

# Импульсно-периодический ТЕА $\text{CO}_2$ -лазер и его применение для генерации второй гармоники в кристалле $\text{ZnGeP}_2$

Л.В.Ковальчук, А.Н.Грезев, В.Г.Низьев, В.П.Якунин, В.С.Межевов, Д.А.Горячкин, В.В.Сергеев, А.Г.Калинцев

*Представлены экспериментальные результаты по созданию источника излучения на длине волны 4.775 мкм с энергией импульсов до 50 мДж и средней мощностью до единиц ватт в коротких сериях импульсов. Описаны созданные для этих экспериментов ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазер и блок нелинейного преобразования на основе кристалла  $\text{ZnGeP}_2$ . Рассмотрены основные ограничения процесса нелинейного преобразования и возможные пути их преодоления.*

**Ключевые слова:** ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазер, нелинейный кристалл  $\text{ZnGeP}_2$ , генерация второй гармоники.

## 1. Введение

Спектральный диапазон второй гармоники излучения  $\text{CO}_2$ -лазера позволяет перекрыть область 4.6–5.4 мкм, важную для ряда прикладных задач, таких как селективные лазерные технологии, дистанционный контроль, лидарные и локационные системы. Как правило, в качестве источника излучения накачки используется импульсный (или импульсно-периодический) ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазер, позволяющий с высокой эффективностью получать импульсы генерации субмикросекундной длительности с узким спектром и перестраивать излучение по дискретным колебательно-вращательным переходам молекулы  $\text{CO}_2$  в области 9.2–10.8 мкм.

Генерация второй гармоники (ГВГ) излучения ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера в ряде нелинейных кристаллов экспериментально продемонстрирована в работах [1–10]. Достигнуты эффективности преобразования энергии импульса излучения во вторую гармонику до десятков процентов [1–4,10]. Серьезной научно-технической проблемой является получение генерации с относительно большой энергией импульса второй гармоники в импульсно-периодическом режиме работы системы.

Цель настоящей работы заключается в получении ГВГ излучения ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера при высокой частоте следования импульсов и высокой средней мощности.

Решение этой сложной задачи включает в себя два отдельных, но взаимосвязанных этапа. Прежде всего, это создание мощного импульсно-периодического ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера, имеющего стабильные параметры излучения, ко-

торые были бы оптимизированы с точки зрения высокоэффективного преобразования частоты излучения во вторую гармонику. Такими параметрами являются:

- высокие пиковая мощность и энергия импульсов при большой частоте их следования и большой средней мощности генерации;
- малая длительность импульса излучения с по возможности коротким «хвостом», вызывающим нежелательный нагрев нелинейного кристалла;
- одна из мощных линий генерации на длине волны, определяемой материалом нелинейного кристалла;
- малая угловая расходимость излучения, которая должна быть меньше угловой ширины синхронизма нелинейного кристалла;
- линейная поляризация излучения, направление которой определяется типом нелинейного взаимодействия в кристалле, используемом для ГВГ.

Вторым неременным условием успешного решения поставленной задачи является правильный выбор материала нелинейного кристалла, его размеров и ориентации, а также организация эффективного теплоотвода при работе в режиме высокой средней мощности. Важно также выбрать оптимальные конфигурацию блока ГВГ и схему фокусировки излучения накачки в блок нелинейных кристаллов, обеспечив тем самым оптимизацию параметров системы лазер–кристалл в целом.

В первой части работы приведены результаты создания и исследования параметров импульсно-периодического ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера с высокими средней и пиковой мощностями, перестраиваемого по линиям колебательно-вращательных переходов молекулы  $\text{CO}_2$ . Лазер создан на современной элементной базе и способен работать непрерывно в течение длительного времени. Для ГВГ в нелинейном кристалле  $\text{ZnGeP}_2$  использовались 10-минутные циклы работы лазера со следующими параметрами излучения: линия генерации  $9P(20)$  ( $\lambda = 9.55$  мкм), энергия в импульсе 0.5 Дж, длительность импульсов  $\sim 0.2$  мкс, частота их следования до 500 Гц.

При создании лазера были использованы результаты предшествующих работ [11,12], полученные с участием авторов настоящей статьи. Это касается разработки конструкции газодинамического тракта (ГДТ) и разрядной камеры, а также оптимизации формы импульса генерации для эффективной ГВГ за счет выбора состава газовой смеси лазера [10].

А.Н.Грезев, В.Г.Низьев, В.П.Якунин. Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Россия, Московская обл., 140700 Шатура, ул. Святоозерская, 1; e-mail: niziev@mail.ru

В.С.Межевов. Калужский лазерный инновационно-технологический центр, Россия, Калужская обл., 249037 Обнинск, Киевское ш., 82

Д.А.Горячкин. ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, Россия, 194064 С.-Петербург, Тихорецкий просп., 21; e-mail: dmitrigror@mail.ru

В.В.Сергеев, А.Г.Калинцев. ОАО «ГОИ им. С.И.Вавилова», Россия, 199053 С.-Петербург, Кадетская л., 5, корп. 2

Поступила в редакцию 4 августа 2014 г., после доработки – 24 декабря 2014 г.

При выборе конфигурации и параметров блока нелинейного преобразования излучения во вторую гармонику были использованы экспериментальные данные работы [10] по лучевой стойкости и эффективности процесса ГВГ в кристалле ZnGeP<sub>2</sub>, а также многолетний опыт производителей применяемых нами кристаллов (ООО «Лаборатория оптических кристаллов», Томск) [13,14].

## 2. Импульсно-периодический TEA CO<sub>2</sub>-лазер для получения ГВГ

Лазер построен по типичной для TEA CO<sub>2</sub>-лазера функциональной схеме с прокачкой рабочей смеси в замкнутом цикле. Он состоит из двух основных блоков – генерации и системы управления.

В блок генерации лазера (рис.1) входят:

- ГДТ замкнутого контура циркуляции лазерной смеси с теплообменником и регенератором;
- разрядная камера, содержащая электроды основного разряда и предыонизации;
- высоковольтный модулятор основного разряда, собранный по схеме удвоения напряжения и содержащий батарею конденсаторов основного разряда (ОР) и тиратрон;
- блок конденсаторов предыонизации для предварительной ионизации газа перед подачей напряжения на электроды основного разряда;
- два блока зарядки типа 7020С-300-380 (ООО «Оптосистемы», Троицк) (рис.2,а), осуществляющие зарядку конденсаторных батарей с частотой до 500 Гц и формирующие импульсы для запуска тиратрона;
- блок запуска и накала тиратрона, обеспечивающий необходимые параметры высоковольтных импульсов для запуска тиратрона;
- резонатор, содержащий систему зеркал, выводное окно из ZnSe, эшелетт, устройства водяного и воздушно-го охлаждения оптических элементов.

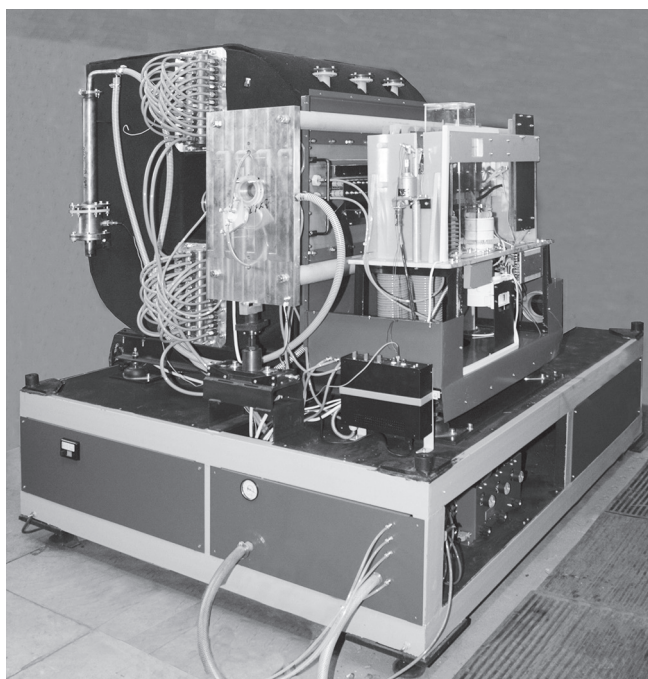


Рис.1. Блок генерации лазера (без внешнего кожуха).



Рис.2. Источники питания (а) и сенсорный пульт управления (б).

В блок генерации лазера также встроены:

- формирующая система для доставки, фокусировки и преобразования (по пространственным характеристикам и направлению поляризации) выходного лазерного пучка и направления его на кристаллы блока ГВГ;
- блок ГВГ, содержащий нелинейные кристаллы ZnGeP<sub>2</sub>, системы стабилизации их температуры и настройки направления синхронизма.

В состав лазера входят системы напуска газа и охлаждения. Их функции таковы: охлаждение тиратрона, электродов разрядной камеры, оптической системы лазера и блока ГВГ, откачка и напуск газов в ГДТ перед началом работы, подпитка свежей смесью газов в процессе длительной работы, обдув оптики, расположенной внутри ГДТ.

Все блоки имеют собственные корпуса и дополнительно закрыты сверху общим защитным съемным кожухом для обеспечения безопасной эксплуатации, снижения уровней шума и электромагнитных помех. Общий вид блока генерации лазера (при снятом кожухе) показан на рис.1. Блок генерации имеет габаритные размеры 2.3 × 1.7 × 2.5 м и вес ~2 т.

Система управления лазером осуществляет взаимодействие блоков лазера при его подготовке к работе, в процессе работы и после окончания рабочего цикла, а также постоянный мониторинг состояния систем лазера. Фотография пульта управления лазером с сенсорным экраном управления приведена на рис.2,б. Система управления имеет габаритные размеры 1.2 × 0.5 × 1.2 м и вес 90 кг.

В металлический корпус ГДТ (рис.1) встроены два теплообменника, вентилятор прокачки с расходом газа ~ 1 м<sup>3</sup>/с и разрядная камера, скорость потока газа в которой составляет ~ 100 м/с. В газовом контуре имеются смотровые окна для наблюдения за разрядом. Приняты меры по виброизоляции между механическими системами лазера и оптической скамьей резонатора.

Перед началом работы корпус ГДТ откачивается до давления, не превышающего 1 Тор, а затем автоматически заполняется смесью рабочих газов CO<sub>2</sub> – N<sub>2</sub> – He с заданным оператором соотношением компонентов до полного давления, равного, как правило, 400–500 Тор. Состав рабочей смеси выбирался исходя из рекомендаций работы [10] по оптимизации процесса ГВГ. Количество гелия составляло 80%, а соотношение компонентов CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub> выбиралось в диапазоне 4:1 – 6:1. Уменьшение содержания азота приводит, как известно, к укорочению хвоста импульса генерации. Доля излучения, содержащаяся в нем,

не участвует в процессе ГВГ, но приводит к нагреву кристалла.

Ключевым узлом ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера является разрядная камера, в которой между катодом и анодом зажигается импульсный самостоятельный разряд. Размер зоны разряда составлял  $30 \times 30 \times 700$  мм. Через поперечные щели в центральной части катода в зону ОР поступает УФ излучение предыонизации, создаваемое вспомогательными разрядами под катодом. Для зажигания однородного самостоятельного разряда в ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазере необходимо быстрое замыкание высоковольтной конденсаторной батареи на разрядный промежуток. Для этой цели конденсаторная батарея и высоковольтный коммутатор (тиратрон) смонтированы непосредственно вблизи разрядной камеры лазера и подключены к ее электродам с минимальной индуктивностью. Для питания разряда применялась схема импульсного удвоения напряжения. Энергия в конденсаторной батарее ОР составляла 35–50 Дж, емкость конденсаторов ОР «в ударе» – 0.04 мкФ, длительность импульса разрядного тока была равна 0.7–1 мкс. Для коммутации самостоятельного разряда лазера на повышенных частотах (до 500 Гц) использовался отечественный тиратрон типа ТГИ1-2500/50 с водяным охлаждением. При более низких частотах (менее 300 Гц) в модуляторе лазера можно было применять более малогабаритный тиратрон ТГИ1-5к/50 с воздушным охлаждением (ООО «Импульсные технологии», Рязань).

В лазере используется устойчивый плосковогнутый резонатор (рис.3). Глухое вогнутое зеркало находится внутри камеры. В качестве выводного плоского элемента, расположенного вне камеры, используется дифракционная решетка 100 штр./мм, угол блеска равен  $30^\circ$ . Из камеры излучение выходит через окно Брюстера (из ZnSe), т.е. является плоскополяризованным. С помощью дифракционной решетки выделяется одна колебательно-вращательная линия генерации  $\text{CO}_2$ , как правило, линия 9Р(20) ( $\lambda = 9.55$  мкм), попадающая в область синхронизма кристалла  $\text{ZnGeP}_2$ . Дифракционная решетка установлена в автоколлимационном режиме по первому порядку дифракции. Вывод излучения осуществляется через нулевой порядок дифракции по схеме Литтрова, в которой сохраняется направление выходного излучения лазера при перестройке длины волны генерации. Зеркала и дифракционная решетка резонатора установлены на контактных пластинах, охлаждаемых водой. Окно Брюстера и вогнутое зеркало обдуваются внутри ГДТ рабочей газовой смесью. При работе лазера с высокой частотой следования импульсов для поддержания состава рабочей смеси использовались регенератор и частичное обновление смеси из газового баллона.

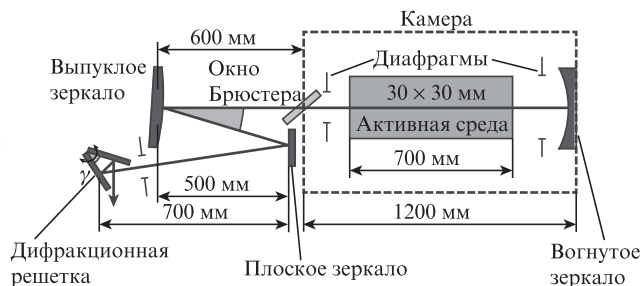


Рис.3. Один из вариантов схемы селективного резонатора, применяемого в лазере.

### 3. Исследование характеристик лазера

Работа лазера тестировалась на частотах следования импульсов до 500 Гц при напряжениях зарядки конденсаторов ОР до 25 кВ и длительности цикла непрерывной работы до 10 мин. Примерно за это время параметры лазера выходят на стационарные значения и устанавливаются тепловые режимы установки. Энергия излучения в частотных пусках измерялась пирозлектрическим приемником PE-50 с использованием калибровок, предоставленных изготовителем (Ophir, Израиль).

Резонатор лазера обычно был настроен на линию 9Р(20) ( $\lambda = 9.55$  мкм). В основном эксперименты проводились со смесью состава  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 5:1:24$  (с малым содержанием азота) при полном давлении 500 Тор. При частотах следования импульсов до 200 Гц энергия импульса составляла 0.5–0.6 Дж, а средняя мощность сохранялась на протяжении всей 10-минутной серии (рис.4, кривая 1). Для сравнения отметим, что для смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$  при прочих одинаковых условиях энергия импульса превышала 1 Дж.

Визуально разряд был однородным в течение всей серии импульсов, искровые пробои отсутствовали. При работе на повышенных частотах следования импульсов приходилось снижать напряжение зарядки конденсаторов до 20–22 кВ.

Из сравнения кривых на рис.4 видно увеличение неустойчивости энергии генерации от импульса к импульсу при работе с более высокой частотой следования, это может объясняться тем, что пироприемник PE-50 регистрировал импульсы выборочно (с частотой не выше 15 Гц), а схема синхронизации в электронном тракте измерений отсутствовала.

Сечение пучка на выходе лазера имеет форму прямоугольника размером примерно  $16 \times 20$  мм, угловая расходимость излучения составляет 3–3.5 дифракционных предела. Форма импульса генерации, измеренная германиевым детектором с фотонным увлечением (ФТИ им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург) при двух различных ширинх полосах пропускания осциллографа, показана на рис.5. Видно, что длинный задний хвост импульса был практически подавлен, полуширина пика была равна  $\sim 200$  нс. Импульс имел тонкую структуру, связанную с биением продольных мод резонатора.

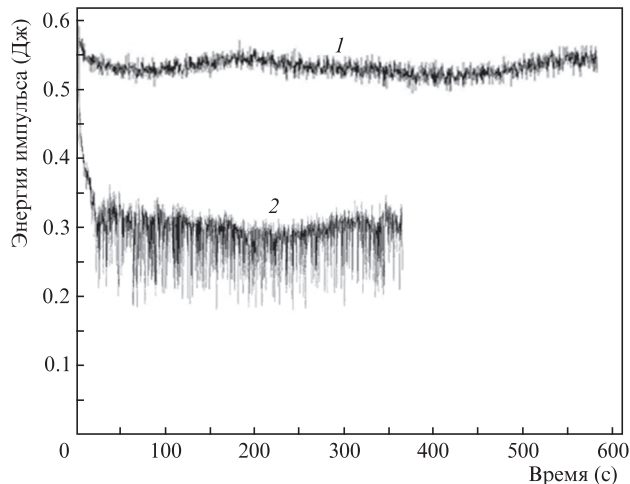


Рис.4. Энергия импульсов лазера в зависимости от времени при частотах их следования 100 (1) и 500 Гц (2).



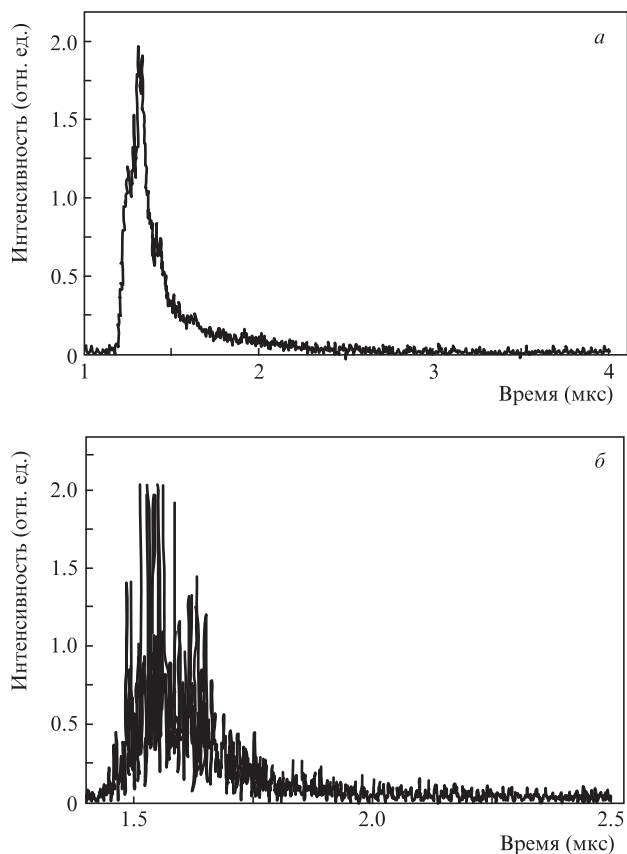


Рис.5. Форма импульса излучения, измеренная при ширинах полосы пропускания осциллографа 20 (а) и 500 МГц (б). Состав смеси CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He = 86:14:400 Тор.

#### 4. Блок ГВГ

Известно, что основные проблемы при ГВГ в кристаллах ZnGeP<sub>2</sub> в частотном режиме связаны со значительным поглощением данного материала на длине волны излучения накачки, которая в данном случае была равна 9.55 мкм. Приводимые в литературе величины показателя поглощения в кристалле ZnGeP<sub>2</sub> излучения на одной и той же длине волны могут различаться в несколько раз (ср., например, 0.26 см<sup>-1</sup> в [15] и 60 м<sup>-1</sup> в [2]), что, по-видимому, определяется особенностями технологии выращивания, обработки и покрытий применяемых кристаллов. Для используемых нами образцов кристаллов [13,14] показатель поглощения измерялся в работе [10] и составил ~0.4 см<sup>-1</sup>.

В результате в объеме кристалла, занятом лазерным пучком, выделяется значительное количество тепла, которое за счет высокой теплопроводности (коэффициент теплопроводности 180 мВт·см<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>[16]) в принципе может быть эффективно отведено к внешним граням кристалла, охлаждаемым системой стабилизации температуры.

Кристаллы были изготовлены в форме параллелепипедов размером 6 × 12 × 12 мм (углы среза  $\theta = 66^\circ$ ,  $\varphi = 0$ ) и прижимались шлифованными широкими гранями к теплоотводам (медным пластинам), температура которых контролировалась элементами Пельтье (рис.6). Выделенное тепло отводилось водяным радиатором. Режим поддержания постоянной температуры регулировался электронным блоком по измерениям датчиков температуры, установленных вблизи широких граней кристаллов.

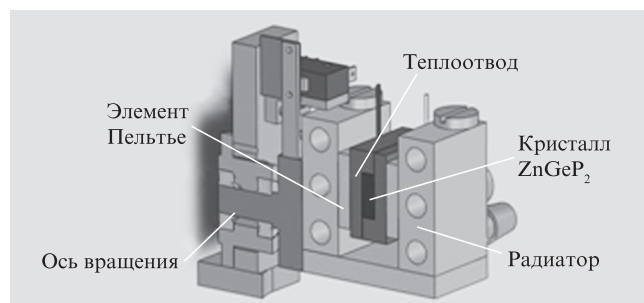


Рис.6. Конфигурация системы крепления нелинейного кристалла.

На входные и выходные грани кристаллов с апертурой 6 × 12 мм было нанесено широкополосное просветляющее покрытие с коэффициентом отражения не более 3.5%–4% как в области 9.55 мкм, так и в области 4.775 мкм. Для настройки угла фазового синхронизма, равного 65.2°, узел термостабилизации вместе с кристаллом мог поворачиваться с помощью шаговых двигателей вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной оси пучка излучения (рис.6).

Как указывалось в работе [10], при плотности энергии свыше 2 Дж/см<sup>2</sup> (пиковая интенсивность ~20 МВт/см<sup>2</sup>) происходило повреждение кристаллов ZnGeP<sub>2</sub> уже после воздействия 5–10 лазерных импульсов на частоте следования несколько герц. Поэтому при работе на высокой частоте энергетическая нагрузка на кристалл была снижена до 0.5–0.7 Дж/см<sup>2</sup>.

Лазерный пучок разделялся на два параллельных канала и вводился в блок ГВГ, содержащий четыре одинаковых нелинейных кристалла ZnGeP<sub>2</sub> (по два последовательно в каждом канале). Наряду со снижением тепловой нагрузки такая геометрия обеспечивала повышение эффективности преобразования за счет увеличения суммарной длины взаимодействия с одновременной компенсацией угловой расходимости и диафрагменного апертурного эффекта.

Сечения пучков на входе в кристаллы первых каскадов имели вид вертикально ориентированных овалов с длинами осей примерно 4 и 10 мм каждый, что при размерах поперечного сечения кристаллов 6 × 12 мм обеспечивало ввод излучения в них без потерь. Излучение было поляризовано вертикально (вектор  $E$ ).

После прохождения через два каскада преобразования пучки, содержащие излучение на двух длинах волн – 4.775 мкм (вторая гармоника) и 9.55 мкм (накачка), выходили из блока ГВГ, объединялись зеркалами в единый пучок и через фильтр из MgF<sub>2</sub>, отсекающий 9-микронное излучение, направлялись на измеритель энергии.

#### 5. Результаты экспериментов по ГВГ

Все серии экспериментов по ГВГ проводились в режиме с включенной системой охлаждения и стабилизации температуры нелинейных кристаллов. При частотах следования импульсов до 200 Гц энергия излучения накачки на длине волны 9.55 мкм на входе в блок ГВГ с учетом потерь на оптических элементах формирования и деления составляла примерно 0.4 Дж, т.е. на первый кристалл каждого из параллельных каналов падал пучок с энергией 0.2 Дж (средняя плотность энергии ~0.5 Дж/см<sup>2</sup>). При частотах 300–500 Гц энергия на входе блока ГВГ была на 30%–40% меньше (рис.4).

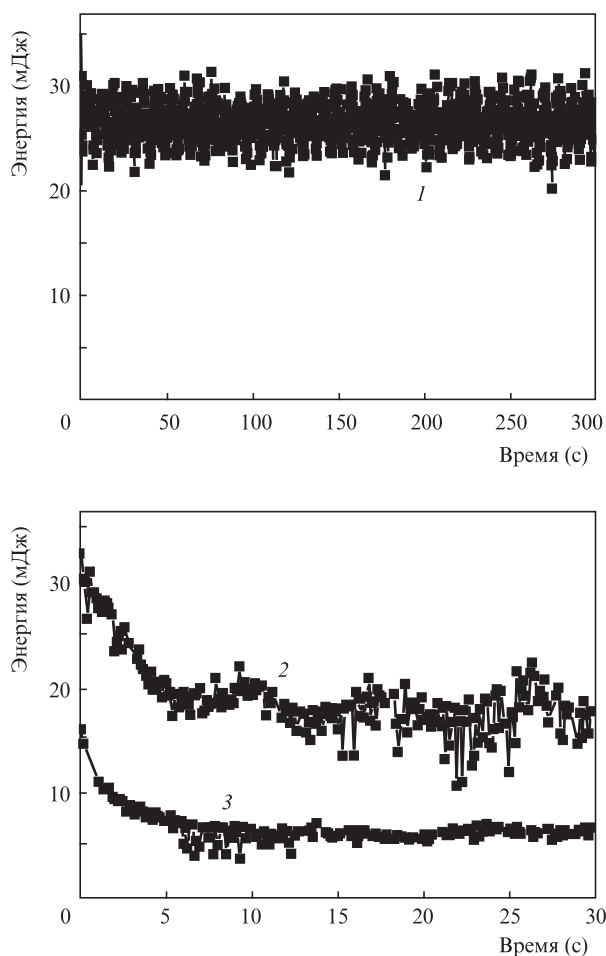


Рис.7. Динамика энергии импульсов излучения второй гармоники при частотах их следования 10 (1), 100 (2) и 200 Гц (3).

Полная энергия излучения второй гармоники в режиме однократных импульсов составляла 40–50 мДж (с одинаковым вкладом от каждого канала), что соответствовало эффективности взаимодействия по энергии 10%–12%. При этом основной вклад в преобразование давали первые из последовательно установленных кристаллов в каждом каскаде (80%–85%).

Некоторые результаты по ГВГ излучения лазера в импульсно-периодическом режиме представлены на рис.7. При частотах следования импульсов 10–50 Гц система работала с сохранением выходной энергии импульсов излучения второй гармоники на уровне 25–30 мДж в течение достаточно длительного времени (более 5 мин на рис.7,а), что соответствовало средней мощности до 1.5 Вт.

При частотах, превышающих 100 Гц, энергия импульсов второй гармоники за первые 3–5 с снижалась и далее стабилизировалась на уровне тем более низком, чем выше была частота следования импульсов. Так, для 100 Гц этот уровень составлял 15–20 мДж, для 200 Гц он не превышал 5–7 мДж (рис.7), а для 400 Гц был равен 3–5 мДж. Во всех случаях максимальный уровень средней мощности 1.5–2 Вт сохранялся примерно одним и тем же.

Отметим, что при частотах более 200 Гц через несколько десятков секунд, как правило, наблюдалось неконтролируемое повреждение кристаллов (обычно на входной поверхности кристалла первого каскада). По этой причине на повышенных частотах мы всегда прекращали работу через 10–15 с. Поврежденные кристаллы

можно было восстановить в результате повторных обработки поверхности и нанесения покрытия.

## 6. Обсуждение результатов

Эксперименты по ГВГ показали, что достаточно высокая эффективность преобразования (10%–12%) имела место лишь в режиме с низкими частотами следования лазерных импульсов. При повышении частоты и мощности падающего на кристаллы излучения наблюдалось заметное снижение эффективности процесса ГВГ (рис.7) за время порядка нескольких секунд. Основной причиной такого снижения был нагрев кристаллов, приводящий к нарушению условий синхронизма в них. Для количественных оценок влияния нагрева на эффективность процесса ГВГ проводились двухступенчатые численные расчеты.

Вначале рассчитывалось температурное поле в кристалле путем решения стационарной теплофизической задачи (без учета генерации гармоники) применительно к конструкции теплоотвода и параметрам наших экспериментов. Определялась максимальная температура кристаллов и ее распределение по различным направлениям при фиксированной температуре охлаждаемых граней, равной 320 К. Указанная температура выбрана из условия достижения устойчивой и стабильной работы схемы термостатирования.

Как следует из результатов расчета, иллюстрируемых рис.8, в кристаллах имело место сильно неравномерное тепловое поле с максимумом температуры на оси лазерного пучка вблизи входной грани и ее спадом в поперечном (к охлаждаемым граням) и в продольном (по ходу распространения лазерного пучка) направлениях.

При мощности излучения на входе первого кристалла 100 Вт поглощенная в нем мощность составила  $\sim 35$  Вт. Максимальная температура наблюдается вблизи входной грани кристалла и равна 350 К, т.е. перепад температур между точкой кристалла с максимальной температурой и его гранями, находящимися в контакте с теплоотводом, составляет 30 К. Температура в центре выходной грани кристалла равна 338 К. Для второго кристалла соответствующие значения поглощенной мощности и мак-

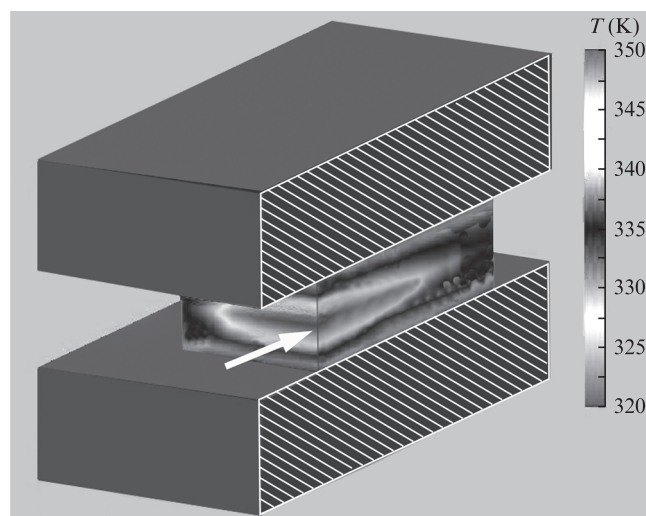


Рис.8. Распределение температуры  $T$  по сечению первого нелинейного кристалла (показатель поглощения  $0.4 \text{ см}^{-1}$ ). Стрелкой показано направление распространения излучения накачки. Цветной вариант рис.8 помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

симального перепада температур составляют 25 Вт и 20 К. Следует отметить, что при увеличении поглощенной кристаллом мощности распределение температуры изменялось только количественно.

Нагрев нелинейных кристаллов, в свою очередь, вызывает изменение показателя преломления и наведенную фазовую расстройку процесса ГВГ. По значениям производных  $\partial n_o/\partial T$  и  $\partial n_e/\partial T$  [17,18] была определена зависимость изменения фазовой расстройки  $\Delta k$  от температуры ( $\partial \Delta k/\partial T = 0.11 \pm 0.01 \text{ см}^{-1}/\text{К}$ ). Для указанных выше перепадов температур оценка разности значений  $\Delta k$  по поперечному сечению в центре входной грани и у боковой поверхности кристалла составляет  $3.3 \text{ см}^{-1}$ , а продольное изменение  $\Delta k$  по оси пучка –  $1.32 \text{ см}^{-1}$ . Это приводит к существенному падению эффективности преобразования.

На рис.9 представлены результаты второй стадии расчетов, где на основе модифицированного геометрико-оптического метода (подробнее см. в [10,19]) с учетом полученного распределения температуры и влияния добавочных фазовых расстроек рассчитывалась эффективность ГВГ для двухкаскадной геометрии в зависимости от мощности, поглощенной кристаллами. Параметры взаимодействия были приближены к соответствующим параметрам экспериментов, описанных выше. Для сравнения результатов расчет проводился для нескольких длин кристаллов и двух значений показателя поглощения кристаллов на длине волны лазерного излучения – 0.2 и  $0.4 \text{ см}^{-1}$ . Показатель поглощения на длине волны второй гармоники принимался равным  $0.02 \text{ см}^{-1}$ .

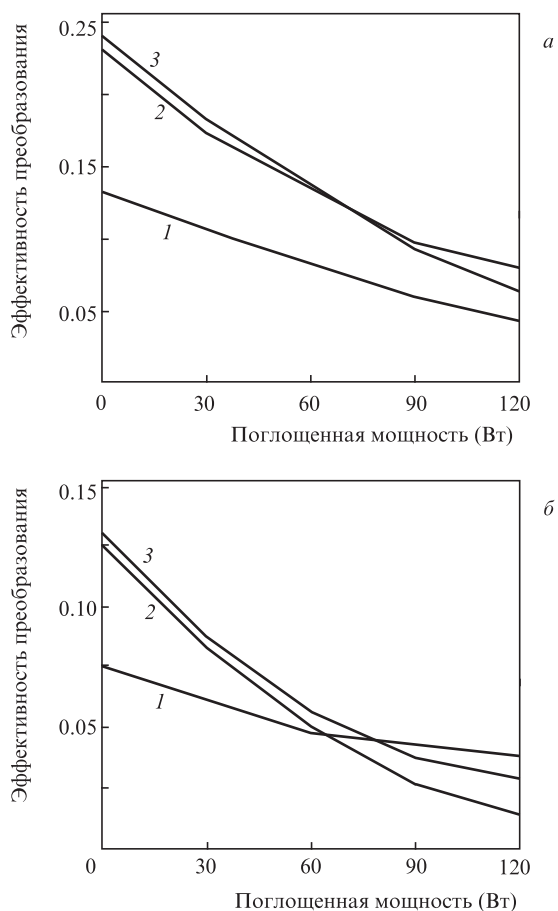


Рис.9. Результаты расчета эффективности ГВГ для двух последовательно установленных кристаллов длиной 0.5 (1), 1 (2) и 1.5 см (3) при показателях поглощения 0.2 (а) и  $0.4 \text{ см}^{-1}$  (б).

Из рис.9 видно, что при показателе поглощения  $0.4 \text{ см}^{-1}$ , характерном для применяемых в настоящей работе кристаллов, эффективность ГВГ была почти вдвое меньше, чем в случае, если бы показатель поглощения кристаллов удалось уменьшить до  $0.2 \text{ см}^{-1}$ . Для всех кривых характерно наличие сильной зависимости эффективности ГВГ от нагрева кристаллов, поэтому приходится констатировать, что именно большое поглощение нелинейных кристаллов ZnGeP<sub>2</sub> ограничивало возможности реализации эффективной ГВГ излучения импульсно-периодического ТЕА CO<sub>2</sub>-лазера в наших экспериментах.

Отметим, что ситуация может быть улучшена при применении двухконтурной автоматической системы управления нелинейным кристаллом. В настоящей работе автоматически поддерживалась только температура на боковых гранях кристаллов (первый контур). Корректировка направления синхронизма проводилась при ручном управлении шаговым двигателем с последующей фиксацией ориентации кристалла.

Неравномерный нагрев кристалла по сечению требует дополнительной «динамической» подстройки синхронизма (второй контур). Второй контур должен отслеживать интенсивность излучения второй гармоники, поддерживая ее значение в заданном интервале путем изменения ориентации кристалла.

При выборе алгоритма работы необходимо учесть, что большое различие показателей поглощения на длинах волн основной и второй гармоник (почти в 20 раз) создает дополнительные проблемы для термостабилизации кристалла. Действительно, в процессе установки нагретого лазерным излучением кристалла на новое направление синхронизма повышаются эффективность преобразования и интенсивность излучения второй гармоники, что, в свою очередь, приводит к снижению температуры кристалла из-за меньшего поглощения излучения второй гармоники. Синхронизм вновь нарушается, и температура кристалла меняется в волнообразном процессе, постоянная времени которого, по нашим оценкам, может составлять несколько секунд.

В заключение отметим, что интерес к применению кристаллов ZnGeP<sub>2</sub> в нелинейно-оптических преобразователях различных конфигураций для создания лазерных излучателей в спектральной области 3–5 мкм в последние годы не ослабевает. Многолетний опыт подобных исследований и опыт выращивания кристаллов имеется и в России [3,4,10,13–15,19–21], что позволяет надеяться на дальнейшее успешное развитие работ в данном направлении.

## 7. Заключение

Описан импульсно-периодический ТЕА CO<sub>2</sub>-лазер, адаптированный для ГВГ в кристалле ZnGeP<sub>2</sub>. При работе на одной линии генерации с длиной волны 9.55 мкм на смеси газов CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He = 5:1:24 энергия импульсов составляла 0.3–0.5 Дж при частотах их следования до 500 Гц. Длительность импульса генерации на полувывоте была равна ~200 нс. Лазер может работать непрерывно в течение длительного времени; для ГВГ время работы было ограничено 10 минутами.

Продемонстрирована возможность ГВГ на длине волны 4.775 мкм при средней мощности до 1.5–2 Вт. При частотах следования 10–50 Гц система в течение ~5 мин работала с сохранением выходной энергии импульсов излучения второй гармоники на уровне 25–30 мДж. При больших частотах

тах следования импульсов происходило быстрое уменьшение средней мощности и снижалась надежность работы блока ГВГ из-за риска повреждения кристаллов.

Авторы выражают глубокую благодарность А.И.Грибенюкову (ООО «Лаборатория оптических кристаллов», Томск) за помощь в поставке нелинейных кристаллов и полезные обсуждения результатов работы, С.К.Вартапетову, С.Н.Сергееву, В.Г.Лужнову (ООО «Оптосистемы», Троицк) за поставку и настройку высоковольтных источников питания, В.Д.Бочкову (ООО «Импульсные технологии», Рязань) за поставку тиратронов. Авторы признательны также Н.А.Романову, А.Ю.Родионову и В.П.Калинину за помощь в проведении работы и полезные дискуссии.

- Eckardt R.C., Fan Y.X., Byer R.L., Route R.K., Feigelson R.S., van der Laan J. *Appl. Phys. Lett.*, **47**, 786 (1985).
- Mason P.D., Jackson D.J., Gorton E.K. *Opt. Commun.*, **110**, 163 (1994).
- Горобец В.А., Петухов В.О., Точицкий С.Я., Чураков В.В. *Оптический журн.*, **66**, 62 (1999).
- Андреев Ю.М., Баранов В.Ю., Воеводин В.Г., Гейко П.П., Грибенюков А.И., Изюмов С.В., Козочкин С.М., Письменный В.Д., Сатов Ю.А., Стрельцов А.П. *Квантовая электроника*, **14**, 2252 (1987).
- Isaenko L., Krinitsin P., Vedenyapin V., Yelissev A., Merkulov A., Zondy J.J., Petrov V. *Cryst. Growth Des.*, **5**, 1325 (2005).
- Абдуллаев Г.Б., Аллахвердиев К.Р., Карасев М.Е., Конов В.И., Кулевский Л.А., Мустафаев Н.Б., Пашинин П.П., Прохоров А.М., Стародумов Ю.М., Чаплиев Н.И. *Квантовая электроника*, **16**, 757 (1989).
- Auyeung R.C.Y., Zielke D.M., Feldman B.J. *Appl. Phys. B*, **48**, 293 (1989).
- Menyuk N., Iseler G.W., Mooradian A. *Appl. Phys. Lett.*, **29**, 422 (1976).
- Churnside J.H., Wilson J.J., Andreev Yu.M., Gribenyukov A.I., Shubin S.F., Dolgii S.I., Zuev V.V., in *NOAA Technical Memorandum ERL WPL-224* (Boulder, USA, 1992, pp 1–18).
- Ковальчук Л.В., Горячкин Д.А., Сергеев В.В., Калинин А.Г., Калининцев Н.А., Калинин В.П., Грибенюков А.И. *Оптический журн.*, **79**, 14 (2012).
- Baranov V.Y., Dyad'kin A.P., Maluta D.D., Kuzmenko V.A., Pigulskiy S.V., Mezhevov V.S., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4165**, 314 (2000).
- Васильцов В.В., Галушкин М.Г., Голубев В.С., Низьев В.Г., Панченко В.Я., Забелин А.М., Завалов Ю.Н. *Перспективные материалы*, №2, 60 (1999).
- Верозубова Г.А., Грибенюков А.И. *Кристаллография*, **53**, 175 (2008).
- Грибенюков А.И. *Оптика атмосферы и океана*, **15**, 71 (2002).
- Андреев Ю.М., Бадиков В.В., Воеводин В.Г., Гейко Л.Г., Гейко П.П., Иващенко М.В., Карапузиков А.И., Шерстов И.В. *Квантовая электроника*, **31**, 1075 (2001).
- Shay J.L., Wernick J.H., in *The Science of the Solid State* (New York: Pergamon Press, 1975, vol.7).
- Kato K. *Appl. Opt.*, **36**, 2506 (1997).
- Bod G.D., Buehler E., Storz F.G. *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 301 (1971).
- Калинцев А.Г., Калининцев Н.А., Серебряков В.А., Копыльцов А.В. *Тезисы докл. XIV междунар. конф. «Оптика лазеров»* (СПб., 2010).
- Андреев Ю.М., Воеводин В.Г., Грибенюков А.И., Зырянов О.Я., Ипполитов И.И., Морозов А.Н., Соснин А.В., Хмельницкий Г.С. *Квантовая электроника*, **11**, 1511 (1984).
- Андреев Ю.М., Ионин А.А., Киняевский И.О., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Ланский Г.В., Шайдуко А.В. *Квантовая электроника*, **43**, 139 (2013).