

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УФ-, ВИДИМОГО, БЛИЖНЕГО И СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Перестраиваемые лазеры, являясь основной частью многих современных оптоэлектронных приборов, позволяют на качественно новом уровне решать задачи спектроскопии, нелинейной оптики, фотохимии, биологии, медицины и другие.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач науки и техники в новых областях требуются лазерные источники, генерирующие излучение, перестраиваемое в определенных спектральных диапазонах. Такими областями являются:

- лазерная спектроскопия и фотохимия, методы которых основаны на селективном взаимодействии лазерного излучения с веществом;
- дистанционное обнаружение веществ, включая лазерное зондирование атмосферы для определения ее состава, загрязняющих примесей и измерения их концентрации;
- лазерная фотобиология и медицина, где перестраиваемые лазеры используются для изучения биообъектов и биопроцессов, фотодинамической терапии и диагностики раковых заболеваний и т.д.

Новые методики требуют новых лазеров. Наряду с этим уже известные методики и приборы постоянно совершенствуются и, как правило, требуют все более мощных, совершенных и надежных лазерных источников. Вот почему разработка перестраиваемых лазерных источников с высокими эксплуатационными характеристиками остается одной из актуальных задач.

В статье дан обзор основных подходов к созданию источников, работающих в УФ-, видимом, ближнем и среднем ИК-диапазонах, а также приведены примеры некоторых удачных коммерческих разработок, выполненных в последние годы в компании "СОЛАР ЛС".

Среди источников перестраиваемого лазерного излучения основными до недавнего времени были лазеры на красителях и на активированных кристаллах ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$, александрит, форстерит, $\text{YAG}:\text{Cr}^{4+}$). Диапазон рабочих длин волн этих лазеров составлял 550–1500 нм, тогда как каждая активная среда была способна генерировать в спектральной области шириной 20–300 нм.

Сегодня разработчики и пользователи все большее внимание уделяют источникам излучения на основе параметрических генераторов света (ПГС). В ПГС удачно сочетаются широкий диапазон непрерывной перестройки и высокий КПД преобразования излучения накачки. Прогресс в области получения нелинейных кристаллов для ПГС и изготовления диэлектрических покрытий позволяет создавать надежные и простые в эксплуатации лазерные источники, перекрывающие спектральный диапазон 200–20000 нм. Этот тип источников перестраиваемого лазерного излучения и будет рассмотрен ниже.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ СВЕТА ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Сегодня наиболее распространены ПГС на кристаллах ВВО с накачкой 2-й и 3-й гармониками Nd:YAG-лазеров. Их и предлагают своим потребителям большинство производителей лазерной техники.

Основные достоинства этих ПГС – широкий диапазон перестройки (410–2500 нм при накачке излучением 355 нм

и 680–2500 нм при накачке излучением 532 нм) и высокий (до 50%) КПД генерации. Недостатки, ограничивающие их использование, – большая расходимость генерируемого излучения (2–20 мрад) и большая спектральная ширина линии генерации (2–10 см⁻¹). Поэтому работы по улучшению характеристик излучения таких ПГС весьма актуальны.

Исследования коллинеарных и неколлинеарных схем ПГС в компании "СОЛАР ЛС" позволили выявить следующую особенность. В ПГС с синхронизмом типа II с двухпроходной схемой накачки ширина линии генерации и расходимость пучка в плоскости синхронизма меньше, чем с однопроходной. Связано это с тем, что в ПГС с двухпроходной схемой сигнальная волна по-разному усиливается в нелинейном кристалле в прямом и обратном направлениях [1]. На рис.1 в качестве примера показаны спектры ПГС на кристалле КТР с одно- и двухпроходной схемой накачки длиной волны 532 нм [2].

Кроме этого, в ПГС с двухпроходной схемой излучение усиливается в кристалле как при движении в прямом, так и в обратном направлениях, что снижает пороговую интенсивность накачки, увеличивает коэффициент усиления, сокращает время генерации и повышает ее эффективность.

Эти особенности позволяют создавать ПГС с улучшенными характеристиками: предельно достижимые для данного класса ПГС характеристики излучения реализуются даже при накачке недорогими многомодовыми Nd:YAG-лазерами,



Рис.2 ПГС на кристалле ВВО модели LP 603/604 компании "СОЛАР ЛС"

а максимальная эффективность преобразования реализуется при низкой интенсивности накачки, что увеличивает ресурс ПГС. В таблице приведена спецификация основных параметров устройств, производимых компанией "СОЛАР ЛС". Внешний вид такого устройства представлен на рис.2.

Для многих применений (лазерно-индуцированная люминесценция молекул, лазерная обработка материалов и др.) требуется УФ-излучение, перестраиваемое по длине волны. В этом случае производители ПГС предлагают потребителям генераторы второй гармоники, обеспечивающие генерацию, перестраиваемую в диапазоне 210–420 нм.

Альтернативным направлением работ по получению перестраиваемого УФ-излучения является создание ПГС с накачкой излучением 4-й гармоники Nd:YAG-лазера. В компании "СОЛАР ЛС" проводились исследования в этом направлении [3]. Экспериментально было установлено, что в кристаллах ВВО под действием излучения накачки (266 нм) образуются динамические центры окраски, имеющие сильное поглощение в области 200–400 нм. Образование таких центров, а также нелинейное поглощение излучения накачки и эффекты теплового самовоздействия [4], видимо, не позволят в ближайшем будущем создавать УФ ПГС на кристаллах ВВО с высокими эксплуатационными характеристиками.

Спецификация основных параметров перестраиваемых ПГС

Параметры	Модель	
	LP 603	LP 604
Область перестройки, нм основная гармоника вторая гармоника	410–2500 210–420	680–2500
Эффективность преобразования, %	>35 для 500 нм	>40 для 850 нм
Ширина линии, нм	0,1 для 500 нм	0,4 для 850 нм
Длина волны накачки, нм	355	532

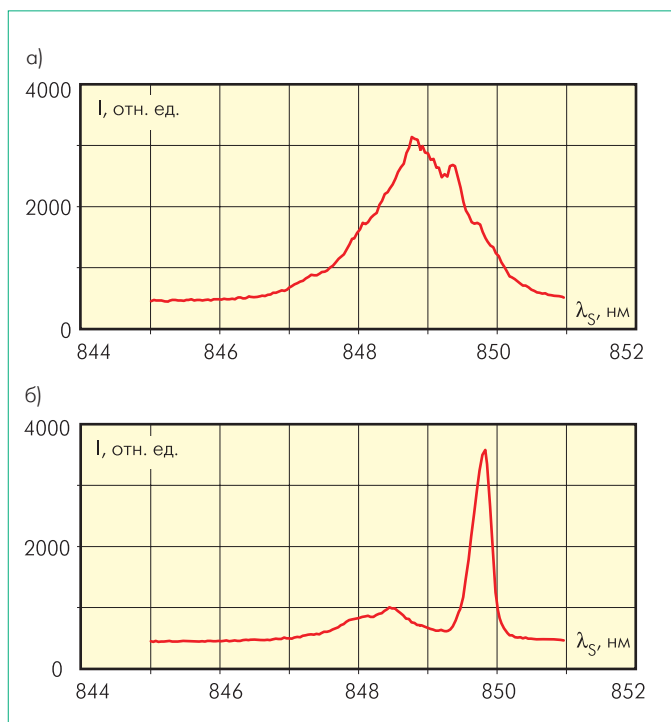


Рис.1 Спектры генерации ПГС на кристалле КТР с однопроходной (а) и двухпроходной (б) схемой накачки с длиной волны 532 нм

ИСТОЧНИКИ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИК-ДИАПАЗОНЕ ДО 4 мкм

В настоящее время ПГС на кристаллах КТР и КТА с накачкой излучением Nd-лазеров позволяют получать перестраиваемое излучение в ближнем ИК-диапазоне 1,5–4 мкм.

Основными трудностями получения высокоэффективной генерации в этой области спектра являются невысокий коэффициент параметрического усиления в нелинейных кристаллах, их краевое поглощение в ИК-области, а также наличие сильных полос поглощения паров воды в атмосфере.

Для надежной работы лазерной системы необходимо, чтобы длина волны генерации попадала в окна прозрачности атмосферы (рис.3). В ПГС, накачиваемых излучением 1064 нм, длины волн излучения сигнальной (λ_s) и холостой (λ_l) волн связаны между собой соотношением

$$1/\lambda_l + 1/\lambda_s = 1/1,0642 \text{ [мкм]}.$$

С учетом этого можно выделить следующие спектральные диапазоны, для которых можно создать надежно работающие ПГС в окнах прозрачности атмосферы: 1,45–1,67; 1,98–2,3 и 2,93–4,10 мкм.

Для надежной работы лазерной системы нужно учитывать свойства нелинейных кристаллов и наличие их собственного краевого поглощения в ИК-области. Нелинейные свойства кристаллов КТА и КТР близки. Но в отличие от КТР, кристалл КТА имеет более широкую полосу пропускания в ближнем ИК-диапазоне.

В компании "СОЛАР ЛС" в последние годы проводились работы по получению высокоэффективной параметрической генерации на кристаллах КТР и КТА. Результатом этих работ явилось создание коммерческой модели ИК-ПГС на

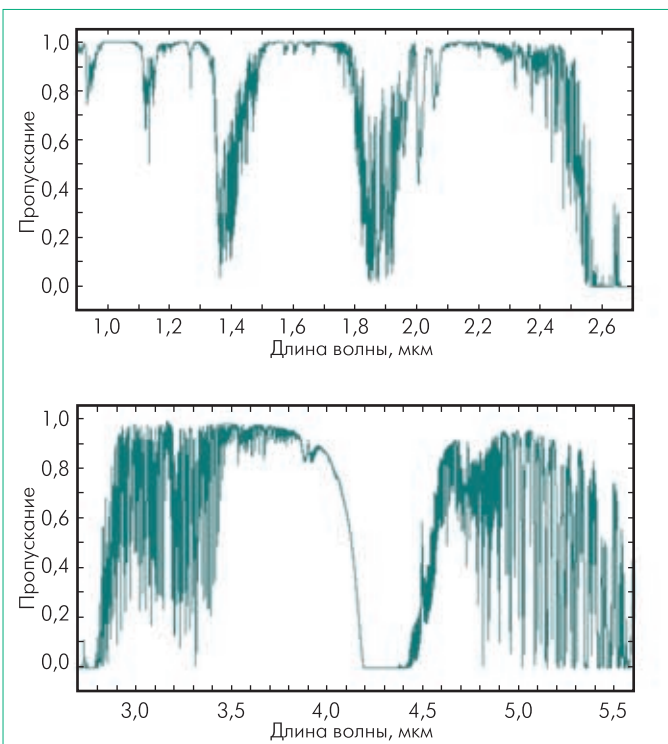


Рис.3 Спектры пропускания атмосферы

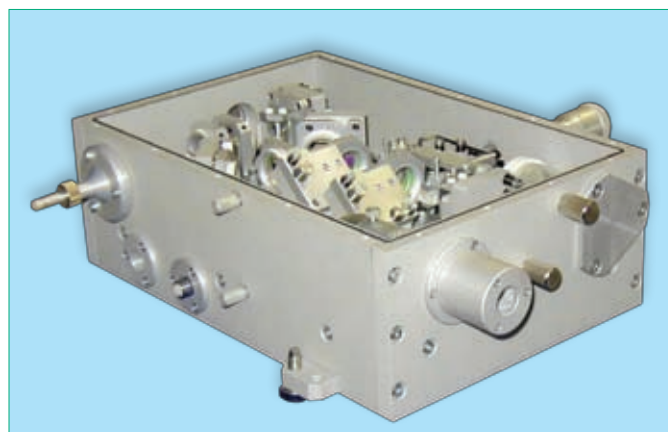


Рис.4 ПГС с накачкой излучением Nd:YAG-лазера компании "СОЛАР ЛС"

указанных кристаллах (рис.4). Так, модель на кристалле КТР обеспечивает диапазон перестройки 1,98–2,3 мкм, энергию выхода до 50 мДж и эффективность преобразования излучения накачки – 25%.

Модель на кристалле КТА дает возможность получить перестраиваемую генерацию в окнах прозрачности атмосферы 1,45–1,67 и 2,93–4,10 мкм с эффективностью до 30%.

ИСТОЧНИКИ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИК-ДИАПАЗОНЕ ДО 20 мкм

Как было отмечено ранее, для целого ряда применений требуются лазерные источники перестраиваемого ИК-излучения, работающие в спектральном диапазоне 5–20 мкм. Поэтому сегодня многие исследовательские центры проводят работы по созданию высокоэффективных, мощных и компактных твердотельных источников лазерного излучения для указанного диапазона.

Такие системы можно создавать на основе генераторов разностной частоты (ГРЧ), либо ПГС с накачкой Er- и Ho-лазерами. Однако эти источники накачки пока достаточно уникальны и не всегда могут быть использованы, учитывая их высокую стоимость и не очень высокие эксплуатационные характеристики.

Альтернативой для накачки ПГС среднего ИК-диапазона являются решения, использующие Nd:YAG-лазер как источник накачки. В состав таких систем входят ПГС, накачиваемые Nd:YAG-лазерами, которые, в свою очередь, используются для накачки ГРЧ или ПГС среднего ИК-диапазона. Эти системы хорошо изучены, их можно легко реализовать в компактном

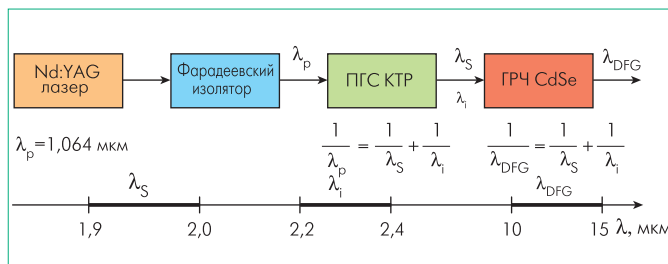


Рис.5 Структурная схема генератора разностной частоты на кристалле CdSe

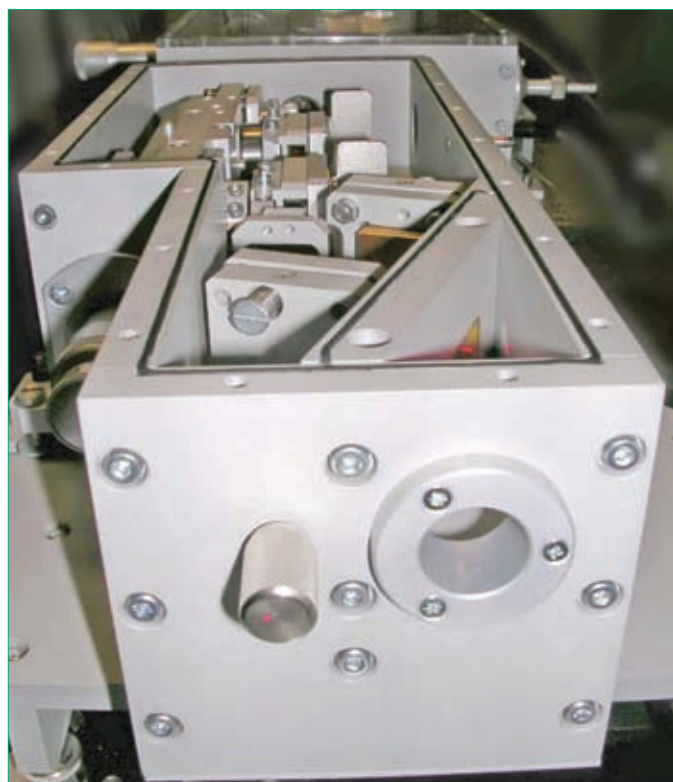


Рис. 6 ГРЧ на кристалле CdSe компании "СОЛАР ЛС"

(для мобильных применений) и в стационарном (для обеспечения высоких энергий выхода) исполнении.

Рассмотрим более подробно возможности создания лазерных источников, генерирующих в диапазоне 5–20 мкм на базе Nd:YAG лазеров.

Генераторы разностной частоты

Описанные выше ПГС на кристаллах КТР и КТА можно использовать в качестве накачки для ГРЧ среднего ИК-диапазона. Так, в компании "СОЛАР ЛС" разработан ГРЧ на кристалле CdSe, который при накачке излучением ПГС на кристаллах КТР генерирует излучение с непрерывно перестраиваемой длиной волны в диапазоне 10–17 мкм (рис.5,6).

Двухкаскадные ПГС

Альтернативой ГРЧ является создание двухкаскадных схем ПГС. В этих схемах есть возможность изменять длину волны накачки и оптимизировать условия генерации узкополосного излучения в заданном диапазоне длин волн с учетом окон прозрачности атмосферы.

Рассмотрим две схемы построения подобных ПГС, используемые сегодня в компании "СОЛАР ЛС".

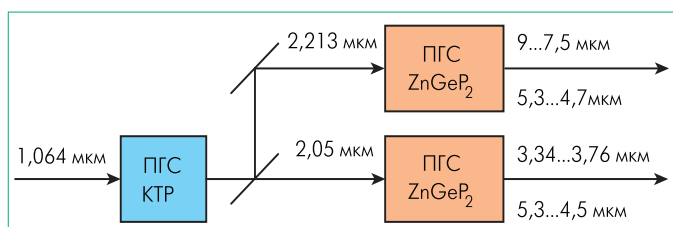


Рис. 7 Структурная схема ПГС на кристаллах ZnGeP₂

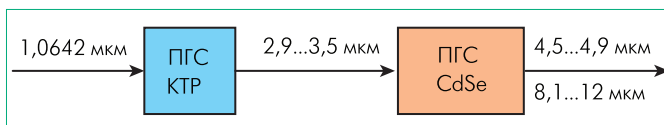


Рис. 8 Структурная схема ПГС на кристалле CdSe с некритичным 90-градусным синхронизмом

Для накачки ПГС на кристалле ZnGeP₂ можно применять ПГС на кристалле КТР, генерирующий одновременно две длины волны: сигнальную $\lambda_s=2,05$ мкм и холостую $\lambda_l=2,213$ мкм [5]. Их можно пространственно разделить и использовать для накачки двух ПГС на кристаллах ZnGeP₂ (рис.7).

Практический интерес представляет также схема ПГС на кристалле CdSe с некритичным 90-градусным синхронизмом [6], в которой при накачке излучением, перестраиваемым в области 2,9–3,5 мкм, можно получить перестраиваемую генерацию в области 4,5–4,9 и 8,1–12 мкм (рис.8).

Представленные материалы исследований, проведенных компанией "СОЛАР ЛС" при создании промышленных образцов приборов, показывают перспективность создания источников перестраиваемого излучения на базе ПГС с накачкой Nd:YAG-лазерами.

Накопленный специалистами "СОЛАР ЛС" опыт разработки и производства перестраиваемых лазеров и лазеров накачки дает возможность поставки систем с перестройкой длины волны во всем диапазоне длин волн 210–20000 нм. Эти системы могут быть доработаны с учетом требований заказчиков для решения их прикладных задач.

Компания "СОЛАР ЛС" приглашает к сотрудничеству научные коллективы и компании для совместного проведения работ по созданию новых перспективных источников лазерного излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. N.Kondratyuk, O.Manko, A.Shagov. Features of the angle-tuned phase-matched OPO with pump beam reflected. – Laser Optics, 2003; Solid-state Lasers and Nonlinear Frequency Conversion: Proc. of SPIE. – V.Ustugov, Ed. Washington: SPIE, 2004, Vol.5478, p.189–193.
2. Н.Кондратюк, О.Манько, А.Шагов. Уменьшение ширины линии генерации при возврате излучения накачки в ПГС на кристалле КТР. – В кн.: Межд. конф. "Лазерная физика и применения лазеров". – Минск, 14–16 мая, Институт физики им. Б.И.Степанова НАН Беларуси, 2003, с.1–46.
3. Кондратюк Н.В. и др. Перестраиваемый в области 300–2340 нм параметрический генератор света на кристалле ВВО с накачкой 4-ой гармоникой Nd:YAG лазера. – Квантовая электроника, 2000, т.30, №3, с.253–254.
4. N.Kondratyuk, A.Shagov. Nonlinear absorption at 266 nm in BBO crystal and its influence on frequency conversion. – ICONO 2001; Nonlinear Optical Phenomena and Nonlinear Dynamics of Optical Systems: Proc. of SPIE. – Washington: SPIE, 2002, Vol.4751, p.110–115.
5. E.Cheng, S.Palese, M.Injeyan. Conversion to mid IR using KTP and ZnGeP₂ OPOs. – OSA TOPS, 1999, Vol.26, p.514-517.
6. Y.Isyanova et al. Multi-wavelength 1.5–10 μm tunable tandem OPO. – OSA TOPS, 1999, Vol.26, p.548–553.