Письма в ЖЭТФ, том 117, вып. 10, с. 734 – 739

Увеличение эффективности изотопно-селективной лазерной ИК многофотонной диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ в смеси с сенсибилизатором и акцептором радикалов SF_6

Г. Н. Макаров[1)], *А. Н. Петин*

Институт спектроскопии РАН, 108840 Троицк, Москва, Россия

Поступила в редакцию 29 марта 2022 г.
После переработки 11 апреля 2023 г.
Принята к публикации 11 апреля 2023 г.

Обнаружено сильное увеличение эффективности изотопно-селективной лазерной ИК многофотонной диссоциации (МФД) молекул $^{11}BCl_3$ в естественной смеси с $^{10}BCl_3$ излучением импульсного CO_2-лазера в случае их облучения с сенсибилизатором – молекулами SF_6, которые являются одновременно и акцепторами радикалов – атомов Cl, образующихся при диссоциации молекул BCl_3. Наблюдалось существенное (в несколько раз) увеличение выхода и селективности диссоциации молекул $^{11}BCl_3$, а также значительное уменьшение пороговой плотности энергии диссоциации молекул в случае их облучения с SF_6 по сравнению со случаем облучения без SF_6. Это открывает возможность реализации одночастотной изотопно-селективной диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ несфокусированным лазерным излучением при умеренной ($\approx$ 3–5 Дж/см^2) плотности энергии возбуждения, что важно и актуально в плане практической реализации лазерного метода для разделения изотопов бора.

DOI: 10.31857/S123456782310004X, EDN: clczlz

1. Введение. В последнее время возрос интерес к лазерному разделению изотопов бора [1–4]. Это связано с их применением в важных отраслях промышленности, в медицине [5–7], а также в космических экспериментах [8]. В природе бор содержится в виде двух изотопных модификаций – ^{10}B (около 19.8 %) и ^{11}B (около 80.2 %) [5, 6]. ^{10}B имеет очень большое сечение захвата тепловых нейтронов, около 3837 барн [9] (1 барн равен 10^{-24} см^2). Для большинства нуклидов это сечение близко к единицам или долям барна. Поэтому материалы, обогащенные изотопом ^{10}B (борная кислота, карбид бора и другие соединения) широко применяются в атомной энергетике. Изотоп ^{11}B используется в электронной промышленности как легирующий компонент при производстве полупроводниковых изделий [6, 7]. В связи с этим разработка методов и эффективной технологии разделения изотопов бора являются важной и актуальной задачей.

Наиболее эффективным методом молекулярного лазерного разделения изотопов сегодня считается метод селективной инфракрасной (ИК) многофотонной диссоциации молекул излучением импульсно-периодического CO_2-лазера [10, 11]. Поэтому при реализации технологического процесса разделения изотопов бора целесообразно использовать именно этот метод. Он успешно применялся ранее в технологии лазерного разделения изотопов углерода на практике [12, 13].

Для молекулярного лазерного разделения изотопов с использованием имеющихся эффективных импульсных CO_2-лазеров необходимо, чтобы полосы ИК поглощения выбранных молекул попадали в диапазон генерации CO_2-лазера и обладали сравнительно большим ($\geq 5{-}10$ см$^{-1}$) изотопическим сдвигом. Кроме того, желательно, чтобы эффективная изотопно-селективная диссоциация выбранных молекул осуществлялась при невысокой плотности энергии лазерного излучения.

Одним из наиболее подходящих исходных соединений для лазерного разделения изотопов бора является газообразное химическое соединение BCl_3. Полосы ИК поглощения колебаний ν_3 молекул $^{11}BCl_3$ ($\approx$ 954.2 см$^{-1}$) и $^{10}BCl_3$ ($\approx$ 993.7 см$^{-1}$) [14] попадают в резонанс соответственно с P- и R-ветвями 10.6 мкм полосы генерации CO_2-лазера. Изотопический сдвиг между указанными полосами ИК поглощения молекул $^{11}BCl_3$ и $^{10}BCl_3$ составляет $\Delta\nu_{\rm is} \approx 39.5$ см$^{-1}$ [14]. Именно с использованием BCl_3 была впервые продемонстрирована изотопно-селективная лазерная ИК МФД молекул [15]. В большом числе последующих работ [16–26] была довольно детально изучена изотопно-селективная диссоциация молекул BCl_3 в поле излучения мощного импульсного CO_2-лазера с

[1)]e-mail: gmakarov@isan.troitsk.ru

использованием разных акцепторов радикалов (H_2, NO, H_2S, D_2S, HBr и др.) для подавления процесса ассоциации образующихся при диссоциации молекул BCl_3 радикалов BCl_2 и атомов Cl [16].

Установлено, что в плане получения сравнительно высоких значений селективности и выхода диссоциации молекул BCl_3 довольно хорошим акцептором радикалов является кислород [17–19, 22]. В случае использования кислорода конечными продуктами ИК многофотонной диссоциации молекул BCl_3 являются B_2O_3 и Cl_2 [17]. Твердое соединение B_2O_3 в виде пленки осаждается на стенках и окнах кюветы, в которой облучается газ. Показано [17, 23], что акцепторы радикалов практически не приводят к сколько-нибудь значительному увеличению селективности и выхода диссоциации BCl_3, а также уменьшению порога диссоциации молекул.

В ходе выполненных ранее исследований установлено также, что для эффективной ИК многофотонной диссоциации молекул BCl_3 требуются довольно высокие плотности энергии возбуждающего лазерного излучения ($\Phi \geq 20$ Дж/см^2) [23, 24], что связано, главным образом, с большой энергией связи молекулы (≈ 110 ккал/моль [27]). Поэтому ИК диссоциация молекул возможна только сфокусированными лазерными пучками. Вместе с тем использование сфокусированных лазерных пучков приводит, как правило, к уменьшению изотопической селективности процесса диссоциации молекул [10, 11].

В случае возбуждения молекул BCl_3 одночастотным лазерным излучением селективности диссоциации молекул $^{10}BCl_3$ и $^{11}BCl_3$ составляли соответственно $\alpha(^{10}B/^{11}B) \leq 8$ и $\alpha(^{11}B/^{10}B) \leq 2.5$ [22–24]. При этом выходы диссоциации молекул (в пересчете на облучаемый лазером объем газа в кювете) были небольшими ($\beta_{10} \approx \beta_{11} \leq (2–8) \times 10^{-4}$ [24]). Значительно более высокие селективности и выходы диссоциации молекул BCl_3 ($\alpha(^{10}B/^{11}B) \geq 8$; $\beta_{10} \geq 10\,\%$; $\beta_{11} \geq 20\,\%$) наблюдались в случае их возбуждения двухчастотным ИК лазерным излучением [28, 29]. При этом существенно уменьшался также порог диссоциации молекул (до значений Φ_1 и $\Phi_2 \geq 2–3$ Дж/см^2). Однако реализация технологического процесса лазерного разделения изотопов бора с использованием двухчастотной диссоциации молекул представляется весьма сложной на практике.

В данной работе нами обнаружено, что в случае использования при изотопно-селективной лазерной ИК многофотонной диссоциации BCl_3 в качестве сенсибилизатора и акцептора радикалов молекул SF_6 происходит существенное увеличение эффективности диссоциации молекул $^{11}BCl_3$. Это представляется весьма важным и актуальным при реализации технологического процесса лазерного разделения изотопов бора.

2. Эксперимент. 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 BaF_2, калориметрический (ТПИ-2-5) и пироэлектрический (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 ≈ 750 нс, в которой содержалась примерно третья часть энергии лазерного импульса. Коллимация лазерного пучка в облучаемую кювету производилась длиннофокусной ($f = 1$ м) линзой. Энергия излучения лазера в импульсе составляла от 0.7 до 3.0 Дж, в зависимости от частоты генерации и парциального состава лазерной смеси. Частота излучения лазера перестраивалась в диапазоне 9.2–10.8 мкм. Для привязки частоты линий излучения CO_2-лазера использовался оптико-акустический приемник с реперным газом NH_3. Поперечное распределение плотности энергии и площадь сечения лазерного пучка определялись с помощью микрозонда путем сканирования его поперек лазерного пучка во взаимно-перпендикулярных направлениях на входе и на выходе из кюветы.

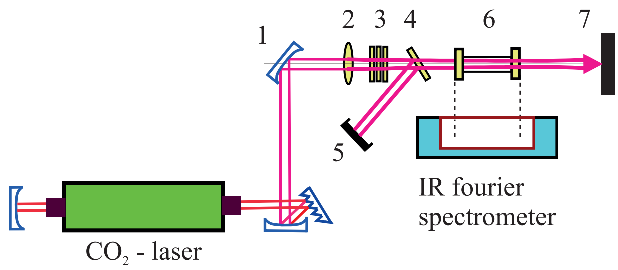

Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема экспериментальной установки. *1*– зеркало; *2* – длиннофокусная линза; *3* – ослабители лазерного излучения; *4* – делительная пластинка; *5* – приемник излучения; *6* – кювета с облучаемым газом; *7* – поглотитель излучения

3. Метод. Селективная по изотопам бора ИК многофотонная диссоциация молекул BCl_3 проводилась при настройке частоты излучения CO_2-лазера на линию 10P32 (частота 932.96 см$^{-1}$), которая совпадает с длинноволновым крылом полосы поглощения колебания ν_3 молекул $^{11}BCl_3$ (≈ 954.2 см$^{-1}$ [14]). Полоса поглощения колебания ν_3 молекул SF_6

($\approx 948\,\text{см}^{-1}$ [30]) примерно на $6.2\,\text{см}^{-1}$ смещена в низкочастотную сторону от центра полосы поглощения молекул $^{11}BCl_3$ (рис. 2a–c). При лазерном ИК многофотонном возбуждении полосы поглощения как молекул $^{11}BCl_3$, так и молекул SF_6 смещаются из-за ангармонизма колебаний в красную сторону (в сторону частоты излучения лазера) и приходят в оптимальный резонанс с лазерным полем [31–34]. Происходит эффективное ИК многофотонное возбуждение обоих типов молекул, в том числе молекул SF_6, поглощенная энергия от которых передается молекулам $^{11}BCl_3$. Поскольку полосы поглощения молекул SF_6 и $^{11}BCl_3$ практически совпадают, процесс колебательно-колебательного $V-V$ обмена энергией между ними имеет резонансный характер и происходит очень эффективно [35, 36]. Это и приводит к увеличению выхода диссоциации молекул $^{11}BCl_3$. Отметим, что поскольку энергия диссоциации молекул SF_6 (≈ 92 ккал/моль [37]) меньше энергии диссоциации молекул BCl_3, при высоких плотностях энергии возбуждения имеет место также диссоциация и молекул SF_6.

Фотохимическая реакция при лазерной ИК многофотонной диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ протекает по схеме

$$^{11}BCl_3 + nh\nu \rightarrow ^{11}BCl_2 + Cl, \tag{1}$$

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

В результате облучения газа продукты диссоциации обогащались изотопом ^{11}B, а остаточный газ BCl_3 обогащался изотопом ^{10}B. Выходы диссоциации, которые представляют собой доли распавшихся в облучаемом объеме молекул за один лазерный импульс, определялись по изменениям в ИК спектрах поглощения для каждой из изотопных компонент BCl_3.

Спектры поглощения измерялись с помощью ИК фурье-спектрометра ФТ-801. Выходы диссоциации β_{11} и β_{10} вычислялись по парциальному давлению каждой компоненты $^iBCl_3$ ($i = 10, 11$) до ($p_{i,0}$) и после (p_i) облучения лазерными импульсами с использованием соотношения

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

где $\Gamma \approx 0.083$ – отношение облучаемого объема ($V_{\text{irr}} \approx 2.0\,\text{см}^3$) к объему кюветы ($V_{\text{cell}} = 24.2\,\text{см}^3$), N – число импульсов облучения. Измерения интенсивности полосы поглощения молекул $^{11}BCl_3$ до и после облучения проводились на частоте $\approx 954.2\,\text{см}^{-1}$ (примерно в максимуме полосы поглощения $^{11}BCl_3$), на которой практически никакого вклада от поглощения молекул SF_6 при используемых в эксперименте давлениях не было (см. рис. 2b). Селективность $\alpha(^{11}B/^{10}B)$ определялась как отношение выходов диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ и $^{10}BCl_3$

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

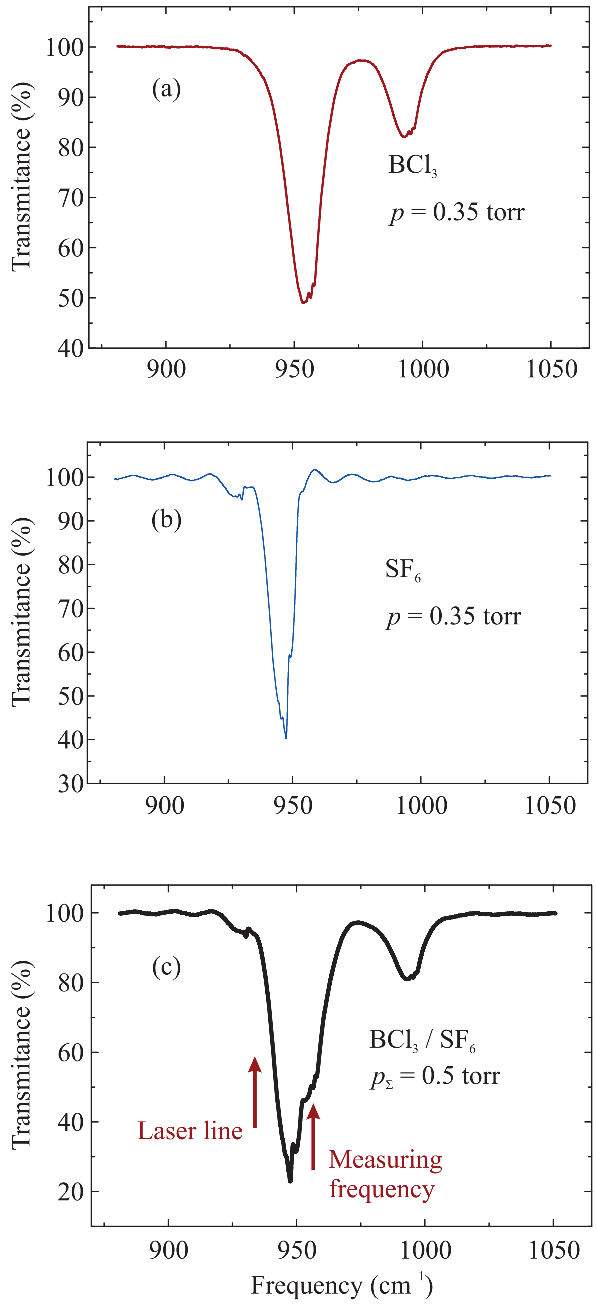

Рис. 2. (Цветной онлайн) (a) – Полосы ИК поглощения колебаний ν_3 молекул $^{11}BCl_3$ и $^{10}BCl_3$. Давление BCl_3 в кювете 0.35 торр, длина кюветы 11.2 см. (b) – Полоса ИК поглощения колебания ν_3 молекул SF_6. Давление SF_6 в кювете 0.15 торр. (c) – Полосы ИК поглощения колебаний ν_3 молекул $^{11}BCl_3$, $^{10}BCl_3$ и SF_6. Давление BCl_3 в кювете 0.35 торр, SF_6 – 0.15 торр

4. Результаты и их обсуждение. В экспериментах измерялись основные параметры селективной лазерной ИК многофотонной диссоциации молекул BCl_3 – выходы диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ (β_{11}) и $^{10}BCl_3$ (β_{10}), а также селективность диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ по отношению к молекулам $^{10}BCl_3$ ($\alpha(^{11}B/^{10}B)$). Получены зависимости этих параметров от давлений облучаемых газов BCl_3 и SF_6, а также от плотности энергии возбуждающего лазерного излучения.

На рисунке 3 показаны полосы ИК поглощения колебаний ν_3 молекул $^{11}BCl_3$, $^{10}BCl_3$ и молекул SF_6 до облучения (*1*) и после облучения лазером (*2*). Показаны также полосы ИК поглощения колебаний ν_1 (≈ 851.4 см$^{-1}$) и ν_8 (≈ 909.1 см$^{-1}$) образующегося продукта SF_5Cl [38]. Исходное давление BCl_3 в кювете 0.35 торр, SF_6 – 0.15 торр. Плотность энергии возбуждающего лазерного излучения 1.91 Дж/см^2. Число импульсов облучения $N = 1800$. Кроме SF_5Cl, в образующихся продуктах нами были обнаружены также (спектры ИК поглощения других продуктов на рис. 3 не показаны) молекулы BCl_2F, $BClF_2$ и BF_3.

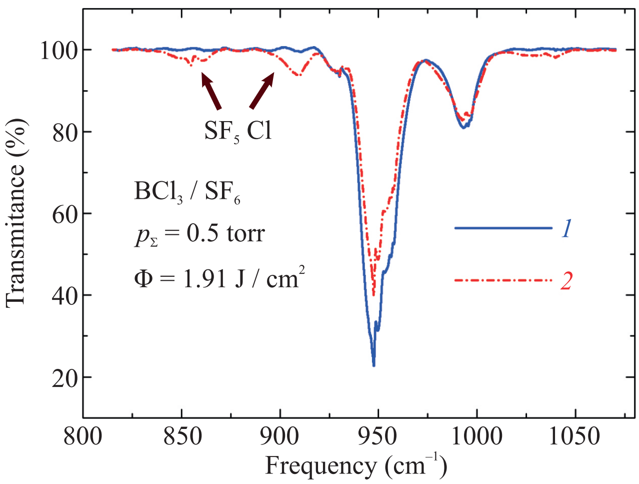

Рис. 3. (Цветной онлайн) Полосы ИК поглощения колебаний ν_3 молекул $^{11}BCl_3$, $^{10}BCl_3$ и молекул SF_6 до облучения (*1*) и после облучения (*2*) лазером. Показаны также полосы ИК поглощения образующегося продукта SF_5Cl с центрами полос на частотах 851.4 см$^{-1}$ (колебание ν_1) и 909. см$^{-1}$ (колебание ν_8) [38]. Исходное давление BCl_3 в кювете 0.35 торр, SF_6 – 0.15 торр. Плотность энергии возбуждающего лазерного излучения 1.91 Дж/см^2. Число импульсов облучения $N = 1800$

На рисунке 4a, b показаны зависимости выходов диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ β_{11} и $^{10}BCl_3$ β_{10} (a), а также селективности диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ по отношению к молекулам $^{10}BCl_3$ $\alpha(^{11}B/^{10}B)$ (b) от

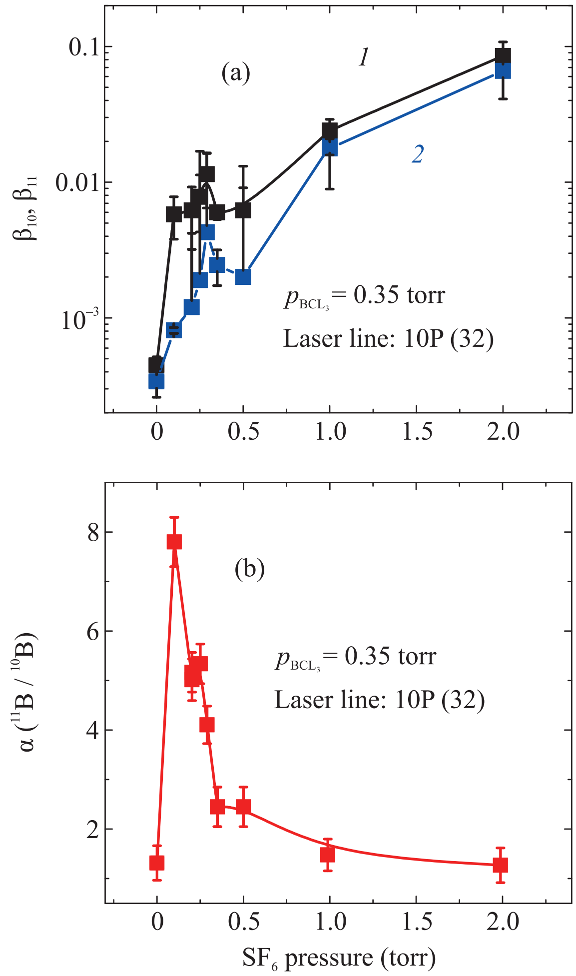

Рис. 4. (Цветной онлайн) (a), (b) – Зависимости выходов диссоциации β_{11} (кривая *1*) и β_{10} (кривая *2*) (a), а также селективности диссоциации $\alpha(^{11}B/^{10}B)$ (b) от давления SF_6 при фиксированном давлении BCl_3, равном 0.35 торр, и плотности энергии возбуждающего излучения 2.1 Дж/см^2

давления SF_6 в диапазоне 0.05–2.0 торр при фиксированном давлении BCl_3, равном 0.35 торр, и плотности энергии возбуждающего излучения $\Phi \approx 2.1$ Дж/см^2. Видно, что в исследуемом диапазоне давлений SF_6 выходы диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ и $^{10}BCl_3$ растут соответственно от значений $\beta_{11} \approx 4.5 \times 10^{-4}$ и $\beta_{10} \approx 3.4 \times 10^{-4}$ при облучении молекул BCl_3 без SF_6 до значений $\beta_{11} \approx 8.5 \times 10^{-2}$ и $\beta_{10} \approx 7.2 \times 10^{-2}$ в случае облучения молекул BCl_3 с SF_6 при давлении 2.0 торр.

Таким образом, при облучении молекул BCl_3 с SF_6 наблюдается увеличение выходов диссоциации молекул BCl_3 более чем на два порядка. Отметим резкое увеличение (более чем на порядок) выхода диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ при добавлении всего лишь 0.1 торр SF_6. Это означает также, что за счет использования SF_6 значительно уменьшается пороговая плотность энергии диссоциации молекул $^{11}BCl_3$. Рост выходов диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ и $^{10}BCl_3$ с увеличением давления SF_6 в области ≈ 0.5–2.0 торр носит монотонный характер.

Селективность диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ по отношению к молекулам $^{10}BCl_3$ резко растет от значения $\alpha(^{11}B/^{10}B) \approx 1.3$ в случае облучения молекул без SF_6 до величины $\alpha(^{11}B/^{10}B) \approx 8.0$ в случае облучения молекул с SF_6 при давлении ≈ 0.15–0.2 торр. При дальнейшем увеличении давления SF_6 до ≈ 0.4 торр селективность быстро падает до значения $\alpha(^{11}B/^{10}B) \approx 3.0$ и далее медленно уменьшается до величины $\alpha(^{11}B/^{10}B) \approx 1.0$ при давлении $SF_6 \geq 1.5$ торр. Таким образом, в случае облучения BCl_3 при давлении 0.35 торр с SF_6 максимальные значения селективности диссоциации $\alpha(^{11}B/^{10}B)$ достигаются при давлении SF_6 в диапазоне 0.15–0.25 торр. При этом селективность $\alpha(^{11}B/^{10}B)$ в случае облучения с SF_6 более чем в 3–5 раз больше, чем при облучении молекул BCl_3 без SF_6.

На рисунке 5 приведены зависимости выходов диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ и $^{10}BCl_3$, а также селективности диссоциации $\alpha(^{11}B/^{10}B)$ от плотности энергии возбуждающего лазерного излучения в диапазоне от ≈ 1.8 до 3.4 Дж/см^2. Облучалась смесь молекул 0.35 торр BCl_3 + 0.1 торр SF_6. Видно, что выходы диссоциации молекул BCl_3 быстро растут с увеличением плотности энергии возбуждения. Столь быстрый рост выходов диссоциации объясняется тем, что вследствие большой энергии связи молекул BCl_3 при указанных плотностях энергии лазерного излучения процесс ИК диссоциации носит надпороговый характер и сравнительно далек от насыщения.

Селективность диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ $\alpha(^{11}B/^{10}B)$, наоборот, резко падает с увеличением плотности энергии возбуждения. Вместе с тем при всех исследуемых плотностях энергии возбуждения селективность диссоциации с использованием SF_6 значительно (в 2–5 раз) больше, чем без SF_6. Наблюдаемое поведение зависимостей выходов диссоциации и селективности от плотности энергии возбуждающего излучения характерно для процесса изотопно-селективной лазерной ИК многофотонной диссоциации большого числа молекул [10, 11]

5. Заключение. Обнаружено существенное увеличение эффективности изотопно-селективной лазерной ИК МФД молекул $^{11}BCl_3$ в естественной смеси с $^{10}BCl_3$ в случае их облучения с резонансно поглощающим излучение лазера сенсибилизатором и акцептором радикалов SF_6. Показано, что при облучении BCl_3 в смеси с SF_6 сильно увеличиваются как выход диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ (на 1–2 порядка), так и селективность диссоциации (в 2–5 раз), а также значительно (примерно на порядок) уменьшается пороговая плотность энергии диссоциации по сравнению со случаем облучения BCl_3 без SF_6. Это открывает возможность реализации одночастотной изотопно-селективной лазерной ИК диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ в несфокусированных лазерных пучках при умеренной (≤ 4–5 Дж/см^2) плотности энергии возбуждения.

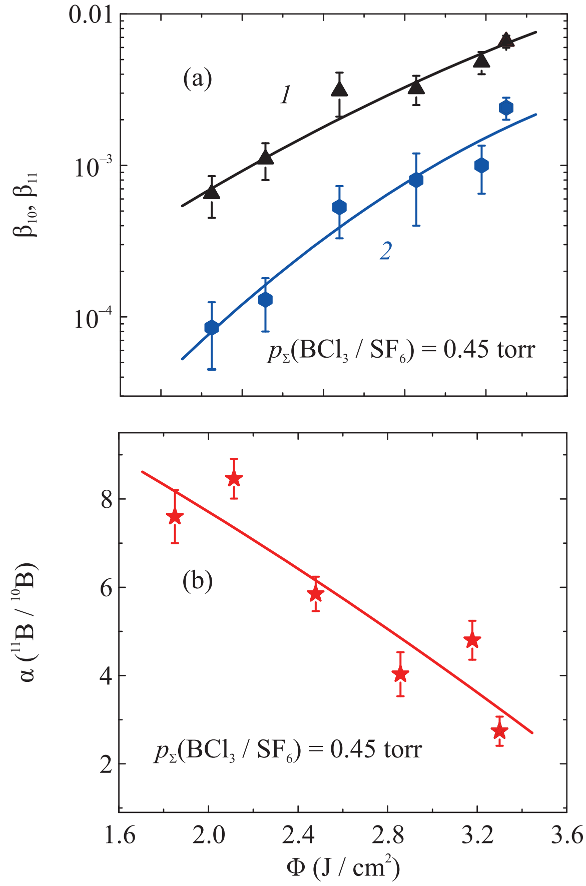

Рис. 5. (Цветной онлайн) (a), (b) – Зависимости выходов диссоциации β_{11} (кривая *1*) и β_{10} (кривая *2*) (a), а также селективности диссоциации $\alpha(^{11}B/^{10}B)$ (b) от плотности энергии возбуждающего лазерного излучения. Давление газа в кювете: 0.35 торр BCl_3 + 0.1 торр SF_6

Полученные результаты важны и актуальны в плане применения описанного метода для разработки лазерной технологии разделения изотопов бора, поскольку становится возможным получать высокообогащенный изотопом ^{10}B молекулярный газ BCl_3 за счет диссоциации молекул $^{11}BCl_3$ в природной смеси с $^{10}BCl_3$.

Авторы выражают благодарность Е. А. Рябову за полезные обсуждения.

Работа выполнена в рамках проекта госзадания.

1. J. Guo, Y.-J. Li, J.-P. Ma, X. Tang, X.-S. Liu, Chem. Phys. Lett. **773**, 138572 (2021).
2. A.K.A. Lyakhov and A.N. Pechen, Appl. Phys. B **126**(8), 141 (2020).
3. A. Aljubouri, F.H. Hamza, and H.H. Mohammed, Engineering and Technology Journal **34**(5), Part (B) Scientific, 157 (2016).
4. K. A. Lyakhov, H. J. Lee, and A. N. Pechen, Separat. Purificat. Technol. **176**, 402 (2017).
5. С. П. Потапов, Атомная энергия **10**, 244 (1961).
6. J. M. Blum and S. Martean, Energie nucleaire **14**(1), 33 (1972).
7. А. Ф. Чабак, А. С. Полевой, *Изотопы в реакторостроении*, в кн. *Изотопы: свойства, получение, применение*, под ред. В. Ю. Баранова, Физматлит, М. (2005), т. II, с. 192.
8. Э. А. Богомолов, Г. И. Васильев, В. Менн, Известия РАН. Серия физическая **85**(4), 466 (2021).
9. A. A. Palko and J. S. Drury, Adv. Chem. Ser. **89**, 40 (1969).
10. V.N. Bagratashvili, V.S. Letokhov, A.A. Makarov, and E.A. Ryabov, *Multiple Photon Infrared Laser Photophysics and Photochemistry*, Harwood Acad. Publ. (1985).
11. *Multiple-Photon Excitation and Dissociation of Polyatomic Molecules*, ed. by C.D. Cantrell, Topics in Current Physics, Springer-Verlag, Berlin (1986), v. 35.
12. В. С. Летохов, Е. А. Рябов, *Многофотонная изотопически-селективная ИК диссоциация молекул*, в кн. *Изотопы: свойства, получение, применение*, под ред. В. Ю. Баранова, Физматлит, М. (2005), т. I, с. 445.
13. V. Yu. Baranov, A. P. Dyadkin, D. D. Malynta, V. A. Kuzmenko, S. V. Pigulsky, V. S. Letokhov, V. B. Laptev, E. A. Ryabov, I. V. Yarovoi, V. B. Zarin, and A. S. Podorashy, *Production of carbon isotopes by laser separation*, Proc. SPIE (Progress in Research and Development of High-Power Industrial CO_2-lasers), **4165**, 314 (2000).
14. D. F. Wolfe and G. L. Humphrey, J. Mol. Struct. **3**, 293 (1969).
15. Р. В. Амбарцумян, В. С. Летохов, Е. А. Рябов, Н. В. Чекалин, Письма в ЖЭТФ **20**, 597 (1974).
16. J. L. Lyman and S. D. Rockwood, J. Appl. Phys. **47**(2), 595 (1975).
17. Р. В. Амбарцумян, Ю. А. Горохов, В. С. Летохов, Г. Н. Макаров, Е. А. Рябов, Н. В. Чекалин, Квантовая электроника **2**, 2197 (1975).
18. Р. В. Амбарцумян, В. С. Должиков, В. С. Летохов, Е. А. Рябов, Н. В. Чекалин, ЖЭТФ **69**, 72 (1975).
19. Р. В. Амбарцумян, Ю. А. Горохов, В. С. Летохов, Г. Н. Макаров, Е. А. Рябов, Н. В. Чекалин, Квантовая электроника **3**, 802 (1976).
20. C. D. Rockwood, J. W. Hudson, Chem. Phys. Lett. **34**, 542 (1975).
21. C. T. Lin, T. D. Z. Atvars, and F. B. T. Pessine, J. Appl. Phys. **48**, 1720 (1977).
22. Ю. Р. Коломийский, Е. А. Рябов, Квантовая электроника **5**, 651 (1978).
23. Y. Ishikawa, O. Kurihara, R. Nakane, and S. Arai, Chem. Phys. **52**, 143 (1980).
24. Z. Peiran, Z. Wensen, and Z. Yuying, Chinese J. Lasers **8**(10), 20 (1981).
25. K. Takeuchi, O. Kurihara, and R. Nakane, Chem. Phys. **54**, 383 (1981).
26. K.-H. Lee, H. Takeo, S. Kondo, C. Matsumura, Bull. Chem. Soc. Jpn. **58**, 1772 (1985).
27. В. Н. Кондратьев (ред.), *Энергии разрыва химических связей, потенциалы ионизации и сродство к электрону*, Наука, М. (1974).
28. В. Б. Лаптев, Е. А. Рябов, Квантовая электроника **13**, 2368 (1986).
29. В. Б. Лаптев, Е. А. Рябов, Химическая физика **7**, 165 (1988).
30. R. S. McDowell, B. J. Krohn, H. Flicker, and M. C. Vasquez, Spectrochim. Acta **42A**, 351 (1986).
31. Г. Н. Макаров, А. Н. Петин, Письма в ЖЭТФ **112**, 226 (2020).
32. Г. Н. Макаров, А. Н. Петин, ЖЭТФ **159**, 281 (2021).
33. Г. Н. Макаров, А. Н. Петин, Письма в ЖЭТФ **115**, 292 (2022).
34. В. Б. Лаптев, Г. Н. Макаров, А. Н. Петин, Е. А. Рябов, ЖЭТФ **162**, 60 (2022).
35. R. S. Karve, S. K. Sarkar, K. V. S. Rama Rao, and J. P. Mittal, Appl. Phys. B **53**, 108 (1991).
36. B. Y. Mohan, J. Chem. Phys. **46**, 98 (1967).
37. S. W. Benson, Chem. Rev. **78**, 23 (1978).
38. R. E. Noftle, R. R. Smardzewski, and W. B. Fox, Inorg. Chem. **16**(12), 3380 (1977).