

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 533.9.082

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ СО-ЛАЗЕР С ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

© 2022 г. А. А. Ионин^а, И. О. Киняевский^а, Ю. М. Климачев^а,
А. Ю. Козлов^а, А. А. Котков^а, А. М. Сагитова^{а, *}, Д. В. Синицын^а

^аФизический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, 119991 Россия

*E-mail: sagitovaam@lebedev.ru

Поступила в редакцию 29.06.2021 г.

После доработки 06.07.2021 г.

Принята к публикации 08.07.2021 г.

Экспериментально исследуется внутрирезонаторное преобразование частоты излучения СО-лазера в нелинейном кристалле ZnGeP_2 в условиях некритичного фазового синхронизма. Рассмотрены различные конфигурации лазерного резонатора, в одной из которых сам нелинейный кристалл служил выходным зеркалом. Осуществлена перестройка спектра преобразованного излучения в коротковолновую область за счет температурной перестройки фазового синхронизма в нелинейном кристалле. Максимальная средняя мощность генерации суммарных частот с кристаллом ZnGeP_2 была получена при комнатной температуре кристалла и выходном зеркале, имеющем пропускание $T \sim 10\%$ для основной частоты, и достигала ~ 7.0 мВт. Отношение мощностей излучения на суммарных частотах и СО-лазера, выходящего из резонатора, составило $\sim 16\%$, что оказалось выше значения, полученного ранее с кристаллом $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ (11.5%) на той же лазерной установке.

Ключевые слова: средний ИК-диапазон, СО-лазер, диагностика плазмы, температурная перестройка фазового синхронизма, генерация суммарных частот, нелинейный кристалл ZnGeP_2

DOI: 10.56304/S207956292201016X

ВВЕДЕНИЕ

В задачах по диагностике плазмы требуется использование инфракрасного лазерного излучения на двух и более длинах волн, генерируемых одновременно или последовательно перестраиваемых. Например, наиболее универсальным методом, позволяющим выделить малое изменение электронной плотности плазмы на фоне сильных вибраций и применимым для широкого класса плазменных установок и параметров плазмы, является двухволновая интерферометрия с сильно различающимися длинами волн. На сегодняшний день существует большое количество таких интерферометров с использованием двух лазеров в различных комбинациях: в частности, CO_2 -лазер (10.6 мкм) и CO_2 -лазер (9.27 мкм); CO_2 -лазер (10.6 мкм) и СО-лазер (5.3 мкм); CO_2 -лазер (10.6 мкм) и He–Ne-лазер (0.63 мкм) и др [1]. В качестве примера можно привести систему пятиканального лазерного интерферометра-поляриметра на базе CO_2 -лазера (10.59 мкм) и СО-лазера (5.42 мкм), которую планируют использовать для измерения линейной интегральной плотности электронов на Международном термоядерном экспериментальном реакторе (ITER) [2].

При голографической диагностике плазмы использование лазеров инфракрасного диапазона спектра имеет определенные преимущества по отношению к лазерам видимого диапазона. Это связано с тем, что чувствительность определения концентрации электронов прямо пропорциональна длине волны зондирующего излучения при том, что чувствительность интерференционной картины к градиенту плотности нейтральных частиц обратно пропорциональна длине волны. То есть при интерференционной диагностике плазменных объектов в среднем инфракрасном диапазоне погрешность измерения распределения электронной концентрации, связанная с градиентом плотности тяжелых частиц, в большинстве случаев пренебрежимо мала [3]. В работе [3] для голографической диагностики плазмы авторы предлагают использовать HF-лазер ($\lambda = 2.6\text{--}3.0$ мкм) или DF-лазер ($\lambda = 3.4\text{--}4.0$ мкм). Стоит отметить, что в данных диапазонах длин волн может излучать и СО-лазер как на обертоновых переходах ($\lambda = 2.5\text{--}4.2$ мкм) [4], так и при генерации суммарных частот (ГСЧ) излучения основной полосы СО-лазера в нелинейных кристаллах ($\lambda = 2.5\text{--}3.2$ мкм) [5].

Как правило, в низкотемпературной плазме подавляющая часть нейтральных молекул находится в основных электронных состояниях (за исключе-

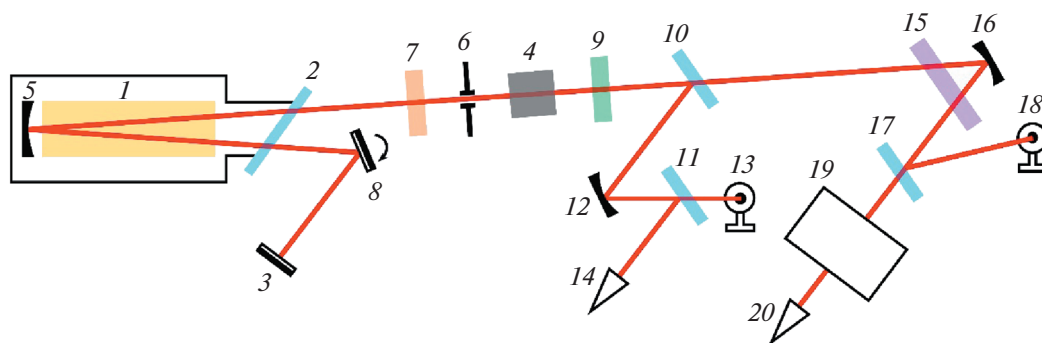


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента: 1 – активная среда СО-лазера, 2 – окно Брюстера, 3 – заднее зеркало, 4 – нелинейный кристалл, 5 – сферическое зеркало, 6 – щелевая диафрагма, 7 – дополнительное плоское зеркало, 8 – вращающееся плоское зеркало, 9 – выходное зеркало, 10, 11 – плоскопараллельные пластины из CaF_2 , 12 – сферическое зеркало, 13 – измеритель мощности, 14 – фотоприемник, 15 – ИК-фильтр, 16 – сферическое зеркало, 17 – плоскопараллельная пластина из Ge, 18 – измеритель мощности, 19 – ИК-спектрометр, 20 – фотоприемник.

нием эксимерных молекул) [6]. Поэтому абсорбционная спектроскопия на колебательно-вращательных переходах является одним из основных средств определения концентрации молекул, их энергетических распределений и связанных с ними температур. Возможность СО-лазера генерировать сотни узких линий в широком диапазоне длин волн среднего ИК-диапазона, в котором находятся линии поглощения множества веществ, делает СО-лазер привлекательным для решения этой задачи.

Кроме этого, СО-лазер применялся в серии работ [7], посвященных исследованию динамики поглощения в содержащих монооксид азота (NO) газовых смесях, в которых молекулы NO возбуждались мощным импульсным электроионизационным разрядом. Таким образом СО-лазер использовался при зондировании динамики колебательной населенности на большом числе высоко возбужденных колебательных уровней.

Все вышесказанное позволяет сделать вывод, что использование СО-лазера может представлять интерес для решения задач по диагностике плазмы.

В лаборатории Газовых лазеров Центра лазерных и нелинейно оптических технологий ФИАН создана компактная лазерная установка на основе планарного ВЧ СО-лазера, излучающего в режиме модуляции добротности резонатора (МДР) ~90 линий в диапазоне длин волн основной полосы ($\lambda = 5.0\text{--}6.6$ мкм), на которой с помощью внрезонаторного преобразования в нелинейном кристалле ZnGeP_2 было получено более 200 линий суммарных частот ($\lambda = 2.5\text{--}3.2$ мкм) [5]. При этом, при пиковой мощности излучения СО-лазера ~2.5 кВт эффективность преобразования внутри кристалла составила 8%. В экспериментах с более мощным лазером (пиковая мощность до 100 кВт) осуществлялось удвоение частоты ($\lambda = 2.6$ мкм) электроионизационного селективного ($\lambda = 5.2$ мкм) СО-лазера, генерирующего короткий цуг (~1 мкс)

наносекундных импульсов. В этих экспериментах эффективность преобразования внутри кристалла ZnGeP_2 достигала 37% [8].

В данной работе впервые экспериментально исследовалась внутризональная генерация суммарных частот излучения СО-лазера в нелинейном кристалле ZnGeP_2 , причем перестройка фазового синхронизма (ФС) осуществлялась за счет изменения температуры кристалла. Внутризональное преобразование позволяет упростить устройство лазерной системы по сравнению с внрезонаторным и использовать непросветленный нелинейный кристалл как выходное зеркало лазера. Однако в этом случае невозможно изменение угла ФС за счет поворота кристалла, т.к. в этом случае поворот кристалла приводит к дополнительным потерям из-за отражения излучения от непросветленных граней кристалла, а просветление кристалла в широком диапазоне длин волн представляет собой нетривиальную задачу. С помощью температурной перестройки ФС возможно осуществить плавную перестройку спектра без поворота кристалла.

ВНУТРИРЕЗОНАТОРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ СУММАРНЫХ ЧАСТОТ

В экспериментах использовался многочастотный щелевой СО-лазер с ВЧ накачкой и МДР, подробно описанный в работе [5]. Схема эксперимента была той же, что и в работе [9], только вместо кристалла $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ использовался кристалл ZnGeP_2 . Оптическая схема эксперимента представлена на рис. 1.

Активная среда 1 объемом $400 \times 16 \times 4.5$ мм³ располагалась между двумя полыми латунными электродами, охлаждаемыми жидким азотом. СО-лазер работал в квазиотпаянном режиме – без принудительного обмена газовой смесью. Вы-

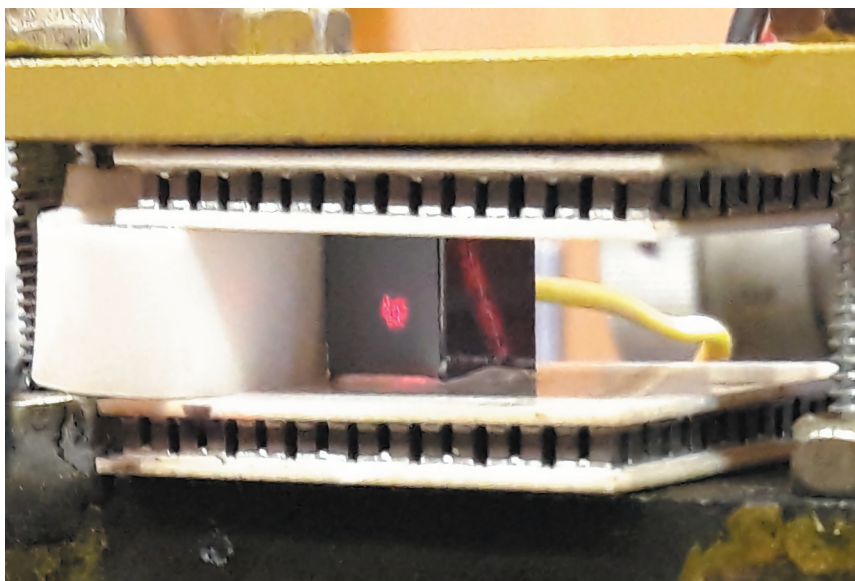


Рис. 2. Внешний вид кристалла ZnGeP_2 и нагревательных элементов Пельтье. Пятно на кристалле — излучение He-Ne-лазера, использованного для юстировки ВЧ СО-лазера.

ходное окно лазерной камеры 2 из CaF_2 было установлено под углом Брюстера к оси резонатора. Двухпроходный лазерный резонатор V-образного типа образован задним зеркалом 3 и нелинейным кристаллом 4, выступающим в качестве выходного зеркала. Плечи резонатора имели почти конфокальную конструкцию с расположенным в середине резонатора сферическим зеркалом 5 с радиусом кривизны 180 см. Регулируемая

щелевая диафрагма 6 располагалась перед кристаллом 4. Дополнительное плоское зеркало 7 с высокой прозрачностью в спектральном диапазоне основной полосы СО-лазера и максимальным отражением излучения суммарных частот (см. рис. 3) было установлено между окном Брюстера 2 и диафрагмой 6. Вращающееся плоское зеркало 8 (до 6000 об/мин) обеспечивало режим модуляции добротности СО-лазера. В некоторых кон-

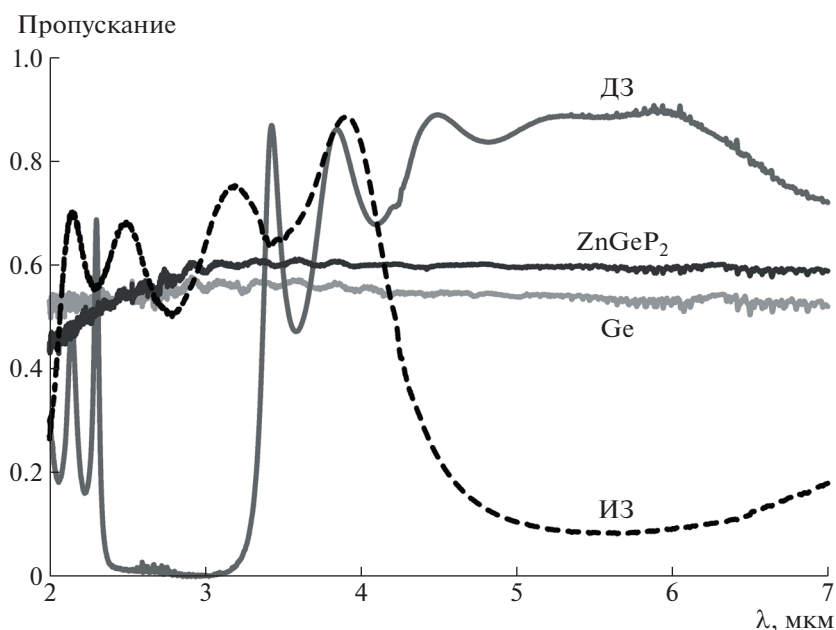


Рис. 3. Пропускание зеркал лазерной системы.

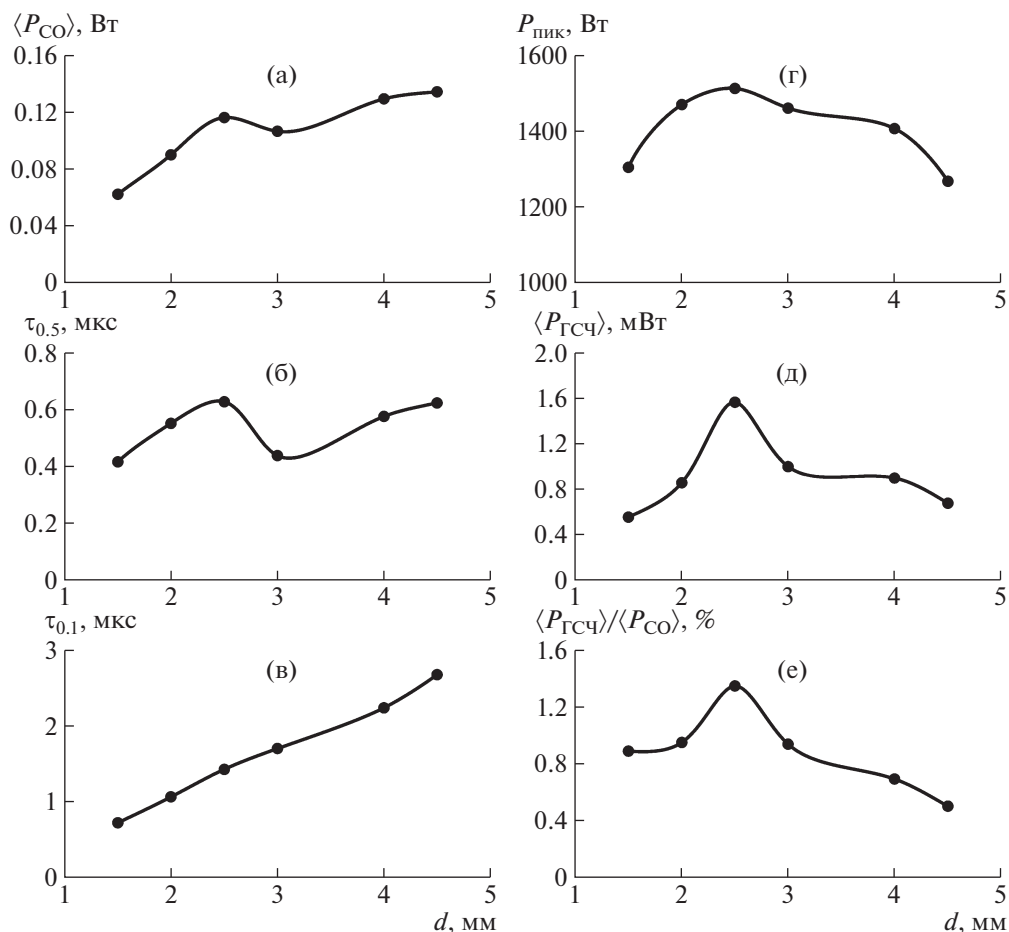


Рис. 4. Зависимости характеристик лазерного излучения (средней мощности основной частоты $\langle P_{CO} \rangle$ (а), длительности импульса по полувысоте $\tau_{0.5}$ (б), длительности импульса по основанию $\tau_{0.1}$ (в), пиковой мощности основной частоты $P_{\text{пик}}$ (г), средней мощности излучения ГСЧ $\langle P_{\text{ГСЧ}} \rangle$ (д) и отношения средних мощностей $\langle P_{\text{ГСЧ}} \rangle / \langle P_{CO} \rangle$ (е)) от ширины щелевой диафрагмы. Выходное зеркало лазерной системы – пластина из Ge, нелинейный кристалл при комнатной температуре. Ошибка измерений в пределах маркера.

фигурациях резонатора за нелинейным кристаллом также помещалось плоское выходное зеркало 9. Выходное излучение лазера разделялось плоскопараллельными пластинами 10, 11 из CaF_2 и фокусировалось сферическим зеркалом 12 с фокусным расстоянием 1 м в измеритель мощности 13 (10A-V2, Ophir Optronics Solutions Ltd) и фотодетектор 14 (PEM-L-3, VIGO system S.A.) для контроля мощности и временных характеристик излучения СО-лазера. ИК-фильтр 15 (плавленый кварц) был использован для подавления основного излучения СО-лазера, что позволило измерить мощность ГСЧ. Излучение, выходящее из кристалла, коллимировалось вторым сферическим зеркалом 16. Часть излучения разделялась плоскопараллельной пластиной из Ge 17 и направлялась в измеритель мощности 18 (3A-SH, Ophir Optronics Solutions Ltd). Вторая часть излу-

чения ГСЧ направлялась в ИК-спектрометр 19 (МДР-2, ЛОМО). В качестве детектора 20 спектрометра 19 использовался фотодетектор PEM-L-3 для измерения основного излучения СО-лазера и PDA20H (Thorlabs Inc.) – для излучения суммарных частот.

В работе использовался нелинейный кристалл ZnGeP_2 длиной 8 мм и с углом среза $46.9^\circ \pm 0.1^\circ$ (рис. 2), выращенный в ООО “Лаборатория оптических кристаллов” (г. Томск). Значение угла среза кристалла было выбрано таким образом, чтобы обеспечить широкополосное преобразование излучения при некритичном фазовом синхронизме.

Использовались следующие выходные зеркала лазерного резонатора: сам кристалл ZnGeP_2 (пропускание $T \sim 60\%$ для $\lambda = 2.5\text{--}6.0$ мкм), либо в дополнение к нему в качестве плоского выходного

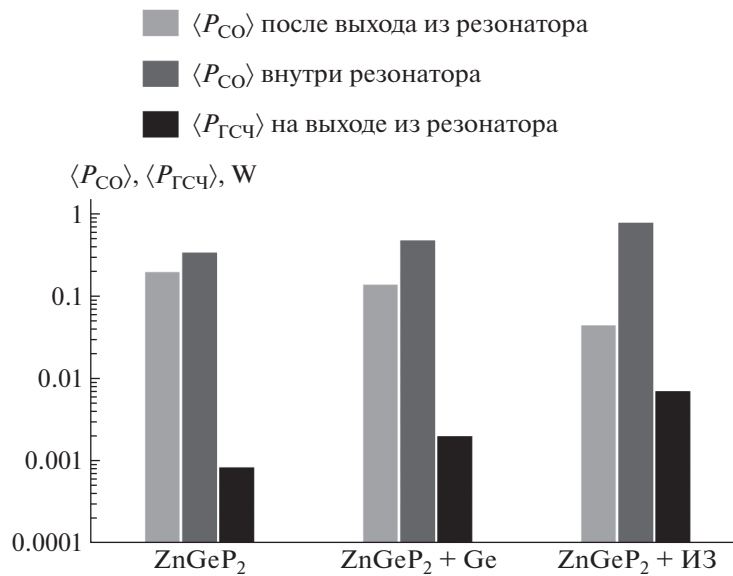


Рис. 5. Энергетические характеристики лазерной системы при комнатной температуре (26.5°C) кристалла ZnGeP₂.

зеркала 9 плоскопараллельная пластина из Ge ($T \sim 50\%$ для $\lambda = 2.5\text{--}6.0$ мкм) или интерференционное зеркало (ИЗ) от лазера ИЛГН-706 ($T \sim 60\%$ для $\lambda = 2.5\text{--}3.0$ мкм и $T \sim 10\%$ для $\lambda = 4.8\text{--}6.0$ мкм). Для уменьшения потерь излучения ГСЧ на окне Брюстера лазерной камеры внутрь резонатора между нелинейным кристаллом и окном помещалось дополнительное зеркало (позиция 7 на рис. 1) (ДЗ) с $T \sim 1\%$ для $\lambda = 2.5\text{--}3.0$ мкм и $T \sim 90\%$ для $\lambda = 4.8\text{--}6.0$ мкм. На рисунке 3 показано пропускание использованных зеркал.

Для регулирования длительности импульса лазерного излучения использовалась щелевая диафрагма, установленная вблизи нелинейного кристалла внутри резонатора. Зависимости характеристик лазерного излучения от ширины щелевой диафрагмы представлены на рис. 4.

В этом случае в качестве выходного зеркала лазера использовалась плоскопараллельная пластина из Ge. Оптимальная ширина щелевой диафрагмы для получения максимальной пиковой мощности составила 2.5 мм, при этом пиковая мощность P_{CO} достигала 1.5 кВт, а средняя мощность $\langle P_{CO} \rangle = 116$ мВт. Средняя мощность излучения ГСЧ в этом случае достигала $\langle P_{ГСЧ} \rangle = 1.56$ мВт. Дальнейшие эксперименты проводились при этом размере щелевой диафрагмы.

Полученные энергетические характеристики лазерной системы при комнатной температуре (26.5°C) кристалла ZnGeP₂ для различных конфигураций резонатора представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что использование оптически более плотных выходных зеркал приводило к уменьшению средней мощности СО-лазера, однако средняя мощность ГСЧ росла пропорционально мощности СО-лазера в резонаторе благодаря запиранию большей доли излучения СО-лазера в резонаторе.

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЕРЕСТРОЙКА ФАЗОВОГО СИНХРОНИЗМА

В исследованиях, посвященных температурной перестройке ФС в нелинейном кристалле ZnGeP₂ при внрезонаторной ГСЧ излучения СО-лазера, было показано, что нагрев кристалла приводит к тому, что минимум зависимости угла ФС от длины волны смещается в коротковолновую область [10]. Это означает, что при нагреве кристалла более эффективным будет осуществляться преобразование коротковолновой части спектра излучения СО-лазера в случае не критичного ФС.

В серии экспериментов по ГСЧ при температурной перестройке ФС кристалла ZnGeP₂ температура кристалла изменялась с помощью термостата на элементах Пельтье от комнатной ($\sim 26^\circ\text{C}$) до 147°C . Температура измерялась термопарой. На рис. 6 показаны характеристики лазерного излучения для разных выходных зеркал при различных температурах нелинейного кристалла ZnGeP₂.

Нагрев кристалла приводил к уменьшению как средней мощности излучения СО-лазера, так и мощности излучения ГСЧ для всех вариантов выходных зеркал. Доля излучения суммарных частот по отношению к излучению СО-лазера при

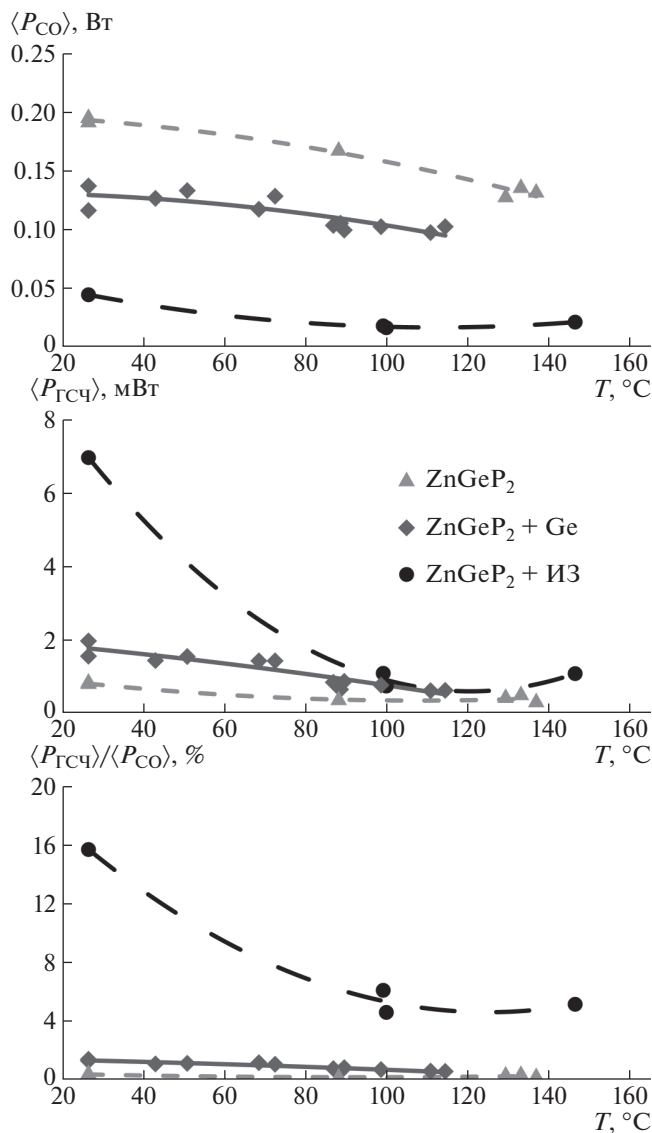


Рис. 6. Зависимости характеристик излучения от температуры кристалла при использовании различных выходных зеркал.

этом также уменьшалась. Для наименее оптически плотного выходного зеркала (кристалла ZnGeP_2) максимальная средняя мощность СО-лазера составила 194 мВт, тогда как для более плотных зеркал — 137 мВт для Ge и 44 мВт для ИЗ. В случае кристалла ZnGeP_2 средняя мощность ГСЧ составляла 0.84 мВт, а для пластинки из Ge и ИЗ она достигала 1.57 и 6.98 мВт соответственно. Отношение средней мощности ГСЧ к средней мощности основной частоты составило $\sim 0.4\%$ для ZnGeP_2 , $\sim 1.4\%$ для пластинки из Ge и $\sim 15.8\%$ для ИЗ. Данное значение оказалось выше, по сравнению с результатами, полученными ранее с кристаллом $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ (11.5%) на той же лазерной установке [11].

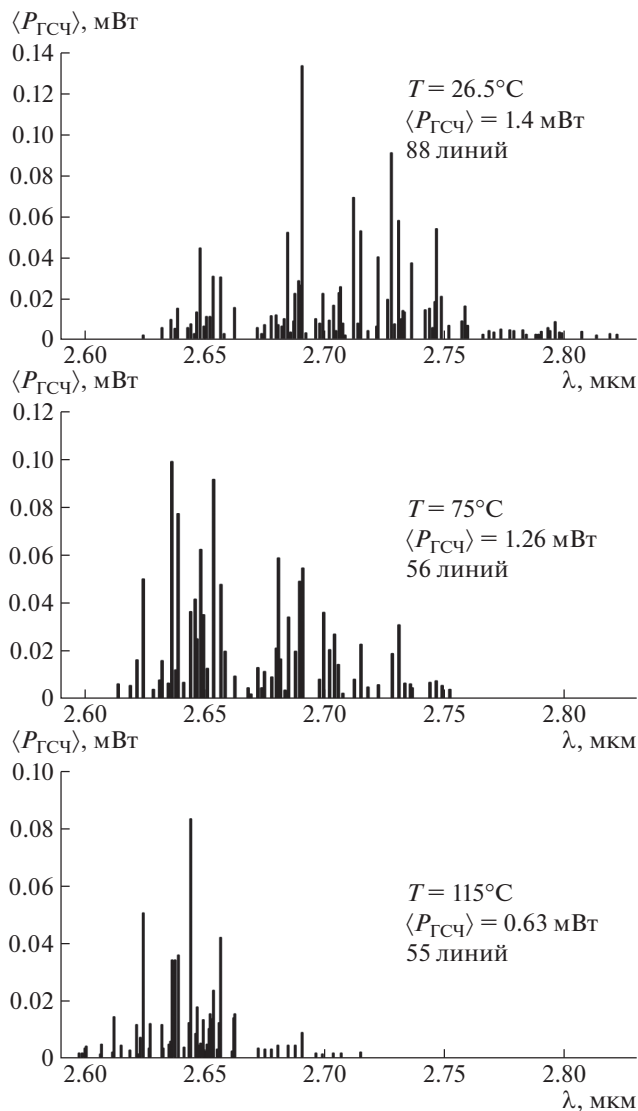


Рис. 7. Спектры ГСЧ излучения лазерной системы с выходным зеркалом — пластиной из Ge при разных температурах кристалла.

На рис. 7 показано, как изменение температуры кристалла влияло на спектр суммарных частот: нагрев кристалла приводил к смещению спектра преобразованного излучения в коротковолновую область. При комнатной температуре ширина спектра ГСЧ составила 0.23 μm , а число линий достигало 88. При увеличении температуры до 115°C ширина спектра сузилась до 0.12 μm , а число линий ГСЧ сократилось до 55.

Таким образом, максимальная средняя мощность ГСЧ при внутривибрационном преобразовании была получена для варианта с наиболее оптически плотным зеркалом и кристаллом ZnGeP_2 при комнатной температуре и достигала ~ 7.0 мВт. Отношение мощностей излучения суммарных ча-

стот и СО-лазера, выходящих из резонатора, составило $\sim 16\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые было проведено экспериментальное исследование температурной перестройки фазового синхронизма при внутрирезонаторной генерации суммарных частот излучения СО-лазера в нелинейном кристалле ZnGeP_2 .

Максимальная средняя мощность ГСЧ с кристаллом ZnGeP_2 была получена при комнатной температуре кристалла и выходном зеркале, имеющем пропускание $T \sim 10\%$ для основной частоты, и достигала ~ 7.0 мВт. Отношение мощностей излучения суммарных частот и СО-лазера, выходящего из резонатора, составило $\sim 16\%$. Оно оказалось выше, по сравнению с результатами, полученными ранее с кристаллом $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ (11.5%) на той же лазерной установке.

Несмотря на то, что нагрев кристалла приводил к уменьшению средней мощности излучения в основной полосе СО-лазера и мощности излучения на суммарных частотах для всех вариантов выходных зеркал, а также к сужению спектра и уменьшению числа линий в спектре ГСЧ, увеличение температуры кристалла позволило сместить спектр преобразованного излучения в коротковолновую область.

Подобный многочастотный СО-лазер, генерирующий множество узких линий в широком диапазоне длин волн среднего ИК-диапазона, может быть полезен для определения концентрации молекул в низкотемпературной плазме и при голографической диагностике плазмы. В свою очередь, селективный СО-лазер, работающий на одной линии [12, 13], может использоваться в двухволновой интерферометрии, как, например, на Международном термоядерном экспериментальном реакторе (ITER) совместно с CO_2 -лазером [2]. Для диагностики более плотной плазмы, имеется возможность использовать один селективный СО-лазер (например, на 5 мкм), с внутри-

резонаторным удвоением частоты (2.5 мкм), позволяющий получить в итоге две сильно отстоящие по длине волны линии и существенно упростить оптическую схему, предложенную в [2].

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проведена при поддержке РНФ (грант No. 16-19-10619).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Кузнецов А.П. Лазерная интерферометрия в диагностике импульсной плазмы [Laser Interferometry in the Pulsed Plasma Diagnostic]: дис. д.ф.-м.н.: 01.04.21. Москва. 2012.
2. Van Zeeland M.A., Boivin R.L., Brower D.L., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. No. 4. P. 043501.
3. Fedotov O.G., Fomin V.M. // Tech. Phys. 2018. V. 63. No. 2. P. 250–256.
4. Ionin A.A., Kurnosov A.K., Napartovich A.P., Seleznev L.V. // Laser Phys. 2010. V. 20. P. 144–186.
5. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Yu.M., et al. // Laser Phys. 2018. V. 28. No. 2. P. 025401.
6. Андреев С.Н., Очкин В.Н. // Энциклопедия низкотемпературной плазмы: Вводный том. Книга II. [Encyclopedia of Low-Temperature Plasma: Introductory Volume II]. Ред. Фортон В.Е. 2000. Москва: МАИК "Наука/Интерпериодика" (Энциклопедическая серия). С. 583–585.
7. Derevyashkin S.P., Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., et al. // Phys. Procedia. 2015. V. 71. P. 247–251.
8. Andreev Yu.M., Budilova O.V., Ionin A.A., et al. // Opt. Lett. 2015. V. 40. No. 13. P. 2997–3000.
9. Ionin A.A., Badikov D.V., Badikov V.V., et al. // Opt. Lett. 2018. V. 43. No. 18. P. 4358–4361.
10. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Yu.M., et al. // Infrared Phys. Technol. 2019. V. 102. P. 103009.
11. Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., Klimachev Yu.M., et al. // Opt. Laser Technol. 2019. V. 115. P. 205–209.
12. Ionin A.A., Kozlov A.Yu., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. // Opt. Commun. 2009. V. 282. P. 629–634.
13. Chebotarev I.A., Ionin A.A., Kinyaevskiy I.O., et al. // Opt. Laser Technol. 2020. V. 131. P. 106431.

Broadband CO Laser with Intracavity Frequency Conversion for Plasma Diagnostics

A. A. Ionin¹, I. O. Kinyaevskiy¹, Yu. M. Klimachev¹, A. Yu. Kozlov¹,
A. A. Kotkov¹, A. M. Sagitova^{1, *}, and D. V. Sinitsyn¹

¹Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: sagitovaam@lebedev.ru

Received June 29, 2021; revised July 6, 2021; accepted July 8, 2021

Abstract—In this work, we experimentally study intracavity frequency conversion of CO laser radiation in a nonlinear ZnGeP_2 crystal under noncritical phase matching. Various configurations of a laser cavity are considered, in one of which the nonlinear crystal itself was an output mirror. The spectrum of the converted radiation was shifted into the short-wavelength region due to the temperature tuning of the phase matching in the nonlinear crystal. The maximum average lasing power was obtained at room crystal temperature and an

output mirror with a transmission $T \sim 10\%$ for the fundamental band, and reached ~ 7.0 mW. The power ratio of sum frequency generation and the CO laser radiation was $\sim 16\%$, which turned out to be higher than the value obtained earlier with the $\text{BaGa}_2\text{GeSe}_6$ crystal (11.5%) at the same laser facility.

Keywords: CO laser, plasma diagnostics, phase matching temperature tuning, sum frequency generation, nonlinear ZnGeP_2 crystal