

04

Аномальная длительность импульсов ультрафиолетового излучения молекулярного азота атмосферного давления при наносекундном диффузном разряде

© В.Ф. Тарасенко, А.Н. Панченко, Д.В. Белоплотов, Д.А. Сорокин

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия
E-mail: vf.tarasenko@hcei.ru

Поступило в Редакцию 10 августа 2026 г.

В окончательной редакции 25 августа 2026 г.

Принято к публикации 28 августа 2026 г.

При диффузном разряде, формируемом наносекундными импульсами в молекулярном азоте атмосферного давления, впервые зарегистрированы импульсы излучения на переходе $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ длительностью сотни наносекунд. Приводятся осциллограммы излучения на различных длинах волн второй положительной системы азота с квазистационарной стадией длительностью ~ 100 ns, а также импульсов напряжения, тока разряда и излучения первой отрицательной системы молекулярного иона азота. Показано, что наиболее вероятным механизмом заселения уровня $C^3\Pi_u$ молекулы азота в послесвечении является пулинг-реакция.

Ключевые слова: наносекундные импульсы напряжения, диффузный разряд, азот, атмосферное давление, пулинг-реакция.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.22.63890.20866

Исследованиям различных свойств разрядов (объемных, диффузных и искровых), а также их приложениям в последние годы уделяется большое внимание [1–3]. Это обусловлено сложностью физических процессов, протекающих в разрядной плазме, и применением разрядов для обработки поверхностей и газов, а также для создания источников лазерного и спонтанного излучения. Значительное число работ посвящено изучению диффузных разрядов в воздухе и азоте (N_2) [4–7]. В частности, подробно изучаются спектральные характеристики этих газов [8–10].

Нами при проведении исследований временных и спектральных характеристик излучения в N_2 атмосферного давления были зарегистрированы аномально большие длительности импульсов излучения (сотни наносекунд) в ультрафиолетовой (УФ) области спектра. Эти длительности существенно превышали время жизни уровня $C^3\Pi_u$ при давлении N_2 и воздуха от сотен Торг до одной атмосферы [11]. Анализ литературных данных показал, что в работе [12] при изучении кинетики заселения уровней N_2 сообщалось об образовании состояния N_2 ($C^3\Pi_u$, $\nu = 0-4$) в реакциях энергетического объединения между N_2 ($A^3\Sigma_u^+$, $\nu = 0-1$) с коэффициентом скорости $(1.5 \pm 0.4) \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3 \cdot \text{molecule}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. В недавней работе [13] было показано, что в N_2 при давлении 200 Торг и его возбуждении стримерным барьерным разрядом заселенность состояния N_2 ($C^3\Pi_u$, $\nu = 0-4$) может возрастать в результате пулинг-реакции. В [13] было установлено, что первоначально состояние $C^3\Pi_u$ возбуждается энергичными электронами в головке стримера, но впоследствии значительно изменяется из-за уменьшения средней энергии и концентрации электронов в стримерном канале. Через несколь-

ко десятков наносекунд после подачи на промежуток импульса напряжения скорость возбуждения состояния N_2 ($C^3\Pi_u$) электронным ударом становится пренебрежимо малой по сравнению со скоростью его заселения при столкновении двух молекул N_2 в состоянии $A^3\Sigma_u^+$. Однако концентрация возбужденных N_2 ($C^3\Pi_u$, $\nu = 0$) в послесвечении разряда была очень низкой и, согласно результатам моделирования из работы [13], составляла всего $\sim 0.01\%$ от максимальной (см. рис. 15 в [13]).

Цель настоящей работы — изучить условия появления импульсов УФ-излучения большой длительности на переходе $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ и установить природу заселения состояния $C^3\Pi_u$ в послесвечении наносекундного диффузного разряда.

Для исследования излучательных характеристик разряда использовалась установка, подобная применяемой в работах [9,14]. Она состояла из наносекундного генератора и разрядной камеры. Схема установки и фотографии диффузного разряда приведены на рис. 1.

Импульсы напряжения от генератора ГИН-55-01 отрицательной полярности 5, разработанного по FID-технологии (см. [15]), подавались на разрядный промежуток 10 в виде двух острий. Зазор составлял 4 mm. Генератор формировал импульсы длительностью на полувысоте $\tau_{0.5} \approx 0.7$ ns, временем нарастания $\tau_{0.1-0.9} \approx 0.7$ ns и амплитудой в падающей волне U_0 до -30 kV на согласованную (75Ω) нагрузку. Ток разряда измерялся токовым шунтом из тонкопленочных SMD-резисторов (Vishay Intertechnology), выложенных по периметру заземленного электрода. Сопротивление шунта составляло 230 m Ω . Данная установка имела передающую линию, состоящую из кабеля 3 и дополнительной линии 4, что позволяло задержать приход отраженных импульсов

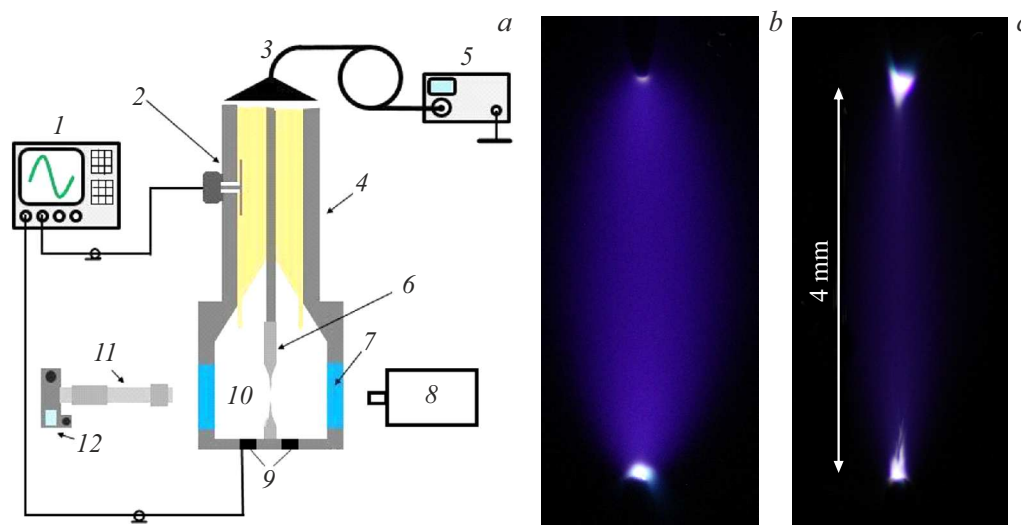


Рис. 1. Схема установки (а) и фотографии излучения плазмы разряда в N_2 при давлении 100 (b) и 760 Торт (c). 1 — осциллограф, 2 — емкостный делитель напряжения, 3 — высоковольтный коаксиальный кабель (75Ω), 4 — короткая передающая линия (75Ω), 5 — высоковольтный импульсный генератор, 6 — высоковольтный электрод, 7 — кварцевые окна, расположенные с двух сторон разрядной камеры, 8 — спектрометр или монохроматор с ФЭУ, 9 — шунт на чип-резисторах, 10 — разрядный промежуток с зазором 4 mm, 11 — длиннофокусный микроскоп, 12 — фотоаппарат.

напряжения, которые возникали из-за отсутствия согласования импедансов генератора и разрядной плазмы при пробое газа. По бокам разрядной камеры для вывода оптического излучения плазмы разряда наружу были установлены две круглые пластинки 7 из кварца КУ-1. Для съемок свечения плазмы разряда использовался зеркальный фотоаппарат Canon EOS 2000D (число пикселей $24.7 \cdot 10^6$, размер матрицы 22.3×14.9 mm, размер пикселя $3.72 \mu m$), оснащенный длиннофокусным микроскопом K2 DistaMax (Infinity Photo-Optical Company) с объективом CF-3. Микроскоп в данной конфигурации обеспечивал увеличение 3.56 с предельным разрешением $1.7 \mu m$. Длительность экспозиции фотоаппарата составляла 1 s, а его чувствительность варьировалась в диапазоне 100–6400 ISO. Фотографирование разрядного промежутка проводилось в режиме однократных импульсов при отсутствии внешнего освещения. Спектры излучения записывались спектрометром HR2000+ES (диапазон 200–1150 nm) с известной спектральной чувствительностью. Излучение регистрировалось спектрометром со всего разрядного промежутка. Аппаратная функция спектрометра составляла ~ 1.2 nm. Каждый спектр был получен в режиме усреднения за 500 реализаций разряда.

Временные характеристики излучения в узких спектральных диапазонах определялись с помощью ФЭУ (EMI 9781 B) и монохроматора VM-502 (Acton Research Corp.) при ширине щели $50 \mu m$. Минимальная длительность фронта оптического сигнала с ФЭУ составляла ~ 3 ns, а спада ~ 30 ns. Электрические сигналы с делителя, шунта и ФЭУ записывались осциллографом TDS-3034 корпорации Tektronix с полосой пропускания 0.3 GHz и максимальной частотой выборки 2.5 GS/s. Его

временное разрешение составляло ~ 1 ns. Газоразрядная камера откачивалась форвакуумным насосом и заполнялась N_2 с содержанием примесей менее 0.01 %.

На рис. 2 показаны осциллограммы импульсов напряжения и тока на двух временных участках при различной развертке.

Из осциллограмм видно, что амплитуда тока разряда во втором импульсе уменьшилась в ~ 3 раза, а в третьем — более чем на порядок. Соответственно основной энерговыход осуществлялся при протекании первого импульса тока. Задержка между основным и первым отраженным импульсами составляла около 35 ns. Пробой происходил на фронте основного (первого) импульса напряжения.

Фотографирование разряда подтвердило результаты работ [4–9,16] и др., согласно которым при резко неоднородном электрическом поле и наносекундных импульсах напряжения в N_2 и воздухе атмосферного давления можно формировать диффузный разряд без дополнительного источника для предыонизации разрядного промежутка. Использование электродов с малым радиусом кривизны, обеспечивающих существенное увеличение напряженности электрического поля у острий, облегчало пробой промежутка при наносекундной длительности импульсов напряжения и обеспечивало за счет формирования встречных широких стримеров формирование диффузного разряда между электродами [14].

На рис. 1, b, c приведены интегральные фотографии свечения разряда в N_2 для двух значений давления, полученные за один импульс напряжения с амплитудой в падающей волне -20 (b) и -30 kV (c). Свечение разряда в промежутке визуально имело синий цвет.

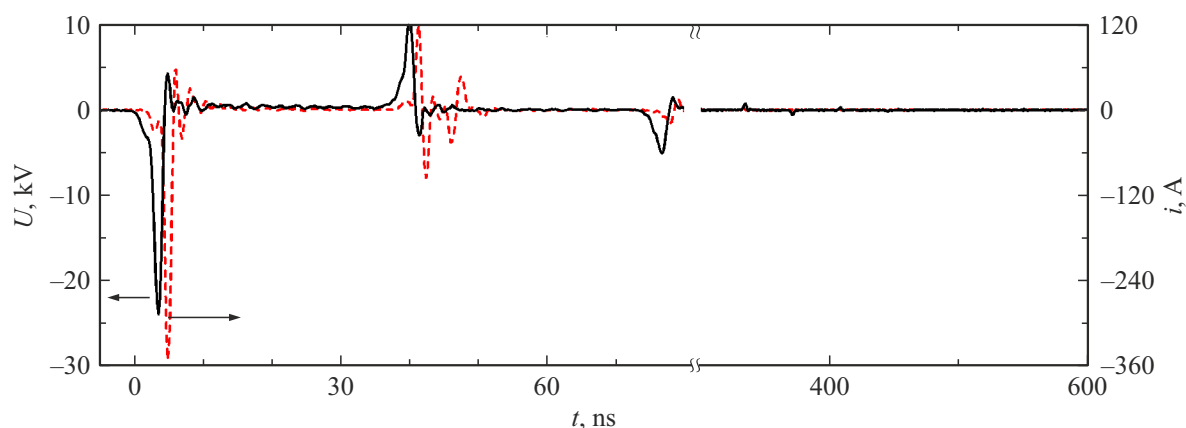


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения U и тока разряда i в N_2 при давлении 760 Торг и амплитуде импульса напряжения в падающей волне -30 кВ.

У электродов были видны белые пятна, интенсивность которых возрастала с увеличением давления газа.

В спектре излучения при формировании диффузного разряда доминировали полосы второй положительной ($2+$) системы N_2 в широком диапазоне давлений (рис. 3).

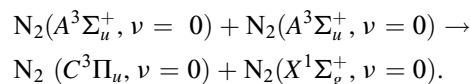
Наибольшая спектральная плотность энергии излучения W в области от 250 до 900 нм при формировании диффузного разряда наблюдалась на полосах $2+$ системы N_2 с длинами волн 315.8, 337.1 и 357.7 нм. При сохранении амплитуды напряжения генератора в падающей волне и уменьшении давления до ~ 30 Торг в спектре излучения становились заметными полосы первой отрицательной ($1-$) системы N_2 со сравнительно небольшими W на длинах волн 391.4 и 427.8 нм. В воздухе атмосферного давления регистрировались подобные спектры излучения, но при одинаковых напряжениях генератора интенсивность излучения полос $2+$ и $1-$ системы N_2 уменьшалась. Анализ результатов спектральных измерений показал, что в N_2 и воздухе регистрировались спектры излучения, которые подобны ранее наблюдаемым в работах [8,9,11,14]. Полосы первой положительной ($1+$) системы N_2 , которые хорошо видны при низких давлениях (~ 1 Торг и ниже), становились заметны в области 580–900 нм при наносекундном диффузном разряде начиная с давления ~ 10 Торг (рис. 3, б).

Новый результат, который важен для определения потоков энергии в молекулярном азоте, был получен при исследованиях амплитудно-временных характеристик излучения. Оказалось, что импульсы излучения ряда полос на переходе $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ имеют при давлении 1 атм аномальную длительность с характерной квазистационарной стадией длительностью ~ 100 нс (рис. 4, а).

Было установлено (рис. 4, а), что подобные осциллограммы при давлении 760 Торг наблюдались на переходе $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ только на некоторых полосах. Импульсы излучения большой длительности, включая квазистационарную стадию длительностью ~ 100 нс, при атмосферном давлении N_2 регистрировались на дли-

нах волн 337.1 нм ($\nu = 0-0$), 357.7 нм ($\nu = 0-1$) и 380.4 нм ($\nu = 0-2$) (показана на рис. 4, б), но отсутствовали на длинах волн 315.8 нм ($\nu = 1-0$) и 297.6 нм ($\nu = 2-0$). Излучение на полосах молекулярного иона N_2^+ на длинах волн $\lambda = 391.4$ нм ($\nu = 0-0$) и 427.8 нм ($\nu = 0-1$) регистрировалось только при низких давлениях, и импульсы имели короткую длительность. При давлении 200 Торг и возбуждении N_2 диффузным разрядом (рис. 4, б) по сравнению со случаем барьерного разряда [13] отношение мощностей излучения P на длинах волн 337.1, 357.7 и 380.4 нм в послесвечении к P в основном импульсе (пике) увеличилось более чем на порядок. Это связано с увеличением плотности тока разряда при диффузном разряде. На длине волны 337.1 нм в пике мощности длительности импульсов излучения на полувысоте для давлений азота 760 и 200 Торг составили соответственно 16 и 24 нс. Длительности импульсов излучения на уровне мощности 0.01 для давлений азота 760 и 200 Торг составили на той же длине волны 337.1 нм соответственно 216 и 231 нс.

На основании анализа полученных результатов считаем, что увеличение длительности импульсов излучения на переходе азота $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ обусловлено вкладом пулинг-реакции



В результате данной реакции происходит преимущественное заселение нижнего колебательного уровня состояния $C^3\Pi_u$ молекулы азота. Энергия состояния $N_2(A^3\Sigma_u^+, \nu = 0)$ составляет ~ 6.17 эВ (суммарная для двух молекул 12.34 эВ), а энергия состояния $N_2(C^3\Pi_u, \nu = 0)$ равняется ~ 11.03 эВ. При столкновении двух долгоживущих молекул азота на самом нижнем колебательном уровне состояния $A^3\Sigma_u^+$ энергии хватает на возбуждение состояния $C^3\Pi_u, \nu = 0$ (см. [12]) и на изменение межъядерных расстояний электронных состояний $C^3\Pi_u$ и $X^1\Sigma_g^+$. Как известно, равновесные межъядерные

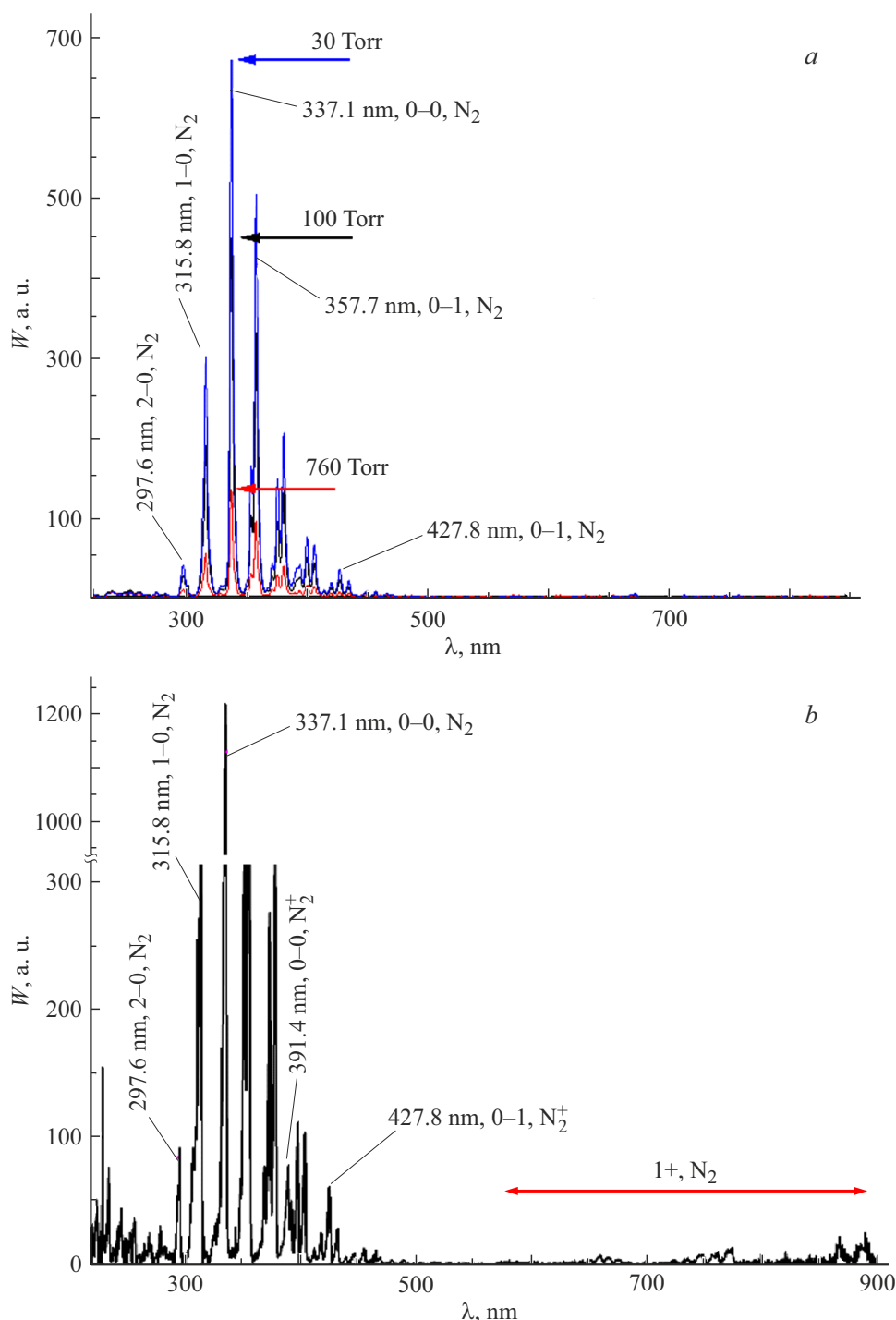


Рис. 3. Спектры излучения плазмы разряда в N_2 при различных давлениях p , полученные при одинаковом количестве импульсов генератора ГИН-55-1. *a* — $p = 30, 100$ и 760 Torr, стрелками показаны максимальные спектральные плотности энергии излучения W на длине волны 337.1 nm при соответствующих давлениях. *b* — $p = 10$ Torr.

расстояния состояний $C^3\Pi_u$, $A_3\Sigma_u^+$ и $X^1\Sigma_g^+$ равняются соответственно $0.1148, 0.1287$ и 0.1098 nm .

С другой стороны, из рис. 4 следует, что энергии 12.34 eV не хватает для эффективного возбуждения уровня $\nu=1$ состояния $C^3\Pi_u$ (переход $1-0$ с $\lambda=315.8 \text{ nm}$), имеющего энергию $\sim 11.28 \text{ eV}$, и $\nu=2$ (переход $2-0$ с $\lambda=297.6 \text{ nm}$), имеющего энергию

$\sim 11.52 \text{ eV}$, что можно объяснить дополнительными потерями энергии. Кроме того, на W переходов $1-0$ и $2-0$ влияет быстрая колебательная релаксация при столкновениях с N_2 . Предположение о влиянии пулинг-процесса на заселение состояния $C^3\Pi_u$ молекулы азота также косвенно подтверждается регистрацией коротких импульсов на длинах волн 391.4 и 427.8 nm перехода

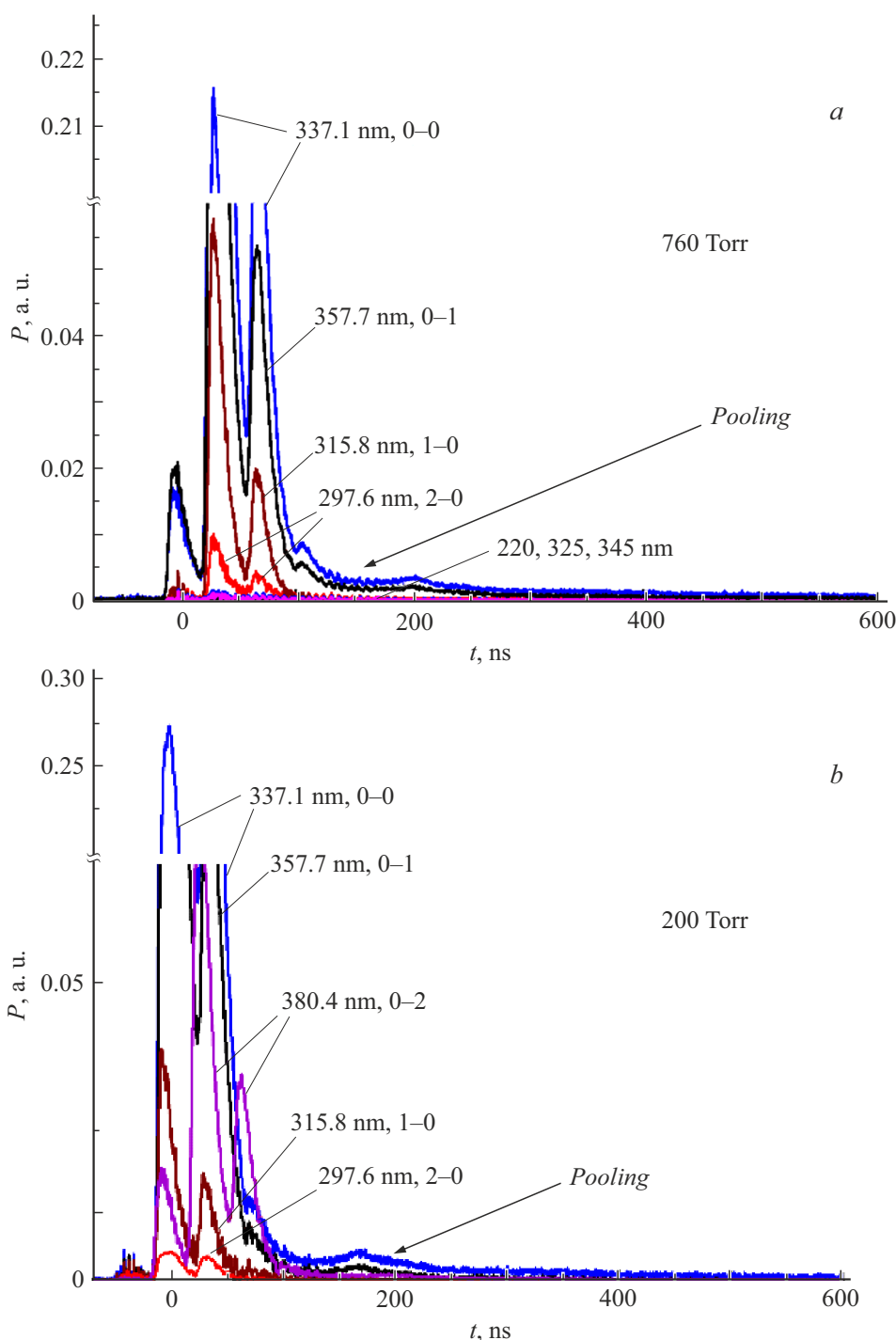


Рис. 4. Осциллограммы импульсов излучения в N_2 при $p = 760$ (a) и 200 Torr (b).

$B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$ молекулярного иона N_2^+ . Энергии двух возбужденных молекул азота в состоянии $A^3\Sigma_u^+$ недостаточно для заселения состояния $B^2\Sigma_u^+$ молекулярного иона N_2^+ (потенциал ионизации N_2 составляет 15.6 eV).

Из полученных спектров излучения также следует, что передача энергии от уровня $B^3\Pi_g$ к уровню $A^3\Sigma_u^+$ в основном происходит при столкновениях с молекулами азота. Излучение 1+ системы N_2 в красной и ближней

инфракрасной областях спектра при высоких давлениях N_2 (рис. 3, a) не регистрировалось из-за его малой интенсивности. Соответственно необходим другой механизм релаксации молекул азота из состояния $B^3\Pi_g$ в состояние $A^3\Sigma_u^+$.

Таким образом, в настоящей работе впервые при атмосферном давлении азота продемонстрирован вклад пулинг-реакции в заселение состояния $C^3\Pi_u$ молекулы

N_2 при наносекундном диффузном разряде. Установлено, что при давлении 200 Торг и возбуждении N_2 диффузным разрядом по сравнению с барьерным разрядом [13] существенно увеличивается отношение мощностей излучения P на длинах волн 337.1, 357.7 и 380.4 nm в послесвечении к P в первом основном импульсе. Из полученных результатов следует, что влияние пулинг-реакции на заселение уровня $C^3\Pi_u$ молекулы N_2 следует учитывать при высоких давлениях и для смесей газов с высоким содержанием N_2 . Увеличение длительности излучения N_2 в УФ-области спектра, а соответственно и энергии излучения в импульсе имеет важное значение для ряда практических приложений.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН (проект № FWRM-2026-0008).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Wang, T. Namihira, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **29**, 023001 (2020). DOI: 10.1088/1361-6595/ab5bf6
- [2] I. Adamovich, S. Agarwal, E. Ahedo, L.L. Alves, S. Baalrud, N. Babaeva, A. Bogaerts, A. Bourdon, P.J. Bruggeman, C. Canal, E.H. Choi, S. Coulombe, Z. Donkó, D.B. Graves, S. Hamaguchi, D. Hegemann, M. Hori, H.-H. Kim, G.M.W. Kroesen, M.J. Kushner, A. Laricchiuta, X. Li, T.E. Magin, S. Mededovic Thagard, V. Miller, A.B. Murphy, G.S. Oehrlein, N. Puac, R.M. Sankaran, S. Samukawa, M. Shiratani, M. Šimek, N. Tarasenko, K. Terashima, E. Thomas, Jr, J. Trieschmann, S. Tsikata, M.M. Turner, I.J. van der Walt, M.C.M. van de Sanden, T. von Woedtke, *J. Phys D*, **55**, 373001 (2022). DOI: 10.1088/1361-6463/ac5e1c
- [3] *Pulsed discharge plasmas: characteristics and applications*, ed. by T. Shao, C. Zhang (Springer, Singapore, 2023). DOI: 10.1007/978-981-99-1141-7
- [4] D.Z. Pai, G.D. Stancu, D.A. Lacoste, C.O. Laux, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **18** (4), 045030 (2009). DOI: 10.1088/0963-0252/18/4/045030
- [5] T. Shao, C. Zhang, H. Jiang, Z. Niu, P. Yan, Y. Zhou, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **39** (9), 1881 (2011). DOI: 10.1109/TPS.2011.2161495
- [6] P. Tardiveau, L. Magne, E. Marode, K. Ouaras, P. Jeanney, B. Bourmonville, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **25** (5), 054005 (2016). DOI: 10.1088/0963-0252/25/5/054005
- [7] V. Tarasenko, A. Panchenko, D. Beloplotov, M. Lomaev, D. Sorokin, C. Zhang, *High Volt.*, **10** (1), 126 (2025). DOI: 10.1049/hve2.12507
- [8] S.A. Shcherbanev, A.Y. Khomenko, S.A. Stepanyan, N.A. Popov, S.M. Starikovskaia, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **26** (2), 02LT01 (2017). DOI: 10.1088/1361-6595/26/2/02LT01
- [9] Д.В. Белоplotов, В.Ф. Тарасенко, А.Н. Панченко, Д.А. Сорокин, *Успехи прикладной физики*, **14** (1), 41 (2026). DOI: 10.51368/2307-4469-2026-14-1-41-51
- [10] С.В. Подлесных, В.В. Ягов, *Письма в ЖТФ*, **52** (14), 46 (2026). DOI: 10.61011/PJTF.2026.14.63313.20659 [S.V. Podlesnykh, V.V. Yagov, *Tech. Phys. Lett.*, **52** (7), 84 (2026)].
- [11] М.И. Ломаев, Д.В. Рыбка, Д.А. Сорокин, В.Ф. Тарасенко, К.Ю. Кривоногова, *Оптика и спектроскопия*, **107** (1), 40 (2009). [M.I. Lomaev, D.V. Rybka, D.A. Sorokin, V.F. Tarasenko, K.Yu. Krivonogova, *Opt. Spectrosc.*, **107** (1), 33 (2009). DOI: 10.1134/S0030400X09070054]
- [12] L.G. Piper, *J. Chem. Phys.*, **88**, 231 (1988). DOI: 10.1063/1.454649
- [13] P. Bílek, T.C. Dias, V. Prukner, P. Hoffer, V. Guerra, M. Šimek, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **32**, 105002 (2023). DOI: 10.1088/1361-6595/acf9c8
- [14] V.F. Tarasenko, D.V. Beloplotov, A.N. Panchenko, D.A. Sorokin, *Plasma Sci. Technol.*, **26** (9), 094003 (2024). DOI: 10.1088/2058-6272/ad34aa
- [15] V.M. Efanov, M.V. Efanov, A.V. Komashko, A.V. Kriklenko, P.M. Yarin, S. Zazoulin, in *Ultra-wideband, short pulse electromagnetics 9*, ed. by F. Sabath, D.V. Giri, F. Rachidi, A. Kaelin (Springer, N.Y., 2010), p. 301–305. DOI: 10.1007/978-0-387-77845-7_35
- [16] Л.В. Тарасова, Л.Н. Худякова, Т.В. Лойко, В.А. Цукерман, *ЖТФ*, **44** (3), 564 (1974).