

ИТТЕРБИЕВЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

В.Кисель, А.Гулевич, Институт оптических материалов и технологий, БНТУ, VEKisel@ilc.by; Н.Кондратюк, СОЛАР Лазерные Системы, info@solarls.eu; Минск, Беларусь.

В спектральной области около 1 мкм очень быстро прогрессируют лазеры на основе иттербийсодержащих материалов. Они превосходят неодимовые лазеры по эффективности генерации, выходной мощности излучения и позволяют перестраивать длину волны излучения. А с появлением мощных лазерных диодов на основе InGaAs, способных излучать на длинах волн 940–980 нм, проявились реальные возможности коммерческой реализации систем на основе Yb:KYW-кристаллов. Среди моделей фемтосекундных лазеров выделяется лазер FL1000 производства компании СОЛАР Лазерные Системы. В статье рассмотрены отдельные возможности его практического использования: исследование сверхбыстрых временных процессов в наноразмерных полупроводниковых структурах и скрайбирование пленок молибдена.

Твердотельные лазеры на основе кристаллов с ионами переходных и редкоземельных элементов известны уже более 40 лет. Ныне целый ряд причин вызвали мощный подъем интереса к ним: быстрый прогресс в технологии производства лазерных диодов обеспечил новые эффективные источники накачки, появились новые лазерные среды и новые методы получения импульсов ультракороткой длительности [1,2]. Именно благодаря интенсивному развитию этой группы лазеров компактные лазерные системы с высокой выходной мощностью излучения, способные перестраивать длину волны излучения в широком спектральном интервале, а также системы, позволяющие генерировать импульсы фемтосекундной длительности, стали реальностью.

Новые лазерные материалы способны эффективно генерировать лазерное излучение при диодной накачке и успешно конкурировать с хорошо известными и широко используемыми активными средами. Так, в спектральной области около 1 мкм, в которой традиционно используются лазеры на базе материалов, содержащих трехвалент-

ные ионы неодима, очень быстро прогрессируют лазеры на основе кристаллов, содержащих трехвалентные ионы иттербия. Последние превосходят неодимовые лазеры по эффективности генерации, выходной мощности излучения и позволяют, к тому же, перестраивать длину волны излучения.

Вследствие особенностей энергетических уровней ионы Yb³⁺ в кристаллах и стеклах не имеют достаточно широких полос поглощения в видимой и ближней ИК-области спектра, которые могут быть использованы для ламповой накачки, поэтому для данных материалов она не применяется. Вот почему именно с появлением мощных лазерных диодов на основе InGaAs, способных излучать на длинах волн 940–980 нм, проявились реальные возможности коммерческой реализации лазеров на основе иттербийсодержащих материалов.

Основными достоинствами лазерных кристаллов с ионами Yb³⁺ являются:

- простая схема уровней энергии (2 мультиплета), что обеспечивает отсутствие потерь на поглощение из возбужденного состояния, ап-конверсию, кросс-

релаксацию и другие концентрационные эффекты;

- существенно более низкая разница в энергии квантов накачки и генерации (менее 10%) по сравнению с ионами Nd³⁺ (в которых эта разница достигает 24%) что существенно снижает тепловыделение в активной лазерной среде;

- широкая полоса усиления (до 20–30 нм), обусловленная более сильным по сравнению с другими редкоземельными ионами электрон-фононным взаимодействием, позволяет генерировать импульсы фемтосекундной длительности.

В предлагаемой статье рассматриваются примеры представленных на рынке лазеров на основе кристаллов, легированных трехвалентными ионами иттербия, а также приведены примеры их практического применения.

ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ИТТЕРБИЕВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Для генерации импульсов фемтосекундной длительности в спектральном диапазоне около 1 мкм в лазерах с прямой диодной накачкой более всего подходят кристаллы двойных вольфраматов, легированных трехвалентными ионами иттер-



Рис.1. Yb:KYW фемтосекундный лазер, модель FL1000 (производство ЗАО «СОЛАР ЛС»)

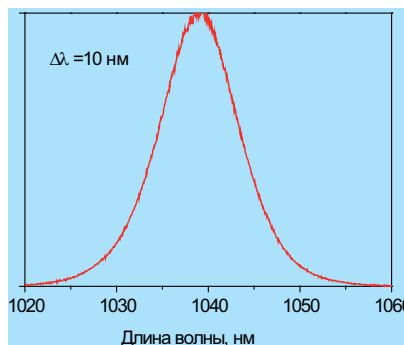


Рис.2. Спектр импульсов лазера FL1000

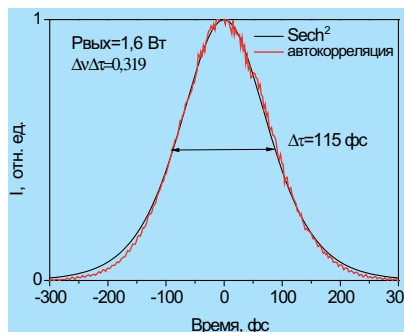


Рис.3. Автокорреляционная функция импульсов лазера FL1000

бия – Yb³⁺:KY(WO₄)₂ (KYW) и Yb³⁺:KGd(WO₄)₂ (KGW) [3]. Ион иттербия, находящийся в этих кристаллических матрицах, обладает высокими значениями поперечных сечений поглощения и стимулированного излучения, а также имеет широкую полосу усиления (20–30 нм) [4]. Такое сочетание спектроскопических характеристик позволяет реализовать генерацию ультракоротких импульсов (УКИ) с длительностями менее 100 фс.

В коммерческих моделях лазеров УКИ на основе кристаллов Yb:KYW и Yb:KGW для получения режима пассивной синхронизации мод чаще всего используются полупроводниковые зеркала с насыщением поглощения (SESAM). Использование этих зеркал позволяет создавать лазерные источники, обладающие самостартом режима пассивной синхронизации мод, и, как правило, не требующие прецизионной юстировки элементов резонатора или дополнительных устройств для внешнего инициирования режима генерации УКИ. Среди немногочисленных коммерческих моделей фемто-

секундных лазеров на основе Yb:KYW-кристаллов выделяется лазер FL1000 (рис.1), производимый нашей белорусской компанией СОЛАР Лазерные Системы (www.solarls.eu).

Лазер FL1000, являясь одним из лучших приборов в своем классе, наглядно демонстрирует все преимущества таких лазеров: компактный дизайн, высокую выходную мощность (более 1,5 Вт), стандартно высокое качество излучения ($M^2 \leq 1,2$) и отличную долговременную стабильность (лучше 3%).

В зависимости от решаемых задач FL1000 может поставляться в различных версиях, отличающихся длительностью импульса (от 120 до 200 фс), центральной длиной волны излучения и частотой следования импульсов (от 70 до 80 МГц). При этом, лазерные импульсы FL1000 близки к спектрально ограниченному импульсам с произведением спектральной полуширины на длительность импульса ($\Delta\nu\Delta\tau$) около 0,32 [5]. Спектр и автокорреляционная функция импульсов для лазера с выходной мощностью 1,6 Вт приведены на рисунках 2 и 3, соответственно.

Интерес к лазерным источникам УКИ обусловлен в первую очередь уникальными возможностями, которые дает их применение в различных областях науки, техники и медицины. Перспективность практического использования лазеров УКИ обуславливается в основном, такими свойствами излучения, как минимальная длительность импульса и максимальная пиковая мощность. В настоящее время лазеры УКИ широко используются в нелинейной оптике, двух- и трехфотонной микроскопии, в спектроскопии высокого временного разрешения, для

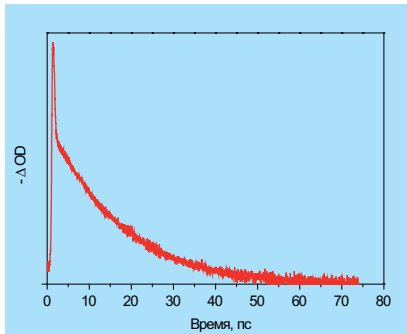


Рис. 4. Кинетика восстановления начального пропускания – Optical Density (OD) – полупроводниковой наноструктуры

генерации терагерцевого излучения, для прецизионной обработки материалов и других применений.

Далее рассмотрим лишь некоторые примеры практического применения лазеров с ультракороткой длительностью импульсов. На базе описанного выше фемтосекундного лазера FL1000 мы разработали установку для исследования сверхбыстрых временных процессов в наноразмерных полупроводниковых структурах, работающую по методу возбуждения-зондирования [6]. В качестве объектов исследования в таких установках могут использоваться и другие материалы с характерными временами нелинейных процессов на уровне 10^{-13} с. Типичная зависимость времени восстановления начального пропускания образца полупроводниковой наноструктуры, изме-

ренная с помощью FL1000, приведена на рис.4.

Высокая стабильность пространственных и временных характеристик излучения FL1000 позволяет регистрировать сигнал изменения оптической плотности образца на уровне 10^{-6} единиц оптической плотности с временным разрешением лучше, чем $0,2 \cdot 10^{-12}$ с. Кроме того, в сфокусированном пятне на поверхности исследуемого объекта можно создавать интенсивности лазерного излучения более 100 ГВт/см^2 . Для расширения спектрального диапазона работы лазера мы использовали стандартный блок генерации гармоник (520, 346 и 260 нм), который входит в комплект FL1000 (рис.5).

Излучение второй гармоники лазера FL1000 мы использовали для **скрайбирования пленок молибдена** толщиной 700 нм со стеклянной подложки [7]. Данная задача очень актуальна при производстве тонкопленочных солнечных элементов на базе CIGS ($\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$)-структур, в которой пленка молибдена является нижним контактом солнечной батареи. Основная технологическая проблема производства солнечных элементов это разделение пленки молибдена на ячейки без повреждения стеклянной подложки, так как температуры плавления данных материалов отличаются

более чем на 2000°C . На рис.6 представлен снимок скола образца, скрайбированного FL1000, полученный на электронном микроскопе. Видно, что в области реза отсутствует пленка молибдена, а стеклянная подложка (нижняя часть снимка) не имеет повреждений (трещин, пузырей и т.п.), что очень важно для дальнейших технологических операций, температура которых достигает 400°C .

В последнее время очень интенсивно развивается ТГц-спектроскопия и связанные с ней технологии. Терагерцевый диапазон длин волн (от 100 ГГц до 10 ТГц) в отличие от других диапазонов электромагнитного излучения до последнего времени оставался практически



Рис.6. Результат скрайбирования молибдена фемтосекундными импульсами FL1000

неизученным. Это было связано как с отсутствием источников достаточно мощного управляемого ТГц-излучения, так и приемников, способных регистрировать параметры излучения в данной области спектра. Появление же на рынке компактных, мощных и надежных лазеров УКИ дало новый толчок развитию этой области физики и сделало возможным создание коммерческих моделей спектрометров ТГц-диапазона. Так, например, в СПбГУ ИТМО разработан терагерцевый спектрометр ТС-5 (рис.7), а в качестве источника фемтосекундных импульсов в нем используется лазер FL1000 [8].

Применение приборов, основанных на использовании терагерцевого излучения, перспективно для систем внутренней и внешней связи в интеграль-



Рис.5. Генератор гармоник лазера FL1000

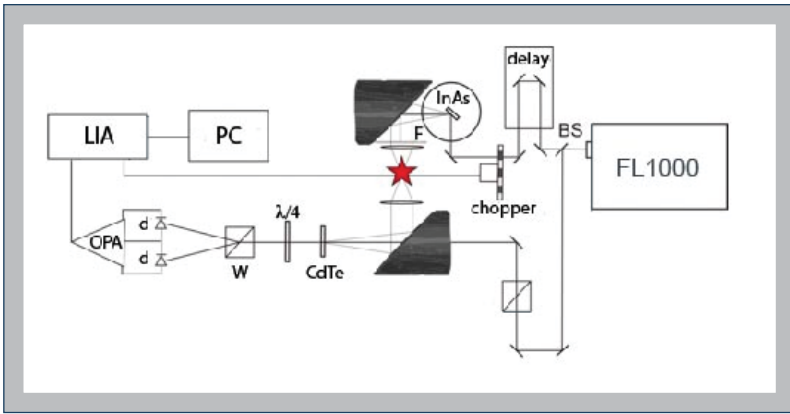


Рис.7. Блок-схема терагерцевого спектрометра ТС-5

ных схемах, в системах для определения химического состава сложных соединений, для создания систем детектирования взрывчатых веществ, ТГц-радаров, томографов с разрешением во времени и других систем.

НАНОСЕКУНДНЫЕ ИТТЕРБИЕВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Большой практический интерес, в частности для систем маркировки, представляют более простые твердотельные лазерные системы, работающие в режиме модулированной добротности. Традиционно, в данном классе лазерных систем наиболее широко представлены Nd:YAG-лазеры. Отметим, что в задачах получения лазерных импульсов с высокой энергией и частотами менее 1 кГц данные лазеры являются наиболее перспективными. Так, благодаря четырехуровневой схеме лазерных переходов неодимовые лазеры работают при меньших интенсивностях излучения на внутрирезонаторных элементах, что снижает требования к стойкости диэлектрических покрытий и т.п.

Однако для приложений, в которых требуется частота следования импульсов в диапазоне от 10 кГц и более, с Nd:YAG-лазерами успешно конкурируют лазеры на иттербий-содержащих материалах. Такие очевидные достоинства иттербий-содержащих материалов, как малые тепловые потери (в 3–4 раза ниже, чем для ионов неодима) и широкая полоса поглощения в области на-

качки InGaAs лазерными диодами делают их перспективными для создания лазерных систем с высокими выходными мощностями. Кроме этого, лазеры на ионах иттербия имеют более высокий коэффициент преобразования излучения накачки в мощность генерируемого излучения, что позволяет создавать не только очень эффективные, но и весьма компактные устройства.

Иллюстрацией указанных преимуществ иттербиевых лазеров может служить модель LC1200, производимая той же белорусской компанией. LC1200 представляет собой Yb:YAG-лазер с диодной накачкой и активной модуляцией добротности. Оптическая эффективность генерации этого лазера в непрерывном режиме превышает 50% (рис.8), что позволило отказаться от неудобного водяного охлаждения – лазер работает с воздушным охлаждением. Эта модель лазера может работать с частотами повторения импульсов от 10 до 50 кГц. Зависимость средней выходной мощности и энергии импульсов от частоты следования приведена на рис.9. В указанном диапазоне частот длительность импульса составляет ~ 20 нс (рис.10). Такой достаточно короткий импульс наряду с безупречным качеством излучения (рис.11) позволяет с высокой эффективностью генерировать гармоники и обеспечивает мощное выходное излучение в видимом и УФ-диапазоне спектра.

Наличие высокоэффективных генераторов гармоник (до 4 Вт на $\lambda=515$ нм и до 1,5 Вт на $\lambda = 343$ нм) значительно расширяет возможности практического применения Yb-лазеров с наносекундной длительностью импульса и кГц-частотой их повторения.

Приводя в статье эту информацию, мы хотели убедительно показать, что интенсивное развитие лазерных материалов и технологий за последние годы способствовало созданию новых и весьма конкурентоспо-

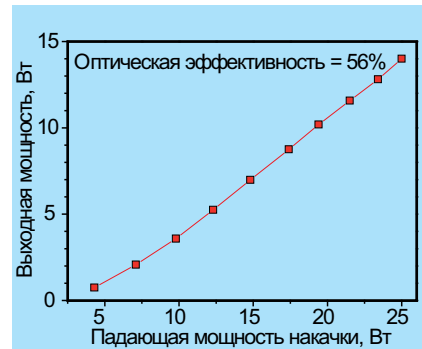


Рис.8. Выходная характеристика непрерывного иттербиевого лазера

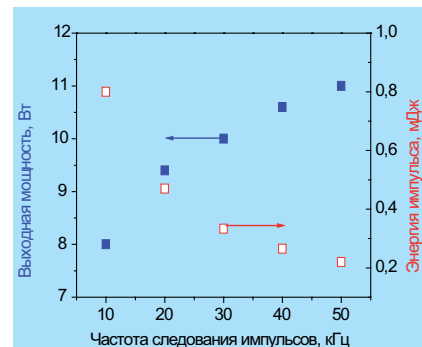


Рис.9. Зависимость энергии и средней выходной мощности от частоты следования импульсов иттербиевого лазера с активной модуляцией добротности

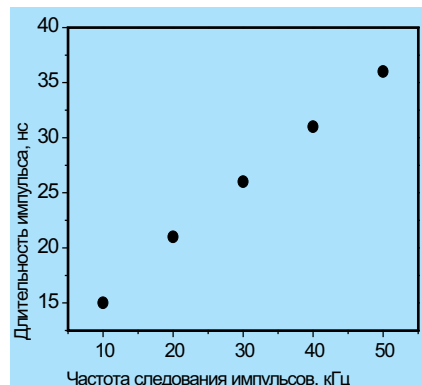


Рис.10. Зависимость длительности импульсов от частоты следования

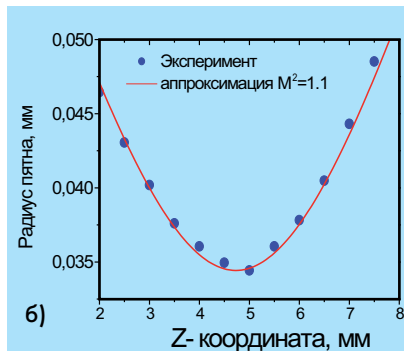
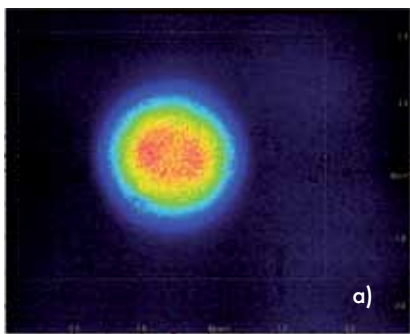


Рис.11. Пространственные характеристики излучения лазера С1200 ($M^2 \leq 1,2$): а) диаграмма пространственного распределения энергии; б) распределение энергии по сечению пучка, аппроксимация $M^2 = 1,1$

собных твердотельных лазеров на ионах иттербия. Уникальные особенности этой лазерной среды позволяют создать на ее основе лазерные источники с высокой выходной мощностью без водяного охлаждения в компактном и надежном дизайне.

Еще одной особенностью иттербиевых лазеров является возможность реализовать самые различные режимы работы – от непрерывной генерации до генерации фемтосекундных импульсов. Применение иттербиевых лазеров дает их пользователям часто принципиально новые возмож-

ности в различных областях науки, техники и медицины. Отдельные возможности практического использования иттербиевых лазеров рассмотрены в статье на примере коммерчески доступных моделей иттербиевых лазеров производства белорусской компании СОЛАР Лазерные Системы (www.solarls.eu).

Авторы выражают благодарность НИЦ Оптических материалов и Технологий (БНТУ, Минск, РБ) и Центру фемтосекундной оптики и фемтотехнологий (СПбГУ ИТМО, Санкт-Петербург, РФ) за предоставленные материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Keller U. — Appl.Phys.B, 1994, 58, 347.
2. Spence D., Kean P., Sibbett W. – Opt. Lett., 1991,16, 42.
3. Brunner F., Spuhler G., Aus J. et al. Diode-pumped femtosecond Yb:KGd(WO4)2 laser with 1,1-W average power. – Opt. Lett., 2000, v.25, №15.
4. Lagatsky A., Kuleshov N., Mikhailov V. Diode-pumped CW lasing of Yb:KYW and Yb:KGW. – Optics communication, 1999, 165.
5. Kartner F., Keller U. Stabilization of solitonlike pulses with a slow saturable absorber. – Opt. Lett. 1995,v.20.
6. Rubtsova N., Kuleshov N., Kisel V. et al. Semiconductor Nanostructures Modified by the UV Laser Radiation. – Laser Physics, 2010, v. 20, № 5.
7. Kisel V., Gulevich A., Kuleshov N. et al. Femtosecond laser scribing for fabrication of the CIGS-based thin-film solar cells. – International Conference «Optical Techniques and Nano-Tools for Material and Life Sciences», Minsk, p.28.
8. Gorodetsky A., Bernalov V., Kozlov S., et al. THz time-domain spectroscopic system. – International Conference «Optical Techniques and Nano-Tools for Material and Life Sciences», Minsk, p.32.

САМООЧИЩАЮЩЕЕСЯ СТЕКЛО

Первые разработанные покрытия для стекла были призваны сократить потери тепла через оконные проемы. Потом появились интерференционные покрытия, обеспечивающие пропускание дневного света и снижающие долю теплового излучения. Недавно на строительном рынке появилось самоочищающееся стекло. Создано специальное покрытие, обладающее фотокаталитическим и гидролитическим эффектами, способное очищать стекло снаружи от органических загрязнений. Фотокаталитический эффект – химическая реакция, которая протекает под воздействием световой энергии в присутствии катализатора. Накопление солнечной энергии в покрытии, в качестве которого используют полупроводниковое соединение TiO_2 в мелкодисперсном состоянии, приводит к выделению активного кислорода O^{2-} и ионов Ti^{4+} , которые реакционноспособны. Быстрота активизации зависит от интенсивности солнечного излучения. После облучения солнечным светом данное покрытие становится активным и в ночное время, и в пасмурные дни. Активный кислород, являясь сильным окислителем, окисляет органические

соединения до полного распада, а также убивает бактерии и запахи на поверхности покрытия. Грязь, осевшая на поверхности самоочищаемого стекла, в ходе реакции фотокатализа разлагается на растворимые компоненты, и поверхность “титанового стекла” становится гидрофильной, что позволяет дождевой воде легко смывать всю грязь. Благодаря гидролитическому эффекту, изменению угла смачиваемости поверхности покрытия, после определенного накопления солнечной энергии (активизации) вода не собирается в капли, а растекается по стеклу широкими ровными слоями, образуя тонкую пленку и смачивая скопившуюся на поверхности грязь. Затем пленка легко соскальзывает с поверхности стекла, увлекая за собой грязь. Под действием естественного света за 1 час на поверхности стекла активный слой на основе TiO_2 способен разрушить слой органических соединений толщиной 60 ангстрем. Но такое покрытие уничтожает только органические загрязнения, не действуя на неорганические.

www.ukrni.com