращается на основной уровень. При малой интенсивности излучения перепоглощение с уровня ${}^3\text{B}_2({}^3\text{T}_2)$ на ${}^3\text{E}({}^3\text{T}_1)$ практически не происходит из-за малого поперечного сечения поглощения с возбужденного уровня. При увеличении мощности излучения заселенность уровня ${}^3\text{B}_2({}^3\text{T}_2)$ в среде модулятора достигает значительной величины, и тогда электроны основного уровня и возбужденного уровня, поглотив квант излучения, перераспределяются между уровнями ${}^3\text{B}_2({}^3\text{T}_2)$ и ${}^3\text{E}({}^3\text{T}_1)$. Общее

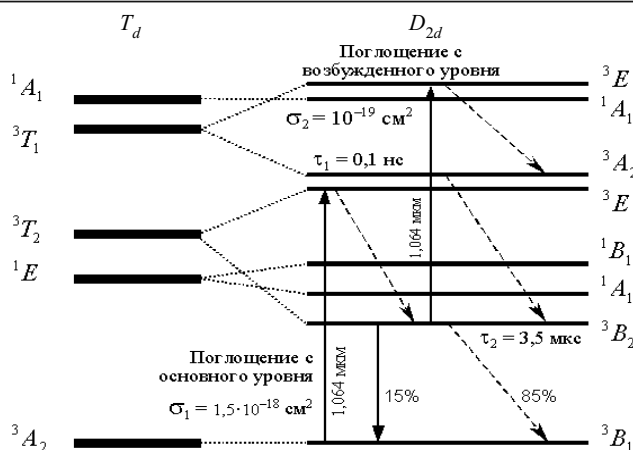


Рис. 5. Схема энергетических уровней ионов Cr^{4+} в тетраэдрической координации

количество актов поглощения уменьшается, и при этом наступает просветление слоя АИГ- Cr^{4+} в области 1,06 мкм. Из зависимости коэффициента поглощения АИГ- Cr^{4+} от мощности падающего излучения неодимового лазера АИГ- Nd^{3+} , показанной на рис. 6 [18], видно, что разница пропускания света в насыщенном и ненасыщенном состояниях может достигать нескольких десятков процентов.

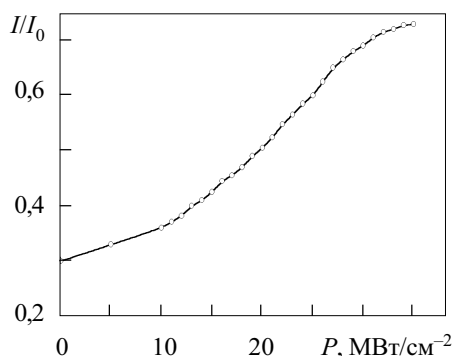


Рис. 6. Зависимость коэффициента поглощения АИГ- Cr^{4+} (I/I_0) от мощности падающего излучения неодимового лазера АИГ- Nd^{3+} (P)

В конструкции, приведенной на рис. 3, насыщающий поглотитель и активная среда расположены между двумя диэлектрическими зеркалами, которые образуют оптический резонатор лазера. Благодаря значительному поглощению в слое поглотителя в ненасыщенном состоянии добротность резонатора недостаточна для возбуждения генерации. Поглощение света в слое АИГ- Cr^{4+} происходит до тех пор, пока заселенность уровня 3B_2 (3T_2) не достигнет определенного критического значения, а затем поглощение почти мгновенно уменьшается, добротность резко возрастает, и генерируется очень короткий импульс лазерного излучения. После этого система возвращается в исходное состояние.

Таким образом, свойство насыщающегося поглощения слоя АИГ- Cr^{4+} приводит к быстрому периодическому изменению добротности лазерного резонатора и генерации периодических импульсов лазерного излучения с длиной волны генерации АИГ- Nd^{3+} . Следует отметить, что временные и энергетические

параметры импульса генерации являются очень стабильными во времени и практически не зависят от мощности накачки, а определяются, в основном, толщиной слоя насыщаемого поглотителя и концентрацией фототропных центров в нем.

Дополнительное использование параметрических эффектов в нелинейно-оптических кристаллах типа ВВО (BaB_2O_4), КТР (KTiOPO_4), РПЛН (периодически поляризованный ниобат лития) и др. для умножения или существенного изменения частоты излучения значительно расширяет сферу применения микрочиповых лазеров [11, 12, 19, 20]. Типичная схема реализации микрочипового лазера с умножением частоты представлена на рис. 7 [4].

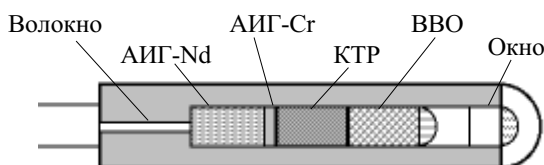


Рис. 7. Микрочиповый лазер с умножением частоты излучения

Для повышения эффективности и снижения энергопотребления, а также для использования в волоконно-оптических системах конструкция микрочиповых лазеров несколько видоизменяется. Для концентрации излучения накачки в активной среде входная грань изготавливается методом травления по специальной технологии в форме, близкой к сферической (рис. 8), а для фокусировки лазерного луча в оптическое волокно на выходной грани структуры методами тонкопленочной технологии формируется микролинза из диоксида кремния [21]. Такая конструкция обеспечивает возможность

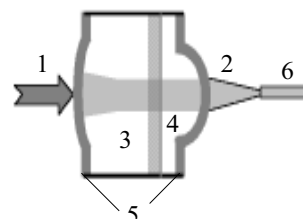


Рис. 8. Микрочиповый лазер со сферическим резонатором: 1 — излучение накачки; 2 — выходящий лазерный луч; 3 — активная среда; 4 — микролинза на основе диоксида кремния; 5 — зеркала резонатора; 6 — волновод

получения лазерного луча диаметром до 7,2 мкм, а концентрация энергии накачки позволяет на порядок снизить порог генерации и использовать для накачки маломощные (100...150 мВт) лазерные диоды.

Как уже упоминалось, для практической реализации рассмотренной схемы микрочипового лазера с пассивной модуляцией добротности было предложено два подхода. В первом, предложенном в Lincoln Laboratory, использовалась технология склеивания или диффузионного сращивания двух прецизионно отполированных пластин генерирующей и модулирующей сред, последующего нанесения входного и выходного диэлектрических зеркал и резки полученной заготовки на отдельные лазерные чипы [19, 22]. В качестве материала генерирующей среды могут использоваться практически все известные твердотельные матрицы, а насыщаемый поглотитель вы-

бирается в зависимости от типа матрицы и длины волны генерации.

Наибольшее распространение получили микроциповые лазеры на основе АИГ-Nd (активная среда) — АИГ-Cr⁴⁺ (насыщаемый поглотитель). Учитывая, что в объемных монокристаллах АИГ-Cr⁴⁺ концентрации активных фототропных центров обычно невысока (~5·10¹⁷ см⁻³) [18, 23], необходимая толщина слоя модулятора достигает нескольких миллиметров. Кроме традиционно используемых кристаллов АИГ, в качестве матриц неодимовых микроциповых лазеров применяются также монокристаллы YVO₄, YLiF₄, Y₂SiO₅, Sr₅(PO₄)₃F, YAl₃(BO₃)₄, причем генерацию получают не только на длине волны 1,06 мкм, но и на 0,9 и 1,3 мкм [25]. Для безопасных для зрения ("eye-safe laser") лазерных систем разработан микроциповый лазер с длиной волны излучения 1,54 мкм, в котором использована генерирующая среда на основе фосфатного стекла, активированного эрбием и сенсибилизированного иттербием, толщиной 750 мкм и насыщаемого поглотителя — кристаллической пластины LaMgAl₁₁O₁₉-Co²⁺ толщиной 500 мкм [12, 26, 27]. Схема энергетических уровней ионов Co²⁺ и их спектры поглощения в оксидных кристаллах приведены в работе [28]. Накачка в таком лазере происходит лазерными диодами на основе GaInAs. Типичные параметры такого лазера:

- длина волны накачки 0,973 мкм;
- основная длина волны генерации 1,55 мкм;
- энергия в импульсе 5...15 мкДж;
- средняя мощность 10...65 мВт;
- мощность в импульсе 1...4 кВт;
- длительность импульса <3 нс;
- частота повторения импульсов 1...20 кГц;
- расходимость пучка <10 мрад.

В стадии разработки находятся также микроциповые лазеры на основе кристаллических матриц, легированных тулием, с длиной волны генерации ~2 мкм и накачкой лазерными диодами в области 790 нм [12]. В качестве перспективных активных сред микроциповых лазеров рассматриваются также оксидные кристаллы, активированные ионами иттербия, привлекательность которых связывается в основном с относительно высокой концентрацией активатора, высокой эффективностью накачки (более 90%), большим временем жизни верхнего лазерного уровня (~0,95 мс), малой длиной поглощения накачки (<0,5 мм), минимизирующей проблему "термической линзы" [29, 30].

Полностью монолитная конструкция была предложена исследователями из CEA LETI. Она базировалась на использовании эпитаксиальных структур, в которых роль генерирующей среды выполняла подложка из АИГ-Nd, а роль пассивного модулятора — эпитаксиальная пленка АИГ-Cr⁴⁺ [12, 13, 20, 31]. Ключевым элементом технологического процесса изготовления такого типа лазеров является получение монокристаллического слоя насыщающегося поглотителя (АИГ-Cr⁴⁺) с заданной толщиной и концентрацией ионов Cr⁴⁺ на поверхности активной среды [31].

Для получения эпитаксиальной структуры практически безальтернативно используется метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) [13, 20, 32]. Из-за высоких скоростей пленкообразования (≥1 мкм/мин) он позволяет не только получать монокристаллические пленки толщиной до нескольких сот микрометров, но и, благодаря особенностям ЖФЭ, увеличить концентрацию фототропных центров более чем на порядок по сравнению с их концентрацией в монокристаллах, выращенных методом Чохральского. Принимая во внимание возможность получения эпитаксиальных структур большой площади с высокой однородностью, структурным совершенством и воспроизводимостью свойств пленок, такой подход является более технологичным в условиях серийного производства, позволяя методом групповой технологии изготовить до нескольких сот практически идентичных микролазеров из одной эпитаксиальной структуры.

На рис. 9 представлена типовая схема технологического процесса изготовления микроциповых лазеров из монолитных эпитаксиальных структур [20, 33—35]. Необходимо отметить, что такая схема обеспечивает изготовление в одном технологическом цикле большого числа (более 200 шт. на подложке Ø25,4 мм или около 1000 шт. на подложке Ø50,8 мм) идентичных по своим параметрам чипов микролазеров размерами ~1×1 мм. В конечном счете использование такого технологического процесса приводит к тому, что стоимость активной среды перестает быть определяющей в стоимости всего лазера, а его общая стоимость становится сравнимой со стоимостью газовых лазеров аналогичной средней мощности [4]. Последнее обстоятельство открывает огромные перспективы для возникновения новых применений микроциповых лазеров.

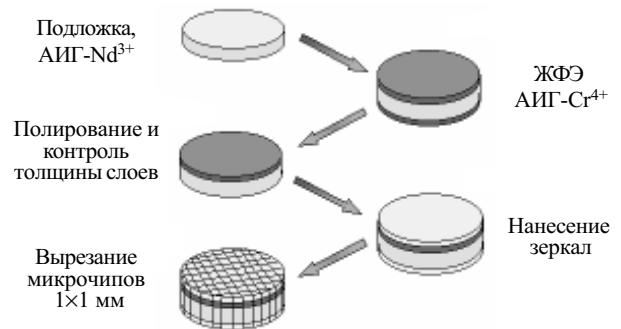


Рис. 9. Схема типового процесса изготовления микроциповых лазеров по технологии CEA LETI

На сегодняшний день серийный выпуск микроциповых лазеров различного назначения освоен фирмами NanoLase (Франция), Litton Airtron Synoptics (США), FIRN (Россия) и др. [26, 35, 36]. Фирма NanoLase выпускает микроциповые лазеры по лицензии CEA LETI, а фирма Litton Airtron Synoptics — по собственной технологии; обе основываются на использовании эпитаксиальных пленок АИГ-Cr⁴⁺. Коммерческая стоимость микроциповых лазеров на рынке составляет, в зависимости от типа лазера, 5,0—8,0 тыс. долл. США, что значительно меньше цены аналогичных традиционных твердотельных лазеров.

Общий вид микрочипового лазера фирмы NanoLase [12, 26] представлен на **рис. 10**. Типичные характеристики выпускаемых микрочиповых лазеров

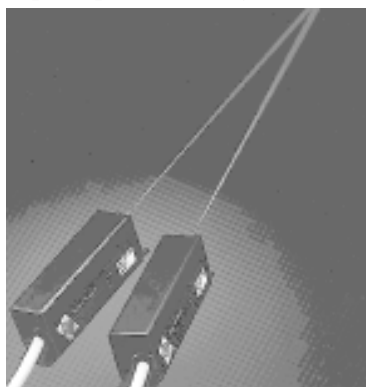


Рис. 10. Микрочиповый лазер фирмы NanoLase

с пассивной модуляцией добротности на основе эпитаксиальных структур АИГ-Nd/АИГ-Cr⁴⁺, по данным [20,26,33]:

- длина волны накачки 0,808 мкм;
- основная длина волны генерации 1,064 мкм;
- энергия импульса 1...10 мкДж;
- средняя мощность 10...50 мВт;
- пиковая мощность в импульсе 10...50 кВт;
- длительность импульса <1 нс;
- частота повторения импульсов 10...50 кГц;
- расходимость пучка <10 мрад.

Ввиду высокой пиковой мощности и качества излучения микрочипового лазера основная длина волны генерации ($\lambda=1,064$ мкм) может быть эффективно преобразована в высшие гармоники в видимой и УФ-области спектра с помощью умножителей частоты на основе нелинейно-оптических кристаллов. Так, при использовании монокристалла КТР длиной 5 мм были получены импульсы ($\tau_{\text{имп}}=0,44$ нс) второй гармоники ($\lambda=532$ нм) с эффективностью преобразования до 70% [19] и средней энергией 3,5 мкДж [4]. Комбинация преобразователей на основе кристаллов КТР и ВВО ($\beta\text{-BaV}_2\text{O}_4$), как схематично изображено на рис. 7, позволяет получать третью ($\lambda=355$ нм) или четвертую ($\lambda=266$ нм) гармоники. При этом эффективность преобразования в четвертую гармонику достигает 20% при средней энергии импульсов 0,7 мкДж. Применение параметрических генераторов позволяет перестраивать частоту лазерного излучения в инфракрасном диапазоне вплоть до 4 мкм с достаточно высокой эффективностью.

Преимущества монокристаллической конструкции микрочиповых лазеров с пассивной модуляцией добротности и многообещающие перспективы их использования в различных областях современных технологий стимулировали развитие работ по разработке оригинальной технологии получения эпитаксиальных лазерных структур во Львовском НИИ материалов научно-производственного предприятия "Карат" [32, 38, 39]. Эти исследования преследовали две цели: во-первых, получение, кроме уже известных эпитаксиальных структур АИГ-Nd/АИГ-Cr⁴⁺ на подложках ориентации (111), аналогичных структур на подложках (100), которые, согласно [40],

могут иметь ряд преимуществ при использовании лазерных импульсов с различной поляризацией. Вторых — разработка технологии получения структур на основе генерирующей среды — подложки Gd₃Ga₅O₁₂-Nd (ГГГ-Nd) и насыщаемого поглотителя — эпитаксиальной пленки ГГГ-Cr⁴⁺ (длина волны генерации 1,06 мкм) [38].

Применение ГГГ в качестве матрицы монокристаллических лазерных структур может иметь ряд преимуществ. Главное из них состоит в том, что мощность, при которой происходит насыщение поглощения фототропных центров ГГГ-Cr⁴⁺, несколько выше, чем в АИГ-Cr⁴⁺. Это позволяет накопить большую энергию в импульсе излучения лазера с модулированной добротностью. Кроме того, монокристаллы ГГГ являются более совершенными по структуре, и можно ожидать, что активированные подложки ГГГ-Nd диаметром до 76 мм могут быть более высокого качества, чем подложки АИГ-Nd такого же диаметра. В конечном счете это обещает снижение стоимости микрочиповых лазеров.

Эпитаксиальное наращивание пленок АИГ-Cr⁴⁺ и ГГГ-Cr⁴⁺ проводилось по схеме, типичной для технологии ЖФЭ гранатов [32, 38, 39]. Гранатообразующие оксиды (Al₂O₃ и Y₂O₃ либо Ga₂O₃ и Gd₂O₃), взвешенные в определенном соотношении, наплавляются в платиновом тигле вместе с флюсом-растворителем PbO-B₂O₃. Необходимое количество легирующей примеси (Cr₂O₃) добавляется в раствор-расплав. Учитывая, что устойчивым валентным состоянием хрома в структуре граната является состояние Cr³⁺, то для стабилизации ионов хрома в состоянии Cr⁴⁺ и сохранения электронейтральности в расплав дополнительно вводится соединение, содержащее ионы со стабильной валентностью +2, например, Mg²⁺. Для полного растворения всех компонентов и гомогенизации раствора-расплава температуру в печи поднимают до уровня выше температуры насыщения на 100...150°C и выдерживают несколько часов. После медленного понижения температуры расплава до температуры выращивания (на 10...30°C ниже температуры насыщения раствора по отношению к фазе граната) в расплав на определенное время погружается соответствующая монокристаллическая подложка толщиной 0,75...1,5 мм, поверхности которой обработаны до эпитаксиального качества, т. е. без каких-либо нарушений кристалличности поверхностного слоя. Толщина полученной эпитаксиальной пленки пассивного поглотителя определяется временем выдержки подложки в расплаве, а концентрация активных ионов Cr⁴⁺ — общей концентрацией хрома и компенсационно-стабилизирующего двухвалентного элемента в растворе-расплаве.

Таким образом были получены эпитаксиальные пленки АИГ-Nd(111)/АИГ-Cr⁴⁺, АИГ-Nd(100)/АИГ-Cr⁴⁺, а также ГГГ-Nd(111)/ГГГ-Cr⁴⁺ с толщиной до 250 мкм и контролируемой концентрацией фототропных центров до $\sim 10^{19}$ см⁻³, имеющие коэффициент поглощения на длине волны 1,06 мкм до ~ 40 см⁻¹ [38]. Типичный спектр поглощения пленки ГГГ-Cr⁴⁺ представлен на **рис. 11**.

Возможность управления концентрацией фототропных центров в эпитаксиальных пленках, а также мо-

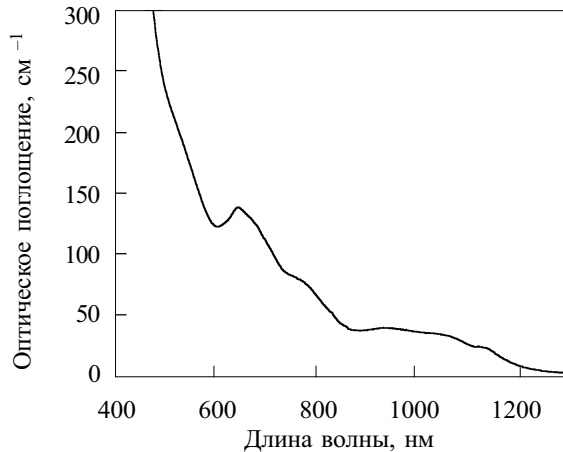


Рис. 11. Спектр оптического поглощения пленки ПГТ-Сг⁴⁺

нокристаллах и АИГ-Сг⁴⁺, с помощью окислительного высокотемпературного отжига исследовалась в [41, 42]. Полученные структуры и тестирование их способности к модуляции излучения неодимового лазера подтверждают возможность управляемого получения необходимых для конкретных применений лазерных структур с заданными характеристиками.

Микрочиповые лазеры, благодаря их малым размерам, возможности функционирования как в режиме непрерывной генерации, так и в импульсном режиме, множеству функциональных и конструктивных решений, низкой стоимости и исключительно высокому качеству луча, находят все более широкое применение в тех отраслях практической деятельности, где требуется использование лазерных источников малой и средней мощности излучения и которые традиционно используют аргоновые, гелий-кадмиевые, импульсные азотные лазеры, а также АИГ-лазеры с активной модуляцией добротности и другие. В отдельных отраслях техники, особенно там, где проблемы качества излучения и массогабаритных характеристик являются определяющими, твердотельные микролазеры вообще не имеют конкуренции.

Основные преимущества микрочиповых лазеров (малая длительность импульсов, достаточно высокая мощность в импульсе, стабильность выходной мощности и формы линии излучения, малая расходимость пучка и т. д.) наиболее очевидны при их использовании в дальнометрах как военного, так и гражданского назначения [4, 12, 20, 21, 43]. Так, уже разработаны автомобильные дальнометры, дальнометрические системы для альтиметров, для использования в строительстве и архитектуре, топографирования фасадов зданий, применения в робототехнике, навигации морских и воздушных судов и др. Разработанные дальнометрические системы обеспечивают измерение расстояний от нескольких сотен метров с сантиметровой точностью до 5 км с точностью ± 1 м. При этом при измерении дальности до 100 м точность определения не хуже чем 1 мм.

Специалисты CEA LETI на основе микрочипового лазера "eye-safe" (1,55 мкм) с импульсной мощностью в несколько кВт разрабатывают военный вариант дальнометра, способного измерять дальность до цели в несколько километров. Этой же фирмой на

основе АИГ:Nd/АИГ:Сг⁴⁺ микрочипового лазера (1,06 мкм) с пассивной модуляцией добротности была разработана система трехмерного видения для военного применения MALIS [44]. Гражданский вариант телеметрической системы MALIS успешно использовался для пространственного маневрирования подвижных робототехнических средств.

Автомобильный дальнометр-акселерометр, интегрированный в индивидуальную систему обеспечения безопасности движения, в котором используется микрочиповый лазер (1,06 мкм) с активным электрооптическим модулятором на основе LiTaO₃, обеспечивает измерение дальности до 50 м с точностью определения ± 1 мм и скорости до 25 м/с [21]. Общий вид автомобильного дальнометра представлен на рис. 12, б.

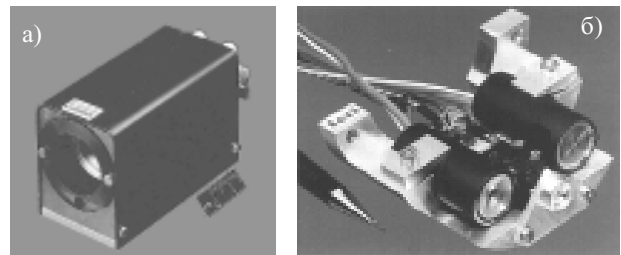


Рис. 12. Прототип компактного дальнометра на основе микрочипового лазера с пассивной модуляцией добротности [12] (а) и общий вид автомобильного дальнометра-акселерометра CEA LETI [20] (б)

Специалистами Lincoln Laboratory на основе зеленого ($\lambda=532$ нм) микрочипового лазера с безопасной для глаза энергией излучения в импульсе ($\sim 0,2$ мкДж) разработаны система для измерения дальности до 50 м с точностью определения ± 1 мм, а также система трехмерного видения для робототехнических устройств [4].

Ультрафиолетовые лазеры (λ 355 и 266 нм) являются основой устройств для непрерывного мониторинга окружающей среды и дистанционного контроля содержания вредных органических и неорганических веществ в атмосфере, воде, почве, продуктах питания [4, 45]. Способность биологических объектов к флуоресценции под действием ультрафиолетового излучения дает уникальную возможность создавать на основе УФ микрочиповых лазеров медицинские и биологические диагностические системы, которые благодаря своим малым размерам могут быть расположены вблизи исследуемого объекта. Для такого типа систем отпадает необходимость передачи мощного УФ-излучения с помощью оптического волокна, которое характеризуется значительным затуханием в этой области спектра.

Перспективным является также применение микрочиповых лазеров в микроэлектронике, коммуникационных и информационных технологиях.

Бесспорно, сфера применения микрочиповых лазеров не ограничивается упомянутыми областями и постоянно расширяется, а учитывая, что микролазерные технологии находятся только на начальной стадии своего развития, то с их прогрессом следует ожидать появления новых полезных и неожиданных научно-технических и технологических решений.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кравцов Н. В., Наний О. Е. Высокостабильные односторонние твердотельные лазеры // Квантовая электроника.— 1993.— Т. 20, № 4.— С. 322—344.
2. Kaminskii A. A. Crystalline lasers: physical processes and operating schemes // Boca Raton, CRC Press.— 1996.
3. Матковский А. О. Материали квантової електроніки // Львів: Ліга-Пресс, 2000.
4. Zayhowski J. J. Microchip lasers create light in small spaces // Laser Focus World.— 1996.— Vol. 32, N 4.— P. 73—78.
5. Jankiewicz Z., Kopczynski K. Diode-pumped solid-state lasers // Opto-Electronics Review.— 2001.— Vol. 9, N 1.— P. 19—33.
6. Zayhowski J. J. Microchip lasers // The Lincoln Lab. Journal.— 1990.— Vol. 3, N 3.— P. 427—554.
7. Зверев Г. М., Куратьев И. И., Шестаков А. В. Твердотельные микролазеры на кристаллах с высокой концентрацией ионов неодима // Изв. АН СССР. Сер. Физ.— 1982.— Т. 46.— С. 1561—1566.
8. Bonner C. L., Brown C. T., Shepherd D. P. et al. Diode-bar and pumped high-power Nd:Y₃Al₅O₁₂ planar waveguide laser // Opt. Lett.— 1998.— Vol. 23.— P. 942.
9. Shepherd D. P., Hettrick S. J., Li C. et al. High-power planar dielectric waveguide lasers // J. Phys. D: Appl. Phys.— 2001.— N 34.— P. 2420—2432.
10. Zayhowski J. J., Dill C. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers // Opt. Lett.— 1994.— Vol. 19, N 18.— P. 1427—1429.
11. Zayhowski J. Microchip lasers // Optical materials.— 1999.— Vol. 11.— P. 255—267.
12. Molva E. Microchip lasers and their applications in optical microsystems // Optical materials.— 1999.— Vol. 11.— P. 289—299.
13. 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, N 1.— P. 101—114.
14. Зверев Г. М., Голяев Ю. Д. Лазеры на кристаллах и их применение.— М.: Радио и связь, 1994.
15. Zhavoronkov N. I., Mikhailov V. P., Kuleshov N. V. et al. Absorption saturation in Cr⁴⁺-activated silicate crystals and use of these crystals in passive laser switches // Quantum Electronics.— 1995.— Vol. 25, N 1.— P. 31—33.
16. Зверев Г. М., Шестаков А. В. Перестраиваемые лазеры ближнего ИК диапазона на основе оксидных кристаллов // Электронная техника. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника.— 1989.— Вып. 3.— С. 15—17.
17. Daskalu T., Philipps G., Weber H. Investigation of Cr⁴⁺:YAG passive Q-switch in CW pumped Nd:YAG lasers // Optics and Laser Technology.— 1997.— Vol. 29, N 3.— P. 145—149.
18. Frukacz 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.
19. Zayhowski J. Passively Q-switched Nd:YAG microchip lasers and applications // J. Alloys and Compounds.— 2000.— Vol. 303—304.— P. 393—400.
20. Microchip lasers // CEA-Leti Booklet.— 1998.
21. Hill P. France maintains lead in microchip lasers // Opto&Laser Europe.— 1998.— Issue 57.— P. 27—30.
22. Zayhowski J. J. Q-switched operation of microchip lasers // Opt. Lett.— 1991.— Vol. 16.— P. 575—577.
23. Sugimoto A., Nobe Y., Yamagishi K. Crystal growth and optical characterization of Cr, Ca:Y₃Al₅O₁₂ // J. Cryst. Growth.— 1994.— Vol. 140.— P. 349—354.
24. Markgraf S. A., Pangborn M. F., Dieckmann R. Influence of different divalent co-dopants on the Cr⁴⁺ content of Cr-doped Y₃Al₅O₁₂ // J. Crystal Growth.— 1997.— Vol. 180.— P. 81—84.
25. Henderson B., Bartman R. Crystal-field engineering of solid-state laser materials // University Press, Cambridge.— 2000.
26. Nanolase Technical Booklet, 1998.
27. Thony P., Ferrand B., Molva E. 1.55 μm passively Q-switched microchip laser // TOPS Advanced Solid State Lasers.— 1998.— Vol. 19.— P. 150—152.
28. Mierczyk Z. Nieliniowe absorberzy // Warszawa: WAT, 2000.
29. Pavel N., Saikawa J., Taira T. Radial pumped microchip high power composite Yb:YAG laser: design and power characteristics // Jap. J. App. Phys.— 2001.— Vol. 40.— P. 146—152.
30. DeLoach L. D., Payne S. A., Chase L. L. et al. Evaluation of absorption and emission properties of Yb³⁺ doped crystals for laser applications // IEEE Journal of Quantum Electronics.— 1993.— Vol. 29, N 4.— P. 1179—1190.
31. Ferretti M. YAG microchip laser development in France // EuroPhotonics.— Dec./Jan.— 1997.— P. 34—35.
32. Ubizskii S. B., Syvorotka I. M., Melnyk S. S. et al. Growth and characterization of YAG:Cr⁴⁺ epitaxial films // Proc. of SPIE.— 1998.— Vol. 3724.— P. 353—356.
33. NanoLasers Technology // Nanolase Technical Bulletin.— 1998, Sept.
34. Pat. 6014393 US. Laser materials and microlasers having high active ion concentration and production processes / L. Fulbert, E. Molva, B. Ferrand.— 11.01 2000.
35. Compact microlasers // Electrooptics.— 1999.— July/August.— P. 9.
36. FIRN. Technical Booklet, 2001.
37. Szweda R. Microchip lasers offer versatile power in a tiny low-cost package // Opto&Laser Europe.— 2000.— January.— P. 39—41.
38. Syvorotka I. M., Ubizskii S. B., Melnyk S. S. et al. Growth and optical absorption of GGG:Mg²⁺Cr⁴⁺ epitaxial films // Conference on laser and electro-optics Europe, CLEO-2000.— 10—15 September, 2000.— Nice, France.— CWF29.
39. Syvorotka I. M., Ubizskii S. B., Melnyk S. S., Matkovskii A. O. Growing and optical study of YAG:Cr⁴⁺ epitaxial films // Functional Materials.— 1999.— Vol. 6, N 2.— P. 345—348.
40. Brunel M., Emilie O., Vallet M. et al. Experimental and theoretical study of monomode vectorial lasers passively Q switched by Cr⁴⁺: yttrium aluminium garnet absorber // Phys. Rev. A.— 1999.— Vol. 60, N 5.— P. 4052—4058.
41. Ubizskii S. B., Syvorotka I. M., Melnyk S. S., Matkovskii A. O. Colour centres investigation in pure and doped yttrium aluminium garnet epitaxial films // Radiat. Effects & Defects in Solids.— 1999.— Vol. 149.— P. 375—379.
42. Ubizskii S. B., Melnyk S. S., Padlyak B. V. et al. Chromium recharging processes in the Y₃Al₅O₁₂:Mg, Cr single crystal under the reducing and oxidizing annealing influence // Proc. SPIE.— 2001.— Vol. 4412.— P. 63—68.
43. Aubert J. J. Q-switched microchip lasers bring new applications to light // Laser Focus World.— 1995.— N 35.— P. 11—13.
44. Besesty P. Robot sees by microlaser telemetry // Opto&Laser Europe.— 1999.— Issue 58.— P. 14.
45. Guillot D. Microchip lasers extend into the UV // Opto&Laser Europe.— 1999.— Issue 59.— P. 9.