

Наблюдение резонансной радиационно-столкновительной передачи колебательной энергии в молекулах при лазерном ИК многофотонном возбуждении в двухкомпонентной среде

Г. Н. Макаров¹⁾, А. Н. Петин

Институт спектроскопии РАН, 142190 Троицк, Москва, Россия

Поступила в редакцию 5 сентября 2024 г.

После переработки 18 сентября 2024 г.

Принята к публикации 19 сентября 2024 г.

Представлены результаты исследований по наблюдению резонансной радиационно-столкновительной передачи колебательной энергии между молекулами при их селективном лазерном ИК многофотонном возбуждении в двухкомпонентной среде. Эксперименты проводились с молекулами BCl_3 природного изотопического состава в смеси с оптически активным сенсibilизатором и акцептором радикалов – молекулами CH_3F . Оба типа молекул резонансно поглощали излучение лазера. Наблюдалась резонансная радиационно-столкновительная передача энергии от молекул CH_3F к молекулам $^{10}\text{BCl}_3$. Показано, что указанный процесс приводит к большому увеличению выхода диссоциации молекул $^{10}\text{BCl}_3$ и $^{11}\text{BCl}_3$ по сравнению с выходом диссоциации с нейтральными акцепторами радикалов. Зависимости выходов диссоциации молекул BCl_3 от частоты возбуждающего лазерного излучения показывают структуру, которая хорошо коррелирует со структурой спектра ИК поглощения молекул CH_3F . Описан метод и приведены результаты экспериментов. Обсуждаются условия, при которых реализуется эффективная резонансная радиационно-столкновительная передача колебательной энергии между молекулами при лазерном ИК многофотонном возбуждении.

DOI: 10.31857/S0370274X24100204, EDN: YUPXUU

1. Введение. Процессы передачи энергии между частицами играют важную роль при проведении направленных фотофизических и фотохимических реакций [1–5]. В селективной лазерной ИК фотохимии и фотофизике, включая молекулярное лазерное разделение изотопов, особенно велика роль резонансных радиационно-столкновительных процессов передачи колебательной энергии между молекулами, когда передача энергии происходит одновременно с процессом возбуждения молекул лазером [4–8]. Резонансная передача энергии при этом реализуется за счет того, что молекулы обоих типов одновременно возбуждаются одним и тем же лазером на одной и той же частоте. Такие процессы имеют место при селективном лазерном ИК многофотонном возбуждении и диссоциации молекул с оптически активными сенсibilизаторами – молекулами, которые, как и исследуемые (целевые) молекулы, резонансно поглощают возбуждающее лазерное излучение [9, 10]. Процессы передачи энергии могут приводить к существенному увеличению скорости индуцированных лазером химических реакций, а также к изменению состава образующихся продуктов и парциального соотношения

между ними [2–10]. С другой стороны, они могут также препятствовать проведению направленных реакций и получению желаемых продуктов [2–6, 11, 12].

Передача колебательной энергии от молекул-сенсibilизаторов к исследуемым молекулам во многих случаях используется из-за отсутствия подходящих и мощных лазеров для их возбуждения. Так, на первоначальном этапе исследований по ИК многофотонному возбуждению и диссоциации молекул UF_6 не было мощных лазеров 16-мкм диапазона для возбуждения UF_6 . Поэтому исследования по ИК диссоциации UF_6 проводились с использованием сенсibilизатора SF_6 [13–17]. Молекулы SF_6 использовались также для возбуждения и диссоциации целого ряда других молекул (XeOF_4 [17], SF_5Cl и CF_3I [18], CF_3Cl и $(\text{CF}_3)_3\text{CH}$ [19]).

В качестве сенсibilизатора (донора колебательной энергии) используются молекулы, характеризующиеся большой колебательной теплоемкостью и имеющие интенсивные полосы поглощения в области частот генерации мощных ИК лазеров. Кроме того, желательно, чтобы молекулы-сенсibilизаторы имели более высокую энергию диссоциации, чем исследуемые молекулы. Молекулы SF_6 имеют сильную полосу ИК поглощения в области 10.6-мкм по-

¹⁾e-mail: g.makarov@isan.troitsk.ru

лосы генерации CO_2 -лазера (колебание ν_3 , частота $\approx 948 \text{ см}^{-1}$ [20]). Для возбуждения и диссоциации молекул UF_6 в качестве сенсibilизаторов использовались также и другие молекулы (CF_4 , CF_3Cl , CF_2Cl_2) [14]. Роль сенсibilизаторов состояла в том, чтобы за счет передачи поглощенной ими из лазерного поля энергии возбудить исследуемые молекулы и индуцировать их диссоциацию. Молекулы сенсibilизатора могут и сами сильно возбуждаться лазерным излучением и подвергаться диссоциации. Однако при умеренных плотностях энергии накачки можно реализовать условия, когда исследуемые молекулы подвергаются диссоциации, а молекулы сенсibilизатора – нет [13–17].

В указанных выше работах [13–18] исследуемые молекулы не поглощали лазерное излучение. Они возбуждались за счет передачи энергии от сенсibilизаторов. Недавно были проведены исследования по изотопно-селективному лазерному ИК многофотонному возбуждению молекул с использованием оптически активных сенсibilизаторов – молекул, которые сильно поглощают лазерное излучение на тех же частотах, на которых резонансно возбуждаются исследуемые молекулы [9, 10]. Выполнены также эксперименты по вовлечению молекул, не поглощающих лазерное излучение, в резонанс с лазерным полем за счет использования оптически активных сенсibilизаторов [21, 22].

В условиях, когда исследуемые молекулы и молекулы сенсibilизатора одновременно поглощают излучение лазера, происходит эффективный резонансный столкновительный обмен энергией между молекулами в присутствии лазерного поля, что приводит к сильному возбуждению обоих типов молекул [6–10]. Именно в таких условиях в работах [9, 10] была изучена изотопно-селективная диссоциация молекул $^{11}\text{BCl}_3$ в естественной смеси изотопологов с сенсibilизатором и акцептором радикалов SF_6 . Показано, что использование сенсibilизатора приводит к существенному увеличению эффективности диссоциации молекул $^{11}\text{BCl}_3$. Отсутствие структуры в полосе ИК поглощения колебания ν_3 SF_6 не позволило в работах [9, 10] наглядно продемонстрировать резонансный характер процесса передачи энергии от молекул сенсibilизатора к исследуемым молекулам. В данной работе представлены результаты, которые четко показывают резонансный характер процесса передачи энергии от молекул CH_3F к молекулам $^{10}\text{BCl}_3$. Тем самым установлено, что молекулы CH_3F являются активным сенсibilизатором и акцептором радикалов для эффективной диссоциации молекул $^{10}\text{BCl}_3$. Полученные результаты важны

в плане реализации лазерного разделения изотопов бора на практике.

2. Установка и метод. Экспериментальная установка (рис. 1) включала в себя перестраиваемый по частоте импульсный CO_2 -лазер, формирующую оптику, газовую кювету из нержавеющей стали для облучения исследуемых молекул длиной 112 мм, объемом 24.2 см^3 , с окнами из KBr, калориметрический (ТПИ-2-5) и пирозлектрические (SensorPhysics Model 510) приемники излучения для измерения падающей и прошедшей через кювету энергии. Импульс излучения CO_2 -лазера состоял из переднего пика длительностью около 80 нс по полувысоте и хвостовой части длительностью $\approx 750 \text{ нс}$, в которой содержалась примерно третья часть энергии лазерного импульса. Лазерное излучение фокусировалось

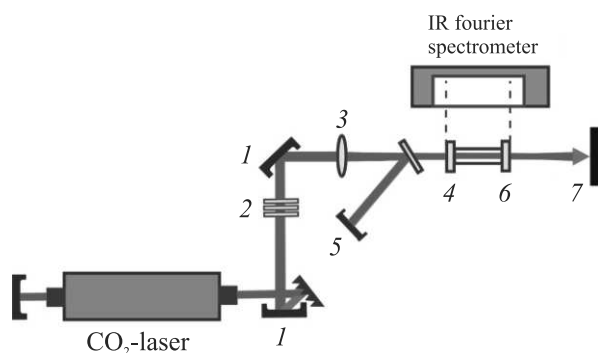
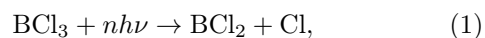


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема экспериментальной установки. 1 – зеркало; 2 – ослабители лазерного излучения; 3 – короткофокусная линза; 4 – делительная пластинка; 5 – приемник излучения; 6 – кювета с облучаемым газом; 7 – поглотитель излучения

в облучаемую кювету линзой из NaCl с фокусным расстоянием $f = 14 \text{ см}$. Размер лазерного пятна в фокальной области линзы был $\approx 0.01 \text{ см}^2$. Энергия излучения лазера в импульсе составляла $\approx 0.4 \text{ Дж}$. Плотность энергии возбуждающего излучения в фокальной области линзы достигала $\approx 40 \text{ Дж/см}^2$. Частота излучения лазера перестраивалась в диапазоне от 973.3 до 986.6 см^{-1} (линии генерации лазера 10R(16)–10R(38)). Для привязки частоты линий излучения CO_2 -лазера использовался оптико-акустический приемник с реперным газом NH_3 .

Лазерная ИК многофотонная диссоциация молекул BCl_3 протекает [2, 3] по схеме:



где $nh\nu$ обозначает количество поглощенных лазерных ИК фотонов.

При облучении молекул на указанных выше частотах генерации лазера продукты диссоциации обогащались изотопом ^{10}B , а остаточный после облучения газ BCl_3 обогащался изотопом ^{11}B . Выходы диссоциации, которые представляют собой доли распавшихся в облучаемом объеме молекул за один лазерный импульс, определялись по изменениям интенсивности полос в ИК спектрах поглощения для каждой из изотопных компонент BCl_3 . Спектры поглощения измерялись с помощью ИК фурье-спектрометра ФТ-801. Выходы диссоциации β_{10} и β_{11} вычислялись по парциальному давлению каждой компоненты $^i\text{BCl}_3$ ($i = 10, 11$) до ($p_{i,0}$) и после (p_i) облучения лазерными импульсами с использованием соотношения

$$\beta_i = \Gamma^{-1}[1 - (p_i/p_{i,0})^{1/N}], \quad (2)$$

где $\Gamma \approx 0.02$ – отношение облучаемого объема ($V_{irr} \approx 0.48 \text{ см}^3$) к объему кюветы ($V_{cell} = 24.2 \text{ см}^3$), N – число импульсов облучения. Селективность $\alpha(^{10}\text{B}/^{11}\text{B})$ определялась как отношение выходов диссоциации молекул $^{10}\text{BCl}_3$ и $^{11}\text{BCl}_3$:

$$\alpha(^{10}\text{B}/^{11}\text{B}) = \beta_{10}/\beta_{11}. \quad (3)$$

Молекулы $^{11}\text{BCl}_3$ и $^{10}\text{BCl}_3$ имеют интенсивные полосы поглощения с центрами соответственно около 954.2 см^{-1} и 993.7 см^{-1} , которые соответствуют асимметричным колебаниям моды ν_3 связи B–Cl [23]. Изотопический сдвиг между указанными полосами поглощения составляет $\Delta\nu_{is} \approx 39.5 \text{ см}^{-1}$ [23]. Полоса поглощения колебания ν_3 молекул CH_3F (частота Q-ветви 1048.61 см^{-1} [24]) примерно на 54.9 см^{-1} смещена в высокочастотную сторону от центра полосы поглощения молекул $^{10}\text{BCl}_3$ (993.7 см^{-1} [23]) (см. рис. 2а–с).

Однако ряд колебательно-вращательных линий R-ветви полосы ИК поглощения молекул CH_3F совпадают с полосой поглощения молекул $^{10}\text{BCl}_3$. При лазерном ИК многофотонном возбуждении CH_3F спектр поглощения возбужденных молекул смещается из-за ангармонизма колебаний в красную сторону, что приводит их к лучшему резонансу с лазерным полем [2, 3, 21, 22, 25]. Это дает возможность при изотопно-селективной диссоциации молекул $^{10}\text{BCl}_3$ использовать молекулы CH_3F одновременно в качестве сенситизатора и акцептора радикалов.

Следует отметить, что молекулы CH_3F , как и молекулы BCl_3 , имеют довольно большую энергию диссоциации ($\text{BCl}_3 - \approx 110 \text{ ккал/моль}$, $\text{CH}_3\text{F} - \approx 112 \text{ ккал/моль}$ по каналу образования $\text{CH}_3 + \text{F}$ и $\approx 110.2 \text{ ккал/моль}$ по каналу образования $\text{CH}_2\text{F} + \text{H}$ [26]). Поэтому при сравнительно высоких плотностях

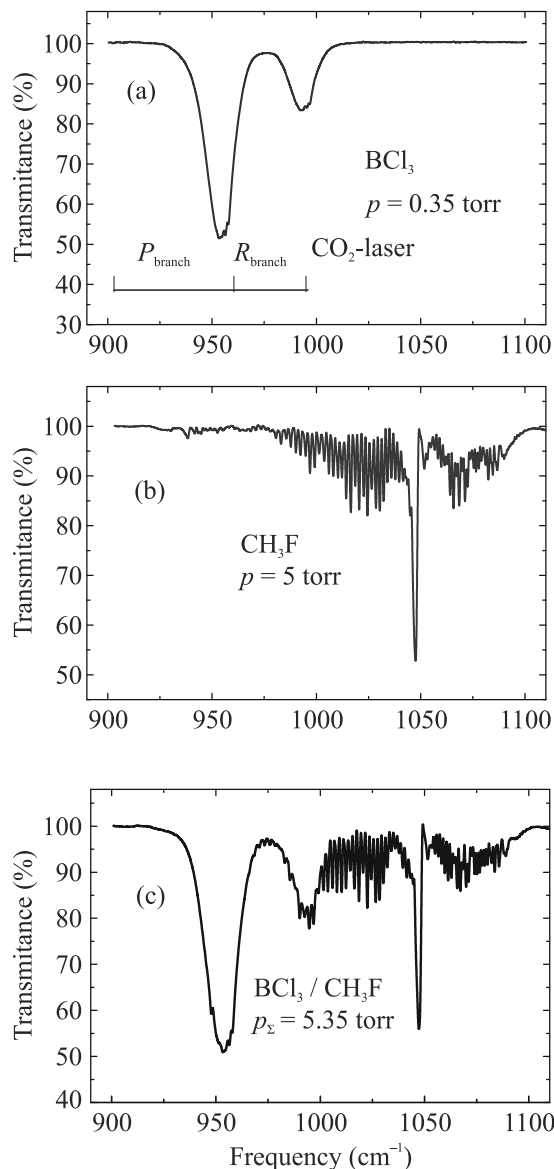


Рис. 2. (Цветной онлайн) (а) – Полосы ИК поглощения колебаний ν_3 молекул $^{11}\text{BCl}_3$ и $^{10}\text{BCl}_3$. Давление BCl_3 в кювете – 0.35 торр, длина кюветы – 11.2 см. (б) – Полоса ИК поглощения колебания ν_3 молекул CH_3F . Давление CH_3F в кювете – 5 торр. (с) – Полосы ИК поглощения колебаний ν_3 молекул $^{11}\text{BCl}_3$, $^{10}\text{BCl}_3$ и CH_3F . Давление BCl_3 в кювете – 0.35 торр, CH_3F – 5 торр

энергии возбуждения могла иметь место диссоциация и молекул CH_3F . Однако молекулы CH_3F характеризуются значительно большей, чем молекулы BCl_3 , величиной ангармонизма колебаний возбуждаемой лазером моды ν_3 ($\Delta\nu_{anh} \approx 3.3 \text{ см}^{-1}$ для BCl_3 [27] и $\Delta\nu_{anh} \approx 15.8 \text{ см}^{-1}$ для CH_3F [28]), что затрудняет процесс их многофотонного возбуждения [2, 3]. При используемых нами плотностях энергии возбуждения ($\Phi \leq 40 \text{ Дж/см}^2$) эффективная диссоциация молекул CH_3F (без BCl_3) не происходила.

3. Результаты и их обсуждение. На рисунке 2а–с приведены спектры линейного ИК поглощения молекул BCl_3 (а), CH_3F (б) и смеси молекул BCl_3 с CH_3F (с) в области частот, на которых молекулы возбуждались лазером, полученные со спектральным разрешением 0.5 см^{-1} с помощью спектрометра ФТ-801. При таком разрешении тонкая структура отдельных линий поглощения молекул CH_3F не разрешалась. В нижней части рис. 2а показаны участки *P*- и *R*-ветвей 10.6-мкм полосы генерации CO_2 -лазера. Частотные отстройки между некоторыми используемыми в экспериментах линиями генерации лазера и линиями поглощения молекул CH_3F составляют $\leq 0.1 \text{ см}^{-1}$ [29]. Наименьшие частотные отстройки реализуются для линий лазера 10R(16), 10R(24), 10R(30) и 10R(36) [29]. При возбуждении смеси молекул $\text{BCl}_3 + \text{CH}_3\text{F}$ можно ожидать проявления структуры в спектральной зависимости выхода диссоциации молекул BCl_3 , хотя многофотонное поглощение молекул в сильном ИК поле лазера может сильно повлиять на спектральную зависимость выхода диссоциации [2, 3]. В экспериментах при возбуждении молекул $\text{BCl}_3 + \text{CH}_3\text{F}$ именно на этих линиях генерации лазера нами наблюдались максимумы в выходах диссоциации молекул BCl_3 .

Рисунок 3 демонстрирует методику измерений. На нем показаны спектры ИК поглощения смеси молекул $\text{BCl}_3 + \text{CH}_3\text{F}$ (при давлении $0.35 + 5.0$ торр) до облучения (1) и после облучения (2) лазером на частоте 983.25 см^{-1} (на линии 10R(32) лазера). Энергия возбуждающего лазерного излучения составляла около 0.3 Дж. Видно, что в результате облучения происходит диссоциация молекул BCl_3 , причем как $^{10}\text{BCl}_3$, так и $^{11}\text{BCl}_3$. При этом большого расхода газа CH_3F не наблюдается. Следует особо отметить, что в результате облучения BCl_3 в смеси с CH_3F образуется продукт BCl_2F . Полоса поглощения колебания ν_4 молекул $^{11}\text{BCl}_2\text{F}$ (частота 993.7 см^{-1} [23]) практически совпадает с полосой поглощения колебания ν_3 молекул $^{10}\text{BCl}_3$ (накладывается на нее) [23]. В результате полученные нами данные по расходу $^{10}\text{BCl}_3$ значительно занижены. Это не давало также возможности определять селективность диссоциации $\alpha(^{10}\text{B}/^{11}\text{B})$ молекул BCl_3 по расходу газа.

Основное внимание в экспериментах было уделено измерению выхода диссоциации молекул BCl_3 по расходу $^{11}\text{BCl}_3$. На полосу поглощения молекул $^{11}\text{BCl}_3$ никакие полосы поглощения продуктов не накладывались. При этом полагалось, что селективность диссоциации молекул BCl_3 в проводимых нами экспериментах сопоставима с селективностью их диссоциации с другими акцепторами радикалов [9, 10],

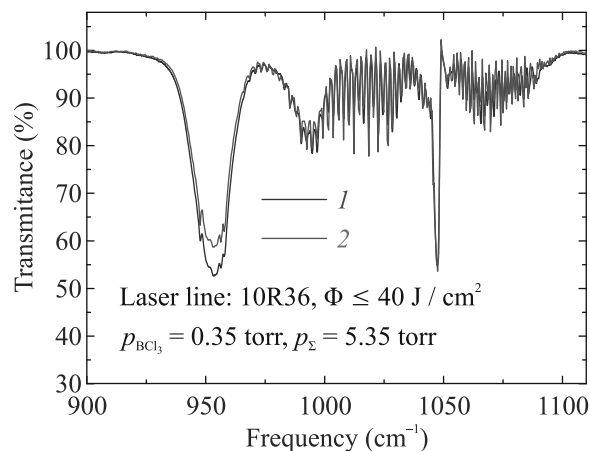


Рис. 3. (Цветной онлайн) Полосы ИК поглощения колебаний ν_3 молекул $^{11}\text{BCl}_3$, $^{10}\text{BCl}_3$ и CH_3F до облучения (1) и после облучения (2) лазером. Исходное давление BCl_3 в кювете – 0.35 торр, CH_3F – 5 торр. Плотность энергии возбуждающего лазерного излучения $\leq 40 \text{ Дж/см}^2$. Число импульсов облучения $N = 900$

и она составляет $\alpha(^{10}\text{B}/^{11}\text{B}) \approx 2.5\text{--}3.5$ (см. работы [30, 31]). Кроме того, на полосу поглощения молекул $^{10}\text{BCl}_3$ накладывались линии поглощения молекул CH_3F (см. рис. 2с и 3), что также ограничивало уменьшение интенсивности полосы поглощения $^{10}\text{BCl}_3$ за счет облучения. Поэтому в представленных нами на рис. 4 и 5 данных выходы диссоциации молекул $^{10}\text{BCl}_3$ определены неточно, они занижены. Данные по выходу диссоциации $^{10}\text{BCl}_3$ приведены нами лишь для качественного сравнения с данными по измерению выхода диссоциации молекул $^{11}\text{BCl}_3$. Для точного определения выхода, а также селективности диссоциации $^{10}\text{BCl}_3$ с использованием сенсibilизатора CH_3F требуется проводить масс-спектрометрический анализ остаточного после облучения газа BCl_3 .

На рисунке 4 приведены зависимости выходов диссоциации молекул $^{11}\text{BCl}_3$ и $^{10}\text{BCl}_3$ от частоты возбуждающего излучения CO_2 -лазера.

Молекулы возбуждались на линиях 10R(16)–10R(38). Энергия лазерного импульса – 0.3 Дж. Облучалась смесь 0.35 торр $\text{BCl}_3 + 5$ торр CH_3F . Установлено, что структура в зависимостях выходов диссоциации молекул $^{10}\text{BCl}_3$ и $^{11}\text{BCl}_3$ от частоты возбуждающего излучения довольно хорошо коррелирует со структурой спектра линейного ИК поглощения колебания ν_3 молекул CH_3F , состоящей из отдельных колебательно-вращательных линий поглощения (рис. 2б). Максимальные выходы диссоциации $^{10}\text{BCl}_3$ и $^{11}\text{BCl}_3$ наблюдаются при возбуждении молекул именно на тех линиях гене-

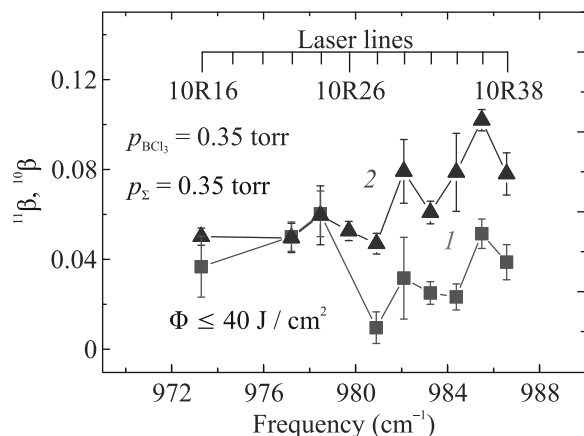


Рис. 4. (Цветной онлайн) Зависимости выходов диссоциации β_{10} (1) и β_{11} (2) от частоты возбуждающего лазерного излучения. Область перестройки линий лазера: 10R(16)–10R(38). Давление газа в кювете: 0.35 торр BCl_3 + 5 торр CH_3F . В верхней части рисунка показано частотное положение линий генерации CO_2 -лазера, на которых возбуждались молекулы

рации лазера (R(24), R(30) и R(36)), для которых реализуются минимальные частотные отстройки от линий поглощения молекул CH_3F [29]. Полученные результаты ясно показывают резонансный характер процесса передачи энергии от молекул CH_3F к молекулам BCl_3 .

На рисунке 5 показаны зависимости выходов диссоциации молекул $^{10}\text{BCl}_3$ и $^{11}\text{BCl}_3$ от давления сенсibilизатора и акцептора радикалов CH_3F . Заметим сразу, что без CH_3F выход диссоциации молекул $^{10}\text{BCl}_3$ больше таковой $^{11}\text{BCl}_3$. Селективность диссоциации $^{10}\text{BCl}_3$ составляла $\alpha(^{10}\text{B}/^{11}\text{B}) \approx 3.5$ (см. рис. 5). С использованием CH_3F , как отмечено выше, измерять селективность мы не могли, поскольку на полосу поглощения молекул $^{10}\text{BCl}_3$ накладываются полосы поглощения продукта $^{11}\text{BCl}_2\text{F}$ и сенсibilизатора. Как видно на рис. 5, в исследуемом диапазоне выходы диссоциации молекул BCl_3 монотонно растут с увеличением давления CH_3F и увеличиваются почти на 2 порядка (в 60–80 раз) при увеличении давления CH_3F примерно от 1.0 до 15 торр. Этот результат существенно отличается от результатов, полученных ранее в случае ИК диссоциации молекул BCl_3 с другими акцепторами радикалов, таких как O_2 , H_2 , NO , HBr , H_2S и другие [30–33], которые не поглощают возбуждающее молекулы BCl_3 лазерное излучение. В случае использования оптически нейтральных акцепторов радикалов выход диссоциации молекул BCl_3 с ростом давления акцепторного газа увеличивался всего в 2–3 раза, а оптимальная величина выхода диссоциации BCl_3 достигалась при давлении

буферных газов 5–10 торр [30–33]. При дальнейшем увеличении давления буферного газа наблюдалась дезактивация возбужденных молекул и уменьшение их выхода диссоциации. Показано также, что в плане получения сравнительно высоких значений селективности и выхода диссоциации молекул BCl_3 хорошим акцептором радикалов является кислород [32, 33]. Полученные нами зависимости выходов диссоциации молекул BCl_3 от частоты возбуждающего

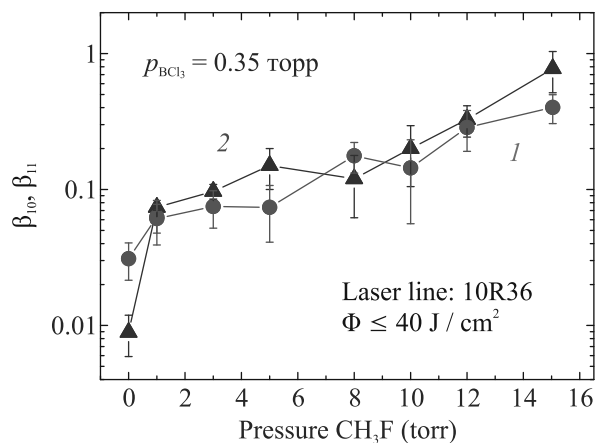


Рис. 5. (Цветной онлайн) Зависимости выходов диссоциации β_{10} (1) и β_{11} (2) от давления сенсibilизатора и акцептора радикалов CH_3F . Давление газа BCl_3 в кювете – 0.35 торр, плотность энергии возбуждающего лазерного излучения ≤ 40 Дж/см²

излучения и от давления сенсibilизатора и акцептора радикалов CH_3F четко показывают, что именно за счет передачи колебательной энергии от молекул CH_3F исследуемым молекулам $^{10}\text{BCl}_3$ происходит существенное увеличение выхода диссоциации BCl_3 . Эффективная передача колебательной энергии от молекул CH_3F к молекулам $^{10}\text{BCl}_3$ происходит ввиду резонансного характера процесса передачи энергии [1, 14, 25, 34]. В результате последующего довольно быстрого столкновительного процесса колебательно-колебательного $V \leftrightarrow V$ обмена энергий между молекулами $^{10}\text{BCl}_3$ и $^{11}\text{BCl}_3$ (константа скорости $p\tau_{V-V} \approx 0.5$ мкс · торр [24]) происходит возбуждение также и не поглощающих лазерное излучение молекул $^{11}\text{BCl}_3$. Константа скорости колебательно-поступательной релаксации молекул BCl_3 в собственном газе составляет $p\tau_{V-T} \approx 5.8$ мкс · торр, а в CH_3F – $p\tau_{V-T} \approx 15.3$ мкс · торр [24]. Поскольку полная длительность возбуждающего лазерного импульса составляла ≈ 0.75 мкс, в проведенных нами экспериментах реализовывался преимущественно радиационно-столкновительный режим возбуждения молекул.

Газообразные продукты, которые образовывались в результате лазерной ИК многофотонной диссоциации молекул BCl_3 в смеси с CH_3F и последующих химических реакций, идентифицировались по их спектрам ИК поглощения в спектральной области примерно от 750 см^{-1} до 3600 см^{-1} . Установлено, что основными конечными продуктами являются $^{10}\text{BCl}_2\text{F}$ и $^{11}\text{BCl}_2\text{F}$, $^{10}\text{BClF}_2$ и $^{11}\text{BClF}_2$, а также HCl .

4. Заключение. Изучена резонансная передача колебательной энергии при изотопно-селективной лазерной ИК многофотонной диссоциации молекул BCl_3 в смеси с оптически активным сенсibilизатором и акцептором радикалов – молекулами CH_3F . Молекулы CH_3F имеют структурированную полосу ИК поглощения, перекрывающуюся с полосой поглощения молекул $^{10}\text{BCl}_3$, что позволяет наблюдать процесс резонансной радиационно-столкновительной передачи колебательной энергии от молекул CH_3F к молекулам $^{10}\text{BCl}_3$.

Показано, что зависимости выходов диссоциации молекул BCl_3 от частоты возбуждающего лазерного излучения имеют структуру, которая хорошо коррелирует со структурой спектра ИК поглощения колебания ν_3 молекул CH_3F . Установлено, что указанный процесс приводит к значительному (более, чем в 5–10 раз) увеличению выхода диссоциации молекул $^{10}\text{BCl}_3$ по сравнению с выходом диссоциации при облучении с нейтральными акцепторами радикалов.

Полученные результаты четко показывают резонансный характер индуцированных мощным ИК лазером процессов передачи энергии от молекул сенсibilизатора CH_3F к исследуемым молекулам $^{10}\text{BCl}_3$ и представляют большой интерес в плане применения лазерных методов для разделения изотопов бора на практике.

Финансирование работы. Исследование выполнено в рамках государственного задания FFUU-2022-0004.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. J. T. Yardley, in *Introduction to Molecular Energy Transfer*, Academic, N.Y. (1980), p. 130.
2. V. N. Bagratashvili, V. S. Letokhov, A. A. Makarov, and E. A. Ryabov, *Multiple Photon Infrared Laser Photophysics and Photochemistry*, Harwood Acad. Publ., Chur (1985).
3. C. D. Cantrell (editor), *Multiple-Photon Excitation and Dissociation of Polyatomic Molecules*, Topics in Current Physics, Springer-Verlag, Berlin (1986), v. 35.
4. Г. Н. Макаров, УФН **192**, 569 (2022).
5. Г. Н. Макаров, УФН **194**, 48 (2024).
6. Г. Н. Макаров, А. Н. Петин, Письма в ЖЭТФ **112**, 226 (2020).
7. Г. Н. Макаров, А. Н. Петин, Квантовая электроника **50**, 1036 (2020).
8. Г. Н. Макаров, А. Н. Петин, ЖЭТФ **159**, 281 (2021).
9. Г. Н. Макаров, А. Н. Петин, Письма в ЖЭТФ **117**, 734 (2023).
10. Г. Н. Макаров, А. Н. Петин, ЖЭТФ **165**, 14 (2024).
11. В. Б. Лаптев, Е. А. Рябов, Квантовая электроника **13**, 2368 (1986).
12. В. Б. Лаптев, Е. А. Рябов, Химическая физика **7**, 165 (1988).
13. R. S. Karve, S. K. Sarkar, K. V. S. Rama Rao, and J. P. Mittal, Chem. Phys. Lett. **78**, 273 (1981).
14. R. S. Karve, S. K. Sarkar, K. V. S. Rama Rao, and J. P. Mittal, Appl. Phys. B **53**, 108 (1991).
15. K. C. Kim, S. Freund, R. K. Sander, D. F. Smith, and W. B. Person, J. Chem. Phys. **78**, 32 (1983).
16. C. Chin, H. Hou, Yi. Bao, and T. Li, Chem. Phys. Lett. **101**, 69 (1983).
17. C. Angelie, M. Cauchetier, and J. Paris, Chem. Phys. **66**, 129 (1982).
18. M. Cauchetier, M. Luce, and C. Angelie, Chem. Phys. Lett. **88**, 146 (1982).
19. В. Н. Баграташвили, В. Н. Буримов, Л. Е. Деев, В. И. Носков, А. П. Свиридов, Квантовая электроника **10**, 1682 (1983).
20. R. S. McDowell, B. J. Krohn, H. Flicker, and M. C. Vasquez, Spectrochim. Acta **42A**, 351 (1986).
21. Г. Н. Макаров, А. Н. Петин, Письма в ЖЭТФ **115**, 292 (2022).
22. В. Б. Лаптев, Г. Н. Макаров, А. Н. Петин, Е. А. Рябов, ЖЭТФ **162**, 60 (2022).
23. D. F. Wolfe and G. L. Humphrey, J. Mol. Struct. **3**, 293 (1969).
24. P. L. Houston, A. V. Nowak, and J. I. Steinfeld, J. Chem. Phys. **58**, 3373 (1973).
25. Г. Н. Макаров, Письма в ЖЭТФ **115**, 703 (2022).
26. В. Н. Кондратьев (ред.), *Энергии разрыва химических связей, потенциалы ионизации и сродство к электрону*, Наука, М. (1974).
27. Н. В. Карлов, Ю. Н. Петров, А. М. Прохоров, О. М. Стельмах, Письма в ЖЭТФ **11**, 220 (1970).
28. A. Owens, A. Yachmenev, J. Kupper, S. N. Yurchenko, and W. Thie, Phys. Chem. Chem. Phys. **21**, 3496 (2018).
29. D. G. Biron, R. J. Temkin, B. Lax, and B. G. Danly, Opt. Lett. **4**, 381 (1979).
30. Ю. Р. Коломийский, Е. А. Рябов, Квантовая электроника **5**, 651 (1978).

- 31. Z. Peiran, Z. Wensen, and Z. Yuying, Chinese J. Lasers **8**(10), 20 (1981).
- 32. Р. В. Амбарцумян, Ю. А. Горохов, В. С. Летохов, Г. Н. Макаров, Е. А. Рябов, Н. В. Чекалин, Квантовая электроника **2**, 2197 (1975).
- 33. Р. В. Амбарцумян, Ю. А. Горохов, В. С. Летохов, Г. Н. Макаров, Е. А. Рябов, Н. В. Чекалин, Квантовая электроника **3**, 802 (1976).
- 34. В. У. Mohan, J. Chem. Phys. **46**, 98 (1967).