

01

Двухфотонное возбуждение оксида азота при фотофрагментации нитробензола

© А.В. Пучикин¹, Ю.Н. Панченко^{1,2}, М.В. Андреев², И.Н. Коновалов¹, В.Е. Прокопьев²

¹ Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН,
634055 Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия

e-mail: apuchikin@mail.ru

Поступила в редакцию 11.12.2023 г.

В окончательной редакции 09.01.2024 г.

Принята к публикации 16.01.2024 г.

Исследованы временные и спектральные характеристики флуоресценции оксида азота $\text{NO } A^2\Sigma$, полученной при двухчастотном лазерном взаимодействии с нитробензолом $\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$. Определен физический механизм появления флуоресценции с электронного уровня $\text{NO } A^2\Sigma, v'(0)$, которая возникает при двухфотонном возбуждении электронного перехода $\text{NO } A^2\Sigma-X^2\Pi, v'v''(0, 1)$ лазерным излучением на длине волны 472 nm с фемтосекундной длительностью. При этом колебательно-возбужденные молекулы $\text{NO } X^2\Pi, v''(1)$ возникают как фотофрагменты нитробензола после взаимодействия с лазерным излучением KrF -лазера (248.3 nm) наносекундной длительности. Отмечается, что для данной экспериментальной установки спектр флуоресценции $\text{NO } A^2\Sigma$ регистрировался при интенсивности фемтосекундного импульса $\sim 300 \text{ GW/cm}^2$.

Ключевые слова: фотофрагментация, двухфотонное поглощение, нитросоединение, флуоресценция.

DOI: 10.61011/OS.2024.01.57542.6-24

Введение

В настоящее время существуют и продолжают разрабатываться неконтактные оптические методы для обнаружения различных паров вредных и опасных веществ в атмосферном воздухе. При необходимости дистанционного детектирования удаленных объектов или заданного воздушного пространства в атмосфере, как правило, используются системы оптического (лазерного) зондирования и локации [1,2]. Полосы поглощения большинства летучих нитроароматических и органических веществ находятся в ультрафиолетовом диапазоне спектра длин волн 200–300 nm [3,4]. Получение интенсивного флуоресцентного сигнала при фотовозбуждении соединений со сложной молекулярной структурой за время воздействия однократных лазерных импульсов ограничивается большим числом степеней свободы исследуемых молекул. С нашей точки зрения, наиболее эффективным и чувствительным оптическим методом обнаружения данных веществ является метод фотофрагментации основной молекулы с последующей лазерно индуцированной флуоресценцией её характеристических колебательно-возбужденных фрагментов (photo-fragmentation-laser-induced-fluorescence, PF-LIF). Следует отметить, что при использовании данного оптического метода возможно определить исходное вещество по косвенным признакам, а именно по наличию узких спектральных полос флуоресценции его основных фрагментов. Для эффективного применения одночастотного метода PF-LIF необходимо обеспечить ряд условий по взаимодействию зондирующего излучения с веществом:

исследуемые молекулы должны обладать высоким сечением поглощения для используемой длины волны излучения, поглощение должно приводить к диссоциации молекулы, образующиеся простые фотофрагменты должны подходить для последующей лазерно индуцированной флуоресценции (ЛИФ), длительность импульса излучения должна соответствовать продолжительности всех последовательно протекающих процессов [5].

В работах [6–8] показана возможность использования одночастотного метода PF-LIF для обнаружения в атмосферном воздухе паров летучих органических соединений, содержащих нитрогруппу C-NO_2 . В данных исследованиях использовалось узкополосное излучение с длинами волн 226, 236 и 247 nm, соответствующих резонансным электронно-колебательным переходам фотофрагментов $\text{NO } A^2\Sigma-X^2\Pi, v'v''(0, 0)$, $v'v''(0, 1)$ и $v'v''(0, 2)$. Во всех проводимых экспериментах регистрация сигнала флуоресценции осуществлялась в коротковолновой области спектра $\text{NO } A^2\Sigma-X^2\Pi, v'v''(0, 0)$ на длине волны 226 nm.

Основная проблема детектирования паровой фазы малолетучих нитросоединений заключается в низкой эффективности образования на стадии фотофрагментации колебательно-возбужденных $\text{NO } X^2\Pi, v'' > 0$ для последующего процесса ЛИФ. Дальнейшие работы были связаны с повышением чувствительности и эффективности метода PF-LIF. Использовались на разных длинах волн ультрафиолетовые лазерные источники как для стадии фотофрагментации, так и для последующего зондирования фрагментов. Двухчастотное лазерное вза-

имодействие применялось с целью увеличить образующуюся при фотофрагментации концентрацию $\text{NO } X^2\Pi, v''(2)$ для процесса ЛИФ, а также являлось предметом исследования эффективного времени заселения $\text{NO } X^2\Pi, v''(2)$ [9–11].

Использование нами ранее более коротковолнового излучения 222.1 nm эксимерного газоразрядного лазера KrCl при взаимодействии с нитробензолом позволило повысить эффективность заселения колебательно-возбужденных $\text{NO } X^2\Pi, v''(2-4)$ при фотофрагментации основных молекул R-NO₂ и вторичного процесса PF-LIF более крупных фрагментов NO₂ за время длительности импульса излучения [12]. Однако использование лазеров дальнего ультрафиолетового (УФ-С) диапазона не всегда возможно для зондирования атмосферного воздуха, так как существуют ограничения по распространению в атмосфере ультрафиолетового (УФ) лазерного излучения из-за столкновительного девозбуждения и поглощения газами O₂, O₃ и N₂. Фотодиссоциация кислорода может приводит к образованию молекул озона O₃, у которых спектральная полоса Хартли обладает сильным поглощением в области 210–290 nm ($\sigma_{\text{abs}} = 1.12 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2/\text{mol}$ для 253.65 nm) [13]. Поэтому поисковые исследования по эффективному взаимодействию лазерного излучения со сложными органическими соединениями на примере нитросоединений сохраняют актуальность и сейчас.

При изучении процессов ЛИФ, когда недостаточно однофотонного возбуждения из-за большого энергетического расстояния между уровнями основного и возбужденного состояний молекулы, используются многофотонные взаимодействия. Лазерные системы с ультракороткой длительностью импульса благодаря высокой интенсивности излучения позволяют легко осуществлять индуцированные нелинейные процессы фотодиссоциации и возбуждения исследуемых молекул. При этом энергия импульса излучения остается низкой в сравнении с лазерным излучением для многофотонных процессов наносекундного диапазона [14–17].

В настоящей работе приводятся результаты исследования временных и спектральных характеристик флуоресценции колебательно-возбужденных фрагментов оксида азота, полученных при фотодиссоциации ароматического соединения нитробензола (NB). Впервые оптическим методом спектрального анализа рассматривается двухчастотное взаимодействие лазерного излучения с нитросоединением: фотофрагментация основной молекулы с последующей ЛИФ ее фрагментов NO при двухфотонном поглощении (photo-fragmentation-two-photon-absorption-laser-induced-fluorescence, PF-TPALIF). Получение существенной доли населенности колебательно-возбужденных $\text{NO } X^2\Pi, v''(1)$ происходит через стадию фотофрагментации нитробензола при взаимодействии импульса наносекундной длительности эксимерного KrF-лазера с центральной длиной волны 248.3 nm. Для процесса ЛИФ осуществлялось двухфотонное возбуждение молекул $\text{NO } A^2\Sigma-X^2\Pi, v'v''(0,1)$ с использованием

излучения фс-лазера длиной волны 472 nm и дальнейшей регистрацией флуоресценции полосы $\text{NO } A^2\Sigma-X^2\Pi, v'v''(0,2)$.

Экспериментальная аппаратура и методики измерений

В эксперименте по взаимодействию лазерного излучения с NB использовались два лазерных источника, фотофрагментирующий LS1 и зондирующий LS2. Основные технические параметры источников приведены в таблице.

Для первой стадии фотофрагментации NB использовалось наносекундное лазерное излучение KrF-лазера 248.3 nm (ИСЭ СО РАН, модель ELF) с интенсивностью воздействия 2 MW/cm². Описание численной модели, оптической и электрической схемы KrF-лазера приведено в работах [18–20]. Для последующей стадии TPALIF $\text{NO } A^2\Sigma-X^2\Pi, v'v''(0,1)$ использовалось фемтосекундное лазерное излучение второй гармоники (ВГ) 472 nm, полученное в перестраиваемой лазерной системе Ti:Sa (Avesta, model 480).

Структурная схема фемтосекундной лазерной системы представлена на рис. 1. Излучение 944 nm с длительностью 50–70 fs формировалось в задающем генераторе, далее после прохождения стретчера длительность импульса увеличивалась до 100 ps и затем энергия повышалась до 12 mJ в регенеративном и многопроходном Ti:Sa-усилителе. В следующей стадии происходило сжатие длительности импульса до 50 fs в компрессоре, состоящем из двух дифракционных решеток. Для генерации второй гармоники 472 nm основного излучения использовался кристалл KDP тип I толщиной 2 mm с ориентацией осей $\theta = 41^\circ$ и $\phi = 45^\circ$.

Двухфотонное возбуждение полосы поглощения $\text{NO } A^2\Sigma-X^2\Pi, v'v''(0,1)$ осуществлялось при интенсивности 300 GW/cm² лазерного излучения 472 nm с использованием дополнительного поджатия исходного пучка сферической линзой L1 $f = 500 \text{ mm}$ в исследуемой области. Излучение обоих лазерных источников направлялось по одной оптической оси в газовую кювету с NB посредством дихроичного зеркала M1 248.3/472 nm (Thorlabs, BB1-E01). Для временных параметров синхронизации и задержек регистрирующей спектральной аппаратуры и лазерных систем использовался управляемый двухканальный генератор импульсов (Digit-EL, PG-872).

Оптическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Взаимодействие лазерного излучения с насыщенными парами NB ($\sim 244 \text{ ppm}$) происходило в газовой кювете из нержавеющей стали при комнатной температуре 298 K. На торцах кюветы устанавливались кварцевые окна марки КУ-1, пропускающие с минимальными потерями вынужденную флуоресценцию оксида азота в области 250 nm. Кювета предварительно откачивалась турбомолекулярным насосом (ILMVAC, Turbo-V 81-AG) до 10^{-5} Pa . Напуск исследуемой смеси пары

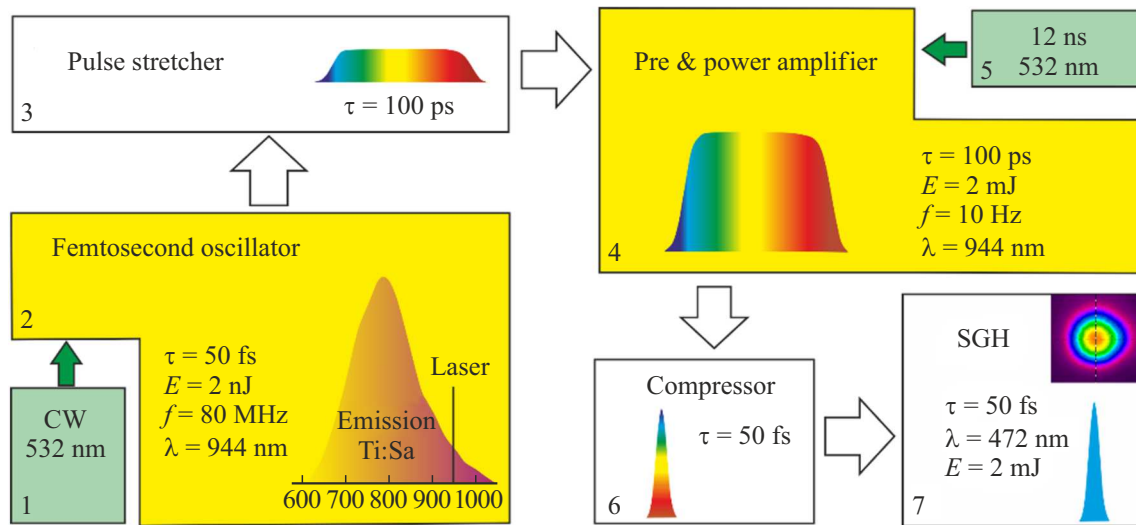


Рис. 1. Структурная схема fs-лазера: 1 — непрерывный лазер накачки задающего генератора, 2 — задающий генератор fs-импульсов, 3 — стретчер, 4 — регенеративный многопроходной усилитель, 5 — импульсный лазер накачки, 6 — компрессор, 7 — генератор второй гармоники.

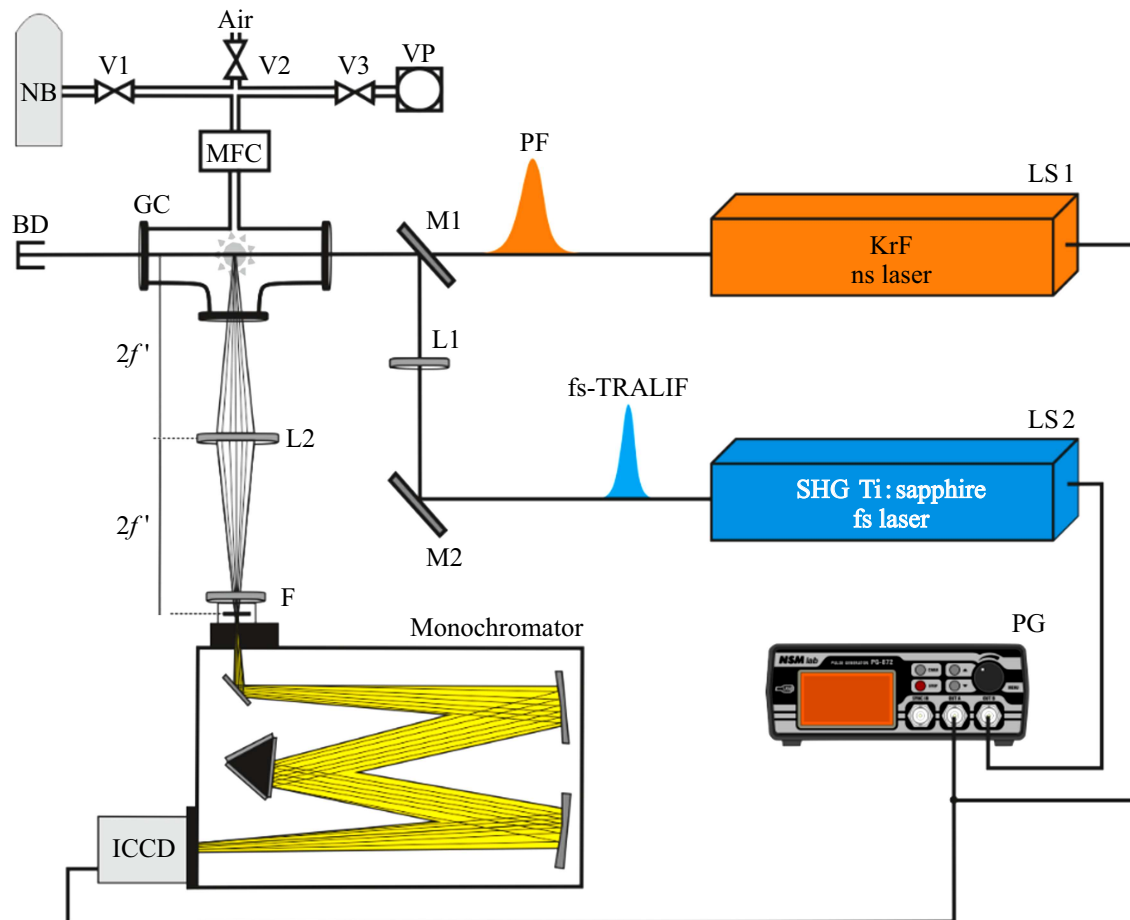


Рис. 2. Экспериментальная схема PF-TRALIF NB: LS1 — ns-лазер, LS2 — fs-лазер, PG — импульсный генератор задержек, M1 — дихроичное зеркало, M2 — узкополосное зеркало, GC — газовая кювета, BD — поглотитель пучка, F — узкополосный фильтр, L1 — линза $f=500$ мм, L2 — собирающая линза $f=150$ мм, Monochromator — монохроматор с фокальной длиной 500 мм, ICCD — интенсивная CCD-камера, MFC — контроллер напуска, V1–V3 — электрические клапаны, VP — вакуумный насос.

Таблица 1. Параметры лазерных источников

Тип Стадия	LS 1—KrF фотофрагментация	LS 2 — Ti:Sapphire ЛИФ
Длина волны, nm	248.3	472
Длительность импульса (FWHM)	10 ns	50 fs
Ширина линии	10 pm	6.5 nm
Максимальная энергия, mJ	100	< 5
Частота повторения, Hz	50	10
Расходимость, mrad	< 0.8	0.1
Размеры пучка, mm	5 × 10	Ø 10

NB/воздух (1 atm) в кювету осуществлялся регулятором массового расхода (MKS, GE50A013500RMV020).

Регистрация флуоресценции NO A²Σ—X²Π, v'v'' (0,2) производилась перпендикулярно падающему излучению. Кварцевая линза L2 собирала рассеянное излучение и формировала изображение области воздействия на входной щели монохроматора. Подавление рассеянного света и спектральная селекция рассеянного сигнала осуществлялись монохроматором (Shamrock, SR500) с фокусным расстоянием 500 mm и дополнительным узкополосным фильтром F (Semrock, Hg 01-254-25, T ~ 60% на 250 nm). Временные и амплитудные характеристики импульса излучения снимались камерой iStarICCD (AndorTechnology, DH720-18F-03) с разрешением менее 5 ns при квантовой эффективности фотокатода ~ 10% в области 240–250 nm. Полученные экспериментальные спектры флуоресценции NO сопоставлялись в программных продуктах моделирования спектров LIFBASE, LIFSIM [21,22]. Энергия лазерного излучения измерялась калориметром (Gentec-EO).

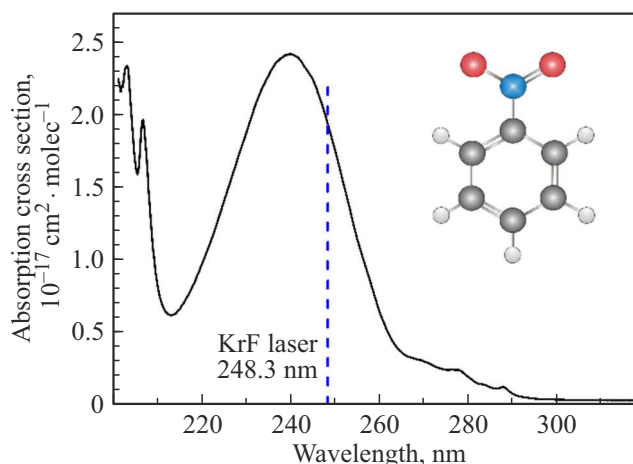


Рис. 3. Взаимодействие лазерного излучения 248.3 nm с нитробензолом. Экспериментальное сечение поглощения нитробензола (черная сплошная кривая) [24]; излучение KrF-лазера (синяя вертикальная штриховая линия).

Результаты и обсуждение

Фотофрагментация нитробензола

Нитробензол относится к классу ароматических соединений, содержащий одну нитрогруппу NO₂. В кюветных экспериментах использовалась концентрация насыщенного пара NB 244 ppm, которая была рассчитана по уравнению Антуана и скорректирована по температуре воздуха 298 K [23]:

$$\ln(P) = ANTA - \left(\frac{ANTB}{T + ANTC} \right), \quad (1)$$

где P — давление в mm Hg, ANTA, ANTB, ANTC — константы Антуана, T — температура в K. Наибольшее сечение взаимодействия нитробензола находится в УФ области (рис. 3).

Для фотофрагментации NB использовалось узкополосное излучение эксимерного KrF-лазера на центральной длине волны 248.3 nm. Фотокинетические реакции представлены следующим образом:

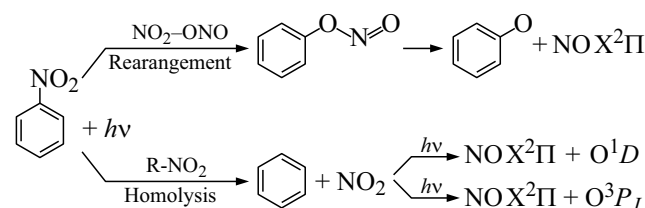
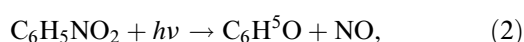
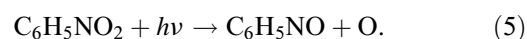
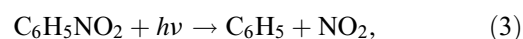


Рис. 4. Разрыв связи нитробензола путем нитро-нитратной изомеризации и гомолиза.



Для последующего процесса ЛИФ в модели рассматриваются реакции (2) и (3) с целью получения колебательно-возбужденных состояний NO X²Π, v' > 1 на стадии фотофрагментации. На рис. 4 схематически представлены основные каналы образования NO X²Π, v'' при одночастотном взаимодействии нитробензола с лазерным излучением. В первом случае по фото-реакции (2) разрыв связи C-NO₂ реализуется через

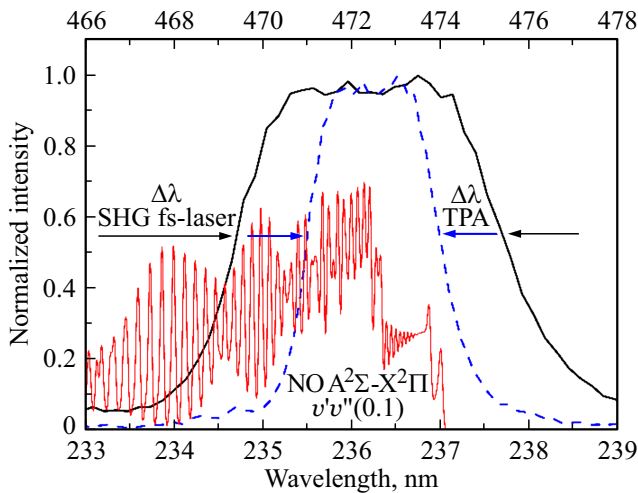


Рис. 5. Расчетный спектр поглощения LIFBASE для NO $A^2\Sigma-X^2\Pi$, $v'v''(0,1)$ при $T_{\text{tot}} = 3500$ K (красный); спектр лазерного излучения второй гармоники Ti:Sa-лазера (черный); расчетный спектр двухфотонного поглощения TPA (синий).

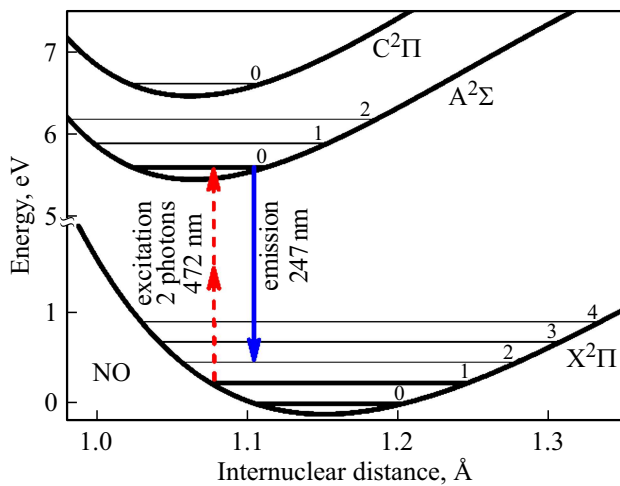


Рис. 6. Кривые потенциальной энергии для NO $A^2\Pi$, $C^2\Pi$, $X^2\Pi$.

нитро-нитратную изомеризацию в низкоэнергетическое переходное состояние с последующим разрывом связи O-NO. Образованные по этому каналу молекулы NO имеют распределение населённости по уровням NO $X^2\Pi$, $v''(0/1/2)-(0.81/0.11/0.04)$ за полное время фрагментации ~ 30 ns. Во втором случае по фотореакции (3) диссоциация C-NO₂ протекает с высокой скоростью образования фотофрагментов NO₂ за время единиц наносекунд [11,25,26]. Также в процессе фотофрагментации NB следует учитывать квантовый выход молекул NO $X^2\Pi$. В работе [27] экспериментально было показано, что соотношение квантовых выходов фотофрагментов NO₂/NO(v) изменяется от 5.9/1 до 3.7/1 с увеличением длины волны излучения от 222 до 240 nm. Сечение взаимодействия для излучения 248.3 nm с диоксидом азота ($\sigma_{\text{NO}_2} = 7.66 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^2 \text{ mol}^{-1}$) су-

щественно ниже по сравнению с нитробензолом ($\sigma_{\text{NB}} = 1.93 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2 \text{ mol}^{-1}$). Поэтому добавка к общей концентрации NO $X^2\Pi$, $v''(1)$ от вторичного процесса фотофрагментации NO₂ будет незначительна [28]. Следовательно, выбор длины волны 248.3 nm позволит получить населенность состояний NO $X^2\Pi$, $v''(1)$ около 15%, что существенно выше населённости сопутствующего атмосферного оксида азота согласно распределению Больцмана по колебательно-возбужденным уровням NO $X^2\Pi$, $v''(0/1/2)-1/10^{-4}/10^{-8}$ при $T = 300$ K [29].

Лазерно индуцированная флуоресценция оксида азота

В экспериментальных работах при фотофрагментации нитробензола лазерным излучением 226–280 nm сообщалось, что образуются „горячие“ фрагменты оксида азота при $T_{\text{tot}} = 2400-3700$ K [26,30]. Спектральное уширение полосы поглощения фотофрагментов оксида азота позволит повысить эффективность использования возбуждающего широкополосного излучения. На рис. 5 приведен расчетный спектр двухфотонного поглощения молекулой NO $A^2\Sigma-X^2\Pi$, $v'v''(0,1)$ при $T_{\text{tot}} = 3500$ K (LIFBASE) и спектр лазерного излучения второй гармоники (ВГ) перестраиваемого Ti:Sa-лазера. Спектральная ширина на половине высоты (FWHM) воздействующего импульса ВГ Ti:Sa лазерной системы 472 nm при длительности 50 fs составляет 6.5 nm и ограничивается полосой пропускания. Относительно поглощения NO $A^2\Sigma-X^2\Pi$, $v'v''(0,1)$ при двухфотонном поглощении для длины волны 236 nm спектральная ширина сократится до 1.64 nm:

$$\Delta\lambda = (TBP\lambda_{236}^2)/(\Delta\tau c), \quad (6)$$

где TBP — произведение на ширину полосы пропускания гауссовых импульсов с ограниченной полосой пропускания (использовалось значение 0.441), $\Delta\tau$ — длительность импульса, c — скорость света.

На рис. 6 показан процесс двухфотонного поглощения 472 nm полосой NO $A^2\Sigma-X^2\Pi$, $v'v''(0,1)$ и последующая регистрируемая в эксперименте эмиссия флуоресценции NO $A^2\Sigma-X^2\Pi$, $v'v''(0,2)$. Силы осцилляторов данных электронных переходов по программе моделирования спектров LIFBASE определены для поглощения $f_{\text{abs}}(0,1) = 6.077 \cdot 10^{-4}$ и для эмиссионной способности $f_{\text{em}}(0,2) = 6.422 \cdot 10^{-4}$. Длительность флуоресценции состояния NO $A^2\Sigma$, $v'(0)$ в атмосферном воздухе определяется радиационным временем жизни 206 ns и сокращается до 1.5 ns из-за сильного столкновительного тушения O₂ при $k_q = (1.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$. Для молекулярного азота N₂ константа тушения уровня NO $A^2\Sigma$, $v'(0)$ существенно ниже: $k_q = 0.008 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ [31,32].

На полученной кинетической серии спектров NO $A^2-X^2\Pi$, $v'v''(0,2)$ процесса PF-TPALIF NO₂ (рис. 7)

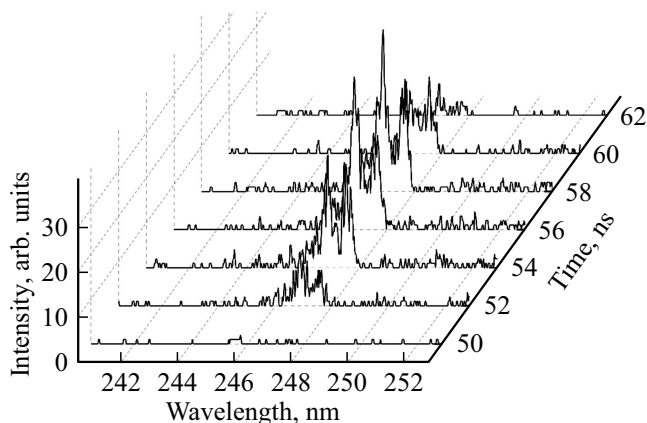


Рис. 7. Кинетическая серия спектров флуоресценции NO $A^2\Sigma-X^2\Pi$, $v'v''(0, 2)$ процесса PF-TPALIF.

наблюдается тушение атмосферными газами флуоресценции состояния NO $A^2\Sigma$. Регистрация спектра флуоресценции проводилась в стоксовой области 247 nm относительно поглощения 236 nm, где коэффициент эмиссии, полученный по программе моделирования спектров LIFBASE, $A(0, 2) = 1.215 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$, максимален для состояния NO $A^2\Sigma$, $v'(0)$ в сравнении с близлежащими колебательными уровнями, для которых $A(0, 0) = 9.802 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$, $A(0, 3) = 7.677 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$. Для исключения возможного появления флуоресценции NO $A^2\Sigma$, $v'(0)$ в результате воздействия фотофрагментирующего KrF-лазера длина волны 248.3 nm со спектральной шириной 10 nm настраивалась вне контура полосы поглощения NO $A^2\Sigma-X^2\Pi$, $v'v''(0, 2)$. Время задержки зондирующего лазера от фрагментирующего лазера устанавливалось в 50 ns, исходя из полученных ранее данных по максимальному времени образования заселенности уровня NO $X^2\Pi$, $v''(2)$ [10].

Заключение

В результате проведенных исследований был предложен оригинальный спектроскопический метод PF-TPALIF, позволяющий определять населенность колебательных уровней молекул NO $X^2\Pi$, v'' . Определены фотокинетические процессы, протекающие в сложных молекулах C-NO₂. На примере нитробензола с использованием предварительной фотофрагментации УФ-С-лазерным излучением получена населенность уровня NO $X^2\Pi$, $v''(1)$ для последующего двухфотонного взаимодействия. Зондирующее лазерное излучение в синей области спектра с длительностью импульса 50 fs при интенсивности $\sim 300 \text{ GW/cm}^2$ приводит к возникновению флуоресценции состояния NO $A^2\Sigma$, $v''(0)$ за счет двухфотонного поглощения на электронном переходе NO $A^2\Pi-X^2\Pi$, $v'v''(0, 1)$. Преимущество зондирования импульсом со сверхкороткой длительностью заключается в том, что минимизируются сопутствующие фотоли-

тические процессы, возникающие при однофотонной фотодиссоциации. В этом случае повышается как селективность взаимодействия, так и линейная дисперсия сигнала ЛИФ, обусловленная шумовым лазерным рассеянием.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FWRM-2021-0014) и при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Вклад авторов

А.В. Пучикин: разработка концепции, проведение исследования, написание текста; Ю.Н. Панченко: администрирование, редактирование текста, утверждение окончательного варианта статьи; М.В. Андреев: статистическая обработка данных; И.Н. Коновалов: ресурсное обеспечение исследования; В.Е. Прокопьев: проведение статистического анализа, разработка методологии.

Список литературы

- [1] V.E. Privalov, V.G. Shemanin. *Opt. Spectrosc.*, **130** (3), 331 (2022). DOI: 10.61011/OS.2024.01.57542.6-24
- [2] L.M. Narlagiri, M.S.S. Bharati, R. Beeram, D. Banerjee, V. Rao Soma. *Trends Anal. Chem.*, **153**, 116645 (2022). DOI:10.1016/j.trac.2022.116645
- [3] D.D. Tuschel, A.V. Mikhonin, B.E. Lemoff, S.A. Asher. *Appl. Spectrosc.*, **64** (4), 425-32 (2010). DOI: 10.1366/000370210791114194
- [4] C.S. Cockell, J. Knowland. *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc.*, **74** (3), 311–45 (1999). DOI: 10.1017/s0006323199005356
- [5] M.O. Rodgers, K. Asai, D.D. Davis. *Appl. Opt.*, **19** (21), 3597 (1980). DOI: 10.1364/AO.19.003597
- [6] T. Arusi-Parpar, D. Heflinger, R. Lavi. *Appl. Opt.*, **40** (36), 6677 (2001). DOI: 10.1364/AO.40.006677
- [7] C. M. Wynn, S. Palmacci, R.R. Kunz, K. Clow, M. Rothschild. *Appl. Opt.*, **47** (31), 5767 (2008). DOI: 10.1364/AO.47.005767
- [8] D. Wu, J.P. Singh, F.Y. Yueh, D.L. Monts. *Appl. Opt.*, **35** (21), 3998 (1996). DOI: 10.1364/AO.35.003998
- [9] S.M. Bobrovnikov, E.V. Gorlov, V.I. Zharkov, Yu.N. Panchenko, A.V. Puchikin. *Appl. Opt.*, **57**(31), 9381 (2018). DOI: 10.1364/AO.57.009381
- [10] S.M. Bobrovnikov, E.V. Gorlov, V.I. Zharkov, Yu.N. Panchenko, A. Puchikin. *Appl. Opt.*, **58**(27), 7497 (2019). DOI: 10.1364/AO.58.007497
- [11] M.-F. Lin, Y.T. Lee, C.-K. Ni, S. Xu, M.C. Lin. *J. Chem. Phys.*, **126**(6), 064310 (2007). DOI: 10.1063/1.2435351
- [12] A.V. Puchikin, Yu.N. Panchenko, S.A. Yampolskaya, M.V. Andreev, V.E. Prokopiev. *J. Lumin.*, **263**, 120073 (2023). DOI: 10.1016/j.jlumin.2023.120073

- [13] J. Viallon, S. Lee, P. Moussay, K. Tworek, M. Petersen, R.I. Wielgosz. *Atm. Meas. Tech.*, **8** (3), 1245 (2015). DOI: 10.5194/amt-8-1245-2015
- [14] K.A. Rahman, K.S. Patel, M.N. Slipchenko, T.R. Meyer, Zh. Zhang, Y. Wu, J.R. Gord, S. Roy. *Appl. Opt.*, **57** (20), 5666 (2018). DOI: 10.1364/AO.57.005666
- [15] J.B. Schmidt, S. Roy, W.D. Kulatilaka, I. Shkurenkov, I.V. Adamovich, W.R. Lempert, J.R. Gord. *J. Phys. D*, **50** (1), 015204 (2017). DOI: 10.1088/1361-6463/50/1/015204
- [16] M. Hay, P. Parajuli, W.D. Kulatilaka. *Proc. Combust. Inst.*, **39**(1), 1435 (2023). DOI: 10.1016/j.proci.2022.08.090
- [17] A.V. Puchikin, Yu.N. Panchenko, S.A. Yampolskaya, M.V. Andreev, V.E. Prokopiev. *J. Lumin.*, **268**, 120412 (2024). DOI: 10.1016/j.jlumin.2023.120412
- [18] Y.N. Panchenko, A.V. Puchikin, S.A. Yampolskaya, S.M. Bobrovnikov, E.V. Gorlov, V. I. Zharkov. *IEEE J. Quant. Electron.*, **57** (2), 1 (2021). DOI: 10.1109/JQE.2021.3049579
- [19] Yu.I. Bychkov, A.G. Yastremskii, S.A. Yampolskaya, V.F. Losev, V. Dudarev, Yu.N. Panchenko, A.V. Puchikin. *Russ. Phys. J.*, **57** (7), 929 (2014). DOI: 10.1007/s11182-014-0326-3
- [20] S.A. Yampolskaya, A.G. Yastremskii, Yu.N. Panchenko, A.V. Puchikin, S.M. Bobrovnikov. *IEEE J. Quant. Electron.*, **56** (2), 1500209 (2020). DOI: 10.1109/JQE.2020.2976532
- [21] J. Luque, D.R. Crosley. *LIFBASE: Database and Spectral Simulation Program (Version 1.5)*, SRI International Report MP 99-009 (1999). <https://www.sri.com/engage/products-solutions/lifbase>
- [22] W.G. Bessler, C. Schulz, V. Sick, J.W. Daily. *Proc. Third Joint Meeting US Sec. Combust. Inst.*, **105**, 1 (2003). <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:92818989>
- [23] R.C. Reid, J.M. Prausnitz, T.K. Sherwood. *The Properties of Gases & Liquids* (Chem. Eng. Series, McGraw-Hill, NY, 1977).
- [24] L. Frøsig, O.J. Nielsen, M. Bilde, T.J. Wallington, J.J. Orlando, G.S. Tyndall. *J. Phys. Chem. A*, **104** (48), 11328 (2000). DOI: 10.1021/jp002696o
- [25] C. Tanjaroon, C.J. Lue, S.W. Reeve, S.D. Allen, J.B. Johnson. *Chem. Phys. Lett.*, **641**, 33 (2015). DOI: 10.1016/j.cplett.2015.10.051
- [26] Y.-M. Li, J.-L. Sun, H.-M. Yin, K.-L. Han, G.-Z. He. *J. Chem. Phys.*, **118** (14), 6244 (2003). DOI: 10.1063/1.1557932
- [27] D.B. Galloway, J.A. Bartz, L.G. Huey, F.F. Crim. *J. Chem. Phys.*, **98**(3), 2107 (1993). DOI: 10.1063/1.464188
- [28] K. Bogumil, J. Orphal, T. Homann, S. Voigt, P. Spietz, O.C. Fleischmann, A. Vogel, M. Hartmann, H. Bovensmann, J. Frerick, J.P. Burrows. *J. Photochem. Photobiol. A*, **157**(2-3), 167 (2003). DOI: 10.1016/S1010-6030(03)00062-5
- [29] R.M. Measures. *Laser remote sensing: fundamentals and applications* (Krieger, Melbourne, 1992).
- [30] D.B. Galloway, T. Glenewinkel-Meyer, J.A. Bartz, L.G. Huey, F.F. Crim. *J. Chem. Phys.*, **100** (3), 1946 (1994). DOI: 10.1063/1.466547
- [31] L.A. Melton, W. Klemperer. *Planet. Space Sci.*, **20**(2), 157 (1972). DOI: 10.1016/0032-0633(72)90097-9
- [32] A.B. Callear, M.J. Pilling. *Trans. Faraday Soc.*, **66**, 1618 (1970). DOI: 10.1039/TF9706601618