

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

Е. Гулевич, Н. Кондратюк, А. Протасеня
СоларЛС, г. Минск, Беларусь
www.solarls.eu

Введение

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

Бурный прогресс в науке и технике ставит все новые и новые задачи, для решения которых требуются лазерные источники генерирующие перестраиваемое излучение в специфических спектральных диапазонах. Наиболее актуальными областями применения таких источников являются:

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

Новые методики требуют новых лазеров. Наряду с этим, уже давно известные методики и приборы постоянно совершенствуются и, как правило, требуют все более мощных, более совершенных и более надежных лазерных источников. Вот почему, разработка перестраиваемых лазерных источников с высокими эксплуатационными характеристиками продолжает оставаться одной из актуальнейших задач для производителей лазерной техники.

В настоящей статье дается обзор основных подходов к созданию таких источников, работающих в УФ, видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах, а также приводятся примеры некоторых удачных коммерческих разработок выполненных в белорусской научно-производственной компании «СоларЛС».

Среди твердотельных источников перестраиваемого лазерного излучения главенствующие позиции до недавнего времени занимали лазеры на красителях в полимерных матрицах и на активированных кристаллах ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$, александрит, форстерит, $\text{YAG}:\text{Cr}^{4+}$). Диапазон рабочих длин волн, обеспечиваемых этими лазерами, располагается в пределах от 550 до 1500 нм, а каждая активная среда в отдельности способна генерировать в сравнительно узкой спектральной области шириной от 20 до 300 нм.

В последнее время разработчиками и пользователями лазерной аппаратуры все большее внимание уделяется источникам излучения на основе параметрических генераторов света (ПГС). ПГС удачно сочетают в себе максимально широкий диапазон непрерывной перестройки (например от 410 до 2500 нм) и высокий КПД преобразования излучения накачки. Прогресс в области роста нелинейных кристаллов для ПГС и изготовления широкополосных стойких диэлектрических покрытий позволяют создавать надежные и простые в эксплуатации лазерные источники, перекрывающие практически весь спектральный диапазон длин волн от 200 нм до 20 мкм.

Именно этот тип источников перестраиваемого лазерного излучения будет рассмотрен подробнее ниже.

1. Параметрические генераторы света видимого и ближнего ИК диапазона.

К настоящему времени наибольшее распространение получили ПГС на кристаллах ВВО с накачкой 2-й и 3-й гармониками Nd:YAG лазеров. Такие приборы предлагают сегодня своим потребителям большинство производителей лазерной техники.

Основными достоинствами этих ПГС являются широчайший диапазон перестройки генерируемых длин волн (от 410 до 2500 нм при накачке излучением с 355 нм и от 680 до 2500 нм при накачке излучением с 532 нм) и высокий, до 50% КПД генерации. Недостатками, ограничивающими их прикладное использование, являются большая расходимость пучка (2-20 мрад) генерируемого излучения и недостаточно узкая спектральная ширина линии генерации ($2-10 \text{ см}^{-1}$).

Вот почему, работы по улучшению пространственно-угловых характеристик излучения ПГС и уменьшению спектральной ширины линии их генерации остаются весьма актуальными.

В СоларЛС проводились исследования коллинеарных и неколлинеарных схем ПГС которые позволили выявить следующую особенность: в ПГС с синхронизмом типа II с двухпроходовой схемой накачки ширина линии генерации и расходимость пучка в плоскости синхронизма нелинейного кристалла меньше чем в ПГС с однопроходовой схемой накачки. Связано это с тем, что в ПГС с двухпроходовой схемой накачки сигнальная волна по разному усиливается в нелинейном кристалле в "прямом" и в "обратном" направлениях [1]. На рис.1, в качестве примера, показаны спектры генерации ПГС на кристалле КТР с одно- и двух-проходовой схемой накачки с длиной волны 532 нм [2].

Кроме этого, в ПГС с двух-проходовой схемой накачки излучение генерации усиливается в нелинейном кристалле как в "прямом", так и в "обратном" направлениях, за счет чего снижается пороговая интенсивность накачки, увеличивается коэффициент усиления, сокращается время развития генерации и, в результате, повышается эффективность параметрической генерации.

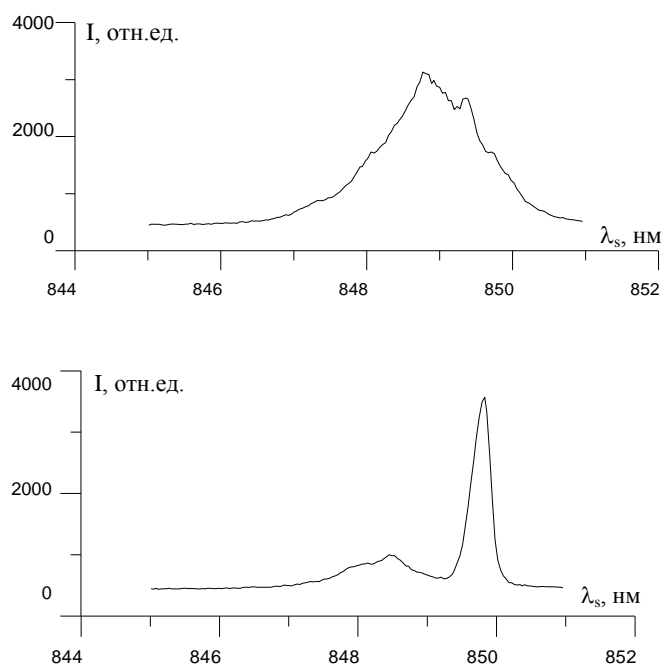


Рис. 1 Спектры генерации ПГС на кристалле КТР с одно-а) и двух-б) проходовой-схемой накачки с длиной волны 532 нм

Использование этих особенностей позволяет создавать ПГС с улучшенными эксплуатационными характеристиками, у которых даже при низких интенсивностях накачки недорогими многомодовыми Nd:YAG лазерами реализуются высокие зффективности преобразования. Кроме того, возможна получение предельно достижимые для данного класса ПГС спектральных и пространственно-угловых характеристики излучения (рис.2).



Спецификация

Модель	LP 603	LP 604
Область перестройки, нм	410...2500	680...2500
Эффективность преобразования, %	>35 на 500нм	>40 на 850нм
Ширина линии, нм	0,1 на 500нм	0,4 на 800нм
Длина волны накачки, нм	355	532

Рис. 2 Параметрический генератор света на кристалле ВВО модель LP 603/604 производства СоларЛС

Для многих применений (лазерно-индуцированная люминесценция молекул, лазерная обработка материалов и др.) требуется перестраиваемое по длине волны излучение в УФ области спектра. Вот почему некоторые производители подобных ПГС предлагают своим потребителям генераторы второй гармоники, расширяющие возможности стандартных ПГС за счет обеспечения перестраиваемой генерации в диапазоне 210...420 нм (рис.3).



Рис. 3. Генератор второй гармоники для ПГС, модель LG350 производства СоларЛС

Альтернативным направлением работ, по получению перестраиваемого УФ излучения, является создание ПГС с накачкой излучением 4-й гармоники YAG:Nd лазера. В Солар ЛС были проведены исследования по изучению возможности получения параметрической генерации в трудно получаемой области спектра от 300 нм до 400 нм. Однако первые эксперименты показали, что эффективность параметрической генерации очень низкая [3]. Схема ПГС на кристалле ВВО с накачкой излучением с 266 нм приведена на рис.4.

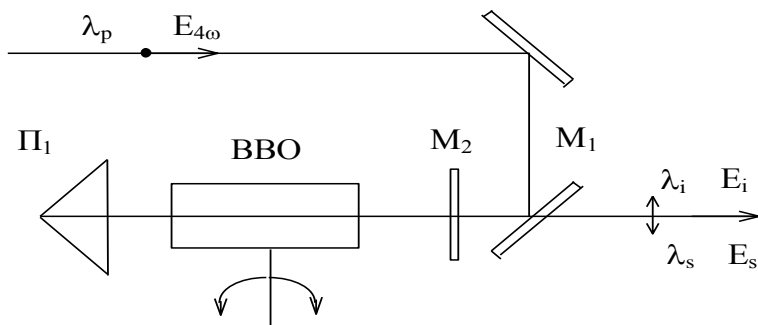


Рис. 4 Схема ПГС на кристалле ВВО с накачкой 266 нм

При интенсивности импульсов накачки $\sim 46 \text{ МВ/см}^2$ была получена перестраиваемая генерация в диапазоне 300...2340 нм с эффективностью $\sim 15\%$ при двухкратном превышении порога на $\lambda_s=340 \text{ нм}$, рис.5.

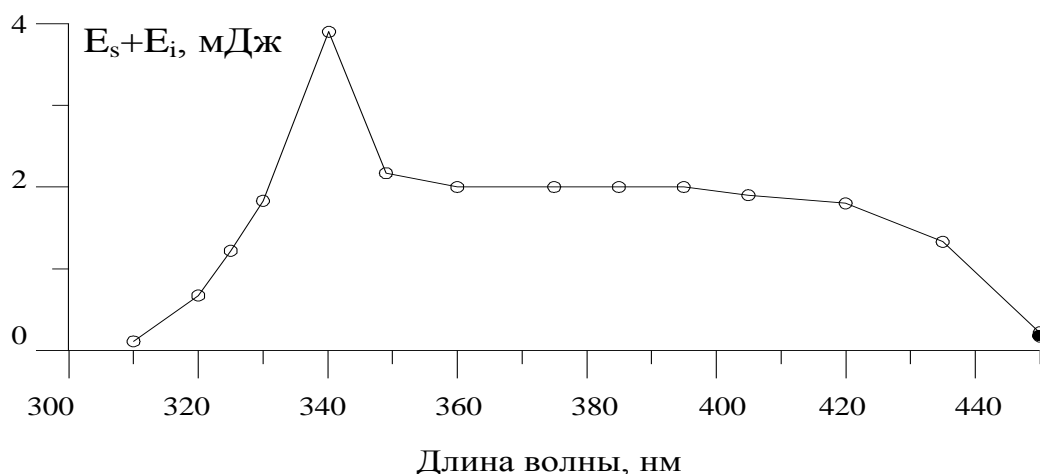


Рис. 5 Перестроечная кривая ПГС при накачке импульсами с энергией $\sim 30 \text{ мДж}$ на 266 нм

Дальнейшие исследования позволили установить, что в кристаллах ВВО под действием излучения накачки (266 нм) образуются динамические центры окраски сильно поглощающие в области 200...400 нм [4]. Образование таких центров окраски, нелинейное поглощение излучения накачки и эффекты теплового самовоздействия, вероятно не позволят в ближайшем будущем создавать УФ ПГС на кристаллах ВВО с высокими эксплуатационными характеристиками.

2. 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 от 1,5 мкм до 4 мкм.

При разработке различных схем ПГС ИК диапазона необходимо учитывать целый ряд факторов влияющих на работу ПГС, в частности, наличие сильных полос поглощения паров воды в атмосфере и краевое поглощение нелинейных кристаллов в ИК области.

Для надежной работы лазерной системы необходимо, чтобы длина волны генерации попадала в окна прозрачности атмосферы, рис.6.

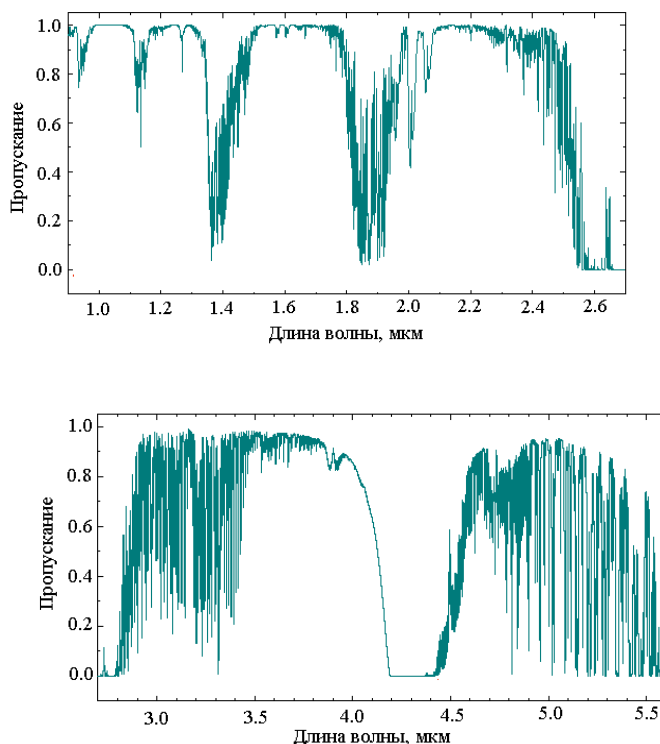


Рис. 6 Спектры пропускания атмосферы

В ПГС накачиваемых излучением с 1,064 мкм, длины волн излучения сигнальной и холостой волн связаны между собой соотношением

$$\frac{1}{\lambda_i} + \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{1,0642} \text{ мкм}$$

С учетом этого соотношения можно выделить следующие спектральные диапазоны, для которых возможно создание надежно работающих ПГС в окнах прозрачности атмосферы:

$$1,45 \dots 1,67 \text{ мкм}, 1,98 \dots 2,3 \text{ мкм}, \\ 2,93 \dots 4,10 \text{ мкм}.$$

Для надежной работы лазерной системы необходимо учитывать свойства нелинейных кристаллов и наличие поглощения в ИК области. По своим нелинейным свойствам кристалл КТА близок к кристаллу КТР. Но в отличие от кристалла КТР кристалл КТА обладает более широкой полосой пропускания в ближнем ИК диапазоне, рис.7.

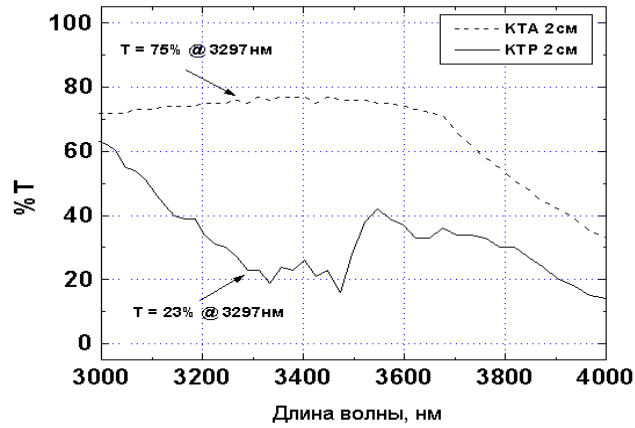


Рис. 7 Спектры пропускания кристаллов КТР и КТА

В СоларЛС на протяжении последних лет проводились работы по получению высокоэффективной параметрической генерации на кристаллах КТР и КТА. Результатом этих работ явилось создание коммерческой модели ИК ПГС на указанных кристаллах, рис.8.

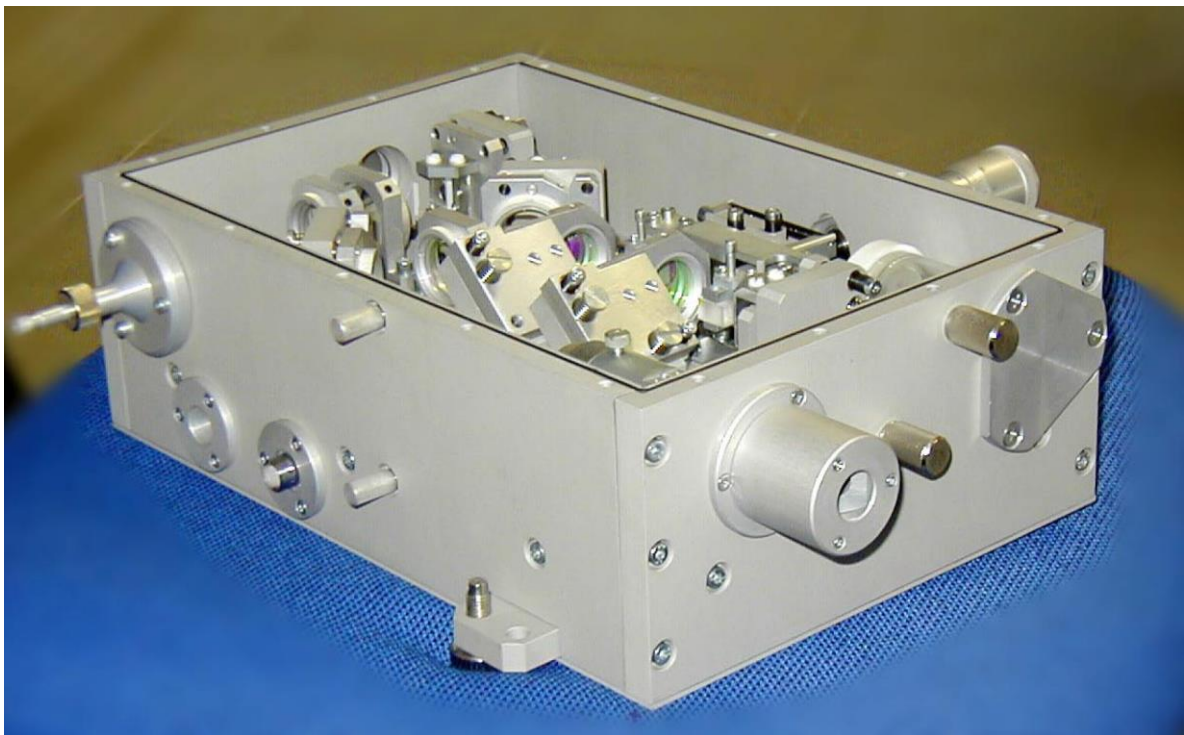


Рис. 8. Параметрический генератор света с накачкой излучением Nd:YAG лазера

При использовании в этой модели кристаллов КТР в диапазоне перестройки 1,98-2,3 мкм эффективность параметрической генерации достигает 25%.

При использовании в этой модели кристаллов КТА, возможно получение перестраиваемой генерации в окнах прозрачности атмосферы 1,45...1,67 мкм и

2,93. ... 4,10 мкм с эффективностью 30% и выше.

3. Источники перестраиваемого лазерного излучения в ИК диапазоне до 20 мкм.

Как было сказано ранее, для целого ряда применений требуются лазерные источники перестраиваемого ИК излучения, работающие в спектральном диапазоне 5...20 мкм. Вот почему, в настоящее время многими исследовательскими центрами интенсивно проводятся исследования по созданию высокоэффективных, мощных и компактных твердотельных источников лазерного излучения для указанного выше диапазона.

Как правило, эти системы создаются на основе генераторов разностной частоты (ГРЧ)

либо ПГС с накачкой Ег- и Но- лазерами с длиной волны $\lambda=1,5\text{мкм}$, $\lambda=2,9\text{мкм}$ и $\lambda=2,05\text{ мкм}$, соответственно. Пока такие источники накачки являются достаточно уникальными и не всегда могут быть использованы по причине не очень высоких эксплуатационных характеристик и высокой стоимости.

В то же время прекрасной альтернативой для накачки ПГС среднего ИК диапазона являются технические решения, базирующиеся на хорошо освоенных лазерах Nd:YAG . В состав этих систем входят ПГС с накачкой Nd:YAG лазерами, которые в свою очередь используются для накачки ПГС среднего ИК диапазона.

Подобные системы хорошо изучены и могут быть легко реализованы как в компактном дизайне для мобильных применений, так и в виде мощных стационарных установок для обеспечения высоких энергий накачки.

Рассмотрим далее основные направления создания лазерных ИК источников на базе Nd:YAG лазеров.

Генераторы разностной частоты.

В СоларЛС был разработан генератор разностной частоты (ГРЧ) на кристалле CdSe с накачкой излучением ПГС на кристаллах КТР, который генерировал излучение с перестраиваемой длиной волны в диапазоне от 10 до 17 мкм, рис.9, 10.

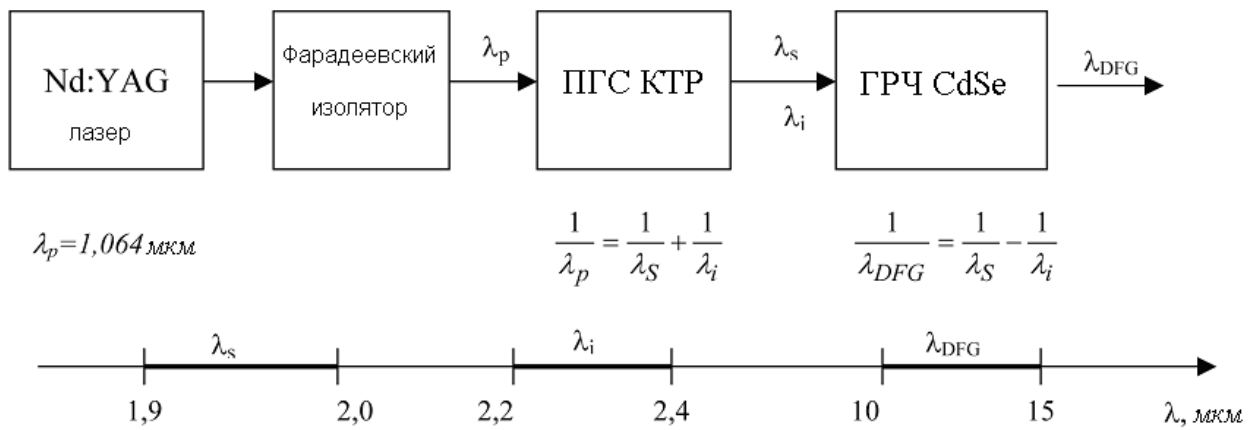


Рис. 9. Структурная схема генератора разностной частоты на кристалле CdSe

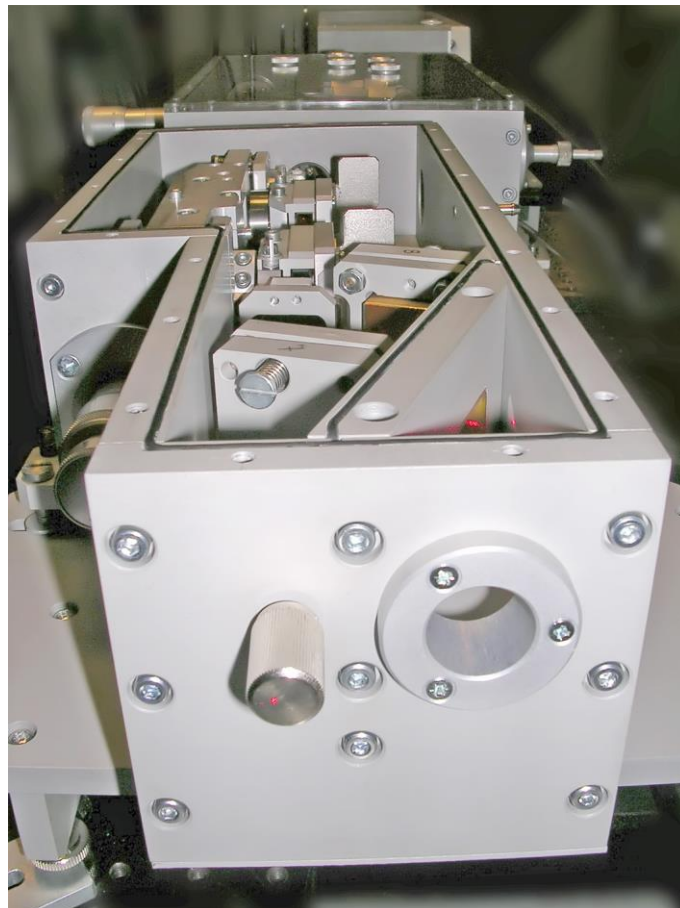


Рис. 10. Генератор разностной частоты на кристалле CdSe

Двухкаскадные ПГС.

Двухкаскадные схемы ПГС широко применяются в тех случаях, когда отсутствуют лазеры накачки с длиной волны $> 2 \text{ мкм}$. С другой стороны, в

двухкаскадных схемах ПГС имеется возможность изменять длину волны излучения накачки и таким образом получать более оптимальные условия для генерации узкополосного излучения в заданном диапазоне длин волн.

В мощных ПГС среднего ИК диапазона используются в основном кристаллы $ZnGeP_2$, $AgGaSe_2$ и $CdSe$ [6].

Табл.1. Сравнительные характеристики нелинейных кристаллов

Кристалл	Диапазон прозрачности, мкм	нелинейный коэффициент d_{eff} , пм/В	Теплопроводность, Вт/м К	Порог повреждения, МВт/см ² ,
$ZnGeP_2$	0,74-12	75	35	60
$AgGaSe_2$	0,71-19	33	10	30
$CdSe$	0,75-25	18	6	50

В качестве примера, рассмотрим две схемы построения подобных ПГС, используемые в настоящее время в СоларЛС.

Для накачки ПГС на кристалле $ZnGeP_2$ может быть использован ПГС на кристаллах КТР который генерирует одновременно две длины волны: сигнальную с $\lambda=2,05$ мкм и холостую с $\lambda=2,213$ мкм [6]. Эти две волны могут быть пространственно разделены и использованы для накачки двух ПГС на кристаллах $ZnGeP_2$ (рис.11).

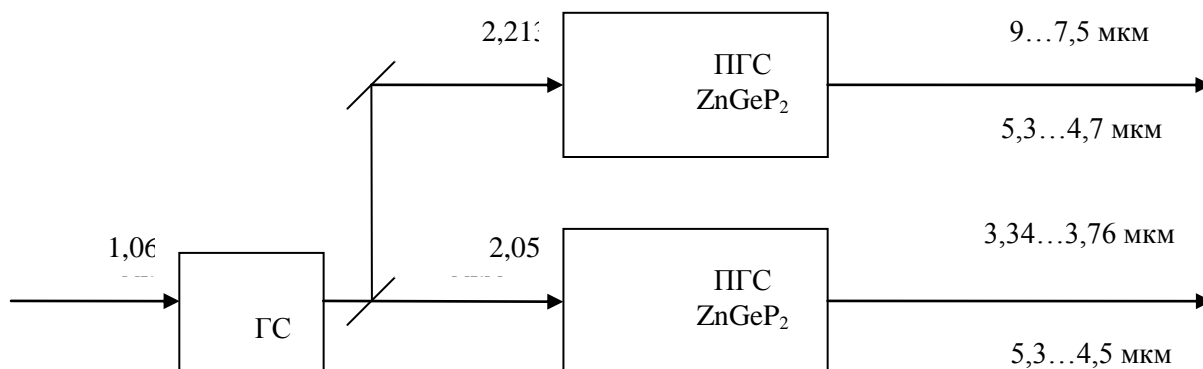


Рис. 11. Структурная схема ПГС на кристаллах $ZnGeP_2$

Также, представляет практический интерес схема ПГС на кристалле $CdSe$ с некритичным 90-градусным синхронизмом [7], в которой, при накачке излучением перестраиваемым в области от 2,9 мкм до 3,5 мкм возможно получение перестраиваемой генерации в области 4,5...4,9 мкм и 8,1...12 мкм (рис.12).

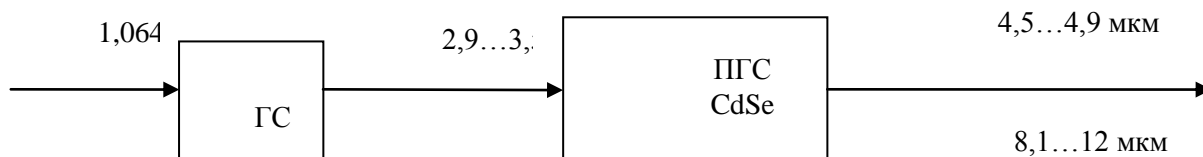


Рис. 12. Структурная схема ПГС на кристалле CdSe с не критичным 90-градусным синхронизмом

Заключение.

Представленные материалы о некоторых результатах научных исследований и освоенных ЗАО «СоларЛС» промышленных образцах демонстрируют перспективность создания источников перестраиваемого лазерного излучения на базе ПГС с накачкой Nd:YAG лазерами. Накопленный специалистами «СоларЛС» опыт по разработке и производству как перестраиваемых лазеров различной конфигурации, так и лазеров для их накачки, обеспечивают возможность изготовления и поставки систем с перестройкой длины волны во всем диапазоне длин волн от 210 нм до 20 мкм. Подобные системы могут быть построены также и с учетом специфических требований заказчиков для решения их прикладных задач.

ЗАО «СоларЛС» постоянно проводит научно-исследовательские работы по созданию новых перспективных источников лазерного излучения и приглашает к партнерскому сотрудничеству научные коллективы стран и производственные предприятия.

Литература

1. N. Kondratyuk, O. Manko, A. Shagov. «Features of the angle-tuned phase-matched OPO with pump beam reflected» / Laser Optics 2003/ Solide-state Lasers and Nonlinear Frequency Conversion: Proceeding of SPIE // Vladimir Ustugov, Editor. Washington: SPIE, 2004. v.5478. p. 189-193.
2. Н. Кондратюк, О. Манько, А. Шагов «Уменьшение ширины линии генерации при возврате излучения накачки в ПГС на кристалле КТР» // Международная конференция «Лазерная физика и применения лазеров» Минск, 14-16 мая. – Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси, 2003 – с. 1-46
3. Кондратюк Н.В., Шагов А.А., Демидчик К.Л., Юркин А.М., Кох А.Е. Перестраиваемый в области 300-2340 км параметрический генератор света на кристалле ВВО с накачкой четвертой гармоникой YAG:Nd 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 Nonlinert Dynamics of Optical Systems: Proceeding of SPIE//

Konstantin N. Drabovich, Nikolay S. Kazak, Vladimir A. Makarov, Alexander P. Voitovich, Editors. – Washington: SPIE. 2002. vol. 4751 p. 110-115.

5. Dmitriev V.G., Gurzadyan G.G., Nikogosyan O.N. Handbook of Nonlinear Optical crystals. – Berlin: Springer-Verlag, 1999. (Third edition).
6. E.Cheng, S.Palese, M.Injeyan «Conversion to mid IR using KTP and ZnGeP₂ OPOs» OSA TOPS, , vol.26, p.514-517 (1999).
7. Y. Isyanova, A. Dergachev, D. Welford, P. Moulton M «Multi-wavelength, 1.5-10 μm tunable, tandem OPO» OSA TOPS, vol.26, p.548-553 (1999).