

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 621.373.8

ПИКОСЕКУНДНАЯ ИК ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОГО CO₂-ЛАЗЕРА

© 2009 г. А. А. Агейчик; В. Н. Алексеев, канд. физ.-мат. наук; В. И. Венглюк;
В. М. Громовенко, канд. техн. наук; М. С. Егоров; В. И. Королев, канд. физ.-мат. наук;
А. Н. Малинин; С. В. Остапенко; Ю. А. Резунков, доктор техн. наук; А. Л. Сафонов;
Г. А. Соколова; В. В. Степанов, канд. физ.-мат. наук

Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов,
г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

E-mail: yuri@sbor.net

Описана пикосекундная лазерная система, построенная на основе гибридного CO₂-лазера с использованием метода оптически управляемых полупроводниковых ключей с длительностью импульсов от 100 пс до 300 нс с последующим преобразованием излучения в нелинейных кристаллах за счет процессов генерации второй гармоники. В качестве нелинейных кристаллов используются селеногаллат серебра AgGaSe₂ и дифосфид цинка-германия ZnGeP₂. В установке осуществляется двухкаскадное преобразование излучения пикосекундного CO₂-лазера с длиной волны 9,4–10,6 мкм в лазерное излучение с длинами волн 4,7–5,3 мкм с эффективностью 0,3%–0,5%, и излучения 4,7–5,3 мкм в излучение 2,4–2,65 мкм с эффективностью 8%. Общая эффективность преобразования составляет 4×10^{-4} или 0,04% при энергии выходного импульса до 35 мкДж.

Ключевые слова: гибридный лазер, вынужденное комбинационное рассеяние, нелинейный кристалл, двухкаскадное преобразование.

Коды OCIS: 140.3438

Поступила в редакцию 06.03.2009

Введение

Методы генерации лазерного излучения с короткой длительностью импульса (пикосекунды, фемтосекунды) в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах основаны, как правило, на chirpingании импульсов с помощью фазовой модуляции светового поля при его самовоздействии в нелинейной среде с последующей компенсацией “ chirpa ” в среде с линейной дисперсией [1]. Для генерации коротких импульсов в среднем ИК диапазоне используются другие методы [2], так как применение компрессии импульса в традиционном виде в этом спектральном диапазоне невозможно из-за отсутствия световодов необходимого качества.

Одним из таких методов является преобразование частоты лазерного излучения с помощью вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в нелинейных кристаллах типа прустита (Ag₃AsS₃) или тиогаллата серебра (AgGaS₂) [3, 4].

В качестве источника излучения накачки обычно используется излучение короткоимпульсного YAG:Nd-лазера. Однако в этом случае нелинейные кристаллы должны удовлетворять достаточно жестким требованиям к области прозрачности материала и условиям фазового синхронизма из-за того, что длины волн излучения накачки и сигнальной волны сильно разнесены. Эти условия существенно влияют на квантовую эффективность преобразования частоты излучения.

В работе [5] впервые была предложена CO₂-лазерная система, в которой короткий импульс формируется за счет его “вырезания” из длинного (около микросекунды) импульса гибридного CO₂-лазера с помощью оптически управляемых полупроводниковых ключей. При этом передний фронт импульса формируется при отражении от одного “плазменного зеркала”, а задний фронт – при прохождении через полупроводник, на поверхности которого плазменное зеркало включается с задержкой относительно первого. Это

позволяет формировать импульсы ИК диапазона длительностью от единиц до сотен пикосекунд. Развитие метода оптически управляемых полупроводниковых ключей привело к созданию [6] первой в мире пикосекундной тераваттной CO₂-лазерной установки. Такие установки могут использоваться для решения ряда фундаментальных и прикладных исследований, связанных с ускорением элементарных частиц в поле мощной световой волны, туннельной ионизацией газов, управлением молниевым разрядом в атмосфере [7].

В данной работе рассматривается пикосекундная лазерная система, построенная на основе гибридного CO₂-лазера с использованием метода оптически управляемых полупроводниковых ключей и с последующим преобразованием излучения в нелинейных кристаллах за счет процессов генерации второй гармоники (ГВГ). В качестве кристаллов для ГВГ используются селеногаллат серебра AgGaSe₂ и дифосфид цинка-германия ZnGeP₂. Такой подход позволяет осуществить преобразование излучения пикосекундного CO₂-лазера с плавной перестройкой длины волны в диапазоне 9,4–10,6 мкм в лазерное излучение с длинами волн в диапазонах от 4,7 мкм до 5,3 мкм и от 2,4 мкм до 2,65 мкм.

Описание пикосекундной CO₂-лазерной установки

В основе лазерной установки – генератор инфракрасных лазерных импульсов на базе гибридного одночастотного одномодового CO₂-лазера с перестраиваемой длиной волны излучения 9,4–10,6 мкм.

В состав установки входят (рис. 1): гибридный CO₂-лазер, твердотельный пикосекундный Nd-лазер для управления полупроводниковыми ключами, блок полупроводниковых (германьевых) ключей для формирования пикосекундного импульса, аппаратура регистрации параметров излучения лазера.

Гибридный CO₂-лазер. Гибридный CO₂-лазер (ГЛ) формирует лазерный импульс с длительностью 300 нс и мощностью излучения 0,3 МВт. В состав ГЛ (рис. 1) входят две газоразрядные камеры (ГРК). Первая камера (3) – ТЕА-секция или камера атмосферного давления (КАД) – работает при атмосферном или близком к нему давлении. Вторая камера (4) – камера низкого давления (КНД) – работает при давлении лазерной смеси около 9 Тор. В качестве камеры низкого давления использована трубка промышленного лазера

ЛГИ-50 с параметрами: диаметр активной среды – 2 см, длина активной среды – 1 м.

В гибридной схеме лазера обе разрядные камеры размещаются в едином резонаторе. В результате на спектральный контур усиления атмосферной секции (полуширина 3 ГГц) накладывается узкий контур усиления секции низкого давления (около 50 МГц). При зарождении генерации в резонаторе преимуществом обладает только одна продольная мода вблизи центра выбранной линии генерации CO₂, чем и обеспечивается одночастотность выходного излучения и плавность формы импульса генерации.

Управление длиной волны излучения по линиям *P*- и *R*-ветви молекулы CO₂ обеспечивается дифракционной решеткой (5) (100 штр/мм), используемой в качестве выходного зеркала резонатора.

Резонатор собирается из оптических элементов (1, 2, 5) по устойчивой схеме для получения плавного профиля интенсивности в поперечном сечении выходного пучка, близкого к гауссово профилю. Для получения максимального резонаторного объема без нарушения условий формирования одночастотного излучения база резонатора выбрана равной 4 м, для которой поперечный размер нулевой моды генерации составляет 15 мм. Увеличение базы больше 5 м нежелательно из-за возможности нарушения одночастотности излучения, так как с ростом базы резонатора уменьшается частотный интервал между продольными модами и в контур усиления секции низкого давления может попасть больше одной моды.

Управление временем заряда и разряда емкостных накопителей энергии импульсного модулятора камеры атмосферного давления (3) осуществляется от блока синхронизации. Длительность объемного горения разряда в КАД не превышает 1 мкс. Применяемая рабочая смесь газов CO₂:N₂:He = 1:1:8. Напряженность электрического поля в объемном самостоятельном разряде составляет 7,8 кВ/см. При этом в разряд может вкладываться удельная энергия до 150 Дж/литр. Пиковая мощность в импульсе излучения ГЛ составляет 0,35 МВт в одночастотном режиме и 0,61 МВт в режиме свободной генерации (с отключенным электропитанием секции низкого давления). При одночастотной генерации задающего генератора (ЗГ) длительность импульса по уровню 0,5 составляет 300 нс.

Для выполнения требований по совпадению временного положения импульса излучения Nd-лазера, управляющего полупроводниково-

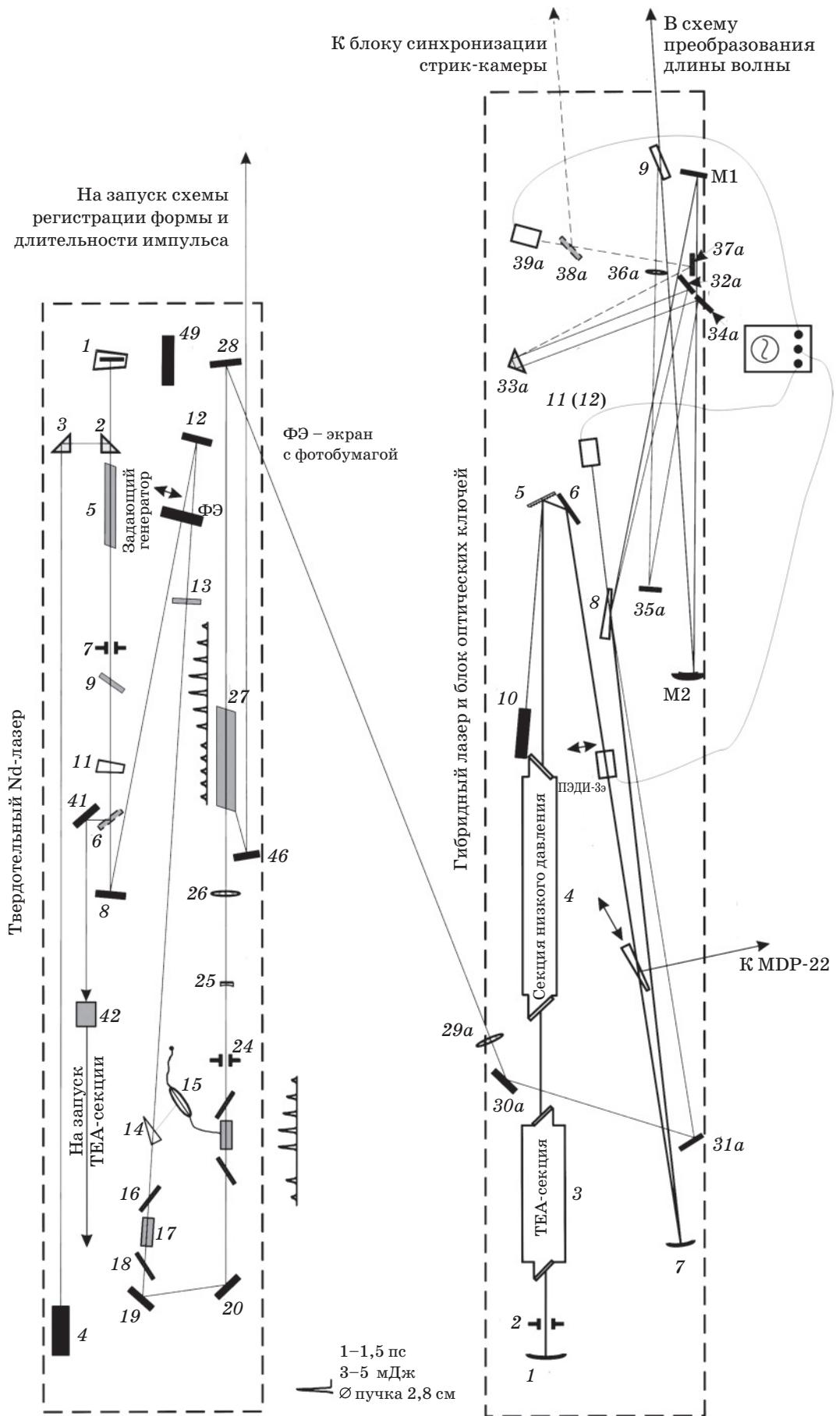


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема лазерной установки (обозначения в тексте статьи).

ми ключами, и максимума импульса излучения гибридного CO₂-лазера была разработана схема синхронизации с запуском КАД импульсом лавинного транзистора (42), соответствующим моменту начала формирования пучка генерации в задающем генераторе Nd-лазера. Суммарная задержка импульса генерации составляет 3,2 мкс.

Твердотельный Nd-лазер. Твердотельный лазер на неодимовом стекле (Nd-лазер) обеспечивает управление работой полупроводниковых ключей, с помощью которых из импульса гибридного CO₂-лазера вырезается лазерный импульс с переменной длительностью – от 10 пс до 300 пс. В состав Nd-лазера входят задающий генератор с пассивной синхронизацией мод, система изоляции лазерного усилителя, система вырезания одиночного импульса из пучка, система формирования пространственного профиля пучка, лазерный усилитель, система юстировки.

Задающий генератор Nd-лазера (ЗГЛ) построен на активном элементе (5) из фосфатного неодимового стекла ГЛС-22 Ø 6,3×75 мм со склонными под углом Брюстера торцами, который помещен в квантрон К104Г. Брюстеровские скосы торцов уменьшают плотность светового пучка в активной среде в 1,6 раза и потеря энергии в резонаторе. Режим работы – пассивная самосинхронизация мод (ПСМ) резонатора, позволяющая при использовании насыщающегося поглотителя с малым временем релаксации получить наиболее короткие длительности импульсов – единицы пикосекунд и меньше.

Система вырезания одиночного импульса выделяет один импульс из пучка импульсов. В состав системы входит разрядник высокого давления с лазерным поджигом (15) и ячейка Покельса (22) с двумя поляризаторами (21, 23). Выбор номера выделяемого импульса из пучка осуществляется подборкой ослабляющих фильтров перед разрядником высокого давления.

Система формирования пространственного профиля пучка включает в себя диафрагму (24) и расширяющий телескоп Галилея (25–26). Диафрагма вырезает основной керн Эйри распределения пучка (5 мм). Увеличение телескопа – 5.

В качестве лазерного усилителя используется активный элемент (27) Ø 30×630 мм в четырехламповом осветителе. Усилитель однопроходный, с четвертьвольновой развязкой. Далее, пучок диаметром 25 мм транспортируется в зону расположения полупроводниковых ключей. Его диаметр уменьшается с помощью длиннофокусной фокусирующей линзы (29а) до требуемого размера.

Система юстировки Nd-лазера включает в себя непрерывный лазер на алюмо-иттриевом гранате с диодной накачкой (мощность 50 мВт) (4) и систему призм (3, 2) для чввода пучка в диафрагму (7) резонатора ЗГЛ. Система юстировки позволяет с достаточно высокой точностью юстировать всю систему и совмещать зоны попадания на полупроводниковые ключи излучения гибридного CO₂-лазера и Nd-лазера.

Блок полупроводниковых ключей. Блок ключей (оптические элементы 8, 9 и 31а–39а) позволяет формировать короткие импульсы ИК излучения с длиной волны 10 мкм и контрастом импульса 10⁵.

Принцип действия ключа основан на изменении коэффициента отражения полупроводникового материала под действием излучения Nd-лазера с пикосекундной длительностью импульса.

Работа блока заключается в следующем. Излучение CO₂-лазера с поляризацией в горизонтальной плоскости попадает на клиновидную пластину из Ge (8) под углом Брюстера. В этих условиях (р-поляризованное излучение) отражение отсутствует. В момент достижения максимальной мощности излучения CO₂-лазера в область падения на Ge излучения CO₂-лазера направляется импульс Nd-лазера пикосекундной длительности. Этот импульс вызывает в тонком приповерхностном слое полупроводника переходы электронов в зону проводимости, благодаря которым материал на некоторое время становится высокоотражающим для излучения с длиной волны 10,6 мкм. Так формируется передний фронт 10-ти мкм излучения (полупроводниковый оптический ключ (8) работает на отражение). Задний фронт импульса формируется при прохождении второго полупроводника из Ge (9), на который импульс Nd-лазера подается с заданной временной задержкой.

Для реализации метода управляемых полупроводниковых ключей в разработанной лазерной системе выполняются следующие дополнительные условия:

- обеспечена высокая степень поляризации излучения гибридного CO₂-лазера (не хуже 10⁶ по интенсивности),

- отклонение угла падения пучка на германьевую пластину от угла Брюстера не превышает 0,5 мрад,

- отклонение волнового фронта излучения CO₂-лазера от плоского составляет не более 0,5 мрад, для выполнения этого требования перетяжка гауссового пучка гибридного лазера с помощью сферического зеркала изображается в плоскость Ge-клина,

— обеспечено совпадение плоскости поляризации выходного пучка гибридного CO₂-лазера и плоскости падения на Ge-клинов с точностью не хуже 1 мрад.

Аппаратура регистрации длительности пикосекундных лазерных ИК импульсов

Для регистрации длительности формируемых пикосекундных инфракрасных импульсов используется метод ап-конверсии [8] с регистрацией видимого света электронно-оптической камерой типа К-008 с времененным разрешением не хуже 20 пс.

Методом ап-конверсии преобразование излучения с длиной волны 10,6 мкм в видимый свет осуществляется в два этапа (рис. 2). На первом

этапе в кристалле GaSe (12) излучение с выхода лазерной системы смешивается с излучением вспомогательного твердотельного лазера (2) с длиной волны 1,06 мкм. На втором этапе с выхода первого кристалла излучение суммарной частоты вместе с вспомогательным излучением поступает на другой кристалл — титанил-фосфат калия (KTiOPO₄) (13), где преобразуется в видимый свет и далее подается в объектив стрик-камеры (15). Развертка стрик-камеры выводится непосредственно на экран управляющего компьютера. Компьютер обрабатывает полученные сигналы и выдает информацию о форме диагностируемого импульса в виде денситограммы (рис. 3).

В экспериментах было показано, что при использовании одного полупроводникового ключа, когда длительность выходного импульса опреде-

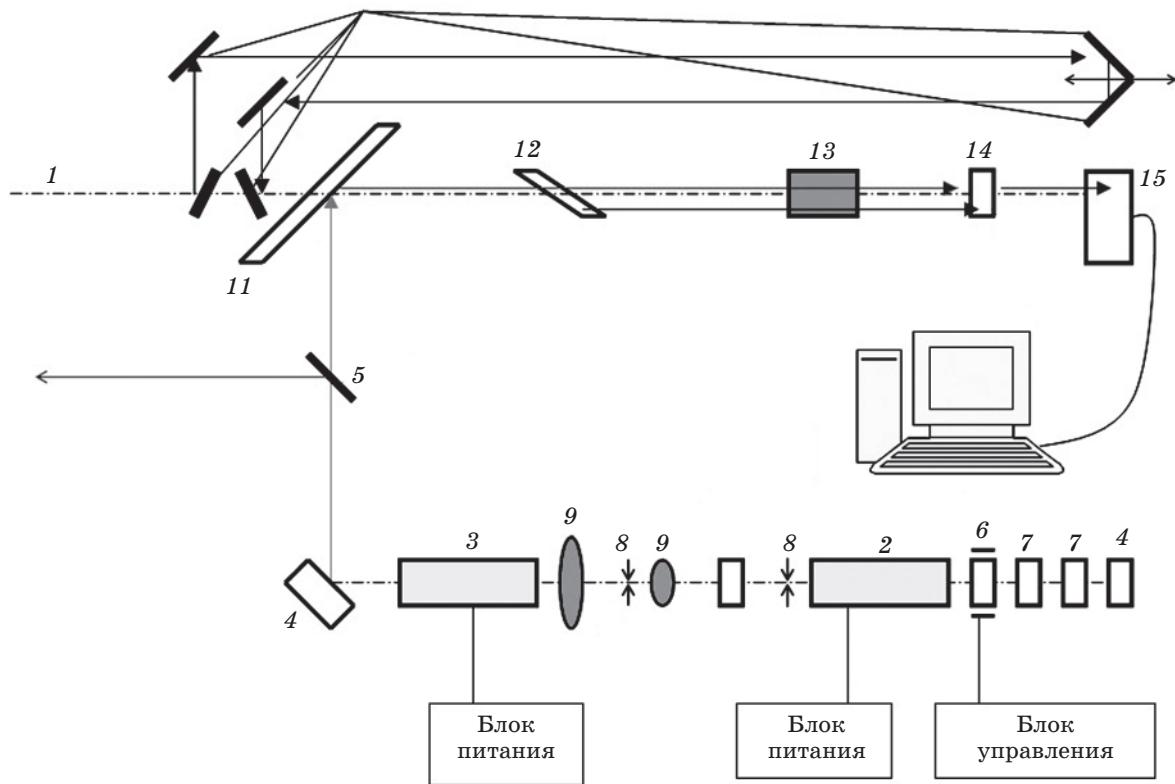


Рис. 2. Общий вид схемы измерения длительности импульса излучения на выходе задающего генератора с использованием метода двухкаскадного преобразования излучения с $\lambda = 10,6$ мкм в излучение с $\lambda = 0,506$ мкм (ап-конверсии). 1 – ИК импульс, 2 – кванtron генератора одномодовых одночастотных линейно поляризованных 30 нс импульсов (1,06 мкм), 3 – кванtron усилителя, 4 – глухие зеркала (1,06 мкм), 5 – полуупрозрачные зеркала (1,06 мкм), 6 – электрооптический затвор-модулятор добротности с блоком управления, 7 – интерферометры Фабри–Перо, 8 – жесткие диафрагмы, 9 – линзы воздушного пространственного фильтра, 10 – глухие зеркала линии оптической задержки импульса излучения 10,6 мкм, 11 – зеркало сведения сигнального пучка и пучка излучения накачки (прозрачное при $\lambda = 10,6$ мкм и отражающее при $\lambda = 1,06$ мкм), 12 – первый каскад преобразования сложением частот (пластина из GaSe), 13 – второй каскад преобразования (кристалл KTP), 14 – светофильтр, пропускающий излучение 0,506 мкм и поглощающий остальные составляющие, 15 – стрик-камера – узел измерения длительности и формы пикосекундных импульсов.

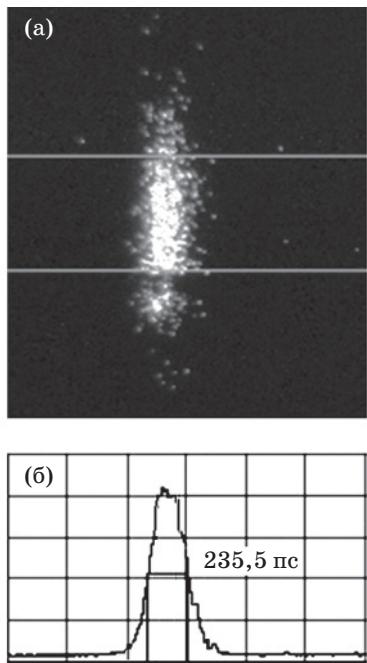


Рис. 3. Кадр (а), зарегистрированный стриккамерой. Развертка по горизонтали – 3 нс/см. Задний фронт импульса ограничен оптическим ключом. Денситограмма кадра (б), изображенного на рис. 3а.

ляется только физическими свойствами герmania и параметрами управляющего импульса Nd-лазера, формируется импульс с достаточно плоской вершиной и длительностью на полувысоте порядка 500 пс. Постоянная времени выключения ключа, оцененная по срезу импульса, составляет примерно 300 пс, а длительность плоской части около 330 пс. Использование второго ключа обеспечивает снижение длительности среза формируемого импульса до уровня длительности фронта (рис. 3). Минимально зафиксированная длительность импульса в экспериментах составила примерно 150 пс по полувысоте и ограничивалась формой импульса Nd-лазера.

Двухступенчатое преобразование излучения CO₂-лазера за счет процессов ГВГ в нелинейных кристаллах

Для ГВГ излучения CO₂-лазера (для обеих ступеней преобразования) был выбран вариант фазового синхронизма 1-го типа как наиболее легко реализуемый и дающий относительно высокий КПД преобразования. При этом смешиваются волны с одинаковой поляризацией (фактически используется одна волна). Для отрицательного

кристалла первой ступени – это обыкновенные волны, для положительного кристалла второй ступени – необыкновенные. Для генерации второй гармоники излучения CO₂-лазера был выбран AgGaSe₂, а четвертой гармоники – ZnGeP₂. Оптические, теплофизические и другие свойства этих кристаллов подробно описаны в работе [9].

Для получения ГВГ необходимо сориентировать кристаллы относительно падающего пучка так, чтобы обеспечить необходимый угол синхронизма. Установка угла фазового синхронизма проводится путем варьирования пространственного угла наклона кристалла по отношению к падающему пучку и нахождения положения, соответствующего максимальной эффективности преобразования. Определение коэффициента преобразования (эффективности) проводится измерением соотношения энергии преобразованного излучения по отношению к энергии падающего пучка с введением соответствующих коэффициентов, учитывающих отражение на поверхностях кристалла и ослабителей (фильтров), присутствующих в оптической схеме.

Исследования проводились при длительности импульса излучения 300 нс. Длина используемого кристалла равна 20 мм при квадратном сечении 8×8 мм, угол среза $\theta_{\text{ср}} = 55,3^\circ \pm 0,5^\circ$ (угол между нормалью к поверхности кристалла и оптической осью кристалла Z) соответствовал углу синхронизма при нормальному падении на переднюю грань кристалла излучения с длиной волны 10,6 мкм. Кристалл был изготовлен в ООО “ЛЕА”, Новосибирск.

На рис. 4 приведена схема эксперимента по получению ГВГ излучения с $\lambda = 9,55$ мкм (первая ступень преобразования). Излучение гибридного CO₂-лазера проходит (справа налево) через блок ослабителей (1), после чего отраженный от передней грани кристалла серебра (2)

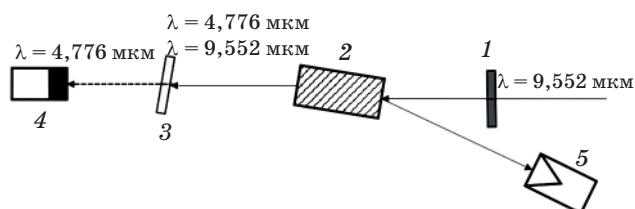


Рис. 4. Схема эксперимента по ГВГ с селеногаллатом серебра и длиной волны излучения 9,5525 мкм. 1 – блок ослабителей, 2 – кристалл селеногаллата серебра, 3 – сапфировый фильтр, 4 – пироэлектрический приемник J3-09, 5 – пироэлектрический приемник ПЭДИ.

пучок попадает на пироэлектрический приемник ПЭДИ (5). Прошедший пучок, представляющей собой излучение с двумя длинами волн – исходной волны накачки и второй гармоники, проходит через сапфировую пластину (3), где накачка фильтруется, а вторая гармоника попадает в пироэлектрический приемник J3-09 (4).

Для выполнения условий генерации второй гармоники с *ooe*-типом взаимодействия исходное излучение имело горизонтальную поляризацию. Главная плоскость кристалла располагается вертикально вдоль направления распространения пучка. Теоретический расчет для длины волны $\lambda = 9,55$ мкм дает угол $\theta_c = 49,6^\circ$, который хорошо согласуется с экспериментально измеренным углом [9]. Отметим, что расчетный угол синхронизма для рабочей длины волны 10,591 мкм, получаемый по приведенным формулам, составляет $55,46^\circ$, что также хорошо совпадает с данными работы [9] и паспортными данными исследуемого кристалла ($\theta_c = 55,3^\circ$). Для ориентации кристалла использовался экран с отверстием для падающего пучка юстировочного Не-Не-лазера. Угол установки вычислялся и выставлялся из простого геометрического построения.

Результаты экспериментов по нахождению максимальных коэффициентов преобразования η излучения на длине волны 9,55 мкм при изменении угла падения излучения на кристалл приведены на рис. 5, а в таблице представлены экспериментальные значения максимальных η и их теоретические оценки при различной энергии лазерного импульса. Расчеты проводились по формуле для ГВГ из работы [10]

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{2^7 \pi^5 d^2 L^2 P_1}{c n_1^2 n_2 \lambda_2^2 A} \operatorname{sinc}^2\left(\frac{|\Delta k|L}{2}\right). \quad (1)$$

Здесь в системе CGS: $[d] = \text{см}/\text{дин}^{1/2}$, $[L] = \text{см}$, $[P] = \text{эрт}/\text{с}$, $[\lambda] = \text{см}$, $[A] = \text{см}^2$, $[c] = 3 \times 10^{10} \text{ см}/\text{с}$. Из формулы видно, что эффективность преобразования пропорциональна интенсивности излучения на кристалле, квадрату длины кристалла, квадрату эффективной нелинейности (“параметру качества” $d^2/(n_1^2 n_2)$) и величине

$$\operatorname{sinc}^2\left(\frac{|\Delta k|L}{2}\right) = \sin^2\left(\frac{|\Delta k|L}{2}\right) / \left(\frac{|\Delta k|L}{2}\right)^2, \quad (2)$$

характеризующей влияние волновой расстройки на эффективность преобразования. Для приближенных расчетов можно принять, что расстройка мала и этот множитель равен 1.

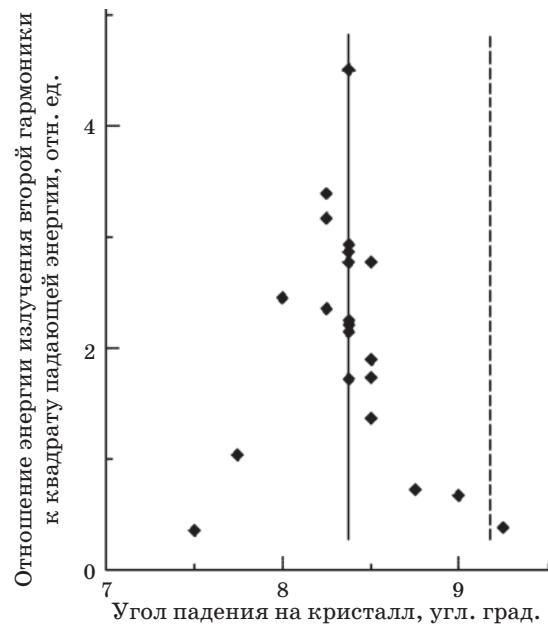


Рис. 5. Зависимость отношения энергии излучения второй гармоники к квадрату падающей энергии от угла падения на кристалл.

Экспериментальный коэффициент преобразования η вычислялся по формуле

$$\eta = E_{\text{преобр}}/E_{\text{пад}}, \quad (3)$$

где $E_{\text{пад}}$ – энергия излучения, падающего на кристалл AgGaSe_2 , и определяемая по показаниям пироэлектрического приемника ПЭДИ ($U_{\text{ПЭДИ}}$), $E_{\text{преобр}}$ – энергия излучения с удвоенной частотой, которая рассчитывается следующим образом:

$$E_{\text{преобр}} = 1,16(U_{\text{J3}}/1450).$$

Здесь U_{J3} – показания приемника J3-09 (мВ); 1450 мВ/мДж – калибровочный коэффициент приемника J3-09 на длине волны 5,3 мкм; 1,16 – коэффициент, учитывающий френелевские потери на пластине сапфира.

В расчетах использовались следующие параметры: $n_1 = 2,596$; $\lambda_2 = 4,776 \times 10^{-4}$ см; $d = 4 \times 10^{-11}$ м/В; $A = 0,126$ см² (диаметр пучка 0,4 см), $L = 2$ см, длительность импульса $\tau = 300$ нс.

Из таблицы видно, что экспериментальные значения коэффициентов преобразования приблизительно в 2,5 раза больше расчетных. Одним из объяснений этого расхождения может быть завышенная площадь пятна на кристалле, так как брался диаметр пучка 0,4 см по уровню $1/e^2$ гауссового пучка, а следовательно и меньшая

Экспериментальные и расчетные значения коэффициентов преобразования частоты лазерного излучения

№	$U_{\text{ПЭДИ}}$, мВ	U_{J_3} , мВ	Энергия падающая $E_{\text{пад}}$, мДж	Энергия преобразованная $E_{\text{преобр.}}$, мДж	Коэффиц. преобр., η (эксперим.)	Коэффиц. преобр., η (расчет)
1	250	390	67,2	0,311	0,46%	0,214%
2	240	375	58,0	0,300	0,52%	0,185%
3	210	380	58,0	0,303	0,52%	0,185%
4	230	390	62,6	0,311	0,50%	0,199%

интенсивность. Тем не менее, полученные коэффициенты преобразования на порядок меньше предельно достижимых значений 5–8% [10].

Исследования по ГВГ излучения CO₂-лазера на длине волны 10,591 мкм показали, что максимальный коэффициент преобразования ГВГ составляет 0,3%–0,4%, что также ниже теоретических значений.

Общая невысокая эффективность ГВГ в данных экспериментах связана с невозможностью обеспечить в них предельную интенсивность излучения в кристалле. Справочные данные для чистого кристалла селеногаллата серебра дают значения порога пробоя по плотности энергии 2 Дж/см² и по интенсивности 15 МВт/см² [10]. В представленных в статье экспериментах максимальное значение интенсивности на кристалле составило 5 МВт/см² при плотности энергии 1,4 Дж/см². Увеличение интенсивности в условиях фиксированной длительности и энергии импульса возможно только за счет уменьшения сечения пучка. Уменьшать сечение пучка было нельзя из опасения повреждения кристалла при приближении к порогу пробоя по энергии.

Для генерации 4-ой гармоники излучения на длине волны 2,648 мкм используется второй каскад преобразования излучения задающего генератора. Из формулы (1) видно, что отношение эффективностей преобразования излучения двух кристаллов можно оценить с помощью выражения (поглощением пренебрегаем)

$$\frac{\eta_{\text{II}}}{\eta_{\text{I}}} \approx \frac{d_{\text{Ieff}}^2}{n_{\text{I}}^3} \frac{n_{\text{II}}^3}{d_{\text{Ieff}}^2}. \quad (4)$$

Здесь d_{eff} – эффективные коэффициенты нелинейности, n – средние показатели преломления кристаллов. Или

$$\frac{\eta_{\text{II}}}{\eta_{\text{I}}} \approx \frac{d_{\text{I}}^2 \sin^2(2\theta_{\text{Ic}})}{d_{\text{II}}^2 \sin^2(\theta_{\text{Ic}})} \frac{n_{\text{II}}^3}{n_{\text{I}}^3}. \quad (5)$$

Здесь θ_{Ic} , θ_{Ic} – углы синхронизма кристаллов для данной длины волны. Оценки, проведенные

по уравнению (5), показывают, что вследствие существенно большего значения эффективного коэффициента нелинейности ZnGeP₂ дает существенный выигрыш в эффективности по сравнению с селеногаллатом серебра при преобразовании излучения с длиной волны 5,3 мкм во вторую гармонику при прочих равных условиях.

Для длины волны 5,3 мкм углы синхронизма селеногаллата серебра и фосфида цинка-германия составляют приблизительно 41° и 47° соответственно. При этом величины d , n равны 45 пм/В, 2,6 и 70 пм/В, 3,2 соответственно. Подставив эти значения в выражение (5), получим

$$\eta_{\text{II}}/\eta_{\text{I}} \approx 3.$$

Проведенный количественный расчет оптимальной длины кристалла ZnGeP₂ для получения четвертой гармоники дает значение 15 мм (на результат существенно влияют используемые в расчетах значения коэффициентов поглощения волны накачки и генерируемой гармоники). Для обеспечения необходимой интенсивности излучения в кристалле между кристаллами первого и второго каскадов ГВГ размещается оптическая схема изображения перетяжки гауссового пучка с уменьшением его диаметра до 1 мм. При этом интенсивность излучения накачки в кристалле составляла примерно 0,16 МВт/см².

По методике, изложенной выше, были проведены исследования эффективности преобразования излучения с длиной волны 5,3 мкм в длину волны 2,65 мкм в кристалле ZnGeP₂ размером 5×5×15 мм изготовления ООО “ЛОК”, Томск. Кристалл был вырезан так, что условия синхронизма выполнялись при нормальном падении излучения с длиной волны 5,3 мкм на переднюю грань кристалла. Однако, максимальная эффективность преобразования была получена при наклоне кристалла на 0,5° в плоскости поляризации излучения 5,3 мкм. При этом эффективность преобразования составила значение порядка 8%. Максимально достижимая эффективность

преобразования имеет значение порядка 30% [11]. Отличие полученной авторами эффективности от достигнутой в работе [11] опять же, как и в случае преобразования излучения с $\lambda = 10,6$ мкм в излучение с $\lambda = 5,3$ мкм объясняется меньшей интенсивностью излучения накачки, ограниченной в описываемом случае лучевой прочностью по энергии.

Таким образом, общая эффективность преобразования по энергии излучения с длиной волны 10,6 мкм в излучение с длиной волны 2,65 мкм составила 4×10^{-4} или 0,04% при энергии выходного импульса 35 мкДж. Основным отличием полученных авторами результатов от результатов работы [11], где в аналогичной схеме была получена общая эффективность преобразования порядка 10%, состоит в первую очередь в длительности импульса лазера накачки. Значительно меньшая (1,5–2 нс) в отличие от нашей (300 нс) длительность импульса позволяла в [11] обеспечить оптимальные (максимальные) интенсивности излучения в кристаллах. Кроме того, в первом каскаде преобразования в [11] использовался кристалл длиной 4 см (в данной работе – 2 см), недоступный нам по технологическим причинам.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана лазерная установка для генерации пикосекундных инфракрасных импульсов. Исследованы ее основные режимы работы и технические характеристики, показана возможность получения генерации в трех спектральных диапазонах: от 9,4 мкм до 10,6; от 4,7 мкм до 5,3 мкм и от 2,4 мкм до 2,65 мкм.

Установка отличается от известных аналогов [11] возможностью генерации импульсов не только в широком спектральном диапазоне, но и в широком диапазоне длительностей импульсов от 100 пс до 300 нс. Кроме того, при повышении эффективности преобразования излучения и при использовании методов параметрической генерации в нелинейных кристаллах установка имеет перспективы развития в направлении расширения спектрального диапазона генерируемого излучения.

Данные исследования частично выполнены в рамках проекта МНТЦ № 2521.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А.А., Мак А.А., Яшин В.Е. Генерация и применение сверхсильных лазерных полей // Квант. электрон. 1997. Т. 24. № 2. С. 99–114.
2. Alcock A., Walker A.C. Generation and detection of 150-ps mode-locked pulses from a multi-atmosphere CO₂ laser // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 25. № 5. P. 299–301.
3. Биглов З.А., Гордиенко В.М. Мощные пикосекундные лазеры десятимикронного диапазона // Современные проблемы лазерных технологий. 1991. Т. 4. С. 84–125.
4. Filip C., Narang R., Tochitsky S.Ya., Clayton C.E., Joshi C. Optical Kerr switching technique for the production of picosecond multi-wavelength CO₂ laser pulse // Appl. Opt. 2002. V. 41. № 18. P. 3743–3747.
5. Alcock A.J., Corkum P.B., James D.J., Leopold K.E., Samson J.C. Selection of single, mode-locked CO₂ laser pulses by semiconductor reflection switching // Opt. Commun. 1976. V. 18. № 4. P. 543–545.
6. Pogorelsky I.V., Ben-Zvi I., Babzien M., Kusche K., Skaritka J., Meshkovsky I.K., Dublov A.A., Lekomtsev V.A., Pavlishin I.V., Boloshin Y.A., Deineko G.B., Tsunemi A. The first picosecond terawatt CO₂ laser // Proc. SPIE. 1999. V. 3683. P. 15–24.
7. Pogorelsky I.V. CO₂ lasers in High Energy Physics. // Proc. of “Lasers 2001” December 3–7, 2001, Tucson, Arizona. STS Press, McLean, Va., 2002. P. 1–6.
8. Абдуллаев Г.Б., Аллахвердиеев К.Р., Кулевский Л.А., Прохоров А.М., Салаев Э.Ю., Савельев А.Д., Смирнов В.В. Параметрическое преобразование ИК-излучения в кристалле GaSe // Квант. электрон. 1975. Т. 2. № 6. С. 1228–1233.
9. Nikogosyan D.N. Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey. N-Y: Springer Science + Business Media, 2005. P. 427.
10. Гурзадян Г.Г., Дмитриев В.Г., Никогосян Д.Н. Нелинейные оптические кристаллы. Справочник. М: Радио и связь, 1991. С. 160.
11. Chou H.P., Slater R.C., Wang Y. High-energy four-harmonic generation using CO₂ lasers // Appl. Phys. B. 1998. V. 66. P. 555–559.