

Оптическая накачка смесей $N_2O - He$ и $N_2O - CO_2 - He$ излучением импульсного многочастотного HF-лазера с целью создания активных сред для усиления мощных сверхкоротких импульсов десятимикронного диапазона

Г.К.Васильев, Е.Ф.Макаров, Ю.А.Чернышев

Проведен анализ оптической накачки активных сред $N_2O - He$ и $N_2O - CO_2 - He$ (общее давление 1 атм) излучением импульсного ($\tau \sim 1$ мкс) многочастотного HF-лазера с целью использования этих сред для усиления сверхкороткого импульса (СКИ) излучения ($\tau \sim 10^{-12}$ с) десятимикронного диапазона. Выявлены переходы, формирующие полосу усиления СКИ излучения, определен запас энергии на них, рассчитаны коэффициенты усиления в момент достижения максимальной инверсии в средах.

Ключевые слова: оптическая накачка, активные среды N_2O и $N_2O - CO_2$, HF-лазер, усиление пикосекундных импульсов.

1. Введение

В работе [1] нами проведено экспериментальное исследование оптической накачки молекул N_2O в смесях с Kr и He излучением импульсного многочастотного ($\tau = 4$ мкс, спектр включает в себя примерно 30 линий в диапазоне волновых чисел $k = 3000 - 3700$ cm^{-1}) HF-лазера на цепной реакции $H_2 + F_2$. В работе [2] мы предложили использовать для усиления супермощных сверхкоротких импульсов (СКИ) в среднем ИК диапазоне молекулы N_2O в смесях с инертными газами, накачиваемые излучением импульсного химического HF-лазера. При накачке создается инверсная населенность на колебательном переходе $00^01 - 10^00$ молекул N_2O , в момент достижения максимальной инверсии от задающего генератора в систему подается импульс излучения длительностью $\sim 10^{-12}$ с с волновым числом $k = 927.74$ cm^{-1} (или 948.59 cm^{-1}), который усиливается в нескольких секциях. Мы обратили внимание [2] на то, что эффективность оптической накачки многочастотным HF-лазером может быть увеличена, если вместе с молекулами N_2O (которые поглощают линии излучения, лежащие в диапазоне $3220 - 3490$ cm^{-1}) использовать молекулы CO_2 . Спектр поглощения излучения HF-лазера молекулами CO_2 по отношению к спектру молекул N_2O сдвинут в коротковолновую область и попадает на не используемые при накачке N_2O линии в диапазоне $3530 - 3690$ cm^{-1} ; в то же время спектры излучения молекул N_2O и CO_2 на переходах $00^01 - 10^00$ перекрываются (центрам полос соответствуют волновые числа 939 и 961 cm^{-1}), и поэтому, в принципе, может быть сформирована общая полоса усиления СКИ излучения.

Г.К.Васильев, Е.Ф.Макаров, Ю.А.Чернышев. Институт проблем химической физики РАН, Россия, 142432 Черноголовка, Московская обл., Институтский просп., 14; e-mail: makarov@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 8 июня 2005 г., после доработки – 31 августа 2005 г.

Увеличение эффективности накачки было продемонстрировано экспериментально при исследовании генерации в активных средах $N_2O - He$, $CO_2 - He$, $N_2O - CO_2 - He$ высокого давления ($p \sim 10$ атм) [3]. Однако вопрос о перспективах использования смесей $N_2O - CO_2$ при генерации коротких импульсов требует специального анализа. В работе [4] мы представили концепцию построения супермощной генерирующей СКИ лазерной системы с оптической накачкой (научное обоснование, ожидаемые характеристики, технические решения, перспективы совершенствования). В предложенной концепции основной является стадия насыщенного усиления в активной среде с дискретным (не перекрывающимся при повышении давления) спектром. В главных секциях с насыщенным усилением давление активной среды предполагается равным 1 атм.

В настоящей работе мы проводим детальный анализ активных сред N_2O и $N_2O - CO_2$ (с общим давлением 1 атм), получаемых при оптической накачке излучением многочастотного импульсного HF-лазера.

2. Описание модели оптической накачки

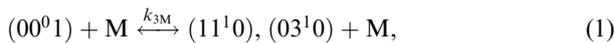
Поглощение линий излучения HF-лазера вызывает колебательные переходы в молекулах N_2O (и CO_2) с одновременным возбуждением либо симметричной и асимметричной мод ($v_1v_2v_3 - (v_1 + 1)v_2(v_3 + 1)$), либо деформационной и асимметричной ($v_1v_2v_3 - v_1(v_2 + 2)(v_3 + 1)$). Здесь v_1, v_2, v_3 – квантовые числа трех фундаментальных мод колебаний линейной молекулы: симметричной, деформационной и асимметричной. Как показал анализ, вклад в поглощение излучения HF-лазера молекулами N_2O (и CO_2) дают следующие состояния: $00^00, 01^10, 02^10$ ($l = 0, 2$), $10^00, 03^10$ ($l = 1, 3$), $00^01, 01^11, 02^11$ ($l = 0, 2$), $00^02, 01^12$ (записаны в порядке возрастания их энергии).

Введем интенсивности линий HF-лазера I_i (в квант. \times $cm^{-2} \cdot c^{-1}$) ($i = 1 - 22$), относительные населенности поглощающих колебательных состояний n_{jm} ($j = 1 - 10, m = 1 \div (l + 1)$), относительные населенности вращатель-

ных состояний f_k ($k = 0 - 50$) и сечения поглощения лазерных линий индивидуальными состояниями молекул σ_{ijkm} . Тогда скорость накачки будет равна $\sum_{ijkm} \sigma_{ijkm} I_i \times n_{jm} f_k [M]$, где $M = N_2O, CO_2$. Сечения поглощения вычислялись с использованием сил колебательных полос из [5-7], данных по столкновительному уширению линий N_2O и CO_2 из [5, 8, 9], волновых чисел лазерных линий из [10]. При расчете поглощения лазерного излучения учитывались все возможные переходы в N_2O и CO_2 , расположенные в пределах $\pm 1.5 \text{ см}^{-1}$ от центра лазерной линии накачки. Контур линий поглощения считали лоренцевским. В общей сложности рассматривались ~ 500 и ~ 200 индивидуальных колебательно-вращательных переходов в молекулах N_2O и CO_2 соответственно. Спектроскопические данные для этих переходов брались из работ [5, 11, 12] для N_2O и [6, 7] для CO_2 .

Анализ всех возможных процессов колебательной релаксации в исследуемых системах показывает, что в моделируемых условиях в ходе оптической накачки имеет место равновесие внутри отдельных мод и между симметричной и деформационной модами, а для смеси N_2O и CO_2 (дополнительно) – между их деформационными и между их асимметричными модами. Это позволяет рассматривать отдельно энергии, запасаемые в симметричной, деформационной и асимметричной модах, и ввести константы скорости, описывающие VV-передачу энергии от асимметричной моды к совокупности двух других мод при соударении с невозбужденными молекулами N_2O и CO_2 и атомами газа-разбавителя, а также константы скорости, описывающие передачу энергии от совокупности симметричной и деформационной мод к поступательным степеням свободы (совпадающие при не слишком высокой температуре с константами скорости VT-релаксации деформационной моды).

Таким образом, основные каналы релаксации энергии обусловлены следующими процессами:



где в скобках даны колебательные состояния молекул N_2O и/или CO_2 ; $M = N_2O, CO_2, He$; k_{2M} и k_{3M} – константы скорости VT- и VV-передачи энергии, связанные с временем колебательной релаксации по этим каналам τ_{iM} соотношением $k_{iM} = (p\tau_{iM})^{-1}$ ($i = 2, 3$).

Введем средние числа квантов ε_1 и ε_3 в симметричной и асимметричной модах. Для удобства записи уравнений будем считать, что ε_2 равно половине среднего числа квантов в деформационной моде. Используя далее индексы N и C для констант и переменных, относящихся к молекулам N_2O и CO_2 , и вводя функции W, W_{VV} и W_{VT} , описывающие накачку, VV- и VT-передачу энергии, для ε_2^N и ε_3^N получаем выражения

$$\frac{d\varepsilon_2^N}{dt} = \frac{W + 1.5W_{VV} - W_{VT}}{F_1}, \quad (3)$$

$$\frac{d\varepsilon_3^N}{dt} = \frac{W - W_{VV}}{F_2}. \quad (4)$$

К этим уравнениям нужно добавить уравнение для текущей температуры и выражения, которые связывают недостающие средние числа квантов с ε_2^N и ε_3^N через

условия равновесия. Для двухкомпонентной системы, например $N_2O - He$, имеем

$$T = 300 + \frac{3340[N_2O]/[M]}{1 + 1.43[N_2O]/[M]} \left\{ \int_0^t \sum_{ijkm} \sigma_{ijkm}^N I_i n_{jm} f_k dt - 0.37 \times [\varepsilon_1^N + 0.92(\varepsilon_2^N - 0.06) + 1.73\varepsilon_3^N] \right\},$$

$$W = \sum_{ijkm} \sigma_{ijkm}^N I_i n_{jm} f_k,$$

$$W_{VV} = \sum_M k_{3M}^N [M] (1 + \varepsilon_1^N) (1 + \varepsilon_2^N) \varepsilon_3^N, \quad (5)$$

$$W_{VT} = \sum_M k_{2M}^N [M] (\varepsilon_2^N - \varepsilon_{02}^N),$$

$$F_1 = 1 + 2 \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_2^N} \right) \left(\frac{\varepsilon_1^N}{\varepsilon_2^N} \right)^2 \exp \left(\frac{154}{T} \right),$$

$$F_2 = 1,$$

$$\varepsilon_1^N = \left[\left(1 + \frac{1}{\varepsilon_2^N} \right) \exp \left(\frac{154}{T} \right) - 1 \right]^{-1}.$$

Для трехкомпонентной системы $N_2O - CO_2 - He$ имеем

$$T = 300 + \frac{3340[N_2O]/[M]}{1 + 1.43([N_2O] + [CO_2])/[M]} \left\{ \int_0^t W dt - 0.37 \times [\varepsilon_1^N + 0.92(\varepsilon_2^N - 0.06) + 1.73\varepsilon_3^N] - 0.4 \frac{[CO_2]}{[N_2O]} \times [\varepsilon_1^C + 0.96(\varepsilon_2^C - 0.06) + 1.69\varepsilon_3^C] \right\},$$

$$W = \sum_{ijkm} \sigma_{ijkm}^N I_i n_{jm} f_k + \sum_{ijkm} \sigma_{ijkm}^C I_i n_{jm} f_k \frac{[CO_2]}{[N_2O]},$$

$$W_{VV} = \left[k_{3N}^N [N_2O] + k_{3He}^N [He] + k_{eff} [CO_2] \frac{\varepsilon_2^C}{\varepsilon_2^N} \exp \left(-\frac{67}{T} \right) \right] \times (1 + \varepsilon_1^N) (1 + \varepsilon_2^N) \varepsilon_3^N + (k_{3C}^C [CO_2] + k_{3He}^C [He]) \frac{[CO_2]}{[N_2O]} \times (1 + \varepsilon_1^C) (1 + \varepsilon_2^C) \varepsilon_3^C,$$

$$W_{VT} = \sum_M k_{2M}^N [M] (\varepsilon_2^N - \varepsilon_{02}^N) + \sum_M k_{2M}^C [M] (\varepsilon_2^C - \varepsilon_{02}^C), \quad (6)$$

$$F_1 = 1 + 2 \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_2^N} \right) \left(\frac{\varepsilon_1^N}{\varepsilon_2^N} \right)^2 \exp \left(\frac{154}{T} \right)$$

$$+ \frac{[CO_2]}{[N_2O]} \left(\frac{\varepsilon_2^C}{\varepsilon_2^N} \right)^2 \exp \left(\frac{113}{T} \right)$$

$$\times \left[1 + 2 \left(\frac{\varepsilon_1^C}{\varepsilon_2^C} \right)^2 \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_2^N} \right) \exp \left(\frac{189}{T} \right) \right],$$

$$F_2 = 1 + \left(\frac{\varepsilon_3^C}{\varepsilon_3^N} \right)^2 \frac{[CO_2]}{[N_2O]} \exp \left(\frac{180}{T} \right),$$

$$\varepsilon_1^C = \left[\left(1 + \frac{1}{\varepsilon_2^N} \right)^2 \exp\left(\frac{302}{T}\right) - 1 \right]^{-1},$$

$$\varepsilon_2^C = \left[\left(1 + \frac{1}{\varepsilon_2^N} \right) \exp\left(\frac{113}{T}\right) - 1 \right]^{-1},$$

$$\varepsilon_3^C = \left[\left(1 + \frac{1}{\varepsilon_3^N} \right) \exp\left(\frac{180}{T}\right) - 1 \right]^{-1}.$$

Здесь $2\varepsilon_{02}^N$, $2\varepsilon_{02}^C$ – равновесные средние числа квантов деформационной моды при температуре T (в кельвинах); $k_{\text{eff}} = k_{3N}^C + k_{3C}^N \exp(180/T)$. Числа в уравнениях и выражениях имеют следующий смысл: 300 – комнатная температура (в кельвинах); 154 и 76 – дефекты энергии резонанса (в кельвинах) внутримодового обмена $v_1^N \leftrightarrow 2v_2^N$ и $v_1^C \leftrightarrow 2v_2^C$; 113 и 180 – дефекты энергии резонанса (в кельвинах) межмодового обмена $v_2^C \leftrightarrow v_2^N$ и $v_3^C \leftrightarrow v_3^N$; 189 = 76 + 113; 302 = 76 + 2 × 113; 67 = 180 – 113; 3340 – отношение энергии кванта излучения наиболее мощной линии HF-лазера к теплоемкости одноатомного газа (в кельвинах); 0.06 – значение ε_2^N (ε_2^C) при комнатной температуре; 0.37 и 0.4 – отношения энергии кванта симметричной моды к энергии кванта излучения HF-лазера для молекулы N₂O и CO₂; 0.92 и 0.96 – отношение удвоенной энергии кванта деформационной моды к энергии кванта симметричной моды для N₂O и CO₂; 1.73 и 1.69 – отношения энергии кванта асимметричной моды к энергии кванта симметричной моды для N₂O и CO₂; 1.43 = $c_V/c_V^{\text{He}} - 1$; c_V и c_V^{He} – теплоемкости N₂O (CO₂) и He. При выводе уравнений мы пренебрегли обратным процессом в (1), т. к. его учет приводит к незначительной поправке в результатах расчетов (менее 0.5 %). Количественные данные по релаксации N₂O в столкновениях с молекулами N₂O и He брались из [13], по релаксации CO₂ в столкновениях с CO₂ и He – из [14, 15], по k_{eff} – из [14].

Система уравнений (3)–(6), в которой используются указанные спектроскопические и релаксационные параметры, удовлетворительно описывает экспериментальные данные [1] по колебательной накачке N₂O [2]. Это позволяет применять ее при прогнозировании характеристик активных сред N₂O и N₂O–CO₂ супермощных лазеров. В настоящей работе рассчитывались величины ε_2 и ε_3 , удельная энергия E_t (Дж/л), запасаемая на всех возможных инверсных переходах между асимметричной и симметричной модами, удельная энергия E (Дж/л), запасаемая на переходах, формирующих полосу усиления СКИ излучения вблизи частоты задающего генератора и коэффициенты усиления активной среды в зависимости от плотности энергии излучения F (Дж/см²) HF-лазера. Указанные величины рассчитывались в момент достижения максимальной инверсии в активной среде.

В расчетах учитывались следующие линии HF-лазера:

P_{1–0} (6) (1.5 %), P_{1–0} (7) (5.5 %), P_{1–0} (8) (6 %),

P_{1–0} (9) (5 %), P_{1–0} (10) (2.5 %), P_{1–0} (11) (1 %),

P_{2–1} (5) (2 %), P_{2–1} (6) (5.5 %), P_{2–1} (7) (11.5 %),

P_{2–1} (8) (7 %), P_{2–1} (9) (5 %), P_{2–1} (10) (5 %),

P_{2–1} (11) (2 %), P_{2–1} (12) (2 %),

P_{3–2} (4) (1 %), P_{3–2} (5) (2 %), P_{3–2} (6) (3.5 %),

P_{3–2} (7) (5 %), P_{3–2} (8) (5 %), P_{3–2} (9) (2.5 %),

P_{4–3} (5) (2 %), P_{4–3} (6) (3 %),

где в процентах указаны доли энергии лазерного излучения, приходящейся на линии [16]. Основной вклад в оптическую накачку молекул N₂O дают линии P_{1–0} (10), P_{1–0} (11), P_{2–1} (7), P_{2–1} (8), P_{2–1} (9), P_{2–1} (10), P_{3–2} (4), P_{3–2} (5), P_{3–2} (6), P_{3–2} (7) (43.5 % лазерной энергии), в накачку молекул CO₂ – линии P_{1–0} (6), P_{1–0} (7), P_{1–0} (8), P_{1–0} (9), P_{2–1} (5), P_{2–1} (6) (25.5 % лазерной энергии). Отметим, что имеется возможность влиять на распределение энергии излучения по линиям HF-лазера, вводя добавки (например, SF₆, C₂F₅ и др.), ускоряющие вращательную релаксацию молекул HF [17], и/или используя селективный резонатор, выделяющий индивидуальные спектральные линии [3]. Полагалось, что лазерный импульс имеет треугольную форму с временем достижения максимума 0.7 мкс и временем спада 0.3 мкс (примерно таким же, как и в [16]).

3. Полосы усиления СКИ излучения

При рассмотрении вопроса о полосах усиления обратим внимание на следующие особенности распределения колебательной энергии при оптической накачке молекул N₂O и CO₂. Как уже отмечалось, в процессе накачки одновременно с асимметричной возбуждаются также симметричная и деформационная моды. Между последними быстро устанавливается равновесие за счет квазирезонансного обмена 10⁰⁰ – 02⁰ ($l = 0, 2$). По расчетам в зависимости от плотности энергии накачки (1–10 Дж × см^{–2}) населенность состояния 020 составляет 1 %–9 % от населенности основного состояния. Поскольку состояние 020 трижды вырождено, а состояние 10⁰⁰ не вырождено, то населенность последнего из них не менее чем в три раза ниже. Поэтому состояния $v_1 v_2 v_3$ с v_1 , отличными от нуля, являются малонаселенными. Если среднее число квантов ε_3 в асимметричной моде не слишком велико, то заметно заселенными являются лишь несколько первых уровней – 00⁰1, 00⁰2, ... и 01¹1, 01¹2, ...). Сдвиги полос переходов с уровней 00⁰1, 00⁰2, ... обусловленные ангармонизмом, незначительны. Так, центры полос 00⁰1 – 10⁰⁰, 00⁰2 – 10⁰¹ и 00⁰3 – 10⁰² в N₂O расположены при $k = 938.85, 936.56$ и 934.12 см^{–1} соответственно. Полосы переходов с уровня 01¹1 также имеют небольшой сдвиг относительно друг друга (например, центры полос 01¹1 – 11¹⁰, 01¹2 – 11¹¹ расположены при $k = 918.02$ и 915.72 см^{–1} соответственно), но относительно переходов с уровней 00⁰1, 00⁰2, ... они сдвинуты на ~20 см^{–1}. Поэтому R-ветви полос 01¹1 – 11¹($v_3 - 1$) накладываются на R-ветви полос 00⁰1 – 10⁰($v_3 - 1$).

В результате формируются две полосы усиления (рис.1): первая отвечает сумме R-ветвей полос переходов 00⁰1 – 10⁰($v_3 - 1$) и R-ветвей полос переходов 01¹1 – 11¹($v_3 - 1$) и имеет максимум вблизи 930 см^{–1}, вторая – сумме R-ветвей полос переходов 00⁰2 – 10⁰($v_3 - 1$) и имеет максимум вблизи 950 см^{–1}. При усилении СКИ излучения, происходящем в бесстолкновительных условиях, вклад в усиление дают переходы 10⁰1 – 20⁰($v_3 - 1$) ($v_3 = 1, 2, \dots$), верхние состояния которых заселяются в процессах 00⁰1 – 10⁰($v_3 - 1$) ($v_3 = 2, 3, \dots$). Центры нескольких первых полос системы (10⁰1 – 20⁰($v_3 - 1$)) расположены при $k = 917.49$ (10⁰1 – 20⁰), 915.91 (10⁰2 –

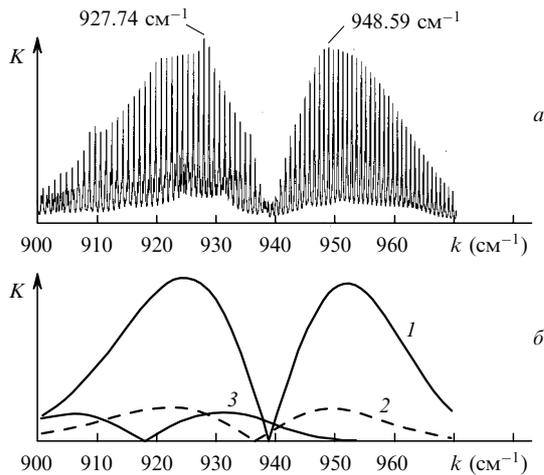


Рис.1. Расчетные коэффициенты усиления K активной среды N_2O (а) и огибающие коэффициентов усиления в полосах $00^0 1 - 10^0 0$ (1), $00^0 2 - 10^0 1$ (2), $01^1 1 - 11^1 0$ (3), дающих основной вклад в формирование полосы усиления СКИ излучения (б). Полное давление смеси 1 атм, давление $p_{N_2O} = 0.2$ атм, газ-разбавитель He; $F = 4$ Дж/см².

$20^0 1$) и 914.11 см⁻¹ ($10^0 3 - 20^0 2$), т.е. R-ветви этой системы полос дают вклад в первую полосу усиления.

Центры системы полос $20^0 v_3 - 30^0 (v_3 - 1)$, $11^1 v_3 - 21^1 (v_3 - 1)$ ($v_3 = 1, 2, \dots$) расположены в области волновых чисел $k < 896$ см⁻¹, и эти полосы вклада в усиление СКИ излучения не дают: при длительности входного импульса $\tau = 10^{-12}$ с ширина его спектра $\Delta\nu \sim \tau^{-1} = 20$ см⁻¹; в последующем процессе насыщенного усиления длительность импульса уменьшается до $(0.7 - 0.8) \times 10^{-12}$ с [4], чему соответствует расширение полосы усиления до $\sim 25 - 28$ см⁻¹. Центры системы полос $0v_2 v_3 - 1v_2 (v_3 - 1)$ ($v_2 > 1$, $v_3 = 1, 2, \dots$) расположены при $k < 902$ см⁻¹, и вкладом этих полос в усиление СКИ излучения также можно пренебречь, в особенности, если принять во внимание относительно малую населенность состояний $0v_2 v_3$ ($v_2 > 1$).

Таким образом, при расчете коэффициентов усиления в момент достижения максимальной инверсии учитываются переходы $00^0 v_3 - 10^0 (v_3 - 1)$, $01^1 v_3 - 11^1 (v_3 - 1)$ ($v_3 = 1, 2, \dots$), а при расчете запаса энергии E_{930} и E_{950} (при $k \sim 930$ и 950 см⁻¹) – переход $00^0 1 - 10^0 0$, каскадные переходы $00^0 v_3 - 10^0 (v_3 - 1) - 20^0 (v_3 - 2)$ ($v_3 = 2, 3, \dots$) и переходы $01^1 v_3 - 11^1 (v_3 - 1)$ ($v_3 = 1, 2, \dots$). При расчете коэффициентов усиления и запаса энергии в состояниях, дающих вклад в полосы усиления, для активной среды $N_2O - CO_2$ использовались переходы в молекуле CO_2 , аналогичные указанным переходам в молекуле N_2O . Центры нескольких первых полос систем $00^0 v_3 - 10^0 (v_3 - 1)$, $10^0 v_3 - 20^0 (v_3 - 1)$, $01^1 v_3 - 11^1 (v_3 - 1)$ для CO_2 расположены при $k = 960.96$ ($00^0 1 - 10^0 0$), 958.55 ($00^0 2 - 10^0 1$), 955.89 ($00^0 3 - 10^0 2$), 917.64 ($10^0 1 - 20^0 1$), 917.82 ($10^0 2 - 20^0 1$), 916.26 ($10^0 3 - 20^0 2$), 927.16 ($01^1 1 - 11^1 0$) и 925.08 см⁻¹ ($01^1 2 - 11^1 1$). Отметим, что для CO_2 полосы $02^0 v_3 - 12^0 (v_3 - 1)$ ($v_3 = 1, 2, \dots$) с центрами при $k = 941.7$ см⁻¹ ($02^0 1 - 12^0 0$), 937.38 см⁻¹ ($02^0 2 - 12^0 1$), ... практически совпадают с полосами $00^0 v_3 - 10^0 (v_3 - 1)$ ($v_3 = 1, 2, \dots$) N_2O . R-ветви полос $03^1 v_3 - 13^1 (v_3 - 1)$ ($v_3 = 1, 2$) с центрами при $k = 908.37$ ($03^1 1 - 13^1 0$) и 905.2 см⁻¹ ($03^1 2 - 13^1 1$) и полос $04^0 v_3 - 14^0 (v_3 - 1)$ ($v_3 = 1, 2$) с центрами при $k = 911.14$ ($04^0 1 - 14^0 0$) и 905.9 см⁻¹ ($04^0 2 - 14^0 1$) частично перекрываются с R-ветвями полос $00^0 v_3 - 10^0 (v_3 - 1)$ ($v_3 = 1, 2, \dots$). Однако если учесть,

что населенности уровней $02^0 v_3$, $03^1 v_3$ и $04^0 v_3$ в 3, 4 и 5 раз меньше населенностей уровней $02v_3$, $03v_3$ и $04v_3$ соответственно, то вкладом указанных полос в усиление СКИ излучения можно пренебречь.

4. Результаты расчетов и их обсуждение

На рис.1,2 представлены расчетные коэффициенты усиления активных сред N_2O и $N_2O - CO_2$ в момент достижения максимальной инверсии (что в условиях расчета соответствует примерно моменту окончания импульса накачки). Максимальный коэффициент усиления в среде N_2O приходится на волновое число 927.74 см⁻¹ и обусловлен линиями P(13) ($00^0 1 - 10^0 0$, 927.74 см⁻¹) и R(11) ($01^1 1 - 11^1 0$, 927.78 см⁻¹) (полуширина линий ~ 0.08 см⁻¹ при давлении 1 атм). В среде $N_2O - CO_2$ максимальный коэффициент усиления обусловлен главным образом линиями R(10) ($00^0 1 - 10^0 0$, 947.8 см⁻¹), R(13) ($00^0 2 - 10^0 1$, 947.78 см⁻¹) в N_2O и P(16) ($00^0 1 - 10^0 0$, 947.74 см⁻¹) в CO_2 и соответствует волновому числу 947.76 см⁻¹. Максимальный коэффициент усиления больше в среде $N_2O - CO_2$ за счет вклада сильной линии P(16) ($00^0 1 - 10^0 0$).

Для усилительной секции, имеющей поперечное сечение S , длину L и удельную энергию E , запасенная энергия равна ESL . Если K_{max} – максимальный коэффициент усиления активной среды, создаваемой накачкой, и $K_{max}L$ – допустимый показатель усиления излучения в секции ($K_{max}L \leq 10$ [4] и определяется устойчивостью к усиленному спонтанному излучению и неконтролируемыми обратными связями), то предельная длина секции $L \sim 1/K_{max}$ и запасенная энергия $\sim E/K_{max}$. Величина E/K_{max} наряду с E является важной характеристикой усилительной системы, поскольку она определяет предельную энергию излучения в насыщенном режиме усиления. Коэффициент преобразования энергии излучения HF-лазера в энергию, запасаемую в полосе усиления СКИ излучения, пропорционален E/F .

На рис.3 представлены зависимости K_{max} , а также ϵ_2 и ϵ_3 для активной среды N_2O от плотности энергии накачки F . На рис.4 приведены зависимости от F величин E_1 , E_{930} , E_{950} (при вычислении E_{930} и E_{950} спектральную ширину полосы усиления принимали равной 30 см⁻¹), E/K_{max} и

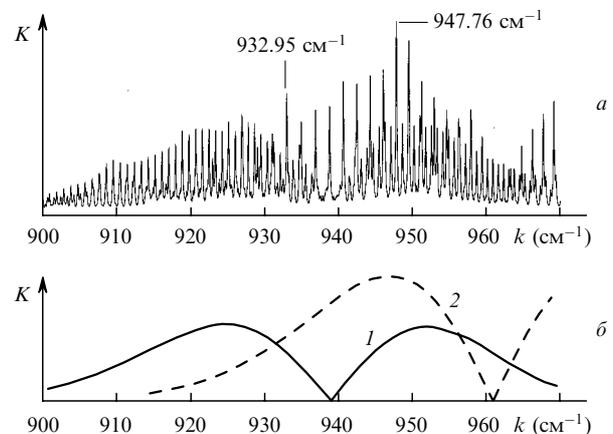


Рис.2. Расчетные коэффициенты усиления K активной среды $N_2O - CO_2$ (а) и огибающие коэффициентов усиления в полосах $00^0 1 - 10^0 0$ N_2O (1) и CO_2 (2), дающих основной вклад в формирование полосы усиления СКИ излучения (б). Полное давление смеси 1 атм, давления $p_{N_2O} = 0.2$ атм, $p_{CO_2} = 0.2$ атм, газ-разбавитель He; $F = 4$ Дж/см².

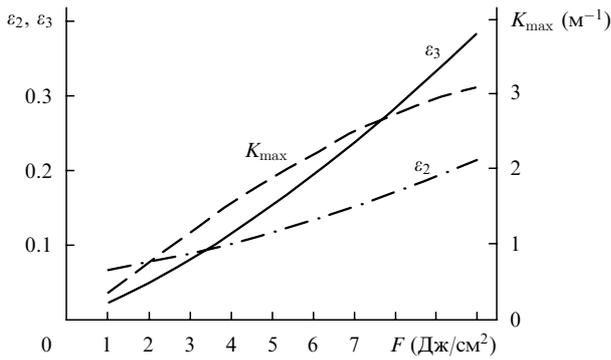


Рис.3. Зависимости средних чисел квантов в деформационной (ϵ_2) и асимметричной (ϵ_3) модах, а также максимального коэффициента усиления K_{\max} в активной среде N₂O от плотности энергии накачки. Полное давление смеси 1 атм, давление $p_{N_2O} = 0.2$ атм, газ-разбавитель He.

E/F для активной среды N₂O; здесь E считалось равным наибольшему из значений E_{930} и E_{950} при данной плотности энергии излучения HF-лазера. Из рис.3 и 4 видно, что с ростом плотности энергии накачки происходит следующее: растут значения K_{\max} , E_t , E_{930} , E_{950} и E/K_{\max} ; рост E_{930} опережает рост E_{950} ; зависимость E/F от F имеет максимум. Для усиления короткого импульса в активной среде N₂O более предпочтительной является полоса с максимумом при $k \sim 930$ см⁻¹. Опережающий рост запасенной энергии в этой полосе в сравнении с полосой с максимумом при $k \sim 950$ см⁻¹ обусловлен вкладом переходов $01^1v_3 - 11^1(v_3 - 1)$ ($v_3 = 1, 2, \dots$). При этом для усиления следует использовать частоту, соответствующую $k = 927.74$ см⁻¹. В полосе усиления сосредотачивается значительная доля всей запасенной удельной энергии E_t (60% – 80%).

При объяснении характера зависимости E/K_{\max} от плотности энергии накачки F существенно то, что коэффициент K_{\max} определяется случайным резонансом двух индивидуальных колебательно-вращательных переходов с разных колебательных уровней – P(13) ($00^01 - 10^00$) и R(11) ($01^11 - 11^10$). С увеличением F растет число состояний, дающих вклад в удельную энергию E , но не дающих вклада в K_{\max} . В силу этого отношение E/K_{\max} должно расти с ростом F (если бы резонанс отсутствовал, рост был бы заметнее). Это основная причина увеличения E/K_{\max} . Менее существенной причиной изменения E/K_{\max} является увеличение поступательно-вращательной температуры с ростом F . Вследствие трансформации

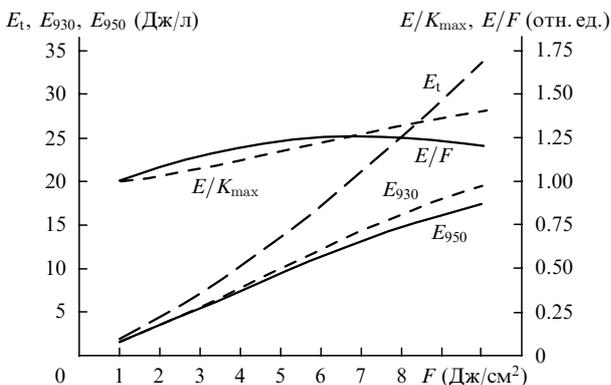


Рис.4. Зависимости E_t , E_{930} , E_{950} (ширина полос усиления 30 см⁻¹), E/K_{\max} и E/F от плотности энергии накачки. Полное давление смеси 1 атм, давление $p_{N_2O} = 0.2$ атм, газ-разбавитель He.

вращательного распределения происходит небольшое увеличение E/K_{\max} .

В расчетах установлено, что при изменении плотности энергии накачки от 1 до 10 Дж/см² температура увеличивается от 304 до 367 К. Изменение E/K_{\max} , обусловленное максимальным в условиях расчетов нагревом, не превышает 5%. Оптимальный КПД преобразования энергии излучения HF-лазера в энергию, запасаемую в полосе усиления СКИ излучения, достигается при $F \sim 7$ Дж/см². Снижение КПД при дальнейшем увеличении F связано с постоянно увеличивающейся населенностью состояний, не принимающих участия в усилении СКИ. Для типичных импульсных химических HF-лазеров $F = 3 - 5$ Дж/см². Из рис.4 видно, что при таких F значения E/F не сильно отличаются от оптимального, т.е. этот диапазон F приемлем для накачки. В условиях расчетов в нем на каждый поглощенный в активной среде квант излучения HF-лазера приходится около 0.65 кванта энергии, которая может быть преобразована в энергию СКИ излучения.

На рис.5 представлены зависимости E_t , E_{930} , E_{950} (при вычислении E_{930} и E_{950} спектральную ширину полосы усиления принимали равной 30 см⁻¹) и E/K_{\max} от парциального давления CO₂ в смеси N₂O – CO₂ – He; здесь, как и в случае среды N₂O, E – максимальное из значений E_{930} и E_{950} при данном F . Видно, что в среде N₂O – CO₂ все удельные энергии увеличиваются с ростом давления CO₂ в смеси. В то же время значения E/K_{\max} с ростом давления CO₂ уменьшаются. Величина K_{\max} в основном определяется случайным резонансом колебательно-вращательных переходов R(10) ($00^01 - 10^00$) в N₂O и P(16) ($00^01 - 10^00$) в CO₂.

Вследствие разной молекулярной симметрии населенность вращательных состояний в полосе $00^01 - 10^00$ в CO₂ вдвое выше, чем в N₂O. С учетом этого населенности состояний с $j = 15$ (CO₂) и $j = 11$ (N₂O) при температуре 320 К (расчеты дают температуру, близкую к 320 К для всех смесей с CO₂) различаются примерно в три раза. Кроме того, сечение перехода P(16) в CO₂ в 1.36 раза больше сечения перехода R(10) в N₂O. В результате возникает сильная зависимость K_{\max} от концентрации CO₂. В итоге, хотя добавление CO₂ увеличивает удельную энергию, запасаемую в среде, но реально энергия, получаемая в секции с насыщенным усилением, падает из-за уменьшения ее допустимой длины. Использование смесей N₂O – CO₂ целесообразно в том случае, если целью является максимальное увеличение коэффициента преоб-

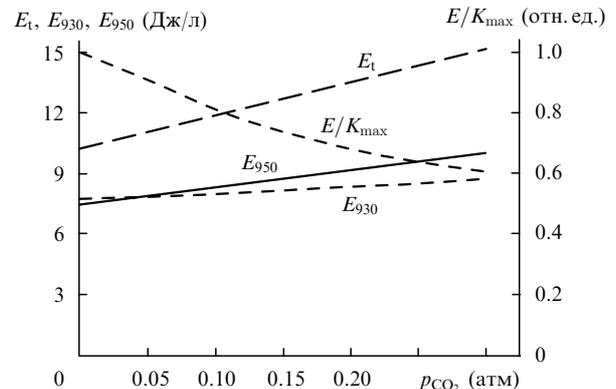


Рис.5. Зависимости E_t , E_{930} , E_{950} (ширина полос усиления 30 см⁻¹) и E/K_{\max} от давления CO₂. Полное давление смеси 1 атм, давление $p_{N_2O} = 0.2$ атм, газ-разбавитель He; $F = 4$ Дж/см².

разования энергии излучения HF-лазера в энергию СКИ излучения.

Отметим, что существует возможность увеличения извлекаемой из активной среды N_2O энергии. Если использовать две несущие частоты, которые соответствуют волновым числам 927.74 и ~ 683 cm^{-1} (или ~ 709 cm^{-1}), то можно реализовать следующую схему переходов:

$$00^01 - 10^00 - 01^10,$$

$$00^02 - 10^01 - 20^00 - 11^10 - 02^20,$$

$$00^03 - 10^02 - 20^01 - 11^11 - 02^21,$$

$$01^11 - 11^10 - 02^20,$$

$$01^12 - 11^11 - 02^21.$$

Переходы $10^00 - 01^10$ (694.14 cm^{-1}), $20^00 - 11^10$ (683.07 cm^{-1}), $20^01 - 11^11$ (668.85 cm^{-1}), $11^10 - 02^20$ (702.52 cm^{-1}), $11^11 - 02^21$ (688.84 cm^{-1}) (в скобках указаны положения центров полос) формируют добавочную полосу усиления с максимумами при $k \sim 683$ и ~ 709 cm^{-1} . В бесстолкновительных условиях населенности верхних состояний этих переходов определяются населенностью исходных состояний 00^0v_3 и 01^1v_3 ($v_3 = 1, 2, \dots$) в момент достижения наивысшей инверсии. Можно показать, что доля добавочной энергии составит $\sim (694/939)[1 - \epsilon_2(1 + \epsilon_3)/(1 + \epsilon_2)\epsilon_3]$. Из рис.3 видно, что эта доля равна нулю при $F \approx 3.5$ Дж/см², поскольку $\epsilon_2 = \epsilon_3$, и далее растет с увеличением плотности энергии накачки. При $F = 10$ Дж/см² она составляет $\sim 30\%$.

5. Заключение

В работе проведен расчет оптической накачки смесей $N_2O - He$ и $N_2O - CO_2 - He$ при общем давлении 1 атм излучением импульсного многочастотного HF-лазера. При накачке молекул N_2O формируются две полосы усиления СКИ излучения с максимумами при $k \sim 930$ и ~ 950 cm^{-1} . В полосе с максимумом при $k \sim 930$ cm^{-1} запасаемая при накачке удельная энергия выше. При плотности энергии излучения HF-лазера ~ 5 Дж/см² она составляет ~ 10 Дж/л. На каждый поглощенный в активной среде квант излучения HF-лазера приходится около 0.65 кванта энергии, которая может быть преобразована в энергию СКИ излучения. Выходная энергия секции с насыщенным усилением растет с увеличением плотности энергии накачки, но КПД секции, начиная с некоторого уровня накачки (~ 7 Дж/см²), уменьшается из-за посто-

янно увеличивающейся населенности состояний, не дающих вклада в усиление СКИ излучения. Если исходить из практических соображений, то приемлемым является диапазон плотностей энергии накачки $3 - 5$ Дж/см². В смеси $N_2O - CO_2$ для усиления СКИ излучения предпочтительнее полоса с максимумом при $k \sim 950$ cm^{-1} . Удельная энергия, запасаемая в этой среде выше, чем в среде N_2O , но энергия, запасаемая в усилительной секции, ниже из-за меньшей допустимой длины секции. Применение смесей $N_2O - CO_2$ целесообразно в том случае, если необходимо максимальное увеличение коэффициента преобразования энергии излучения HF-лазера в энергию СКИ излучения.

Показано, что существует способ увеличения извлекаемой из активной среды N_2O энергии, заключающийся в использовании добавочных полос усиления с максимумами при $k \sim 683$ и ~ 709 cm^{-1} , формируемых переходами из промежуточных состояний, которые возникают за счет переходов, формирующих основные полосы усиления.

1. Васильев Г.К., Макаров Е.Ф., Чернышев Ю.А. и др. *Химическая физика*, **7**, 1310 (1988).
2. Bravy B.G., Vasiliev G.K., Makarov E.F., Chernyshev Yu.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4747**, 1 (2002).
3. Arsenjev A.V., Azarov M.A., Burtsev A.P., Drozdov V.A., Mashendzinov V.I., Sudarikov V.V., Troshchinenko G.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5479**, 141 (2004).
4. Бравый Б.Г., Васильев Г.К., Гордиенко В.М., Макаров Е.Ф., Платоненко В.Т., Чернышев Ю.А. *Препринт МГУ № 2/2004* (М., 2004).
5. Toth R.A. *Appl. Opt.*, **32**, 7326 (1993).
6. Rothman L.S., Young L.D.G. *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, **25**, 505 (1981).
7. Rothman L.S. *Appl. Opt.*, **25**, 1795 (1986).
8. Sondag A.H.M., van der Lift H.A., Wergam G.H. *J. Mol. Spectroscopy*, **97**, 353 (1983).
9. Rosenmann L., Hartmann J.M., Perrin M.Y., Taine J. *J. Chem. Phys.*, **88**, 2999 (1988).
10. Sengupta U.K., Das P.K., Rao K.N. *J. Mol. Spectroscopy*, **74**, 322 (1979).
11. Toth R.A. *Appl. Opt.*, **30**, 5289 (1991).
12. Zuniga J., Alacid M., Bastida A., et al. *J. Chem. Phys.*, **110**, 6339 (1999).
13. Зуев А.П. *Химическая физика*, **2**, 923 (1983).
14. Lepoutre F., Louis G., Taine J. *J. Chem. Phys.*, **70**, 2225 (1979).
15. Stephenson J.C., Moore C.B. *J. Chem. Phys.*, **56**, 1295 (1972).
16. Azarov M.A., Alexandrov B.S., Drozdov V.A., Troshchinenko G.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2502**, 382 (1994).
17. Васильев Г.К., Макаров Е.Ф., Рябенко А.Г., Тальрозе В.Л. *ЖЭТФ*, **71**, 1320 (1976).