

# ПРЕПРИНТ



А.А. ИОНИН, А.К. КУРНОСОВ, А.П. НАПАРТОВИЧ, Л.В. СЕЛЕЗНЕВ

# ЛАЗЕРЫ НА ОБЕРТОННЫХ ПЕРЕХОДАХ МОЛЕКУЛЫ ОКИСИ УГЛЕРОДА

**MOCKBA 2009** 

# Лазеры на обертонных переходах молекулы окиси углерода

А.А.Ионин<sup>1</sup>, А.К.Курносов<sup>2</sup>, А.П.Напартович<sup>2</sup>, Л.В.Селезнев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физический институт им.П.Н,Лебедева РАН, Ленинский пр., 53, 119991, Москва, РФ, <u>aion@sci.lebedev.ru</u>

<sup>2</sup> ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Московская обл., РФ, <u>apn@triniti.ru</u>

## Аннотация

В работе представлен обзор экспериментальных и теоретических исследований лазеров, действующих на первом колебательном обертоне молекулы СО. Приведено описание теоретической модели активной среду СО лазера и ее верификация. В обзоре экспериментальных работ продемонстрировано, что обертонный СО лазер может действовать в широкой спектральной области 2.5-4.2 мкм, перекрывающей "окно прозрачности" атмосферы. Показано, что обертонный СО лазер может быть использован в качестве эффективного источника излучения среднего ИК диапазона для атмосферной спектроскопии, транспортировки лазерного излучения на большие расстояния, дистанционного лазерного зондирования и др.

# 1. Введение

Среди молекулярных лазеров СО лазер выделяется своими спектральными и энергетическими характеристиками [1-12]. Генерация излучения в таком лазере происходит на большом количестве колебательновращательных переходов молекулы окиси углерода. Спектр излучения СО лазера, действующего на основных (фундаментальных) переходах  $V+1 \rightarrow V$ , т.е. с изменением номера колебательного уровня V на 1, лежит в диапазоне длин волн от 4.63 мкм [13] до 8.23 мкм [14]. Благодаря процессам колебательно-колебательного VV обмена [15] и каскадному механизму генерации излучения [16], при котором нижний лазерный уровень одного перехода становится верхним лазерным уровнем другого перехода, эффективность преобразования энергии накачки в энергию излучения СО лазера, работающего на основных переходах, может превышать 30% [7-10, 12, 17-21].

При транспортировке лазерного излучения на большие расстояния важным фактором становится поглощение излучения в атмосфере. В среднем ИК диапазоне спектра вклад в поглощение дают многие составляющие атмосферы: пары воды, углекислый газ, метан и другие. Распространение лазерного излучения с малым поглощением возможно лишь в небольших спектральных интервалах [22], т.е. в "окнах прозрачности" атмосферы.

В диапазоне длин волн, соответствующем основным переходам молекулы CO, располагаются относительно узкие "окна прозрачности" (см., например, [23]). Вместе с тем, довольно широкое "окно прозрачности" атмосферы расположено в спектральной области 3.3-4.0 мкм. В эту область попадают длины волн химического DF-лазера [24,25]. Однако, применение химических лазеров сталкивается с проблемой утилизации высокотоксичных продуктов химических реакций в таких лазерах [25]. CO лазер, действующий на первом колебательном обертоне  $V+2 \rightarrow V$  [26,27], т.е. с изменением колебательного квантового числа V на 2, может работать в том же спектральном диапазоне [28-33]. При этом активная среда CO лазера гораздо менее токсична, а количество спектральных линий у такого лазера в несколько раз больше, чем у DF-лазера. В спектральной области 2.5-4.2 мкм расположены линии поглощения различных естественных и загрязняющих атмосферных компонент, например, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, NO, SO<sub>2</sub>, HCN, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>CO, HOCl, CH<sub>3</sub>Cl, CO, HCl, HF, HBr, HI, ОН,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $C_6H_6$ ,  $C_7H_8$ ,  $CH_3OH$ ,  $C_2H_5OH$ ,  $C_2H_8N_2$  и др., многие из которых совпадают со спектральными линиями обертонного СО лазера. Кроме того, такой лазер может обладать высокими энергетическими характеристиками. Например, эффективность обертонного СО лазера достигает 16% [34], что сопоставимо с эффективностью широко распространенных CO<sub>2</sub> лазеров. Таким образом, обертонный CO лазер может найти широкое применение, с одной стороны, в лазерной спектроскопии, с другой, поскольку он может действовать в спектральном диапазоне, перекрывающем "окно прозрачности" атмосферы - при транспортировке лазерного излучения на большие расстояния, дистанционном лазерном зондировании и др.

В настоящей работе представлен обзор экспериментальных и теоретических исследований обертонных СО лазеров<sup>\*</sup>. Развитие модели обертонного СО лазера потребовало произвести пересмотр существовавших приближенных представлений 0 колебательноранее кинетике колебательного обмена между такими парами молекул, как CO-CO, N<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>, СО- N<sub>2</sub>. Для этих пар молекул были выполнены детальные полуклассические расчёты констант скоростей V-V обмена для широкого интервала температур газа, включая криогенные температуры. С использованием новых данных модель СО лазера существенно модифицирована и проверена путём сравнения с лазерными экспериментами. Хорошее согласие с измерениями позволяет рекомендовать развитую модель к широкому использованию.

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> В молекуле СО возможны излучательные переходы и на более высоких обертонах, например на втором обертоне с  $V+3 \rightarrow V$  т.е. с изменением колебательного квантового числа V на 3, в спектральном диапазоне ~ 1.6 – ~2.7 мкм. На возможность создания СО лазера на втором обертоне указывалось в [J.W.Rich and R.C.Bergman, Molecular laser operating on fundamental and overtone bands, US Patent 4194169, Publication Date 03/18/1980]. Однако, СО лазер на втором обертоне не был создан вследствие малого значения коэффициента усиления. Поэтому в дальнейшем речь пойдет о СО лазере на первом обертоне молекулы СО.

# 2. Теоретическая модель СО лазера на обертоне.

# 2.1 Введение

Молекулярный СО лазер действует на колебательно-вращательных переходах молекулы СО, находящейся в основном электронном состоянии  $X^{1}\Sigma^{+}$ . Генерация может осуществляться как в основной (фундаментальной) системе полос, так и в первой обертонной системе. Физические принципы работы СО лазера в основной системе полосе изложены в ряде обзоров [5, 7, 35, 10, 12, 36, 37]. Мы, для полноты изложения, приводим краткие сведения о характеристиках молекул СО и кинетических процессах, происходящих в активной среде электроразрядных СО лазеров.

Уровни энергии колебательно-вращательных состояний молекулы СО в общепринятых обозначениях имеют вид:

 $E_{V,J} = G(V) + F_V(J) = [\omega_e(V+1/2) - \omega_e x_e(V+1/2)^2] + [B_V J(J+1) - D_V J^2(J+1)^2], \quad (2.1)$ 

где V – номер колебательного уровня, J - номер вращательного подуровня, G(V) - колебательная энергия молекулы в приближении ангармонического осциллятора ( $\omega_e$  - частота гармонических колебаний,  $\omega_e x_e$  постоянная ангармонизма),  $F_V(J)$  - вращательная энергия молекулы с учётом взаимодействия между вращательным и колебательным движениями. Для молекул, составленных из основных изотопов <sup>12</sup>С и <sup>16</sup>О, вращательные постоянные  $B_V$  и  $D_V$  зависят от номера V следующим образом:  $B_V = B_e$ - $\alpha_e(V+1/2)$ ,  $D_V = D_e + \beta_e(V+1/2)$ , где  $B_e = 1.931271$  cm<sup>-1</sup>,  $\alpha_e = 0.017513$  cm<sup>-1</sup>,  $D_e = 6.1198 \ 10^{-6}$  cm<sup>-1</sup>,  $\beta_e = 0.9876 \ 10^{-9}$  cm<sup>-1</sup> [38].

В работе [39] были представлены результаты проведенных ранее исследований по измерению молекулярных констант и частот колебательно-вращательных переходов молекулы СО, находящейся в основном электронном состоянии. Позже в [40] были приведены длины волн обертонных колебательных переходов молекулы СО в диапазоне от 2.29 до 2.5 мкм, измеренных при анализе спектра излучения солнечной фотосферы. Осуществление генерации излучения в импульсном газоразрядном СО лазере [1] позволило провести более точные (с погрешностью  $\pm 0.02$  см<sup>-1</sup>) измерения длин волн фундаментальных колебательновращательных переходов молекулы СО и уточнить спектроскопические константы этой молекулы [41]. При этом были измерены длины волн 143 спектральных линий СО лазера, действующего в спектральном диапазоне от 5.0 до 6.2 мкм [41]. В более поздней работе [42] измерения частот спектральных линий СО лазера были проведены с точностью, достигающей нескольких МГц ( $\pm 10^{-4} - 10^{-5}$  см<sup>-1</sup>). На основе этих результатов в работе [43] были рассчитаны колебательные константы и частоты колебательно-вращательных переходов молекулы СО. Спектроскопические константы молекулы СО, рассчитанные в [44] на основе экспериментальных данных, полученных в [45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55], вошли в различные базы данных (см., например, [56]). Расчетные частоты более чем 400 обертонных колебательно-вращательных переходов, в том числе переходы, на которых в экспериментах была получена генерация излучения, приведены в работе [32] и в таблице (см. Приложение)<sup>\*</sup>.

Разность энергий между вращательными подуровнями *J* и *J*', принадлежащими колебательным уровням *V* и *V*', согласно (2.1) имеет вид:

$$\Delta E \begin{pmatrix} V' \to V \\ J' \to J \end{pmatrix} = \left[ \omega_e \left( V' + \frac{1}{2} \right) - \omega_e x_e \left( V' + \frac{1}{2} \right)^2 \right] - \left[ \omega_e \left( V + \frac{1}{2} \right) - \omega_e x_e \left( V + \frac{1}{2} \right)^2 \right] + B_V J' (J'+1) - B_V J (J+1) + D_V J'^2 (J'+1)^2 - D_V J^2 (J+1)^2.$$
(2.2)

В обычных условиях инверсия в распределении молекул СО по колебательным уровням ( $N_{V+\Delta V} < N_V$ ) отсутствует, и генерация излучения происходит при так называемой частичной инверсии, т.е. инверсии между некоторыми колебательно-вращательными состояниями ( $V+\Delta V$ , J) и (V,  $J\pm 1$ ), где  $\Delta V \ge 1$ . Изменение числа J при радиационном переходе определяется правилом отбора:  $\Delta J=+1$  для P-ветви и  $\Delta J=-1$  для R-ветви. Частичная инверсия может возникнуть только в P-ветви.

В электроразрядных СО лазерах неравновесное распределение молекул по колебательным уровням формируется, в первую очередь, за счёт возбуждения молекул при столкновении с электронами. Для молекул СО, как и для N<sub>2</sub>, сечение возбуждения колебательных уровней с V < 9 аномально велико за счёт резонансного возбуждения нестабильного возбуждённого состояния отрицательного иона, которое спонтанно распадается, так что конечное состояние оказывается колебательно возбужденным:  $CO(0)+e \rightarrow CO^{-} \rightarrow CO(V)+e$ . Сечения возбуждения  $\sigma_{0V}$  колебательных уровней V молекул СО электронным ударом в зависимости от энергии электронов были экспериментально измерены в работе [57] (см. Рис. 2.1). В

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> В указанной таблице представлены частоты обертонных колебательно-вращательных переходов для основного изотопа молекулы  ${}^{12}C^{16}O$ . Применение молекул другого изотопического состава  ${}^{13}C^{16}O$  и  ${}^{12}C^{18}O$  позволит существенно увеличить количество спектральных линий.

дальнейшем, вопрос нормировки измеренных в [57] сечений активно исследовался в ряде работ. На наш взгляд, наибольшей достоверностью обладает значение нормировочного фактора 1.3, определённого в ([58]) путём обработки данных по скорости дрейфа электронов в смесях Ar:CO.



Рис. 2.1. Экспериментальные сечения возбуждения  $\sigma_{0V}$  колебательного уровня V молекул СО электронным ударом в зависимости от энергии электронов [57].

Эффективно возбуждают нижние колебательные уровни молекулы СО электроны, энергия которых составляет ~1-3 эВ (для сравнения, энергия ионизации молекулы СО составляет 14.014 эВ [38]. При столкновении электрона с молекулой СО(V) при 1<V<9 переходы между уровнями также могут происходить по резонансному механизму. Следует отметить, что до сих пор имеется несколько вариантов теоретического расчёта резонансных сечений для переходов в группе уровней с V<8, вызванных столкновениями с электронами [59], которые заметно отличаются друг от друга.

Критерии для выбора определённого набора сечений отсутствуют, однако, в работе [59], отмечалось, что результаты моделирования разрядов при высокой степени колебательного возбуждения мало меняются при смене матрицы сечений переходов  $V_i \leftrightarrow V_j$ .

Кроме резонансного возбуждения колебаний, имеется и процесс потенциального рассеяния электронов на молекулах, при котором молекула может опуститься или подняться на один колебательный уровень. Сечения таких процессов малы для нижних уровней и растут с номером, так что для уровней выше десятого их вклад в возбуждение - девозбуждение молекул СО может стать заметным [60].

Дальнейшая эволюция колебательной функции распределения (КФР) контролируется колебательно-колебательным (VV) обменом. Мак-

6

симально быстро этот процесс идёт в случае резонанса, когда состояние пары молекул фактически не меняется. При малом дефекте энергии скорость обмена также велика.



Рис.2.2. Схема прямых и обратных переходов при столкновении двух ангармонических осцилляторов, находящихся на колебательных уровнях *V* и *V'-1 (V* < *V'-1*). Прямые переходы показаны сплошными стрелками, обратные - пунктирными.

В сильно неравновесных условиях, когда запас колебательной энергии на молекулу сильно превышает равновесное значение, наличие ангармонизма колебаний приводит к качественно новому эффекту – формированию потока колебательной энергии вверх по системе колебательных уровней. Рис. 2.2 даёт качественное объяснение этому эффекту. При столкновении двух ангармонических осцилляторов, находящихся на колебательных уровнях V и U ( $V < U - \Delta V$ ), возможен процесс VV обмена:  $CO(V) + CO(U - \Delta V) \rightarrow CO(V - \Delta V) + CO(U)$ . По принципу детального равновесия соотношение вероятностей прямых и обратных переходов в таком процессе может быть записано в следующем виде:

$$P_{V \to V \to V}^{U \to \Delta V \to U} = P_{V \to \Delta V \to V}^{U \to U \to \Delta V} \exp[\Delta E / kT], \qquad (2.3)$$

где  $\Delta E^{=(E_{V+1}-E_V)-(E_U-E_{U-1})}$  - дефект энергии данного процесса, т.е. изменение колебательной энергии системы в результате обмена колебательными квантами. Если V>U, то  $\Delta E>0$ , и вероятность прямого процесса больше вероятности обратного процесса. Это различие растёт с уменьшением температуры газа. Таким образом, процессы VV обмена приводят к разбеганию молекул на верхние и нижние уровни, соответственно. В отсутствие релаксации это приводит к формированию КФР, имеющей минимум для некоторого уровня, номер которого называется числом Тринора (Treanor), выражаемого формулой:  $n^* = E_1/2\Delta E(T/T_1) + 1/2$  [15], где  $T_1$  – температура первого колебательного уровня, определяемая через отношение населённостей основного и первого колебательных уровней. Особенностью Триноровской (Treanor) КФР является отсутствие потока числа квантов по системе колебательных уровней. При  $T_1 > T$  имеется область уровней с абсолютной инверсией населенностей, что объясняется отсутствием гибели квантов в рассматриваемой модели.

При наличии VT релаксации и стационарного возбуждения нижних уровней формируется поток колебательных квантов вверх по «лесенке» уровней. Из-за потерь, связанных с релаксацией, растущая часть КФР деформируется в плато, начинающееся от минимума Тринора (Treanor). Длина плато зависит от степени преобладания процессов VV обмена над VT релаксацией и разрыва между колебательной и поступательной температурами. Форма установившейся КФР при постоянной температуре газа была аналитически описана в [35]. Обобщение аналитической теории на нестационарные условия было выполнено в работе [61]. Выведенные аналитические выражения были верифицированы путём сравнения с численными расчётами в работе [62].





На Рис. 2.3 схематично показано возбуждение колебательных уровней молекулы СО: возбуждение нижних уровней электронным ударом и распространение волны возбуждения на более высокие уровни благодаря VV обмену. На Рис. 2.4 представлена типичная эволюция расчётной КФР, как во время импульса накачки, так и после его выключения.



Рис. 2.4. Расчётная КФР в импульсном СО ЭИЛ (СО:He=1:4,  $T_0$ =110 К, начальная плотность газа 0.1 Амага, удельный энерговклад 240 Дж/л Амага, длительность импульса накачки 30 мкс) в разные моменты времени: (1) 10, (2) 30, (3) 60, (4) 100 и (5) 300 мкс, соответственно, от начала импульса накачки.

В области плато КФР, показанной на Рис. 2.4, реализуется частичная инверсия на переходах *P*- ветви между вращательными подуровнями колебательных полос с изменением колебательного квантового числа  $\Delta v=1$  (основная система) и с  $\Delta v=2$ , 3 (первая и вторая обертоннные системы).

Из формулы Патэла (Patel) [63] для коэффициента усиления

$$\alpha_{V,J\to V',J\pm 1} = (\lambda^2 / 8\pi kT)A_{V,V'}S_J[N_V B_V \exp\left(-\frac{B_V F_V(J)}{kT}\right) - N_{V'}B_{V'} \exp\left(-\frac{B_{V'}F_{V'}(J\pm 1)}{kT}\right)]G(\lambda)$$

$$, \qquad (2.4)$$

следует, что коэффициент усиления может быть положительным только для *P*-ветви. В (2.4)  $F_{V'}(J\pm 1)=J(J\pm 1)$  - знак "плюс" соответствует *P*ветви, "минус" - *R*- ветви;  $S_J=J+1$  для *P*-ветви перехода,  $S_J=J$  для *R*-ветви;  $A_{V,V'}$  - частота спонтанного радиационного перехода  $V \rightarrow V'$  (коэффициент Эйнштейна),  $\lambda$  - длина волны,  $G(\lambda)$  - нормированный спектральный профиль линии. В работе [64] приводятся аналитические выражения для вычисления  $G(\lambda)$  через функцию Фойгта (Voigt), в которых учитывается совместное воздействие столкновительного и доплеровского уширения спектральной линии:

$$G(\lambda) = (4\ln 2/\pi)^{1/2} H(b) / \Delta v_D,$$
  

$$H(b) = \frac{b}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-z^2)}{z^2 + b^2} dz = [1 - \Phi(b)] \exp b^2,$$
  

$$\Phi(b) = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{b} \exp(-x^2) dx, b = \frac{\Delta v_L}{\Delta v_D} \sqrt{\ln 2},$$
  
(2.5)

где  $\Delta v_D = \frac{v/c\sqrt{(8kT/M)\ln 2}}{i}$  - ширина доплеровской линии, а столкновительная ширина вычисляется по формуле  $\Delta v_L = 2\Sigma \gamma_i p_i$ , где  $p_i$  - парциальное давление *i*-ой компоненты смеси,  $\gamma_i$  - полуширина линии, обусловленная столкновением молекул СО с молекулами *i*-ой газовой компоненты. Зависимости  $\gamma_i$  от номера вращательного перехода и от поступательной температуры для столкновительных партнеров СО-СО, СО-N<sub>2</sub>, СО-Не, СО-Аг приводятся в [65].

Сопоставляя выражение (2.4) применительно для переходов на основной частоте и на первом колебательном обертоне, можно отметить, что при прочих равных условиях коэффициент усиления на обертоне должен быть меньше, чем на основной частоте, по причине меньшей длины волны  $\lambda$  и меньшей величины инверсии. Специфика лазерных переходов на обертоне также определяется существенно иным, чем для переходов на основной частоте, характером зависимости коэффициентов Эйнштейна ( $A_{V+K,V}$ ) от номера колебательной полосы. Для обертона малость коэффициента Эйнштейна обусловлена малой величиной ангармонизма. Однако он продолжает нарастать на высоких уровнях, где коэффициент Эйнштейна для основной частоты проходит через максимум и начинает падать. Современные данные [66] о вероятностях радиационных переходов  $A_{V+2 \rightarrow V}$  и  $A_{V+1 \rightarrow V}$  представлены на Рис. 2.5. Как видно, при V > 30 коэффициент Эйнштейна для обертона больше, чем для основной частоты.



Рис. 2.5. Коэффициенты Эйнштейна для переходов на основной частоте  $A^{V+1,V}$ (1) и на обертоне  $A^{V+2,V}$  (2) молекулы СО в зависимости от номера колебательного уровня V.

Коэффициент усиления на высоких обертонных колебательных переходах молекулы СО, приближаясь по величине к коэффициенту усиления на основных переходах, остаётся всегда меньше. Это иллюстрирует Рис. 2.6, на котором представлены результаты численных расчетов временной динамики коэффициентов усиления слабого сигнала (КУСС) на основной частоте и обертоне в условиях, типичных для импульсных СО ЭИЛ.



Рис. 2.6. Расчётная динамика КУСС на обертоне и основной частоте на переходах P(12). a) обертон:  $10 \rightarrow 8$  (1),  $15 \rightarrow 13$  (2),  $20 \rightarrow 18$  (3),  $25 \rightarrow 23$  (4),  $30 \rightarrow 28$ (5),  $35 \rightarrow 33$  (6); b) основная частота:  $10 \rightarrow 9$  (1),  $15 \rightarrow 14$  (2),  $20 \rightarrow 19$  (3),  $25 \rightarrow 24$ (4),  $30 \rightarrow 29$  (5),  $35 \rightarrow 34$  (6). Условия: CO:He=1:4,  $T_0=110$  К, начальная плотность 0.1 Амага, удельный энерговклад в ЭИЛ 240 Дж/л Амага.

В первых работах [67; 68] был сделан прогноз возможности получения генерации на обертоне. Более подробный анализ работы такого лазера в стационарном и импульсном режимах, в том числе при одновременной генерации на обертоне и основной частоте, был выполнен в теоретических работах [69; 70; 71, 72]. Также была разработана аналитическая модель лазера на обертоне [73]. Однако скудность экспериментальных данных не позволяла верифицировать модели. В частности, прогноз энергетических характеристик обертонного СО лазера оказался сильно завышенным (КПД до 50%). Отчасти это объяснялось использованием в расчетах доли энергии электронов, теряемой на прямой нагрев, находимой из решения уравнения Больцмана.

При исследовании СО лазеров на основной частоте в ряде работ было обнаружено, что на быстрый нагрев в несамостоятельном разряде идет существенно большая доля (η) энергии накачки, чем следует из уравнения Больцмана [74, 75, 76]. С быстрым нагревом обычно связывают каналы возбуждения вращения молекул и потери, связанные с упругими соударениями. Внесение уточнений в сечения возбуждения молекулярных вращений уменьшило расхождение между теорией и экспериментом, но не ликвидировало его окончательно [77], [78].

Возможные причины указанного расхождения анализировались в работе [79], а также в [80], где в результате обработки экспериментальных данных были получены значения η, близкие к рассчитанным в [77]. Эта проблема – расхождение между теорией и экспериментом в доле энергии, идущей в быстрый нагрев газа – осталась нерешённой до сих пор. До настоящего времени используется полуэмпирический подход – введение в баланс энергии электронов доли η=0.15, которая близка к экспериментальным данным для условий, типичных для работы СО ЭИЛ. Такой подход обеспечивает удовлетворительное согласие теории с экспериментом по энергетическим характеристикам СО лазера [81].

Однако основной прогресс в теории обертонного СО лазера в последние годы связан с существенной модификацией модели VV-обмена.

Система кинетических уравнений, описывающих эволюцию населённостей колебательных уровней молекул CO и молекул N<sub>2</sub>, может быть представлена в виде:

$$\frac{dn_{v}}{dt} = R_{e-v}^{v} + R_{VV}^{v} + R_{VT}^{v} + R_{SP}^{v} + R_{IND}^{v}$$
(2.6)

где  $R_{e-v}^{\nu}$ ,  $R_{VV}^{\nu}$ ,  $R_{VT}^{\nu}$ ,  $R_{SP}^{\nu}$ ,  $R_{IND}^{\nu}$  - скорости изменения населенности уровня с номером *v* из-за взаимодействия с электронами; в процессах VVобмена; VT-релаксации; при спонтанном и индуцированном излучении, соответственно. Выражения для членов этого уравнения более подробно описаны, например, в [82].

Так как в электрическом разряде ток и поле взаимосвязаны, по мере развития разряда происходят изменения как величины приведенного электрического поля, E/N, так и состава газа и степени его возбуждения. Все эти факторы существенно влияют на функцию распределения электронов по энергии (ФРЭЭ), приводя к изменению во времени кинетических коэффициентов. Поэтому необходимо решать систему уравнений (2.6) совместно со стационарным уравнением Больцмана для ФРЭЭ. Уравнение Больцмана для ФРЭЭ может быть записано в схематическом виде:

$$\frac{dJ_F(u)}{du} + \frac{dJ_{el}(u)}{du} = St(f_0),$$
(2.7)

где u – энергия электронов;  $J_F$  и  $J_{el}$  потоки электронов в энергетическом пространстве, обусловленные, соответственно, наличием электрического поля и потерями энергии при упругих электрон - молекулярных столкновениях и при возбуждении молекулярных вращений; *St*( $f_0$ ) интеграл столкновений, учитывающий заселение колебательно - и электронновозбужденных состояний молекул, диссоциацию и ионизацию молекул при столкновениях с электронами. Выбор сечений всех необходимых процессов при столкновении электронов с CO, He, N<sub>2</sub> и методика решения уравнений (2.6), (2.7) описаны в [60], [83].

Для расчёта в общем случае многочастотного спектра генерации можно использовать простейшие уравнения баланса фотонов в резонаторе:

$$\frac{dI_{v,j}}{dt} = c \cdot \left(G_{v,j} - \Gamma_{v,j}\right) \cdot I_{v,j} + \frac{L \cdot \Omega}{4\pi} n_v A_{v,v-2},$$

где *с* - скорость света, *L* - длина усиливающей среды,  $\Omega$ - апертура выходного зеркала,  $A_{r,r,2}$  коэффициент Эйнштейна на рассматриваемом обертонном переходе,  $G_{v,j}$  - коэффициент усиления на заданном колебательно-вращательном переходе,  $\Gamma_{v,j}$  пороговое значение коэффициента усиления. Коэффициенты  $G_{v,j}$  рассчитывались по формуле (2.4). Изменение плотности активной среды за счет теплового расширения может существенно влиять на динамику КФР и КУСС. В условиях экспериментов [30] возбужденный газ расширялся в буферный объём, во много раз превосходящий объём активной среды. В теоретической модели такое расширение может быть приближенно учтено, в частности, с помощью выражения, аппроксимирующего переход от изохорического к изобарическому режиму расширения [84]. Необходимо учитывать изменение поступательной температуры активной среды в результате прямого нагрева в разряде и в процессах изменения колебательной энергии при VV обмене и VT релаксации [84], а также охлаждения в процессе расширения газа.

## 2.2. Физические особенности СО лазера на обертоне

Для всех колебательных уровней молекулы СО обертонные переходы обладают меньшим коэффициентом усиления, чем основные (см. Рис. 2.6). Поэтому при наличии генерации на переходах двух типов (V $\rightarrow$ V-1 и V $\rightarrow$ V-2), эффективность лазера на обертоне оказывается низкой, т.к. при генерации на основной частоте перехватывается часть потока квантов на более высокие уровни, где реализуется генерация на обертоне. Для достижения высоких значений КПД лазера на обертоне необходимо подавление генерации на основной частоте. Сделать это посредством спектрально селективных отражателей или фильтров оказалось трудно изза больших ширин спектральных областей, в одной из которых требуется внести сильные потери, в другой - обеспечить очень малые потери. В ранних экспериментальных работах по исследованию лазера на обертоне [26, 27, 85] этого сделать не удалось.

Поскольку коэффициент усиления на обертонных переходах мал, расчетные характеристики лазера на обертоне гораздо более чувствительны к значениям скоростей V-V обмена, чем лазера на основной частоте. Кроме того, обертонный СО лазер оказывается более чувствительным к наличию в активной среде примесей, которые могут приводить к релаксации молекул СО на высоких колебательных уровнях за счёт процессов квазирезонансного VV' обмена и VT релаксации [86].



В ранней теоретической работе [69] было предсказано, что в спектре обертонного СО лазера должно наблюдаться чередование по энергии сильных и слабых полос, которое не связано с изменением добротности резонатора (см. Рис. 2.7). В более поздних работах [87; 32, 30] этот эффект наблюдался экспериментально и был подтверждён численным расчётом. Причина возникновения такого чередования связана с существованием двух радиационно-независимых каскадов при генерации обертонного излучения - каскадов, связывающих излучением либо четные, либо нечетные колебательные переходы (см. Рис. 2.3). Наблюдается такое чередование интенсивностей колебательных полос, во-первых, в случае превышения скорости изменения населённостей, вызванных стимулированным излучением, над скоростью процессов VV обмена, а во-вторых, из-за неравноправия двух радиационно-независимых каскадов, которое, как правило, всегда имеет место. Масштаб указанной особенности зависит от конкретных условий эксперимента.

#### 2.3. Кинетическая модель активной среды

Экспериментальных данных для констант скорости VV-обмена с участием высоковозбужденных молекул СО практически нет. Долгое время константы VV-обмена между молекулами СО, измеренные для нижних колебательных уровней, где преобладает одноквантовый обмен (ОКО) (когда сталкивающиеся молекулы СО обмениваются одним колебательным квантом), экстраполировались в область более высоких колебательных уровней. Закон, используемый при этом, был основан на теории возмущений в первом порядке. При этом требовалось, чтобы вероятность рассматриваемого столкновительного перехода была мала и каждая молекула рассматривалась как двухуровневая система [88]. Простые оценки показывают, что вероятность обмена для квазирезонансных процессов между молекулами СО, рассчитанная по формулам [89, 65], аппроксимирующим результаты вычислений в первом порядке теории возмущений [88], при низких температурах близка к единице уже для уровня v≈10 и продолжает расти далее с номером v. Столь высокая вероятность указывает на неприменимость указанного приближения. Данное несоответствие обсуждалось ещё в работе [90], где предлагалось ограничить рассчитанные таким образом константы скорости экзотермических процессов величиной константы скорости газокинетических столкновений. Однако использование такого предположения лишь ухудшало согласие теории с результатами измерения стационарной КФР.

Таким образом, возникла потребность в создании более строгой теоретической модели колебательно-колебательного обмена, включающей в себя рассмотрение процессов многоквантового VV обмена (МКО). В работе [91] метод двойного резонанса был использован для измерения возмущения КУСС на выбранном переходе, возникающего при подаче мощного короткого импульса излучения на соседних переходах. Обработка временного поведения этих возмущений с помощью системы упрощённых кинетических уравнений позволила автору заключить, что эти данные не могут быть объяснены для переходов выше  $15 \rightarrow 14$ , если пренебрегать двухквантовым обменом. Включение в модель этих процессов с константами 2-х квантового обмена, служащих подгоночными параметрами, позволило оценить их величину.

В работах [92; 93] исследовалась работа импульсного СО ЭИЛ на основной частоте на переходах вплоть до 20→19. Была использована им-

пульсно-периодическая модуляция добротности частотно селективного резонатора, позволившая определить влияние первого импульса излучения на последующие при изменении времени задержки (периода модуляции). Так как лазерные импульсы при модуляции добротности были существенно короче импульсов свободной генерации, то локальное возмущение формы КФР, вызванное первым импульсом, релаксировало, и на этом переходе вновь возникали условия для генерации. Выяснилось, что время восстановления инверсии на данном переходе, рассчитанное по модели ОКО, в несколько раз короче, чем измеренное время. Это явно доказывало неприменимость модели ОКО для описания колебательного обмена на уровнях выше десятого.

Ранее в ряде работ [94, 95, 29] отмечалось, что распределение молекул СО на высоких колебательных уровнях (v>30) не согласуется с теорией одноквантового обмена. Обеднение заселённости этих уровней по сравнению с теоретическими предсказаниями объяснялось влиянием гипотетического процесса передачи энергии на электронный уровень  $CO(A^{1}\Pi)$ . В действительности, как отмечалось в работах [96, 97] на формирование КФР в этой области могут оказать существенное влияние процессы асимметричного VV обмена двух квантов на один:

 $CO(v)+CO(u=0) \rightarrow CO(v-2)+CO(u=1).$ (2.8)

Таким образом, стало ясно, что для надёжного предсказания энергетики и спектра СО лазера на обертоне нужен последовательный учет всей совокупности процессов VV-обмена, для чего необходимо провести расчёты их скоростей для широких диапазонов изменения колебательных номеров и температур газа для различного числа обмениваемых квантов.

Физически обоснованный подход к определению констант скорости процессов VV обмена между двухатомными молекулами на средних и высоких колебательных уровнях, основанный на использовании полуклассического метода, был в полном виде сформулирован в работах Г. Биллинга (G. Billing) [98, 99]. С его использованием были численно рассчитаны константы скорости процессов VV-обмена между молекулами CO [100, 101]. Было количественно установлено, в какой степени растут с номером V и когда становятся существенными процессы  $2^x$  квантового,  $3^x$ квантового и  $4^x$  квантового обмена. Было найдено, что рост констант скорости для близких к резонансу одноквантовых процессов сильно замедляется, начиная с v>7. Это иллюстрирует Рис. 2.8, на котором результаты полуклассических вычислений констант скорости ближайших к резонансу экзотермических процессов CO(v)+CO(v+1- $\Delta$ v) $\rightarrow$ CO(v- $\Delta$ v)+CO(v+1) [101] сопоставляются с результатами использования соотношений [65], ранее использованных в модели ОКО для определения констант скорости VV обмена. Примечательно, что «эффективная» скорость одноквантового обмена (кривая 1 на Рис. 2.8.) близка по величине к сумме скоростей двух-, трёх – и четырёх - квантовых обменов с соответствующими весами. Это качественно объясняет, почему КФР для стационарных условий, рассчитанные в приближении ОКО, неплохо согласуются с экспериментом [102, 103].



Рис. 2.8. Константы скорости ближайших к резонансу экзотермических процессов  $CO(v)+CO(v+1-\Delta v)\rightarrow CO(v \Delta v)+CO(v+1)$ : (2)  $\Delta v=1$ , (3)  $\Delta v=2$ , (4)  $\Delta v=3$ , (5)  $\Delta v=4$  [101]. (1) - Константы скорости процессов CO(v)+CO(v) $\rightarrow$ CO(v-1)+CO(v+1) [65]. Температура газа T=100 K.

Для иллюстрации роли таких параметров, как число обмениваемых квантов и дефект энергии, на Рис. 2.9 приведены зависимости от V констант скорости процессов CO(36- $\Delta v$ )+CO(v) $\rightarrow$ CO(36)+CO(v- $\Delta v$ ) при варьируемом числе обмениваемых квантов  $\Delta v=1\div4$ , вычисленные в [101].



Рис. 2.9. Константы скорости процессов CO(36- $\Delta v$ )+CO(v)  $\rightarrow$ CO(36)+CO(v- $\Delta v$ ) [101], как функции v для различного числа обмениваемых квантов  $\Delta v$ . Температура газа T=100 K. Константы асимметричного обмена двух квантов энергии на высоких уровнях на один квант на нижнем уровне (процесс (2.8)) для разных V были также рассчитаны в рамках полуклассической теории VV-обмена [101] между молекулами СО. При наличии в активной среде СО лазера молекул азота большую роль могут сыграть процессы асимметричного VV' обмена:

$$CO(v)+N_2(u=0) \rightarrow CO(v-2)+N_2(u=1).$$
 (2.9)

Экспериментальные свидетельства заметного влияния процесса (2.9) на спектр СО ЭИЛ на обертоне в области высоких колебательных уровней были получены при малых ( $\leq 10\%$ ) добавках N<sub>2</sub> к смеси СО:Не в [32]. Необходимые для теоретического анализа константы скоростей этих процессов для u $\leq 2$  были рассчитаны в работах [104, 83] с использованием полуклассического метода. Для иллюстрации полученных результатов мы приводим на Рис. 2.10 зависимости констант скоростей для близких к резонансу процессов асимметричного VV обмена колебательно возбужденных СО(v) при столкновениях с СО и N<sub>2</sub> от колебательного квантового числа v.

Константы скорости асимметричного обмена между молекулами СО достигают вблизи резонанса существенно более высоких значений, чем константы скорости асимметричного перекрестного обмена между молекулами окиси углерода и азота. Однако резонансный пик значений констант для процессов энергообмена между СО и N<sub>2</sub> приходится на более низкие колебательные уровни. Следовательно, в смесях с  $[N_2] >> [CO]$ значительная часть потока колебательных квантов на верхние уровни молекул СО перехватывается на возбуждение нижних колебательных уровней молекул N<sub>2</sub>. Появляющиеся в результате этих процессов молекулы N<sub>2</sub>(v) (v=1, 2, 3) передают колебательное возбуждение молекулам СО на нижних колебательных уровнях.



Рис. 2.10. Зависимости констант скорости процессов CO(v)+CO(0) $\rightarrow$ CO(v-2)+CO(1) (1,1') и CO(v)+N<sub>2</sub>(0) $\rightarrow$  CO(v-2)+N<sub>2</sub>(1) (2, 2') от номера колебательного уровня v. T=100 K (1, 2) и T=300 K (1', 2') [83].

Включение всех рассмотренных выше процессов VV обмена в кинетическую модель активной среды и привело к созданию модели МКО, в рамках которой никакие аналитические аппроксимации для вычисления констант скорости VV обмена между молекулами СО не использовались. Подробная кинетическая информация, необходимая для корректного учета всех процессов колебательно-колебательного энергообмена для разных температур газа, была получена в результате выполнения большого объёма полуклассических вычислений [100, 101, 104, 83].

Переход к физически более обоснованной МКО модели сказался на результатах расчетов характеристик лазера на обертоне [101], [105]. Отметим наиболее существенные различия результатов, рассчитанных с использованием моделей МКО и ОКО для условий, типичных для импульсных СО ЭИЛ.

Форма КФР молекул СО изменяется медленнее, чем предсказывает ОКО. Однако установившиеся квазистационарные функции распределения оказываются довольно близкими. Это иллюстрирует Рис. 2.11, на котором проводится сопоставление КФР, рассчитанных с использованием обеих моделей на моменты времени 50, 100, 200 и 300 мкс после включения разряда [101]. Как уже отмечалось выше, малое отличие между квазистационарными функциями распределения в области «плато» объясняется примерным равенством скорости одноквантового обмена в модели ОКО и суммарной скорости процессов, взятых с соответствующими весами в модели МКО. Существенное уменьшение колебательных населенностей в чистом СО для v>40 является результатом влияния процессов асимметричного обмена между молекулами СО.



Рис. 2.11. Временная эволюция КФР, рассчитанная с использованием различных моделей: пунктирные линии соответствует модели ОКО, сплошные – модели МКО. Смесь СО:Не = 1:4, Т=100 К, плотность 0.2 Амага, энерговклад 200 Дж/(литр Амага), длительность импульса накачки 30 мкс.

Динамика КФР, представленная на Рис. 2.11, определяется процессами VV обмена во всем диапазоне колебательных чисел. При работе лазера, особенно при селективной генерации, возмущающее воздействие лазерного излучения имеет место в сравнительно узком диапазоне номеров колебательных уровней. Искажение формы КФР в этом диапазоне определяется конкуренцией процессов колебательного энергообмена и лазерных переходов. Как было показано в работе [106], качественной характеристикой динамики локальных возмущений КФР является частота ухода молекул с выбранного колебательного уровня за счёт VV обмена. Эта

частота может быть представлена в виде:  $\frac{1}{\tau_{VV}} = \sum_{m\geq 1} \left( \sum_{i\geq 0} n_i \cdot Q_{v,v-m}^{i,i+m} + \sum_{i\geq m} n_i \cdot Q_{v,v+m}^{i,i-m} \right).$ 

Здесь n<sub>i</sub> колебательные населенности на уровнях i, а  $Q_{v,v-m}^{i,i+m}$ ,  $Q_{v,v+m}^{i,i-m}$  константы скорости процессов VV обмена, опустошающих уровень *v*. Как видно из приведенного выражения, величина  $1/\tau_{VV}$  должна зависеть не только от

величин констант скоростей процессов при разных отстройках от резонанса, но и от формы КФР. Представленные на Рис. 2.12 зависимости частоты ухода за счёт VV обмена от номера колебательного уровня, рассчитанные с использованием различных моделей [101], отличаются весьма существенно, начиная с уровня с v = 10.



Рис. 2.12. Зависимости частоты ухода молекул с выбранного колебательного уровня за счёт VV обмена,  $1/\tau_{VV}$ , от колебательного квантового числа v, рассчитанные на момент времени 300 мкс после включения накачки с использованием различных моделей: 1—модель ОКО, 2—модель МКО.

Величина  $\tau_{vv}$  играет важную роль в лазерной кинетике, позволяя оценить интенсивность насыщения  $I_s \approx hv/\sigma \tau_{vv}$  при селективной генерации на переходах молекулы СО (hv квант излучения на частоте перехода,  $\sigma$  - сечение индуцированного перехода) [93]. Этот параметр характеризует нелинейность активной среды по отношению к воздействию индуцированного ванного излучения.

Обновление кинетической модели, в первую очередь, сильно сказалось на расчетных характеристиках частотно-селективной генерации импульсного СО ЭИЛ на колебательно-вращательных переходах между колебательными уровнями с v>20 [105]. Заметные отличия имеются и в результатах расчетов генерационных характеристик лазера с высокой добротностью в узком спектральном окне на нескольких последовательно расположенных переходах [105]. Для режима свободной генерации излучения модель МКО предсказывает некоторое «обогащение» длинноволновой части спектра генерации по сравнению с теорией ОКО.

## 2.4. Верификация теоретической модели

Ревизия теоретической модели затронула описание процессов колебательно-колебательного обмена во всем диапазоне колебательных квантовых чисел v. Если в области низких v значительных изменений в описании процессов нет, то для средних и больших значений квантовых чисел изменения довольно существенны [101]. Для осуществления верификации модели МКО необходимо иметь экспериментальные данные по динамике КФР на высоких уровнях. Такие данные до сих пор отсутствуют. Лазерная техника позволяет получить данные о динамике коэффициентов усиления на разных переходах. Поскольку КУСС напрямую связан с населённостями колебательных уровней (см. формулу (2.4)), то его измерение может дать информацию, необходимую для верификации теории МКО. При этом могут быть использованы данные о динамике КУСС как на основной частоте, так и на обертоне.

В работах [92, 93, 106] была получена косвенная информация о динамике КУСС на выбранном переходе по измеренному времени восстановления инверсии для v>10. Сопоставление этих экспериментальных данных с расчетами, проведенными по модели ОКО, позволило сделать вывод о существенно более медленном протекании процессов на высоких колебательных уровнях, чем предсказывала теория. Это полностью соответствует выводам, полученным в модели МКО, что иллюстрирует Рис. 2.12.

Обработка данных, полученных измерением лазерных характеристик, встречает проблемы, связанные с пространственной неоднородностью накачки и активной среды [107]. Более информативными для сравнения теории с экспериментом могут оказаться измерения динамики КУСС. На Рис. 2.13 проводится сопоставление рассчитанной динамики КУСС на переходах 20 $\rightarrow$ 18 P(12), 26 $\rightarrow$ 24 P(12), 29 $\rightarrow$ 27 P(12), 33 $\rightarrow$ 31 P(12), 36 $\rightarrow$ 34 P(12) с результатами измерений, выполненных в работе [108] методом калиброванных потерь. При построении графиков произведена корректировка величины удельного энерговклада, предложенная в работе [107].

Использованная в работе [108] экспериментальная методика имеет ограничения, связанные с необходимостью проведения большого объёма измерений для получения временной зависимости КУСС на одном переходе, при этом измерения возможны лишь до достижения максимального значения коэффициента усиления.





Рис.2.13. Динамика КУСС на обертонных переходах в смеси CO:He=1:4 при средней величине удельного энерговклада 320 Дж/л Амага, длительности импульса накачки 30 мкс, начальной температуре 110 К, начальной плотности газа 0.18 Амага. Сплошные кривые – результаты расчетов, точки – реультаты экспериментов [108].

Измерения КУСС путём зондирования активной среды излучением пробного частотно-селективного лазера позволяют получить существенно больше информации. Такая методика успешно использовалась в работах [84, 107, 109, 110] для измерений динамики КУСС на основной частоте в широком диапазоне колебательных переходов для различных значений плотности активной среды и удельного энерговклада. В этих же работах проведена верификация теоретической модели МКО. Для иллюстрации сказанного мы приводим далее (см. Рис. 2.14÷2.16) экспериментальные и

расчетные результаты по динамике КУСС на различных колебательно вращательных переходах с различным временным разрешением.



Рис. 2.14. Зависимость КУСС от времени: (а) на переходе 7 $\rightarrow$ 6 Р(14), 1- эксперимент при  $\overline{Q}$ =130 Дж л<sup>-1</sup> Амага<sup>-1</sup>, 2расчет.

Рис. 2.15. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по динамике КУСС на переходе 20 $\rightarrow$ 19Р(12) в смеси CO:He=1:4 при  $\overline{Q}$ =105 Дж л<sup>-1</sup> Амага<sup>-1</sup>,  $T_0$  = 110 K,  $N_0$  = 0.12 Амага. Экспе-

риментальные данные указаны с погрешностью измерений. Расчет- кривая 1.

Рис. 2.16. Временная динамика КУСС на переходе 21-20 Р(14). СО:Не=1:4,  $N_0$  = 0.12 Амага,  $T_0$  = 110 К при  $\overline{Q}$ =150 Дж л<sup>-1</sup> Амага<sup>-1</sup>. Экспериментальные данные указаны с погрешностью измерений. Расчет- кривая 1.

Дополнительные подтверждения справедливости теории МКО с имеющимся набором констант скоростей VV обмена дают измерения характеристик обертонного СО лазера на предельно высоких колебательных уровнях, где была получена генерация излучения, вплоть до перехода 38→36 [31].

Проведенное в [108] сопоставление теории с экспериментом при наличии малых примесей молекулярного азота позволило подтвердить роль асимметричного обмена в процессах  $CO(v)+N_2 \rightarrow CO(v-2)+N_2(1)$ . Полученные в указанной работе расчетные данные по энергии излучения на переходах  $36 \rightarrow 34$ ,  $37 \rightarrow 35$ ,  $38 \rightarrow 36$  в смеси CO:He: N<sub>2</sub> при малых добавках молекулярного азота в смесь CO:He сопоставляются с экспериментом на Рис. 2.17.





Процессы асимметричного VV обмена CO(v)+CO $\rightarrow$ CO(v-2)+CO(1), как видно из Рис. 2.11, приводят к резкому падению колебательных населенностей молекул CO для уровней с v>40. Эта особенность отмечалась ранее в экспериментальных измерениях КФР молекул CO [29, 95, 111], где авторы пытались объяснить данный факт влиянием процесса передачи энергии на электронный уровень CO(A<sup>1</sup>П).

# 2.5. Теоретический прогноз характеристик СО лазера на обертоне

Создание современной модели, не содержащей произвольных приближений, позволяет надеяться на высокую надёжность прогнозных расчётов. В частности, представляет интерес теоретический расчёт параметров узкополосных лазеров для разных ширин разрешенной полосы и положений центра полосы.

В экспериментальных работах [32, 30] по исследованию характеристик лазера на обертоне не удавалось одновременно обеспечить высокую добротность резонатора в широком спектральном диапазоне излучения на обертоне с 2.7 по 4.2 мкм с большими потерями в основной полосе, что требуется для высокого КПД обертонного лазера. Существенно проще обеспечить высокую добротность резонатора для обертона в узком спектральном окне при высоких потерях на основной частоте. Для этой цели могут быть использованы многослойные диэлектрические отражатели. Так, например, при использовании одной из комбинаций отражателей в работе [32] удалось подавить генерацию на переходах основной полосы и получить генерацию на 5÷6 соседних обертонных переходах с достаточно высоким КПД≥5%. Это стимулировало теоретическое исследование возможностей лазера на обертоне в частотно селективном режиме. Для различных технологических применений может потребоваться концентрация энергии лазерного пучка в отдельных участках спектра. Теоретический прогноз позволяет оценить достижимые характеристики СО лазера на обертоне, генерирующего в узком спектральном диапазоне.

В работе [105] сделан прогноз зависимости энергетических характеристик частотно-селективного обертонного СО лазера от числа колебательно-вращательных переходов, попадающих в спектральное окно узкополосного резонатора, и от расположения данного окна. Был сделан также анализ эволюции характеристик лазера при переходе от одночастотного селективного режима к режиму свободной генерации. Была рассмотрена генерация на одном, трёх и пяти соседних колебательных переходах V+2→V, для значений V, варьируемых от 6 до 37. В экспериментах такая селективность резонатора может быть достигнута различными методами: применением дифракционных решеток, зеркал с многослойными диэлектрическими покрытиями и т.д. При численном моделировании задавались следующие параметры среды и импульса накачки, довольно типичные для импульсных СО ЭИЛ, работающих при криогенных температурах активной среды: плотность газа 0.2 Амага (Amagat), (Амага – единица относительной концентрации газа, численно равная количеству молей в молярном объеме при нормальных условиях). состав смеси CO:N<sub>2</sub>=1:9, начальная температура 100 К, значение параметра E/N=1·10<sup>-16</sup> В см<sup>2</sup>, длительность импульса накачки 30 мкс, удельный энерговклад в импульсе 200 Дж л<sup>-1</sup> Амага<sup>-1</sup>. Форма импульсов тока и напряжения полагалась прямоугольной, плотность среды постоянной. В основном, расчеты выполнялись для порогового значения коэффициента усиления 5.87 10<sup>-4</sup> см<sup>-1</sup>, неизменного для всех радиационных переходов на обертоне в рассматриваемом спектральном окне. Такое пороговое усиление соответствует потерям за полный обход резонатора 10% при длине активной среды по лучу 100 см. При этом предполагалось полное отсутствие пассивных потерь резонатора для обертонного излучения и подавление генерации на переходах основной полосы.



Рис. 2.18. Эффективность генерации на обертоне в узком спектральном окне от номера нижнего уровня а) генерация на одном переходе; b) генерация на трех последовательных переходах; c) генерация на пяти последовательных переходах. Вывод излучения из резонатора 10%.

На Рис. 2.18 приводятся гистограммы, показывающие эффективность суммарной генерации на одном (а), трёх (б) и пяти (в) последовательных переходах как функцию номера V самого нижнего уровня. Как и следовало ожидать, эффективность генерации при этом растёт с числом переходов в спектральном окне для всех V<34, что связано с более полным перехватом потока колебательных квантов в излучение. Для более высоких V увеличение числа переходов в спектральном окне резонатора не влияет на энергетическую эффективность, так как верхние уровни опустошены за счёт передачи энергии на нижние уровни азота в процессах асимметричного VV' обмена. Наличие каскадных переходов приводит к заметному сдвигу коротковолновой границы в область меньших длин волн. При увеличении числа переходов с одного до трёх нижняя граница сдвигается на два уровня; дальнейшее увеличение числа переходов до пяти приводит к увеличению сдвига ещё на один уровень. В целом рост мощности генерации с числом переходов приводит к энергетической эффективности на уровне 12% для пяти переходов, заканчивающихся на уровне с номером V порядка 20. В режиме многочастотной свободной генерации на обертоне полная энергетическая эффективность составила для данных условий примерно 27%. На Рис. 2.19 приведен спектр генерации, полученный в этих расчетах. Каждый столбец гистограммы на этом рисунке соответствует энергетической эффективности на отдельно взятом переходе V+2 $\rightarrow$ V. Сопоставление результатов, представленных на Рис. 2.18 и 2.19 и полученных при неизменной добротности, позволяет сделать вывод, что использование данного класса узкополосных резонаторов может значительно увеличить энергию лазерного излучения в сравнительно узком спектральном диапазоне, по сравнению с энергией, излучаемой в данном спектральном диапазоне в режиме свободной генерации. Для селективной генерации на одном колебательно-вращательном переходе данное утверждение справедливо для рассматриваемых условий при V>10, для узкополосной генерации при V>12 (где V номер самого нижнего колебательного уровня). Для переходов вблизи длинноволновой границы спектра указанное увеличение энергии излучения может быть многократным.



Рис. 2.19. Спектр генерации на обертоне в режиме свободной генерации. Каждый столбец гистограммы соответствует эффективности преобразования энергии накачки в энергию излучения на переходе V+2→V. Вывод излучения из резонатора 10%.

Спектры генерации на Рис. 2.19 ограничены переходом v=36 $\rightarrow$ 34, что объясняется ролью асимметричного перекрёстного обмена (2.9). Спектрально-энергетические характеристики лазера на обертоне в смесях CO:He/Ar:N<sub>2</sub> были численно исследованы в [83] при изменении в широких пределах доли молекулярного азота. В частности, для безазотных смесей CO: He/Ar расчетный диапазон перестройки расширяется в длинноволновую область ещё на 2-3 перехода. Это может быть существенным для получения генерации на предельно высоких переходах с длиной волны  $\lambda \ge 4 \mu m$ .



Рис. 2.20. Эффективность генерации на обертоне от номера нижнего уровня а) генерация на одном переходе; b) генерация на трех последовательных переходах; c) генерация на пяти последовательных переходах. Вывод излучения из резонатора 2.5%.

Представляет интерес выяснить, насколько можно увеличить КПД узкополосной генерации, подняв добротность резонатора. Расчеты показали, что уменьшение порогового значения коэффициента усиления до величины 1.26  $10^{-4}$  см<sup>-1</sup>, соответствующей доле выводимого из резонатора излучения 2.5% в отсутствие прочих потерь, позволяет более чем в два раза увеличить эффективность преобразования энергии в излучение для обертонных переходов (Рис. 2.20), приводя к максимальной эффективности 10.2% (V=12) для одного перехода, 19.5% (V=12) для трёх и 26.3% (V=11) для пяти переходов. Следует учитывать, что в расчётах не учитывались пассивных потери, которые могут существовать в реальных резонаторах. Ещё одно ограничение на результаты связано с увеличением лучевой нагрузки на зеркала при уменьшении доли выводимого излучения.

Рассмотрим распределение энергии излучения между соседними переходами в узкополосном резонаторе. На Рис. 2.21 приводятся спектры, рассчитанные при доле излучения, выводимого из резонатора, 2.5% для генерации на одиночных переходах на уровни V=15, 20, 25, 30, а также для генерации на трех и пяти переходах, заканчивающихся на тех же V. Спектр генерации на обертоне имеет характерную структуру чередующихся по высоте пиков, что обсуждалось в п. 2.2. Другой эффект, который можно заметить на Рис. 2.21, заключается в том, что энергия излучения на нижнем переходе незначительно растёт с числом переходов в спектральном окне резонатора. Обусловлен этот эффект наличием радиационных каскадов, роль которых в дополнительной накачке лазерных уровней при указанных выше параметрах активной среды мала.



Рис. 2.21. Спектры селективной узкополосной генерации на обертоне, рассчитанные при различных положениях спектрального окна резонатора (V=15, 20, 25, 30) и при различной ширине этого окна (1, 3, 5 переходов). Вывод излучения из резонатора 2.5%.

Исследовался также вопрос об изменении энергии генерации при дальнейшем увеличении диапазона разрешенных переходов [105]. Для определённости, расположение центрального перехода считалось фиксированным, симметрично варьировалась ширина спектрального окна (N). В качестве центрального был взят переход  $V_c=22$ . Расчеты были проведены для всех нечетных N в интервале от 1 до 35. Расчетные зависимости эффективности лазера, генерирующего на обертоне, от количества рабочих переходов (N) приводятся на Рис. 2.22. На начальном участке происходит быстрый рост эффективности, и уже при генерации на 5 соседних переходах ее величина превышает 50% от величины, достижимой при максимальном числе N.

Максимальная энергетическая эффективность, достижимая при данной добротности резонатора в режиме свободной генерации составляет примерно 43%. Расчёты, в которых учитывались реальные пассивные потери в резонаторе приводят к значению практически достижимого предела КПД генерации на обертоне на уровне 20%.



Рис. 2.22. Зависимости эффективности генерации СО лазера от числа рабочих переходов в селективном резонаторе с фиксированным центральным переходом V=22 при генерации на обертоне. Вывод излучения из резонатора 2.5%.

Несмотря на потенциально высокие энергетические характеристики лазера на обертоне, работающего при криогенных температурах активной среды, исследователей продолжают интересовать возможные характеристики этого лазера и при комнатной температуре активной среды. Так, в работе [112] была экспериментально реализована работа импульсного СО ЭИЛ на обертоне при комнатной температуре активной среды с КПД, достигающим 2%.



В отсутствие детальной информации об условиях эксперимента в [112] теоретический анализ импульсного СО лазера на обертоне при комнатной температуре был выполнен для условий, сочетающих условия экспериментов [112] и [30]: смесь CO:N<sub>2</sub>:He=12.5:37.5:50, начальная температура  $T_0=278$  K, давление газа  $P_0=413$  Тор, удельный энерговклад варьировался, длительность разряда 30 мкс, начальное значение приведенной напряженности электрического поля (E/N)<sub>0</sub>=1.5·10<sup>-16</sup> B·см<sup>2</sup>. Гене-

рация на основной частоте, как в расчёте, так и в эксперименте была полностью подавлена. В расчетах использовались следующие параметры резонатора: длина активной среды по лучу 100 см, доля вывода излучения за полный обход резонатора была взята равной 6%. Рассчитанный для таких условий КПД генерации как функция удельного энерговклада приводится на Рис. 2.23. Максимальное значение КПД в этом случае составляет 3.1%.



Рис. 2.24. КПД на отдельных переходах в режиме свободной генерации лазера (переходы *V*→*V*-2), рассчитанный при величине удельного энерговклада Q<sub>in</sub>=474 Дж/л Амага.

Рис. 2.25. КПД частотноселективной генерации лазера на обертоне (переходы  $V \rightarrow V$ -2)), рассчитанный при величине удельного энерговклада  $Q_{in}$ =474 Дж/л Амага.

Зависимость КПД генерации для отдельных переходов в режиме свободной генерации при удельном энерговкладе 474 Дж/л Амага представлена на Рис. 2.24. Можно отметить, что в спектре, приведенном на Рис. 2.24, в отличие от спектра, рассчитанного при начальной температуре среды 100 К (см. Рис.2.19), не содержит переходов выше, чем 23→21, что отражает возросшую с температурой роль процессов VT релаксации. Чтобы оценить возможность повышения мощности при той же добротно-

сти резонатора на фиксированном переходе, была рассчитана зависимость КПД на переходе  $V \rightarrow V$ -2 от номера верхнего уровня V для режима частотно селективной генерации. Эта зависимость показана на Рис. 2.25. Можно отметить, что в режиме генерации на выделенном колебательновращательном переходе удается повысить энергию излучения примерно вдвое, но границы перестройки частоты совпадают с границами спектра свободной генерации.

При уменьшении вдвое доли выводимого излучения и величине удельного энерговклада 474 Дж/л Амага КПД генерации заметно растёт, достигая 6.8%. Расширения спектрального диапазона в длинноволновую область при этом не произошло, а в коротковолновой области добавилось излучение на переходах v=12 $\rightarrow$ 10 и v=13 $\rightarrow$ 11. Таким образом, теоретический прогноз КПД генерации импульсного СО ЭИЛ на обертоне при комнатной температуре активной среды составляет (3-6)%. Значения, достигнутые в работе [112], заметно меньше, что объясняется наличием в экспериментах пассивных потерь, сопоставимых с долей выводимого излучения.

# 3. Экспериментальные исследования характеристик обертонного СО лазера

Первое сообщение о генерации излучения на обертонных колебательных переходах молекулы СО в химическом  $CS_2:O_2$  лазере было опубликовано в [113]. Генерация излучения наблюдалась как в основной полосе, так и на первом колебательном обертоне. Мощность генерации излучения в диапазоне длин волн от 2.3 до 2.9 мкм (~ 0,1 мВт) составляла всего 1% от общей мощности лазерного излучения. В более поздней работе [114], посвященной исследованию генерации обертонного излучения в химическом лазере  $CS_2:N_2O:O_2$ , была подвергнута сомнению возможность генерации обертонного излучения в экспериментальных условиях, описанных в работе [113].



Рис.3.1. Схема обертонного СО лазера со сверхзвуковой прокачкой газовой смеси [26].

Начало экспериментальным исследованиям генерационных характеристик обертонного СО лазера положила работа [26], где исследовался непрерывный газоразрядный лазер (Рис.3.1) со сверхзвуковой прокачкой газовой смеси СО:Не  $\approx$  1:12 (с малой добавкой кислорода ~0.1%). На этой лазерной установке мощность излучения на обертонных переходах молекулы СО достигала 20 Вт при КПД ~ 0.6%. Полная мощность лазерного излучения, включающая генерацию излучения в основной полосе, составляла 88 Вт при длине активной среды лазера 0.2 м. Спектр обертонного излучения состоял из 25 спектральных линий, которые соответствовали колебательным переходам от 12 $\rightarrow$ 10 до 21 $\rightarrow$ 19 в спектральном диапазоне длин волн от 2.69 до 3.07 мкм. В основной полосе генерация излучения 34 наблюдалась на низкорасположенных переходах от  $4\rightarrow 3$  до  $11\rightarrow 10$  в диапазоне длин волн 4.89-5.38 мкм. Генерация излучения наблюдалась при значениях вращательного квантового числа J = 5 - 7, поэтому, по оценкам авторов работы, температура газа в сверхзвуковом потоке составляла ~ 40 К.

Генерация обертонного излучения в импульсном режиме впервые исследовалась в работе [27]. Эксперименты проводились на криогенной импульсной электроионизационной (ЭИ) лазерной установке. В таком разряде электрическая проводимость лазерной среды создается внешним источником ионизирующего излучения (например, электронным пучком). Применение ЭИ разряда для возбуждения активной среды позволяет работать при оптимальных условиях (по энергии электронов) для возбуждения колебательных уровней, а также снимает ряд ограничений на давление (плотность) газовой смеси, объем лазерной камеры, что делает возможным получение высоких энергетических характеристик лазера. В этих экспериментах [27] эффективность обертонного СО лазера достигала 3.1% при удельном энергосъеме до 3.5 Дж/(л Амага) (Амага – единица относительной концентрации газа, численно равная количеству молей в молярном объеме при нормальных условиях). В экспериментах применялась лазерная смесь CO:N<sub>2</sub>:He=1:9:10 при плотности газа 0.5 Амага. Объем активной среды составлял 5 л. Охлаждение лазерной смеси осуществлялось жидким азотом до температуры 100 К. Длительность импульса накачки составляла 50 мкс. Генерация обертонного излучения наблюдалась в спектральном диапазоне длин волн 2.7 - 2.9 мкм на колебательных переходах от 13-11 до 16-14. При этом в спектре генерации присутствовало излучение в основной полосе на переходах от  $6 \rightarrow 5$  до  $11 \rightarrow 10$ . Общая энергия, т.е. с учетом излучения на основных переходах, такого лазера достигала 100 Дж (~10 Дж на обертонных переходах), а общая эффективность ~ 30%.

Более детальному экспериментальному исследованию генерационных свойств обертонного ЭИ СО лазера были посвящены работы [85, 115, 116]. Схема и фотография криогенной ЭИ лазерной установки представлена на Рис.3.2. В этих работах представлены спектрально-временные и энергетические характеристики импульсного обертонного ЭИ СО лазера в зависимости от различных экспериментальных параметров. Генерация обертонного излучения наблюдалась на колебательных переходах от
13-11 до 21-19 в диапазоне длин волн 2.7 – 3.3 мкм. Характерной особенностью генерации обертонного излучения была большая длительность лазерных импульсов, которая в этих работах превышала продолжительность генерации в основной полосе, достигая нескольких миллисекунд [85]. При этом генерация обертонного излучения развивалась только после прекращения импульса энерговклада и со значительно большим, чем для основных частот, временем задержки, определяемым как временной интервал между началами импульсов энерговклада и генерации. Максиудельный энергосъем В ЭТИХ экспериментах мальный составлял ~10 Дж/(л. Амага) при КПД ~ 5% (см. Рис. 3.3), а энергия лазерного импульса достигала 50 Дж [116].





Рис.3.2. Схема и фотография импульсной криогенной ЭИ лазерной установки [116].



Рис. 3.3. Зависимость КПД обертонного ЭИ СО лазера от удельного энерговклада при использовании различных лазерных зеркал [115]. Коэффициенты отражения зеркал в спектральном диапазоне, соответствующем обертонным и основным переходам: О 80%; 24%;

 $\Delta$  94%; 6%.

Довольно высокие энергетические характеристики обертонного ЭИ СО лазера, продемонстрированные работах в [85, 115, 116], были получены в условиях генерации излучения как на обертонных  $\Delta V = 2$  $(\lambda_{\text{макс}} < 3.3 \text{ мкм})$  так и на основных переходах  $\Delta V = 1$  молекулы CO, т.е. излучение на основных переходах не было подавлено. При этом генерация излучения в основной полосе не могла не оказывать влияния на формирование инверсной населенности и генерацию излучения на обертонных переходах. В работах [30, 32, 117, 118] для подавления генерации излучения на основных переходах молекулы СО применялись спектральные фильтры, которые представляли собой плоскопараллельные пластины разной толщины из плавленого кварца. Спектральное пропускание двух таких фильтров показано на Рис.3.4. В экспериментах [117] фильтр располагался внутри резонатора, как это изображено на Рис.3.5. В этой работе исследовалось влияние плотности лазерной смеси (0.2-0.5 Амага) и ее состава (соотношение CO:N<sub>2</sub>) на энергетические характеристики обертонного ЭИ СО лазера при коротком импульсе накачки: длительность импульса тока электронного пучка на полувысоте ~1.5 мкс. Начальная температура газа составляла 135 К, удельный энерговклад изменялся ОТ 300 до 1600 Дж/(л Амага). В спектре излучения лазера было зарегистрировано 11 спектральных линий, соответствовавших колебательным переходам от 14 $\rightarrow$ 12 до 19 $\rightarrow$ 17 ( $\lambda_{\text{макс}}$ <3.3 мкм). В этих экспериментах авторам впервые удалось получить генерацию обертонного излучения в чистой окиси углерода. Электрооптический КПД обертонного лазера не превышал 1.2% при удельном энергосъеме до 12 Дж/(л Амага).

В экспериментах, описанных в работе [30, 32, 118], лазерный резонатор состоял из двух «глухих» медных зеркал. Лазерное излучение вы-

водилось из резонатора благодаря френелевскому отражению от граней фильтра. Генерация излучения наблюдалась на обертонных переходах от 13→11 до 30→28 в диапазоне длин волн 2.7 - 3.6 мкм (Рис.3.4).



Рис.3.4. Спектр обертонного излучения и пропускание спектральных фильтров [32]. Толщина фильтров: а – 2 мм, b – 0.5 мм.



Рис.3.5. Оптическая схема экспериментов [117]. 1 – заднее зеркало, 2 – внешнее интерференционное зеркало, 3 – окно Брюстера из CaF<sub>2</sub>, 4 - внутрирезонаторный спектральный фильтр, 5 – фотодетектор, 6 – сферическое зеркало (removable), 7 – калориметр, 8 – плоское зеркало, 9 – линза из CaF<sub>2</sub>, 10 – монохроматор, 11 – фотопластинка.

В условиях отсутствия генерации излучения на основных переходах было проведено исследование влияния на генерационные характеристики обертонного ЭИ СО лазера различных экспериментальных параметров: состав газовой смеси CO:N<sub>2</sub> =1:x (где x изменялось от 1.5 до 39) и смеси CO:N<sub>2</sub>:He=1:9:у (где у изменялось от нуля до 20); плотность газа (от 0.02 до 0.5 Амага); начальная температура (от ~100 до 300 К); длительность накачки (от 25 до 1500 мкс); величина удельного энерговклада (от 50 до 1500 Дж/(л Амага); коэффициент вывода излучения из резонатора (от 0.5 до 10%). Некоторые экспериментальные параметры оказывали значительное влияние на генерацию обертонного излучения. Например, при температуре газа выше 170 К в этих экспериментах генерация излучения не наблюдалась, а уменьшение длительности накачки (увеличение мощности энерговклада) от 300 до 25 мкс приводило к значительному почти в 50 раз увеличению энергии генерации обертонного СО лазера (Рис.3.6). При оптимальных, с точки зрения энергетических характеристик лазера, условиях эффективность генерации обертонного излучения достигала 5.5%, а удельный энергосъем 20 Дж/(л Амага).



Рис.3.6. Зависимость удельного энергосъема обертонного СО лазера от длительности импульса накачки [118].

Во всех описанных выше экспериментах генерация обертонного излучения происходила в спектральном диапазоне, который располагался вне "окна прозрачности" атмосферы. При этом основная доля энергии обертонного СО лазера содержалась в спектральном диапазоне до 3.3 мкм, что соответствует относительно низко расположенным колебательным переходам (до 25–23). Спектр излучения обертонного СО лазера на выше расположенных переходах попадает в «окно прозрачности» атмосферы, что существенно расширяет возможности применения такого лазера.



Рис.3.7. Конструкция непрерывного частотно-селективного СО лазера низкого давления [28].

В работе [28] обертонный СО лазер впервые действовал в спектральной области от 2.8 до 4.0 мкм, которая перекрывает "окно прозрачности", на колебательных переходах от 16->14 до 37->35. В этих экспериментах наблюдалась генерация излучения на 150 отдельных спектральных линиях в непрерывном частотно-селективном обертонном СО лазере низкого давления. Конструкция этого лазера показана на Рис.3.7. В более поздней работе [29] генерация обертонного излучения была получена на 330 колебательно-вращательных переходах (см. Рис.3.8) в диапазоне длин волн от 2.62 мкм (колебательный переход 10→8) до 4.07 мкм (переход 37→35). В этих экспериментах лазерный резонатор состоял из сферического золотого зеркала и дифракционной решетки (450 шт/мм), установленной в режиме автоколлимации. Вывод излучения осуществлялся в нулевой порядок дифракции. Газовая смесь состояла из He, N<sub>2</sub>, воздуха и CO в различных соотношениях. Активная среда при постоянной медленной (0.04 м<sup>3</sup>/час) прокачке охлаждалась жидким азотом. Ток разряда варьировался от 2.5 до 12.5 мА, при этом генерация излучения в пределах одной колебательной полосы наблюдалась на различных вращательных компонентах (Рис.3.9). Спектральная ширина линии излучения этого обертонного СО лазера, измеренная в экспериментах, описанных в [119], составила ~100 кГц, при этом нестабильность частоты излучения была менее 30 кГц ( $\Delta v/v=3 \ 10^{-10}$ ). Максимальная мощность выходного излучения обертонного СО лазера, действующего на одной спектральной линии, достигала 550 мВт [29] (данные об эффективности генерации обертонного излучения в этих работах отсутствовали).



Рис.3.8. Спектр непрерывного частотно-селективного обертонного СО лазера низкого давления [29]



Рис.3.9. Спектр обертонного излучения, полученный при различных значениях тока накачки: 2.5 мА (верхний рисунок), 12.5 мА (нижний рисунок) [29]. В импульсном режиме генерация частотно-селективного излучения на обертонных переходах исследовалась в работах [31, 32, 120]. В этих экспериментах генерация излучения была получена на 413 спектральных линиях, принадлежащих колебательным полосам от  $12\rightarrow10$  до  $38\rightarrow36$ , в спектральном диапазоне 2.7-4.2 мкм. Эксперименты проводились на криогенной ЭИ лазерной установке. Лазерный резонатор состоял из сферического медного зеркала и дифракционной решетки, установленной в режиме автоколлимации. Исследовались три дифракционные решетки с различными характеристиками. Активная среда состояла из CO, N<sub>2</sub> и Не (в некоторых экспериментах Ar) в различных соотношениях. Плотность газовой смеси варьировалась от 0.05 до 0.3 Амага при температуре 100 К. Величина удельного энерговклада изменялась от 50 до 700 Дж/(л Амага).



Рис.3.10. Зависимости эффективности генерации обертонного излучения (а), времени задержки начала импульса излучения (б) и спектральной характеристики вывода излучения решеткой в нулевой порядок (в) от длины волны [32].

На спектрально-энергетические характеристики такого лазера сильно влияли характеристики дифракционной решетки. На Рис.3.10 показаны зависимости эффективности генерации обертонного излучения (а), времени задержки начала импульса излучения (b) (временной интервал между началами импульсов накачки и генерации излучения) и спектральной характеристики вывода излучения решеткой в нулевой порядок (с) от длины волны. В этих экспериментах в коротковолновой области (менее 2.7 мкм) спектр излучения был ограничен внутрирезонаторным поглощением излучения атмосферными парами воды в открытом участке лазерного резонатора (между дифракционной решеткой и выходным окном лазерной камеры), а в длинноволновой области (более 4.0 мкм) - уменьшением добротности резонатора, поскольку коэффициент вывода излучения из резонатора увеличивался почти до 30% (Рис.3.10с). Зависимость эффективности обертонного СО лазера с этой дифракционной решеткой от длины волны при перестройке по спектральным линиям в области 3.4 мкм носило характер резкого скачка. При этом лазерная эффективность уменьшалась от ~0.1% в центре колебательной полосы 26-24 почти до 0.01% в центре соседней полосы 27→25 (Рис.3.10а). Причина неоднородности спектрально-энергетической характеристики обертонного СО лазера в рассматриваемой области длин волн заключалась в резком снижении (от 8% до 0.5%) коэффициента вывода излучения из резонатора (Рис.3.10с, о спектральных характеристиках дифракционных решеток см. также [121]). Путем увеличения коэффициента вывода излучения из лазерного резонатора с помощью дополнительной внутрирезонаторной пластины из CaF<sub>2</sub> (отражение излучения от обеих граней), эффективность лазера в спектральной области 3.4-3.6 мкм, соответствующей провалу на Рис. 3.10а, была увеличена. Пунктиром на Рис. 3.10а представлена огибающая, проведенная по максимальным значениям измеренной эффективности в каждой колебательной полосе. Следует отметить, что в отличие от лазерной эффективности, в этой же спектральной области поведение временной задержки начала импульса генерации излучения относительно начала импульса энерговклада носило монотонный характер (Рис.3.10b).

В пределах одной колебательной полосы перестройка импульсного обертонного СО лазера осуществлялась по нескольким (иногда более 20) спектральным линиям. На Рис.3.11 показана зависимость удельного энер-

госъема от вращательного квантового числа J в колебательной полосе  $32 \rightarrow 30$  при трех значениях удельного энерговклада: 200, 400 и 550 Дж/(л Амага). Следует отметить, что в отличие от непрерывного обертонного СО лазера [29], где при увеличении тока накачки происходило смещение спектра генерации (Рис.3.9), в импульсном лазере увеличение удельного энерговклада приводило к расширению спектра генерации в область больших значений J. При этом число J, соответствующее спектральной линии, на которой энергосъем в пределах этой полосы максимален, увеличивалось. Такое изменение спектра генерации обусловлено увеличением поступательной и вращательной температуры газа при возрастании энерговклада.



Рис.3.11. Зависимости удельного энергосъема для различных вращательных компонент Р(*J*) одной колебательной полосы 32—30 при трех значениях энерговклада: а -200, b - 400, с -550 Дж/(л Амага). [31].

До исследований, результаты которых представлены в работах [31, 32, 120], генерация излучения в СО лазере была получена на обертонных колебательных переходах вплоть до  $37 \rightarrow 35$  [28, 29] и до  $37 \rightarrow 36$  в основной полосе [14, 122]. Отсутствие генерации излучения на более высоко расположенных колебательных переходах объяснялось в работе [95] со ссылкой на работу [94] тем, что колебательная энергия, соответствующая высоко расположенным колебательным уровням основного электронного состояния молекулы СО, может преобразовываться в энергию возбужде-

ния электронных состояний. Однако, в работах [31, 32, 120] было продемонстрировано, что генерация обертонного излучения на колебательном переходе 38→36 возможна, но только при использовании безазотной (CO:He=1:4) газовой смеси. Для исследования влияния азота на генерационные характеристики частотно-селективного обертонного СО лазера экспериментально был измерен удельный энергосъем лазера, перестраиваемого в спектральном диапазоне, соответствующем трем самым высоким наблюдавшимся в эксперименте колебательным переходам 36-34, 37-35 и 38-36 при различных концентрациях азота в газовой смеси (Рис.3.12). Увеличение доли азота X в смеси CO:He:N<sub>2</sub> =1:4:X приводило к росту энергии генерации излучения на колебательном переходе 36-34 и к уменьшению энергии генерации вплоть до нуля на переходе 38 -> 36. Такое влияние добавок азота в состав лазерной смеси объяснялось проявлением процессов асимметричного VV обмена между молекулами азота и окиси углерода  $CO(V)+N_2(0)\rightarrow CO(V-2)+N_2(1)$  (подробнее см. Раздел 2) и было подтверждено теоретическим анализом экспериментальных результатов [108].



Рис.3.12. Удельный энергосъем обертонного СО лазера, генерирующего излучение на самых высоких колебательных переходах ( $36 \rightarrow 34, 37 \rightarrow 35$  и  $38 \rightarrow 36$ ), при различных концентрациях азота в газовой смеси CO:He:N<sub>2</sub>=1:4:X, где X = 0 (a); 0.17 (b) и 0.5 (c). [32].

Эксперименты, результаты которых представлены в [31, 32, 120], проводились на лазерной установке с большим объемом возбуждения (~18 л). Однако объем активной среды в лазерном резонаторе ограничивался размерами оптических элементов и не превышал 2.5 л. Исследование динамики коэффициента усиления слабого сигнала на колебательновращательных переходах молекулы СО [107] показало, что величина энерговклада в локальном объеме, соответствующем объему и положению лазерного резонатора, на ~30% меньше, чем среднее значение энерговклада по всему объёму разрядной области. Поэтому в работе [34] была проведена корректировка величины эффективности обертонного СО лазера, измеренной в работах [31, 32, 120]. Учет локального значения энерговклада показал, что в частотно-селективном режиме генерации обертонного излучения максимальное значение лазерной эффективности достигает величины ~0.75% (Рис.3.13). Удельный энергосъем обертонного СО лазера, действующего на одном колебательно-вращательном переходе, достигал 3 Дж/(л Амага) [31, 32, 120].



Рис.3.13 Зависимости эффективности генерации обертонного излучения от длины волны [120].

В работах [87, 30, 32, 123, 124] было показано, что в многочастотном режиме работы генерация обертонного излучения в импульсном ЭИ СО лазере также может осуществляться на высоко расположенных переходах (вплоть до 37—35) в спектральном диапазоне, перекрывающем «окно прозрачности» атмосферы. В этих экспериментах лазерный резонатор состоял из двух интерференционных зеркал. Применение такого лазерного резонатора предпочтительнее резонатора, состоящего из диэлектрического и "глухого" (например, с золотым покрытием) зеркала (см., например, [27, 85, 115, 116]). Это связано, с тем что, применение двух диэлектрических зеркал с коэффициентами отражения, например, ~10% в области основных переходов (~5-6 мкм) эквивалентно лазерному резонатору, состоящему из "глухого" 100% зеркала и зеркала с коэффициентом отражения - 1%, что позволяет подавить или существенно ослабить генерацию излучения в основной полосе. В этих экспериментах лазерные зеркала были установлены непосредственно на ЭИ разрядной камере, что исключало влияние на генерационные характеристики лазера поглощения излучения в атмосфере. В экспериментах [30, 32, 87, 123, 124] генерация обертонного излучения наблюдалась на переходах от  $6 \rightarrow 4$  до  $37 \rightarrow 35$  в диапазоне длин волн от 2.5 до 4.1 мкм (Рис.3.14 [30]). Спектр генерации излучения определялся спектральными характеристиками лазерных зеркал. В каждой колебательной полосе генерация осуществлялась на 2-3 колебательно-вращательных переходах.



Рис.3.14. Спектр генерации обертонного ЭИ СО лазера и спектральные характеристики лазерных зеркал [30].

При анализе спектрального распределения энергии обертонного ЭИ СО лазера было обнаружено чередование сильных и слабых по энергии колебательных полос [30, 32, 87] в диапазоне длин волн от 3 до 4 мкм (Puc.3.15 [87]). Это чередование не было связано с изменением добротности лазерного резонатора, имевшего в этом спектральном диапазоне довольно постоянную спектральную характеристику. Подобное чередование энергии по колебательным полосам в спектре обертонного СО лазера также наблюдалось с другими лазерными зеркалами, с разными газовыми смесями (Puc.3.15), при разной плотности активной среды (от 0.02 до 0.3 Амага) [87]. Обусловлено такое чередование, как отмечалось в Разделе 2, генерацией обертонного излучения на двух радиационно независимых колебательных каскадах, включающих только четные или только нечетные колебательные уровни и конкуренцией между этими каскадами в процессе генерации.



Рис.3.15. Спектральное распределение энергии обертонного ЭИ СО лазера [87].

На Рис.3.16 представлены зависимости удельного энергосъема обертонного СО лазера от удельного энерговклада [30]. Увеличение удельного энерговклада приводило к возрастанию удельного энергосъема как для излучения на обертонных, так и на основных переходах. В этих экспериментах энергия генерации излучения на основных переходах была 48

существенно меньше, чем на обертонных, что позволило достичь величины удельного энергосъема на обертонных переходах ~50 Дж/л Амага (Рис.3.16). При этом энергия обертонного излучения достигала ~5 Дж (объем активной среды в лазерном резонаторе составлял ~0.85 л). В работе [34] представлена экспериментальная зависимость эффективности импульсного обертонного ЭИ СО лазера от локального энерговклада и расчетная, взятая из [30, 32] (Рис.3.17). При энерговкладах менее 150 Дж (л Амага)<sup>-1</sup> наблюдалось хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных. Максимальное экспериментальное значение эффективности генерации обертонного излучения в импульсном ЭИ СО лазере достигало 16% [34].



Рис.3.16. Зависимость удельного энергосъема импульсного ЭИ СО лазера от удельного энерговклада [30]. Треугольники – генерация излучения на основных переходах, кружки – на обертонных.



Рис.3.17. Расчетная (кривая) [30, 32] и экспериментальная (маркеры) зависимости эффективности генерации обертонного излучения в ЭИ СО лазере от локального удельного энерговклада [34].

работе [123] исследовались также спектрально-временные В характеристики излучения обертонного СО лазера. Временная динамика импульсов СО лазера, наблюдаемая в эксперименте [123] для различных участков спектра - вблизи длин волн 2.8 мкм, 3.2 мкм, 3.7 мкм и 5.3 мкм, приведена на Рис.3.18. Длительность генерации обертонного излучения намного превышала длительность генерации излучения СО лазера в основной полосе и составляла несколько милисекунд. Причем с ростом длины волны (т.е. с ростом номера колебательного перехода) она увеличивалась, достигая ~ 6 мс. При уменьшении длины волны (т.е. при номера колебательного уровня) уменьшении время задержки возникновения генерации, отсчитываемое от начала импульса накачки, уменьшалось от 500 мкс на длине волны 3.7 мкм до 90 мкс на длине волны 2.8 мкм. Для основной полосы время задержки составляло 40 мкс. Следует отметить, что представленная в [123] временная динамика излучения наблюдалась в течение одного лазерного импульса, т.е. в одних и тех же экспериментальных условиях наблюдалась различная временная динамика генерации излучения на разных переходах.



Рис.3.18. Временная динамика импульсов СО лазера, наблюдаемая в эксперименте для различных участков спектра: вблизи длин волн 2.8 мкм (а), 3.2 мкм (b), 3.7 мкм (c) и 5.3 мкм (d). Время задержки: 90 мкс (а), 250 мкс (b), 500 мкс (c) и 40 мкс (d) [123].

Исследование временной динамики коэффициента усиления слабого сигнала (КУСС) на обертонных переходах проводилось в работе [108]. Кроме того, в этой работе представлены результаты исследования процессов, влияющих на формирование спектра обертонного СО лазера, действующего на высоко расположенных колебательных переходах. В частности, показано влияние асимметричного колебательно-колебательного обмена между молекулами азота и окиси углерода (см. также Рис.3.12) на генерационные характеристики обертонного СО лазера, действующего на колебательно-вращательном переходе  $38 \rightarrow 36$  P(12). Измерение временной динамики КУСС в этой работе проводилось методом калиброванных внутрирезонаторных потерь на пяти колебательно-вращательных переходах молекулы СО для двух лазерных смесей: CO:He=1:4 и CO:N<sub>2</sub>=1:9 (Pис.3.19).



Рис.3.19. Временная динамика коэффициента усиления слабого сигнала, измеренная для лазерной смеси СО:Не=1:4 (удельный энерговклад 320 Дж/(л Амага)) и СО:N<sub>2</sub>=1:9 (удельный энерговклад 380 Дж/(л Амага)) [108].

Наибольшей величины 0.43 м<sup>-1</sup> коэффициент усиления достигал в лазерной смеси CO:N<sub>2</sub>=1:9 для перехода 33 $\rightarrow$ 31. В безазотной лазерной смеси CO:He=1:4 значение КУСС было почти в два раза меньше и практически не зависело от номера колебательного уровня. На Рис.3.20 показана зависимость временной задержки  $\tau_d$  от номера колебательного уровня V (переход V+2 $\rightarrow$ V). Временная задержка  $\tau_d$  определялась как временной интервал от начала импульса энерговклада до момента времени, когда КУСС в активной среде лазера достигнет заданного значения равного 0.05 м<sup>-1</sup>. Для обеих газовых смесей нарастание номера V от 18 до 34 приводило к монотонному увеличению времени  $\tau_d$  от ~70 до ~170 мкс.



Знание времени задержки появления усиления в активной среде особенно важно для разработки и создания быстропроточных лазерных установок. В работах [125, 126] приведены результаты исследований генерационных характеристик СО лазера с накачкой высокочастотным (ВЧ) разрядом и последующим охлаждением лазерной среды в сверхзвуковом потоке. Схема и фотография этого лазера представлена на Рис.3.21. Крепление оптических элементов лазерного резонатора могло осуществляться на различном расстоянии от сопла, что позволяло, изменяя положение лазерного резонатора, менять время пролета возбужденного газа от сопла до резонатора. В экспериментах применялась газовая смесь CO:He=1:7 с небольшими добавками кислорода. Давление газа в сверхзвуковом потоке, т.е. в области лазерного резонатора, варьировалось от 2 до 9 Тор. Число Маха составляло 2.7.



Рис.3.21. Схема (а) [126] и фотография (b) [125] сверхзвукового СО лазера с ВЧ накачкой: (1) направление потока, (2) камера смешения, (3) ВЧ электроды, (4) сверхзвуковое сопло, (5) вакуумная откачка, (6) система крепления оптических элементов с обдувом гелием, (7) лазерное излучение.

Наибольшая мощность генерации излучения в этих экспериментах, как на основных, так и на обертонных переходах молекулы CO, наблюдалась при максимальном расстоянии от сверхзвукового сопла до оси лазерного резонатора. В основной полосе генерация излучения наблюдалась в спектральном диапазоне 4.9-5.7 мкм на колебательных переходах от  $4\rightarrow3$  до  $18\rightarrow17$ . Максимальная выходная мощность генерации излучения

в основной полосе достигала 2 кВт, а лазерная эффективность – 20%. Мощность генерации обертонного излучения в сверхзвуковом ВЧ СО лазере достигала ~50 Вт. Следует отметить, что лазерный резонатор в этих экспериментах состоял из двух «глухих» (коэффициент отражения более 99.5%) диэлектрических зеркал, предназначавшихся для HF лазера, на кварцевых подложках непрозрачных для 5 мкм излучения. Специальные меры по подавлению последнего не предпринимались. Оптимизация коэффициентов отражения лазерных зеркал могла бы значительно увеличить выходную мощность такого лазера (вплоть до сотен Ватт). Спектр обертонного излучения лежал в диапазоне длин волн 2.6-2.7 мкм, что соответствовало относительно низким переходам от 9-7 до 11→9 (Рис.3.22). Анализ полученных результатов и моделирование экспериментальных условий на импульсном ЭИ СО лазере позволили авторам сделать вывод, что в таких экспериментальных условиях время пролета газа от сверхзвукового сопла до лазерного резонатора недостаточно для формирования инверсной населенности на высоко расположенных обертонных переходах в сверхзвуковом СО лазере. В этой работе [126] авторами предложены возможные изменения конструкции сверхзвукового СО лазера, которые позволят осуществить генерацию изучения в таком лазере на высоко расположенных обертонных переходах в спектральном диапазоне 3.3-4.0 мкм.





В работе [127] исследовался обертонный СО лазер с медленной прокачкой газовой смеси. Схема экспериментальной установки показана на Рис.3.23. В экспериментах использовались две газоразрядные трубки с 54

различной длиной охлаждаемой области (активной среды): «короткая» - 102 см и «длинная» - около 140 см. Возбуждение активной среды осуществлялось непрерывным тлеющим разрядом. Газовая смесь охлаждалась жидким азотом. Для уменьшения оптических потерь в резонаторе, лазерные зеркала устанавливались непосредственно на газоразрядной трубке с помощью специально разработанных крепежных элементов. Лазерные зеркала и электроды обдувались гелием.



Рис.3.23. Схема лазерной установки [127]

Характерный спектр лазерного излучения, наблюдаемый при использовании «короткой» трубки, показан на Рис.3.24. В экспериментах была получена одновременная генерация излучения на 40-45 колебательно-вращательных переходах, принадлежащих колебательным полосам от  $9 \rightarrow 7$  до  $35 \rightarrow 33$ , в спектральном диапазоне 2.6-3.9 мкм. Максимальная выходная мощность с «короткой» трубкой составляла 8.5 Вт. Применение «длинной» газоразрядной трубки позволило увеличить выходную мощность обертонного СО лазера, которая достигла 12 Вт. Наибольшее значение эффективности генерации излучения на обертонных переходах составляло 5%. Следует отметить, что применение более длинной активной среды привело к появлению относительно слабой (менее 12% от полной выходной мощности) генерации излучения на основных переходах.



В активной среде электроразрядных СО лазеров заселение колебательных уровней происходит благодаря колебательно-колебательному обмену. Эффективность такого заселения значительно возрастает при уменьшении температуры газа. Влияние температуры становится особенно важным для получения генерации излучения на обертонных переходах, где коэффициент усиления меньше, чем на переходах основной полосы (см. Раздел 2). Поэтому особого внимания заслуживают работы [112, 128], где была получена генерация обертонного излучения без криогенного охлаждения активной среды. Эти эксперименты проводились на импульсно-периодической ЭИ лазерной установке (Рис.3.25), которая могла также работать в моноимпульсном режиме. Газовая смесь (CO, N<sub>2</sub>, He) в режиме замкнутого цикла медленно прокачивалась через область ЭИ разряда, после чего в теплообменнике ее температура понижалась до 5°С. Спектральное распределение энергии обертонного излучения и пропускание выходного зеркала лазерного резонатора показано на Рис.3.26. Генерация излучения наблюдалась на колебательных переходах от 14-12 до 24->22 в спектральном диапазоне 2.8-3.3 мкм. В режиме одиночных импульсов максимальная энергия обертонного излучения достигала 25 Дж [128]. В импульсно-периодическом режиме при частоте 30 Гц средняя выходная мощность обертонного излучения составляла 60 Вт. В этих экспериментах объем активной среды в лазерном резонаторе ограничивался

56

размерами лазерных зеркал и составлял 1.5 л. Промасштабировав полученные результаты на полный объем активной среды (12 л), авторы утверждают, что в таких экспериментальных условиях возможна генерация обертонного излучения со средней выходной мощностью более 4 кВт.



Рис.3.25. Схема (а) и внешний вид (b) электроионизационной лазерной установки [128].



Рис.3.26. Спектр обертонного ЭИ СО лазера и спектральное пропускание выходного зеркала лазерного резонатора [128].

В работе [129] была продемонстрирована возможность получения генерации обертонного излучения в газовых смесях, содержащих большое количество кислорода. В этих экспериментах генерация излучения осуществлялась на низко расположенных колебательных уровнях.



Рис.3.27. Зависимость лазерного энергосъема  $Q_{out}$  на первом колебательном обертоне молекулы СО от удельного энерговклада  $Q_{in}$  при различном содержании кислорода [129].

На Рис.3.27 показаны зависимости лазерного энергосъема Q<sub>out</sub> от удельного энерговклада Q<sub>in</sub> при различном содержании кислорода. (В этих экспериментах оптимизация зеркал не проводилась.) Добавки кислорода в газовую смесь приводили к уменьшению порогового значения энерговклада (энерговклада, при котором возникает генерация излучения) и к увеличению энергосъема при фиксированном значении энерговклада. Такое влияние добавок кислорода на генерационные характеристики лазера объяснялось межмолекулярным колебательно-колебательным обменом между молекулами СО и О2. Учитывая то, что молекулы кислорода имеют более высокую скорость колебательно-поступательной релаксации, такой межмолекулярный обмен увеличивает скорость релаксации колебательной энергии, запасенной молекулами СО. Наиболее быстро колебательная релаксация молекул СО происходит на колебательных уровнях  $V \sim 25$ , при этом на ниже расположенных колебательных уровнях увеличивается населенность, что обеспечивает повышение потока колебательной энергии с нижних на высокие колебательные уровни. Поэтому при увеличении содержания кислорода в рабочей смеси энергия генерации на нижних колебательных переходах молекул СО. В этой же работе

58

[129] была получена генерация обертонного излучения в газовых смесях, состоящих из окиси углерода и атмосферного воздуха, что открывает возможность для использования воздушных смесей в качестве активной среды мощных мобильных СО лазеров, действующих, как на основных, так и на обертонных переходах.



Рис.3.28. Спектральное распределение энергии щелевого ВЧ лазера, действующего на обертонных переходах молекулы СО, полученное для двух лазерных резонаторов 1, 2 [130].

Газовые смеси с относительно большим количеством кислорода применялись также в работах [130, 131, 132]. В этих работах исследовался СО лазер, возбуждение активной среды которого осуществлялось щелевым ВЧ (81 МГц) разрядом при криогенном охлаждении электродов. В этих экспериментах лазер действовал в импульсно-периодическом режиме. Средняя выходная мощность лазера составляла ~0.3 Вт. На этой же установке мощность генерации излучения в основной полосе достигала 12 Вт. Это позволяет предположить, что, как и в случае с экспериментами, описанными в [126], оптимизация обертонного лазерного резонатора может увеличить мощность обертонного излучения в несколько раз. Следует отметить, что в настоящее время этот лазер является наиболее компактным обертонным СО лазером: объем активной среды составляет ~25 см<sup>3</sup>, длина лазерного резонатора ~27 см. При использовании двух лазерных резонаторов с различными спектральными характеристиками генерация обертонного излучения была осуществлена на ~80 спектральных линиях в диапазоне длин волн ~2.5 - 4.0 мкм (Рис.3.28). Создание столь компактных обертонных СО лазеров, действующих в широком спектральном диапазоне, позволяет надеяться на более активное применение таких лазеров, например, в спектроскопии (см. также Раздел 4).

## 4. Применения обертонного СО лазера.

В спектральном диапазоне 2.5-4.2 мкм расположено большое количество линий поглощения различных органических и неорганических веществ (см., например, [56]). Обертонный СО лазер может действовать на значительном количестве (более 400) спектральных линий [29, 31, 32, 120], которые попадают в этот спектральный диапазон. При этом спектральная ширина линии излучения такого лазера может составлять всего 100 кГц, при нестабильности частоты излучения менее 30 кГц ( $\Delta v/v=3$  10<sup>-10</sup>) [119]. Сочетание большого количества линий, высокой стабильности частоты излучения и малой спектральной ширины отдельной линии открывает широкие возможности по применению обертонного СО лазера в спектроскопии [95, 133-136].



Рис.4.1. Расчетные положения спектральных линий обертонного CO, HF и DF лазеров [135].

В той же спектральной области могут действовать лазеры на молекулах HF и DF [24, 25]. Расчетные положения спектральных линий обертонного CO, HF и DF лазеров показаны на Рис.4.1 [135]. Спектральный диапазон генерации излучения в обертонном CO лазере перекрывает диа-60 пазоны HF и DF лазеров. Кроме того, количество линий в единичном спектральном интервале у обертонного CO лазера существенно больше. В работах [137, 138] исследовались возможности обертонного CO, HF и DF лазеров с точки зрения количественной спектроскопии различных атмосферных примесей. Рассчитанные в этих работах количественные параметры спектроскопического газоанализа многокомпонентных смесей (минимально обнаружимые концентрации различных веществ, парциальные чувствительности, парциальные селективности, перекрестные чувствительности), убедительно продемонстрировали уникальные возможности обертонного CO лазера в спектроскопии по сравнению с HF и DF лазерами.

В работе [139] была экспериментально продемонстрирована возможность детектирования различных углеводородов (метан, этилен и др.) на уровне единиц ppB с помощью обертонного CO лазера. В работах [140, 141] исследовались возможности детектирования в атмосфере небольших примесей формальдегида (H<sub>2</sub>CO) (минимально обнаружимая концентрация ~2 ppB [141]), а также соотношения изотопов метана <sup>12</sup>CH<sub>4</sub> и <sup>13</sup>CH<sub>4</sub> (минимально обнаружимая концентрация ~100 ppt [140]). Детектирование малых концентраций органических веществ с помощью обертонного CO лазера нашло применение в области биологии [142-144]. Наример, в [143] изучалось содержание метана и этана в выдохе человека (концентрации более 500 ppt), а работы [142, 144] были посвящены исследованию вырабатывания изопрена (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>) [142] и этана [144] листьями растений. Кроме того, в [145] изучалась чувствительность ИК рецепторов жуков Melanophila путем воздействия монохроматическим излучением обертонного CO лазера в спектральном диапазоне 2.8-3.5 мкм.

Помимо лабораторной лазерной спектроскопии обертонный СО лазер представляет интерес для ряда приложений, где требуется транспортировка излучения на большие расстояния (см., например, [146]), поскольку диапазон генерации обертонного излучения перекрывает широкое «окно прозрачности» атмосферы, расположенное в спектральном интервале 3.3-4.2 мкм (см. Рис.4.2 [147, 148]). На интернет-сайте Air Force Research Lab (USA) (http://www.afrl.af.mil/successstories/) было опубликовано, что обертонный СО лазер является «an attractive candidate for the Airborne Laser, Space-Based Laser, and Tactical High Energy Laser,... Since the pump mechanism is electrical in nature, closed-cycle operation of the CO Overtone Laser would lend itself to a compact, flight-worthy design viable for military applications.»



Рис.4.2. Спектральное поглощение и рассеяние атмосферы [147, 148].

В работах [135, 149] исследовалось поглощение излучения обертонного СО лазера в атмосфере. Для полученных в экспериментах спектров обертонного СО лазера, проводились расчеты на основе базы данных [56], в которых учитывались линейное и нелинейное поглощение, наведенное поглощение, «просветление» лазерным излучением. В работе [149] представлен список из 50 спектральных линий обладающих наименьшим поглощением в атмосфере. Минимальный коэффициент поглощения обертонного излучения в атмосфере при учете вклада в поглощение континуумов  $H_2O$  и  $CO_2$  составляет ~0.01 км<sup>-1</sup>. Также обертонный СО лазер может найти применение для дистанционного зондирования малых газовых составляющих атмосферы [150, 151]. Слабое поглощение лазерного излучения в атмосферы в атмосферы [150, 151]. Слабое поглощение измерения концентраций различных веществ на больших расстояниях [152, 153].

## 5.Заключение

В работе представлен обзор экспериментальных и теоретических исследований обертонных СО лазеров. Анализ теоретических работ показал необходимость включения в модель активной среды обертонного СО лазера процессов многоквантового обмена. Приведено описание такой модели, ее верификация. Показано, что в настоящее время генерационные характеристики обертонного СО лазера могут с достаточной точностью рассчитываться численно. На основе существующей теоретической модели приведен прогноз характеристик обертонного СО лазера. В обзоре экспериментальных работ продемонстрировано, что генерация излучения на обертонных переходах молекулы СО может быть получена на лазерных установках различных классов. Показано, что обертонный СО лазер может действовать в широкой спектральной области 2.5-4.2 мкм, перекрывающей "окно прозрачности" атмосферы. Продемонстрировано, что энергетические характеристики такого лазера могут быть довольно высоки. Кратко приведен обзор применений обертонного СО лазера. Показано, что обертонный СО лазер может быть использован в качестве эффективного источника излучения среднего ИК диапазона для атмосферной спектроскопии, транспортировки лазерного излучения на большие расстояния, дистанционного лазерного зондирования и др.

## References

- 1. C.K.N. Patel, R.J. Kerl, Appl.Phys.Lett., 5, 81 (1964).
- 2. J.W. Rich, H.M. Thompson, Appl.Phys.Lett., 19, 1, 35 (1971)
- 3. W.B.Lacina, M.M. Mann, Appl.Phys.Lett., 21, 224 (1972).
- 4. N.N. Sobolev, V.V. Sokovikov, Sov.J.Quantum Electron, 2, 305 (1972).
- 5. N.N.Sobolev, V.V.Sokovikov, Sov. Phys. Uspekhy, 16, 350 (1973).
- 6. N.G. Basov, V.A. Danilychev, A.A. Ionin, I.B. Kovsh, V.A. Sobolev, Kratkie soobscheniya po fizike, **6**, 1 (1974) (in Russian).
- 7. R.E. Center, High power-efficient electrically excited CO lasers, In: *Laser* hanbook edited by M.L.Smith (North-Holland Publ.Co., p.89 1979).
- 8. A.A. Ionin, I.B. Kovsh, V.A. Sobolev, B.M. Urin, Electric discharge high pressure IR lasers and their applications in Itogi nauki I tekhniki, ser.Radiotekhnika, **32**, VINITI, Moscow (1984) (in Russian).
- 9. A.A Ionin, Quantum Electronics, 23, 93-101 (1993).
- A. Ionin, I. Spalding, CO lasers state of the art and potential of application. in "Gas Lasers Recent Developments and Future Prospects." ed. by W.J. Witteman и V.N. Ochkin. NATO ASI Series, 3. High Technology-1.10, c. 279 (1995).
- 11. A. Ionin, Proc. SPIE, **3889**, p.424 (2000).
- A.A. Ionin, "Electric discharge CO lasers", in book 'Gas Lasers', ed. M. Endo, R. Walter, (CRC Press - Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida, USA, p.201 2007).
- J. McCord, A. Ionin, S. Phipps, P.G.Crowell, A.I. Lampson, J. McIver, A.J.W. Brown, G. Hager, IEEE J. Quantum Electronics, 36, (9) 1041 (2000).
- 14. J.T. Yardley, J.Molec.Spectr., 35, 314 (1970).
- 15. C.E. Treanor, J.W. Rich, R.G. Rehm, J. Chem. Phys., 48, 1798 (1968).
- 16. C.K.N. Patel, Phys.Rev., 141, 71 (1966).
- J.W. Rich, "Relaxation of molecules exchanging vibrational energy" in Applied Atomic Collision Physics vol.3 Gas Lasers ed E.W. McDaniel and W.L. Nighan (NY, Academic Press, 1982, p.125).
- M.L. Bhaumik, W.B. Lacina , M.M. Mann IEEE J. Quant. Electron., QE-8, 150 (1972).
- M.M. Mann, D.K. Rice, R.G. Eguchi IEEE J. Quant. Electron., QE-10, 682 (1974).
- 20. M.M. Mann, AIAA Journal, 14, 549 (1976).

- N.G. Basov, V.G. Bakaev, A.A. Ionin, I.B. Kovsh, A.V.Kuchaev, A.P.Lytkin, V.N.Paisov, D.V.Sinitsyn, V.A.Sobolev, Journal of Technical Physics, 55, 326 (1985) (in Russian).
- 22. R.M. Measures, Laser remote sensing fundamentals and applications (Wiley Interscience, New York, 1984).
- 23. E.D. Hinkley, Optical and Quantum Electronics, 8, 155 (1976).
- 24. U.K. Sengupta, P.K. Das, K.N. Rao, J. Molec Spectrosc., 74, 322, (1979).
- V.Ya. Agroskin, B.G. Bravy, V.I. Kirianov, V.G.Papin, G.K.Vasiliev, Mobil pulsed chain HF/DF laser: Prospects for remote analysis of atmosphere, Proc. Int.Conf."LASERS'98", 7-11 Dec 1998, Tucson, AZ, USA; STS Press, McLean, VA p.469 (1999).
- 26. R.C. Bergman, J.W. Rich, Appl. Phys. Lett. 31, 597 (1977).
- N.G. Basov, V.A. Danilychev, A.A. Ionin, V.S. Kazakevich, I.B. Kovsh, Sov.J.Quant.Electron., 8, 1058 (1978).
- 28. M. Gromoll-Bohle, W. Bohle, W. Urban, Opt. Comms., 69, 409 (1989).
- 29. E. Bachem, A. Dax, T. Fink, A. Weidenfell, M. Schnieder, W. Urban, Appl. Phys. **B. 57**, 185 (1993).
- N.G.Basov, G.D.Hager, A.A.Ionin, A.A.Kotkov, A.K.Kurnosov, J.E.McCord, A.P.Napartovich, L.V.Seleznev, N.G.Turkin, Quant.Electron., 30, 771 (2000).
- N.G.Basov, G.D.Hager, A.A.Ionin, A.A.Kotkov, A.K.Kurnosov, J.E.McCord, A.P.Napartovich, L.V.Seleznev, N.G.Turkin, Quant.Electron., 30, 859 (2000).
- N.G.Basov, G.D.Hager, A.A.Ionin, A.A.Kotkov, A.K.Kurnosov, J.E.McCord, A.P.Napartovich, L.V.Seleznev, N.G.Turkin, IEEE J.Quantum Electronics, 36, 810 (2000).
- 33. A.Ionin, Proc.SPIE, 4065, p.768-780 (2000).
- A.A.Ionin, Yu.M.Klimachev, A.Yu.Kozlov, A.A.Kotkov, A.K.Kurnosov, J.E.McCord, A.P.Napartovich, O.A.Rulev, L.V.Seleznev, D.V.Sinitsyn, G.D.Hager, S.L.Shnyrev, Quant.Electron., 36, 1153 (2006).
- 35. B.F. Gordiets, A.I. Osipov, L.A. Shelepin, Kineticheskie processy v gasakh I molekularnye lasery (Nauka, Moscow, 1980) (In Russian).
- A.P. Napartovich, Physics of high-power CO lasers. In "Gas Lasers Recent Developments and Future Prospects." Ed. by W.J. Witteman и V.N. Ochkin. NATO ASI Series, 3. High Technology-10, p. 11 (1995).

- A.A. Likalter, G.V. Naidis, Kolebatelnye raspredelenija v silnovozbuzhdennykh molekularnykh gasakh. In "Khimija plazmy". 156 (Moscow, 1981) (In Russian).
- Fizicheskie velichiny. Handbook. Ed. I.S.Grigor'ev & E.Z.Melikhov, (Energoizdat, Moscow, 1991) (In Russian).
- 39. G. Herzberg, Molecular spectra and Molecular structure, 1.Spectra of diatomic molecules. (Van Nostrand Reinhold Company, Ney York, 1950).
- 40. L. Goldberg, E.A. Muller, Astrophys. J. 118, 397 (1953).
- 41. C.K.N. Patel, Appl. Phys. Letters, 7, 246 (1965).
- 42. D.R. Sokoloff, A. Sanchez, R.M. Osgood, A. Javan, Appl.Phys.Lett. 17, 257 (1970).
- 43. G. Schiffner, E. Klement, Appl. Phys. 6, 199 (1975).
- 44. G. Guelachvili, D. deVilleneuve, R. Farrenq, W. Urban, J. Verges, J.Mol.Spectrosc. **98**, 64 (1983).
- 45. R.S. Eng, H. Kildal, J.C. Mikkelsen, D.L. Spears, Appl.Phys.Letters, 24, 231 (1974).
- 46. G. Guelachvili in "Spectrometric techniques", Ed., G.Vanasse (Academic Press, New York, 1981).
- 47. A.H.M. Ross, R.S. Eng, H. Kildal, Opt. Commun. 12, 433 (1974).
- 48. T.X. Lin, W. Rohrberck, W. Urban, Appl.Phys.B. 26, 73 (1981).
- 49. D.W. Chen, R.K. Narahari, J.Mol.Spectrosc. 61, 71 (1976).
- 50. C. Effantin, C. Amiot, J. Verges, J.Mol.Spectrosc. 76, 221 (1979).
- 51. G. Guelachvili, Opt.Commun. 8, 171 (1973).
- 52. P. Helminger, F.C. DeLucia, W. Gordy, Phys. Rev. Lett. 25, 1397 (1970).
- 53. W.B. Roh, R.K. Narahari, J. Mol. Spectrosc. 49, 317 (1974).
- 54. T.R. Todd, C.M. Clayton, W.B. Telfair, T.K. McCubbin, Jr.&J. Pliva, J.Mol.Spectrosc. 62, 201 (1976).
- 55. B. Rosenblum, A.H. Nethercot, C.H. Towns, Phys Rev. 109, 400 (1958).
- L.S. Rothman, R.R. Gamache, R.H. Tipping, C.P. Rinsland, M.A.H. Smith, D.C. Benner, V.M. Malathy, J.-M. Flaud, C. Camy-Peyret, A. Perrin, C. Goldman, S.T. Massie, L.R. Brown, R.A. Toth, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 48, 469 (1992). [Update HITRAN-96 version on CD-ROM]
- G.J. Schulz, Chap.1, In: "Electron Molecule Scattering". Ed. by S. C. Brown (Wiley, New York, 1979).
- 58. G.N. Haddad, H.B. Milloy, Austral. J. Phys. 36, 473 (1983).

- 59. A. Ionin, Yu. Klimachev, A. Kotkov, A. Kurnosov, A. Napartovich, L. Seleznev, D. Sinitsyn, N. Turkin, "Experimental and theoretical study on first overtone carbon monoxide laser physics". Preprint#11 (Lebedev Physical Institute Rusian Academy of Science, Moscow, 1998)
- 60. I.V. Kochetov, A.K. Kurnosov, A.P. Napartovich, and S.L. Shnyrev, Plasma Physics Reports, **28**, 1041 (2002).
- 61. S.A. Zhdanok, A.P. Napartovich, A.N. Starostin, Sov. Phys. JETP, **49**, 66 (1979).
- A.V. Dem'yanov, S.A. Zhdanok, I.V. Kochetov, A.P. Napartovich, V.G. Pevgov, A.N. Starostin, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 22, 287 (1981).
- 63. C.K.N. Patel, Phys.Rev.A. 136, 1187 (1964).
- 64. S.S. Penner, Quantitative Molecular Spectroscopy and Gas Emissivities, (Adisson-Wesley, Reading, Mass., 1959).
- Yu.B. Konev, I.V. Kochetov, V.G. Pevgov, V.F. Sharkov, Preprint №2821, (I.V. Kurchatov Institute of Atomic Energy, Mosc., 1977) (In Russian).
- 66. S.R. Langhoff, C.W. Bauschlichter, J.Chem.Phys. 102, 5220 (1995).
- 67. S.D. Rockwood, J.E. Brau, W.A. Proctor, G.H. Canavan, IEEE Journal of QE, 9, 120 (1973).
- 68. Yu.B. Konev, I.V. Kochetov, A.K. Kurnosov, V.G. Pevgov. Pis'ma v ZhTF, **3**, 1267 (1977) (In Russian).
- 69. A.F. Suchkov, Yu.N. Shebeko, Sov.J.Quant.Electron. 9, 565 (1979).
- 70. Yu.N. Shebeko, J. Tech. Phys. 50, 1262 (1980) (In Russian).
- Yu.B. Konev, I.V. Kochetov, A.K. Kurnosov, V.G. Pevgov, and A.V. Dem'yanov, Journal of Engineer. Phys. and Thermophysics, 41, 884 (1981).
- Yu.B. Konev, I.V. Kochetov, A.K. Kurnosov, V.G. Pevgov, and A.V. Dem'yanov, Journal of Engineer. Phys. and Thermophysics, 41, 1016 (1981).
- S.A. Zhdanok, I.V. Kochetov, A.K. Kurnosov, A.P. Napartovich, V.G. Pevgov, and A.N. Starostin, Journal of Engineer. Phys. and Thermophysics, 38, 169 (1980).
- N.G. Basov, V.D. Zvorykin, I.B. Kovsh, A.I. Kipshakbaev, A.I. Lopatnikov, M.V. Pjatachin, B.M. Urin, J. Tech. Phys. 54, 1294 (1984) (In Russian)

- 75. N.G. Basov, V.A. Kazakevich, I.B. Kovsh, A.N. Mikryukov, Sov. J. Quant. Electron. **13**, 667 (1983).
- E.T. Aliev, N.G. Basov, I.B. Kovsh, I.A. Lesnov, V.A. Sobolev, Sov. J. Quant. Electron. 14, 593 (1984).
- 77. Yu.B. Konev, I.V. Kochetov, V.S. Marchenko, V.G. Pevgov, Soviet J. Quant.Electron. 7, 768 (1977).
- N.G. Basov, V.A. Danilychev, A.A. Ionin, V.A. Kazakevich, I.B. Kovsh, N.L. Poletaev, Sov. J. Quant. Electron. 9, 716 (1979).
- 79. Yu. B. Konev, A.K. Kurnosov, Teplofizika Vys. Temper. 26, 651 (1988) (In Russian).
- A.A. Deryugin, I.V. Kochetov, A.I. Loboiko, A.F. Pal', V.V. Pichugin, A.V. Filippov, Fizika Plazmy, 14, 340 (1988) (In Russian)
- 81. A.A. Ionin, A.A. Kotkov, A.K. Kurnosov, A.P. Napartovich, L.V. Seleznev, N.G. Turkin, Optics Communications, **155**, 197 (1998).
- M. Capitelli (ed.), Nonequilibrium Vibrational Kinetics, (Springer-Verlag, Berlin, 1986), Chs.3, 11.
- M. Cacciatore, A. Kurnosov, A. Napartovich, S. Shnyrev, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 37, 3379 (2004).
- 84. S.V. Vetoshkin, A.A. Ionin, Yu.M. Klimachev, A.Yu. Kozlov, A.A. Kotkov, A.K. Kurnosov, A.P. Napartovich, O.A. Rulev, L.V. Seleznev, D.V. Sinitsyn, S.L. Shnyrev, "Small signal gain time behavior in active medium of pulsed electron beam sustained discharge CO laser: theory and experiment". Preprint#27 (Lebedev Physical Institute Rusian Academy of Science, Moscow, 2004) (In Russian).
- 85. N.G. Basov, V.A. Kazakevich, I.B. Kovsh, Sov. J. Quant. Electron 10, 1131 (1980).
- Yu. B. Konev, I.V. Kochetov, A.K. Kurnosov, Preprint#3829/11, (I.V. Kurchatov Institute of Atomic Energy, Mosc. 1983) (In Russian).
- A.A. Ionin, A.A. Kotkov, A.K. Kurnosov, A.P. Napartovich, L.V. Seleznev, N.G. Turkin, Optics Communications, 178, 337 (2000).
- 88. R.D. Sharma and C.A. Brau, J. Chem. Phys. 50, 924 (1969).
- 89. N.S. Smith, H.A. Hassan, AIAA Journal, 14, 374 (1976).
- W.B. Lacina, M.M. Mann, G.H. McAlister, IEEE Journal of QE, 9, 588 (1973).
- 91. Ph. Brechignac, Chemical Physics, 34, 119 (1978).

- A.A. Ionin, Yu.M. Klimachev, Yu.B. Konev, I.V. Kochetov, A.K. Kurnosov, D.V. Sinitsyn, Izv.Akademii Nauk ser. Fizicheskaya, 63, 676 (1999) (In Russian)
- 93. A.A Ionin, Yu.M. Klimachev, Yu.B. Konev, A.K. Kurnosov, A.P. Napartovich, D.V. Sinitsyn, Yu.V. Terechov, Quant.Electron. **30**, 573 (2000).
- 94. R. Farrenq, C. Rossetti, Chem. Phys. 92, 401 (1985).
- 95. W. Urban, Laser und Optoelektronik, 23, 56 (1991).
- A. N. Oraevskyi, A.F. Suchkov, Yu.N. Shebeko, Kratkie soobshchenija po fizike, №1, 32 (1978) (In Russian).
- 97. A.V. Dem'yanov, I.V. Kochetov, A.P. Napartovich, V.G. Pevgov, A.N. Starostin, Teplofizika Vys. Temper. **18**, 918 (1980) (In Russian).
- 98. G.D. Billing, Chem. Phys. Lett. 97, 188 (1983).
- 99. G.D. Billing, Comput. Phys. Rept. 1, 237 (1984).
- 100. C. Coletti, and G.D. Billing, J. Chem. Phys. 113, 4896 (2000).
- 101. G. Billing, C. Coletti, A.K. Kurnosov and A.P. Napartovich, J. Phys .B: At. Mol. Opt. Phys. 36, 1175 (2003).
- 102. Yu.B. Konev, I.V. Kochetov, A.K. Kurnosov, B.A. Mirzakarimov, Quant. Electron. 24, 124 (1994).
- 103. Yu.B. Konev, I.V. Kochetov, A.K. Kurnosov, and B.A. Mirzakarimov, J. Phys. D: Appl. Phys., 27, 2054 (1994).
- 104. A. Kurnosov, M. Cacciatore, G.D. Billing, Journ. Phys. Chem. A. 107, 2403 (2003).
- 105. A.K. Kurnosov, A.P. Napartovich, S.L. Shnyrev, Quant. Electron. 34, 1027 (2004).
- 106. A.A. Ionin, Yu.M. Klimachev, Yu.B. Konev, A.A. Kotkov, A.K. Kurnosov, A.P. Napartovich, L.V. Seleznev, D.V. Sinitsyn, Yu.V. Terekhov, J. Phys. D: Appl. Phys. 34, 2230 (2001).
- 107. S.V. Vetoshkin, A.A. Ionin, Yu.M. Klimachev, A.Yu. Kozlov, A.A. Kotkov, A.K. Kurnosov, A.P. Napartovich, O.A. Rulev, L.V. Seleznev, D.V. Sinitsyn, S.L. Shnyrev, Quant.Electron. 35, 1107 (2005).
- 108. N.G. Basov, G.D. Hager, A.A. Ionin, A.A. Kotkov, A.K. Kurnosov, J.E. McCord, A.P. Napartovich, L.V. Seleznev, N.G. Turkin, Quant.Electron. 32, 404 (2002).
- 109. S.V. Vetoshkin, A.A. Ionin, Yu.M. Klimachev, A.Yu. Kozlov, A.A. Kotkov, O.A. Rulev, L.V. Seleznev, D.V. Sinitsyn, Journal of Russ. Las. Research, 27,33 (2006).

- 110. A.A Ionin, Yu.M. Klimachev, A.Yu. Kozlov, A.A. Kotkov, A.K. Kurnosov, A.P. Napartovich, S.L. Shnyrev, Quant. Electron. **38**, 833 (2008).
- 111. W. Urban, J.-X. Lin, V.V. Subramaniam, M. Havenith, and J.W. Rich, Chem. Phys. **130**, 389 (1989).
- 112. E. Zeyfang, W. Mayerhofer, S. Walther, Room-temperature repetitively pulsed CO overtone laser. Proc.of SPIE, 4184, 230 (2001).
- 113. F.G.Sadie, P.A.Buger, and O.G.Malan, J. Appl. Phys., 43, 2906 (1972).
- 114. V.A.Dudkin, V.B.Rukhin, Sov.J.Quant.Electron., 19, 908 (1992)
- 115. N.G.Basov, V.S.Kazakevich, I.B.Kovsh, Sov.J.Quant.Electron., **10**, 1136 (1980).
- 116. N.G.Basov, A.A.Ionin, I.B.Kovsh, Infrared Physics, 25, 47 (1985).
- 117. A.D.Belykh, V.A.Gurashvili, I.V.Kochetov, A.K.Kurnosov, A.P.Putilin, N.G.Turkin, Quant.Electron., 25, 315 (1995).
- 118. A.A.Ionin, A.A.Kotkov, A.K.Kurnosov, A.P.Napartovich, L.V.Seleznev, N.G.Turkin, Opt. Commun., **155**, 197 (1998).
- 119. M.Murtz, B.Frech, P.Palm, R.Lotze, W.Urban, Opt.Lett., 23, 58 (1998).
- 120. N.G.Basov, G.D.Hager, A.A.Ionin, A.A.Kotkov, A.K.Kurnosov, J.E.McCord, A.P.Napartovich, L.V.Seleznev, N.G.Turkin, Opt. Commun., 180, 285 (2000).
- 121. C.Palmer, Diffraction grating handbook (third edition) (Richardson Grating Laboratory, NY, USA, 1996).
- 122. J.T.Yardley, Appl. Opt., 10, 1760 (1971).
- 123. A.A.Ionin, A.A.Kotkov, A.K.Kurnosov, A.P.Napartovich, L.V.Seleznev, N.G.Turkin, Opt. Commun., **160**, 255 (1999).
- 124. N.G.Basov, G.D.Hager, A.A.Ionin, A.A.Kotkov, A.K.Kurnosov, J.E.McCord, A.P.Napartovich, L.V.Seleznev, N.G.Turkin, Opt. Commun., 171, 107 (1999).
- 125. G.Hager, A.Ionin, J.McCord, L.Seleznev, R.Tate, Proc. Int.Conf. LASERS 2000, 4-8 Dec 2000, Albuquerque, NM, USA, STS Press, McLean, VA, USA p.281 (2001).
- 126. W.Bohn, H.von Buelow, S.Dass, A.A.Ionin, Yu.M.Klimachev, A.A.Kotkov, J.K.McIver, J.E.McCord, L.V.Seleznev, D.V.Sinitsyn, R.F.Tate, G.D.Hager, Quant.Electron., 35, 1126 (2005).
- 127. Yu.G.Utkin, M.Goshe, I.V.Adamovich, J.W.Rich, Opt. Commun., 263, 105 (2006).

- 128. W.L.Bohn, H.-A.Eckel, W.Riede, S.Walther, Proc.SPIE, **4760**, 486 (2002).
- 129. A A Ionin, Yu M Klimachev, A Yu Kozlov, A A Kotkov, L V Seleznev, Quantum Electronics, **38**, 115 (2008).
- A.A. Ionin, A.Yu. Kozlov, L.V. Seleznev, D.V. Sinitsyn, Opt. Commun., 282, 629 (2009).
- 131. A.A. Ionin, A.Yu. Kozlov, L.V. Seleznev, D.V. Sinitsyn, IEEE J. Quant.Electron., 45, 215 (2009).
- 132. A.A. Ionin, A.Yu. Kozlov, L.V. Seleznev, D.V. Sinitsyn, "Carbon monoxide cryogenic slab laser", Quant.Electron., (2009) (in print).
- 133. W.Urban, The CO-overtone laser a spectroscopic source in a most interesting wavelength region in "Applied Laser Spectroscopy" ed. By W.Demtroder & M.Ingusico (Plenum, NY, 127-135, 1990).
- 134. W.Urban, Infrared Phys.Technol., 36, 465 (1995).
- 135. O.G.Buzykin, A.A.Ionin, S.V.Ivanov, A.A.Kotkov, L.V.Seleznev, A.V.Shustov, Laser and Particle Beams, 18, 697 (2000).
- 136. M.W.Sigrist, Rev.of scientific instruments, 74, 486 (2003).
- 137. O.G.Buzykin, S.V.Ivanov, A.A.Ionin, A.A.Kotkov, L.V.Seleznev, Izv.Akademii Nauk ser. Fizicheskaya, **66**, 962 (2002) (in Russian)
- 138. O.G.Buzykin, A.A.Ionin, S.V.Ivanov, A.A.Kotkov, L.V.Seleznev, Proc.SPIE, **4644**, 193 (2002).
- M.Murtz, T.Kauser, D.Klaine, S.Stry, P.Hering, W.Urban, Proc SPIE, 3758, 53 (1999).
- 140. H.Danke, D.Klaine, W.Urban, P.Hering, M.Murtz, Appl.Phys.B, 72, 121 (2001).
- 141. H.Danke, G.von Basum, K.Kleinermanns, P.Hering, M.Murtz, Appl.Phys.B, **75**, 311 (2002).
- 142. H.Danke, J.Kahl, G.Schuler, W.Boland, W.Urban, F.Kuhnemann, Appl.Phys.B, **70**, 275 (2000).
- 143. H.Danke, D.Klaine, W.Urban, P.Hering, M.Murtz, Appl.Phys.B, 72, 971 (2001).
- 144. I.E.Santosa, L.J.J.Laarhovan, J.Harbinson, S.Driscoll, F.J.M.Harren, Rev.of Scientific Instruments, 74, 680 (2003).
- 145. H.Schmitz, M.Murtz, H.Bleckmann, Journal of Comparative Physiology A, **186**, 543 (2000).
- 146. A.Ionin, L.Seleznev, AIP conference proceedings, 997, 159 (2007).
- 147. J.Cook, Int. Workshop on laser pumped by chemical reactions or explosives, ISL, Saint-Louis, Nov13-14, 2001.
- A.Ionin, I.Kholin, B.Vasil'ev, V.Zvorykin, AIP conference proceedings, 664, 697 (2003).
- 149. O.G.Buzykin, S.V.Ivanov, A.A.Ionin, A.Yu.Kozlov, A.A.Kotkov, L.V.Seleznev, Atmos.Oceanic Opt., **14**, 361 (2001).
- 150. A.A.Ionin, Yu.M.Klimachev, A.Yu.Kozlov, A.A.Kotkov,
  O.A.Romanovskii O.A. Romanovskii, L.V. Seleznev, D.V. Sinitsyn,
  O.V.Kharchenko, S.V. Yakovlev, Vestnik Akademii inzhenernyh nauk, 3,
  187 (2007). (in Russian)
- 151. A.A.Ionin, Yu.M.Klimachev, A.Yu.Kozlov, A.A.Kotkov,
  O.A.Romanovskii O.A. Romanovskii, L.V. Seleznev, D.V. Sinitsyn,
  O.V.Kharchenko, A.V.Shelestovich, S.V. Yakovlev, Izvestija VUZov.
  Fizika, 11, 76 (2008). (in Russian)
- 152. S.V.Ivanov, A.A.Ionin, A.A.Kotkov, A.Yu.Kozlov, L.V.Seleznev, D.V.Sinitsyn, O.G.Buzykin, Khimicheskaya Fizika, 21, 62 (2004). (in Russian)
- 153. O.G.Buzykin, S.V.Ivanov, A.A.Ionin, A.A.Kotkov and A.Yu.Kozlov, Journal of Russian Laser Research, **26**, 402 (2005).

**Приложение.** Рассчитанные частоты для колебательно-вращательных  $(V \rightarrow V-2, J-1 \rightarrow J)$  переходов основного изотопа молекулы <sup>12</sup>C<sup>16</sup>O.

Ссылки указывают работы, в которых была получена генерация излучения на соответствующих переходах.

V	J	cm <sup>-1</sup>	
4	4	4140,101	
4	5	4135,992	
4	6	4131,89	
4	7	4127,796	
4	8	4123,371	
4	9	4119,125	
4	10	4114,718	
4	11	4110,321	
4	12	4105,765	
4	13	4101,05	
4	14	4096,514	
4	15	4091,653	
4	16	4086,971	
4	17	4081,966	
4	18	4077,14	
4	19	4071,993	
4	20	4067,024	
4	21	4061,903	
4	22	4056,63	
4	23	4051,371	
4	24	4045,962	
5	4	4087,639	
~	-	1000 600	
5	5	4003,033	
ว 5	5 6	4063,633 4079,468	
5 5 5	5 6 7	4079,468 4075,312	
5 5 5 5 5	5 6 7 8	4083,833 4079,468 4075,312 4071,164	
5 5 5 5 5 5 5	5 6 7 8 9	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859	
5 5 5 5 5 5 5 5	5 6 7 8 9 10	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398	
5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	5 6 7 8 9 10 11	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948	
5555555	5 6 7 8 9 10 11 12	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506	
55555555	5 6 7 8 9 10 11 12 13	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911	
555555555	5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326	
5     5     5     5     5     5     5       5     5     5     5     5     5     5     5	5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588	
5     5 <td>5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16</td> <td>4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4034,861</td> <td></td>	5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4034,861	
5     5 <td>5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17</td> <td>4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4039,588 4034,861 4029,983</td> <td></td>	5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4039,588 4034,861 4029,983	
5       5	5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4034,861 4029,983 4025,117	
555555555555555555555555555555555555555	5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4034,861 4029,983 4025,117 4020,101	
5     5 <td>5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20</td> <td>4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4034,861 4029,983 4025,117 4020,101 4015,097</td> <td></td>	5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4034,861 4029,983 4025,117 4020,101 4015,097	
5     5 <td>5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21</td> <td>4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4039,588 4034,861 4029,983 4025,117 4020,101 4015,097 4009,945</td> <td></td>	5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4039,588 4034,861 4029,983 4025,117 4020,101 4015,097 4009,945	
5     5 <td>5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22</td> <td>4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4034,861 4029,983 4025,117 4020,101 4015,097 4009,945 4004,806</td> <td></td>	5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4034,861 4029,983 4025,117 4020,101 4015,097 4009,945 4004,806	
5     5 <td>5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23</td> <td>4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4034,861 4029,983 4025,117 4020,101 4015,097 4009,945 4004,806 3999,52</td> <td></td>	5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4034,861 4029,983 4025,117 4020,101 4015,097 4009,945 4004,806 3999,52	
5     5 <td>5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24</td> <td>4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4034,861 4029,983 4025,117 4020,101 4015,097 4009,945 4004,806 3999,52 3994,249</td> <td></td>	5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24	4063,633 4079,468 4075,312 4071,164 4066,859 4062,398 4057,948 4053,506 4048,911 4044,326 4039,588 4034,861 4029,983 4025,117 4020,101 4015,097 4009,945 4004,806 3999,52 3994,249	

V	J	cm <sup>-1</sup>	
6	5	4031,282	
6	6	4027,224	
6	7	4023,012	
6	8	4018,808	
6	9	4014,613	
6	10	4010,266	
6	11	4005,929	[32]
6	12	4001,441	[32]
6	13	3996,962	[32]
6	14	3992,334	
6	15	3987,559	
6	16	3982,953	
6	17	3978,041	
6	18	3973,141	
6	19	3968,254	
6	20	3963,221	
6	21	3958,201	
6	22	3953,038	
6	23	3947,888	
6	24	3942,596	
7	4	3982.953	
7	5	3978,991	
7	6	3975,037	
7	7	3970,933	
7	8	3966,837	
7	9	3962,593	
7	10	3958,358	
7	11	3953,976	[32]
7	12	3949,447	[32]
7	13	3944,929	[32]
7	14	3940,421	
7	15	3935,768	
7	16	3931,126	
7	17	3926,342	
7	18	3921,415	
7	19	3916,5	
7	20	3911,598	
7	21	3906,555	
7	22	3901,373	
7	23	3896,205	
7	24	3891,051	
8	4	3930.972	
8	5	3926,959	
		· · · ·	

8         6         3923,107           8         7         3918,956           8         8         3914,814           8         9         3910,68           8         10         3906,403           8         11         3902,135         [32]           8         12         3897,724         [32]           8         12         3893,171         [32]           8         13         3893,171         [32]           8         14         3888,63	V	J	cm <sup>-1</sup>	
8       7       3918,956         8       8       3914,814         8       9       3910,68         8       10       3906,403         8       10       3902,135       [32]         8       12       3897,724       [32]         8       13       3893,171       [32]         8       13       3893,171       [32]         8       14       3888,63	8	6	3923,107	
8         8         3914,814           8         9         3910,68           8         10         3906,403           8         11         3902,135         [32]           8         12         3897,724         [32]           8         13         3893,171         [32]           8         13         3893,171         [32]           8         14         3888,63	8	7	3918,956	
8         9         3910,68           8         10         3906,403           8         11         3902,135         [ <sup>32</sup> ]           8         12         3897,724         [ <sup>32</sup> ]           8         12         3893,171         [ <sup>32</sup> ]           8         14         3888,63         .           8         14         3884,099         .           8         15         3884,099         .           8         16         3879,427         .           8         17         3874,767         .           8         18         3869,969         .           8         19         3865,033         .           8         20         3860,11         .           8         21         3855,05         .           8         22         3850,004         .           8         23         3844,823         .           8         24         3839,656         .           9         4         3875,218         .           9         5         3875,218         .           9         1         3854,753         .	8	8	3914,814	
8       10       3906,403         8       11       3902,135       [ <sup>32]</sup> 8       12       3897,724       [ <sup>32]</sup> 8       13       3893,171       [ <sup>32]</sup> 8       14       3888,63       [         8       15       3884,099       [         8       16       3879,427       [         8       16       3879,427       [         8       17       3874,767       [       [         8       17       3874,767       [       [         8       19       3865,033       [       [         8       19       3865,033       [       [         8       20       3860,11       [       ]       ]       ]       ]       ] <td>8</td> <td>9</td> <td>3910,68</td> <td></td>	8	9	3910,68	
8       11       3902,135       [ <sup>32]</sup> 8       12       3897,724       [ <sup>32]</sup> 8       13       3893,171       [ <sup>32]</sup> 8       14       3888,63	8	10	3906,403	
8       12       3897,724       [ <sup>32]</sup> 8       13       3893,171       [ <sup>32]</sup> 8       14       3888,63         8       15       3884,099         8       16       3879,427         8       17       3874,767         8       18       3869,969         8       19       3865,033         8       20       3860,11         8       21       3855,05         8       22       3850,004         8       23       3844,823         8       24       3839,656         9       4       3878,976         9       5       3875,218         9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       11       3850,448         [ <sup>32]</sup> 9       12         9       13       3841,573         9       13       3841,573         9       14       3837,151         9       15       <	8	11	3902,135	[32]
8       13       3893,171       [ <sup>32]</sup> 8       14       3888,63         8       15       3884,099         8       16       3879,427         8       17       3874,767         8       17       3874,767         8       18       3869,969         8       19       3865,033         8       20       3860,11         8       21       3855,05         8       22       3850,004         8       23       3844,823         8       24       3839,656         9       4       3878,976         9       5       3875,218         9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       11       3850,448         321       9       12         9       13       3841,573         9       13       3841,573         9       14       3827,898         9       17       3823,214 <td>8</td> <td>12</td> <td>3897,724</td> <td>[32]</td>	8	12	3897,724	[32]
8       14       3888,63         8       15       3884,099         8       16       3879,427         8       17       3874,767         8       18       3869,969         8       19       3865,033         8       20       3860,11         8       21       3855,05         8       22       3850,004         8       23       3844,823         8       24       3839,656         9       4       3878,976         9       5       3875,218         9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       11       3850,448         39       11       3850,448         39       12       3846,006         32,1271       13       3841,573         9       14       3837,151         9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       17       3823,214 <tr< td=""><td>8</td><td>13</td><td>3893,171</td><td>[32]</td></tr<>	8	13	3893,171	[32]
8       15       3884,099         8       16       3879,427         8       17       3874,767         8       18       3869,969         8       19       3865,033         8       20       3860,11         8       21       3855,05         8       22       3850,004         8       23       3844,823         8       23       3844,823         8       24       3839,656         9       4       3878,976         9       5       3875,218         9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       11       3850,448         [32]       9       12         9       13       3841,573         9       14       3837,151         9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       17       3823,214         9       18       3813,592 <td< td=""><td>8</td><td>14</td><td>3888,63</td><td></td></td<>	8	14	3888,63	
8       16       3879,427         8       17       3874,767         8       18       3869,969         8       19       3865,033         8       20       3860,11         8       21       3855,05         8       22       3850,004         8       23       3844,823         8       24       3839,656         9       4       3878,976         9       5       3875,218         9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       11       3850,448         381       391         9       12       3846,006         32,127]       13         9       13       3841,573         9       13       3841,573         9       14       3837,151         9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       17       3823,214         9       18 <td< td=""><td>8</td><td>15</td><td>3884,099</td><td></td></td<>	8	15	3884,099	
8       17       3874,767         8       18       3869,969         8       19       3865,033         8       20       3860,11         8       21       3855,05         8       22       3850,004         8       23       3844,823         8       24       3839,656         9       4       3878,976         9       5       3875,218         9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       11       3850,448         [32]       9       12         9       13       3841,573         9       14       3837,151         9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       17       3823,214         9       18       3818,397         9       19       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728 <td< td=""><td>8</td><td>16</td><td>3879,427</td><td></td></td<>	8	16	3879,427	
8       18       3869,969         8       19       3865,033         8       20       3860,11         8       21       3855,05         8       22       3850,004         8       23       3844,823         8       24       3839,656         9       4       3878,976         9       5       3875,218         9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       11       3850,448         [32]       9       12         9       13       3841,573         9       12       3846,006         [32, 127]       13         9       14       3837,151         9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       17       3823,214         9       18       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9 <t< td=""><td>8</td><td>17</td><td>3874,767</td><td></td></t<>	8	17	3874,767	
8       19       3865,033         8       20       3860,11         8       21       3855,05         8       22       3850,004         8       23       3844,823         8       24       3839,656         9       4       3878,976         9       5       3875,218         9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       11       3850,448         9       12       3846,006         32, 127]       14       3837,151         9       12       3846,006         38,1,573       [32, 127]         9       14       3837,151         9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       17       3823,214         9       18       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       21       3798,671 <t< td=""><td>8</td><td>18</td><td>3869,969</td><td></td></t<>	8	18	3869,969	
8       20       3860,11         8       21       3855,05         8       22       3850,004         8       23       3844,823         8       24       3839,656         9       4       3878,976         9       5       3875,218         9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       11       3850,448         9       12       3846,006         32, 127]       13       3841,573         9       12       3846,006         32, 127]       13       3841,573         9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       17       3823,214         9       18       3818,397         9       19       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       22       3798,671         9       23       3793,627	8	19	3865,033	
8       21       3855,05         8       22       3850,004         8       23       3844,823         8       24       3839,656         9       4       3878,976         9       5       3875,218         9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       11       3850,448         9       12       3846,006         32, 127]       13       3841,573         9       12       3846,006         32, 127]       14       3837,151         9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       17       3823,214         9       18       3818,397         9       19       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       22       3798,671         9       23       3793,627         9       24       3788,453	8	20	3860,11	
8       22       3850,004         8       23       3844,823         8       24       3839,656         9       4       3878,976         9       5       3875,218         9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       11       3850,448         9       12       3846,006         32, 127]       13       3841,573         9       12       3846,006         32, 127]       14       3837,151         9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       17       3823,214         9       18       3818,397         9       19       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       22       3798,671         9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312 <td>8</td> <td>21</td> <td>3855,05</td> <td></td>	8	21	3855,05	
8       23       3844,823         8       24       3839,656         9       4       3878,976         9       5       3875,218         9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       10       3854,753         9       11       3850,448         9       12       3846,006         32, 127]       13       3841,573         9       12       3846,006         32, 127]       13       3841,573         9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       17       3823,214         9       18       3818,397         9       19       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       22       3798,671         9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312 <td>8</td> <td>22</td> <td>3850,004</td> <td></td>	8	22	3850,004	
8       24       3839,656         9       4       3878,976         9       5       3875,218         9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       11       3850,448       [32]         9       12       3846,006       [32, 127]         9       13       3841,573       [32, 127]         9       13       3841,573       [32, 127]         9       14       3837,151       9         9       15       3832,592       9         9       16       3827,898       9         9       17       3823,214       9         9       18       3818,397       9         9       19       3813,592       9         9       20       3808,798       9         9       21       3803,728       9         9       23       3793,627       9         9       24       3788,453       10         10       4       3823	8	23	3844,823	
9       4       3878,976         9       5       3875,218         9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       10       3854,753         9       11       3850,448         9       12       3846,006         9       12       3846,006         9       12       3841,573         9       13       3841,573         9       14       3837,151         9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       17       3823,214         9       18       3818,397         9       19       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312         10       5       3823,361	8	24	3839,656	
9       5       3875,218         9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       10       3854,753         9       11       3850,448         9       12       3846,006       [32, 127]         9       12       3846,006       [32, 127]         9       13       3841,573       [32, 127]         9       14       3837,151       9         9       15       3832,592       9         9       16       3827,898       9         9       17       3823,214       9         9       18       3818,397       9         9       19       3813,592       9         9       20       3808,798       9         9       21       3803,728       9         9       23       3793,627       9         9       24       3788,453       10         10       5       3823,361       10	9	4	3878,976	
9       6       3871,167         9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       10       3854,753         9       11       3850,448       [ <sup>32]</sup> 9       12       3846,006       [ <sup>32, 127]</sup> 9       13       3841,573       [ <sup>32, 127]</sup> 9       14       3837,151       9         9       15       3832,592       9         9       16       3827,898       9         9       17       3823,214       9         9       18       3818,397       9         9       19       3813,592       9         9       19       3803,728       9         9       21       3803,728       9         9       23       3793,627       9         9       24       3788,453       10         10       5       3823,361       10	9	5	3875,218	
9       7       3867,125         9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       11       3850,448       [ <sup>32]</sup> 9       12       3846,006       [ <sup>32, 127]</sup> 9       12       3841,573       [ <sup>32, 127]</sup> 9       13       3841,573       [ <sup>32, 127]</sup> 9       14       3837,151       9         9       15       3832,592       9         9       16       3827,898       9         9       17       3823,214       9         9       18       3818,397       9         9       19       3813,592       9         9       20       3808,798       9         9       21       3803,728       9         9       23       3793,627       9         9       24       3788,453       10         10       5       3823,361       10	9	6	3871,167	
9       8       3863,092         9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       11       3850,448       [ <sup>32]</sup> 9       12       3846,006       [ <sup>32, 127]</sup> 9       12       3841,573       [ <sup>32, 127]</sup> 9       13       3841,573       [ <sup>32, 127]</sup> 9       14       3837,151       9         9       15       3832,592       9         9       16       3827,898       9         9       16       3823,214       9         9       18       3818,397       9         9       19       3813,592       9         9       19       3803,728       9         9       21       3803,728       9         9       23       3793,627       9         9       24       3788,453       10         10       4       3827,312       10         10       5       3823,361       10	9	7	3867,125	
9       9       3858,918         9       10       3854,753         9       11       3850,448       [ <sup>32</sup> ]         9       12       3846,006       [ <sup>32, 127]</sup> 9       13       3841,573       [ <sup>32, 127]</sup> 9       13       3841,573       [ <sup>32, 127]</sup> 9       14       3837,151         9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       17       3823,214         9       18       3818,397         9       19       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       22       3798,671         9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312         10       5       3823,361	9	8	3863,092	
9       10       3854,753         9       11       3850,448       [ <sup>32]</sup> 9       12       3846,006       [ <sup>32, 127]</sup> 9       13       3841,573       [ <sup>32, 127]</sup> 9       14       3837,151	9	9	3858,918	
9       11       3850,448       [ <sup>32</sup> ]         9       12       3846,006       [ <sup>32, 127]</sup> 9       13       3841,573       [ <sup>32, 127]</sup> 9       14       3837,151	9	10	3854,753	
9       12       3846,006       [32, 127]         9       13       3841,573       [32, 127]         9       14       3837,151         9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       16       3823,214         9       18       3818,397         9       19       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       22       3798,671         9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312         10       5       3823,361	9	11	3850,448	[32]
9       13       3841,573       [ <sup>32, 127]</sup> 9       14       3837,151         9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       16       3823,214         9       17       3823,214         9       18       3818,397         9       19       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       22       3798,671         9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312         10       5       3823,361	9	12	3846,006	[32, 127]
9       14       3837,151         9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       17       3823,214         9       18       3818,397         9       19       3813,592         9       19       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       22       3798,671         9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312         10       5       3823,361	9	13	3841,573	[32, 127]
9       15       3832,592         9       16       3827,898         9       17       3823,214         9       18       3818,397         9       19       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       22       3798,671         9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312         10       5       3823,361	9	14	3837,151	
9       16       3827,898         9       17       3823,214         9       18       3818,397         9       19       3813,592         9       19       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       22       3798,671         9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312         10       5       3823,361	9	15	3832,592	
9       17       3823,214         9       18       3818,397         9       19       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       22       3798,671         9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312         10       5       3823,361	9	16	3827,898	
9       18       3818,397         9       19       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       22       3798,671         9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312         10       5       3823,361	9	17	3823,214	
9       19       3813,592         9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       22       3798,671         9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312         10       5       3823,361	9	18	3818,397	
9       20       3808,798         9       21       3803,728         9       22       3798,671         9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312         10       5       3823,361	9	19	3813,592	
9       21       3803,728         9       22       3798,671         9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312         10       5       3823,361	9	20	3808,798	
9       22       3798,671         9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312         10       5       3823,361         10       20       240,554	9	21	3803,728	
9       23       3793,627         9       24       3788,453         10       4       3827,312         10       5       3823,361         10       5       224,252,12	9	22	3798,671	
9     24     3788,453       10     4     3827,312       10     5     3823,361	9	23	3793,627	
10     4     3827,312       10     5     3823,361       40     2242,524	9	24	3788,453	
10 5 3823,361	10	4	3827,312	
	10	5	3823,361	
10 6  3819,564	10	6	3819,564	

V	J	cm <sup>-1</sup>	
10	7	3815,483	
10	8	3811,412	[29]
10	9	3807,348	[29]
10	10	3803,149	
10	11	3798,959	[32, 127]
10	12	3794,635	[32, 127]
10	13	3790,176	[32]
10	14	3785,728	
10	15	3781,147	
10	16	3776,578	
10	17	3771.877	
10	18	3767,188	
10	19	3762.369	
10	20	3757,562	
10	21	3752.627	
10	22	3747 564	
10	23	3742 515	
10	24	3737 34	
11	1	3775 722	
11	4 5	3771 877	
11	5	2769 04	
11	7	2764 069	[29]
11	/ 0	2750 064	[29]
11	0	3759,904	[29]
11	9	3733,009	[29]
11	10	3731,782	[20]
11	11	3747,504	[32, 127]
11	12	3743,210	[32, 127]
11	13	3738,877	[32]
11	14	3734,409	
11	15	3729,951	
11	10	3725,300	
11	17	3720,792	
11	18	3716,091	
11	19	3711,264	
11	20	3706,449	
11	21	3701,647	
11	22	3696,584	
11	23	3691,535	
11	24	3686,5	
12	4	3724,256	
12	5	3720,376	[26]
12	6	3716,643	[26, 29]
12	7	3712,642	[29]
12	8	3708,649	[29]
12	9	3704,664	[29]
12	10	3700,551	[29, 127]
12	11	3696,311	[29, 30, 1 <mark>20,</mark> 127]
12	12	3692,081	[32, 120]
12	13	3687,724	[32, 120]
12	14	3683,377	[32, 120]

V	J	cm <sup>-1</sup>	
12	15	3678.905	[32, 120]
12	16	3674,444	
12	17	3669,725	
12	18	3665,152	
12	19	3660,456	
12	20	3655.639	
12	21	3650,701	
12	22	3645,777	
12	23	3640,865	
12	24	3635,703	
13	4	3672,96	
13	5	3669,186	[26]
13	6	3665.42	[26, 29]
13	7	3661.528	[26, 29, 85]
13	8	3657.51	[29, 85]
13	9	3653.502	[29, 85]
13	10	3649,502	[29, 32, 85, 120,
10		0045045	127]
13	11	3645,245	[29, 32, 85, 120, 127]
13	12	3641,13	[32, 85, 120]
13	13	3636,76	[32, 85, 120]
13	14	3632,401	[32, 85, 120]
13	15	3628,052	[32, 85, 120]
13	16	3623,451	[32, 85, 120]
13	17	3618,992	[85]
13	18	3614,284	[85]
13	19	3609,587	[85]
13	20	3604,903	
13	21	3600,101	
13	22	3595,182	
13	23	3590,149	
13	24	3585,129	
14	4	3621,745	
14	5	3618,076	[26]
14	6	3614,284	[26, 29]
14	7	3610,499	[26, 29, 32, 120]
14	8	3606,593	[29, 32, 120]
14	9	3602,565	[29, 32, 85, 120,
14	10	3598 546	127] [29, 32, 85, 120,
	10		127] [29_32_85_120]
14	11	3594,407	[29, 32, 33, 120]
14	12	3590,278	[20, 32, 00, 120]
14	13	3500,029	[32 85 120]
14	14	3501,002	[32 85 120]
14	10	35/1,300	[32 85 120]
14	10	3012,032	[32 85 120]
14	10	3508,243	[32, 85, 120]
14	10	3203,005	[32 85 120]
14	19	3558,972	[85]
14	20	3554,292	[00]
14	21	3549,498	

V	J	cm <sup>-1</sup>	
14	22	3544.591	
14	23	3539.698	
14	24	3534.693	
15	<u> </u>	3570 791	
15	5	3567 224	[26]
15	6	3563 411	[26, 29]
15	7	3559 606	[26, 29, 32, 120]
15	8	3555 808	[29, 32, 120]
15	9	3551 767	[29, 32, 120]
15	10	3547 735	[29, 32, 120]
15	11	3543 712	[29, 32, 85, 120]
15	12	3539 572	[29, 32, 85, 120]
15	13	3535 318	[29, 32, 85, 120]
15	14	3531 073	[29, 32, 85, 120]
15	15	3526 715	[32, 85, 120]
15	16	3522.243	[32, 85, 120]
15	17	3517 782	[32, 85, 120]
15	18	3513 21	[32, 85, 120]
15	19	3508 649	[32, 85, 120]
15	20	3503 854	[85]
15	21	3499 195	[85]
15	22	3494 304	
15	23	3489.427	
15	24	3484.442	
16	<u> </u>	3520.011	
16	5	3516 422	[26, 29]
16	6	3512 716	[26, 29]
16	0 7	3508 895	[26, 29]
16	8	3505 083	[29]
16	9	3501 156	[29, 32, 120]
16	10	3497 237	[29, 32, 120]
16	11	3493,206	[29, 32, 120]
16	12	3489.062	[29, 32, 120]
16	13	3484.806	[29, 32, 85, 120]
16	14	3480,561	[29, 32, 85, 120]
16	15	3476.326	[32, 85, 120]
16	16	3471.861	[32, 85, 120]
16	17	3467,406	[32, 85, 120]
16	18	3462,964	[32, 85, 120]
16	19	3458,293	[32, 85, 120]
16	20	3453,635	[85]
16	21	3448,99	[85]
16	22	3444,119	[85]
16	23	3439,263	[85]
16	24	3434,42	
17	4	3469,452	
17	5	3465,844	[29]
17	6	3462,124	[26, 29]
17	7	3458,413	[26, 29]
47	8	3454 589	[29, 32, 120]

V	J	cm <sup>-1</sup>	
17	9	3450,775	[29, 32, 120]
17	10	3446,85	[29, 32, 120]
17	11	3442,815	[29, 32, 120]
17	12	3438,671	[29, 32, 120]
17	13	3434,538	[29, 32, 120]
17	14	3430,296	[29, 32, 120]
17	15	3426,065	[29, 32, 85, 120]
17	16	3421,728	[32, 85, 120]
17	17	3417,285	[32, 85, 120]
17	18	3412,853	[32, 85, 120]
17	19	3408,2	[32, 85, 120]
17	20	3403,676	[32, 85, 120]
17	21	3398,933	[85]
17	22	3394,203	[85]
17	23	3389,371	[85]
17	24	3384,438	[85]
18	4	3419,037	
18	5	3415,417	[26, 29]
18	6	3411,805	[26, 29]
18	7	3408,084	[26, 29, 32, 120]
18	8	3404,255	[29, 32, 120]
18	9	3400,435	[29, 32, 120]
18	10	3396,508	[29, 32, 120]
18	11	3392,591	[29, 32, 120]
18	12	3388,567	[29, 32, 120]
18	13	3384,438	[29, 32, 120]
18	14	3380,206	[29, 32, 120]
18	15	3375,983	[29, 32, 120]
18	16	3371,658	[29, 32, 120]
18	17	3367,344	[32, 85, 120]
18	18	3362,814	[32, 85, 120]
18	19	3358,297	[85]
18	20	3353,792	[85]
18	21	3349,074	[85]
18	22	3344,37	[85]
18	23	3339,567	[85]
18	24	3334,779	[85]
19	4	3368,705	
19	5	3365,19	[26, 29]
19	6	3361,57	[26, 29, 32, 120]
19	7	3357,958	[26, 29, 32, 120]
19	8	3354,129	[29, 32, 120]
19	9	3350,308	[29, 32, 120]
19	10	3346,496	[2 <mark>9, 32, 120,</mark> 127]
19	11	3342,581	[29, 32, 120, 127]
19	12	3338,564	[29, 32, 120, 127]
19	13	3334,445	[29, 32, 120, 127]
19	14	3330,336	[29, 32, 120]
19	15	3326 <u>,</u> 127	[29, 32, 120]

V	T	cm <sup>-1</sup>	
10	16	2221 010	[29 32 120]
19 10	17	33217 50	[32 120]
19	1/ 10	3312 014	,•]
19 10	10	3308 510	
19	19 20	3304 020	[85]
19	∠∪ 21	3200 25	[85]
19	<u> イ</u> I 22	3299,30 3201 676	[85]
19	22	3234,010	[85]
19 10	23 24	3285 151	[85]
19	∠4 ₄	0200,101	[~~]
20	4	3318,621	[26, 20]
20	о 6	3315,1	[26, 20, 32, 120]
20	6 7	3311,478	[20, 29, 32, 120]
20	/	3307,863	[20, 32, 120]
20	ŏ	3304,147	[20, 32, 120]
20	9	3300,439	[20, 32, 120]
20	10	3296,631	129, 32, 120, 127]
20	11	3292,723	[29, 32, 120, 127]
20	12	3288,717	[29, 32, 120, 127]
20	13	3284,612	[29, 32, 120]
20	14	3280,517	[29, 32, 120]
20	15	3276,325	[29, 32, 120]
20	16	3272,144	[29, 32, 120]
20	17	3267,76	[32, 120]
20	18	3263,388	[32, 120]
20	19	3259,028	
20	20	3254,467	
20	21	3249,919	[85]
20	22	3245,278	[85]
20	23	3240,546	[85]
20	24	3235,722	[85]
21	4	3268.615	
21	5	3265.2	[29]
21	6	3261.685	[26, 29, 32, 120]
21	7	3258.072	[29, 32, 120]
21	8	3254,361	[29, 32, 120]
21	9	3250.658	[29, 32, 120]
21	10	3246,859	[29, 32, 120]
21	11	3242,963	[29, 32, 120,
21	12	3239,076	[29, 32, 120]
21	13	3234,99	[29, 32, 120]
21	14	3230,914	[29, 32, 120]
21	15	3226,847	[29, 32, 120]
21	16	3222,584	[29, 32, 120]
21	17	3218,332	[29, 32, 120]
21	18	3213,987	[32, 120]
21	19	3209,552	
21	20	3205,128	
21	21	3200,512	
21	22	3195.909	
		,	

V	J	cm <sup>-1</sup>	
21	23	3191.218	[85]
21	24	3186 54	[85]
22	 ⊿	3218.85	
22	- 5	3215,00	[29, 32, 120]
22	6	3210,404	[29, 32, 120]
22	7	3208 419	[29, 32, 120]
22	, 8	3200, 413	[29, 32, 120]
22	g	3201,717	[29, 32, 120]
22	10	3197 238	[29, 32, 120,
22	10	0107,200	127]
22	11	3193,46	[29, 32, 120, 127]
22	12	3189,589	[29, 32, 120, 127]
22	13	3185,525	[29, 32, 120]
22	14	3181,572	[29, 32, 120]
22	15	3177,427	[29, 32, 120]
22	16	3173,294	[29, 32, 120]
22	17	3168,969	[29]
22	18	3164,657	[29]
22	19	3160,356	
22	20	3155,868	
22	21	3151,393	
22	22	3146,732	
22	23	3142,085	[85]
22	24	3137,452	[85]
23	4	3169,271	[32, 120]
23	5	3165,859	[29, 32, 120]
23	6	3162,455	[29, 32, 120]
23	7	3158,859	[29, 32, 120]
23	8	3155,271	[29, 32, 120]
23	9	3151,592	[29, 32, 120]
23	10	3147,921	[29, 32, 120]
23	11	3144,061	[29, 32, 120, 1271
23	12	3140,21	[29, 32, 120]
23	13	3136,271	[29, 32, 120]
23	14	3132,243	[29, 32, 120]
23	15	3128,226	[29, 32, 120]
23	16	3124,024	[29, 32, 120]
23	17	3119,833	[29, 32, 120]
23	18	3115,556	[29, 32, 120]
23	19	3111,194	
23	20	3106,844	
23	21	3102,314	
23	22	3097,797	
23	23	3093,198	
23	24	3088,517	
24	4	3119.833	[32, 120]
24	5	3116.43	[29, 32, 120]
24	6	3113.034	[29, 32, 120]
24	7	3109.55	[29, 32, 120]
24	8	3105.976	[29, 32, 120]
	-	,,,,,,	_

V	J	cm <sup>-1</sup>	
24	9	3102,314	[29, 32, 120]
24	10	3098,661	[29, 32, 120]
24	11	3094,921	[29, 32, 120, 1271
24	12	3090,999	[29, 32, 120, 127]
24	13	3087,182	[29, 32, 120, 127]
24	14	3083,184	[29, 32, 120]
24	15	3079,102	[29, 32, 120]
24	16	3075,031	[29, 32, 120]
24	17	3070,876	[29, 32, 120]
24	18	3066,638	[29]
24	19	3062,318	[29]
24	20	3057,917	
24	21	3053,528	
24	22	3048,967	
24	23	3044,418	
24	24	3039,791	
25	4	3070.499	[32, 120]
25	5	3067 202	[29, 32, 120]
25	6	3063 819	[29, 32, 120]
25	7	3060.35	[29, 32, 120]
25	, 8	3056 795	[29, 32, 120]
25	g	3053 249	[29, 32, 120]
25	10	3049 524	[29, 32, 120]
25	11	3045 809	[29, 32, 120]
25	12	3042,01	[29, 32, 120, 127]
25	13	3038,128	[29, 32, 120]
25	14	3034.257	[29, 32, 120]
25	15	3030,211	[29, 32, 120]
25	16	3026,176	[29, 32, 120]
25	17	3021.97	[29, 32, 120]
25	18	3017,775	[29, 32, 120]
25	19	3013.5	[29, 32, 120]
25	20	3009.238	[32, 120]
25	21	3004.808	[32, 120]
25	22	3000.3	
25	23	2995.806	
25	24	2991,146	
26	4	3021 331	[32, 120]
26	5	3018 048	[29, 32, 120]
26	6	3014 772	[29, 32, 120]
26	7	3011 323	[29. 32. 120]
20	י 8	3007 70	[29, 32, 120]
20	0	3001,13	[29, 32, 120]
20 26	10	3000,66	[29, 32, 120,
26	11	2996,973	[29, 32, 120, 127]
26	12	2993 206	[29, 32, 120]
26	13	2989 358	[29, 32, 120.
26	1/	2005,000	127] [29, 32, 120]
20	14	2900,401	[,,0]

V	J	cm <sup>-1</sup>	
26	15	2981.426	[29, 32, 120]
26	16	2977 431	[29, 32, 120]
26	17	2973 359	[29, 32, 120]
26	18	2969 121	[29, 32, 120]
<u>_</u> 26	19	2964 896	[29, 32, 120]
26	20	2960 594	[29, 32, 120]
26	21	2956 219	[32, 120]
26	22	2951,768	
26	23	2947.331	
26	24	2942.734	
27	<u> </u>	2972 386	[32, 120]
27	5	2969 121	[29, 32, 120]
27	6	2965 775	[29, 32, 120]
27	7	2062 436	[29, 32, 120]
27	י 2	2058 03	[29. 32. 120]
27 27	a	2950,95	[29, 32, 120]
27	10	2051 855	[29, 32, 120]
27 27	11	2018 2	[29, 32, 120]
27 27	12	2044 467	[29, 32, 120,
21	12	2344,407	127]
27	13	2940,657	[29, 32, 120]
27	14	2936,771	[29, 32, 120]
27	15	2932,895	[29, 32, 120]
27	16	2928,858	[29, 32, 120]
27	17	2924,832	[29, 32, 120]
27	18	2920,646	[29, 32, 120]
27	19	2916,472	[29, 32, 120]
27	20	2912,226	[29, 32, 120]
27	21	2907,822	[32, 120]
27	22	2903,432	[32, 120]
27	23	2898,971	[32, 120]
27	24	2894,44	[32, 120]
28	4	2923,549	[32, 120]
28	5	2920,305	[29, 32, 120]
28	6	2916,983	[29, 32, 120]
28	7	2913,668	[29, 32, 120]
28	8	2910,276	[29, 32, 120]
28	9	2906,723	[29, 32, 120]
28	10	2903,179	[29, 32, 120]
28	11	2899,559	[29, 32, 120, 127]
28	12	2895,865	[29, 32, 120, 127]
28	13	2892,096	[29, 32, 120]
28	14	2888,253	[29, 32, 120]
28	15	2884,421	[29, 32, 120]
28	16	2880,433	[29, 32, 120]
28	17	2876,374	[29, 32, 120]
28	18	2872,325	[29, 32, 120]
28	19	2868,124	[29, 32, 120]
28	20	2863,852	[29, 32, 120]
28	21	2859,594	[32, 120]

V         J         cm <sup>-1</sup> 28         22         2855,185         [32, 120]           28         23         2850,79         [32, 120]           29         4         2874,802         [32, 120]           29         5         2871,583         [29, 32, 120]           29         6         2868,371         [29, 32, 120]           29         7         2865,083         [29, 32, 120]           29         8         2861,64         [29, 32, 120]           29         9         2858,205         [29, 32, 120]           29         10         2854,696         [29, 32, 120, 127]           29         11         2851,115         [29, 32, 120, 127]           29         12         2847,461         [29, 32, 120, 127]           29         13         2843,737         [29, 32, 120]           29         14         2839,941         [29, 32, 120]           29         15         2836,075         [29, 32, 120]           29         16         2832,139         [29, 32, 120]           29         17         2828,134         [29, 32, 120]           29         18         2824,061         [32, 120]			1	
28         22         2855,185         [32, 120]           28         23         2850,79         [32, 120]           29         4         2874,802         [32, 120]           29         5         2871,583         [29, 32, 120]           29         6         2868,371         [29, 32, 120]           29         7         2865,083         [29, 32, 120]           29         8         2861,64         [29, 32, 120]           29         9         2858,205         [29, 32, 120]           29         10         2854,696         [29, 32, 120, 127]           29         11         2847,461         [29, 32, 120, 127]           29         12         2847,461         [29, 32, 120, 127]           29         13         2843,737         [29, 32, 120]           29         14         2839,941         [29, 32, 120]           29         14         2836,075         [29, 32, 120]           29         14         2836,075         [29, 32, 120]           29         16         2832,139         [29, 32, 120]           29         17         2828,134         [29, 32, 120]           29         18         2807,096	V	J	cm⁻¹	
28       23       2850,79       [32, 120]         28       24       2846,327         29       4       2874,802       [32, 120]         29       5       2871,583       [29, 32, 120]         29       6       2868,371       [29, 32, 120]         29       7       2865,083       [29, 32, 120]         29       9       2858,205       [29, 32, 120]         29       9       2854,696       [29, 32, 120, 127]         29       10       2854,696       [29, 32, 120, 127]         29       12       2847,461       [29, 32, 120, 127]         29       13       2843,737       [29, 32, 120, 127]         29       14       2839,941       [29, 32, 120, 127]         29       15       2836,075       [29, 32, 120]         29       16       2832,139       [29, 32, 120]         29       17       2828,134       [29, 32, 120]         29       18       2824,061       [29, 32, 120]         29       21       2817,472       [29, 32, 120]         29       21       2817,473       [32, 120]         29       22       2807,769       [32, 120]	28	22	2855,185	[32, 120]
28         24         2846,327           29         4         2874,802         [32, 120]           29         5         2871,583         [29, 32, 120]           29         6         2868,371         [29, 32, 120]           29         7         2865,083         [29, 32, 120]           29         8         2861,64         [29, 32, 120]           29         9         2858,205         [29, 32, 120]           29         10         2854,696         [29, 32, 120, 127]           29         12         2847,461         [29, 32, 120, 127]           29         13         2843,737         [29, 32, 120, 127]           29         14         2839,941         [29, 32, 120, 127]           29         15         2836,075         [29, 32, 120]           29         15         2836,075         [29, 32, 120]           29         16         2832,139         [29, 32, 120]           29         17         2828,134         [29, 32, 120]           29         12         2807,096         [32, 120]           29         21         2811,437         [32, 120]           29         22         2807,096         [32, 120]	28	23	2850,79	[32, 120]
29       4       2874,802       [32, 120]         29       5       2871,583       [29, 32, 120]         29       6       2868,371       [29, 32, 120]         29       7       2865,083       [29, 32, 120]         29       8       2861,64       [29, 32, 120]         29       9       2858,205       [29, 32, 120]         29       10       2854,696       [29, 32, 120, 127]         29       11       2851,115       [29, 32, 120, 127]         29       12       2847,461       [29, 32, 120, 127]         29       13       2843,737       [29, 32, 120, 127]         29       14       2839,941       [29, 32, 120]         29       15       2836,075       [29, 32, 120]         29       15       2836,075       [29, 32, 120]         29       16       2832,139       [29, 32, 120]         29       17       2828,134       [29, 32, 120]         29       18       2824,061       [29, 32, 120]         29       21       2811,437       [32, 120]         29       22       2807,096       [32, 120]         29       24       2798,299       [32, 120]<	28	24	2846.327	
20         4         207,002         1         1           29         5         2871,583         [29, 32, 120]           29         6         2868,371         [29, 32, 120]           29         7         2865,083         [29, 32, 120]           29         8         2861,64         [29, 32, 120]           29         9         2858,205         [29, 32, 120]           29         10         2854,696         [29, 32, 120, 127]           29         11         2851,115         [29, 32, 120, 127]           29         12         2847,461         [29, 32, 120, 127]           29         13         2843,737         [29, 32, 120]           29         14         2839,941         [29, 32, 120]           29         15         2836,075         [29, 32, 120]           29         16         2832,139         [29, 32, 120]           29         17         2828,134         [29, 32, 120]           29         12         2815,712         [29, 32, 120]           29         21         2814,4737         [32, 120]           29         22         2807,096         [32, 120]           29         24         2798	29	4	2874 802	[32, 120]
20         6         2868,371         [29, 32, 120]           29         7         2865,083         [29, 32, 120]           29         7         2865,083         [29, 32, 120]           29         8         2861,64         [29, 32, 120]           29         9         2858,205         [29, 32, 120]           29         10         2854,696         [29, 32, 120, 127]           29         11         2851,115         [29, 32, 120, 127]           29         12         2843,737         [29, 32, 120, 127]           29         13         2843,737         [29, 32, 120]           29         14         2839,941         [29, 32, 120]           29         15         2836,075         [29, 32, 120]           29         16         2832,139         [29, 32, 120]           29         17         2828,134         [29, 32, 120]           29         18         2824,061         [29, 32, 120]           29         12         2817,712         [29, 32, 120]           29         24         2798,299         [32, 120]           29         24         2798,299         [32, 120]           30         4         2826,216 <td>20</td> <td>5</td> <td>2871 583</td> <td>[29, 32, 120]</td>	20	5	2871 583	[29, 32, 120]
23         24         24         24         24         24         24         24         24         24         24         24         24         24         25         32         120         32         32         120         32         32         120         32         32         120         32         32         120         32         32         120         32         120         127         120         121         2851,115         [29, 32, 120, 127]         129         13         2843,737         [29, 32, 120, 127]         129         13         2843,737         [29, 32, 120, 127]         129         14         2839,941         [29, 32, 120]         127]         129         14         2839,941         [29, 32, 120]         129         14         2836,075         [29, 32, 120]         129         14         2836,075         [29, 32, 120]         129         14         2836,075         [29, 32, 120]         129         14         2836,075         [29, 32, 120]         129         12         2819,92         [29, 32, 120]         129         22         2807,096         [32, 120]         129         23         2802,769         [32, 120]         120           29         24         2798,299         [32,	20	6	2868 371	[29, 32, 120]
29         7         2803,003         [29, 32, 120]           29         9         2858,205         [29, 32, 120]           29         10         2854,696         [29, 32, 120]           29         11         2851,115         [29, 32, 120, 127]           29         12         2847,461         [29, 32, 120, 127]           29         13         2843,737         [29, 32, 120, 127]           29         14         2839,941         [29, 32, 120, 127]           29         14         2839,941         [29, 32, 120]           29         15         2836,075         [29, 32, 120]           29         17         2828,134         [29, 32, 120]           29         17         2828,134         [29, 32, 120]           29         18         2824,061         [29, 32, 120]           29         20         2815,712         [29, 32, 120]           29         21         2811,437         [32, 120]           29         22         2807,096         [32, 120]           30         4         2826,216         [32, 120]           30         5         2823,025         [29, 32, 120]           30         6         2819,84<	20	7	2865 083	[29, 32, 120]
20         28001,04         1         1           29         9         2858,205         [29, 32, 120]           29         10         2854,696         [29, 32, 120, 127]           29         12         2847,461         [29, 32, 120, 127]           29         12         2843,737         [29, 32, 120, 127]           29         13         2843,737         [29, 32, 120, 127]           29         14         2839,941         [29, 32, 120]           29         15         2836,075         [29, 32, 120]           29         16         2832,139         [29, 32, 120]           29         17         2828,134         [29, 32, 120]           29         18         2824,061         [29, 32, 120]           29         19         2819,92         [29, 32, 120]           29         20         2815,712         [29, 32, 120]           29         21         2807,096         [32, 120]           29         22         2807,096         [32, 120]           30         4         2826,216         [32, 120]           30         5         2823,025         [29, 32, 120]           30         6         2819,84	29	, 8	2861 64	[29, 32, 120]
20         10         2854,696         [29, 32, 120]           29         11         2851,115         [29, 32, 120, 127]           29         12         2847,461         [29, 32, 120, 127]           29         13         2843,737         [29, 32, 120, 127]           29         14         2839,941         [29, 32, 120, 127]           29         14         2839,941         [29, 32, 120]           29         15         2836,075         [29, 32, 120]           29         16         2832,139         [29, 32, 120]           29         17         2828,134         [29, 32, 120]           29         18         2824,061         [29, 32, 120]           29         19         2819,92         [29, 32, 120]           29         21         2811,437         [32, 120]           29         21         2807,096         [32, 120]           29         24         2798,299         [32, 120]           30         4         2826,216         [32, 120]           30         5         2823,025         [29, 32, 120]           30         6         2819,84         [29, 32, 120]           30         7         2816,584	20	a	2858 205	[29, 32, 120]
29102034,030 $[23, 4, 103]$ 29112851,115 $[29, 32, 120, 127]$ 29122847,461 $[29, 32, 120, 127]$ 29132843,737 $[29, 32, 120, 127]$ 29142839,941 $[29, 32, 120]$ 29152836,075 $[29, 32, 120]$ 29162832,139 $[29, 32, 120]$ 29162832,139 $[29, 32, 120]$ 29172828,134 $[29, 32, 120]$ 29182824,061 $[29, 32, 120]$ 29202815,712 $[29, 32, 120]$ 29202815,712 $[29, 32, 120]$ 29212811,437 $[32, 120]$ 29222807,096 $[32, 120]$ 29242798,299 $[32, 120]$ 3042826,216 $[32, 120]$ 3052823,025 $[29, 32, 120]$ 3062819,84 $[29, 32, 120]$ 3062819,84 $[29, 32, 120]$ 3072816,584 $[29, 32, 120]$ 3072816,584 $[29, 32, 120]$ 30102806,309 $[29, 32, 120]$ 30112802,769 $[29, 32, 120]$ 30122799,082 $[29, 32, 120]$ 30132795,404 $[29, 32, 120]$ 30142791,659 $[29, 32, 120]$ 30142791,659 $[29, 32, 120]$ 30182775,927 $[29, 32, 120]$ 30192	20	10	2854 606	[29, 32, 120]
2911263 1, 113 $[27]$ 127]29122847,461 $[29, 32, 120, 127]$ 29132843,737 $[29, 32, 120, 127]$ 29142839,941 $[29, 32, 120, 127]$ 29152836,075 $[29, 32, 120]$ 29162832,139 $[29, 32, 120]$ 29172828,134 $[29, 32, 120]$ 29172828,134 $[29, 32, 120]$ 29182824,061 $[29, 32, 120]$ 29202815,712 $[29, 32, 120]$ 29212811,437 $[32, 120]$ 29222807,096 $[32, 120]$ 29232802,769 $[32, 120]$ 29242798,299 $[32, 120]$ 3042826,216 $[32, 120]$ 3052823,025 $[29, 32, 120]$ 3062819,84 $[29, 32, 120]$ 3062819,84 $[29, 32, 120]$ 3072816,584 $[29, 32, 120]$ 3072816,584 $[29, 32, 120]$ 30102806,309 $[29, 32, 120]$ 30102806,309 $[29, 32, 120]$ 30112802,769 $[29, 32, 120]$ 30122799,082 $[29, 32, 120]$ 30132795,404 $[29, 32, 120]$ 30142791,659 $[29, 32, 120]$ 30152787,845 $[29, 32, 120]$ 30162783,964 $[29, 32, 120]$ 3016 <t< td=""><td>20</td><td>10</td><td>2054,030</td><td>[29 32 120</td></t<>	20	10	2054,030	[29 32 120
29       12       2847,461       [29, 32, 120, 127]         29       13       2843,737       [29, 32, 120, 127]         29       14       2839,941       [29, 32, 120]         29       15       2836,075       [29, 32, 120]         29       15       2836,075       [29, 32, 120]         29       16       2832,139       [29, 32, 120]         29       17       2828,134       [29, 32, 120]         29       18       2824,061       [29, 32, 120]         29       19       2819,92       [29, 32, 120]         29       20       2815,712       [29, 32, 120]         29       21       2807,096       [32, 120]         29       22       2807,096       [32, 120]         29       24       2798,299       [32, 120]         30       4       2826,216       [32, 120]         30       5       2823,025       [29, 32, 120]         30       6       2819,84       [29, 32, 120]         30       7       2816,584       [29, 32, 120]         30       7       2816,584       [29, 32, 120]         30       10       2806,309       [29, 32, 120]     <	29	11	2001,110	127]
2913 $2843,737$ $[29, 32, 120, 127]$ 2914 $2839,941$ $[29, 32, 120, 127]$ 2915 $2836,075$ $[29, 32, 120]$ 2916 $2832,139$ $[29, 32, 120]$ 2917 $2828,134$ $[29, 32, 120]$ 2918 $2824,061$ $[29, 32, 120]$ 2919 $2819,92$ $[29, 32, 120]$ 2920 $2815,712$ $[29, 32, 120]$ 2920 $2815,712$ $[29, 32, 120]$ 2921 $2802,769$ $[32, 120]$ 2924 $2798,299$ $[32, 120]$ 2924 $2798,299$ $[32, 120]$ 304 $2826,216$ $[32, 120]$ 305 $2823,025$ $[29, 32, 120]$ 306 $2819,84$ $[29, 32, 120]$ 306 $2819,84$ $[29, 32, 120]$ 307 $2816,584$ $[29, 32, 120]$ 308 $2813,177$ $[29, 32, 120]$ 308 $2813,177$ $[29, 32, 120]$ 309 $2809,778$ $[29, 32, 120]$ 3010 $2806,309$ $[29, 32, 120]$ 3011 $2802,769$ $[29, 32, 120]$ 3012 $2799,082$ $[29, 32, 120]$ 3013 $2795,404$ $[29, 32, 120]$ 3014 $2791,659$ $[29, 32, 120]$ 3015 $2787,845$ $[29, 32, 120]$ 3016 $2783,964$ $[29, 32, 120]$ 3018 $2775,927$ $[29, 3$	29	12	2847,461	[29, 32, 120, 127]
29142839,941 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120, 127 \end{bmatrix}$ 29152836,075 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 29162832,139 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 29172828,134 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 29172828,134 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 29182824,061 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 29192819,92 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 29202815,712 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 29212807,096 $\begin{bmatrix} 32, 120 \end{bmatrix}$ 29222807,096 $\begin{bmatrix} 32, 120 \end{bmatrix}$ 29242798,299 $\begin{bmatrix} 32, 120 \end{bmatrix}$ 3042826,216 $\begin{bmatrix} 32, 120 \end{bmatrix}$ 3052823,025 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 3062819,84 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 3062819,84 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 3072816,584 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 3082813,177 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 3082813,177 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 3092809,778 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 30102806,309 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 30112802,769 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 30122799,082 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 30132795,404 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 30142791,659 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 30152787,845 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 30182775,927 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 30202767,706 $\begin{bmatrix} 29, 32, 120 \end{bmatrix}$ 30212763,5 $\begin{bmatrix} 32, 120 \end{bmatrix}$ <td>29</td> <td>13</td> <td>2843,737</td> <td>[29, 32, 120, 127]</td>	29	13	2843,737	[29, 32, 120, 127]
29       15       2836,075       [29, 32, 120]         29       16       2832,139       [29, 32, 120]         29       17       2828,134       [29, 32, 120]         29       19       2819,92       [29, 32, 120]         29       19       2819,92       [29, 32, 120]         29       20       2815,712       [29, 32, 120]         29       20       2815,712       [29, 32, 120]         29       21       2811,437       [32, 120]         29       22       2807,096       [32, 120]         29       24       2798,299       [32, 120]         30       4       2826,216       [32, 120]         30       5       2823,025       [29, 32, 120]         30       6       2819,84       [29, 32, 120]         30       6       2819,84       [29, 32, 120]         30       7       2816,584       [29, 32, 120]         30       8       2813,177       [29, 32, 120]         30       10       2806,309       [29, 32, 120]         30       11       2802,769       [29, 32, 120]         30       11       2802,769       [29, 32, 120]	29	14	2839,941	[29, 32, 120, 127]
29         16         2832,139         [29, 32, 120]           29         17         2828,134         [29, 32, 120]           29         18         2824,061         [29, 32, 120]           29         19         2819,92         [29, 32, 120]           29         20         2815,712         [29, 32, 120]           29         20         2815,712         [29, 32, 120]           29         21         2807,096         [32, 120]           29         22         2807,096         [32, 120]           29         24         2798,299         [32, 120]           30         4         2826,216         [32, 120]           30         5         2823,025         [29, 32, 120]           30         6         2819,84         [29, 32, 120]           30         6         2819,84         [29, 32, 120]           30         7         2816,584         [29, 32, 120]           30         8         2813,177         [29, 32, 120]           30         10         2806,309         [29, 32, 120]           30         12         2799,082         [29, 32, 120]           30         12         2799,084         [29, 32, 1	29	15	2836 <u>,</u> 075	[29, 32, 120]
29       17       2828,134       [29, 32, 120]         29       18       2824,061       [29, 32, 120]         29       19       2819,92       [29, 32, 120]         29       20       2815,712       [29, 32, 120]         29       21       2811,437       [32, 120]         29       21       2802,769       [32, 120]         29       24       2798,299       [32, 120]         30       4       2826,216       [32, 120]         30       4       2826,216       [32, 120]         30       5       2823,025       [29, 32, 120]         30       6       2819,84       [29, 32, 120]         30       6       2819,84       [29, 32, 120]         30       7       2816,584       [29, 32, 120]         30       8       2813,177       [29, 32, 120]         30       9       2809,778       [29, 32, 120]         30       10       2806,309       [29, 32, 120]         30       11       2802,769       [29, 32, 120]         30       12       2799,082       [29, 32, 120]         30       12       2799,084       [29, 32, 120]	29	16	2832,139	[29, 32, 120]
29       18       2824,061       [29, 32, 120]         29       19       2819,92       [29, 32, 120]         29       20       2815,712       [29, 32, 120]         29       21       2811,437       [32, 120]         29       22       2807,096       [32, 120]         29       23       2802,769       [32, 120]         29       24       2798,299       [32, 120]         30       4       2826,216       [32, 120]         30       5       2823,025       [29, 32, 120]         30       6       2819,84       [29, 32, 120]         30       6       2819,84       [29, 32, 120]         30       7       2816,584       [29, 32, 120]         30       8       2813,177       [29, 32, 120]         30       9       2809,778       [29, 32, 120]         30       10       2806,309       [29, 32, 120]         30       11       2802,769       [29, 32, 120]         30       12       2799,082       [29, 32, 120]         30       12       2799,082       [29, 32, 120]         30       13       2787,845       [29, 32, 120]	29	17	2828,134	[29, 32, 120]
2919 $2819,92$ $[29, 32, 120]$ 2920 $2815,712$ $[29, 32, 120]$ 2921 $2811,437$ $[32, 120]$ 2922 $2807,096$ $[32, 120]$ 2923 $2802,769$ $[32, 120]$ 2924 $2798,299$ $[32, 120]$ 304 $2826,216$ $[32, 120]$ 305 $2823,025$ $[29, 32, 120]$ 306 $2819,84$ $[29, 32, 120]$ 306 $2819,84$ $[29, 32, 120]$ 307 $2816,584$ $[29, 32, 120]$ 308 $2813,177$ $[29, 32, 120]$ 308 $2813,177$ $[29, 32, 120]$ 309 $2809,778$ $[29, 32, 120]$ 3010 $2806,309$ $[29, 32, 120]$ 3011 $2802,769$ $[29, 32, 120]$ 3012 $2799,082$ $[29, 32, 120]$ 3013 $2795,404$ $[29, 32, 120]$ 3014 $2791,659$ $[29, 32, 120]$ 3015 $2787,845$ $[29, 32, 120]$ 3016 $2783,964$ $[29, 32, 120]$ 3017 $2780,017$ $[29, 32, 120]$ 3018 $2775,927$ $[29, 32, 120]$ 3019 $2771,849$ $[29, 32, 120]$ 3020 $2767,706$ $[29, 32, 120]$ 3021 $2763,5$ $[32, 120]$ 3022 $2759,154$ $[32, 120]$ 3023 $2754,821$ $[32, 120]$ 30	29	18	2824,061	[29, 32, 120]
2920 $2815,712$ $[29, 32, 120]$ 2921 $2811,437$ $[32, 120]$ 2922 $2807,096$ $[32, 120]$ 2923 $2802,769$ $[32, 120]$ 2924 $2798,299$ $[32, 120]$ 304 $2826,216$ $[32, 120]$ 305 $2823,025$ $[29, 32, 120]$ 306 $2819,84$ $[29, 32, 120]$ 306 $2819,84$ $[29, 32, 120]$ 307 $2816,584$ $[29, 32, 120]$ 308 $2813,177$ $[29, 32, 120]$ 308 $2813,177$ $[29, 32, 120]$ 309 $2809,778$ $[29, 32, 120]$ 3010 $2806,309$ $[29, 32, 120]$ 3011 $2802,769$ $[29, 32, 120]$ 3012 $2799,082$ $[29, 32, 120]$ 3013 $2795,404$ $[29, 32, 120]$ 3014 $2791,659$ $[29, 32, 120]$ 3015 $2787,845$ $[29, 32, 120]$ 3016 $2783,964$ $[29, 32, 120]$ 3017 $2780,017$ $[29, 32, 120]$ 3018 $2775,927$ $[29, 32, 120]$ 3019 $2771,849$ $[29, 32, 120]$ 3021 $2763,5$ $[32, 120]$ 3022 $2759,154$ $[32, 120]$ 3023 $2754,821$ $[32, 120]$ 3024 $2750,351$ $[32, 120]$ 3024 $2750,351$ $[32, 120]$ 31 <t< td=""><td>29</td><td>19</td><td>2819,92</td><td>[29, 32, 120]</td></t<>	29	19	2819,92	[29, 32, 120]
2921 $2811, 437$ $[32, 120]$ 2922 $2807, 096$ $[32, 120]$ 2923 $2802, 769$ $[32, 120]$ 2924 $2798, 299$ $[32, 120]$ 304 $2826, 216$ $[32, 120]$ 305 $2823, 025$ $[29, 32, 120]$ 306 $2819, 84$ $[29, 32, 120]$ 306 $2819, 84$ $[29, 32, 120]$ 307 $2816, 584$ $[29, 32, 120]$ 308 $2813, 177$ $[29, 32, 120]$ 308 $2813, 177$ $[29, 32, 120]$ 309 $2809, 778$ $[29, 32, 120]$ 3010 $2806, 309$ $[29, 32, 120]$ 3011 $2802, 769$ $[29, 32, 120]$ 3012 $2799, 082$ $[29, 32, 120]$ 3013 $2795, 404$ $[29, 32, 120]$ 3014 $2791, 659$ $[29, 32, 120]$ 3015 $2787, 845$ $[29, 32, 120]$ 3015 $2787, 845$ $[29, 32, 120]$ 3016 $2783, 964$ $[29, 32, 120]$ 3018 $2775, 927$ $[29, 32, 120]$ 3019 $2771, 849$ $[29, 32, 120]$ 3021 $2763, 5$ $[32, 120]$ 3022 $2759, 154$ $[32, 120]$ 3023 $2754, 821$ $[32, 120]$ 3024 $2750, 351$ $[32, 120]$ 3024 $2750, 351$ $[32, 120]$ 314 $2777, 701$ $[32, 120]$ <td>29</td> <td>20</td> <td>2815,712</td> <td>[29, 32, 120]</td>	29	20	2815,712	[29, 32, 120]
2922 $2807,096$ $[32,120]$ 2923 $2802,769$ $[32,120]$ 2924 $2798,299$ $[32,120]$ 304 $2826,216$ $[32,120]$ 305 $2823,025$ $[29,32,120]$ 306 $2819,84$ $[29,32,120]$ 306 $2819,84$ $[29,32,120]$ 307 $2816,584$ $[29,32,120]$ 308 $2813,177$ $[29,32,120]$ 308 $2813,177$ $[29,32,120]$ 309 $2809,778$ $[29,32,120]$ 3010 $2806,309$ $[29,32,120]$ 3011 $2802,769$ $[29,32,120]$ 3012 $2799,082$ $[29,32,120]$ 3013 $2795,404$ $[29,32,120]$ 3014 $2791,659$ $[29,32,120]$ 3015 $2787,845$ $[29,32,120]$ 3015 $2787,845$ $[29,32,120]$ 3016 $2783,964$ $[29,32,120]$ 3017 $2780,017$ $[29,32,120]$ 3018 $2775,927$ $[29,32,120]$ 3019 $2771,849$ $[29,32,120]$ 3020 $2767,706$ $[29,32,120]$ 3021 $2763,5$ $[32,120]$ 3022 $2759,154$ $[32,120]$ 3023 $2754,821$ $[32,120]$ 3024 $2750,351$ $[32,120]$ 3024 $2750,351$ $[32,120]$ 314 $2777,701$ $[32,120]$ </td <td>29</td> <td>21</td> <td>2811,437</td> <td>[32, 120]</td>	29	21	2811,437	[32, 120]
2923 $2802,769$ $[32, 120]$ 2924 $2798,299$ $[32, 120]$ 304 $2826,216$ $[32, 120]$ 305 $2823,025$ $[29, 32, 120]$ 306 $2819,84$ $[29, 32, 120]$ 306 $2819,84$ $[29, 32, 120]$ 307 $2816,584$ $[29, 32, 120]$ 308 $2813,177$ $[29, 32, 120]$ 309 $2809,778$ $[29, 32, 120]$ 3010 $2806,309$ $[29, 32, 120]$ 3010 $2802,769$ $[29, 32, 120]$ 3011 $2802,769$ $[29, 32, 120]$ 3012 $2799,082$ $[29, 32, 120]$ 3012 $2799,082$ $[29, 32, 120]$ 3013 $2795,404$ $[29, 32, 120]$ 3014 $2791,659$ $[29, 32, 120]$ 3015 $2787,845$ $[29, 32, 120]$ 3015 $2787,845$ $[29, 32, 120]$ 3016 $2783,964$ $[29, 32, 120]$ 3018 $2775,927$ $[29, 32, 120]$ 3019 $2771,849$ $[29, 32, 120]$ 3021 $2763,5$ $[32, 120]$ 3022 $2759,154$ $[32, 120]$ 3023 $2754,821$ $[32, 120]$ 3024 $2750,351$ $[32, 120]$ 3024 $2750,351$ $[32, 120]$ 314 $2777,701$ $[32, 120]$ 315 $2774,618$ $[29, 32, 120]$ <td>29</td> <td>22</td> <td>2807,096</td> <td>[32, 120]</td>	29	22	2807,096	[32, 120]
29242798,299 $[32, 120]$ 3042826,216 $[32, 120]$ 3052823,025 $[29, 32, 120]$ 3062819,84 $[29, 32, 120]$ 3072816,584 $[29, 32, 120]$ 3082813,177 $[29, 32, 120]$ 3082813,177 $[29, 32, 120]$ 3092809,778 $[29, 32, 120]$ 30102806,309 $[29, 32, 120]$ 30112802,769 $[29, 32, 120]$ 30122799,082 $[29, 32, 120]$ 30122795,404 $[29, 32, 120]$ 30132795,404 $[29, 32, 120]$ 30142791,659 $[29, 32, 120]$ 30152787,845 $[29, 32, 120]$ 30162783,964 $[29, 32, 120]$ 30172780,017 $[29, 32, 120]$ 30182775,927 $[29, 32, 120]$ 30182775,927 $[29, 32, 120]$ 30202767,706 $[29, 32, 120]$ 30212763,5 $[32, 120]$ 30222759,154 $[32, 120]$ 30232754,821 $[32, 120]$ 30242750,351 $[32, 120]$ 3142777,701 $[32, 120]$ 3152774,618 $[29, 32, 120]$	29	23	2802,769	[32, 120]
3042826,216 $[32, 120]$ 3052823,025 $[29, 32, 120]$ 3062819,84 $[29, 32, 120]$ 3072816,584 $[29, 32, 120]$ 3082813,177 $[29, 32, 120]$ 3092809,778 $[29, 32, 120]$ 3092809,778 $[29, 32, 120]$ 30102806,309 $[29, 32, 120]$ 30112802,769 $[29, 32, 120, 127]$ 30122799,082 $[29, 32, 120, 127]$ 30122799,082 $[29, 32, 120, 127]$ 30132795,404 $[29, 32, 120, 127]$ 30142791,659 $[29, 32, 120, 127]$ 30152787,845 $[29, 32, 120]$ 30162783,964 $[29, 32, 120]$ 30172780,017 $[29, 32, 120]$ 30182775,927 $[29, 32, 120]$ 30192771,849 $[29, 32, 120]$ 30202767,706 $[29, 32, 120]$ 30212763,5 $[32, 120]$ 30222759,154 $[32, 120]$ 30232754,821 $[32, 120]$ 30242750,351 $[32, 120]$ 3142777,701 $[32, 120]$ 3152774,618 $[29, 32, 120]$	29	24	2798,299	[32, 120]
30 $7$ $2020, 210$ $1$ $1$ $30$ $5$ $2823, 025$ $[29, 32, 120]$ $30$ $6$ $2819, 84$ $[29, 32, 120]$ $30$ $7$ $2816, 584$ $[29, 32, 120]$ $30$ $8$ $2813, 177$ $[29, 32, 120]$ $30$ $8$ $2813, 177$ $[29, 32, 120]$ $30$ $9$ $2809, 778$ $[29, 32, 120]$ $30$ $9$ $2806, 309$ $[29, 32, 120]$ $30$ $10$ $2806, 309$ $[29, 32, 120]$ $30$ $11$ $2802, 769$ $[29, 32, 120]$ $30$ $12$ $2799, 082$ $[29, 32, 120]$ $30$ $12$ $2799, 082$ $[29, 32, 120]$ $30$ $13$ $2795, 404$ $[29, 32, 120]$ $30$ $14$ $2791, 659$ $[29, 32, 120]$ $30$ $14$ $2791, 659$ $[29, 32, 120]$ $30$ $15$ $2787, 845$ $[29, 32, 120]$ $30$ $15$ $2787, 845$ $[29, 32, 120]$ $30$ $16$ $2783, 964$ $[29, 32, 120]$ $30$ $18$ $2775, 927$ $[29, 32, 120]$ $30$ $19$ $2771, 849$ $[29, 32, 120]$ $30$ $21$ $2763, 5$ $[32, 120]$ $30$ $22$ $2759, 154$ $[32, 120]$ $30$ $23$ $2754, 821$ $[32, 120]$ $30$ $24$ $2750, 351$ $[32, 120]$ $30$ $24$ $2750, 351$ $[32, 120]$ $30$ $24$ $2750, 351$ $[32, 120]$ $31$ <	30	4	2826 216	[32, 120]
30 $6$ $2819,84$ $[29, 32, 120]$ $30$ $7$ $2816,584$ $[29, 32, 120]$ $30$ $7$ $2816,584$ $[29, 32, 120]$ $30$ $8$ $2813,177$ $[29, 32, 120]$ $30$ $9$ $2809,778$ $[29, 32, 120]$ $30$ $10$ $2806,309$ $[29, 32, 120]$ $30$ $10$ $2802,769$ $[29, 32, 120]$ $30$ $11$ $2802,769$ $[29, 32, 120]$ $30$ $12$ $2799,082$ $[29, 32, 120]$ $30$ $12$ $2799,082$ $[29, 32, 120]$ $30$ $13$ $2795,404$ $[29, 32, 120]$ $30$ $14$ $2791,659$ $[29, 32, 120]$ $30$ $14$ $2791,659$ $[29, 32, 120]$ $30$ $15$ $2787,845$ $[29, 32, 120]$ $30$ $15$ $2787,845$ $[29, 32, 120]$ $30$ $16$ $2783,964$ $[29, 32, 120]$ $30$ $18$ $2775,927$ $[29, 32, 120]$ $30$ $19$ $2771,849$ $[29, 32, 120]$ $30$ $21$ $2763,5$ $[32, 120]$ $30$ $22$ $2759,154$ $[32, 120]$ $30$ $23$ $2754,821$ $[32, 120]$ $30$ $24$ $2750,351$ $[32, 120]$ $30$ $24$ $2750,351$ $[32, 120]$ $31$ $4$ $2777,701$ $[32, 120]$ $31$ $5$ $2774,618$ $[29, 32, 120]$	30	5	2823 025	[29, 32, 120]
3072816,584[29, 32, 120]3082813,177[29, 32, 120]3092809,778[29, 32, 120]30102806,309[29, 32, 120]30102802,769[29, 32, 120]30112802,769[29, 32, 120]30122799,082[29, 32, 120]30132795,404[29, 32, 120]30132795,404[29, 32, 120, 127]30142791,659[29, 32, 120, 127]30152787,845[29, 32, 120]30162783,964[29, 32, 120]30172780,017[29, 32, 120]30182775,927[29, 32, 120]30192771,849[29, 32, 120]30202767,706[29, 32, 120]30212763,5[32, 120]30222759,154[32, 120]30232754,821[32, 120]30242750,351[32, 120]3142777,701[32, 120]3152774,618[29, 32, 120]	30	6	2819 84	[29, 32, 120]
30 $2010,304$ $12010,304$ $12012$ $30$ $8$ $2813,177$ $[29,32,120]$ $30$ $9$ $2809,778$ $[29,32,120]$ $30$ $10$ $2806,309$ $[29,32,120]$ $30$ $11$ $2802,769$ $[29,32,120]$ $30$ $11$ $2802,769$ $[29,32,120]$ $30$ $12$ $2799,082$ $[29,32,120]$ $30$ $12$ $2799,082$ $[29,32,120]$ $30$ $13$ $2795,404$ $[29,32,120]$ $30$ $14$ $2791,659$ $[29,32,120]$ $30$ $14$ $2791,659$ $[29,32,120]$ $30$ $15$ $2787,845$ $[29,32,120]$ $30$ $15$ $2787,845$ $[29,32,120]$ $30$ $16$ $2783,964$ $[29,32,120]$ $30$ $18$ $2775,927$ $[29,32,120]$ $30$ $19$ $2771,849$ $[29,32,120]$ $30$ $21$ $2763,5$ $[32,120]$ $30$ $21$ $2763,5$ $[32,120]$ $30$ $22$ $2759,154$ $[32,120]$ $30$ $23$ $2754,821$ $[32,120]$ $30$ $24$ $2750,351$ $[32,120]$ $30$ $24$ $2777,701$ $[32,120]$ $31$ $4$ $2777,701$ $[32,120]$ $31$ $5$ $2774,618$ $[29,32,120]$	30	7	2816 584	[29, 32, 120]
30 $9$ $2809,778$ $[29, 32, 120]$ $30$ $10$ $2806,309$ $[29, 32, 120]$ $30$ $11$ $2802,769$ $[29, 32, 120]$ $30$ $11$ $2802,769$ $[29, 32, 120]$ $30$ $12$ $2799,082$ $[29, 32, 120]$ $30$ $12$ $2799,082$ $[29, 32, 120]$ $30$ $13$ $2795,404$ $[29, 32, 120]$ $30$ $14$ $2791,659$ $[29, 32, 120]$ $30$ $14$ $2791,659$ $[29, 32, 120]$ $30$ $15$ $2787,845$ $[29, 32, 120]$ $30$ $16$ $2783,964$ $[29, 32, 120]$ $30$ $16$ $2783,964$ $[29, 32, 120]$ $30$ $18$ $2775,927$ $[29, 32, 120]$ $30$ $19$ $2771,849$ $[29, 32, 120]$ $30$ $19$ $2771,849$ $[29, 32, 120]$ $30$ $20$ $2767,706$ $[29, 32, 120]$ $30$ $21$ $2763,5$ $[32, 120]$ $30$ $22$ $2759,154$ $[32, 120]$ $30$ $23$ $2754,821$ $[32, 120]$ $30$ $24$ $2750,351$ $[32, 120]$ $30$ $24$ $2777,701$ $[32, 120]$ $31$ $4$ $2777,701$ $[32, 120]$ $31$ $5$ $2774,618$ $[29, 32, 120]$	30	, 8	2813 177	[29, 32, 120]
30302003, 770 $(2, 32, 120)$ 30102806,309 $[29, 32, 120]$ 30112802,769 $[29, 32, 120, 127]$ 30122799,082 $[29, 32, 120, 127]$ 30132795,404 $[29, 32, 120, 127]$ 30142791,659 $[29, 32, 120, 127]$ 30152787,845 $[29, 32, 120]$ 30152787,845 $[29, 32, 120]$ 30162783,964 $[29, 32, 120]$ 30172780,017 $[29, 32, 120]$ 30182775,927 $[29, 32, 120]$ 30192771,849 $[29, 32, 120]$ 30202767,706 $[29, 32, 120]$ 30212763,5 $[32, 120]$ 30222759,154 $[32, 120]$ 30232754,821 $[32, 120]$ 30242750,351 $[32, 120]$ 3142777,701 $[32, 120]$ 3152774,618 $[29, 32, 120]$	30 30	a	2800 778	[29, 32, 120]
30       10       2000,303 $[20, 32, 120, 127]$ 30       11       2802,769 $[29, 32, 120, 127]$ 30       12       2799,082 $[29, 32, 120, 127]$ 30       13       2795,404 $[29, 32, 120, 127]$ 30       14       2791,659 $[29, 32, 120, 127]$ 30       15       2787,845 $[29, 32, 120]$ 30       15       2787,845 $[29, 32, 120]$ 30       16       2783,964 $[29, 32, 120]$ 30       16       2783,964 $[29, 32, 120]$ 30       17       2780,017 $[29, 32, 120]$ 30       18       2775,927 $[29, 32, 120]$ 30       19       2771,849 $[29, 32, 120]$ 30       19       2767,706 $[29, 32, 120]$ 30       20       2767,706 $[29, 32, 120]$ 30       21       2763,5 $[32, 120]$ 30       22       2759,154 $[32, 120]$ 30       23       2754,821 $[32, 120]$ 30       24       2750,351 $[32, 120]$ 30       24	30	10	2003,770	[29, 32, 120]
3011 $2802,769$ $127$ 3012 $2799,082$ $[29, 32, 120]$ 3013 $2795,404$ $[29, 32, 120, 127]$ 3014 $2791,659$ $[29, 32, 120, 127]$ 3015 $2787,845$ $[29, 32, 120]$ 3016 $2783,964$ $[29, 32, 120]$ 3016 $2783,964$ $[29, 32, 120]$ 3017 $2780,017$ $[29, 32, 120]$ 3018 $2775,927$ $[29, 32, 120]$ 3019 $2771,849$ $[29, 32, 120]$ 3020 $2767,706$ $[29, 32, 120]$ 3021 $2763,5$ $[32, 120]$ 3022 $2759,154$ $[32, 120]$ 3023 $2754,821$ $[32, 120]$ 3024 $2750,351$ $[32, 120]$ 314 $2777,701$ $[32, 120]$ 315 $2774,618$ $[29, 32, 120]$	20	10	2000,309	[29, 32, 120]
30       12       2799,082       [29, 32, 120]         30       13       2795,404       [29, 32, 120, 127]         30       14       2791,659       [29, 32, 120, 127]         30       15       2787,845       [29, 32, 120]         30       16       2783,964       [29, 32, 120]         30       16       2783,964       [29, 32, 120]         30       17       2780,017       [29, 32, 120]         30       17       2780,017       [29, 32, 120]         30       18       2775,927       [29, 32, 120]         30       19       2771,849       [29, 32, 120]         30       20       2767,706       [29, 32, 120]         30       21       2763,5       [32, 120]         30       22       2759,154       [32, 120]         30       23       2754,821       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         31       4       2777,701       [32, 120]         31       5       2774,618       [29, 32, 120]	30	11	2002,709	127]
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	30	12	2799,082	[29, 32, 120]
30       14       2791,659       [29, 32, 120, 127]         30       15       2787,845       [29, 32, 120]         30       16       2783,964       [29, 32, 120]         30       17       2780,017       [29, 32, 120]         30       17       2780,017       [29, 32, 120]         30       18       2775,927       [29, 32, 120]         30       19       2771,849       [29, 32, 120]         30       20       2767,706       [29, 32, 120]         30       21       2763,5       [32, 120]         30       22       2759,154       [32, 120]         30       23       2754,821       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         31       4       2777,701       [32, 120]         31       5       2774,618       [29, 32, 120]	30	13	2795,404	[29, 32, 120, 127]
30       15       2787,845       [29, 32, 120]         30       16       2783,964       [29, 32, 120]         30       17       2780,017       [29, 32, 120]         30       18       2775,927       [29, 32, 120]         30       19       2771,849       [29, 32, 120]         30       19       2771,849       [29, 32, 120]         30       20       2767,706       [29, 32, 120]         30       21       2763,5       [32, 120]         30       22       2759,154       [32, 120]         30       23       2754,821       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         31       4       2777,701       [32, 120]         31       5       2774,618       [29, 32, 120]	30	14	2791,659	[29, 32, 120, 127]
30       16       2783,964       [29, 32, 120]         30       17       2780,017       [29, 32, 120]         30       18       2775,927       [29, 32, 120]         30       19       2771,849       [29, 32, 120]         30       19       2767,706       [29, 32, 120]         30       20       2767,706       [29, 32, 120]         30       21       2763,5       [32, 120]         30       22       2759,154       [32, 120]         30       23       2754,821       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         31       4       2777,701       [32, 120]         31       5       2774,618       [29, 32, 120]	30	15	2787,845	[29, 32, 120]
30       17       2780,017       [29, 32, 120]         30       18       2775,927       [29, 32, 120]         30       19       2771,849       [29, 32, 120]         30       19       2767,706       [29, 32, 120]         30       20       2767,706       [29, 32, 120]         30       21       2763,5       [32, 120]         30       22       2759,154       [32, 120]         30       23       2754,821       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         31       4       2777,701       [32, 120]         31       5       2774,618       [29, 32, 120]	30	16	2783,964	[29, 32, 120]
30       18       2775,927       [29, 32, 120]         30       19       2771,849       [29, 32, 120]         30       20       2767,706       [29, 32, 120]         30       21       2763,5       [32, 120]         30       22       2759,154       [32, 120]         30       23       2754,821       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         31       4       2777,701       [32, 120]         31       5       2774,618       [29, 32, 120]	30	17	2780,017	[29, 32, 120]
30       19       2771,849       [29, 32, 120]         30       20       2767,706       [29, 32, 120]         30       21       2763,5       [32, 120]         30       22       2759,154       [32, 120]         30       23       2754,821       [32, 120]         30       23       2754,821       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         31       4       2777,701       [32, 120]         31       5       2774,618       [29, 32, 120]	30	18	2775,927	[29, 32, 120]
30       20       2767,706       [29, 32, 120]         30       21       2763,5       [32, 120]         30       22       2759,154       [32, 120]         30       23       2754,821       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         31       4       2777,701       [32, 120]         31       5       2774,618       [29, 32, 120]	30	19	2771,849	[29, 32, 120]
30       21       2763,5       [32, 120]         30       22       2759,154       [32, 120]         30       23       2754,821       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         31       4       2777,701       [32, 120]         31       5       2774,618       [29, 32, 120]	30	20	2767,706	[29, 32, 120]
30       22       2759,154       [32, 120]         30       23       2754,821       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         31       4       2777,701       [32, 120]         31       5       2774,618       [29, 32, 120]	30	21	2763,5	[32, 120]
30       23       2754,821       [32, 120]         30       24       2750,351       [32, 120]         31       4       2777,701       [32, 120]         31       5       2774,618       [29, 32, 120]	30	22	2759,154	[32, 120]
30       24       2750,351       [32, 120]         31       4       2777,701       [32, 120]         31       5       2774,618       [29, 32, 120]	30	23	2754,821	[32, 120]
31         4         2777,701         [32, 120]           31         5         2774,618         [29, 32, 120]		04	0750 054	[32 120]
31 5 2774,618 <sup>[29, 32, 120]</sup>	30	24	2750,351	[02, 120]
	30 31	24 4	2750,351	[32, 120]

V	J	cm <sup>-1</sup>	
31	6	2771,465	[29, 32, 120]
31	7	2768,166	[29, 32, 120]
31	8	2764,875	[29, 32, 120]
31	9	2761,515	[29, 32, 120]
31	10	2758,012	[29, 32, 120]
31	11	2754,517	[29, 32, 120]
31	12	2750,956	[29, 32, 120, 127]
31	13	2747,253	[29, 32, 120]
31	14	2743,559	[29, 32, 120, 127]
31	15	2739,726	[29, 32, 120]
31	16	2735,903	[29, 32, 120]
31	17	2731,942	[29, 32, 120]
31	18	2727,992	[29, 32, 120]
31	19	2723,905	[29, 32, 120]
31	20	2719,756	[29, 32, 120]
31	21	2715,547	[32, 120]
31	22	2711,35	[32, 120]
31	23	2707,019	[32, 120]
31	24	2702,63	[32, 120]
32	4	2729.332	[32, 120]
32	5	2726.281	[29, 32, 120]
32	6	2723.089	[29, 32, 120]
32	7	2719.904	[29, 32, 120]
32	8	2716.653	[29, 32, 120]
32	9	2713.262	[29, 32, 120]
32	10	2709.88	[29, 32, 120]
32	11	2706,36	[29, 32, 120, 127]
32	12	2702,849	[29, 32, 120, 127]
32	13	2699,201	[29, 32, 120, 127]
32	14	2695,49	[29, 32, 120]
32	15	2691,718	[29, 32, 120]
32	16	2687,955	[29, 32, 120]
32	17	2684,059	[29, 32, 120]
32	18	2680,103	[29, 32, 120]
32	19	2676,086	[29, 32, 120]
32	20	2671,939	[32, 120]
32	21	2667,805	[32, 120]
32	22	2663,542	[32, 120]
32	23	2659,292	[32, 120]
32	24	2654,914	[32, 120]
33	4	2681,037	[32, 120]
33	5	2678,021	[29, 32, 120]
33	6	2674,87	[29, 32, 120]
33	7	2671,725	[29, 32, 120]
33	8	2668,517	[29, 32, 120]
33	9	2665,174	[29, 32, 120]
33	10	2661,769	[29, 32, 120]
33	11	2658,302	[29, 32, 120]

V	J	cm <sup>-1</sup>	
33	- 12	2654 811	[29, 32, 120]
33	13	2651 254	[29, 32, 120,
55	10	2001,204	127]
33	14	2647,604	[29, 32, 120]
33	15	2643,824	[29, 32, 120]
33	16	2640,055	[29, 32, 120]
33	17	2636,227	[29, 32, 120]
33	18	2632,272	[29, 32, 120]
33	19	2628,259	[29, 32, 120]
33	20	2624,259	[32, 120]
33	21	2620,133	[32, 120]
33	22	2615,952	[32, 120]
33	23	2611,648	[32, 120]
33	24	2607,358	
34	4	2632,826	[32, 120]
34	5	2629,849	[29, 32, 120]
34	6	2626,74	[29, 32, 120]
34	7	2623,639	[29, 32, 120]
34	8	2620,408	[29, 32, 120]
34	9	2617,116	[29, 32, 120]
34	10	2613,764	[29, 32, 120]
34	11	2610,353	[29, 32, 120]
34	12	2606,882	[29, 32, 120, 127]
34	13	2603.353	[29, 32, 120]
34	14	2599,698	[29, 32, 120]
34	15	2596.054	[29, 32, 120]
34	16	2592.285	[29, 32, 120]
34	17	2588,461	[29, 32, 120]
34	18	2584,58	[29, 32, 120]
34	19	2580,579	[32, 120]
34	20	2576,589	[32, 120]
34	21	2572,479	[32, 120]
34	22	2568,317	[32, 120]
34	23	2564,103	[32, 120]
34	24	2559,836	
35	4	2584.714	[32, 120]
35	5	2581,711	[29, 32, 120]
35	6	2578 715	[29, 32, 120]
35	7	2575.594	[29, 32, 120]
35	8	2572,414	[29, 32, 120]
35	9	2569 175	[29, 32, 120]
35	10	2565 879	[29, 32, 120]
35	11	2562,46	[29, 32, 120,
35	12	2559,05	[29, 32, 120]
35	13	2555,519	[29, 32, 120]
35	14	2551,932	[29, 32, 120]
35	15	2548,29	[29, 32, 120]
35	16	2544,529	[32, 120]
35	17	2540.78	[32, 120]
35	18	2536.912	[32, 120]
			1

V	J	cm <sup>-1</sup>	
35	19	2532,992	[32, 120]
35	20	2529 021	[32, 120]
35	21	2524 934	[32, 120]
35	22	2520.86	[32, 120]
35	23	2516 673	[32, 120]
35	24	2512 374	[32, 120]
36 36	1	2536 50	[32, 120]
36	4 5	2533 608	[32, 120]
36	5	2530,090	[29, 32, 120]
36	7	2500,005	[29, 32, 120]
20	/ 0	2527,014	[29, 32, 120]
30	0	2524,400	[29, 32, 120]
30	9	2521,241	[29, 32, 120]
20	10	2517,94	[29, 32, 120]
30 26	10	2014,040	[29, 32, 120]
30	12	2511,230	[20, 02, 120]
30	13	2507,711	[20, 32, 120]
30	14	2504,195	[29, 32, 120]
30	15	2500,563	[23, 32, 120]
30	10	2490,879	[32, 120]
30	17	2493,144	[32, 120]
30	18	2489,296	[32, 120]
36	19	2485,398	[32, 120]
36	20	2481,451	[32, 120]
36	21	2477,455	[32, 120]
36	22	2473,35	
36	23	2469,197	
36	24	2464,997	
37	4	2488,552	
37	5	2485,646	[22, 120]
37	6	2482,683	[32, 120]
37	1	24/9,66/	[32, 120]
37	8	24/6,535	[29, 32, 120]
37	9	2473,35	[29, 32, 120]
37	10	2470,112	[29, 32, 120]
37	11	2466,821	[29, 32, 120]
37	12	2463,418	[29, 32, 120]
37	13	2459,964	[29, 32, 120]
37	14	2456,459	[32, 120]
37	15	2452,904	[32, 120]
37	16	2449,24	[32, 120]
37	17	2445,526	[32, 120]
37	18	2441,764	[32, 120]
37	19	2437,895	[JZ, 120]
37	20	2433,978	
37	21	2430,016	
37	22	2425,948	
37	23	2421,835	
37	24	2417,62	
38	4	2440,513	
38	5	2437,657	

V	J	cm <sup>-1</sup>	
38	6	2434,689	
38	7	2431,729	
38	8	2428,658	
38	9	2425,477	
38	10	2422,304	[32, 120]
38	11	2419,023	[32, 120]
38	12	2415,692	[32, 120]
38	13	2412,254	[32, 120]
38	14	2408,768	[32, 120]
38	15	2405,234	[32, 120]
38	16	2401,595	[32, 120]
38	17	2397,909	[32, 120]
38	18	2394,177	
38	19	2390,4	
38	20	2386,464	
38	21	2382,541	
38	22	2378,517	
38	23	2374,451	
38	24	2370,286	
39	4	2392,459	
39	5	2389,6	

V	J	cm <sup>-1</sup>	
39	6	2386,749	
39	7	2383,733	
39	8	2380,726	
39	9	2377,612	
39	10	2374,451	
39	11	2371,185	
39	12	2367,873	
39	13	2364,513	
39	14	2361,052	
39	15	2357,545	
39	16	2353,994	
39	17	2350,342	
39	18	2346,646	
39	19	2342,853	
39	20	2339,017	
39	21	2335,085	
39	22	2331,111	
39	23	2327,043	
39	24	2322,934	
40	4	2344,391	
40	5	2341,592	

V	J	cm <sup>-1</sup>	
40	6	2338,689	
40	7	2335,794	
40	8	2332,797	
40	9	2329,699	
40	10	2326,555	
40	11	2323,366	
40	12	2320,078	
40	13	2316,745	
40	14	2313,315	
40	15	2309,842	
40	16	2306,326	
40	17	2302,715	
40	18	2299,009	
40	19	2295,315	
40	20	2291,476	
40	21	2287,597	
40	22	2283,678	
40	23	2279,67	
40	24	2275,572	