

ДИНАМИКА ГЕНЕРАЦИИ КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ МНОГОЧАСТОТНОГО СО-ЛАЗЕРА С МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ РЕЗОНАТОРА

А. А. Ионин¹, И. О. Киняевский¹, Ю. М. Климачев¹, Д. С. Крючков^{1,2}, А. М. Сагитова^{1,3}

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

²Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Московская обл.

³Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

Были получены спектры излучения криогенного СО-лазера, работающего в режиме модуляции добротности резонатора при частотах 70 Гц и 120 Гц. Впервые была измерена динамика генерации такого лазера на всех линиях спектра. Благодаря этому были определены пиковые мощности всех спектральных линий. Для 70 Гц было получено 113 спектральных линий в интервале длин волн от 4,89 мкм до 6,54 мкм, а для 120 Гц – 99 линий в диапазоне длин волн от 4,90 мкм до 6,44 мкм. Для всех линии была проведена идентификация переходов, а также осуществлен анализ процессов, влияющих на формирования спектра.

Введение

Для решения множества задач газового анализа, лазерной химии, медицины, разделения изотопов и ряда других большой интерес представляет разработка источника лазерного излучения в среднем ИК диапазоне. Так, например, многие молекулы, в том числе загрязнители, взрывчатые и токсичные вещества, имеют линии поглощения именно в этом диапазоне, а поглощение тканей человеческого организма сильно зависит от длины волны излучения среднего ИК диапазона.

Одним из наиболее эффективных источников лазерного излучения в среднем ИК диапазоне является СО-лазер. Данный лазер может генерировать излучение на десятках колебательно-вращательных линий. Электрическим разрядом возбуждаются нижние колебательные уровни молекулы СО, а путем обмена колебательной энергией за счет столкновений между молекулами происходит заселение верхних колебательных уровней, что происходит благодаря ярко выраженному ангармонизму молекулы СО. Таким образом, создается частичная инверсная населенность на большом количестве колебательно-вращательных переходов, а благодаря каскадному механизму происходит генерация на большом количестве спектральных линий в широком диапазоне длин волн [1]. Число этих линий может достигать многих сотен [1] для основных колебательных полос в диапазоне длин волн от 4,6 мкм [2] до 8,7 мкм [3] и полос первого колебательного обертона в диапазоне длин волн от 2,5 мкм до 4,2 мкм [4].

Наличие каскадного механизма генерации излучения приводит к тому, что СО-лазер имеет наивысший КПД среди газоразрядных лазеров, в многочастотном режиме достигающий 50 % на основных переходах [1] и 16 % на обертоновых переходах [5].

Однако, для ряда задач требуются длины волн, выходящие за пределы полос генерации СО-лазера. Одним из способов расширения и обогащения спектра СО-лазера является многочастотное преобразование частоты излучения в нелинейных кристаллах. На данный момент было реализована генерация суммарных частот в $ZnGeP_2$ [6] и $AgGaSe_2$ [7] $GaSe$ [8] и $PbIn_6Te_{10}$ [9] с внутренним коэффициентом преобразования 6,5 %, 1 %, 0,3 % и 0,01 %, соответственно. Для этого необходимо иметь большую пиковую мощность излучения накачки, например, за счет модуляции добротности резонатора (МДР). Естественно, что эффективность преобразования широкополосного излучения СО-лазера зависят как от характеристик использованных нелинейных кристаллов, так и от характеристик самого СО-лазера.

Целью данной работы является подробное исследование спектрально-временных характеристик криогенного СО-лазера с накачкой разрядом постоянного тока и МДР. Ранее спектрально-

временные характеристики подобного лазера были исследованы как экспериментально, так и теоретически в работах [10–11]. Хотя в указанных публикациях были приведены достаточно ограниченные экспериментальные результаты, но они показали, что длительности генерации на отдельных колебательно-вращательных линиях очень сильно отличаются.

Оптическая схема эксперимента

Для исследования динамики генерации на отдельных колебательно-вращательных линиях в режиме МДР использовалась установка СО-лазера, оптическая схема которой представлена на рис. 1. В качестве активной среды использовалась криогенная газоразрядная трубка, возбуждаемая разрядом постоянного тока. Торцы трубки были закрыты окнами Брюстера из CaF_2 . В качестве активной среды 1 криогенного СО-лазера использовалась смесь $\text{He:N}_2:\text{CO}:\text{Воздух} = 70:5:1:1$ при напряжении на трубке 9 кВ и токе 6 мА. Давление смеси составляло 7,7 Торр.

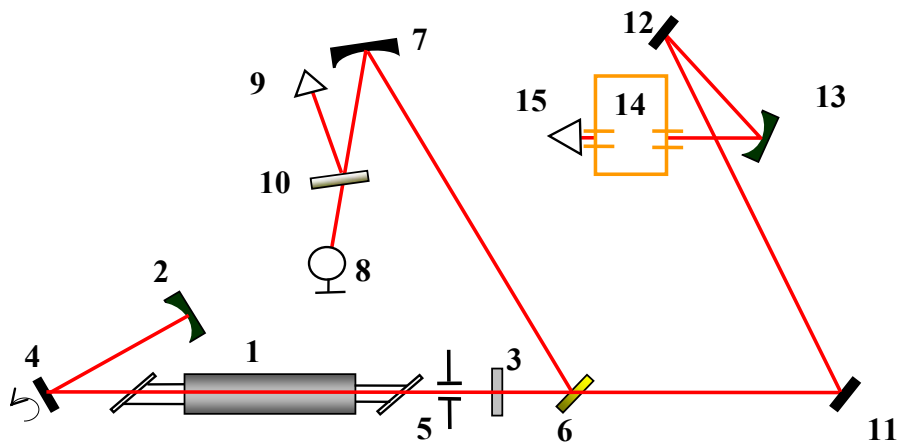


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента. 1 – активная среда СО-лазера; 2 – глухое зеркало; 3 – частично отражающее зеркало; 4 – вращающееся зеркало; 5 – диафрагма; 6, 10 – пластины из CaF_2 ; 7, 13, – сферические зеркала; 8 – измеритель мощности; 9, 15 – фотодетекторы; 11, 12 – поворотное зеркало, 14 – спектрометр ИКС-31

Резонатор лазера был образован глухим сферическим зеркалом 2 (радиус кривизны $R = 9$ м) и плоским выходным зеркалом (коэффициент отражения $\geq 90\%$ в диапазоне длин волн $\sim 5,0\text{--}6,5$ мкм). Внутри резонатора помещалось плоское вращающееся зеркало 4, которое обеспечивало работу лазера в режиме МДР. Диафрагма 5 обеспечивала работу лазера на основной поперечной моде. Для контроля средней мощности излучения его часть ($\sim 5\%$) с помощью плоскопараллельной пластинки 6 из CaF_2 направлялась на сферическое зеркало 7 ($R = 0,6$ м). Далее излучение фокусировалось на измеритель мощности 8 (Orhir-10A), а также фотодетектор 9 (PEM-L-3, временное разрешение 0,5 нс) для контроля временной формы суммарного по спектру импульса, для чего использовалась еще одна пластинка 10 из CaF_2 .

Основная часть излучения ($\sim 95\%$) для измерения спектральных характеристик направлялась с помощью поворотных зеркал 11 и 12, а также сферического зеркала 13 ($R = 0,5$ м) на вход спектрометра 14 (ИКС-31). Отселектированное излучение попадало на фотодетектор 15 (PEM-L-3). Сигналы с фотодетекторов 9 и 15 регистрировались на осциллографе Tektronix TDS 1012 (на рис. 1 не показан).

Динамика генерации на отдельных спектральных линиях

На рис. 2 показана характерная осциллограмма, зарегистрированная на осциллографе. Сигнал 1 соответствует динамике генерации суммарного по спектру импульса, а сигнал 2 – динамике генерации на конкретной колебательно-вращательной линии. Результаты усреднялись по 4 измере-

ниям. Длительности генерации по уровню 0,1 и 0,5 от высоты импульса на конкретной колебательно-вращательной линии показаны серым и черным отрезками, соответственно.

Динамика генерации полного импульса и отдельных вращательных компонент колебательной полосы 7–6 представлена на рис. 3. Из рисунка видно, что наиболее сильные линии, например, $P(9)$ и $P(8)$ перекрываются по времени полностью. То есть они будут взаимодействовать в нелинейном кристалле при суммировании частот наиболее эффективно. Есть линии, например, $P(8)$ и $P(11)$, которые перекрываются по времени только частично. Они дадут вклад в эффективность суммирования частот существенно меньший. Но есть и такие линии, например, $P(7)$ и $P(12)$, которые по времени практически не перекрываются, то есть не дадут суммарной частоты в принципе.

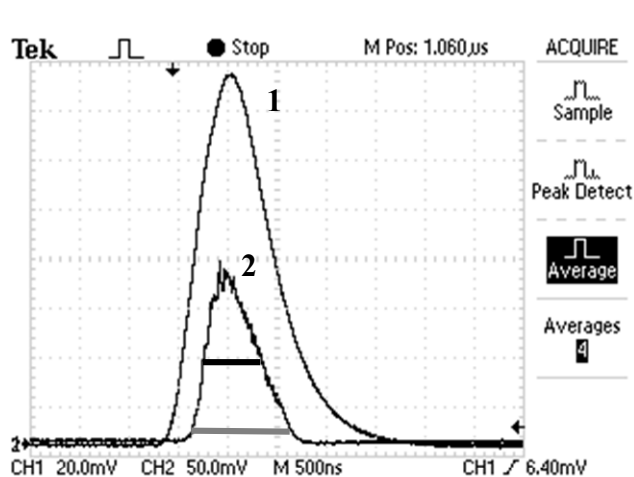


Рис. 2. Характерная осциллограмма динамики генерации суммарного по спектру импульса (1), и динамики генерации на конкретной колебательно-вращательной линии (2)

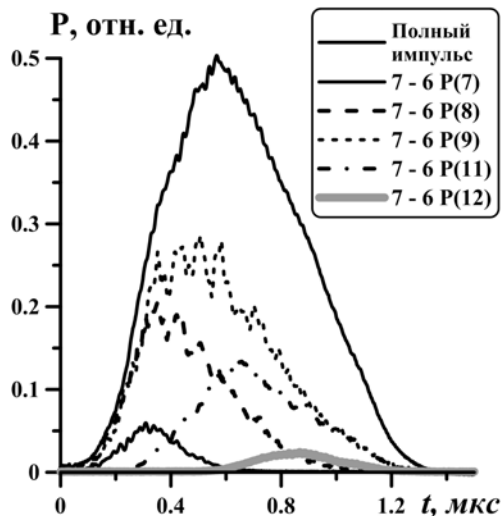


Рис. 3. Динамика генерации полного импульса и отдельных вращательных компонент колебательной полосы 7–6

На рис. 4 представлены длительности генерации на спектральных линиях СО лазера для двух частот МДР 70 Гц и 120 Гц в зависимости от длины волны. Черными отрезками показана длительность по уровню 0,1, а серыми – по уровню 0,5 от высоты импульса. Также для каждой линии точками отмечены те моменты, когда импульс генерации на данной линии достигал своего максимума. В верхней части рис. 4 горизонтальными отрезками показан диапазон по длинам волн, соответствующей колебательной полосе, а также указаны переходы: $(V+1)-VP(J)$, где V – колебательное квантовое число, J – вращательное квантовое число.

В среднем длительность генерации по уровню 0,1 при частоте модуляции $f = 70$ Гц приблизительно в два раза больше длительности генерации в случае $f = 120$ Гц. Видно, что на низких колебательных полосах ($V = 3 \div 13$) генерация лазера начиналось на низких и средних вращательных компонентах ($J = 6 \div 10$). Тогда как на более высоких вращательных компонентах ($J = 11 \div 13$) каждой колебательной полосы генерация начиналась во второй половине всего лазерного импульса. В основном мы можем наблюдать, что в пределах одной полосы с возрастанием номера вращательной компоненты момент достижения максимума мощности наблюдается в более позднее время. На средних колебательных полосах ($V = 14 \div 23$) подобный анализ затруднен из-за уменьшения числа вращательных компонент. Это связано, по-видимому, как со снижением коэффициента усиления на данных линиях, так и с наличием поглощения воздуха в этом спектральном диапазоне (5,6–6,5 мкм).

При обоих частотах модуляции мы можем наблюдать, что генерация на самой низкой колебательной полосе ($V = 3$) начиналась с существенным запаздыванием, если сравнивать с генерацией более высоких колебательных полос. Можно сделать вывод, что инверсная населенность на этом колебательном переходе появляется только за счет «сваливания» молекул СО с более высоких уровней благодаря генерации излучения высоких колебательных полос. В данном случае наиболее

явно проявляется преимущество многоуровневой схемы генерации в СО-лазере за счет каскадного механизма появления инверсной населенности.

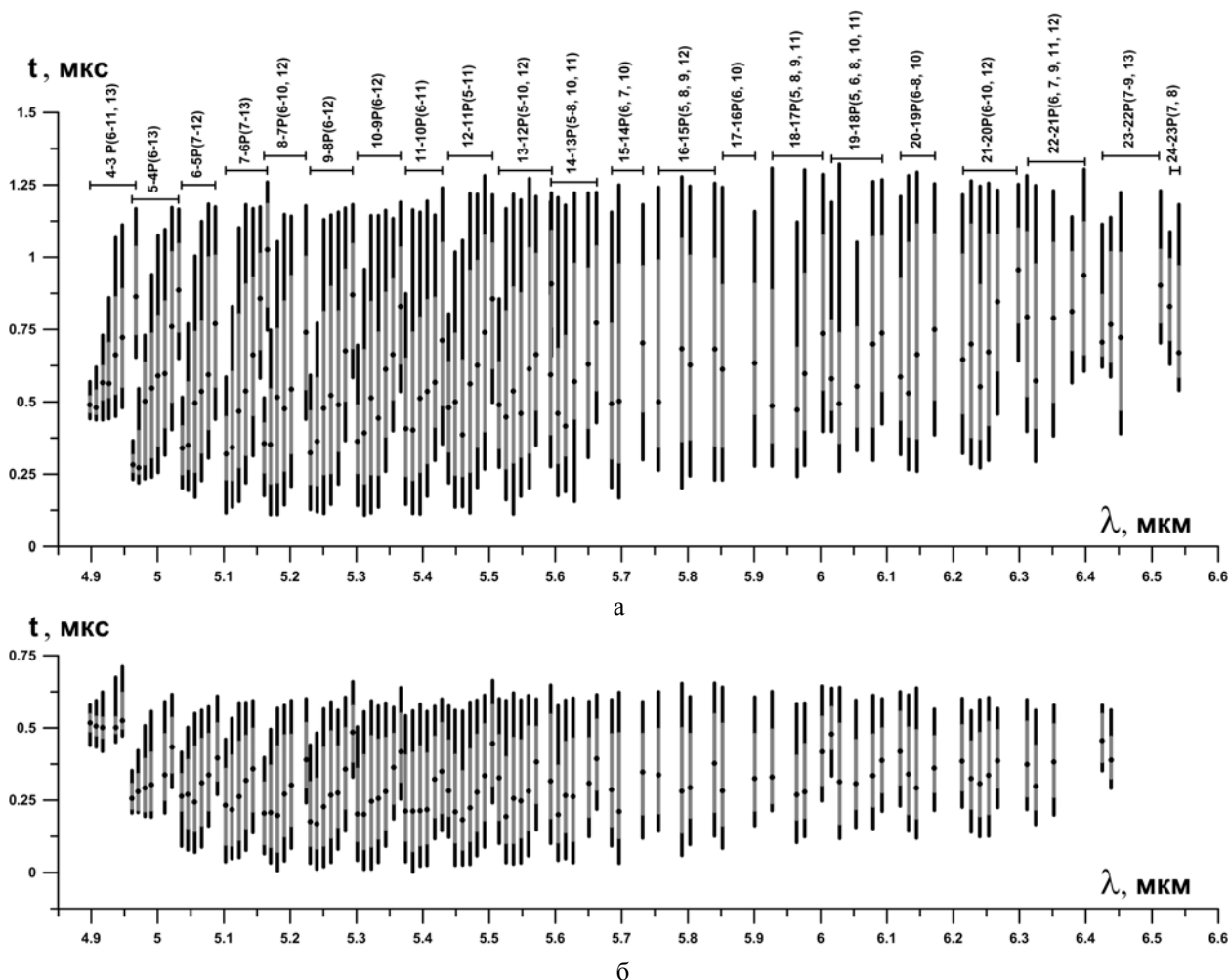


Рис. 4. Длительность генерации спектральных линий для частот МДР 70 Гц (а) и 120 Гц (б)

Методика расчета пиковой мощности излучения спектральных линий и спектр генерации

Мощность излучения на отдельных колебательно-вращательных линиях измерялась в относительных единицах (Вольтах). Максимальное значение (пиковая мощность) в этих единицах для каждой линии умножалось на длительность генерации для данной линии по уровню 0,5. Тем самым получалась энергия генерации на данной линии в относительных единицах. Сумма энергий по всем линиям давала энергию суммарного по спектру импульса генерации в относительных единицах. Перевод пиковой мощности в ватты в данной работе осуществлялся путем нормировки на реальную энергию суммарного по спектру импульса генерации. Энергия импульса равна отношению средней мощности суммарного по спектру излучения (реально измеренного в эксперименте) к частоте модуляции добротности.

Затем пиковая мощность излучения спектральных линий уточнялась благодаря учету спектральной чувствительности фотоприемника. По известной из паспорта фотоприемника зависимости находится мощность, в действительности излучаемая СО-лазером.

При использовании этого метода рассчитанная пиковая мощность большинства линий на 20 % выше мощности, рассчитанной по упрощенной схеме, когда считалось, что все линии генерации имеют одну и ту же длительность по уровню 0,5, равную длительности суммарного по спектру импульса генерации.

Распределение мощности по линиям генерации и идентификация колебательно-вращательных переходов для импульсно-периодического неселективного СО-лазера представлены на рис. 5. На спектре также указаны колебательно-вращательных переходов.

Полученный спектр СО-лазера при частоте модуляции добротности 70 Гц насчитывал 113 линий в диапазоне длин волн от 4,89 мкм до 6,54 мкм, а при 120 Гц – 99 линий в диапазоне длин волн от 4,90 до 6,44 мкм. В обоих случаях наиболее сильные линии наблюдались в диапазоне длин волн от 4,8 до 5,3 мкм. Максимальная пиковая мощность приходится на переход 8–7 $P(9)$. В каждой из колебательных полос наиболее сильными были вращательные компоненты с $J = 9 \div 12$.

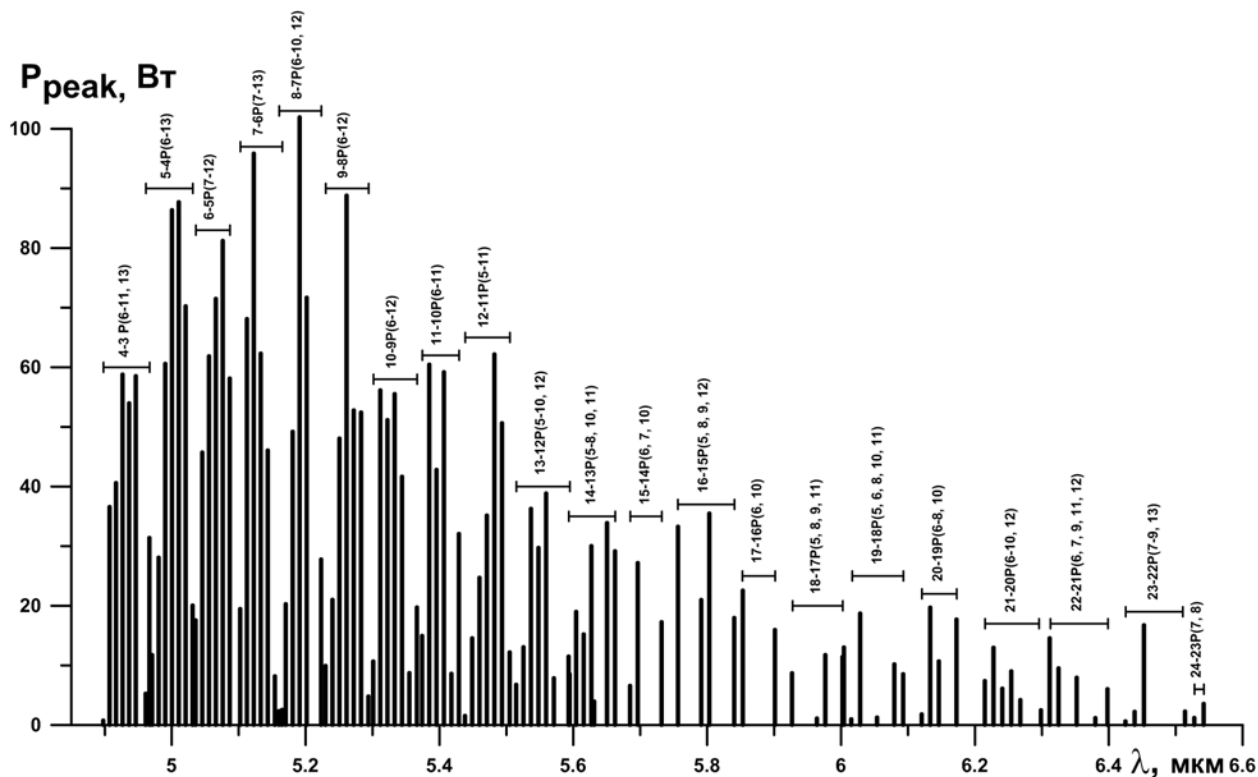


Рис. 5. Спектр СО-лазера при частоте МДР 70 Гц

На рис. 6 видно, что спектральные линии есть только в тех интервалах длин волн, где поглощение воздухом не слишком велико. На рисунке величина пропускания обозначена границей между желтым и белым цветом.

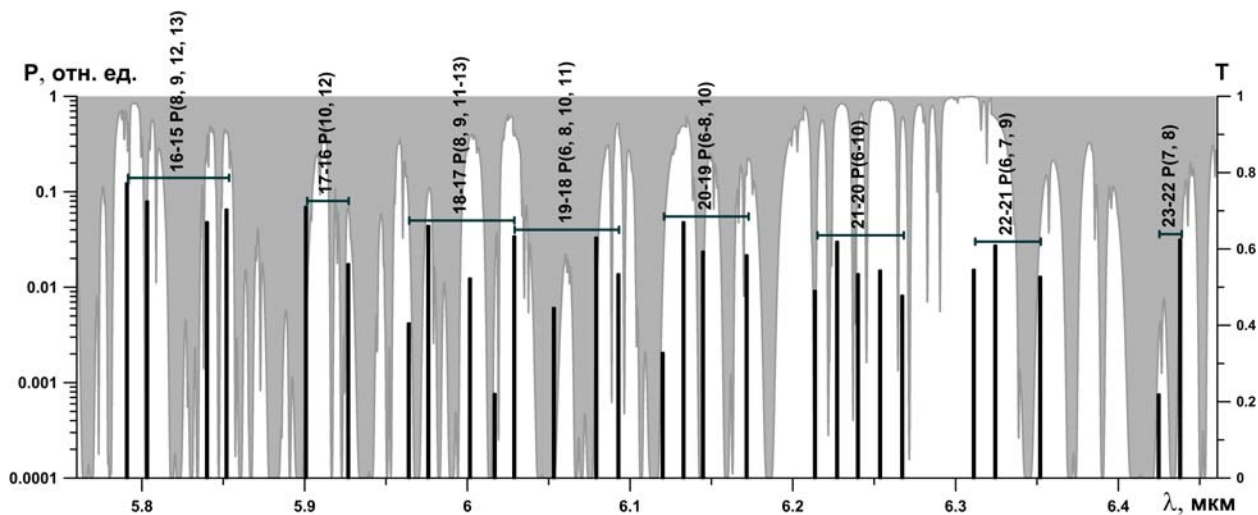


Рис. 4. Участок спектра СО-лазера при частоте МДР 120 Гц и поглощение воздуха T

Заключение

В ходе данной работы была рассмотрена генерация спектра СО-лазера в режиме модуляции добротности резонатора при двух разных частотах. Впервые была измерена динамика генерации такого лазера на всех линиях спектра. Спектр, полученный при работе лазера с частотой модуляции добротности 70 Гц, насчитывал 115 спектральных линий в интервале от 4,89 мкм до 6,54 мкм. При 120 Гц были получены 102 линии в диапазоне длин волн от 4,90 мкм до 6,44 мкм. Были рассчитаны пиковые мощности спектральных линий с нормировкой на длительности их генерации по уровню 0,5. Для всех линии была проведена идентификация переходов и проведен анализ процессов, влияющих на формирования спектра.

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

Список литературы

1. Ionin A. A. "Electric discharge CO laser" in Gas Lasers, M. Endo and R. Walter eds. (CRC Press - Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida) 2007. P. 201–238.
2. McCord J. E., Ionin A. A., Phipps S. P. et al. // IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000. 36, 1041.
3. Ionin A. A., Kinyaevskiy I. O., Klimachev Yu. M. et al. // Optics letters, 2017. 42(3), 498.
4. Basov N. G., Hager G. D., Ionin A. A. et al. Efficient pulsed first-overtone CO laser operating within the spectral range of 2,5–4,2 μm // IEEE J. Quantum Electronics, 2000. V. 36. P. 810.
5. Ионин А. А., Климачев Ю. М., Козлов А. Ю., Котков А. А., Курносов А. К., Напартович А. П., Рулев О. А., Селезнев Л. В., Сеницын Д. В., Хагер Г., Шнырев С. Л. Импульсный обертоновый СО лазер с КПД 16 % // Квантовая электроника, 2006. 36(12). С. 1153.
6. Andreev Yu. M., Ionin A. A., Kinyaevskiy I. O. et al. // Quantum Electronics, 2013. 43(2), 139.
7. Budilova O. V., Ionin A. A., Kinyaevskiy I. O. et al. // Optics Letters, 2016. 41(4), 777.
8. Zh. Lai-ming, X. Ji-Jiang, G. Jin, et al. // Optics and Precision Engineering, 2012. 20(2), 277.
9. Ionin A. A., Kinyaevskiy I. O., Klimachev Yu. M., Kotkov A. A., Badikov V. V., Mitin K. V. "Frequency conversion of molecular gas lasers in $\text{PbIn}_6\text{Te}_{10}$ crystal within mid-IR range // Optics Letters, 2016. 41, (10), pp. 2390–2393.
10. Basiev A. G., Golubev A. A., Gurashvili V. A., Iziumov S. V. Soviet Physics Technical Physics 1980. 25, 1016.
11. Басиев А. Г., Гальцев В. Е., Гурашвили В. А., Изюмов С. В., Кочетов И. В., Курносов А. К., Певгов В. Г. Особенности спектрообразования СО-лазера с модулированной добротностью / Препринт № 3448/12, М., ИАЭ. 32с., 1981.