01

Вакуумное ультрафиолетовое излучение атомарного азота в импульсных самостоятельных разрядах атмосферного давления

© А.Н. Панченко, Д.В. Белоплотов, В.А. Панарин, В.С. Скакун, Д.А. Сорокин

Институт сильноточной электроники СО РАН,
Томск, Россия

e-mail: alexei@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 16.04.2025 г.
В окончательной редакции 22.05.2025 г.
Принята к публикации 04.06.2025 г.

Исследованы параметры вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения плазменных струй и наносекундных диффузных разрядов, формируемых в промежутках с неоднородным электрическим полем наносекундными импульсами высокого напряжения за счет убегающих электронов. В смесях азота с гелием или аргоном при содержании азота менее 10% обнаружено интенсивное ВУФ излучение на линиях атомарного азота с длинами волн 149.3 и 174.3 nm. Определены составы газовых смесей для получения максимальной мощности излучения на данных линиях. Получена средняя мощность излучения до 6.8 mW/cm^2. Измерены вольт-амперные и излучательные характеристики диффузных разрядов в смесях He(Ar)-N_2. Обнаружен рост интенсивности излучения на линиях 149.3 и 174.3 nm после прекращения тока диффузного разряда.

Ключевые слова: плазменные струи, неоднородное электрическое поле, диффузная плазма, атомы азота, ВУФ излучение.

DOI: 10.61011/OS.2025.07.61103.7802-25

Введение

В настоящее время исследования плазменных струй, формирующих холодную неравновесную плазму в смесях различных газов атмосферного давления, привлекают большое внимание благодаря широкому применению таких струй в различных областях науки и технологии [1,2]. Данный способ формирования неравновесной плазмы отличается простотой и низкой стоимостью конструкции. При этом наиболее часто используются плазменные струи на основе различных смесей атомарных и молекулярных газов. Например, плазменные струи, формируемые в смесях аргона с азотом, являются эффективными источниками реактивных частиц, таких как атомы и метастабильные молекулы азота [3], широко используются в медицинских приложениях для ускорения заживление ран, стерилизации медицинских инструментов, дезактивации вирусов и бактерий и т. д. [4–6]. Проводится моделирование параметров воздействия холодной плазмы [7,8]. Однако исследования спектрального состава излучения таких плазменных струй зачастую ограничивались видимой и ультрафиолетовой (УФ) областями спектра [1,9]. В ряде работ показано, что в спектре плазмы различных разрядов в смесях аргона и гелия с азотом или воздухом наблюдаются ВУФ линии атомарного азота [10–12]. При этом подробные исследования параметров данного излучения не проводились.

Цель настоящей работы — исследование ВУФ излучения атомарного азота в струях плазмы и диффузных разрядах, формируемых в смесях азота и воздуха с гелием и аргоном.

Экспериментальная установка и методика измерений

В экспериментах исследовались спектральные характеристики нескольких типов самостоятельных разрядов. Для получения плазменных струй использовались барьерный разряд или разряд между двумя тонкими металлическими электродами с продувкой смесей азота или воздуха с инертными газами через область разряда. Конструкция данных устройств представлена на рис. 1. Барьерный разряд формировался внутри кварцевой полости, на внешней поверхности которой располагались плоские электроды из фольги (трубка 1). Внутренний диаметр трубки на выходе струи плазмы был равен 4 mm. В другой конфигурации разряд зажигался внутри кварцевой трубки с внутренним диаметром 9 mm между двумя вольфрамовыми проволочками диаметром 0.3 mm, установленными на расстоянии 5 mm друг от друга (трубка 2). Для зажигания разрядов использовался генератор импульсов напряжения с амплитудой до 15 kV, длительностью на полувысоте 100 ns, работающий с частотой до 50 kHz.

Дополнительно проведены исследования спектров излучения диффузного разряда между двумя иглами с зазором 4 mm между ними. Для формирования разряда применялись различные генераторы высоковольтных импульсов наносекундной длительности [13]. Схема экспериментальной установки для исследования параметров плазмы диффузного разряда подробно описана в [14]. Разрядный промежуток из двух игл помещался в газовой

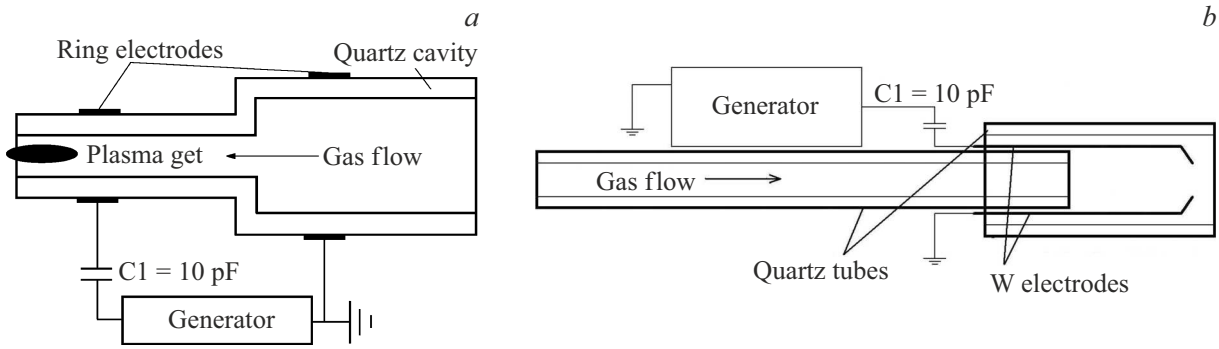

Рис. 1. Схемы получения плазменных струй на основе (a) барьерного, трубка 1, и (b) искрового, трубка 2, разрядов.

камере и подключался к генератору наносекундных высоковольтных импульсов с регулируемой амплитудой через кабель длиной 3 m с сопротивлением 75 Ω. При этом на промежуток подавалась серия из прямого и отраженных от промежутка и генератора импульсов с интервалом 30 ns между ними. В ряде экспериментов одна из игл заземлялась через нагрузку в 75 Ω. В этом случае на промежуток подавался только один или два импульса напряжения.

Камера крепилась к входному окну из LiF вакуумного монохроматора BM-502 (Acton Research Corp.), оснащенному фотоумножителем EMI9781B (ФЭУ), который регистрировал как спектральное распределение энергии излучения плазмы разряда в области 100–545 nm, так и ход интенсивности излучения на различных длинах волн. Минимальное время нарастания импульса излучения, надежно регистрируемое ФЭУ, составляет ~ 3 ns, время спада ~ 30 ns. Монохроматор откачивали безмасляным насосом НОРД-100 до остаточного давления 10^{-6} Torr. Для запуска высоковольтного генератора использовался генератор задающих импульсов BNC565. В экспериментах использовались высоковольтные генераторы со следующими параметрами: ГИН 50-1 с амплитудой в падающей волне до +25 kV, длительностью на полувысоте $t_{1/2} = 13$ ns, фронтом $t_ф = 2$ ns; ГИН 55-01 с амплитудой до −37 kV, $t_{1/2} = 0.7$ ns, $t_ф = 0.7$ ns; ГИН 100-1 с амплитудой до −25 kV, $t_{1/2} = 4$ ns, $t_ф = 1$ ns; FPG с амплитудой до +13 kV, $t_{1/2} = 1$ ns, $t_ф = 0.1$ ns.

Для регистрации спектров плазменные струи направлялись на входное окно газовой камеры, изготовленное из CaF_2 или MgF_2, камера при этом откачивалась до остаточного давления 10^{-3} Torr или заполнялась инертным газом. Мощность ВУФ излучения определялась измерителем Hamamatsu C8026 Series с сенсором H8025-126/146 (область чувствительности по уровню 0.1 140–185 nm, максимум чувствительности на 175 nm).

Кроме того, спектры и формы импульсов излучения в видимом и УФ диапазонах регистрировались с помощью спектрометра EPP2000C-25 (StellarNet Inc.) с известной спектральной чувствительностью и вакуумного коаксиального фотодиода ФЭК-22 с временным разрешением < 1 nsΩ. Импульсы напряжения на входе в разрядную камеру регистрировались емкостным делителем напряжения. Формы электрических сигналов записывались цифровыми осциллографами Tektronix TDS-3054B (500 MHz, 5 Gs s^{-1}).

Результаты экспериментов и обсуждение

На рис. 2 приведены характерные осциллограммы напряжения на электродах барьерного разряда, тока в цепи генератора и фотография плазменной струи. Напряжение на электродах нарастало за время около 100 ns, после пробоя промежутка в цепи накачки в течение 5–6 μs продолжались колебания тока и напряжения. Разряд имел эллипсоидальную форму, вытягиваясь по потоку газа.

В первых экспериментах было обнаружено существенное изменение спектра плазменной струи в зависимости от расстояния от среза кварцевой трубки до входного окна камеры (рис. 3). При расстоянии от окна не более 1–2 mm в спектре излучения наблюдается ВУФ континуум, состоящий из большого числа линий, который можно отнести к переходам полосы Лаймана-Бирджа-Хопфильда ($a^1\Pi_g - X^1\Sigma_g^+$) молекулярного азота [15]. Данная полоса обычно появляется в излучении разрядной или пучковой плазмы в азоте и воздухе при давлениях газа менее 10^{-4} Torr [16,17]. В УФ и видимой областях наиболее интенсивными были переходы молекул NO, полосы второй положительной и первой отрицательной систем N_2, максимумы интенсивности на 314, 337, 357 и 392 nm, а также переходы атомов аргона в области 410–550 nm [9,18]. Излучение второго континуума аргона с максимумом интенсивности около 126 nm не наблюдалось.

При использовании окна из CaF_2 в спектре наблюдалась полоса люминесценции фторида кальция в области 205–250 nm, которая, по-видимому, возникает под воздействием ВУФ излучения плазменной струи. При этом синяя граница данного излучения сдвинута примерно на 20 nm, а сама полоса люминесценции значительно уже

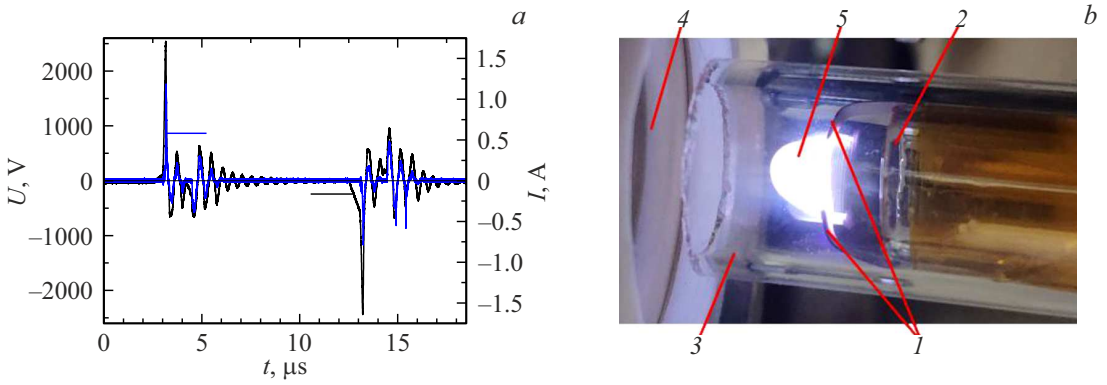

Рис. 2. (*a*) Осциллограммы импульсов напряжения на электродах и тока в цепи накачки, амплитуда импульсов генератора 6 kV, поток аргона 20 l/min, трубка 1. (*b*) Внешний вид разряда в трубке 2: *1* — вольфрамовые электроды, *2* — внутренняя трубка, *3* — внешняя трубка, *4* — окно из MgF_2, *5* — плазменная струя.

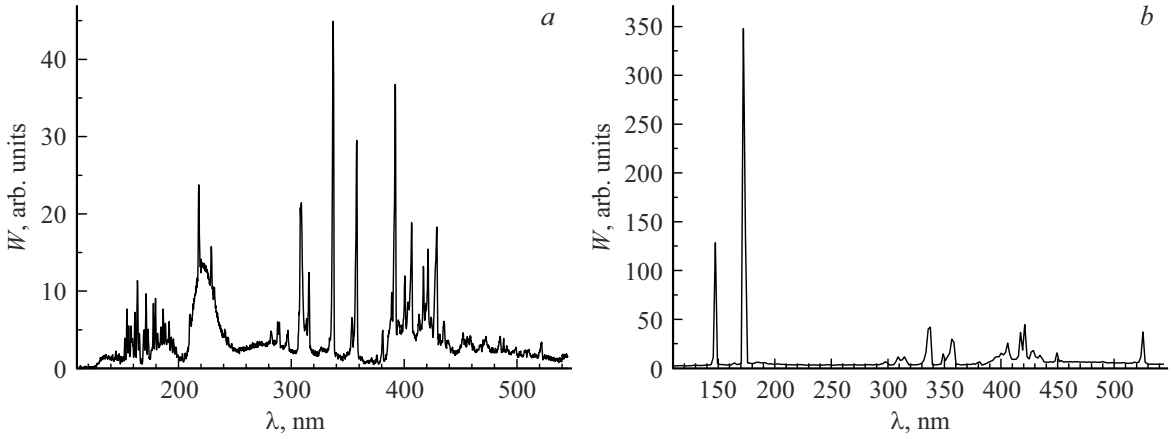

Рис. 3. Спектры излучения струи плазмы аргона при положении выходного среза трубки в 1 (*a*) и 7 mm (*b*) от входного окна камеры. Трубка 1, поток аргона 20 l/min. Входное окно в камере из MgF_2.

по сравнению с полосой люминесценции данного материала, полученной при возбуждении субнаносекундным пучком электронов с энергией электронов > 50 keV и плотностью тока до $j_b \approx 75$ A/cm^2 [19]. В полученном спектре также следует выделить полосу люминесценции CaF_2. В дальнейших экспериментах использовалось окно из MgF_2, которое не вносило изменений в спектр излучения плазмы разряда.

При удалении среза трубки от окна из MgF_2 в спектре разряда появлялись две ВУФ линии, интенсивность которых в зависимости от расстояния до окна могла превышать интенсивность полос второй положительной системы азота в 5–10 раз! Данные линии соответствуют переходам $3s^2P-2p^2P^\circ$ и $3s^2P-2p^2D^\circ$ атомарного азота на 174.3 и 149.3 nm соответственно [20]. Очевидно, что появление данных линий связано с взаимодействием компонентов плазмы с молекулами азота при прохождении струи через воздух.

На рис. 4 показаны зависимости интенсивностей линий атомарного азота из разряда в струе чистого аргона от расстояния среза трубки 2 до окна камеры. Максимальная мощность излучения была получена при удалении конца трубки на 1–2 cm, затем интенсивность ВУФ

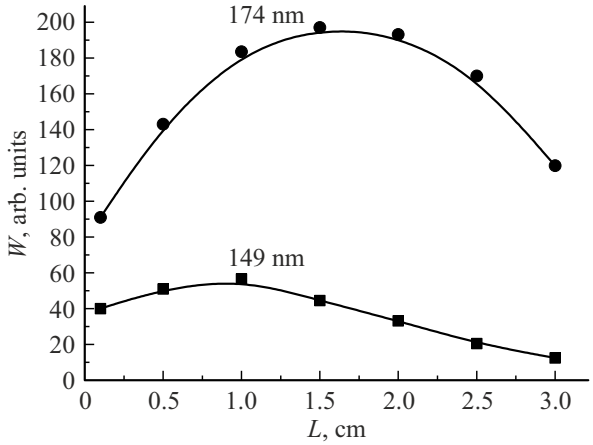

Рис. 4. Интенсивности линий атомарного азота из разряда в струе аргона при различных расстояниях среза трубки от окна MgF_2. Трубка 2, поток аргона 10 l/min.

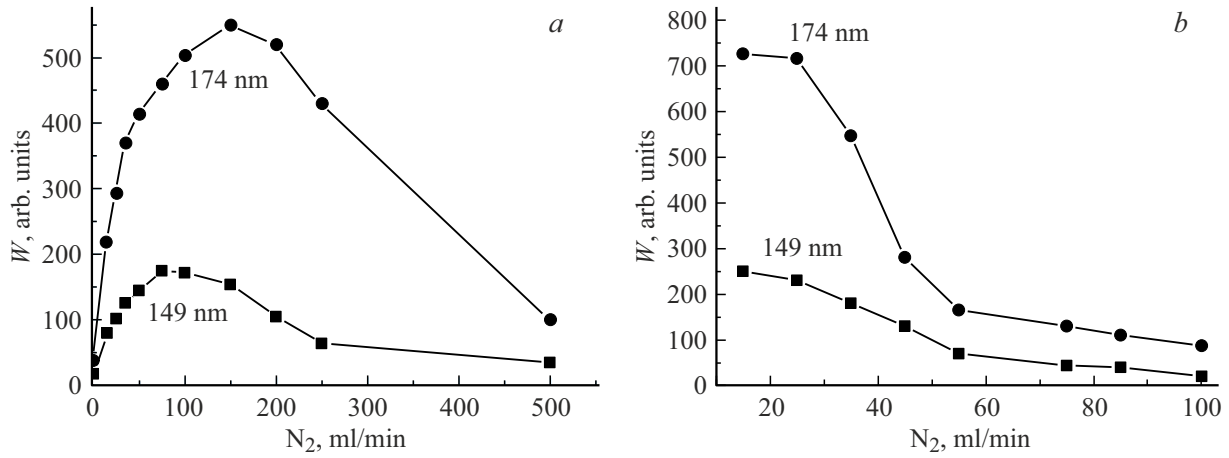

Рис. 5. Зависимости интенсивности излучения на ВУФ линиях азота от расхода азота в потоке газа. Расход аргона (*a*) и гелия (*b*) 5 l/min. Трубка 2. Содержание азота в смеси 0–10% (*a*) и 0.2–2% (*b*).

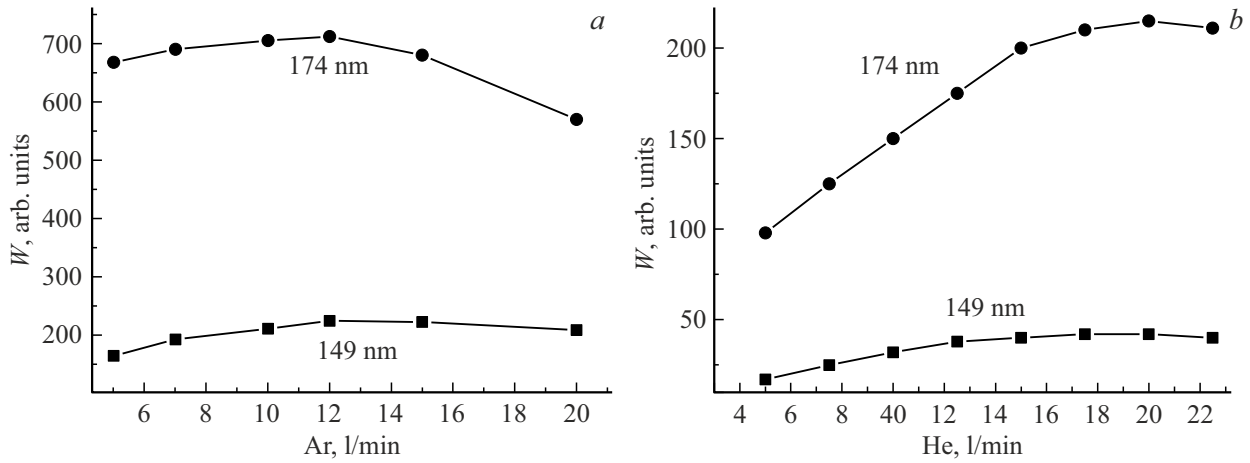

Рис. 6. Зависимости интенсивности излучения на ВУФ линиях азота от расхода аргона (*a*) и гелия (*b*) в потоке газа. Расход азота 0.1 l/min. Трубка 2. Содержание азота в смеси 2–0.5% (*a*) и 2–0.43% (*b*).

излучения начинала падать из-за поглощения содержащимся в воздухе кислородом. При этом ВУФ излучение на линиях 149 и 174 nm наблюдалось и при минимальном расстоянии среза трубки от окна камеры. Это было обусловлено подсосом воздуха в область разряда через зазор между кварцевыми трубками. Подобный результат был получен в [10] при добавлении 0.1% воздуха в плазменную струю, формируемую в аргоне. Увеличение поступления воздуха приводило к потере стабильности горения разряда, промежуток мог не пробиваться в течение нескольких импульсов от генератора, что приводило к снижению интенсивностей ВУФ линий. При герметизации зазора между трубками ВУФ излучение атомарного азота при малых расстояниях среза трубки от окна не фиксировалось. Поэтому в дальнейшем исследовались спектры разрядов, которые зажигались в потоках смесей различных инертных газов с азотом с регулируемым соотношением расходов компонентов смесей. Полученные результаты приведены на рис. 5, 6.

Составы газовых смесей с аргоном и гелием для получения максимальной мощности ВУФ излучения заметно отличались. Максимум интенсивностей для аргона получен при расходе азота 0.1–0.15 l/min, тогда как для гелия оптимальный расход азота не превышал 10-20 ml/min. Оптимальный расход аргона и гелия составил 12 и 20 l/min соответственно. При добавлении воздуха в поток аргона или гелия интенсивность азотных линий падала в 3–4 раза уже при расходе воздуха 0.05 l/min, а при расходе 0.2 l/min излучение ВУФ линий в спектре струи плазмы не фиксировалось.

Максимальная мощность ВУФ излучения на линиях азота в оптимальных газовых смесях возрастала при увеличении амплитуды импульсов напряжения, и для трубки 1 достигала 2.8 mW/cm^2. В случае трубки 2 излучаемая мощность возрастала примерно в 2.5 раза и достигала 6.8 mW/cm^2, что сравнимо с мощностью излучения барьерных эксиламп на димерах ксенона, излучающих на 172 nm [21]. Данная мощность ВУФ

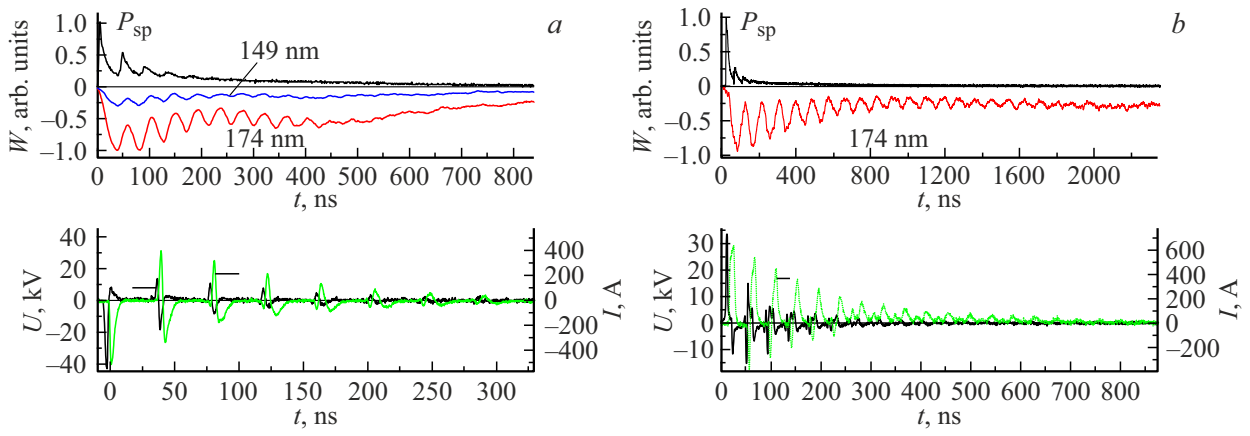

Рис. 7. Осциллограммы импульсов излучения диффузного разряда в видимой и УФ областях (P_{sp}) на длинах волн 149 и 174 nm, а также осциллограммы сигнала с емкостного делителя (U) и тока разряда (I). Диффузный разряд формируется (a) в потоке смеси Ar:N_2 со скоростями 5 l/min:22 ml/min (содержание азота в смеси 0.44%), генератор ГИН-100-5, 30 kV и (b) в смеси He:N_2 при давлениях 2 atm:3 Torr (He:N_2=99.8:0.2%), генератор ГИН-50-1, 25 kV.

излучения в плазменной струе заметно не меняется при замене особо чистых газов на технические с чистотой 99.99% и не требует использования дорогих инертных газов и кварцевых трубок с высоким коэффициентом пропускания ВУФ излучения. Мощность излучения на линиях азота может быть увеличена при повышении амплитуды импульсов напряжения и частоты их следования, тогда как параметры излучения ламп на димерах ксенона в [21] близки к предельным.

Невысокая импульсная мощность накачки в данных конфигурациях разряда не давала возможность получить временные зависимости мощности излучения на линиях атомарного азота. Поэтому для измерения импульсов излучения на 149 и 174 nm был использован диффузный разряд, формируемый генераторами мощных ns-импульсов. На рис. 7 представлены вольт-амперные и излучательные параметры диффузных разрядов в смесях азота с аргоном и гелием.

Из рис. 7 видно, что диффузный разряд формируется при падении на промежуток первого импульса от генератора как положительной, так и отрицательной полярностей. Затем энергия вкладывается в плазму разряда цугом отраженных импульсов в течение нескольких сотен наносекунд. Однако после прекращения накачки наблюдается повторный рост интенсивности излучения на 149 и 174 nm. Это означает, что в релаксирующей плазме существует канал передачи энергии на верхний уровень данных ВУФ переходов. Спектры излучения в данных условиях были аналогичны приведенным на рис. 3, *b*. Интенсивность ВУФ линий существенно превышала интенсивность излучения второй положительной системы азота, что не характерно для диффузного разряда в смесях с N_2 [12], и заметно возрастала при увеличении амплитуды импульсов напряжения от генераторов.

Подобное поведение параметров разряда наблюдается и при его формировании однократным импульсом (рис. 8, *a*). Здесь также видно увеличение интенсивности ВУФ излучения после окончания импульса возбуждения. Однако в данных условиях эксперимента интенсивность излучения атомарного азота падает более чем на порядок по сравнению с излучением плазменных струй и диффузных разрядов с возбуждением серией импульсов (рис. 8, *b*). Причину этого можно понять из интегральных фотографий диффузного разряда, приведенных на рис. 9. При подаче на промежуток однократного импульса длительностью 1 ns диффузный разряд подобно работам [22,23] формируется в виде голубого стримера шириной около 2 mm. При увеличении длительности импульса накачки диффузный разряд переходит в канальную стадию, его ширина падает примерно в 3 раза. Вокруг канала наблюдается розовый ореол, обусловленный излучением первой положительной системы азота из расширяющегося канала, которое продолжается в течение нескольких десятков микросекунд после окончания тока разряда. Из полученных данных следует, что для получения эффективного излучения на ВУФ линиях азота необходимо увеличивать плотность тока разряда, что приводит к увеличению скорости диссоциации молекул азота электронным ударом и росту концентрации атомов азота в плазме разряда. Увеличение мощности ВУФ излучения в разряде между проволочками также можно связать с большей плотностью тока в трубке 2 по сравнению с плотностью тока в трубке 1.

Пики на импульсах спонтанного излучения в УФ и видимой областях спектра на рис. 7 и 8 повторяют пики импульсов накачки. Импульсы на линиях 147 и 174 nm начинались через несколько наносекунд после пробоя промежутка, их интенсивность достигала максимума в течение примерно 30–40 ns, после чего начинались колебания интенсивностей ВУФ излучения с периодом, близким к периоду импульсов тока разряда. Пики импульсов излучения и тока не совпадали из-за затягивания фронтов оптических сигналов ФЭУ

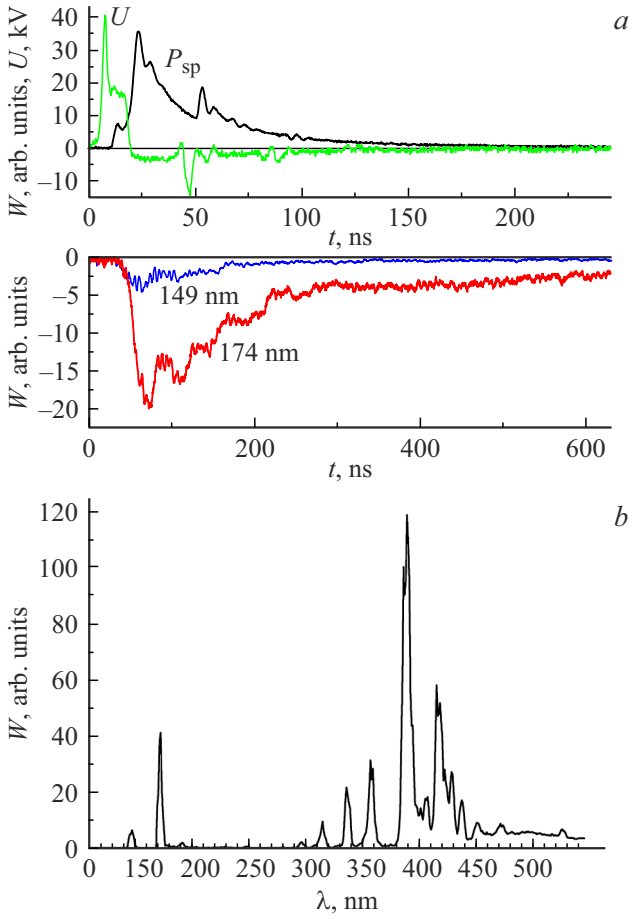

Рис. 8. (*a*) Осциллограммы импульсов излучения диффузного разряда в видимой и УФ областях (P_{sp}) и на линиях 149 и 174 nm, а также осциллограммы сигнала с емкостного делителя (*U*), (*b*) спектр разряда. Диффузный разряд формируется в смеси He:N_2 при давлениях 2 atm:3 Torr (He:N_2=99.8:0.2%). Генератор ГИН-50-1, 25 kV, подключена нагрузка 75 Ω.

монохроматора. Анализ спектра излучения диффузного разряда в случае его формирования однократным импульсом от генератора ГИН 55-01 показал следующее. В течение первых наносекунд после пробоя промежутка появляются импульсы излучения иона азота на 391 nm и молекулы азота на 337 nm. Данные импульсы достигают максимума через 10 и 15 ns соответственно и еще через $\sim$ 50 ns прекращаются. Импульсы ВУФ излучения запаздывают на несколько наносекунд, их передний фронт составляет $\sim$ 35 ns, после чего начинается плавный спад их интенсивности. Известно, что верхний уровень перехода на 337 nm заселяется прямым электронным ударом [24]. Отличие УФ и ВУФ импульсов говорит о том, что в заселении уровня ^2P атомарного азота прямой электронный удар не является основным каналом.

Для определения каналов заселения верхнего уровня ВУФ переходов атомарного азота необходимы дополнительные эксперименты и модельных расчеты. Например, в смесях с аргоном возможными каналами заселения уровня ^2P атомарного азота может быть столкновительная передача энергии от долгоживущих метастабильных уровней аргона Ar*, каскадный переход с долгоживущего ($>$ 100 ns) уровня ^2S атомарного азота с энергией возбуждения 11.6 eV, который может эффективно заселяться в столкновениях с метастабильными состояниями аргона Ar* ($^3P_0$) (11.72 eV), с излучением фотона на 1345.6 nm, или релаксация уровня ^2S в состояние ^2P в столкновениях с атомами Ar [25–27].

В случае смесей с гелием данный механизм заселения уровня ^2P не будет работать. Эксперименты, проведенные в [3,12], показали, что на стадии спада напряжения при высокой напряженности электрического поля на промежутке сначала появляется излучение второй положительной системы азота, интенсивность которого заметно выше интенсивности ВУФ линий. После спада напряжения и росте тока в промежутке, приводящем к контракции разряда, с задержкой в несколько наносекунд появляются ВУФ линии, а их интенсивность уже заметно превышает интенсивность 2^+-системы. Это значит, что в начальной стадии разряда преобладают процессы прямой ионизации молекул азота. В данных

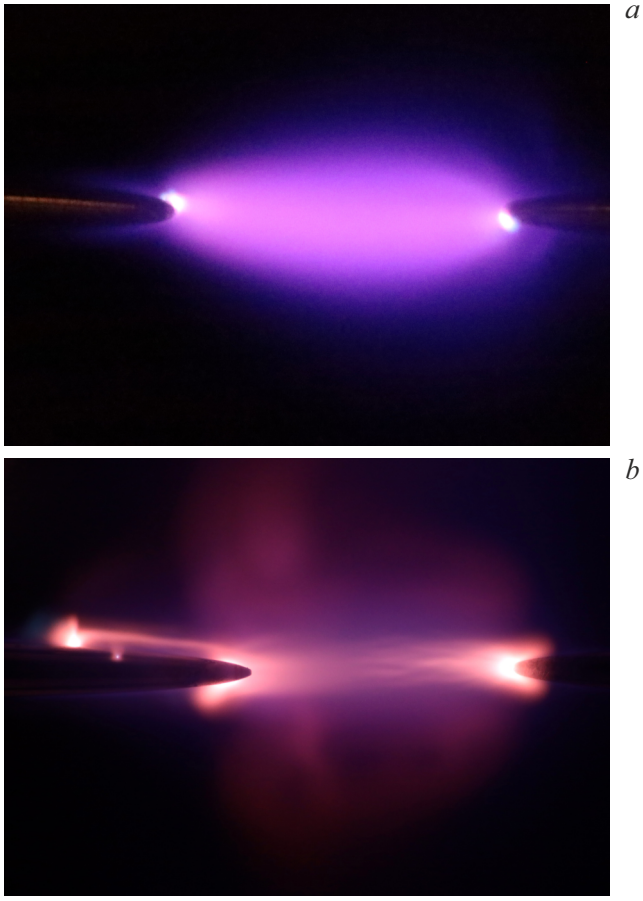

Рис. 9. Интегральные фотографии диффузного разряда в смеси He:N_2 при давлениях 1 atm:3 Torr (He:N_2=99.6:0.4%). На промежуток подается однократный импульс (*a*) или серия импульсов (*b*). Генераторы FPG-10 (*a*) и ГИН 50-1 (*b*).

работах предполагается, что основным механизмом формирования возбужденного атомарного азота может быть двухступенчатый процесс. При формировании разряда происходит диссоциация молекул азота прямым электронным ударом, затем в условиях большой плотности тока атомы азота в состоянии $N(^2P)$ возникают в столкновениях электронов с атомами азота в основном состоянии $N(^2D^\circ)$ и состоянии $N(^2P^\circ)$ [3,12]. Как отмечалось выше, в наших экспериментах интенсивность ВУФ линий также возрастала при увеличении плотности тока разряда. Другие кинетические процессы в газоразрядной плазме, приводящие к диссоциации молекул азота, подробно рассмотрены в [28].

В экспериментах [29] ВУФ линии появлялись с задержкой после замыкания промежутка стримером. При этом заселение верхних уровней ВУФ переходов связывалось с диссоциативной рекомбинацией молекулярного иона азота в основном состоянии в следующем процессе:

$$e + N_2^+(X^2\Sigma_g^+) \rightarrow N(^2P) + N(^4S^\circ).$$

После прекращения тока разряда основным каналом заселения уровня $N(^2P)$ может являться столкновение колебательно возбужденных молекул азота в метастабильном состоянии $N_2(A^3\Sigma_u^+, \nu)$ с атомами азота в состояниях $N(^2P^\circ)$ и $^2D^\circ$ [30], которые тоже являются метастабильными с временами жизни 11 и 49000 s соответственно [31].

Отметим, что в [32] сообщается о возможности получения усиления на линиях атомарного азота. Для проверки возможности получения генерации на линиях 149.3 и 174.3 nm планируются измерения ВУФ излучения протяженного диффузного разряда с использованием экспериментальной установки с протяженными лезвийными электродами [14].

Выводы

Показано, что плазменные струи и диффузные разряды, формируемые в промежутках с неоднородным электрическим полем наносекундными импульсами высокого напряжения за счет убегающих электронов в смесях аргона, гелия и азота, являются источниками интенсивного ВУФ излучения атомарного азота на длинах волн 149 и 174 nm. Проведена оптимизация состава смесей и условий генерирования плазменных струй для получения максимальной мощности излучения на линиях атомарного азота. Получена средняя мощность излучения до 6.8 mW/cm^2.

Измерены вольт-амперные и излучательные характеристики диффузных разрядов в смесях $He(Ar)-N_2$. Обнаружено, что интенсивность излучения на длинах волн 149 и 174 nm возрастает после прекращения тока диффузного разряда. Высказано предположение о возможности получения стимулированного излучения на линиях атомарного азота.

Показано, что для повышения интенсивности излучения на ВУФ линиях атомов азота необходимо увеличивать плотность тока разряда.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект № FWRM-2021-0014.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] A. Barkhordari, A. Ganjovi, I. Mirzaei, A. Falahat, M.N. Rostami Ravari. J. Theor. Appl. Phys., **11** (4), 301 (2018). DOI: 10.1007/s40094-017-0271-y

[2] Tao Shao, Ruixue Wang, Cheng Zhang, Ping Yan. High Voltage, **3** (1), 14 (2018). DOI: 10.1049/hve.2016.0014

[3] V. Ferrer, J.-P. Gardou, F. Marchal, A. Ricard, J.-P. Sarrette. Eur. Phys. J. D, **76** (10), 191 (2022). DOI: 10.1140/epjd/s10053-022-00512-5

[4] I. Schweigert, D. Zakrevsky, P. Gugin, E. Yelak, E. Golubitskaya, O. Troitskaya, O. Koval. Appl. Sci., **9** (21), 4528 (2019). DOI: 10.3390/app9214528

[5] Susumu Suzuki, Kenji Teranishi, Haruo Itoh. Electric. Engineer. Japan, **217** (1), e23457 (2024). DOI: 10.1002/eej.23457

[6] R. Kawakami, Y. Yoshitani, K. Mitani, M. Niibe, Y. Nakano, C. Azuma, T. Mukai. Appl. Surf. Sci., **509**, 144910 (2020). DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.144910

[7] N.Y. Babaeva, G.V. Naidis, V.A. Panov, R. Wang, Y. Zhao, T. Shao. Phys. Plasmas, **25** (6), 063507 (2018). DOI: 10.1063/1.5024778

[8] P. Viegas, E. Slikboer, Z. Bonaventura, O. Guaitella, A. Sobota, A. Bourdon. Plasma Sourc. Sci. Technol., **31** (5), 053001 (2022). DOI: 10.1088/1361-6595/ac61a9

[9] M.C. García, M. Varo, P. Martínez. Plasma Chem. Plasma Process., **30** (2), 241 (2010). DOI: 10.1007/s11090-010-9215-x

[10] R. Brandenburg, H. Lange, T. von Woedtke, M. Stieber, E. Kindel, J. Ehlbeck, K.-D. Weltmann. IEEE Trans. Plasma Sci., **37** (6), 877 (2009). DOI: 10.1109/TPS.2009.2019657

[11] Y. Kashiwagi, H. Ito, K. Noguchi, K. Teranishi, S. Suzuki, H. Itoh. IEEJ Trans. Fund. Mater., **127** (9), 537 (2007). DOI: 10.1541/ieejfms.127.537

[12] A. Fierro, G. Laity, A. Neuber. J. Phys. D, **45** (45), 495202 (2012). DOI: 10.1088/0022-3727/45/49/495202

[13] V.M. Efanov, M.V. Efanov, A.V. Komashko, A.V. Kirilenko, P.M. Yarin, S.V. Zazoulin. In: *2010 Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9*, part 5, p. 301–306 (Springer-Verlag, N.Y., 2010). DOI: 10.1007/978-0-387-77845-7

[14] A.N. Panchenko, V.F. Tarasenko, V.V. Kozhevnikov. Appl. Phys. B, **129** (11), 178 (2023). DOI: 10.1007/s00340-023-08125-5

[15] A. Lofthus, P.H. Krupenie. J. Phys. Chem. Ref. Data, **6** (1), 113 (1977). DOI: 10.1063/1.555546

[16] U. Fantz, S. Briefi, D. Rauner, D. Wünderlich. Plasma Sourc. Sci. Technol., **25** (4), 045006 (2016). DOI: 10.1088/0963-0252/25/4/045006

[17] J.M. Ajello, J.S. Evans, V. Veibell, Ch.P. Malone, G.M. Holsclaw, A.C. Hoskins, R.A. Lee, W.E. McClintock, S. Aryal1, R.W. Eastes, N. Schneider. J. Geophys. Res.: Space Physics, **125** (3), e2019JA027546 (2020). DOI: 10.1029/2019JA027546
[18] S. Sintsov, K. Tabata, D. Mansfeld, A. Vodopyanov, Ki. Komurasaki. J. Phys. D., **53** (30), 305203 (2020). DOI: 10.1088/1361-6463/ab8999
[19] D.A. Sorokin, A.G. Burachenko, D.V. Beloplotov, V.F. Tarasenko, E.Kh. Baksht, E.I. Lipatov, M.I. Lomaev. J. Appl. Phys., **122** (15), 154902 (2017). DOI: 10.1063/1.4996965
[20] D.A. Dahlberg, D.K. Anderson, I. E. Dayton. Phys. Rev., **64** (1), 20 (1967). DOI: 10.1103/PhysRev.164.20
[21] M.I. Lomaev, V.S. Skakun, V.F. Tarasenko, D.V. Shitts. J. Opt. Technol., **79** (8), 498 (2012). DOI: 10.1364/JOT.79.000498
[22] Д.В. Белоплотов, Д.А. Сорокин, М.И. Ломаев, В.Ф. Тарасенко. Письма в ЖЭТФ, **106** (9–10), 627 (2017). DOI: 10.7868/S0370274X17220064 [D.V. Beloplotov, V.F. Tarasenko, D.A. Sorokin, M.I. Lomaev. JETP Lett., **106** (10), 653 (2017). DOI: 10.1134/S0021364017220064].
[23] N.Yu. Babaeva, G.V. Naidis, D.V. Tereshonok, V.F. Tarasenko, D.V. Beloplotov, D.A. Sorokin. J. Phys. D, **56** (3), 035205 (2023). DOI: 10.1088/1361-6463/aca776
[24] A.W. Ali, A.C. Kolb, A.D. Anderson. Appl. Opt., **6** (12), 2115 (1967). DOI: 10.1364/AO.6.002115
[25] N. Masoud, K. Martus, K. Becker. J. Phys. D, **38** (11), 1674 (2005). DOI: 10.1088/0022-3727/38/11/006
[26] C. Foissac, J. Krištof, A. Annušová, V. Martišovitš, P. Veis, P. Supiot. Plasma Sourc. Sci. Technol., **19** (5), 055006 (2010). DOI: 10.1088/0963-0252/19/5/055006
[27] Hironobu Umemoto, Naoki Terada, Kunikazu Tanaka, Shigeki Oguro. Phys. Chem. Chem. Phys., **2** (15), 3425 (2000). DOI: 10.1039/B003280H
[28] A.V. Volynets, D.V. Lopaev, T.V. Rakhimova, A.A. Chukalovsky, Yu.A. Mankelevich, N.A. Popov, A.I. Zotovich, A.T. Rakhimov. J. Phys. D, **51** (36), 364002 (2018). DOI: 10.1088/1361-6463/aad1ca
[29] N. Sewraj, N. Merbahi, J.P. Gardou, P. Rodriguez Akerreta, F. Marchal. J. Phys. D, **44** (14), 145201 (2011). DOI: 10.1088/0022-3727/44/14/145201
[30] A. Rahman, A.P. Yalin, V. Surla, O. Stan, K. Hoshimiya, Z. Yu, E. Littlefield, G.J. Collins. Plasma Sourc. Sci. Technol., **13** (3), 537 (2004). DOI: 10.1088/0963-0252/13/3/021
[31] A. Owens, T. He, M. Hanicinec, C. Hill, S. Mohr, J. Tennyson. Plasma Sourc. Sci. Technol., **32** (8), 085015 (2023). DOI: 10.1088/1361-6595/aceeb0
[32] G.N. Gerasimov, E. Krylov, D.I. Stasel'ko, I.V. Alekseev. J. Opt. Technol., **79** (8), 462 (2012). DOI: 10.1364/jot.79.000462 10.1364/jot.79.000462