

СО₂-ЛАЗЕР С АКТИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД ИЛИ МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ РЕЗОНАТОРА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*А. А. Ионин¹, И. О. Киняевский¹, Ю. М. Климачев¹, А. Ю. Козлов¹, А. А. Котков¹,
В. В. Степанищев^{1,2}, И. Ж. Хафизов^{1,2}*

¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Введение

Освоение терагерцового диапазона частот – одно из наиболее развивающихся направлений современной прикладной физики. Интерес к терагерцовому излучению обусловлен следующими его свойствами: излучение неионизирующее (энергия фотонов 0,04–0,004 эВ), не наносит вреда организму, т.е. может использоваться при сканировании людей и багажа; это излучение хорошо проходит через мутные среды и мелкодисперсные материалы из-за слабого Рэлеевского рассеяния.

Существует много методов и установок для получения терагерцового излучения: ТГц квантовые каскадные лазеры (ККЛ), преобразование излучения титан – сапфировых лазеров, лазеры на свободных электронах (FELs), источники полупроводниковых ТГц сигналов, получение ТГц с помощью плазменной филаменты. Однако, почти все эти методы дают достаточно низкую мощность излучения. Например, ККЛ – самый современный источник ТГц излучения. Но на данный момент их потенциал еще не раскрыт окончательно. Пиковая мощность при 5К составляет 248 мВт [1].

Одним из способов получения терагерцового излучения является генерация разностной частоты (ГРЧ) излучения СО₂-лазеров в кристаллах ZnGeP₂ [2] или GaSe [3]. В указанных работах использовались два СО₂-лазера с возможностью перестройки длины волны, но с общей активной средой и с отдельными резонаторами. Излучения лазеров сводились в кристалле, в котором и происходили данное преобразование. В данных работах длины волн этих двух лазеров перестраивались, что давало возможность получить различные длины волн ТГц излучения.

Однако известны публикации (см., например [4]), в которых СО₂-лазер работал одновременно на нескольких (до 10) колебательно-вращательных переходах. Цель данной работы – создание многочастотного СО₂-лазера с одним резонатором для ГРЧ в нелинейных кристаллах. Этого можно добиться с помощью модуляции добротности резонатора (МДР). Этот способ проще реализуем по сравнению с вариантом с двумя лазерами, т.к. нет необходимости синхронизировать излучения лазеров по времени и в пространстве.

Режим работы лазера с короткими импульсами для дальнейшего преобразования ГРЧ можно получить двумя способами: синхронизация мод и модуляция добротности резонатора. Существует два метода синхронизации мод: активная и пассивная. В случае с многочастотным лазером можно реализовать только активную синхронизацию, так как пассивная синхронизация с помощью газов (поглотителя) действует на определенные длины волн и является нереализуемым для нашего случая вариантом.

Синхронизация мод

Сначала была рассмотрена синхронизация мод. Для получения наносекундных импульсов излучения в данной работе исследуется режим активной синхронизации мод в СО₂-лазере с помощью акустооптического модулятора (АОМ) на стоячей акустической волне.

Оптическая схема ЭИ СО₂-лазера с синхронизацией мод представлена на рис. 1. В качестве активной среды 1 использовалась рабочая газовая смесь СО₂:N₂:He = 1:1:4 с плотностью 0,3 Амага, которая возбуждалась импульсным ЭИ разрядом с длительностью импульса ~100 мкс. Резонатор

CO₂-лазера длиной 537,5 см был образован плоским зеркалом 2, установленным внутри камеры, и выходным зеркалом 3, плоскопараллельной пластиной из германия. Перед выходным зеркалом был установлен АОМ 4. Внутри лазерного резонатора было установлено сферическое зеркало 5 с радиусом кривизны 10 м.

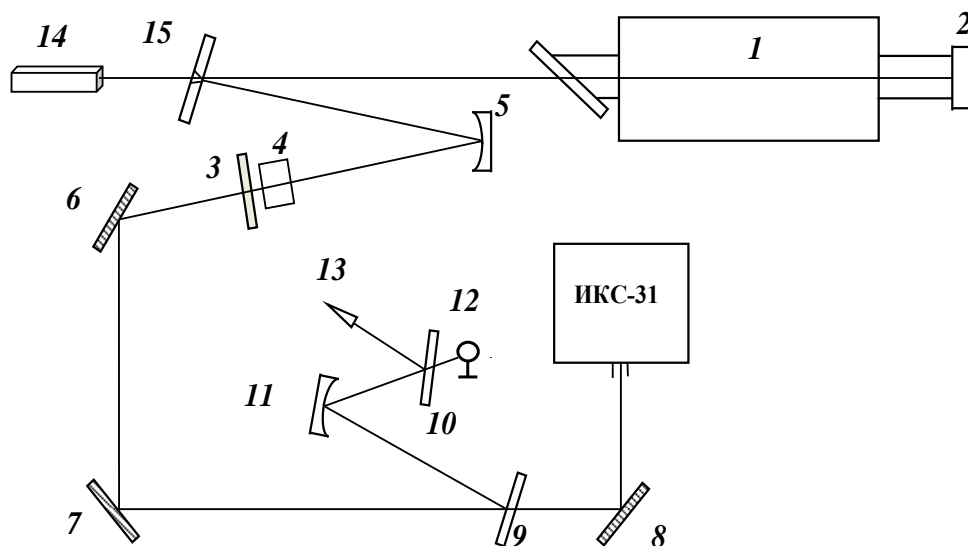


Рис 1. Схема импульсного ЭИ CO₂-лазера с активной синхронизацией мод и измерения его характеристик

Излучение, вышедшее из резонатора, поворотными зеркалами 6, 7, 8 направлялось в спектрометр ИКС-31, оснащенный фотосопротивлением ФСГ-22А. Часть излучения (~6 %) отводилась плоскопараллельными пластинами из ВаF₂ 9 и 10 и фокусировалась сферическим зеркалом 11 на термоэлектрический датчик Орфир-3А 12 для измерения энергии, а также на фотодетектор РЕМ-L3 13 для измерения временной формы импульсов излучения CO₂-лазера. Юстировка оптической схемы осуществлялась полупроводниковым лазером 14, излучение которого заводилось внутрь лазерного резонатора через зеркало с отверстием 15. Форма импульсов регистрировалась осциллографом Tektronix TDS5052В.

На рис. 2 представлена форма импульса излучения при выключенном АОМ. Нулевое значение на временной оси соответствует началу импульса ЭИ разряда. В этом случае наблюдались два достаточно коротких импульса – в начале и на 37-й мкс, – с последующим более длительным и менее мощным хвостом импульса излучения. Энергия всего импульса излучения составляла 23,5 мДж, а максимальная пиковая мощность – ~1,2 кВт. Пиковая мощность была рассчитана с учетом энергии и формы импульса лазерного излучения.

Отметим, что на хвосте импульса наблюдаются пиковые структуры, связанные с межмодовыми биениями в резонаторе (см. врезку на рис. 2) с частотой $27,65 \pm 0,05$ МГц, что соответствует длине лазерного резонатора 5,4 м. Временная форма импульса излучения CO₂-лазера в режиме синхронизации мод при минимальной мощности ВЧ генератора, который возбуждает акустическую волну в АОМ, представлена на рис. 3.

Энергия всего импульса излучения уменьшилась до 11,2 мДж, а максимальная пиковая мощность составила ~2,1 кВт (на рис. 3 первый пичок оказался «обрезан»). Полный импульс излучения состоял из цуга пичков длительностью ~7 нс по полувысоте, следующих с частотой $27,65 \pm 0,05$ МГц.

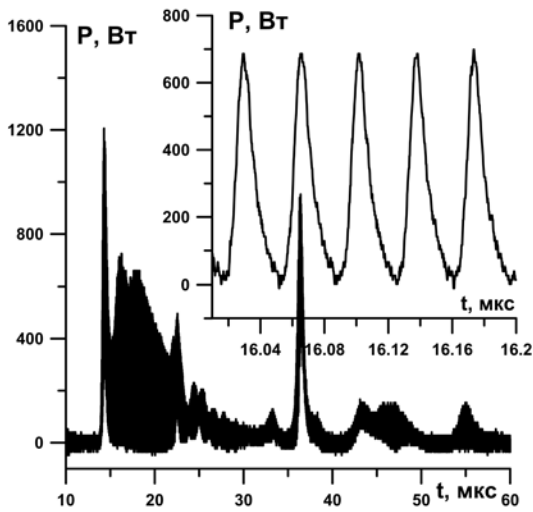


Рис. 2. Форма импульса излучения при выключенном АОМ

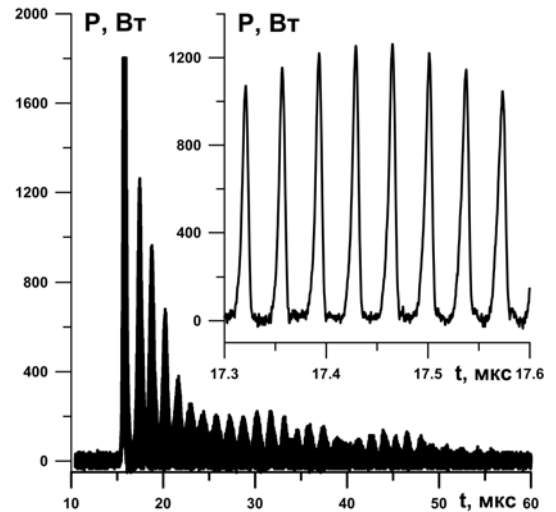


Рис. 3. Форма импульса излучения при минимальной мощности АОМ

При дальнейшем увеличении мощности ВЧ генератора, режим синхронизации ухудшался. Это выражалось в растягивании пиков и уменьшении пиковой мощности.

Спектр излучения CO_2 -лазера состоял из одной колебательно-вращательной линии 9 P(22) с длиной волны $\lambda = 9,568$ мкм.

Таким образом, пиковая мощность ЭИ CO_2 -лазера с активной синхронизацией мод достигала ~ 2 кВт при длительности пиков ~ 7 нс. Но так как многочастотный режим генерации не был получен, было решено попробовать второй вариант – МДР.

3. Модуляция добротности резонатора CO_2 -лазера

Оптическая схема установки для реализации многочастотного CO_2 -лазера с МДР представлена на рис. 4.

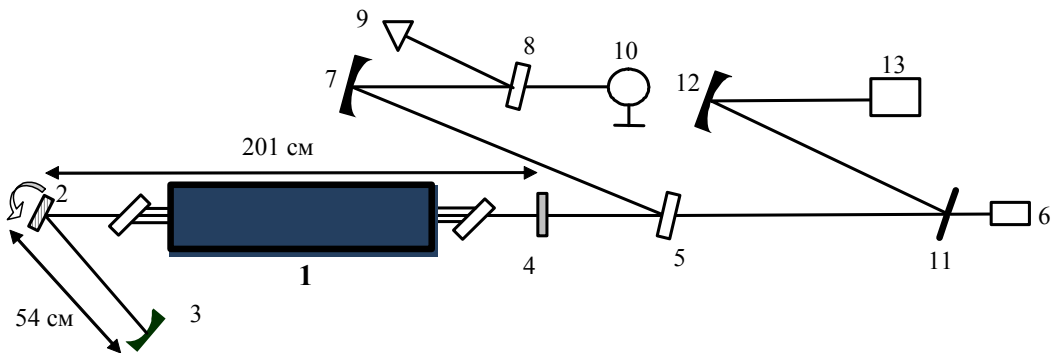


Рис. 4. Оптическая схема установки для реализации многочастотного CO_2 -лазера с МДР

В качестве активной среды 1 использовалась газовая смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:2:8$, возбуждаемая непрерывным разрядом напряжения 17 кВ. Газоразрядная трубка была закрыта пластинками из BaF_2 , установленными под углом Брюстера. Резонатор CO_2 длиной 255 см, образован сферическим зеркалом 3 с радиусом кривизны $R = 3$ м и выходным зеркалом 4. В качестве выходного зеркала 4 использовалось стандартное зеркало от промышленного CO_2 – лазера ИЛГН-704. Часть излучения, вышедшего из резонатора, с помощью плоскопараллельных пластин 5, 8 из BaF_2 и сферическим зеркалом 7 направлялась на термоэлектрический датчик 10 Ophir-3A 10 для измерения энергии и на

фотодетектор 9 (РЕМ-L-3, временное разрешение 0,5 нс) для измерения временной формы импульсов излучения CO₂-лазера. Оставшаяся часть излучения с помощью зеркала 11 и сферического зеркала 12 фокусировалась в спектрометр ИКС-31 13, оснащённый вторым фотодетектором РЕМ-L-3. Система юстировалась с помощью полупроводникового лазера 6, излучение которого заводилось через миллиметровое отверстие в зеркале 11.

CO₂-лазер может излучать в двух диапазонах длин волн: ~9 мкм и ~10 мкм. Так как лазерная трубка была закрыта пластинами из ВаF₂, то лазер излучал на длине волны 9,6 мкм. В эксперименте наиболее широкий спектр генерации содержал 9 линий (рис.5). Три наиболее сильные линии 9 R(18), 9 P(20) и 9 P(22) с длинами волн ~9,28, ~9,55 мкм и ~9,57 мкм, соответственно, содержали 85 % мощности CO₂-лазера. Эти линии могут дать ГРЧ на длине волны ~310 мкм. Длины волн ГРЧ от других линий попадают в диапазон 263 ÷ 8100 мкм. Однако возможности реальной реализации ГРЧ могут быть существенно ограничены пропусканием нелинейных кристаллов в терагерцовом диапазоне. Нелинейные кристаллы ZnGeP₂ [5] и GaSe [6] и PbIn₆Te₁₀ [7] достаточно прозрачны в ТГц диапазоне длин волн.

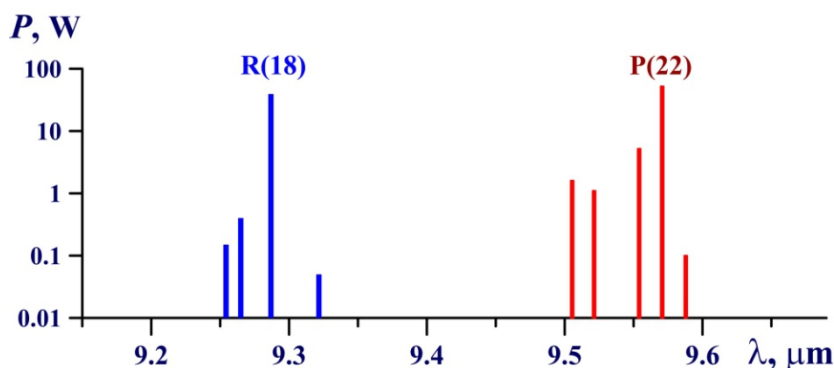


Рис. 5. Наиболее широкий спектр излучения CO₂ – лазера в наших экспериментах

Но, для реализации ГРЧ нам необходимо было убедиться в том, что генерация всех линий происходит одновременно. Для этого была исследована временная зависимость мощности генерации линий, составляющих спектр выходного излучения.

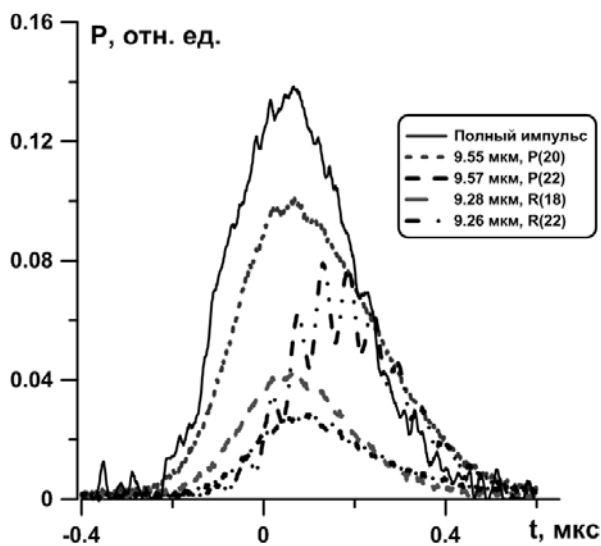


Рис. 6. Временная зависимость мощности генерации отдельных линий и всего спектра CO₂ – лазера с МДР

Данные зависимости для наиболее сильных линий представлены на рис. 6. Анализ показал, что генерация почти всех линий происходит в одно время, а если и есть отклонения, то перекрытие по времени составляет не менее 50 процентов (см. рис. 6). Однако, пиковые мощности этих линий могут сильно отличаться.

Не менее важным является вопрос стабильности генерации отдельных линий от импульса к импульсу. На рис. 7 представлена импульсно-периодическая генерация суммарного по спектру импульса и на отдельных линиях, охватывающая ~40 последовательных импульсов. Анализ полученных результатов показал, что генерация некоторых линий происходит не во всех импульсах. Например, генерация на линии R(22) происходит достаточно редко, на R(18) – чаще, а на линиях P(22) и P(20) – почти все время. Поэтому целесообразно попытаться получить ГРЧ между линиями P(20) и P(22).

Однако, длина волны ГРЧ в этом случае составит ~ 5380 мкм. Регистрировать такое длинноволновое излучение непросто. Кроме этого квантовый КПД не превышает $\sim 0,1$ %. Если использовать для ГРЧ линию $R(18)$ и обе линии $P(22)$ и $P(20)$, имеющие близкие длины волн, то можно получить сразу две близких линии терагерцового излучения вблизи ~ 310 мкм. При этом квантовый КПД может превысить $\sim 0,3$ %.

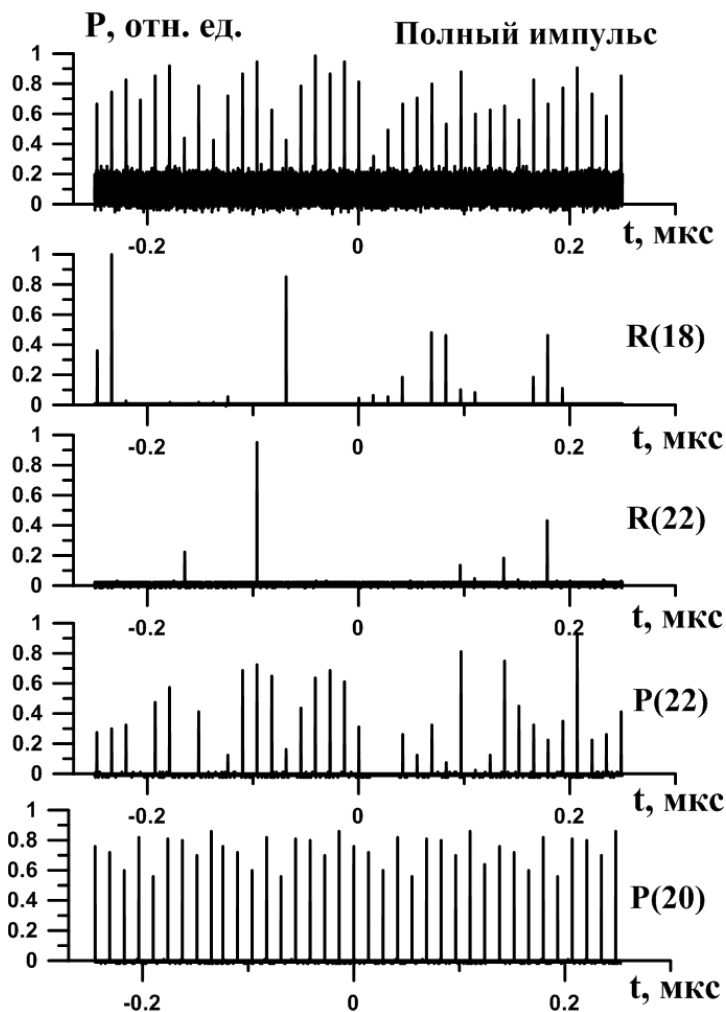


Рис. 7. Импульсно-периодическая генерация суммарного по спектру импульса (вверху) и на отдельных линиях

Для дальнейшей работы необходимо было решить две проблемы: какой кристалл использовать для ГРЧ и какой фильтр использовать для обрезания излучения накачки.

Нелинейные кристаллы и углы фазового синхронизма

Расчет углов производился по методике, описанной в [8].

Нами были сосчитаны углы фазового синхронизма для кристаллов $ZnGeP_2$ и $GaSe$ и $PbIn_6Te_{10}$. На рис. 8 и 9 представлены зависимости угла фазового синхронизма от длины волны ГРЧ (λ_3) для кристалла $PbIn_6Te_{10}$ (рис. 8) и $GaSe$ (рис. 9). При расчете мы фиксировали одну длину волны излучения CO_2 лазера (λ_1) на $9,6$ мкм, а вторую (λ_2) меняли в диапазоне от $9,2$ мкм до $10,6$ мкм. Так как по нашим оценкам мощность излучения ГРЧ на длине волны ~ 310 мкм ожидается максимальной, то на зависимости фазового синхронизма данная точка показана красным кружком. Остальные кружки (желтые) соответствуют другим возможным длинам волн ГРЧ, которые получатся при использовании для накачки кристалла спектра CO_2 лазера, представленного на рис. 5.

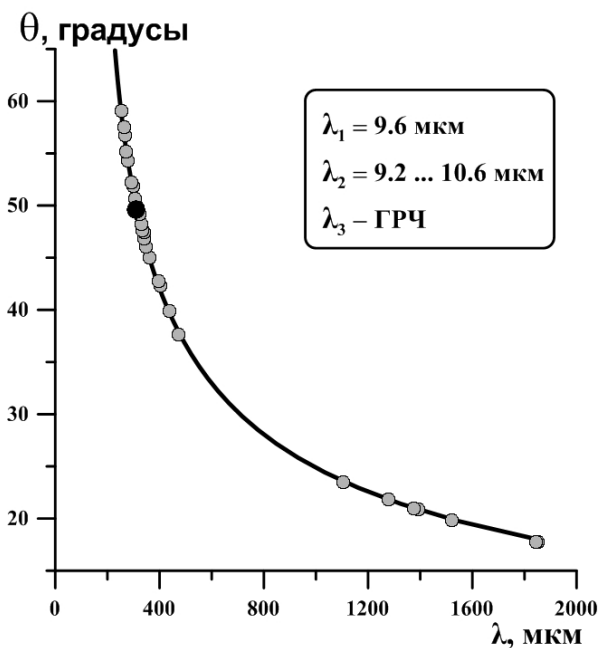


Рис. 8. Угол фазового синхронизма для ГРЧ в кристалле $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$

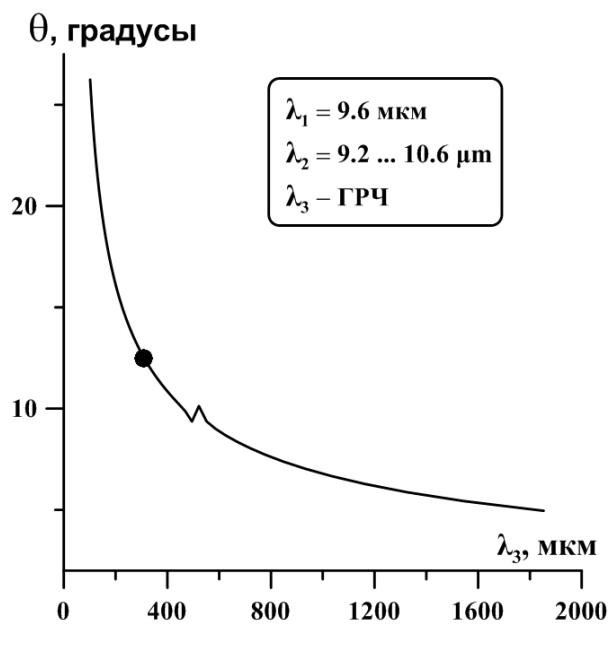


Рис. 9. Угол фазового синхронизма для ГРЧ в кристалле GaSe

Для длины волны ~ 310 мкм угол фазового синхронизма составил: для кристалла GaSe – 12,5 градусов, для ZnGeP_2 – 25 градусов, для $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$ – 49,6 градусов. Для ZnGeP_2 и $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$ большие углы синхронизма не являются препятствием для реализации ГРЧ, так как эти кристаллы можно срезать под необходимым углом и в итоге заводить излучение нормально к поверхности кристалла. Но в случае с GaSe этого сделать невозможно, так как он расслаивается. Поэтому малый угол фазового синхронизма для данного кристалла показывает возможность реализации ГРЧ.

Предполагаемая схема

На рис. 10. представлена предлагаемая схема установки. Мы создали многочастотный CO_2 -лазер с модуляцией добротности резонатора для ГРЧ в нелинейных кристаллах в одном резонаторе, подобрали кристалл. Осталось решить 2 вопроса: какой детектор выбрать для регистрации терагерцового излучения и какой фильтр установить перед ним. Суть в том, что теоретический КПД преобразования порядка 10^{-3} , а в эксперименте ожидается на несколько порядков ниже. Поэтому, ТГц излучение должно быть отделено от излучения нашего лазера оптическим фильтром.

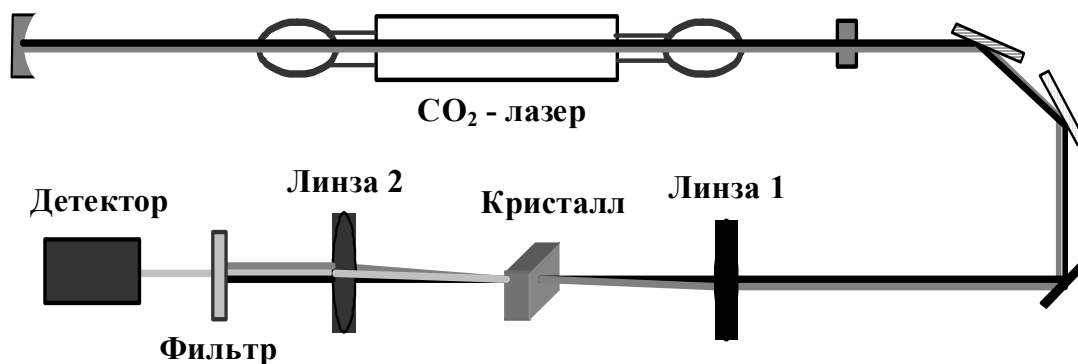


Рис. 10. Предлагаемая схема ГРЧ в нелинейном кристалле

Излучение накачки имеет длину волны 10 мкм. На рис. 11 представлен коэффициент пропускание и отражение образца тефлона (фторопласта) толщины 2 мм в среднем ИК и ТГц диапазонах. Данный материал был использован в работе [2], но он пропускает достаточно большую часть излучения CO₂-лазера и не подходит в качестве фильтра, но может быть использован в качестве материала линзы 2. В качестве другого материала был рассмотрен образец кристаллического кварца. Исходя из анализа рис. 12. был сделан вывод, что данный материал подходит для дальнейших работ в качестве фильтра излучения накачки. Похожими характеристиками обладает также сапфир.

Проанализировав предложения различных производителей детекторов излучения среднего ИК и ТГц диапазонов, мы остановились на Pyro-electric detector (DLA-TGS element with THz absorption coating) фирмы QMC Instruments Ltd. [9]. Он имеет высокую чувствительность (1600 В/Вт) при частоте модуляции подающего сигнала 80 Гц в широком спектральном диапазоне от 100 GHz до 100 THz при комнатной температуре.

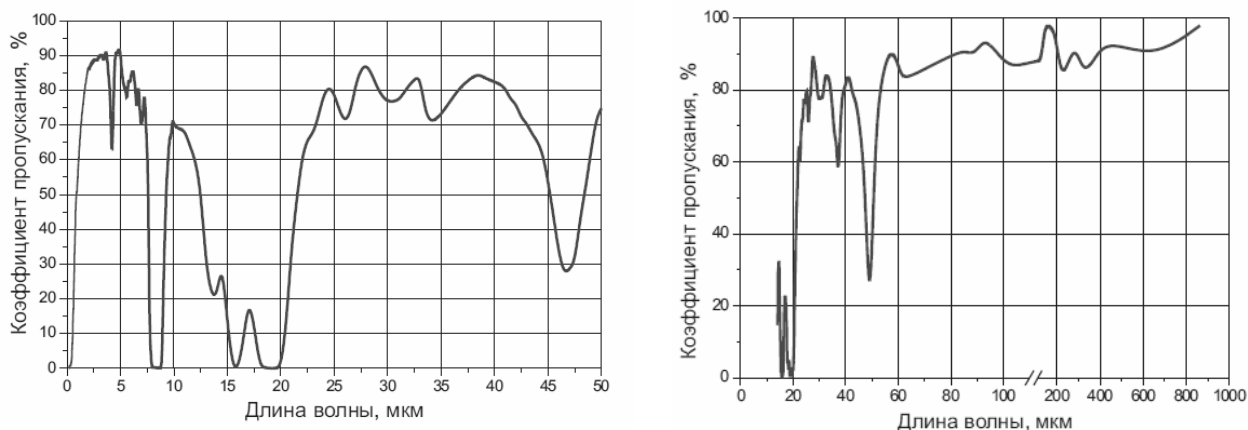


Рис. 11. Пропускание тефлона (фторопласта) толщины 2 мм. Средний ИК и ТГц диапазон [10]

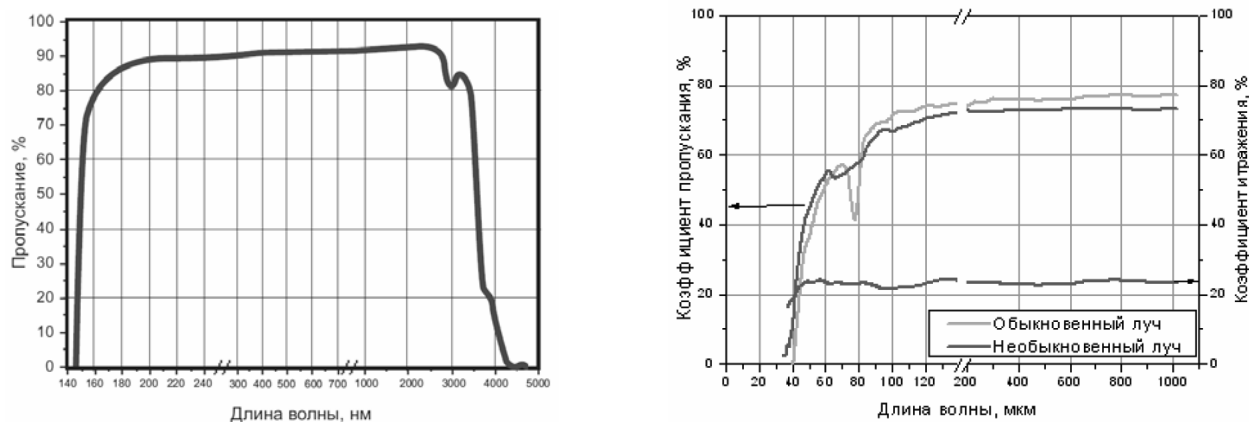


Рис. 12. Пропускание кристаллического кварца толщины 8 мм в среднем ИК (слева) [11] и пропускание и отражение кристаллического кварца толщины 1 мм в ТГц диапазоне [10]

Заключение

Был создан ЭИ CO₂ - лазера с активной синхронизацией мод и пиковой мощностью. ~2 кВт при длительности пиков ~7 нс. Спектр излучения CO₂-лазера состоял из одной колебательно-вращательной линии 9 P(22) с длиной волны $\lambda = 9,568$ мкм.

Был создан многочастотный CO₂-лазер с модуляцией добротности резонатора для ГРЧ в нелинейных кристаллах. Спектр генерации содержал 9 линий из 9-ти микронной полосы, т.к. лазерная трубка была закрыта пластинами из ВаF₂. Три наиболее сильные линии 9 R(18), 9 P(20) и 9 P(22) с длинами волн ~9,28, ~9,55 мкм и ~9,57 мкм, соответственно, содержали 85 % мощности CO₂-лазера. Суммарно по всем линиям генерации пиковая мощность достигала 1 кВт. Самые сильные линии могут дать ГРЧ на длине волны ~310 мкм. Длины волн ГРЧ от других линий попадают в диапазон 263÷8100 мкм.

Были рассчитаны углы фазового синхронизма для ГРЧ в терагерцовый диапазон в кристаллах GaSe, ZnGeP₂ и PbIn₆Te₁₀, из данных результатов был сделан вывод, что все кристаллы подходят для дальнейшей работы.

Был подобран детектор и фильтр. В качестве фильтра лучше всего подходят кристаллический кварц или сапфир.

Работа поддержана РНФ (грант № 16-19-10619).

Список литературы

1. Williams, Benjamin S., et al. 2006 "High-power terahertz quantum-cascade lasers." Electronics letters vol 42 no 2 p 89-91.
2. Andreev Yu.M., et al. 1998 J. Korean Phys. Soc. 33. (3) p 320-325.
3. Zhiming Rao, et al. 2011 Optics Communications 284 p 5472-5474.
4. Richardson M. C. 1974 Applied Physics Letters 25 p 31-33.
5. Pathik Kumbhakar, Takayoshi Kobayashi and Gopal C. Bhar. 2004 Applied Optics Vol. 43 No. 16
6. Ching-Wei Chen, Tsung-Ta Tang, et al. 2009 Journal Optical Society of America vol 26 no 9.
7. Andreev Yu.M., et al. 2014 Laser Phys. Lett. p 13
8. Dmitriev V. G., Gurzadyan G. G., Nikogosyan D. N. 1997 Handbook of Nonlinear Optical Crystals vol 32, ed. A E Siegman (Berlin: Springer).
9. http://www.terahertz.co.uk/index.php?option=com_content&view=article&id=236&Itemid=530
10. http://www.tydexoptics.com/pdf/THz_Materials.pdf
11. http://www.tydexoptics.com/pdf/Crystal_quartz.pdf