

ЛАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ БЕЗОПАСНОГО ДЛЯ ГЛАЗ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.А. Орлович, В.И. Дашкевич, Р.В. Чулков

Институт физики имени Б.И. Степанова

Национальной Академии наук Беларуси, г. Минск, Беларусь

E-mail: v.orlovich@dragon.bas-net.by

Импульсные лазерные источники, генерирующие в безопасном для глаз диапазоне спектра (1,4 – 1,8 мкм), находят широкое применение в области охраны окружающей среды, дальнометрии, распознавании объектов и в ряде других областей, связанных с распространением лазерного излучения в свободном пространстве. В настоящее время существует два основных подхода к разработке безопасных для глаз лазеров. Первый подход основан на прямой генерации в данной области спектра. Основными лазерными средами для генерации безопасного для глаз излучения на длине волны 1,54 мкм являются легированные эрбием стекла, особенно когда они солегированы ионами Yb^{3+} . Однако теплопроводность Er-Yb стекол очень низка, что препятствует созданию лазерных систем с высокой частотой повторения импульсов. Много усилий было направлено на поиск и исследование Er-содержащих кристаллов, обладающих гораздо большей теплопроводностью. Тем не менее, практическая реализация высокой мощности лазерного излучения в Er-Yb кристаллах сталкивается с рядом трудностей, среди которых многофононное тушение люминесценции и низкий квантовый выход, ведущий к высокому порогу генерации.

Ввиду несовершенства Er-лазерных сред для разработки безопасных для глаз лазеров широко используется второй подход, основанный на нелинейно-оптическом преобразовании излучения неодимовых лазеров с помощью вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и параметрической генерации света (ПГС).

В настоящем докладе рассматриваются несколько типов безопасных для глаз лазерных источников, разработанных нами с использованием второго подхода, и сообщаются результаты исследования их характеристик.

Если классифицировать оптические схемы, то реализовано четыре типа безопасных для глаз источников с нелинейно-оптическим преобразованием лазерного излучения. В случае ВКР преобразования реализованы так называемые лазеры с ВКР-самопреобразованием, в которых для генерации и преобразования лазерного излучения используется один лазерный стержень. Схема таких лазеров очень проста. Это двухзеркальный резонатор стоячей волны, содержащий Nd-легированный элемент и модулятор добротности. Для получения безопасного для глаз излучения, зеркала изготовлены таким образом, что создается очень высокая добротность резонатора на $\lambda \sim 1,34$ мкм ($^4\text{F}_{3/2} - ^4\text{I}_{13/2}$ лазерный канал Nd иона) и обеспечивается требуемое отражение для излучения 1-ой стоксовой компоненты. С использованием Nd:KGd(WO₄)₂

(Nd:KGW) элемента длиной 50 мм созданы ВКР-самопреобразующие лазеры с ламповой накачкой и естественным воздушным охлаждением. Лазеры обеспечивают безопасное для глаз излучение на длине волны 1,538 мкм. При активной модуляции добротности (LiNbO₃), длительность импульса (FWHM) составляет 3-5 нс в зависимости от длины резонатора. При накачке 7 Дж энергия ВКР импульса равняется 14 мДж. Расходимость безопасного для глаз излучения на уровне 86,5% полной энергии $\theta_{0.865}$ составляет 6 - 7 мрад. При пассивной модуляции добротности (V³⁺:YAG) интегральный ВКР-импульс длительностью ~ 15 нс (диаметр стержня $\varnothing = 3$ мм) или ~ 25 нс ($\varnothing = 4$ мм) представляет собой огибающую коротких (~ 1 – 2 нс) сдвинутых во времени импульсов, генерируемых отдельными локальными участками поперечного сечения активной среды. Энергия ВКР-излучения составляет ~ 9 ($\varnothing = 3$ мм) и ~ 13 мДж ($\varnothing = 4$ мм). Расходимость пучка безопасного для глаз лазера ($\theta_{0.865}$) не превышает 12 - 13 мрад.

Создан импульсный Nd:YVO₄ лазер с ВКР-самопреобразованием, имеющий продольную диодную накачку. Лазер излучает 1-ю стоксову компоненту на длине волны 1,524 мкм. Частота повторения импульсов до 20 кГц. Средняя выходная мощность стоксова излучения достигает ~ 1 Вт.

Второй тип безопасных для глаз источников основан на внerezонаторных ВКР-лазерах с линейным резонатором, возбуждаемых излучением отдельного многомодового Nd:KGW лазера накачки. Лазер накачки на кристалле Nd:KGW размером $\varnothing 4 \times 50$ мм имеет активную модуляцию добротности и ламповую накачку. Когда лазер накачки работает на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$ ($\lambda = 1,351$ мкм), безопасный для глаз ВКР-лазер с двухпроходным пучком накачки генерирует первую стоксову компоненту. Внerezонаторные ВКР-лазеры реализованы на кристаллах Ba(NO₃)₂ (длина волны безопасного для глаз излучения λ_{1st} равна 1,574 мкм), PbWO₄ *a*-среза (1,538 мкм) и KGW *b*-среза. В случае KGW источник может использовать либо 767,5-(вектор электрического поля *E* параллелен N_g оси кристалла) или 901,5 см⁻¹ (*E* || N_m) ВКР сдвиг частоты и преобразует лазерное излучение в безопасное для глаз излучение с длинами волн 1,507 и 1,538 мкм, соответственно. Кроме того, возможна генерация безопасного для глаз излучения на обеих длинах волн одновременно.

В случае внerezонаторного ВКР-лазера генерация импульса накачки и ВКР-преобразование лазерного излучения являются независимыми процессами. В силу этого длительность ВКР импульса приблизительно равна длительности импульса накачки и составляет ~20 нс. Все ВКР-лазеры обеспечивают примерно одинаковую энергию излучения первой стоксовой компоненты, которая достигает ~12 мДж при электрической накачке источника 10 Дж. Расходимость безопасного для глаз излучения ($\theta_{0.865}$) не превышает 11 мрад.

Для Nd-содержащих лазеров, традиционный переход ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ ($\lambda \sim 1.06$ мкм), имеет более высокое поперечное сечение и обеспечивает существенно более высокую энергию импульсного излучения. Однако для ВКР сдвига частоты данного перехода в безопасный для глаз спектральный диапазон

требуется генерация стоксовой компоненты более высокого порядка, чем в случае лазерного канала ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$, поскольку используемые ВКР сдвиги частот ВКР кристаллов лежат в диапазоне 700-1100 см^{-1} . Нами создан безопасный для глаз лазерный источник, в котором внerezонаторный KGW ВКР-лазера преобразует многомодовое излучение Nd:KGW лазера, работающего на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$, в 3-ю стоксову компоненту с длиной волны 1,5 мкм ($E||N_m$ геометрия возбуждения ВКР). Лазер накачки имеет активную модуляцию добротности и ламповую накачку. Оптические покрытия зеркал ВКР лазера обеспечивают развитие каскадного ВКР процесса, заканчивающегося генерацией 3-й стоксовой компоненты. Если кристаллы KGW и Nd:KGW имеют размеры, такие же, как в случае перехода ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$, ВКР лазер 3-ей стоксовой компоненты обеспечивает более высокую мощность и энергию импульса (~ 14.2 мДж) и меньшую расходимость стоксова пучка ($\theta_{0.865} \sim 9,4$ мрад), к тому же при более низкой энергии накачки Nd: KGW лазера (~ 6.7 Дж). С точки зрения электрической энергии, подводимой к лампе накачки, полный КПД лазера 3-ей стоксовой компоненты в 1,7 раз выше. Длительность импульса 3-ей стоксовой компоненты зависит от его энергии. Когда энергия импульса увеличивается от 6 до 14 мДж, длительность импульса уменьшается от 12 до 6 нс. Также исследован ВКР-лазер, возбуждение которого проводилось Nd:YAG лазером с поперечной диодной накачкой.

Третий тип безопасных для глаз источников основан на внутрирезонаторном ВКР-лазере или ПГС. Создан безопасный для глаз источник с внутрирезонаторным KGW ВКР-лазером, который преобразует многомодовое излучения импульсного Nd: KGW лазера, работающего на переходе в ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$, в 3-ю стоксову компоненту (1,5 мкм). Установлено, что энергия безопасной для глаз 3-ей стоксовой компоненты практически линейно возрастает с увеличением электрической энергии, подводимой к лампе накачки. При энергии накачки источника 6 Дж, внутрирезонаторный ВКР-лазер излучает импульсы с энергией 14,7 мДж длительностью ~ 3 нс. Расходимость пучка ВКР лазера ($\theta_{0.865}$) составляет 9 мрад.

Последний тип безопасных для глаз источников основан на внerezонаторном ВКР-лазере или ПГС, работающих в режиме бегущей волны благодаря использованию кольцевого резонатора. Кольцевые резонаторы позволяют создавать компактные лазерные системы, поскольку устраняют оптическую обратную связь с нелинейным преобразователем (не требуется оптическая развязка). Используется кольцевой резонатор, состоящий из трех плоских зеркал. Оптический осевой контур кольцевого резонатора представляет собой равносторонний треугольник. Создан кольцевой KGW ВКР-лазер, излучающий 1-ю стоксову компоненту при накачке упомянутым выше Nd: KGW лазером, работающим на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$. Используются три стержня из KGW, имеющие размеры $\varnothing 2,8 \times 22$ мм. Они ориентированы для осуществления накачки в геометрии $E||N_m$ ($\lambda_{1st} = 1,538$ мкм). Наличие в кольцевом ВКР лазере паразитного стоксова излучения, генерируемого френелевским отражением в обратном направлении вдоль пути пучка накачки,

приводит к образованию в резонаторе двух стоксовы волн, распространяющихся в противоположных направлениях. При устранении паразитного стоксова излучения путем наклона торцов ВКР -кристаллов на 2 - 4 градуса по отношению к оси резонатора кольцевой ВКР-лазер обеспечивает стабильную однонаправленную генерацию стоксовой волны, распространяющейся в направлении накачки, без использования внутррезонаторного оптического вентиля. При подводимой к лампе лазера накачки энергии ~ 10 Дж кольцевой ВКР-лазер генерирует с 20% эффективностью преобразования энергии и излучает импульсы с энергией 7 мДж и длительностью 15 нс. Расходимость стоксова излучения составляет менее 5 мрад.

В силу прямого преобразования традиционного 1-мкм излучения Nd-лазеров в безопасное для глаз излучение ПГС на основе кристалла КТР (КТiPO₄) является эффективной альтернативой ВКР-лазеру. Нами создан безопасный для глаз источник, основанный на КТП-ПГС бегущей волны, накачка которого осуществляется Nd:YAG-лазером с модулируемой добротностью, имеющим ламповую накачку и водяное охлаждение и генерирующим импульсы с длительностью 9 нс и частотой повторения 10-12.5 Гц. Используются три кристалла КТР, обеспечивающие II тип не критического фазового синхронизма вдоль оси x ($\theta=90^\circ$, $\phi = 0^\circ$). Длина кристалла КТР 15 мм. При электрической энергии накачки, которая не превышает 8 Дж, источник генерирует импульсы излучения с энергией до 35 мДж и длительностью ~ 11 нс. В ряде экспериментов мы использовали также Nd:YAG лазер с поперечной диодной накачкой.

Длина волны КТП-ПГС при накачке излучением на $\lambda = 1,064$ мкм составляет 1,571 мкм. Веским доводом высокой надежности источника является его долгосрочная работа при накачке 6,5 Дж. При непрерывной работе энергия импульса ПГС контролировалась в течении более трехчасовых промежутков, разделенных часовой паузой. При длительной эксплуатации ПГС средняя энергии импульса ~ 25 мДж оставалась практически постоянной со стандартным отклонением 0,74 мДж. При выходной энергии ~ 25 мДж, расходимость пучка ПГС была меньше семи дифракционных пределов. Созданный макет источника с кольцевым ПГС обеспечил наработку 2,5 млн. импульсов без существенного изменения характеристик выходного излучения.

Выявлены причины, ограничивающие энергию кольцевого трехзеркального КТП-ОПГ. Разработаны пути повышения энергии КТП-ОРО до ~ 80 мДж.