

Импульсный лазер на первом колебательном оберitone молекулы CO, действующий в спектральном диапазоне 2.5–4.2 мкм. 1. Многочастотный режим генерации

Н.Г.Басов*, А.А.Ионин*, А.А.Котков*, А.К.Курносков**, Дж.Е.МакКорд***, А.П.Напартович**, Л.В.Селезнев*, Н.Г.Туркин**, Г.Д.Хагер***

Экспериментально и теоретически исследованы генерационные свойства импульсного электроионизационного СО-лазера, работающего в многочастотном режиме генерации излучения на первом колебательном оберitone молекулы СО. Экспериментально показано, что импульсный многочастотный оберитонный СО-лазер – это эффективный источник когерентного излучения в спектральном диапазоне длин волн 2.5–4.1 мкм, удельный лазерный энергосъем которого достигает 50 Дж/(л·Амага), а электрооптический КПД – 11%. Теоретический прогноз, основанный на экспериментальных данных, указывает на возможность достижения КПД генерации оберитонного излучения ~20%. Обсуждается эффект чередования интенсивности колебательных полос оберитонного СО-лазера, связанный с каскадным механизмом спектрообразования излучения. Сопоставление экспериментальных и теоретических расчетных данных показало хорошее согласие между ними в отношении спектрально-энергетических характеристик излучения оберитонного СО-лазера и выявило необходимость уточнения кинетической модели активной среды СО-лазера для описания временных параметров импульса излучения.

Ключевые слова: оберитонные колебания, электроионизационный СО-лазер, VV-обмен.

Введение

Благодаря кинетике колебательно-колебательного VV-обмена [1, 2], лазер на первом оберitone ($\Delta v = 2$) молекулы СО [3, 4] в режиме свободной генерации может работать на колебательных переходах, существенно более высоких, чем те, на которых работает СО-лазер в основной (фундаментальной) полосе ($\Delta v = 1$). Спектральный диапазон генерации излучения оберитонного СО-лазера перекрывает область генерации HF- и DF-лазеров, а плотность его заполнения колебательно-вращательными линиями намного выше. Многие из этих линий совпадают с линиями поглощения различных органических и неорганических веществ. Оберитонный СО-лазер, генерирующий излучение на этих колебательно-вращательных линиях, может быть использован для резонансного воздействия на самые различные среды в нелинейной спектроскопии, лазерном мониторинге атмосферы, лазерной химии и т. п. При этом длинноволновая часть спектра оберитонного СО-лазера попадает в «окно прозрачности» атмосферы, а излучение в коротковолновой части эффективно поглощается молекулами воды и может быть использовано, например, в лазерной медицине.

К началу 90-х гг. спектр излучения импульсного многочастотного оберитонного СО-лазера, наблюдавшийся в экспериментах [3–7], лежал в довольно узком интервале длин волн от 2.7 до 3.3 мкм, соответствовавшем колеба-

тельным переходам вида $v + 2 \rightarrow v$ от $12 \rightarrow 10$ до $23 \rightarrow 21$. В работах [5–7] было показано, что электрооптический КПД генерации импульсного оберитонного многочастотного СО-лазера (отношение выходной оптической энергии к энергии накачки, введенной в активную среду до окончания импульса генерации, далее КПД) достигает 5% при удельном энергосъеме до 10 Дж/(л·Амага) и полной энергии генерации до 50 Дж. В непрерывном лазере низкого давления [8] была получена генерация оберитонного излучения на отдельном колебательно-вращательном переходе молекулы СО, и в [8, 9] генерация излучения наблюдалась на 330 отдельных спектральных линиях с максимальной мощностью до ~0.5 Вт (о КПД при этом не сообщалось) в диапазоне длин волн 2.62–4.07 мкм (переходы от $10 \rightarrow 8$ до высоко расположенного перехода $37 \rightarrow 35$) и с шириной спектральной линии ~110 кГц [10].

В кинетической модели активной среды СО-лазера из-за дефицита экспериментальных данных о скоростях VV-обмена на высоко расположенных колебательных уровнях молекулы СО обычно применяется метод экстраполяции кинетических констант [11–17]. Например, в работе [17] на основании согласия расчетных и экспериментальных данных набор кинетических констант для лазера на основных переходах молекулы СО от $5 \rightarrow 4$ до $16 \rightarrow 15$ применялся и для расчета потенциальных энергетических возможностей сверхзвукового оберитонного электроионизационного СО-лазера (СО-ЭИЛ), работающего на оберитонных переходах до $44 \rightarrow 42$. Однако применимость метода экстраполяции кинетических констант для таких высоких колебательных переходов требует своего обоснования путем сопоставления с экспериментальными данными.

Такое сопоставление было предпринято в работе [16] при исследовании генерационных свойств многочастотного оберитонного СО-ЭИЛ с малой длительностью импульса энерговклада ~1.5 мкс. В этой работе отмечалось

*Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 117924 Москва, Ленинский просп., 53; тел./факс: (095) 132-04-25, эл.почта: aion@sci.lebedev.ru

**ГНЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Россия, 142092 Троицк Моск. обл.; тел: (095) 334-04-50, эл.почта: apn@triniti.ru

***AFRL, Albuquerque, New Mexico, USA

удовлетворительное согласие между экспериментальными и расчетными данными, но спектр излучения был довольно узким (11 линий на переходах от 14 → 12 до 19 → 17) и электрооптический КПД лазера не превышал 1.2 % при удельном энергопотреблении до 12 Дж/(л·Амага).

В настоящей работе экспериментально и теоретически исследуются генерационные характеристики импульсного СО-ЭИЛ на первом колебательном обертоне молекулы окиси углерода, работающего в многочастотном режиме генерации излучения (см. также [18–24]). Исследованию частотно-селективного режима генерации излучения обертонного СО-лазера на отдельных колебательно-вращательных переходах будет посвящено продолжение настоящей работы [25].

1. Лазерная установка и методики измерения параметров

Эксперименты проводились в Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН на импульсной криогенной электроионизационной (ЭИ) лазерной установке с длиной активной среды 1.2 м при максимальной плотности тока электронного пучка 20 мА/см², энергии электронов ~ 150 кэВ. Импульс тока ЭИ разряда имел форму, близкую к треугольной, с максимумом на переднем фронте. Его длительность могла варьироваться от 25 до 1500 мкс (по уровню 0.1). Удельный энерговыход менялся от 50 до 1000 Дж/(л·Амага). Отклонение энерговыхода от этих значений на краях электроразрядного промежутка не превышало 10 %. В большинстве экспериментов отношение напряженности электрического поля к плотности газовой смеси E/N составляло порядка 4 кВ/(см·Амага).

Система регистрации параметров лазерного излучения позволяла измерять энергию импульса, его временную динамику, распределение интенсивности излучения в ближней и дальней зонах, регистрировать спектр излучения. Для выделения излучения либо на обертонных, либо на основных переходах применялись спектральные фильтры. В качестве таких фильтров использовались или тонкие кварцевые пластины, полностью поглощавшие излучение с длиной волны более 5 мкм, или широкополосные интерференционные зеркала, имевшие коэффициент отражения более 90 % в интервале длин волн 2.5–4.0 мкм и коэффициент пропускания более 90 % в интервале 5–6 мкм.

Для анализа колебательно-вращательной структуры спектра лазерного излучения применялась схема щелевого спектрографа с нормальным падением излучения на поверхность дифракционной решетки (150 штр./мм, максимальное отражение неполяризованного света на длине волны 4 мкм). Спектр излучения регистрировался в фокальной плоскости спектрографа на диффузно рассеивающем экране при помощи тепловизионной аппаратуры с последующей цифровой обработкой изображения. В экспериментах использовались лазерные резонаторы с внутрирезонаторным спектральным фильтром и диэлектрическими зеркалами.

2. Лазер с внутрирезонаторным фильтром

Для исследования генерационных характеристик обертонного СО-лазера в этих экспериментах был применен внутрирезонаторный широкополосный спектральный фильтр, полностью подавивший генерацию в основ-

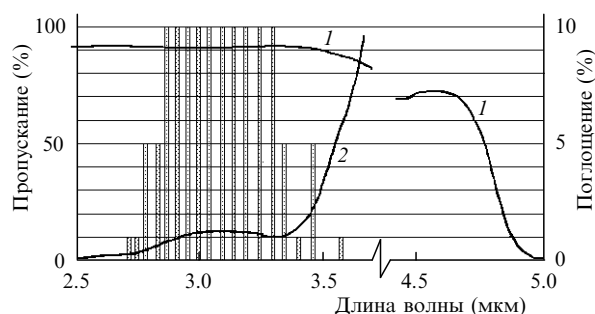


Рис.1. Спектральное пропускание фильтра (1) и поглощение (2) излучения в материале фильтра, а также типичный спектральный состав лазерного излучения (гистограмма).

ной полосе. Спектральный фильтр представлял собой тонкую плоскопараллельную пластину из плавленого кварца толщиной ~ 0.5 мм и диаметром 50 мм. Фильтр устанавливался внутри резонатора вблизи выходного окна ЭИ разрядной камеры под определенным углом к оптической оси лазерного резонатора. Оптический резонатор был образован двумя медными зеркалами: плоским и сферическим с радиусом кривизны ~ 5 м. Сферическое зеркало закреплялось непосредственно на разрядной камере. Оптический объем лазера был ограничен внутрирезонаторной апертурной диафрагмой диаметром 36 мм и составлял ~ 1.2 л. Излучение выводилось из резонатора за счет френелевского отражения от обеих граней фильтра. На рис.1 представлены спектральное пропускание фильтра и поглощение излучения в материале фильтра, а также типичный спектральный состав лазерного излучения.

2.1. Спектральные характеристики

Генерация многочастотного обертонного излучения наблюдалась в диапазоне длин волн 2.7–3.6 мкм (рис.1), что соответствовало колебательным переходам от 13 → 11 до 30 → 28 при отсутствии генерации излучения на основных переходах. Ограничение спектрального диапазона лазерного излучения было обусловлено внутрирезонаторным поглощением атмосферными парами воды в области длин волн менее 2.7 мкм и поглощением материалом спектрального фильтра на длине волны более 3.6 мкм. В условиях полного подавления генерации излучения на основных переходах молекулы СО было проведено многопараметрическое исследование генерационных характеристик импульсного многочастотного ЭИ лазера, работающего на первом колебательном обертоне молекулы СО.

2.2. Энергетические характеристики

При исследовании энергетических характеристик обертонного СО-ЭИЛ изучалось влияние ряда параметров на удельный энергопотребление и КПД лазера, а также проводилось сопоставление экспериментальных и расчетных данных (см. также [18–20]). В ходе экспериментального исследования менялись параметры лазерной смеси: плотность (от 0.02 до 0.5 Амага), начальная температура (от ~ 100 до 300 К), состав лазерной смеси $\text{CO}:\text{N}_2 = 1:x$ (где x изменялось от 1.5 до 39) и смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He} = 1:9:y$ (где y изменялось от нуля до 20); варьировались параметры импульса ЭИ разряда: удельный энерговыход (от 50 до 1000 Дж/(л·Амага)), длительность импульса энерговыхода (от 25 до 1500 мкс), емкость

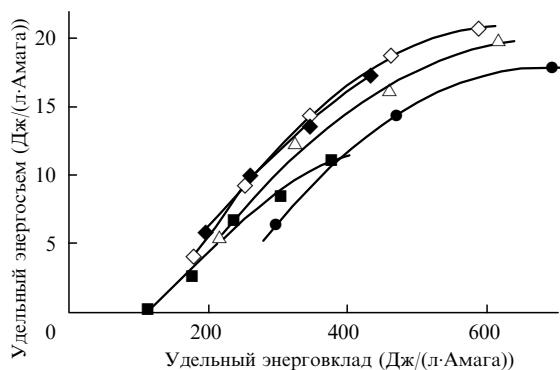


Рис.2. Зависимости удельного энергосъема от удельного энергозклада при плотностях $N = 0.5$ (■), 0.3 (◆), 0.2 (◇), 0.12 (△) и 0.06 Амага (●) газовой смеси $\text{CO}:\text{N}_2 = 1:9$.

батареи конденсаторов (от 12 до 67 мкФ); изменялись параметры резонатора: коэффициент вывода излучения из резонатора (от 0.5 до 10 %) путем поворота фильтра по отношению к оптической оси резонатора, добротность резонатора путем внесения дополнительных оптических потерь (до 30 %).

В результате этого исследования были определены оптимальные с точки зрения КПД условия генерации излучения импульсного многочастотного обертонного СО-ЭИЛ: плотность газовой смеси 0.1–0.3 Амага, температура газа $T \sim 100$ К, состав лазерной смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He} = 1:9:10$, удельный энергозклад 200–300 Дж/(л·Амага) при длительности импульса накачки ~ 25 мкс, коэффициент вывода излучения из резонатора 4–8 %. Однако для получения максимального удельного энергосъема экспериментальные условия несколько отличались от вышеуказанных: использовалась лазерная смесь $\text{CO}:\text{N}_2 = 1:9$ при энергозкладе 500–600 Дж/(л·Амага). На рис.2 даны зависимости удельного энергосъема от удельного энергозклада при плотности газовой смеси $N = 0.06 - 0.5$ Амага для смеси $\text{CO}:\text{N}_2 = 1:9$. Макси-

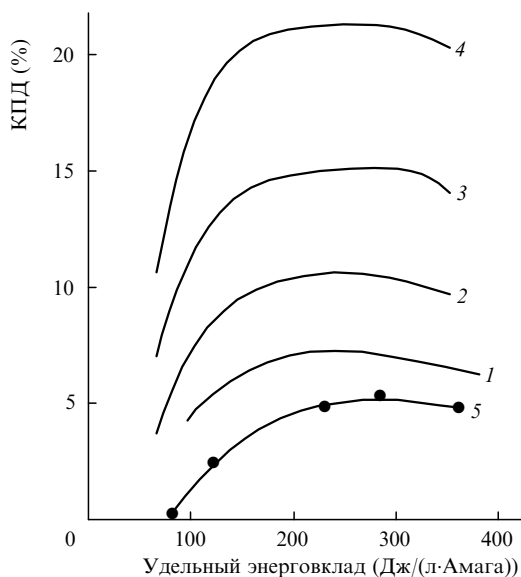


Рис.3. Расчетные (1–4) и экспериментальная (5) зависимости КПД обертонного СО-лазера от удельного энергозклада при потерях излучения на поглощение и рассеяние в оптических элементах за двойной обход лазерного резонатора 6 (1), 4 (2) и 2 % (3, 4) (кривая 4 получена в предположении, что атмосферные пары воды внутри лазерного резонатора отсутствуют) для смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He} = 1:9:10$, $N = 0.3$ Амага, $T \sim 100$ К.

мальный удельный энергосъем более 20 Дж/(л·Амага) был зарегистрирован при плотности газовой смеси 0.2 Амага и энергозкладе ~ 600 Дж/(л·Амага).

Сопоставление экспериментальных данных и результатов теоретических расчетов, выполненных на основе кинетической модели активной среды СО-лазера с учетом условий проведенных экспериментов, показало [18–20], что энергетические и спектральные характеристики обертонного СО-лазера удовлетворительно описываются этой моделью.

На рис.3 приведены экспериментальная и расчетные зависимости КПД обертонного СО-лазера от удельного энергозклада для лазерной смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He} = 1:9:10$ с плотностью 0.3 Амага и температурой ~ 100 К. В этих экспериментах КПД обертонного СО-лазера достигал максимального значения $\sim 5.5\%$ при энергозкладе примерно 300 Дж/(л·Амага). Расчетные кривые 1–4 на рис.3 соответствуют разным потерям излучения на поглощение и рассеяние в оптических элементах за двойной обход лазерного резонатора. Теоретическая кривая 1 (потери 6 %) неплохо согласуется с экспериментальными данными, а при реально достижимом уменьшении оптических потерь в таком лазерном резонаторе до 2 % (кривая 3) расчетный КПД увеличивался до $\sim 15\%$. При устранении же атмосферных паров воды из оптического резонатора и, соответственно, при расширении спектра в коротковолновую область, теоретический прогноз дает КПД обертонного СО-лазера $\sim 20\%$.

2.3. Временные характеристики

Импульс обертонного излучения в условиях, наиболее близких к оптимальным по эффективности, имел почти треугольную форму при характерной длительности от 0.5 до 2 мс и начинался почти всегда после импульса энергозклада (исключение из этого правила см. ниже). При уменьшении плотности газовой смеси от 0.5 до 0.02 Амага длительность импульса излучения увеличивалась от 0.3 до 3 мс, а время задержки его начала по отношению к началу импульса накачки возрастало от 80 до 500 мкс [18–20]. Увеличение энергозклада выше оптимальных значений (~ 300 Дж/(л·Амага)) приводило к уменьшению длительности импульса излучения.

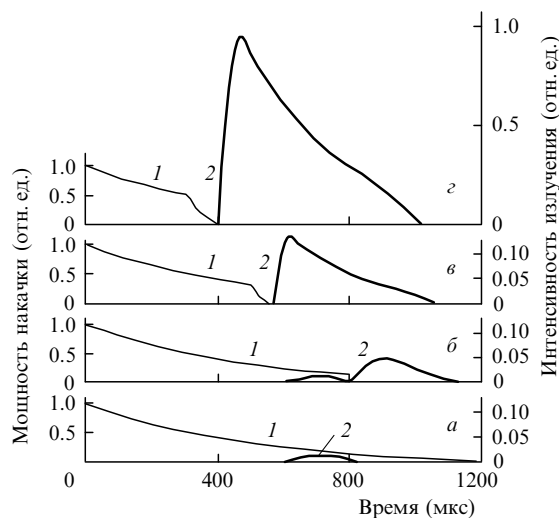


Рис.4. Временные зависимости мощности накачки (1) и интенсивности обертонного излучения (2) при удельном энергозкладе 300 Дж/(л·Амага) для смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He} = 1:9:10$, $N = 0.3$ Амага.

В этих же экспериментах было продемонстрировано, что уменьшение длительности импульса ЭИ разряда до 25 мкс при одинаковом энерговкладе приводило к монотонному увеличению как эффективности лазера, так и удельного энергосъема. Такое же возрастание энергетических характеристик оберточного СО-лазера при уменьшении длительности импульса ЭИ разряда, но в других экспериментальных условиях иллюстрируется рис.4.

В данном эксперименте временные зависимости мощности накачки были одинаковыми до момента окончания (обрыва) импульса ЭИ разряда. При этом длительность импульса накачки изменялась от 400 до 1200 мкс. На рис.4,а показан полный импульс накачки (кривая 1) с длительностью $t_p \sim 1200$ мкс и удельным энерговкладом, равным 300 Дж/(л·Амага), для лазерной смеси СО: N₂:He = 1:9:10 с плотностью 0.3 Амага. В таких условиях очень слабый импульс излучения оберточного СО-лазера (кривая 2) возникал в самом процессе накачки активной среды ЭИ разрядом с временем задержки начала импульса ~ 600 мкс и длительностью импульса ~ 0.2 мс.

Прерывание импульса ЭИ разряда после возникновения импульса генерации в момент времени $t = t_p \approx 800$ мкс (рис.4,б) приводило к резкому возрастанию интенсивности оберточного излучения и увеличению длительности импульса лазерного излучения до 0.5 мс. Уменьшение длительности импульса накачки от ~ 600 мкс (рис.4,в) до ~ 400 мкс (рис.4,г) приводило к увеличению интенсивности и энергии оберточного излучения почти на порядок.

Результаты этого эксперимента указывают на то, что разряд в газе оказывает существенное влияние на кинетические процессы, происходящие в активной среде оберточного СО-лазера. Расчетные времена задержки начала импульса лазерного излучения и его длительность были заметно меньше тех характерных значений, которые наблюдались в эксперименте. Это расхождение требует уточнения механизмов передачи энергии на сравнительно высокие колебательные уровни молекулы СО (см., напр., [19]).

Применение внутрирезонаторного фильтра позволило полностью подавить генерацию излучения на основных переходах молекулы СО и расширить спектральный диапазон генерации многочастотного оберточного излучения в длинноволновую область до 3.6 мкм. Многопараметрическое исследование генерационных характеристик лазера с этим фильтром позволило определить оптимальные условия для повышения эффективности и удельного энергосъема оберточного СО-лазера.

3. Лазер с интерференционными зеркалами

Результаты исследования влияния параметров лазерного резонатора на генерационные характеристики оберточного СО-лазера с внутрирезонаторным фильтром позволили сформулировать требования к лазерным зеркалам: коэффициент вывода излучения из резонатора должен составлять 4–8 % за двойной проход в диапазоне длин волн 2.5–4.2 мкм, а коэффициент отражения – менее 10 % (при использовании симметричного резонатора) в диапазоне 4.8–6.5 мкм. В экспериментах использовались различные пары диэлектрических интерференционных лазерных зеркал на подложках из СаF₂ с разными спектральными характеристиками.

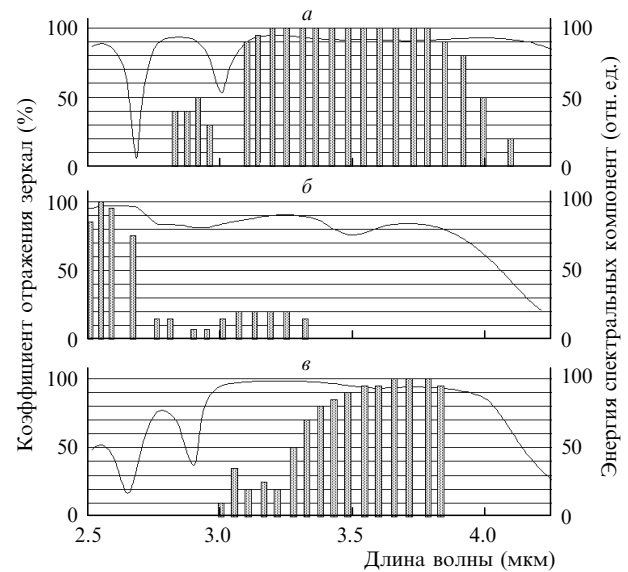


Рис.5. Колебательные спектры оберточного излучения (гистограммы) и соответствующие им коэффициенты отражения зеркал эквивалентного симметричного резонатора (кривые) для трех пар (а–в) лазерных зеркал, смеси СО:N₂:He = 1:9:10, $N = 0.12$ Амага, удельного энерговклада 300 Дж/(л·Амага).

3.1. Спектральный диапазон излучения лазера

На рис.5 представлены коэффициенты отражения трех пар лазерных зеркал эквивалентного симметричного резонатора: $R(\lambda) = (R_i R_j)^{1/2}$, $i, j = 1, 2$, где R_i, R_j – коэффициенты отражения зеркал. Наблюдавшиеся колебательные спектры оберточного излучения показаны в виде гистограмм. В каждой колебательной полосе наблюдалась генерация излучения на двух-трех колебательно-вращательных линиях.

В этих экспериментах при использовании различных пар лазерных зеркал спектр генерации многочастотного оберточного излучения был расширен как в длинноволновую область до 4.1 мкм (колебательный переход 37 → 35, рис.5,а), так и в коротковолновую область до 2.5 мкм (переход 6 → 4, рис.5,б). Несмотря на малость коэффициента отражения лазерных зеркал в области длин волн 5–6 мкм ($R < 10\%$, т. е. коэффициент вывода излучения за обход резонатора составлял более 99 %), в резонаторе возникала генерация на основных переходах молекулы СО.

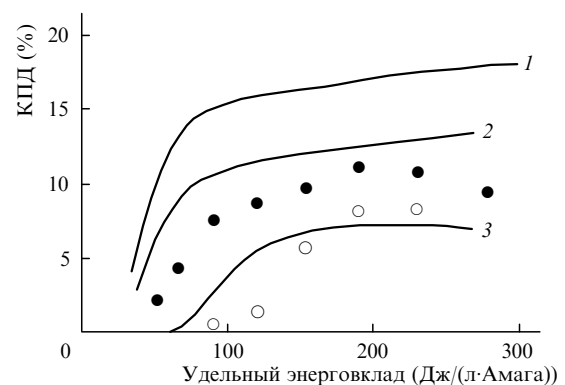


Рис.6. Экспериментальные (точки) и теоретические (сплошные кривые) зависимости КПД лазера от удельного энерговклада для экспериментальных условий, соответствующих рис.5,а: ●, 1, 2 – оберточные переходы; ○, 3 – основные переходы (кривая 2 рассчитана при дополнительных потерях 0.5 % за один обход резонатора).

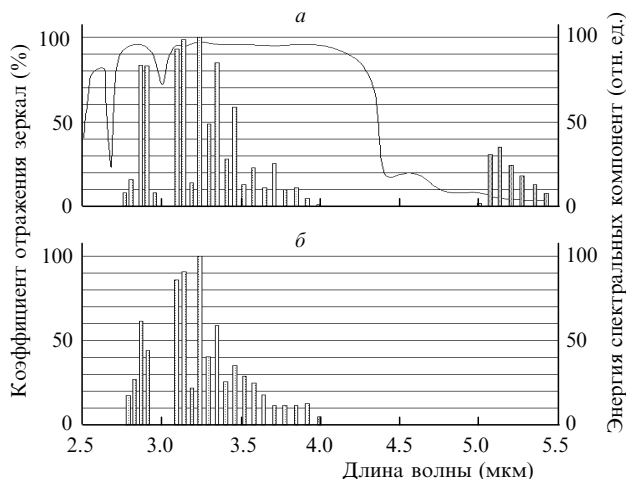


Рис. 7. Коэффициент отражения зеркал эквивалентного симметричного резонатора (кривая) и распределения энергии излучения лазера по колебательным полосам (гистограммы) при удельном энергокладе 300 Дж/(л·Амага) для смеси CO:N₂:He = 1:9:10, $N = 0.12$ Амага (*a* – эксперимент, *b* – теория).

3.2. Энергетические характеристики

На рис.6 представлены экспериментальные и теоретические зависимости КПД лазера от удельного энергоклада для резонатора, спектральная характеристика которого приведена на рис.5,б. Основная доля энергии излучения лазера в этом резонаторе приходилась на высоко расположенные переходы (длина волны более 3.5 мкм), по-видимому, из-за слишком высокой (неоптимальной) добротности в интервале длин волн 3.1–3.5 мкм.

Максимальный КПД обертонного лазера в эксперименте составил ~11% при удельном энергокладе ~200 Дж/(л·Амага). Рассчитанные для экспериментальных условий (лазерная смесь CO:N₂:He = 1:9:10 с плотностью 0.12 Амага) кривые 1, 3 (рис.6) представляют собой зависимости КПД лазера, работающего на обертонных и основных переходах соответственно, от удельного энергоклада. Теоретическая кривая 1 предсказывает лазерный КПД в ~1.5 раза выше реально полученного (до 17%).

Однако при вводе дополнительных потерь 0.5% за один проход резонатора расчетная кривая 2 демонстрирует лучшее согласие с экспериментальными данными. Это позволяет утверждать, что уменьшение оптических потерь в лазерном резонаторе даже на 0.5% может привести к существенному увеличению КПД обертонного лазера. Снижение эффективности генерации обертонного

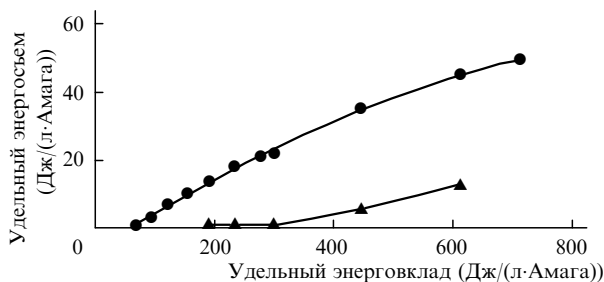


Рис. 8. Зависимости удельного энергопотребления от удельного энергоклада для CO-лазера с резонатором, спектральная характеристика которого приводится на рис. 7, для смеси CO:N₂ = 1:9, $N = 0.12$ Амага на обертонных (●) и основных (▲) переходах.

излучения при увеличении удельного энергоклада (более 200 Дж/(л·Амага)) было связано как с нагревом смеси, так и с ростом энергии излучения в основной полосе.

КПД генерации излучения в основной полосе достигал 9%, т.е. суммарный КПД CO-лазера по всем переходам составлял 20%. При использовании лазерного резонатора, спектральная характеристика которого приведена на рис.7, энергия излучения на основных переходах была существенно меньше, чем на обертонных. При увеличении удельного энергоклада до ~650 Дж/(л·Амага) удельный энергопотребление обертонного лазера монотонно возрастал до ~50 Дж/(л·Амага) (рис.8).

3.3. Узкополосная генерация

При использовании лазерных зеркал с высокой отражательной способностью в относительно узком спектральном интервале шириной 200–300 см⁻¹ эффективность обертонного CO-лазера может быть достаточно высокой. В лазерном резонаторе с одной из пар таких зеркал спектр излучения (аналогично спектру на рис.5,б) состоял всего из пяти-шести колебательных полос, но КПД лазера превышал 5%. При этом генерация излучения на основных переходах не возникала [21–23].

Для выяснения возможностей узкополосного режима генерации обертонного CO-лазера была рассчитана его эффективность при удельном энергокладе 220 Дж/(л·Амага) для лазерной смеси CO:N₂:He = 1:9:10 (рис.9). В расчетах предполагалось, что лазерные зеркала в спектральном диапазоне, который содержит пять (ширина диапазона 200–250 см⁻¹, рис.9,а) или три (100–150 см⁻¹, рис.9,б) соседние обертонные колебательные полосы, имеют следующие характеристики: коэффициент отражения 97.5%, пропускание 1.5%, пассивные потери 1%. Номера вращательных компонент *P*-ветви определялись из условия конкуренции колебательно-вращательных переходов. Максимальный расчетный КПД такого узкополосного обертонного CO-лазера, работающего на пяти или трех колебательных полосах, превышал 6 и 4% соответственно.

Следует отметить, что в рассмотренных режимах генерации энергия излучения распределена между соседними переходами весьма неравномерно. При $v > 16$ более 50% энергии излучения приходится на самый нижний (коротковолновый) переход $v + 2 \rightarrow v$ (см. также [25]).

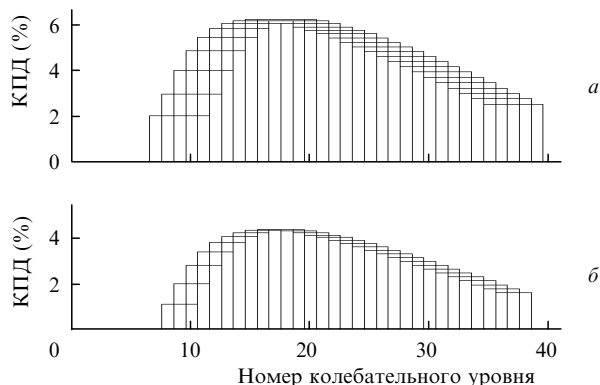


Рис. 9. Суммарный (по всем линиям) КПД генерации обертонного CO-лазера, генерирующего излучение на пяти (*a*) и трех (*б*) соседних колебательных переходах $v + 2 \rightarrow v$, в зависимости от номера колебательного уровня v . На диаграмме соответствующие переходы объединены одной горизонтальной линией. Удельный энергокладе 220 Дж/(л·Амага), смесь CO:N₂:He = 1:9:10, $N = 0.12$ Амага.

3.4. Чересполосица в колебательном спектре

На рис.7,*a* в виде гистограммы представлено распределение энергии излучения лазера по колебательным полосам, измеренное калориметром в фокальной плоскости спектрографа. При анализе этого распределения наблюдается чередование (по энергии) сильных и слабых колебательных полос в диапазоне длин волн 3–4 мкм, которое не было связано с изменением добротности лазерного резонатора, имевшего в этом спектральном диапазоне довольно постоянную спектральную характеристику (сплошная линия на рис.7,*a*).

Этот эффект, который для краткости будем далее называть чересполосицей, был теоретически предсказан в [12]. Он обусловлен механизмом генерации оберточного излучения на двух колебательных каскадах, включающих в себя только четные и только нечетные колебательные уровни. Расчетный колебательный спектр оберточного излучения представлен на рис.7,*б* и хорошо согласуется с измеренным спектром, включая эффект чересполосицы. Следует отметить, что в экспериментах энергия генерации излучения в основной полосе была очень мала, при этом в расчетах генерация на этих переходах не возникла.

Чересполосица наблюдалась также при изменении состава лазерной смеси (СО: N₂, СО: Не и чистый СО), при различных энергозкладах вплоть до пороговых значений и при плотностях газа от 0.02 до 0.3 Амага. Экспериментальное обнаружение чересполосицы свидетельствует, с одной стороны, о наличии каскадного механизма генерации излучения СО-лазера, а с другой стороны, о превышении скорости излучательных переходов над скоростью колебательно-колебательного обмена.

3.5. Спектрально-временные характеристики

Временные характеристики лазерного излучения для каждой колебательной полосы были измерены при экспериментальных условиях, соответствующих рис.7. Характерная временная форма импульсов излучения была близка к треугольной с максимумом вблизи начала импульса. Длительность и время задержки импульса излучения в зависимости от номера нижнего колебательного уровня ν представлены на рис.10 в виде гистограммы. Для оберточных колебательных переходов они составляли 1–4 мс и 130–500 мкс соответственно.

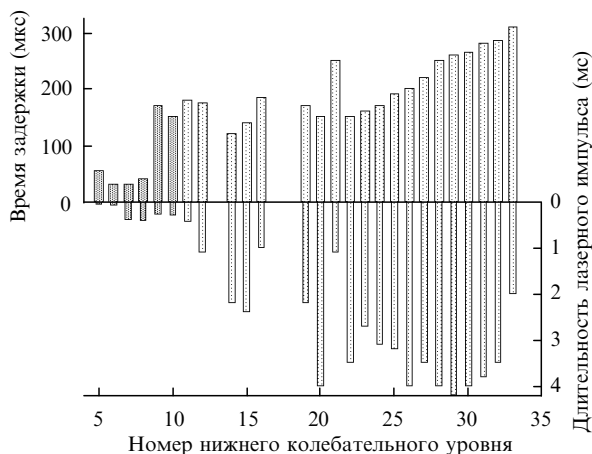


Рис.10. Длительность и время задержки импульса излучения в зависимости от номера нижнего колебательного уровня ν (основные переходы выделены темно-серым цветом, оберточные – светло-серым). Экспериментальные условия соответствуют рис.7.

Длительность импульсов излучения на колебательных переходах основной полосы была значительно меньше и составляла 0.05–0.5 мс. Характерное время задержки для импульсов основной полосы в различных экспериментах находилось в интервале 30–60 мкс. Исключением из этого правила (см. рис.10) стали две колебательные полосы с $\nu = 9, 10$, времена задержки которых (150–180 мкс) сравнимы с временами задержек соседних оберточных переходов с $\nu = 11, 12$, что, по-видимому, обусловлено каскадным механизмом формирования инверсной населенности и взаимным влиянием генерации на обертоном и основной полосе. Это взаимное влияние также наблюдалось в [5]. Следует отметить, что чересполосица, имевшая место в энергетическом спектре излучения оберточного СО-лазера (рис.7) при $\nu > 19$, почти не проявлялась в спектре временных характеристик.

Выводы

Многopараметрическое исследование генерационных характеристик многочастотного оберточного СО-ЭИЛ с внутрирезонаторным фильтром и полностью подавленной генерацией в основной полосе позволило определить оптимальные экспериментальные условия для повышения его эффективности: условия накачки, добротность резонатора, температура, плотность и состав лазерной смеси. Экспериментально измеренный КПД оберточного лазера составлял $\sim 5.5\%$. Теоретический прогноз, основанный на сопоставлении экспериментальных и теоретических данных, показал, что КПД оберточного ЭИЛ лазера с может достигать 20%.

Применение широкополосных диэлектрических зеркал с высоким коэффициентом отражения и малыми оптическими потерями позволило существенно расширить спектр генерации оберточного излучения до 2.5–4.1 мкм, что соответствует колебательным переходам от 6 \rightarrow 4 до 37 \rightarrow 35. Экспериментально наблюдался эффект чередования (по энергии) сильных и слабых колебательных полос, предсказанный теоретически. Показано хорошее соответствие экспериментальных и теоретических данных. Максимальный КПД оберточного лазера составил 11%, удельный энергозъем достигал 50 Дж/(л·Амага). Теоретический прогноз указывает, что при уменьшении оптических потерь всего на 0.5% за один проход резонатора, КПД оберточного СО-лазера может достигать 17%. Совокупность спектральных и энергетических характеристик импульсного оберточного СО-лазера делает его конкурентоспособным с химическими HF(DF)-лазерами.

Авторы выражают признательность Х.Акерману (H. Ackermann, AFRL, USA), Дж.МакАйверу (J. McIver, University of New-Mexico, USA) и М.Стикли (M. Stickey, EOARD, USA) за помощь в организации этой работы. Работа поддержана РФФИ (грант № 99-02-17553).

1. Treanor C.T., Rich J.W., Rehm R.G. *J.Chem.Phys.*, **48**, 1798 (1968).
2. Rich J.W. *J.Appl.Phys.*, **42**, 3719 (1971).
3. Bergman R.C., Rich J.W. *Appl.Phys.Letts*, **31**, 597 (1977).
4. Басов Н.Г., Данилычев В.А., Ионин А.А., Казакевич В.С., Ковш И.Б. *Квантовая электроника*, **5**, 1855 (1978).
5. Басов Н.Г., Казакевич В.С., Ковш И.Б. *Квантовая электроника*, **7**, 1966 (1980).
6. Басов Н.Г., Казакевич В.С., Ковш И.Б. *Квантовая электроника*, **7**, 1973 (1980).
7. Basov N.G., Ionin A.A., Kovsh I.B. *Infrared Physics*, **25**, 47 (1985).
8. Gromoll-Bohle M., Bohle W., Urban W. *Optics Comms*, **69**, 409 (1989).

9. Vachem E., Dax A., Fink T. et al. *Appl. Phys. B*, **57**, 185 (1993).
10. Murtz M., Frech B., Palm P., Lotze R., Urban W. *Optics Letts*, **23**, 58 (1998).
11. Конев Ю.Б., Кочетов И.В., Курносков А.К., Певгов В.Г. *Письма в ЖТФ*, **3**, 1267 (1977).
12. Сучков А.Ф., Шебеко Ю.Н. *Квантовая электроника*, **6**, 960 (1979).
13. Жданок С.А., Кочетов И.В. и др. *Инж.-физ.ж.*, **38**, 273 (1980).
14. Конев Ю.Б., Кочетов И.В. и др. *Инж.-физ. ж.*, **41**, 514 (1981).
15. Долинина В.И., Ковш И.Б., Урин Б.М. *Квантовая электроника*, **10**, 1228 (1983).
16. Бельх А.Д., Гурашвили В.А., Кочетов И.В., Курносков А.К. и др. *Квантовая электроника*, **22**, 333 (1995).
17. Александров Б.С., Белавин В.А., Дымшиц Б.М., Корецкий Я.П. *Квантовая электроника*, **24**, 601 (1997).
18. Ionin A., Kotkov A., Kurnosov A., Napartovich A. et al. *Proc.Intern. Conf.LASERS'97* (New Orleans, LA, USA, 1997; STS Press, McLean, VA, 1998, pp. 92–99).
19. Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Kotkov A.A., Kurnosov A.K. et al. *Preprint P.N.Lebedev Physics institute RAS № 11* (Moscow, 1998).
20. Ionin A., Kotkov A., Kurnosov A., Napartovich A. et al. *Optics Comms*, **155**, 197 (1998).
21. Ионин А.А., Котков А.А., Курносков А.К., Напартович А.П. и др. *Препринт ФИАН № 34* (М., 1998).
22. Basov N., Hager G., Ionin A., Kotkov A. et al. *Proc.Intern.Conf. LASERS'98* (Tucson, AZ, USA, 1997; STS Press, McLean, VA, 1999, pp. 481–487).
23. Basov N.G., Ionin A.A., Kotkov A.A., Kurnosov A.K. et al. *Preprint P.N.Lebedev Physics institute RAS № 15* (Moscow, 1999).
24. Ionin A.A., Kotkov A.A., Kurnosov A.K., Napartovich A.P. et al. *Optics Comms*, **160**, 255 (1999).
25. Басов Н.Г., Ионин А.А., Котков А.А., Курносков А.К. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 859 (2000).

N.G.Basov, A.A.Ionin, A.A.Kotkov, A.K.Kurnosov, J.E.McCord, A.P. Napartovich, L.V.Seleznev, N.G.Turkin, G.D.Hager. Pulsed laser operating on the first overtone of the CO molecule in the 2.5–4.2- μ m range. I. Multifrequency lasing.

Characteristics of an electroionisation CO laser operating on the first overtone of the CO molecule are experimentally and theoretically studied. It is shown experimentally that a pulsed multifrequency overtone CO laser is an efficient source of coherent radiation in the 2.5–4.1- μ m region whose specific output energy reaches 50 J/(litre Amagat) and electro-optical conversion efficiency reaches 11 %. A theoretical analysis based on experimental data shows the feasibility of obtaining overtone emission with efficiency as high as 20 %. The alternation of intensity of vibrational bands in the overtone CO laser is discussed. The effect is associated with the cascade mechanism of formation of the emission spectrum. The comparison of experimental data with calculation results showed that they agree well in spectral and energy characteristics of the overtone CO laser. Moreover, it showed the necessity of refinement of the kinetic model of the active medium of the CO laser for obtaining an adequate description of time parameters of a laser pulse.